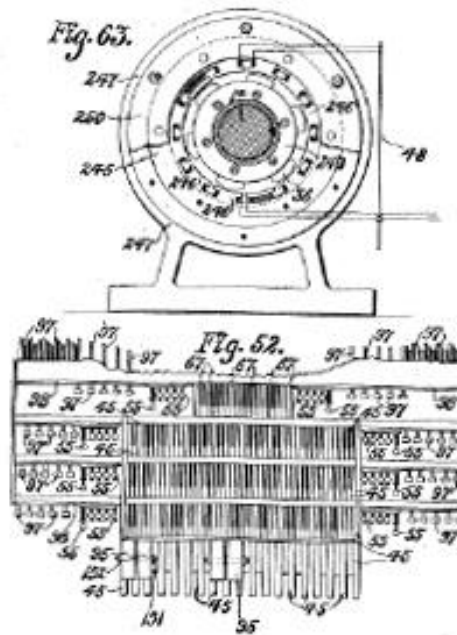


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΕΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΙΩΤΑΚΗ ΙΩΑΝΝΑ Α.Ε.Μ. 817



Θέμα: Ηλεκτρονική σύνθεση ήχου:

Η τεχνική της Προσθετικής Σύνθεσης

Επιβλέπων καθηγητής: Αιμίλιος Καμπουρόπουλος

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2004

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	i
Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - Φασματική ανάλυση	4
1.1. Ηχόχρωμα και φάσμα	4
1.1.1. Διαστάσεις του ήχου	4
1.1.2. Ορισμός ηχοχρώματος	5
1.1.3. Φάσμα (spectrum)	7
1.1.4. Ανάλυση Fourier	8
1.1.5. Περιβάλλουσα	12
1.2. Γραφική αναπαράσταση ηχητικών σημάτων	14
1.2.1. Γραφική παράσταση στον τομέα του χρόνου	14
1.2.2. Γραφική παράσταση στον τομέα της συχνότητας	15
1.2.2.1. Γραφικές παραστάσεις με στατικό φάσμα	16
1.2.2.2. Γραφικές παραστάσεις με μεταβαλλόμενο στο χρόνο φάσμα	19
1.3. Εφαρμογές φασματικής ανάλυσης ή ανάλυσης Fourier	21
1.3.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή	21
1.3.2. Αρμονική ανάλυση	23
1.3.2.1. Short-time Fourier transform (STFT)	23
1.3.2.1.1. Λειτουργία της FFT	24
1.3.2.1.2. Παραθυροποίηση (windowing) του σήματος εισόδου	27
• Η περιβάλλουσα του παράθυρου	27
• Το μέγεθος του παράθυρου	29
• Ο παράγοντας της επικάλυψης	29
1.3.2.2. Ανάλυση Wavelet	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – Η τεχνική της προσθετικής σύνθεση	33
2.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή της προσθετικής σύνθεσης	33
2.2. Στοιχειώδεις γεννήτριες ήχου (unit generators) που χρησιμοποιούνται στην προσθετική σύνθεση	38
2.2.1. Ψηφιακός ταλαντωτής (oscillator)	38
2.2.2. Γεννήτρια περιβάλλουσας (envelope generator)	39

2.3. Ψηφιακή προσθετική σύνθεση	42
2.4. Προσθετική σύνθεση με στατικό φάσμα	44
2.5. Προσθετική σύνθεση με μεταβαλλόμενο στο χρόνο φάσμα	49
2.6. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες προσθετικής σύνθεσης	51
2.7. Ανάλυση / ανασύνθεση	52
2.8. Οι αισθητικές αναζητήσεις των συνθετών πηγές για έλεγχο δεδομένων στην προσθετική σύνθεση	55
2.9. Επίλογος	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο- Λογισμικά που χρησιμοποιούν τη τεχνική της προσθετικής σύνθεσης	57
3.1. Σύνθεση ήχου με λογισμικό (software synthesis)	58
3.2. Παρουσίαση και σχολιασμός λογισμικών	58
3.2.1. Adobe Audition 1.5	58
3.2.1.1. Σχολιασμός μονάδας Generate Tones του Adobe Audition	61
3.2.2. Virtual Waves 2.22	62
3.2.2.2. Σχολιασμός της μονάδας προσθετικής σύνθεσης του λογισμικού Virtual Waves 2.22	65
3.2.3. Reaktor 3.05	66
3.2.3.1. Γενικές ιδιότητες του Reaktor 3.05	66
3.2.3.2. Το Add-1, ψηφιακός συνθετητής προσθετικής σύνθεσης του Reaktor	67
3.2.3.3. Σχολιασμός ψηφιακού συνθετητή Add-1 του Reaktor	69
3.2.4. Max/MSP	71
3.2.4.1. Εισαγωγικό Patch προσθετικής σύνθεσης της Max/MSP	72
Επίλογος	75
Βιβλιογραφία	76
Διαδικτυακοί Δεσμοί (Links)	79

Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα οι συνθέτες αρχίζουν να δίνουν μια σημαντικότερη θέση στο ηχόχρωμα ως ένα από τα χαρακτηριστικά του ήχου μέσα στις συνθέσεις τους. Νιώθουν όλο και περισσότερο την ανάγκη μεγαλύτερης εξερεύνησης και αξιοποίησης του ηχοχρώματος των οργάνων. Έτσι, πειραματίζονται με θεμελιώδη μοντέλα ανεξάρτητων οργάνων, τα οποία όμως έχουν πεπερασμένα όρια χειρισμού του ηχοχρώματος.

Σε αυτή την προσπάθεια αναζήτησης νέων μοντέλων που ασχολούνται με τη σημασία του ηχοχρώματος στη μουσική σύνθεση, πολλοί συνθέτες και ερευνητές άντλησαν έμπνευση από ψυχολογικές θεωρίες της αντίληψης του ήχου. Από εκεί προήλθαν και δύο νέοι επιστημονικοί κλάδοι η ψυχοακουστική και οι γνωστικές επιστήμες (Miranda, 2001, σελ. 4).

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. Η είσοδος των συνθετητών δίνει νέες δυνατότητες στους συνθέτες για αξιοποίηση και εργασία με μεγαλύτερη ευκολία πάνω στο ηχόχρωμα.

Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στη μουσική είναι μια εξέλιξη της προηγούμενης γενιάς εξοπλισμού των ηλεκτρονικών συσκευών. Έτσι, από τα τέλη της δεκαετίας του 50, η ψηφιακή τεχνολογία ήχου αντικαθιστά σιγά σιγά την αναλογική τεχνολογία. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθιστά πιο εύκολη τη σύνθεση ήχου, εφόσον όλες οι λειτουργίες εφαρμόζονται σε αυτόν πιο γρήγορα και αποτελεσματικά. Σήμερα, οι υπολογιστές είναι ιδιαίτερα ικανοί να συνθέτουν ήχους οι οποίοι είναι δύσκολο να ξεχωρίσουν από τους φυσικούς ήχους.

Το θέμα της παρούσας εργασίας ασχολείται με την παλαιότερη από τις τεχνικές σύνθεσης ήχου με τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας, την τεχνική της

προσθετικής σύνθεσης. Βέβαια, αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται πολύ καιρό πριν από την είσοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με τη λογική της προσθετικής σύνθεσης, κατασκευάστηκε το πρώτο ηλεκτρικό μουσικό όργανο. Ουσιαστικά, η τεχνική αυτή, εφαρμόζεται από τότε που οι άνθρωποι άρχισαν να κατασκευάζουν όργανα με σωλήνες και αυτό γιατί η λογική της είναι πολύ απλή. Βασίζεται στην αρχή, ότι σύνθετοι ήχοι μπορούν να κατασκευαστούν από την άθροιση απλών ήχων. Ουσιαστικά, θεμελιώθηκε πάνω σε μια θεωρία των αρχών του δεκάτου ενάτου αιώνα, τη θεωρία της ανάλυσης του Fourier. Ο Fourier απέδειξε ότι κάθε σύνθετος περιοδικός ήχος, δηλαδή κάθε ήχος με τονικό ύψος, αποτελείται από ποικίλες ημιτονοειδείς συνιστώσες, όπου οι συχνότητες των υψηλότερων συνιστωσών είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας της χαμηλότερης συνιστώσας. Το αποτέλεσμα της παρουσίας των συγκεκριμένων κυματομορφών είναι το ηχόχρωμα, όπως θα ακουγόταν, παραδείγματος χάρη, μια συγχορδία, στην οποία μια νότα με μεγάλη ένταση παίζεται ταυτόχρονα με άλλες που έχουν διαφορετική ένταση η κάθε μια (Miranda, 2002, σελ. 49). Έτσι, η τεχνική της προσθετικής σύνθεσης βασισμένη στην ανάλυση του Fourier συνθέτει τόσο τονικούς ήχους όσο και μη τονικούς, δηλαδή σύνθετους ήχους που περιέχουν μη ακέραια πολλαπλάσια μιας συχνότητας.

Για να φτιάξει όμως κάποιος συνθέτης χρήσιμα και ενδιαφέροντα ηχοχρώματα οφείλει να γνωρίζει το αρμονικό περιεχόμενο των πραγματικών οργάνων (Russ, 1996, σελ. 109). Η μελέτη των πραγματικών οργάνων πραγματοποιείται μέσα από μεθόδους ανάλυσης που αποτελούν μια πρακτική εφαρμογή της ανάλυσης του Fourier.

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας ασχολείται με τη φασματική ανάλυση επιχειρώντας να δώσει μια εικόνα για το περιεχόμενο ως προς τις συνιστώσες των ήχων των φυσικών οργάνων. Αρχικά, γίνεται μια γενική αναφορά στο ηχόχρωμα και στη συνέχεια επικεντρώνεται στο φάσμα και την περιβάλλουσα του ήχου, στοιχεία που είναι αναγκαία να γνωρίζει κάποιος προτού ξεκινήσει την σύνθεση ήχου με την προσθετική σύνθεση. Κατόπιν, γίνεται μια εισαγωγή σε

γραφικές αναπαραστάσεις ήχων που αποτελούν ένα χρήσιμο σημείο έναρξης της σχέσης μεταξύ σχήματος (γραφική αναπαράσταση) και αντίληψης (ήχος) των ηχητικών φαινομένων για να φτάσουμε στην επεξήγηση μηχανισμών αρμονικής ανάλυσης. Ο λόγος που γίνεται αυτή η αναφορά είναι γιατί είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζει κάποιος πώς να χειρίζεται μηχανισμούς ανάλυσης ήχων ώστε να μπορεί να ανακαλύπτει την εσωτερική τους δομή και να χρησιμοποιεί αυτή τη γνώση στην αντίστροφη πορεία σύνθεσης νέων ήχων.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την τεχνική της ψηφιακής προσθετικής σύνθεσης. Αφού παρουσιαστούν οι στοιχειώδεις γεννήτριες ήχου που αποτελούν τις βασικές μονάδες παραγωγής ήχου, ακολουθεί η σύνθεση τόσο σύνθετων κυματομορφών των οποίων το φάσμα παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια του χρόνου, όσο και ήχων που παρουσιάζουν φάσμα το οποίο μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και οι δυσκολίες της τεχνικής αυτής καθώς και κάποιες εναλλακτικές μέθοδοι που δίνουν λύσεις σε αυτά τα προβλήματα.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια λογισμικά που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή, με στόχο μια καλύτερη κατανόησή της μέσα από την πρακτική της εφαρμογή.

Η μελέτη αυτή αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών της Σχολής Καλών Τεχνών του Α.Π.Θ. και έγινε υπό την επίβλεψη του λέκτορα κ. Α. Καμπουρόπουλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμότατα.

Φιωτάκη Ιωάννα

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2004

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο- Φασματική ανάλυση

1. Ηχώχρωμα και φάσμα

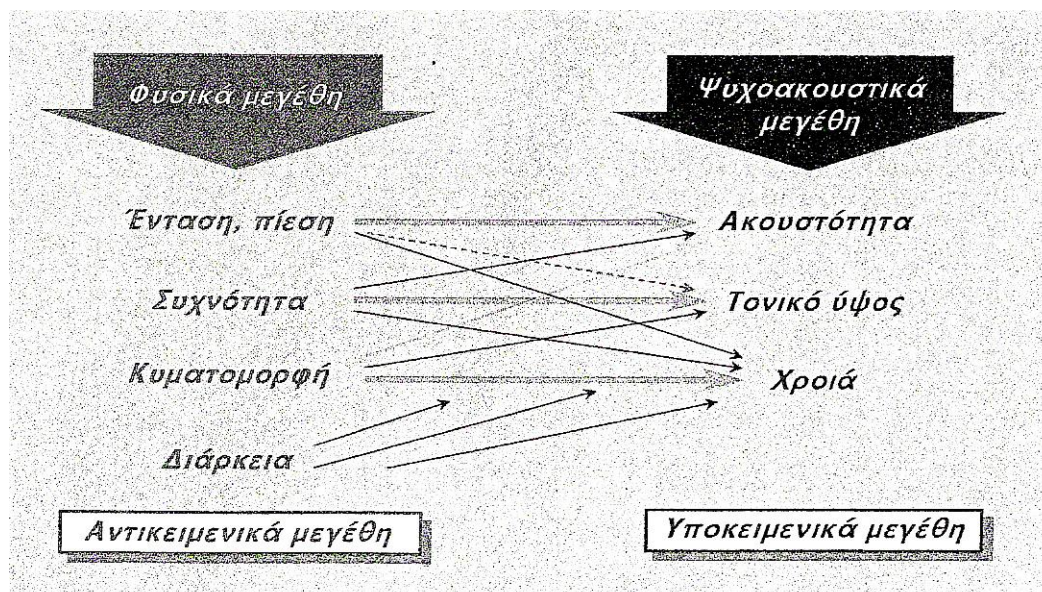
1.1. Διαστάσεις του ήχου

Ο ήχος, κατά τη μελέτη των ηχητικών φαινομένων, εξετάζεται από δύο διαφορετικές σκοπιές: ως φυσικό και ως ψυχοφυσικό φαινόμενο. Στη φυσική είναι μια φυσική διαταραχή του μέσου διάδοσης (Παπανικολάου, 1995, σελ. 1). Στον κλάδο της ψυχοακουστικής, είναι η αίσθηση που προκαλείται από τον ερεθισμό των οργάνων της ακοής λόγω των διαταραχών του μέσου διάδοσης (Sethares, 1999, σελ. 11).

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου είναι τα εξής: α) χρόνος, β) ένταση, πίεση, γ) συχνότητα και δ) κυματομορφή. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος τις κωδικοποιεί και αντιλαμβάνεται τέσσερις ποιότητες του ήχου: α) διάρκεια, β) ακουστότητα, γ) τονικό ύψος και δ) χροιά. Αυτές οι αντιληπτικές ποιότητες οργανώνονται ως ψυχολογικές διαστάσεις του ήχου ή αλλιώς ως ψυχοακουστικά μεγέθη.

Όπως αναφέρουν οι Dowling και Harwood (1986, σελ. 19), το θεμελιωδέστερο πρόβλημα της ακουστικής γνωσιολογίας είναι το πώς αυτές οι

ψυχολογικές διαστάσεις συνδέονται με τα φυσικά ακουστικά κύματα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες χαρακτηριστικές συσχετίσεις φυσικών μεγεθών με αντίστοιχα ψυχοακουστικά. «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). Εξετάζοντας τον πίνακα, παρατηρούμε ότι όλα τα φυσικά μεγέθη συμβάλλουν στη δημιουργία του ηχοχρώματος (πίνακας 1).



Πίνακας 1 Συσχετισμός φυσικών και ψυχοακουστικών μεγεθών. Το πάχος κάθε βέλους υποδηλώνει τη σημαντικότητα της σχέσης μεταξύ των συσχετιζόμενων μεγεθών (Γ. Παπαδέλης, 2001α, σελ. 8)

1.2. Ορισμός ηχοχρώματος

Ένας πλήρης ορισμός του ηχοχρώματος δεν έχει δοθεί. Πολλοί ερευνητές εργάζονται πάνω στην εξερεύνηση του ηχοχρώματος, παρ' όλα αυτά όμως κανείς ορισμός δεν είναι επαρκής. Υπάρχουν δυσκολίες για το πια χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος θα μπορούσαν ή δε θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι παίζουν κάποιο ρόλο στην αντίληψη του ηχοχρώματος.

Ένας συνηθισμένος ορισμός στον κλάδο της ψυχοακουστικής είναι ότι το ηχόχρωμα είναι αυτό το χαρακτηριστικό της ακουστικής αίσθησης κατά το οποίο ένα άτομο μπορεί να κρίνει ότι δύο όμοια παρουσιαζόμενοι ήχοι με την ίδια ένταση και το ίδιο τονικό ύψος είναι ανόμοιοι. Σε αυτό τον ορισμό για παράδειγμα, απουσιάζει η σχέση του ηχοχρώματος με άλλα χαρακτηριστικά του ήχου.

Ένας πληρέστερος ορισμός, αναφέρει το ηχόχρωμα ως το χαρακτηριστικό της αίσθησης της ακοής όπου ο ακροατής μπορεί να κρίνει ότι δύο ήχοι είναι διαφορετικοί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε κριτήριο εκτός από το τονικό ύψος, την ένταση και τη διάρκεια. Και αυτός ο ορισμός αγνοεί τις αλληλεπιδράσεις που ασκούν το τονικό ύψος, η ένταση και η διάρκεια στο ηχόχρωμα (Hajda et al., 1997, σελ. 256).

Ο Helmholtz (1877-1954) θεωρεί το ηχόχρωμα ως μια ποιότητα του ήχου αναφερόμενος όμως μόνο στο σταθερό μέρος των μουσικών ήχων. Με αυτό τον τρόπο διαφοροποιεί το ρόλο των αιφνίδιων μεταβολών του ήχου (transients) και του χαρακτηριστικού ήχου των οικογενειών των οργάνων, στην αντίληψη του ηχοχρώματος. Παρ' όλα αυτά, μελέτησε μόνο την αρμονική δομή των φυσικών ήχων.

Σύμφωνα με τον Seashore (1938-1967), το ηχόχρωμα είναι το χαρακτηριστικό το οποίο βασίζεται πάνω στην αρμονική δομή του ήχου καθώς μεταβάλλεται από το απόλυτο τονικό ύψος (συχνότητα) και τη συνολική ένταση. Το ηχόχρωμα ανταποκρινόταν σε ένα μόνο κύκλο του περιοδικού σήματος. Η συνολική ποιότητα του ήχου που προέκυπτε από την συγχώνευση του μεταβαλλόμενου ηχοχρώματος,

του τονικού ύψους και της έντασης ονομαζόταν «sonance» (Hajda et ál., 1997, σελ. 256).

Ένας μεταγενέστερος ορισμός, από το American National Standards Institute, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη χρονική εξέλιξη του ήχου, θεωρεί ότι το ηχόχρωμα εξαρτάται κυρίως από το φάσμα του ηχητικού σήματος, αλλά επίσης εξαρτάται από την κυματομορφή, την ακουστική πίεση, τη θέση των συχνοτήτων στο φάσμα και τα χρονικά χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος (Hajda et ál., 1997, σελ. 256).

Συνεπώς, κατά την ακρόαση ενός ήχου αντιλαμβανόμαστε το ηχόχρωμα 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, σελ. 544).

Συστηματικές έρευνες για την αντίληψη του ηχοχρώματος έχουν γίνει από θεωρητικούς της μουσικής, μουσικούς ερευνητές που κάνουν χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και ψυχοακουστικούς ερευνητές. Η έρευνα και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών βοήθησαν πολύ στην πρόοδο της εξερεύνησης και κατανόησης των ποικίλων συστατικών αυτού που παραδοσιακά ονομάζουμε ηχόχρωμα (Phil Burk et ál., 2002).

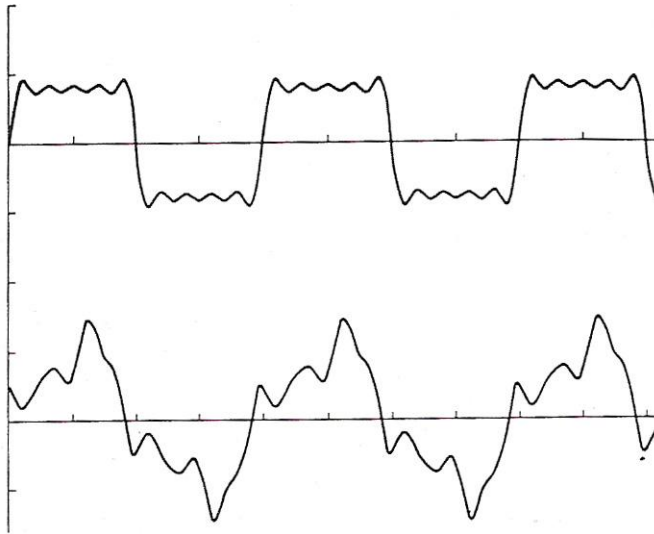
Από όλα αυτά τα στοιχεία, εκείνα που μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα και που είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε προτού φτάσουμε στη σύνθεση του ήχου με την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης, είναι το φάσμα του και η περιβάλλουσα.

1.3. Φάσμα (spectrum)

Ένας ορισμός για το φάσμα είναι ότι πρόκειται για «ένα μέτρο της κατανομής της ενέργειας του σήματος σαν μία συνάρτηση της συχνότητας» (Roads, 1996, σελ. 536). Η απεικόνιση της κατανομής της ισχύος του σήματος στις διάφορες

συχνότητες λέγεται **ανάλυση φάσματος (spectrum analysis)** (Παπαδέλης, 2001β, σελ. 4). Το φάσμα αποτελεί μια πλήρη περιγραφή μιας κυματομορφής, περιγράφοντας το πλάτος και τη φάση κάθε μιας συνιστώσας της συχνότητας (Pierce, 2001, σελ. 46).

Προτού, όμως, προχωρήσουμε την εξέταση του φάσματος, θα ήταν καλό να γίνει μια διασαφήνιση σχετικά με τη φάση. 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 1.1).

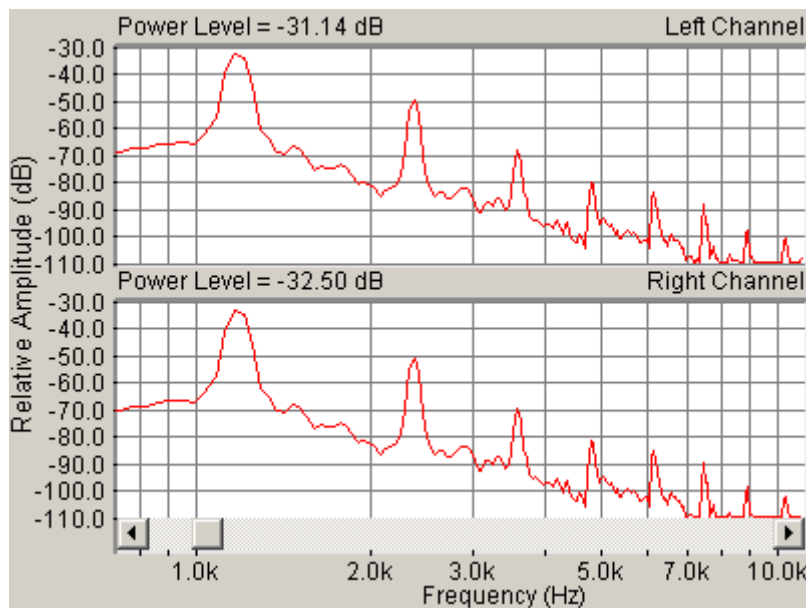


Σχήμα 1.1 Δύο κυματομορφές με το ίδιο φάσμα, αλλά με διαφορετικές σχέσεις φάσεων μεταξύ των συνιστωσών τους. Παρ' όλο που το σχήμα αλλάζει, η διαφορά στο άκουσμα δεν είναι αισθητή (Roads, 1996, σελ. 746)

Παρ' όλο που το ανθρώπινο αυτί ασχολείται κυρίως με το αρμονικό περιεχόμενο, η διαφορά φάσης των αρμονικών μπορεί να γίνει σημαντική σε πολύ

χαμηλές συχνότητες (π. χ. 27.5 Hz) και χρησιμοποιώντας ακουστικά. Εν μέρει, επειδή δεν ακούμε μέσω ακουστικών και επειδή τα περισσότερα τονικά ύψη είναι άνω των 27.5 Hz, τα περισσότερα φάσματα δε λαμβάνουν υπόψη τους τη φάση (Pierce, 2001, σελ. 47). Έτσι, στα διαγράμματα φάσματος, το διάγραμμα της φάσης σπάνια εμφανίζεται.

Όταν μιλάμε για φάσμα, λοιπόν, αναφερόμαστε σε ένα διάγραμμα του πλάτους (ή της ενέργειας) ως προς τη συχνότητα (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Γραφική παράσταση πλάτους – συχνότητας, η οποία προέρχεται από την ανάλυση φάσματος ενός δείγματος χρονικής διάρκειας 5 sec νότας D6 (1174,66 Hz) ενός πιάνου

Το φάσμα ενός φυσικού οργάνου αλλάζει στο χρόνο και αν αυτή η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα, ή δυναμικό φάσμα (dynamic spectrum), απουσιάζουν (όπως μερικές φορές συμβαίνει στους ηλεκτρονικά παραγόμενους

τόνους), τότε αντιλαμβανόμαστε τον ήχο σαν να έχει παραχθεί τεχνητά (Roads, 1996, σελ. 1065).

Η ανάλυση του φάσματος χρησιμοποιεί τεχνικές οι οποίες είναι βασισμένες στην ανάλυση του Fourier, για να αποκαλύψει την εσωτερική δομή του ήχου (Roads, 1996, σελ. 1075).

1.1.4. Ανάλυση Fourier

Τα περισσότερα μουσικά όργανα παράγουν ήχους οι οποίοι είναι σχεδόν περιοδικοί, δηλαδή ένας ολόκληρος κύκλος της κυματομορφής επαναλαμβάνεται, ή σχεδόν επαναλαμβάνεται, ξανά και ξανά (Pierce, 2001, σελ. 44). Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με την ανάλυση φαινομένων που χαρακτηρίζονται από περιοδικότητες.

Οι πρώτες προσπάθειες μαθηματικής θεμελίωσης των περιοδικών φαινομένων ξεκινούν ήδη από το 18^ο αιώνα¹. Μια θεμελιωμένη, όμως, θεωρία για τα περιοδικά φαινόμενα έγινε το 1822, από τον Γάλλο μηχανικό και αριστοκράτη **Jean-Baptiste Joseph, Baron de Fourier** (1768-1830) που ανέπτυξε τη θεωρία ότι πολύπλοκες ταλαντώσεις μπορούν να αναλυθούν ως ένα άθροισμα από πολλά ταυτόχρονα απλά σήματα². Συγκεκριμένα, ο Fourier απέδειξε ότι κάθε περιοδική κυματομορφή (κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, που ονομάζονται συνθήκες Dirichlet) μπορεί να αναλυθεί σε μία σειρά ημιτονοειδών (ή/και συνημιτονοειδών) κυματομορφών με καθορισμένες συχνότητες, φάσεις και πλάτη (Σπυριδής, 2000, σελ. 87).

¹ Από τον L. Euler το 1748 (Πανός, 1998, σελ. 63).

² Πρόκειται για τη θεωρία του για τη διάχυση που βρίσκεται στο βιβλίο, «Théorie analytique de la chaleur» (Πανός, 1998, σελ. 64). J. B. J. Fourier, *The analytical Theory of Heat*, μεταφρασμένο από τον A. Freeman (Cambridge University Press, 1878) (Haykin, 1995, σελ. 13).

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 **υπέρτονοι** (overtones). Όταν οι υπέρτονοι 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 θεμέλιας συχνότητας, λέμε ότι το σύνολο των συχνοτήτων αποτελεί μια **αρμονική σειρά** ή μια **σειρά Fourier**. Μπορούμε να δομήσουμε μια αρμονική σειρά θεωρώντας ως θεμέλιο οποιαδήποτε συχνότητα, όπου:

f_1 (θεμέλιος ή πρώτος αρμονικός),

$f_2 = 2f_1$ (2^{ος} αρμονικός),

$f_3 = 3f_1$ (3^{ος} αρμονικός),

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

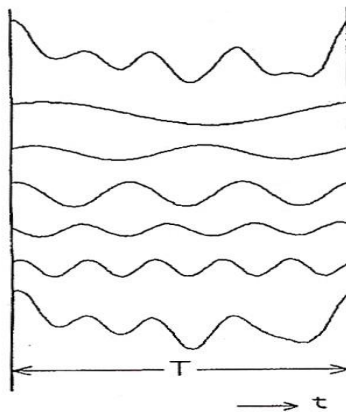
Η κάθε μια συχνότητα της αρμονικής σειράς εκφράζει έναν ημιτονοειδή ήχο ο οποίος σε σχέση με τη θεμέλιο σχηματίζει ένα μουσικό διάστημα. Αν π.χ. $f_1 = 32,7$ Hz τότε $f_2 = 65,41$ Hz, $f_3 = 98$ Hz, $f_4 = 130,81$ Hz, $f_5 = 164,81$ Hz κ.ο.κ. που αντιστοιχούν στις νότες C1, C2, G2, C3, E3 (Σπυρίδης,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

Εξαιτίας της σχέσης ακέραιων αναλογιών μεταξύ των ημιτονοειδών συχνοτήτων στην ανάλυση του Fourier, η ανάλυση έγινε γνωστή ως **αρμονική ανάλυση** (Roads, 1996, σελ. 545).

