

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

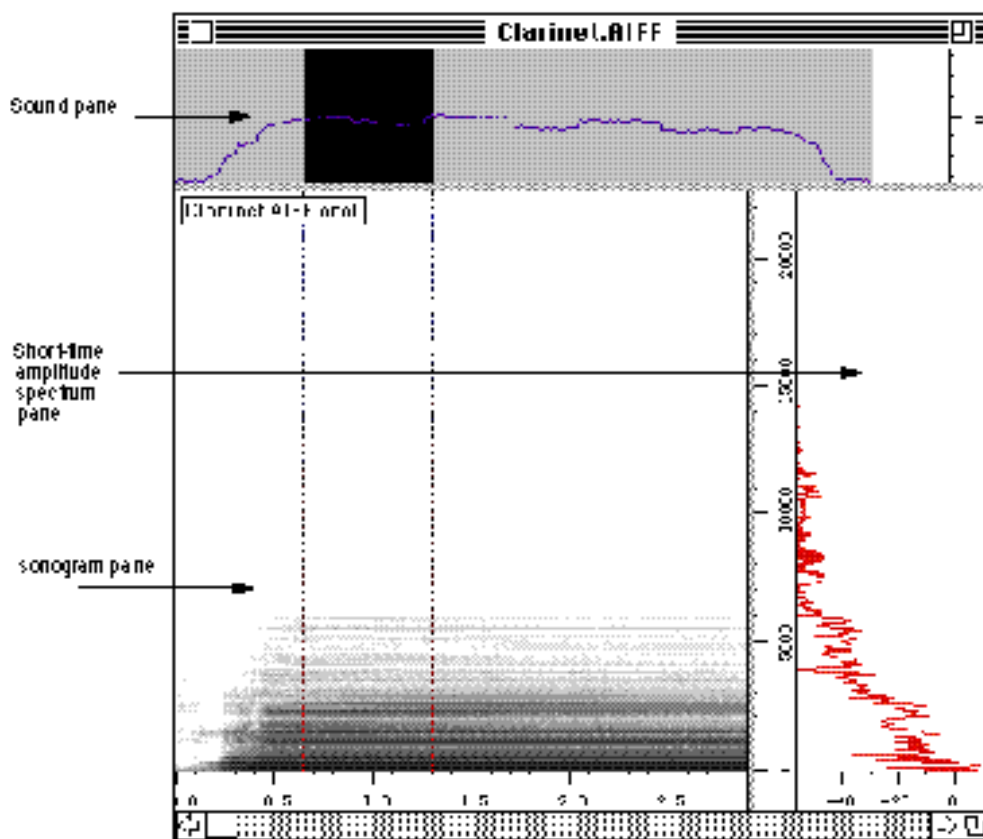
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΧΩΝ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΓΕΩΡΓΑΚΗ



ΑΘΗΝΑ , 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΧΟΥ	5
1.1. Κατηγορίες ήχων	6
1.2. Τα χαρακτηριστικά μιας κυματομορφής	7
1.3. Ακουστική αλυσίδα	8
2. ΤΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	10
2.1. Η θεμελιώδης συχνότητα	10
2.2.1. Ηχοστάθμη (L _I) και έννοια του Decibel	12
2.3. Ένταση και χρόνος	13
2.4. Φάσμα συχνοτήτων	16
2.4.1. Θεώρημα Fourier	16
2.4.2. Δομή του φάσματος	16
2.4.3. Long time average spectra:	18
2.4.4. Τύποι κυματομορφών και φάσματα αυτών	18
2.5. Αναπαράσταση του ήχου	21
2. 6. Φυσικοί παράμετροι	23
3. ΘΕΜΑΤΑ ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ	24
3.1. Η Θεωρία των κρίσιμων ζωνών	24
3.2. Αντίληψη της έντασης	26
3.2.1. Ακουστότητα (Loudness)	27
Μονάδα μέτρησης στάθμης ακουστότητας και ισοακουστικές καμπύλες Fletcher-Munson	27
3.1.2. Μονάδα μέτρησης ακουστότητας και κλίμακα των sones	28
3.2. Ακουστότητα σύνθετων τόνων	29
3.3. Το φαινόμενο της μάσκας η απόκρυψης	30
3.3. Αντίληψη του τονικού ύψους	31
3. 1. 1 . Ορισμός του ύψους	31
3. 1. 2. Αίσθηση του ύψους και διάρκεια	31
Φαινόμενα που σχετίζονται με την αντίληψη ελάχιστης διάρκειας του ήχου	32
3.1.3. Αντίληψη του ύψους και ένταση	32
3.1.4. Ψυχοφυσική κλίμακα των mels	33
3.1.5. Ο «μύθος» του απόλυτου αυτιού (Absolute Pitch)	34
3.1.6. Τονικός χαρακτήρας	34
3.1.7. Αίσθηση του ύψους και ηχώχρωμα	35
3.1.8. Θεωρίες για την αντίληψη του ύψους-	35
3. 2. Σχετικό ύψος: Διαστήματα	36
3 .2.1. Τα διαστήματα και η αρχή της απόστασης	36
Μονάδες διαστημάτων	37
3.2.2. Σχετική αντίληψη διάκρισης του ύψους	37
3.4. Συνήχηση τόνων : Συμφωνία και Διαφωνία	38
3.4.1. Αντίληψη συνήχησης (συμφωνία και διαφωνία)	38
3.4.2. Θεωρίες συνήχησης φθόγγων	39
3.4.3. Θεωρία Plomp-Levelt η θεωρία της κρίσιμης ζώνης (1965)	39
Για απλούς ήχους:	39
Για σύνθετους ήχους (Θεωρία Plomp-Levelt)	40
3.4.4. Βαθμοί διαφωνίας και συμφωνίας	42
Κανόνες διαφωνίας -συμφωνίας	43

3.4.5. Συνδυασμός τόνων η προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης.....	43
3.5. Αντίληψη του ηχοχρώματος	44
3.5.1. Ηχόχρωμα η χροιά	44
α) Ο αριθμός των παραγώγων συχνοτήτων	44
β) Η αρμονική και μη αρμονική σχέση των παραγώγων με την θεμελιώδη:	44
γ). Σχετική ένταση των αρμονικών.....	45
δ) Οι σχετικές φάσεις των αρμονικών	45
ε) Η κατανομή των αρμονικών στο φάσμα.....	45
στ). Η ένταση διέγερσης επηρεάζει την χροιά του ήχου.	46
ζ) Χρονική μεταβολή και εξέλιξη του αρμονικού του φάσματος.....	46
η) Ισχύς της θεμελιώδους:	46
θ). Κλίμακα ηχοχρωμάτων	46
Υποκειμενικές παράγωγοι	47
Βαθμοί κρίσεως ηχοχρώματος.....	47
3.6. Αντίληψη του ήχου στο χώρο	47
3.6.1. Αμφιωτική ακοή	47
Πλεονεκτήματα της αμφιωτικής έναντι της μονοωτικής ακοής:.....	48
3.6.2. Εντοπισμός της πηγής (sound localisation).....	48
3.6.3. Αντίληψη Στερεοφωνικού ήχου.....	49
3.6.4. Φαινόμενο Haas	50
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	51
4.1. Ψηφιακή αναπαράσταση του ηχητικού σήματος.....	51
4.1.1. Δειγματοληψία και ADC (analog to digital conversion).....	51
Ορισμός-διαδικασία.....	51
4.1.2. Θεώρημα Shannon και συχνότητα Nyquist.....	52
Μετατροπείς.....	53
Ο Δειγματολήπτης (sampler).....	54
4.1.3.Κβάντιση (Quantizing)	54
4.1.4. Η Τεχνική Dither.....	55
4.1.5.Κωδικοποίηση.....	55
4.1.4.Aliasing	55
4.3. Μετατροπή του ψηφιακού ήχου σε αναλογικού (DAC).....	55
4.3.1. Ψηφιακά αρχεία ήχου	55
4.3.3.Τύπου ψηφιακών αρχείων ήχου.....	56
4.3.4.Σημαντικότεροι τύποι αρχείων	56
4.4. Τεχνικές ανάλυσης.....	57
4.4.1. Ιστορικό υπόβαθρο ανάλυσης του τονικού ύψους , ρυθμού και κυματομορφών.....	57
4.4.2. Ανίχνευση του τονικού ύψους	58
Εφαρμογές της ανίχνευσης τονικού ύψους.....	58
4.5.Φασματική ανάλυση	59
4.5.2 Εφαρμογές της φασματικής ανάλυσης	59
4.5.3 Τρόποι παρουσιάσης του φάσματος.....	59
Μεταβαλλόμενος στο χρόνο (time varying spectrum plots).....	60
4.5.3. Ανάλυση κατά Fourier με τον αλγόριθμο FFT	60
4.6. Εντολές για την φασματική ανάλυση	61
4.6.1. Sonogram Ανάλυση	61
4.6.2. Ανάλυση σε “πραγματικό” χρόνο (realtime).....	62
4.6.3. Ανάλυση FFT.....	62
4.6.4. LPC Ανάλυση (Linear prediction coding).....	62
4.6.5.- Εκτίμηση θεμελιώδους	64
4.6.6. Masking Effects	64

5. ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (Sound synthesis)	66
5.1. Σύντομο Ιστορικό : Απο το MUSIC V στη CSOUND.....	66
5.2. Συνοπτικό Σχεδιάγραμμα του Ιστορικού.....	67
Οι διάφορες versions του πρόγραμματος σύνθεσης MUSIC	68
5.3. Οι Τεχνικές σύνθεσης του ήχου.....	69
5.3.1. Προσθετική σύνθεση	69
Πλεονεκτήματα.....	70
Μειονεκτήματα:.....	70
5.3.2. Αφαιρετική Σύνθεση.....	71
Πηγή.....	71
Φίλτρα.....	71
Πλεονεκτήματα:.....	71
Μειονέκτημα.....	71
5.3.3. Frequency Modulation Synthesis.....	71
5.3.5. Cross Synthesis (Διασταυρούμενη σύνθεση)	74
5.3.6. Σύνθεση με ηχητικούς κόκκους (Granular Synthesis).....	74
5.4. Περιβάλλοντα ηχητικής σύνθεσης.....	77
5.4.1. Το πρόγραμμα Audiosculpt	77
5.4.2. Περιγραφή του AudioSculpt.....	77
5.4.3. Σύνθεση του ήχου	78
5.5. Η χρήση των ηχητικής σύνθεσης στην ηλεκτρακουστική μουσική	78
5.5. 1. Η ηχητική σύνθεση σαν ένασμα της μουσικής δημιουργίας	80
5.5.2. Εφαρμογή της ηχητικής σύνθεσης στη μουσική δημιουργία (sound synthesis in music composition)	82
6. ΠΕΡΙ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	87
6.1. Επεξεργασία του ηχητικού σήματος στη δυναμική και φασματική περιοχή	87
6.2. Επεξεργασία του ηχητικού σήματος με τεχνικές διαμόρφωσης.....	89
6.3. Επεξεργασία του ηχητ. σήματος στο χρόνο και το χώρο	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95
Intreactive music systems	96
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΑ	97

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια του μαθήματος *Ανάλυση και σύνθεση ήχων* διδάσκονται οι βασικές τεχνικές ηχητικής ανάλυσης και σύνθεσης. Στα δύο πρώτα κεφάλαια αναφερόμαστε στην ανατομία του ήχου από την σκοπιά της Μουσικής Ακουστικής παρουσιάζοντας αναλυτικά τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που πρόκειται να διερευνήσουμε μέσω της ανάλυσης. Στο κεφάλαιο της ψυχοακουστικής εξετάζουμε τον τρόπο πρόσληψης των αντικειμενικών αυτών χαρακτηριστικών καθώς η αντίληψη των ήχων είναι σημαντική για την σύνθεση αυτών. Στο τρίτο μάθημα (ανάλυση ήχων) εξετάζονται οι κύριες τεχνικές ανάλυσης του ηχητικού σήματος και παρουσιάζονται αναλύσεις (κυματομορφές, φάσματα και τρισδιάστατη αναπαρασταση των ηχητικών δειγμάτων) με την βοήθεια ειδικών λογισμικών για την καλύτερη κατανόηση των ηχοχρωμάτων (των οργάνων της ορχήστρας και των παραδοσιακών οργάνων).

Στο κεφάλαιο ηχητική σύνθεση επιχειρείται η ανασύσταση του ήχου μέσα από τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες τεχνικών (τεχνικές διαμόρφωσης, φυσικής μοντελοποίησης, φασματικές τεχνικές και τεχνικές επεξεργασίας του ηχητικού σήματος στο χρόνο). Με την χρήση ειδικών λογισμικών οι φοιτητές καλούνται να δημιουργήσουν την δική του πρωτότυπη ηχοθήκη με ήχους που έχουν αναλύσει και ανασυνθέσει οι ίδιοι σε περιβάλλον PC και Mac.

1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΧΟΥ

Ηχος είναι ένα είδος ακουστικής ενέργειας που εκφράζεται από τις μεταβολές της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα (ή σε άλλα ελαστικά μέσα) και γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί (από 16- 20000 Hz.) Το ηχητικό κύμα εκφράζεται σαν μια συνάρτηση πυκνωμάτων και αραιωμάτων του αέρα.

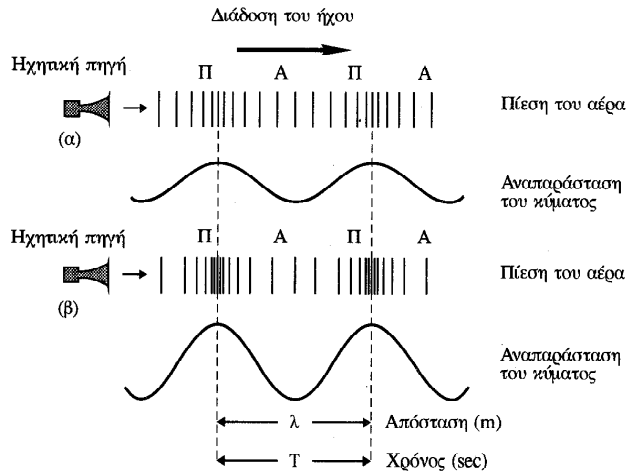
Το ερώτημα της φύσεως του ήχου προκάλεσε έντονες συζητήσεις στα σαλόνια των διανοουμένων της Ευρώπης¹ (διαμάχη μεταξύ φιλοσόφων και Φυσικών). Ακόμη και στις μέρες μας επικρατεί μια σύγχυση στον ορισμό του ήχου μεταξύ της *αιτίας* (εναν φυσικό κραδασμό κάποιου υλικού στοιχείου) και *του αποτελέσματος* (μια φυσιολογική αίσθηση στον εγκέφαλο του ανθρώπου).

Στην ουσία ήχος είναι και τα δύο, διότι ήχος δημιουργείται όταν ένα σώμα κινείται παλινδρομικά με ταχύτητα ανάλογη έτσι ώστε να στείλει ένα κύμα μέσω του υλικού μέσα στο οποίο πάλλεται. Αλλά ο ήχος, σαν αίσθηση πρέπει να γίνει δεκτός από το αυτί και να μεταβιβαστεί στον εγκέφαλο, όπου καταγράφεται σαν ένα γεγονός που συντελείται στον κόσμο που περιβάλλει τον ακροατή.

Οι ήχοι που μας περιβάλλουν μπορεί να ανήκουν χονδρικά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Ηχοι της Φύσης (άνεμος, βροχή, θάλασσα, κτλ..)
- Ηχοι της πανίδος (Πουλιά και ζώα)
- Ηχοι ανθρώπινης προέλευσης και κατασκευής (από τον βιομηχανικό θόρυβο έως και την ανθρώπινη φωνή ή τα μουσικά όργανα).

¹"Αν ένα δένδρο πέσει στο δάσος και δεν βρίσκεται κανείς εκεί για να το ακούσει θα παραχθεί ήχος;" ρωτούσαν οι λόγιοι του 18ου αιώνα. Οι Φυσικοί συμφωνούσαν εκλαμβάνοντας τον ήχο μόνο σαν φυσικό φαινόμενο οι δε φιλόσοφοι διαφωνούσαν υποστηρίζοντας ότι ο ήχος είναι μια αισθητική εμπειρία που συνδέεται με την φυσική και συναισθηματική μας ζωή. Δημιουργήθηκε από Αναστασία Γεωργάκη, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιούνιος 2003



εικ.1.1. Πυκνώματα και αραιώματα του αέρα που αναπαρίστανται από μια κυματομορφή.

Το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ήχους συχνότητας μεταξύ 16 -20000Hz . Οι υπόηχοι<16Hz (σεισμοί) η οι υπέρηχοι>20000Hz (υπερηχογράφημα, νυχτερίδα , δελφίνια-120000Hz) δεν γίνονται αντιληπτοί απο το ανθρώπινο αυτί.

Παρατηρείστε το διάγραμμα (στο παράρτημα των σημειώσεων) με τις συχνότητες εκπομπής και λήψεως συχνοτήτων απο τον άνθρωπο και διάφορα ζώα.

1.1.Κατηγορίες ήχων

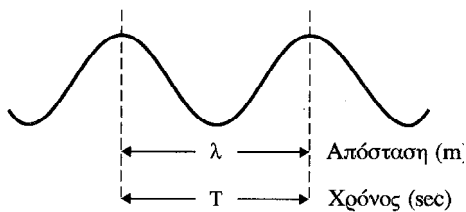
Μπορούμε να χωρίσουμε του ήχους στις εξής βασικές κατηγορίες ανάλογα με το ηχόχρωμα τους : σε απλούς, σύνθετους, θορύβους, κρότους:

Απλοί: Κυματομορφή περιοδική και ημιτονοειδής

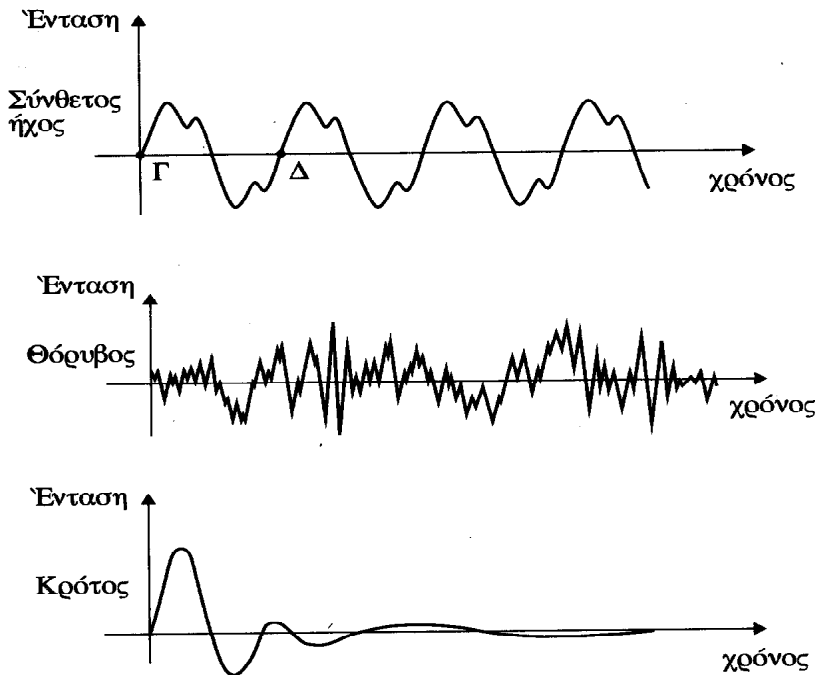
σύνθετοι: Κυματομορφή περιοδική και μη ημιτονοειδής.

θόρυβος : Μη περιοδική κυματομορφή

κρότος . : Απότομοι θόρυβοι μικρής χρονικής διάρκειας.



εικ. 1.2. Απλός ήχος (ημιτονοειδής κυματομορφή)



εικ. 1.3. Κυματομορφές σύνθετου ήχου, θορύβου και κρότου

1.2. Τα χαρακτηριστικά μιας κυματομορφής

Ενας απλός ήχος (ο ήχος του διαπασών) έχει ως κυματομορφή μια ημιτονοειδή καμπύλη (διότι για την περιγραφή του χρησιμοποιείται η τριγωνομετρική συνάρτηση του ημιτόνου) και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση για γραμμική αρμονική ταλάντωση:

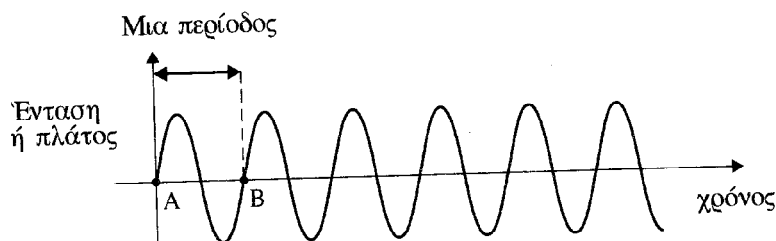
$$x = \chi_0 \eta \mu \omega t$$

όπου χ_0 το πλάτος της ταλάντωσης

ωt καλείται φάση φ της κίνησης, όπου ω η γωνιακή ταχύτητα των κινουμένων σημείων και

$$\omega = 2\pi f \text{ όπου } f \text{ η συχνότητα.}$$

Κάθε ηχητικό κύμα έχει την δική του κυματομορφή που αποτελείται από ένα σύνολο ημιτονοειδών κυματομορφών. Προς το παρόν θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά της απλούστερης κυματομορφής, της ημιτονοειδούς.



εικ. 1.4. Ημιτονοειδής κυματομορφή (απλός ήχος).

Η κυματομορφή ενός ημιτονοειδούς κύματος καθορίζεται από 4 βασικές παραμέτρους:

το πλάτος (amplitude) : Η μέγιστη απομάκρυνση της ταλάντωσης. Σχετίζεται με τα αραιώματα και πυκνώματα του αέρα.

η περίοδος (period) : Η πλήρης εξέλιξη της κίνησης μεταξύ δύο ίδιων καταστάσεων της ταλάντωσης. Εκφράζεται από τον τύπο $T=1/f$ όπου *συχνότητα* f (frequency) της ταλάντωσης είναι ο αριθμός των περιόδων/ sec.

- **Μήκος κύματος λ :** Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων ταλάντωσης με ίδια φάση (το μήκος της περιόδου μιάς ταλάντωσης). Το μήκος κύματος σχετίζεται με την συχνότητα και την ταχύτητα με τον εξής τύπο : $v = \lambda \cdot f$.

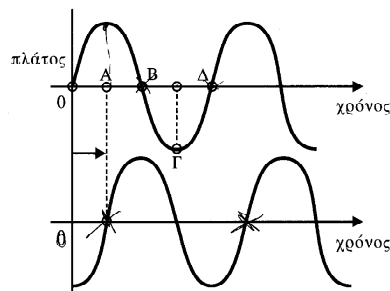
-**Την φάση φ :** Η στιγμιαία θέση της ταλάντωσης που αντιστοιχεί στην γωνία φάσης φ και μετρείται σε μοίρες (η διαφορετικά η στιγμή που το κύμα τέμνει τον οριζόντιο άξονα).²

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε διάφορες φάσεις κυματομορφών.

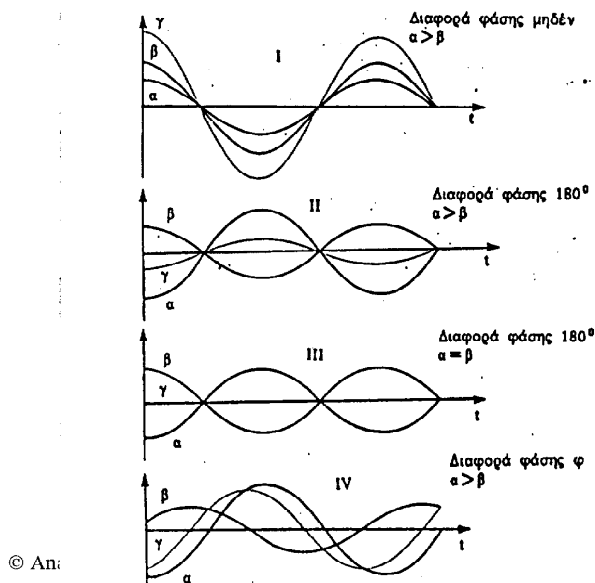
Ας παρατηρήσουμε στο σχήμα 20α την κυματομορφή του πάνω ημιτόνου που αρχίζει από το σημείο Ο (την αρχή των αξόνων). Κάθε σημείο της κυματομορφής, σε διάστημα μιας περιόδου (Ο ως Δ) απέχει διαφορετική απόσταση από το σημείο Ο.

Αυτή η απόσταση είναι η **Φάση** της κυματομορφής στο σημείο και μετράται σε μοίρες, όπως οι γωνίες.

Στο σημείο Α η κυματομορφή έχει φάση 90° , στο Β έχει 180° , στο Γ 270° και στο Δ 360° . Στην αρχή (στο Ο) έχει φάση 0° . Από το σημείο Ο αρχίζει μία περίοδος η οποία τελειώνει στο σημείο Δ, απ' όπου αρχίζει μία νέα κ.ο.κ.



Σχήμα 20(α)
Μετατόπιση φάσης κατά 90° .



© Αν:

1.3.Ακουστική αλυσίδα

Ηχητική πηγή³ : Εκπομπή (αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου).

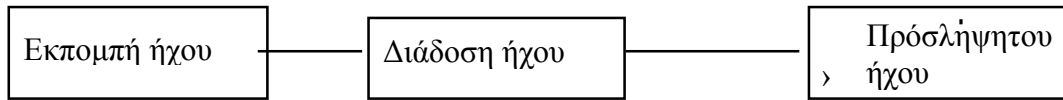
Διάδοση του ήχου : Το κανάλι είναι ο αέρας. Πυκνώματα και αραιώματα.

Ανθρώπινο Αυτί : Ο δέκτης (υποκειμενικά χαρακτηριστικά : ποιόν και ποσόν ενός ήχου).

²Ενώ στη μεταβολή της συχνότητας ενός ήχου παρατηρούμε μεταβολή του ύψους του, στη μεταβολή της φάσης δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στα χαρακτηριστικά ενός ήχου.

³-φυσικές: χορδές, ηχητικοί σωλήνες, ράβδοι, ηχητικές πλάκες.

-τεχνητές(μηχανικές, ηλεκτρικές) : σειρήνα, ηλεκτρικοί ταλαντωτές, μεγάφωνα.



Για να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του ήχου ακολουθούμε την εξής διαδικασία: λαμβάνουμε το ηχητικό σήμα ενός μουσικού οργάνου ή μιας οποιασδήποτε μουσικής πηγής μέσω ενός μικροφώνου ακριβείας, ενισχύουμε το σήμα και έπειτα το αναλύουμε με διάφορα προγράμματα στον υπολογιστή, που μας δίνουν είτε την κυματομορφή του, είτε το φάσμα του περιγράφοντας με ακρίβεια όλα του τα χαρακτηριστικά (συχνότητα, πλάτος έντασης, αρμονικό φάσμα).

2. ΤΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που θα προσδιορίσουμε παρακάτω αποτελούν το κύριο θέμα μελέτης της πειραματικής *Μουσικής Ακουστικής*. Τα *υποκειμενικά χαρακτηριστικά* του είναι το κύριο θέμα μελέτης της *Ψυχοακουστικής* και θα τα εξετάσουμε σε παρακάτω κεφάλαια, αφού πρώτα μελετήσουμε την λειτουργία της ανθρώπινης ακοής. Τα *αντικειμενικά χαρακτηριστικά* ενός ήχου αναφέρονται στα φυσικά του χαρακτηριστικά και είναι αυτά που μπορούν να μετρηθούν και να περιγραφούν από την φυσική επιστήμη όπως επίσης και να προσδιοριστούν *ποιοτικά και ποσοτικά* μέσω μετρήσεων, που γίνονται από εξειδικευμένα όργανα και συσκευές.

Τα *υποκειμενικά χαρακτηριστικά* αναφέρονται στις αισθήσεις μας και τις ψυχολογικές επιπτώσεις που δημιουργούνται στον ακροατή, οι οποίες σχετίζονται με το *ποιόν* και το *ποσόν* του ήχου που γίνεται αντιληπτός. Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά δεν μπορούν να μετρηθούν με το συμβατικό τρόπο, δηλ. με όργανα μετρήσεων, αλλά η μέτρηση τους γίνεται μέσα από έλεγχο - δοκιμασία (τέστ) ομάδων ακροατών.

<u>Αντικειμενικά</u>	<u>Υποκειμενικά</u>
Συχνότητα (θεμελ. συχνότητα)	Ύψος
Ένταση (Πλάτος της ταλαντ.)	Ακουστότητα
Φάσμα συχνοτήτων	Ηχόχρωμα η χροιά
Διάρκεια (σε sec)	Διάρκεια (υποκειμενική)
Κατευθυντικότητα	Εντοπισμός του ήχου στο χώρο

Επίσης στα *αντικειμενικά χαρακτηριστικά* συγκαταλέγονται τα χαρακτηριστικά του ήχου που σχετίζονται με την διάρκεια του όπως:

Η φάση που περιγράφει τη στιγμιαία κατάσταση του κύματος.

Η ταχύτητα του ήχου που αναφέρεται στην διάδοση του κύματος ανά μονάδα χρόνου.

Η δυναμική περιβάλλουσα του ήχου που περιγράφει την εξέλιξη της έντασης στο χρόνο.

2.1.Η θεμελιώδης συχνότητα

Βασική η θεμελιώδης συχνότητα f_0 ⁴ : Η θεμελιώδης συχνότητα, που είναι η χαμηλότερη συχνότητα στο φάσμα των συχνοτήτων, καθορίζει το τονικό ύψος των ήχων .

Συνήθως είναι η συχνότητα που έχει την μεγαλύτερη ένταση από τις υπόλοιπες συχνότητες που καλούνται *παράγωγοι*, αλλά σε ορισμένα μουσικά όργανα η θεμελιώδης είναι ασθενέστερη από κάποιες παράγωγες.

Σε ένα δυναμικό πλάνο (πλάτος-χρόνος), μπορούμε να βρούμε την θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου μετρώντας τον αριθμό των περιόδων του στην μονάδα του χρόνου. π.χ. όταν έχουμε 20 περιόδους / sec, η συχνότητα του εν λόγω ήχου είναι 20 Hz.

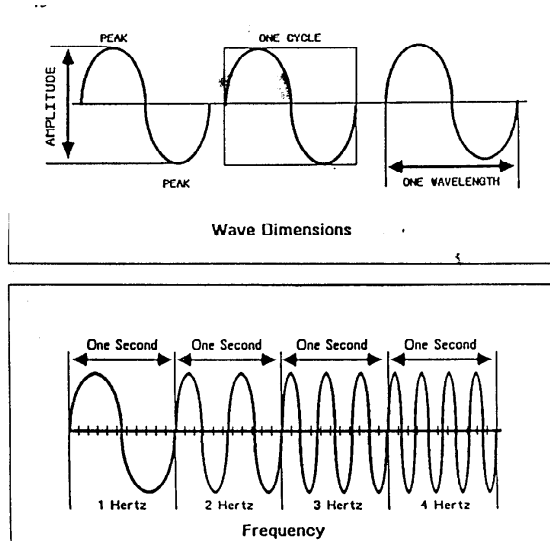
Παράθεση μερικών βασικών συχνοτήτων νοτών πιάνου.

Λα3= 440Hz

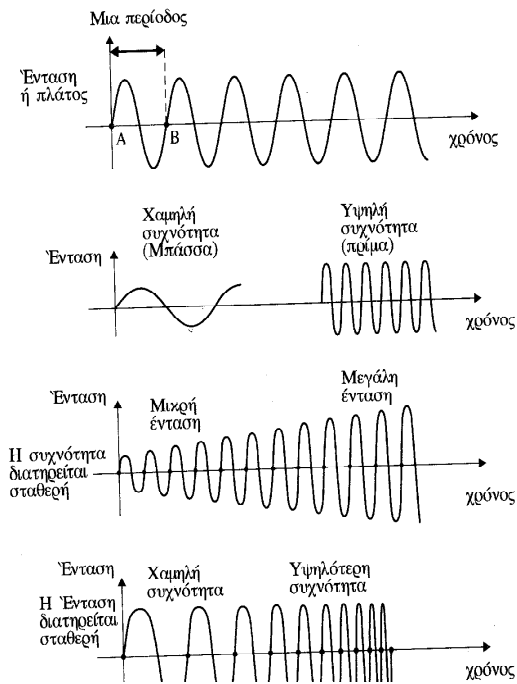
Λα4=880Hz

Λα5=1760 Hz.

⁴ Fundamental frequency



εικ. 2.1. Ο αριθμός των περιόδων στο δευτερόλεπτο εκφράζει την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα ένα Hz ισοδυναμεί με ένα κύκλο το δευτερόλεπτο. Παρατηρείστε τον αριθμό των περιόδων στη μονάδα του χρόνου.



εικ.2. 2 : Η κυματομορφή του ημιτόνου σε διάφορες εντάσεις και συχνότητες.

Όνομασ. φθόγγων	Ισοσυγκ. κουρδίσμα	Κουρδίσμα κατά τη Φυσική	Cent	Φυσικό κουρδίσμα	Σχέση ως προς το ντο ²	Ισοσυγκερ. κουρδίσμα
ντο ²	4186,03 Hz	~ 2 ¹²	1200	528 Hz	2:1	523,25 Hz
ντο ⁶	2093,02 Hz	~ 2 ¹¹	1100	495 Hz	15:8	493,88 Hz
ντο ³	1046,51 Hz	~ 2 ¹⁰	1000	475 Hz	9:5	466,16 Hz
ντο ⁷	523,25 Hz	~ 2 ⁹	900	422 Hz	5:3	415,31 Hz
ντο ⁴	261,63 Hz	~ 2 ⁸	800	396 Hz	8:5	392,00 Hz
ντο ⁵	130,81 Hz	~ 2 ⁷	700	327 Hz	25:18	369,99 Hz
ντο ¹	65,41 Hz	~ 2 ⁶	600	352 Hz	4:3	349,23 Hz
ντο ²	32,70 Hz	~ 2 ⁵	500	330 Hz	5:4	329,63 Hz
ντο ³	16,35 Hz	~ 2 ⁴	400	317 Hz	6:5	311,13 Hz
ντο ⁴	8,15 Hz	~ 2 ³	300	297 Hz	9:8	293,67 Hz
			200	275 Hz	25:24	277,18 Hz
			100	264 Hz	1:1	261,63 Hz
			0			

Τονικά υψή
 Χρωματική κλίμακα
 Λα του διαπάσων

εικ. 2.3. Πίνακας μουσικών υψών στο Ευρωπαϊκό σύστημα ($\Lambda_3=440$ Hz).

2.2 Ένταση (πλάτος) του ήχου

Όπως η συχνότητα έτσι και η ένταση ενός ήχου αποτελεί ένα αντικειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου και μπορεί να μετρηθεί με μαθηματική ακρίβεια.

Ο φυσικός ερευνητής μετρά την ένταση του ήχου σε μονάδες ισχύος (Watt) που πλήττουν ένα τετραγωνικό εκατοστόμετρο οποιασδήποτε επιφάνειας (όπως η επιφάνεια του ακουστικού τυμπάνου), αλλά καθώς το Watt για την μέτρηση της ακουστικής ισχύος είναι πολύ μικρή μονάδα (π.χ. σε τιμή 0,000001 Watt μπορεί να έχουμε ενοχλητικό θόρυβο που ξεπερνά κατά 10 δισεκατομμύρια φορές τον ασθενέστερο ακουστό ήχο) στην πραγματικότητα το αυτί μας δεν αντιλαμβάνεται αυτόν τον ήχο 10 δισεκατομμύρια φορές πιο δυνατό.

Πιο συγκεκριμένα όταν η ένταση του ήχου διπλασιάζεται το αυτί μας αντιλαμβάνεται αυτή την αύξηση κατά 23%.

Η κλίμακα των Decibel (10-1 Bel) επινοήθηκε από τον εφευρέτη του τηλεφώνου A. G. Bell, δίνοντας μια αδρή συσχέτιση μεταξύ της φυσικής έντασης του ήχου και της υποκειμενικής ηχηρότητας που προκαλεί.

Για την μέτρηση των ήχων της καθημερινής ζωής το επίπεδο 0 Decibel αντιπροσωπεύει τον ασθενέστερο ήχο που μπορεί να ανιληφθεί το ανθρώπινο αυτί, το δε επίπεδο 130 Decibel πλησιάζει το όριο του πόνου.

Θα μελετήσουμε παρακάτω διάφορα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την ακουστική ένταση.

2.2.1. Ηχοστάθμη (L_I) και έννοια του Decibel

Η στάθμη έντασης ενός ήχου είναι η διαφορά δύο ηχοσταθμών όπου στην περίπτωση μας είναι L_I-L₀:

όπου L₀=0 και αντιστοιχεί στο log I/ I₀ χαρακτηρίζεται από τον παρακάτω τύπο:

L_I (intensity level) η SIL(sound intnsity level).

$$L_I = 10 \log I / I_0$$

όπου I₀=10⁻¹² W/ m² είναι η ένταση κατωφλίου, δηλ. η κατώτατη ένταση που μπορεί να ερεθίσει το αυτί μας και μετριέται σε μονάδες db (decibel).

Για να κατανοήσουμε την κλίμακα των decibel⁵ βάσει του ακουστικού αισθήματος παρουσιάζουμε τον παρακάτω πίνακα:

Όταν η ένταση κατωφλίου $I_0=10^{-12}$ W/m² τότε η ακουστική στάθμη είναι 0 db. όταν η ένταση είναι 10 φορές πιο δυνατά η ακουστική στάθμη είναι 10 db. όταν η ένταση είναι 100 φορές πιο δυνατά η ακουστική στάθμη είναι 20 db. όταν η ένταση είναι 1000 φορές πιο δυνατά η ακουστική στάθμη είναι 30 db. κοκ.....

Παρατηρούμε ότι έχουμε να κάνουμε με μια γεωμετρική πρόοδο με λόγο 10 από την πλευρά της έντασης και με μία αριθμητική πρόοδο με διαφορά 10 από την πλευρά της στάθμης έντασης.

Πάνω σ' αυτή τη λογική στηρίζεται η μονάδα στάθμης ηχητικής έντασης *1 db (decibel)* που μετρά σε λογαριθμική κλίμακα τις αλλαγές της ακουστικής πίεσης των ηχητικών κυμάτων.

Η κλίμακα των db εκτείνεται από 0- 120 db.

Αρα, *1 decibel* είναι μια σχετική μονάδα σύγκρισης εντάσεων (I και I_0) μεταξύ δύο ήχων. Αποτελεί μια μονάδα σύγκρισης για την ακουστική και ηλεκτρακουστική διότι δίνει έναν αριθμό που στηρίζεται σε φυσικά μεγέθη.

Όταν δύο ηχητικές πηγές συνηχούν και παράγουν τον ίδιο τόνο, τότε η συνολική ένταση (η ακουστική πίεση) είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων.

Η συνολική όμως στάθμη έντασης δεν ισούται με το άθροισμα των στάθμων.

Έτσι αν η κάθε πηγή παράγει ήχο στάθμης 60 db τότε η συνολική στάθμη είναι 63 db και όχι 120 db. Συνεπώς όταν η ένταση -σε W/ m²-διπλασιάζεται, τότε η στάθμη αυξάνεται κατά 3 db.

2.3. Ένταση και χρόνος

⁵Μαθηματικό υπόβαθρο: Περί λογαρίθμων

Εάν έχουμε μια εκθετική συνάρτηση της μορφής $f(x) = a^x$ η αλλιώς $\psi = f(x)$, όπου $a > 0$ με $a \neq 1$ και $\psi > 0$.

Η παραπάνω εξίσωση έχει μοναδική λύση, αφού η παραπάνω εκθετική συνάρτηση είναι "1-1 και επί". Τη μοναδική αυτή λύση την συμβολίζουμε με $\log_a \psi$ και την ονομάζουμε λογάριθμο του ψ ως προς βάση a . ώστε αν $a > 0$ με $a \neq 1$ και $\psi > 0$. τότε:

$$a^x = \psi \quad \text{τότε} \quad x = \log_a \psi$$

Ο λογάριθμος (λόγος και αριθμός) ως όρος εκφράζει "τον αριθμό που μετρά το πλήθος των όρων" διότι αν θεωρήσουμε δύο πρόοδους: την πρώτη αριθμητική πρόοδο με διαφορά 1 και την δεύτερη γεωμετρική πρόοδο με λόγο 2 έχουμε:

A: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,

B: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, , 128...

Τότε παρατηρούμε ότι ο αριθμός 6 (που είναι ο λογάριθμος του 64 με βάση το 2⁶) δείχνει πόσοι λόγοι χρειάζονται στην συνεχή αναλογία

$$\frac{6}{1} = \frac{4}{2} = \frac{8}{4} = \frac{16}{8} = \frac{32}{16} = \frac{64}{32} \dots$$

για να φτάσουμε στον όρο 64.

Η χρήση των λογαρίθμων στην μουσική..

Στη σημερινή εποχή των ηλεκτρονικών υπολογιστών η αρχική χρησιμότητα των λογαρίθμων σαν ένα μέσο απλοποίησης των αριθμητικών υπολογισμών έχει φυσικά εκμηδενιστεί.

