

# ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαλαμίδης Άγγελος Α.Ε.Μ. 1347



Αφαιρετική σύνθεση ήχου: δημιουργία αφαιρετικού συνθε-  
σάιζερ στην γλώσσα προγραμματισμού MAX/MSP, με χρή-  
ση της φωνής ως ελεγκτή για την τροποποίηση της ηχητι-  
κής πηγής.

Επιβλέπων καθηγητής: Αιμίλιος Καμπουρόπουλος

Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2013

## Περιεχόμενα

➤ Εισαγωγή.....	3
<b>1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΗΧΗΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Αναλογική και ψηφιακή αναπαράσταση ήχου.....	7
1.2 Οι συνιστώσες του ήχου.....	9
1.3 Βασικές κυματομορφές.....	13
1.4 Φάσμα- Ανάλυση Φουριέ.....	15
1.5 Εξαγωγή τονικού ύψους (Pitch extraction).....	18
<b>2. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....</b>	<b>26</b>
2.1 Πηγή και τροποποιητής ή αντηχητής (source and modifier or resonator).....	26
2.2 Πηγές.....	28
2.3 Γεννήτριες θορύβου (Noise generators).....	29
2.4 Αρμονικό περιεχόμενο κυματομορφών.....	31
2.5 Τροποποιητές (Modifiers).....	36
2.6 Φίλτρα (Filters).....	36
2.7 Σύνδεση φίλτρων.....	43
2.8 Φωνοσυντονισμοί (Formants).....	46
<b>3. ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΝΘΕΣΑΙΖΕΡ.....</b>	<b>49</b>
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Διάγραμμα αναλογικού συνθεσάιζερ.....	51
3.3 Το πληκτρολόγιο (Keyboard).....	52
3.4 Έλεγχος τάσης (Voltage control).....	53
3.5 Ταλαντωτής ελεγχόμενης τάσης (Voltage controlled oscillator)..	53
3.6 Ταλαντωτής χαμηλής τάσης (Low frequency oscillator).....	55
3.7 Φίλτρο ελεγχόμενης τάσης (Voltage controlled filter).....	55

3.8	Ενισχυτής ελεγχόμενης τάσης (Voltage controlled amplifier).....	57
3.9	Ψηφιακά αφαιρετικά συνθεσάιζερ σε μορφή λογισμικού.....	58
<b>4.</b>	<b>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΟΥ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΣΑΙΖΕΡ</b>	
	<b>ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΦΩΝΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ/ΕΚΤΕΛΕΣΤΗ....</b>	<b>63</b>
4.1	Εισαγωγή.....	63
4.2	Δημιουργία βασικού αφαιρετικού συνθεσάιζερ (Βασικό Patch)...	65
4.3	Δημιουργία αφαιρετικού συνθεσάιζερ μεταβάλλοντας την φασματική περιβάλλουσα του ήχου με την ανθρώπινη φωνή...	69
4.4	Σταθερή επιλογή παραμέτρων ελέγχου αφαιρετικής σύνθεσης (Patch 1).....	71
4.5	Μεταβολές του φάσματος σε πραγματικό χρόνο (real-time) (Patch 2).....	73
	➤ <b>Επίλογος.....</b>	<b>78</b>
	➤ <b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>81</b>
	➤ <b>Παράρτημα.....</b>	<b>85</b>

## Εισαγωγή

Η αφαιρετική σύνθεση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται από τα πρώτα χρόνια της ηλεκτρονικής μουσικής. Όπως σύνθετες κυματομορφές μπορούν να κατασκευαστούν με την πρόσθεση απλούστερων κυματομορφών, έτσι πλούσιες φασματικά κυματομορφές μπορούν να διαφοροποιηθούν μέσω της συστηματικής τροποποίησης/εξάλειψης συγκεκριμένων φασματικών περιοχών του ήχου. Η αφαιρετική σύνθεση ξεκινάει με μια πολύπλοκη κυματομορφή την οποία μεταβάλλει στη συνέχεια με χρήση φίλτρων.

Η αφαιρετική σύνθεση συχνά θεωρείται λανθασμένα ως η μόνη αναλογική μέθοδος σύνθεσης ήχου. Αν και υπάρχουν και άλλες μέθοδοι σύνθεσης, η πλειοψηφία των εμπορικών αναλογικών συνθεσάιζερ χρησιμοποιούν αφαιρετική σύνθεση. Επειδή συνήθως παρουσιάζεται με ένα περιβάλλον εργασίας του χρήστη το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κουμπιών και διακοπών, αρχικά μπορεί να είναι αποτρεπτική προς κάποιον αρχάριο. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της ύπαρξης μιας σχέσης η οποία είναι ένας-προς-ένα μεταξύ των διαθέσιμων ελέγχων και των διακοπών και των κουμπιών, είναι κατανοητή και εφαρμόζεται πολύ καλά σε εκπαιδευτικούς σκοπούς. Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσει έναν αριθμό σημαντικών αρχών και μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούνται στη θεωρία της ακουστικής και του ήχου (Russ, 2009).

Η ψηφιακή τεχνολογία ήχου πλέον έχει αντικαταστήσει σχεδόν εξ' ολοκλήρου την αναλογική τεχνολογία. Σήμερα, οι υπολογιστές είναι ιδιαίτερα ικανοί να συνθέτουν ήχους οι οποίοι προσομοιώνουν πειστικά φυσικούς ήχους, καθώς και νέους πρωτότυπους συνθετικούς ήχους. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθιστά πιο εύκολη τη σύνθεση ήχου,

εφόσον όλες οι λειτουργίες εφαρμόζονται σε αυτόν πιο γρήγορα και αποτελεσματικά.

Το θέμα της παρούσας εργασίας ασχολείται με την αφαιρετική σύνθεση ήχου μέσω χρήσης της ψηφιακής τεχνολογίας. Περιγράφει βασικά χαρακτηριστικά ενός αναλογικού αφαιρετικού συνθεσάιζερ, καθώς και την μεταφορά του σε μορφή λογισμικού. Τέλος προτείνεται μια νέα διαδραστική εφαρμογή στην γλώσσα προγραμματισμού MAX/MSP η οποία επιτρέπει τον έλεγχο βασικών παραμέτρων της αφαιρετικής σύνθεσης σε πραγματικό χρόνο μέσω εξωτερικών ήχων (προηχογραφημένων ή από μικρόφωνο).

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αρχικά αποσαφηνίζει σύντομα τις διαφορές του αναλογικού από το ψηφιακό σήμα, και στην συνέχεια γίνεται μία γενική αναφορά στις συνιστώσες του ήχου που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην ηλεκτρονική μουσική. Επίσης σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αναπαράσταση του ήχου στο πεδίο του χρόνου (κυματομορφή) και στην συνέχεια δίνεται περισσότερο βάρος στο φάσμα και στην ανάλυση Φουριέ τα οποία είναι βασικά στοιχεία πριν ασχοληθεί κάποιος με την σύνθεση ήχου. Κλείνοντας το πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην ανίχνευση και εξαγωγή τονικού ύψους και παρουσιάζονται κάποιες αποτελεσματικές μέθοδοι εξαγωγής τονικού ύψους. Η εξαγωγή τονικού ύψους αποτελεί μέρος της εφαρμογής στο τελικό κεφάλαιο της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την τεχνική της αφαιρετικής σύνθεσης. Αρχικά παρουσιάζονται οι κύριες πηγές που χρησιμοποιούνται στην αφαιρετική σύνθεση, και αναλύονται λεπτομερώς όλες οι κυματομορφές που παράγονται από μία στοιχειώδη γεννήτρια ήχου (τον ταλαντωτή), καθώς και από μία γεννήτρια θορύβου. Στην συνέχεια γίνεται μία αναφορά στους τροποποιητές, περιγράφεται η λειτουργία κάθε φίλτρου ξεχωριστά καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να συνδεθούν μετα-

ξύ τους. Κλείνοντας το δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στα formants διότι η ανθρώπινη φωνή είναι ένα παράδειγμα αφαιρετικής σύνθεσης, όπου η στοματική, η ρινική κοιλότητα και ο λαιμός μπορούν να βοηθούν ως μια πολύπλοκη διάταξη που μοιάζει με σωλήνα όπου συγκεκριμένες συχνότητες τονίζονται ενώ άλλες φιλτράρονται κι έτσι η απόκριση συχνότητας που προκύπτει παρουσιάζει μια σειρά από κορυφές (peaks).

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στα πρώτα αναλογικά αφαιρετικά συνθεσάιζερ και μία συνοπτική αναφορά στα ψηφιακά. Στην συνέχεια περιγράφονται οι επιμέρους μονάδες από τις οποίες αποτελείται ένα συνθεσάιζερ. Το κεφάλαιο κλείνει παρουσιάζοντας δύο αφαιρετικά συνθεσάιζερ στο Ableton Live το οποίο είναι πρόγραμμα για δημιουργία, παραγωγή και εκτέλεση μουσικής (δέχεται VST επέκταση).

Τέλος, έπειτα από την ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας της αφαιρετικής σύνθεσης, δημιουργούμε ένα ψηφιακό αφαιρετικό συνθεσάιζερ στην γραφική γλώσσα MAX/MSP. Σ' αυτό το synth εξελίσσουμε την ιδέα ότι με την χρήση της τεχνολογίας μπορούμε πλέον να έχουμε έλεγχο σε διάφορες παραμέτρους του συνθεσάιζερ με άλλα διαδραστικά μέσα πέρα από την χρήση διακοπών. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της ανθρώπινης φωνής η οποία επιδρά στην κεντρική συχνότητα των φίλτρων και αυτά με την σειρά τους τροποποιούν την πηγή. Αυτό γίνεται με την ανάλυση της φωνής που λαμβάνει το μικρόφωνο στο πεδίο των συχνοτήτων, με την τεχνική ανάλυσης Φουριέ (FFT) και με τεχνικές ανίχνευσης τονικού ύψους (pitch detection). Το συνθεσάιζερ αυτό έχει δύο εκδοχές: 1) διαμόρφωση νέου ηχοχρώματος μέσω της φωνής και στην συνέχεια διατήρηση του ηχοχρώματος σταθερού, και 2) συνεχής διαμόρφωση του ηχοχρώματος σε πραγματικό χρόνο από την φωνή μέσω αλλαγής της φασματικής περιβάλλουσας προ-ηχογραφημένων ήχων. Η γενική ιδέα

αυτού του project είναι ότι ένας εκτελεστής συνθεσάιζερ σε ένα live concept θα έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την φασματική περιβάλλουσα της πηγής με την φωνή του. Επίσης θα μπορεί να δημιουργεί ηχητικά εφέ με την χρήση της φωνής χρησιμοποιώντας προ-ηχογραφημένους ήχους διαμορφώνοντας την φασματική περιβάλλουσα και κάνοντας loops σε αυτούς τους ήχους.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί την διπλωματική μου εργασία στο πλαίσιο των σπουδών μου στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών της Σχολής Καλών Τεχνών του Α.Π.Θ.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον επίκουρο καθηγητή κ. Αιμίλιο Καμπουρόπουλο για την επιστημονική καθοδήγηση και σημαντική βοήθεια, στην ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας.*

*Θα κάνω ειδική μνεία στην οικογένειά μου, στους γονείς μου και στα αδέρφια μου. Η ευγνωμοσύνη μου είναι αμέριστη, όχι μόνο για την στήριξή τους για την διπλωματική μου εργασία, αλλά πρωτίστως για αυτά που έχουν προσφέρει στη ζωή μου.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου για την υποστήριξη, την υπομονή και την απλόχερη αγάπη της.*

*Μαλαμίδης Άγγελος*

## {1}

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΗΧΗΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

## 1.1 Αναλογική και ψηφιακή αναπαράσταση ήχου

Λέγοντας ότι η πληροφορία είναι **αναλογική**, εννοούμε ότι το σήμα που περιγράφει τον ήχο μεταβάλλεται ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται και ο ήχος, δηλαδή αναπαριστά αυτό τον ήχο και παρακολουθεί τις όποιες μεταβολές του, μέσα από μια σχέση αναλογίας. Αν ο ήχος μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο, ανάμεσα σε μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή, το ίδιο κάνει και το σήμα που το αναπαριστά. Ο όρος «συνεχείς» δηλώνει πως στη συνάρτηση δεν υπάρχουν σημεία ασυνέχειας, δηλαδή σημεία στα οποία η τιμή της συνάρτησης να “πηδά” από μια τιμή  $X$  σε κάποια άλλη τιμή  $Y$  χωρίς να περνά από της ενδιάμεσες τιμές (Πολίτης, 2007, σελ 74).

**Ψηφιακό σήμα:** Τα ηλεκτρικά σήματα που αναπαριστούν την πληροφορία μπορούν να βρίσκονται μόνο σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα επίπεδα. Κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή απλά δεν έχει νόημα, δεν υφίσταται στο σύστημα τιμών του σήματος. Κάθε σήμα που αποτελείται από ακολουθία τέτοιων διακριτών τιμών, χαρακτηρίζεται ως **ψηφιακό**. (Πολίτης, 2007, σελ 75).

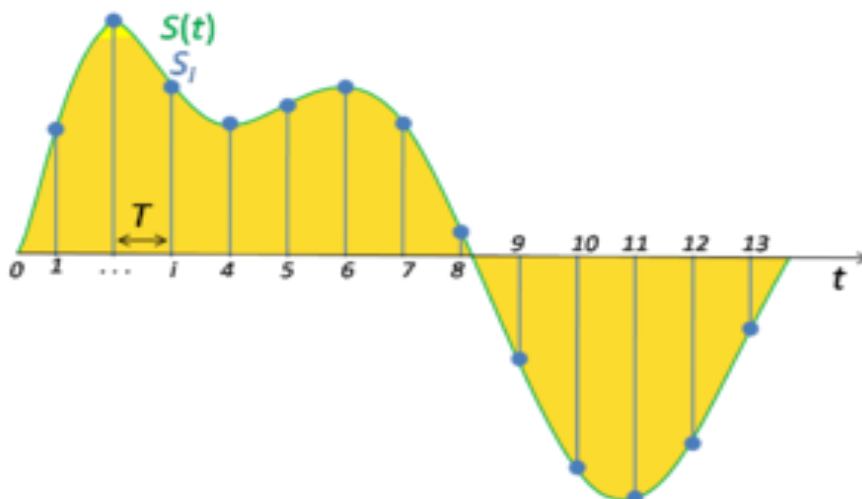
Οι τιμές της τάσης ενός αναλογικού σήματος μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή αντιστοιχεί διαφορετική τιμή (και φυσικά, ανάμεσα σε δύο οποιεσδήποτε χρονικές στιγμές υπάρχουν άπειρες χρονικές υποδιαίρεσεις και ανάμεσα σε δύο τιμές τάσης άπειρες άλλες υποδιαίρεσεις). Δεν είναι δυνατή η μέτρηση και αποθήκευση της κάθε τιμής τάσης ενός αναλογικού σήματος για κάθε χρονική στιγμή, λόγω φυσικών περιορισμών ενός υπολογιστή (θα χρειαζόταν απεριόριστο χρόνο επεξεργασίας και χώρο αποθήκευσης). Είναι απαραίτητο με κάποιο



τρόπο να μετατραπούν οι συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές του αναλογικού σήματος σε ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών τιμών που να αναπαριστούν με αξιοπιστία το αρχικό αναλογικό σήμα. Η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα στηρίζεται σε δύο παράγοντες: στην δειγματοληψία (sampling) και στον κβαντισμό (quantisation) (Καμπουρόπουλος, 2006, σελ. 1).

Ο ήχος είναι συνεχές σήμα (πυκνώματα και αραιώματα του αέρα) και με το μικρόφωνο μετατρέπεται σε ένα ανάλογο ηλεκτρικό σήμα. Ο δειγματολήπτης μετατρέπει το σήμα σε διακριτό και στην συνέχεια ένας κβαντιστής μετατρέπει τις τιμές του διακριτού σήματος σε ψηφιακές (κάθοντας κβαντισμό - στρογγυλοποίηση).

Για την μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακή μορφή, αντί να μετράται η τάση του σήματος για κάθε χρονική στιγμή, λαμβάνονται δείγματα (σε ίσα χρονικά διαστήματα) από ένα συνεχές σήμα. Ο αριθμός δειγμάτων που μετρώνται ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate ή sampling frequency) (Καμπουρόπουλος, 2006).



**Σχήμα 1.1** Σχεδιάγραμμα δειγματοληψίας σήματος. Το συνεχές σήμα αναπαριστάται από την πράσινη γραμμή ενώ τα διακριτά δείγματα (αποτέλεσμα δειγματοληψίας) με το μπλε χρώμα<sup>1</sup>.

Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, για κάθε δείγμα λαμβάνεται μία διακριτή τιμή που αναπαριστά το πλάτος του κύματος (Σχήμα 1.1). Οι τιμές αυτές επιλέγονται από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών και η βασική επιδίωξη είναι να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική τιμή του αναλογικού σήματος. Η διαδικασία αντιστοίχισης διακριτών τιμών πλάτους στις συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές του αναλογικού σήματος ονομάζεται *κβαντισμός* (quantisation) (Καμπουρόπουλος, 2006, σελ. 5).

## 1.2 Τα χαρακτηριστικά του ήχου

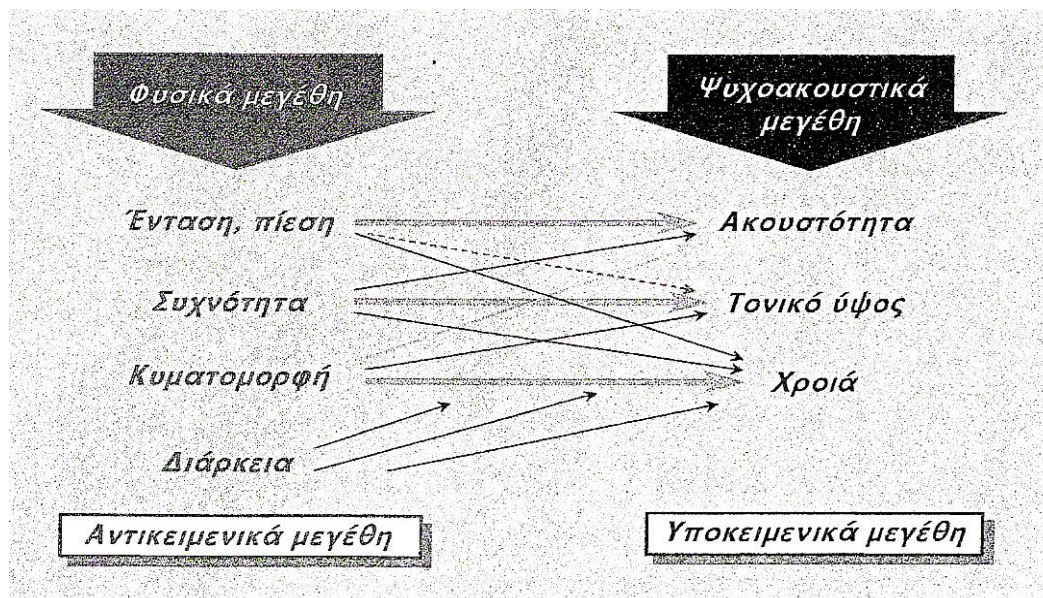
Φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου είναι η συχνότητα, η ένταση, η κυματομορφή και η διάρκεια του. Η φάση, χωρίς ν' αποτελεί ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, περιγράφει την στιγμιαία κατάσταση του κύματος, η ταχύτητα αναφέρεται στην διάδοση του κύματος στο χώρο ανά μονάδα χρόνου (δευτερόλεπτο), το μήκος κύματος βρίσκεται σε άμεση σχέση με τη συχνότητα του και τέλος η δυναμική του ανάπτυξη αναφέρεται στην εξέ-

<sup>1</sup> [el.wikipedia.org/wiki/Δειγματοληψία\\_σήματος](http://el.wikipedia.org/wiki/Δειγματοληψία_σήματος)

λιξη της έντασης στο χρόνο. Αυτά τα χαρακτηριστικά ενός κύματος είναι τα αντικειμενικά μεγέθη, διότι αναφέρονται στην φυσική κατάσταση ενός ήχου και μπορούν να προσδιοριστούν πλήρως με την ποιότητα και την ποσότητά του (Χαδέλλης, 2010, σελ 20).

Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς ψυχοακουστικά μεγέθη των ήχων είναι το ύψος, η ακουστότητα και η χροιά (ηχόχρωμα). Το ύψος ενός ήχου εξαρτάται από την συχνότητά του, η ακουστότητα από την ένταση και το ηχόχρωμα κυρίως από το φάσμα των συχνοτήτων του. Αυτή είναι η θεμελιώδης αντιστοιχία μεταξύ των τριών βασικών υποκειμενικών και αντικειμενικών χαρακτηριστικών του ήχου (Χαδέλλης, 2010, σελ 20).

«Η συσχέτιση παραμέτρων του φυσικού ερεθίσματος με αντίστοιχα ψυχοακουστικά μεγέθη δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά είναι αξιοσημείωτο ότι περισσότερες από μια φυσικές παράμετροι συμβάλλουν στη διαμόρφωση κάποιου συγκεκριμένου ψυχοακουστικού μεγέθους και μάλιστα με διαφορετική «βαρύτητα» η κάθε μια» (Γ. Παπαδέλης, 2001α, σελ. 8).



**Σχήμα 1.2** Συσχετισμός φυσικών και ψυχοακουστικών μεγεθών. Το πάχος κάθε βέλους υποδηλώνει τη σημαντικότητα της σχέσης μεταξύ των συσχετιζόμενων μεγεθών (Γ. Παπαδέλης, 2001α, σελ. 8)

Από όλα αυτά τα στοιχεία, εκείνα που μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα και που είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε προτού φτάσουμε στη σύνθεση του ήχου με την τεχνική της αφαιρετικής σύνθεσης, είναι το φάσμα του και η φασματική περιβάλλουσα που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Επίσης σύμφωνα με τον Holmes η κατανόηση των πέντε συνιστωσών του ήχου που θα δούμε στις επόμενες παραγράφους είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της οποιαδήποτε μουσικής.

**Συχνότητα (Frequency):** Είναι ο αριθμός των περιόδων που συντελούνται μέσα σε ένα δευτερόλεπτο. Περίοδος ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος της μεταβολής ενός περιόδου φαινομένου (Γ. Παπαδέλης, 2002).

Το 1960 στο System Internationale (SI) ορίστηκε ως μονάδα μέτρησης της συχνότητας το Hertz (HZ) προς τιμήν του Γερμανού φυσικού των ραδιοφωνικών κυμάτων και ανακάλυψε τον τρόπο παραγωγής (Χαδέλλης, 2010).

**Ένταση (Amplitude):** Η ένταση του ήχου σε κάποιο σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση είναι η ποσότητα της ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού με κέντρο το συγκεκριμένο σημείο (Γ. Παπαδέλης, 2002). Με ακουστικά όργανα, η ένταση ελέγχεται από τον εκτελεστή που παίζει πιο μαλακά ή πιο σκληρά – πατώντας το πλήκτρο, φυσώντας το πνευστό όργανο, χτυπώντας τις χορδές κλπ. Στην ηλεκτρονική μουσική, η ένταση καθοδηγείται από την ηλεκτρική δύναμη ενός ενισχυτή που κάνει να ακουστούν οι ήχοι που παράγονται ηλεκτρονικά (Roads, 1996).

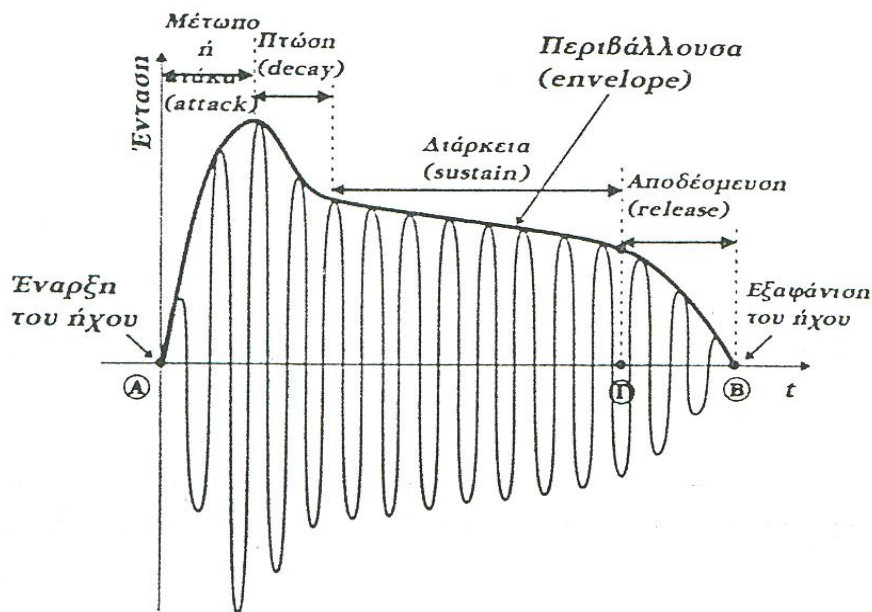
**Ηχώχρωμα, Χροιά (Timbre):** Η χροιά είναι εκείνο το χαρακτηριστικό του ήχου το οποίο δίνει την δυνατότητα στον ακροατή να αναγνωρίσει το είδος του μουσικού οργάνου που παράγει τον ήχο. Η χροιά είναι η υποκειμενική αντίληψη του αρμονικού περιεχομένου του ήχου. Μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την χροιά σαν το χρώμα ενός ήχου απ' όπου βγαίνει και

ο συνώνυμος όρος της χροιάς , ηχώχρωμα. Όλα τα κύματα του ήχου είναι σύνθετα και περιέχουν παράγωγες συχνότητες ή αλλιώς υπέρτονους (overtones, βλ. παράρτημα, κεφάλαιο 1) οι οποίες έχουν αρμονική ή μη αρμονική σχέση με την θεμέλιο. Όσο περισσότερες συνιστώσες συχνότητες περιέχει ένας ήχος τόσο πιο πλούσιος γίνεται. Η ύπαρξη περισσότερων μη αρμονικών συχνοτήτων τείνει να εξαφανίσει την αίσθηση του τονικού ύψους (Χαδέλλης, 2010). Αν, μία θεμελιώδης συχνότητα κυριαρχεί, και υπάρχουν περισσότερες αρμονικές συχνότητες σε σχέση με την θεμελιώδη τότε ο ήχος μπορεί να σχετιστεί εύκολα με μια νότα στην μουσική κλίμακα. Κατά την ακρόαση ενός ήχου αντιλαμβανόμαστε το ηχώχρωμα από πολλούς παράγοντες. Αυτοί περιλαμβάνουν κυρίως το περιεχόμενο των συχνοτήτων (φάσμα), καθώς και μεταξύ άλλων την ένταση, τις μεταβολές της έντασής του ήχου κατά την εξέλιξή του στο χρόνο (περιβάλλουσα), διάρκεια, διακυμάνσεις εξαιτίας του βιμπράτο ή του τρέμολο (Roads, 1996).

**Διάρκεια (Duration):** Το μήκος του χρόνου κατά τον οποίο ακούγεται ο ήχος. Τα μουσικά όργανα έχουν περιορισμένη δυνατότητα να διατηρούν τους ήχους. Το πιάνο, για παράδειγμα, έχει σχεδιαστεί με ένα ειδικό πεντάλ με σκοπό να επιτρέπει στις νότες να διατηρούνται περισσότερο. Τα ηλεκτρονικά όργανα έχουν την ικανότητα να διατηρούν έναν ήχο απεριόριστα, κάνοντας τη διάρκεια ένα στοιχείο-κλειδί για τη σύνθεση. Η διάρκεια είναι στενός «σύμμαχος» της περιβάλλουσας (Roads, 1996).

**Περιβάλλουσα (envelope):** Ο χαρακτήρας των ήχων επηρεάζεται πολύ από το αρμονικό τους περιεχόμενο αλλά το ηχώχρωμα εξαρτάται σημαντικά και από αλλαγές στην ένταση κατά τη διάρκεια του ήχου. Αυτές οι αλλαγές περιγράφονται με τον όρο **περιβάλλουσα (envelope)**. Η περιβάλλουσα είναι ένα περίγραμμα του πλάτους του ήχου κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του μέσα στο χρόνο. Σε ένα διάγραμμα πλάτους ενός

ήχου εφαρμόζουμε ένα περίγραμμα το οποίο δείχνει τις μεταβολές του πλάτους της κυματομορφή του ήχου (Σπυρίδης, 2000).