Ένας από τους λόγους που αναλύουμε τους ήχους σε σειρές Fourier, όπως πρότεινε ο **H.L.F.Helmholtz** (1821-1894), είναι γιατί το ανθρώπινο σύστημα ακοής αναγνωρίζει τα διάφορα ηχοχρώματα αποσυνθέτοντας το φάσμα τους σε ημιτονοειδείς συνιστώσες. Οι διαφορές μεταξύ των ηχοχρωμάτων γίνονται αντιληπτές λόγω της διαφοράς της έντασης των ξεχωριστών συνιστωσών των αρμονικών σειρών (Miranda, 2002, σελ. 101).

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.3), βλέπουμε πώς μια σύνθετη κυματομορφή μπορεί να δομηθεί από μια σειρά ημιτονοειδών κυματομορφών. Η πρώτη κυματομορφή είναι η δοσμένη (τυχαίο σχήμα) και βλέπουμε μια περίοδο της. Κάτω

από αυτήν υπάρχουν πέντε ημιτονοειδείς κυματομορφές που αποτελούνται από 1, 2, 3, 4 και 5 ολόκληρες περιόδους αντίστοιχα. Μια παρόμοια συστηματική αναφορά δε μπορεί να γίνει για τα πλάτη και τις φάσεις των κυματομορφών, γιατί είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Το άθροισμά της πρόσθεσης των 5 κυματομορφών φαίνεται στο τέλος και μοιάζει αρκετά με την αρχική συνάρτηση.



Σχήμα 1.3 Ανάλυση Fourier (Tempelaars, 1996, σελ. 118)

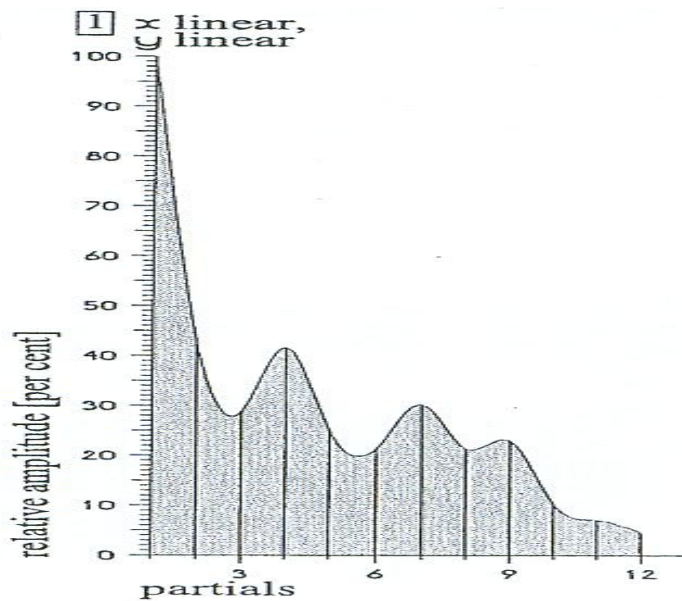
Η θεωρία του Fourier λέει, πως για να προσεγγίσει η τελική κυματομορφή την αρχική πρέπει να προσθέτουμε όσο το δυνατόν περισσότερους αρμονικούς. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι αρμονικοί στο φυσικό ήχο έχουν άπειρο αριθμό και εξελίσσονται συνεχώς κατά τη διάρκεια του χρόνου, ενώ όταν χρησιμοποιούμε τα δεδομένα της ανάλυσης χρησιμοποιούμε ένα πεπερασμένο αριθμό αρμονικά συσχετισμένων ημιτονοειδών κυματομορφών (Tempelaars, 1996, σελ. 118).

Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα πράγματα, σχετικά με το μηχανισμό της αντίληψης, είναι ότι ένα ηχητικό κύμα που αποτελείται από πολλές συχνότητες μπορεί να ακουστεί σαν να έχει ένα μόνο τονικό ύψος και ότι η φασματική ισορροπία των αρμονικών τους συγχωνεύεται προκαλώντας την αίσθηση μιας μόνο ποιότητας, ή ηχοχρώματος. Η συγχώνευση είναι πιθανότατα φαινόμενο

υψηλότερης τάξης που προέρχεται από ένα συνδυασμό φασματικών και χρονικών πληροφοριών τροφοδοτούμενων από το περιφερειακό σύστημα ακοής (Roads, 1996, σελ. 1065). Ακόμη και στην περίπτωση που η θεμέλιος συχνότητα απουσιάζει, οι υπέρτοννοι του αρμονικού φάσματος πληροφορούν την αντίληψη για το τονικού ύψος της θεμέλιου. Έτσι, αν μια ομάδα υπέρτονων έχει διαμορφωθεί σε μια συχνότητα από μια κοινή χρονική περιβάλλουσα, τότε τείνουν να συγχωνευτούν σε ένα ηχώχρωμα (Roads, 1996, σελ. 1065).

Ένα χαρακτηριστικό των αρμονικών είναι ότι τα πλάτη τους φθίνουν τάχιστα καθώς αυξάνεται η τάξη του αρμονικού, με αποτέλεσμα, να μπορούμε να προσεγγίσουμε μια σύνθετη κυματομορφή μόνο με τους λίγους πρώτους όρους της σειράς Fourier στην οποία αναλύεται (Σπυριδής, 2000, σελ. 87) (σχήμα 1.4).

Ο περιορισμός της περιοδικότητας της ανάλυση του Fourier χρησιμοποιείται έτσι ώστε τα μαθηματικά του να είναι εύχρηστα. Χωρίς αυτόν τον περιορισμό είναι ακόμη δυνατόν να μετατραπεί οποιαδήποτε κυματομορφή σε μια σειρά ημιτονοειδών κυματομορφών, αλλά εφόσον η κυματομορφή δεν είναι σταθερή, τότε και οι ημιτονοειδείς κυματομορφές που την αποτελούν δεν είναι σταθερές επίσης (Russ, 1996, σελ. 104).

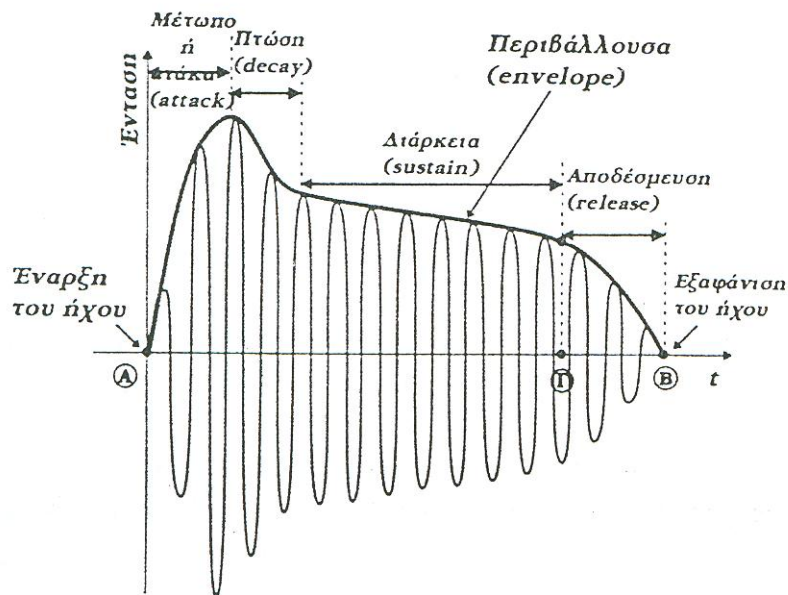


Σχήμα 1.4 Διάγραμμα πλάτους –συχνότητας, μιας νότα G3 (392 Hz) ενός φαγκότο. Στον άξονα του χ φαίνεται η τάξη των αρμονικών. Παρατηρούμε ότι πάνω από το δωδέκατο αρμονικό (4704 Hz) το επίπεδο του πλάτους είναι πολύ χαμηλό (Barlow, 2003, *On Musiquantics*, σημειώσεις μαθήματος από το Royal Conservatory The Hague, παράρτημα Γ25, σελ 23)

1.1.5. Περιβάλλουσα (envelope)

Ο χαρακτήρας των ήχων επηρεάζεται πολύ από το αρμονικό τους περιεχόμενο αλλά το ηχόχρωμα εξαρτάται σημαντικά και από αλλαγές στην ένταση και στη συχνότητα κατά τη διάρκεια του ήχου. Αυτές οι αλλαγές περιγράφονται με τη λέξη **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 κυματομορφής του ήχου (Σπυρίδης, 2000, σελ. 77) (σχήμα 1.5).

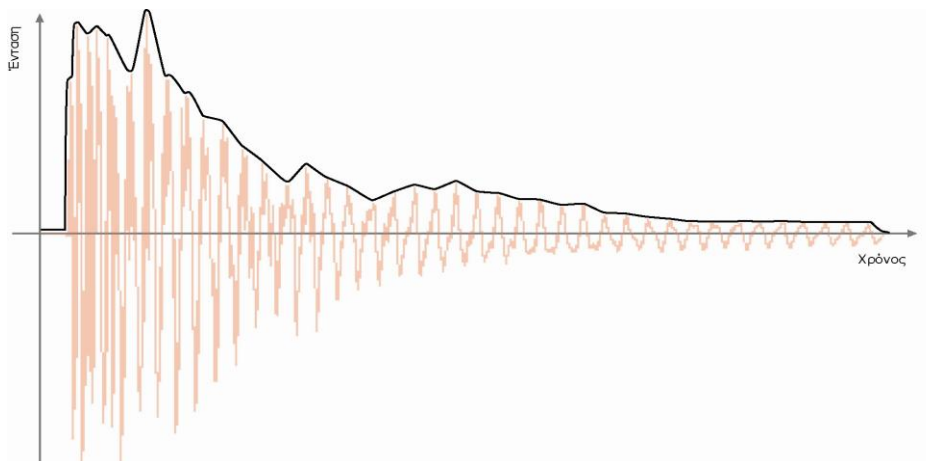


Σχήμα 1.5 Γενική μορφή περιβάλλουσας πλάτους (Σπυρίδης, 2000, σελ. 77)

Η πιο συνηθισμένη μορφή περιβάλλουσας φυσικών οργάνων αποτελείται από τέσσερις περιοχές. Την **άτακα (attack)** που είναι η στιγμή που δημιουργείται ο ήχος και φτάνει στη μέγιστη τιμή του. Την **πτώση (decay)** που είναι η χρονική στιγμή που ο ήχος αρχίζει να φθίνει μέχρι να φτάσει στο επίπεδο που θα διατηρηθεί, δηλαδή στο **σταθερό μέρος ή διάρκεια³ (sustain)** και τέλος στην **αποδέσμευση του ήχου (release)** όπου μειώνεται σημαντικά η έντασή του και σβήνει.

³ τον όρο διάρκεια χρησιμοποιεί ο Σπυρίδης για το μέρος sustain

Από το πώς κινούνται τα διάφορα μέρη της καμπύλης, εξαρτάται και η χροιά του ήχου. Για παράδειγμα, στα έγχορδα με δοξάρι, η ατάκα, η πτώση και η αποδέσμευση μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, δηλαδή η άνοδος ή η πτώση αντίστοιχα να γίνονται αργά, ενώ τα νυκτά έγχορδα και τα κρουστά έχουν πιο απότομη ατάκα και καθόλου σταθερό μέρος (σχήμα 1.6). Το πιάνο και τα κρουστά μπορούν να έχουν πολύ γρήγορη ατάκα και περίπλοκα τμήματα πτώσης και διάρκειας (Russ, 1996, σελ. 83).



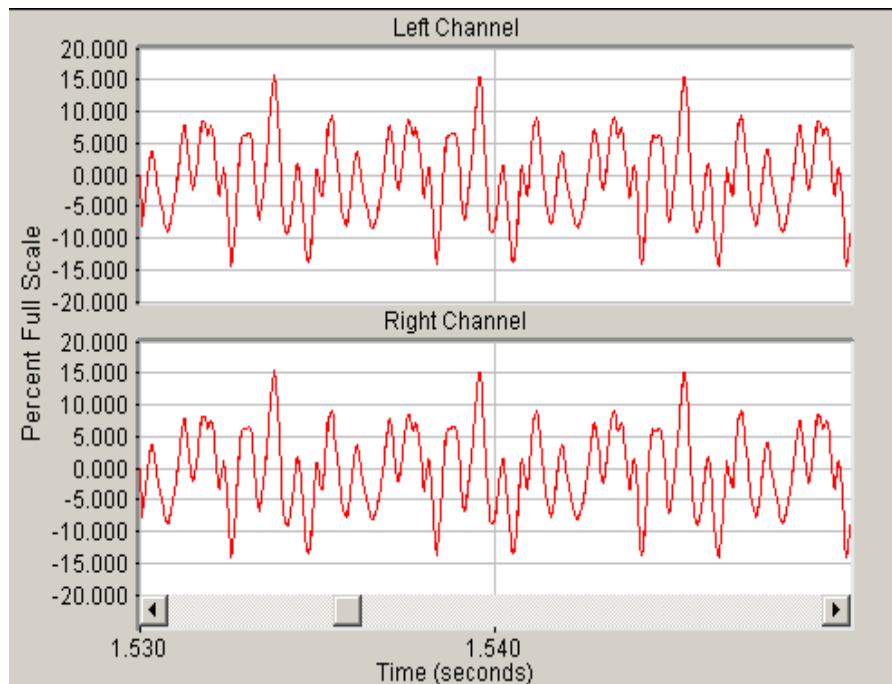
Σχήμα 1.6 Περιβάλλουσα κρουστού οργάνου

Κάθε οικογένεια παραδοσιακών οργάνων όπως ξύλινα και χάλκινα πνευστά, έγχορδα και κρουστά, έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά περιβάλλουσας. Η περιβάλλουσα είναι πολύ σημαντική στην αναγνώριση του ηχοχρώματος μιας οργανικής πηγής και ιδιαίτερα **το μέρος της ατάκας** (Roads, 1996, σελ. 545).

1.2. Γραφική αναπαράσταση ηχητικών σημάτων

1.2.1. Γραφική παράσταση στο πεδίο του χρόνου

Ο πιο απλός τρόπος για την αναπαράσταση ενός ηχητικού σήματος είναι η θεώρηση του πλάτους του ως μια συνάρτηση χρόνου. Δηλαδή, μια γραφική παράσταση που απεικονίζει τις μεταβολές του πλάτους του σήματος στο χρόνο (Παπαδέλης, 2001, σελ. 3). Αυτή η αναπαράσταση του ήχου ως χρονικού σήματος συχνά ονομάζεται αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου. Εξετάζοντας τη κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου προσεκτικά, κάποιος μπορεί να αντλήσει αρκετές πληροφορίες για το ηχόχρωμα ενός ήχου χωρίς να τον υποβάλλει σε μία λεπτομερή φασματική ανάλυση (Roads, 2001, σελ. 545)(σχήμα 1.7)



Σχήμα 1.7 Γραφική παράσταση χρόνου- πλάτους, η οποία απεικονίζει ένα απόσπασμα 20ms της νότας F3 ενός κλαρινέτου. Στον οριζόντιο άξονα αναγράφονται οι τιμές του χρόνου, ενώ στον κατακόρυφο τα σχετικά πλάτη

Συχνά αναφέρεται ότι το ηχόχρωμα καθορίζεται από το σχήμα της κυματομορφής. Αυτό είναι αλήθεια, αν και κάπως παραπλανητικό. Η αντίληψη του ηχοχρώματος προέρχεται από την ικανότητα του αυτιού να εντοπίζει τους αρμονικούς. Εφόσον, το αρμονικό περιεχόμενο καθορίζεται από το σχήμα της κυματομορφής, η αναισθησία του αυτιού στη φάση κάνει αυτή τη σχέση μονόπλευρη. Αυτό σημαίνει ότι μια συγκεκριμένη κυματομορφή θα έχει ένα μόνο ηχόχρωμα, ενώ ένα συγκεκριμένο ηχόχρωμα έχει ένα άπειρο αριθμό κυματομορφών (Smith, 1999, σελ. 356).

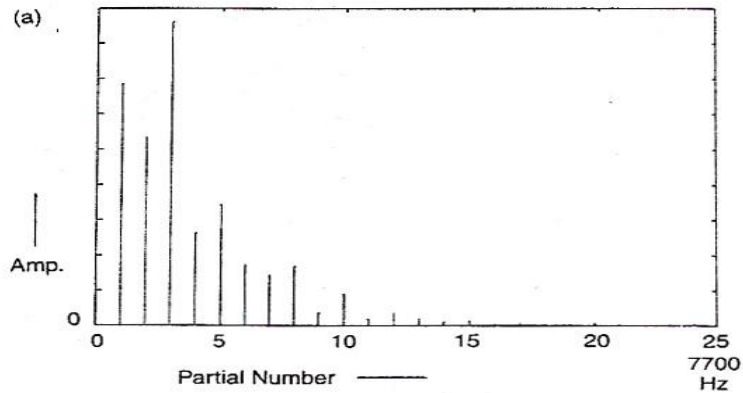
1.2.2. Γραφική παράσταση στο πεδίο της συχνότητας

Ένας άλλος τρόπος για αναπαράσταση του ηχητικού σήματος είναι στο πεδίο της συχνότητας, που ασχολείται και με τα πλάτη και με τις συχνότητες ως συναρτήσεις χρόνου. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται με τον όρο ανάλυση φάσματος. Παίρνει δηλαδή τα αποτελέσματα της ανάλυσης του Fourier και τα απεικονίζει γραφικά. Οι γραφικές παραστάσεις του φάσματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: φάσμα στατικό και μεταβαλλόμενο στο χρόνο (Roads, 1996, σελ. 537).

1.2.2.1 Γραφικές παραστάσεις με στατικό φάσμα

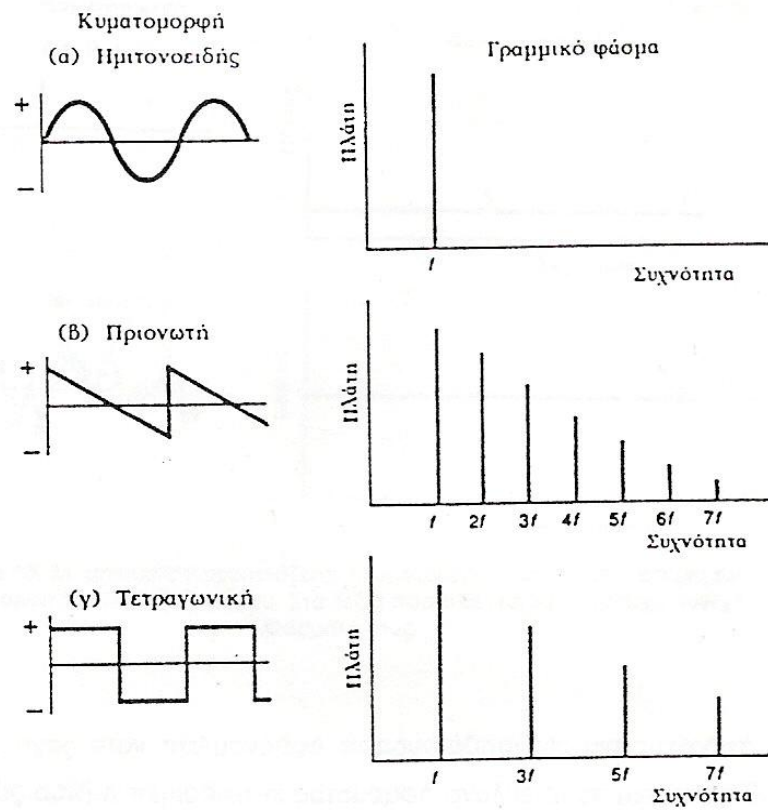
Το στατικό διάγραμμα είναι ένα φωτογραφικό στιγμιότυπο (snapshot) του ήχου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Απεικονίζει δύο διαστάσεις, το πλάτος και τη συχνότητα. Το μέγεθος του παραθύρου ή η χρονική διάρκεια του αναλυμένου ήχου μπορεί να ποικίλει από μια στιγμή έως κάποια δευτερόλεπτα ή και περισσότερο.

Ένας τύπος στατικού φάσματος είναι το **διακριτό ή γραμμικό φάσμα**, όπου μια κάθετη γραμμή ή μπάρα απεικονίζει κάθε συχνότητα του φάσματος (σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8 Γραμμικό φάσμα πλάτους-συχνότητας του σταθερού μέρους ενός ήχου τρομπέτας. Κάθε γραμμή απεικονίζει το πλάτος των αρμονικών μιας κεντρικής συχνότητας των 309 Hz. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές της συχνότητας σε Hz, ενώ στον κατακόρυφο το πλάτος σε γραμμική κλίμακα (Roads, 1996, σελ. 538)

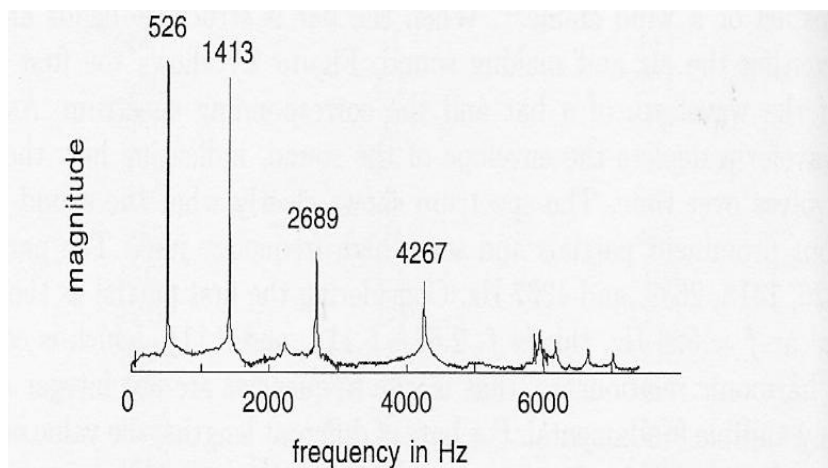
Ακολουθούν κάποια διαγράμματα συνηθισμένων απλών περιοδικών κυματομορφών (σχήμα 1.9):



Σχήμα 1.9 α) ημιτονοειδής κυματομορφή (sine wave): το φάσμα της αποτελείται από μία και μοναδική συνιστώσα συχνότητας, β) πριονωτή κυματομορφή (sawtooth wave): περιέχει όλους τους αρμονικούς, το πλάτος των οποίων είναι αντιστρόφως ανάλογο της τάξης των αρμονικών, γ) τετραγωνική κυματομορφή (square wave): έχει ενέργεια μόνο στους περιττές τάξεις αρμονικούς, τα πλάτη των οποίων φθίνουν αντιστρόφως ανάλογα με την τάξη του αρμονικού ($1/n$) (Σπυρίδης, 2000, σελ. 90)

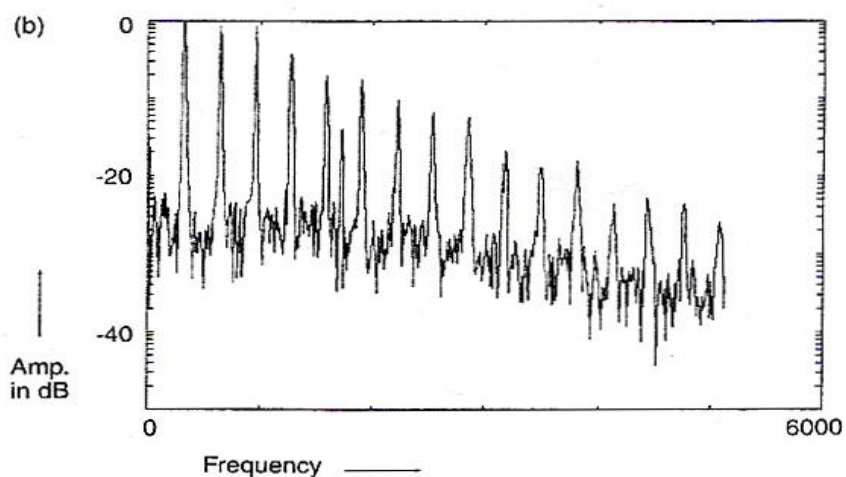
Στα παραπάνω διαγράμματα οι ήχοι είναι περιοδικοί. Τα στατικά φάσματα παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για περιοδικούς ήχους, γιατί για την ανάλυσή τους αρκεί μία μόνο περίοδος, εφόσον το σχήμα της κυματομορφής κάθε περιόδου είναι το ίδιο. Βέβαια, οι ήχοι των φυσικών οργάνων δεν είναι ποτέ εντελώς περιοδικοί. Στην καλύτερη περίπτωση μπορούν να προσεγγίζουν ένα περιοδικό σήμα για ένα μεγάλο, πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Έτσι το φάσμα μπορεί περίπου να αναπαραστήσει ένα μουσικό ήχο (Sethares, 1999, σελ. 16).

Ένας άλλος τύπος είναι το **συνεχές φάσμα**, όπου τα διακριτά σημεία αντικαθιστώνται από μια συνεχή γραμμή. Παρ' όλο που οι ξεχωριστές ημιτονοειδείς συνιστώσες δεν είναι ορατές, το διάγραμμα δίνει σαφείς πληροφορίες (σχήμα 1.10)



Σχήμα 1.10 Διάγραμμα συνεχούς φάσματος από το χτύπημα μιας μεταλλικής ράβδου (Sethares, 1999, σελ. 24)

Το συνεχές φάσμα ταιριάζει περισσότερο σε ήχους που είναι απεριοδικοί, δηλαδή σε ήχους, των οποίων οι συχνότητες δεν είναι πολλαπλάσια μιας συχνότητας. Τα διαγράμματα αυτά είναι γνωστά με το όνομα **φάσματα πλάτους** (amplitude spectrum) (σχήμα 1.11).



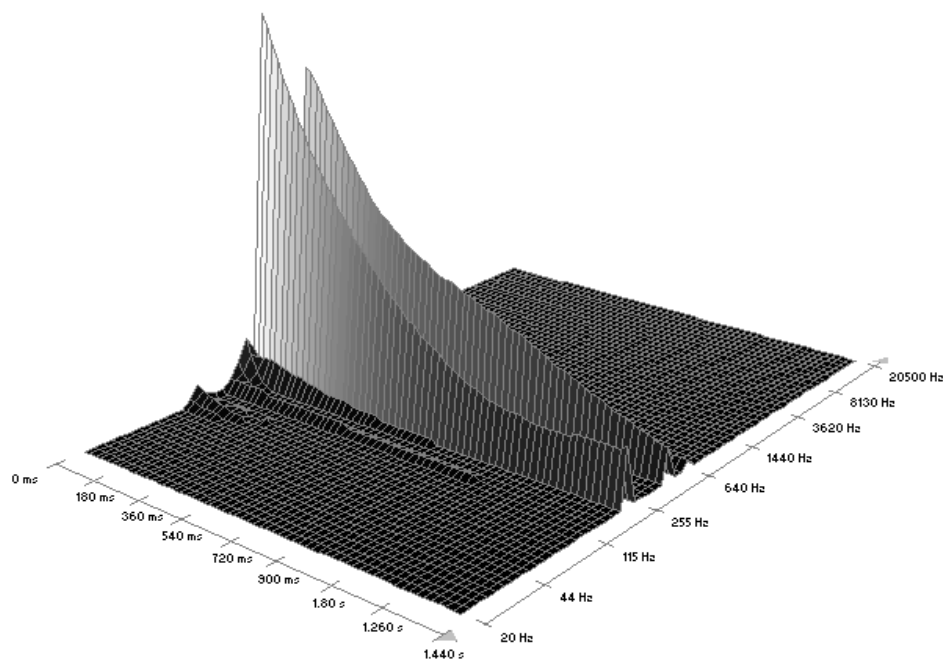
Σχήμα 1.11 Διάγραμμα πλάτους-συχνότητας του σταθερού μέρους ενός ήχου τρομπέτας, συχνότητας 309 Hz. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές της συχνότητας σε Hz, ενώ στον κατακόρυφο οι σχετικές στάθμες σε dB (Roads, 1996, σελ. 538)

Όλα τα φάσματα τα οποία περιέχουν αρμονικούς μπορούν να αναπαρασταθούν με αυτό τον τρόπο, τόσο τα αρμονικά όσο και τα μη αρμονικά (αυτά που δε σχηματίζουν αρμονικές σειρές). Το αρνητικό σε αυτά τα διαγράμματα είναι πως **δε λαμβάνουν υπόψη τους το χρόνο** και παρουσιάζουν τα φασματικά συστατικά σαν άπειρες, σταθερές ημιτονοειδείς κυματομορφές (Miranda, 2002, σελ. 101).