Αντίθετα είναι πολύ μεγάλη η χρησιμότητα της λογαριθμικής συνάρτησης σαν ένα μέσο μαθηματικής περιγραφής καταστάσεων του φυσικού κόσμου.

Πρέπει μάλιστα να σημειώσουμε ότι πολλές από τις εφαρμογές της λογαριθμικής συνάρτησης στηρίζονται στην αρχική ιδέα της αντιστοιχίας μίας *γεωμετρικής* και μίας *αριθμητικής* πρόοδου.

Συγκεκριμένα όταν ένα μέγεθος μεταβάλλεται πολύ γρήγορα (γεωμετρικά) και ένα άλλο, που σχετίζεται με αυτό πολύ αργά (αριθμητικά) τότε η μεταξύ τους σχέση μπορεί να εκφραστεί λογαριθμικά.

Μιλήσαμε για την ένταση του ήχου σε μακροσκοπικό πλάνο, δηλ. την ένταση που καταμετρούμε κατά την διάρκεια μιας συναυλίας, κατα την απογείωση ενός αεροπλάνου κτλ. Τώρα θα ασχοληθούμε με την ένταση του ήχου σε μικρότερη κλίμακα, εξετάζοντας πια είναι η δυναμική εξέλιξη ενός ήχου στο χρόνο και πως αναγνωρίζουμε κατ' αυτό το τρόπο την *ηχητική τατότητα* ενός οργάνου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν θα ασχοληθούμε με ήχους μεγάλης διάρκειας, αλλά περισσότερο με δείγματα ήχων διάρκειας 1 sec.

Αν π.χ. ηχογραφήσουμε τον ήχο μιας νότας του πιάνου και κόψουμε την αρχή και το τέλος, θα αντιληφθούμε ότι ο ήχος γίνεται αγνώριστος.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επεμβαίνουμε με διάφορα μέσα στην περιβάλλουσα ενός ήχου (σε μικροσκοπικό πλάνο) που μας δείχνει την δυναμική του εξέλιξη στο χρόνο.

5.3.1. Περιβάλλουσα πλάτους (amplitude envelope) είναι η καμπύλη που αναπαριστά την δυναμική ανάπτυξη της έντασης ενός ήχου. Μπορεί να χαρακτηριστεί σαν *ηχητική υπογραφή* ενός οργάνου.

Η περιβάλλουσα ενός ήχου μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω τμήματα:

Μέτωπο η αττάκα(Attack): Αρχική και-ανάλογα με το όργανο- γρήγορη η αργή αύξηση της έντασης.

Εξασθένηση η πτώση (Decay): Η αρχή της μείωσης της έντασης αμέσως μετά το μέτωπο.

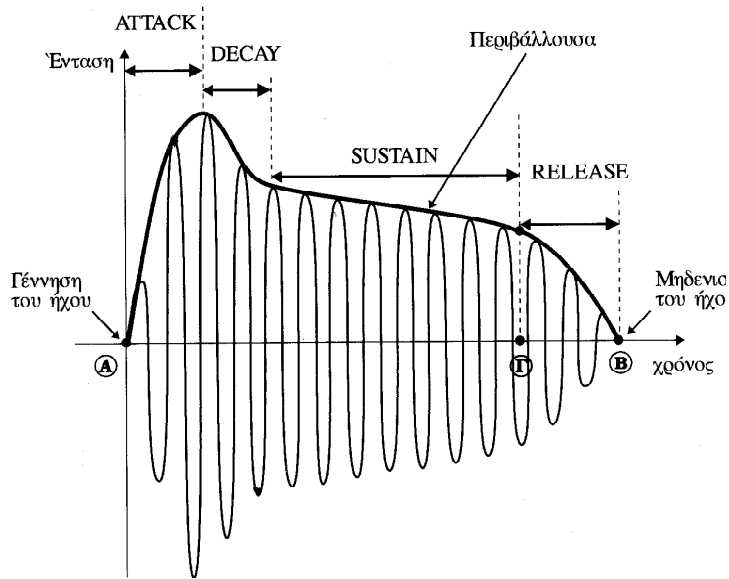
Sustain : Διατήρηση μιάς μέτριας έντασης (διάρκεια)

Αποδέσμευση (Release) : Η δραστική μείωση και μηδενισμός του ήχου

Παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα την περιβάλλουσα ADSR= Attack, Decay, Sustain, Release. (εικ.5.11.)

Το σχήμα της περιβάλλουσας εξαρτάται απο το είδος του μουσικού οργάνου και από τον τρόπο που το προσεγγίζει ο μουσικός. Για παράδειγμα τα πνευστά έχουν αργό μέτωπο, δηλ. η ένταση τους αργεί να αυξηθεί, ενώ η κιθάρα και τα κρουστά έχουν ταχύ μέτωπο (έντονο attack) διότι η ένταση τους παίρνει απότομα μεγάλες τιμές. Στη συνέχεια, ενώ στην κιθάρα η τα κρουστά ο ήχος εξασθενεί γρήγορα και διαρκεί πολύ λίγο, στα πνευστά διαρκεί πολύ περισσότερο (επειδή ο μουσικός συνεχίζει να φυσά). Η φάση της αποδέσμευσης συναντάται στα όργανα που έχουν έναν μηχανισμό γέννησης και διατήρησης του ήχου, π.χ. πάτημα του πλήκτρου, φύσημα του πνευστού, σύρσιμο του δοξαριού....). Όταν αυτός πάψει να ενεργεί π.χ. άφημα του πλήκτρου, παύση του φυσήματος, κ.λ.) τότε ο ήχος μη συντηρούμενος πλέον φθίνει δραστικά και μηδενίζεται.

μουσική.



Σχήμα 4(α). Η περιβάλλουσα (ENVELOPE) στην γενική της μορφή.
εικ.2.4.. Η δυναμική περιβάλλουσα ενός ήχου.

Παραδειγματικά παραθέτουμε παρακάτω την μέση τιμή διάρκειας της αττάκας για ορισμένα όργανα:

κρουστά : 1-2 ms

Πιάνο: 20 ms.

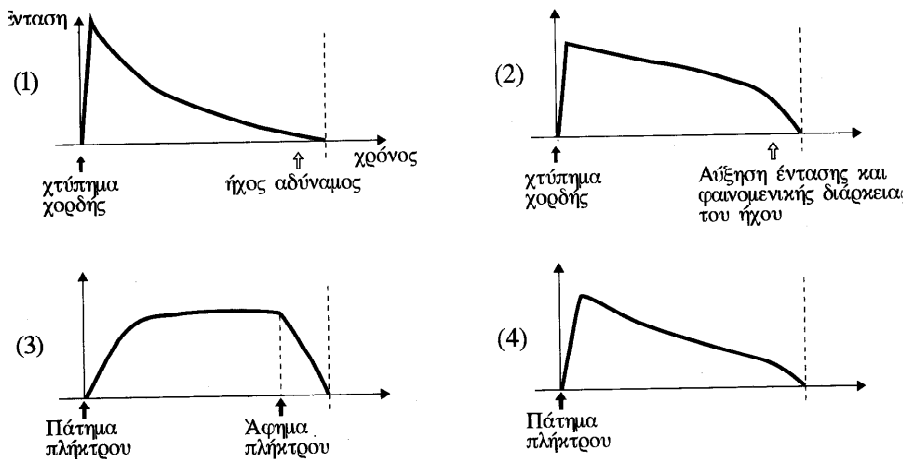
τρομπέτα : 20 ms

κλαρίνο : 50 -70 ms

Σαξόφωνο: 36-40 ms

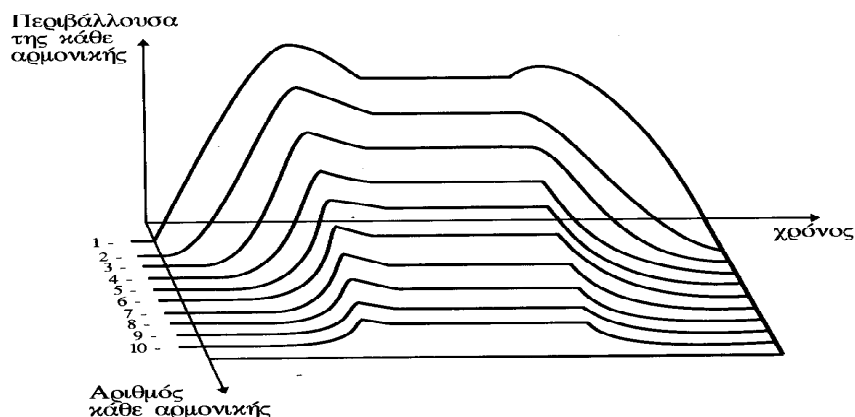
Φλάουτο : 200-300 ms

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τις περιβάλλουσες μερικών οργάνων.



Σχήμα 4(β): Περιβάλλουσες διάφορων οργάνων.
1. Κιθάρας, 2. Ηλεκτρικής κιθάρας μετά την παρεμβολή ενός συμπιεστή (Sustainer), 3. Οργάνου (Pipe Organ), 4. Πιάνου.

Σύμφωνα με τον J.Cl. Risset η κάθε παράγωγη συχνότητα του φάσματος ακολουθεί τη δική της περιβάλλουσα.



εικ. 2.6. Οι περιβάλλουσες των αρμονικών και της θεμελιώδους σε τρισδιάστατο πλάνο.

2.4. Φάσμα συχνοτήτων

Το φάσμα συχνοτήτων ενός ήχου διαφοροποιεί δύο ήχους ίδιας θεμελιώδους συχνότητας (ύψους) και έντασης (ακουστότητας).

Οι σύνθετοι ήχοι των μουσικών οργάνων διαφέρουν επειδή έχουν διαφορετικά φάσματα.

Το φάσμα συχνοτήτων καθορίζεται από :

το συνολικό αριθμό των επιμέρους συχνοτήτων (που αποτελούν τον σύνθετο ήχο)
την ένταση της κάθε επιμέρους συχνότητας
την κατανομή τους στο ακουστικό φάσμα
τους συσχετισμούς των φάσεων τους.

Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν επίσης και το σχήμα της κυματομορφής του ήχου.

Το αρμονικό φάσμα ενός σύνθετου ήχου απορρέει από το παρακάτω θεώρημα του Γάλλου Μαθηματικού J. Fourier:

2.4.1. Θεώρημα Fourier

«Κάθε περιοδικό κύμα μπορεί να αποσυνθετηθεί σε μια σειρά επιμέρους ημιτονοειδών κυμάτων, των οποίων οι συχνότητες είναι παράγωγες των βασικών συχνοτήτων, έχουν δε διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές φάσεις από την θεμελιώδη συχνότητα.»

2.4.2. Δομή του φάσματος

Το φάσμα συχνοτήτων που αντιστοιχεί στο υποκειμενικό γνώρισμα της χροιάς των μουσικών οργάνων αποτελείται:

- α) από την θεμελιώδη συχνότητα (που αντιστοιχεί στο τονικό ύψος μιας νότας) και
- β) τις μερικές ή παράγωγες συχνότητες της θεμελιώδους (partials- overtones).

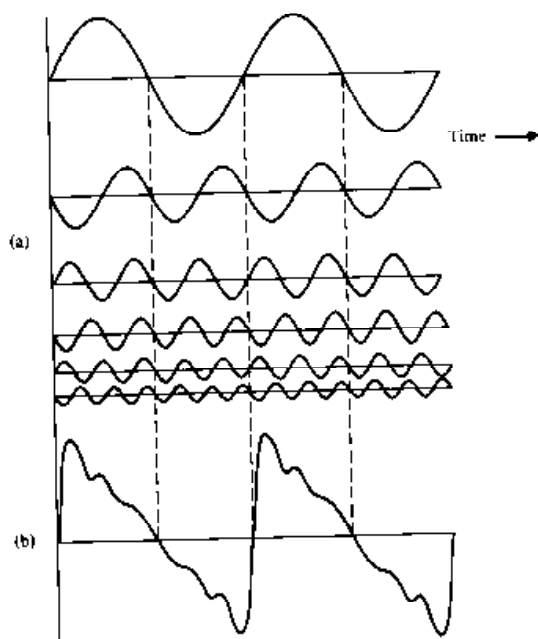
Αρμονικοί (harmonics) (f, a) που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους ($f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, \dots$)

Μη αρμονικοί (inharmonics) που δεν είναι ακέραια αλλά δεκαδικά πολλαπλάσια της θεμελιώδους.

Υποαρμονικοί καλούνται οι συχνότητες που προηγούνται της θεμελιώδους και είναι ακέραια υποπολλαπλάσια, δηλ. το $1/2$, $1/3$, $1/4$, κτλ..

Τεχνητή παραγωγή υποαρμονικών μπορεί να γίνει απο ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως το Octaver.

Formants : Μικρή ομάδα γειτονικών συχνοτήτων με επίκεντρο τον αρμονικό. Καθορίζεται απο την κεντρική συχνότητα (συχνότητα του αρμονικού), απο το πλάτος του και το πλάτος της ζώνης (ευρύτητα περιοχής). Βλέπε σχήμα 5.14.



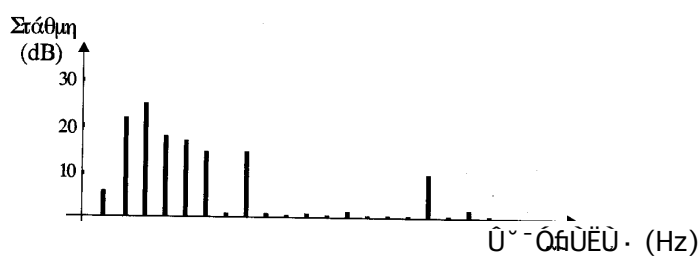
Εικ.2.7. Η σύνθετη κυματομορφή του Σολ (196 Hz) είναι η τελευταία (β) και οι επιμέρους ημιτονοειδείς κυματομορφές που την αποτελούν (α).

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το αρμονικό φάσμα της παραπάνω κυματομορφής του Σολ του βιολιού (στο φασματικό πλάνο-άξονες : ένταση-συχνότητα).

Η κάθε μία απο της παραπάνω γραμμές αναπαριστά μια ημιτονοειδή κυματομορφή που εξελίσσεται στο χρόνο.

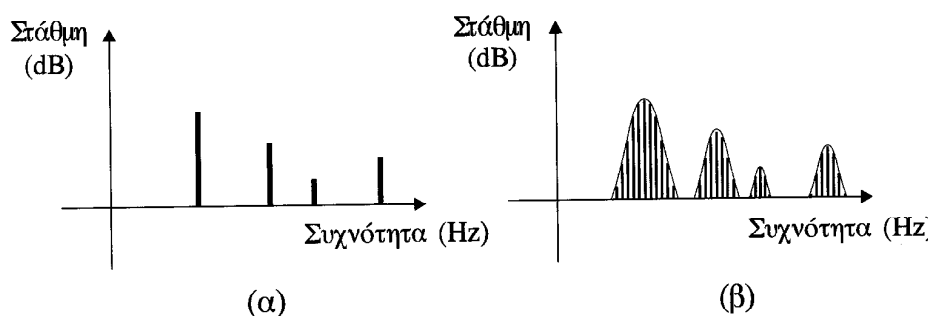
Συνήθως η θεμελιώδης συχνότητα ονομάζεται και *πρώτη αρμονική*.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες *μερικών ή παραγώνων* (overtones η partials) που σχετίζονται με την αρμονική ή μη σχέση των συχνοτήτων μεταξύ τους.



εικ. 2.8.. Το αρμονικό φάσμα της νότας Σολ το βιολιού.

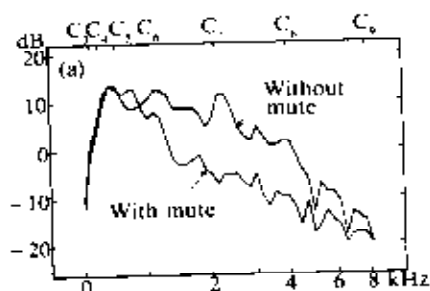
9).



εικ. 2.9.. Στο σήμα (β) παρατηρούμε τις περιοχές των formants..

2.4.3. Long time average spectra:

Αυτό το τύπος φάσματος το οποίο έχει παρουσιάσει ο J. Sundberg (Royal academy of music, Stockholm) δίνει πληροφορίες για την μουσική σημειογραφία, την εκτέλεση, το μουσικό όργανο και τον χώρο εκτέλεσης.



2.10. Ειδικός τύπος φάσματος (long time average spectra)

2.4.4. Τύποι κυματομορφών και φάσματα αυτών

-*Τετραγωνικό κύμα*. Περιέχει περιττούς αρμονικούς (1,3,5,7 ..) που οι συχνότητες τους είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους ($1.f_0, 3.f_0, 5.f_0, 7.f_0$)⁶ και το πλάτος των αρμονικών είναι $1/3, 1/5, 1/7, 1/9, \dots$ του πλάτους της θεμελιώδους.

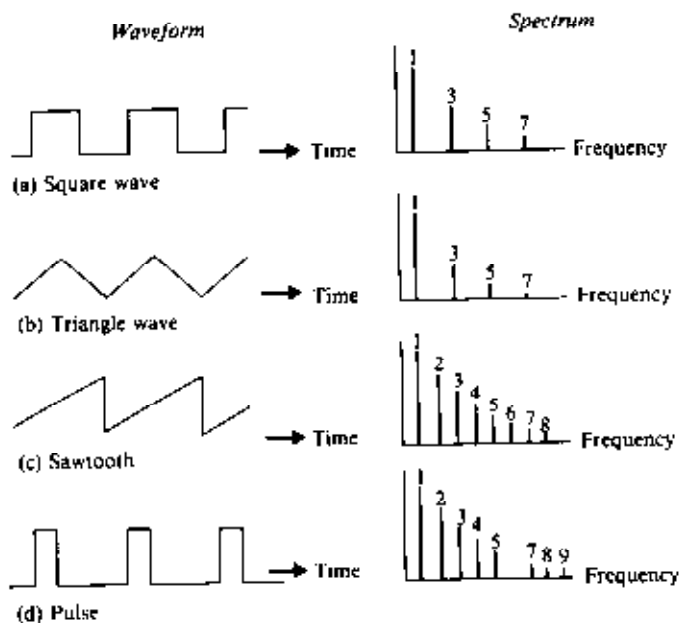
Τριγωνικό κύμα: περιέχει επίσης περιττούς αρμονικούς 1,3,5,7 αλλά το πλάτος τους είναι $1/9, 1/25, 1/49, 1/81, \dots$

Πριονωτό κύμα: περιέχει όλους τους αρμονικούς: 1,2,3,4,5,6,7,.....

Παλμός: (pulse) : Περιέχει τους αρμονικούς : 1,2,3,4,5, 7,8,9.

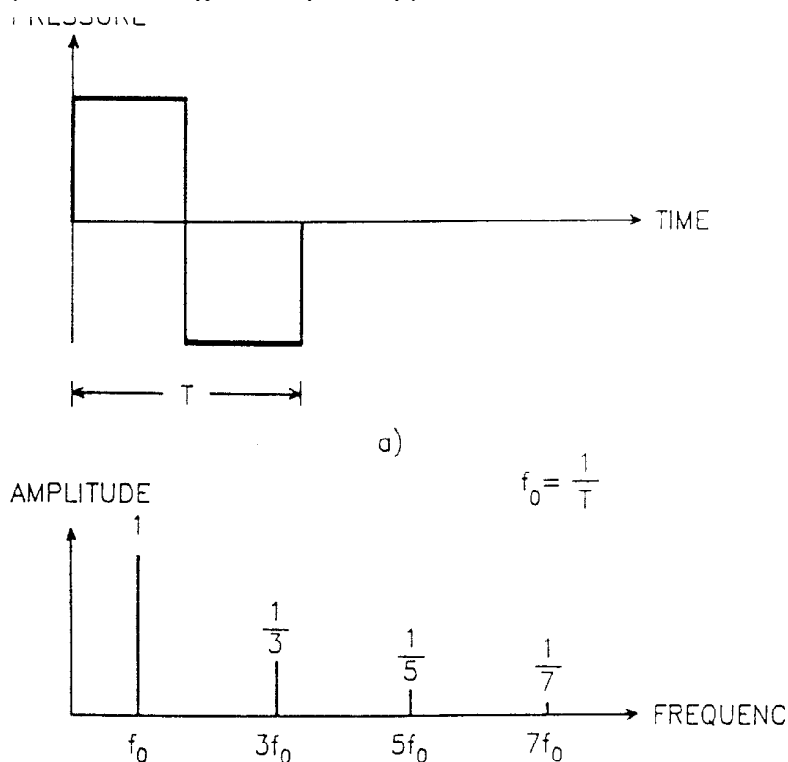
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε όλες τις παραπάνω κυματομορφές με το αντίστοιχο φάσμα τους.

⁶Δηλ. αν η αρχική συχνότητα $f_0 = 200$ Hz τότε οι παράγωγες συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της κατά 1, 3, 5, 7, δηλ. θα είναι της τάξεως των συχνοτήτων: 200Hz, 600 Hz, 1000 Hz, 1400 Hz,ktl....



εικ.2.11.. Βασικές κυματομορφές και φάσματα

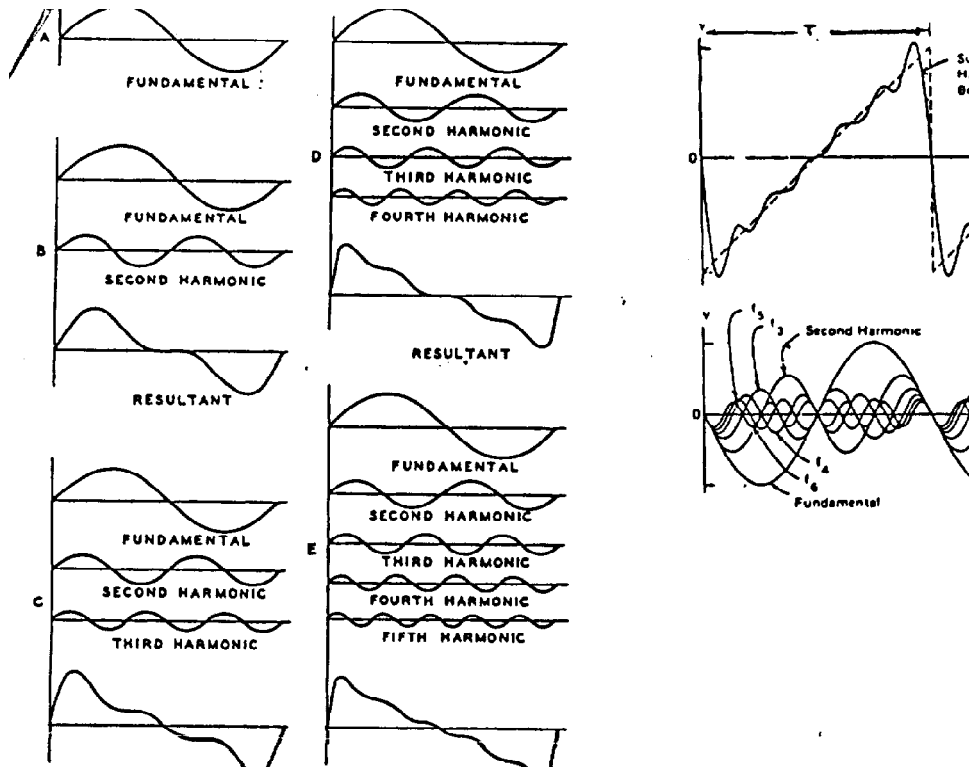
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε αναλυτικά το τετραγωνικό κύμα και το αρμονικό του φάσμα, με τα αντίστοιχα πλάτη των αρμονικών.



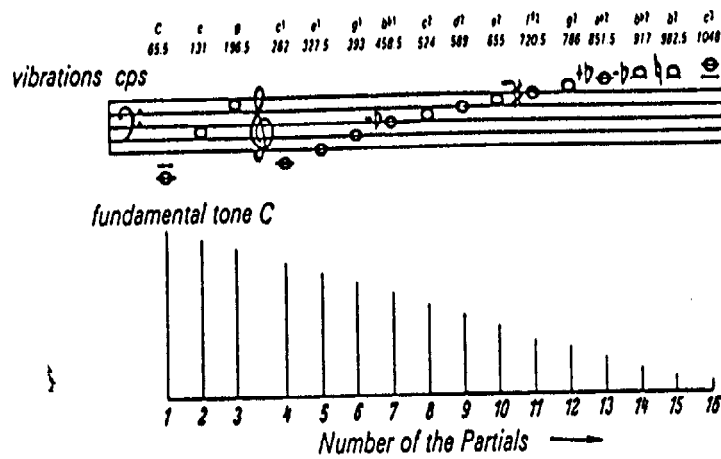
εικ. 2.12. Τετραγωνικό παλμός και φάσμα αυτού.

Στα παρακάτω σχήματα παρατηρούμε την ανασύσταση μιάς κυματομορφής σε διαφορετικά βήματα προσθέτοντας έναν - έναν τους αρμονικούς και έχοντας την τελική κυματομορφή. (resultant).

Αριστερά παρατηρούμε έναν άλλο τύπο κυματομορφής και τις επιμέρους ημιτονοειδείς κυματομορφές που την αποτελούν.



εικ.2.13. Ανασύσταση μιας σύνθετης κυματομορφής απο τις απλές ημιτονοειδείς κυματομορφές που την αποτελούν.



εικ.2.14.. Οι αρμονικοί του Ντό (πίανου) σε μουσική σημειογραφία (αρμονική σειρά).

Παρατηρούμε ότι η 7^η, 11^η και 14^η παράγωγοι είναι λίγο ψηλότερα απο τη θεμέλιο.

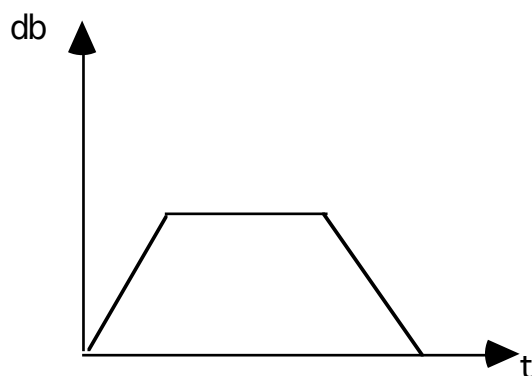
2.5. Αναπαράσταση του ήχου

Ενας ήχος μπορεί να αποδοθεί με τρισδιάστατη υπόσταση ως “ήχητικό αντικείμενο” (objet sonore)⁷

Ετσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρία βασικά πλάνα αναπαράστασης του ήχου:

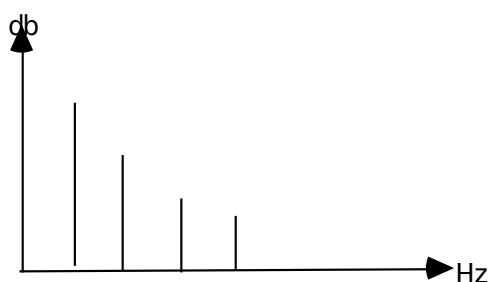
- α) Δυναμικό
- β) φασματικό
- γ) Μελωδικό

Στο Δυναμικό πλάνο (με άξονες α, t) αναπαριστάται η κυματομορφή του ήχου και η δυναμική του εξέλιξη στο χρόνο. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε την περιβάλλουσα πλάτους μιάς κυματομορφής.



εικ.2.8.. Δυναμικό πλάνο και η περιβάλλουσα της κυματομορφής

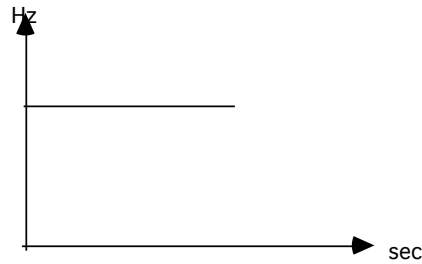
Στο φασματικό πλάνο αναπαρίστανται οι συχνότητες που αποτελούν το φάσμα του ήχου σε άξονες έντασης και συχνότητας.



εικ. 2.9.. Φασματικό πλάνο (κάθε μια γραμμή αντιπροσωπεύει το πλάτος μια ημιτονοειδούς κυματομορφής)

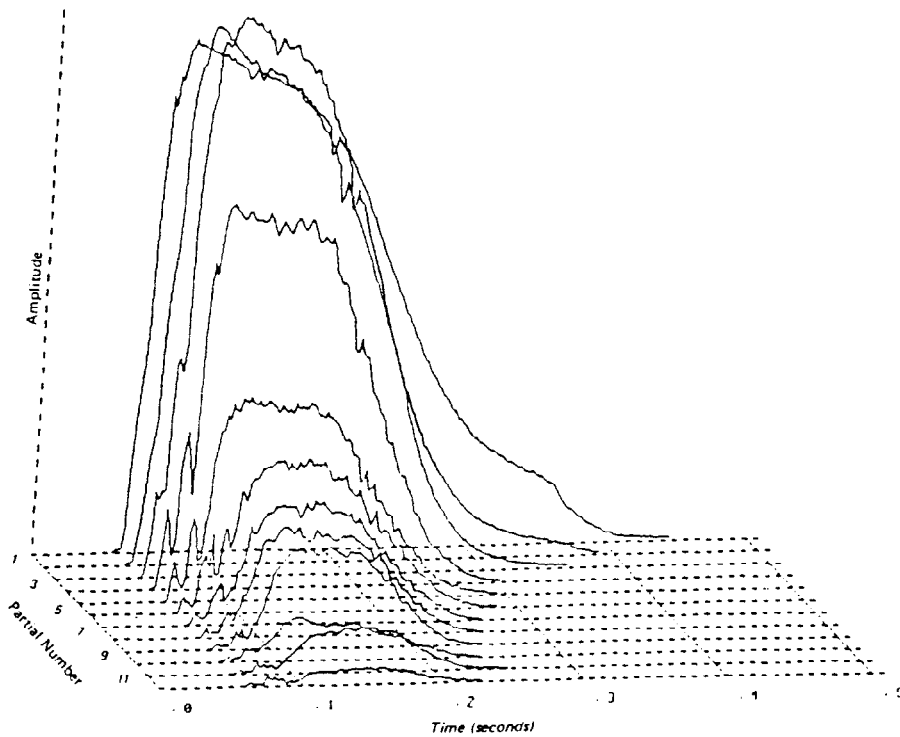
Στο Μελωδικό πλάνο αναπαρίστανται ανάλογα με την περίπτωση είτε η θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου σε σχέση με το χρόνο (κλασσικό πεντάγραμμο) είτε η εξέλιξη των παραγώγων συχνοτήτων στο χρόνο (sonogramme).

⁷-Όρος που εισήγαγε ο Γάλλος συνθέτης και θεμελιωτής της συγκεκριμένης Μουσικής (musique concrète) Pierre Schaeffer. Δημιουργήθηκε από Αναστασία Γεωργάκη, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιούνιος 2003



εικ. 2. 10. Μελωδικό πλάνο

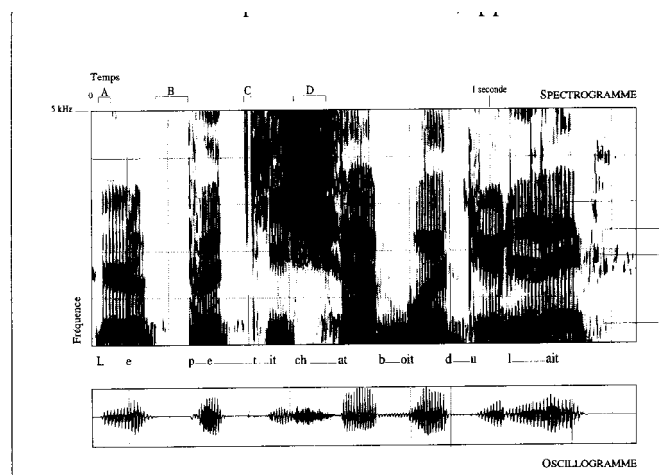
Ετσι η τρισδιάστατη αναπαράσταση του ήχου (στην συγκεκριμένη περίπτωση τόνων μιας τρομπέτας) στηρίζεται στο παρακάτω σχήμα όπου παρατηρούμε τους τρεις άξονες (πλάτος, συχνότητα , χρόνος) και την ανάλυση του ήχου σε επιμέρους παράγωγες συχνότητες που κάθε μία έχει διαφορετική περιβάλλουσα στην εξέλιξη της στο χρόνο . Οι περιβάλλουσες αυτές διαγράφου ημιτονοειδείς κυματομορφές (εξετάσετε και πάλι το θεώρημα του Fourier).



εικ. 2.11.. Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τόνων της τρομπέτας.

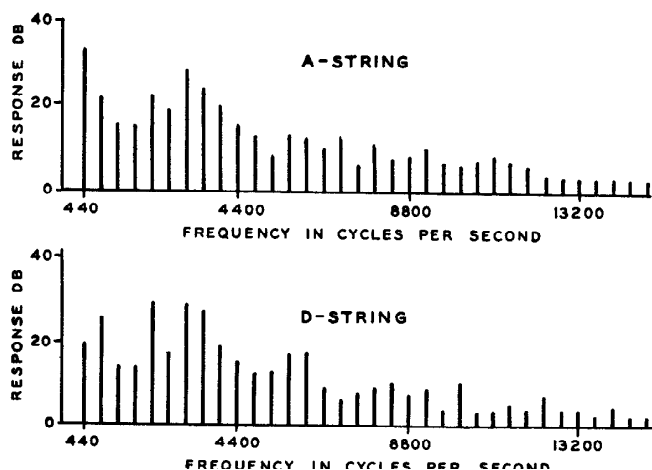
Η αναπαράσταση ενός ήχου λοιπόν γίνεται είτε:

α) είτε με το φασματογράφημα του (sonogramme η spectrogramme) είτε με την κυματομορφή του (εικ. 5.26) όπου παρατηρούμε την δυναμική του εξέλιξη στο χρόνο η τέλος με το στατικό φάσμα του (5.27).



εικ.2.12.. Πάνω : φασματογράφημα (σε άξονες χρόνου-συχνότητας)⁸

Κάτω : απεικόνιση της κυματομορφής (χρόνος- πλάτος).



εικ. 2.12. Το στατικό φάσμα δύο ανοιχτών χορδών του βιολιού.

2. 6. Φυσικοί παράμετροι

Στην ουσία οι φυσικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν πιο λεπτομερώς ένα ήχο μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω.

Πλάτος (db)

Περιβάλλουσα πλάτος

Συχνότητα και περίοδος

Φάση

Φάσμα

Φάσμα φάσεως

Φασματική περιβάλλουσα

Μερικές η παράγωγες συχνότητες (αρμονικές και μη αρμονικές)

Φόρμαντς

⁸Η ένταση των παραγώγων συχνοτήτων αντιπροσωπεύεται από το έντονο ή αχνό μαύρο χρώμα . Οπου η σιακγράφηση είναι πιο έντονη δείχνει ότι ο κάθε αρμονικός έχει έντονη παρουσία , δηλ. μεγάλο πλάτος.

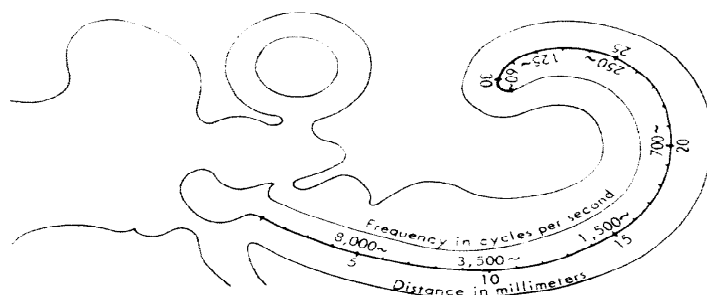
3. ΘΕΜΑΤΑ ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Σ' αυτό το μέρος θα εξετάσουμε τους μηχανισμούς αντίληψης των ήχων από το ανθρώπινο αυτί. Πιο συγκεκριμένα η *Ψυχοακουστική* σε συνδυασμό με την *Φυσιολογία* ερευνά αναλυτικά πώς ο βιολογικός μηχανισμός της ακοής, το νευρικό σύστημα και ο εγκέφαλος αντιδρούν στο ερέθισμα ήχος και δημιουργούν αισθήσεις, εντυπώσεις, συναισθήματα, αντιλήψεις και εμπειρίες..

Στο συγκεκριμένο μάθημα θα περιοριστούμε περισσότερο σε θέματα Ψυχοακουστικής που σχετίζονται με τους μηχανισμούς της ακοής, διότι τα υπόλοιπα θέματα (αντιδράσεις νευρικού συστήματος και εγκέφαλου) είναι περισσότερα θέματα που αφορούν το τομέα της Μουσικής Γνωστικής και Ψυχολογίας (Musical Cognition and Psychology).

3.1. Η Θεωρία των κρίσιμων ζωνών

Οι κρίσιμες ζώνες αντιπροσωπεύουν περιοχές συχνοτήτων πάνω στην Βασική μεμβράνη που καθορίζονται από μια *κεντρική συχνότητα* και ένα *εύρος ζώνης* πάνω και κάτω από την κεντρική συχνότητα (που αποτελεί και την συχνότητα ερεθίσματος.)



εικ. 3.1. Τοποθέτηση των περιοχών συχνοτήτων και των κρίσιμων ζωνών πάνω στη βασική μεμβράνη του κοχλία.

Η κρίσιμη ζώνη για συχνότητες κάτω από 200Hz έχει εύρος περίπου 90 Hz, ενώ το εύρος της αυξάνεται με την συχνότητα και φθάνει περίπου τα 900 Hz στην συχνότητα των 5000 Hz. Το εύρος της είναι περίπου το 1/3 της οκτάβας και αντιστοιχεί σε περίπου σταθερό μήκος της βασικής μεμβράνης 1,2 mm, στο οποίο υπάρχουν περίπου 1300 αγγεία.

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε 24 κρίσιμες ζώνες (critical bands), την κεντρική τους συχνότητα (center frequency) και το εύρος ζώνης σε Hz και % (classical bandwidth).

Η θεωρία της κρίσιμης ζώνης εξηγεί ορισμένα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την συνήχηση δύο ήχων (*διακροτήματα*, *συμφωνία*) *διαφωνία* ή *φαινόμενο μάσκας*). Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται στην αλληλεπίδραση ή μη των διεγερμένων περιοχών της Βασικής μεμβράνης.

Π.χ. στην περίπτωση των διακροτημάτων, όπου δύο ήχοι έχουν μικρή διαφορά στις συχνότητες τους, συμβαίνει οι δύο συχνότητες να διεγείρουν την ίδια περιοχή κρίσιμης ζώνης, έτσι ώστε να μην στέλλονται διαφορετικά μηνύματα στον εγκέφαλο. Όταν όμως η διαφορά αρχίσει να μεγαλώνει μεταξύ των συχνοτήτων, οι τόνοι αρχίζουν να γίνονται πιο διαχωρισμένοι διότι διαφορετικές συχνότητες διεγείρουν διαφορετικές περιοχές τριχοφωρον κυττάρων πάνω στη βασική μεμβράνη.

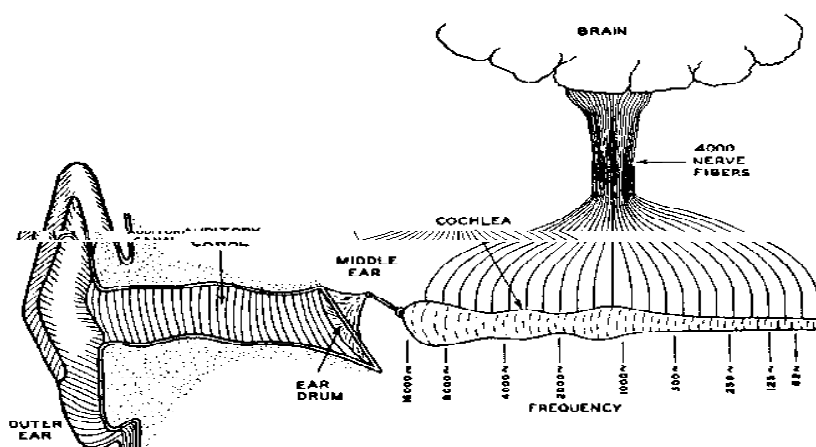
Table 2-1 Critical Bandwidths of the Human Ear

Critical Band No.	Center Frequency	Classical Bandwidth (Hz)	%	Equivalent Rectangular Band (ERB), Hz
1	50	100	200	33
2	150	100	67	43
3	250	100	40	52
4	350	100	29	62
5	450	110	24	72
6	570	120	21	84
7	700	140	20	97
8	840	150	18	111
9	1000	160	16	130
10	1170	190	16	150
11	1370	210	15	170
12	1600	240	15	200
13	1850	280	15	220
14	2150	320	15	260
15	2500	380	15	300
16	2900	450	16	350
17	3400	550	16	420
18	4000	700	18	500
19	4800	900	19	620
20	5800	1100	19	780
21	7000	1300	19	990
22	8500	1800	21	1300
23	10500	2500	24	1700
24	13500	3500	26	2400

εικ. 3.2. Κρίσιμες ζώνες της Βασικής μεμβράνης

Για να αποσαφηνίσουμε τον μηχανισμό επιλογής συχνοτήτων από τα όργανα Corti θα επιστήσουμε την προσοχή μας στο μηχανισμό της ακοής όπου το αυτί πρέπει να κάνει διάκριση μεταξύ υψηλής και χαμηλής συχνότητας.