Σχήμα 1.3 Γενική μορφή περιβάλλουσας πλάτους (Σπυρίδης, 2000 σελ 77).

Μια βασική γεννήτρια περιβάλλουσας έχει 4 τμήματα: Attack, Decay, Sustain, Release (ADSR). Το κάθε ένα καθορίζει τι συμβαίνει σε ορισμένα κομβικά σημεία κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης ενός ήχου (Κόκορας, 2007).

- **Attack time:** ατάκα, ο τρόπος με τον οποίο ένας ήχος φτάνει στη μέγιστη έντασή.
- **Decay time:** εξασθένηση ή πτώση, η σταδιακή μείωση της έντασης ενός ήχου ή ενός ηλεκτρικού σήματος στη διάρκεια του χρόνου.
- **Sustain Level:** διάρκεια, η διατήρηση μίας μέσης έντασης, εάν υπάρχει.
- **Release Time:** αποδέσμευση, η δραστική μείωση μέχρι το μηδενισμό του ήχου.

### 1.3 Βασικές Κυματομορφές

Τα περιοδικά κύματα του ήχου μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά από τα δύο βασικά χαρακτηριστικά τους, το τονικό ύψος (pitch) και το πλάτος. Στην ηλεκτρονική μουσική, το pitch αναφέρεται ως συχνότητα και προσδιορίζεται από έναν αριθμό δονήσεων που προκύπτουν κά-

θε δευτερόλεπτο (μετρείται σε hertz ή Hz ). Το πλάτος ενός ήχου είναι η ισχύς του. Σε ένα διάγραμμα κύματος, η ισχύς αναπαρίσταται από το πλάτος του κύματος (Holmes, 2002).

Ένας σύνθετος ήχος αποτελείται από αρκετά απλά ημιτονοειδή κύματα. Έχει θεμελιώδη συχνότητα και τις συνιστώσες ή υπέρτονους (overtones). Η θεμέλιος είναι ένα κύμα με την χαμηλότερη συχνότητα ή την υψηλότερη ισχύ κι έτσι επικρατεί στον συνδυασμό των τόνων. Οι αρμονικοί ήχοι προσθέτουν χρώμα στον ήχο, δίνοντας του χαρακτήρα ή ηχοχρωματική ποιότητα (Holmes, 2002).

Εφόσον οι περισσότεροι ήχοι που ακούμε στην ηλεκτρονική μουσική είναι συνδυασμοί πολλαπλών κυμάτων, είναι χρήσιμο να υπάρχει ένας κατάλογος με μερικές βασικές κυματομορφές, που χρησιμεύουν ως δομικά υλικά για τον συνθέτη ηλεκτρονικής μουσικής. Οι κάρτες ήχου των υπολογιστών και τα μουσικά συνθεσάιζερ παρέχουν ηλεκτρονικούς ηχητικούς ταλαντωτές (oscillators) που μπορούν να παράγουν οποιοδήποτε από αυτά τα κύματα σε μια περίπου καθαρή μορφή.

Οι βασικές κυματομορφές είναι: Ημιτονοειδής κυματομορφή (sine wave), Τριγωνική κυματομορφή (triangle wave), Τετραγωνική κυματομορφή (square wave), Πριονωτή κυματομορφή (sawtooth wave), και η κυματομορφή στενού παλμού (pulse wave). Θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με το αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών αυτών στο επόμενο κεφάλαιο.

Αυτές οι βασικές κυματομορφές μπορούν να συνδυαστούν ώστε να δημιουργήσουν πιο πλούσιους και με πιο σύνθετη υφή ήχους ή να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν παραμέτρους άλλων ήχων, τεχνικές που θα παρουσιαστούν πιο κάτω.

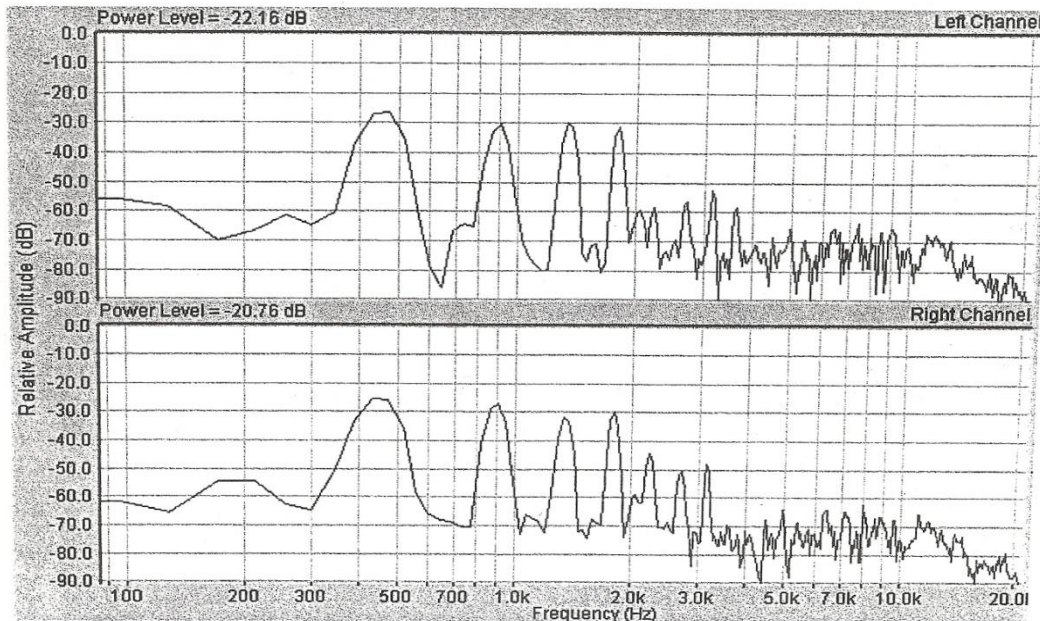
Μια ακόμη βασική κυματομορφή πρέπει να αναφερθεί, ο λευκός θόρυβος, ο οποίος δεν διαθέτει την δομική συμμετρία των ημιτονοειδών, τριγωνών, πριονωτών και παλμικών κυμάτων. Με απλά λόγια, ο λευκός θόρυβος είναι για αυτές τις τέσσερις βασικές κυματομορφές ότι το χρώμα

Λευκό είναι για τα πρωτεύοντα χρώματα, είναι ένας συνδυασμός όλων αυτών, χωρίς κανένα συγκεκριμένο στοιχείο να επικρατεί στο μείγμα. Ο λευκός θόρυβος δημιουργείται όταν όλα τα χαρακτηριστικά συχνότητας και ισχύος ενός ήχου προκύπτουν τυχαία μέσα στο ηχητικό φάσμα. Μπορεί να φιλτραριστεί και να διαμορφωθεί σε ήχο που μοιάζει με πράγματα όπως ο ήχος του ωκεανού ή ο αέρας και είναι μια πλούσια πηγή για τον συνθέτη της ηλεκτρονικής μουσικής (Holmes, 2002).

#### 1.4 Φάσμα – Ανάλυση Fourier

Ένας ορισμός για το φάσμα είναι ότι πρόκειται για «ένα μέτρο της κατανομής ενέργειας του σήματος ως μία συνάρτηση της συχνότητας» (Roads, 1996). Η απεικόνιση της κατανομής ισχύος του σήματος στις διάφορες συχνότητες λέγεται **ανάλυση φάσματος (spectrum analysis)** (Παπαδέλης, 2001β). Το φάσμα αποτελεί μια πλήρη περιγραφή μιας κυματομορφής στο πεδίο συχνοτήτων, περιγράφοντας το πλάτος και τη φάση κάθε μιας συνιστώσας συχνότητας (Pierce, 2001). Τα επιμέρους ημιτονοειδή κύματα έχουν περιορισμένη μουσική αξία. Ωστόσο, οι συνδυασμοί των ημιτονοειδών κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν, να αναλύσουν και να συνθέσουν σχεδόν κάθε πιθανό ήχο (Sethares, 2004).



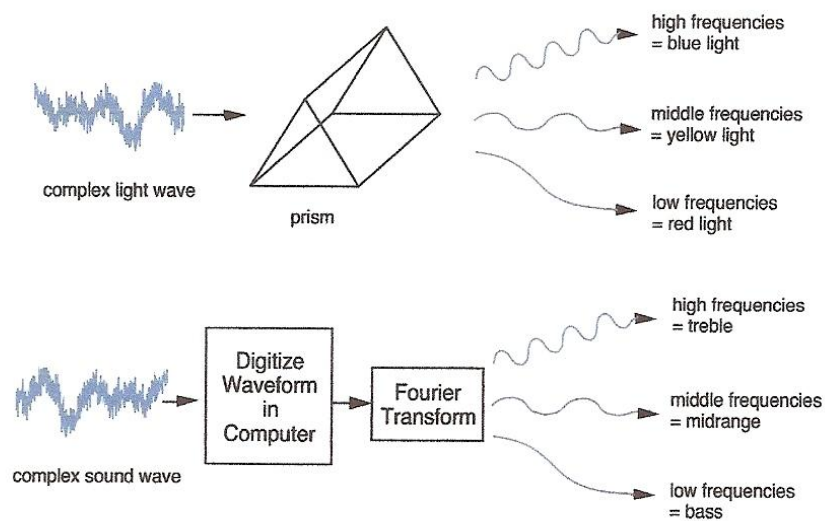


**Σχήμα 1.4** Γραφική παράσταση πλάτους συχνότητας, η οποία προέρχεται από την εφαρμογή ανάλυσης φάσματος σε ένα χρονικό δείγμα 20ms της νότας A4 του φλάουτου. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές της συχνότητας σε HZ, ενώ στον κατακόρυφο οι σχετικές στάθμες (Παπαδέλης, 2002, σελ. 23).

Ο ήχος (με την φυσική έννοια) είναι ένα κύμα, και έχει πολλές ιδιότητες που είναι ανάλογες με τις ιδιότητες του κύματος του φωτός. Σκεφτείτε ένα πρίσμα, το οποίο «κάμπει» κάθε χρώμα μέσω μιας διαφορετικής γωνίας κι έτσι αποσυνθέτει το φως του ήλιου σε μια οικογένεια χρωματιστών ακτίνων. Κάθε ακτίνα περιέχει ένα ‘καθαρό χρώμα’, ένα κύμα μίας συχνότητας, πλάτους και φάσης. Παρόμοια, τα σύνθετα κύματα ήχου μπορούν να αποσυντεθούν σε μια οικογένεια απλών ημιτονοειδών κυμάτων, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα, το πλάτος και τη φάση του. Αυτά ονομάζονται συνιστώσες, ή υπέρτονοι (overtones) ενός ήχου και η συλλογή όλων των συνιστωσών ονομάζεται φάσμα. Στο σχήμα 1.5 απεικονίζει τον μετασχηματισμό Fourier σε ρόλο ‘ηχητικού πρίσματος’ (Sethares, 2004).

Αυτό το εφέ πρίσματος για τους ήχους επιτυγχάνεται μέσω της μιας φασματικής ανάλυσης, που συνηθέστερα εφαρμόζεται σε έναν υπολογιστή τρέχοντας ένα πρόγραμμα που ονομάζεται Discrete Fourier Transform

(DFT) ή το πιο αποδοτικό Fast Fourier Transform (FFT). Πρότυπες εκδοχές του DFT και/ή του FFT είναι διαθέσιμες σε λογισμικά ηχητικής επεξεργασίας και σε αρκετά πακέτα που μπορούν να χειριστούν αρχεία με δεδομένα ήχου (Sethares, 2004).

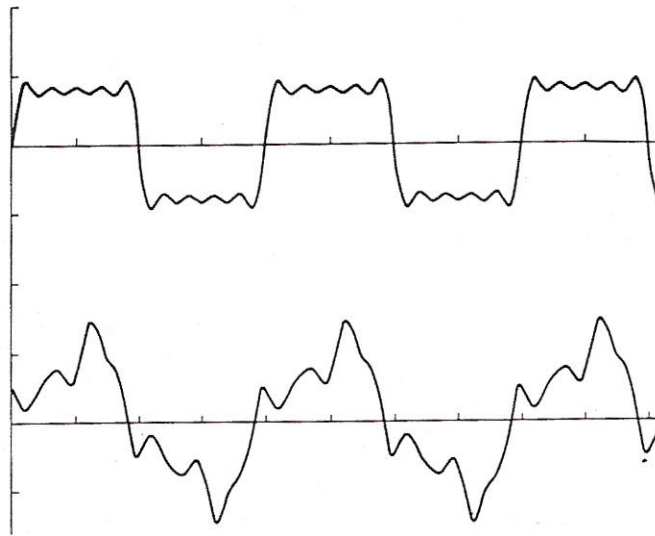


**Σχήμα 1.5** Όπως ακριβώς ένα πρίσμα διασπά το φως στα απλά συστατικά του στοιχεία (τα χρώματα του ουράνιου τόξου), έτσι ο μετασχηματισμός Fourier διαχωρίζει τα σήματα ήχου σε απλούστερες ημιτονοειδείς κυματομορφές στις χαμηλές (μπάσες), μεσαίες (μεσαίας συχνότητας) και υψηλές συχνότητες. Παρόμοια, το ακουστικό σύστημα μετατρέπει ένα κύμα πίεσης σε μια διαστηματική παράταξη που ανταποκρίνεται σε διάφορες συχνότητες που περιέχονται στο κύμα (Sethares, 2004, σελ 14).

Η θεωρία του Φουριέ λέει ότι οποιαδήποτε περιοδική κυματομορφή, μπορεί να αποδομηθεί σε απλές ημιτονοειδείς κυματομορφές με διαφορετικό πλάτος, συχνότητα και φάση. Έτσι μπορούν να αναλυθούν απλοί και σύνθετοι ήχοι και να διαφανεί από ποιές συχνότητες αποτελούνται (Roads, 1996).

Κατά την ακρόαση δύο ήχων με τις ίδιες συχνότητες, ίδιο πλήθος αρμονικών, ίδια πλάτη, αλλά με διαφορετικές φάσεις, το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται το ίδιο ηχόχρωμα. Σε αυτή τη περίπτωση η κυματομορφή

θα αλλάξει σημαντικά όψη, η διαφορά τους ωστόσο δεν γίνεται αντιληπτή (Russ, 1996, σελ. 105).



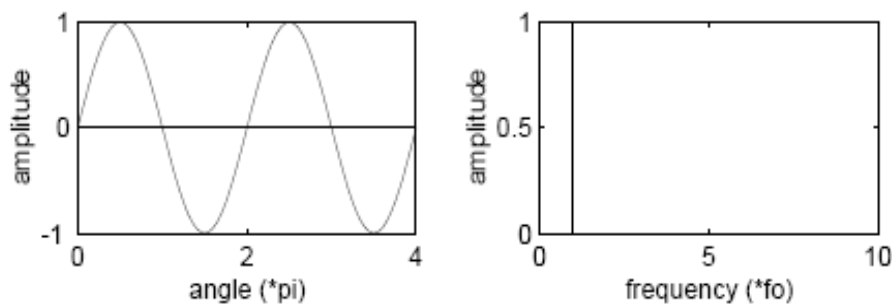
**Σχήμα 1.6** Δύο κυματομορφές με το ίδιο φάσμα αλλά με διαφορετικές σχέσεις φάσεων μεταξύ των συνιστωσών τους. Αν και το σχήμα αλλάζει το άκουσμα είναι σχεδόν ίδιο (Roads, 1996, σελ. 746).

Μια απλή αλλά ενδιαφέρουσα άσκηση στα μαθηματικά δείχνει ότι, οποιοδήποτε περιοδικό σήμα μπορεί να διασπαστεί σε ένα σύνολο ημιτονοειδών κυμάτων με συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια κάποιας θεμελιώδους συχνότητας. Το φάσμα είναι έτσι, ιδανικό για την αναπαράσταση περιοδικών κυματομορφών. Αλλά κανένας πραγματικός ήχος δεν είναι πραγματικά περιοδικός, γιατί πρέπει να έχει μια αρχή κι ένα τέλος. Στην καλύτερη περίπτωση θα πρέπει να πλησιάζει πολύ ένα περιοδικό σήμα για ένα μεγάλο αλλά άπειρο χρόνο (Sethares, 2004).

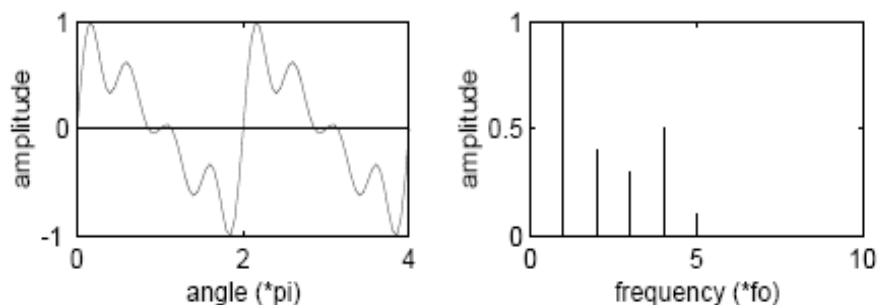
### 1.5 Εξαγωγή τονικού ύψους (pitch extraction)

Η εξαγωγή του ύψους (pitch extraction) ανάγεται στον υπολογισμό της θεμελιώδους συχνότητας ενός μουσικού σήματος. Ένας ανιχνευτής του ύψους πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη και αντιληπτικά μοντέλα και να παράγει το αποτέλεσμα στην κλίμακα τονικών υψών και όχι στην κλίμακα συχνοτήτων.

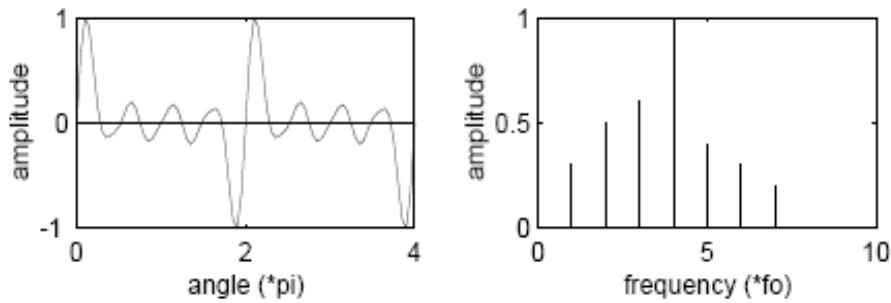
Υπάρχει ένα πλήθος μεθόδων για την εξαγωγή της θεμελιώδους συχνότητας, βασισμένων σε διάφορες μαθηματικές αρχές. Αφού το ύψος είναι μια αντιληπτική ποσότητα σχετιζόμενη με την θεμελιώδη συχνότητα,  $f_0$ , μιας περιοδικής ή ψευδο-περιοδικής κυματομορφής, θα αρκούσε να προσδιορίσουμε την περίοδο της ταλάντωσης, η οποία θα μας έδινε την συχνότητα ( $f=1/T$ ). Το πρόβλημα προκύπτει όταν το κύμα αποτελείται από περισσότερα του ενός ημίτονα. Καθώς αρμονικά στοιχεία προστίθενται σε ένα σύνθετο κύμα, το ύψος γίνεται λιγότερο εμφανές. Η δυσκολία εύρεσης της  $f_0$  μιας κυματομορφής εξαρτάται από την ίδια την κυματομορφή. Αν η κυματομορφή έχει λίγες υψηλές αρμονικές ή η ισχύς τους είναι μικρή, η  $f_0$  είναι πιο εύκολο να ανιχνευτεί. Αν οι αρμονικές έχουν μεγαλύτερη ισχύ από την  $f_0$ , η περίοδος είναι πιο δύσκολο να ανιχνευτεί όπως φαίνεται παρακάτω (David Gerhard, 2003, σελ. 3).



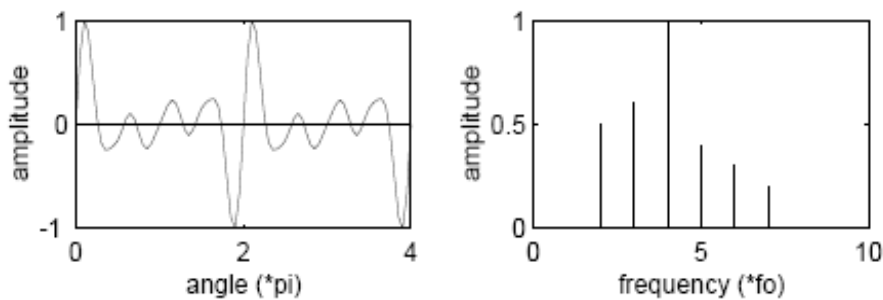
Σχήμα 1.7 Κυματομορφή χωρίς αρμονικές (David Gerhard, 2003, σελ. 3).



Σχήμα 1.8 Κυματομορφή με υψηλότερες αρμονικές μικρότερης ισχύος (David Gerhard, 2003, σελ. 3).



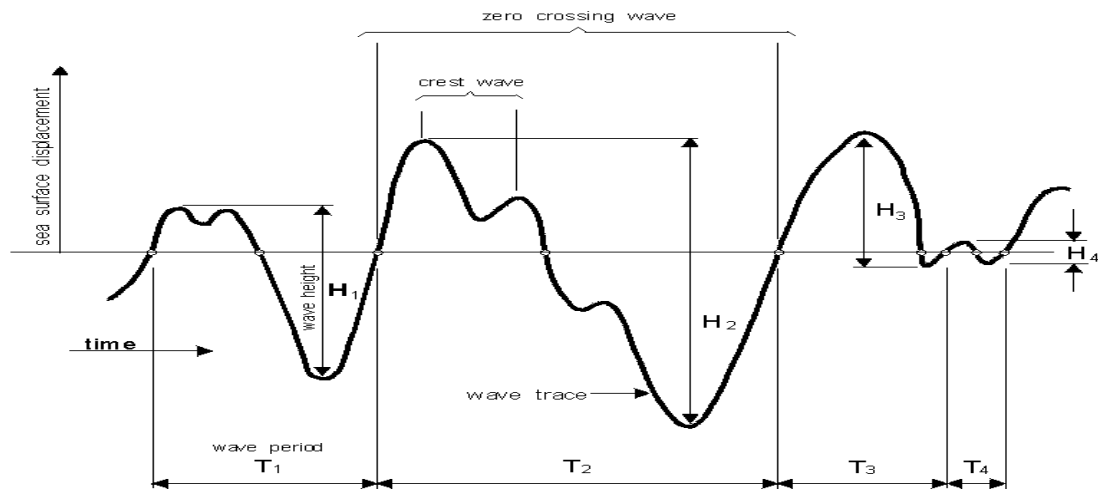
**Σχήμα 1.9** Κυματομορφή με υψηλότερες αρμονικές μεγαλύτερης ισχύος (David Gerhard, 2003, σελ. 4).



**Σχήμα 1.10** Κυματομορφή με υψηλότερες αρμονικές μικρότερης ισχύος και χωρίς θεμελιώδη συχνότητα (David Gerhard, 2003, σελ. 4).

Στο πεδίο του χρόνου έχουμε 3 τρόπους ανίχνευσης τονικού ύψους:

Ο πρώτος τύπος PD (Pitch Detector) προσπαθεί να βρει περιοδικότητες στην κυματομορφή, αναζητώντας επαναλαμβανόμενες μηδενικές διελεύσεις. Η διάβαση από το μηδέν είναι το σημείο όπου η κυματομορφή του πλάτος περνάει από θετικό σε αρνητικό ή αντίστροφα. Ο αλγόριθμος εδώ ψάχνει τα σημεία αυτά, μετράει το διάστημα μεταξύ των σημείων και συγκρίνοντας αντίστοιχα διαδοχικά διαστήματα, βρίσκει την θεμέλιο συχνότητα της κυματομορφής. Γενικά, αυτός ο αλγόριθμος είναι σχετικά απλός και η μέθοδος ανέξοδη, αλλά συγχρόνως είναι λιγότερο ακριβής από ότι πιο λεπτομερείς μέθοδοι, και αυτό διότι άλλες συχνότητες που δεν είναι στην συχνότητα του τονικού ύψους μπορούν επίσης να δημιουργήσουν κυματομορφές που διασχίζουν το μηδενικό σημείο ή να εκθέσουν κορυφές (Roads, 1996).

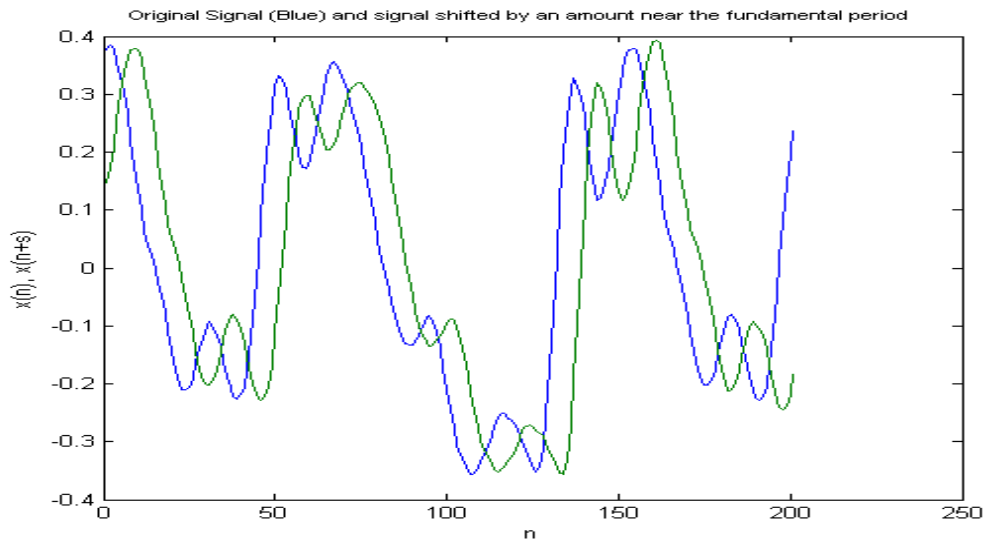


Σχήμα 1.11 Επαναλαμβανόμενες μηδενικές διελεύσεις<sup>2</sup>

Ο δεύτερος τύπος PD ονομάζεται αλγόριθμος της αυτό-συσχέτισης (auto-correlation). Ουσιαστικά, ο αλγόριθμος αυτός εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ένα περιοδικό σήμα, ακόμη και αν δεν είναι ένα καθαρό ημιτονοειδές κύμα, θα είναι παρόμοιο από τη μία περίοδο στην επόμενη. Αυτό ισχύει ακόμη και αν το πλάτος του σήματος μεταβάλλεται στο χρόνο, εφόσον δεν προκύπτει πολύ γρήγορα αυτή η αλλαγή. Για την ανίχνευση του τονικού ύψους, παίρνουμε μία εκδοχή του σήματος, με μία χρονική καθυστέρηση<sup>3</sup>. Ένα μικρό τμήμα του σήματος αποθηκεύεται σε ένα buffer του συστήματος και έπειτα ο ανιχνευτής ψάχνει να βρει ομοιότητες με το υπόλοιπο εισερχόμενο σήμα. Η ομοιότητα καταδεικνύει περιοδικότητα και έτσι βρίσκεται η θεμέλιος συχνότητα του σήματος. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί καλύτερα στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες (Roads, 1995).

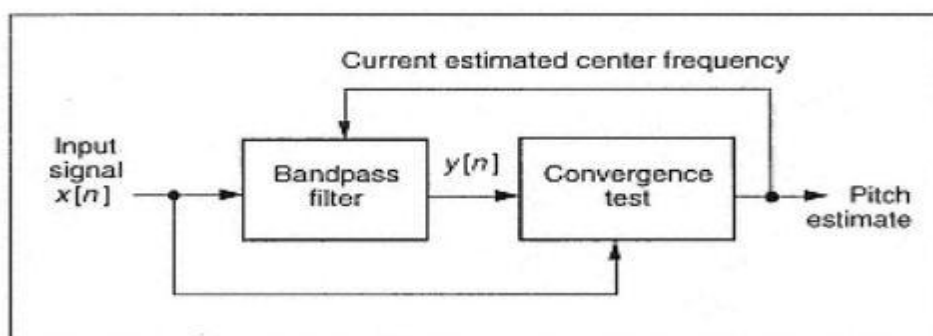
<sup>2</sup> <http://www.mhl.nsw.gov.au/www/wavestat.htmlx>

<sup>3</sup> <http://cnx.org/content/m11714/latest/>



**Σχήμα 1.12** Η μέθοδος της αυτό-συσχέτισης<sup>4</sup>

Η Τρίτη μέθοδος είναι η ανίχνευση τονικού ύψους με φίλτρο προσαρμογής (adaptive filter). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση της διαφοράς που προκύπτει ανάμεσα στην έξοδο του φίλτρου και την είσοδο του φίλτρου. Η διαφορά αυτή πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν. Η κεντρική συχνότητα του ζωνοδιαβατού φίλτρου ελέγχεται από αυτήν τη διαφορά (Rossignol, S., Desain, P., and Honing, H., 2001). Η απόφαση για το τονικό ύψος βγαίνει συγκρίνοντας το εισερχόμενο στο φίλτρο σήμα με το εξερχόμενο (Roads, 1996).