1.2.2.2. Γραφικές παραστάσεις με μεταβαλλόμενο στο χρόνο φάσμα

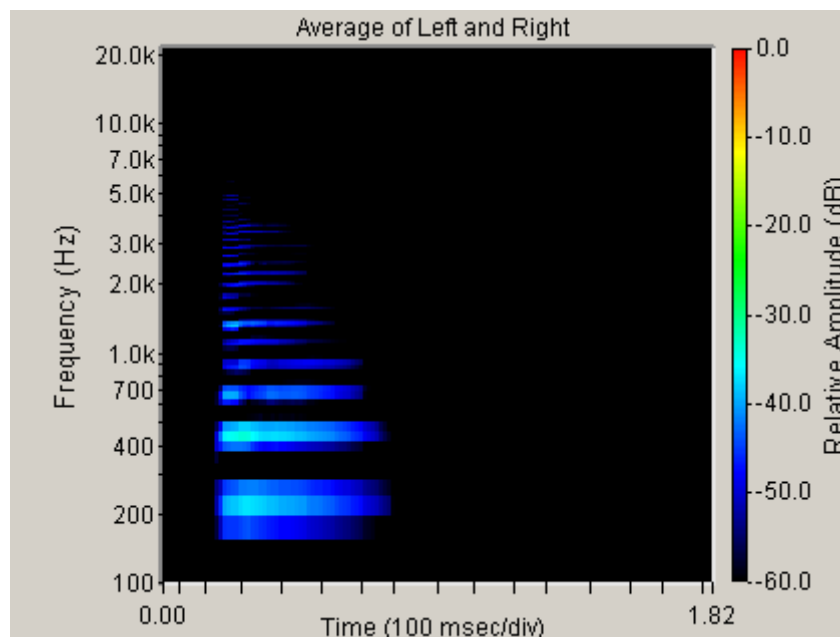
Το περιεχόμενο των συχνοτήτων ενός φυσικού μουσικού ήχου, αλλάζει στο χρόνο. Ακόμα και οι σταθεροί μουσικοί ήχοι έχουν μικρές, σχεδόν περιοδικές αλλαγές στο πλάτος (τρέμολο) και στη συχνότητα (βιμπράτο), όπως και στα μέρη της ατάκας και της πτώσης (Pierce, 2001, σελ. 47). Τα στατικά διαγράμματα, μη λαμβάνοντας υπόψη τους το χρόνο, μπορούν να περιγράψουν μόνο ένα μέρος του εξελισσόμενου ήχου. Τα μεταβαλλόμενα φάσματα απεικονίζουν τις αλλαγές του μίγματος των συχνοτήτων κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής τους. Πρόκειται για μια τρισδιάστατη απεικόνιση του φάσματος όπου η μία διάσταση είναι ο χρόνος.

Ένας τρόπος αναπαράστασης του μεταβαλλόμενου φάσματος είναι να σχεδιαστεί γραφικά μια διαδοχή φασμάτων λίγο άνω και στα δεξιά το ένα από το άλλο, έτσι ώστε να δώσει μια αίσθηση προοπτικής στο χρόνο (**waterfall spectrum**) (Pierce, 2001, σελ. 47). Πρόκειται για ένα φασματικό διάγραμμα, στο οποίο ο άξονας του χρόνου κινείται σε πραγματικό χρόνο (σχήμα 1.12).



Σχήμα 1.14 Τρισδιάστατη απεικόνιση φάσματος νότας C4 τσέλου με pizzicato (waterfall spectrum)

Ένας άλλος τρόπος είναι το **φασματογράφημα (spectrogram)** ή σονογράμμα. Αυτό είναι επίσης μια τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ενέργειας ενός ηχητικού σήματος στις διάφορες συχνότητες, σε συνάρτηση με το χρόνο. Ο χρόνος έχει σχεδιαστεί να κινείται από τα αριστερά στα δεξιά. Η ανάλυση ενός ήχου δε μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα ταυτόχρονα στις δύο διευθύνσεις, δηλαδή του χρόνου και της συχνότητας. Όταν η ανάλυση είναι καλή στο πεδίο της συχνότητας, χάνει στο πεδίο του χρόνου και αντιστρόφως (Pierce, 2001, σελ. 48) (βλ. ενότητα 1.3.2) (σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15: Φασματογράφημα ήχου σύντομης νότας A3 (220 Hz) άλτο σαξοφώνου. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται οι συχνότητες (100Hz-

20kHz). Η κατανομή της ενέργειας στο χρόνο και στη συχνότητα απεικονίζονται με διαφορετικές διαβαθμίσεις του μπλε

1.3. Εφαρμογές φασματικής ανάλυσης ή ανάλυσης Fourier

1.3.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή

Όπως το ανθρώπινο αυτί εφαρμόζει από τη φύση του, μια ανάλυση Fourier, το ίδιο μπορεί να συμβεί, δηλαδή η απομόνωση κάθε ενός φασματικού συστατικού του ήχου, με τη χρήση φίλτρων. Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αυτή η τεχνική ήταν η μοναδική για τον προσδιορισμό του φάσματος μια αυθαίρετης κυματομορφής (Tempelaars, 1996, σελ. 154).

Ο πρώτος που χρησιμοποίησε την τεχνική των φίλτρων ήταν ο Γερμανός επιστήμονας **H. L. F. Helmholtz** (1821-1894), ο οποίος πήρε αρκετούς resonators (αντηχητές), τους οποίους κούρδιζε στα φασματικά συστατικά του ήχου που ήθελε να αναλύσει και μετά τοποθετώντας το αυτί του στο (δεύτερο) άνοιγμα του αντηχητή προσπαθούσε να εντοπίσει την παρουσία και να εκτιμήσει την ισχύ των σχετικών συνιστωσών του ήχου (Tempelaars, 1996, σελ. 154) (σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.16: Helmholtz resonator (Tempelaars, 1996, σελ. 154)

Το 1870, οι αδερφοί **Kelvin** κατασκεύασαν τον πρώτο μηχανικό αρμονικό αναλυτή ο οποίος εντόπιζε όλους τους αρμονικούς μιας θεμελίου συχνότητας. Ένας καλύτερος αρμονικός αναλυτής του ίδιου τύπου ήταν το **Michelson-Stratton**, που κατασκευάστηκε το 1898. Εφάρμοζε ανάλυση μέχρι και 80 αρμονικών και μπορούσε να κάνει και ανασύνθεση του ήχου. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα εμφανίζονται συνεχώς νέοι μηχανικοί αναλυτές. Κάποιοι από αυτούς αποδίδονται στους Meyer και Buchmann το 1931, στον Backhaus το 1932 και σε άλλους.

Με την ανακάλυψη της ψηφιακής τεχνολογίας στη δεκαετία του 1940, δημιουργείται η πρώτη ψηφιακή εκδοχή του μετασχηματισμού του Fourier (**Fourier transform ή FT**). Όμως, τα τεχνολογικά μέσα είναι πολύ φτωχά εκείνη την εποχή και ο μετασχηματισμός του Fourier απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο. Μόλις το 1965, κάνει την εμφάνισή του το **fast Fourier transform ή FFT** (γρήγορος μετασχηματισμός Fourier) όπου χρησιμοποιώντας μια ομάδα από αλγόριθμους μειώνει τον όγκο των υπολογισμών που απαιτεί η ανάλυση του Fourier. Το fast Fourier transform ή FFT αποδίδεται στους James Cooley και John Tukey (Roads, 1996, σελ. 1076).

Μέχρι τώρα, οι αναλύσεις στηρίζονται στο σταθερό μέρος του ήχου, αγνοώντας το γεγονός ότι ο ήχος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Ο πρώτος που ασχολείται με σήματα μεταβαλλόμενα στο χρόνο είναι ο **Dennis Gabor**, σύμφωνα με τις θεωρίες του οποίου, ο ήχος μπορεί να αναλύεται ταυτόχρονα στον τομέα του χρόνου και της συχνότητας σε μονάδες που ονομάζονται **κβαντικά σωματίδια** (quanta), τα οποία σήμερα ονομάζονται ηχητικοί κόκκοι (grains), wavelets ή παράθυρα (windows), ανάλογα με το σύστημα ανάλυσης που χρησιμοποιούμε (Roads, 1996, σελ. 546).

Το 1969, ο **Max Mathews** και ο **Jean-Claude Risset** ανέλυσαν τον ήχο χάλκινων οργάνων χρησιμοποιώντας το **pitch-synchronous** πρόγραμμα ανάλυσης. Η ανάλυση αυτή σπάει την κυματομορφή σε ψευδοπεριοδικά τμήματα (pseudoperiodic segments) των οποίων βρίσκει το τονικό ύψος και μετά υπολογίζει

το αρμονικό φάσμα κατά Fourier, σαν ο ήχος να είναι περιοδικός και το τονικό ύψος συνεχές. Αυτό το πρόγραμμα παράγει μεταβαλλόμενες στο χρόνο συναρτήσεις πλάτους για κάθε αρμονικό μιας δεδομένης θεμελίου. Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Peter Zinovieff και οι συνεργάτες του δημιούργησαν έναν αναλυτή/ανασυνθετητή Fourier ο οποίος λειτουργούσε σε πραγματικό χρόνο (Roads, 1996, σελ. 547).

1.3.2. Αρμονική ανάλυση

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την ανάλυση του φάσματος των ήχων που χωρίζονται ουσιαστικά σε δύο κατηγορίες. Η μια είναι η **αρμονική ανάλυση (harmonic analysis)** και η άλλη η **formant⁴ ανάλυση**. Η πρώτη αποβλέπει στην αναγνώριση των συχνοτήτων και των πλατών των φασματικών συστατικών, ενώ η άλλη χρησιμοποιεί μια εκτίμηση του συνολικού σχήματος της περιβάλλουσας πλάτους του φάσματος (Miranda, 2002, σελ. 51). Κάθε μια κατηγορία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Ανάλογα με το είδος των ήχων που θέλουμε να αναλύσουμε, διαλέγουμε και την αντίστοιχη μέθοδο. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει η αρμονική ανάλυση που είναι η εφαρμογή του θεωρήματος του Fourier. Θα ασχοληθούμε με δύο τυπικά παραδείγματα αρμονικής ανάλυσης τη **Short-time Fourier transform (STFT)** και την **ανάλυση κυματοδηγών (wavelets analysis)**.

1.3.2.1. Short-time Fourier transform (STFT)

⁴ formants ή μορφήματα ονομάζονται τα χαρακτηριστικά κορυφώματα της περιβάλλουσας του φάσματος (Ατλας της Μουσικής, 1994, σελ. 17)

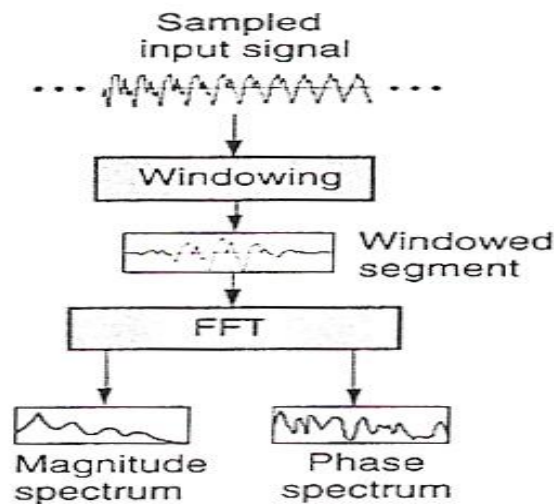
Για να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση φυσικών ήχων γίνεται χρήση του **μετασχηματισμού Fourier** (Fourier transform ή FT), που είναι μια μαθηματική διαδικασία, η οποία μετατρέπει το σήμα εισόδου σε μια αντίστοιχη φασματική αναπαράσταση (Roads, 1996, σελ. 550). Η ψηφιακή εκδοχή αυτής της μεθόδου, με τη χρήση κάποιου προγράμματος σε υπολογιστή είναι η **fast Fourier transform ή FFT**. Η FFT είναι ένας αλγόριθμος που περιέχει μια πολύ αποτελεσματική διαδικασία (γρήγορη), που εκτελεί τη γενική μαθηματική επεξεργασία του σήματος.

Ένα από τα προβλήματα της FFT είναι πως, ενώ δίνει πληροφορίες για τα διάφορα συστατικά του φάσματος, δε λαμβάνει υπόψη της το πώς μεταβάλλονται αυτά στο χρόνο. Αυτό το πρόβλημα έρχεται να λύσει η **short-time Fourier transform (STFT)**.

Η STFT εφαρμόζει δύο βήματα για την επεξεργασία του σήματος:

1) τεμαχίζει τον ήχο σε μικρά τμήματα, που ονομάζονται παράθυρα (windows) (η διαδικασία αυτή ονομάζεται **windowing**)

2) εφαρμόζει σε κάθε παράθυρο την FFT και αναπαριστά γραφικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε αλληλουχία, προκειμένου να αποτυπώσει την χρονική εξέλιξη του ήχου (Miranda, 2002, σελ. 54)



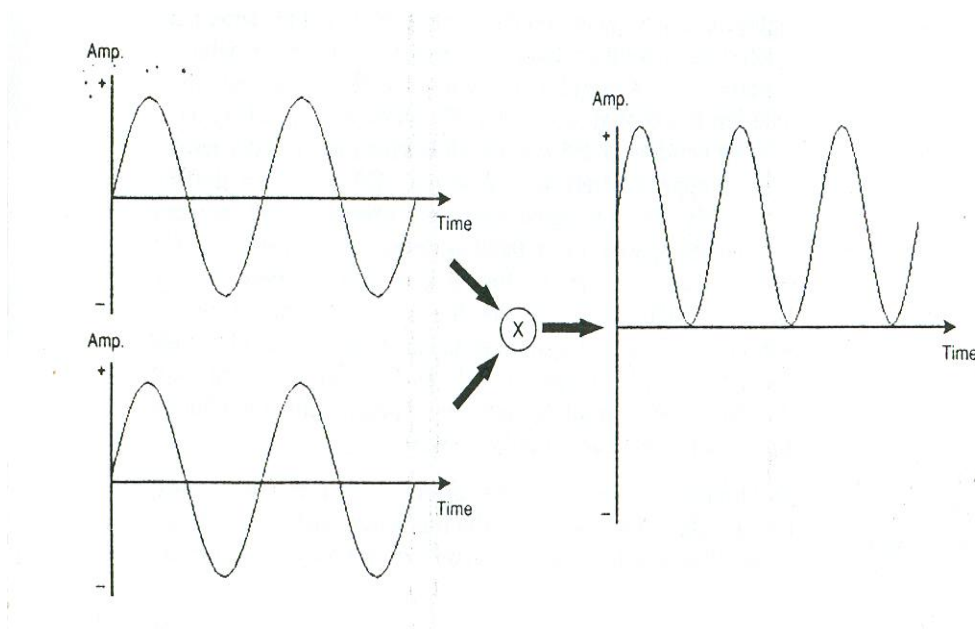
Σχήμα 1.17 Σχηματική απεικόνιση της short-time Fourier transform (STFT) (Roads, 1996, σελ 551)

Για την ορθότερη κατανόηση της διαδικασίας της παραθυροποίησης είναι προτιμότερο να εξηγήσουμε πρώτα τη λειτουργία της FFT.

1.3.2.1.1. Λειτουργία της FFT

Η FFT είναι ένας μηχανισμός, ο οποίος εντοπίζει τις συνιστώσες ενός σήματος εισόδου, συγκρίνοντάς το με μια θεμέλια συχνότητα η οποία βρίσκεται στον αλγόριθμο του προγράμματος και λειτουργεί σαν σήμα αναφοράς. Για παράδειγμα, αν το σήμα αναφοράς είναι 110 Hz και το σήμα εισόδου είναι πανομοιότυπο, τότε ο αλγόριθμος της FFT θα πολλαπλασιάσει τα δύο σήματα και το αποτέλεσμα του θα είναι μία ημιτονοειδής κυματομορφή των 220 Hz, αλλά εντελώς μετατοπισμένη στο θετικό τομέα. Η μετατοπισμένη αξία εξαρτάται από το

πλάτος και των δύο σημάτων. Έτσι, είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε και το πλάτος του σήματος εισόδου παίρνοντας το πλάτος του εικονικού σήματος σαν σημείο αναφοράς (Miranda, 2002, σελ. 53) (σχήμα 1.18).



Σχήμα 1.18 Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού δύο πανομοιότυπων ημιτονοειδών θα είναι μία ημιτονοειδής κυματομορφή εντελώς μετατοπισμένη στο θετικό τομέα (Miranda, 2002, σελ. 53)

Στη θεωρία, κάθε ήχος μπορεί να έχει άπειρο αριθμό συνιστωσών συχνότητας. Στην πράξη όμως, αναγκαστικά περιοριζόμαστε σε έναν πεπερασμένο αριθμό. Στην ανάλυση της FFT χωρίζουμε το φάσμα των συχνοτήτων σε έναν αριθμό ζωνών συχνοτήτων, που ονομάζονται bins (Phil Burk et al., 2002). Ο μηχανισμός της FFT εφαρμόζει μια τράπεζα αρμονικών ανιχνευτών⁵ σε ζώνες

⁵ Ή μια τράπεζα φίλτρων.

συχνοτήτων (bins), οι οποίες **ισαπέχουν** μεταξύ τους. Η απόσταση των bins είναι ακέραια πολλαπλάσια της:

συχνότητας δειγματοληψίας (sampling frequency) / N,

όπου N είναι το μέγεθος του αναλυμένου παράθυρου (αριθμός δειγμάτων). Αν για παράδειγμα, η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 30 KHz και το μήκος του παραθύρου αποτελείται από 1000 δείγματα, η ανάλυση των ζωνών συχνοτήτων θα τοποθετηθεί σε απόσταση $30000/1000 = 30$ Hz η μία από την άλλη, ξεκινώντας από 0 Hz.

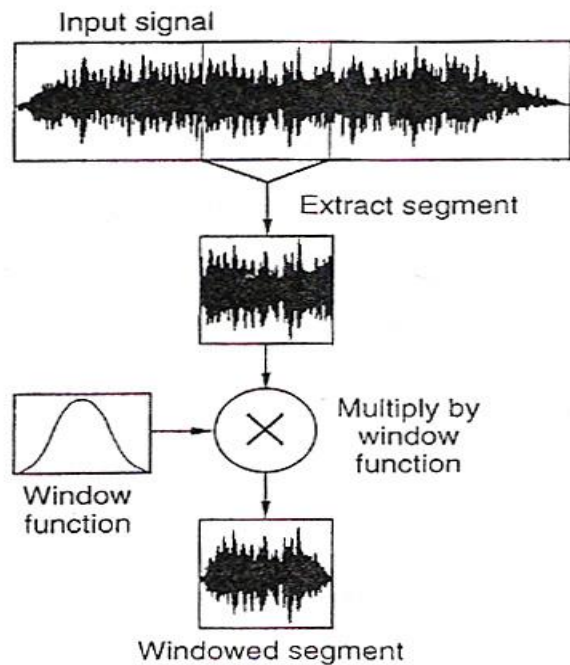
Τα ακουστικά σήματα είναι περιορισμένα στο μισό της συχνότητας δειγματοληψίας⁶(sampling rate) και έτσι μας ενδιαφέρουν μόνο τα μισά από τα bins της ανάλυσης. Μια αποτελεσματική ανάλυση της συχνότητας έχουμε λοιπόν για N/2 bins τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις στο ακουστό εύρος ζώνης, ξεκινώντας από 0 Hz και καταλήγοντας στη συχνότητα Nyquist. Στο παράδειγμα, ο αριθμός των χρήσιμων bins της συχνότητας είναι 500, που απέχουν 30 Hz το ένα από το άλλο (Roads, 1996, σελ. 557).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των bins, τόσο πιο ακριβής είναι η ανάλυση (N/ απόσταση bin= αριθμός bin). Δυστυχώς, η FFT διανέμει τους αρμονικούς ανιχνευτές της γραμμικά κατά πλάτος του ακουστικού πεδίου, ενώ το τονικό ύψος κινείται λογαριθμικά. Αυτό σημαίνει ότι ένας συμβιβασμός πρέπει να βρεθεί, προκειμένου να αποτρέψουμε μια όχι απαραίτητη ακρίβεια στις ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων από τη μια μεριά, και μια φτωχή απόδοση στις ζώνες χαμηλότερων συχνοτήτων από την άλλη (Miranda, 2002, σελ. 53) (βλ. ανάλυση wavelet, στην ενότητα 1.3.2.2).

⁶ Για μια σωστή αναπαράσταση του σήματος ο η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το διπλάσιο της υψηλότερης συχνότητας των συνιστωσών του σήματος. Η ανώτατη συχνότητα η οποία μπορεί θεωρητικά να εμπεριέχεται σε ένα ψηφιακό σήμα ονομάζεται **συχνότητα Nyquist** και έχει τιμή ίση με το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας (Καμπουρόπουλος Αιμίλιος, σημειώσεις του μαθήματος: *Πληροφορική και Μουσική/Μουσικολογία: Εισαγωγή στη μουσική πληροφορική*, του Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη).

1.3.2.1.2. Παραθυροποίηση (windowing) του σήματος εισόδου

Η STFT τεμαχίζει το σήμα εισόδου σε μικρά χρονικά παράθυρα (time-windows), τα οποία παραθέτει σε μια ακολουθία. Ουσιαστικά, το παράθυρο είναι ένα συγκεκριμένο είδος περιβάλλουσας, σχεδιασμένης για φασματική ανάλυση. Η διάρκεια του παραθύρου έχει συνήθως μια έκταση από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου έως 1 δευτερόλεπτο και τα τμήματα μερικές φορές επικαλύπτονται (Roads, 1996, σελ. 550). Μετά την παραθυροποίηση του σήματος, εφαρμόζεται στο κάθε παράθυρο η FFT. Το αποτέλεσμα κάθε παραθύρου ανάλυσης ονομάζεται **FFT frame** και μας παρέχει πληροφορίες ενός φάσματος πλάτους και ενός φάσματος φάσης.



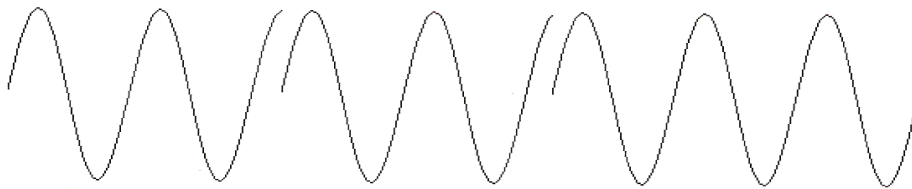
Σχήμα 1.19 Παραθυροποίηση του σήματος εισόδου (Roads, 1996, σελ. 550)

Η αποτελεσματικότητα της STFT διαδικασίας εξαρτάται από τον καθορισμό τριών συντελεστών παραθυροποίησης: την περιβάλλουσα του παράθυρου, το μέγεθος του παράθυρου και τον παράγοντα της επικάλυψης (Miranda, 2002, σελ. 54).

- **Η περιβάλλουσα του παραθύρου**

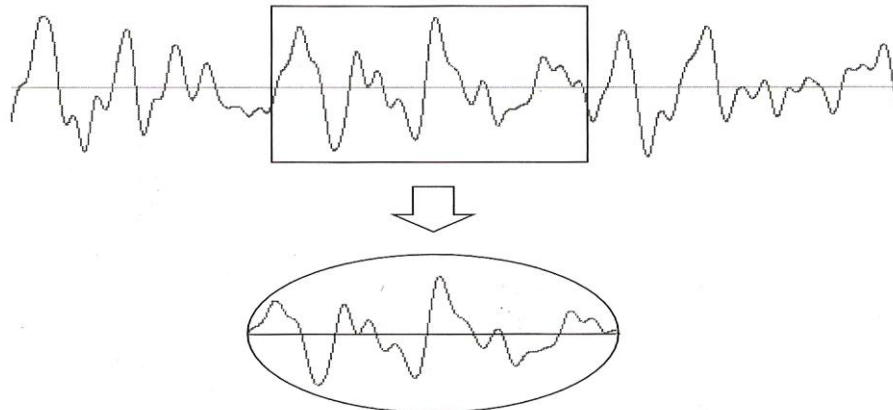
Κατά τη διαδικασία της παραθυροποίησης είναι πιθανό ο ήχος να κοπεί σε μη μηδενικά σημεία της κυματομορφής. Ο αλγόριθμος της FFT μετατρέπει το σήμα κάθε παραθύρου σε περιοδικό. Από αυτό προκύπτει, πως υπάρχει μεγάλη

πιθανότητα, διακοπές ανάμεσα στα τέλη των παραθυροποιημένων τμημάτων να οδηγήσουν σε ανωμαλίες της ανάλυσης (σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20 Το κόψιμο του ήχου σε μη μηδενικά σημεία προκαλεί ανωμαλίες στην ανάλυση (Miranda, 2002, σελ. 55)

Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας μία περιβάλλουσα για την εξομάλυνση των δύο πλευρών του παραθύρου (σχήμα 1.21).



Σχήμα 1.21 Διακοπές μεταξύ των τελικών τμημάτων μπορούν να αντιμετωπισθούν χρησιμοποιώντας μια περιβάλλουσα, η οποία θα εξομαλύνει τις δύο πλευρές του παραθύρου (Miranda, 2002, σελ. 55)

Υπάρχουν διάφορων ειδών περιβάλλουσες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση αυτού του προβλήματος όπως η Hamming, Hanning, Kaiser, Uniform, Blackman, από της οποίες η κάθε μια έχει τα σημεία που υστερεί και τα σημεία που υπερέχει.

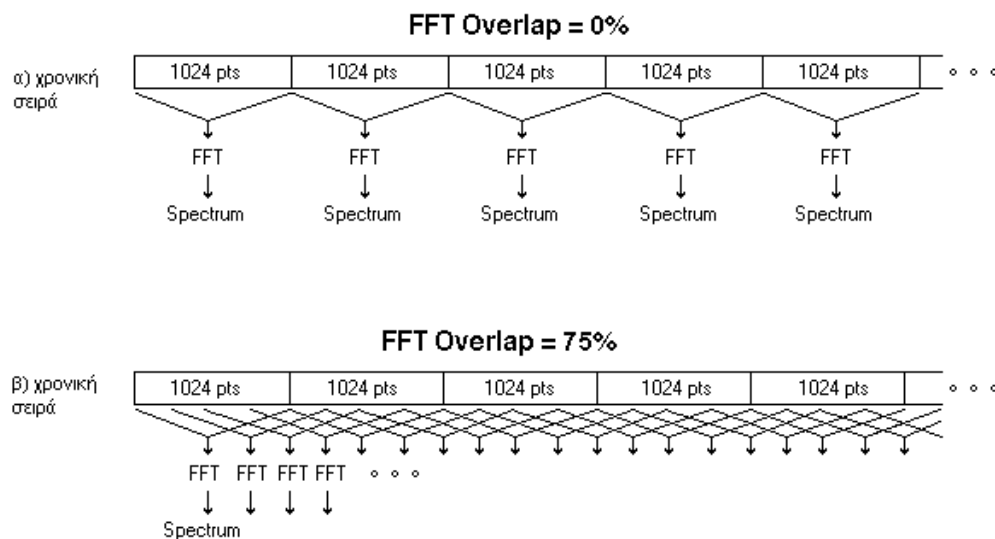
Δυστυχώς όμως, οι περιβάλλουσες εν μέρει παραμορφώνουν την ανάλυση. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα είναι πιο ακριβή με τη χρήση της περιβάλλουσας παρά χωρίς αυτήν (Miranda, 2002, σελ. 56).