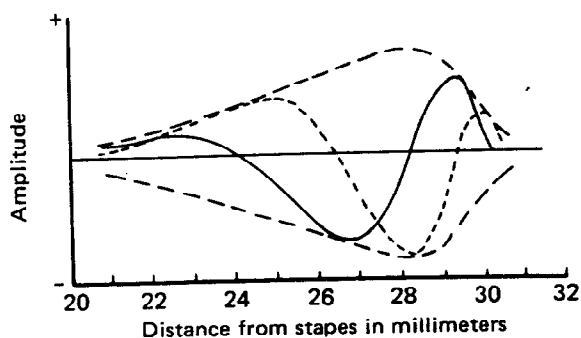
Η διάκριση αυτή γίνεται όταν το αυτί θέτει σε κίνηση τη Βασική μεμβράνη που αποτελεί το ένα από τα δύο τοιχώματα του κοχλιακού πόρου.



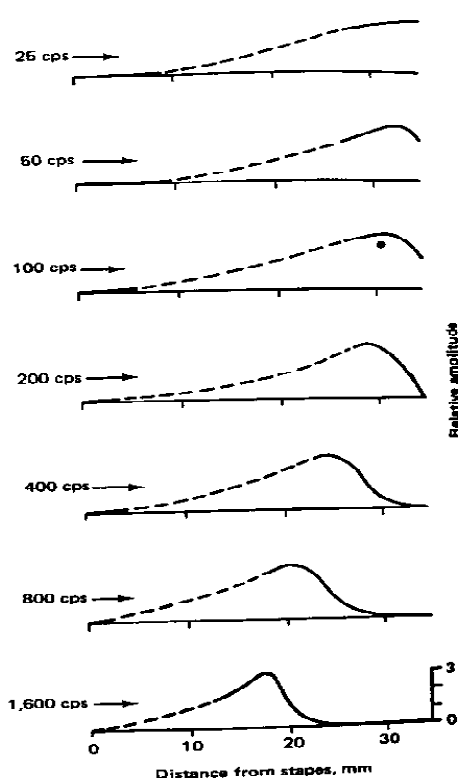
εικ.3.3. Νευρικές ίνες που ξεκινούν από την βασική μεμβράνη και καταλήγουν στον εγκέφαλο.

Η μεμβράνη είναι λεπτή και τεντωμένη στο άκρο της κοντά στον αναβολέα και χοντρή και χαλαρή στο άλλο άκρο. Κύματα υδραυλικής πίεσης στον κοχλία προκαλούν στη βασική μεμβράνη μια κυματοειδή ρυτίδωση που κινείται από το τεντωμένο προς το χαλαρό άκρο. Οι υψηλοί τόνοι δημιουργούν τις κορυφώσεις τους εκεί όπου η μεμβράνη είναι τεντωμένη, ενώ οι χαμηλοί τόνοι εκεί όπου το τοίχωμα είναι χαλαρό. Η θέση της υψηλότερης κορυφής έχει σημασία επειδή καθορίζει ποιές νευρικές ίνες θα στείλουν τα τελικά ηχητικά κύματα προς τον εγκέφαλο. (εικ. 6.8 και 6.9.)

Πιο συγκεκριμένα η συχνότητα του ήχου καθορίζει σε πίο σημείο του κοχλιακού πόρου το κύμα του θα έχει τη μεγαλύτερη του ένταση.



εικ. 3.4. Μετατόπιση του κοχλιακού διαμερισμού για συχνότητα 200 Hz σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές με διαφορά φάσης 90° .



εικ. 3.5. Τρόποι ταλάντωσης του κοχλιακού διαμερισμού για επτά διαφορετικές συχνότητες (cps= cycles per second--> Hz).

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα ότι οι κορυφώσεις της ταλάντωσης βρίσκονται στην αρχή της βασικής μεμβράνης κοντά στην Ωοειδή Θύρα για τις υψηλές συχνότητες, ενώ για τις χαμηλές συχνότητες βρίσκεται σε πιο απομακρυσμένες περιοχές.

3.2. Αντίληψη της έντασης

Κλασικό παράδειγμα των όσων αναφέραμε, στο προηγούμενο κεφάλαιο, περί λογαρίθμων αποτελεί ο νόμος *Fechner Weber*, που περιγράφει μαθηματικά την σχέση ανάμεσα σ' ένα ερέθισμα και την αίσθηση που το προκαλεί.

Ετσι αν εφαρμόσουμε αυτον τον νόμο απο την Ψυχολογία στην Ακουστική έχουμε:» η ενταση A του ακουστικού αισθήματος ειναι λογαριθμικά αναλογη της έντασης E ενός ήχου που το προκαλεί».

$$A = \kappa \log E$$

που κ μια σταθερά, εξαρτωμένη από την συχνότητα του ήχου και τον αποδέκτη του ερεθίσματος.⁹

Η σχέση αυτή προέκυψε ύστερα από πειράματα των Γερμανών επιστημόνων E. Weber (1795-1878) και του G.T. Fechner (1801-1887), που έδειξαν ότι μια σειρά ερεθισμάτων (οπτικών, ακουστικών κτλ.) τα οποία μπορούν να μετρηθούν και αυξάνουν κατά γεωμετρική πρόοδο, προκαλούν μια σειρά αισθημάτων που αυξάνουν κατά αριθμητική πρόοδο.

Η Θεωρία του Fechner δεν εξηγούσε όμως τα αποτελέσματα των απλών δοκιμασιών ακροάσεως. Οι μηχανικοί οι οποίοι ανέπτυξαν την επιστήμη της Ακουστικής είχαν ανάγκη από ένα μέσο μέτρησης της αντίληψης του ήχου. Για ένα διάστημα η ανάγκη αυτή φάνηκε ότι είχε ικανοποιηθεί με τη μονάδα μέτρησης *ντεσιμπέλ*, που μετρά ηχητική ενέργεια σε λογαριθμικές μονάδες, και πρόσφερε μια άμεση εφαρμογή του νόμου του Fechner-Weber. Αλλά ήταν φανερό σε οποιοδήποτε ακροατή ότι το υποκειμενικό αίτημα έντασης ενός ήχου 100db δεν ήταν το μισό της υποκειμενικής έντασης ενός ήχου 50 db. Στην ουσία η αντίληψη ήχου έντασης 100 db (θόρυβος αεριωθούμενου που πετά σε ύψος 300m) είναι περίπου 30 φορές μεγαλύτερη για το ανθρώπινο αυτί από έναν ήχο έντασης 50 db (ήσυχος βόμβος ενός αναγνωστηρίου βιβλιοθήκης).

Γύρω στα 1930 ερευνητές σε αρκετά εργαστήρια άρχισαν να μελετούν μια νέα κλίμακα ακουστότητας, που ανταποκρινόταν με μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαβαθμίσεις του μέγεθους των ακουστικών αισθήσεων. Τα πειράματα έλαβαν μέρος στο Πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ, και η νέα κλίμακα υποκειμενικής αντίληψης της έντασης ονομάζεται *κλίμακα των sones*, στην οποία θα αναφερθούμε λεπτομερέστερα παρακάτω.

3.2.1. Ακουστότητα (Loudness)

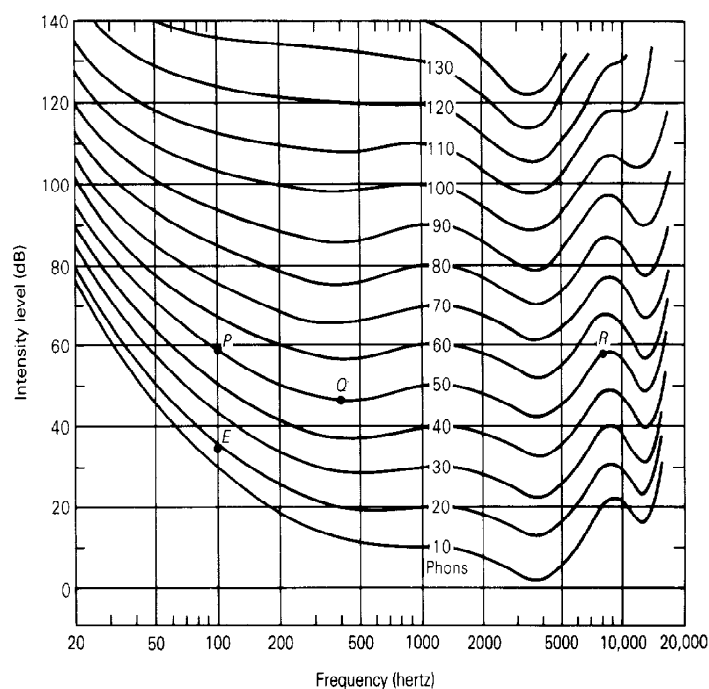
Είναι το μέγεθος της ακουστικής αντίληψης που δημιουργεί η ένταση στον ακροατή, εξαρτάται από την ακουστική πίεση και μεταβάλλεται με την συχνότητα, το αρμονικό φάσμα και την διάρκεια του ήχου. Μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το *phon*.

Μονάδα μέτρησης στάθμης ακουστότητας και ισοακουστικές καμπύλες Fletcher-Munson

1 Phon: είναι μια μονάδα *στάθμης ακουστότητας* L_L που στη συχνότητα αναφοράς 1000 Hz είναι ίση με τη στάθμη ακουστικής πίεσης L_p και αντιστοιχεί σε 1 db.⁹

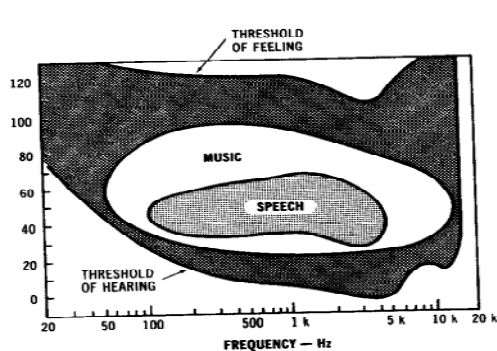
Η σχέση μεταξύ ακουστότητας και συχνότητας, όπως επίσης η διαφορά στις μονάδες μέτρησης db και phon τις βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα (ισοακουστικές καμπύλες για ημιτονοειδείς ήχους), στην ημιλογαριθμική κλίμακα του *Fletcher - Munson*. Παρατηρείστε την αναισθησία του αυτιού στις πολύ χαμηλές συχνότητες.

⁹! 1 decibel είναι μια σχετική μονάδα σύγκρισης εντάσεων (I και I_0) μεταξύ δύο ήχων και αποτελεί μια μονάδα σύγκρισης για την ακουστική και ηλεκτρακουστική διότι δίνει έναν αριθμό που στηρίζεται σε φυσικά μεγέθη..



εικ.3.6. Ισοακουστικές καμπύλες Fletcher-Munson. Παρατηρούμε ότι κάθε καμπύλη εκφράζει την στάθμη ακουστότητας σε phons και πλησιάζει τη στάθμη έντασης (σε db) μόνο όταν η συχνότητα είναι 1000 Hz.

Παρατηρούμε επίσης στο παραπάνω σχήμα ότι για συχνότητες 100 Hz στάθμης έντασης 20 db το αυτί μας δεν αντιδρά στο ερέθισμα, δότι είναι έξω απο το πεδίο ακουστότητας. Το κατώφλι ακουστότητας (Threshold of audibility) και το όριο πόνου καθορίζουν το πεδίο ακουστότητας που σκιαγραφείται από τις ισοακουστικές καμπύλες των phons. Στο παρακάτω σχήμα που εκφράζει το πεδίο ακουστότητας (είναι το ίδιο με το διάγραμμα Fletcher-Munson χωρίς τις καμπύλες ακουστότητας) παρατηρούμε ότι η ομιλία (speech) χρησιμοποιεί την περιοχή συχνοτήτων μέχρι 100 και 5000 Hz που εκτείνεται μεταξύ 30 και 70 db.



εικ.3.7. Πεδίο ακουστότητας των ήχων.

3.1.2. Μονάδα μέτρησης ακουστότητας και κλίμακα των sones

1 sone είναι η ακουστότητα που παράγει ένας απλός τόνος 1000Hz με στάθμη 40 phon.

Το sone έρχεται, σαν μονάδα ακουστότητας, καθαρά υποκειμενικής φύσης, να καλύπτει τα κενά πληροφοριών που μας δίνουν τα phon, για την υποκειμενική ένταση των ήχων. Δηλ. καλύπτει ερωτήματα της φύσης πότε

ένας ήχος είναι διπλάσιος από τον άλλο έτσι ώστε τα 2 sones να ηχούν με διπλάσια ακουστότητα από το 1 sone, εν αντιθέσει με τα phons.

Π.χ. όταν η στάθμη ακουστότητας αυξάνεται κατά 10 phons, τότε η ακουστότητα διπλασιάζεται από 8 sones στα 16 sones αντίστοιχα.

Έτσι για να διπλασιαστεί η ακουστότητα του ήχου που παράγει ένα βιολί ή να αυξηθεί η στάθμη κατά 10 phons, πρέπει να συνηχήσουν μαζί 10 βιολιά (τα οποία παίζουν εξ ίσου δυνατά και την ίδια νότα με το αρχικό βιολί).

Μεταφρασμένα σε μαθηματικούς όρους, τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η αίσθηση της ακουστότητας αυξάνει με πολλαπλασιασμό (όχι με πρόσθεση όπως υπέθεσε ο Fechner), και ότι ο πολλαπλασιαστικός παράγων είναι μια δύναμη (εκθέτης) ηχητικών εντάσεων. Στη βραχύτερη μαθηματική μορφή «ο νόμος της δυνάμεως» ορίζει ότι η ακουστότητα αυξάνει με την ένταση υψούμενη σε μια δύναμη.

Ο εκθέτης ή ο πολλαπλασιαστικός παράγων για την ακουστότητα είναι περίπου 0.3.

Μια αύξηση 10 ντεσιμπέλ στην ένταση ενός ήχου αυξάνει το επίπεδο των sones κατά $10^{0.3}$. Μια δεύτερη αύξηση κατά 10 db αυξάνει το αρχικό επίπεδο των sones κατά $2 \cdot 10^{0.3}$ και ούτω καθεξής.

Εκθέτης μικρότερος του 1 σημαίνει ότι η ακουστότητα αυξάνει περισσότερο αργά από την φυσική ένταση.

Η κλίμακα των sones έχει εγκριθεί από την Διεθνή Οργάνωση Μέτρων και Σταθμών και οι μηχανικοί την εφαρμόζουν στην ανάπτυξη μεθόδων υπολογισμού της ακουστότητας κατευθείαν από το μετρούμενο φάσμα ενός θορύβου. Πολύπλοκα όργανα καταμέτρησης διασπών τον ήχο σε ξεχωριστές ομάδες συχνότητας, μετρούν τη στάθμη έντασης με db και εν συνεχεία μετατρέπουν αυτές τις στάθμες έντασης σε μεγέθη ακουστότητας με την βοήθεια της κλίμακας των sones.

Σχέση μεταξύ phons και sones: καθορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

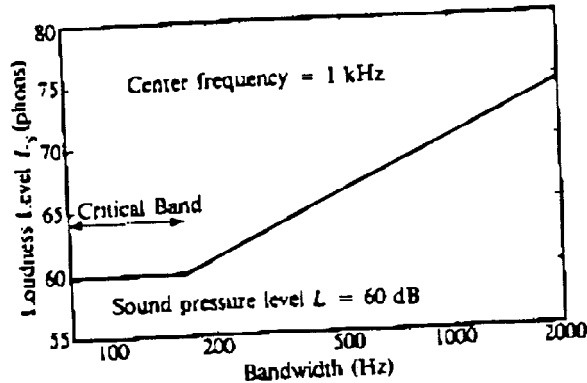
$$S = 2(L_L - 40) / 10 \quad (7.1.)$$

όπου S η μονάδα sone και L_L η στάθμη ακουστότητας (σε phons).

3.2. Ακουστότητα σύνθετων τόνων

Η κρίσιμη ζώνη και η διαφορά ακουστότητας μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων οφείλεται στην *μη γραμμική συμπεριφορά του αυτιού που εντοπίζεται στον κοχλία και κυρίως στην βασική μεμβράνη*.

Η αλλαγή συμπεριφοράς της βασικής μεμβράνης μας δίνει την αίσθηση της πτώσης του ύψους χαμηλών τόνων (κάτω από 1000Hz) ή της ανόδου του ύψους υψηλών τόνων (πάνω από 2000Hz) όταν η ακουστότητα τους αυξάνεται πάνω από τα 40 phons. (εικ.7.3.)



εικ. 3.8. Σχέση μεταξύ στάθμης ακουστότητας (σε phons) και εύρους κρίσιμης ζώνης της βασικής μεμβράνης σε Hz, για ήχο κεντρικής συχνότητας 1000Hz και στάθμης ηχητικής πίεσης 60db.

3.3. Το φαινόμενο της μάσκας η απόκρυψης

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εάν δύο τόνοι ίδιας η διαφορετικής συχνότητας συνηχούν, ο ισχυρότερος καλύπτει τον ασθενέστερο. Ένας ήχος με αρκετή ένταση μπορεί να μην είναι ακουστός αν κάποιος ισχυρότερος εμφανιστεί. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αλληλεπικάλυψη των διεγερμένων περιοχών της βασικής μεμβράνης. Όταν στον ακροατή παρουσιάζονται περισσότεροι από ένας τόνοι, η αντιληπτή ακουστότητα ποικίλλει με τη συχνότητα και τις σχέσεις του πλάτους μεταξύ των τόνων. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της απόκρυψης, δηλαδή η επικάλυψη ενός σήματος από θόρυβο.

Όταν η ισχύς του ακουστικού σήματος εξασθενεί, κάτι που πρακτικά συμβαίνει στις υψηλές συχνότητες (υψηλές αρμονικές), τότε ο θόρυβος επειδή επεκτείνεται σε όλο το ακουστικό φάσμα, γίνεται αντιληπτός και μπορεί ακόμη και να καλύψει το σήμα (γι' αυτό ακούγεται το φύσημα). Το φαινόμενο αυτό ισχύει και αντίστροφα οπότε ένα ισχυρότερο ακουστικό σήμα μπορεί να καλύψει το θόρυβο.

Η ευαισθησία του πλάτους οφείλεται στην κούραση των νευρώνων στη βασική μεμβράνη. Έτσι η παρουσία ενός δυνατότερου τόνου, ένας απαλός τόνος ίσως δεν ακουστεί καθόλου. Το κατώφλι ακουστότητας της απόκρυψης καθορίζεται από το επίπεδο του πλάτους στο οποίο ο απαλότερος τόνος εξαφανίζεται και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορά της συχνότητας μεταξύ των τόνων, το πλάτος του ισχυρότερου τόνου και ως μικρότερο βαθμό από τη συχνότητα του ισχυρότερου τόνου. Η απόκρυψη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν ο τόνος καταλαμβάνει την ίδια κρίσιμη ζώνη. Σε πολλές περιπτώσεις, ο τόνος που έχει πλάτος μόνο 15 με 10 db λιγότερα από ένα δυνατότερο τόνο δεν θα γίνει αντιληπτός.

Όταν ο τόνος βρίσκεται αρκετά κοντά στη συχνότητα για να προκαλέσει διακροτήματα, το κατώφλι ακουστότητας της απόκρυψης μειώνεται ελάχιστα. Για δύο δυνατούς τόνους έξω από της ίδια κριτική ζώνη, ο τόνος με τη χαμηλότερη συχνότητα αποκρύπτεται πιο εύκολα από τον επάνω. Ήχοι χαμηλού πλάτους έξω από την κρίσιμη ζώνη, γενικά δεν αποκρύπτονται ο ένας από τον άλλο.

Η απόκρυψη δεν συμβαίνει μόνο σε ταυτόχρονους τόνους, αλλά επίσης σε τόνους που συμβαίνουν διαδοχικά. Κάτω από πολλές περιπτώσεις η κούραση των νευρώνων προκαλείται από ένα δυνατότερο, προηγούμενο τόνο που μπορεί να επηρεάσει την αντίληψη ενός απλούτερου, επακόλουθου τόνου.

Γενικά συμπεραίνουμε ότι στο φαινόμενο μάσκας:

οι απλοί ήχοι (τόνοι) υψηλής συχνότητας καλύπτουν πιο αποτελεσματικά από τόνους χαμηλής συχνότητας.

όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του τόνου που επικαλύπτει τον άλλο, τόσο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων μπορεί να καλύψει.

εάν δύο τόνοι είναι αρκετά απομακρυσμένοι, στο πεδίο συχνοτήτων, τόσο μικρότερη είναι η επικάλυψη. κτλ...

Τό θέμα της απόκρυψης έχει μεγάλη σπουδαιότητα στην μουσική όπου ο ήχος ενός οργάνου μπορεί να καλύψει τον ήχο ενός άλλου, αν το κάθε όργανο δεν δίνει την κατάλληλη ένταση ήχου.

3.3. Αντίληψη του τονικού ύψους

3.1.1. Ορισμός του ύψους

Υψος είναι εκείνο το χαρακτηριστικό γνώρισμα, βάσει του οποίου οι ήχοι μπορούν να διαταχθούν σε μια μουσική κλίμακα. Εξαρτάται από την θεμελιώδη συχνότητα και εκφράζει το «υψηλό» ή «χαμηλό» για την ανθρώπινη αντίληψη.

Μια πρώτη προσέγγιση είναι ότι το ύψος ενός ήχου είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους της χορδής που το παράγει. Μετά όμως από εργαστηριακές εργασίες παρατηρήθηκε ότι η αίσθηση του ύψους ενός ήχου σταθερής συχνότητας εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους: ένταση, θέση της συχνότητας στην ακουστή περιοχή, διάρκεια, ηχώχρωμα κτλ.

Το ανθρώπινο αντί αντιλαμβάνεται συχνότητες μεταξύ 16Hz και 20KHz. Παρατηρείται όμως μια μείωση της ακοής με την ηλικία (12Hz - 8KHz). Προστασία του αυτιού από άχρηστους ήχους του περιβάλλοντος (ως και 2000 KHz).

Ο ανθρώπινος μηχανισμός ακοής δεν μπορεί να μετρήσει άμεσα τη συχνότητα ταλάντωσης ενός ηχητικού κύματος όπως γίνεται με ένα μηχάνημα.

Ο διαμερισμός της *κοχλιακής μεμβράνης* αντιστοιχεί περίπου στο λογάριθμο της συχνότητας, όπως τονίσαμε ήδη στο κεφάλαιο 7. Στη μέση είναι πιο εκτεταμένο, γι αυτό και η καλύτερη αναγνώριση διαφοράς τονικού ύψους βρίσκεται μεταξύ 1000 και 3000 Hz ($0.3\% = 1/40$ του τόνου)

3.1.2. Αίσθηση του ύψους και διάρκεια

Ανάμεσα από τον *φυσικό χρόνο* μετρημένο σε δευτερόλεπτα και τον *ψυχολογικό χρόνο*, οι διαφορές μπορεί να είναι τεράστιες.

Η αίσθηση του ύψους σε σχέση με την διάρκεια, εξαρτάται από την ψυχολογική μας κατάσταση και τη διάθεση της στιγμής, που είναι συνάρτηση με τη σειρά τους της λειτουργίας του οργανισμού μας.

Οι χτύποι της καρδιάς και ο αναπνευστικός ρυθμός παίζουν μεγάλο ρόλο.

Ελάχιστος χρόνος αντίληψης: (JND: *Just noticeable difference*) είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα από την στιγμή που ένα ερέθισμα διεγείρει το αισθητήριο όργανο μέχρι τη στιγμή που ο άνθρωπος συνειδητοποιεί τι του συμβαίνει. Ο χρόνος αυτός είναι περίπου 50 ms και είναι καθοριστικός για τη διάκριση ηχητ. γεγονότων ανάλογα με την συχνότητα και την διάρκεια των ήχων.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορετική ελάχιστη διάρκεια των ήχων για διαφορετικές συχνότητες :

Ένας ήχος 50 HZ διαρκεί 60 ms. (3 περιόδους) και ένας ήχος 800kHz διαρκεί 13 ms (10 περιόδους).

Πρακτικά, ο χρόνος που χρειάζεται το ανθρώπινο αυτί για να δημιουργήσει μια σταθερή εντύπωση, είναι μεγαλύτερος 2 με 3 φορές από τον ελάχιστο χρόνο αντίληψης, δηλ. είναι περίπου 100 με 150 ms.

Φαινόμενα που σχετίζονται με την αντίληψη ελάχιστης διάρκειας του ήχου.

Ηχώ: Όταν οι ανακλάσεις ενός ηχητικού κύματος απέχουν χρονικά περισσότερο από 50 ms από τον αρχικό ήχο, τότε γίνονται ξεχωριστά αντιληπτές και δημιουργούν την ηχώ.

Αντήχηση: Όταν οι ανακλάσεις αυτές απέχουν λιγότερο από 50 ms, γίνονται αντιληπτές σαν συνέχεια του αρχικού ήχου και δημιουργούν το βάθος χώρου (reverb).

Τέλος, δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε το ύψος της νότας όταν παίζουμε πάνω από 10-12 νότες το λεπτό.

Vibrato: γρήγορη μικρή ταλάντευση του τονικού ύψους με 6-7 κυματισμούς το λεπτό.

Το vibrato παίζει ρόλο στην αντίληψη του τονικού ύψους διότι είναι άμεσα συνδεδεμένο με την λειτουργία των νεύρων και δίνει την αίσθηση του «πιο δυνατού ήχου» εκμεταλλεύοντας τις ιδιότητες του νευρικού και ακουστικού μας συστήματος.

Παίζει μεγάλο ρόλο στις Ethnic music (φωνές με vibrato, παραδοσιακά όργανα με vibrato, για να δώσουν μεγαλύτερη έμφαση στο τονικό ύψος.).

3.1.3. Αντίληψη του ύψους και ένταση

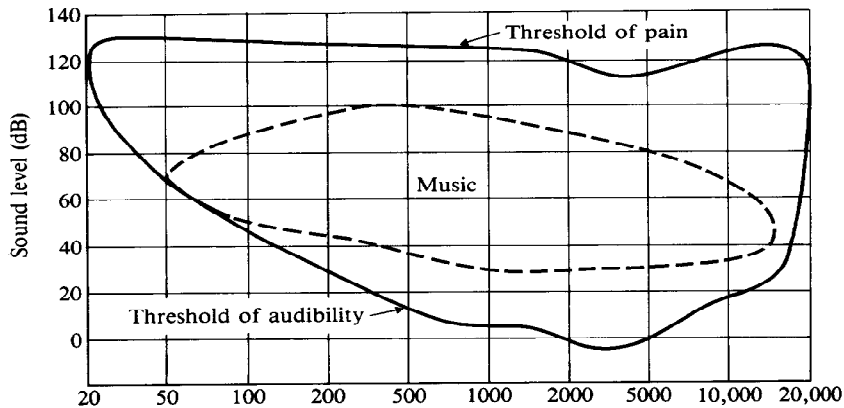
Για τους ημιτονοειδείς ήχους

Όταν η ένταση ενός ήχου αυξάνεται άνω των 40 phon ενώ η συχνότητα του παραμένει σταθερή δίνεται η εντύπωση στον ακροατή ότι το ύψος αλλάζει.

Κάτω από 1 kHz η αύξηση της έντασης προκαλεί την αίσθηση ότι ο ήχος πέφτει. Πάνω από 2 kHz ή αύξηση της έντασης δημιουργεί την αίσθηση ότι το ύψος ανεβαίνει.

Μόνο η περιοχή μεταξύ 1 και 2 kHz είναι ανεξάρτητη των μεταβολών έντασης.

Για τους σύνθετους ήχους το αυτί μας έχει ένα μέσο όρο. Για αυτό οι σύνθετοι ήχοι με πολλές αρμονικές δεν αποκλίνουν σε ύψος όταν αλλάζουμε την ένταση τους.



εικ. 3.1. Πεδίο ακουστότητας ήχων. Σχέση στάθμης έντασης (db) και συχνοτήτων. Παρατηρούμε ότι τα άκρα καθορίζονται από το κατώφλι ακουστότητας και το όριο πόνου.

3.1.4. Ψυχοφυσική κλίμακα των mels.

Με μια γεννήτρια ημιτονοειδών κυμάτων καταλαβαίνουμε ότι αν διπλασιάσουμε την συχνότητα ενός ηχού δεν ακούμε πάντα την οκταβα στίς υψηλές συχνότητες.

Για αυτό κατασκευάστηκε η ψυχοφυσική κλίμακα των Mels .

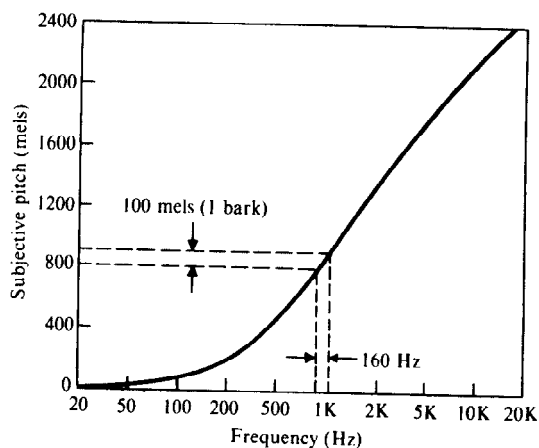


FIG. 7.1

Pitch scale vs. frequency scale. On the pitch scale, 100 mels is 1 bark.

εικ. 3.2. Κλίμακα των Mels για την μέτρηση του υποκειμενικού ύψους των ήχων.

Για τους σύνθετους ήχους, ένας ήχος π.χ. 200 Hz που έχει 20 αρμονικούς, δεν ακολουθεί κατ' ανάγκη ένα τόσο απλό κανόνα καθώς κάθε αρμονικός τοποθετείται διαφορετικά στην κλίμακα των Mels.¹⁰

Αυτό εξηγεί ίσως γιατί οι σύνθετοι ήχοι με πολλούς αρμονικούς δίνουν το αίσθημα της διαφωνίας. Καταλαβαίνουμε επίσης γιατί οι κουρδιστές πιάνων δεν

¹⁰Το mel είναι μονάδα υποκειμενικού ύψους.

χρησιμοποιούσαν το ακουστικό στροβοσκόπιο με τους πίνακες τών συχνοτήτων, αλλά βασίζονται περισσότερο στο αυτί τους.

3.1.5. Ο «μύθος» του απόλυτου αυτιού (Absolute Pitch)

Τα φαινόμενα που σχετίζονται με το απόλυτο αυτί σχετίζονται με την σπουδαιότητα της οκτάβας, την εσωτερική δομή μιας κλίμακας (δωδεκαφθογγικό τονικό σύστημα) και την ιεραρχική φύση του συστήματος.

Οι επιστήμονες μελέτησαν το απόλυτο αυτί τα τελευταία 75 χρόνια .

Υπάρχουν 4 διαφορετικές θεωρίες:

- *Θεωρία της Κληρονομικότητας*: εκμάθηση ονομάτων των νοτών όπως ακριβώς και τα χρώματα.
- *Θεωρία εκμάθησης*. Ο καθένας μας μπορεί να κατέχει» απόλυτο αυτί « με καλή εξάσκηση.
- *Θεωρία μη μάθησης* : Είναι πιο εύκολο για τα παιδιά της προσχολικής ηλικίας να αποκτήσουν «απόλυτο αυτί» (βάσει συστηματικής εξάσκησης βέβαια) κάνοντας συνεχείς συγκρίσεις μεταξύ σχετικών υψών των νοτών.

--- *Θεωρία της αποτύπωσης*: Όλα τα παιδιά μπορούν να ξεχωρίζουν το απόλυτο ύψος στην νηπιακή ηλικία...

Το θέμα του απόλυτου αυτιού παραμένει ένα επίμαχο θέμα για τους επιστήμονες λόγω της φανεράς δυσκολίας πειραματισμού με μεμονωμένες περιπτώσεις ατόμων.

Εαν κάποιος , παρ' όλα αυτά θέλετε το παιδί του να αποκτήσει απόλυτο αυτί ας πειραματιστεί, ξεκινώντας το συντομότερο δυνατό (απο την ηλικία των 2 1/ 2 -3 χρόνων) να το εξασκεί με την εύρεση νοτών στο πιάνο σαν μουσικό παιχνίδι.

3.1.6. Τονικός χαρακτήρας

Το απόλυτο αυτί σχετίζεται επίσης με έναν άλλο παράγοντα, εκτός απο το τονικό ύψος , που είναι ο *τονικός χαρακτήρας* σε σχέση με την θέση του μέσα στην οκτάβα.

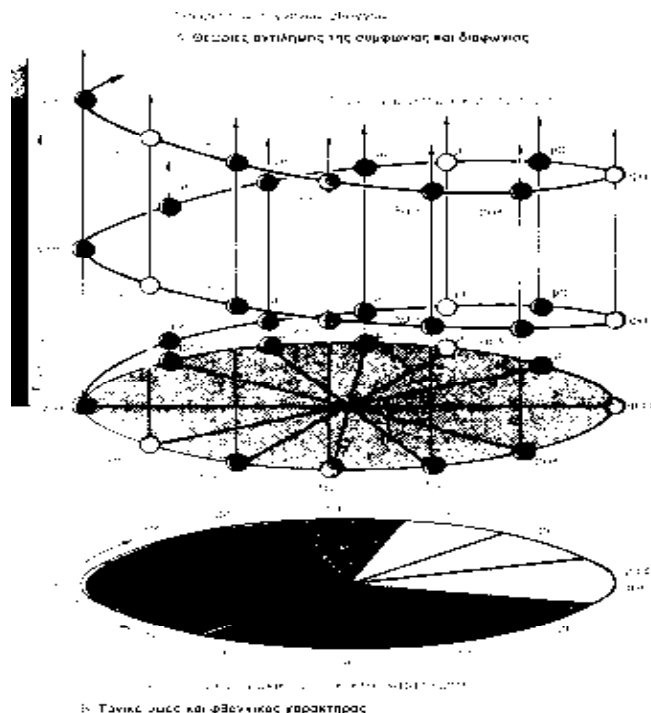
Η κλίμακα συχνοτήτων δεν ακούγεται σαν μια σειρά ισάξιων ποιοτήτων, αλλά διέπεται απο το φαινόμενο της οκτάβας κατα το οποίο αναγνωρίζονται κάποιες ιδιότητες του Ντο3 στο Ντο4 κτλ..

Ο *τονικός χαρακτήρας (chroma)* των φθόγγων, με απόσταση πολλαπλάσια της οκτάβας παραμένει αισθητά ίδιος παρα τη διαφορά ύψους.

Συνεπώς σε ένα φθόγγο διακρίνεται το *τονικό του ύψος (tone height)* και ο *τονικός του χαρακτήρας (chroma)* σε σχέση με την θέση του μέσα στην οκτάβα, που καθορίζει την *οκταβική του ταυτότητα*.

Ταξινομώντας τους τονικούς χαρακτήρες κατά ακουστική ομοιότητα προκύπτει ο κύκλος κατα πέμπτες. Τοποθετώντας τους φθόγγους σε μια χρωματική σειρά απο ημιτόνια, σχηματίζεται μια σπείρα στην οποία κάθε φθόγγος έχει το ίδιο χρώμα και βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τους κατ' οκτάβα συγγενείς του.

Στο παρακάτω σχήμα ο τονικός χαρακτήρας αντιστοιχεί με νότα του ίδιου ονόματος. Τοποθετώντας τους φθόγγους σε μια χρωματική σειρά απο ημιτόνια, σχηματίζεται μια σπείρα στην οποία ο κάθε φθόγγος έχει το ίδιο χρώμα και βρίσκεται στη ίδια ευθεία με τους κατ' οκτάβα συγγενείς του.



εικ. 3.3. Τονικό ύψος και φθογγικός χαρακτήρας

3.1.7. Αίσθηση του ύψους και ηχώχρωμα

Η μεταβολή της αίσθησης του ύψους οφείλεται επίσης σε μερικές αλλαγές του ηχοχρώματος όπως π.χ.αφαίρεση αρμονικών απο το φάσμα του ήχου που οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες (όπως απορρόφηση- φιλτράρισμα).

Όταν με τεχνητά μέσα αφαιρέσουμε απο τον ήχο μερικές παράγωγες χαμηλές η υψηλές , το ύψος του αλλάζει ακουστικά . Αυτό το φιλτράρισμα μπορεί να προέλθει απο την απορρόφηση μερικών συχνοτήτων απο τις κουρτίνες του χώρου συναυλιών κτλ..

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης , δηλ. της επίδρασης της ποιότητας του ηχοχρώματος στην αντίληψη του τονικού ύψους είναι η περίπτωση του όμποε : το όμποε δίνει το λα της ορχήστρας (σύμφωνα με αυτό κουρδίζονται τα υπόλοιπα όργανα της ορχήστρας) διότι έχει ένα ηχο πλούσιο σε αρμονικές (ισοκατανεμημένες στις υψηλές και χαμηλές περιοχές) και μας δίνει μια ακριβή αίσθηση του ύψους.

Η αίσθηση του ύψους καθορίζεται επίσης απο την κατανομή των παραγώγων συχνοτήτων στο φάσμα (Ιση η όχι απόσταση μεταξύ των αρμονικών η μη αρμονικών γραμμών ενός φάσματος.)

Σε μια άλλη περίπτωση οι ηλικιωμένοι με διάφορες μορφές εγκεφαλικής ασθένειας δεν αντιλαμβάνονται όλες τις συχνότητες του αρμονικού φάσματος με αποτέλεσμα να μην ακούν το σωστό τονικό ύψος. π.χ. ο G.Fauré άκουγε τα πάντα λάθος (μετατοπισμένα κατά ένα τόνο) όταν είχε φτάσει σε προχωρημένη μορφή η ασθένεια του (όγκος στον εγκέφαλο).

3.1.8. Θεωρίες για την αντίληψη του ύψους-

Όταν μια συχνότητα διεγείρει το αυτί θέτει σε ταλάντωση το τύμπανο, μετά την ωοειδή θύρα και τέλος—κατά μήκος της *βασικής μεμβράνης*—διεγείρει μια περιοχή κυττάρων.

Η αίσθηση του ύψους εξαρτάται από:

- α) την θέση αυτής της περιοχής
- β) από το σημείο μέγιστης διέγερσης
- γ) σημείο εκκίνησης των ηλεκτρικών παλμών (διεγερμένα κύτταρα)
- δ) πυκνότητα των παλμών στο χρόνο

Αν η συχνότητα διπλασιαστεί, τότε η διεγερμένη περιοχή βρίσκεται μετατοπισμένη κατά 4 mm, σε σχέση με την προηγούμενη θέση της.

Από τα 500-1000 Hz, 1000-2000 Hz η μετατόπιση είναι σταθερή δηλ. ο λόγος συχνοτήτων και όχι η διαφορά καθορίζει την μετατόπιση.

Πάνω από τα 500Hz η σχέση του μήκους της μεμβράνης και των περιοχών που αντιστοιχούν σε συχνότητες είναι λογαριθμική, ενώ κάτω από τα 500Hz είναι γραμμική.

α) Place Theory: (θεωρία αντίληψης ύψους)

Η θέση της μέγιστης ταλάντωσης της Βασικής μεμβράνης αντιστοιχεί στο αντιλαμβανόμενο ύψος των απλών τόνων. Κάθε τριχοφόρο κύτταρο και νευρική ίνα έχουν οξεία χαρακτηριστικά περάσματος ζωνών. Όσο πιο υψηλή η συχνότητα που αντιλαμβανόμαστε τόσο πιο κοντά βρίσκεται το κύμα στην ωοειδή θύρα.

Η place theory φαίνεται να διατηρείται στο ακουστικό νεύρο. Οι νευρικές ίνες που αντιστοιχούν σε υψηλότερες συχνότητες βρίσκονται κοντά στην περιφέρεια του ακουστικού νεύρου με μια βαθμιαία μείωση της συχνότητας κρουδίσματος που ανταποκρίνεται στην ίνα βαίνοντας προς το κέντρο των δεσμών των νευρών.

β) Θεωρία ομοβροντίας (Volley theory)

Η κάθε νευρική ίνα μπορεί να μεταδώσει έως και 1000 παλμούς / sec διότι ύστερα από κάθε διέγερση χρειάζεται κάποιο μικρό χρόνο να επανέλθει στην κανονική της κατάσταση. Συνεπώς για συχνότητες άνω των 1000 Hz λειτουργούν παράλληλα περισσότερες της μιάς ακουστικές ίνες για να μεταδώσουν παλμούς που αντιστοιχούν σ' αυτή τη συχνότητα.

3. 2. Σχετικό ύψος: Διαστήματα

3.2.1. Τα διαστήματα και η αρχή της απόστασης

Διάστημα είναι η σχέση μεταξύ των συχνοτήτων δυο δεδομένων ήχων. Τα μουσικά διαστήματα έτσι αντιστοιχούν σε αναλογίες συχνοτήτων π.χ. 440: 220=2:1 (μια οκτάβα).

Εάν υποδιαιρέσουμε την οκτάβα σε 12 ίσα μέρη έχουμε το δωδεκαφθογγικό συγκερασμένο σύστημα. Η υποδιαίρεση δε της οκτάβας (που αναπαρίσταται με την ανολογία 2:1) είναι :

$$\delta = \sqrt[12]{2}$$

αρα $\delta^{12} = 2$ και επομένως $12 = \log_{\delta} 2$ (οπου δ εκφράζει ένα ημιτόνιο δηλ. την σχέση 16:15.). Παρατηρούμε έτσι την λογαριθμική σχέση μεταξύ του αριθμού των διαστημάτων και της οκτάβας (που είναι στην ουσία αναλογία συχνοτήτων).