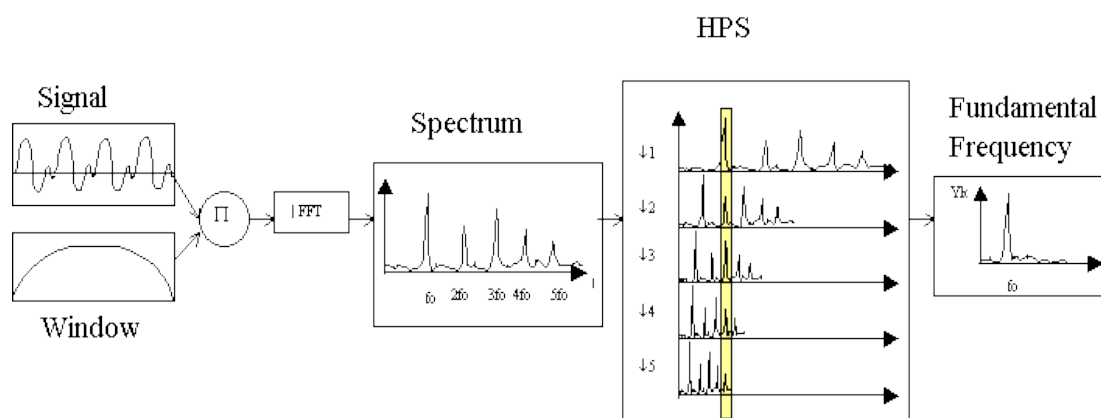


**Σχήμα 1.13** Ανίχνευση τονικού ύψους με βάση το φίλτρο προσαρμογής<sup>5</sup>

<sup>4</sup> <http://cnx.org/content/m11714/latest/>

Στο πεδίο των συχνοτήτων το εισερχόμενο σήμα διαχωρίζεται στις συχνότητες που σχηματίζουν το συνολικό φάσμα του ήχου. Αναλύοντας το φάσμα φαίνεται πόση ενέργεια υπάρχει σε συγκεκριμένες συχνότητες με στόχο να βρεθεί η θεμελιώδης συχνότητα του ήχου. Η ανάλυση γίνεται σε μικρά τμήματα του ήχου με την μέθοδο του μετασχηματισμού Φουριέ (short-time Fourier transform – STFT).

Η μέθοδος του αρμονικού φάσματος (Harmonic Product Spectrum). Η βασική συχνότητα μπορεί να προσδιοριστεί με μέτρηση των συχνοτήτων των υψηλότερων αρμονικών συνιστωσών και να υπολογίσει τον μέγιστο κοινό διαιρέτη αυτών των αρμονικών συχνοτήτων. Ο μέγιστος κοινός διαιρέτης μπορεί να προσδιοριστεί, κάνοντας μια καταχώρηση σε ένα ιστόγραμμα συχνοτήτων για κάθε αρμονική συχνότητα και σε ακέραιες υποδιαίρεσεις του αρμονικών συχνοτήτων. Η συχνότητα στην κορυφή του ιστογράμματος αντιπροσωπεύει τον μέγιστο κοινό διαιρέτη, και ως εκ τούτου την θεμελιώδη συχνότητα<sup>6</sup>.



Σχήμα 1.14 Η μέθοδος του αρμονικού φάσματος<sup>7</sup>

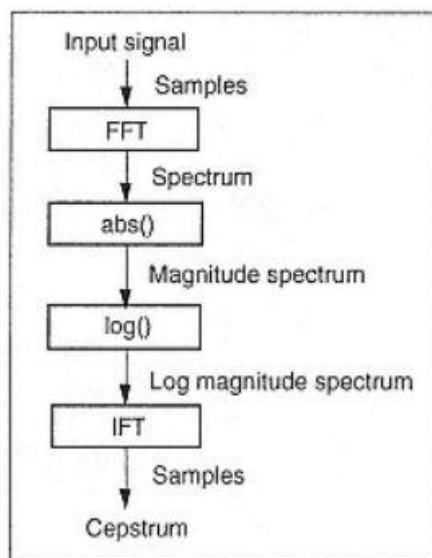
<sup>5</sup> <https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm>

<sup>6</sup> [https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#\\_ftnref10](https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#_ftnref10)

<sup>7</sup> [https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#\\_ftnref10](https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#_ftnref10)



Μία ακόμη μέθοδος στο πεδίο συχνοτήτων είναι η *cepstrum* της οποίας το όνομα προκύπτει αντιστρέφοντας τα τέσσερα πρώτα γράμματα της λέξης *spectrum* (φάσμα). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προσπαθεί να ξεχωρίσει ένα ισχυρό τονικά τμήμα του ήχου από το υπόλοιπο φάσμα. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών του *cepstrum* είναι μια χρονική αλληλουχία, όπως και το εισερχόμενο σήμα. Αν αυτό έχει μια ισχυρή θεμελιώδη τονική περίοδο, στο *cepstrum* εμφανίζεται μια κορυφή (*peak*). Μετρώντας την απόσταση από το 0 ως το σημείο της κορυφής, μπορεί να εντοπιστεί η θεμέλιος περίοδος του τονικού ύψους (Roads, 1996).

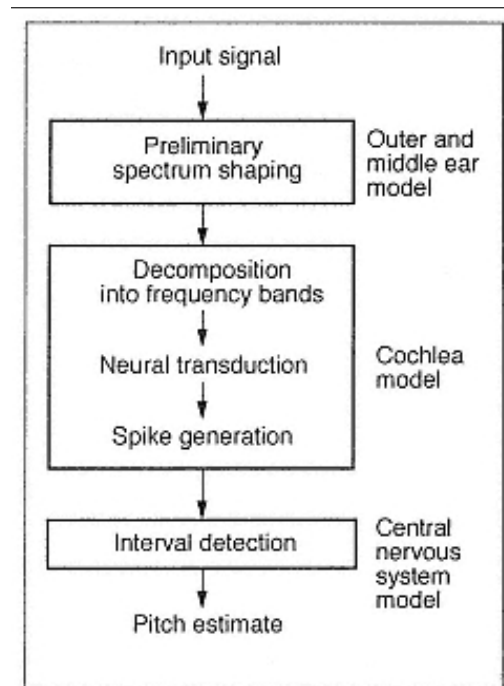


Σχήμα 1.15 Η μέθοδος *cepstrum* (Roads, 1996, σελ 516)

Τέλος υπάρχει μέθοδος που βασίζεται στο σύστημα της ανθρώπινης ακοής, η οποία επιχειρεί να μοντελοποιήσει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται το τονικό ύψος<sup>8</sup>. Χωρίζεται σε τρία υπόμοντέλα: εξωτερικό και εσωτερικό του αυτιού, κοχλίας και κεντρικό νευρικό σύστημα. Αρχικά ο ήχος φιλτράρεται κατ' αντιστοιχία με την απόκριση που έχει από το ανθρώπινο αυτί. Στη συνέχεια το εισερχόμενο σήμα μετασχηματίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω ζωνοδιαβατών φίλ-

<sup>8</sup> [https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#\\_ftnref10](https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm#_ftnref10)

τρων (βλ. επόμενο κεφάλαιο), και τέλος ακολουθεί η προσομοίωση του μοντέλου του κοχλίου του αυτιού με την δημιουργία κορυφών. Η ανίχνευση του τονικού ύψους γίνεται μετρώντας την απόσταση ανάμεσα στις κορυφές (Roads, 1996).



**Σχήμα 1.16** Ανίχνευση τονικού ύψους βασισόμενη στο σύστημα της ανθρώπινης ακοής (Roads, 1996, σελ 519)

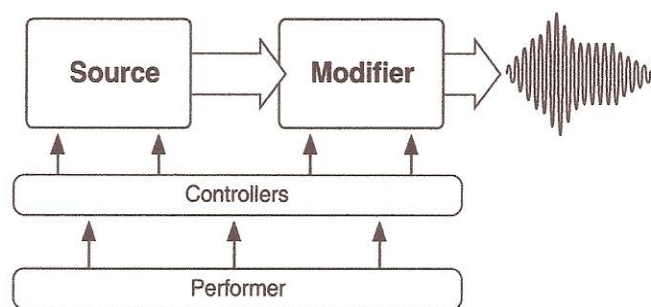
## {2}

### 2. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ (subtractive synthesis)

Αντίθετα από την προσθετική σύνθεση με την οποία ένα φάσμα δημιουργείται με την άθροιση απλών ημιτονοειδών, η αφαιρετική σύνθεση χρησιμοποιεί αρχικά ένα σύνθετο φάσμα, το οποίο μορφοποιείται κατάλληλα πριν την έξοδο τονίζοντας ή εξασθενώντας τα συστατικά μέρη του (Διαμαντόπουλος, 2004, σελ 154).

#### 2.1 Πηγή και τροποποιητής ή αντηχητής (source and modifier or resonator)

Η αφαιρετική σύνθεση βασίζεται γύρω από την ιδέα ότι τα πραγματικά μουσικά όργανα μπορούν να χωριστούν σε τρία κυρίως μέρη: την πηγή του ήχου (source), τον τροποποιητή (modifier) (ο οποίος επεξεργάζεται την παραγωγή της πηγής) και κάποιους ελεγκτές (controllers) (που λειτουργούν ως η αλληλεπίδραση μεταξύ του εκτελεστή και του μουσικού οργάνου). Αυτό είναι ξεκάθαρο σε πολλά πνευστά όργανα, όπου τα επιμέρους τμήματα μέρη μπορούν να εξεταστούν μεμονωμένα (σχήμα 2.1) (Russ, 2009).



**Σχήμα 2.1** Ο εκτελεστής χρησιμοποιεί τους ελεγκτές του οργάνου για να τροποποιήσει τις παραμέτρους της πηγής και του τροποποιητή (Russ, 2009, σελ 105)

Για παράδειγμα, ένα κλαρινέτο όπου η δονούμενη γλωττίδα συνενώνεται με ένα σωλήνα, μπορεί να χωριστεί, και τα δύο μέρη μπορούν να

μελετηθούν ξεχωριστά. Από μόνη της η γλωττίδα παράγει ένα σκληρό, στριγκό τόνο, ενώ το σώμα του οργάνου είναι απλά ένας σωλήνας που συνεισφέρει μια σειρά ακουστικών αντηχήσεων που σχετίζονται με το μήκος του, τη διάμετρο της διαμήκουσ τρύπας και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών. Με άλλα λόγια, το σώμα του οργάνου συμπεριφέρεται σαν μία σειρά φίλτρων συντονισμού (resonant filters, τύπος ζωνοδιαβατού φίλτρου, βλ. ενότητα 2.7). Συνοπτικά, ο αυλός παράγει έναν ήχο ο οποίος, στη συνέχεια, τροποποιείται από τις αντηχήσεις του σώματος του οργάνου ώστε να παράγει τον τελικό, χαρακτηριστικό ήχο του κλαρινέτου (Russ, 2009).

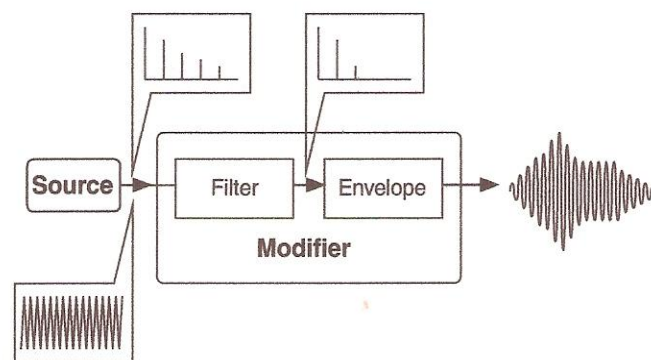
Αν και αυτό το μοντέλο είναι μια χρήσιμη μεταφορά για να βοηθήσει στην κατανόηση του πώς λειτουργούν κάποια μουσικά όργανα, δεν είναι με κανέναν τρόπο μια ολοκληρωμένη ή μια μοναδική προσέγγιση. Η ίδια ιδέα είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί σε ένα όργανο όπως η κιθάρα, όπου η πηγή του ήχου φαίνεται να είναι η νυκτική χορδή κι έτσι το σώμα της κιθάρας πρέπει να είναι ο τροποποιητής του ήχου που παράγεται από τη χορδή. Σε μια κιθάρα η πηγή και ο τροποποιητής είναι άρρηκτα δεμένα και είναι πολύ πιο δύσκολο να τα χωρίσεις σε διακριτά μέρη. Για παράδειγμα, η χορδή δεν μπορεί να παιχτεί μόνη της όπως μπορεί η γλωττίδα του κλαρινέτου, και οι αντηχήσεις του σώματος της κιθάρας δεν μπορούν να προσδιοριστούν χωρίς την παρουσία των τεντωμένων χορδών (Russ, 2009).

Η ιδέα της τροποποίησης του ήχου που παράγει μία ηχητική πηγή είναι σχετικά προφανής και εύκολα κατανοητή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μιας ευρείας ποικιλίας συνθετικών και μιμητικών ηχοχρωμάτων. Στην πραγματικότητα, η βασική ιδέα της πηγής και του τροποποιητή είναι ένα κοινό θέμα στους περισσότερους τύπους της σύνθεσης ήχων (Russ, 2009).

Η αφαιρετική σύνθεση χρησιμοποιεί ένα υποσύνολο αυτής της γενικευμένης ιδέας της πηγής και του τροποποιητή, όπου η πηγή παράγει

έναν ήχο ο οποίος περιέχει όλο το απαραίτητο συχνотικό περιεχόμενο για τον τελικό ήχο, ενώ ο τροποποιητής χρησιμοποιείται για να φιλτράρει τις ανεπιθύμητες συχνότητες και να σχηματίσει την περιβάλλουσα πλάτους του ήχου (volume envelope). Έτσι, το φίλτρο αφαιρεί τις συχνότητες που δεν χρειάζονται εξ' ου και το όνομα της μεθόδου σύνθεσης (σχήμα 2.2) (Russ, 2009).

Ο κύριος περιορισμός της αφαιρετικής σύνθεσης είναι ότι αγνοούνται οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της πηγής και του αντηχητή (δηλ. δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις ανάδρασης μεταξύ του αντηχητή και της πηγής διέγερσης) κι έτσι υπάρχουν δυσκολίες στον έλεγχο των χαρακτηριστικών των εκλεπτυσμένων ήχων των ακουστικών οργάνων. Για παράδειγμα, η συχνότητα της δονούμενης γλωττίδας του σαξόφωνου επηρεάζεται πολύ από την ακουστική ανάδραση από τον σωλήνα αντήχησης του οργάνου, αφού διεγερθεί αρχικά από ένα φύσημα αέρος από το στόμα. Ωστόσο, η αφαιρετική σύνθεση κατανοείται, εκτελείται και ελέγχεται εύκολα και μπορεί να παρέχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μερικές περιπτώσεις (Miranda, 2002).



**Σχήμα 2.2** Η πηγή παράγει μια συνεχή, ακατέργαστη κυματομορφή. Το φίλτρο αλλάζει την αρμονική δομή, ενώ η περιβάλλουσα δίνει σχήμα στον ήχο (Russ, 2009, σελ 107)

## 2.2 Πηγές

Δύο τύποι γεννητριών σήματος χρησιμοποιούνται συνήθως ως πηγές διέγερσης για την αφαιρετική σύνθεση, εξαιτίας του πλούσιου φάσματος τους: γεννήτρια θορύβου και γεννήτρια παλμού. Ενώ η γεννήτρια θορύβου παράγει έναν μεγάλο αριθμό τυχαίων συχνοτήτων σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, η γεννήτρια παλμού (pulse) παράγει μια περιοδική κυματομορφή, σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, με μεγάλης ενέργειας αρμονικές. Το φάσμα της κυματομορφής του παλμού καθορίζεται από την αναλογία του εύρους του παλμού και της περιόδου του σήματος. Όσο μικρότερη είναι η αναλογία, τόσο πιο στενός είναι ο παλμός κι έτσι πιο υψηλή η ενέργεια των υψηλής συχνότητας αρμονικών (Miranda, 2002).

Επίσης ως πηγή διέγερσης χρησιμοποιούνται οι διάφορες στοιχειώδεις κυματομορφές οι οποίες παίρνουν το όνομά τους από τα απλά κυματικά σχήματα τους (waveshapes): πριονωτά (sawtooth), τετράγωνα (square), ημιτονοειδή (sine) και τριγωνικά (triangle) είναι τα πιο συνηθισμένα. Τα σχήματα αυτά εύκολα περιγράφονται μαθηματικά κι επίσης παράγονται ηλεκτρονικά. Τυχαία σχήματα κυμάτων παράγουν θόρυβο, ο οποίος περιέχει ένα διαρκώς εναλλασσόμενο συνδυασμό όλων των συχνοτήτων (Russ, 2009).

## 2.3 Γεννήτριες Θορύβου (Noise generators)

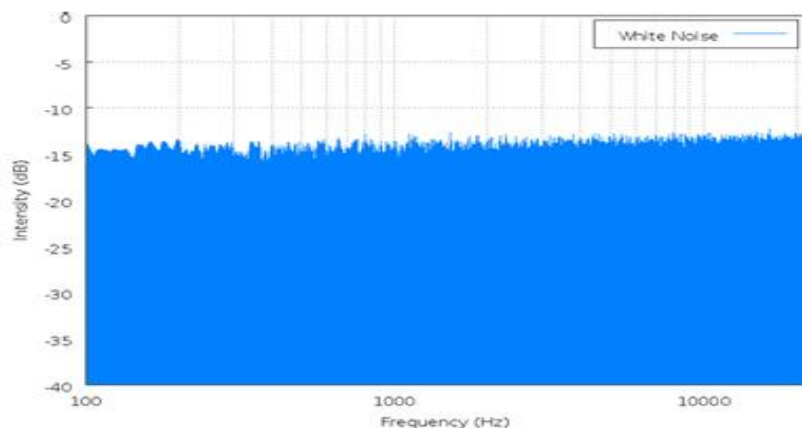
Υπάρχουν ήχοι (όπως τα τύμπανα, ο αέρας, το κύμα, κ.λπ.) που δεν έχουν αρμονικό περιεχόμενο. Αυτοί οι ήχοι σε ένα συνθεσάιζερ μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια θορύβου. Ο θόρυβος αποτελείται από όλες τις συχνότητες στο ακουστικό φάσμα οι οποίες ηχούν μαζί. Ο πιο γνωστός θόρυβος είναι ο λευκός θόρυβος. Αποκαλείται έτσι επειδή, όπως το λευκό φως, έχει μια ομαλή κατανομή σε όλες τις συχνότητες του φάσματος. Εντούτοις, υπάρχουν επίσης άλλοι τύποι θορύβων όπως ο ροζ, καφέ, μοβ, μπλε, γκρι, θόρυβος κλπ. (Κόκορας, 2007).

Παρακάτω θα μιλήσουμε για τον λευκό και τον ροζ γιατί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

**Λευκός Θόρυβος (White noise)** – όλες οι συχνότητες, σταθερή ενέργεια ανά συχνότητα (+3 dB/ Octave).

Ο Λευκός Θόρυβος (White Noise) περιέχει όλες τις συχνότητες και έχει επίπεδο και ευρύ φάσμα. Η ενέργεια του είναι κατανομημένη ομοιόμορφα σε όλο το ακουστικό φάσμα και πέρα από αυτό, δηλαδή έχει σταθερή ενέργεια ανά Hz. «Στη λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων ο λευκός θόρυβος εμφανίζεται να έχει συνεχή αύξηση της ενέργειας του, καθώς η συχνότητα αυξάνεται, με ρυθμό 3dB ανά οκτάβα.» (Χαδέλλης, 1992).

Αυτό συμβαίνει διότι σε κάθε επόμενη οκτάβα συχνοτήτων, διπλασιάζεται το απόλυτο εύρος της οκτάβας (το εύρος της οκτάβας από 500 έως 1000 Hz είναι 500 Hz, ενώ το εύρος της επόμενης οκτάβας από 1000 Hz έως 2000Hz είναι 1000 Hz κ.ό.κ.), οπότε διπλασιάζεται και το «ποσό ενέργειας θορύβου» που περιέχεται μέσα στην οκτάβα. Ο διπλασιασμός της ενέργειας (ή ισχύος) ισοδυναμεί με αύξηση της κατά 3 dB» (Χαδέλλης, 1992).



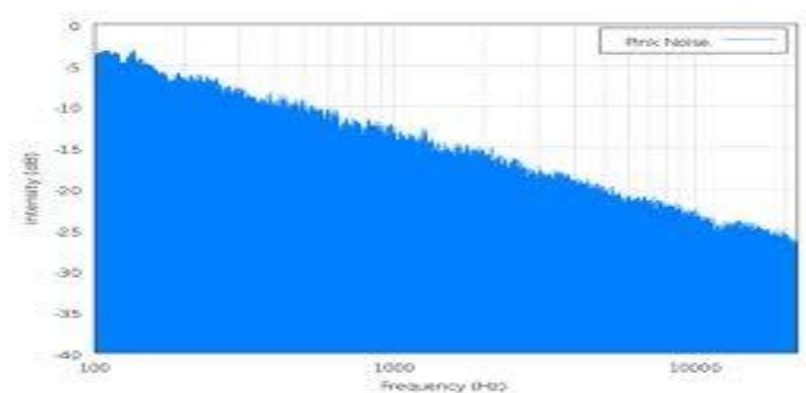
Σχήμα 2.3 Φάσμα λευκού θορύβου<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> [http://psychology.wikia.com/wiki/White\\_noise](http://psychology.wikia.com/wiki/White_noise)

**Ροζ θόρυβος (Pink noise)** – ίση και σταθερή ενέργεια σε κάθε οκτάβα (-3 dB/ Octave)

Ο ροζ θόρυβος (pink noise) έχει «επικλινές» φάσμα (με κλίση προς τα δεξιά) στη γραμμική κλίμακα συχνοτήτων, δηλαδή όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μειώνεται η ενέργεια των συνιστωσών συχνοτήτων του. «Αυτό συμβαίνει διότι ο ροζ θόρυβος διατηρεί ίση και σταθερή ενέργεια σε κάθε οκτάβα γι' αυτό στη λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων εμφανίζεται να έχει σταθερή ενέργεια (Χαδέλλης, 1992).

Ο ροζ θόρυβος δεν υφίσταται φυσικά, αλλά παράγεται από το λευκό θόρυβο με φιλτράρισμα, μέσω του pinking φίλτρου, το οποίο είναι ένα κατωδιαβατό (βλ. πιο κάτω ενότητα) φίλτρο με συχνότητα αποκοπής κάτω από τα 16 Hz και ρυθμό εξασθένησης 3 dB ανά οκτάβα. Αυτό το φίλτρο στην ουσία αναιρεί την κατά 3 dB αύξηση ενέργειας του λευκού θορύβου ανά οκτάβα, ώστε να διατηρεί σταθερή ενέργεια ανά οκτάβα» (Χαδέλλης, 1992).



Σχήμα 2.4 Φάσμα ροζ θορύβου<sup>10</sup>.

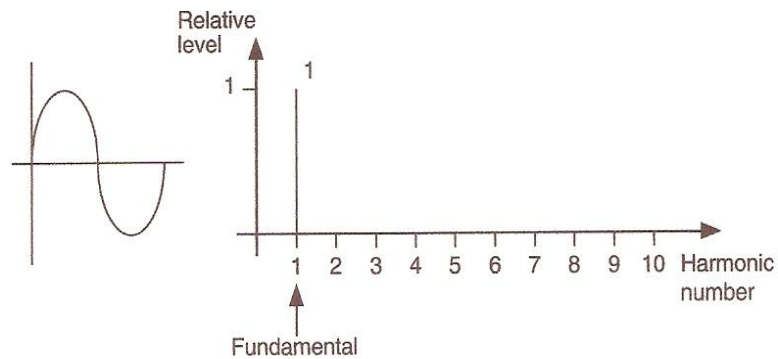
## 2.4 Αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών

Αναμφισβήτητα, το πιο απλό σχήμα κύματος είναι το ημιτονοειδές κύμα (sine waveshape). Είναι μια ομαλή, κυκλική κυματομορφή που βασίζεται στη λειτουργία του μαθηματικού ημίτονου. Ένα ημιτονοειδές κύμα περιέχει μόνο μία 'αρμονική', την πρώτη ή θεμελιώδη (Russ, 2009). Αυτό

<sup>10</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pink\\_noise\\_spectrum.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pink_noise_spectrum.png)

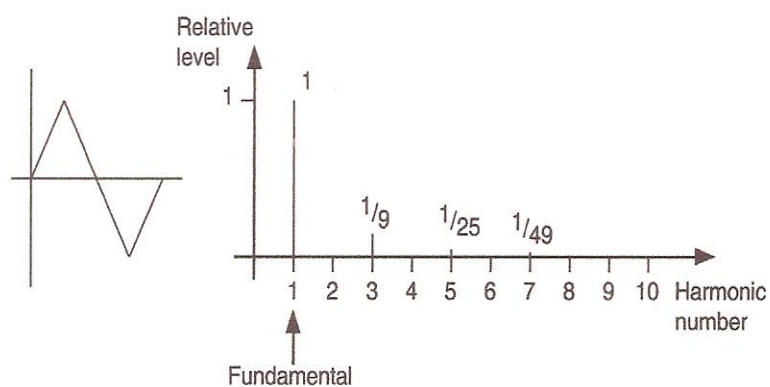


το κάνει κάπως ακατάλληλο για αφαιρετική σύνθεση από τη στιγμή που δεν έχει αρμονικές προς φιλτράρισμα.



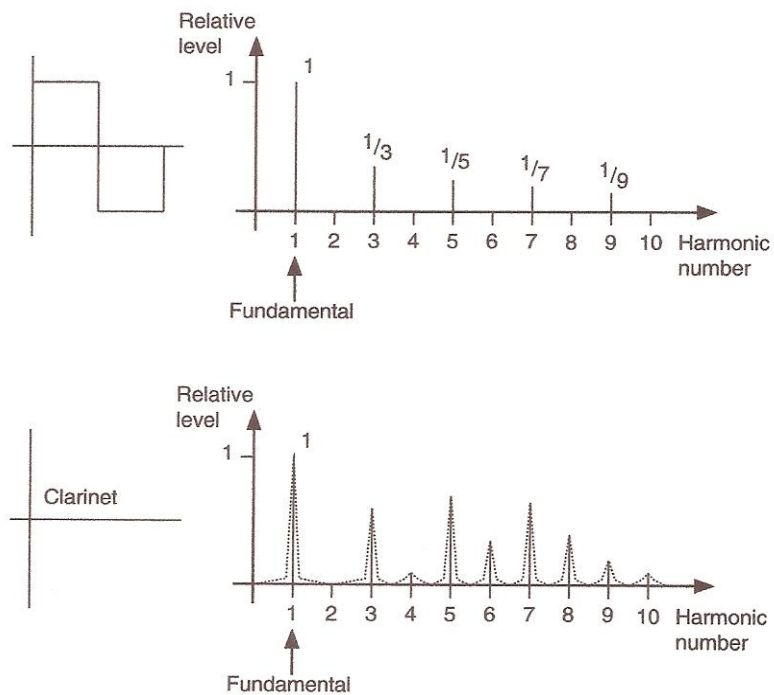
**Σχήμα 2.5 Sine wave** (Ημιτονοειδής κυματομορφή): αντιστοιχεί στην κυματομορφή ενός απλού τόνου χωρίς αρμονικές (Russ, 2009, σελ 109).

Ένα τριγωνικό κύμα (triangle waveshape) αποτελείται από δύο γραμμικές καμπύλες. Έχει μικρές ποσότητες αρμονικών περιττών αριθμών, οι οποίες δίνουν αδύναμο αλλά επαρκές αρμονικό περιεχόμενο ώστε ένα φίλτρο να δουλέψει επάνω του (Russ, 2009).