- **Το μέγεθος του παραθύρου**

Το μέγεθος του παραθύρου καθορίζει το πόσο καλή θα είναι η ανάλυση της συχνότητας και του χρόνου στην ανάλυση. Τα μεγαλύτερα παράθυρα παρέχουν καλύτερη ανάλυση της συχνότητας από τα μικρότερα, ενώ τα μικρότερα παρέχουν καλύτερη ανάλυση του χρόνου. Για παράδειγμα, ενώ ένα παράθυρο των 1024 δειγμάτων σε ένα εύρος των 44100 Hz, επιτρέπει προσεγγιστικά μια ανάλυση χρόνου των 23 χιλιοστών του δευτερολέπτου ($1024 / 44100 = 0,023$), ένα παράθυρο των 256 δειγμάτων επιτρέπει μία πολύ καλύτερη ανάλυση, προσεγγιστικά των 6 χιλιοστών του δευτερολέπτου ($256 / 44100 = 0,0058$). Αντιστρόφως, οι αρμονικοί ανιχνευτές θα κουρδιστούν να ανιχνεύσουν συχνότητες που βρίσκονται σε μια ζώνη εύρους περίπου 43 Hz ($44100 / 1024 = 43$) στην πρώτη περίπτωση και 172 Hz ($44100 / 256 = 172$) περίπου στη δεύτερη. Αυτό σημαίνει ότι το παράθυρο των 256 δειγμάτων δεν είναι κατάλληλο για την ανάλυση ήχων χαμηλότερων των 172 Hz, αλλά αυτό μπορεί να ταιριάζει στην ανάλυση ενός ήχου, ο οποίος είναι πιθανό να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις μέσα σε λιγότερο από 23 χιλιοστά του δευτερολέπτου (Miranda, 2002, σελ. 56).

- **Ο παράγοντας της επικάλυψης (overlapping factor)**

Τα μεγάλα παράθυρα παρέχουν καλύτερη ανάλυση της συχνότητας αλλά φτωχή ανάλυση χρόνου, ενώ τα μικρά παρέχουν καλύτερη ανάλυση του χρόνου και φτωχή ανάλυση της συχνότητας. Η διαδικασία της επικάλυψης χρησιμοποιείται για να δώσει καλύτερη ανάλυση και στα δύο πεδία. Για παράδειγμα, εάν κατά τη διάρκεια ενός ηχητικού σήματος σταματήσει να ακούγεται ένας υπέρτονος, το παράθυρο του FFT θα είναι δύσκολο να διακρίνει τη χρονική στιγμή που συνέβη αυτό το γεγονός. Αν όμως κατά την εφαρμογή του FFT, αντί να κινήσουμε μπροστά στην ακολουθία ένα ολόκληρο παράθυρο, κινήσουμε ένα μικρό του μέρος, τότε θα μπορούσαμε να διακρίνουμε το χρόνο της κάθε συχνότητας. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη διαδικασία της επικάλυψης (σχήμα 1.22)



Σχήμα 1.22 Διαδικασία επικάλυψης στο α) με παράγοντα επικάλυψης 0% και στο β) με 75% (SpectraLAB- Help menu)

Στο σχήμα, ο επικαλυπτικός παράγοντας (overlapping factor) έχει ρυθμιστεί να ισούται με 75 % και το μέγεθος του παραθύρου έχει ρυθμιστεί να ισούται με 1024 δείγματα. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαδικασία της παραθυριοποίησης θα κόψει τον ήχο σε βήματα των 13 δειγμάτων ($1024 / 75 = 13,653$). Έτσι, η ανάλυση του χρόνου του παραθύρου των 1024 δειγμάτων θα βελτιωθεί από 23 χιλιοστά του δευτερολέπτου σε περίπου 3 χιλιοστά του δευτερολέπτου (SpectralLAB- help menu).

Δυστυχώς, η παραθυριοποίηση έχει την τάση να αλλοιώνει τις φασματικές μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει, επειδή ο αναλυτής του φάσματος δεν μετράει απλά το σήμα εισόδου, αλλά αντιθέτως το προϊόν του σήματος εισόδου και του παραθύρου. Το φάσμα που προκύπτει είναι η περιέλιξη του φάσματος των σημάτων εισόδου και του παραθύρου (Roads, 1996, σελ. 551).

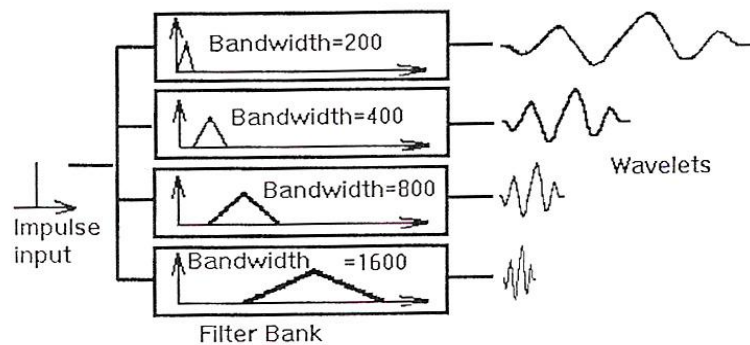
Ένα από τα **βασικά προβλήματα** της STFT είναι, ότι πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στη ανάλυση της συχνότητας και στην ανάλυση του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι, αν θέλουμε μια καλή ανάλυση στο τομέα του χρόνου, θυσιάζουμε την ακρίβεια στην ανάλυση της συχνότητας. Αντιστρόφως, αν θέλουμε μια καλή ανάλυση στον τομέα της συχνότητας, θυσιάζουμε την ακρίβεια της ανάλυσης στον τομέα του χρόνου (Roads, 1996, σελ. 557). Δηλαδή, μια υψηλή ανάλυση στον ένα τομέα παρέχει μια φτωχή ανάλυση στον άλλο.

1.3.2.2. Ανάλυση κυματοδηγών (Wavelets analysis)

Η ανάλυση κυματοδηγών είναι μια μέθοδος πολύ κοντά στην STFT η οποία χρησιμοποιεί κάποιους μηχανισμούς που παρέχουν λύσεις στα προβλήματα της ανάλυσης STFT.

Σε αντίθεση με την STFT το μέγεθος των παραθύρων της ανάλυσης κυματοδηγών δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις συχνότητες που αναλύονται. Σε κάθε παράθυρο εφαρμόζεται μια τράπεζα φίλτρων. Ανάλογα με την

κεντρική συχνότητα κάθε παραθύρου τα φίλτρα αυτά μεταβάλλουν το μέγεθος τους. Το εύρος ζώνης κάθε επόμενου φίλτρου είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο, καθώς αναλύει ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων. Άρα το μέγεθος του παραθύρου ποικίλει αναλογικά με τις συχνότητες που αναλύονται. Το σήμα εξόδου καθενός από τα φίλτρα ονομάζεται κυματοδηγός (wavelets) (Pierce, 2001, σελ. 55) (σχήμα 1.22).

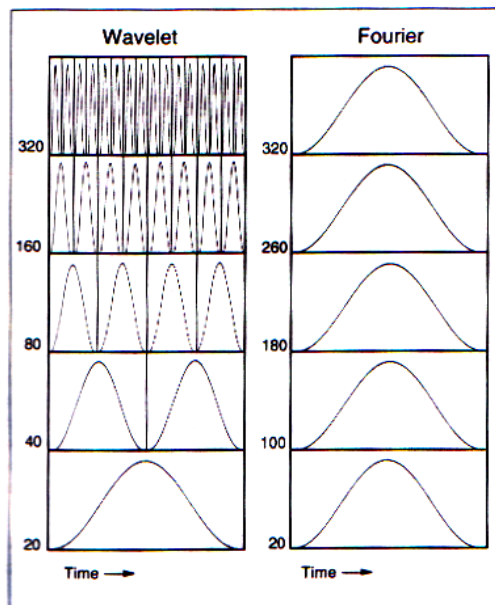


Σχήμα 1.22 Μια τράπεζα φίλτρων της ανάλυσης κυματοδηγών. Τα φίλτρα έχουν αυξανόμενο εύρος ζώνης (σχήμα Pierce, 2001, σελ. 55)

Η κλίμακα των συχνοτήτων είναι λογαριθμική. Αυτό σημαίνει πως η συχνότητα από κάθε αναλυμένο κυματοδηγό σχετίζεται με τους άλλους με ένα λογαριθμικό μουσικό διάστημα (Roads, 1996, σελ. 583).

Αυτός ο μηχανισμός μειώνει δραστικά τη διαμάχη της ανάλυσης της STFT γιατί «εντείνει την ανάλυση του χρόνου στις ζώνες υψηλών συχνοτήτων και την ανάλυση της συχνότητας στις ζώνες χαμηλών συχνοτήτων» (Miranda, 2002, σελ. 56).

Οι κυματοδηγοί όμως, απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ. Παρ' όλα αυτά, παρέχουν πολύ περισσότερες δυνατότητες από άλλες μεθόδους ανάλυσης (σχήμα 1.23).



Σχήμα 1.23 Η ανάλυση κυματοδηγών έχει καλύτερη ανάλυση χρόνου στο ανώτερο μέρος του φάσματος, ενώ η ανάλυση του STFT είναι σταθερή (Roads, 1996, σελ. 583)

Το κεφάλαιο αυτό ασχολήθηκε με την ανάλυση φυσικών ήχων, προκειμένου να κατανοηθεί η δομή τους. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο στο οποίο θα δούμε πως κάποια από τα στοιχεία που δημιουργούν έναν ήχο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση νέων ήχων με την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – Η τεχνική της προσθετικής σύνθεσης

Η προσθετική σύνθεση είναι μια τεχνική σύνθεσης ήχου η οποία είναι βασισμένη στην ανάλυση του Fourier. Στηρίζεται δηλαδή στην αρχή: ότι «κάθε περιοδική κυματομορφή μπορεί να σχηματιστεί σαν ένα άθροισμα από ημιτονοειδείς κυματομορφές με διαφορετικές περιβάλλουσες πλάτους και με μεταβαλλόμενες στο χρόνο συχνότητες» (Miranda, 2002, σελ. 50). Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη ψηφιακή προσθετική σύνθεση, η οποία εφαρμόζεται σε λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών. Πρόκειται για την κλασική τεχνική προσθετικής σύνθεσης ημιτονοειδών κυματομορφών⁷. Προτού όμως, φτάσουμε εκεί θα γίνει μια αναφορά σε διάφορα όργανα (ακουστικά, ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά και ψηφιακά) που στο παρελθόν χρησιμοποίησαν την τεχνική αυτή.

2.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή της προσθετικής σύνθεσης

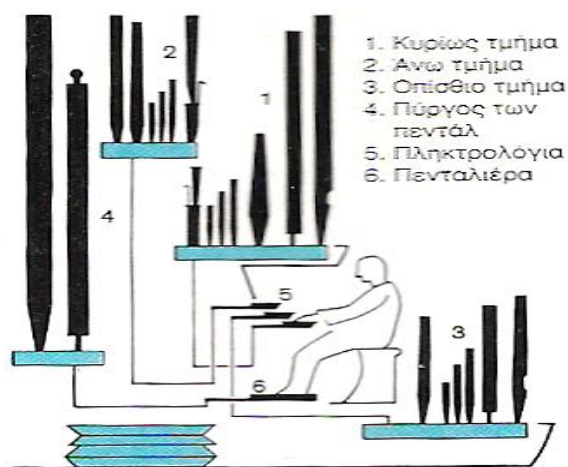
«Η ιδέα της πρόσθεσης απλών ήχων για τη δημιουργία σύνθετων ηχοχρωμάτων χρονολογείται από τότε που οι άνθρωποι άρχισαν να φτιάχνουν όργανα με σωλήνες» (Miranda, 2002, σελ. 51). Όλα τα όργανα τύπου εκκλησιαστικού οργάνου (organs) βασίζονται στην αρχή της προσθετικής σύνθεσης ή σύνθεσης Fourier⁸.

Τον 1^ο αιώνα π.Χ. εμφανίζεται η ύδραυλις ή υδραυλικό όργανο, που χρησιμοποιεί υδραυλικούς μηχανισμούς με τους οποίους διοχετεύει αέρα σε περισσότερους του ενός σωλήνες ταυτόχρονα. Η ύδραυλις θεωρείται πρόδρομος του εκκλησιαστικού οργάνου (Γιάννου, 1995, σελ. 97).

⁷ Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που μπορούν να χαρακτηριστούν ως τεχνικές προσθετικής σύνθεσης όπως κάποιες μορφές κοκκώδους σύνθεσης (Roads, 1996, σελ 134).

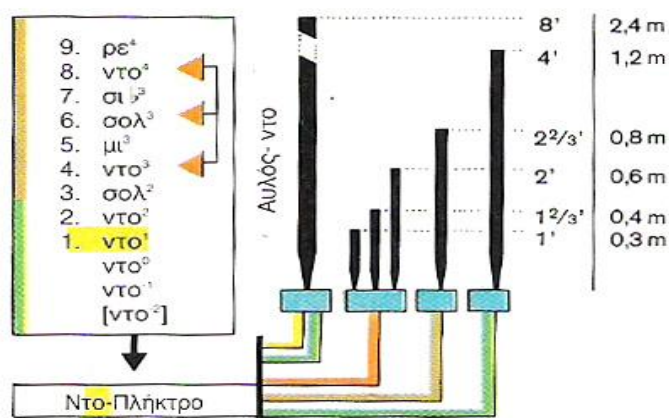
⁸ Από το Wolrd Wide Web: http://en.wikipedia.org/wiki/Hammond_organ

Το εκκλησιαστικό όργανο είναι το κατ' εξοχήν όργανο που λειτουργεί με τη λογική της προσθετικής σύνθεσης. Εμφανίζεται κατά τη περίοδο του μεσαίωνα και μέχρι σήμερα παίρνει διάφορες μορφές βελτιώνοντας συνεχώς τους μηχανισμούς του (που από υδραυλικοί έχουν γίνει μηχανικοί). Το χαρακτηριστικό του εκκλησιαστικού οργάνου, είναι ότι αποτελείται από αυλούς διαφορετικού μήκους οι οποίοι μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους και να παράγουν ένα ενιαίο ηχοχρώμα (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Πλάγια και μπροστινή όψη εκκλησιαστικού οργάνου (σχηματικά), (Άτλας της μουσικής, 1994, σελ. 56)

Για τη διαμόρφωση του ηχοχρώματος κατασκευάζονται, μεταξύ άλλων, και αυλοί κουρδισμένοι πάνω στη σειρά των αρμονικών. Οι αυλοί συνδυάζονται σε σειρές κλιμάκων και αποτελούν τα ρετζίστρα (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 Ρεζίιστρο, αρμονικοί του ντο και μήκος αυλών σε πόδια (')
(Άτλας της μουσικής, 1994, σελ. 56)

Το ηχόχρωμα βέβαια εξαρτάται εκτός από τις αναλογίες των σωλήνων και από το υλικό και το σχήμα τους (Άτλας της μουσικής, 1994, σελ. 57). Όλα τα συγγενικά όργανα του εκκλησιαστικού οργάνου λειτουργούν με βάση αυτή τη λογική.

Γενεές κατασκευαστών οργάνων ασχολήθηκαν με την ιδέα της προσθετικής σύνθεσης. Το πρώτο ηλεκτρικό όργανο, ήταν το **Telharmonium ή Dynamophone**. Αυτό χρησιμοποίησε ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρομηχανικών ταλαντωτών οι οποίοι έλεγχαν με ακρίβεια τη συχνότητα (Freed et al., 1993).

Το Telharmonium σχεδιάστηκε από τον Thaddeus Cahill (1867-1934) και παρουσιάστηκε στο κοινό το 1906 στο Holyoke της Μασαχουσέτης των ΗΠΑ. Αποτελούνταν από μια συλλογή τροποποιημένων ηλεκτρογεννητριών, οι οποίες με κάποιες ρυθμίσεις παρήγαγαν εναλλασσόμενη τάση σε διάφορες ακουστές συχνότητες. Το ακουστικό αποτέλεσμα ήταν ένα σύνθετος ήχος που προέκυπτε από την άθροιση αυτών των σημάτων. Το Telharmonium «δίνει τη δυνατότητα στον εκτελεστή να μεταβάλλει τη μουσική ποιότητα των επιλεγμένων ήχων ως προς το σχετικό πλάτος καθενός από τους βασικούς αρμονικούς που σχετίζονται με μία

συγκεκριμένη νότα» (Manning, 1985, σελ. 1). Το Telharmonium, λοιπόν, παράγει μουσικούς ήχους από ηλεκτρικά σήματα βασισμένους στην αρχή της προσθετικής σύνθεσης.



Σχήμα 2.3 Το Telharmonium το οποίο έχει μήκος 60 πόδια και ζυγίζει 200 τόνους⁹

Τον Απρίλιο του 1935 εμφανίζονται τα διάσημα Hammond organs από τον Laurens Hammond. Το **Hammond organ** χρησιμοποιήθηκε για να αντικαταστήσει το εκκλησιαστικό όργανο. Όπως και το Telharmonium, παράγει κυματομορφές με μηχανικές γεννήτριες (tonewheels). Κάθε νότα στο όργανο αποτελείται από τη θεμέλια συχνότητα και ένα αριθμό αρμονικών. Αυτό είναι και το ιδιαίτερό του χαρακτηριστικό, η χρήση ενός συνδετικού μηχανισμού (drawbar) για την μίξη των διαφόρων συνιστωσών της κυματομορφής σε ποικίλες αναλογίες. Επειδή οι κυματομορφές παράχθηκαν από μηχανικές ηλεκτρογεννήτριες και όχι

⁹Από το World Wide Web:

http://www.obsolete.com/120_years/machines/telharmonium/index.html

ηλεκτρονικούς ταλαντωτές τα αυθεντικά Hammond organs θεωρούνται ηλεκτρικά και όχι ηλεκτρονικά όργανα. Στα πιο σύγχρονα Hammond organs χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί ταλαντωτές για τη παραγωγή ημιτονοειδών κυματομορφών¹⁰.



Σχήμα 2.4 Ο Laurens Hammond και το Model A¹¹

Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών για τη παραγωγή ήχου ξεκινάει στα τέλη της δεκαετίας του 50, από τον Max Mathews και τους συνεργάτες του (Roads, 1996, σελ 10). Όμως, οι υπολογιστές αυτοί είχαν περιορισμένες δυνατότητες και εξαιρετικά υψηλό κόστος και ήταν δύσκολο να εφαρμόσουν μια τεχνική όπως η προσθετική σύνθεση. Έτσι τη δεκαετία του 60, δημιουργήθηκαν άλλοι τρόποι σύνθεσης, πιο οικονομικοί και εύχρηστοι όπως η Frequency Modulation (FM)¹². Στα

¹⁰ Από το World Wide Web: http://en.wikipedia.org/wiki/Hammond_Organ

¹¹ Από το World Wide Web : <http://theatreorgans.com/hammond/>

¹² Από το World Wide Web: <http://x.i-dat.org/~csem/UNESCO/5/index.html>

τέλη της δεκαετίας του 70, υπήρχαν μηχανές οι οποίες ήταν ικανές να συνθέσουν με πιστότητα εκατοντάδες ημιτονοειδείς κυματομορφές, αλλά το υπερβολικό κόστος και τα περιορισμένα εργαλεία προγραμματισμού, απέτρεπαν τη διάδοσή τους (Freed, 1999a).

Το πρώτο εμπορικό ψηφιακό ηλεκτρονικό όργανο, εμφανίζεται μόλις το 1976, με σχετική επιτυχία. Πρόκειται για το **Synclavier** που δημιουργήθηκε στο κολέγιο του Dartmouth και βγήκε στη αγορά σε συνεργασία με την New England Digital Corporation. Το Synclavier χρησιμοποιεί μια τράπεζα γεννητριών, η οποία παρέχει τη δυνατότητα επιλογής πολλών αρμονικών για κάθε φωνή (ανάλογα με το μοντέλο μπορεί να έχει από 8 έως 32 αρμονικούς). Το σύστημα ελέγχου του οργάνου αποτελείται από ένα μικροϋπολογιστή (microcomputer)¹³ και μια μνήμη των 128 kilobyte. Ο εκτελεστής σε αυτό το όργανο, εκτός των άλλων, μπορεί να ρυθμίσει τους ανεξάρτητους αρμονικούς και να τοποθετήσει περιβάλλουσες σε κάθε έναν χωριστά καθώς και να ρυθμίσει μια γενική περιβάλλουσα του ήχου (Manning, 1985, σελ. 249).



Σχήμα 2.5 To Synclavier (Phil Burk et al., 2002)

¹³ ή αλλιώς προσωπικό υπολογιστή

Κατά τη δεκαετία του 70, οι μόνες εφαρμογές της προσθετικής σύνθεσης γίνονταν μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού του Fourier (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT), όπου έπαιρνε τα δεδομένα της ανάλυσης και έπειτα ανασυνθέτετε τον ήχο προσθετικά (Freed, 1999a).

Το πρώτο όργανο το οποίο μπόρεσε με πιστότητα να παράγει προσθετική σύνθεση σε πραγματικό χρόνο χωρίς να θυσιάζει την πολυφωνία¹⁴ εμφανίζεται στα μέσα της δεκαετίας του 80. Πρόκειται για το ιαπωνικής προέλευσης **Kawai K5** από τη New England Digital Corporation στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το Kawai K5 επέτρεπε προσθετική σύνθεση 64 αρμονικών για κάθε νότα ή 128 αν χρησιμοποιούνταν δύο νότες για κάθε φωνή και το πιο σημαντικό, έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των τιμών ποικίλων ομάδων υπερτόνων¹⁵.

Η ανακάλυψη, το 1983, του διασυνδεδετικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας MIDI (Musical Instruments Digital Interface) έκανε πιο εύχρηστους τους συνθετητές, οι οποίοι σταδιακά γίνονται όλοι ψηφιακοί. Σήμερα, «οι συνθετητές του παρελθόντος έχουν αντικατασταθεί από μικροσκοπικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC-integrated circuits ή chips) τα οποία μπορούν να πραγματοποιήσουν πολυφωνικούς αλγόριθμους σύνθεσης σε πραγματικό χρόνο» (Roads, 1996, σελ. 103). Η ψηφιακή παραγωγή ήχου γίνεται πλέον με κάποιο πρόγραμμα σύνθεσης ενός λογισμικού σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή (Roads, 1996, σελ. 99). Όπως αναφέρει ο Miller Puckette (2003, εισαγωγή), «οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι σχετικά οικονομικοί και τα αποτελέσματα της χρήσης τους είναι πιο εύκολο να οριστούν και να αναπαραχθούν από αυτά προηγούμενης γενιάς εξοπλισμού. Υπό αυτή την έννοια τουλάχιστον, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αποτελεί το ιδανικό ηλεκτρονικό μουσικό όργανο, έως ότου κάποιος ανακαλύψει κάτι πιο φτηνό και ευέλικτο από αυτόν».

¹⁴ πριν από το Kawai K5 υπήρξαν και άλλα όργανα που συνέθεταν ήχους σε πραγματικό χρόνο, αλλά είχαν προβλήματα κυρίως στην πολυφωνία. Οι καλύτεροι ήχοι ήταν μονοφωνικοί ή δίφωνικοί.

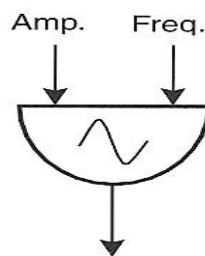
¹⁵ Από το World Wide Web:

http://www.soundonsound.com/sos/1997_articles/oct97/synthschool4.html

2.2. Στοιχειώδεις γεννήτριες ήχου (**unit generators**) που χρησιμοποιούνται στην προσθετική σύνθεση

2.2.1. Ψηφιακός ταλαντωτής (**oscillator**)

Για τη δημιουργία ενός οργάνου¹⁶ προσθετικής σύνθεσης σε υπολογιστή απαιτείται η χρήση στοιχειωδών γεννητριών ήχου (**unit generators**). Οι γεννήτριες ήχου έχουν σχεδιαστεί βασισμένες στις συσκευές των αναλογικών συνθετητών. Η βασική γεννήτρια ήχου είναι ο **ταλαντωτής** (Miranda, 2002, σελ. 15). Ο ταλαντωτής είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο παράγει περιοδικές κυματομορφές (Καμπουρόπουλος, 2003, σελ. 1). Ένας ταλαντωτής έχει τουλάχιστον τρεις παραμέτρους: συχνότητα, πλάτος και κυματομορφή. Συνήθως, οι ψηφιακοί ταλαντωτές απεικονίζονται σαν μισός κύκλος με ένα ζευγάρι εισόδων-ένα για το πλάτος και ένα για τη συχνότητα καθώς και το σήμα εξόδου στο κάτω μέρος (Miranda, 2002, σελ. 16) (σχήμα 2.6).

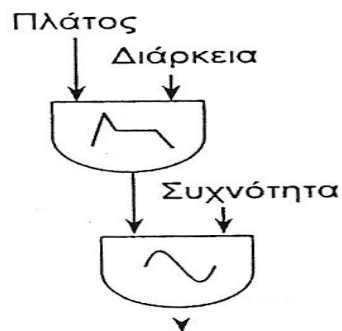


Σχήμα 2.6 Σύμβολο ψηφιακού ταλαντωτή (Miranda, 2002, σελ 16)

¹⁶ ο όρος όργανο (instrument) αναφέρεται σε έναν αλγόριθμο ο οποίος πραγματοποιεί ένα μουσικό γεγονός (Dodge and Jerse, 1985, σελ. 63)

2.2.2 Γεννήτρια περιβάλλουσας (envelope generator)

Μια άλλη επίσης πολύ σημαντική γεννήτρια ήχου είναι η γεννήτρια συνάρτησης (function generator) (Miranda, 2002, σελ 16) ή αλλιώς γεννήτρια περιβάλλουσας (envelope generator). Η **γεννήτρια περιβάλλουσας** είναι ένα μη περιοδικό σήμα ελέγχου το οποίο μπορεί να διαμορφώσει τις τιμές μιας οποιαδήποτε ηχητικής παραμέτρου (π.χ. έντασης, τονικού ύψους) μέσα στο χρόνο. Είναι δηλαδή, μια συνάρτηση χρόνου προορισμένη να προσδίδει δυναμικές εξελίξεις στους ηλεκτρονικά στατικούς παραγόμενους ήχους (Καμπουρόπουλος, 2003, σελ. 2) (σχήμα 2.7)



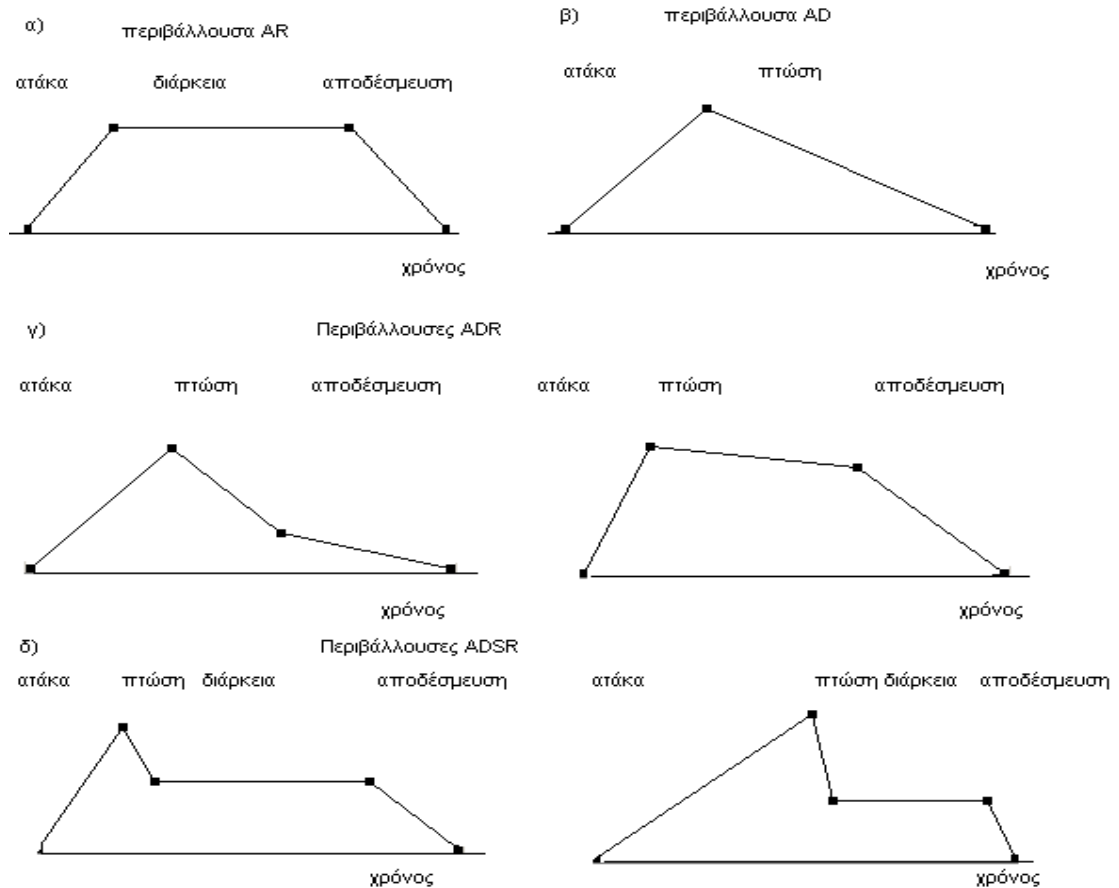
Σχήμα 2.7 Εφαρμογή περιβάλλουσας πλάτους πάνω σε έναν ταλαντωτή

Οι γεννήτριες περιβάλλουσας μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές. Ανάλογα με τον αριθμό των σημείων προσδιορίζουν το σχήμα της περιβάλλουσας και χωρίζονται σε κατηγορίες. Οι πιο απλές παρέχουν έλεγχο στην αρχή και στο τέλος

του ήχου, ενώ οι πιο σύνθετες μπορούν να έχουν ένα πολύ μεγάλο αριθμό σημείων.