Διαστημα dk μεταξύ δύο συχνοτήτων f_1 και f_2 : είναι η απόσταση μεταξύ δύο φθόγγων δυό διαφορετικών συχνοτήτων όπου $f_2 > f_1$.

$$dk(f_2, f_1) = k \cdot \log_2(f_2/f_1)$$

Η αρχή της απόστασης: αφορά την ακριβή απόσταση μεταξύ δυο φθόγγων και ενδείκνυται ιδιαίτερα για την περιγραφή των εξωευρωπαϊκών τονικών συστημάτων, δεν μαρτυρεί όμως τίποτα σχετικό με την συγγένεια των φθόγγων μεταξύ τους.

Μονάδες διαστημάτων

Το Savart: Η υποδιαίρεση του τόνου βάσει των Savart στηρίζεται στον ψυχοφυσικό νόμο του Fechner -Weber (η ένταση της ακουστικής αίσθησης είναι ο λογαριθμικός της έντασης του ερεθίσματος).

Αντιπροσωπεύει την μονάδα που αντιστοιχεί στην διαχωριστική ικανότητα του αυτιού να διαρίνει το πιο μικρό διάστημα στις καλύτερες συνθήκες...

$$\begin{aligned} \text{Διάστημα} &: 660/440 = 1,5 \\ \log 1,5 &= 0,17609 \\ 0,17609 \times 1000 &= 176 \text{ savarts.} \end{aligned}$$

Μια οκτάβα έχει 300 savarts, Ο τόνος 50 savarts, Το ημίτονο 25 savarts

Το κόμμα του Holder, κόμμα ίσο 1/9 του τόνου... = 5 savarts

Το cent: Ο Ellis το 1885 καθιέρωσε ως μονάδα μέτρησης το cent όπου ένα ημιτόνιο = 100 cents.

Άρα η υποδιαίρεση της οκτάβας σε cents είναι: $2^{1/1200}$ όπου

$$1 \text{ savart} = 4 \text{ cents} \dots$$

3.2.2. Σχετική αντίληψη διάκρισης του ύψους

Διάκριση ύψους είναι η ελάχιστη διαφορά ύψους που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί και εξαρτάται από τη συχνότητα, την ένταση, τη διάρκεια του τόνου, την αιφνιδιαστική αλλαγή συχνότητας και το εξασκημένο αυτί του ακροατή.

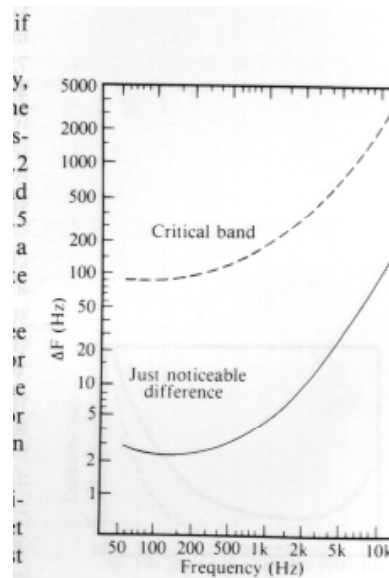


FIG. 7.2

Just-noticeable difference (jnd) in frequency determined by modulating the frequency of a tone at 4 Hz. Note that the jnd at each frequency is nearly a constant percentage of the critical bandwidth. (From Zwicker, Flottorp and Stevens, 1957).

εικ. 8.4. Η μόλις αντιληπτή διαφορά συχνότητας (JND) καθορίζεται διαμορφώνοντας την συχνότητα ενός τόνου στα 4Hz.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τη μέση (πείραμα με 4 ακροατές) ελάχιστη διαφορά αντίληψης ύψους (JND ¹¹of pitch) για απλούς τόνους σε μια ηχοστάθμη 80 db. Απο 1000 Hz έως και 4000 Hz , η ελάχιστη διαφορά αντίληψης είναι περίπου 0.5.% της συχνότητας του απλού τόνου, δηλ. περίπου 1/12 του ημιτόνου.

Παρατηρείστε επίσης ότι η JND σε κάθε συχνότητα πλησιάζει μια σταθερή αναλογία της κρίσιμης ζώνης.

Χαμηλή περιοχή: Απο 65 εως 125 Hz, το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται περίπου 30 διαφορετικά ύψη.

Υψηλή περιοχή: Από 1 εως και 2 KHz αντιλαμβάνεται 280 διαφορετικά ύψη.

Στο όλο ακουστικό φάσμα (16 εως και 20 KHz)το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ακούσει περίπου 1500 διαφορετικές συχνότητες ενώ οι νότες της συγκερασμένης κλίμακας απο La -1= 27, 5 HZ εως και Do 7= 4186 HZ είναι μόνο 88 .

Σύμφωνα με τον E. Leïpp μπορούμε να διακρίνουμε 300 μικρά διαστήματα σε μια οκτάβα(Savarts) , έτσι ώστε να έχουμε 2000 διαβαθμίσεις του ύψους στην ακουστή περιοχή.

Συμπέρασμα: Δεν εκμεταλλευόμαστε πλήρως όλες τις δυνατότητες αναγνώρισης τόνων του αυτιού .

Η σχετική αντίληψη διαφοράς μεταξύ των υψών για τον καθορισμό των διαστημάτων οφείλεται στη *μη γραμμική συμπεριφορά της βασικής μεμβράνης* που μας δίνει την αίσθηση πτώσης του ύψους χαμηλών τόνων (κάτω των 100HZ) ή της ανόδου του ύψους υψηλών τόνων (πάνω από 2000 HZ) όταν η ακουστότητα τους αυξάνεται πάνω απο 40 ρhon. Παρατηρείται επίσης μια συμπίεση των διακριτών υψών. Γι' αυτό ένα διάστημα που παράγεται απο υψηλές νότες ακούγεται μικρότερο απο ένα ίδιο διαστημα που παράγεται απο χαμηλές νότες.

Παρόλο που η ποσοτική διαφορά μεταξύ των παρακάτω διαστημάτων τόνος και ημιτόνιο, είναι η ίδια (8 Hz) εμείς αντιλαμβανόμαστε διαφορετικά την απόσταση.

Παράδειγμα:

Τόνος: Nτο1= 65,4 HZ και Ρε1= 73,4 HZ: Διαφορά 8HZ

Ημιτόνιο : Nτο2 = 130, 6 HZ και Nτο#2 =138, 6 HZ: Διαφορά 8 Hz.

Παρατηρούμε ότι ενώ τα δύο παραπάνω διαστήματα , αντικειμενικά έχουν την ίδια διαφορά συχνοτήτων (8Hz) , το αυτί μας αντιλαμβάνεται το ένα μεγαλύτερο απο το άλλο.

3.4. Συνήχηση τόνων : Συμφωνία και Διαφωνία

3.4.1.Αντίληψη συνήχησης (συμφωνία και διαφωνία)

Τα διαστήματα ανάλογα με την αίσθηση που προκαλούν διακρίνονται σε *εύχη* (σύμφωνα) ή σε *έντονα* (διάφωνα).

Στη περίπτωση της συμφωνίας ο ήχος που προκύπτει απο την συνήχηση είναι απαλός-λείος, ενώ στην διαφωνία ο ήχος είναι σκληρός και τραχύς.

¹¹Just Noticeable difference.

3.4.2. Θεωρίες συνήχησης φθόγγων

Οι σημαντικότερες επεξηγηματικές ακουστικές θεωρίες για την συνήχηση των φθόγγων είναι:

α) Θεωρία *Πυθαγόρα* ή των κλασμάτων ακεραίων αριθμών .

β) Θεωρία των *διακροτημάτων του Helmholtz* : το κριτήριο της συμφωνίας και διαφωνίας εξαρτάται από το αρμονικό περιεχόμενο των τόνων και την παραγωγή διακροτημάτων μεταξύ των αρμονικών τους.

γ) Θεωρία της *κρίσιμης ζώνης του Plomp- Levelt* : θέση συχνοτήτων στο ακουστικό φάσμα όπου ένα διάστημα σύμφωνο σε μια περιοχή συχνοτήτων ενδέχεται να είναι διάφωνο σε κάποια άλλη.

Θα μελετήσουμε αναλυτικότερα την επικρατέστερη όλων που είναι η *θεωρία της κρίσιμης ζώνης*.

3.4.3. Θεωρία Plomp-Levelt η θεωρία της κρίσιμης ζώνης (1965)

Για απλούς ήχους:

Η κρίσιμη ζώνη για *απλούς ήχους (ημιτονοειδείς)* που είναι μικρότεροι των 500Hz, είναι λίγο μεγαλύτερη από 100 Hz. Όμως για υψηλές συχνότητες ημιτονοειδών ήχων η κρίσιμη ζώνη πλησιάζει το *διάστημα τρίτης μικρής*.

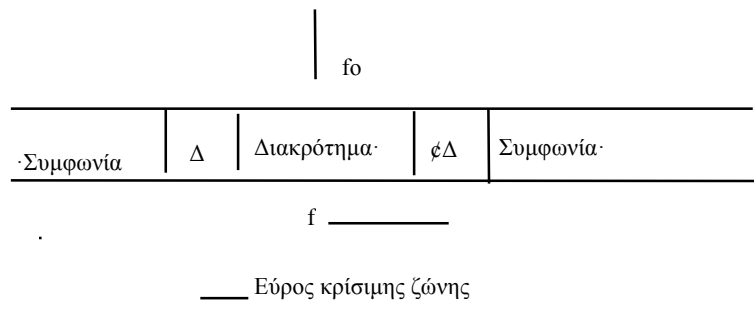
Το παραπάνω φαινόμενο εξηγεί γιατί ίδια διαστήματα μπορούν να ηχούν καθαρά και αρμονικά σε υψηλότερες συχνότητες (και θαμπά μη αρμονικά σε χαμηλότερες).

Εξηγείται επίσης και ο ρόλος των σολιστικών οργάνων στην ορχήστρα.....

Διακροτήματα. παρουσιάζονται εάν δύο ημιτονοειδείς τόνοι κοντινών τόνων (με διαφορά < 10 Hz) συνηχούν .

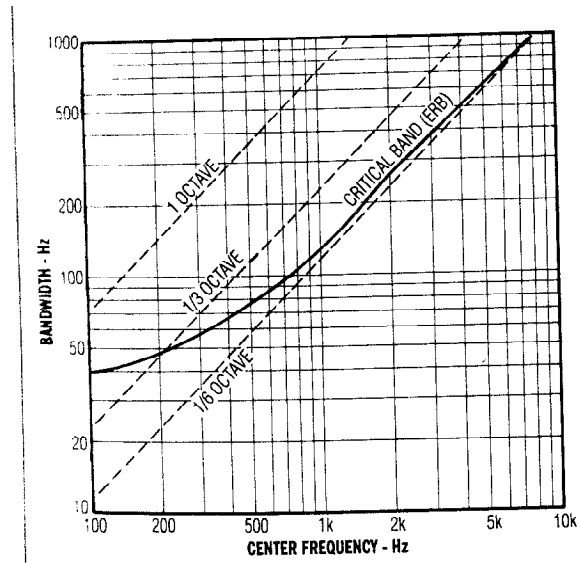
Η διαφωνία. παρουσιάζονται εάν η διαφορά τους είναι λίγο πιο μεγάλη από 10 Hz .

Συμφωνία. Εάν η διαφορά τους είναι πολύ πιο μεγάλη από 10 Hz .



εικ. 3.3. Διαβάθμιση της συμφωνίας και αρμονίας στα πλαίσια μιάς κρίσιμης ζώνης.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τη διαβάθμιση της συμφωνίας και διαφωνίας μέσα στα πλαίσια μιας κρίσιμης ζώνης. Όταν η διαφορά των συχνοτήτων των δύο συνηχούντων ήχων γίνεται μεγαλύτερη από το εύρος της κρίσιμης ζώνης τότε ακούμε την συμφωνία αυτών (ευχάριστο αίσθημα). Το Δ στο παραπάνω σχήμα δηλώνει την Διαφωνία.



εικ. 3.4. Το εύρος μιας κρίσιμης ζώνης σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα , μεταφραζόμενο σε υποδιαιρέσεις της οκτάβας.

Πιο συγκεκριμένα δύο ίσοι και δυνατοί ημιτονοειδείς τόνοι ποτέ δεν ηχούν διάφωνα εάν ο διαχωρισμός συχνοτήτων είναι μεγαλύτερος από μια κρίσιμη ζώνη. Εάν ο διαχωρισμός συχνοτήτων ισούται με το τέταρτο της κρίσιμης ζώνης τότε η διαφωνία είναι μέγιστη.

Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα παρατηρούμε το εύρος μιας κρίσιμης ζώνης σε συνάρτηση με την συχνότητα.

Παρατηρούμε ότι κάτω από μια συχνότητα 500 Hz , το εύρος κρίσιμης ζώνης είναι ανάλογο της συχνότητας. Στο σχήμα παρατηρούμε τις διαφορές συχνοτήτων για τρία διαστήματα. Η καλύτερη εκτίμηση είναι, αν θεωρήσουμε σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα ότι *εάν δύο απλοί ήχοι χωρίζονται από ένα διάστημα τουλάχιστον τρίτης μικρής σχηματίζουν ένα σύμφωνο διάστημα.*

Για σύνθετους ήχους (Θεωρία Plomp-Levelt)

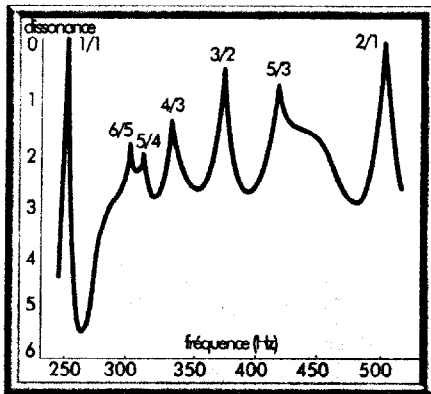
Η διαφωνία των συνηχούντων τόνων εξαρτάται από τα μεγέθη των αποστάσεων των συχνοτήτων μεταξύ γειτονικών παραγώγων συχνοτήτων (Partial) μετρημένων σε κλίμακα κρίσιμης ζώνης.

Το 1965 , ο R. Plomp και ο W. Levelt από το Ινστιτούτο Ακουστικής αντίληψης του Eindhoven, ανέπτυξαν την θεωρία της κρίσιμης ζώνης , σύμφωνα με την οποία υπάρχει για κάθε συχνότητα του συνεχούς φάσματος μια κρίσιμη περιοχή συχνοτήτων , της οποίας το εύρος είναι σχεδόν ανάλογο της κεντρικής συχνότητας.

Όταν δύο ήχοι ακουγονται μαζί , το φαινόμενο της σκληρότητας παράγεται κάθε φορά που ένας αρμονικός εισέρχεται στην κρίσιμη ζώνη του άλλου. Στην ουσία, είναι τα γκρούπ νευρικών κυττάρων που ερεθίζονται στο εσωτερικό αυτί, διαταράσσοντας έτσι την ανιληπτική διάκριση μεταξύ των δύο αρμονικών.

Ο Plomp και ο Levelt, κατασκεύασαν με βάση το μοντέλο της κρίσιμης ζώνης , μια καμπύλη συμφωνίας , ξεκινώντας από δύο ήχους που περιέχουν 6 αρμονικούς: ο

πρώτος στα 250 HZ και ο δεύτερος μεταξύ 250 και 500HZ. (Σχήμα 9.5.)
 et 2/1 représentent les intervalles d'unisson, de



εικ. 4.5. Βαθμοί διαφωνίας, συμφωνίας Plomp -Levelt.

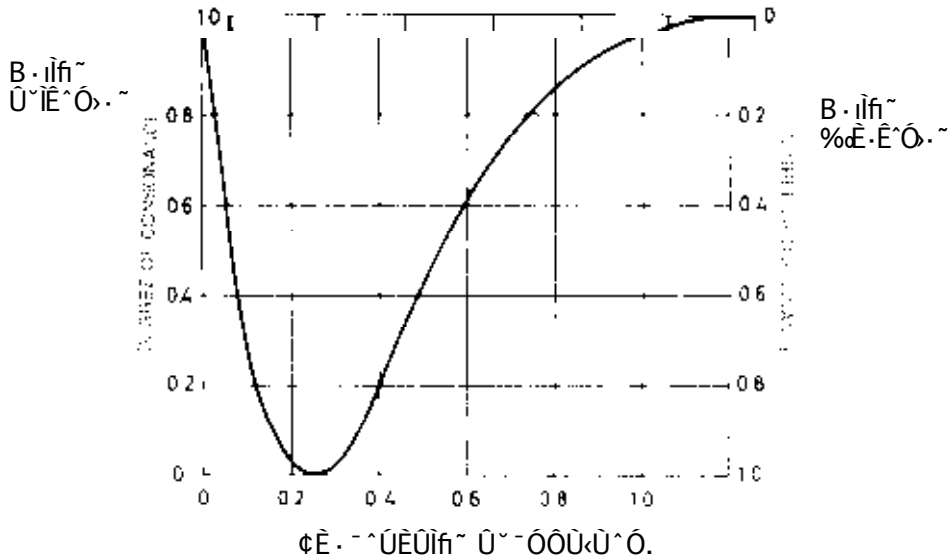
Είναι τα μέγιστα της καμπύλης που δηλώνουν την συμφωνία (οι σχέσεις 1/1, 3/2 και 2/1 αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα ταυτοφωνίας, πέμπτης και οκτάβας ανάμεσα στους θεμελιώδεις των δύο ήχων.)

Είναι αξιοπρόσεκτη η ομοιότητα μεταξύ της χειρόγραφης καμπύλης του Helmholtz και της τελευταίας καμπύλης .

3.4.4. Βαθμοί διαφωνίας και συμφωνίας

Ο Βαθμός διαφωνίας εξαρτάται από την απόσταση αυτών των μερικών παραγώγων και των σχετικών τους πλατών. Ο πιο σημαντικός παράγοντας καθορίζεται από το πόσοι δυνατοί παράγωγοι εμπίπτουν στην ίδια κρίσιμη ζώνη. Όσοι πίο πολλοί είναι τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός της διαφωνίας.

Εάν όμως έχουν κοινούς παραγώγους, τόσο μικρότερος ο βαθμός της διαφωνίας.



εικ. 4.6. Σχέση μεταξύ διαχωρισμού συχνοτήτων και βαθμών διαφωνίας και συμφωνίας.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε το βαθμό διαφωνίας και συμφωνίας (μεταξύ 0 και 1). Οι ήχοι είναι σύμφωνοι εάν ο διαχωρισμός της συχνότητας είναι αρκετά ασθενής για να διαχωρίσουμε αργά διακροτήματα. Παρατηρούμε ότι η συμφωνία μηδενίζεται και η διαφωνία φτάνει στο μέγιστο της όταν ο διαχωρισμός συχνότητας μεταξύ των δύο ήχων είναι κοντά στο 0.2 του πλάτους της κρίσιμης ζώνης.

Αρα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι αρμονικοί τόνοι που κατέχουν θεμελιώδη συχνότητα που εκφράζεται σε αναλογία μοιράζονται πολλούς παραγώγους, όπως είναι π.χ. τα καθαρά διαστήματα.

παράδειγμα: η οκτάβα 2:1 αποτελείται από δύο νότες που έχουν κοινούς τους περισσότερους αρμονικούς:

Π.χ. μια νότα $\chi=100\text{Hz}$ έχει στην οκτάβα της μια νότα $\psi=200\text{hz}$.

Αν σχηματίσουμε τα αρμονικά φάσματα της κάθε μιάς θα παρατηρήσουμε ότι έχουν πολλές κοινούς αρμονικούς:

χ : $f_0=100, f_1=200, f_2=300, f_4=400, f_5=500 \dots\dots$

ψ : $f_0=200, f_1=400 \dots\dots\dots$

Σύμφωνα με αυτά που είπαμε μέχρι τώρα για το βαθμό συμφωνίας,

ο βαθμός συμφωνίας εξαρτάται από την αναλογία των συχνοτήτων που καθορίζουν τα διαστήματα των παραγώγων συχνοτήτων.

Ετσι η οκτάβα (2:1) είναι η πιο σύμφωνη δυάδα, μετά η πέμπτη (3:2), κτλ.

Κανόνες διαφωνίας -συμφωνίας

Πιο συγκεκριμένα , υπάρχει ο παρακάτω κανόνας για το βαθμό συμφωνίας μεταξύ δύο νοτών:

Κάθε ν-οστό αρμονικός της υψηλής νότας ψ θα συμφωνεί με κάθε μ-οστό αρμονικό της χ αμηλής νότας χ. (βλέπε παραπάνω παράδειγμα).

Υπάρχουν βέβαια και οι παρακάτω εξαιρέσεις:

- Εάν οι ήχοι έχουν δυνατούς παραγώγους (με μεγάλο πλάτος) η διαφωνία μεγαλώνει (π.χ. το διάστημα τρίτης μικρής ηχεί καλύτερα στο Λα4 παρά στο Ντό1)
- Εάν οι ήχοι έχουν η όχι αρμονικό φάσμα.

Τέλος , το μυστικό της διαφωνίας είναι να αποφεύγουμε παραγώγους κοντινούς σε συχνότητα. Όταν οι δύο συχνότητες απομακρυνθούν αρκετά έτσι ώστε να διεγείρουν διαφορετικές ομάδες νεύρων η σκληρότητα (roughness) εξαφανίζεται και εμφανίζεται η αίσθηση δύο διαφορετικών υψών.

3.4.5. Συνδυασμός τόνων η προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης

Κατά την συνήχηση δύο τόνων , μπορούμε να ακούσουμε (εαν διαθέτουμε «εξασκημένο αυτί»), έναν μεγάλο αριθμό απο νέους τόνους που προέρχονται απο τον συνδυασμό των αρχικών τόνων.

Ετσι αν ηχήσουν ταυτόχρονα το $Do_2 = 120,81$ Hz και $sol_2 = 196$ Hz, τότε ακούγεται σχετικά εύκολα ένας άλλος τόνος που είναι το $Do_1 = 65$ Hz. Η συχνότητα του do_1 προκύπτει απο την διαφορά των αρχικών τόνων ($sol_2 - Do_2$).

Αυτοί οι τόνοι συνδυασμού καλούνται *προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης* και εκφράζονται με τον τυπο: $a.f_1 \pm b.f_2$, όπου a, β ακέραιοι και f_1, f_2 οι συχνότητες των αρχικών τόνων. Το φαινόμενο των προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης οφείλεται στη *μη γραμμική λειτουργία του αυτιού* , που δρά σαν μείκτης συχνοτήτων.

Οι *τόνοι διαφοράς* $a.f_1 - b.f_2$, ανακαλύφθηκαν απο τον Γερμανό οργανίστα Sorge το 1745 και το βιολιστή Ταρτίνι ενώ οι τόνοι αθροίσματος $a.f_1 + b.f_2$, από τον Helmholtz το 1856.

3.5. Αντίληψη του ηχοχρώματος

3.5.1.. Ηχώχρωμα η χροιά

Ηχώχρωμα η χροιά είναι το υποκειμενικό χαρακτηριστικό της ακουστικής αίσθησης που καθιστά διακριτούς δυό ήχους που έχουν την ίδια ακουστότητα και ύψος. Χονδρικά, η χροιά εξαρτάται από το τονικό του ύψος, την περιβάλλουσα, την διάρκεια, την στάθμη ακουστότητας κτλ...

Η αίσθηση της χροιάς ενός ήχου εξαρτάται πιο αναλυτικά:

- α. από τον αριθμό των παραγώγων συχνοτήτων που περιέχει
- β. την αρμονική και μη αρμονική σχέση των παραγώγων με την θεμελιώδη
- γ. την σχετική τους ένταση .
- δ. τις σχετικές φάσεις των αρμονικών
- ε. την κατανομή τους στο φάσμα
- ζ. την συνολική ισχύ διέγερσης.
- η. Την εξέλιξη και διαμόρφωση της περιβάλλουσας των αρμονικών στο χρόνο (λαμπρότητα)
- θ. την ισχυρή παρουσία της θεμελιώδους συχνότητας.

Πιο αναλυτικά:

α) Ο αριθμός των παραγώγων συχνοτήτων

Ο αριθμός των παραγώγων συχνοτήτων στο φάσμα καθορίζει το πλούσιο ή λιτό ηχώχρωμα. Από διάφορα πειράματα σε ακροατές, αποδείχθηκε ότι στο φάσμα των μουσικών οργάνων οι αρμονικές άνω από την εβδόμη δεν είναι τόσο σημαντικές, διότι η απόσταση μεταξύ τους αρχίζει να γίνεται σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα να βρίσκονται μέσα στην ίδια κρίσιμη ζώνη της βασικής μεμβράνης του αυτιού.

Π.χ. Ένας σύνθετος ήχος με θεμελιώδη συχνότητα 500 Hz, έχει την 10^η, 11^η και 12^η αρμονική του στα 500, 550 και 6000 Hz αντίστοιχα. Η κρίσιμη ζώνη σ' αυτή τη περιοχή συχνοτήτων είναι μεταξύ 900-1000 Hz (βλέπε τον πίνακα στο κεφάλαιο του αυτιού) και οι τρεις αρμονικές βρίσκονται μέσα σ' αυτή την ζώνη. Συνεπώς, δεν είναι δυνατόν να ακουστούν ξεχωριστά αφένος, προσδίδουν δε στο συνολικό άκουσμα οξύτητα και τραχύτητα.

Το αντί μπορεί να διακρίνει τις πρώτες επτά αρμονικές ενός σύνθετου τόνου, εφ' όσον βέβαια έχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από την κρίσιμη ζώνη.

β) Η αρμονική και μη αρμονική σχέση των παραγώγων με την θεμελιώδη:

Οι αρμονικές συχνότητες δημιουργούν με την θεμελιώδη και μεταξύ τους 'σύμφωνα' ή 'ευφωνα' μουσικά διαστήματα. (π.χ. η 2^η και 4^η αρμονική απέχουν από την θεμελιώδη μια και δύο οκτάβες αντίστοιχα. κτλ..)

Γι' αυτό το λόγο η ύπαρξη αρμονικών σ' ένα ήχο διατηρεί και ενισχύει την αίσθηση του τονικού ύψους.

Οι μη αρμονικές σχηματίζουν με την θεμέλιο διάφωνα διαστήματα και οι τόνοι διαφοράς δεν έχουν συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και για αυτό, η ύπαρξη τους τείνει να εξαφανίσει την αίσθηση του ύψους.

Π.χ. Τα κρουστά έχουν δυσδιάκριτο ύψος καθώς το φάσμα συχνοτήτων τους περιέχει πολλές μη αρμονικές συχνότητες .

Κρουστά καθορισμένου ύψους: Ξυλόφωνο, μαρίμπα, celesta...

Φαινόμενα μη αρμονικότητας σε έγχορδα....(χορδή της κιθάρας, χορδές του πιάνου στις ψηλές συχνότητες.)

γ). Σχετική ένταση των αρμονικών

Κάθε αρμονικός έχει διαφορετική ένταση και συνεισφέρει ανάλογα κατ' αυτό τον τρόπο στην ολική αντίληψη του ηχοχρώματος. Στην περίπτωση του τετραγωνικού παλμού παρατηρούμε ότι οι εντάσεις των αρμονικών εξασθενούν με την σχέση $1/n$, όπου n ο αριθμός των αρμονικών. Σε άλλα φάσματα υπάρχουν αρμονικοί με υψηλές εντάσεις σχετικά με τους υπόλοιπους, οι λεγόμενοι *formants*:

Στην ουσία καθορίζουν μια ευρύτερη περιοχή γύρω από κάθε παράγωγο μεγάλης έντασης που αντιστοιχεί σε μια μικρή ομάδα συχνοτήτων και καθορίζεται από την ευρύτητα της περιοχής, την συχνότητα της παραγωγού και το πλάτος της. (Formants).

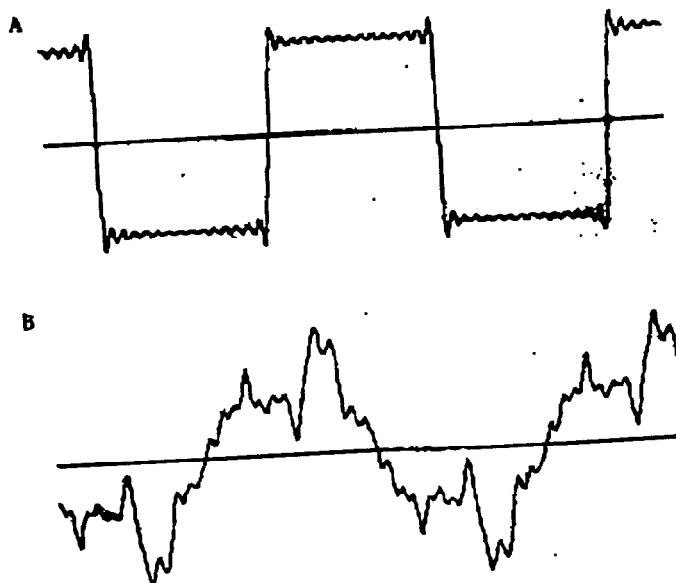
Formants παρατηρούνται στα φωνήεντα (αντηχήσεις της φωνητικής κοιλότητας όπου ενισχύονται ορισμένες παράγωγοι.)

δ) Οι σχετικές φάσεις των αρμονικών

Οι σχετικές φάσεις των αρμονικών επηρεάζουν το ηχόχρωμα και την κυματομορφή του ήχου σε μικρό βαθμό.

Η κυματομορφή εξαρτάται από τις σχετικές φάσεις των παραγωγών και των σχετικών εντάσεων τους. Το μέρος Α δείχνει την προσέγγιση μιας τετραγωνικής κυματομορφής που αποτελείται από 12 παράγωγους με κανονικές φάσεις.

Τό μέρος Β αναπαριστά μια κυματομορφή με τις ίδιες παραγωγούς και εντάσεις με την προηγούμενη κυματομορφή αλλά με διαφορετικές φάσεις.



εικ. 12.1. Δύο διαφορετικές κυματομορφές που εκφράζουν σχεδόν τον ίδιο ήχο (με το ίδιο αρμονικό περιεχόμενο, μόνο που οι αρμονικές τους έχουν διαφορετικές φάσεις).

ε) Η κατανομή των αρμονικών στο φάσμα

Η ομοιόμορφη κατανομή των αρμονικών στο φάσμα καθορίζει τον *ωραίο* ήχο ενός οργάνου.

Π.χ. Ένα βιολί Stradivarius με ομοιόμορφα κατανεμημένες τις αρμονικές του μεταξύ 3 και 5 KHZ ηχεί υπέροχα εν συγκρίσει με ένα άλλο βιολί που τα κατασκευαστικά του υλικά δέν είναι εξ' ίσου ποιοτικά με του Stradivarius.

στ). Η ένταση διεγερσης επηρεάζει την χροιά του ήχου.

Όσο πιο έντονα διεγείρεται ο ταλαντωτής τόσο πιο πολλές αρμονικές παράγονται. Παραγωγή υποκειμενικών τόνων (συνδυασμός υπαρχόντων και νέων), με την αύξηση της έντασης του ήχου λόγω της μη γραμμικότητας του αυτιού.

ζ) .Χρονική μεταβολή και εξέλιξη του αρμονικού του φάσματος.

Η χρονική εξέλιξη και μεταβολή των αρμονικών στο χρόνο καθορίζουν την ζωντάνια του ήχου.(J.C. Risset).Το αρμονικό περιεχόμενο του ήχου δεν παραμένει σταθερό καθ'ολη την διάρκεια του ήχου. Μετά απο τις μελέτες του Γάλλου συνθέτη και ερευνητή J.C. Risset , οι εντάσεις των αρμονικών απο την γέννηση εως και την παύση του ήχου δεν έχουν την ίδια περιβάλλουσα.

Αυτό εξηγεί την λαμπρότητα του ήχου του πιάνου στο attack λόγω της παρουσίας υψηλών αρμονικών που έχουν μεγάλη ισχύ στην αρχή.

Η αττάκα του ήχου , η ύπαρξη υψηλών ή χαμηλών αρμονικών στην αρχή ή στο τέλος της νότας και η πορεία της μεταβολής της κάθε αρμονικής παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ηχοχρώματος.

π.χ. αν αποκοπεί η αττάκα απο κάποιους ήχους τότε η κορνέτα μπορεί να ληφθεί σαν τρομπέττα και το τσέλλο σαν φαγκότο.

η) Ισχύς της θεμελιώδους:

Τέλος η παρουσία της θεμελιώδους καθορίζει το ύψος του ήχου. Συνήθως είναι πιο έντονη απο τις αρμονικές , υπάρχουν όμως και περιπτώσεις οργάνων που η θεμελιώδης είναι ασθενέστερη απο τις αρμονικές της.

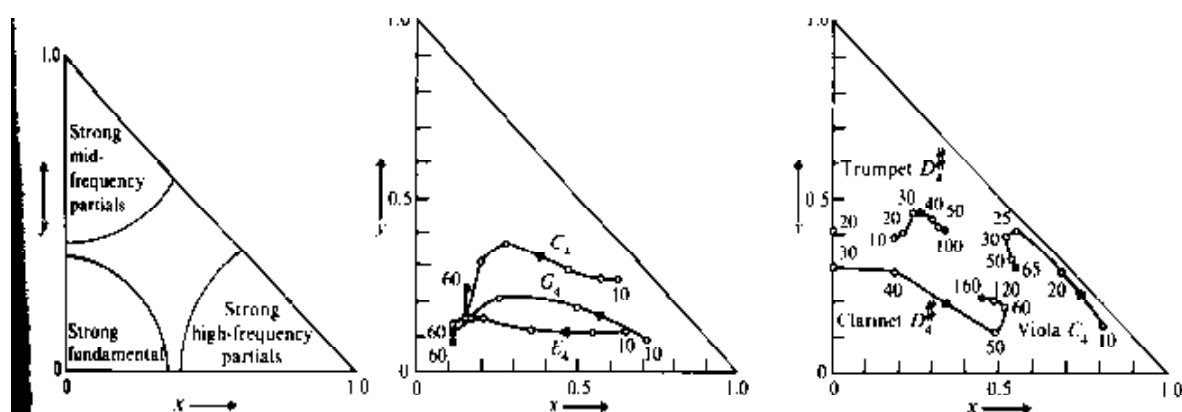
Ισχυρή παρουσία της θεμελιώδους και χαμηλών αρμονικών παράγει καθαρή αρχή στη νότα.

θ). Κλίμακα ηχοχρωμάτων

Ενώ για την ακουστότητα υπάρχει η κλίμακα των sones και για το υποκειμενικό ύψος η κλίμακα των -mels, για το ηχοχρώμα δεν υπάρχει ουσιαστικά μια επιστημονικά τεκμηριωμένη κλίμακα που να το εκφράζει (λόγω της πολυπλοκότητας των αρμονικών και των σχέσεων μεταξύ τους).

Ενας αποτελεσματικός τρόπος για την αναπαράσταση του ηχοχρώματος σύμφωνα με τον Rossing, είναι το «tristimulus diagramm» (τριδιάστατο διάγραμμα ερεθισμάτων) ανάλογο ενός χρωματικού διαγράμματος που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των χρωμάτων.

Στο παρακάτω σχήμα το διάγραμμα (α) αναπαριστά το ηχοχρώμα των μουσικών οργάνων. Το κλάσμα της έντασης των μερικών συχνοτήτων 2,3,4, καλύπτει τον άξονα των ψ ενώ το κλάσμα των υψηλών αρμονικών τον άξονα των χ.



εικ.6.2 : Tristimulus diagrams για την κατηγοροποίηση των ηχοχρωμάτων.

Υποκειμενικές παράγωγοι

- Διαύγεια(ηχώχρωμα και αντανακλάσεις)
 - Συνοχή (χώρο)
 - Présence(ηχώχρωμα)
 - Sonie (ακουστότητα , ένταση)
 - Tonie (Τονικό ύψος).

Βαθμοί κρίσεως ηχοχρώματος

Σύμφωνα με τον Daok υπάρχουν οι εξής υποκειμενικοί βαθμοί κρίσης ενός ηχοχρώματος.

μουντό----λαμπρό

Ζεστό- κρύο

λιτό- πλούσιο

μουντό—διαπεραστικό

συμπαγές—αραιό

γεμάτο----άδειο

με χρώμα -χωρίς χρώμα

Ο Ericson (1975) υποστηρίζει οτι υπαρχουν τρεις τρόποι που μπορούμε ν' ακούσουμε ενα σύνθετο ήχο:

- α) σαν συγχορδία
- β) σαν ύψος με ηχώχρωμα
- γ) σαν ενα οποιοδήποτε ήχο

Τέλος, ο καθορισμός του αρμονικού φάσματος ενός οποιοδήποτε οργάνου δεν μπορεί να γίνει επακριβώς , διότι το πλήθος των αρμονικών και μη συχνοτήτων που παράγονται , εξαρτώνται απο πολλούς παράγοντες όπως τα υλικά κατασκευής του οργάνου , τον τρόπο κατασκευής , την προσέγγιση απο το μουσικό..κτλ..

3.6.Αντίληψη του ήχου στο χώρο

3.6.1. Αμφιωτική ακοή

Για τον εντοπισμό της πηγής και την αντίληψη καλύτερης ποιότητας του ήχου ο άνθρωπος χρησιμοποιεί και τα δύο του αυτιά (αμφι-ωτα). Τα

ηχητικά κύματα που φτάνουν στα δύο του αυτιά συνήθως δεν είναι ίδια αλλά έχουν μια διαφορά χρόνου άφιξης (διαφορά φάσης) και έντασης που οφείλεται στην ηχητική σκιά που δημιουργούν το κεφάλι και τα πτερύγια του εξωτερικού αυτιού.

Παρ' όλα αυτά ο άνθρωπος ακούει μόνο έναν ήχο .

Πλεονεκτήματα της αμφιωτικής έναντι της μονωτικής ακοής:

- Το κατώφλι ακουστότητας στους αμφιωτικούς ήχους είναι 3 db χαμηλότερο από το κατώφλι ακοής στους μονωτικούς ήχους.
 - διάκριση μεμονωμένων ήχων μέσα σε ένα θορυβώδες περιβάλλον (cocktail party effect)
 - ολοκλήρωση της συνήθως «ατελούς» ακουστικής εντύπωσης που σχηματίζεται από το κάθε αυτί.
- πλήρης εντοπισμός πηγής (localisation) ¹²
- αποφυγή ηχητικής σκιάς που δημιουργείται από το κεφάλι.

3.6.2. Εντοπισμός της πηγής (sound localisation).

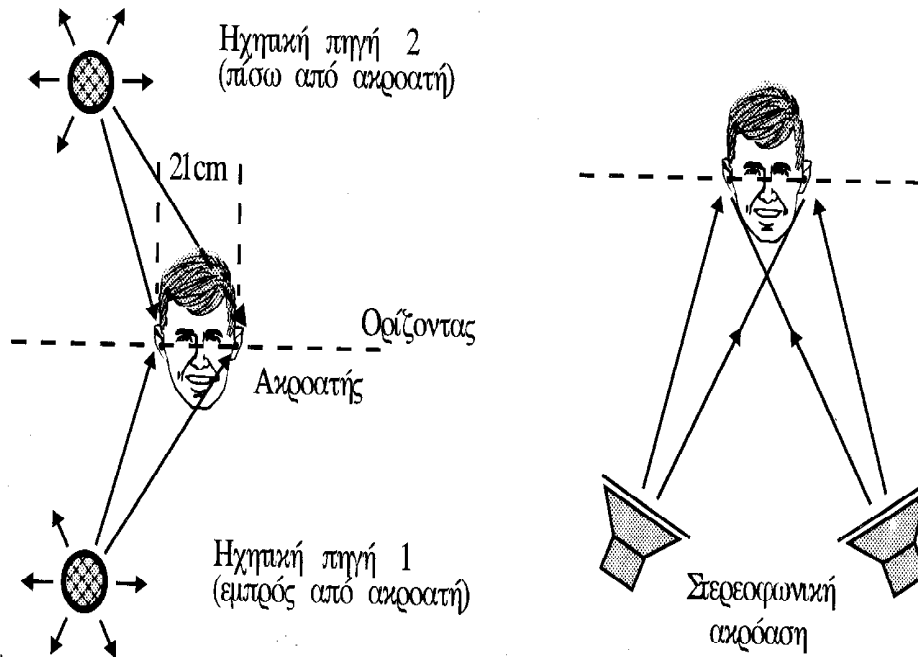
Λόγω της φυσικής απόστασης που υπάρχει μεταξύ των δύο αυτιών (περίπου 21 cm) υπάρχει μια χρονική διαφορά άφιξης του ήχου στο κάθε αυτί, η οποία είναι περίπου 630ms. Ανάλογα με τη θέση της πηγής του ήχου, το κάθε αυτί δέχεται το ηχητικό κύμα όχι μόνο με διαφορετικό *χρόνο άφιξης*, αλλά και με διαφορετική *ένταση* και με διαφορετική *χροιά*.

