

ΟΡΕΣΤΗΣ ΚΑΡΑΜΑΝΛΗΣ

ΣΥΝΘΕΣΗ
ΚΑΙ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΗΧΟΥ
ΜΕ ΤΟ
SUPERCOLLIDER



Copyright για την ελληνική έκδοση
ΟΡΕΣΤΗΣ ΚΑΡΑΜΑΝΛΗΣ
© Εκδόσεις Φυλάτος, © Fylatos Publishing, Θεσσαλονίκη 2021

Συγγραφέας: ΟΡΕΣΤΗΣ ΚΑΡΑΜΑΝΛΗΣ

Επιστημονική επιμέλεια κειμένου: Νικόλας Βαλασαμάκης
Σελιδοποίηση: Διονύσης Αθηναίος
Σχεδιασμός εξωφύλλου: Μυρσίνη Μανέτα | birdsandlofts.com
Επιμέλεια: Σοφία Αλμπανίδου © Fylatos Publishing
Εκδοτική επιμέλεια: Fylatos Publishing ©

Επιτρέπεται η αναδημοσίευση τμήματος του παρόντος έργου για λόγους σχολιασμού ή κριτικής. Επιτρέπεται η αναδημοσίευση περιορισμένων τμημάτων για επιστημονικούς λόγους, με υποχρεωτική αναγραφή του τίτλου του έργου, του συγγραφέα, του εκδότη, της σελίδας που αναδημοσιεύεται και της ημερομηνίας έκδοσης. Απαγορεύεται οποιαδήποτε διασκευή, μετάφραση και εκμετάλλευση, χωρίς αναφορά στους συντελεστές του βιβλίου και γραπτή άδεια του εκδότη και του συγγραφέα σύμφωνα με τον νόμο.

© Εκδόσεις Φυλάτος, © Fylatos Publishing
e-mail. contact@fylatos.com
web: www.fylatos.com

ISBN: 978-960-658-088-8

Σύνθεση και Επεξεργασία Ήχου με το SuperCollider

Ορέστης Καραμανλής

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
1 Βασικές Έννοιες	1
1.1 Το Ηχητικό Κύμα: Συχνότητα & Πλάτος	1
1.2 Το Πεδίο του Χρόνου	2
1.3 Το Πεδίο των Συχνοτήτων	2
1.4 Η Φάση	5
1.5 Το Ψηφιακό Σήμα	5
2 Βασικές Κυματομορφές & Εισαγωγή στο SuperCollider	11
2.1 Ημιτονοειδής Κυματομορφή Sinusoidal Waveform	11
2.2 Σύντομη Εισαγωγή στη Γλώσσα του SuperCollider	15
2.3 Τριγωνική Κυματομορφή Triangle Waveform	18
2.4 Πριονωτή Κυματομορφή Sawtooth Waveform	20
2.5 Τετραγωνική Κυματομορφή Square Waveform	21
2.6 Σύνθεση Σταθερής Κυματομορφής Fixed Waveform Synthesis	23
3 Θέματα SuperCollider [1]	25
3.1 Έξοδος Out	25
3.2 Πολυκάναλη Επέκταση Multichannel Expansion	26
3.3 Χωροθέτηση στο Στερεοφωνικό Πεδίο Stereo Panning	26
3.4 Μεταβλητές Variables	28
3.5 Μηνύματα Λάθους Error Messages	31
4 Envelopes Περιβάλλουσες	35
5 Προσθετική Σύνθεση Additive Synthesis	47
6 Αφαιρετική Σύνθεση Subtractive Synthesis	55
6.1 Γεννήτριες Θορύβου Noise Generators	55
6.2 Φίλτρα Filters	58
7 Θέματα SuperCollider [2]	65
7.1 Ορίσματα Συναρτήσεων Arguments of Functions	65
7.2 SynthDef	67
7.3 Η Χρήση του Ορίσματος doneAction	69

8 Διαμόρφωση Δακτυλίου & Πλάτους Ring & Amplitude Modulation	73
9 Διαμόρφωση Συχνότητας Frequency Modulation	83
10 Θέματα SuperCollider [3]	91
10.1 Είσοδοι στον Υπολογιστή Hardware Inputs	91
10.2 Control Bus Δίαυλος Ελέγχου	92
10.3 Λίστες & Πίνακες Lists & Arrays	93
10.4 Απλός Χρονοπρογραμματισμός Simple Scheduling	96
11 Θέματα SuperCollider [4]	99
11.1 Τελεστές Operators	99
11.2 Δομές Ελέγχου Control Structures	102
12 Παραμόρφωση Distortion	105
13 Σύνθεση Δειγματοληψίας Sampling Synthesis	111
14 Κοκκώδης Σύνθεση Granular Synthesis	119
15 Σύνθεση Αλυσιδωτής Συνένωσης Concatenative Synthesis	127
16 Φυσική Μοντελοποίηση Physical Modeling	131
17 Στοχαστική Σύνθεση Stochastic Synthesis	135
18 Τεχνικές με Χρονοκαθυστέρηση Time-Delay Techniques	139
18.1 FIR	139
18.2 IIR	141
18.3 Fixed Delay-Time Σταθερή Χρονοκαθυστέρηση	143
18.4 Flanger / Chorus	147
18.5 All-Pass	149
19 Ειδικά Θέματα SuperCollider: Control	153
19.1 Σύνδεση MIDI MIDI Connectivity	153
19.2 Το πρωτόκολλο OSC Open Sound Control Protocol	157
19.3 Γραφική Διεπαφή Χρήστη Graphic User Interface	160
20 Ειδικά Θέματα SuperCollider: Audio	165
20.1 Σειρά Εκτέλεσης Execution Order	165
20.2 Πρότυπα Patterns	168
20.3 Κόμβος Μεσολάβησης Node Proxy	174
21 Πεδίο Συχνοτήτων Frequency Domain	177
21.1 Μετασχηματισμός Φουριέ Fourier Transform	177
21.2 Επεξεργασία στο Πεδίο Συχνοτήτων Frequency Domain Processing	183