Τα μέρη στα οποία χωρίζονται οι «καμπύλες» που σχηματίζουν ονομάζονται σημεία ή στάδια. Τα κυριότερα είναι η ατάκα (attack), η πτώση (decay), το σταθερό μέρος ή διάρκεια (sustain) και η αποδέσμευση του ήχου (release) (Βλ. ενότητα 1.1.5).

Οι πιο συνηθισμένες μορφές περιβάλλουσας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.8):



Σχήμα 2.8 α) περιβάλλουσα Attack release (AR). Παρέχει έλεγχο στην αρχή και στο τέλος του ήχου, β) περιβάλλουσα Attack decay (AD) όπου η πτώση ξεκινάει αμέσως μετά την ατάκα (κρουστοί ήχοι), γ) δύο περιβάλλουσες Attack decay release (ADR), δ) δύο περιβάλλουσες Attack decay sustain release (ADSR)

Η πιο συνηθισμένη περιβάλλουσα είναι η **Attack Decay Sustain Release (ADSR)**. Το μειονέκτημα της είναι ότι το μέρος sustain είναι στατικό. Αυτό δυσκολεύει για παράδειγμα, τη δημιουργία περιβαλλουσών των οποίων το σταθερό

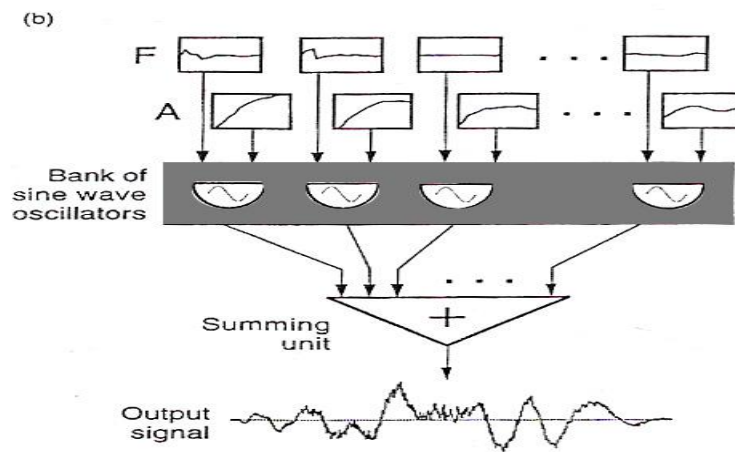
μέρος του ήχου εξασθενεί σταδιακά (Russ, 1996, σελ. 87). Αυτή τη μορφή περιβάλλουσας χρησιμοποιούσαν οι περισσότεροι εμπορικοί αναλογικοί συνθετητές. Στη χρήση λογισμικών για την παραγωγή κυματομορφών η περιβάλλουσα των τεσσάρων σταδίων είναι αναχρονιστική. «Η διαμόρφωση του πλάτους είναι μια λεπτή διεργασία και έτσι απαιτούνται πιο ευέλικτες περιβάλλουσες (envelope editors) που επιτρέπουν στον μουσικό να χαράξει αυθαίρετες καμπύλες» (Roads, 2003, σελ. 97).

Τα περισσότερα προγράμματα λογισμικού παρέχουν τη δυνατότητα καθορισμού μεγάλου αριθμού σημείων. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα στο χρηστή να φτιάξει σχήματα περιβάλλουσας τα οποία προσεγγίζουν καμπύλες, κάνοντας έτσι πιο «μαλακό» τον ήχο.

Το είδος της περιβάλλουσας, έχει μεγάλη επίδραση στο ηχόχρωμα του τελικού ήχου (Miranda, 2002, σελ. 112) (βλ. επίσης ενότητα 1.1.5.).

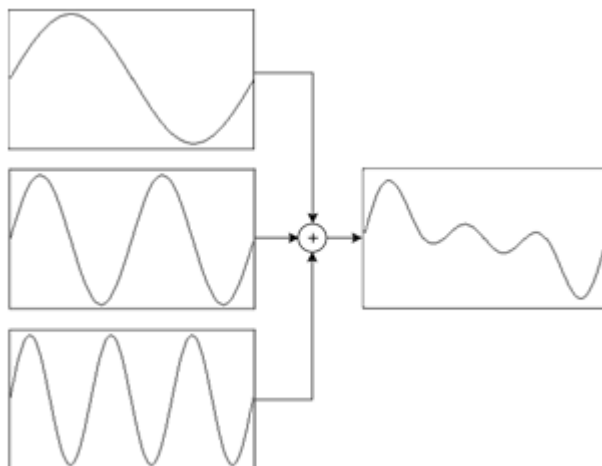
2.3. Ψηφιακή προσθετική σύνθεση

«Για σύνθεση ήχου με χρήση της προσθετικής σύνθεσης απαιτείται ένας ξεχωριστός ημιτονοειδής ταλαντωτής για κάθε υπέρτονο, με τις κατάλληλες γεννήτριες συνάρτησης εφαρμοσμένες στο πλάτος και τη συχνότητα του κάθε ενός» (Dodge and Jerse, 1985, σελ. 79). Στη συνέχεια, οι έξοδοι από όλους τους ταλαντωτές τροφοδοτούν μια μονάδα (module) η οποία προσθέτει τα σήματα. Η μονάδα αυτή με τη σειρά της δίνει το αποτέλεσμα της πρόσθεσης σε ένα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα (Digital to Analog Converter, DAC) για να μετατρέψει το σήμα (Roads, 1996, σελ. 141) (σχήμα 2.9).



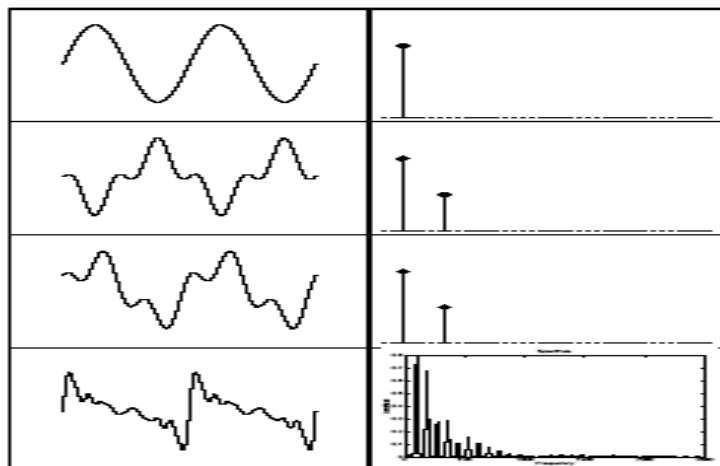
Σχήμα 2.9 Ψηφιακή προσθετική σύνθεση (Roads, 1996, σελ. 142)

«Ένα όργανο προσθετικής σύνθεσης λοιπόν, λειτουργεί αθροίζοντας ανεξάρτητα παραγόμενες κυματομορφές προκειμένου να δημιουργήσει έναν συγκεκριμένο ήχο» (Miranda, 2002, σελ. 50) (σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Πρόσθεση τριών αρμονικά συσχετιζόμενων ημιτονοειδών κυματομορφών προκειμένου να σχηματίσουν μια περιοδική μη ημιτονοειδή κυματομορφή (Miranda, 2002, σελ. 50)

Τη μορφή της κυματομορφής επηρεάζει η φάση, παρ' όλα αυτά το άκουσμα είναι το ίδιο (σχήμα 2.11).



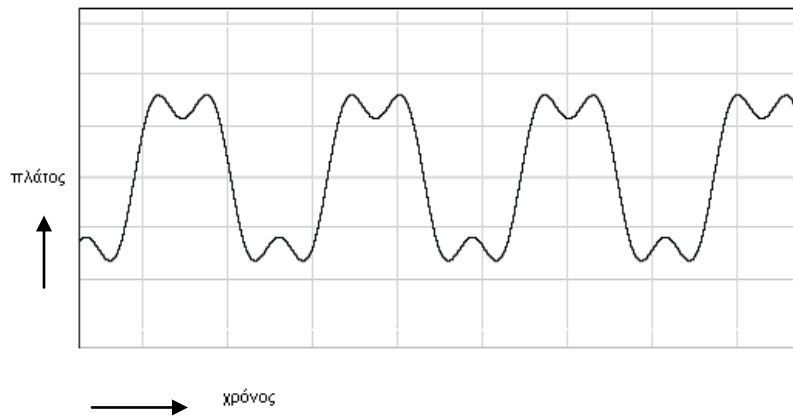
Σχήμα 2.11 Διαγράμματα χρόνου- πλάτους και τα αντίστοιχα διαγράμματα πλάτους-συχνότητας κατά την πρόσθεση δύο ημιτονοειδών κυματομορφών. Στο πρώτο απεικονίζεται μια μόνο ημιτονοειδής κυματομορφή, στο δεύτερο το άθροισμα δύο ίδιων ημιτονοειδών κυματομορφών, στο τρίτο τα άθροισμα των ίδιων κυματομορφών αλλά με διαφορετικές φάσεις και στο τελευταίο ένα σύνθετος ήχος που προήλθε από τη σύνθεση πολλών ημιτονοειδών κυματομορφών (Marchand, 2000, σελ.32)

2.4. Προσθετική σύνθεση με στατικό φάσμα

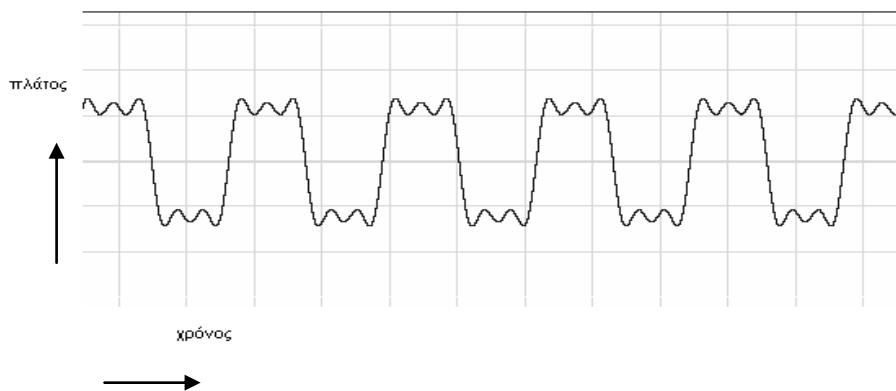
Η προσθετική σύνθεση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη να παράγει στατικές κυματομορφές (fixed-waveforms), δηλαδή κυματομορφές που δε μεταβάλλονται κατά τη πορεία του ηχητικού γεγονότος.

Για τη δημιουργία μιας στατικής κυματομορφής με αρμονικό φάσμα, σε κάποιο λογισμικό, ο χρήστης ρυθμίζει τις συχνότητες των ταλαντωτών έτσι ώστε με βάση τη μία, ως θεμέλιο συχνότητα, οι υπόλοιπες να σχηματίζουν μια αρμονική σειρά. Στη συνέχεια, προσαρμόζει τα σχετικά πλάτη των αρμονικών της θεμελίου. Εφόσον οι ρυθμίσεις έχουν οριστεί, το λογισμικό προσθέτει τα σήματα των ταλαντωτών και παράγει την κυματομορφή. Όταν αλλάζει το τονικό ύψος του ταλαντωτή, αν το λογισμικό προσφέρει αυτή τη δυνατότητα, όλες οι ρυθμίσεις προσαρμόζονται στην νέα συχνότητα (Roads, 1996, σελ. 136).

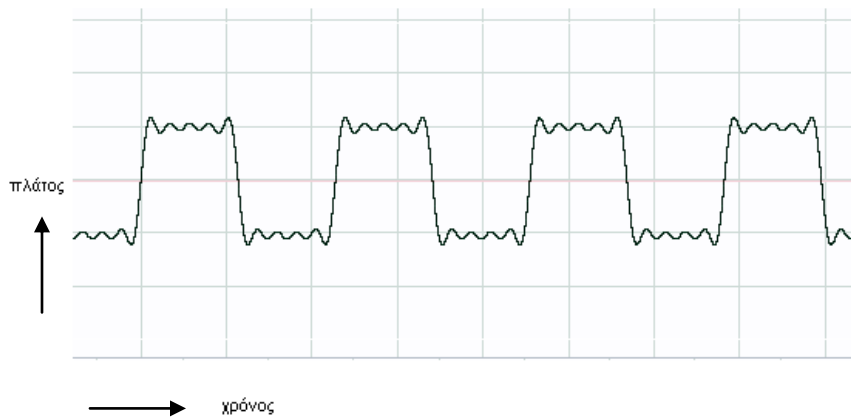
Τα παρακάτω σχήματα (σχήματα 2.11, 2.12, 2.13) δείχνουν μια σταδιακή δημιουργία μιας περίπου τετραγωνικής κυματομορφής (quasi-square waveform). Το σταθερό μέρος του ήχου ενός κλαρινέτου, για παράδειγμα, προσεγγίζει μια τετραγωνική κυματομορφή, γιατί το φάσμα του αποτελείται μόνο από περιττούς αρμονικούς λόγω του κλειστού του σωλήνα (Pierce, 2001, σελ. 43). Έτσι, προκύπτει από την ανάλυση ότι η τετραγωνική κυματομορφή αποτελείται από περιττής τάξης αρμονικούς (1, 3, 5, 7 κ.λ.π.), η ένταση των οποίων προσδιορίζεται από τη σχέση $1/n$ όπου n ο αριθμός του κάθε αρμονικού.



Σχήμα 2.11 περίπου- τετραγωνική κυματομορφή που περιέχει τον πρώτο και τρίτο αρμονικό της νότα A4 (440Hz)



Σχήμα 2.12 Περίπου - τετραγωνική κυματομορφή των περιττών αρμονικών ως τον πέμπτο αρμονικό της νότας A4 (440Hz)

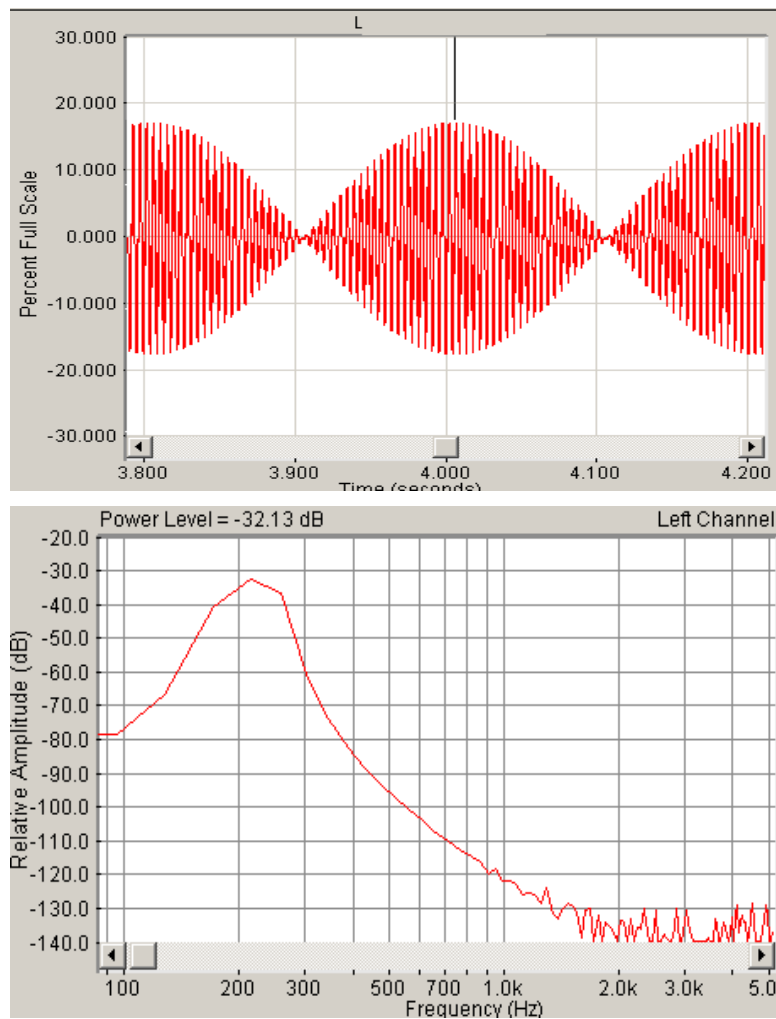


Σχήμα 2.13 Περίπου- τετραγωνική κυματομορφή των περιπτών αρμονικών ως τον ένατο αρμονικό της νότας A4 (440Hz)

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται πως όσο προσθέτουμε αρμονικούς τόσο πιο καλά προσεγγίζουμε την τετραγωνική κυματομορφή. Γενικά, στη σύνθεση οποιασδήποτε κυματομορφής όσο περισσότεροι αρμονικοί υπάρχουν τόσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον ήχο που προσπαθούμε να προσεγγίσουμε (Tempelaars, 1996, σελ. 118). Παρ' όλα αυτά, με τη χρήση έστω και λίγων αρμονικών μπορεί να δημιουργηθεί ένα αναγνωρίσιμο είδος ηχοχρώματος, παρόλο που το σχήμα της κυματομορφής δεν θα είναι το αναμενόμενο, (όπως συμβαίνει και στο παραπάνω παράδειγμα) (Russ, 1996, σελ. 109).

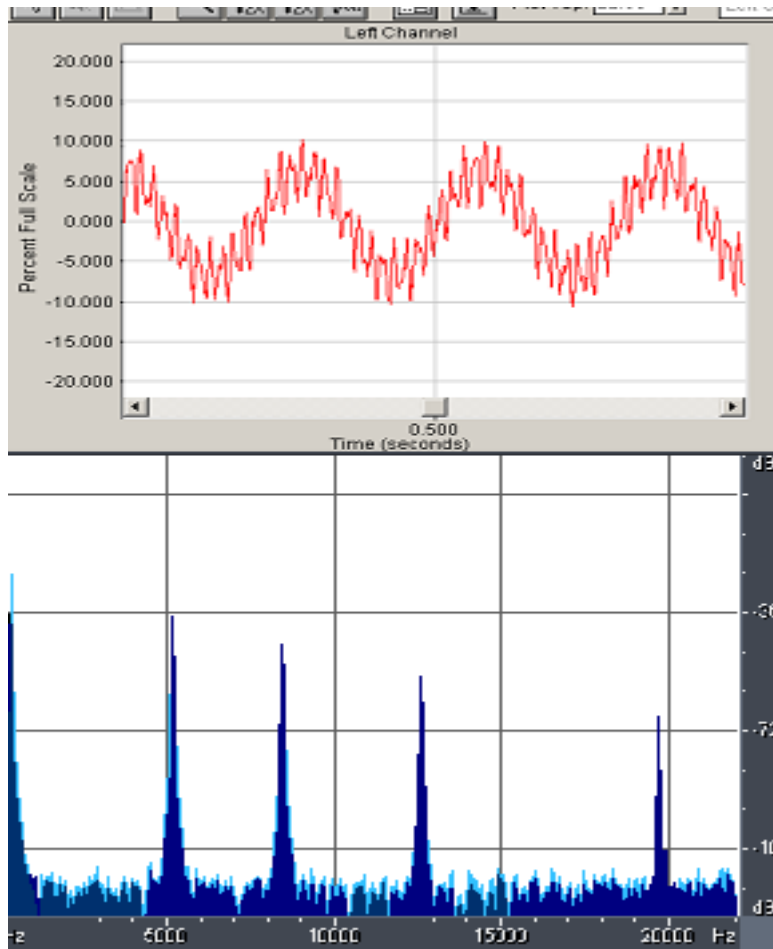
Βέβαια, η τεχνική αυτή μπορεί να δημιουργήσει και φάσμα το οποίο δεν είναι απαραίτητα αρμονικό. Τότε, κατά την κατασκευή ήχων χρησιμοποιεί υπέρτονους αντί για αρμονικούς. Στους τονικούς ήχους των φυσικών οργάνων για παράδειγμα, η παρουσία των υπερτόνων εμφανίζεται με τη μορφή θορύβου (π. χ. στην ατάκα του ήχου ενός φλάουτο), ή διακροτημάτων (beat frequencies) τα

οποία προκύπτουν όταν οι αρμονικοί του ήχου δεν είναι καλά κουρδισμένοι μεταξύ τους (Russ, 1996, σελ. 112). Το παρακάτω σχήμα δείχνει το διακρότημα που προκύπτει από την προσθετική σύνθεση δύο ημιτονοειδών κυματομορφών με πολύ κοντινές μεταξύ τους συχνότητες (η πρώτη συχνότητα είναι 220 Hz και η δεύτερη 225 Hz) (σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα πλάτους-χρόνου και τα αντίστοιχο διάγραμμα πλάτους- συχνότητας δύο κοντινών συχνοτήτων (220Hz και 225Hz). Παρατηρούμε ότι οι δύο συχνότητες δεν ξεχωρίζουν μεταξύ τους

Η χρήση υπερτόνων μπορεί επίσης, να οδηγήσει στην δημιουργία νέων ηχοχρωμάτων. Ένα τέτοιο νέο, μη αρμονικό φάσμα απεικονίζεται στη συνέχεια (σχήμα 2.15)



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα πλάτους-χρόνου και τα αντίστοιχο διάγραμμα πλάτους- συχνότητας μη ακεραίων πολλαπλασίων θεμελίου συχνότητας των 329.628 Hz

Η δημιουργία στατικών κυματομορφών παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για το σταθερό μέρος της νότας. Η ατάκα της νότας, όμως, ενός φυσικού οργάνου, στην οποία η μίξη της συχνότητας αλλάζει σε υπερβολικά γρήγορους ρυθμούς, είναι αδύνατο να δημιουργηθεί σε ένα στατικό φάσμα (Roads, 1996, σελ. 139). Για αυτό είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας γεννήτριας περιβάλλουσας πάνω στο πλάτος του ταλαντωτή για να μπορεί να μεταβάλλει την έντασή του κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ανθρώπινο αυτί δεν αντιλαμβάνεται διαφορές της φάσης. Παρ' όλα αυτά, σε αιφνίδιες μεταβολές του ήχου (transients), καθώς και σε σύνθετους ήχους όπου οι φάσεις ορισμένων συστατικών μετακινούνται στο χρόνο, οι διαφορές φάσης γίνονται αντιληπτές (Roads, 1996, σελ. 137). Έτσι, όταν κάποιος εργάζεται με μεγάλη λεπτομέρεια οφείλει να τη λάβει υπόψη του.

2.5. Προσθετική σύνθεση με μεταβαλλόμενο στο χρόνο φάσμα

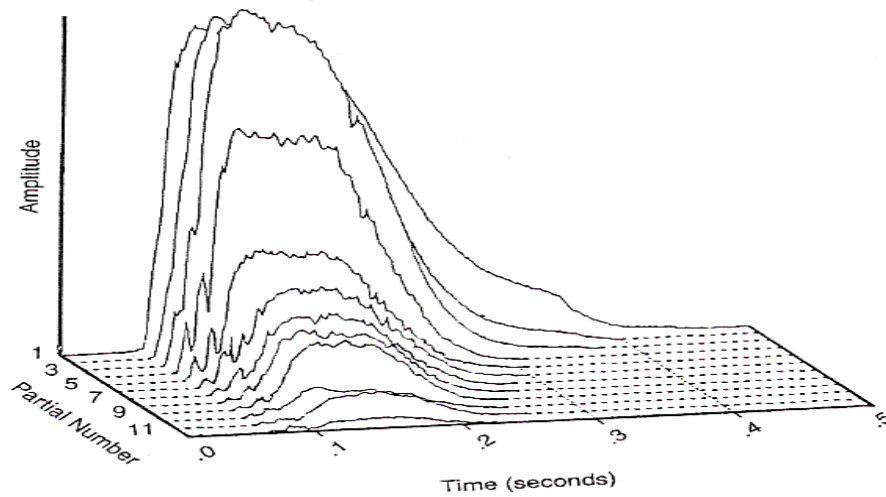
Για τη δημιουργία πιο «ζωντανών» ήχων, για την προσέγγιση του ήχου των φυσικών οργάνων καθώς και για την απόκτηση πιο ενδιαφερόντων συνθετικών ηχοχρωμάτων, χρειάζεται να μεταβάλλουμε τις διάφορες παραμέτρους του ήχου κατά τη διάρκεια του χρόνου. «Για τη δημιουργία ενός φάσματος το οποίο μεταβάλλεται στο χρόνο εφαρμόζουμε σε κάθε είσοδο συχνότητας και πλάτους στους ταλαντωτές μια μεταβαλλόμενη στο χρόνο συνάρτηση **περιβάλλουσας** που εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του μουσικού γεγονότος» (Roads, 1996, σελ. 141).

Εφαρμόζοντας λοιπόν, μια περιβάλλουσα στην είσοδο του πλάτους του ταλαντωτή μπορούμε να δημιουργήσουμε μεταβαλλόμενα στο χρόνο πλάτη. Αφού ορίσουμε τη διάρκεια και την καμπύλη της περιβάλλουσας, τότε αυτή ελέγχει το πλάτος κάθε νότας. Κάνοντας τη ίδια διαδικασία στην είσοδο της συχνότητας,

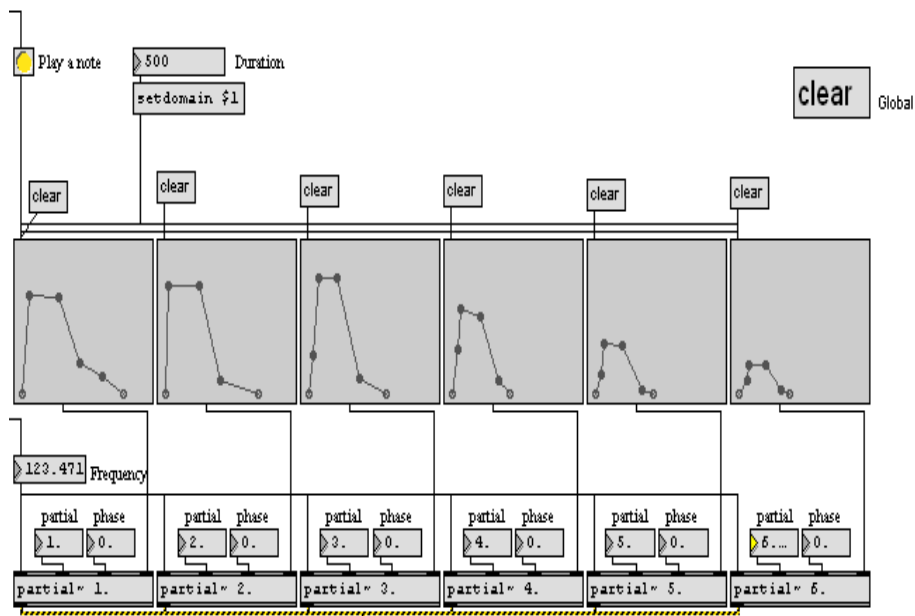
μπορούμε να αποκτήσουμε αλλαγές στο τονικό ύψος, όπως βιμπράτο (vibrato) ή γκλισσάντο (glissando) (Roads, 1996, σελ. 98).

Οι λειτουργίες της περιβάλλουσας είναι καθοριστικής σημασίας για τη μορφή του παραγόμενου ήχου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά του τελικού ηχητικού αποτελέσματος κατά την αλλαγή μόνο της χρονικής διάρκειας του ήχου. Όταν αλλάζει μόνο η χρονική διάρκεια και όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, το ηχόχρωμα που ακούγεται στις δύο περιπτώσεις είναι αρκετά διαφορετικό. Γιατί π.χ. μια απότομη ατάκα ενός ήχου 500ms δε θα ακουστεί τόσο απότομη σε έναν ήχο 5000ms.

Αποκτώντας τα δεδομένα της ανάλυσης ενός ήχου μπορεί ο χρήστης να ανακατασκευάσει προσεγγιστικά μια κυματομορφή. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την προσπάθεια σχηματισμού των δεδομένων, που προήλθαν από την ανάλυση του φάσματος μιας νότας τρομπέτας, με τη χρήση ενώ εισαγωγικού patch προσθετικής σύνθεσης, της γραφικής γλώσσας προγραμματισμού Max/MSP (βλ. ενότητα 3.2.4.). Στο σχήμα 2.16 φαίνεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του φάσματος μιας τρομπέτας και στο σχήμα 2.17 μια προσεγγιστική τοποθέτηση των δεδομένων της στη Max/MSP.