Η υπάρχουσα απόσταση μεταξύ των δύο αυτιών δίνει στο μηχανισμό της ακοής τη δυνατότητα μέσω της ανίχνευσης της χρονικής ή φασικής διαφοράς μεταξύ των δύο «αντιγράφων « του ήχου, να εντοπίσει την *κατεύθυνση* από τη οποία προέρχεται ο ήχος αρκεί όμως η συχνότητα του να είναι μικρότερη από 800Hz.

Ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται από τη δεδομένη απόσταση μεταξύ των δύο αυτιών (21cm) που αντιστοιχεί περίπου στο μισό μήκος κύματος της συχνότητας των 800 Hz.

Υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί εντοπισμού πηγής που αναπτύσσουν τα αυτιά για διαφορετικές συχνότητες.

¹²Το αυτί έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει την πηγή του ήχου, υπολογίζοντας την κατεύθυνση και την απόστασή της. Ο J. Blauert (1974) έδειξε ότι υπάρχει ξεκάθαρη σχέση μεταξύ της περιοχής της συχνότητας και της κατεύθυνσης του ηχητικού γεγονότος. Είναι αλήθεια ότι εντοπίζουμε καλύτερα τους ήχους του ακουστικού φάσματος που παρουσιάζουν ορισμένες αττάκες και υψηλές συχνότητες.



εικ. 3.6. Αμφιωτική Ακοή ¹³

3.6.3. Αντίληψη Στερεοφωνικού ήχου

Το τελευταίο βήμα στην επί σχεδόν ένα αιώνα αναζήτηση της υψηλής πιστότητας είναι ο *στερεοφωνικός ήχος*. Η τελειοποίηση αυτή βασίζεται στην εξής ιδέα : *αφου ο ακροατής ακούει με δύο αυτιά ο καλύτερος τρόπος αναπαραγωγής του είναι η εγγραφή του με δύο αυτιά δηλ. ξεχωριστά μικροφωνικά συστήματα που συλλαμβάνουν και εγγράφουν ελαφρά διαφορετικές παραλλαγές του ίδιου ήχου. Όταν ύστερα ξαναπαιχθούν ταυτόχρονα, συνθέτουν ένα τόνο με πληρέστερες διαστάσεις, όπως ακριβώς δύο μάτια δίνουν περισσότερη αντίληψη βάθους παρά ένα.*

Η στερεοφωνία στα καινούρια συστήματα αναπαραγωγής ήχου δίνει τεχνητά στον ακροατή την αίσθηση *του εντοπισμού της πηγής*. Δυό βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται , για να δοθεί τεχνητά στον ακροατή η αίσθηση του εντοπισμού των πηγών, στη στερεοφωνία είναι *οι διαφορές φάσης και έντασης*.

Κατά την ακρόαση στερεοφωνικής μουσικής μπροστά απο δύο μεγάφωνα, το κάθε αυτί ακούει δύο διαφορετικά ηχητικά σήματα (ένα απο το αριστερό ηχείο και ένα απο το δεξί).

Οι διαφορές έντασης και φάσης των δύο αυτών σημείων στο κάθε ηχείο καθορίζονται απο την θέση και διάταξη των μικροφώνων σε σχέση με τα όργανα κατά την ηχογράφιση. Αυτές οι διαφορές δεν φτάνουν ίδιες στα αυτιά του ακροατή διότι μεσολαβεί η απόσταση του απο τα ηχεία. Ο συνδυασμός των σημάτων των δύο ηχείων που φθάνουν στο κάθε αυτί παράγει τέτοιες διαφορές φάσης και έντασης , που εξομοιώνουν τον ήχο του συστήματος με τον ήχο της ζωντανής ακρόασης.

¹³Η φυσική απόσταση των αυτιών (21 cm) μεταξύ τους, κάνει τον ακροατή να δέχεται το ίδιο κύμα με διαφορές στο κάθε αυτί π.χ. το αριστερό αυτί του δέχεται το κύμα απο την πηγή 1 χωρίς εξασθένηση ενώ το κύμα της πηγής 2 εξασθενεία απο το πτερύγιο.

Με αυτόν το τρόπο η στεροφωνική ακρόαση δίνει την ψευδαίσθηση του τρισδιάστατου ήχου στον ακροατή, που νομίζει πλέον ότι βρίσκεται μπροστά από την ορχήστρα και μπορεί να διακρίνει και να εντοπίσει τα μουσικά όργανα.

3.6.4. Φαινόμενο Haas

Φαινόμενο που σχετίζεται με την αντίληψη της τοποθέτησης του αντικειμένου στο χώρο και καθορίζεται από την κατεύθυνση του πρώτου ηχητικού κύματος που ακούγεται από δύο κανάλια.

Για παράδειγμα όταν σ' έναν ακροατή φθάνουν δύο διαδοχικοί ήχοι από διαφορετικές πηγές, που απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από 50 ms, τότε ο ακροατής προσέχει μόνο τον πρώτο ήχο (χρονικά) και εντοπίζει την πηγή του, ενώ δεν αντιλαμβάνεται το δεύτερο έστω κι αν αυτός είναι ισχυρότερος σε ένταση ακόμη και κατά 10 db. Παρατηρείται δηλαδή ένα είδος *απόκρυψης (masking)* της δεύτερης πηγής από την πρώτη.

Το γεγονός ότι η προσοχή του ακροατή δεν αποσπάται για 50 ms από άλλους ήχους που ακολουθούν, είναι ένα θετικό γεγονός και «προστατεύει» τον ακροατή από την «πληθώρα» των ηχητικών μεταβατικών φαινομένων και άλλων απότομων ήχων, που θα μπορούσαν να του αποσπάσουν την προσοχή συνεχώς χωρίς να «προσφέρουν» κάποια πληροφορία.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

«...Και ιδού τα πλεονεκτήματα που προσδοκώ απο μια τέτοια μηχανή : την απελευθέρωση από το δεσποτικό, ανασταλτικό, συγκερασμένο τονικό σύστημα. Τη δυνατότητα να επιτυγχάνει κανείς οποιαδήποτε συχνότητα -αν το επιθυμεί- οποιονδήποτε αριθμό υποδιαιρέσεων της οκτάβας και κατά συνέπεια την διαμόρφωση οποιασδήποτε επιθυμητής κλίμακας. Αφάνταστη επέκταση του ηχητικού φάσματος προς τις χαμηλές και τις υψηλές περιοχές. Επιτεύξεις νέων συνηχήσεων χάρη σε νέους συνδυασμούς κατιόντων αρμονικών που με τα σημερινά μέσα είναι ανέφικτοι. Τη δυνατότητα οποιασδήποτε διαφοροποίησης του ηχοχρώματος και των ηχητικών συνδυασμών. Νέες διαβαθμίσεις δυναμικής που να ξεπερνούν κατά πολύ τις δυνατότητες της σημερινής ορχήστρας η οποία βασίζεται στην ανθρώπινη δύναμη. Μιά αίσθηση προβολής του ήχου στο χώρο με μέσα που εκπέμπουν τον ήχο σε όλους τους χώρους η ταυτόχρονα σε πολλούς χώρους στην αίθουσα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μουσικού κειμένου. Πολυρρυθμικές και πολυμετρικές κατασκευές. Ολα αυτά σε μία δεδομένη ενότητα μέτρου η ρυθμού, που με ανθρώπινες μόνο δυνάμεις δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί.»(E. Varèse, 1939).

4.1. Ψηφιακή αναπαράσταση του ηχητικού σήματος

DAC και ADC μετατροπή: Από τον αναλογικό στον ψηφιακό ήχο

Η εκμετάλλευση της ισχύος των υπολογιστών όσον αφορά τον ήχο απαιτεί την μετατροπή του αναλογικού ήχου σε ψηφιακό, δηλ. την περιγραφή του σαν μια σειρά απο δυαδικές τιμές (01)

Η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

- την δειγματοληψία
- την κβάντιση
- κωδικοποίηση

4.1.1. Δειγματοληψία και ADC (analog to digital conversion)

Ορισμός-διαδικασία

Η δειγματοληψία περιγράφει την ψηφιακή εγγραφή ενός ήχου και την διαδικασία μετατροπής ενός συνεχούς αναλογικού σήματος σε ένα σύστημα δυαδικών αριθμών, που καθέννας απο αυτούς ονομάζεται *δείγμα*.

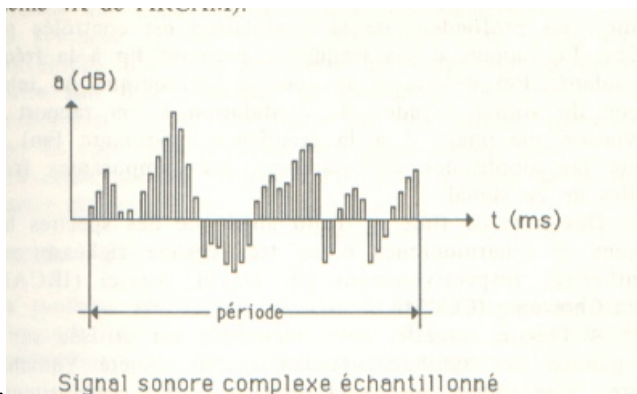
Το ψηφιακό σήμα είναι διακριτό δηλ. δεν είναι συνεχές στο χρόνο

Γιά την δειγματοληψία, κρατάμε για ισαπέχουσες χρονικές στιγμές την τιμή (πλάτος) που έχει το σήμα και όσο πιο κοντά είναι οι χρονικές αποστάσεις (στις οποίες κρατάμε την τιμή του πλάτους) τόσο πιο πολύ το διακριτό σήμα προσεγγίζει το αναλογικό.

Η διαδικασία είναι παρόμοια με την δημιουργία κινούμενων εικόνων απο μία σειρά ακίνητων φωτογραφιών που προβάλλονται με μεγάλη ταχύτητα : ο δειγματολήπτης

παίρνει μια σειρά απο δείγματα του ήχου και τα ξαναπαίζει σε μεγάλη ταχύτητα για να επαναδημιουργήσει τον ήχο (συνήθως η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεταξύ 32000- 50000 δείγματα /sec, όπου το 44100 δείγματα / sec είναι στάνταρτ για τη βιομηχανία audio.).

Καθώς όλη η πληροφορία αποθηκεύεται σε αριθμούς είναι εύκολο να χειριστούμε και να μετατρέψουμε αυτά τα δείγματα με μεγάλη ακρίβεια (ψηφιακή επεξεργασία δείγματος).



εικ.4.1. Ψηφιακό δείγμα ηχητικού σήματος

Ως ρυθμός δειγματοληψίας (sample rate f_s) ορίζεται ο αριθμός των δειγμάτων στη μονάδα του χρόνου, ενώ περίοδος δειγματοληψίας (T_s) η χρονική απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών δειγμάτων.

Αν T_s είναι η περίοδος δειγματοληψίας τότε ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι $f_s=1/T_s$. Για παράδειγμα αν παίρνουμε ένα δείγμα κάθε 0.01 δευτερόλεπτα ($T=0.01$ s), τότε ο ρυθμός δειγματοληψίας θα είναι $f_s=100$ δείγματα/sec η 100Hz.

Το σήμα που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο, αποτελείται απο ένα σύνολο παλμών σταθερής χρονικής διάρκειας, που έχουν μεταβλητό πλάτος ανάλογα με τις τιμές του αρχικού σήματος γνωστό ως PAM(Pulse Amplitude Modulation)

4.1.2. Θεώρημα Shannon και συχνότητα Nyquist

Σύμφωνα με την θεωρία της πληροφορίας και το θεώρημα του C.Shannon η συχνότητα της δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το διπλάσιο της συχνότητας του ήχου που προορίζεται να δειγματοληφθεί.

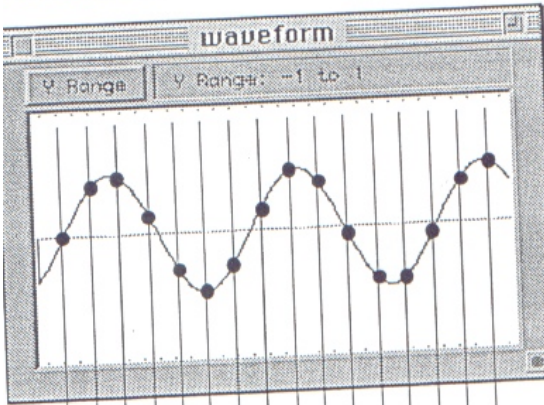
$$F_s = 2 F_{max}$$

π.χ. για ένα δείγμα που οι αρμονικές του εκτείνονται μεταξύ 20 -20000 Hz χρειαζόμαστε $f_s > 40000$ Hz.

Η συχνότητα F_{max} ονομάζεται και *συχνότητα Nyquist* και είναι το θεωρητικό όριο της υψηλότερης συχνότητας που μπορεί να παρουσιαστεί σ' ένα ψηφιακό σήμα.

Με δεδομένο ότι η μέγιστη συχνότητα που μπορεί ο άνθρωπος να ακούσει είναι τα 20KHz τότε ο ρυθμός δειγματοληψίας, θα πρέπει να είναι τουλάχιστο 40 KHz , δηλ. να λαμβάνουμε 40.000 δείγματα κάθε δευτερόλεπτα. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι η δειγματοληψία που χρησιμοποιείται στο CD μουσικής, είναι μεγαλύτερη από 40 KHz και για την ακρίβεια 44.1.KHz, ώστε να αποφευχθούν και επιδράσεις των μη ιδανικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται.

Για να επιβεβαιώσουμε ότι οι συχνότητες στο αναλογικό σήμα είναι υποκείμενες της συχνότητας του Nyquist ένα αναλογικό χαμηλοπερατό φίλτρο τοποθετείται πριν τον A/D μετατροπέα. Παρομοίως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο είναι συνδεδεμένο με την έξοδο D/A μετατροπέα για να εξασφαλίσει ότι όλες οι συχνότητες στην έξοδο του αναλογικού σήματος είναι στην κατάλληλη περιοχή.



εικ.11. Λήψη δειγμάτων από μία κυματομορφή

- Η σχέση μεταξύ Θορύβου και σήματος:

$$S/B = (6n + 1.8) \text{ db}, \quad n \text{ ο αριθμός των bit.}$$

Το φαινόμενο aliasing (ψέυδιση, παραποίηση) εμφανίζεται όταν ο ρυθμός δειγματοληψίας γίνει μικρότερος από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας ($f_s < 2f_{max}$) που περιέχει το αναλογικό σήμα, τότε εμφανίζονται επικαλύψεις που καθιστούν αδύνατη την ανάκτηση του αρχικού σήματος.

4.3. Η ποιότητα της δειγματοληψίας, επεξεργασία του ψηφιακού δείγματος και οι δειγματολήπτες

1. Παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα της δειγματοληψίας

α) Η ακρίβεια της ψηφιακής μετατροπής (8, 12, 14, 16 bits)

β) Η συχνότητα δειγματοληψίας (18-44 KHz)

γ) Η δυνατότητα αποθήκευσης δειγμάτων που περιορίζει τη διάρκεια της ηχογράφησης (από 1 -5 sec περίπου).

Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας τόσο μεγαλύτερη είναι η ποιότητα του ήχου και απαιτείται περισσότερη μνήμη π.χ. ενώ στην περίπτωση που η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 44100 Hz αποθηκεύεται ήχος διάρκειας 1 sec, όταν η συχνότητας δειγματοληψίας γίνει 22100 Hz αποθηκεύεται ήχος 2sec.

2 Επεξεργασία ψηφιακού δείγματος

- ψηφιακό μοντάζ
- μείξη πολλών ηχοχρωμάτων στην ίδια νότα
- interpolation δύο ηχοχρωμάτων (υπολογισμός μιας συνεχούς χρονικής διαδοχής μεταξύ ενός ή περισσοτέρων παραμέτρων).
- Interpolation μεταξύ ρυθμών, υψών, διαρκειών.

Μετατροπείς

ADC-DAC: ψηφιοποίηση, επεξεργασία και μετατροπή του ήχου σε real-time.

3. Αλλαγή διάρκειας

Αλλάζοντας το ύψος (συχνότητα του δείγματος) αλλάζει και η διάρκεια του ήχου. Για υψηλές συχνότητες το μήκος του ήχου συμπιέζεται (μικραίνει) και για χαμηλές συχνότητες μεγαλώνει. Για να λύσουμε το πρόβλημα της αλλαγής διάρκειας ενός δείγματος με την αλλαγή των συχνοτήτων πρέπει με συνεχή λούπα να δημιουργήσουμε ένα ομαλό σύνδεσμο από την μια συχνότητας στην άλλη (cross fade loop).

Ο Δειγματολήπτης (sampler)

Ένας sampler(δειγματολήπτης) έχει τις εξής λειτουργίες

- καθορισμός και έλεγχος των καναλιών MIDI
- φιλτράρισμα
- καθυστέρηση
- έλεγχος του ταλαντωτή

Το μεγάλο μειονέκτημα της δειγματοληψίας έναντι της σύνθεσης ήχων είναι ότι στην ουσία απαιτείται πολύ μεγάλη μνήμη και ότι δεν μπορούμε να επεμβούμε στις επιμέρους παραμέτρους του ήχου με ακρίβεια όπως στην σύνθεση.

Πηγές για δειγματοληψία Μικρόφωνο, μαγνητόφωνο, Κόμπακτ Ντίσκ.

Στην ουσία ένα πρόγραμμα δειγματοληψίας (όπως το samplecell) αποθηκεύει μέχρι και 6 νότες οργάνου για να ανταποκριθεί στο πρόβλημα της παραμόρφωσης του ηχοχρώματος ανάλογα με το τονικό ύψος. Μπορούμε να ξαναπαίζουμε τα δείγματα από οποιοδήποτε κλαβιέ MIDI.

Έτσι αν θέλουμε να τransπορτάρουμε έναν ήχο (π.χ ένα φωνήεν) πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά soundfiles που καθένα από αυτά καλύπτει διαφορετική έκταση υψών (Multi-sampling).

4.1.3.Κβάντιση (Quantizing)

Η κβάντιση εκφράζει την αντιστοίχιση κάθε δείγματος που έχει προκύψει (σήμα PAM) στην κοντινότερη τιμή από ένα πεπερασμένο πλήθος από προκαθορισμένες στάθμες (τετραγωνοποίηση του σήματος). Με τον τρόπο αυτό περιβάλλουμε διακριτές τιμές πλάτους για κάθε δείγμα.

. Για παράδειγμα, ενός Η/Υ μπορεί να χειριστεί περιορισμένο μέγεθος αριθμών και για αυτό στρογγυλοποιεί την πληροφορία των συνεχών αριθμών που δέχεται στην είσοδο, κατανέμοντας την πάνω σε συγκεκριμένη κλίμακα(από 256 βήματα για μία μονάδα των 8 bits έως και 65536 βήματα για 16 bit).

Γενικά η αύξηση σταθμών κβάντισης, οδηγεί σε μείωση του σφάλματος κβάντισης καθώς ακόμη και μία μικρή μεταβολή στο πλάτος του σήματος, μπορεί να προβληθεί σε διαφορετική στάθμη. Με κριτήριο λοιπόν το επιθυμητό σφάλμα αλλά και τη δυναμική περιοχή (Dynamic range) του σήματος, δηλ. τη διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του σήματος που θέλουμε να κωδικοποιήσουμε επιλέγουμε το πλήθος των σταθμών κβάντισης

Η κβάντιση χρησιμοποιείται στη διαδικασία ψηφιοποίησης ενός ακουστικού σήματος για την συνεχή μέτρηση των μεταβολών του εύρους του ανα δευτερόλεπτο και την μετατροπή του από σειρά ψηφίων σε αναλογική ηχητική πληροφορία.

4.1.4. Η Τεχνική Dither

Περιγράφει την προσθήκη θορύβου στο κβαντισμένο σήμα προσδίδοντας του περισσότερη διακριτική ικανότητα για καταγραφή.

Ο Λευκός θόρυβος γνωστός και σαν *θόρυβος dither* έχει πλάτος όσο το εύρος δύο διαδοχικών σθμών κβάντισης ενώ προστίθεται στο πλάτος του σήματος.

4.1.5.Κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση είναι το τελικό στάδιο της ψηφιοποίησης ενός αναλογικού σήματος και εκφράζει την αντιστοίχιση κάθε διακριτής στάθμης (όπως αυτή έχει προκύψει απο το στάδιο της κβάντισης) με ένα δυαδικό αριθμό.

Η πιό εύχρηστη μέθοδος κωδικοποίησης είναι η *παλμοκωδική διαμόρφωση* (PCM).

Υπάρχει και η ADPCM (Adaptive Differential Pulse Modulation) με την οποία επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης προς αποθήκευση πληροφορίας σε σχέση με το σύστημα PCM, χωρίς σημαντική υποβάθμιση του ήχου.

Στο τελικό στάδιο κάθε δείγμα μπορεί να παρασταθεί με μια σειρά δυαδικών ψηφίων που αντιστοιχεί στο πλάτος του αρχικού αναλογικού σήματος και μπορούν να αποθηκευτούν σε αρχεία ήχου.

Το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για την αναπράσταση κάθε δείγματος καθορίζεται απο την δυναμική περιοχή. Δηλ. Τη διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του σήματος η οποία και θα κωδικοποιηθεί.

Η τιμή αυτή είναι το αποτέλεσμα του γινομένου (πλήθος bits)* 6db.

π.χ. στα Audio CD, όπου κάθε δείγμα κωδικοποιείται με 16 bits η δυναμική περιοχή είναι 96db

4.1.4.Aliasing

Είδος παραμόρφωσης που παράγεται σε ένα ψηφιακό ηχητικό σύστημα (ψηφιακούς συνθετητές, περιφερειακές επεξεργαστές ήχου), όταν η ανάκλαση των συχνοτήτων είναι ψηλότερη απο τη συχνότητα Nyquist σε χαμηλές συχνότητες. Οι αρμονικές του ακουστικού σήματος αλληλεπιδρούν με την περίοδο συχνότητας δειγματοληψίας τους, δημιουργώντας έτσι στην είσοδο του ένα ανεπιθύμητο φιλτράρισμα αρμονικών. Αν το φίλτρο εισόδου αφήνει να περάσουν αρμονικές του εισερχομένου σήματος οι οποίες έχουν το ίδιο εύρος συχνότητας με την περίοδο δειγματοληψίας τότε το αποτέλεσμα είναι η *δημιουργία ειδώλου* (*alias*).

Στην πραγματικότητα, η παραμόρφωση αυτή παράγει μια υπερφόρτωση αρμονικών (με άλλα λόγια εμφανίζονται ανεπιθύμητες αρμονικές υψηλών συχνοτήτων στις περιοχές των χαμηλών). Χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι παραγωγή «σκληρών» ήχων με υψηλά ακουστή παραμόρφωση.

4.3. Μετατροπή του ψηφιακού ήχου σε αναλογικού (DAC)

4.3.1. Ψηφιακά αρχεία ήχου

Τα ψηφιακά αρχεία ήχου αποτελούνται απο δύο τμήματα :

- την κεφαλίδα header
- τα ακουστικά δεδομένα Στο header βρίσκουμε πληροφορίες σχετικά :

- αρχείο (ρυθμός δειγματοληψίας, εύρος δείγματος , τύπος συμπίεσης)
- πληροφορίες (τίτλος, επωνυμία του νόμιμου κατόχου, κτλ)

FORMAT : αναφέρεται στο τρόπο κωδικοποίησης των δεδομένων του αρχείου

FILE TYPE : αναφέρεται στη δομή των δεδομένων μέσα στο αρχείο.

4.3.2. Μέγεθος ψηφιακού αρχείου ήχου

- Ρυθμός –συχνότητα δειγματοληψίας
- Βάθος εύρος δείγματος (Bit depth) : είναι το πλήθος των bits που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση του κάθε δείγματος
- Bit Rate (sample rate x bit rate) : Εκφράζει τον αριθμό των bits στη μονάδα του χρόνου (bps)
- χρονική διάρκεια
- κανάλια (mono –stereo)

Π.χ. για ηχογράφιση ψηφιακού ήχου επιπέδου CD, όπου ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 44.1.KHz , το εύρος δείγματος 16 bits και τα κανάλια είναι δύο, ένα αρχείο ήχου χρονικής διάρκειας 5 λεπτών απαιτεί αποθηκευτικό χώρο 423360000bits η 52.92Mb.

4.3.3.Τύπου ψηφιακών αρχείων ήχου

- Microsoft wave (.wav)
- Mp3 Audio (.mp3) (μεγάλος λόγος συμπίεσης 11:1)
- Video for Windows (.avi)
- Windows Media Audio (.wma)
- Macintosh AIFF-Audio Interchange File Format (.aif, .aiff, .snd)
- Dialogic VOX (.vox)
- Intervoice(.ivc)
- Next/Sun (.au, snd)
- Sonic Foundry Perfect Clarity Audio(.pca)

4.3.4.Σημαντικότεροι τύποι αρχείων

Τα αρχεία wav :Το βασικότερο χαρακτηριστικό των αρχείων wav είναι ότι η ηχητική πληροφορία που βρίσκεται μέσα τους , μένει πρακτικά ασυμπίεστη. Δεν εφρμόζεται καμιά τεχνική συμπίεσης στο μέγεθος του αρχείου που προκύπτει κα την εγγραφή του ήχου. Αυτό σημαίνει ότι τα αρχεία wav έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος και κορυφαία ποιότητα αναπαραγωγής. Π.χ. για να αποθηκεύσουμε ένα τραγούδι διάρκειας 4 λεπτών χρειάζονται περίπου 40 MB στο σκληρό δίσκο. Για αυτό το λόγο τα αρχεία .wav χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις ήχων πολύ μικρής διάρκειας.

Τα αρχεία wav προκύπτουν συνήθως απο την ψηφιοποίηση του ήχου που εισέρχεται σε κάποια απο τις εισόδους της κάρτας ήχου του υπολογιστή. , υπάρχει όμως και η δυνατότητα να μετατρέψουμε ένα τραγούδι απο μουσικό CD , χωρίς να γίνει ψηφιοποίηση μέσω της κάρτας ήχου.

Τέλος, όσο μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας (sample rate : απο 11KHz μέχρι 48KHz) και ποιότητα δειγματοληψίας (bit resolution) τόσο αυξάνεται το μέγεθος του αρχείου.

Τα αρχεία MP3: τα αρχεία MP3 περιέχοντας κωδικοποιημένο (συμπιεσμένο) ήχο , ήταν τα πρώτα που κατάφεραν να προσφέρουν πολύ καλή ποιότητα αναπαραγωγής χρησιμοποιώντας το 1/10 του χώρου ενός ασυμπίεστου αρχείου .wav. Αυτά τα Δημιουργήθηκε από Αναστασία Γεωργάκη, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιούνιος 2003

αρχεία χαρακτηρίζονται και αυτά από τον ρυθμό και την ποιότητα δειγματοληψίας αλλά συνηθέστερα αναφερόμαστε στο ρυθμό ροής δεδομένων (Kbps: kbits per second). Ένα τραγούδι MP3 τυπικής διάρκειας 4 λεπτών έχει μέγεθος περίπου 4MB, όταν η ηχητική ποιότητα πλησιάζει αυτήν ενός CD (128Kbps). Χρησιμοποιώντας χαμηλότερη ποιότητα ήχου (μεγαλύτερη συμπίεση) το μέγεθος αυτό μπορεί να μικρύνει δραστικά. Η συμπίεση που χρησιμοποιείται στα αρχεία MP3 ονομάζεται απωλεστική¹⁴ καθώς συνεπάγεται απώλεια κάποιων ηχητικών πληροφοριών.

Αρχεία WMA: συμπίεσμένα αρχεία της Microsoft (Windows Media player) με ροή δεδομένων μόλις 64 Kbps.

4.4. Τεχνικές ανάλυσης

Η ανάλυση του ηχητικού σήματος έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια σαν ένα από τα βασικότερα εργαλεία της μουσικής πληροφορικής. Παίζει σημαντικό ρόλο σε διάφορες εφαρμογές όπως η *μουσική με διαδραστικά μέσα* (απόκριση των οργάνων), συστήματα αυτόματης συνοδείας και νέες μέθοδους ηχητικής σύνθεσης. Οι τεχνικές ανάλυσης ποικίλλουν ανάλογα με τις δυνατότητες του επεξεργαστή του υπολογιστή και στις επιδράσεις της ανθρώπινης αντίληψης.

4.4.1. Ιστορικό υπόβαθρο ανάλυσης του τονικού ύψους, ρυθμού και κυματομορφών

Οι πρώτες προσπάθειες ανάλυσης των τόνων και ρυθμών ανάγονται στην αρχαιότητα.

Η κλίμακα των Shruti (μιά οκτάβα =22 σρούτι, Ινδία) που οι Έλληνες μετονόμασαν σε *Εναρμονικός*, εθεωρείτο από τους Αρχαίους Έλληνες σαν την βάση όλων των τύπων μουσικών κλιμάκων. Ο Πυθαγόρας, πρώτος έθεσε τις βάσεις για την αντιστοιχία μεταξύ τονικών υψών και των διαιρέσεων των μηκών της χορδής, επιτρέποντας του την περιγραφή μουσικών διαστημάτων και κλιμάκων με όρους αριθμητικών κλασμάτων. Οι Έλληνες επίσης ανέπτυξαν μια σειρά από ρυθμικά διαστήματα η τρόποι που χρησιμοποιήθηκαν σαν βάση στην Ευρωπαϊκή Μεσαιωνική μουσική

Το 1636 ο Γαλιλαΐος (1564-1642) και ο Marin Mersenne (1588-1648) πειραματικά περιέγραψαν την σχέση μεταξύ τονικού ύψους και συχνότητας μιας κυματομορφής. Οί Mersenne και ο Gassendi (1592-1655) έκαναν τις πρώτες προσπάθειες να καθορίσουν την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν τα ηχητικά κύματα

1770 :Ο Sauver ανακαλύπτει μια μέθοδο μέτρησης των ακουστικών κυμάτων

1711: ανακάλυψη του διαπασών από τον John Shore

1830: Ο Savart παρουσιάζει μια νέα τεχνική μέτρησης του τονικού ύψους με περιστρεφόμενους οδοντωτούς τροχούς.

1877: Ο P. Koenig (πρώτες προσπάθειες Dr. Higgens, 1777) εξετάζει την οπτική αναπαράσταση των ήχων με τις *μανομετρικές φλόγες* (βλέπε εικόνα).

¹⁴ Πώς μπορεί η απώλεια στην ποιότητα του ήχου να περνάει απαρατήρητη από ανθρώπινο αυτί? Γνωρίζουμε ότι η ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού περιορίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο φάσμα ηχητικών συχνοτήτων (20-20KHZ). Στην συμπίεση απορρίπτονται συχνοτήτες που ξεπερνούν κάποια συγκεκριμένα όρια. Επιπλέον σε περιπτώσεις που δύο ήχοι έχουν πολύ κοντινές συχνοτήτες αλλά διαφορετική ένταση ο άνθρωπος δεν μπορεί να αντιληφθεί αυτόν με την χαμηλότερη ένταση, η σε περιπτώσεις στεροφωνικού αρχείου πολύ χαμηλής συχνότητας η διαφορά είναι ανεπίσθητη Σε διάφορες περιπτώσεις σαν αυτές που αναφέραμε η κωδικοποίηση MP3 απορρίπτει τις σχετικές πληροφορίες, επιτυγχάνοντας μείωση του όγκου του σχετικού αρχείου. Οι πληροφορίες που χάνονται είναι τέτοιες που ούτε ως η άλλως το ανθρώπινο αυτί δεν μπορεί να τις εκλάβει.

Δημιουργήθηκε από Αναστασία Γεωργάκη, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιούνιος 2003

1880: Ο R. Koenig παρουσιάζει το τονομετρο που μετράει το τονικό ύψος ήχων από την ταλάντωση 154 διαπασών.

1878 : Ανακάλυψη του πρωτότυπου οργάνου που μετράει την ένταση (the phonic wheel/La cour και με το δίσκο του Rayleigh)

1904: Ανακάλυψη του πρώτου μονοφωνικής συσκευής μέτρησης ηχοστάθμης από τον G.W. Pierce (μετά την ανακάλυψη της τρίοδης ηλεκτρ. λυχνίας)

4.4.2. Ανίχνευση του τονικού ύψους

Με την εξέλιξη των νέων υπολογιστικών συστημάτων οι επιστήμονες προχώρησαν πέρα από την ανάλυση των κυματομορφών, στην ανίχνευση και αναγνώριση του ρυθμού και του τονικού ύψους από τον υπολογιστή.

Η ανίχνευση του τονικού ύψους και ρυθμού έχει δύο σημεία εκκίνησης:

- ανάλυση της κυματομορφής του audio σήματος
- μετάφραση των MIDI μηνυμάτων (Η Δεύτερη περίπτωση είναι και η πιο εύκολη)

Ανιχνευτής τονικού ύψους είναι ένας αλγόριθμος λογισμικού ή μια συσκευή, που προσλαμβάνοντας το ηχητικό σήμα προσπαθεί να καθορίσει την περίοδο της θεμελιώδους συχνότητας αυτού του σήματος. (αν κυττάξουμε προσεκτικά την συχνοτική περιβάλλουσα διαφόρων ήχων παραδοσιακών οργάνων θα παρατηρήσουμε ότι το τονικό τους ύψος δεν είναι ποτέ σταθερό και ότι υπάρχουν συνεχώς μικροπαραλλαγές στη συχνότητα)

Στις μουσικές παραστάσεις ο ρόλος ενός PD είναι να αγνοήσει αυτές τις μικροπαραλλαγές και να εντοπίσει το κεντρικό τονικό ύψος.

Εφαρμογές της ανίχνευσης τονικού ύψους

- Εφαρμογές στην Εθνομουσικολογία (π.χ. σύλληψη και ανάλυση του φωνητικού ιδιώματος των Θιβετιανών μοναχών). Αυτές οι μικροτονικές μελωδίες δεν μπορούν εύκολα να αποδοθούν με την καθιερωμένη μουσική γραφή.

Συσκευή : the Seeger Melograph

- Επεξεργασία των ηχητικών σημάτων. Τα περισσότερα πρόγραμματα sound editing περιέχουν ρουτίνες εκτίμησης του τονικού ύψους που χρησιμοποιούνται σαν οδηγός στο pitch-shifting και στις time-scale λειτουργίες.
- Εγγραφή ενός σόλο οργάνου (π.χ, σαξόφωνο) σε πρόγραμμα μουσικής σημειογραφίας
- Ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών για το ξεχώρισμα δύο διαφορετικών φωνών.
- Μουσική με διάδραση : Ο υπολογιστής παρακολουθεί τον εκτελεστή μέσω του PD και έχοντα προγραμματίζει σημαντικά γεγονότα μέσα στην παρτιτούρα πυροδοτούνται σε πραγματικό χρόνο από τον εκτελεστή.

Δυσκολίες στην έρευνα
Μέθοδοι

4.5.Φασματική ανάλυση

ΤΟ συχνοτικό φάσμα είναι η μέτρηση της ενέργειας του ηχητικού σήματος σαν μια συνάρτηση της συχνότητας. Ο σωστότερος όρος είναι όχι φασματική ανάλυση αλλά *φασματική εκτίμηση*.

4.5.1.Ιστορικό

1781: Ο Νεύτωνας εισάγει τον όρο στην οπτική (φάσμα χρωμάτων που αναλύονται απο το πρίσμα)

1822 : Jean Baptiste Joseph Baron de Fourier (1768-1830) εκδίδει την Analytical Theory of Heat. Απέδειξε ότι κάθε περιδοική συνάρτηση είναι σύνολο ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Αρμονική ανάλυση

1843:: Ο G.Ohm στο Πολυτεχνικό Ινστιτούτο της Νυρεμβέργης είναι ο πρώτος που εφαρμόζει ται Θεώρημα του Fourier στα ακουστικά σήματα.

1863:: Ο H. Helmholtz εργάστηκε πάνω στις σειρά Fourier για το σταθερό μέρος (sustain) των ήχων. Ανέπτυξε ένα είδος ακουστικής ανάλυσης που βασίζεται στα μηχανικά ακουστικά αντηχεία.

1875: Ο Tyndall έκανε όρατα τα πειράματα πάνω στο φάσμα των ήχων με τις «τραγουδιστές φλόγες».

1916-1940:Ανάπτυξη μηχανικών συσκευών για την ανάλυση του ήχου (για ένα αρμονικό)

1940: Οι πρώτοι ηλεκτρονικοί παλμογράφοι (oscilloscopes)

1960 και μετά : πρώτα προγράμματα ανάλυσης και σύνθεσης ήχου με την βοήθεια του υπολογιστή

4.5.2 Εφαρμογές της φασματικής ανάλυσης

- Σημαντικά εργαλεία για τον επιστήμονα της ακουστικής και ψυχοακουστικής. Παρουσίαση της μικροδομής των φυσικών, φωνητικών και συνθετικών ήχων
- Οι μουσικολόγοι χρησιμοποιούν συχνά φασματογραφήματα για να μελετήσουν την μουσική εκτέλεση και την δομή της ηλεκτρονικής μουσικής.
- Η φασματική ανάλυση σε πραγματικό χρόνο είναι ένα είδος «αντιού» για την μουσική με διαδραστικά μέσα
- Μετασχηματισμός των ήχων . Απο το στάδιο της ανάλυσης ξεκινάει η επεξεργασία ηχητικού σήματος και η σύνθεση των ήχων.

4.5.3 Τρόποι παρουσιάσης του φάσματος

Στατικός : Διδιάστατη αναπαράσταση του ήχου (a, f). Η ανάλυση μετράει τη μέση ενέργεια για κάθε περιοχή συχνοτήτων στην περίοδο του χρόνου του αναλυόμενου σήματος. Αυτή τη περίοδος (μήκος παραθύρου) μπορεί να διαφοροποιηθεί απο ένα δευτερόλεπτο εως και πολλά.

Μεταβαλλόμενος στο χρόνο (time varying spectrum plots)

Σε αυτό το φάσμα οι μεταβλητές για κάθε αρμονικό αλλάζουν το χρόνο ενώ στο στατικό μελετάμε μόνο ένα μέρος τους εξελισσόμενου ήχου.

A) τρισδιάστατο

B) ηγόγραμμα η φασματογράφημα (sonogram or spectrogram). Ονομάζεται και ορατός λόγος. (f, t). Παρουσιάζεται η εξέλιξη των αρμονικών στο χρόνο όπου η τα πλάτη των συχνοτήτων αναπαρίσταται με την σκίαση της κάθε γραμμής. Οι συνατές συχνότητες έχουν βαθιέ'ασκίαση ..

4.5.3. Ανάλυση κατά Fourier με τον αλγόριθμο FFT

Η ανάλυση κατά Fourier είναι μιά τεχνική μέτρησης σε ένα υπολογιστικό σύστημα που δίνει την δυνατότητα να μεταβούμε απο το δυναμικό πεδίο ενός ήχου της κηματομορφής του (time domain) στο φασματικό πεδίο (frequency domain).

Ο αλγόριθμος FFT (Fast Fourier Transform) χρησιμοποιείται σε ειδικά λογισμικά ανάλυσης και επξεργασίας ακουστικών ψηφιακών σημάτων παράγοντας σε σύντομο χρονικό διάστημα ανάλυση κατά Fourier.

4.6. Εντολές για την φασματική ανάλυση

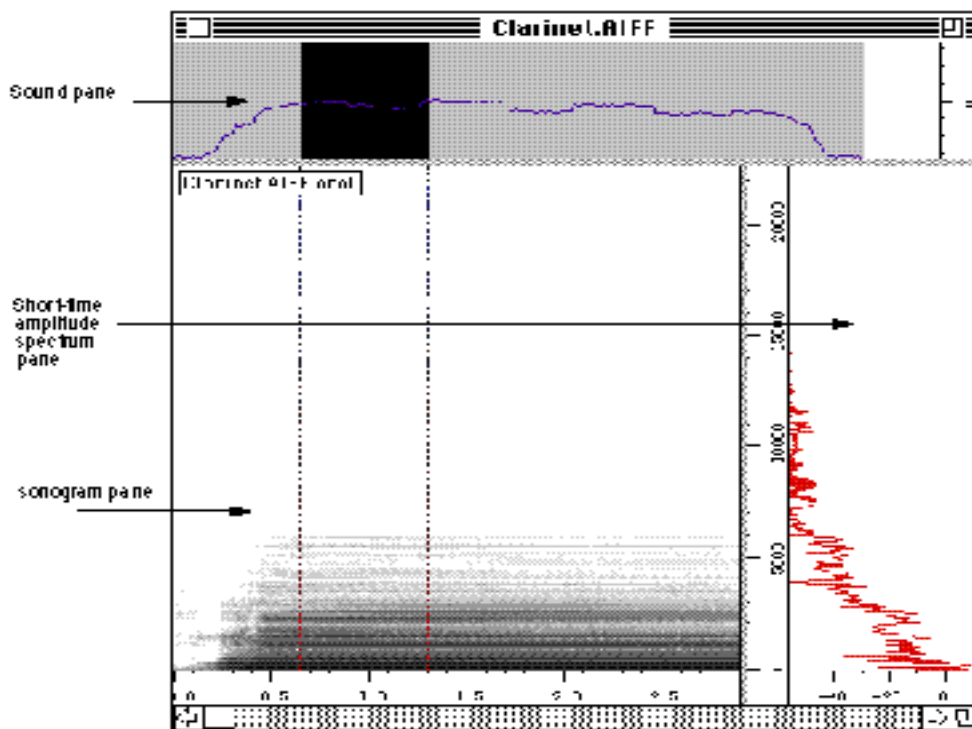
4.6.1. Sonogram Ανάλυση

Η Sonogram ανάλυση απεικονίζει μία φασματική ανάλυση του αρχείου ήχου στον άξονα χρόνου συχνότητας, όπου το πλάτος των αρμονικών καθορίζεται από την έντονη γραμμοσκίαση τους.