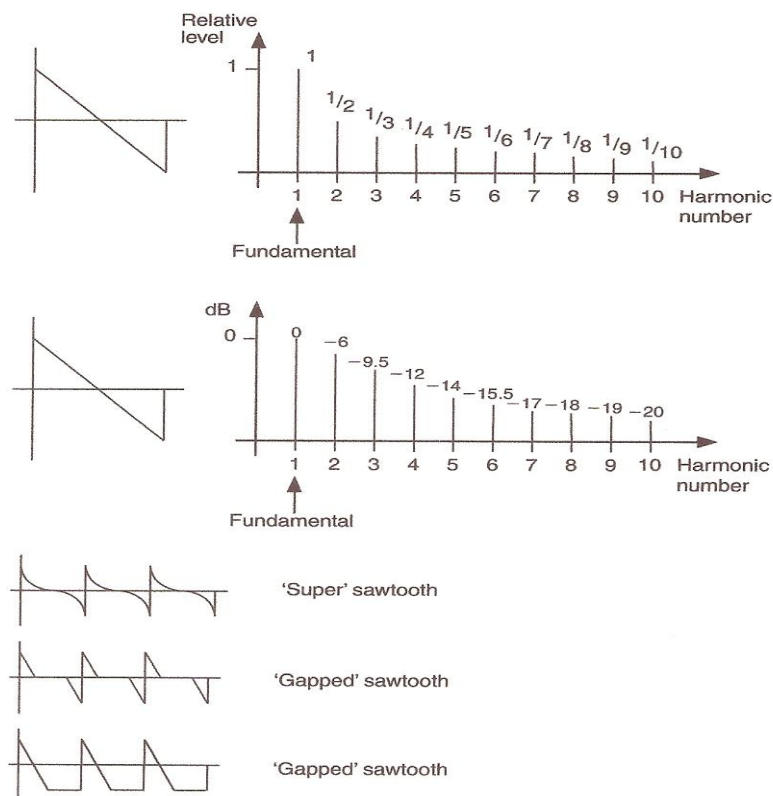
**Σχήμα 2.6 Triangle wave** (Τριγωνική κυματομορφή): λαμπρή και ευχάριστη χροιά που θυμίζει φλάουτο (Russ, 2009, σελ 110).

Ένα τετράγωνο κύμα (square wave) περιέχει μόνο περιττές αρμονικές οι οποίες έχουν περισσότερη ενέργεια απ' ότι στην περίπτωση της τριγωνικής κυματομορφής, έχει ένα χαρακτηριστικό 'κούφιο' (hollow) ήχο .



**Σχήμα 2.7 Square wave** (Τετραγωνική κυματομορφή): ένρινη χροιά με τραχύτητα όμοια με αυτή του κλαρινέτου (Russ, 2009, σελ 110).

Ένα πριονωτό κύμα (sawtooth wave) περιέχει και περιττούς και άρτιους αρμονικούς και έχει λαμπρό (bright) ηχόχρωμα. Τα 'υπερπριονωτά' σχήματα κυμάτων (super-sawtooth waveshapes) αντικαθιστούν τη γραμμική καμπύλη με εκθετικές καμπύλες και με πριονωτά κενά: αυτά μπορεί να περιέχουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας στις ψηλές συχνότητες (Russ, 2009).

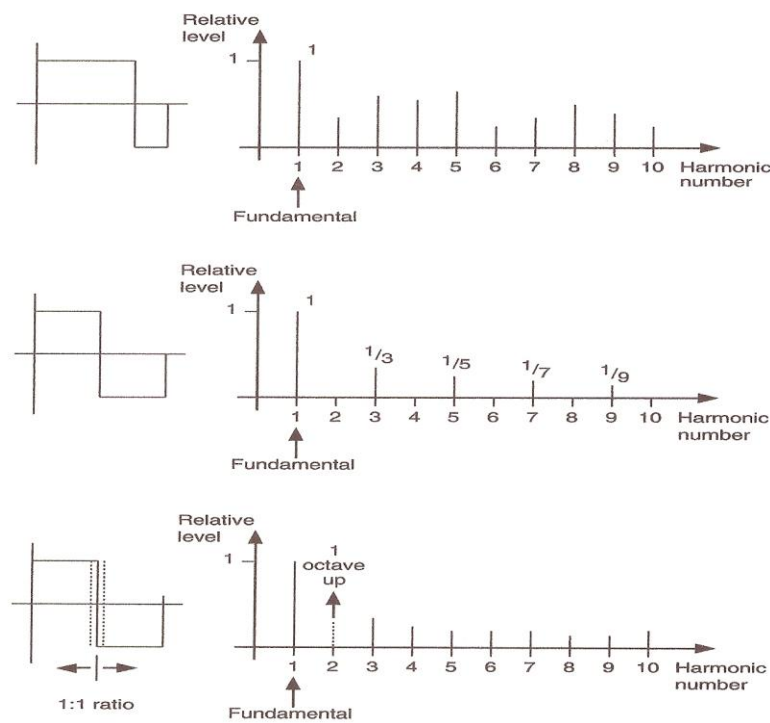


**Σχήμα 2.8 Sawtooth wave** (Πριονωτή κυματομορφή): λαμπρή, γεμάτη χροιά όμοια με αυτή των χάλκινων πνευστών (Russ, 2009, σελ 111)

Εξαρτώμενα από την αναλογία ανάμεσα στα δύο μέρη (γνωστή ως mark-space ratio), σχήματος (shape), κύκλου περιόδου (duty cycle) ή συμμετρίας (symmetry), οι κυματομορφές παλμού (pulse) μπορούν να περιέχουν και άρτιους και περιττούς αρμονικούς, αν και όλοι οι αρμονικοί δεν είναι πάντοτε παρόντες. Το γενικό αρμονικό περιεχόμενο των παλλόμενων κυμάτων αυξάνεται καθώς το εύρος του παλμού στενεύει, αν και εάν ένας παλμός στενέψει υπερβολικά, μπορεί να εξαφανιστεί εντελώς. Μια ιδιαίτερη περίπτωση ενός κύματος παλμού είναι το τετράγωνο κύμα ίσης αναλογίας 50:50 (50:50 equal ratio square wave), όπου οι άρτιοι αρμονικοί δεν είναι παρόντες. Οι διαφοροποιημένου εύρους κυματομορφές παλμού είναι γνωστές ως PWM (Pulse-Width Modulation) waveforms και το αρμονικό τους περιεχόμενο αλλάζει καθώς το εύρος του παλμού ποικίλει. Οι

κυματομορφές PWM συνήθως ελέγχονται με έναν ταλαντωτή χαμηλών συχνοτήτων (LFO) (βλ. ενότητα 3.6) ή μία περιβάλλουσα (envelope), ώστε το εύρος του παλμού να αλλάζει με τον χρόνο. Το ακουστικό αποτέλεσμα, όταν μια κυματομορφή PWM αλλάζει κυκλικά από ένα LFO, είναι παρόμοιο με το να παίζουν μαζί δύο oscillators (Russ, 2009).

Είναι πιθανό να προσαρμοστεί το εύρος του παλμού ώστε να δίνονται ακουστικά μία τετραγωνική κυματομορφή: ακούγοντας τη θεμέλιο, το εύρος παλμού προσαρμόζεται μέχρι η νότα μία οκτάβα πάνω να εξαφανιστεί. Αυτή η νότα είναι η δεύτερη αρμονική η οποία δεν είναι παρούσα στην τετραγωνική κυματομορφή (σχήμα 2.8) (Russ, 2009).



**Σχήμα 2.9 Pulse wave** (Κυματομορφή στενού παλμού): λαμπρός και σφυριχτός ήχος. Κυματομορφή παλμού και φάσμα. Τα σχετικά επίπεδα ενέργειας των αρμονικών εξαρτώνται από το εύρος του παλμού (Russ, 2009, σελ 112).

Όλα τα σχήματα κυμάτων και τα αρμονικά περιεχόμενα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως είναι ιδεατά. Στην πραγματικότητα οι άκρες δεν είναι τόσο αιχμηρές, τα σχήματα δεν είναι τόσο γραμμικά και τα

φάσματα δεν είναι τόσο μαθηματικώς ακριβή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας φιλτραρίσματος που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του φάσματος και δεν σημαίνει ότι υπάρχουν επιπλέον συχνότητες (Russ, 2009).

## 2.5 Τροποποιητές (modifiers)

Υπάρχουν δύο κύριοι τροποποιητές για τα σήματα ήχου στα συνθεσάιζερ: τα φίλτρα και οι ενισχυτές (filters and amplifiers) (βλ. επόμενο κεφάλαιο). Το φιλτράρισμα χρησιμοποιείται για να αλλάξει το αρμονικό περιεχόμενο ή ηχόχρωμα του ήχου, ενώ η ενίσχυση χρησιμοποιείται για να αλλάξει την ένταση ή το 'σχήμα' του ήχου (Russ, 2009).

Εφέ όπως η αντήχηση<sup>11</sup> (reverb) και το chorus<sup>12</sup> δεν συμπεριλαμβάνονται, συνήθως, στους 'τροποποιητές' στα βασικά αναλογικά συνθεσάιζερ, αν και υπάρχουν κάποιες αξιοσημείωτες εξαιρέσεις: για παράδειγμα, το EMS (ηλεκτρονικά μουσικά στούντιο) VCS -3 (σχήμα 3.7) έχει μια ενσωματωμένη μονάδα αντήχησης (spring-line reverb unit) (Russ, 2009).

## 2.6 Φίλτρα (filters)

Το φίλτρο είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα σχεδιασμένο να επιτρέπει τη διέλευση επιλεγμένου εύρους συχνοτήτων. Οι τέσσερις κύριοι τύποι φίλτρων είναι: low-pass, high-pass, band-pass, και notch.

### Low-pass (Κατωδιαβατό)

Ένα low-pass φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση χαμηλών συχνοτήτων, έχει ισχυρότερη απόσβεση (attenuation) καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Το

<sup>11</sup> Η λέξη **reverbation**, ή reverb για συντομία, αναφέρεται στον τρόπο που τα ηχητικά κύματα ανακλώνται σε διάφορες επιφάνειες πριν να φτάσουν στο αυτί μας. Είναι η επιμονή του ήχου μετά από την αρχική παραγωγή του, σε ένα συγκεκριμένο χώρο. Ο ήχος σταδιακά αποσυντίθεται καθώς απορροφάται από τους τοίχους και τον αέρα (<http://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation>).

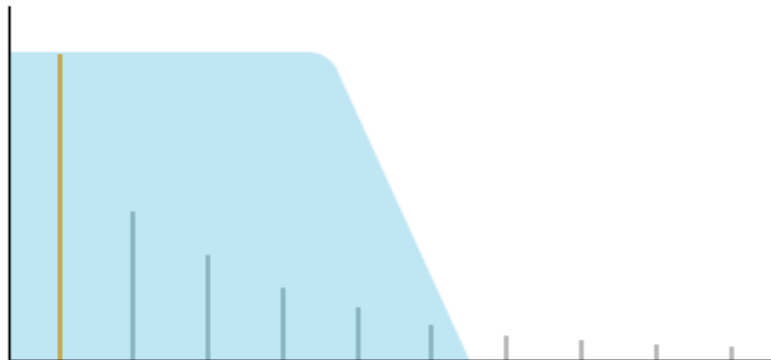
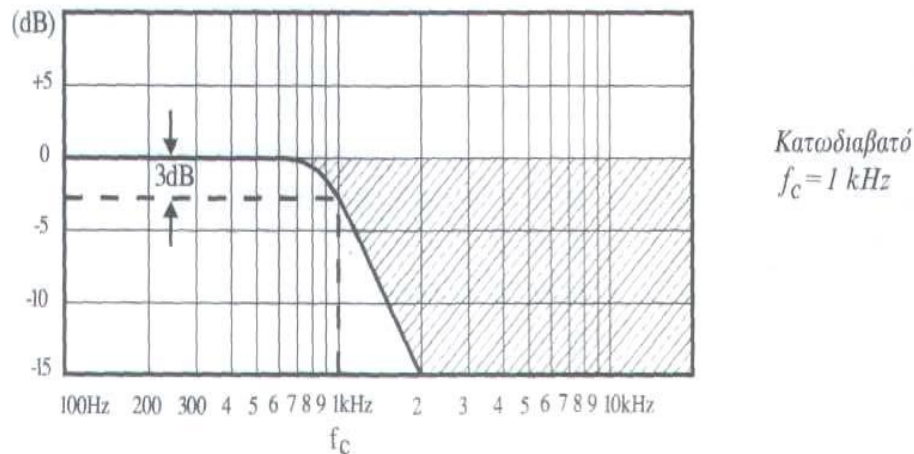
<sup>12</sup> Το κύριο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου εφέ είναι ότι ο ήχος μας γίνεται πιο πλούσιος, και συχνά δημιουργείται η εντύπωση ότι προέρχεται από πολλαπλά όργανα, ή από πολλές φωνές οι οποίες τραγουδούν όλες μαζί ταυτόχρονα. Χρησιμοποιώντας το εφέ Chorus μας δίνεται η δυνατότητα να μετατρέψουμε έναν απλό-στεγνό ήχο σε έναν πιο πλούσιο και πλήρη.

σημείο στο οποίο η απόσβεση είναι 3dB ονομάζεται συχνότητα αποκοπής (cut-off frequency) γιατί αυτή είναι η συχνότητα στην οποία η εξασθένηση γίνεται πρώτα εμφανής. Είναι, επίσης, το σημείο στο οποίο η μισή από την ισχύ του σήματος ήχου έχει χαθεί κι έτσι μερικές φορές ονομάζεται σημείο της μισής ισχύος (half- power point) (Russ, 2009).

Ένα σάρωμα της οριακής συχνότητας από ψηλές σε χαμηλές συχνότητες κάνει ένα σήμα ήχου 'σκοτεινότερο' (darker) με τονισμένες τις χαμηλότερες συχνότητες και λιγότερες υψηλές συχνότητες παρούσες. Ένα σάρωμα του φίλτρου από υψηλή συχνότητα σε χαμηλή συχνότητα της συχνότητας αποκοπής αναφέρεται συχνά ως αλλαγή από 'ανοιχτό' (open) σε 'κλειστό' (closed). Όταν η συχνότητα αποκοπής ρυθμίζεται στο μέγιστο, και το φίλτρο είναι 'ανοιχτό', τότε όλες οι συχνότητες μπορούν να περάσουν μέσα από το φίλτρο (Russ, 2009)

Καθώς η συχνότητα αποκοπής ενός κατωδιαβατού φίλτρου αυξάνεται από το μηδέν, η πρώτη συχνότητα που θα ακουστεί είναι συνήθως η θεμέλιος. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, κάθε μία από τις διαδοχικές αρμονικές (αν υπάρχουν) του ήχου θα ακουστεί. Το ηχητικό αποτέλεσμα από αυτή τη διαδικασία είναι ένα αρχικό ημιτονοειδές κύμα (το θεμελιώδες) που ακολουθείται από μια βαθμιαία αύξηση στην 'λαμπρότητα' (brightness) του ήχου καθώς πρόσθετες συχνότητες επιτρέπονται να διέλθουν μέσω του φίλτρου. Αν η συχνότητα αποκοπής ενός κατωδιαβατού φίλτρου ρυθμιστεί ώστε να επιτρέπει να περνάει μέσω του φίλτρου μόνο η θεμέλιος, τότε το ημιτονοειδές κύμα που προκύπτει θα είναι πανομοιότυπο ανεξάρτητα με ποια κυματομορφή ήχου εισέρχεται. Μόνο όταν η συχνότητα αποκοπής αυξάνεται και πρόσθετες αρμονικές ακούγονται, οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών κυματομορφών θα γίνουν εμφανείς. Για παράδειγμα, ένα πριονωτό (sawtooth) θα έχει μια δεύτερη αρμονική ενώ ένα τετραγωνικό κύμα (square wave) δεν θα έχει (Russ, 2009).

Οι συχνότητες που βρίσκονται στα όρια των περιοχών διέλευσης και αποκοπής ονομάζονται συχνότητες αποκοπής και συμβολίζονται συνήθως με  $f_c$ . Στη συχνότητα  $f_c$  θεωρείται ότι το φίλτρο, έχει εισέλθει στην αποκοπή και εξασθενεί κατά 3 dB (Χαδέλλης, 1992).

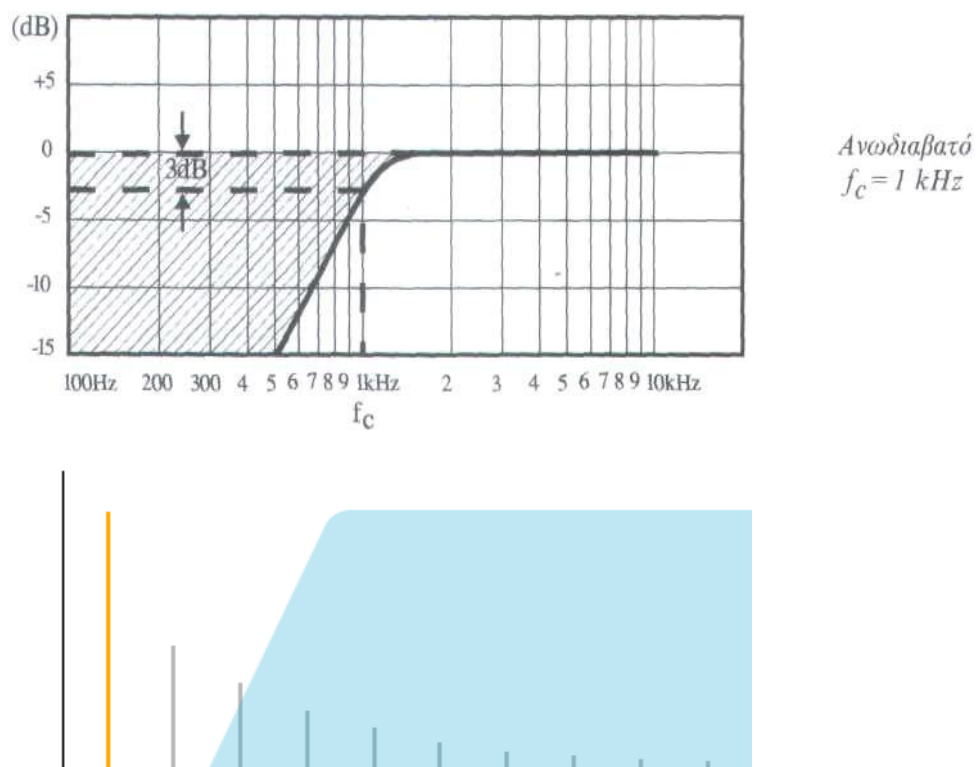


**Σχήμα 2.10** Κατωδιαβατά φίλτρα ή χαμηλής διέλευσης (Low-Pass Filters ή LPF), τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων (Χαδέλλης, 1992, σελ 121) (Κόκορας, 2007, σελ 14).

### High-pass (Ανωδιαβατό)

Ένα ανωδιαβατό φίλτρο έχει την αντίθετη δράση φιλτραρίσματος από ένα κατωδιαβατό φίλτρο: κάνει απόσβεση σε όλες τις συχνότητες που είναι κάτω από την συχνότητα αποκοπής. Τα ανωδιαβατά φίλτρα αφαιρούν τις αρμονικές από μια κυματομορφή ήχου, αλλά καθώς η συχνότητα

αυξάνεται από το μηδέν, η θεμέλιος είναι εκείνη που αφαιρείται πρώτη. Καθώς αφαιρούνται οι πρόσθετες αρμονικές, το ηχόχρωμα γίνεται πιο 'λεπτό' (thinner) και πιο καθαρό (brighter), με λιγότερες χαμηλές συχνότητες και περισσότερες ψηλές, το αντιλαμβανόμενο τονικό ύψος του ήχου μπορεί να αλλάξει επειδή λείπει η θεμέλιος. Μερικά αφαιρετικά συνθεσάιζερ έχουν ένα φίλτρο ανωδιαβατό συνδεδεμένο είτε πριν είτε μετά από ένα low-pass στην είσοδο σήματος. Αυτό επιτρέπει περιορισμένο, επιπρόσθετο έλεγχο στις χαμηλές συχνότητες που περνάνε από το φίλτρο low-pass. Χρησιμοποιείται, συνήθως, για να αφαιρέσει ή να αλλάξει το επίπεδο της θεμελίου, το οποίο είναι χρήσιμο για την μίμηση του ηχοχρώματος των μουσικών οργάνων όπου η θεμέλιος δεν έχει την μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τις άλλες συνιστώσες συχνότητες. (Russ, 2009).



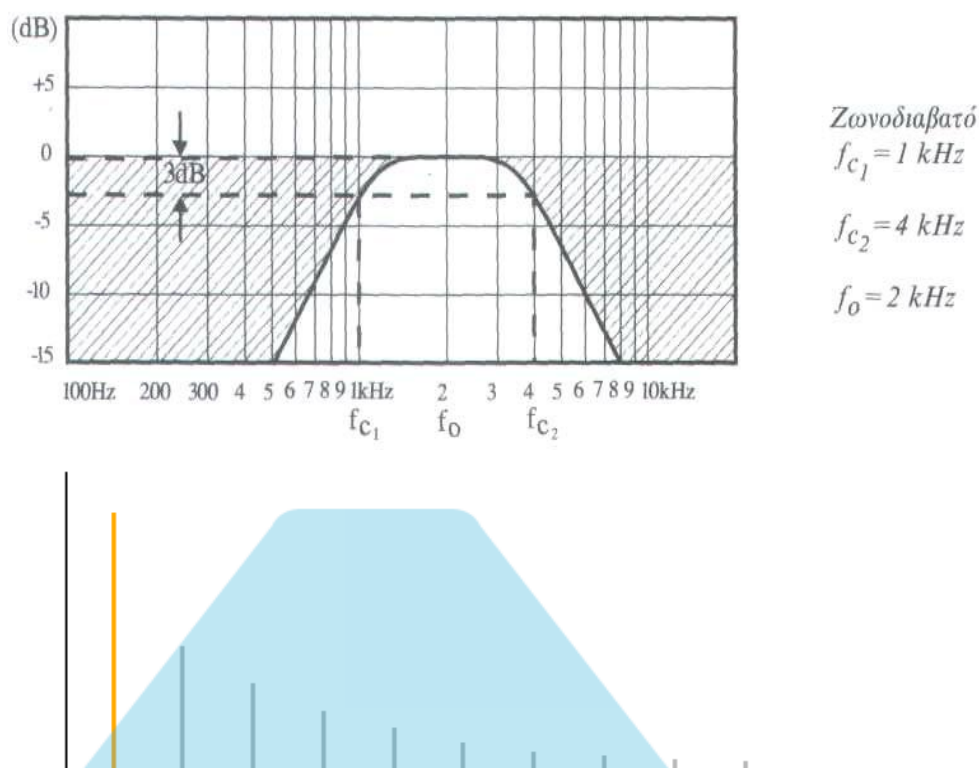
**Σχήμα 2.11** Ανωδιαβατά φίλτρα ή υψηλής διέλευσης (High- Pass Filters ή HPF), τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση μόνο των υψηλών συχνοτήτων (Χαδέλλης, 1992, σελ 121) (Κόκορας, 2007, σελ 14).



### Band-pass (ζωνοδιαβατό φίλτρο)

Ένα φίλτρο band-pass επιτρέπει μία ζώνη συχνοτήτων να περνούν από αυτό απαράλλαχτες, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες συχνότητες γίνεται απόσβεση. Η ζώνη συχνοτήτων που περνάνε αναλλοίωτες ονομάζεται εύρος ζώνης (bandwidth) (Russ, 2009).

Τα φίλτρα band-pass συνήθως περιγράφονται σε σχέση με το σχήμα που σχετίζεται με το εύρος ζώνης απόκρισής τους. Τα στενά band-pass filters αναφέρονται ως 'στενά' (narrow) ή 'αιχμηρά' (sharp) και παράγουν αξιοσημείωτες αλλαγές στο περιεχόμενο της συχνότητας ενός σήματος ήχου. Πιο φαρδιά band-pass έχουν λιγότερο αποτέλεσμα στο ηχόχρωμα αφού απλά δίνουν έμφαση σε μια ζώνη συχνοτήτων. Η μεσαία συχνότητα του band-pass ονομάζεται κεντρική συχνότητα (center frequency) (Russ, 2009).

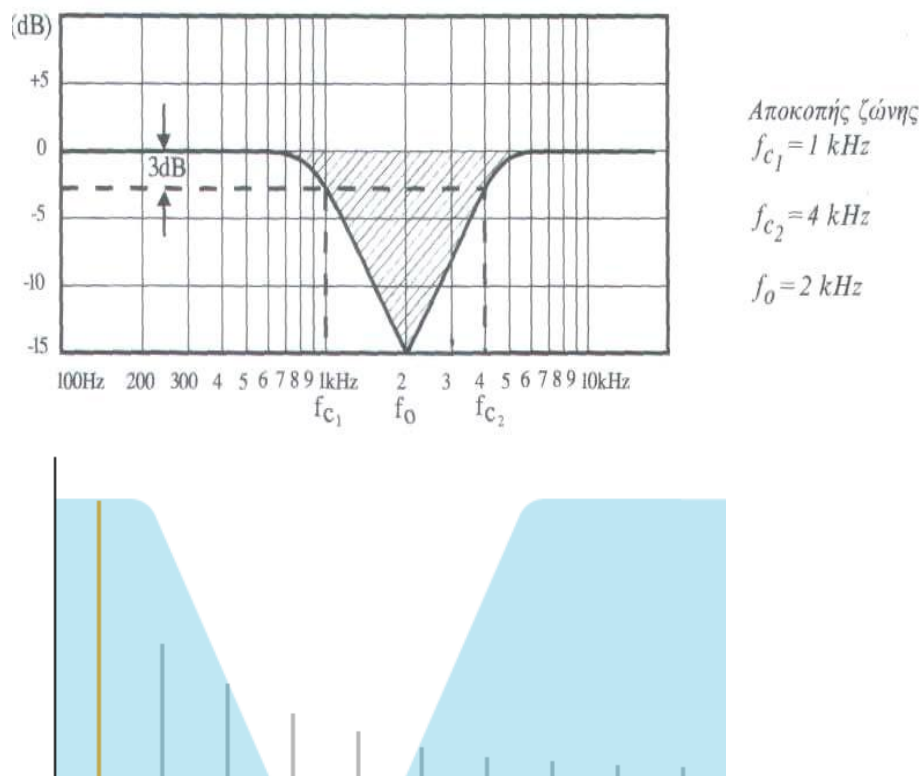


**Σχήμα 2.12** Ζωνοδιαβατά φίλτρα ή συντονισμένα φίλτρα (Band- Pass Filters ή resonant filters), τα οποία επιτρέπουν μόνο μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων (Χαδέλλης, 1992, σελ 121) (Κόκορας, 2007, σελ 14).

### Notch / Band reject (φίλτρα αποκοπής ζώνης)

Τα φίλτρα αποκοπής ζώνης (Band Reject Filters) αποκόπτουν μία ζώνη συχνοτήτων ενώ επιτρέπουν τη διέλευση όλων των υπολοίπων συχνοτήτων (Χαδέλλης, 2010). Τα φίλτρα notch χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν ή απομειώσουν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων και τα 'στενά' (narrow) notches μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αφαιρέσουν συγκεκριμένες αρμονικές από έναν ήχο. Τα Notch συνήθως παρέχουν έλεγχο στην συχνότητα αποκοπής και στο bandwidth (ή stop-band) του φίλτρου (Russ, 2009).

Ο συνδυασμός ανωδιαβατών και κατωδιαβατών φίλτρων είναι αυτός που δημιουργεί τα ζωνοδιαβατά και τα φίλτρα αποκοπής ζώνης.

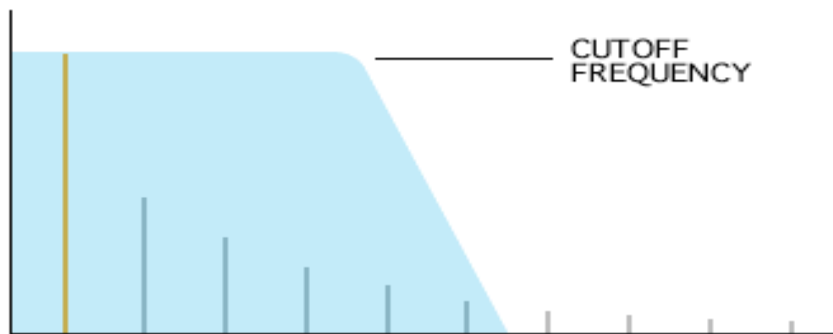


**Σχήμα 2.13** Φίλτρα αποκοπής ζώνης (Band- Reject Filters), Ονομάζονται επίσης και Notch Filters (Notch = βύθισμα) (Χαδέλλης, 1992, σελ 121) (Κόκορας, 2007, σελ 14).