Σχήμα 2.16 Τρισδιάστατη απεικόνιση μεταβαλλόμενου φάσματος τρομπέτας (Roads, 1996, σελ. 141)



Σχήμα 2.17 Προσέγγιση φάσματος τρομπέτας με τη χρήση εισαγωγικού patch προσθετικής σύνθεσης της Max/MSP

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τις περιβάλλουσες των έξι πρώτων αρμονικών μιας θεμελίας συχνότητας των 123.371 Hz. Το ηχητικό αποτέλεσμα προσεγγίζει το ηχόχρωμα της τρομπέτας. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται πως κατά τη δημιουργία μια σύνθετης αρμονικής δομής, τα δεδομένα της οποίας προέρχονται από την ανάλυση, είναι πολύ δύσκολο να σχηματιστούν με το χέρι οι περιβάλλουσες πλάτους κάθε υπέρτονου, με την απαραίτητη λεπτομέρεια. Για αυτό το λόγο έχουν δημιουργηθεί μέθοδοι ανάλυσης/ανασύνθεσης που προσφέρουν λύσεις σε αυτό το πρόβλημα (βλ. ενότητα 2.7).

Ένα από τα πράγματα που θα πρέπει να προσέχει κανείς κατά τη δημιουργία σύνθετων ήχων με την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης είναι οι τιμές των συχνοτήτων των υψηλότερων αρμονικών. Οι συχνότητες αυτές δε θα πρέπει να ξεπερνάνε το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας γιατί τότε «καθρεφτίζονται» σε χαμηλότερες συχνότητες και μεταβάλλουν τον τελικό ήχο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναδίπλωση συχνοτήτων (aliasing ή foldover) (Καμπουρόπουλος Αιμίλιος, σημειώσεις του μαθήματος: *Πληροφορική και Μουσική/Μουσικολογία: Εισαγωγή στη μουσική πληροφορική*, του Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη).

2.6. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες προσθετικής σύνθεσης

Η προσθετική σύνθεση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική γιατί παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου κάθε υπέρτονου. Μπορεί να θέτει διαφορετικές ρυθμίσεις για τη συχνότητα και το πλάτος του κάθε ενός με αποτέλεσμα να δημιουργεί αρκετά «ζωντανά» ηχοχρώματα. Επιπλέον, η λογική της είναι πολύ απλή και γίνεται εύκολα κατανοητή από τους μουσικούς σε αντίθεση με άλλες τεχνικές ψηφιακής σύνθεσης (Freed, et al., 1993). Πρόκειται λοιπόν, για μια τεχνική η οποία είναι ικανή να δημιουργήσει οποιοδήποτε ηχόχρωμα με υψηλής

ποιότητας ήχο (Dodge and Jerse, 1985, σελ. 79). Η τεχνολογία έχει φτάσει στο σημείο να δημιουργεί χίλιους ημιτονοειδείς υπέρτονους σε έναν desktop υπολογιστή (SGI Power Indigo 2)¹⁷.

Όμως, η τεχνική αυτή παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες κατά τη χρήση της. Έτσι, είναι δύσκολο να δημιουργηθούν οι αιφνίδιες μεταβολές του ήχου (transients). Η ατάκα της νότας ενός φλάουτου περιέχει αρκετό θόρυβο από την αναπνοή, οπότε για την σύνθεσή της θα πρέπει να συντεθούν πολλά διαφορετικά είδη πληροφοριών, όπως θόρυβος, αιφνίδιες μεταβολές της ατάκας, και άλλα για τον κάθε ένα υπέρτονο. Εδώ, μπορεί και οι διαφορές φάσης να προκαλέσουν απρόσμενα αποτελέσματα. Παρόλο που η αρμονική δομή ενός ήχου δεν εξαρτάται από τις φάσεις των ανεξάρτητων συνιστωσών του (εκτός της σπάνια περίπτωσης της αναίρεσης) οι γρήγορες μεταβολές του ήχου, όπως η ατάκα ή η πτώση εξαρτώνται από τη φάση των κυματομορφών¹⁸.

Επίσης, είναι αρκετά δύσκολο να δημιουργηθούν ηχοχρώματα κρουστών οργάνων, όπως τύμπανα, κύμβαλα, λόγω του ότι περιέχουν πλήθος υπερτόνων. Οπότε, θα πρέπει το λογισμικό να προσφέρει μεγάλο αριθμό ταλαντωτών, καθώς και έναν ισχυρό υπολογιστή που θα μπορεί να εκτελέσει τις ρυθμίσεις (Clark, 2003).

Ακόμη, τα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε φυσικού ήχου μεταβάλλονται, εκτός των άλλων, και σύμφωνα με το τονικό ύψος και το επίπεδο της δυναμικής. Έτσι, απαιτεί πολλαπλούς συνθετικούς συνδυασμούς¹⁹.

Όπως, φαίνεται, η τεχνική της προσθετικής σύνθεσης απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων για το σχηματισμό του ήχου (Dodge and Jerse, 1985, σελ. 79). Στην περίπτωση που η παραγωγή του σήματος γίνεται σε πραγματικό χρόνο πολύ

¹⁷ Από το World Wide Web:

<http://cnmat.cnmat.berkeley.edu/~adrian/ICMC95.html>

¹⁸ Από το World Wide Web : <http://cnmat.cnmat.berkeley.edu/~adrian/ICMC95.html>

¹⁹ Από το World Wide Web:

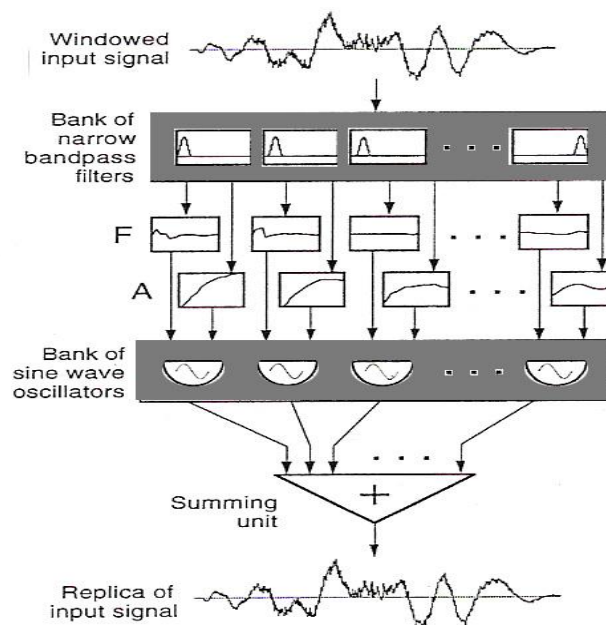
http://www.csis.ul.ie/staff/CiaranCasey/CS5631_Sound_synth/Wk2_Lec2.htm

σημαντικοί παράγοντες είναι: η πιστότητα με την οποία το σήμα μπορεί να αναπαραχθεί και η ταχύτητα με την οποία μπορεί να εκτελεστεί²⁰. Για τη σωστή λειτουργία του, λοιπόν, απαιτεί ένα γρήγορο και με μεγάλη ισχύ ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε παλαιότερα υλικά, αυτές οι λειτουργίες ήταν δύσκολο να εκτελεστούν σε πραγματικό χρόνο λόγω έλλειψης υπολογιστικών δυνατοτήτων και λόγω κόστους. Σήμερα τόσο το κόστος, όσο και οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι ικανές να εκτελέσουν τη προσθετική σύνθεση με θαυμαστά αποτελέσματα.

2.7. Προσθετική ανάλυση/ανασύνθεση

«Η προσθετική σύνθεση έχει αποδεχτεί σαν ίσως, η πιο ισχυρή και ευέλικτη μέθοδος φασματικής προτυποποίησης (spectral modelling)» (Miranda, 2002, σελ. 51). Παρόλο που είναι μια τεχνική οικεία προς τους μουσικούς, από την άποψη ότι ασχολείται με απλούς όρους συχνοτήτων και πλατών, είναι «επώδυνη» ως προς το προσδιορισμό των παραμέτρων της. «Εναλλακτικές μέθοδοι έχουν προταθεί παρέχοντας εργαλεία που δίνουν αυτόματα τις παραμέτρους σύνθεσης, από την ανάλυση του φάσματος δειγμάτων ήχου» (Miranda, 2002, σελ. 51). Είναι δηλαδή, κάποιες μέθοδοι ανάλυσης του ήχου οι οποίες παρέχουν αυτόματα τα δεδομένα της ανάλυσης, ελάχιστα τροποποιημένα, για να δημιουργήσουν ένα νέο ήχο ξανά προσθέτοντας όλες τις συνιστώσες του. Η διαδικασία, αυτή, ονομάζεται ανάλυση/ανασύνθεση (Roads, 1996, σελ. 146) (σχήμα 2.18).

²⁰ Στα ψηφιακά κυκλώματα η πρόσθεση και η αφαίρεση για παράδειγμα γίνονται γρήγορα ενώ ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση απαιτούν πολύ χρόνο και χώρο (Moog, Bob, 1984, *Synthesizers and computers, Approaches to digital synthesis*, Brent Hurtig).



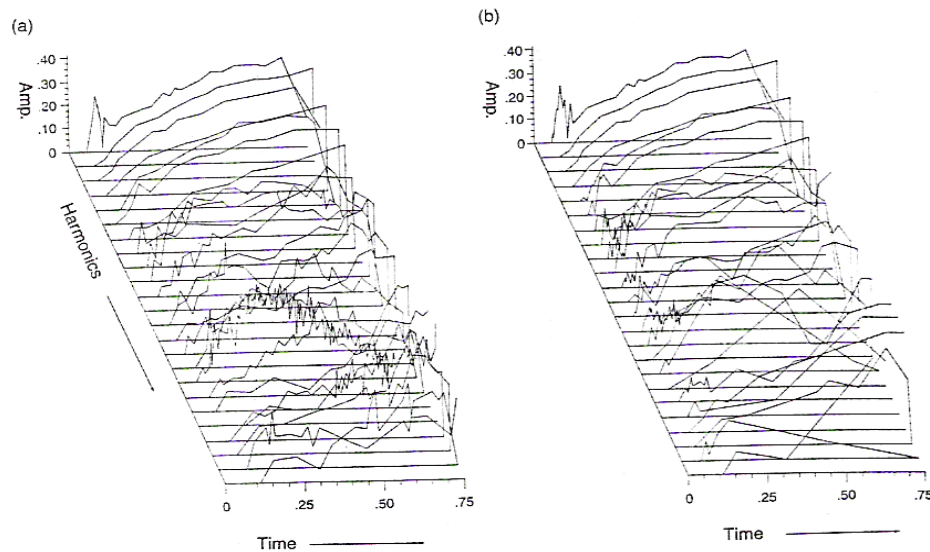
Σχήμα 2.18 Προσθετική ανάλυση/ανασύνθεση. Ένα παραθυροποιημένο σήμα εισόδου αναλύεται μέσω φίλτρων σε μια ομάδα περιβαλλουσών συχνότητας και πλάτους η κάθε μία εκ των οποίων καθοδηγείται από ένα ταλαντωτή. Αν ο ήχος εισόδου είναι καλά διαπλασμένος σαν μια άθροιση ημιτονοειδών κυματομορφών, το αθροιστικό σήμα που παράγεται από του ταλαντωτές πρέπει να είναι περίπου το ίδιο με το αυθεντικό σήμα εισόδου (Roads, 1996, σελ. 145).

Η απευθείας ανάλυση/ανασύνθεση ενός ήχου από μουσικής άποψης δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Προκειμένου να δημιουργήσουμε μουσικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα, πρέπει να μετατρέψουμε τα δεδομένα που προέρχονται από την ανάλυση.

Κάποιες μέθοδοι ανάλυσης ανασύνθεσης είναι η pitch-synchronous analysis (από τους Risset και Mathews το 1969), η phase vocoder (από τον Dolson), η constant-Q ανάλυση (Roads, 1996, σελ. 148).

Η πιο δημοφιλής από όλες τις μεθόδους είναι η Phase Vocoder. Η Phase Vocoder χρησιμοποιώντας μια τράπεζα φίλτρων αποκαλύπτει τα φασματικά συστατικά ενός σήματος εισόδου, τα δεδομένα των οποίων λαμβάνουν αντίστοιχες περιβάλλουσες πλάτους και συχνότητας και εφαρμόζονται πάνω σε ημιτονοειδείς ταλαντωτές. Με αυτούς τους ταλαντωτές και τις ρυθμίσεις των περιβαλλουσών ανακατασκευάζεται το αρχικό σήμα. Πολλοί ενδιαφέροντες μετασχηματισμοί ήχου μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση ενός Phase Vocoder. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συμπίεση ή επέκταση χρόνου χωρίς αλλαγή τονικού ύψους. Με αυτό το εφέ ένας ήχος γίνεται μικρότερος ή μεγαλύτερος χωρίς σημαντικές αλλαγές στο τονικό ύψος ή στο ηχόχρωμα (Roads, 1996, σελ. 148).

Πολλές φορές, στις τεχνικές ανάλυσης του ήχου τα δεδομένα της ανάλυσης καταλαμβάνουν πολύ περισσότερο χώρο στη μνήμη από το σήμα εισόδου. Έτσι, είναι δύσκολο να αποθηκευτούν αρχεία αναλυμένων ήχων και ο όγκος των δεδομένων γίνεται δυσχερής κατά την επεξεργασία. Για αυτό το λόγο, απαιτείται μείωση δεδομένων για μια αποτελεσματική ανάλυση/ανασύνθεση. Κατά τη μείωση δεδομένων ουσιαστικά, πραγματοποιείται μια απλοποίηση των δεδομένων του σήματος εισόδου, χωρίς όμως να αφαιρούνται σημαντικά αντιληπτικά στοιχεία του σήματος. Κάποιες τεχνικές μείωσης δεδομένων που εφαρμόστηκαν στην μουσική για υπολογιστές είναι: Line-segment approximation, Principal components analysis (PCA), Spectral interpolation synthesis (SIS), Spectral modeling synthesis (SMS) (Roads, 1996, σελ. 149) (σχήμα, 2.19).



Σχήμα 2.19 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της περιβάλλουσας πλάτους των πρώτων 24 αρμονικών μια νότας $A=220$ Hz ενός βιολιού. Στο δεύτερο σχήμα οι περιβάλλουσες είναι απλοποιημένες. Κάποιες ατάκες είναι πιο συγκεκριμένες, ενώ κάποια σημεία που περιέχουν λίγο θόρυβο κυρίως στους υψηλότερους αρμονικούς έχουν εξομαλυνθεί (Roads, 1996, σελ. 774). Αυτή η απλοποίηση βασίζεται στην τεχνική Line-segment approximation, η οποία κατά την ανάλυση αποθηκεύει μόνο τα σημεία μέγιστης αλλαγής (Roads, 1996, σελ. 149)

2.8. Οι αισθητικές αναζητήσεις των συνθετών πηγές για έλεγχο δεδομένων στην προσθετική σύνθεση

Οι συνθέτες ηλεκτρονικής μουσικής στις προσπάθειές τους να αποκτήσουν καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων της προσθετικής σύνθεσης και πιο ενδιαφέροντα ηχοχρώματα δημιούργησαν διάφορες «καθοδηγητικές συναρτήσεις» (driving functions) για τα όργανα σύνθεσης. Δημιούργησαν δηλαδή, δεδομένα ελέγχου «τα

οποία είναι απαραίτητα για μια αποτελεσματική χρήση της ψηφιακής τεχνικής σύνθεσης».

Η δημιουργία αυτών των δεδομένων προήλθε κυρίως από τις αναζητήσεις των συνθετών ηλεκτρονικής μουσικής. Ο Charles Dodge για παράδειγμα στο κομμάτι *Earth's Magnetic Field* (1970) χρησιμοποίησε συναρτήσεις ελέγχου που προήλθαν από τις καμπύλες που σχημάτιζαν κάποιες οροσειρές ή κάποιες αστικές ουρανογραμμές. Πολλοί συνθέτες χρησιμοποίησαν δεδομένα ελέγχου τα οποία προέρχονται από γεωμετρικά στοχαστικά και άλλα μαθηματικά ή φυσικά μοντέλα. Ο John Chowning στο κομμάτι *Stria* (1977), το οποίο έχει δημιουργηθεί με προσθετική σύνθεση μη αρμονικού φάσματος, κατασκεύασε καθοδηγητικές λειτουργίες σε σχέση με τη μουσική μικροδομή.

Άλλες συνθέσεις βασίζονται σε συστήματα που μεταφράζουν υψηλού επιπέδου μουσικές ιδέες, όπως φράσεις, ηχητικά αντικείμενα ή σύννεφα (sound objects or clouds) σε παραμέτρους σύνθεσης. Ο Jean-Claude Risset στο κομμάτι *Inharmonique* (1970), χρησιμοποιεί συνδυασμούς των παραπάνω σε συνδυασμό με διαισθητικές, θεωρητικές ή εμπειρικές γνώσεις του στον κλάδο της ψυχοακουστικής.

Με τη βοήθεια των μεθόδων ανάλυσης/ανασύνθεσης, οι συνθέτες μπορούν να παραποιούν τα δεδομένα της ανάλυσης και να δημιουργούν ενδιαφέροντες ήχους. Παραδείγματα τέτοιων συνθέσεων που βασίζονται στην ανάλυση δεδομένων είναι το *Mortuos Plango* και το *Vivos Voco* (1981) του Jonathan Harvey, *Desintegrations* (1983) του Tristan Murail, *Digital Moonscapes* (1985) του Wendy Carlos (Roads, 1996, σελ. 146).

Η τεχνική της προσθετικής σύνθεσης, προσφέρει τις βάσεις για μια περαιτέρω ενασχόληση στον κόσμο των ηχοχρωμάτων με την χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ακόμη, σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές προσφέρει ένα ακόμη

μεγαλύτερο πεδίο έκφρασης. Επειδή σήμερα, οι μουσικοί δουλεύουν κυρίως στο πεδίο της συχνότητας συνεχώς δημιουργούνται νέες μέθοδοι επεξεργασίας του ήχου όπως, *time stretching*, *pitch shifting*, ηχοχρωματική διασύνδεση (*timbral interpolation*)- μετάβαση από ένα ηχόχρωμα σε ένα άλλο αλλάζοντας το φασματικό περιεχόμενο κατά τη διάρκεια του χρόνου (έτσι, είναι δυνατόν να συντεθεί ένας π.χ. ήχος τρομπέτας ο οποίος σταδιακά μεταβάλλεται σε ήχο βιολιού (*Dodge and Jerse, σελ. 79*))- οι οποίες αναδεικνύουν συνεχώς τις δυνατότητες της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Λογισμικά που χρησιμοποιούν τη τεχνική της προσθετικής σύνθεσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μια πρακτική εφαρμογή της τεχνικής της προσθετικής σύνθεσης. Η εφαρμογή θα γίνει μέσα από την παρουσίαση κάποιων μονάδων/patches προσθετικής σύνθεσης που χρησιμοποιούν ορισμένα λογισμικά με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας της. Πρόκειται για τα εξής λογισμικά: Adobe Audition 1.5, Virtual Waves 2.23, Reaktor 3.05 και η γλώσσα προγραμματισμού Max/MSP. Προτού όμως, προχωρήσουμε στη παρουσίασή τους είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες επεξηγήσεις σχετικά με τις υπάρχουσες κατηγορίες των λογισμικών και κάποιων ιδιοτήτων τους.

3.1. Σύνθεση ήχου με λογισμικό (software synthesis)

Η εφαρμογή των ψηφιακών τεχνικών σύνθεσης για την παραγωγή του ήχου γίνεται σε ένα πρόγραμμα σύνθεσης λογισμικού το οποίο «τρέχει» σε έναν υπολογιστή γενικής χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι «όλες οι μαθηματικές πράξεις που σχετίζονται με τον υπολογισμό ενός αριθμού δειγμάτων γίνονται από ένα πρόγραμμα το οποίο μπορεί να αλλάξει με ποικίλους τρόπους από το χρήστη» (Roads, 1996, σελ. 100). Γενικά, όλη η πρωτοποριακή εργασία στον τομέα της μουσικής για υπολογιστές έχει προέλθει μέσω της σύνθεσης ήχου με λογισμικό. Σήμερα, μια ποικιλία προγραμμάτων σύνθεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από οικονομικούς προσωπικούς υπολογιστές.

Ο Roads (1996, σελ. 100), κατηγοριοποιεί τα σύγχρονα προγράμματα σύνθεσης λογισμικού σε: γραφικά μουσικά προγράμματα (graphical instrument editors) και σε γλώσσες προγραμματισμού. Στα πρώτα, ο μουσικός αλληλοσυνδέει εικονίδια στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή δημιουργώντας patches. Κάθε εικονίδιο συμβολίζει μία μονάδα ήχου. Στη γλώσσα προγραμματισμού, οι ήχοι

προγραμματίζονται γράφοντας ένα κώδικα ο οποίος εκτελείται από ένα πρόγραμμα σύνθεσης. Τα γραφικά μουσικά προγράμματα, είναι κλειστά προγράμματα, δηλαδή προγράμματα που δεν επιτρέπουν στο χρήστη να επέμβει στον προγραμματισμό τους. Αντίθετα, οι γλώσσες προγραμματισμού δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να προγραμματίσει ο ίδιος τις μονάδες που θέλει να δημιουργήσει.

Για την πραγματοποίηση κάποιου βήματος στη σύνθεση του αλγόριθμου του συστήματος, απαιτείται κάποιος χρόνος μέχρι να εκτελεστεί η εντολή. Κάποιες τεχνικές επεξεργασίας σήματος κοστίζουν υπολογιστικά και είναι δύσκολο να εκτελεστούν σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει καθυστέρηση τουλάχιστον κάποιων δευτερολέπτων από τη στιγμή που αρχίζει ο υπολογισμός του ήχου μέχρι το χρόνο που τον ακούμε. Ένα σύστημα με τέτοια καθυστέρηση ονομάζεται σύστημα μη πραγματικού χρόνου (non-real-time) (Roads, 1996, σελ. 102).

Η σύνθεση σε μη πραγματικό χρόνο ήταν η μόνη λύση στις απαρχές της σύνθεσης ηλεκτρονικής μουσικής. Σήμερα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι ικανοί να εκτελούν εντολές σε πραγματικό χρόνο (real-time). Το πλεονέκτημα της σύνθεσης σε πραγματικό χρόνο είναι, ότι παρέχει τη δυνατότητα δυναμικών διαμορφώσεων μιας σειράς επιλεγμένων από το χρήστη παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, μπορούν να προσαρμοστούν μουσικές συσκευές εισόδου (musical input devices), τις οποίες μπορεί ο χρήστης να χειρίζεται καθώς δημιουργείται ο ήχος. Η σύνθεση σε πραγματικό χρόνο λύνει τα χέρια των συνθετών. «Ο μη-πραγματικού χρόνου τρόπος σύνθεσης είναι ο «δύσκολος δρόμος» για να φτιάξεις μουσική» (Roads, 1996, σελ. 104).

3.2. Παρουσίαση και σχολιασμός λογισμικών

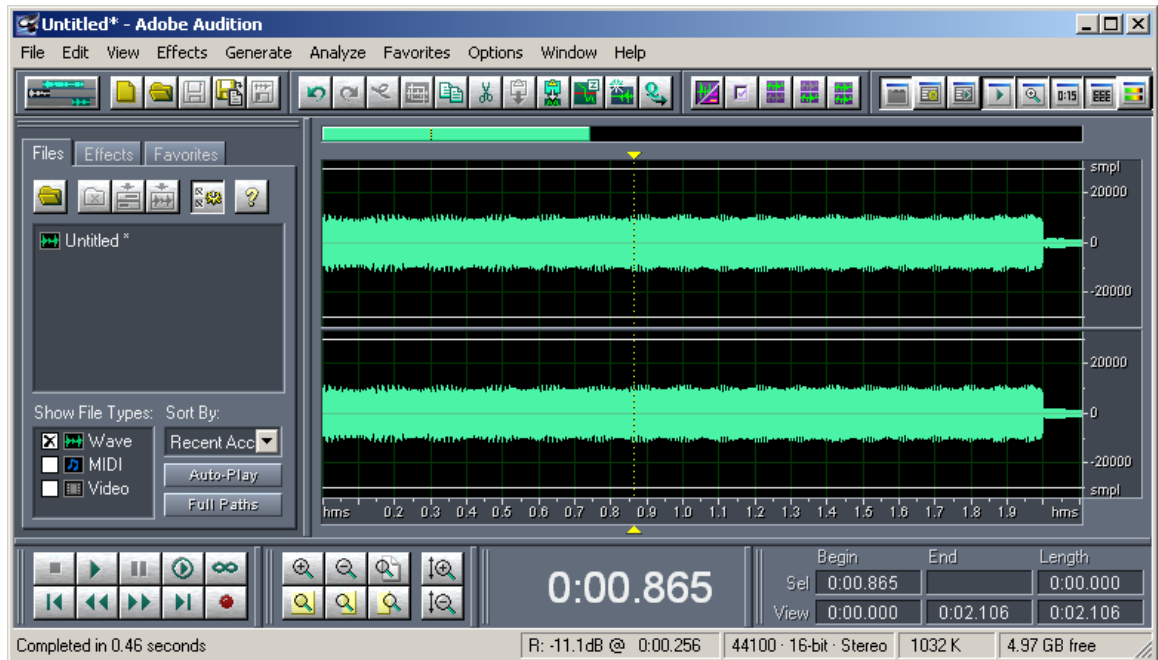
Από τα προγράμματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, το Adobe Audition 1.5, το Virtual Waves 2.23 και το Reaktor 3.05 είναι γραφικά μουσικά προγράμματα, ενώ η Max/MSP είναι γραφική μουσική γλώσσα προγραμματισμού.

Στα δύο πρώτα η σύνθεση ήχου γίνεται σε μη πραγματικό χρόνο, δηλαδή ο προγραμματισμός προηγείται της μουσικής εκτέλεσης, ενώ τα άλλα δύο παρέχουν τη δυνατότητα σύνθεσης σε πραγματικό χρόνο.

3.2.1. Adobe Audition 1.5

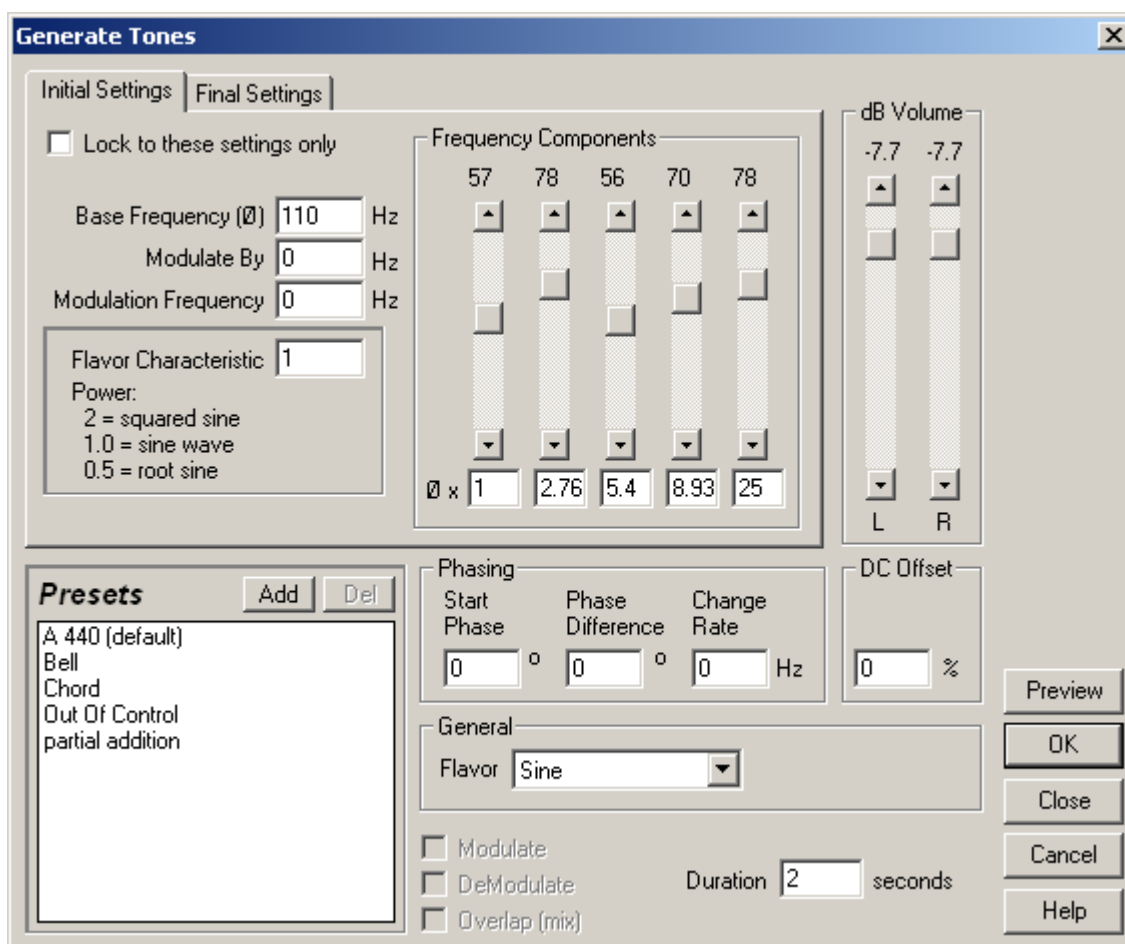
Το Adobe Audition είναι ένα επαγγελματικό, πολλαπλής χρήσης περιβάλλον επεξεργασίας σήματος που παρέχει δυνατότητες ηχογράφησης, μίξης, επεξεργασίας και δημιουργίας εφφέ τόσο για ήχο όσο και για εικόνα. Πρόκειται για το παλαιότερο λογισμικό Cool Edit Pro το οποίο αγοράστηκε από την εταιρεία Adobe. Το βελτιωμένο λογισμικό Adobe Audition 1.5 παρέχει τα χαρακτηριστικά ενός ώριμου προγράμματος, παρέχοντας σταθερότητα, εκτεταμένη εργαλειοθήκη και φιλική επιφάνεια εργασίας.