Στη παρακάτω εικόνα παρατηρούμε ένα αρχείο ήχου κλαρινέτου από το πρόγραμμα Audiosculpt (που τρέχει σε περιβάλλον MAC και αναπτύχθηκε στο IRCAM το 1990).

Στο πάνω μέρος παρατηρούμε την δυναμική περιβάλλουσα του ήχου (που περιβάλλει την κυματομορφή) και βρισκόμαστε στο Time domain.

Στο κάτω μέρος παρατηρούμε την Sonogram analysis (στο φασματικό περιβάλλον με άξονες f, t) και κάτω αριστερά παρατηρούμε την φασματική περιβάλλουσα (στους άξονες a, f).



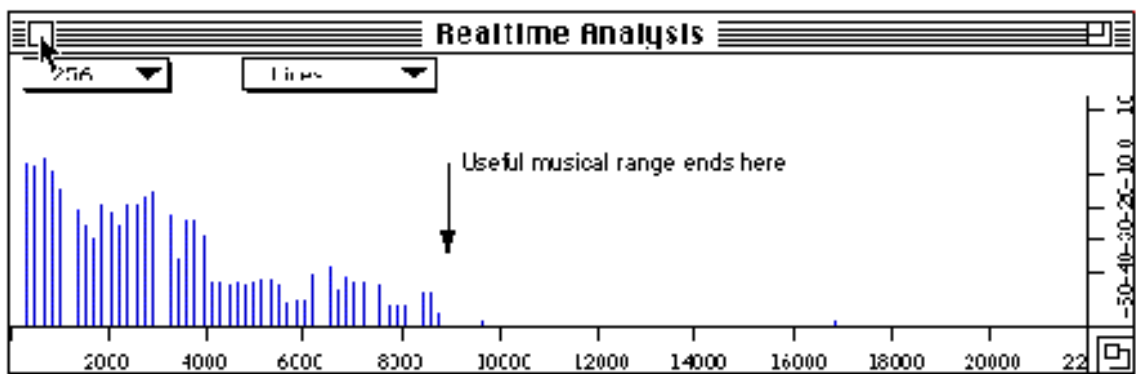
Όταν επιλέξουμε την εντολή αυτή από το μενού ανάλυσης, παρουσιάζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορούμε να καθορίσουμε τις παραμέτρους ανάλυσης, οι οποίες είναι:

1. Το μέγεθος παραθύρου (window size): το οποίο καθορίζει τον αριθμό των δειγμάτων του ήχου σε κάθε ανάλυση.
2. Η θεμελιώδης συχνότητα: η οποία επιτρέπει να υπολογίσουμε το μέγεθος του παραθύρου αυτόματα. Αν καθορίσουμε το μέγεθος του παραθύρου, θα φανερωθεί η θεμελιώδης συχνότητα που υπολογίσαμε. Το μέγεθος του παραθύρου είναι μία σειρά με πέντε φορές της περιόδου που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη συχνότητα.
3. Το βήμα παραθύρου (window step): το οποίο καθορίζει το διάστημα χρόνου ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αναλύσεις.
4. Το FFT μέγεθος: το οποίο καθορίζει τον αριθμό στιγμών της ανάλυσης.

5. Το παράθυρο ανάλυσης: με το οποίο μπορούμε να καθορίσουμε τον τύπο του παραθύρου που χρησιμοποιείται στην ανάλυση.
6. Ο τύπος ανάλυσης: προτείνονται δύο τεχνικές φασματικής ανάλυσης: η μετατροπή Fourier (FFT) και η γραμμική πρόβλεψη (LP).

4.6.2. Ανάλυση σε “πραγματικό” χρόνο (realtime)

Με την ανάλυση αυτή ο ήχος αναλύεται σε “πραγματικό” χρόνο. Πρέπει να έχουμε ένα μικρόφωνο ή οποιοδήποτε ηχητική συσκευή συνδεδεμένη με την είσοδο του ήχου του υπολογιστή. Ο εισερχόμενος ήχος θα αναλυθεί (σε FFT) και το φάσμα θα απεικονιστεί σ’ ένα νέο παράθυρο.



Αυτό το στατικό φάσμα χρησιμοποιείται αρκετά συχνά (άξονες f , t) η αναπαρίσταται με την φασμαστική περιβάλλουσα.

4.6.3. Ανάλυση FFT

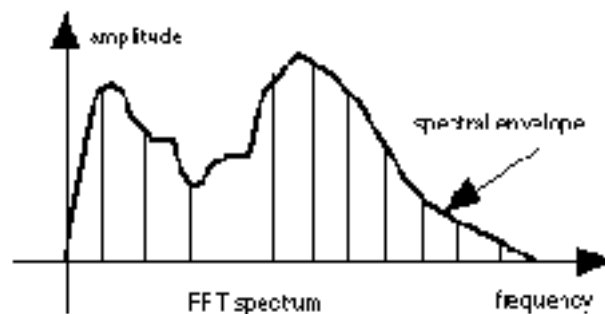
Η εντολή FFT ανάλυση ξεκινάει μία σύντομης περιόδου φασματική ανάλυση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει την μετατροπή Fourier, η οποία μετατρέπει ένα “παραθυροποιημένο” σήμα μέσα σ’ ένα φάσμα. Η μετατροπή Fourier δίνει, πάνω από ένα ορισμένο διάστημα χρόνου, την ανάλυση του ήχου μέσα σ’ ένα σύνολο narrow-band σημάτων, εκατοντάδων περίπου διαδοχικών συχνοτήτων που είναι γραμμικά κλιμακωμένες πάνω από τη συχνότητα που κυμαίνεται από μηδεν Hz ως $SR/2$ (όπου SR είναι για το ρυθμό δειγματοληψίας του ήχου). Ο αριθμός των συστατικών της συχνότητας στην οποία ο ήχος αναλύεται είναι ίσος με το μισό του μεγέθους της μετατροπής Fourier. Ο ήχος που θα αναλυθεί σώζεται όπως ένα αρχείο κειμένου, το οποίο μπορεί μετά να διαβαστεί από άλλες εφαρμογές όπως το Max, το PatchWork, το Excel κλπ. Οι παράμετροι για την ανάλυση μπορεί να τεθούν, και είναι οι εξής: μέγεθος παραθύρου ή θεμελιώδης συχνότητα, βήμα παραθύρου, μέγεθος της μετατροπής Fourier και παράθυρο ανάλυσης.

4.6.4. LPC Ανάλυση (Linear prediction coding)

Η LPC ανάλυση ξεκινάει με την φασματική ανάλυση χρησιμοποιώντας τον κώδικα γραμμικής πρόβλεψης. Είναι συνηθισμένο να υπολογίζουμε την περιβάλλουσα φάσματος. Ο ήχος που θα αναλυθεί σώζεται όπως ένα αρχείο κειμένου και μπορεί να διαβαστεί από άλλες εφαρμογές όπως το Max, PatchWork κλπ. Κι εδώ μπορούμε να θέσουμε τις παραμέτρους ανάλυσης.

Η μετατροπή Fourier και η γραμμική πρόβλεψη δεν είναι ισοδύναμες, γιατί υπολογίζουν μία φασματική αναπαράσταση του ήχου αλλά δεν περιέχουν την ίδια πληροφορία. Η μετατροπή Fourier περιέχει όλες τις πληροφορίες του φάσματος, ενώ στο φάσμα της γραμμικής πρόβλεψης, μόνο η περιβάλλουσα φάσματος εξασφαλίζεται. Η περιβάλλουσα φάσματος αφορά το πρίγραμμα του πλάτους φάσματος και όχι τόσο τα συστατικά μέρη του φάσματος. Η γνώση της περιβάλλουσας φάσματος επιτρέπει τον καθορισμό της μεγιστοποίησης της περιβάλλουσας. Η θέση των formants παίζει, για παράδειγμα, ένα σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση των φωνηέντων στο λόγο. Η περιβάλλουσα φάσματος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για φίλτρο άλλου ήχου.

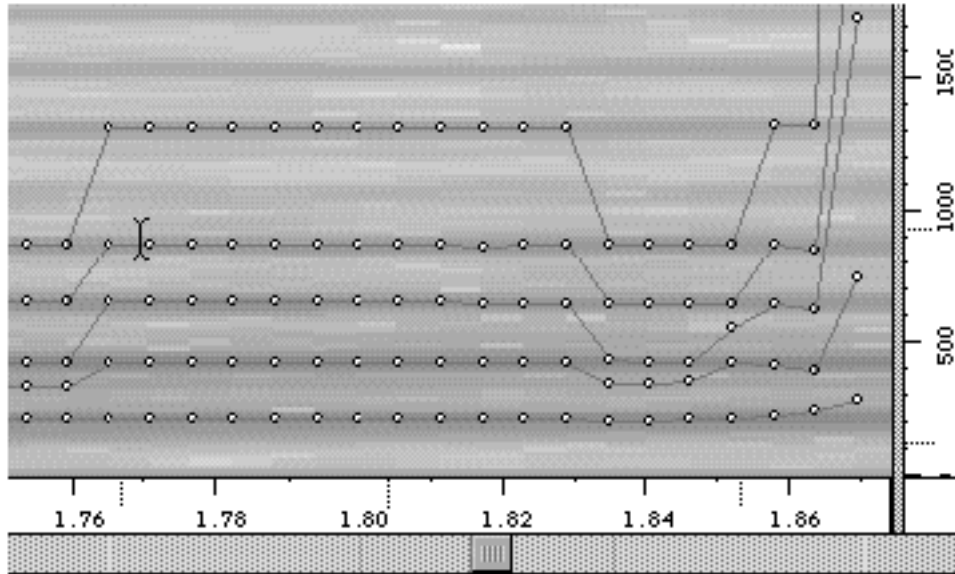
Η τεχνική του κώδικα γραμμικής πρόβλεψης (LPC) υπολογίζει ένα φίλτρο που έχει μία συχνότητα απόκλισης, η οποία μοιάζει με τη περιβάλλουσα φάσματος του ήχου. Το τμήμα μετατροπής που αναπαριστά το φίλτρο καθορίζεται από ένα σετ πόλων, οι οποίοι γίνονται ζευγάρι. Κάθε ζευγάρι της κλίσης των πόλων αναπαριστά ένα formant στη περιβάλλουσα φάσματος. Ο αριθμός των πόλων (ίσως με το διπλάσιο του αριθμού των formants), ελέγχει την ομαλότητα του διαγράμματος. Ο αριθμός των πόλων στην ανάλυση γραμμικής πρόβλεψης μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη, έτσι ώστε να αυξήσει την ακρίβεια της περιβάλλουσας φάσματος. Χρησιμοποιούνται 30 πόλοι από το πρόγραμμα.



4.6.5. Ανίχνευση κορυφής (Peak Detection η Pitch tracking)

Η εντολή Ανίχνευση κορυφής ψάχνει για την κορυφή στο φάσμα σε κάθε συνεχή σύντομη περίοδο περιβάλλουσας φάσματος. Ανοίγοντας αυτή την εντολή παρουσιάζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο οι παράμετροι μπορούν να δοθούν:

1. “Κατώφλι” σε dB: η διαφορά σε πλάτος ανάμεσα σε μία κορυφή και τα πλάτη στα γειτονικά σημεία πρέπει να ξεπεράσει το κατώφλι. Κορυφές που δεν ικανοποιούν την ανάγκη παραλείπονται. Η καθορισμένη αξία είναι 25 dB.
2. Αριθμός των κορυφών: μπορούμε να καθορίσουμε πόσες κορυφές θέλουμε να σημειωθούν. Οι πέντε υψηλότερες κορυφές είναι δοσμένες.



4.6.5.- Εκτίμηση θεμελιώδους

Η εντολή Εκτίμηση θεμελιώδους ψάχνει για την θεμελιώδη συχνότητα που βασίζεται η φασματική ανάλυση. Σ' οποιοδήποτε παράθυρο ανάλυσης γίνεται μία εκτίμηση θεμελιώδους. Στο παράθυρο διαλόγου που παρουσιάζεται μπορούμε να θέσουμε τις παραμέτρους ανάλυσης, οι οποίες είναι:

1. Ελάχιστη Θεμελιώδης: η ανάλυση δεν αναζητά τη θεμελιώδη συχνότητα κάτω από το καθορισμένο "κατώφλι" από την ελάχιστη θεμελιώδη (το "κατώφλι" είναι 50Hz).
2. Μέγιστη Θεμελιώδης: η ανάλυση δεν αναζητά τη θεμελιώδη συχνότητα πάνω από το καθορισμένο "κατώφλι" από τη μέγιστη θεμελιώδη (το "κατώφλι" είναι 2500Hz).
3. Μέγιστη αρμονική: η ανάλυση δεν μελετά αρμονικές πάνω από το καθορισμένο "κατώφλι" από τη μέγιστη αρμονική (το "κατώφλι" είναι 7500Hz).
4. "Κατώφλι" σε dB: το οποίο καθορίζει ένα επίπεδο θορύβου. Αν η διαφορά στο πλάτος μεταξύ μιας κορυφής και της υψηλότερης κορυφής είναι μεγαλύτερη από το "κατώφλι", η κορυφή παραλείπεται.

Η αναλογία Μέγιστη αρμονική/ Ελάχιστη θεμελιώδης οριοθετείται για λόγους μνήμης και υπολογίσιμο χρόνο.

4.6.6. Masking Effects

Η εντολή Masking Effects μειώνει το πλάτος φάσματος σ' ένα μικρό αριθμό κορυφών το οποίο συμβάλλει στην τονική αντίληψη. Στο παράθυρο διαλόγου μπορούμε να επιλέξουμε τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις:

1. Weights: τα weights μετράνε τη σπουδαιότητα των συστατικών του φάσματος. Το weight είναι πάντα μεγαλύτερο από το μηδέν.
2. Πλάτη που αποκρύπτονται (Masked amplitudes): τα πλάτη των συστατικών του φάσματος μετά τα εφέ που αποκρύπτονται παίρνονται σε σύνολο. Τα πλάτη των σημαντικών συστατικών του φάσματος έχουν μία θετική αξία.
3. Αντιληπτά τονικά ύψη: δίνει μία εκτίμηση του "Πραγματικού τονικού ύψους του φάσματος": το τονικό ύψος των συστατικών του φάσματος όπως γίνεται αντιληπτό από τον ακροατή.

4. Όλα: εξάγει τα weights, τα πλάτη που αποκρύπτονται και τα αντιληπτά τονικά ύψη.
Πρόσθετες παράμετροι είναι το “κατώφλι” σε dB και ο αριθμός των κορυφών.

5. ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (Sound synthesis)

Η ψηφιακή σύνθεση του ήχου ορίζεται ως η παραγωγή ενός σήματος με την βοήθεια του υπολογιστή είτε με σύνθεση απλών κυματομορφών είτε με άλλους τρόπους διαμόρφωσης του ηχητικού σήματος και δημιουργεί μια επιθυμητή ακουστική εντύπωση.

5.1. Σύντομο Ιστορικό : Απο το MUSIC V στη CSOUND

Ο τομέας της ηχητικής σύνθεσης που έκλεισε φέτος 45 χρόνια ιστορίας, θεμελιώθηκε το 1957 από τον Αμερικανό ερευνητή και μουσικό **Max Mathews** στα Bell Telephone Laboratories στο Murray Hill, στο New Jersey.

Στα πρώτα πειράματα, ο Max V. Mathews και οι συνάδελφοί του απέδειξαν ότι ένας υπολογιστής μπορεί να συνθέσει ήχους σύμφωνα με οποιοδήποτε τονικό ύψος η κυματομορφή, περιλαμβάνοντας χρονικές διαφοροποιήσεις συχνότητας και περιβάλλουσες πλάτους. Τα πρώτα συστατικά της σύνθεσης ήταν ταλαντωτές, φίλτρα ή γεννήτριες και τα πρώτα προγράμματα γράφθηκαν απ' ευθείας με όρους οδηγιών μηχανής για ένα γιγάντιο υπολογιστή IBM 704 με ένα κύκλωμα ηλεκτρικών λυχνιών, μία ισχυρή μηχανή για τις μέρες του. Οι υπολογιστές ήταν πολύ σπάνιοι εκείνο το καιρό και οι υπολογισμοί της σύνθεσης πραγματοποιήθηκαν στο IBM Headquarters στη Νέα Υόρκη.

Ο Max Mathews μετά τα πειράματά ολοκλήρωσε τις έρευνές του, με τη δημιουργία του προγράμματος MUSIC I, μέσω του οποίου έδινε τη δυνατότητα παραγωγής μίας απλής κυματομορφής: ένα ισόπλευρο τρίγωνο. Ένας υπομονετικός χρήστης θα μπορούσε έτσι να καθορίσει νότες μόνο από την άποψη του τονικού ύψους, της κυματομορφής και της διάρκειας. Ο Ψυχολόγος Newman Guttman επιχειρεί την πρώτη του σύνθεση με το πρόγραμμα MUSIC I : μία μονοφωνική σπουδή *In a Silver Scale*, που γράφτηκε το 1957.

Το 1958 ο Mathews ολοκληρώνει το πρόγραμμα MUSIC II: πρόγραμμα γραμμένο σε ειδική γλώσσα για τον υπολογιστή IBM 7094 (εφοδιασμένο με τρανζίστορ και πιο εξελιγμένο από τον IBM 704). Ο 7094 ήταν πιο γρήγορος από τον προηγούμενο, κι έτσι ήταν δυνατό να εφαρμόσουν πιο φιλόδοξες συνθέσεις αλγορίθμων. Στο νέο σύστημα ήταν διαθέσιμες τέσσερις ανεξάρτητες φωνές με μία επιλογή δεκαέξι κυματομορφών και με δυνατότητα αποθήκευσης στη μνήμη. Το Music II χρησιμοποιήθηκε από διάφορους ερευνητές στα Bell Telephone Laboratories, συμπεριλαμβανομένου τον Max Mathews, τον John Pierce και τον Newman Guttman.

Μία από τις σημαντικές εξελίξεις στο σχεδιασμό της ψηφιακής ηχητικής σύνθεσης ήταν η έννοια της μονάδας γεννητριών (UGs). Η μονάδα γεννητριών αποτελείτο από διαμορφωτές επεξεργασίας σήματος όπως οι ταλαντωτές και οι ενισχυτές, οι οποίοι μπορούσαν να αλληλοσυνδέσουν σε μορφή σύνθεσης instruments ή patches που παράγουν ηχητικά σήματα. Η πρώτη σύνθεση γλώσσας προγραμματισμού με χρήση της έννοιας της μονάδας γεννητριών ήταν το πρόγραμμα MUSIC III, που προγραμματίστηκε από τον Max Mathews και τον συνάδελφό του Joan Miller το 1960. Με την ανάπτυξη του MUSIC III άρχισε να αναπτύσσεται μία οικογένεια συστημάτων της software σύνθεσης που βασίζονταν στην έννοια της μονάδας γεννητριών.

Το Music IV ήταν μία αντιγραφή του Music III σε μία νέα μακρά συγκεντρωμένη γλώσσα, αναπτύχθηκε στα Bell Laboratories και ονομάστηκε BEFAP.

Το Music V, που αναπτύχθηκε το 1968, ήταν το αποκορύφωμα των προσπαθειών του Max Mathews στη software σύνθεση. Το Music V γράφτηκε σχεδόν αποκλειστικά στην Fortran IV- μία καθιερωμένη γλώσσα - και έγινε εξαγωγή του σε διάφορα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα σ' όλο το κόσμο στις αρχές του 1970. Για πολλούς μουσικούς χρησίμευσε σαν μία εισαγωγή στη τέχνη της ψηφιακής ηχητικής σύνθεσης.

Παίρνοντας σαν μοντέλο το Music IV ή το Music V, αναπτύχθηκαν κι άλλα προγράμματα σύνθεσης όπως το Music 4BF, το Music 360, το Music 7, το Music 11, το Csound, το MUS10, το Cmusic, το Common Lisp Music, και άλλα.

Πέρα από το Music V και τις παραλλαγές που δημιουργήθηκαν έγιναν κι άλλες προσπάθειες στην ηχητική σύνθεση. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο Ιάννης Ξενάκης προσπαθεί να δημιουργήσει το στοχαστικό μοντέλο σύνθεσης. Χρησιμοποιώντας τα προγράμματα UPIC και GENDY1 παράγει συνθετικούς ήχους που βασίζονται στους στοχαστικούς νόμους.

Το πρόγραμμα Chant είναι ένα πρόγραμμα ηχητικής σύνθεσης που δημιουργήθηκε στο IRCAM από την ομάδα του Xavier Rodet το 1979. Οι FOF (formant wave-function) είναι η βάση για το πρόγραμμα Chant. Το Chant δίνει την δυνατότητα στο χειριστή του να δημιουργήσει μία μεγάλη κατηγορία από φυσικούς μηχανισμούς που αντηχούν όταν διεγείρονται και διακόπτονται από φυσικές δυνάμεις, όπως είναι η τριβή.¹⁵ Το βασικό μοντέλο παραγωγής ήχου του Chant είναι η φωνή. Παρ' όλα αυτά οι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν τις περισσότερες παραμέτρους του προγράμματος για να πάρουν πέρα από τη φωνητική σύνθεση κι άλλους ήχους οργάνων. Ο Xavier Rodet και οι συνάδελφοί του χρησιμοποίησαν το Chant για να αναπτύξουν μοντέλα ανδρικών και γυναικείων τραγουδιστών, παραδοσιακά έγχορδα, ξύλινα πνευστά, κόρνες και κρουστά.

Τελικά, μετά από πολλές έρευνες που έγιναν στο IRCAM, για ένα πρόγραμμα σύνθεσης, ανάλυσης και επεξεργασίας των ήχων, σχεδιάστηκε το πρόγραμμα AudioSculpt και βασίζεται στο SVP (Super Vocodeur de Phase). Θα αναφερθούμε εκτενέστερα για το πρόγραμμα Audiosculpt σε επόμενα κεφάλαια.

5.2. Συνοπτικό Σχεδιάγραμμα του Ιστορικού

- 1957: ο Max Mathews, ερευνητής στα Bell Telephone Laboratories (États-Unis) πραγματοποιεί την πρώτη ηχητική ψηφιακή εγγραφή και σύνθεση ήχου μέσω υπολογιστή. Τα πρώτα συστατικά της σύνθεσης: ταλαντωτές, φίλτρα η γεννήτριες χρονικών εξελίξεων του φάσματος γραμμένες σε πρόγραμμα FORTRAN. Σύνδεση των modules με patches όπως και στο Turbosynth.
- Χρήση των μοντέλων αφαιρετικής και προσθετικής σύνθεσης στα πρώτα έργα ηλεκτρονικής Μουσικής στο Στουντιο της Κολωνίας (όπως το Gesang der Junglinge), το 1956.
- Χρήση των μοντέλων προσθετικής (additive) και αφαιρετικής σύνθεσης (soustractif) απο τον Max Mathews και J.C.Risset (Catalogue de sons, 1969) στην προσπάθεια τους να αναπαράγουν τους ήχους όλων των οργάνων (simulation).

¹⁵ . Για παράδειγμα, τα κουδούνια αντηχούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ ένα wood-block έχει μία αντήχηση που αποσβένει σχεδόν αμέσως. Οι φωνητικές χορδές παράγουν μία σειρά γρήγορων ωθήσεων σε συνεχή διέγερση αντηχίσεων στη φωνητική έκταση, δημιουργώντας έναν ήχο κάποιου τονικού ύψους. Αυτά τα συστήματα είναι όλα αναλογίες για τον τρόπο, με τον οποίο λειτουργούν οι γεννήτριες FOF.

- 1968: Ψηφιακή Δειγματοληψία ήχων απο τους Ussachevsky -Luening στα Εργαστήρια Bell.

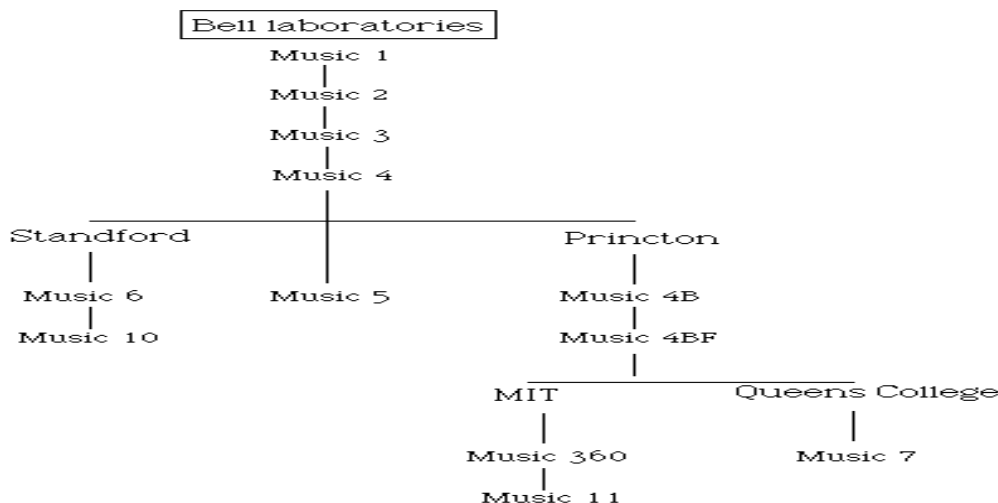
Γέννηση της «συγκεκριμένης Μουσικής μέσω υπολογιστή».

- 1972: Σύνθεση ήχων με διαμόρφωση συχνότητας-FM Synthesis (J. Chowning) : Αυτή η τεχνική θα φέρει μια επανάσταση στον κόσμο της ηλεκτρονικής οργανοποιίας διότι χρησιμοποιήθηκε κατά κόρο απο τα περισσότερα συνθεσαΐζερ του εμπορίου , καθώς επιτρέπει την σύνθεση των ήχων με φθηνά μέσα.
- Αρχές της δεκαετίας του 1970: το Στοχαστικό μοντέλο σύνθεσης του Ξενάκη.

Προσπαθεί να φέρει τις πολύπλοκες ιδέες περί στοχαστικής μουσικής απο την Μακροσύνθεση στην μικροσύνθεση. Προγράμματα :UPIC -GENDY:(Gen pour génération et Dy pour dynamique) παράγουν συνθετικούς ήχους βασιζόμενοι σε στοχαστικούς νόμους.

•

Οι διάφορες versions του πρόγραμματος σύνθεσης MUSIC



- Αρχές 70: Μοντέλο ανάλυσης -σύνθεσης των ήχων (LPC) Linear predicting code. Αναπτύσσεται απο επιστήμονες και Μουσικούς του MIT (Βοστώνη). Αποτελεί την βάση της Cross synthesis για την δημιουργία υβριδίων .
- 1974: C. Roads: Granular synthesis: τεχνική στατιστικής μοντελοποίησης στην διάσταση του χρόνου.
- 1979: Πρόγραμμα σύνθεσης ήχων: CHANT (IRCAM) απο την ομάδα του X. Rodet, για την σύνθεση φωνής+modèles de résonance
- 1981: εφεύρεση το αλγορίθμου Karplus - Strong που επιτρέπει την σύνθεση φυσικών μοντέλων. Δεν παραμετροποιούμε το ακουστικό σή'μα όπως στα προηγούμενα μοντέλα αλλά το ίδιο το όργανο.(σχέση μεταξύ αιτίας και αποτελέσματος).
- 1983: Διατίθεται το MIDI στην αγορά (Musical Interface for Digital Instrument). Διασυνδεδετικό μεταξύ των ψηφιακών μέσω παραγωγής , επεξεργασίας και έλεγχου των ήχων
- 1984: Το πρόγραμμα PARSHL (Center of Computer Research of music and Acoustics) στο πανεπιστήμιο Stanford επεκτείνει τον phase vocoder στην σύνθεση μη αρμονικών στοιχείων.

5.3. Οι Τεχνικές σύνθεσης του ήχου

Οι τεχνικές σύνθεσης ήχου κατατάσσονται ανάλογα με την λειτουργία τους σε διάφορες κατηγορίες::

- προσθετική σύνθεση
- αφαιρετική σύνθεση
- τεχνικές διαμόρφωσης του ήχου (κατά πλάτος, κατά συχνότητα, κατά φάση)
- τεχνικές επξεργασίας του φάσματος (Distortion)
- τεχνικές γραμμικής και μη γραμμικής σύνθεσης.

Στην παράγραφο που ακολουθεί θα αναφέρουμε ενδεικτικά τις κυριότερες μεθόδους σύνθεσης, καθώς το θέμα αυτό θα αναπτυχθεί αναλυτικότερα στα πλαίσια του προγράμματος «Ανάλυση και σύνθεση ήχων». στο εαρινό εξάμηνο.

Ετσι θα αναφερθούμε στις κυριότερες τεχνικές σύνθεσης όπως :

1. Additive synthesis (προσθετική σύνθεση)
2. Subtractive synthesis (Αφαιρετική σύνθεση)
3. FM synthesis
4. LPC synthesis
5. Cross synthesis
- 6 Granular synthesis
7. Physical models synthesis.

5.3.1. Προσθετική σύνθεση

Η προσθετική σύνθεση στηρίζεται στο θεώρημα του Fourier στην σύμφωνα με το οποίο, *κάθε περιοδική κυματομορφή μπορεί να εκφραστεί σαν άθροισμα απείρου αριθμού ημιτονοειδών κυματομορφών σε αρμονική σχέση με την θεμελιώδη συχνότητα (ακέραια πολλαπλάσια) αλλά με ξεχωριστό πλάτος, φάση και περιβάλλουσα.*

Ο H.Helmholtz συνεχίζει την έρευνα του Fourier, πειραματιζόμενος για πρώτη φορά στην σύνθεση των ήχων (με φυσικά μέσα) με την συνάθροιση των ημιτονοειδών αρμονικών.

Αν θεωρήσουμε ότι $F(t)$ μια περιοδική κυματομορφή, τότε εκφράζεται σαν το άθροισμα των ημιτονοειδών της κυματομορφών:

$$F(t) = \sum A_k \cdot \eta\mu(k\omega t + \phi_k)$$

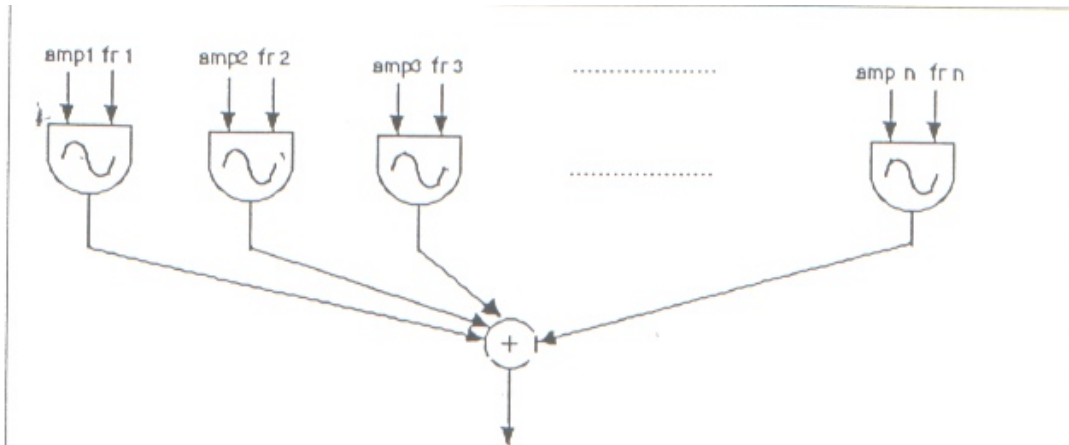
Όπου A_k : το πλάτος των αρμονικών

ω , η γωνική ταχύτητα της θεμελιώδους συχνότητας

ϕ_k , η φάση της εκάστοτε αρμονικής

k , φυσικός αριθμός απο το 1 έως και το άπειρο.

Η βασική αρχή της προσθετικής σύνθεσης που στηρίζεται στο παραπάνω μοντέλο (πρόσθεση πολλών ημιτονοειδών ταλαντωτών με ρυθμισμένη τη συχνότητα, το πλάτος και τη φάση) εκφράζεται με το παρακάτω σχήμα :



εικ.5.2.. Η Αρχή της προσθετικής σύνθεσης

Πλεονεκτήματα

Η προσθετική σύνθεση παρουσιάζει πολύ καλή ποιότητα στην αναπαραγωγή του ήχου (όταν προέρχεται από ανάλυση Fourier με την βοήθεια του αλγορίθμου FFT¹⁶) και παρέχει πολύ μεγάλο έλεγχο στις διάφορες παραμέτρους της κάθε μιάς παραγωγού καθώς είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη.

Μειονεκτήματα:

οι περισσότεροι ήχοι δεν είναι περιοδικοί

η ανάλυση κατά Fourier είναι στιγμιαία (δεν λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη του ήχου στο χρόνο και κατά συνέπεια οι περιβάλλουσες των αρμονικών –ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την «ζωντάνια» του αναπαραγόμενου ήχου).

η ανεξαρτησία των παραμέτρων απαιτεί πολλούς ταλαντωτές και η διαδικασία της σύνθεσης καθίσταται ακριβή, εκτός του ότι δημιουργεί προβλήματα στον χειρισμό τόσων παραμέτρων

αν μεταβάλλουμε το τονικό ύψος ενός συνθετικού δείγματος που έχει δημιουργηθεί με προσθετικά δείγματα μεταβάλλονται και οι παράγωγες του.

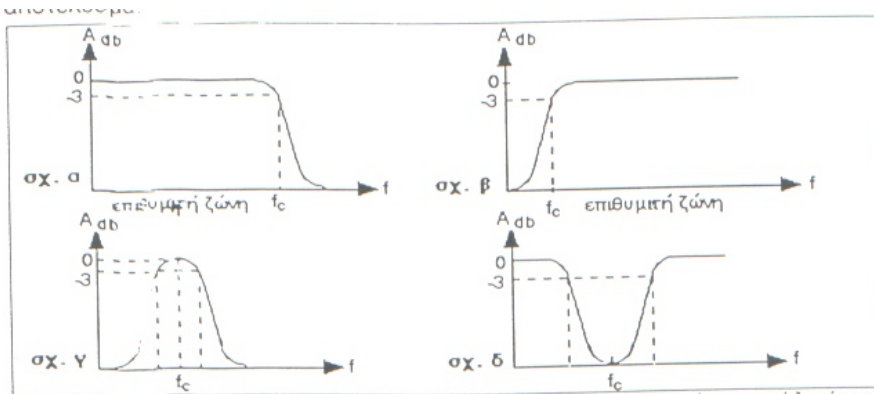
Πάνω στις αρχές της προσθετικής σύνθεσης στηρίχτηκε η φιλοσοφία των πρώτων έργων ηλεκτρονικής μουσικής στο Studio της Κολωνίας.

Τα τελευταία χρόνια, έχει βελτιωθεί κατά πολύ η παραγωγή ηχοχρωμάτων με προσθετική σύνθεση καθώς αυξήθηκε η υπολογιστική ικνότητα των υπολογιστών και με το ισχυρό εργαλείο της FFT (Fast Fourier Transform) δίνεται η δυνατότητα γρήγορου υπολογισμού των παραμέτρων.

¹⁶ Η εντολή FFT ανάλυση ξεκινάει μία σύντομη περίοδο φασματική ανάλυση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει την μετατροπή Fourier, η οποία μετατρέπει ένα "παραθυροποιημένο" σήμα μέσα σ' ένα φάσμα. Η μετατροπή Fourier δίνει, πάνω από ένα ορισμένο διάστημα χρόνου, την ανάλυση του ήχου μέσα σ' ένα σύνολο narrow-band σημάτων, εκατοντάδων περίπου διαδοχικών συχνοτήτων που είναι γραμμικά κλιμακωμένες πάνω από τη συχνότητα που κυμαίνεται από μηδεν Hz ως $SR/2$ (όπου SR είναι για το ρυθμό δειγματοληψίας του ήχου). Ο αριθμός των συστατικών της συχνότητας στην οποία ο ήχος αναλύεται είναι ίσος με το μισό του μεγέθους της μετατροπής Fourier. Ο ήχος που θα αναλυθεί σώζεται όπως ένα αρχείο κειμένου, το οποίο μπορεί μετά να διαβαστεί από άλλες εφαρμογές όπως το Max, το PatchWork, το Excel κλπ. Οι παράμετροι για την ανάλυση μπορεί να τεθούν, και είναι οι εξής: μέγεθος παραθύρου ή θεμελιώδης συχνότητα, βήμα παραθύρου, μέγεθος της μετατροπής Fourier και παράθυρο ανάλυσης.

5.3.2. Αφαιρετική Σύνθεση

Η αφαιρετική σύνθεση είναι σχεδόν το αντίθετο της προσθετικής: ενώ στην προσθετική σύνθεση ξεκινάμε με απλούς ήχους για να κατασκευάσουμε σύνθετους, στην αφαιρετική ξεκινάμε με σύνθετους και μέσα από μια σειρά φίλτρων αφαιρούμε αρμονικούς από το φάσμα τους. Η Αφαιρετική σύνθεση βασίζεται στο μοντέλο Source-filtre (πηγής-ήχου, κατ' αναλογία του μοντέλου ενός μουσικού οργάνου (όπου ο ταλαντωτής φιλτράρεται από το αντηχείο). Η μέθοδος της αφαιρετικής σύνθεσης γειτνιάζει με την μέθοδο των φυσικών μοντέλων (όσον αφορά τρόπο ακουστικής λειτουργίας ενός οργάνου).



Εικ.12 Παρατηρούμε τέσσερα είδη φίλτρων που χρησιμοποιούνται στην αφαιρετική σύνθεση

Πηγή

Υπάρχουν δύο τύποι γεννητριών για την παραγωγή ήχων με πλούσιο αρμονικό φάσμα (πηγή): οι γεννήτριες κυματομορφών και οι γεννήτριες θορύβου

Φίλτρα

Χρησιμοποιούνται διάφορων ειδών φίλτρα ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων που θέλουμε να αποκόψουμε:

Βαθυπερατά: αποκόβουν τις υψηλές συχνότητες

Υψιπερατά: αποκόβουν τις χαμηλές συχνότητες

Ζωνοπερατά: αποκόβουν όλες τις περιοχές γύρω από μία ορισμένη συχνότητα

Φίλτρα αποκοπής ζώνης: αποκόβουν μια περιοχή γύρω από μία επιλεγμένη συχνότητα.

Πλεονεκτήματα:

Η αφαιρετική σύνθεση είναι πιο οικονομική μέθοδος καθώς απαιτεί λιγότερους υπολογισμούς και ταλαντωτές από την προσθετική, και για αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά κόρο σαν βασική μέθοδος σύνθεσης στα αναλογικά συνθεσαΐζερ.

Μειονέκτημα

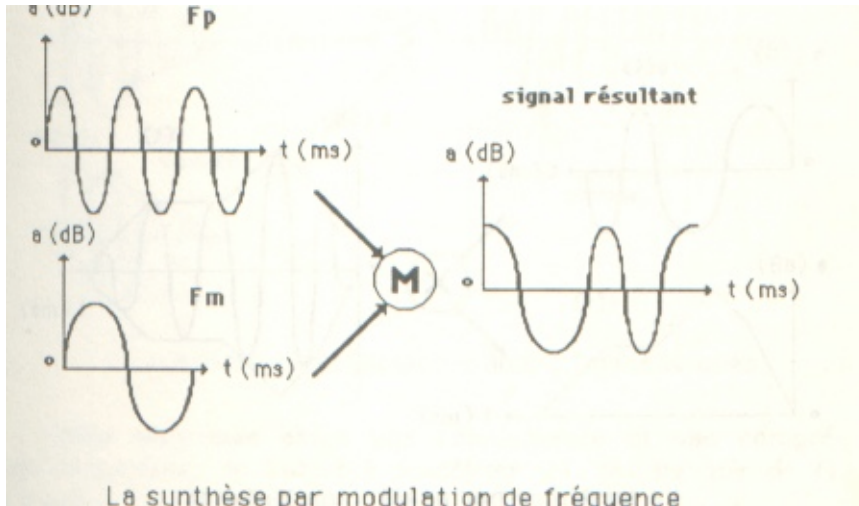
Δεν έχει την ποιότητα και την δυνατότητα λεπτού χειρισμού των παραμέτρων όπως στην προσθετική σύνθεση.

5.3.3. Frequency Modulation Synthesis

Η τεχνική της διαμόρφωσης συχνότητας ανήκει στις τεχνικές των μη γραμμικών συστημάτων (σε αντίθεση με την προσθετική σύνθεση) και αναπτύχθηκε το 1973 στο Πανεπιστήμιο του Stanford από τον Αμερικανό συνθέτη John Chowning .

Η βασική αρχή της FM είναι η διαμόρφωση συχνότητας ενός ταλαντωτή σύμφωνα με την αυξομείωση της συχνότητας διαμόρφωσης.

Εστω ο φέρων ταλαντωτής (carrier) με κεντρική συχνότητα F_c και πλάτος A και ο ταλαντωτής διαμόρφωσης (modulator) με συχνότητα F_m και πλάτος A_m .