Υπάρχουν τρεις ρυθμίσεις που ισχύουν για όλους τους τύπους φίλτρων: συχνότητα αποκοπής, συντονισμός και ενίσχυση.

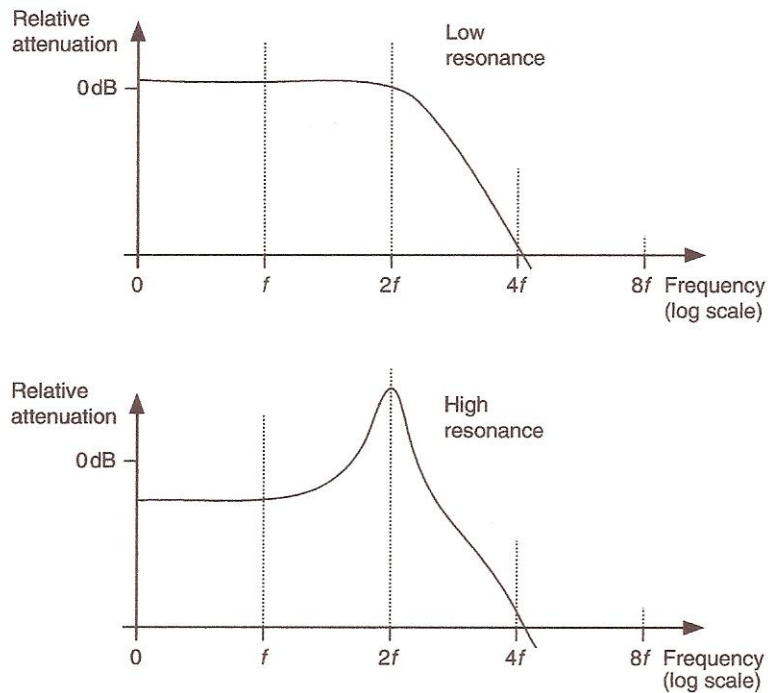
**Cut off frequency** (συχνότητα αποκοπής): Είναι η συχνότητα πάνω ή κάτω από την οποία αρχίζει να επιδρά ένα φίλτρο.

Κάτω από αυτήν την συχνότητα (στην περίπτωση ενός κατωδιαβατού φίλτρου) το σήμα δεν θα επηρεαστεί. Επάνω από τη συχνότητα αποκοπής, το σήμα θα αποκοπεί. Επομένως, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο περισσότερες συχνότητες από το σύνολο του σήματος θα αφαιρεθούν (εάν τεθεί η συχνότητα αποκοπής κάτω από την θεμελιώδη συχνότητα του ήχου, το σήμα θα αφαιρεθεί σχεδόν εξ ολοκλήρου) (Κόκορας, 2007).



Σχήμα 2.14 Cut off Frequency (Κόκορας, 2007, σελ 14).

**Quality Factor** γνωστό και ως **Resonance** ή **Peak** ή **Q**: συντελεστής ποιότητας δηλαδή το πόσο «στενό ή φαρδύ» είναι ένα φίλτρο και συνεπώς το πόσες συχνότητες αφήνει να περάσουν δίνεται από την παράμετρο Q. Ο συντελεστής ποιότητας τονίζει τις συχνότητες ακριβώς γύρω από την συχνότητα αποκοπής (Κόκορας, 2007). Ο συντελεστής ποιότητας του φίλτρου ορίζεται ως:  $Q = \text{κεντρική συχνότητα} / \text{εύρος ζώνης}$ .



**Σχήμα 2.15** Ο συντονισμός αλλάζει το σχήμα της απόκρισης ενός low-pass φίλτρου πιο αισθητά στη συχνότητα αποκοπής. Το αποτέλεσμα είναι μια ομαλή και συνεχής μετάβαση από ένα low-pass σε κάτι όπως ένα στενό φίλτρο band-pass (Russ, 2009 σελ 120).

Και τέλος το **Gain** (κέρδος ή ενίσχυση) ορίζει το βαθμό/ποσοστό ενίσχυσης ή εξασθένισης μίας περιοχής /ζώνης συχνοτήτων.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να είναι προκαθορισμένα ή να ορίζονται από το χρήστη, ανάλογα με την κατασκευή του φίλτρου.

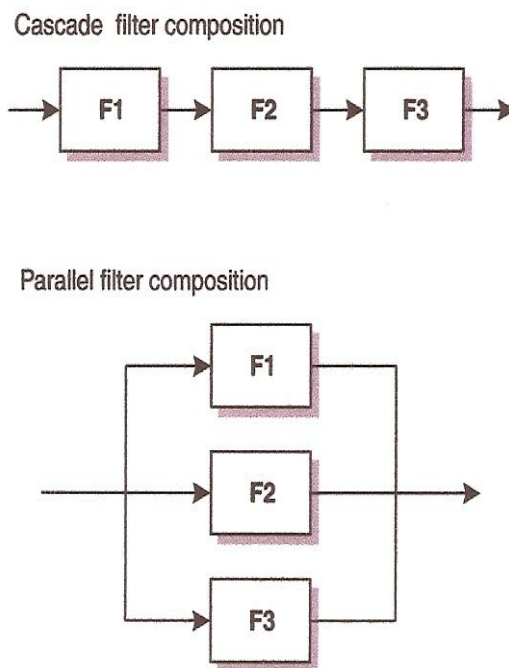
## 2.7 Σύνδεση Φίλτρων

Το συστατικό συντονισμού ενός αφαιρετικού συνθεσίζερ συνήθως απαιτεί μια σύνθεση από διασυνδεδεμένα φίλτρα για να παράγει το επιθυμητό φάσμα. Υπάρχουν δύο βασικοί συνδυασμοί για την σύνδεση φίλτρων: παράλληλη και σειριακή σύνδεση (επίσης γνωστή και ως σύνδεση cascade) (Σχήμα 2.16) (Miranda, 2002).

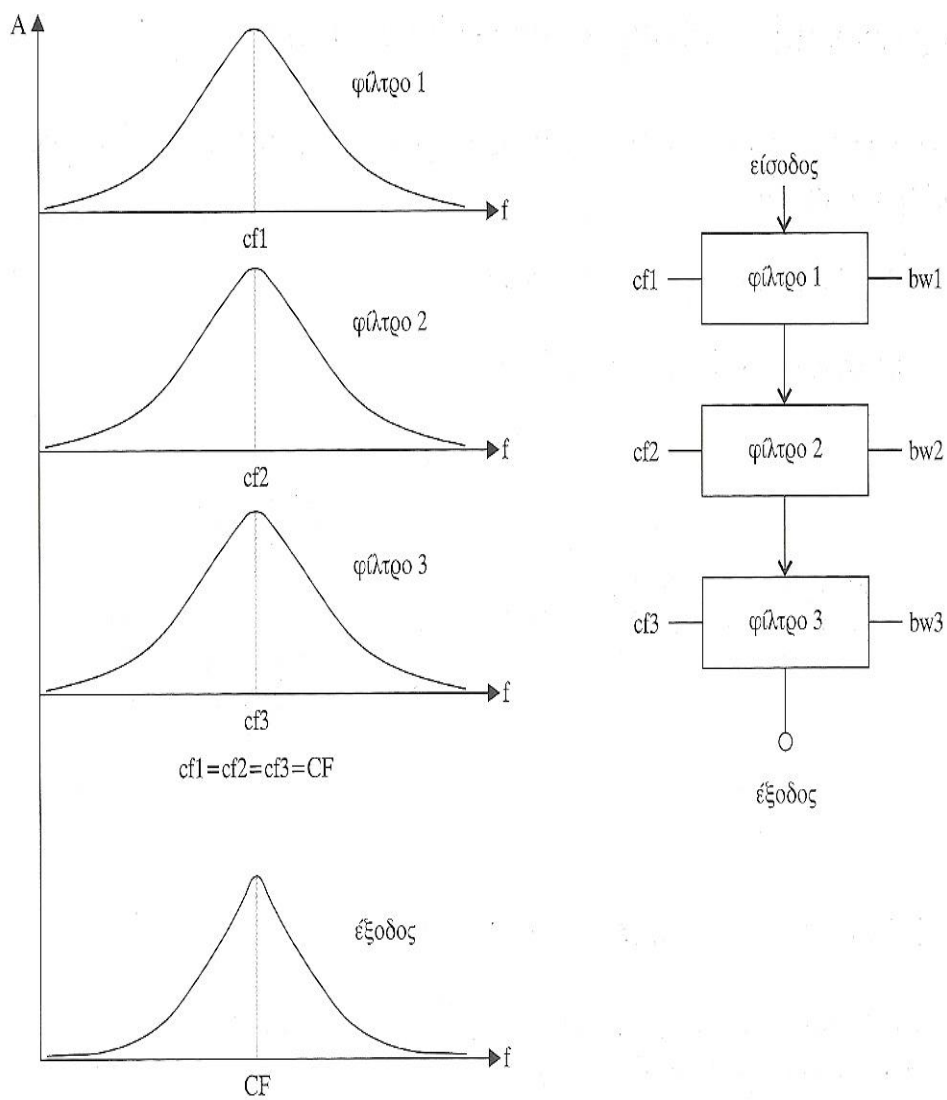
Σε μια σειριακή σύνδεση τα φίλτρα συνδέονται όπως οι κρίκοι μιας αλυσίδας. Η παράγωγή ενός φίλτρου τροφοδοτεί την εισαγωγή του επό-

μενου και ούτω καθεξής. Έτσι, η παραγωγή του τελευταίου φίλτρου είναι η παραγωγή ολόκληρης της αλυσίδας (Miranda, 2002).

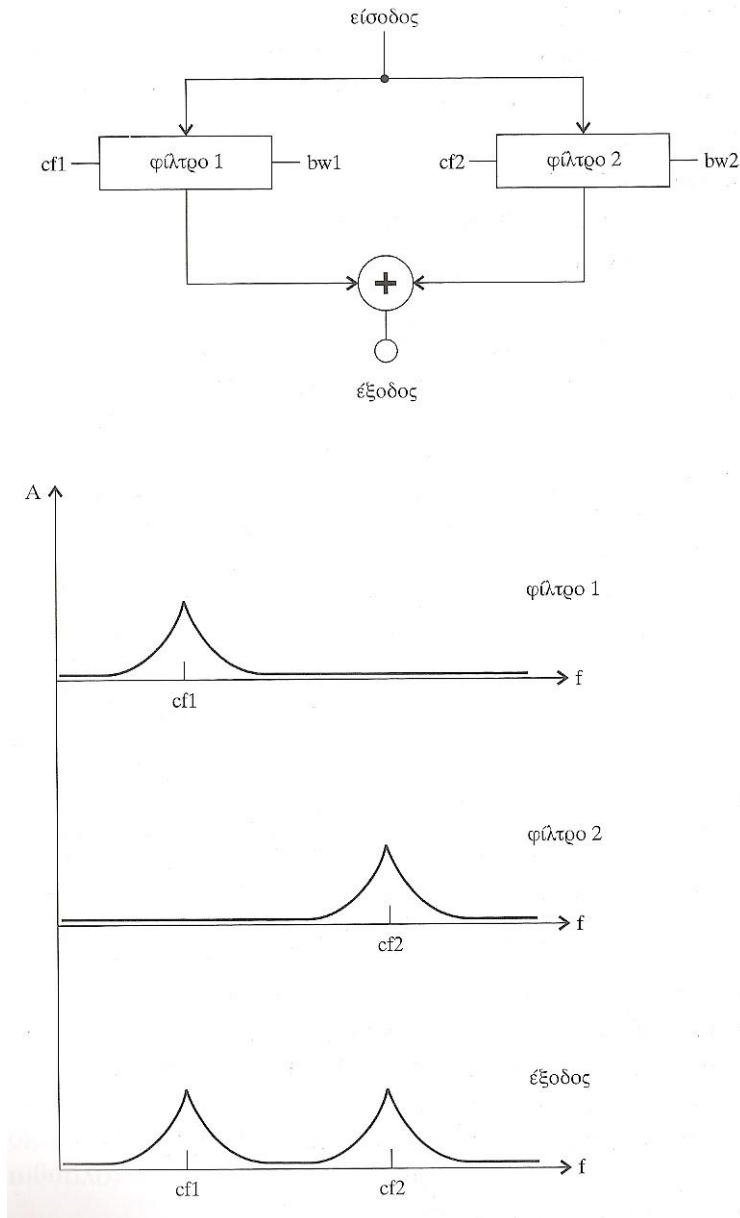
Με την παράλληλη σύνδεση, το σήμα που πρέπει να φιλτραριστεί εφαρμόζεται ταυτόχρονα στις εισόδους όλων των φίλτρων. Το αποτέλεσμα είναι η πρόσθεση των αποκρίσεων όλων των φίλτρων που έχει ως αποτέλεσμα το συντονισμό κάθε συχνότητας που βρίσκεται μέσα στο passband bandwidth του κάθε φίλτρου. Σε κάθε φίλτρο της παράλληλης σύνδεσης συνήθως προηγείται ένας έλεγχος ενίσχυσης, ο οποίος καθορίζει τις σχετικές ενισχύσεις των μερών του φάσματος που προκύπτει (Miranda, 2002).



**Σχήμα 2.16** Ένα αφαιρετικό συνθεσάιζερ απαιτεί συνήθως ένα συνδυασμό διασυνδεμένων φίλτρων (Miranda, 2009 σελ 74).



**Σχήμα 2.17** Τρία φίλτρα διέλευσης ζώνης (bandpass) στη σειρά με  $cf1 = cf2 = cf3 = cf$  και  $bw1 = bw2 = bw3$ . Η τελική καμπύλη απόκρισης μεταβάλλεται σημαντικά με πιο απότομα χαρακτηριστικά (Διαμαντόπουλος, 2004, σελ 169).



**Σχήμα 2.18** Δύο φίλτρα διέλευσης ζώνης (bandpass) σε παράλληλη σύνδεση. Το τελικό αποτελείται από την άθροιση των εξόδων τους (Διαμαντόπουλος, 2004, σελ 173).

## 2.8 Φωνοσυντονισμοί (formants)

Η ανθρώπινη φωνή είναι ένα παράδειγμα αφαιρετικού συστήματος όπου η στοματική κοιλότητα, η ρινική κοιλότητα, και ο λαιμός μπορούν να νοηθούν ως μια πολύπλοκη διάταξη που μοιάζει με σωλήνα όπου συγκεκριμένες συχνότητες τονίζονται ενώ άλλες φιλτράρονται κι έτσι η απόκριση συχνότητας που προκύπτει είναι μια σειρά από κορυφές (peaks). Οι φωνητικές χορδές παράγουν μια αιχμηρή (spiky) κυματομορφή, παρό-

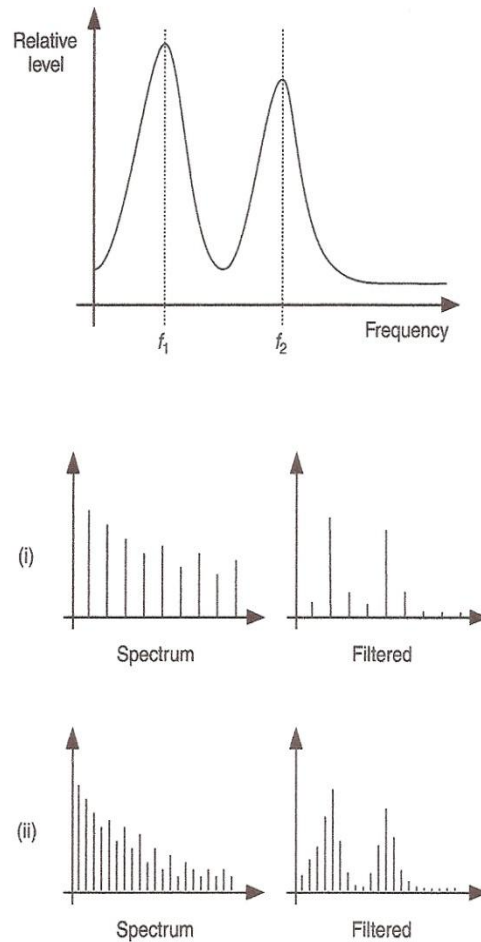
μοια με την κυματομορφή παλμού, πλούσια σε αρμονικές, και έπειτα αυτή διαμορφώνεται από τη φωνητική οδό (στοματική, ρινική κοιλότητα και τον λαιμό) που λειτουργεί ως μηχανισμός φιλτραρίσματος. Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος είναι η εξαγωγή ενός ήχου που περιέχει κατά κύριο λόγο τις συχνότητες από τον αρχικό παλμικό ήχο, του οποίου η φασματική περιβάλλουσα ταιριάζει με τις κορυφές του φίλτρου συντονισμού. Από τη στιγμή που μπορεί κάποιος να κάνει μόνο πολύ μικρές αλλαγές στο φυσικό σχήμα του σωλήνα που σχηματίζεται από την φωνητική οδό (π.χ. να αλλάξει το μέγεθος και το σχήμα της στοματικής κοιλότητας με τη γλώσσα), τότε οι κορυφές είναι πιο σταθερές κι έτσι αυτό που βγαίνει έξω είναι ένα σύνολο αρμονικών που έχουν κορυφές σταθεροποιημένες από τις φωνοσυντονισμένες συχνότητες, άσχετα από το τονικό ύψος της νότας που τραγουδιέται. Τα μόνα πράγματα που αλλάζουν είναι οι θεμελιώδεις συχνότητες και οι αρμονικές (Σχήμα 2.19) (Russ, 2009).

Η περιοδική πηγή δεν αλλάζει μορφή για διαφορετικά φωνήματα, παρά μόνο μπορεί να αλλάξει συχνότητα. Αντιστοιχεί δηλαδή στον ήχο που παράγουν οι φωνητικές χορδές, και θεωρείται ότι η ταλάντωσή τους δεν επηρεάζεται από την υπόλοιπη φωνητική οδό. Η απλούστερη μορφή περιοδικής πηγής είναι η ακολουθία παλμών. Ο παλμός επαναλαμβάνεται, παράγοντας τις αρμονικές που σχετίζονται με τους καθορισμένους συντονισμούς των formants που αντιπροσωπεύει, ενώ το τονικό ύψος που ακούγεται είναι ο ρυθμός επανάληψης. Το μέρος του τροποποιητή μπορεί να μιμηθεί ο συνδυασμός πολλών band-pass και notch φίλτρων, αν και από τη στιγμή που μπορούν να γίνουν αλλαγές στο σχήμα του 'σωλήνα', αυτά τα φίλτρα πρέπει να είναι δυναμικά μεταβαλλόμενα σε πραγματικό χρόνο (Russ, 2009).

Μία πηγή ήχου συνδεδεμένη με ένα σύνολο formants (resonant set of formants) που λειτουργεί ως τροποποιητής, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σχεδόν μουσικό όργανο. Παράδειγμα για τα έγχορδα όργα-



να, τα formants καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά των χορδών, τις τοποθετήσεις του και τη δομή του σώματος του οργάνου (Russ, 2009).



**Σχήμα 2.19** Οι φωνοσυντονισμοί (formants) είναι κορυφές (peaks) στο φάσμα συχνότητων ενός ήχου. Αυτό το παράδειγμα δείχνει δύο μεγάλες κορυφές στο φάσμα παραγωγής, άσχετα από τη θεμέλιο και τις αρμονικές των εισερχόμενων δεδομένων (Russ, 2009 σελ 297).

# {3}

## ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΣΑΙΖΕΡ

### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε πώς χρησιμοποιείται η αφαιρετική σύνθεση ήχου μέσω της παρουσίασης των αναλογικών αφαιρετικών συνθεσάιζερ. Η επιλογή των αναλογικών αφαιρετικών συνθεσάιζερ έγινε για ιστορικούς και πρακτικούς λόγους καθώς όλα τα βασικά συστατικά στοιχεία και οι παράμετροι της αφαιρετικής σύνθεσης προέκυψαν κατά την διάρκεια ανάπτυξης των αναλογικών συνθεσάιζερ, και πολλοί όροι και μέθοδοι αναπτύχθηκαν στη διάρκεια αυτής της πορείας. Η δομή και η λειτουργία κάθε συνιστώσας μονάδας στην αφαιρετική σύνθεση μπορεί να γίνει κατανοητή παρουσιάζοντας εφαρμογές στα αναλογικά συνθεσάιζερ. Οι λειτουργίες της κάθε μονάδας στην αφαιρετική σύνθεση είτε γίνονται στο αναλογικό πεδίο είτε με ψηφιακούς αριθμούς είναι στην ουσία πανομοιότυπες.

Πριν την έλευση της ψηφιακής δειγματοληψίας και σύνθεσης, οι τεχνικές για τη δημιουργία ηλεκτρονικών μουσικών οργάνων χρησιμοποιώντας αναλογικές τεχνικές ήταν πρόκληση, χρειάζονταν πολύ υπομονή από την πλευρά του συνθέτη και ήταν μερικές φορές δύσκολο να αναπαραχθούν εξαιτίας της ακρίβειας που χρειαζόταν για να κατασκευαστούν – και να επαναληφθούν – οι παραμετρικές ρυθμίσεις που χρειάζονταν για να παράγουν τον επιθυμητό ήχο (Holmes, 2008).

Οι πρώτοι συνθέτες ηλεκτρονικής μουσικής δεν είχαν συνθεσάιζερ στη διάθεσή τους. Εξοπλισμένοι μόνο με ταλαντωτές (oscillators) κυματομορφών, φίλτρα και μαγνητόφωνα, έμαθαν πως να συνδυάζουν και να τροποποιούν τους υπάρχοντες ήχους για να κάνουν καινούριους από τα πιο απλά συνιστώμενα μέρη (Holmes, 2002).



Σχήμα 3.1 Το modular synthesizer Roland 100m<sup>13</sup>

Τα πρώτα συνθεσάιζερ αποτελούσαν μέρος των στούντιο και ήταν θηριώδεις κατασκευές που καταλάμβαναν δωμάτια ολόκληρα. Οι μεταβολές τάσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων προκαλούσαν αλλαγές των παραμέτρων του παραγόμενου ήχου. Αυτά τα συνθεσάιζερ ονομάστηκαν modular επειδή αποτελούνταν από ξεχωριστές μονάδες (modules) (Πολίτης, 2007).

Καθώς τα ηλεκτρικά κυκλώματα άρχισαν σιγά – σιγά να υποκαθίστανται από ψηφιακές μονάδες, απέκτησαν και μνήμη, στην οποία μπορούσαν να αποθηκεύουν συνδυασμούς ρυθμίσεων και ήχους που μπορούσαν να ανακληθούν με το πάτημα ενός κουμπιού. Η λειτουργία των ψηφιακών συνθεσάιζερ στηρίζεται στην παραγωγή ήχων, που βρίσκονται αποθηκευμένοι στην μνήμη τους και τους επεξεργάζονται με τις διατάξεις όπως στα αναλογικά συνθεσάιζερ. Οι ήχοι αυτοί, στη βάση τους αποτελούν δείγματα (samples), κάποιων αναλογικών ήχων, που ήδη υφίστανται. Η δειγματοληψία (sampling) γίνεται αποθηκεύοντας πραγματικο-

<sup>13</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Roland\\_System-100M](http://en.wikipedia.org/wiki/Roland_System-100M)

ύς ήχους σε ψηφιακές εγγραφές υψηλής ποιότητας, ώστε το συνθεσάιζερ που τις χρησιμοποιεί, να έχει οποιαδήποτε στιγμή τη δυνατότητα αναπαραγωγής τους (Πολίτης, 2007, σελ. 207).



Σχήμα 3.2 Roland V Synth<sup>14</sup>

### 3.2 Διάγραμμα αναλογικού συνθεσάιζερ

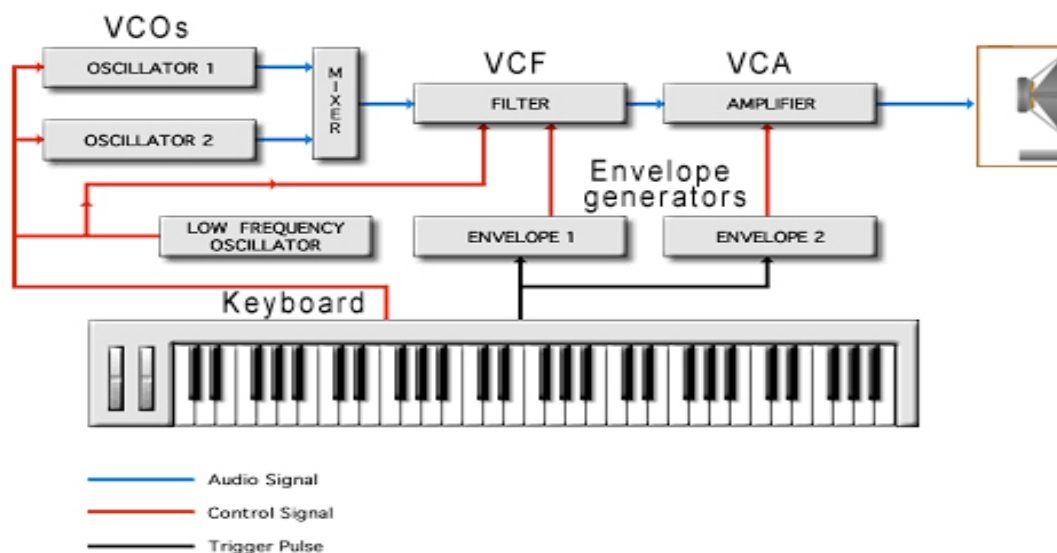
Ένα αναλογικό συνθεσάιζερ αποτελείται από 3 κύριες υπομονάδες ένας ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO-Voltage Controlled Oscillator), ένα φίλτρο ελεγχόμενο από τάση (VCF-Voltage Controlled filter) και ένας ενισχυτής ελεγχόμενος από τάση (VCA-Voltage Controlled Amplifier) (Κόκορας, 2007).

Ο VCO παράγει έναν ή περισσότερους βασικούς τόνους. Το τονικό ύψος συνήθως (αν και δεν είναι απαραίτητο) ελέγχεται από ένα πληκτρολόγιο. Αυτός ο τόνος οδηγείται στο VCF, το οποίο "χρωματίζει" τον ήχο μεταβάλλοντας το αρμονικό περιεχόμενο του ήχου. Τελικά ο ήχος οδηγείται στο VCA. Αυτό ελέγχεται από μια γεννήτρια περιβάλλουσας για να ελέγξει την ένταση ή να δώσει «σχήμα» στην δυναμική πορεία του ήχου - δηλ. πόσο γρήγορα ξεκινά όταν ένα πλήκτρο πιέζεται, πώς η ένταση μεταβάλλεται ενώ το πλήκτρο παραμένει πατημένο, και πόσο γρήγορα σβήνει ο ήχος όταν απελευθερώνεται το πλήκτρο. Υπάρχει επίσης και ο

<sup>14</sup> <http://www.vintagesynth.com/roland/vsynth.php>

ταλαντωτής χαμηλής συχνότητας (LFO-Low Frequency Oscillator) που μπορεί να εφαρμόσει μια μεταβαλλόμενη τάση για να διαμορφώσει άλλες υπομονάδες (Κόκορας, 2007).

Το σχήμα 3.3 παρουσιάζει τις κύριες υπό-μονάδες ενός αναλογικού συνθεσάιζερ ελεγχόμενου από τάση, και πώς συνδέονται συνήθως μεταξύ τους. Σημειώστε ότι αυτό είναι ένα πολύ απλοποιημένο μοντέλο σε σχέση με μερικά εξαιρετικά σύνθετα συνθεσάιζερ που έχουν παραχθεί (Κόκορας, 2007). Με παρόμοιο τρόπο, ως προς την σύνδεση πηγή-φίλτρο-ενισχυτή, πραγματοποιείται η αφαιρετική σύνθεση και στα βασικά ψηφιακά αφαιρετικά συνθεσάιζερ.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα αναλογικού συνθεσάιζερ (Κόκορας, 2007, σελ 4)

### 3.3 Keyboard

Το γνωστό μουσικό πληκτρολόγιο με τον συνδυασμό των άσπρων και μαύρων πλήκτρων χρησιμοποιείται ευρέως ως ο κύριος διακεκριμένος ελεγκτής τονικού ύψους για την επιλογή των νοτών (Russ, 2009).