Το Adobe Audition έχει δύο κύριους χώρους εργασίας, το Multitrack View στο οποίο γίνεται πολυκάναλη επεξεργασία του ηχητικού σήματος και το Edit View στο οποίο γίνεται η επεξεργασία μίας μόνο κυματομορφής (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Το παράθυρο επεξεργασίας (Edit view), ένας από του δύο κυρίους χώρους εργασίας του Adobe Audition

Στα πλαίσια του Edit View υπάρχει μια μονάδα δημιουργίας ήχου η οποία ονομάζεται Generate Tones (σχήμα 3.2). Με αυτή τη μονάδα, το λογισμικό μπορεί να παράγει κυματομορφές, με έλεγχο, εκτός των άλλων της συχνότητας και του πλάτους τους.



Σχήμα 3.2 Η μονάδα Generate Tones

Η συγκεκριμένη μονάδα, στηρίζεται στην αρχή της προσθετικής σύνθεσης, δημιουργώντας το ηχόχρωμα του ήχου με την πρόσθεση συσχετιζόμενων μεταξύ τους συχνοτήτων.

Οι συνιστώσες της συχνότητας (frequency components) που προσφέρει είναι πέντε. Οι ρυθμίσεις των συχνοτήτων ορίζονται ως πολλαπλάσια της θεμελίου συχνότητας, της οποίας δίνουμε μια τιμή σε Hertz. Πολλαπλασιάζοντας λοιπόν, τη

τιμή της θεμελίου συχνότητας με έναν αριθμό, ακέραιο ή δεκαδικό, δημιουργείται μία αρμονική ή μη αρμονική φασματικό συνιστώσα, του σύνθετου πλέον ήχου. Για κάθε ένα υπέρτονο στη συνέχεια, μπορεί να ρυθμιστεί το πλάτος του ή αλλιώς το επίπεδο έντασης του σε μια κλίμακα από 0 έως 100, με τα συρόμενα ποτενσιόμετρα που βρίσκονται κάτω από τις συνιστώσες της συχνότητας. Η συνολική ένταση του σήματος ρυθμίζεται από δύο συρόμενα ποτενσιόμετρα όταν τα σήμα είναι στερεοφωνικό ή με ένα στην περίπτωση που είναι μονοφωνικό, τα οποία εκφράζονται σε dB. Επιπλέον, προσφέρει έλεγχο της φάσης της κυματομορφής (στην περίπτωση της στερεοφωνίας), καθώς και μπορεί να προσθέσει σταθερή τάση (DC offset) για έλεγχο του συνολικού πλάτους του ήχου.

Οι ρυθμίσεις αυτές μπορούν να βρεθούν σε δύο καταστάσεις. Η μια κατάσταση διατηρεί τις ίδιες ρυθμίσεις καθ' όλη τη διάρκεια του ήχου. Αυτό σημαίνει, πως παράγει μια στατική κυματομορφή. Η δεύτερη κατάσταση παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού αρχικής και τελικής μορφής του ήχου. Δηλαδή, μπορεί να δημιουργήσει έναν ήχο ο οποίος μεταβάλλεται στο χρόνο, περνώντας από ένα ηχόχρωμα σε ένα άλλο. Καθώς επίσης, και να αλλάζει τονικό ύψος και ένταση από το ένα ηχόχρωμα στο άλλο. Αυτός ο τρόπος μεταβολής του φάσματος, δείχνει μια νέα δυνατότητα της προσθετικής σύνθεσης που προήλθε μέσα από τη χρήση του ηχητικού φάσματος στο πεδίο της συχνότητας.

Ακόμη, προσφέρει και κάποιες ρυθμίσεις διαμόρφωσης της συχνότητας (οι ενδείξεις *modulate by* και *modulation frequency*). Μια άλλη παράμετρος του προγράμματος είναι η ιδιότητα *preview* σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει, πως κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του σήματος, μπορούμε να ακούμε τον ήχο καθώς και τις αλλαγές στις ρυθμίσεις σε πραγματικό χρόνο, πριν ακόμη δημιουργηθεί η κυματομορφή (δεν μπορούμε όμως να ηχογραφήσουμε τις αλλαγές αυτές) . Η ρύθμιση αυτή προσφέρει μεγάλη ευκολία στο χρήστη καθώς κερδίζει το χρόνο που ενδεχομένως θα έχανε από μια πιθανή απόρριψη των αποτελεσμάτων της σύνθεσης του ήχου. Τέλος, έχει δυνατότητα δημιουργίας και χρήσης *presets* καθώς και σύνθεσης ήχου μεγάλης διάρκειας.

3.2.1.1. Σχολιασμός μονάδας Generate Tones του Adobe Audition

Η μονάδα generate tones προσφέρει την επιλογή δημιουργίας ήχου με φασματικό περιεχόμενο έως και πέντε υπερτόνων. Οι πέντε υπέρτοννοι, παρόλο που είναι λίγοι μπορούν να δημιουργήσουν αναγνωρίσιμα ηχοχρώματα (Russ, 1996, σελ. 109). Το ότι οι σχέσεις μεταξύ τους προσδιορίζονται με πολλαπλασιασμό της θεμελίου συχνότητας, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει με ακρίβεια αυτές τις σχέσεις. Έτσι, μπορεί ο χρήστης να δημιουργήσει με την ίδια ακρίβεια τόσο ήχους με αναγνωρίσιμο τονικό ύψος (αρμονικό φάσμα) όσο και χωρίς (μη αρμονικό φάσμα).

Με τη ρύθμιση της έντασης των υπερτόνων ορίζεται το πλάτος της κάθε κυματομορφής, με αρκετή επίσης, ακρίβεια. Έτσι λοιπόν, όταν η λειτουργία αυτή βρίσκεται στην κατάσταση όπου οι ρυθμίσεις παραμένουν σταθερές, μπορεί να παράγει με ικανοποιητικά αποτελέσματα κυματομορφές με στατικό φάσμα, όπως για παράδειγμα το σταθερό μέρος ήχων οργάνων, καθώς και να δημιουργήσει ηχοχρώματα με μη αρμονικό περιεχόμενο, διακροτήματα, «νέους» σύνθετους ήχους. Ακόμη, οι ρυθμίσεις σχετικά με τη φάση του δίνουν την επιλογή να δουλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στην περίπτωση που γίνεται καθορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης δημιουργείται ένας μεταβαλλόμενος στο χρόνο ήχος. Η σταδιακή μεταβολή από το ένα ηχοχρώμα στο άλλο δημιουργεί εντυπωσιακά εφέ του ήχου και ανοίγει νέους ορίζοντες εξερεύνησης του ηχοχρώματος. Επιπλέον, οι ρυθμίσεις διαμόρφωσης της συχνότητας προσφέρουν πολύ σημαντικές αλλαγές στο ηχοχρώμα.

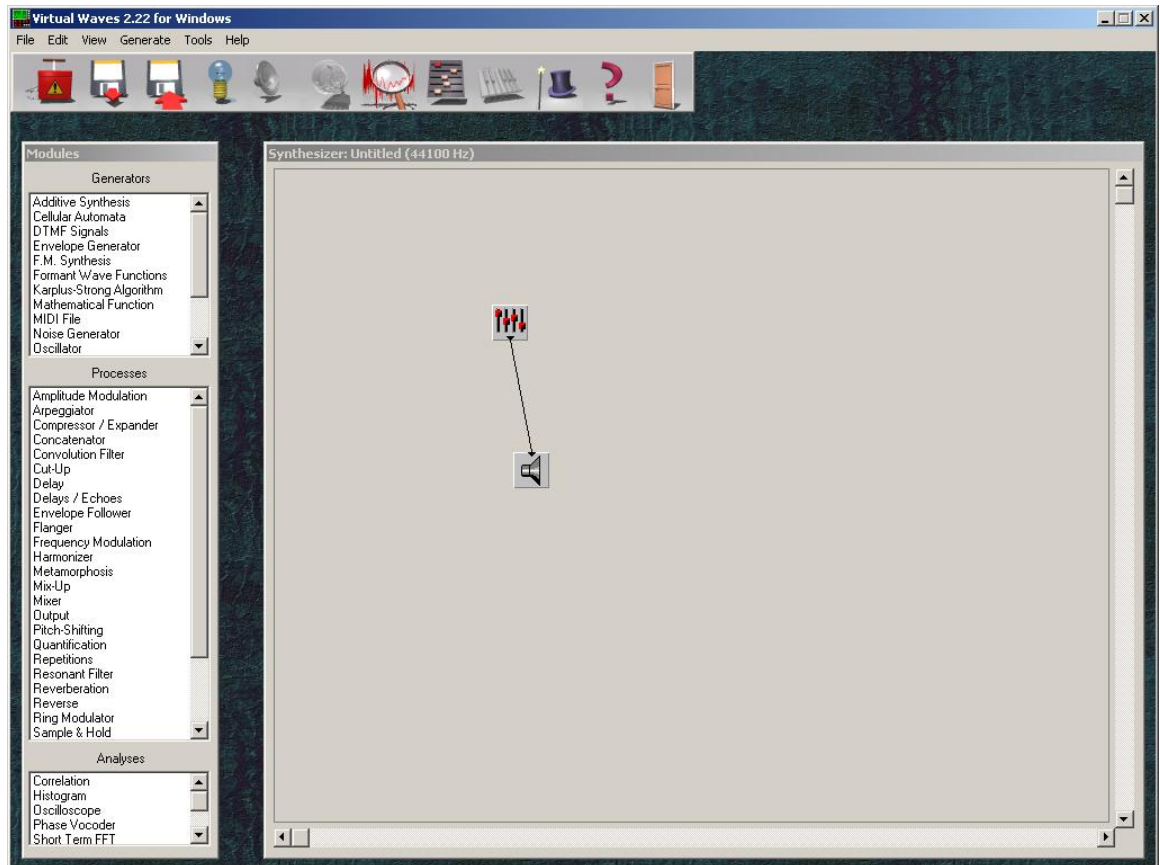
Αυτό που απουσιάζει από την εξεταζόμενη εδώ μονάδα του λογισμικού, είναι η εφαρμογή μιας γεννήτριας περιβάλλουσας σε κάθε μία συχνότητα της οποίας θα μπορούσαμε να ορίσουμε τα σημεία με ακρίβεια και η οποία θα προσέδιδε πραγματική ευελιξία στις δυναμικές εξελίξεις του παραγόμενου ήχου.

Έτσι, η μονάδα αυτή δεν μπορεί να δημιουργήσει «ζωντανούς» ήχους παρά μόνο γραμμικά μεταβαλλόμενες κυματομορφές.

3.2.2. Virtual Waves 2.22

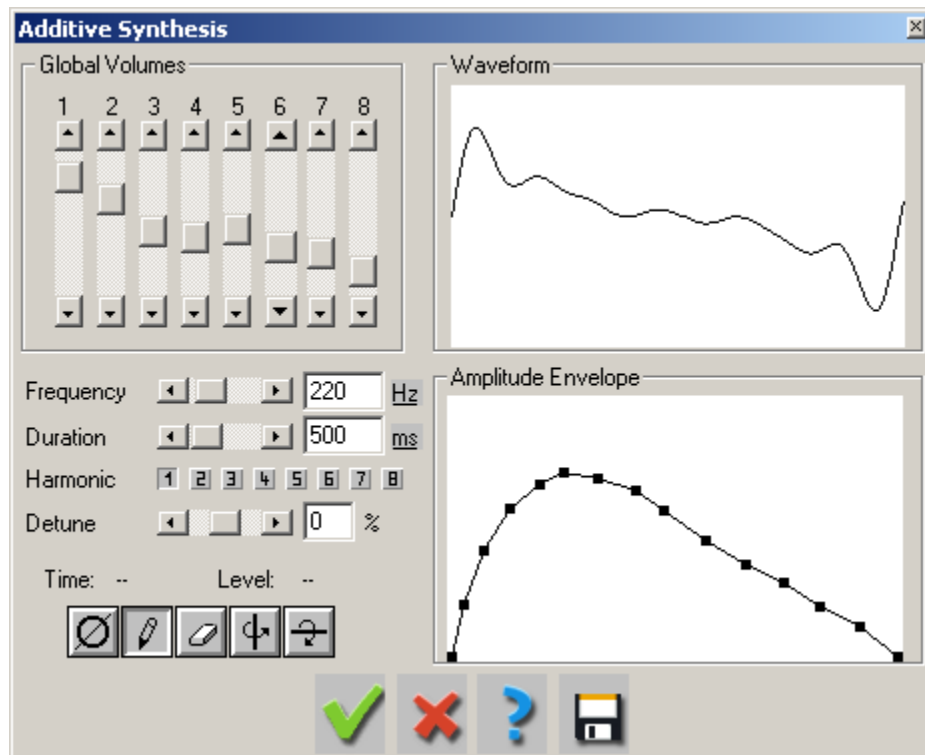
Το Virtual Waves 2.2, της εταιρίας Synoptic, είναι ένα λογισμικό, αρκετά απλό στη χρήση του, το οποίο όμως παρέχει βασικές λειτουργίες σύνθεσης, επεξεργασίας και ανάλυσης του ήχου. Για την προσθετική σύνθεση προσφέρει μια μονάδα (module) προσθετικής σύνθεσης. Παράλληλα βέβαια, το λογισμικό προσφέρει και άλλες μονάδες, οι οποίες είναι στοιχειώδεις γεννήτριες ήχου και μπορούν να συνδεθούν κατάλληλα ώστε να εφαρμόσουν την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης. Για μεγαλύτερη ευκολία και λιγότερες ρυθμίσεις όμως, προσφέρεται η μονάδα προσθετικής σύνθεσης. Παρ' όλο που είναι ένα κλειστό λογισμικό, δηλαδή δεν επιτρέπει στο χρήστη να προσθέσει νέες μονάδες (Roads, 1996, σελ. 758), δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας εργαλείων ανάλογα με τις προσωπικές μουσικές ανάγκες.

Ανάμεσα στις μονάδες που προσφέρει υπάρχει και μια μονάδα προσθετικής σύνθεσης. Με τη χρήση αυτής της μονάδας το λογισμικό είναι ικανό να δημιουργήσει αρκετά πλούσια ηχοχρώματα με δυναμικές στο χρόνο εξελίξεις. Συνδέοντας τη μονάδα της προσθετικής σύνθεσης με μια μονάδα εξόδου (output) αποκτάμε τον παραγόμενο ήχο (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Το κύριο παράθυρο του Virtual Waves 2.2 και η μονάδα προσθετικής σύνθεσης συνδεδεμένη με τη μονάδα εξόδου

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις ρυθμίσεις που μπορεί ο χρήστης να μεταβάλλει χρησιμοποιώντας την μονάδα αυτή (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Ιδιότητες μονάδας προσθετικής σύνθεσης

Η συγκεκριμένη λοιπόν, μονάδα προσθετικής σύνθεσης επιτρέπει την πρόσθεση οκτώ αρμονικών. Ρυθμίζοντας τη συχνότητα της θεμελίου, ο αλγόριθμος της μονάδας υπολογίζει τις συχνότητες των αντίστοιχων οκτώ αρμονικών. Κάθε ένας έχει ανεξάρτητες ρυθμίσεις, στις οποίες ο χρήστης μπορεί να επέμβει με τα οκτώ κουμπιά (harmonic) τα οποία αντιστοιχούν στους οκτώ αρμονικούς. Μια γεννήτρια περιβάλλουσας, με δυνατότητα προσδιορισμού πολλών σημείων, εφαρμόζεται σε κάθε έναν ώστε να του προσδώσει μεταβαλλόμενο στο χρόνο φάσμα. Επιπλέον, υπάρχει ένας έλεγχος (detune control) ο οποίος μπορεί να μεταβάλει τη συχνότητα του κάθε αρμονικού σε ποσοστά τοις εκατό. Τέλος, προσφέρει έλεγχο του πλάτους κάθε αρμονικού, προσαρμόζοντας τη συνολική ένταση της περιβάλλουσας πλάτους με τα συρόμενα ποτενσιόμετρα που βρίσκονται

κάτω από την ένδειξη *global volumes*. Το σχήμα της παραγόμενης κυματομορφής απεικονίζεται στο παράθυρο άνω δεξιά. Βέβαια στην περίπτωση που η περιβάλλουσα πλάτους έχει δυναμική εξέλιξη το τελικό σχήμα της κυματομορφής εξαρτάται και από το σχήμα της περιβάλλουσας. Η συνολική διάρκεια του ήχου μπορεί να ρυθμιστεί από 100 έως 5000 χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Αφού ρυθμιστούν όλες οι τιμές από τον χρήστη το λογισμικό στέλνει τον παραγόμενο ήχο στη μονάδα εξόδου και στη συνέχεια στον μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (*digital-to-analog converter (DCA)*).

3.2.2.2. Σχολιασμός της μονάδας προσθετικής σύνθεσης του λογισμικού *Virtual Waves 2.22*

Όπως φαίνεται, το συγκεκριμένο λογισμικό με τη χρήση αυτή της μονάδας μας παρέχει σχεδόν όλα τα εργαλεία που απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσθετική σύνθεση. Ο αυτόματος υπολογισμός των αρμονικών της θεμελίου συχνότητας ανακουφίζει τον χρήστη από τον υπολογισμό της συχνότητας του κάθε αρμονικού. Παράλληλα, η λειτουργία *detune* του δίνει τη δυνατότητα να κατασκευάσει σύνθετους ήχους με μη αρμονικό φάσμα.

Επιπλέον, ο ανεξάρτητος έλεγχος κάθε αρμονικού δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός μεταβαλλόμενου στο χρόνο ήχου. Για παράδειγμα, μπορεί να επιχειρήσει ο χρήστης να προσομοιώσει τον ήχο μιας τρομπέτας όπου το πλάτος του κάθε αρμονικού διαφέρει και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Το ότι παρέχει ενδείξεις που δείχνουν τις τιμές εξέλιξης του πλάτους στο χρόνο (περιβάλλουσα) δίνει τη δυνατότητα μιας ικανοποιητικής προσέγγισης ενός ηχοχρώματος, του οποίου τα δεδομένα γνωρίζει ο χρήστης από την ανάλυση, καθώς και πιο σαφείς ρυθμίσεις όταν φτιάχνει έναν «νέο» ήχο. Τέλος, συνδέοντας και άλλες μονάδες προσθετικής σύνθεσης μπορεί να φτιάξει ήχους με 16, 24, 32 αρμονικούς, αρκεί να μην υπερβαίνει τη συχνότητα Nyquist.

Το πρόγραμμα εμφανίζει και διάφορα ελαττώματα. Είναι δύσκολο λοιπόν, να οριστούν με ακρίβεια υπέρτοννοι (μη ακέραια πολλαπλάσια) της θεμελίου. Η διάρκειά του επίσης, δεν μπορεί να ξεπεράσει τα πέντε δευτερόλεπτα με αποτέλεσμα ο χρήστης να μη μπορεί να φτιάξει ήχους μεγάλης διάρκειας.

Η μονάδα προσθετικής σύνθεσης λοιπόν, του συγκεκριμένου λογισμικού είναι ένα εργαλείο με το οποίο θα μπορούσε να ασχοληθεί ακόμη και ο εντελώς άπειρος χρήστης, ο οποίος ενδιαφέρεται να πειραματιστεί με τους ήχους. Έτσι, το Virtual Waves λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για ένα κλειστό λογισμικό του οποίου οι ρυθμίσεις γίνονται πριν από την αναπαραγωγή του ηχητικού γεγονότος (σε μη πραγματικό χρόνο) παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης μια τεχνικής σύνθεσης όπως η προσθετική, με τον περιορισμό ότι ο χρήστης αρκείται στο άκουσμα ενός ήχου τη φορά.

3.2.3. Reaktor 3.05

3.2.3.1. Γενικές ιδιότητες του Reaktor 3.05

Το Reaktor 3.05, της εταιρείας Native Instruments, είναι ένα ολοκληρωμένο στούντιο ήχου με πάρα πολύ μεγάλες δυνατότητες για παραγωγή και εκτέλεση μουσικής. Λειτουργεί είτε μόνο του ως αυτόνομο πρόγραμμα, είτε ως VST / Direct-X plugin μέσα σε άλλες εφαρμογές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως sampler, επεξεργαστής εφφέ, sequencer και ως συνθετητής. Είναι ιδιαίτερα ικανό να προσομοιώσει τον ήχο σχεδόν οποιουδήποτε συνθετητή. Ουσιαστικά, η αποστολή του προγράμματος είναι να επιτρέπει στο χρήστη τη δημιουργία ρεαλιστικών προσομοιώσεων ηλεκτρονικών συνθετητών. Με τη χρήση μια εργονομικής διεπαφής (interface) όλοι οι παράμετροι μιας συγκεκριμένης μονάδας μπορούν να ανατεθούν και να ρυθμίζονται από αυτό. Παρέχει υψηλής ποιότητας αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος και ποιότητα ήχου των 32-bit.

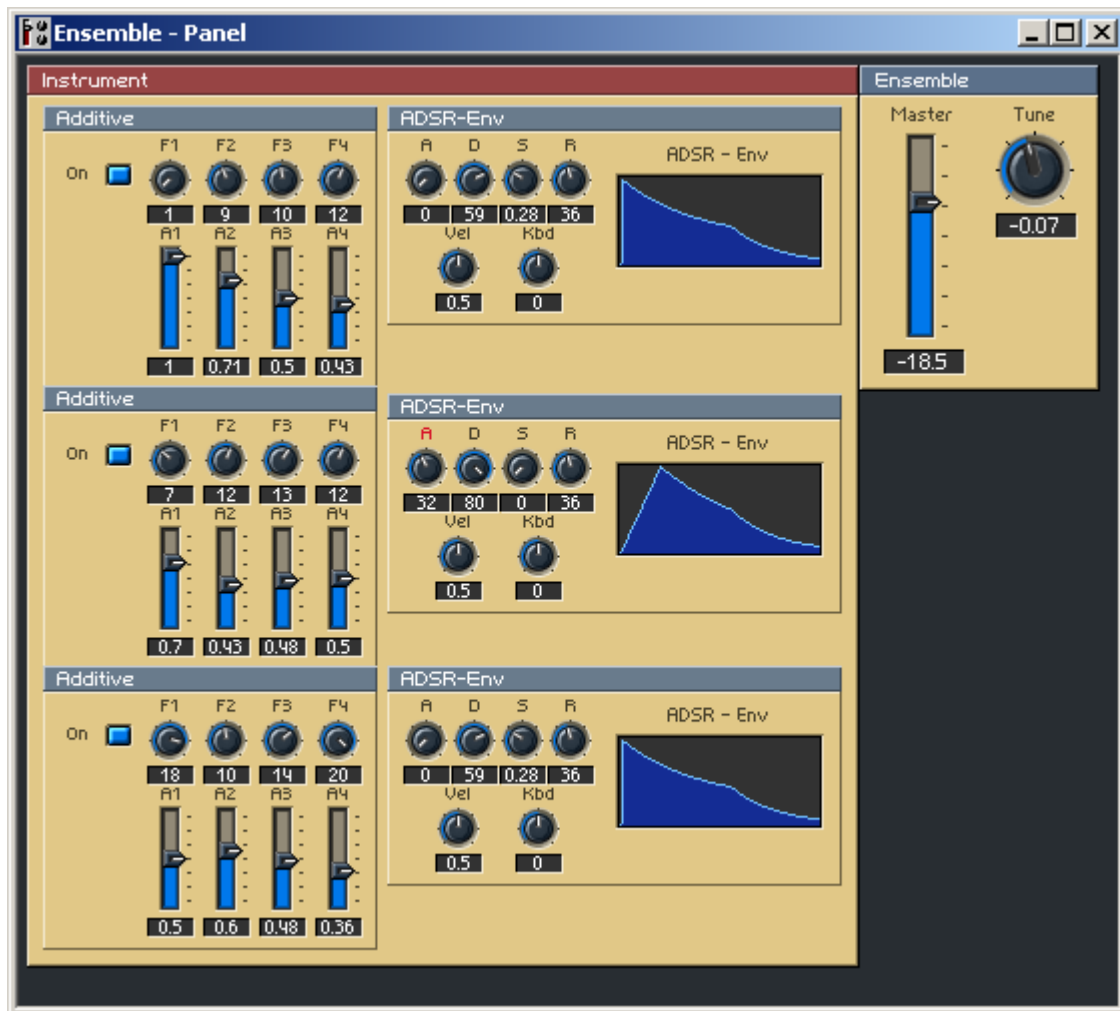
Το Reaktor είναι ένα πολύ καλό περιβάλλον για την κατασκευή και τον προγραμματισμό οργάνων. Προσφέρει πάνω από 200 βασικές μονάδες που αποτελούν την πηγή από την οποία κατασκευάζονται οι συνθετητές και τα διάφορα εφφέ. Οι διάφορες τεχνικές σύνθεσης μπορούν να υλοποιηθούν μέσα από την σύνδεση των ποικίλων μονάδων που προσφέρει. Επιπλέον, παρέχει μια μεγάλη συλλογή έτοιμων οργάνων (τα οποία ονομάζονται ensembles) και patches, προσιτή στο χρήστη, τα οποία δείχνουν τις δυνατότητες του λογισμικού. Τα έτοιμα όργανα αποτελούν και μια πρώτη επαφή του χρήστη με τη δομή τους, προτού ο ίδιος προχωρήσει στη δημιουργία δικών του. Ακόμη, παρέχει συμπιεστές (compressors), equalizers, pitch shifters, delays, distortion και πολλά άλλα.

Από την άποψη του προγραμματισμού, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του Reaktor είναι ότι μια σύνθεση από μονάδες (modules) μπορούν να συμπεριληφθούν σε μια μετα-μονάδα (meta-module) (που ονομάζεται macro) η οποία μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα αρχείο και έτσι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από άλλα όργανα. Αυτό, κάνει αμέσως και την επιφάνεια εργασίας πιο εύχρηστη, γιατί δε τη φορτώνει με πλήθος μονάδων στην περίπτωση, παραδείγματος χάριν, ενός σύνθετου οργάνου. Επιπλέον, ένα ολόκληρο όργανο μπορεί να σωθεί ως meta-module και να χρησιμοποιηθεί μαζί με άλλα όργανα και να φτιάξει ένα ensemble (το ensemble είναι το υψηλότερο επίπεδο της δομής-ένα ολοκληρωμένο όργανο). Ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή μπορεί να συνδυαστεί ένας μεγάλος αριθμός σύνθετων οργάνων στη δημιουργία ενός ensemble (Miranda, 2002, σελ. 206).

3.2.3.2. Το Add-1, ψηφιακός συνθετητής προσθετικής σύνθεσης του Reaktor

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως το Reaktor παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας οποιουδήποτε οργάνου. Σε σχέση με την προσθετική σύνθεση το

Reaktor μεταξύ άλλων, προσφέρει και έναν έτοιμο εισαγωγικό ψηφιακό συνθετητή για προσθετική σύνθεση, που ονομάζεται Add-1 (σχήμα 3.5).