εικ.5.3.. FM Σύνθεση

Οι βασικοί παράμετροι για την FM σύνθεση είναι οι ακόλουθες :

- d =απόκλιση συχνότητας (frequency deviation)
- f_m =συχνότητας διαμόρφωσης (modulator frequency)
- A_c =πλάτος φέρουσας
- F_c = συχνότητας φέρουσας
- $I=d/f_m$ Δείκτης διαμόρφωσης

Στην είσοδο του φέροντος ταλαντωτή εισέρχεται το άθροισμα της F_c και του ταλαντωτή διαμόρφωσης, έτσι ώστε όταν δεν υπάρχει διαμόρφωση (δηλ.η απόκλιση συχνότητας $d=0$) να ακούγεται απλά το σήμα F_c , ενώ όταν υπάρχει διαμόρφωση το σήμα F_m να αυξομειώνει την συχνότητα F_c .

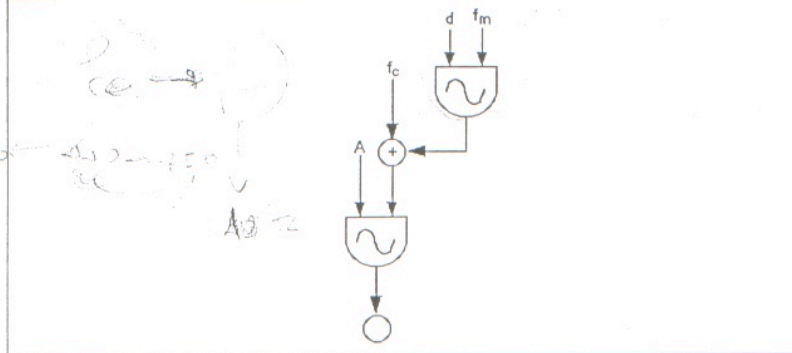
Το ποσό της διαμόρφωσης καθορίζεται από το d τη συχνότητας απόκλισης (που μετριέται σε Hz), δηλ την απόκλιση από την κεντρική συχνότητα ενώ η τελική συχνότητα καθορίζεται από την F_m .

Η διαμόρφωση συχνότητας μπορεί να κατανοηθεί με τη βοήθεια ενός απλού διαγράμματος αναλογικού συνδυασμού όπως το παρακάτω (εικ.14.).Ο φορέας είναι ο ταλαντωτής του οποίου η στιγμιαία του συχνότητα μεταβάλλεται από την κεντρική αξία του VCA. Η είσοδος του VCA τροφοδοτείται από το διαμορφωτή -ταλαντωτή που μαζί με το φορέα παράγουν ημιτονοειδείς κυματομορφές. Τρεις είσοδοι ελέγχου τροφοδοτούνται· ο διαμορφωτής συχνότητας και ο δείκτης διαμόρφωσης. Στην FM το προϊόν του φορέα περιέχει πλάγιες ζώνες, που είναι συχνότητες διαφορετικές από τη φέρουσα συχνότητα. Οι δυνάμεις όλων των ζωνών συχνοτήτων είναι υποταγμένες σε μία παράμετρο: το δείκτη διαμόρφωσης I που καθορίζει την κατανομή της ενέργειας μεταξύ των συχνοτήτων στο φάσμα.

Έτσι με μόνο τρεις παραμέτρους στη διάθεσή μας, προσδιορίζουμε το τονικό ύψος, το αρμονικό περιεχόμενο και τον “έσω-χορδισμό” (αναλογία μεταξύ του κεντρικού φορέα συχνότητας και του διαμορφωτή συχνότητας). Αν προσπαθήσουμε να

ελέγχουμε τον συντονισμό των αρμονικών ενός τόνου θα διαπιστώσουμε ότι μια μικρή αλλαγή στο διαμορφωτή συχνότητας φέρνει μία ριζική αλλαγή στο ηχόχρωμα.

Η συνδεσμολογία της F.M. σύνθεσης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



εικ.5.3. Η συνδεσμολογία της FM σύνθεσης

Το φάσμα του τελικού σήματος περιέχει τις συχνότητες f_c , f_c+f_m , f_c-f_m , f_c+2f_m , f_c-2f_m , δηλαδή τις συχνότητες f_c+kf_m όπου k ακέραιος αριθμός.

Η τεχνική FM μας δίνει την δυνατότητα τεχνητού Vibrato (μιας περιοδικής αυξομείωσης του τονικού ύψους γύρω από την κεντρική συχνότητα). Το Vibrato επιτυγχάνεται όταν η συχνότητα διαμόρφωσης είναι μικρότερη από 16 Hz και η απόκλιση της διαμόρφωσης d πολύ μικρή.

Πλεονέκτημα: οικονομία των μέσων καθώς με δύο ταλαντωτές μπορεί να προσφέρει μια ανεξάντλητη παλλέτα ήχων.

Την ευρεσιτεχνία της εφεύρεσης την αγόρασε η Yamaha και την χρησιμοποίησε στο περίφημο συνθεσάιζερ DX7.

5.4. LPC σύνθεση

Μιά τεχνική σύνθεσης που συγγενεύει με την αφαιρετική και πρωτοχρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή συνθετικής φωνής είναι ο κώδικας γραμμικής πρόβλεψης (LPC: Linear prediction coding).

Η τεχνική LPC στηρίζεται στην γραμμική πρόβλεψη της φασματικής περιβάλλουσας.

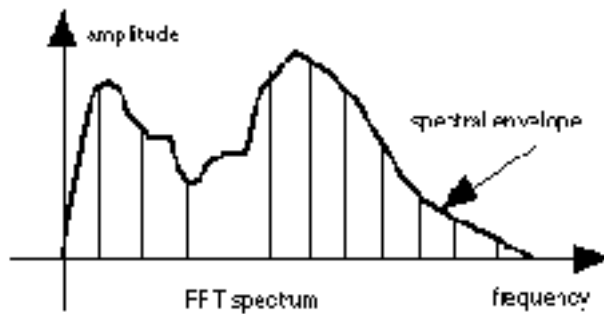
Η μετατροπή Fourier και η γραμμική πρόβλεψη δεν είναι ισοδύναμες, γιατί υπολογίζουν τη φασματική αναπαράσταση του ήχου αλλά δεν περιέχουν την ίδια πληροφορία: ο μετασχηματισμός Fourier (FFT) περιέχει όλες τις πληροφορίες του φάσματος, ενώ με τη γραμμική πρόβλεψη (LPC) μόνο η περιβάλλουσα φάσματος εξασφαλίζεται.

Η περιβάλλουσα φάσματος αφορά το περίγραμμα του πλάτους φάσματος και όχι τόσο τα συστατικά μέρη του φάσματος. Η θέση των formants παίζει, για παράδειγμα, ένα σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση των φωνηέντων στο λόγο. Η περιβάλλουσα φάσματος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για φίλτρο άλλου ήχου.

Η τεχνική του κώδικα γραμμικής πρόβλεψης (LPC) υπολογίζει ένα φίλτρο που έχει μία συχνότητα απόκλισης, η οποία μοιάζει με τη περιβάλλουσα φάσματος του ήχου.

Το τμήμα μετατροπής που αναπαριστά το φίλτρο καθορίζεται από ένα σετ πόλων, οι οποίοι γίνονται ζευγάρι. Κάθε ζευγάρι της κλίσης των πόλων αναπαριστά ένα formant στη περιβάλλουσα φάσματος. Ο αριθμός των πόλων (ίσως με το διπλάσιο

του αριθμού των formants), ελέγχει την ομαλότητα του διαγράμματος. Ο αριθμός των πόλων στην ανάλυση γραμμικής πρόβλεψης μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη, έτσι ώστε να αυξήσει την ακρίβεια της περιβάλλουσας φάσματος.



Εικ.14 .Η περιβάλλουσα φάσματος ενός ήχου που υπολογίζεται από την τεχνική LPC

5.3.5. Cross Synthesis (Διασταυρούμενη σύνθεση)

Μια παράγωγη σύνθεση της LPC, είναι η Cross synthesis. Η Διασταυρούμενη (Cross) σύνθεση είναι ο συνδυασμός δύο ήχων στο επίπεδο της φασματικής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει διαφορετικούς τύπους φασματικών μίξεων ανάμεσα σε δύο ήχους.

Η cross σύνθεση πηγή-φίλτρου συνίσταται στον πολλαπλασιασμό του φάσματος της μετατροπής Fourier με μία περιβάλλουσα φάσματος που προκύπτει την ανάλυση γραμμικής πρόβλεψης:: ο πρώτος ήχος φιλτράρεται από τη περιβάλλουσα φάσματος του δεύτερου. Στην ουσία η πηγή είναι ο πρώτος ήχος και το φίλτρο είναι η περιβάλλουσα φάσματος του δεύτερου.

Μία κοινή εφαρμογή είναι το φιλτράρισμα ενός ενόργανου ήχου από τη φωνή, έτσι ώστε να έχει ένα εφφέ “οργάνου που μιλάει”.¹⁷ Το ηχόχρωμα του οργάνου παραμορφώνεται από τα formants της φωνής.

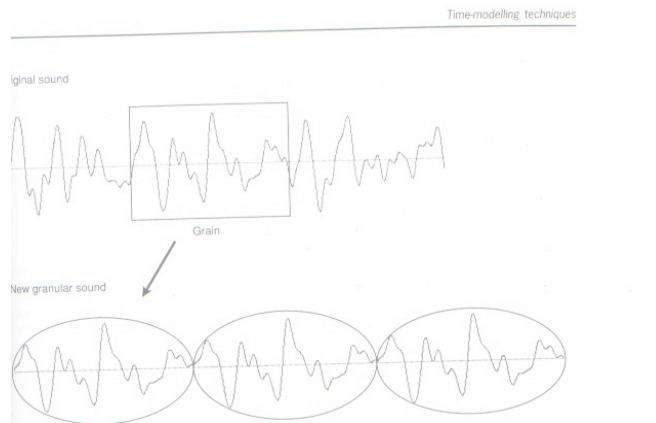
5.3.6. Σύνθεση με ηχητικούς κόκκους (Granular Synthesis)

Η τεχνική σύνθεσης με κόκκους βασίζεται στα αποτελέσματα έρευνας του φυσικού Denis Gabor(1946): ορμώμενος από τα κβάντα της Φυσικής θεώρησε ότι και ήχος αποτελείται από μικρούς κόκκους (grains) ή μουσικά κβάντα και είναι οι βραχύτεροι ήχοι που μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί . Ένας κόκκος έχει την διάρκεια 10-50 msec. .Το αυτί μας όμως μπορεί να διακρίνει ήχους από 5-7 ms και πέρα.

Ο Ι. Ξενάκης στηρίχτηκε σε αυτή την θεωρία και την ανέπτυξε το 1971, μέσω του μοντέλου GENDY, σε τεχνική σύνθεσης με την βοήθεια του υπολογιστή. Σύμφωνα με τον Ξενάκη «όλοι οι ήχοι γίνονται αντιληπτοί σαν ένα μεγάλος αριθμός στοιχειωδών ήχων κατάλληλα τοποθετημένων στο χρόνο. Χιλιάδες καθαροί ήχοι εμφανίζονται στην αττάκα η την αποδέσμευση ενός ήχου σε ένα μεγαλύτερο η μικρότερο διάστημα του χρόνου.»

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που συναντάμε σε λογισμικά granular σύνθεσης είναι :

το σχήμα της περιβάλλουσας του κόκκου (ο κόκκος στο σχήμα15 είναι μέσα στο τετράγωνο η τον κύκλου)
η κυματομορφή του κόκκου
η συχνότητα του κόκκου
η διάρκεια του κόκκου
χρόνος καθυστέρησης μεταξύ των κόκκων
εντοπισμός του κόκκου σε στερεοφωνικό πεδίο



εικ.5.4.. Δείγμα των ηχητικών κόκκων

Η granular synthesis είναι μια μορφή προσθετικής σύνθεσης καθώς για την σύνθεση του ήχου απαιτούνται χιλιάδες κόκκοι που χαρακτηρίζονται από την συχνότητα, την ένταση τους και στην σύνθεση τους από την πυκνότητα, το ρυθμό δειγματοληψίας κτλ.

Μηχανισμοί υψηλού επιπέδου χρησιμοποιούνται για τον συνδυασμό των κόκκων όπως οι παρακάτω τεχνικές :

Διαβατικές περιβάλλουσες
τυχαίες τιμές
Πιθανότητες
Fractal γεωμετρία
cellular automata.

5.7.Τεχνική σύνθεσης με φυσικά μοντέλα (Physical modeling)

Η βασική ιδέα αυτής της τεχνικής στηρίζεται στην παραγωγή του ήχου έχοντας σαν πρότυπο την πηγή του οργάνου και όχι το τελικό αποτέλεσμα του (σήμα).

Στηρίζεται αποκλειστικά στην ανασύνθεση του ήχου πάνω στο μοντέλλο της πηγής. Για να γίνει αυτό εφικτό πρέπει να μελετηθούν και να αναπαρασταθούν όλες οι μηχανικές ακουστικές ιδιότητες της πηγής και οι αλληλεπιδράσεις των μελών του οργάνου, ώστε να συνυπολογίζεται η συμβολή τους στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

5.8.Άλλες τεχνικές σύνθεσης

Waveshaping : είναι μια μη γραμμική τεχνική που παρέχει μεγάλες δυνατότητες φασματικών αλλαγών με την παραμόρφωση του πλάτους των αρμονικών ή παραγώγων συχνοτήτων

Resynthesis : είναι μια ενδιαφέρουσα τεχνική σύνθεσης με την οποία οι ήχοι δειγματολαμβάνονται ψηφιακά, εκτίθενται σε μια αναπαράσταση για ανάλυση με τη

χρήση του computer, αναλύονται παραμετρικά για τη διαμόρφωση ενός ειδικού μοντέλου και έπειτα επανασυντίθενται. Παρ'όλο που δεν είναι μια real-time τεχνική, βρίσκει αυξανόμενη χρήση στη μίμηση των οργάνων.

Γραμμική αριθμητική σύνθεση (ΓΑΣ) : το 1987 η εταιρεία Roland παρουσίασε το συνθεσάιζερ Roland D-50 που στηρίζεται ΓΑΣ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ένα αριθμό διαφορετικών συστατικών για τη δημιουργία ήχου, γνωστά σαν τμήματα (partials). Τα τμήματα αυτά είναι είτε ψηφιακά κατασκευασμένες κυματομορφές, είτε δείγματα κωδικοποιημένων διαμορφωμένων παλμών. Προκειμένου να συνθέσουμε κυματομορφές χρησιμοποιούνται διάφορα συστατικά στοιχεία, περικλείοντας μια γεννήτρια κύματος, χρονο-μεταβλητό φίλτρο και διαμορφωτή, τρεις γεννήτριες περιβάλλουσας και τρεις ταλαντωτές χαμηλής συχνότητας. Αυτά τα στοιχεία συμπεριφέρονται μ'ένα προβλεπόμενο τρόπο, παρόμοιο με τα αναλογικά συστατικά και βοηθούν στη δημιουργία *γραμμικής αριθμητικής σύνθεσης* με αρκετή ευκολία στη χρήση και ειδικά αν ο χρήστης είναι εξοικειωμένος με την αναλογική σύνθεση.

5.4. Περιβάλλοντα ηχητικής σύνθεσης

Όπως αναφέρουμε και στο ιστορικό, από το 1970 και μετά αναπτύχθηκαν αρκετά μοντέλα ηχητικής σύνθεσης που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως από συνθέτες ηλεκτρακουστικής μουσικής όπως τα παρακάτω :

MUSIC V (University of Stanford, 1970)

CHANT (IRcam, 1980)

UPIC (Xenakis, 1978)

CSOUND (1980)

GENDY (Cemamu, Xenakis, 1990)

AUDIOSCULPT (IRCAM 1994))

MODALYS (IRCAM, 1996)

Υβριδικά συστήματα (μουσικής και ηχητικής σύνθεσης)

GROOVE (Generated Real-time Output Operations on Voltage Controlles Equipment, Max Mathews Bell Laboratoris 1970)

MUSYS III *Zinovieff, Cockerell Grogono, Λονδίνο 1969)

VIRTUAL WAVES

5.4.1. Το πρόγραμμα AudioSculpt

Το AudioSculpt, ένα από τα πιο εύχρηστα και φιλικώς κείμενα στο χρήστη προγράμματα ανάλυσης, σύνθεσης και επεξεργασίας των ήχων, βασίστηκε στο πρόγραμμα SVP 1.3 για το Macintosh. Είναι μία γραφική ενδοεπικοινωνία για την αναπαράσταση ήχων και για τον έλεγχο των μετατροπών (χρόνος επέκτασης ή συμπίεσης, φιλτράρισμα, cross σύνθεση, κ.λ.π.). Περιέχει όλες τις εντολές που διαθέτει το SVP 1.3 για το Macintosh και προσθέτει κάποιες νέες δυνατότητες. Τα κύρια χαρακτηριστικά του γνωρίσματα είναι η *φασματογραφική ανάλυση (sonogram)* και το *φιλτράρισμα των επιφανειών κατ' ευθείαν πάνω στη sonogram ανάλυση*.

Το AudioSculpt είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης-σύνθεσης, που αναπτύχθηκε στο IRCAM το 1994, χρήσιμο για ενδιαφέρουσες έρευνες στη δομή του ήχου, καθώς επίσης και στους χρήστες, οι οποίοι εύχονται να μελετήσουν και να αλλάξουν τις ιδιότητες των ήχων. Οι εφαρμογές για τη μουσική σύνθεση είναι πολλαπλές καθώς ο χρήστης μπορεί να :

να επεξεργαστεί αναξάρτητα το πλάτος, τη συχνότητα και το χρόνο εξέλιξης των μουσικών ήχων, αν είναι φυσικό, ενόργανοι ή ήχοι φωνής
έχει πρόσβαση σε προχωρημένα αποτελέσματα ανάλυσης με τη μορφή αρχείων, που μπορούν να ερμηνευθούν και από άλλα προγράμματα
χειριστεί κατ' ευθείαν τη γραφική παράσταση, μία διαδικασία που απλουστεύει τους χειρισμούς του σύνθετου ήχου.

5.4.2. Περιγραφή του AudioSculpt

Η πιο ουσιαστική διαφορά του AudioSculpt από τα άλλα προγράμματα ανάλυσης ήχου είναι η *φασματογραφική ανάλυση (sonogram ανάλυση)*. Η φασματογραφική ανάλυση διευκολύνει την επεξεργασία γιατί οι ιδιότητες του ήχου μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά. Ο χρήστης μπορεί να δουλέψει κατ' ευθείαν στο παράθυρο που περιέχει τη sonogram ανάλυση. Άλλες δυνατές αναλύσεις στο πρόγραμμα είναι: η μετατροπή Fourier (FFT), ο υπολογισμός της περιβάλλουσας φάσματος με τη τεχνική της γραμμικής πρόβλεψης, η ανίχνευση κορυφής σε μία σύντομη περίοδο

φάσματος, η εκτίμηση της θεμελιώδους συχνότητας, ο υπολογισμός των αντιληπτών τονικών υψών και weights.

5.4.3.Σύνθεση του ήχου

Με το AudioSculpt νέοι ήχοι μπορούν να συνθεθούν βασιζόμενοι στην ανάλυση ενός ή δύο υπάρχοντων ήχων. Η *Διασταυρώμενη (Cross) σύνθεση* είναι ο συνδυασμός δύο ήχων στο επίπεδο της φασματικής ανάλυσης και χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει διαφορετικούς τύπους μίξεων ανάμεσα σε δύο ήχους, αποτελέσματα υβριδίων κλπ. Το AudioSculpt επιτρέπει δύο τύπους της cross σύνθεσης: cross σύνθεση πηγής- φίλτρου (source- filter cross synthesis) και γενικευμένη cross σύνθεση (Generalized cross synthesis).

α. Cross Σύνθεση πηγής-φίλτρου (Source-filter cross synthesis)

Ο πρώτος ήχος είναι φιλτραρισμένος από τη περιβάλλουσα φάσματος του δεύτερου. Στο AudioSculpt, η πηγή είναι ο πρώτος ήχος και το φίλτρο είναι η περιβάλλουσα φάσματος του δεύτερου. Μία κοινή εφαρμογή είναι το φιλτράρισμα ενός ενόργανου ήχου από τη φωνή, έτσι ώστε να έχει ένα εφφέ “οργάνου που μιλάει”. Αυτή η cross σύνθεση λέγεται πηγή-φίλτρο γιατί είναι παρόμοια με το σύστημα σύνθεσης μιας πηγής-φίλτρου, στο οποίο η έξοδος του σήματος υπολογίζεται από το πέρασμα του σήματος της πηγής διαμέσου ενός γραμμικού φίλτρου που ο χρόνος του ποικίλλει.

Οι εφαρμογές της cross σύνθεσης πηγής-φίλτρου είναι πολυάριθμες και πραγματικά ενδιαφέρουσες. Ένα παράδειγμα, κοινοτυπία βέβαια, είναι το φιλτράρισμα ενός ενόργανου ήχου από το λόγο ή το αντίστροφο. Στην πρώτη περίπτωση ακούμε τον ενόργανο ήχο που φιλτράρεται από τη φωνητική περιοχή και διαμορφώνεται από τα φωνήματα του λόγου. Το ηχόχρωμα του οργάνου παραμορφώνεται από τα formants της φωνής. Στη δεύτερη περίπτωση, η φωνητική ώθηση περνάει διαμέσου του σώματος του οργάνου που αντηχεί. Το φωνητικό ηχόχρωμα καθορίζεται από το χρωματισμό του οργάνου.

β. Γενικευμένη cross σύνθεση (Generalized cross synthesis)

Η γενικευμένη cross σύνθεση είναι μία επέκταση της προηγούμενης cross σύνθεσης. Τα φάσματα των δύο ήχων έχουν αναλυθεί στο πλάτος και τη φάση φάσματος, τα οποία μπορούμε να τα χειρισθούμε ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτός ο ανεξάρτητος έλεγχος στο πλάτος και τη φάση δίνει μία σημαντική διαφορά ηχητικών συνδυασμών. Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι φτιάχνοντας ήχους-υβρίδια εφαρμόζοντας τη φάση φάσματος του ενός ήχου στο πλάτος του άλλου ήχου ή “crossfading”, που είναι η προοδευτική μετατροπή των πλατών και των φάσεων του ενός ήχου στα πλάτη και τις φάσεις του άλλου.

Η γενικευμένη cross σύνθεση μπορεί να δημιουργήσει αλλαγές που είναι πραγματικά περίπλοκες στις περιόδους του ηχοχρώματος. Ηχοχρωματική παρεμβολή ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς και συγκρινόμενους ήχους, όπως για παράδειγμα έναν ήχο με τονικό ύψος και έναν ήχο θορύβου, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον.

5.5. Η χρήση των ηχητικής σύνθεσης στην ηλεκτρακουστική μουσική

Οι τρέχουσες εξελίξεις στην ηχητικής σύνθεση που έγιναν εφικτές με τις ψηφιακές τεχνικές αναφέρονται προφητικά στα παράδοξα “ηχητικά σπίτια” που επινόησε ο Francis Bacon στο έργο του “Νέα Ατλαντίδα” (1627).

Ουσιαστικά η έρευνα για τα νέα ηλεκτρονικά όργανα ξεκινάει στις αρχές του αιώνα με την εφεύρεση πρωτότυπων οργάνων όπως το τηλεαρμόνιο, το αιθερόφωνο, τα κύματα Μαρτενώ, κτλ. Ένας από τους προπομπούς της ηλεκτρονικής εποχής, ο συνθέτης Edgard Varèse το 1939, προφητικά αναφέρεται στα “*μουσικά όργανα που ικανοποιούν τις σκέψεις του και που με τη συνεισφορά ενός ολόκληρου νέου κόσμου απρόσμενων ήχων θα οδηγηθούν στις απαιτήσεις ενός ενδότερου ρυθμού*”. Το όνειρο αυτό γίνεται πραγματικότητα μετά από μισό αιώνα με τη διαθεσιμότητα των ψηφιακών τεχνικών για την ανάλυση, σύνθεση κι επεξεργασία του ήχου.

Πέρα όμως από τις συνθετικές δυνατότητες των φανταστικών οργάνων του E. Varese, οι δυνατότητες που προσφέρονταν από τις ψηφιακές τεχνικές ηχογράφησης κι επεξεργασίας, ήταν τεράστιες. Πολλοί συνθέτες γοητεύτηκαν από τα νέα ηλεκτρονικά μουσικά συστήματα με τα οποία μπορούν να ψηφιοποιήσουν, επεξεργαστούν κι εκδώσουν φυσικούς ήχους όμοιους μ’αυτούς των παραδοσιακών οργάνων. Αυτή η δραστηριότητα ακολουθεί τις τεχνικές της tape music και της συγκεκριμένης μουσικής αλλά ξεπερνούν κατα πολύ το κλασσικό χειρισμό της μαγνητοταινίας.

Μετά το Β’ Παγκόσμιο Πόλεμο, η συγκεκριμένη κι η ηλεκτρονική μουσική έδωσαν την δυνατότητα στο συνθέτη να επεξεργαστεί με ποικίλους τρόπους το ηχητικό υλικό και η ηλεκτροακουστική μουσική εξελίχθηκε σ’ένα ξεχωριστό κλάδο της μουσικής. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να ήταν ωφέλιμος μέχρι και αναγκαίος. Στη συγκεκριμένη μουσική ένας καταγραμμένος ήχος διατίθεται στη μουσική σύνθεση εμπλουτίζοντάς τη έτσι με μια πλατειά ποικιλία φυσικών ήχων με πολύπλοκες δομές. Οι ήχοι αυτοί μπορούν να τροποποιηθούν με διαδικασίες απλές σε σχέση, με την αφθονία του αυθεντικού υλικού κι αυτό μας φέρνει μπροστά στον κίνδυνο της υπερεκτίμησης των ηχητικών προϊόντων με αποτέλεσμα να έχουμε μία αισθητική κολάζ

.Η ηλεκτρονική μουσική απ’την άλλη μας επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της δομής των ηλεκτρονικών ήχων, συνήθως απλών και βαρετών. Αυτοί οι ήχοι μπορούν να εμπλουτιστούν αλλά μόνο με χειρισμούς που σε μεγάλη έκταση καταστρέφουν τον έλεγχο που ο συνθέτης μπορεί να ασκήσει πάνω τους.

Μερικοί συνθέτες που είχαν εναποθέσει μεγάλες ελπίδες σε τέτοιες νέες ηχητικές πηγές, γρήγορα απογοητεύθηκαν. Για παράδειγμα ο Ligeti παραιτήθηκε από την ηλεκτρονική μουσική ύστερα από την παραγωγή του “Artikulation”, ένα ηλεκτρονικό κομμάτι με αυστηρές προδιαγραφές, επειδή δεν του πρόσφερε τις απεριόριστες δυνατότητες που πρόσμενε.

Οι συνθέτες πάντως που επηρεάστηκαν από τα νεότερα ρεύματα του ολικού σειραϊσμού (οργάνωση ρυθμού, διάρκειών, δυναμικών, άρθρωσης πάνω σε 12-τονικές σειρές) και της στοχαστικής μουσικής, είδαν τους υπολογιστές σαν πανίσχυρα εργαλεία για την δημιουργία των συνθέσεών τους. Το πιο γνωστό κομμάτι ήταν το “Iliac Suite” για κουαρτέτο εγχόρδων, που δημιουργήθηκε το 1957 από τους Lejaren Hiller και Leonard Isaakson χρησιμοποιώντας τον computer “Iliac” του Πανεπιστημίου του Ιλλινόις.

Με την τεχνολογία των νέων υπολογιστών ο μουσικός ελπίζει να προχωρήσει πέρα απ’τα όρια της συγκεκριμένης και της ηλεκτρονικής μουσικής. Ο υπολογιστής επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των ηλεκτρονικών ήχων. Αυτός ο έλεγχος δεν περιορίζεται μόνο σε απλούς τόνους ή θορύβους όπως στην περίπτωση της ηλεκτρονικής μουσικής. Οι ήχοι μπορούν να υποστούν επεξεργασία με πολύπλοκους τρόπους που επιτρέπουν στο συνθέτη να τους εμπλουτίσει διατηρώντας παράλληλα τον έλεγχο και την ικανότητα παραγωγής. Με την ψηφιακή τεχνολογία μπορούμε να

επεξεργαστούμε πραγματικούς ήχους τόσο καλά όπως γίνεται με τη συγκεκριμένη μουσική αλλά με ακόμα περισσότερο εκλεπτυσμένους κι εσωτερικούς τρόπους μέσα από την εφαρμογή των τεχνικών σύνθεσης-ανάλυσης.

Αλλά οι ψηφιακές τεχνικές των studio παρουσιάζουν μόνο ένα μέρος της ιστορίας της ηλεκτροσκουστικής μουσικής. Η χρήση των υπολογιστών και συνθεσάιζερ ζωντανά στις παραστάσεις που ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '70 με τους Peter Zinovieff, Edwzard Kobrin, Salvator Martiorano και Donald Buchla, αυξήθηκε ραγδαία στη δεκαετία του '80.

Η ψηφιακή επεξεργασία στις παραστάσεις πρόσφατων οργανικών έργων των Morton Subotnick, Pierre Boulez και Luciano Berio, στηρίχτηκαν στις παλιότερες αναλογικές τεχνικές προχωρώντας και περα απ'αυτές, για να προσφέρουν αριθμητικούς και συμβολικούς χειρισμούς που γίνονται δυνατοί μόνο με την αναλογική επεξεργασία. Η ικανότητα των υπολογιστών να ακούν και να ανταποκρίνονται στη μουσική και όχι μόνο στον ήχο, φανερώνει μία ποιοτική αλλαγή από τις προηγούμενες αναλογικές ηλεκτρονικές μουσικές δυνατότητες.

Όλα αυτά που προσφέρουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές δεν είναι πρωτοεμφανίσιμα. Σε μερικές περιπτώσεις, οι νέες δυνατότητες είναι επεκτάσεις ή ακόμα και ανακαλύψεις ήδη υπάρχουσών γνώσεων. Για παράδειγμα, το βιβλίο του Robert Erickson (1975) περιέχει αφθονία γνώσεων πάνω στις τεχνικές χειρισμού του ήχου που εφαρμόστηκαν σε παλιά οργανικά έργα. Πολλές από αυτές τις τεχνικές έχουν προσαρμοστεί στα όρια της computer music.

Επιστήμονες όπως οι Mathews και Pierce (1980), ανασκάλεσαν τις έρευνες των *Πυθαγόρα*, *Rameau* και *Helmholtz* στις σπουδές τους πάνω στην ψυχοσύνθεση και στις κλίμακες.

Ο συνθέτης Clarens Barlow (1980) χρησιμοποίησε τον υπολογιστή για να συνθέσει μικροτονικές συνθέσεις, ακολουθώντας ένα δρόμο που ανοίχτηκε στις αρχές του 20ου αιώνα από τους A.Haba, E.Carillo, Vyschnegrandski, Ch.Ives και H.Partch.

Για μερικούς συνθέτες, συγκεκριμένα τους Charles Dodge και Jean Claude Risset, ο υπολογιστής είναι πάνω απ'όλα ένα θαυμάσια εύκολο όργανο που προσφέρει ηχητικούς συνδυασμούς και χειρισμούς ανέφικτους με άλλους παραδοσιακούς τρόπους.

5.5. 1. Η ηχητική σύνθεση σαν ένασμα της μουσικής δημιουργίας

Η άμεση ψηφιακή σύνθεση που αναπτύχθηκε από τον Max Mathews το 1958, εμπλέκει ένα computer που ελέγχει το μεγάφωνο ενός μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC). Η άμεση ψηφιακή σύνθεση είναι η περισσότερο διαθέσιμη διαδικασία σύνθεσης ήχου.

Η δυσκολία για ένα συνθέτη που εφαρμόζει ένα πρόγραμμα σύνθεσης ήχου έγκειται στην περιγραφή των χαρακτηριστικών των ήχων που παράγονται μέσα από τέτοιες διαδικασίες σε αντίθεση με τον παραδοσιακό συνθέτη που κατέχει το ηχόχρωμα των παραδοσιακών οργάνων μιας ορχήστρας.

Οι πρώτοι χρήστες της άμεσης σύνθεσης ήχου αντιμετώπισαν αυτά τα ουσιαστικά προβλήματα καθώς υπήρξαν αξεπέραστα εμπόδια ακουστικής φύσεως των φυσικών ήχων.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη μίμηση ήχων χρησιμοποιώντας περιγραφές από κλασσικές διατριβές *Μουσικής Ακουστικής* απέτυχαν τονίζοντας έτσι την ανεπάρκεια τέτοιων περιγραφών και την ανάγκη για περισσότερο λεπτομερή και σχετικά

δεδομένα. Ελλιπής ήταν και η πληροφορία γύρω από τον τρόπο παροχής ζωντανίας (*vivacity*) και ταυτότητας (*identity*) στους συνθετικούς ήχους, που έφερε και την αρχική απογοήτευση για την ηλεκτρονική μουσική. Οι ήχοι ήταν μάλλον βαρετοί και οι νέες τεχνικές δε φαίνεται να ζωντάνευαν τις προσδοκίες. Αυτή η αποτυχία αποδίδεται και στην ανεπάρκεια της ανάλυσης *Fourier* αλλά και στο ότι οι μιμήσεις προέρχονταν από ένα υπεραπλουστεμένο μοντέλο των οργανικών ήχων. Το μοντέλο αυτό παρέχει ένα αμετάβλητο φάσμα που δεν είναι το χαρακτηριστικό του οργανικού ηχοχρώματος. Παρ'όλα αυτά δεν ήταν εύκολο να αναπτυχθούν περισσότερο λεπτομερή μοντέλα σύνθεσης. Ο Morill, θέλοντας να αυξήσει τη ρεαλιστικότητα εισήγαγε “λάθος νότες” και “ατυχήματα” αποδεικνύοντας έτσι ότι η σύνθεση μέσω υπολογιστή δεν είναι αναγκαία καταδικασμένη από την κρυάδα της τελειότητας.

Η ανάπτυξη της ψηφιακής μουσικής τεχνολογίας οφείλεται στο **Dr. Max Mathews**, που εργάστηκε πάνω στην ανάπτυξη ζωντανά ελεγχόμενων *computer-οργάνων*. Στα εργαστήρια Bell, ο Max Mathews επικεντρώθηκε στην κωδικοποίηση του λόγου απαραίτητης για την τελειοποίηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Προσέγγισε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την ψηφιακή τεχνολογία, ακολούθως μετέτρεψε το λόγο σε γλώσσα κατανοητή για τον *computer*, δηλαδή σε αριθμούς και με την αντίστροφη διαδικασία έκανε μετατροπή των αριθμών σε λόγο. Αυτή η τεχνική μπορούσε να εφαρμοσθεί το ίδιο καλά και για τη μετατροπή αριθμών σε μουσικούς ήχους. Μ'αυτό τον τρόπο είχε ήδη γίνει το πρώτο βήμα για την κατασκευή μουσικών οργάνων-*computer*. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα δούμε την έρευνα των υπολοίπων συνθετών πάνω στις τεχνικές ψηφιακής σύνθεσης και τη στάση τους απέναντι στο νεοεμφανιζόμενο κλάδο της *computer -assisted composition*.

5.10.2. Σημαντικές τεχνικές σύνθεσης που χρησιμοποιούν οι συνθέτες

Μερικές από τις πιο διαδεδομένες ψηφιακές τεχνικές σύνθεσης ήχου τις βλέπουμε παρακάτω.

Linear prediction : διαμορφώνει τον ήχο -είτε περιοδικό είτε θορυβώδη- σαν ένα είδος διέγερσης που φιλτράρεται μέσα από μια σειρά αντηχητικών χώρων. Τα φίλτρα περιγράφουν με παραμέτρους τη ρινική κοιλότητα και το λαιμό ενώ η διέγερση περιγράφει τη λειτουργία της γλωττίδας.

Phase distortion (παραμόρφωση φάσης): είναι μια τεχνική που βασίζεται στην εναλλαγή φάσης των κυματομορφών που είναι αποθηκευμένες σαν *Wavetables*. Ο ήχος του βασικού κύμματος παραμορφώνεται αλλάζοντας τη ταχύτητα που έχει παραχθεί στη διάρκεια ενός κύκλου. Αυτή η ταχύτητα μπορεί να ελεγχθεί παραμετρικά, για παράδειγμα από μια περιβάλουσα ή μια μηχανή παράστασης. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε από την Casio και μερικές φορές ονομάζεται *μη γραμμική παραμόρφωση*.

Waveshaping : είναι μια μη γραμμική τεχνική που παραμορφώνει το πλάτος ενός ήχου για να παράγει φασματικές αλλαγές. Η επεξεργασία βασίζεται στην ιδέα της λειτουργίας μεταφοράς, μια λειτουργία που χρησιμοποιείται για την εναλλαγή μιας εισαγόμενης κυματομορφής και την παραγωγή μιας άλλης. Οι μη-γραμμικότητες αυτής της λειτουργίας έχουν σαν αποτέλεσμα την πρόσθεση πλαγιοζωνών στο εισαγόμενο σήμα.

Resynthesis : είναι μια ενδιαφέρουσα τεχνική σύνθεσης με την οποία οι ήχοι δειγματολαμβάνονται ψηφιακά, εκτίθενται σε μια αναπαράσταση για ανάλυση με τη χρήση του *computer*, αναλύονται παραμετρικά για τη διαμόρφωση ενός ειδικού μοντέλου και έπειτα επανασυντίθεται. Παρ'όλο που δεν είναι μια *real-time* τεχνική, βρίσκει αυξανόμενη χρήση στη μίμηση των οργάνων.

Η απ'ευθείας ψηφιακή σύνθεση , : απ'ευθείας δημιουργία και σχεδιασμός κυματομορφών. Εξ'αιτίας της μεγάλης υπολογιστικής δύναμης και μνήμης που απαιτείται προκειμένου με αυτή τη μέθοδο να έχουμε υψηλής ποιότητας αποτελέσματα, αυτή η τεχνική δεν είναι μια real-time τεχνική.

Frequency Modulation Synthesis : Η διαμόρφωση συχνότητας μπορεί να κατανοηθεί με τη βοήθεια ενός απλού διαγράμματος αναλογικού συνδυασμού. Ο φορέας είναι ο ταλαντωτής με τον οποίο ακούμε. Η στιγμιαία του συχνότητα μεταβάλλεται από την κεντρική αξία του VCA. Η είσοδος του VCA τροφοδοτείται από το διαμορφωτή -ταλαντωτή που μαζί με το φορέα παράγουν ημιτονοειδείς κυματομορφές. Τρεις είσοδοι ελέγχου τροφοδοτούνται· ο διαμορφωτής συχνότητας και ο δείκτης διαμόρφωσης.

Σύνθεση Fourier : τα ψηφιακά κυκλώματα είναι ικανά για τη σύνθεση οποιουδήποτε ηχητικού κύματος, ή για την ερμηνεία οποιασδήποτε τροποποίησης σήματος που μπορούν να περιγραφούν μέσα από τα όρια ενός μαθηματικού μοντέλου.

Γραμμική αριθμητική σύνθεση (ΓΑΣ) : το 1987 η εταιρεία Roland παρουσίασε το συνθεσάιζερ Roland D-50 που στηρίζεται ΓΑΣ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ένα αριθμό διαφορετικών συστατικών για τη δημιουργία ήχου. Τα βασικά συστατικά στοιχεία της ΓΑΣ είναι γνωστά σαν τμήματα (partials). Τα τμήματα αυτά είναι είτε ψηφιακά κατασκευασμένες κυματομορφές, είτε δείγματα κωδικοποιημένων διαμορφωμένων παλμών.

VOSIM , που σημαίνει μίμιση φωνής και αναπτύχθηκε από τους Werner Kaegi και Stan Temelaars και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή φωνόμορφων μουσικών ήχων.. Η κυματομορφή που βρίσκεται ανάμεσα στις διακεκομμένες γραμμές είναι ένας πλήρης κύκλος.

5.5.2. Εφαρμογή της ηχητικής σύνθεσης στη μουσική δημιουργία (sound synthesis in music composition)

Η προσέγγιση του *John Chowning* στη σύνθεση με τη γλώσσα προγραμματισμού MUSIC V είναι γι' αυτόν κάτι παραπάνω από ένα πέραςμα προς την πραγμάτωση των ιδεών, αφού μπορεί να σχηματίσει κι ακόμα να εμπνεύσει μουσική έκφραση. Αυτή η προσέγγιση στη σύνθεση φαίνεται σε 3 έργα του: το *Turenas* (1971), το *Stria* (1978) και το *Phoné* (1981). Τα *Turenas* και *Phoné* βασίζονται στη διαμόρφωση συχνότητας (FM), ενώ στο *Stria* χρησιμοποιεί συνδυασμούς πρόσθεσης ημιτονοειδών κυμάτων. Ο Chowning ακόμα ξαναεξετάζει τις πρώτες του έρευνες για την κίνηση των ήχων στο διάστημα, για τη σύνθεση μέσω διαμόρφωσης συχνότητας και τη σύνθεση φωνής.