Όταν ένα πλήκτρο πιέζεται, το πληκτρολόγιο στέλνει ένα σήμα. Αυτό είναι βασικά μια on/off εντολή. Όταν δηλαδή είναι ανοικτό (on) σημαίνει ότι το πλήκτρο πιέζεται, και όταν είναι κλειστό (off) σημαίνει ότι το

πλήκτρο δεν πιέζεται. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλες υπομοναδες (modules) όπως η γεννήτρια περιβάλλουσας για να διαμορφώσει την ένταση της νότας όταν πιέζεται ένα πλήκτρο και ίσως να ενεργοποιεί κάτι άλλο όταν απελευθερώνεται το πλήκτρο (Κόκορας, 2007, σελ. 6).

### 3.4 Έλεγχος τάσης (Voltage control)

Η φράση «ελεγχόμενο από τάση» αναφέρεται στις υπο-μονάδες που έχουν πολλές από τις παραμέτρους τους ελέγξιμες είτε από ένα ποτενσιόμετρο είτε μέσω μιας τάσης συνεχούς ρεύματος (Κόκορας, 2007).

Από τη στιγμή που τα συνιστώμενα μέρη του συνθεσάιζερ παράγουν σήματα ήχου τα οποία είναι επίσης τάσεις, τα ίδια σήματα που χρησιμοποιούνται για τον ήχο μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς ελέγχου (control). Ένα παράδειγμα είναι ένας ταλαντωτής που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το τρέμολο ή το βιμπράτο όταν χρησιμοποιείται σε μια πολύ χαμηλή συχνότητα (λίγων δεκάδων hertz), αλλά, την ίδια στιγμή, ο ίδιος oscillator γίνεται μια πηγή ήχου εάν η συχνότητα είναι λίγων εκατοντάδων hertz (Russ, 2009).

Αν και όλα τα αναλογικά συνθεσάιζερ δεν αποτελούνται από τα ίδια στοιχεία, πολλά από τα μέρη είναι κοινά και η μέθοδοι ελέγχου των παραμέτρων είναι εξ' ολοκλήρου η ίδια.

### 3.5 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (voltage controlled oscillators)

Ένας ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση (VCO) είναι αυτός που παράγει τον ήχο (ένα σταθερό τόνο) σε ένα συνθεσάιζερ. Το τονικό ύψος αυτού του ήχου καθορίζεται από την τιμή μιας ελεγχόμενης τάσης που στέλνεται από το πληκτρολόγιο του συνθεσάιζερ. Όταν το πλήκτρο που πιέζεται είναι στην ψηλή περιοχή του συνθεσάιζερ τότε παράγεται μια αντίστοιχα ψηλή τάση και αναγκάζει τον VCO να ταλαντώνεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα και ακολούθως να παράγεται και η αντίστοιχη

συχνότητα. Η συχνότητα της κυματομορφής που παράγει ο VCO μεταβάλλεται ανάλογα με την τάση, που εφαρμόζεται στην είσοδο του. Π.χ. όταν στην είσοδο ελέγχου ενός VCO εφαρμόζεται τάση 8Volt, τότε η συχνότητα του είναι 440Hz, ενώ αν η τάση γίνει 16V, τότε η συχνότητα του γίνεται 880Hz. Τότε λέγεται ότι η συχνότητα του εν λόγω VCO μεταβάλλεται κατά 55Hz ανά Volt (55Hz/V). Η σχέση Hz ανά Volt ορίζεται από το CV (Control Voltage) μια μέθοδο ελέγχου διαφόρων συνθεσάιζερ μεταξύ τους. Σήμερα η μέθοδος αυτή έχει αντικατασταθεί από το πρωτόκολλο Midi (βλ. ενότητα 3.10) (Κόκορας, 2007, σελ. 7).

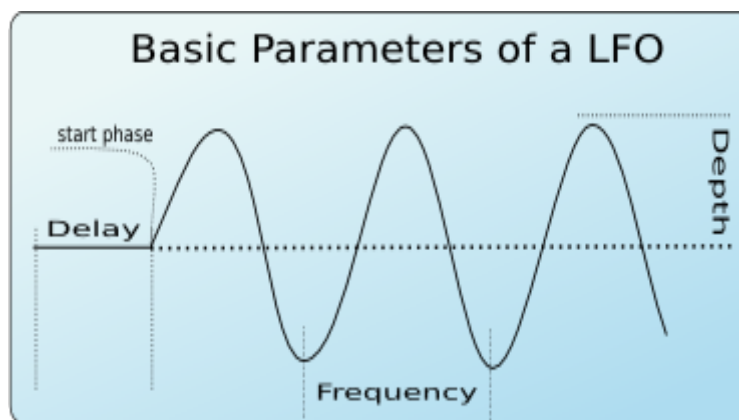
Μερικά VCOs παρέχουν, επίσης, εισαγόμενα δεδομένα (input) ελεγχόμενης τάσης προς διαμόρφωση και προς διαφοροποίηση του σχήματος των παραγόμενων κυματομορφών (συνήθως το εύρος παλμού των τετραγωνικού σχήματος κυμάτων, αν και μερικά VCOs επιτρέπουν και την αλλαγή και άλλων κυματομορφών). Πολλά VCOs έχουν επιπρόσθετα εισαγόμενα δεδομένα για κάποιο άλλο σήμα ήχου VCO, στο οποίο το VCO μπορεί να συγχρονιστεί.

Ένα τυπικό VCO έχει ελέγχους για τον αδρό (σε ημίτονα) και για τον λεπτό προσδιορισμό του pitch του, κάποιο είδος επιλογή κυματομορφών (συνήθως μιας εκ των ημιτονοειδών, τριγωνικών, τετράγωνων, πριονωτών και παλλόμενων), και έναν ελεγκτή εύρους του παλμού για το σχήμα της κυματομορφής παλμού. Μερικές φορές, πολλές ταυτόχρονες κυματομορφές παραγωγής είναι διαθέσιμες και μερικά VCOs επίσης παρέχουν 'υπο-οκταβικές' (sub-octave) παραγωγές που είναι μία ή δύο οκτάβες χαμηλότερα σε τονικό ύψος. Ένα CV για το εύρος παλμού επιτρέπει στον σχηματισμό της κυματομορφής παλμού (και μερικές φορές και σε άλλες κυματομορφές επίσης) να διαφοροποιηθούν. Αυτό ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) ή διαμόρφωση σχήματος (Russ, 2009).

### 3.6 Ταλαντωτής χαμηλής συχνότητας (Low frequency oscillator)

Ο ταλαντωτής χαμηλής συχνότητας LFO παράγει μια συχνότητα όπως και ο VCO. Ωστόσο, ενώ ένας VCO παράγει μια ακουστή από τον άνθρωπο συχνότητα (για παράδειγμα από 20Hz μέχρι 20KHz) ο LFO παράγει ένα σήμα χαμηλής συχνότητας που μπορεί να κυμανθεί από 1 κύκλο το λεπτό μέχρι 10 φορές το δευτερόλεπτο (10 Hz).

Η κυματομορφή που συνήθως χρησιμοποιείται σε ένα LFO είναι ημίτονο ή τριγωνική κυματομορφή, αν και μερικά συνθεσάιζερ προσφέρουν περισσότερους τύπου κυματομορφών. Το LFO δεν χρησιμοποιείται για να παράγει ένα σήμα που μπορείτε να ακουστεί, αλλά χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει άλλες παραμέτρους του συνθεσάιζερ. Χρησιμοποιείται κανονικά για να διαμορφώσει: συχνότητα, ένταση και οποιαδήποτε άλλη παράμετρο (Κόκορας, 2007).



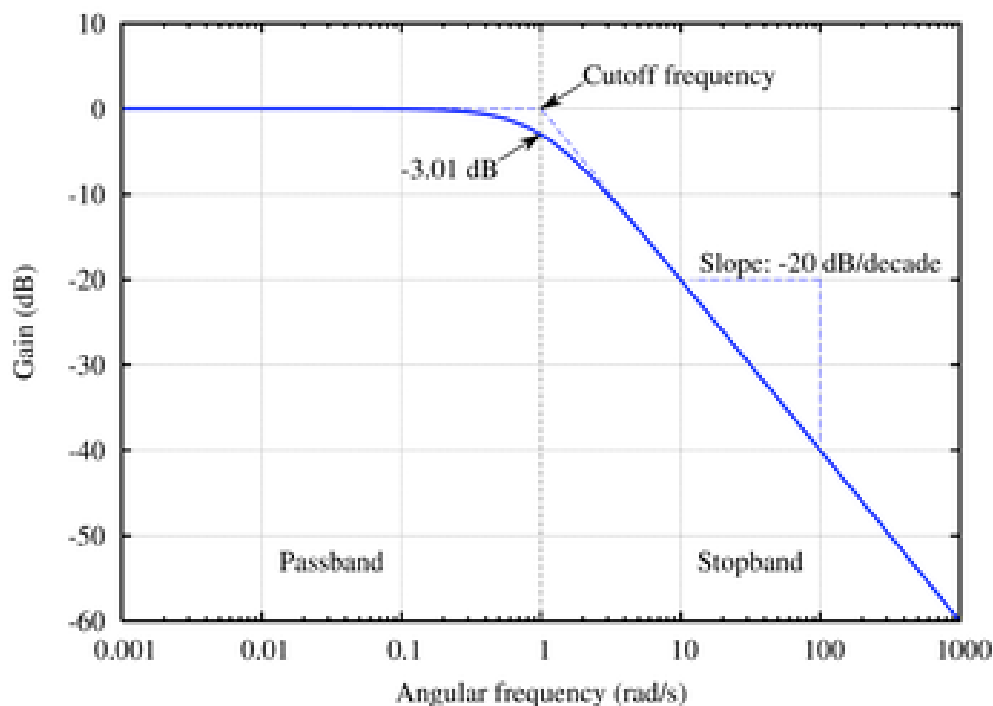
**Σχήμα 3.4** Οι βασικές παράμετροι ενός LFO με τις οποίες επηρεάζεται το κυρίως ακουστικό σήμα. Delay είναι η υστέρηση δηλαδή ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα από την αρχική είσοδό του. Frequency είναι η συχνότητα που θα παράγει ο LFO και το Depth είναι η παράμετρος που ορίζει το πλάτος της διαμόρφωσης.

### 3.7 Φίλτρο ελεγχόμενο από τάση (Voltage controlled filter)

Το φίλτρο VCF είναι η υπομονάδα που διαμορφώνει τη συχνότητα αποκοπής (cut off frequency) ή την συχνότητα συντονισμού (Quality factor) με τη βοήθεια μιας ελεγχόμενης τάσης που εφαρμόζεται σε μια ή περισσότερες εισόδους του VCF. Η ζώνη διέλευσης του VCF αλλάζει όταν η τά-



ση στην είσοδο του μεταβάλλεται. Το αποτέλεσμα είναι να αλλάζουν και οι συχνότητες τις οποίες επιτρέπει να διέλθουν το φίλτρο. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται συνεχώς το αρμονικό περιεχόμενο του ακουστικού σήματος που διέρχεται από το VCF. Το φίλτρο μπορεί να αλλάξει την κλίση (slope) που καθορίζει πόσο γρήγορα μειώνεται το σήμα πέρα από τη ζώνη διέλευσης (Κόκορας, 2007).



**Σχήμα 3.5** Απεικόνιση συχνότητας αποκοπής (cutoff frequency) ενός κατωδιαβατού φίλτρου (lowpass filter) με κλίση (slope)  $-20$  dB/decade<sup>15</sup>

Στα αναλογικά συνθεσάιζερ το VCF συνήθως τοποθετείται μετά από τον ταλαντωτή. Ο ταλαντωτής παράγει ένα ακουστικό σήμα, το οποίο (εκτός από το θόρυβο) περιλαμβάνει μια θεμελιώδη συχνότητα και μια σειρά αρμονικών. Μεταβάλλοντας την συχνότητα αποκοπής, προστίθενται ή να αφαιρούνται μερικοί από τους αρμονικούς με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερο ενδιαφέροντες και πλούσιοι ήχοι.

<sup>15</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Cutoff\\_frequency](http://en.wikipedia.org/wiki/Cutoff_frequency)

Στην ηλεκτρονική μουσική συναντάται συχνά η χρήση της τεχνικής του "σαρώματος φίλτρου" (filter sweeps). Αυτά τα σαρώματα δημιουργούνται αλλάζοντας τη συχνότητα αποκοπής του VCF (μερικές φορές πολύ αργά) για να αποκαλύψουν ή να κρύψουν τους αρμονικούς του ταλαντωτή (Κόκορας, 2007)

### 3.8 Ενισχυτής Ελεγχόμενος από τάση (voltage controlled amplifier)

Ένας ενισχυτής ελεγχόμενης τάσης επιτρέπει στον μουσικό να ελέγχει την ένταση ενός σήματος σε μια ποικίλη κλίμακα ενίσχυσης. Η ενίσχυση είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο της παραγωγής ήχου και σπάνια προκύπτει σε μια κλίμακα που πηδάει από το 0 (off) στην κορυφή (on) χωρίς μερικά βήματα ενδιάμεσα. Αυτά τα βήματα μπορεί να είναι αργά, όπως στο βαθμιαίο φούσκωμα της έντασης, έως γρήγορα και περιοδικά όπως στο τρέμολο. Το VCA παρέχει ρυθμίσεις για να καθιστά δυνατές τέτοιες βαθμιαίες αλλαγές στην ένταση (Holmes, 2008).



Σχήμα 3.6 Μία μονάδα (module) για τον έλεγχο της περιβάλλουσας (ADSR).

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το VCA (και τη γεννήτρια περιβάλλουσας) για να ελέγξουμε εάν ένας ήχος αρχίζει αμέσως όταν πιέζεται ένα πλήκτρο, ή ενισχύεται βαθμιαία. Χρησιμοποιείται επίσης για να ελέγξει το χρόνο που θα χρειαστεί ο ήχος μέχρι να σιωπήσει (γρήγορα ή αργά) όταν απελευθερώνεται ένα πλήκτρο. Συνήθως το VCA ελέγχει μόνο μια γεννήτρια περιβάλλουσας, αν και μπορούμε αν θελήσουμε να δρομολογήσουμε την έξοδο ενός LFO στο VCA, για να παραγάγει μια "ταλάντευση" στην ένταση του ήχου γνωστή ως τρέμολο (Κόκορας, 2007).



Σχήμα 3.7 VCS3 (1969) EMS Αγγλία <sup>16</sup>

### 3.9 Ψηφιακά αφαιρετικά συνθεσάιζερ σε μορφή λογισμικού

Στις παραπάνω ενότητες είδαμε από ποιές υπομονάδες αποτελείτε ένα αναλογικό συνθεσάιζερ και ποία η λειτουργία τις κάθε μίας σ αυτό. Ένα ψηφιακό βασικό αφαιρετικό συνθεσάιζερ αποτελείται από μία πηγή, έναν τροποποιητή και έναν ενισχυτή και λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο, μόνο που ο έλεγχος των μονάδων πλέον δεν γίνεται από τάση αλλά ελέγχεται με ψηφιακό τρόπο.

<sup>16</sup> <http://www.gearslutz.com/board/electronic-music-instruments-electronic-music-production/176708-vcs3-synthi-gas.html>

Για παράδειγμα σε ένα συνθεσάιζερ με ψηφιακά ελεγχόμενο ταλαντωτή το κάθε πλήκτρο αντιστοιχεί και σε ένα μοναδικό αριθμό τον οποίο και διαβάζει το DCO (Digital controlled oscillator) και έτσι παράγει στην αντίστοιχη συχνότητα μια σειρά από παλμούς (Κόκορας, 2007, σελ. 12).

Μέχρι πριν κάποια χρόνια κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί την ιδέα ενός υπολογιστή ικανού να παράγει ήχο από μόνος του. Ειδικά, αν ο ήχος αυτός ξεπερνούσε ένα απλό "μπιπ" ή κάποια οκτάμπιτα δείγματα. Όπως ήταν φυσικό θέματα όπως αυτά της ζωντανής μουσικής εκτέλεσης ή της πολυχρωματικής αναπαραγωγής δεν συζητιόταν καθόλου. Οι εξελίξεις στο χώρο των μικροεπεξεργαστών άλλαξαν δραματικά το σκηνικό και επέτρεψαν τη δημιουργία ηλεκτρικών οργάνων σε μορφή λογισμικού, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στη δημιουργία και επεξεργασία ήχου μέσω υπολογιστή (Πλέσσας, 2001).



Σχήμα 3.8 Minimoog<sup>17</sup>

Τα DAWs (Digital Audio Workstation) είναι προγράμματα για ηχογράφηση, μίξη, ενορχήστρωση, δημιουργία αναπαραγωγή loops και άλλων

<sup>17</sup> <http://iamphotograph.com/2011/04/synthesized/>

πολλών δυνατοτήτων. Επίσης στο διαδίκτυο τα συναντάμε σαν Recording Software, Recording Program, Mixing Program, Mixing Software. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι τα Pro Tools<sup>18</sup>, Cubase, **Ableton**, Logic Pro και Reaper.

Τα DAWs δέχονται επέκταση VSTs (**Virtual Studio Technology**) τα οποία είναι plug-in<sup>19</sup> και χρησιμοποιούνται ως midi για την εισαγωγή κάποιον ήχων σε μία σύνθεση ή ως εργαλεία για την χρήση ηχητικών εφέ. Επίσης υπάρχουν VSTs τα οποία προσομοιώνουν synthesizers σε ψηφιακή μορφή. Τα VSTs δεν είναι Standalone programs δηλαδή δεν μπορούν να λειτουργήσουν μόνα τους αλλά μόνο μέσα από τα DAWs.

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του Ableton Live για την παρουσίαση κάποιων VST τα οποία προσομοιώνουν αναλογικά-αφαιρετικά συνθεσάιζερ.

Το Ableton Live γράφτηκε με την γλώσσα προγραμματισμού C++<sup>20</sup> και η πρώτη του έκδοση, V1, εμφανίστηκε το 2001. Το Ableton Live είναι ένα μουσικό sequencer που βασίζεται στην δημιουργία και αναπαραγωγή loops αλλά και ένα DAW (Digital Audio Workstation) για τις πλατφόρμες Mac OS και Windows. Δημιουργήθηκε με κύριο σκοπό να λειτουργεί ως live όργανο και ψηφιακός μείκτης για DJs και όχι ως εργαλείο εγγραφής μουσικής, που το κάνει ξεχωριστό σε σχέση με άλλα sequencers<sup>21</sup>.

Το πρώτο VST προσομοιώνει ένα βασικό, μονοφωνικό, αφαιρετικό αναλογικό συνθεσάιζερ, το Minimooog (Σχήμα 3.5) (βλ. παράρτημα κεφάλαιο 2). Το Minimooog αποτελείται από 3 υπομονάδες: 1) Μία γεννήτρια που περιέχει τρεις ταλαντωτές ελεγχόμενους από τάση (3 VCOs) και μία

<sup>18</sup>Τα Pro Tools αντί για VSTs δέχονται τα RTAS και τα TDM τα οποία είναι το ίδιο πράγμα απλά αλλάζει η κατάληξη.

<sup>19</sup>Ως **plug-in**, επίσης και *plugin*, ορίζεται ένα σύστημα συστατικών κάποιου λογισμικού που προσθέτει ιδιαίτερες δυνατότητες σε ένα μεγαλύτερο λογισμικό (<http://el.wikipedia.org/wiki/Plug-in>).

<sup>20</sup> <http://el.Wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>

<sup>21</sup> [exit210.gr/bloggers](http://exit210.gr/bloggers)

γεννήτρια λευκού ή ροζ θορύβου 2) ένα φίλτρο ελεγχόμενο από τάση (VCF) 3) έναν ενισχυτή ελεγχόμενο από τάση (VCA).



Σχήμα 3.9 VST Minimoog<sup>22</sup>

Το δεύτερο VST ονομάζεται Abakos είναι ένα πιο σύνθετο αφαιρετικό συνθεσάιζερ. Αποτελείται από δύο VCOs όπου ο κάθε ένας παράγει τρεις κυματομορφές, ένα ταλαντωτή χαμηλής συχνότητας (LFO) με πέντε κυματομορφές, δύο γεννήτριες περιβάλλουσας, διακόπτες χειρισμού των εφέ tremolo, vibrato, delay. Περιέχει μία γεννήτρια θορύβου, έλεγχο αναλογικού/ψηφιακού φίλτρου, και ring modulation (βλ. παράρτημα ενότητα 4). Τέλος έχει 127 έτοιμους διαφορετικούς ήχους οι οποίοι μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με την προτίμηση του εκτελεστή.

<sup>22</sup> <http://www.kvraudio.com/kvr-developer-challenge/2009/>



Σχήμα 3.10 VST Abakos<sup>23</sup>

<sup>23</sup> [http://www.vst4free.com/free\\_vst.php?id=399](http://www.vst4free.com/free_vst.php?id=399)

## {4}

### ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΟΥ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΣΑΙΖΕΡ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΦΩΝΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ/ΕΚΤΕΛΕΣΤΗ

#### 4.1 Εισαγωγή

Η σύγχρονη μουσική τεχνολογία δίνει την δυνατότητα να δημιουργούνται συνθεσάιζερ στα οποία ο έλεγχος βασικών παραμέτρων της αφαιρετικής σύνθεσης να μην γίνεται απλά μέσω κάποιων διακοπών αλλά να μπορούν να ελέγχονται και από άλλες εσωτερικές ή εξωτερικές μονάδες/διεργασίες.

Η βασική ιδέα της παρούσας υλοποίησης είναι η δημιουργία ενός αφαιρετικού συνθεσάιζερ του οποίου το ηχόχρωμα θα μπορεί να διαμορφώνει ο χρήστης σε πραγματικό χρόνο με την φωνή του (μέσω μικροφώνου). Το σύστημα μπορεί να εξάγει βασικά τονικά χαρακτηριστικά από την φωνή, (όπως θεμέλιος και κάποιοι σχετικά ισχυροί αρμονικοί), και να χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά αυτά για τον έλεγχο των κεντρικών συχνοτήτων των φίλτρων καθώς και άλλων τεχνικών παραμέτρων της αφαιρετικής σύνθεσης.

Από καλλιτεχνικής πλευράς, ένα τέτοιο διαδραστικό όργανο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο για την δημιουργία *ad hoc* διαδραστικών συνθέσεων στις οποίες ο ακροατής θα μπορεί να διακρίνει με ευκρινή τρόπο την ηχητική σύζευξη ανάμεσα στον εκτελεστή και το σύστημα (π.χ. όταν ανεβαίνει το τονικό ύψος της φωνής θα γίνεται πιο λαμπρό το ηχόχρωμα που συνοδεύει τη φωνή), όσο για την δημιουργία νέων ήχων για χρήση σε ένα συνθεσάιζερ (χωρίς να χρειάζεται η ρύθμιση παραμέτρων μέσω διακοπών και κουμπιών). Η φωνή θα μπορεί, φυσικά, να αντικατασταθεί και από άλλους ήχους (π.χ. περιβαλλοντικούς, τεχνητούς, κλπ).

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα παρουσιάσουμε τη δημιουργία ενός απλού συνθεσάιζερ αποτελούμενο από τις τρεις βασικές μονάδες: πηγή,



φίλτρο, ενισχυτή. Σκοπός της σχεδίασης και παρουσίασης αυτού του οργάνου (patch στο περιβάλλον MAX/MSP) είναι να φανεί καθαρά η λειτουργία της κάθε μονάδας σε ένα αφαιρετικό συνθεσάιζερ.

Το κύριο μέρος αυτού του κεφαλαίου είναι η δημιουργία συνθεσάιζερ στο οποίο ο έλεγχος των φίλτρων γίνεται μέσω της ανθρώπινης φωνής του χρήστη/εκτελεστή. Αυτό γίνεται με την ανάλυση της φωνής που λαμβάνει το μικρόφωνο, στο πεδίο των συχνοτήτων και την εξαγωγή τονικών χαρακτηριστικών της με τα οποία ελέγχεται η χρήση φίλτρων. Η ανάλυση γίνεται με την τεχνική ανάλυσης Φουριέ (FFT) και με τεχνικές ανίχνευσης τονικού ύψους (pitch detection) (βλ. ενότητα 1.5). Το συνθεσάιζερ αυτό θα έχει δύο εκδοχές: 1) διαμόρφωση νέου ηχοχρώματος μέσω της φωνής και στη συνέχεια διατήρηση του ηχοχρώματος σταθερού (κλείνοντας το μικρόφωνο), και 2) συνεχής διαμόρφωση του ηχοχρώματος σε πραγματικό χρόνο από την φωνή μέσω αλλαγής της φασματικής περιβάλλουσας προ-ηχογραφημένων ήχων.

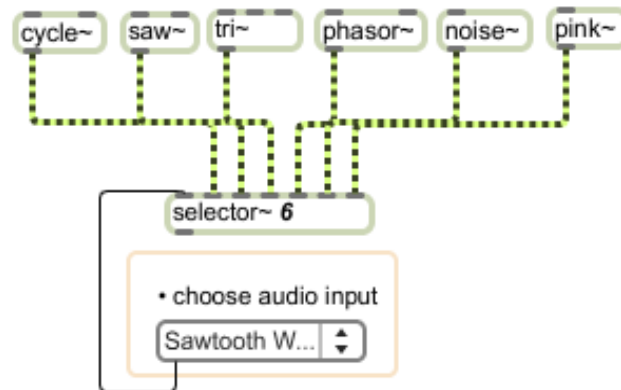
Η δημιουργία των παραπάνω εφαρμογών στον τομέα της αφαιρετικής σύνθεσης γίνεται στην γλώσσα προγραμματισμού MAX/MSP (βλ. παράρτημα ενότητα 3). Η MAX/MSP ανήκει στις αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού. Στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό στόχος των προγραμματιστών είναι η δημιουργία μονάδων, οι οποίες περιλαμβάνουν τα δεδομένα αλλά και τις εντολές οι οποίες τα διαχειρίζονται. Οι μονάδες αυτές στις γλώσσες που υποστηρίζουν αντικειμενοστραφή προγραμματισμό λέγονται συναρτήσεις ή αλλιώς αντικείμενα (Λάζος, 2002). Η MAX/MSP είναι μια γραφική αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού για την μουσική (και multimedia). Τα αντικείμενα εμφανίζονται στην MAX/MSP με την μορφή κουτιών, τα οποία περιέχουν κείμενο ή εικόνες οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία του κάθε αντικειμένου. Ένα πρόγραμμα στη MAX/MSP ονομάζεται patch.

## 4.2 Δημιουργία βασικού αφαιρετικού συνθεσάιζερ στην MAX/MSP (Βασικό Patch)

Ένα αφαιρετικό συνθεσάιζερ αποτελείται στη ουσία από τρεις κύριες υπομονάδες (modules): 1) μία γεννήτρια βασικών κυματομορφών με πλούσιο φάσμα ή μία γεννήτρια θορύβου, 2) ένα ή περισσότερα συνήθως ζωνοδιαβατά φίλτρα (επιπλέον στο παρόν patch, γίνεται χρήση ένας τύπος ζωνοδιαβατού φίλτρου που ονομάζεται resonant filter), 3) και έναν ενισχυτή που ελέγχεται από την περιβάλλουσα του ήχου.

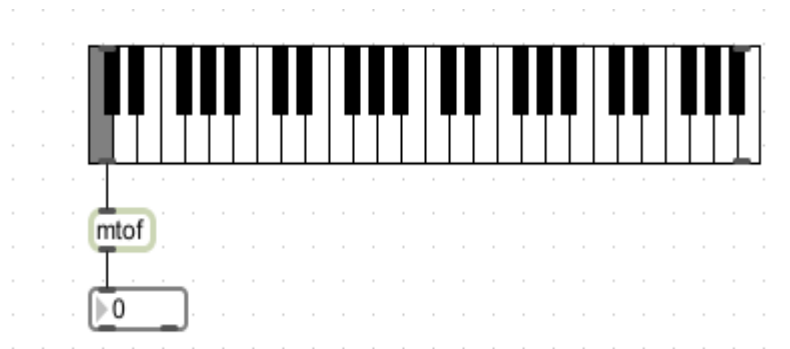
Στην MAX/MSP είναι σχετικά απλή διαδικασία η δημιουργία ενός τέτοιου συνθεσάιζερ διότι το τελικό πρόγραμμα δημιουργείται με την σύνδεση υπάρχοντων σύνθετων επιμέρους δομικών μονάδων. Το παρόν συνθεσάιζερ είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο σε σχέση με άλλα σύνθετα modular συνθεσάιζερ που έχουν παραχθεί.