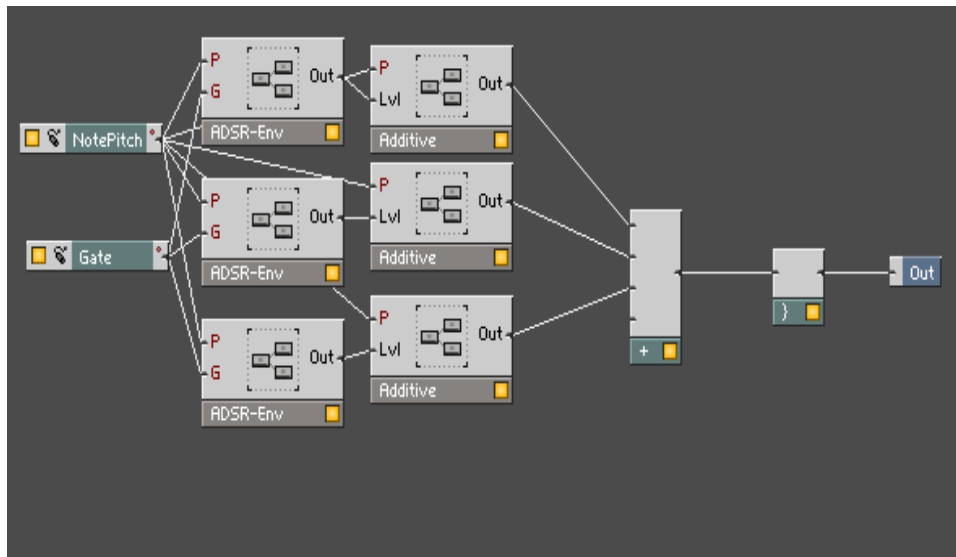


Σχήμα 3.5 Ο ψηφιακός συνθετητής Add-1

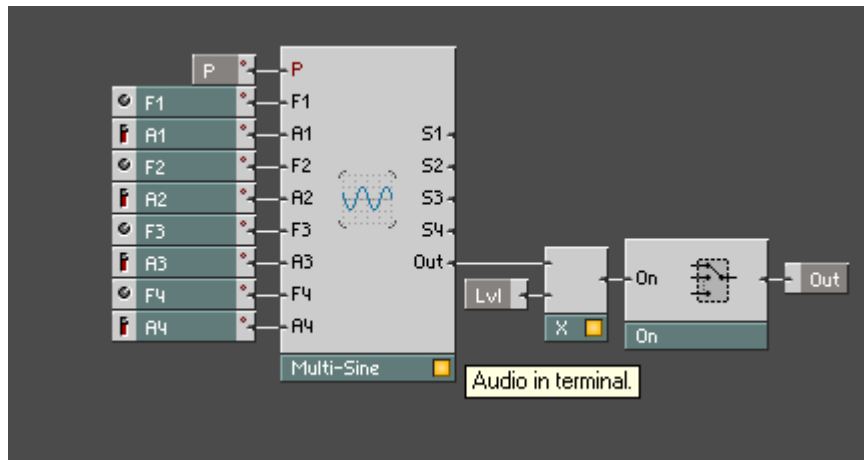
Ο συνθετητής αυτός αποτελείται από 12 ταλαντωτές. Οι συχνότητες είναι ρυθμισμένες να μεταβάλλονται σύμφωνα με την τάξη των αρμονικών της θεμελίου

συχνότητας. Οι ενδείξεις 1, έως 20, που ρυθμίζονται με τα περιστρεφόμενα ποτενσιόμετρα τα οποία βρίσκονται κάτω από τις ενδείξεις F1, F2, F3, F4, αντιπροσωπεύουν τον πρώτο, δεύτερο, ...,εικοστό αρμονικό, αντίστοιχα. Κάτω από αυτά, υπάρχουν οι ρυθμίσεις της έντασης του κάθε αρμονικού σε μια κλίμακα από 0 έως 1. Στη συνέχεια, σε κάθε ομάδα των τεσσάρων ταλαντωτών εφαρμόζεται μια γεννήτρια περιβάλλουσας των τεσσάρων σταδίων (ADSR). Με τον διακόπτη on ενεργοποιούμε ή αντίστοιχα απενεργοποιούμε ομάδες των τεσσάρων ταλαντωτών. Η ρύθμιση της συνολικής έντασης γίνεται με το συρόμενο ποτενσιόμετρο με την ένδειξη master. Η θεμέλιος συχνότητα παρέχεται στο σύστημα μέσω της ενεργοποίησης ενός MIDI οργάνου ή του πληκτρολογίου του υπολογιστή. Οι ρυθμίσεις vel και kbd σχετίζονται με το MIDI.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή του οργάνου, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε μικρότερα παράθυρα, μέχρι τις βασικές μονάδες του προγράμματος (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Δομή οργάνου (structure) Add-1



Σχήμα 3.7 Δομή μονάδα Additive οργάνου Add-1

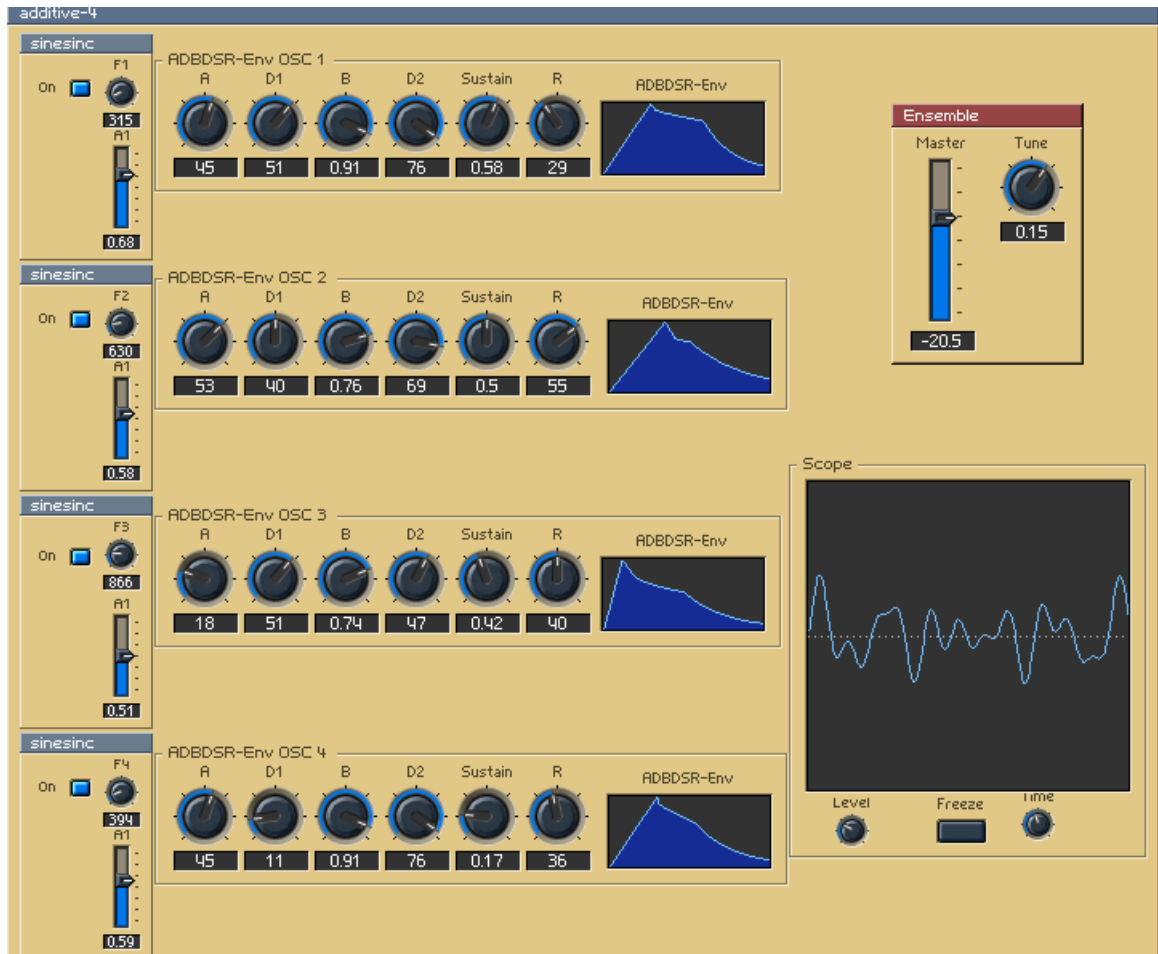
3.2.3.3. Σχολιασμός ψηφιακού συνθετητή Add-1 του Reaktor

Ο συνθετητής αυτός είναι ικανός να χρησιμοποιείται σε πραγματικό χρόνο. Για αυτό το λόγο είναι και κάπως απλός, σκοπεύοντας να μειώσει το υπολογιστικό φορτίο του επεξεργαστή (CPU-central processing unit), καθώς και την πολυπλοκότητα του προγραμματισμού των ήχων του. Έτσι, περιορίζεται στη χρήση 12 ταλαντωτών. Ο δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τη δυναμική μίξη, δηλαδή την αλλαγή της μίξης των ταλαντωτών σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, αντί να παρέχει μια περιβάλλουσα σε κάθε ταλαντωτή, εφαρμόζει μια ανά ομάδες των τεσσάρων. Σε αυτούς τους συμβιβασμούς προστίθενται και κάποια άλλα μειονεκτήματα, όπως το ότι παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού μόνο αρμονικού φάσματος καθώς και ότι η περιβάλλουσα περιορίζεται σε αυτή των τεσσάρων σταδίων.

Το πιο σημαντικό όμως στοιχείο σε αυτό είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πραγματικό όργανο, με καθορισμό και έλεγχο των παραμέτρων του σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, ο μουσικός έχει στα χέρια ένα όργανο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει με μεγάλη ευκολία. Ένας ακόμη λόγος που χρησιμοποιούνται μόνο τρεις περιβάλλουσες είναι για τον ευκολότερο χειρισμό τους. Αλλάζοντας τις

διάφορες παραμέτρους κατά τη διάρκεια του χρόνου μπορούν να επιτευχθούν εντυπωσιακές δυναμικές μίξεις και μεταβαλλόμενα ηχοχρώματα.

Το παραπάνω όργανο είναι ένα εισαγωγικό όργανο προσθετικής σύνθεσης, που χρησιμοποιείται για μια την κατανόηση της τεχνικής αυτής. Μέσα στα πλαίσια του Reaktor είναι δυνατόν να κατασκευαστούν διάφοροι συνθετητές από τους οποίους άλλοι θα εφαρμόζουν καλύτερα την τεχνική αυτή και άλλοι όχι. Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας νέος συνθετητής που αποτελείται από τέσσερις ταλαντωτές με ανεξάρτητες ρυθμίσεις και μια γεννήτρια περιβάλλουσας εφαρμοσμένη στο κάθε ένα χωριστά (με μια απλή αντιγραφή και επικόλληση των διαφόρων μονάδων μπορούν να προσθέσουμε όσες κυματομορφές αντέχει το CPU του εκάστοτε υπολογιστή) (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Νέο όργανο προσθετικής σύνθεσης

Στα παραπάνω όργανα είναι δυνατόν να προστεθούν διάφορα εφέ και να αποφέρουν εντυπωσιακότερα αποτελέσματα.

3.2.4 Max/MSP

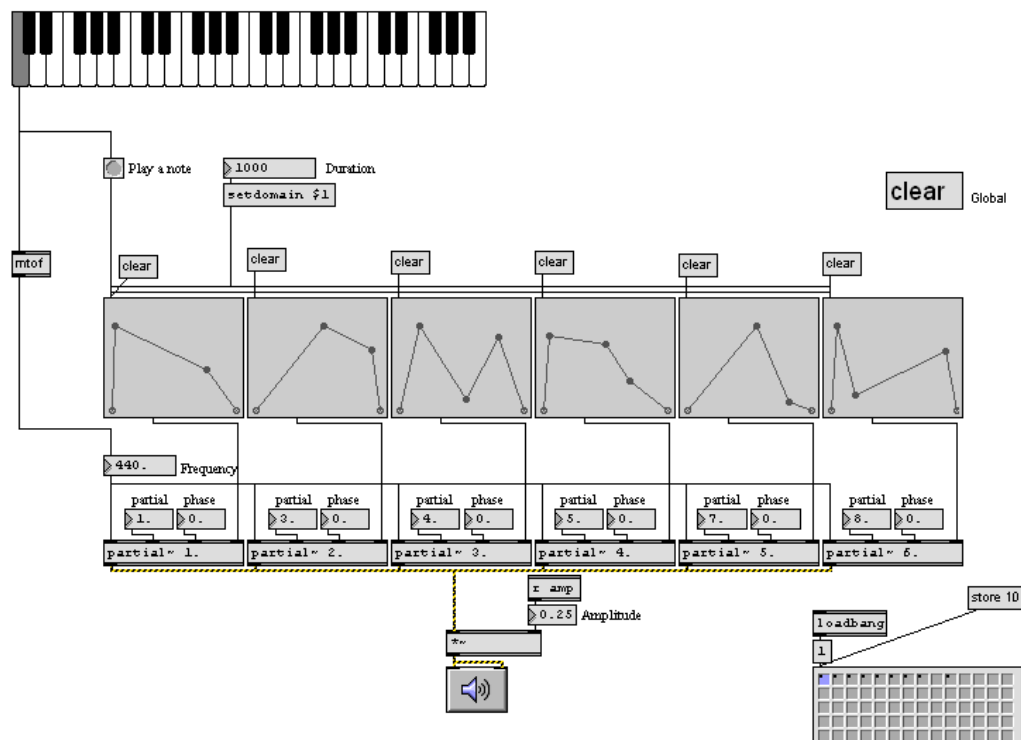
Η Max/MSP είναι μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού η οποία σήμερα θεωρείται ως ένα από τα πιο αξιόπιστα μέσα για τη δημιουργία ήχων. Ως γλώσσα προγραμματισμού παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα κατασκευής εκ του μηδενός των patches που επιθυμεί να αποκτήσει. Βέβαια κάτι τέτοιο προϋποθέτει τη γνώση της γλώσσας προγραμματισμού C, μια κοπιαστική διαδικασία, η οποία όμως εφόσον επιτευχθεί λύνει τα χέρια του προγραμματιστή πλέον μουσικού.

Η Max/MSP είναι μια γραφική γλώσσα μουσικού προγραμματισμού η οποία αναπτύχθηκε στα τέλη του 1986 στο IRCAM (Παρίσι) από τον Miller Puckette στις πρώτες εκδόσεις. Στις επόμενες εκδόσεις (και τη σημερινή) σημαντική υπήρξε η συμβολή του David Zicarelli. Η Max επιτρέπει τον χειρισμό μουσικών συσκευών που διαθέτουν το πρωτόκολλο MIDI και εξυπηρετεί με τον καλύτερο –ίσως- δυνατό τρόπο τη δημιουργία διαδραστικών περιβαλλόντων. Στις τελευταίες τις εκδόσεις, απέκτησε τη δυνατότητα για επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο (real - time) (MSP) κάτι που διευρύνει πολύ τους μουσικούς της ορίζοντες και επιτρέπει στο χρήστη να αξιοποιήσει όλες τις γνωστές τεχνικές σύνθεσης ήχου σε πραγματικό χρόνο και με διαδραστικό έλεγχο. Είναι γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού C και αυτό δίνει στο πρόγραμμα μια τεράστια ευελιξία προκειμένου να επεκταθεί προς κάθε κατεύθυνση από τους ανά τον κόσμο προγραμματιστές-μουσικούς ή μη ²¹.

3.2.4.1. Εισαγωγικό Patch προσθετικής σύνθεσης της Max/MSP

²¹ Μαρωνίδης, Δημήτρης, 2004, «Ανάλυση και ανασύνθεση της Sequenza I για φλάουτο του Luciano Berio με τη χρησιμοποίηση Μαρκοβιανών Αλυσίδων», μουσικοτροπίες, αρ. Τεύχους 42, περιοδική έκδοση του συλλόγου φοιτητών του τμήματος Μουσικών Σπουδών

Σε σχέση με την προσθετική σύνθεση με τη χρήση της Max/MSP προσφέρεται ένα έτοιμο εισαγωγικό patch το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.9):



Σχήμα 3.9 Patch προσθετικής σύνθεσης στην Max/MSP

Το συγκεκριμένο patch αποτελείται από έξι ταλαντωτές με ανεξάρτητο έλεγχο συχνότητας, πλάτους και φάσης. Για τον καθορισμό των υπερτόνων τοποθετούμε ένα αριθμό, ακέραιο ή δεκαδικό, ο οποίος καθορίζει τη συχνότητά του ως προς τη θεμέλιο συχνότητα, (ορίζεται στο κουτάκι, *partial*, κάτω αριστερά). Οι ρυθμίσεις των υπερτόνων παραμένουν σταθερές όταν αλλάζει η τιμή της θεμέλιου συχνότητας. Για τη δημιουργία μεταβαλλόμενου φάσματος τοποθετούνται

γεννήτριες περιβάλλουσας σε κάθε ένα ταλαντωτή. Με το πάτημα του ποντικιού μέσα στην περιβάλλουσα μπορούμε να ορίσουμε πλήθος σημείων, με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, σχηματίζεται το σχήμα της περιβάλλουσας. Η νότα ενεργοποιείται με το πάτημα του εικονιδίου με το megáφωνο και του κουμπιού play a note. Με τη χρήση του κλαβιέ παρέχεται η δυνατότητα εναλλαγής του τονικού ύψους. Στην ένδειξη amplitude έχει γίνει μια ρύθμιση του συνολικού πλάτους της, το οποίο φτάνει μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο ώστε να αποτρέψει τυχόν παραμορφώσεις του σήματος (γενικά πρέπει να έχει μια τιμή χαμηλότερη του 1). Ο πολλαπλασιαστής που εμφανίζεται στο τέλος πολλαπλασιάζει τους ταλαντωτές με μια γενική περιβάλλουσα και στη συνέχεια τροφοδοτεί τα σήματα σε ένα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα (DAC) σε δύο κανάλια.

Το συγκεκριμένο patch μπορεί να εφαρμόσει με μεγάλη ευελιξία την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης. Προσφέρει όλες τις δυνατότητες για τη δημιουργία ενός μεταβαλλόμενου φάσματος και μάλιστα με προγραμματισμό και ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο. Είναι ικανό να κατασκευάσει ποικιλία ηχοχρωμάτων από «ρεαλιστικά» ηχοχρώματα φυσικών οργάνων μέχρι καθαρά τεχνητούς ήχους, παρόλο που επιτρέπει τη χρήση μόνο έξι αρμονικών. Όλες οι ρυθμίσεις είναι δυνατόν να αλλάζουν με την κίνηση του ποντικιού κάτι που προσφέρει μεγάλη ταχύτητα στη διαμόρφωση των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη με την εφαρμογή π.χ. ενός MIDI controller ο χειρισμός της γίνεται ακόμη πιο γρήγορος.

Ένας, περαιτέρω σχολιασμός θα ήταν ενδεχομένως άνευ νοήματος, εφόσον η δυνατότητες της Max/MSP είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτό που μας δείχνει το συγκεκριμένο Patch. Το συγκεκριμένο Patch, αν και εισαγωγικό, παρ' όλα αυτά ικανοποιεί σε μεγάλο τις απαιτήσεις της τεχνικής αυτής.

Γενικά, κατά τη σύνθεση ήχων με την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης θα πρέπει να προσέχουμε κυρίως τα εξής. Προκειμένου το ηχοχρώμα του σύνθετου ήχου να παραμείνει το ίδιο κατά τις αλλαγές του τονικού του ύψους, κάθε υπέρτονος θα πρέπει να διατηρεί τη σχέση του με τη θεμέλιο. Τοποθετώντας τη συχνότητα κάθε υπέρτονου σε αναλογίες (π.χ. ως πολλαπλάσιο) της θεμελίου

συχνότητας διατηρείται το φάσμα του ήχου ακόμη και όταν η συχνότητα αλλάζει. Ακόμη, το τελικό σήμα θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται από ένα σταθερό σήμα τιμής μικρότερης του ενός, προκειμένου να μη παραμορφωθεί από τον ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα (DAC). Τέλος πρέπει να προσέχουμε η τάξη του υψηλότερου υπέρτονου να μη ξεπερνάει το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας (συχνότητα Nyquist) γιατί τότε οι συχνότητες «αναδιπλώνονται» σε χαμηλότερες τιμές αλλοιώνοντας το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

Επίλογος

Η προσθετική σύνθεση είναι μια τεχνική σύνθεσης ήχου αρκετά απλή στη λογική της. Με τη χρήση μόνο στοιχειωδών γεννητριών ήχου είναι ικανή να δημιουργήσει οποιοδήποτε επιθυμητό ηχόχρωμα. Από αυτή την άποψη και μόνο είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική. Το γεγονός ότι απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, δεν αποτελεί πρόβλημα στις μέρες μας, διότι η τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και έτσι ισχυρά μηχανήματα είναι προσιτά, χωρίς μεγάλο κόστος, στον χρήστη. Τα προβλήματα του χειροκίνητου προσδιορισμού και ελέγχου των παραμέτρων της μπορούν να μειωθούν, αν συνδυαστεί με νεότερες μεθόδους ανάλυσης/ανασύνθεσης, κάνοντάς την πιο προσιτή. Επιπλέον, όταν συνοδεύεται από μια εργονομική διεπαφή (interface), μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ως συνθετητής, με τον οποίο μπορούν να εκφραστούν μουσικοί όλων των ειδών ηλεκτρονικής μουσικής. Με την τεχνική αυτή και τις δυνατότητες που προσφέρουν το λογισμικά, ο μουσικός δε χρειάζεται πλέον να περιμένει τον κατασκευαστή οργάνων για να ανακαλύψει νέους ήχους. Οι γλώσσες προγραμματισμού του δίνουν τη δυνατότητα να είναι ο ίδιος κατασκευαστής/προγραμματιστής του οργάνου που θέλει, ικανός να κατασκευάσει οποιοδήποτε ηχόχρωμα. Τέλος, αν συνδυαστεί με άλλες τεχνικές σύνθεσης, με διάφορα εφφέ και φίλτρα μπορεί να οδηγήσει σε εντυπωσιακά αποτελέσματα

Η τεχνική της προσθετικής σύνθεσης έχει μεγάλη αξία, γιατί είναι η μόνη τεχνική που προσφέρει ανεξάρτητο έλεγχο των συστατικών του ήχου, προσδίδοντας του έτσι μεγάλη φυσικότητα. Ακόμη, οι αρχές που τη διέπουν είναι θεμελιώδεις, μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητές και είναι χρήσιμο να τις γνωρίζει κανείς αν θέλει να ασχοληθεί με την ηλεκτρονική σύνθεση ήχου και μουσικής.

Βιβλιογραφία

- **Burk, P., L. Polansky, D.Repetto, M. Roberts, and D.Rockmore, (2002),** *Music and Computers*, Trustees of Dartmouth College, New Hampshire, USA. Ανασύρθηκε στις 25 Ιανουαρίου 2004, από το World Wide Web:
<http://eamusic.dartmouth.edu/~book/MATCpages/tableofcontents.html>
- **Clark, James, (2003),** *Advanced Programming Techniques For Modular Synthesizers*. Ανασύρθηκε στις 16 Μαρτίου 2004, από το World Wide Web :
http://www.cim.mcgill.ca/~clark/nordmodularbook/nm_additive.html
- **Dodge, C., and T. Jerse, (1985),** *Computer music. Synthesis, Composition, and Performance*, Schirmer Books, New York
- **Dowling, J., and D. Harwood, (1986),** *Music Cognition*, Academic press, San Diego
- **Freed, A., X. Rodet, and P. Depalle, (1993),** *Synthesis and control of hundreds of sinusoidal partials on a desktop computer without custom hardware*, proceedings of the Fourth International Conference on Signal Processing Applications and Technology ICSPAT '93, Santa Clara, CA, USA. Ανασύρθηκε στις 5 Μαΐου 2004, από το World Wide Web:
http://www.cnmat.berkeley.edu/~adrian/FFT-1/FFT-1_ICSPAT.html
- **Freed, Adrian, (1999a),** *Real-time Inverse Transform Additive Synthesis for Additive and Pitch Synchronous Noise and Sound Spatialization*. Ανασύρθηκε στις 5 Μαΐου 2004, από το World Wide Web:
<http://cnmat.cnmat.berkeley.edu/ICMC99/papers/InverseNoise/InverseNoiseICMC.html>
- **Freed, Adrian, (1999b),** *Spectral Line Broadening with Transform Domain Additive Synthesis*, proceedings of the International Computer

Music Conference, Beijing, China. Ανασύρθηκε στις 5 Μαΐου 2004, από το Wolrd Wide Web:

<http://cnmat.cnmat.berkeley.edu/~adrian/ICMC95.html>

- **Hajda, J., R. Kendall, E. Carterette, and M. Harshberger, (1997),** Methodological issues in timbre research, In *Perception and Cognition of Music*, Deliege & Sloboda, Psychology Press Ltd, UK
- **Haykin, Simon, (1995),** *Συστήματα επικοινωνίας*, μεταφραστές: Ε. Δ. Συκάς, Μ. Ε. Θεολόγου, Παπασωτηρίου, Αθήνα
- **Manning, Peter, (1985),** *Electronic and Computer Music*, Clarendon press, Oxford
- **Marchand, Sylvain (2000),** *Modélisation informatique du son musical (analyse, transormation, synthèse)*, Thèse présentée á l' université Bordeaux 1, école doctorale de mathématiques et d' informatique
- **Mathews, Max, (2001),** Introduction to Timbre, In *Music, Cognition, and Computerised sound. An introduction to pshychoacoustics*, Cook Perry R., The MIT press, Cambridge (Massachusetts)
- **Michels, Ulrich, (1994),** λήμμα: «εκκλησιαστικό όργανο», *Άτλας της μουσικής*, Φίλιππος Νάκας, Αθήνα
- **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 pshychoacoustics*, Cook Perry R., The MIT press, Cambridge (Massachusetts)
- **Puckette, Miller, (2003),** *Theory and Techniques of Electronic Music*, University of California, San Diego
- **Roads, Curtis, (1996),** *The Computer Music Tutorial*, The MIT press, Cambridge (Massachusetts)

- **Russ, Martin, (1996),** *Sound Synthesis and Sampling*, Focal Press, Oxford (U.K.)
- **Sethares, William A., (1999),** *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*, Springer-Verlag, London
- **Steven, W. Smith, (1999),** *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego, California
- **Tempelaars, Stan, (1996),** *Signal processing, speech and music*, Swets and Zeitlinger, Berlin
- **Γιάννου, Δημήτρης, (1995),** *Ιστορία της μουσικής- σύντομη γενική επισκόπηση*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη
- **Καμπουρόπουλος, Αιμίλιος, (2003),** σημειώσεις του μαθήματος: *Ηλεκτρονική σύνθεση ήχου και μουσικής*, του Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- **Πανάς, Σταύρος Μ., (1998),** *Επεξεργασία αναλογικών σημάτων*, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- **Παπαδέλης, Γεώργιος, (2001α),** σημειώσεις του μαθήματος: *Θεμελιώδεις έννοιες της Ψυχοακουστικής και Γνωστικής Ψυχολογίας της Μουσικής*, του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
- **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 1*, του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
- **Παπανικολάου, Γεώργιος, (1995),** σημειώσεις του μαθήματος: *Μουσική Ακουστική II*, του Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- **Σπυρίδης, Χαράλαμπος, (2000),** ΦΑΚΕΛΟΣ με θέματα μουσικής ακουστικής, Αθήνα

Διαδικτυακοί Δεσμοί (Links)

- **Casey, Ciaran**, *Fundamentals of Synthesis and Additive Synthesis*
Ανασύρθηκε στις 15 Μαρτίου 2004, από το Wolrd Wide Web:
http://www.csis.ul.ie/staff/CiaranCasey/CS5631_Sound_synth/Wk2_Lec2.html
- Ανασύρθηκε στις 10 Ιουνίου 2004, από το Wolrd Wide Web:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hammond_organ
- Ανασύρθηκε στις 10 Ιουνίου 2004, από το Wolrd Wide Web:
http://www.obsolete.com/120_years/machines/telharmonium/index.html
- Ανασύρθηκε στις 10 Ιουνίου 2004, από το Wolrd Wide Web :
<http://theatreorgans.com/hammond/>
- Ανασύρθηκε στις 5 Μαΐου 2004, από το World Wide Web:
<http://x.i-dat.org/~csem/UNESCO/5/index.html>
- Ανασύρθηκε στις 10 Ιουνίου 2004 ,από το World Wide Web:
http://www.soundonsound.com/sos/1997_articles/oct97/synthschool4.html