Το έργο του *Turenas* ολοκληρώθηκε την άνοιξη του 1972. Το έργο αυτό στηρίχθηκε στη σύνθεση ήχου μέσω διαμόρφωσης συχνότητας, μία τεχνική που στηρίχθηκε στις δικές του έρευνες. Η διαμόρφωση συχνότητας ανοίγει έναν εύκολο δρόμο για το δυναμικό έλεγχο του φάσματος που είναι μία από τις όψεις των φυσικών ήχων δύσκολο να αναπαραχθούν με τους αναλογικούς συνθεσάιζερ. Στο *Turenas* χρησιμοποίησε για τη γέννηση των τόνων, μόνο την τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας. Αυτή η τεχνική χρησίμευσε και για τις αρμονικές σειρές αλλά και για τις θορυβώδεις αναρμονικές σειρές, κάνοντας μετατροπές ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Μία από τις συνθετικές χρήσεις της FM σύνθεσης ήταν η μετατροπή του ηχοχρώματος.

Στο έργο του *Phoné* βασίστηκε στη χρήση αλγορίθμων, εμπνευσμένος από μια δουλειά του Michael Mac Nabb πάνω στη προσθετική σύνθεση των φωνητικών τόνων. Επειδή ανακάλυψε ότι όλες οι προηγούμενες προσπάθειες στη σύνθεση φωνής

είχαν ελείψεις, ανέπτυξε αυτό τον αλγόριθμο και προσπάθησε να τον ενσωματώσει στα χαρακτηριστικά που μπορούσε να στοιχειοθετήσει. Για παράδειγμα πόσο Vibrato έπρεπε να προσθέσει για να δημιουργήσει μία πειστική εντύπωση ή αν θα έπρεπε ένας τραουδισμένος τόνος να έχει ένα μικρό πορταμέντο στην αττάκα του ή πώς τα φωνήματα συμπεριφέρονται κατά την αττάκα (attack) και το σβήσιμο (decay) ενός τραγουδισμένου φωνήεντος. Ερευνώντας όλ' αυτά ανακάλυψε ενδιαφέρουσες ασάφειες που δημιουργούνταν είτε από περιοδικές είτε από τυχαίες μικροσυχνότητες.

Chowning συνέθεσε επίσης σοπρανόμορφους ρεαλιστικούς τόνους, εφαρμόζοντας διαφορετικά είδη διαμόρφωσης συχνότητας σε διαφορετικό φωνόμορφο φάσμα. Μπορεί να φτιάξει φωνόμορφους ήχους που προκύπτουν από μία αναδιαφοροποίητη ηλεκτρονική υφή του ήχου. Επιπλέον για την παραχώρηση νέων πιθανοτήτων έκφρασης, αυτή η δουλειά ρίχνει φως στην ακουστική ανάλυση των ηχητικών μαζών. Αυτό το φαινόμενο υποδεικνύει ότι το αυτί επωφελείται από τις μικρορυθμικές αλλαγές προκειμένου να ξεχωρίσει τα διαφορετικά σήματα.

Αυτά τα δύο παραδείγματα αναφέρονται σε ένα νέο ορίζοντα που ανοίχθηκε με την ψηφιακή σύνθεση και ονομάζεται *μη αρμονικοί τόνοι*. Οι περισσότεροι ερευνητές υποστηρίζουν ότι οι οργανικοί τόνοι είναι σχεδόν περιοδικοί και ότι τα συχνοτικά συστατικά τους σχετίζονται αρμονικά τονίζοντας ορισμένα διαστήματα όπως αυτά της 8ης και της 5ης. Με την ελευθερία των κατασκευασμένων τόνων από αυθαίρετα συχνοτικά συστατικά, κάποιος μπορεί να σπάσει τη σχέση μεταξύ συνήχησης-διαφωνίας και να φτιάξει προνομιούχα διαστήματα. Στο κομμάτι *Stria* ο Chowning μπόρεσε να φτιάξει πλούσιες δομές εισδύοντας η μία στην άλλη χωρίς διαφωνίες ή τραχύτητες, ελέγχοντας τις συχνότητες που σχηματίζουν αυτές τις δομές. Αυτή είναι μία περίπτωση όπου το φάσμα δεν παίζει διακοσμητικό ρόλο αλλά ουσιαστικά παριστάνει μια σχεδόν συχνοτική λειτουργία.

Παρ'όλο που η ιδέα της άρθρωσης της μουσικής υφής μέσω ηχοχρωματικής οργάνωσης δεν είναι καινούργια, για να το πετύχει κάποιος χρειάζεται τον έλεγχο που η σύνθεση μέσω computer προσφέρει. Κάποιος μπορεί να ελπίζει ότι ένας φασματικός έλεγχος, που είναι εφικτός μέσω της ψηφιακής σύνθεσης μπορεί να παίζει ένα καθαρά λειτουργικό ρόλο σε πλήρεις συνθέσεις.

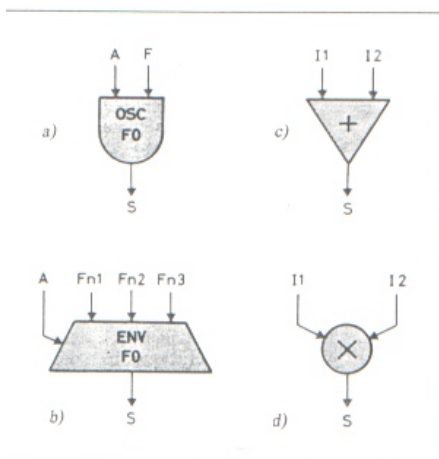
Το 1971 ο *Ch. Dodge* ξεκίνησε να ερευνά τις χρήσεις του συνθετικού λόγου μέσω computer στη μουσική σύνθεση, μια μέθοδος γνωστή σαν σύνθεση λόγου μέσω ανάλυσης, που βασίζεται σε μαγνητοφωνημένη φωνή που επιτρέπει την τροποποίηση της φωνητικής ανάλυσης πριν τη σύνθεση. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, είναι δυνατό να επεκτείνουμε τη μεταχείριση της κατεγραμμένης φωνής πέρα από το πεδίο της παραδοσιακής ηλεκτρονικής μουσικής.

Στο κομμάτι *In Celebration* μία ηλεκτρονική μουσική πραγματοποίηση του ποιήματος του Mark Strand, το ποίημα εξυπηρετεί σαν γραπτή και ακουστική πηγή. Όλοι οι ήχοι στο έργο φτιάχτηκαν από τη σύνθεση μέσω computer που προέρχεται από μια απλή ανάγνωση του ποιήματος. Έτσι το κομμάτι εκφράζει το ποίημα με μία ευθύτητα που δε θα βρίσκαμε με τη παραδοσιακή μουσική σύνθεση. Επίσης έγινε χρήση μιας μόνο ανθρώπινης φωνής για τη γέννηση όλων των ήχων του κομματιού προκειμένου να έχουμε μια ενιαία σύνθεση.

Στα μέσα της δεκαετίας του '50, ο *Max Mathews* άρχισε να πειραματίζεται με το πρόγραμμα Music I που παρήγαγε μία ισόπλευρη τριγωνική κυματομορφή με την ίδια πρόοδο των χαρακτηριστικών της εξασθένησης (decay). Μπορούσε έτσι να καθορίσει το ύψος, το πλάτος και τη διάρκεια κάθε νότας. Αργότερα ανέπτυξε το πρόγραμμα Music II, όπου μπορούσε να ελέγξει 4 ανεξάρτητες φωνές. Το 1960 εισήγαγε το Music III καθώς και την ιδέα της ενιαίας γεννήτριας που αποτέλεσε την μεγαλύτερη πρόοδο προς την Computer Music. Το 1963 ακολούθησε το πρόγραμμα

Music IV που δεν ήταν δυνατότερο μουσικά από το προηγούμενό του αλλά ήταν πιο βολικό στη χρήση. Μετά το Music V στράφηκε προς τα real-time έργα και ανέπτυξε το σύστημα Groove, μια τελείως διαφορετική κατεύθυνση. Είναι ένα υβριδικό σύστημα που αποτελούνταν από ένα μικρό-computer συνδεδεμένο με ένα αναλογικό σύστημα σύνθεσης ήχου και με ένα αριθμό μηχανών όπως joystick και χαρουλιών για τη διεύθυνση παρτιτούρας προετοιμασμένης για την εισαγωγή σε computer. Το πρόγραμμα αυτό ήταν ένας ευέλικτος τρόπος για τον έλεγχο των λειτουργιών ενός απλού συνθεσάιζερ και το συνδυασμό τους με τις λειτουργίες που γεννιούνται όταν ο εκτελεστής πιέζει τους αισθητήρες του οργάνου.

Ο **J. Moorer** εργάστηκε στο studio τεχνητής νοημοσύνης του Stanford. Ανέπτυξε προγράμματα σχεδιασμού κι εφαρμογής φίλτρων και ειδικά προγράμματα αντήχησης (reverberation). Μέσα από την εφαρμογή του προγράμματος S.S. ένα ηχοεξερευνητικό πρόγραμμα που μας επιτρέπει να κοιτάμε αρχείο ήχου μπρος ή πίσω, επεσήμαντε την σημαντικότητα του εσωτερικού ενός ήχου. Ύστερα από την ολοκλήρωση του πακέτου επεξεργασίας σήματος στράφηκε στις τεχνικές ανάλυσης-σύνθεσης. Έτσι είδε την ιδέα του phase-vocoder σαν την πιο κατάλληλη προς αυτή την κατεύθυνση. Ανέπτυξε επίσης ένα σύστημα για υψηλής ποιότητας γραμμικής σύνθεσης ήχου, έχοντας σαν αρχική ιδέα τη σύνθεση ανθρώπινης φωνής. Στη περίπτωση της μουσικής αυτό που ήθελε να κάνει ήταν η παραγωγή νέων και διαφορετικών ήχων ή η διαμόρφωση της φωνής πέρα απ'αυτά που ένας άνθρωπος μπορεί να κάνει.



εικ.17. Ένα όργανο του προγράμματος MUSIC V (Max Mathews)

Το 1975 ο **J.C. Risset** συνέθεσε το έργο “Dialogues” με το οποίο προσπάθησε να συνυφάνει οργανικούς και computer ήχους. Ο computer ξεκινά και το όργανο επεμβαίνει. Σε μια μεταγενέστερη έκδοση, ακούγεται ένας διάλογος μεταξύ πιάνο και τσελέστα -σε χρωματική σκάλα- και υψηλών τόνων ήχων από τον computer σε μια γραμμική σκάλα. Έχουμε λοιπόν τον computer να παίζει αρμονικούς των νοτών: Re, Fa, Sol, La και DO.

Μερικές από τις συνθετικές ιδέες που εκθέτει ο Risset είναι:

Η δημιουργία ενός εύκαμπτου ηχητικού κόσμου που αποκλίνει από τον κόσμο των οργάνων αλλά συγχωνεύεται με αυτόν με μυστηριώδεις τρόπους.

Ο πειραματισμός για το σχεδιασμό ενός προγράμματος που έχει περιορισμούς, σε αντίθεση με την υποχρέωση να εμμένει σε οργανικούς και ηλεκτρονικούς περιορισμούς.

Συγκέντρωση μιας προσωπικής παλέτας ζωντανών ήχων, προικισμένης με μερικά χαρακτηριστικά ταυτότητας πολύ εύπλαστα και δεκτικά να υπηρετούν οπεισμένα χαρακτηριστικά και να παραποιούν άλλα.

Παίρνοντας πλεονέκτημα από τις λειτουργίες του computer προτείνει ιδιαίτερες συνθετικές μετατροπές, επεκτείνοντας παράλληλα το ρόλο του computer στη μουσική σημειογραφία.

5.10.4. Mortuos plango, Vivos Voco- Jonathan Harvey

Το έργο γραμμένο σε 8-κάναλη ταινία, ζητήθηκε από το κέντρο George Pompidou στο Παρίσι και παραγματοποιήθηκε στο IRCAM με την τεχνική βοήθεια του Stanley Hanes. Πρόκειται για ένα πολύ προσωπικό κομμάτι του Harvey, στο οποίο οι δυο ηχητικές πηγές, είναι από τη μια η φωνή του γιου του κι απ' την άλλη η μεγάλη τενόρο καμπάνα του καθεδρικού ναού Winchester στην Αγγλία.

Το κείμενο που απαγγέλει η φωνή είναι γραμμένο πάνω στη καμπάνα: “μετρώ τις ώρες που φεύγουν, θρηνώ τους νεκρούς, τους ζωντανούς καλώ να προσευχηθούν”. Στο κομμάτι η νεκρή φωνή της καμπάνας, έρχεται σ' αντίθεση με τη ζωντανή φωνή του αγοριού. Το φάσμα της καμπάνας αναλύεται με το πρόγραμμα Fast Fourier Transform (FFT) στο IRCAM. Η ανάλυση ξεκινάει ½ δευτερόλεπτο μετά την εισαγωγή του ήχου. Προσθέτεις στο φάσμα ένα από τα πιο υπερφυσικά χαρακτηριστικά αυτού του θαυμάσιου ήχου : μιά αργή εξασθένηση στα 347 Hz που περιείχε ένα ρυθμό, ένα αποτέλεσμα των διαφόρων αρμονικών σειρών που φαίνονται καθαρά στο φάσμα.

Η σύνθεση και το μιξάρισμα έγιναν στο IRCAM με το πρόγραμμα Music V. Στην αρχή συνέθεσε το φάσμα της καμπάνας Έπειτα χρησιμοποιώντας το Music V επέτυχε να δώσει στα μέρη όποια περιβάλλουσα επιθυμούσε. Για παράδειγμα μπορούσε να γυρίσει το εσωτερικό της καμπάνας έξω, αντιστρέφοντας την εξασθένηση των χαμηλών αρμονικών από αργή σε πολύ γρήγορη. Οι μετατροπές από τη μια καμπάνα στην άλλη πραγματοποιήθηκαν με glissandi γύρω από τον ίδιο τόνο. Τα ηχητικά αρχεία του Music V έχουν τη δυνατότητα να διαβάζουν αρχεία απ' την αρχή ή απ' το τέλος κι ανάλογα με την επιλογή της ταχύτητας. Πολλές φορές ένα γρήγορο ταλαντευόμενο μπρος-πίσω διάβασμα δίνει ένα decrescendo-crescendo των υψηλών αρμονικών.

Οι αρμονικοί της καμπάνας ήταν διασκορπισμένοι στα 8 ηχεία, δίνοντας στον ακροατή την αίσθηση ότι βρίσκεται μέσα στην καμπάνα. Η ηχογράφιση του αγοριού έγινε ενώ α) τραγουδούσε το λατινικό κείμενο πάνω σε μια νότα β) τραγουδούσε τα φωνήματα του κειμένου χωριστά και γ) τραγουδούσε μια μικρή μελωδία βασισμένη στο φάσμα των τονικών υψών. Ο Harvey μιμήθηκε αυτούς τους ήχους χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα σύνθεσης Chant που αναπτύχθηκε από τους Gerald Bennett και Xavier Rodet.

Συχνά κάλυπτε την αρχή των συνθετικών μετατροπών με αποσπάσματα αληθινής φωνής, ενώ με μια άλλη τεχνική τα φωνητικά του παιδιού που είχαν ηχογραφηθεί ψηφιοποιήθηκαν. Η συνθετική φωνή του αγοριού που τραγουδήθηκε πάνω στους αρμονικούς της καμπάνας υπέστη εφέ. Μετατροπές εφαρμόστηκαν επίσης στο φάσμα της φωνής του αγοριού. Ένα τέτοιο ηχητικό αρχείο μπορεί να διαβαστεί μπρος-πίσω δίνοντας γρήγορες ταλαντώσεις στην αγορίστικη φωνή και στον ήχο της καμπάνας γρήγορους ρυθμούς.

5. 5.3. Ακουστικά παράδοξα ύψους και ρυθμού και χώρου με την sound synthesis

a) Ο υπολογιστής μπορεί να επεξεργαστεί τους ήχους έτσι ώστε να δίνουν την ψευδαίσθηση ότι κινούνται γρήγορα στο διάστημα.

Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε από τον Chowning (1971) και η επιτυχία αυτής της τεχνικής ήταν ο έλεγχος της κίνησης των ήχων στο διάστημα. Ο Chowning μπόρεσε να επιτύχει της ψευδαίσθηση ενός απέραντου διαστήματος όπου οι δυναμικές ηχητικές πηγές ακούγονται σαν να κινούνται. Αυτό γίνεται δυνατό χάρις στην ακρίβεια του υπολογιστή και στην ψυχοακουστική κατανόηση των φυσικών παραμέτρων υπεύθυνων για την υποκειμενική εκτίμηση του ήχου. Μπορούμε να ελπίζουμε ότι οι έρευνες πάνω στην ψυχοακουστική μας καθιστούν ικανούς να χρησιμοποιούμε τον υπολογιστή για τον απ'ευθείας έλεγχο των υποκειμενικών χαρακτηριστικών του ήχου και για τη δημιουργία ενός απατηλού ακουστικού κόσμου ενεργώντας απ'ευθείας στις αισθητικές λειτουργίες που προκαλούν συγκεκριμένες ακουστικές εμπειρίες. Έτσι, ακουστικά παράδοξα ή ψευδαισθήσεις που μπορούν να προκληθούν μέσω του υπολογιστή δεν αποτελούν πλέον ουτοπικές σκέψεις.

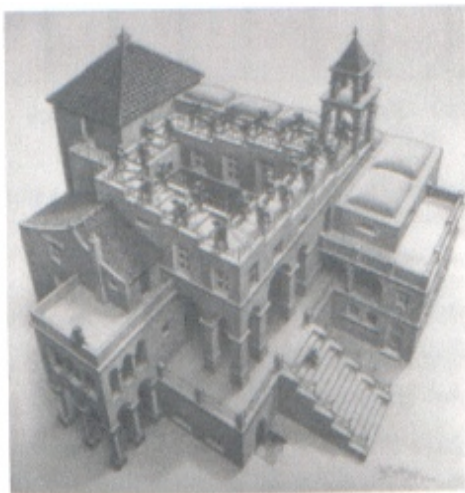
β) Δημιουργία συνεχών ανιόντων η κατιόντων glissandi

Ο Shepard απ'την άλλη δημιούργησε μια σειρά από 12 τόνους σε χρωματική διαδοχή που φαίνεται ότι ανεβαίνει ακατάπαυστα όταν αυτή επαναλαμβάνεται. Ο Risset επεκτείνει αυτό το παράδοξο συνθέτοντας συνεχή ανιόντα ή κατιόντα glissandi > Με τη βοήθεια της σύνθεσης ήχου το επιτυγχάνει με την ακριβή οργάνωση των παραμέτρων με τρόπους που δε συναντάμε στη φύση. Επιπλέον αυτά τα παράδοξα δεν αποτελούν απλά και μόνο τεχνητές παραξενιές, αλλά αντανakλούν την υφή των τονικών μας κριτηρίων. Σε ειδικές περιπτώσεις το ύψος διαιρείται σε δύο ιδιότητες: α) σε συγκεκριμένη όψη που σχετίζεται με το τονικό ύψος και β) σε διασκορπισμένη που σχετίζεται με το φάσμα.

γ) ατέρμονη επιτάχυνση ρυθμού

Το 1974 ο Knowlton συνέθεσε ρυθμούς που φαίνονταν να επιταχύνουν επ'άπειρον. Ο Risset επέκτεινε αυτό το παράδοξο και το ταίριαξε με το τονικό παράδοξο για να παράγει έναν ήχο που ενώ ανέβαινε την κλίμακα ταυτόχρονα ακουγόταν χαμηλότερα κι επιτάγγυνε ενώ την ίδια ώρα επιβραδυνόταν προοδευτικά.

Για μια ακόμα φορά τέτοιες παραδοξότητες αντανakλούν τους μηχανισμούς αντίληψης (perception) κι αποκαλύπτουν την πολυπλοκότητα της αντίληψης του τονικού ύψους και του ρυθμού που μπορεί να σχετίζεται με τη μουσική εξάσκηση. Στα έργα *Fall* (από το *Little Boy*), *Mutations* και *Moments Newtoniens* ο Risset χρησιμοποιεί τέτοιους παράδοξους ήχους. Στο *Fall* το ακατάπαυστο γλίστρημα δημιουργεί ένα αίσθημα που ενώ είναι καινούργιο φαίνεται οικείο. Έτσι οι δυνατότητες κατασκευής νέων ηχητικών δομών μπορούν να επεκτείνουν τη συνολική μας αντίληψη.



εικ.18. Το μοναστήρι με τα οπτικά παράδοξα του χαρακτή Escher , που σχετίζεται με τα ακουστικά παράδοξα του Shepard.

6. ΠΕΡΙ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Η ψηφιακή επεξεργασία του ήχου αναφέρεται στον αριθμητικό χειρισμό των ακουστικών σημάτων και των δεδομένων που έχουν την μορφή *δειγμάτων*. Με στοιχειώδεις χειρισμούς όπως η ψηφ. αποθήκευση και καθυστέρηση, πρόσθεση, αφαίρεση και πολλαπλασιασμό μπορούμε να παράγουμε μια πλατιά ποικιλία χρήσιμων λειτουργιών. Παραδείγματος χάριν μπορούμε να εξάγουμε ένα επιθυμητό σήμα από ένα ανεπιθύμητο θόρυβο ή να εκτιμήσουμε τις συχνότητες φάσματος ενός σήματος.

6.1. Επεξεργασία του ηχητικού σήματος στη δυναμική και φασματική περιοχή

- 1) Η **ενίσχυση** ανεβάζει το ηχητικό επίπεδο ενός σήματος. Το ποσό ενίσχυσης (gain) μπορεί να ρυθμιστεί σε real-time από έναν ελεγκτή

2) **Μείξη** είναι η πρόσθεση δύο ή περισσότερων σημάτων που προσδιορίζει το επίπεδο ενίσχυσης ενός αριθμού πηγών που σχετίζονται μεταξύ τους.

3) **Τα Φίλτρα** μας βοηθούν να αλλάξουμε τα χαρακτηριστικά των ήχων με την διαμόρφωση του φάσματος (ενισχύοντας ή αποσβένοντας κάποιες συχνότητες).

Χαμηλοπερατά (low-pass filters), *Υψηλοπερατά* (high-pass filters), *ζωνοδιαβατά* φίλτρα (band –pass filters) , *φίλτρα αποκοπής ζώνης* (band –reject filters)

Συχνότητα αποκοπής (cut-off frequency) ενός φίλτρου προσδιορίζει τη συχνότητα μετάβασης όπου αρχίζει ο ρυθμός πτώσης (slope) της έντασης (μετριέται σε db)

4) **Το ισοστάθμισμα (equalization)** ρυθμίζει τις συχνότητες του φάσματος ενός ήχου. Η ισοστάθμιση διαφέρει απο το φιλτράρισμα διότι μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονα ενίσχυση και αφαίρεση συχνοτήτων με μία σειρά ζωνοπερατών φίλτρων ή με τη χρήση της παραμετρικής ισοστάθμισης .

Η ισοστάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν τονικός ρυθμιστής στη σύνθεση σε πραγματικό χρόνο. Για την αλλαγή τονικότητας μιας περιοχής δεδομένων ή και ολοκλήρου του αρχείου υπάρχουν διαφορετικές επιλογές που παρέχουν μηχανισμούς σχεδίασης φίλτρων, τα οποία επιδρούν πάνω σε μία περιοχή , ενισχύοντας ή εξασθενίζοντας περιοχές συχνοτήτων του σήματος (graphic, paragraphic και parametric).

5) **Διαμόρφωση περιβάλλουσας** σχετίζεται με το σχεδιασμό μορφών δυναμικής περιβάλλουσας στο χρόνο (περιβάλλουσες AD, AR, ADSR)

6) **Normalize** : επιτρέπει την αξιοποίηση όλης της διαθέσιμης δυναμικής περιοχής και επιτρέπει την μεγιστοποίηση της έντασης μιας προεπιλεγμένης περιοχής ή ολόκληρου του αρχείου χωρίς παραμόρφωση.

7) **Δυναμική επεξεργασία του σήματος** :

Στην οικογένεια των εντολών dynamics ανήκουν : συμπίεση , περιορισμός, αποσυμπίεση και μείωση θορύβου.

Συμπίεση (compression) : με την συμπίεση επιτυγχάνουμε ελάττωση της δυναμικής περιοχής ενός σήματος μειώνοντας το επίπεδο δειγμάτων υψηλής στάθμης κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Συνήθως χρησιμοποιείται στην ισοστάθμιση της φωνής με τη μουσικής και στη μείωση της διαφοράς έντασης που πορκύπτει από την κίνηση του ομιλητή μπροστά απο το το μικρόφωνο.

Περιορισμός : είναι ένα είδος συμπίεσης με μεγαλύτερο λόγο μείωσης της δυναμικής περιοχής καθώς επιδρά σε ένα σήμα αποκόπτοντας τις απότομες κορυφές του.

Αποσυμπίεση : Μεγαλώνει τη δυναμική περιοχή του σήματος αυξάνοντας το επίπεδο των δειγμάτων χαμηλής έντασης.

13) **Noise gate** : η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για εξάλειψη θορύβων, βόμβων και σφυριγμάτων που εμφανίζονται κα τη διάρκεια ηχογραφήσεων. Ουσιαστικά καθαρίζει όλους τους ήχους κάτω από ένα επίπεδο έντασης που ορίζουμε εμείς. Σε ηχογραφήσεις που ακούγεται ο ανεπιθύμητος ήχος περιβάλλοντος (audible noise floor) με τη χρήση του Noise gate είναι δυνατό να απομακρυνθεί.

14) **Επαναδειγματοληψία (resample)** : Η εντολή resample επιτρέπει την αλλαγή συχνότητας δειγματοληψίας ενάσο υπάρχοντος αρχείου ήχου.

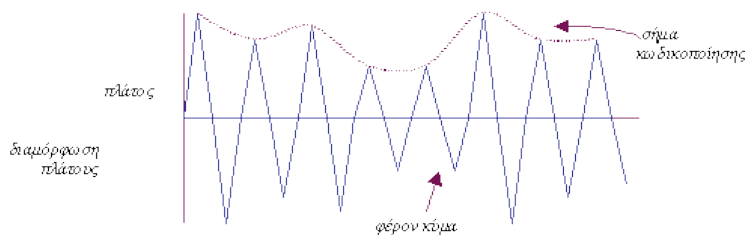
6.2. Επεξεργασία του ηχητικού σήματος με τεχνικές διαμόρφωσης

Συνεισφέρουν στην χρονική συνάφεια των «ηχητικών εικόνων», συνάφεια που στηρίζεται στον συγχρονισμό της αττάκας, στην αρμονικότητα των παραγώγων και στην φασματική συνέχεια.

Μικροσκοπικές διακυμάνσεις της συχνότητας:--Vibrato (αργή διακύμανση μεταξύ 6 -10 HZ), --Portamento (αργή διακύμανση πάνω στην αττάκα.)

Διαμόρφωση AM-FM¹⁸ αναφέρεται στην επίδραση ενός σήματος πάνω σε κάποιο άλλο όπου τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις συχνότητες και τα πλάτη των ταλαντωτών (φέρων και διαμορφωτής).

Σαν AM (amplitude modulation) εφφέ έχουμε το *τρέμολο*. Η διαμόρφωση πλάτους είναι μια διαδικασία κατά την οποία αλλάζει το πλάτος ή η ακουστότητα ενός σήματος υψηλής συχνότητας με την επέμβαση και παραλλαγή στα χαρακτηριστικά του από τις διακυμάνσεις του πλάτους ενός σήματος χαμηλής συχνότητας. Χαμηλές τιμές διαμόρφωσης παράγουν ένα είδος παλμού (**tremolo**), ενώ υψηλές τιμές διαμόρφωσης μεταβάλλουν το ηχόχρωμα (**timbre**). Ο ήχος ο οποίος διαμορφώνεται ονομάζεται φορέας σήματος.



Σαν FM (frequency modulation) εφφε με LFO γεννήτρια διαμόρφωσης έχουμε το *vibrato*

6.3 Επεξεργασία του ηχητ. σήματος στο χρόνο και το χώρο

- 1) **Panning**: μοίρασμα του ήχου σε δύο η περισσότερα μεγάφωνα (συνήθως έχουμε το pan L και pan R). Με το λεγόμενο panning effect μπορούμε να ρυθμίσουμε το πέρασμα του ήχου από το ένα κανάλι στο άλλο.
- 2) **Delay**: οι τεχνικές καθυστέρησης στην επεξεργασία του σήματος αποτελούν την βάση για μια σειρά μουσικών εφφε, ξεκινώντας από την απλη ηχώ και καταλήγοντας στους πολύπλοκους χρωματικούς μετασχηματισμούς. Οι παράγοντες που καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι ο *χρόνος καθυστέρησης* και ο *αριθμός επαναλήψεων* του εισαγομένου σήματος. Αν ο χρόνος της καθυστέρησης είναι πάνω από 50 ms αντιλαμβανόμαστε μια ξεκάθαρη ηχώ (double tracking)

¹⁸ Για την FM synthesis μιλήσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια

Παράγωγα εφφε της καθυστέρησης

Chorus : το χορωδιακό εφφε χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει την εντύπωση πολλαπλών πηγών ήχου από μία μόνο είσοδο και στηρίζεται στην χρήση διαφόρων παράλληλων γραμμών καθυστέρησης που κάθε μία παρουσιάζει τυχαία μεταβολή στο χρόνο καθυστέρησης κοντά στα 30 ms. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον εμπλουτισμό των εξασθενημένων ήχων του απλού ταλαντωτή ενός συνθεσάιζερ η τον εμπλουτισμό των ήχων που μιμούνται τα έγχορδα. (για τους κιθαριστές μια από τις κλασσικές χρήσεις του chorus εφε είναι η μίμηση του ήχου μιας 12-χορδης κιθάρας χρησιμοποιώντας 6-χορδη κιθάρα).

Flanging : προσδίδει στον ήχο τη χροιά απο ένα σίφουνα η τον ήχο ενός τζέτ αεροπλάνου η από εναν κυματισμό της θάλασσας. Δημιουργείται απο τη μείξη ενός σήματος με μία ελαφρά χρονική καθυστέρηση του , το μέγεθος της οποίας αλλάζει σταθερά. Βασική παράμετρος του εφφέ είναι το depth (βάθος) που μας επιτρέπει να καθορίσουμε το ποσοστό του χρονικά καθυστερημένου σήματος

Phasing . Με το εφφέ phasing επιτυγχάνεται ένα ηχητικό αποτέλεσμα που στηρίζεται στην μεταβαλλόμενη ολίσθηση της φάσης που επιφέρει στο σήμα εισόδου ανάλογα με το φασματικό του περιεχόμενο. Το σήμα ουσιαστικά διέρχεται μεσα παο ένα σύνολο ειδικών φίλτρων που επιτρέπουν την διέλευση όλων των συχνοτήτων προκαλώντας ολίσθηση φάσης που μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας. Βασική παράμετρος του εφφέ είναι το depth (βάθος) που μας επιτρέπει να καθορίσουμε το ποσοστό του χρονικά καθυστερημένου σήματος

- 3) **REVERB**: Με την εντολή Reverb προσδίδουμε στον ήχο χαρακτηριστικά φυσικού βάθους προσομοιώντας περιβάλλοντα απο μεγάλες αίθουσες στάδια, εκκλησίες κτλ.,
- 4) **PITCH shift** : τροποποίηση τονικού ύψους σε μια επιλεγμένη περιοχή
- 5) **PITCH Bend** : Με την εντολή αυτή τροποποιούμε το ύψος μιας περιοχής σε συνάρτηση με το χρόνο. Με τη βοήθεια μιας περιβάλλουσας την οποία σχεδιάζουμε, μπορούμε να καθορίσουμε με ακρίβεια το τρόπο που θα επέλθει αυτή η τροποποίηση.
- 6) **REVERSE** (αναστροφή της κυματομορφής). Το ακουστικό αποτέλεσμα είναι να ακούμε τον ήχο απο το τέλος πρός την αρχή
- 7) **TIME STRETCH** (Επιμήκυνση του χρόνου): με αυτή την εντολή μπορούμε να μεγαλώσουμε τη διάρκεια ενός αρχείου χωρίς να μεταβάλλουμε την συχνότητα του.

Τα μορφήματα (formants): Είναι περιοχές συχνότητων με κορυφές πλάτους στο ηχ. φάσμα (με κεντρική συχνότητα, πλάτος της και εύρος ζώνης) που αντιστοιχούν στις αντηχήσεις της στοματικής κοιλότητας η απο το μέγεθος ενός πνευστού η κρουστού. Οργάνου (τα φωνήεντα χαρακτηρίζονται απο 4 formants).

Επεξεργασία ήχου στο SOUND FORGE

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ

1. Αποκοπή τμημάτων σιγής (fade in /fade out, αποκοπή σιωπής μεταξύ των φράσεων, κτλ)
2. Μετατροπή εύρους δέγματος (8, 16, 24 32,)
 3. Μετατροπή καναλιών (μετατροπή του αρχείου ήχου απο μονοφωνικό σε στερεοφωνικό και το αντίθετο, μείξη των καναλιών ενός στερεοφωνικού αρχείου)
4. Τροποποίηση της τονικότητας με την χρήση φίλτρων
5. Επιμήκυνση του χρόνου (time stretch)
6. Reverse: αναστροφή της κυματομορφής
7. Τροποποίηση στερεοφωνίας
 8. Κανονικοποίηση

Επεξεργασία του ήχου II/EFFECTS

1. προσομοίωση χώρων με acoustic mirror και reverb
2. Διαμόρφωση πλάτους με την Amplitude Modulation
3. Εφε διπλασιασμού (chorus effect)
4. Εφε ηχούς με εντολές delay/echo
5. Εφε παραμόρφωσης με το distortion
6. Συμπίεση και αποσυμπίεση
7. Τροποποίηση πλάτους
8. Flange, phaser, wha-wha
9. Noise gate
10. Τρεμολο
11. vibrato
12. Μεταβολή του τονικού ύψους (Pitch bend, pitch shift)

Επεξεργασία του ήχου στο WAVELAB

Normalize

Gain change

Dynamics (compression, expansion, limiting and nose gate)

Fade-in/ fade-out

Crossfade

Waveform restorer

- time stretch
- pitch correction
- pitch bend
- harmonization
- Hi-fi chorus

Convert sample rate

Τα ηχητικά παράδοξα:

J.Cl. Risset: Η σονίτα Little Jonhy

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

DEPOLI G., Piccialli Aldo et Road Curtis: *"Representations of musical signals"*, MIT Press, 1989

DODGE Charles , JERSE Thomas : *Computer Music . Synthesis, Composition and Performance* , New-York : Schimer Books et Londres : Collier Mac Williams Publishers , 1985 .

EARGLE John: *Music , Sound and Technology*, Van Nostrand, Reinhold, 1990.

MANNING PETER: *Electronic and computer music* , Clarendon Press Oxford 1993.

MATHEWS Max , PIERCE John : *Current Directions in computer Music Research* , MIT Press, Cambridge , Massachusetts, London , 1989

MIPANDA Eduardo Reck: *Computer sound synthesis for the electronic musician*, Focal Press, Oxford 2001.

MOORE F. Richard : *Elements of Computer Music* , Englewood Cliffs : Prentice-Hall , New-Jersey , 1990 .

PIERCE John R. : *The science of musical sound* , Scientific American Books: New-York-San-Francisco , 1983 .

PRESSING JEFF: *Synthesizer performance and real-time techniques*, Oxford university Press, 1992.

ROADS Curtis: *Computer Music Tutorial*, MIT press, Massachusetts, 1996

ROEDER Juan : *The Physics and Psychophysics of music*, Springer -Verlag, 1995.

ΣΑΡΤΖΕΤΑΚΗΣ Χρηστος: *Ψηφιακή επεξεργασία ήχου με το Sound Forge*, Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002..

STARWIN J. : *Digital audio engineering*, W. Kaufman,, California, 1985.

Iannis: Formalized Music

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

- Computer Music Journal
<http://mitpress.mit.edu/journal-ordering-options>.
- ELECTRONIC MUSICOLOGICAL REVIEW
<http://www.cce.ufpr.br/~rem/remi.html>
- Journal of new Music research
<http://www.cce.ufpr.br/~rem/remi.html>
- Journal of the Acoustic society of America
<http://asa.aip.org/jasa.html>
- The Leonardo Music Journal
<http://mitpress.mit.edu/e-journals/Leonardo/isast/journal/journal.html>
- Perspectives of New Music
<http://depts.washington.edu/pnm/>
- New Mus Music net

<http://www.artswire.org/Artswire/NewMusNet/nmmn.htm>

- Musical Performance

<http://www.gbhap-us.com/journals/404/404-top.htm>

ΣΥΝΔΕΣΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

www.ircam.fr: Ινστιτούτο Έρευνας συντονισμού ακουστικής και μουσικής, Παρίσι

www.emf.org: Οργανισμός ηλεκτρονικής μουσικής

www.computermusic.org : Οργανισμός μουσικής Πληροφορικής

Intreactive music systems

CyberGlove user's manual. 1993. Palo Alto, CA, USA: Virtual Technologies Inc. (<http://www.virtex.com>),

Dimensionbeam. <http://www.dimensionbeam.com/db/index.htm>.

Lightning. <http://www.buchla.com/index.shtml>

Miburi. <http://www.yamaha.com>.

I-Cube System. <http://www.infusionsystems.com>.

The Theremin home page. <http://www.nashville.net/theremin/>.

Troika Ranch. <http://www.art.net/troika/troikahome.html>.

Laetitia Sonami. <http://www.otherminds.org/Sonami.html>.

Sensorband. <http://wwwusers.imaginet.fr/atau/sensorband/index.html>.

Waisvisz archive. <http://www.xs4all.nl/mwais>.

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΑ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Conservatory of Music Center for Computer Music, University of Cincinnati

CNMAT - Center for New Music and Audio Technologies - U.C. Berkeley

Columbia University Computer Music Center

Computer Music Department of CNUCE/C.N.R - Pisa

CREATE, Center for Research in Electronic Art Technology, UCSB

University of Padova, Center for Computational Sonology

Eastman Computer Music Center

University of Texas at Austin, Electronic Music Studio at

University of Florida, Florida Electroacoustic Music Studio

University of Oregon, Future Music Oregon

Georgia Institute of Technology, Audio Research Team

University of California, Irvine, Gassmann Electronic Music Studio

Harvard Computer Music

Hochschule fur Musik Detmold

(iEAR), Integrated Electronic Arts, Rensselaer

Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing

Laboratory of Electroacoustic Music - Conservatory P.A.Soler

Michigan State University Computer Music Studios

'Music, Mind, Machine' group (MMM), Edimburgh

University of Nijmegen/University of Amsterdam

Northern Illinois University Computer Music Studios

NoTAM, Norwegian network for Technology, Acoustics and Music at the University of Oslo

Northwestern University, Music Technology

New York University, Music Technology

Peabody Computer Music

Princeton University Department of Music

Queensland University of Technology New Media Music Studies

Ohio State University, Sound Synthesis Studios

University of Alabama, Southern Center for Research in ElectroAcoustic Music (SCREAM)

Australian Center for the Arts and Technology

California Institute of the Arts

Carnegie Mellon University, Computer Music Project

CCRMA, Center for Computer Research in Music and Acoustics, Stanford University

Dartmouth College, Bregman Electronic Music Studio

Mills College, Center For Contemporary Music

MIT Media Lab (Massachusetts Institute of Technology)

Oberlin Conservatory, TIMARA

Technical University of Gdansk Sound Engineering Department

The University of Illinois Experimental Music Studios

The University of Michigan Department of Media and Music Technology (Center for Performing Arts and Technology)

The University of Michigan MusEn project

University of Illinois at Urbana-Champaign, Computer Music Project

The University of Chicago Computer Music Studio

UCSD Music Technology

University of Glasgow Department of Music

Virginia Center for Computer Music (VCCM)

KTH, Speech and hearing Department, Stockholm Sweden.

EPEYNHTIKA INΣTITOYTA

CREAM, Center for Research in Electro-Acoustic Music Institut International de Musique Electroacoustique de Bourges Institut Universitari de l'Audiovisual Instituut voor Psychoacustica en Elektronische Muziek (IPEM)

IRCAM, Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

Laboratorio de Investigaci3n y Producci3n Musical

'Music, Mind, Machine' group (MMM), Nijmegen Institute for Cognition and Information (NICI)

NoTAM, Norwegian network for Technology, Acoustics and Music

Ntonyx Computer Laboratories

Swiss Center for Computer Music

CCARH, The Center for Computer Assisted Research in the Humanities

CCRMA, The Center for Computer Research in Music and Acoustics

DIEM, The Danish Institute of Electroacoustic Music

IBM Research Division Computer Music Center
Logos Foundation
MIT Media Lab, Massachusetts Institute of Technology
Technical University of Gdansk Sound Engineering Department
The Digital Music Research (DMR) Group
ZKM, Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe

Ενδιαφέροντα συνέδρια Μουσικής Πληροφορικής

Στην παρακάτω σελίδα που ανήκει στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου μπορείτε να βρείτε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με συνέδρια που έχουν γίνει στο χώρο της μουσικής Πληροφορικής απο το 1988 και μετά:

www.dai.ed.ac.uk/groups/aimusic/conferences.html

Άλλα συνέδρια

www.icmc2002.org : International Computer music conference

JIM2002; Journées d'informatique musicale

Brasilian symposium on computer music.