Ας δούμε πιο αναλυτικά τις επιμέρους μονάδες (modules) που χρειάστηκαν για την κατασκευή του. Αρχικά για γεννήτρια χρησιμοποιούμε ένα αντικείμενο (object) στο οποίο γράφουμε το όνομα της κυματομορφής ή του θορύβου που θέλουμε για ηχητική πηγή. Στο συγκεκριμένο patch έχουμε επιλογή ανάμεσα σε τρεις σύνθετες κυματομορφές μία ημιτονοειδής (η οποία δεν είναι κατάλληλη για την αφαιρετική σύνθεση διότι δεν περιέχει συνιστώσες) και δύο γεννήτριες θορύβου. Για παράδειγμα γράφοντας στο αντικείμενο *tri~* μας δίνει μία τριγωνική κυματομορφή της οποίας η συχνότητα ορίζεται από το keyboard που θα δούμε παρακάτω. Το αντικείμενο *selector~* διαχωρίζει τις διάφορες κυματομορφές και τους τύπους θορύβων και δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την γεννήτρια που επιθυμεί.



**Σχήμα 4.1** Τα αντικείμενα τα οποία αντιστοιχούν σε τέσσερις κυματομορφές και σε δύο θορύβους.

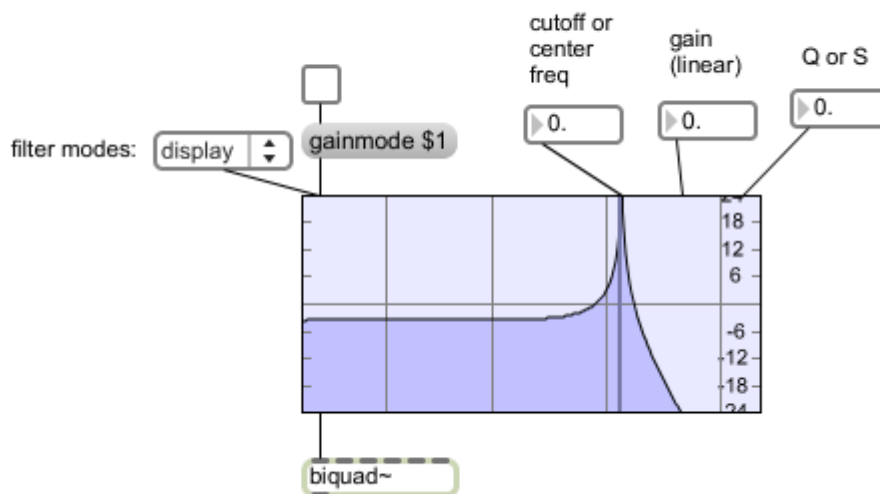
Με το αντικείμενο *kslider* εμφανίζεται το keyboard από το οποίο ελέγχεται το τονικό ύψος. Το αντικείμενο *mtof* μετατρέπει την παράμετρο *pitch velocity* του πρωτόκολλου MIDI<sup>24</sup> σε συχνότητα (Hz) η οποία εμφανίζεται στο αντικείμενο *number*.



**Σχήμα 4.2** Τα αντικείμενα *kslider*, *mtof*, και *number*

<sup>24</sup> Το **MIDI** (*Musical Instrument Digital Interface*, ελλ. Ψηφιακή Διασύνδεση Μουσικών Οργάνων) είναι ένα πρωτόκολλο που αποσκοπεί στην επικοινωνία και τον συγχρονισμό μεταξύ ηλεκτρονικών μουσικών οργάνων (όπως συνθεσάιζερ, ρυθμομηχανές, δειγματολήπτες, συσκευές χρονισμού), υπολογιστών και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών, ανεξαρτήτως κατασκευαστή. Το πρωτόκολλο MIDI δεν μεταδίδει ηχητικό σήμα, αλλά μηνύματα που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με το τονικό ύψος και την ένταση μιας νότας, καθώς επίσης και σήμα χρονισμού που προσδιορίζει την ταχύτητα - το *tempo* - ενός κομματιού (<http://el.wikipedia.org/wiki/MIDI>).

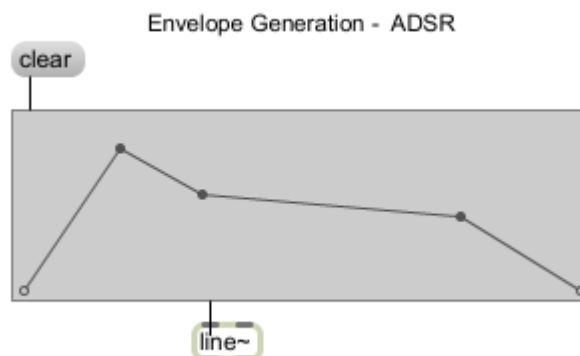
Στην συνέχεια με το αντικείμενο *filtergraph~* δημιουργούμε την υπομονάδα που τροποποιεί το σήμα της γεννήτριας μέσω των φίλτρων. Στο αντικείμενο αυτό συνδέουμε επίσης το object *umenu* από το οποίο μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο του φίλτρου. Το *filtergraph~* έχει εισόδους στις οποίες συνδέουμε το object *number* και μπορούμε να ελέγξουμε από εκεί την συχνότητα του φίλτρου το κέρδος (gain) και τον συντελεστή ποιότητας του φίλτρου (Q). Στην έξοδο του φίλτρου συνδέουμε το object *biquad~* το οποίο είναι το φίλτρο που χειρίζεται τα δεδομένα του αντικειμένου *filtergraph~* για να φιλτράρει τον ήχο. Με το μήνυμα *gainmode \$1* υπάρχει η επιλογή για το αν θέλει ο χειριστής να αλλάζει ή όχι το gain του φίλτρου.



Σχήμα 4.3 Τα αντικείμενα *filtergraph~* και *biquad~*.

Η γεννήτρια περιβάλλουσας ελέγχεται από το αντικείμενο *function* το οποίο επιτρέπει να σχεδιάσουμε ή να αποθηκεύσουμε ένα σύνολο από  $x, y$  κινητά σημεία έτσι ώστε να ορίζουμε τον τρόπο κατά τον οποίο η ένταση ενός ήχου ή ενός σήματος πως θα μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται με το αντικείμενο *line~*. Τέλος

ανοίγοντας ένα κουτάκι *message* και γράφοντας την λέξει *clear* μπορούμε να διαγράψουμε και να επαναπροσδιορίσουμε εκ νέου την περιβάλλουσα.



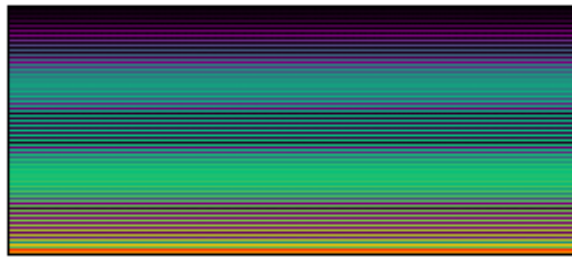
Σχήμα 4.4 Το αντικείμενο *function*.

Στην συνέχεια, τις εξόδους των προηγούμενων αντικειμένων τις ενώνουμε με το αντικείμενο *\*~* το οποίο πολλαπλασιάζει το σήμα και συνδέετε με ένα *gain~* που ρυθμίζει την ένταση (*amplitude*). Στο τέλος του *patch* γίνεται η μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα με το αντικείμενο *ezdac~* και επίσης ενεργοποιούμε η κλείνουμε τον ήχο από το συγκεκριμένο αντικείμενο.



Σχήμα 4.5 Τα αντικείμενα *\*~*, *gain~* και *ezdac~*.

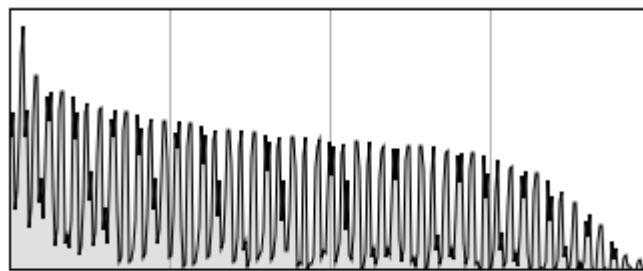
Τέλος και σ' αυτό και στο επόμενο *patch* που θα αναλύσουμε παρακάτω χρησιμοποιούνται τα αντικείμενα *spectroscope~* και *spectrogram~* από τα οποία μπορούμε να παρακολουθήσουμε της μεταβολές του φάσματος στα πεδία συχνότητας - χρόνου και συχνότητας - ισχύος .



Sonogram mode - frequency vs. time with amplitude displayed as color

**Σχήμα 4.6** Το αντικείμενο *spectroscope~* μας δίνει το φασματογράφημα στο πεδίο συχνοτήτων-χρόνου εμφανίζοντας και την ένταση.

Spectrogram mode - frequency vs. amplitude



**Σχήμα 4.7** Το αντικείμενο *spectrogram~* απεικονίζει την φασματική περιβάλλουσα

### 4.3 Δημιουργία αφαιρετικού συνθεσάιζερ μεταβάλλοντας την φασματική περιβάλλουσα του ήχου με την ανθρώπινη φωνή

Στις δύο εκδοχές αυτού του patch δημιουργήσαμε ένα συνθεσάιζερ το οποίο δίνει στον εκτελεστή την δυνατότητα να αλλάζει το ηχόχρωμα της πηγής αλλάζοντας την κεντρική συχνότητα του φίλτρου με την φωνή του. Σε αυτό το patch χρησιμοποιούνται τα αντικείμενα *kslider*, *mtof*, *filtergraph~*, *biquad~*, *umenu*, *function*, *gain~*, *ezdac~*, και *selector~* των οποίων η λειτουργία περιγράφηκε στο προηγούμενο patch. Επίσης γίνεται χρήση και άλλων αντικειμένων τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Αρχικά η φωνή μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα μέσω του αντικειμένου *adc~* (Analog to Digital Converter), που ελέγχεται από το αντικείμενο *gain~* για την εξισορρόπηση της έντασης του μικροφώνου. Στην συνέχεια οι ήχοι αναλύονται στο πεδίο των συχνοτήτων χρησιμοποιώντας τον γρήγορο μετασχηματισμό Φουριέ (FFT), με το αντικείμενο *sigmund~*<sup>25</sup> γίνεται και η ανίχνευση τονικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μία φασματική ανάλυση στο πεδίο έντασης- συχνοτήτων χρησιμοποιώντας (FFT) και με εξειδικευμένες μεθόδους ανίχνευσης τονικού ύψους ανιχνεύονται και εξαγονται οι πιο ισχυρές συχνότητες του φάσματος. Επειδή ο ήχος προέρχεται από την φωνή συνήθως ανιχνεύονται και συχνότητες από την περιοχή των formants (βλ. κεφάλαιο 2.9).

Μέσα στο αντικείμενο *sigmund~* έχουμε δύο παραμέτρους *@npts 4096* και *@hop2048* οι οποίες μας δίνουν το μέγεθος του παραθύρου και ο αριθμός που γίνεται η ανάλυση μεταξύ των σημείων. Επίσης με την παράμετρο *@peaks* ορίζουμε τον αριθμό των ημιτονοειδών κορυφών που θέλουμε να πάρουμε ο οποίος έχει εύρος τιμών από το μηδέν μέχρι και το είκοσι. Εμείς χρησιμοποιούμε την εξαγωγή τριών κορυφών (*@peaks 3*). Με το αντικείμενο *route* διαχωρίζονται οι συχνότητες των τριών κορυφών που παίρνουμε από το *sigmund~* όποτε έχουμε τρεις διαφορετικές συχνότητες στην κάθε έξοδο του αντικειμένου, συνήθως, την θεμέλιο και δύο αρμονικές, (κάποιες φορές και από formants).

Στην έξοδο (output) του αντικειμένου *sigmund~* έχουμε μια ροή από δεδομένα που είναι (συχνότητα, ένταση). Για να ξεχωρίσουμε τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν χρησιμοποιούμε το αντικείμενο *unpack*. Τέλος συνδέουμε τις συχνότητες από την ανάλυση FFT του αντικειμένου *sigmund~* με την κεντρική συχνότητα των τριών φίλτρων τα οποία είναι παράλληλα συνδεδεμένα, μια συχνότητα σε κάθε φίλτρο (Σχήμα 4.8).

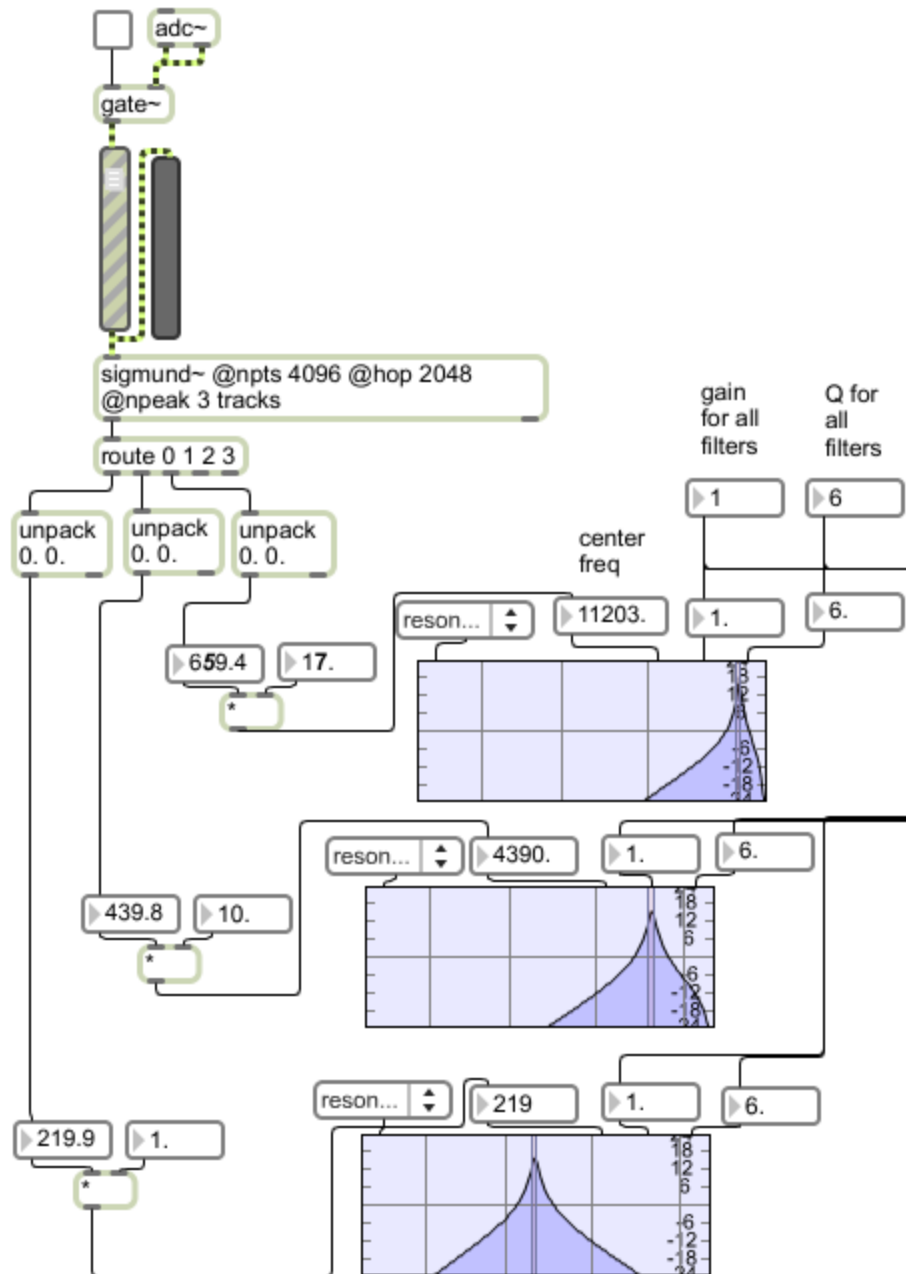
<sup>25</sup> Το αντικείμενο *sigmund~* δεν ανήκει στον βασικό κατάλογο αντικειμένων της max/msp δημιουργήθηκε από χρήστη και ανασύρθηκε από την διεύθυνση: <http://cra.ucsd.edu/~tapel/software.html>

#### 4.4 Σταθερή επιλογή παραμέτρων έλεγχου αφαιρετικής σύνθεσης (Patch 1)

Σε αυτό το patch δίνοντας έναν τόνο με την φωνή παίρνουμε κάποιες συχνότητες , και απενεργοποιώντας το μικρόφωνο τα φίλτρα κρατάνε σταθερά τις συχνότητες που έχουν ανίχνευση από την επεξεργασία που έκανε το αντικείμενο *sigmund~*. Έτσι ο εκτελεστής μπορεί να έχει ένα σταθερά διαμορφωμένο ηχόχρωμα της επιλογής του.

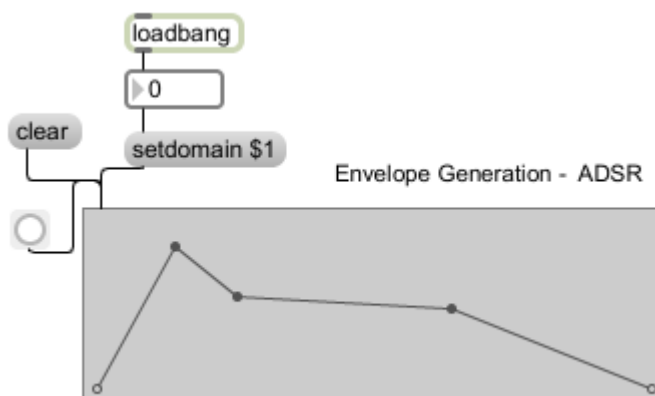
Η λειτουργία αυτή ελέγχεται μέσω του αντικείμενου *gate~* με το οποίο γίνεται ο διαχωρισμός ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του μικροφώνου ανεξαρτήτως όλου του patch, δηλαδή ο εκτελεστής/χρήστης έχει την δυνατότητα να δώσει κάποιο τονικό ύψος στο μικρόφωνο και απενεργοποιώντας αυτό (δηλ. το μικρόφωνο) οι τιμές των συχνοτήτων που εξήχθησαν από την ανάλυση του αντικειμένου *sigmund~* παραμένουν σταθερές δίνοντας μία σταθερή παραμόρφωση στην αρχική πηγή.





**Σχήμα 4.8** Η πρώτη εκδοχή του patch με την χρήση αντικειμένου *gate~*. Το μικρόφωνο με το αντικείμενο *adc~*, η ανάλυση της φωνής και η εξαγωγή τονικού ύψους δίνοντας την θεμέλιο και 2 αρμονικές γίνεται με το αντικείμενο *sigmund~*, και τα τρία φίλτρα που η κεντρική τους συχνότητα ορίζεται από τις συχνότητες που εξάγονται από το αντικείμενο *sigmund~*.

Επιπλέον έχουμε την δυνατότητα να ελέγξουμε την διάρκεια που θα έχει η περιβάλλουσα με το αντικείμενο *loadbang* δίνοντας την διάρκεια της στο αντικείμενο *number* (δηλαδή 1000 στο αντικείμενο *number* ισούται με ένα δευτερόλεπτο).



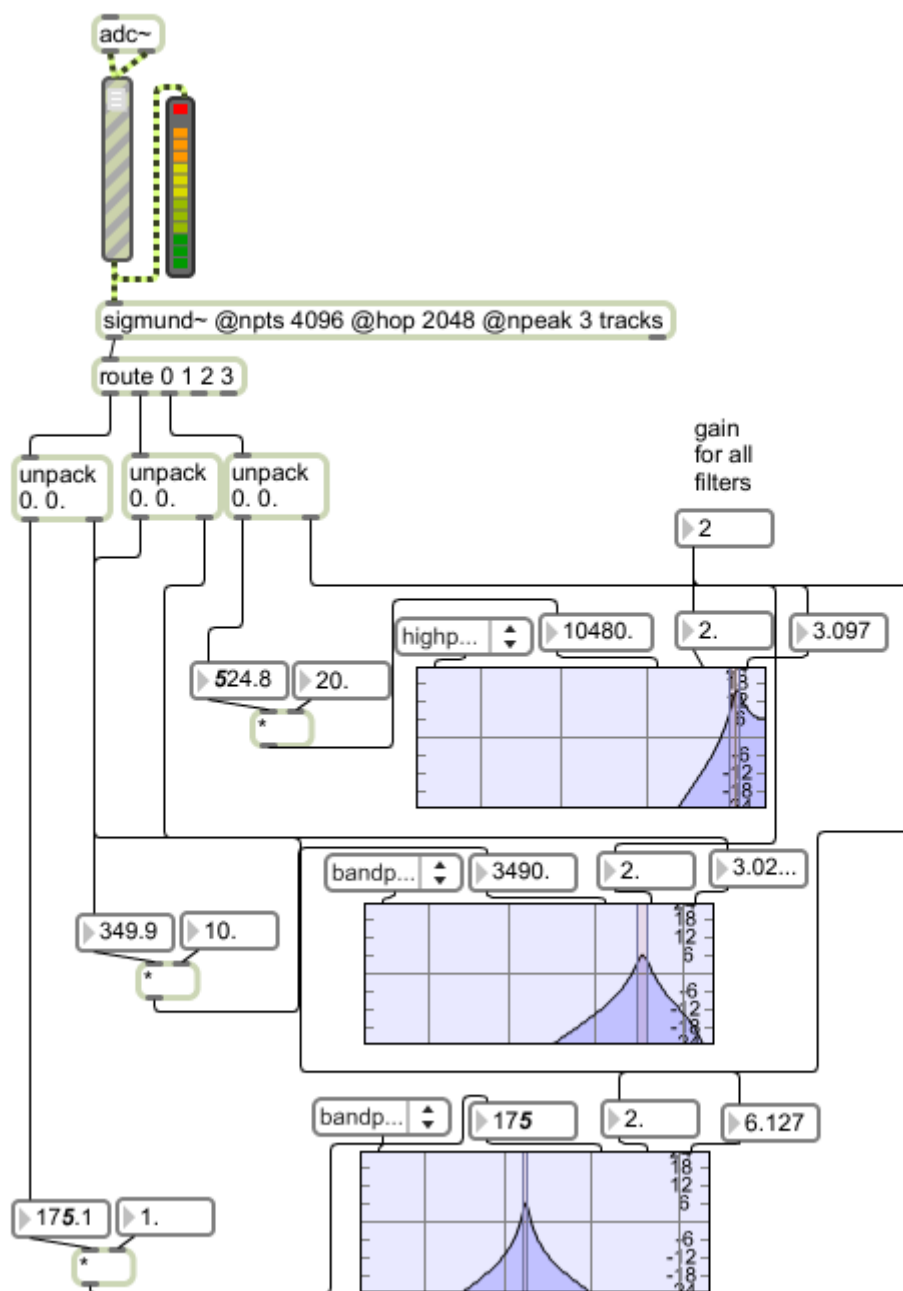
Σχήμα 4.9 Το αντικείμενο *loadbang*

#### 4.5 Μεταβολές του φάσματος σε πραγματικό χρόνο (real-time) (Patch 2)

Στην δεύτερη εκδοχή γίνεται τροποποίηση του φάσματος προηχογραφημένων ήχων σε πραγματικό χρόνο δημιουργώντας έτσι διάφορα ηχητικά εφέ. Επίσης έχουμε την χρήση επιπλέον αντικειμένων που θα περιγράψουμε παρακάτω.

Όπως αναφέραμε στην ενότητα 4.3 με το αντικείμενο *unpack~* γίνεται ο διαχωρισμός των δεδομένων του *sigmund~*. Από την πρώτη έξοδο παίρνουμε την συχνότητα και από την δεύτερη έξοδο του *unpack* παίρνουμε την ένταση της κάθε συχνότητας που ανιχνεύεται από το *sigmund~* και την συνδέουμε με το Q του φίλτρου, οπότε όσο πιο δυνατή η ένταση της φωνής τόσο στενότερο θα γίνεται και το φίλτρο. Τα φίλτρα συνδέονται το κάθε ένα ξεχωριστά με τρία αντικείμενα *biquad~* (Σχήμα 4.3 βλ. ενότητα 4.2).

Επίσης έχει την δυνατότητα ο χειριστής του συνθεσάιζερ να εισάγει στο patch έναν δικό του ήχο. Αυτό πραγματοποιείται με το αντικείμενο

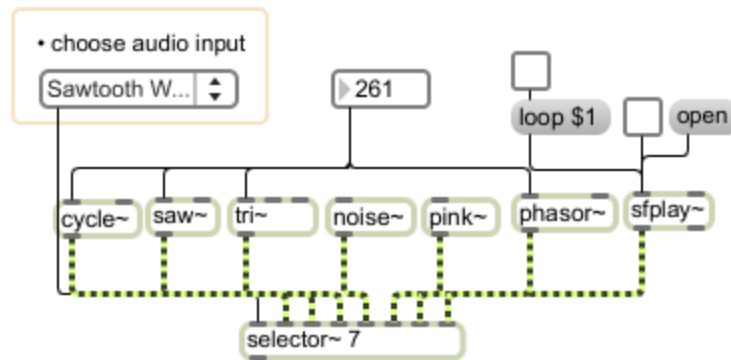


**Σχήμα 4.10** Δεύτερη εκδοχή του patch στην οποία η ποιότητα του φίλτρου ελέγχεται από την ένταση της φωνής/

*sfplay~* (sound file) και το μήνυμα *open* που ανοίγει το αρχείο ήχου.

Ένα ακόμη αντικείμενο που χρησιμοποιείται σε αυτό το patch είναι το *loop* με το οποίο επαναλαμβάνεται αυτόματα ένας ήχος μόλις τελειώσει η διάρκεια του, έτσι μπορούμε να δημιουργήσουμε έναν ήχο με μεγάλη διάρκεια. Φυσικά πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένος ο ήχος για να

μπορεί να γίνει με ομαλό τρόπο η μετάβαση από το τέλος στη αρχή του ήχου. Μεταβάλλοντας την φασματική περιβάλλουσα του ήχου μέσω των φίλτρων δημιουργείται ένας νέος συνεχής μεταβαλλόμενος ήχος.

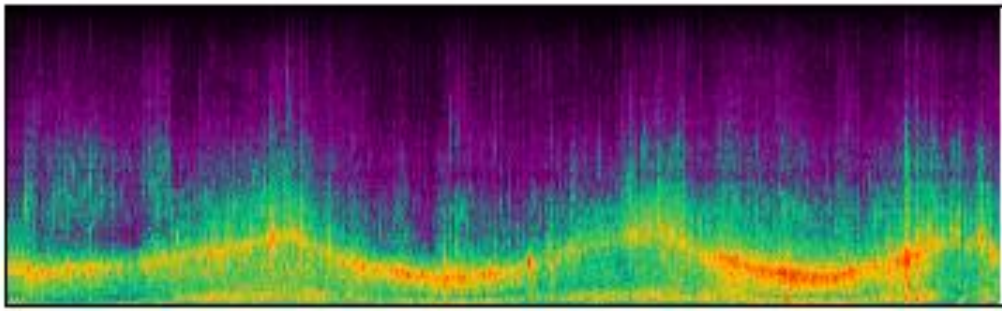


Σχήμα 4.11 Τα αντικείμενα *loop*, *sfplay~*.

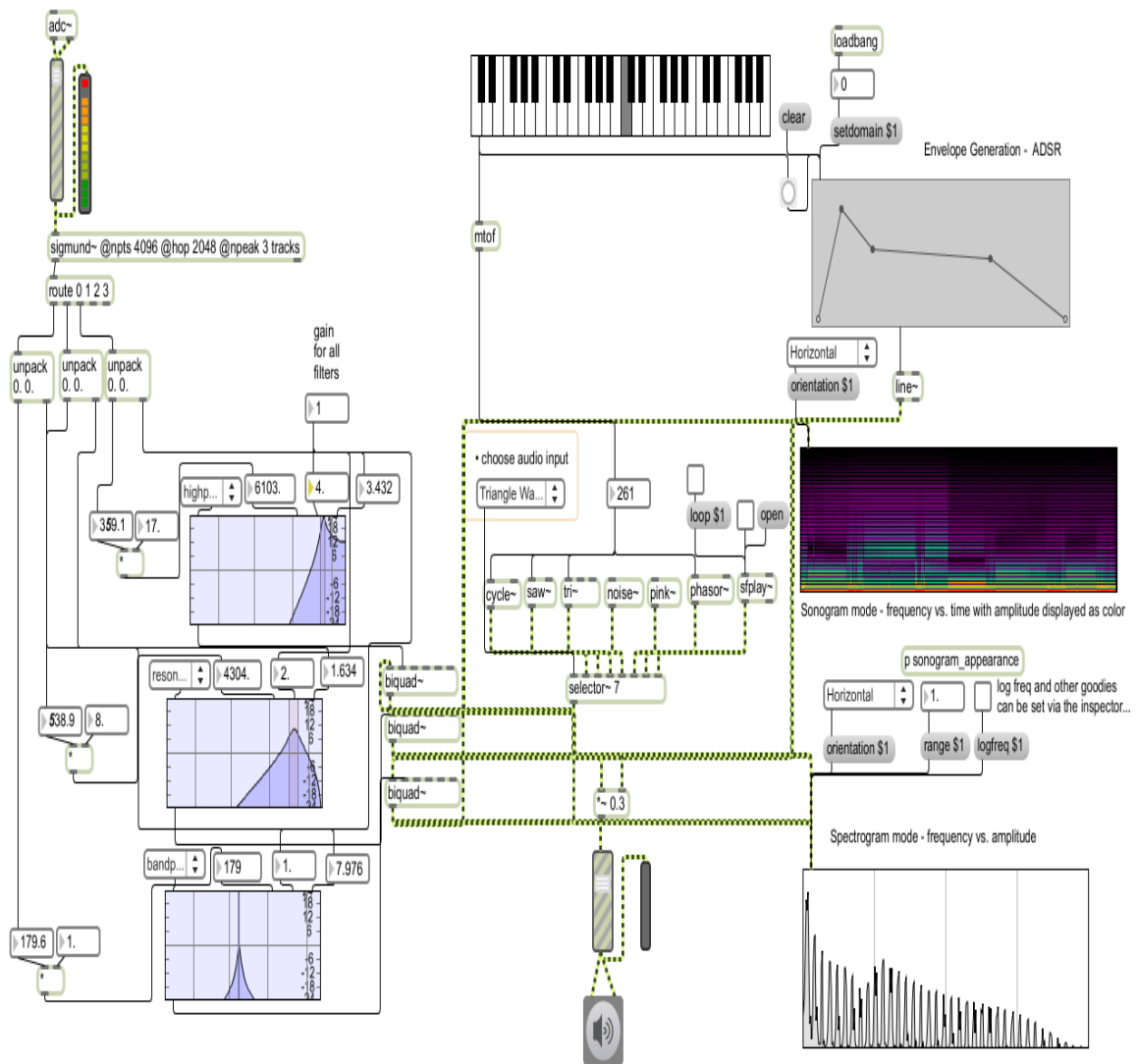
Αρχικός στόχος αυτού του project ήταν να βρούσαμε ένα αντικείμενο το οποίο θα επεξεργαζόταν την φωνή και θα εξήγαγε τους φωνοσυντονισμούς της (formants, βλ. ενότητα 2.9). Μέσω αυτό θα μπορούσαμε να ελέγξουμε την κεντρική συχνότητα των φίλτρων διαμορφώνοντας την ηχητική πηγή. Αφενός δεν βρέθηκε κάποιο κατάλληλο patch για εντοπισμό φωνοσυντονισμών (formant detection) για PC, αφετέρου ακόμα και αν βρούσαμε το αντικείμενο αυτό θα είχε χρηστικό μειονέκτημα όσον αφορά την τροποποίηση της φασματικής περιβάλλουσας του ήχου διότι, όπως εξηγήσαμε και στην ενότητα 2.9, από την φωνή εξάγεται ένα σύνολο αρμονικών που έχουν κορυφές οι οποίες είναι σταθερές και ανεξάρτητες από το τονικό ύψος της νότας που τραγουδιέται (τα formants αλλάζουν με την άρθρωση φωνημάτων όπως τα φωνήεντα αλλά όχι με το τονικό ύψος).

Καταλήξαμε στην χρήση του αντικειμένου *sigmund~* το οποίο εξάγει την συχνότητα η οποία τραγουδιέται από την φωνή. Επιπλέον κάνουμε χρήση του αντικειμένου πολλαπλασιασμού (*\*~*) για να έχουμε μία ποικι-

λία στην τροποποίηση της φασματικής περιβάλλουσας. Η χρήση αυτού του αντικείμενου έγινε διότι από την επεξεργασία που έκανε το αντικείμενο *sigmund* παίρναμε την θεμέλιο και δύο αρμονικές, (κάποιες φορές ίσως εντόπιζε αρμονικούς από την περιοχή των formants), με αποτέλεσμα οι συχνότητες που περνούσαν στα φίλτρα να είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους και έτσι δεν υπήρχε μεγάλο εύρος τιμών μεταξύ των κεντρικών συχνοτήτων στα φίλτρα άρα και λιγότερο δραστική διαμόρφωση του ήχου της πηγής. Με το αντικείμενο \*~ πολλαπλασιάζουμε τις συχνότητες αυθαίρετα με διαφορετικούς αριθμούς δεκαδικούς είτε ακέραιους οπότε η κεντρική συχνότητα των τριών φίλτρων έχει μεγάλο εύρος.



**Σχήμα 4.12** Εδώ είναι εμφανής οι μεταβολές ενός προ-ηχογραφημένου ήχου με πλούσιο φάσμα, εκτελώντας glissando με την φωνή.



Σχήμα 4.13 Τελική μορφή δεύτερου patch.

## Επίλογος

Η αφαιρετική σύνθεση είναι μια από τις πρώτες και πιο διαδεδομένες ιστορικά τεχνικές σύνθεσης. Η τεχνική αυτή ξεκινάει με μια πολύπλοκη κυματομορφή την οποία μεταβάλλει στη συνέχεια με χρήση φίλτρων. Οι αρχές που τη διέπουν είναι θεμελιώδεις, μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητές και έτσι η τεχνική αυτή είναι σχετικά προσιτή στον συνθέτη ηλεκτρονικής μουσικής.

Την δεκαετία του 90' με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, νέες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας του ήχου άρχισαν να γίνονται ιδιαίτερα δημοφιλείς και να εφαρμόζονται στα συνθεσάιζερ με αποτέλεσμα η αφαιρετική σύνθεση να χάσει τα πρωτεία. Όταν όμως στα μέσα της δεκαετίας εκφράστηκε ξανά το ενδιαφέρον για τον “ζεστό” ήχο της αφαιρετικής σύνθεσης, κάποιες εταιρίες έκαναν την αρχή και επανέφεραν την αφαιρετική σύνθεση με ψηφιακά εργαλεία επεξεργασίας σήματος. Με την χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας επίσης παραμερίστηκαν και κάποια ελαττώματα του αναλογικού ήχου (π.χ. αστάθεια τονικού ύψους λόγω θερμοκρασίας). Έτσι η αφαιρετική σύνθεση εξακολουθεί να είναι μια σημαντική τεχνική που εφαρμόζεται ευρέως στην ηλεκτρονική σύνθεση ήχου και στην σύγχρονη μουσική (Valimaki, 2011).

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την αφαιρετική σύνθεση ήχου μέσω χρήσης της ψηφιακής τεχνολογίας. Περιγράψαμε βασικά χαρακτηριστικά ενός αναλογικού αφαιρετικού συνθεσάιζερ, καθώς και την μεταφορά του σε μορφή λογισμικού. Τέλος προτείναμε μια νέα διαδραστική εφαρμογή στην γλώσσα προγραμματισμού Max/Msp η οποία επιτρέπει τον έλεγχο βασικών παραμέτρων της αφαιρετικής σύνθεσης σε πραγματικό χρόνο μέσω εξωτερικών ήχων (προηχογραφημένων ή από μικρόφωνο).

Η βασική ιδέα της διαδραστικής εφαρμογής που προτείνεται στην παρούσα εργασία είναι η δημιουργία ενός αφαιρετικού συνθεσάιζερ του οποίου το ηχόχρωμα μπορεί να διαμορφώνει ο χρήστης σε πραγματικό χρόνο με την φωνή του (μέσω μικροφώνου). Το σύστημα μπορεί να εξάγει βασικά τονικά χαρακτηριστικά από την φωνή, (όπως θεμέλιος και κάποιοι σχετικά ισχυροί αρμονικοί), και να χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά αυτά για τον έλεγχο των κεντρικών συχνοτήτων των φίλτρων καθώς και άλλων τεχνικών παραμέτρων της αφαιρετικής σύνθεσης. Η ανάλυση γίνεται με την τεχνική ανάλυσης Φουριέ (FFT) και με τεχνικές ανίχνευσης τονικού ύψους (pitch detection). Το συνθεσάιζερ που προτείναμε έχει δύο εκδοχές: 1) διαμόρφωση νέου ηχοχρώματος μέσω της φωνής και στη συνέχεια διατήρηση του ηχοχρώματος σταθερού (κλείνοντας το μικρόφωνο), και χρήση του μέσω keyboard και 2) συνεχής διαμόρφωση του ηχοχρώματος σε πραγματικό χρόνο από την φωνή μέσω αλλαγής της φασματικής περιβάλλουσας προ-ηχογραφημένων ήχων.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή φαίνεται να έχει, και από καλλιτεχνικής πλευράς και από καθαρά πρακτικής ή χρηστικής πλευράς, ενδιαφέροντα αποτελέσματα στον τομέα της διαδραστικής ηλεκτρονικής σύνθεσης. Περαιτέρω επέκταση και εξέλιξη της εφαρμογής αυτής ίσως μπορεί να προσφέρει ακόμη πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε επιπλέον να έχουμε τον έλεγχο κάποιων παραμέτρων των φίλτρων μέσω ενός ανιχνευτή κίνησης και μέσω του μικροφώνου να ελέγχουμε κάποιες άλλες παραμέτρους της αφαιρετικής σύνθεσης (της πηγής ή των τροποποιητών). Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε εξ' ολοκλήρου τον έλεγχο ενός αφαιρετικού συνθεσάιζερ χωρίς καμία χρήση διακοπών έτσι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική αυτή με πρωτότυπο δημιουργικό τρόπο στα πλαίσια, για παράδειγμα, διαδραστικής live performance.



Με την αξιοποίηση της επιστήμης και της τεχνολογίας για την κατασκευή ηλεκτρικών και στη συνέχεια ηλεκτρονικών συσκευών με σκοπό τη σύνθεση ήχου και μουσικής, ανοίγονται νέοι δρόμοι δημιουργίας στην ηλεκτρονική σύνθεση. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθιστά πιο εύκολη τη σύνθεση ήχου, εφόσον όλες οι λειτουργίες εφαρμόζονται σε αυτόν πιο γρήγορα και αποτελεσματικά, παρέχοντας συγχρόνως την δυνατότητα ευέλικτων και πολυαισθητηριακών τρόπων ελέγχου διαφόρων παραμέτρων με τρόπο φιλικό και διαισθητικά κατανοητό σε έναν χρήστη-μουσικό. Οι πρωτοποριακές τεχνολογικές δυνατότητες συνδυασμένες με την καλλιτεχνική δημιουργία μπορούν να προσφέρουν νέες συναρπαστικές συνθετικές εμπειρίες.

## Βιβλιογραφία

- **Curtis Roads (1996)**, *The Computer Music Tutorial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- **David Temperley (2007)**, *Music and Probability*, MIT Press.
- **David Gerhard (2003)**, *Pitch Extraction and Fundamental Frequency: History and Current Techniques*, Department of Computer Science University of Regina Regina, Saskatchewan, CANADA
- **Emmerson, Simon (2007)**, *Living Electronic Music* Aldershot: Ashgate.
- **F. Richard Moore (1990)**, *Elements of Computer Music*, Prentice-Hall.
- **Holmes, T. (2002)**, *Electronic and Experimental Music*. Routledge New York & London.
- **Holmes, T. (2008)**, *Electronic and experimental music*. 3rd edition, Routledge, New York.
- **Howard, D. M. and Angus, J. (1996)**, *Acoustics and Psychoacoustics*, (2<sup>nd</sup> ed.). Oxford: Focal Press.
- **Miranda, Eduardo Reck (2001)**, *Composing music with computers*, Focal Press, Oxford.

- **Miranda, Eduardo Reck (2002)**, *Computer Sound Design: Synthesis techniques and programming*, Focal Press, Oxford.
- **Pierce, John (2001)**, *Sound waves and Sine Waves*, In *Music, cognition, and computerised sound. An introduction to psychoacoustics*, Cook Perry R., The MIT press, Cambridge (Massachusetts).
- **Pope, Stephen Travis (ed.) (1991)**. *The well tempered object: Musical applications of object oriented technology*. Campridge: MIT Press.
- **Rossignol, S., Desain, P., and Honing, H. (2001)** State-of-the-art in fundamental frequency tracking. *Proceedings of Workshop on Current Research Directions in Computer Music*, 244-254. Barcelona: UPF.
- **Russ, Martin (2009)**, *Sound synthesis and sampling*. 3rd edition by Elsevier Ltd, Oxford.
- **Sethares, William A. (2005)**, *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*,(2nd ed.). New York: Springer.
- **Valimaki, Vesa & Pekonen, Jussi (2011)**. *The brief history of virtual analog synthesis*, proceedings of the conference Forum acusticum 2011, Aalborg Denmark.
- **Winkler, T. (1998)**. Motion-Sensing Music: Artistic And Technical Challenges in Two Works for Dance. Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC, 1998).
- **Winkler, Todd (2001)**. *Composing interactive music*. MIT Press, London

- **Διαμαντόπουλος Ταξιάρχης, (2004)**, Προγραμματισμός & Σύνθεση Ήχου. Εκδόσεις ΕΛΛΗΝ
- **Καμπουρόπουλος, Αιμίλιος (2006)**, σημειώσεις του μαθήματος: *Εισαγωγή στην μουσική πληροφορική*, του Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- **Κόκορας Παναγιώτης Α. (2007)**, σημειώσεις του μαθήματος: *Θεωρία και Τεχνικές στην Ηλεκτρονική Μουσική*, του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- **Λάζος, Ε. Κ. (2002)**, Εισαγωγή στην C ++ και στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό. Εκδόσεις Κ.Ε Λάζος
- **Παπαδέλης, Γεώργιος (2001β)**, σημειώσεις του μαθήματος: *Πληροφορική και Μουσικολογία II*, του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- **Παπαδέλης, Γεώργιος (2002)**, σημειώσεις του μαθήματος: *Εισαγωγή στη μουσική ακουστική I*, του Α.Π.Θ
- **Πλέσσας Αντώνης (2002)**, *Μουσική και Τεχνολογία*, Εκδόσεις Σύγχρονη Μουσική, Αθήνα
- **Πολίτης Διονύσιος (2007)**, *Μουσική Πληροφορική*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- **Συμβουλόπουλος Αντρέας (1994)**, *ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ*, Εκδόσεις Μουσικός οίκος ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΝΑΚΑΣ, Αθήνα, Ιανουάριος 1994
- **Χ. Σπυρίδης, Χαράλαμπος (2000)**, *ΦΑΚΕΛΟΣ* με θέματα μουσικής ακουστικής, Αθήνα.

- **Χ. Σπυρίδης, Χαράλαμος (2005),** *Φυσική και μουσική ακουστική*, Εκδόσεις GRAPHOLINE, Α' Έκδοση 2005
- **Χαδέλλης, Λουκάς (1992),** *Ήχος – Μουσική και Τεχνολογία*, Εκδόσεις Σύγχρονη Μουσική, Αθήνα.
- **Χαδέλλης, Λουκάς (2010),** *Τεχνολογία Ήχου*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, "ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ", Αθήνα

## Παράρτημα

### 1. Υπέρονοι (overtones)

Συνήθως, η χαμηλότερη συχνότητα της κυματομορφής, αυτή που έχει τη μεγαλύτερη περίοδο, ονομάζεται **θεμέλια συχνότητα ή θεμέλιος** (fundamental frequency). Οι υπόλοιπες συχνότητες που απαρτίζουν τον ήχο ονομάζονται **υπέρονοι** (overtones). Όταν οι υπέρονοι είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελίου τότε ονομάζονται **αρμονικοί**. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν δηλαδή όλες οι συχνότητες από τις οποίες αποτελείται ένας σύνθετος ήχος είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελίας συχνότητας, λέμε ότι το σύνολο των συχνοτήτων αποτελεί μια **αρμονική σειρά**. Μπορούμε να δομήσουμε μια αρμονική σειρά θεωρώντας ως θεμέλιο οποιαδήποτε συχνότητα, όπου:

$f_1$  (θεμέλιος ή πρώτος αρμονικός),

$f_2 = 2f_1$  (2<sup>ος</sup> αρμονικός),

$f_3 = 3f_1$  (3<sup>ος</sup> αρμονικός),

$f_n = nf_1$  (νιοστός αρμονικός) (Παπαδέλης, 2002, σελ. 25).



**Σχήμα 1** Προσέγγιση ύψους αρμονικών. Για μία θεμελιώδη συχνότητα συμβολίζετε με  $f$  HZ έτσι προκύπτουν σε  $1f$  (η πρώτη αρμονική ή θεμελιώδης),  $2f$  (η δεύτερη αρμονική),  $3f$  (τρίτη αρμονική) και ούτω καθεξής. Κατά προσέγγιση μουσικών υψών εμφανίζονται οι αρμονικές σε σχέση με μια θεμελιώδη συχνότητα που είναι το χαμηλό ντο.

Η κάθε μια συχνότητα της αρμονικής σειράς εκφράζει έναν ημιτονοειδή ήχο ο οποίος σε σχέση με τη θεμέλιο σχηματίζει ένα μουσικό διάστημα. Αν π.χ.  $f_1 = 32,7 \text{ Hz}$  τότε  $f_2 = 65,41 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 98 \text{ Hz}$ ,  $f_4 = 130,81 \text{ Hz}$ ,  $f_5 = 164,81 \text{ Hz}$  κ.ο.κ. που αντιστοιχούν στις νότες C1, C2, G2, C3, E3 (Σπυρίδης, 2000, σελ. 92).

## 2. Minimoog

Τα πρώτα συνθεσάιζερ παρουσίασης όπως το Moog Minimoog ενσωμάτωσαν κάποια από τα πρώτα λογικά βήματα μακριά από τη χρήση επιπρόσθετων καλωδίων και χειρονακτικά ελεγχόμενων παραμέτρων για να προκαθορίσουν ελέγχους για ορχηστρικές φωνές βασιζόμενοι σε τεχνικές προσθετικής και αφαιρετικής σύνθεσης (Holmes, 2008).

Το Minimoog δεν είχε επιπρόσθετα καλώδια και αν και δεν περιείχε συγκεκριμένες προκαθορισμένες φωνές απλοποιούσε πολύ καλά την τροποποίηση των ήχων παρέχοντας μόνο βασικούς ελέγχους στους φακέλους, στην ενίσχυση και σε άλλες διαμορφώσεις. Για παράδειγμα, ένα ταμπλό Emphasis με δέκα ρυθμίσεις μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ένα ταμπλό (φίλτρο) οριακής συχνότητας για να παράγει μια αιχμηρή αντήχηση στο φίλτρο. Η εξάλειψη των επιπρόσθετων καλωδίων με προκαθορισμένα κυκλώματα για τον έλεγχο των παραμέτρων του σχηματισμού κυμάτων απελευθέρωνε πολύ τον μουσικό ώστε να συγκεντρωθεί στο παίξιμό του. Αυτή ήταν μια καινοτόμα βελτίωση αλλά το παίξιμο του Minimoog εξακολουθούσε να μην είναι τόσο απλό όσο το γύρισμα ενός διακόπτη για να πάρεις τον επιθυμητό ήχο. Ως παράδειγμα, σημειώστε τις οδηγίες που έχουν παρθεί από το εγχειρίδιο λειτουργίας του Minimoog για την προσαρμογή των χαρακτηριστικών attack ενός ήχου<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Ο έλεγχος του χρόνου attack καθορίζει τη διάρκεια της αρχικής αύξησης στην ένταση στην κορυφή. Κλείστε την πηγή θορύβου και ανοίξτε τον oscillator 1. Κινείστε τον έλεγχο μπρος πίσω ενώ πατάτε επαναληπτικά ένα πλήκτρο. Παρατηρήστε τις διαφορετικές ποιότητες που αποκτά η νότα καθώς ένα απότομο attack γίνεται ένα αργό κρεσέντο.

Το Minimoog ακολούθησαν σύντομα πιο εξελιγμένα αναλογικά συνθεσάιζερ από τον Moog και άλλες εταιρείες που ενσωμάτωναν έναν αυξανόμενο αριθμό προκαθορισμένων ρυθμίσεων για να προσεγγίσουν τις χαρακτηριστικές φωνές πολλών οργάνων όπως τα βιολιά, τα πνευστά και τα πιάνο μεταξύ άλλων. Μέχρι το τέλος του 1970, η διαθεσιμότητα κυκλωμάτων υπολογιστή ολοένα και πιο οικονομικά άρχισε να βελτιώνει τα χαρακτηριστικά προγραμματισμού και ακολουθίας των αναλογικών συνθεσάιζερ, οδηγώντας τελικά σε πλήρως ψηφιακά όργανα χρησιμοποιώντας ένα νέο κύμα διαφόρων τεχνικών σύνθεσης (Holmes, 2008).

### 3. MAX/MSP

Η γλώσσα προγραμματισμού max/msp και οι πρώτες της εφαρμογές αναπτύχθηκαν στο μεγαλύτερο τους μέρος κατά την χρονική περίοδο 1980-1990, απορροφώντας ένα ευρύτατο πεδίο επιρροών μέχρις ότου φτάσει στην τελική της μορφή. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν στο ερευνητικό κέντρο IRCAM (institute de Recherche et Coordination Acoustic/Musicue) στο Παρίσι. Δημιουργός του προγράμματος ήταν ο μαθηματικός Miller Puckett, απόφοιτος του M.I.T. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε αρχικά προκειμένου να ελέγξει το synthesizer 4X που την εποχή εκείνη βρισκόταν στα στούντιο IRCAM και αποτελούσε τότε το πλέον ισχυρό μουσικό όργανο για την επεξεργασία σήματος (Winkel, 1998).

Η max ανήκει στις υψηλού επιπέδου (high-level) γλώσσες προγραμματισμού που έχει ενσωματώσει στοιχεία σπονδυλωτού προγραμματισμού (modular programming). Χρησιμοποιεί “αντικείμενα” σαν βασική μονάδα επικοινωνίας μέσα στο πρόγραμμα για να στέλνει και να αποκωδικοποιεί μηνύματα. Τα αντικείμενα αυτά είναι αυτόνομες μονάδες που εκτελούν μια συγκεκριμένη λειτουργία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές φορές. Αντικειμενοστραφείς γλώσσες επιτρέπουν στους προγραμματιστές να χτίσουν συστήματα σαν συλλογή από αλληλεπιδρούμενα



αντικείμενα, όπου το κάθε ένα μιμείται την συμπεριφορά μιας οντότητας από την πραγματικότητα (Pope, 1991). Αυτή η δυνατότητα ήταν σημαντική και συνάμα συναρπαστική αφού μετέφερε το βάρος του προγραμματισμού από το “πως γίνεται” κάτι στο “τι κάνει” αυτό, χαρακτηριστικό που βρίσκουμε στις 4 γενιάς γλώσσες προγραμματισμού (Winkler, 2001).

#### 4. Άλλες τεχνικές σύνθεσης ήχου

Εδώ αναφέρονται περιληπτικά κάποιες τεχνικές σύνθεσης ήχου:

##### **Προσθετική σύνθεση (Additive synthesis)**

Η πιο απλή μορφή της σύνθεσης ήχου είναι ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών κυμάτων σε μια πιο πολύπλοκη κυματομορφή. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προσθετική σύνθεση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθούν διάφοροι ήχοι χτίζοντας στρώματα πολλών ξεχωριστών ήχων. Η προσθετική σύνθεση βασίζεται στην παρατήρηση της θεωρίας του Fourier ότι ένας περιοδικός ήχος συντίθεται από μια θεμελιώδη συχνότητα, η οποία είναι κυρίαρχη, και μερικές, που έχουν μαθηματικά αρμονική σχέση με την θεμέλιο. Στα ηλεκτρονικά μουσικά στούντιο, οι ξεχωριστές συχνότητες και οι σχέσεις ενίσχυσής τους μπορούν να διαχειριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιγράψουν ή να τροποποιήσουν τον ήχο συνθετικά. Τα συνθεσάιζερ επιτρέπουν την δημιουργία πολύπλοκων ήχων από απλούστερα ξεχωριστά στοιχεία και προσφέρουν την δυνατότητα της διαχείρισης της συχνότητάς τους και των σχέσεων ισχύς τους. Η προσθετική σύνθεση ήταν η μέθοδος που χρησιμοποιούνταν από πολλούς από τους πρώτους συνθέτες ηλεκτρονικής μουσικής. Τα πρώτα πειράματα του Stockhausen με παραγωγούς ημιτονοειδών κυμάτων ξεκίνησαν ως ασκήσεις στην προσθετική σύνθεση (Holmes, 2008).

### **Διαμόρφωση Ισχύος (Amplitude Modulation)**

Η διαμόρφωση ισχύος (AM) είναι η χρήση μιας τάσης ελέγχου για να τροποποιήσει (διαμορφώσει) την ένταση ενός άλλου σήματος. Ο ήχος που διαμορφώνεται ονομάζεται σήμα μεταφορέας (carrier signal). Όταν ένα υποακουστικό σήμα χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα δεδομένο κύμα ήχου, το αποτέλεσμα είναι ένα αργό, κυματιστό εφέ που ονομάζεται τρέμολο στο οποίο η ένταση του ήχου γίνεται εναλλακτικά πιο δυνατή και πιο απαλή αλλά χωρίς να αλλάζει το pitch. Η ένταση ανεβαίνει και κατεβαίνει γύρω από μια κεντρική ισχύ (Holmes, 2002)

Όλοι οι τύποι των κυματομορφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σήματα ελέγχου. Η χρήση ενός ημιτονοειδούς κύματος για να διαμορφώσει τον μεταφορέα κάνει την ηχηρότητα να ανεβαίνει και να κατεβαίνει πολύ σταδιακά. Ένα τρίγωνο κύμα θα επηρεάσει μια βαθμιαία άνοδο στην ένταση που γυρνάει προς τα κάτω απότομα και πέφτει σταδιακά, μόνο για να αλλάξει ξανά διευθύνσεις πολύ απότομα. Η χρήση ενός παλμικού κύματος ως σήμα διαμόρφωσης της ισχύος εξαλείφει τις διάφορες κλίσεις μεταξύ δυνατού και απαλού και κάνει τον μεταφορέα να αλλάζει αμέσως μεταξύ των δύο άκρων (Holmes, 2002).

### **Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Modulation)**

Η διαμόρφωση συχνότητας (FM) είναι η χρήση μιας τάσης ελέγχου για να τροποποιήσει τη συχνότητα (pitch) του ήχου. Μια υποακουστική τάση ελέγχου θα παράγει το εφέ βιμπράτο, που είναι ένας κυματισμός του pitch γύρω από τον κεντρικό τόνο του μεταφορέα. Όπως στην διαμόρφωση ισχύος, όταν η τάση ελέγχου είναι μέσα στο ακουστικό πεδίο συχνότητας, το σήμα που προκύπτει περιέχει αρμονικές του θεμελιώδες κύματος. Η πολυπλοκότητα και οι αρμονικές των FM sidebands είναι πολύ πιο περίπλοκα και πλούσια από αυτά που παράγονται από τα AM. Αντίθετα από τα AM, τα FM sidebands μπορεί τελικά να κυριαρχήσουν στον τόνο μεταφορέα (Holmes, 2002).

## Ring modulation

Η διαμόρφωση δακτυλίου (ring) είναι μια μορφή διαμόρφωσης της ισχύος στην οποία ειδικό κύκλωμα καταστέλλει το σήμα της θεμελίου και αναπαράγει μόνο τις αρμονικές συχνότητες. Δύο επιπρόσθετες συχνότητες δημιουργούνται στη θέση του αρχικού σήματος μεταφορέα. Η μία είναι ίση με το άθροισμα των δύο εισαγόμενων συχνοτήτων και η άλλη είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ τους. Αν το εισαγόμενο σήμα έχει πολλές αρμονικές, όπως η κιθάρα ή η ανθρώπινη φωνή, το παραγόμενο σήμα που προκύπτει είναι πολύπλοκο και πλούσιο, ένα είδος φαντάσματος του αρχικού ήχου. Ο αναλογικός ring modulator έχει ένα δεύτερο εισαγόμενο σήμα σε μορφή oscillator. Αυτό μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να στενέψει ή να διευρύνει την απόσταση μεταξύ των δύο συχνοτήτων που παράγονται από το εφέ (Holmes, 2002).