22 Μουσική Σύθεση Composition	189
22.1 Τεχνικές για Μεικτά Μέσα Practices in Mixed Music	190
22.2 Συνταγή Σύθεσης και Ερμηνείας Recipe for Composing & Performing	194
22.3 CuePlayer	197
23 Έξοδος Exit	205

Για τον συγγραφέα

Ο Ορέστης Καραμανλής ολοκλήρωσε ένα διδακτορικό στη σύνθεση στο Sonic Arts Research Centre στο Μπέλφαστ. Το σύνολο του έργου του καλύπτει ένα ευρύ φάσμα σύγχρονης μουσικής με ιδιαίτερη έμφαση στο συγκερασμό των ακουστικών οργάνων με το laptop, στην αλγοριθμική σύνθεση και στην επεξεργασία του ήχου για πολυκάναλα συστήματα. Διδάσκει δημιουργικά μαθήματα σύνθεσης και επεξεργασίας ήχου για νέα μέσα στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Αθηνών και είναι επισκέπτης ερευνητής στο Πανεπιστήμιο του Μπόρνμουθ. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στον ιστότοπο orestiskaramanlis.net.

Ευχαριστώ τους ανθρώπους που παρακολούθησαν κάποιες απ' τις διαλέξεις που έδωσα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, στο Ιόνιο Πανεπιστήμιο, στο ΤΕΙ Κρήτης και στο Πανεπιστήμιο του Μπόρνμουθ. Έμαθα αρκετά απ' τις γόνιμες παρατηρήσεις των φοιτητών και φοιτητριών και απ' τις συζητήσεις με τους φίλους μουσικούς. Ευχαριστώ θερμά τον Νικόλα Βαλσαμάκη και τον Διονύση Αθηναίο για την επιμέλεια και τα στοχευμένα σχόλιά τους πάνω στο αρχικό κείμενο. Όλα τα εναπομείναντα λάθη είναι δικά μου.

Ορέστης Καραμανλής | Αθήνα, Μάρτιος 2021

Πρόλογος

Συνήθως βαριέμαι τα βιβλία που παρουσιάζουν τη θεωρία ξέχωρα από την πρακτική της εφαρμογή. Ίσως γιατί δεν έχω την υπομονή που χρειάζεται ώστε να περάσω από το στάδιο της θεωρητικής μελέτης στο στάδιο της πρακτικής εξάσκησης. Συχνά προτιμώ να μαθαίνω ανάποδα. Αρχίζω προσπαθώντας να φτιάξω κάτι και καλύπτω τα θεωρητικά κενά που εμφανίζονται καθ' οδόν. Δεν είμαι σίγουρος ότι αυτός είναι ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος εκμάθησης. Για αυτό που είμαι βέβαιος όμως είναι ότι κάθε άνθρωπος έχει τον δικό του τρόπο να απορροφά γνώση. Έτσι εδώ αποφάσισα να δουλέψω με τη μέθοδο που μου είναι περισσότερο γνώριμη, παρουσιάζοντας δηλαδή την πρακτική εφαρμογή των τεχνικών σύνθεσης ταυτόχρονα με τη θεωρία. Ελπίζω αυτός ο τρόπος προσέγγισης να σε βοηθήσει να ξετυλίξεις το κουβάρι της σύνθεσης ήχου με μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού θα έχεις τη δυνατότητα να ακούς και να πειραματίζεσαι με την κάθε τεχνική μαθαίνοντας ταυτόχρονα και SuperCollider, μία γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται από μουσικούς και καλλιτέχνες σε όλον τον κόσμο και που μπορεί ο καθένας να κατεβάσει ελεύθερα από το διαδίκτυο.

Στις επόμενες σελίδες έχει γίνει συνειδητή επιλογή να παρουσιαστούν τα θέματα απλοποιημένα, ακόμη και αν αυτό σημαίνει ότι κάποιες ενότητες προσεγγίζονται με μικρότερο βαθμό επιστημονικής αρτιότητας. Βασικό μέλημα είναι να πάρει ο αναγνώστης τις πληροφορίες που χρειάζεται ώστε να αρχίσει να πειραματίζεται μόνος του προς την κατεύθυνση που τον ενδιαφέρει χωρίς να δυσκολευτεί με τεχνικές λεπτομέρειες που συχνά κάνουν δύσκολη την κατανόηση απλών διαδικασιών. Θεωρώ ότι κατά τα πρώτα στάδια εκμάθησης ενός γνωστικού αντικείμενου είναι προτιμότερο να δοθεί το βάρος στο να διατηρηθεί ο ενθουσιασμός του μαθητή προς αυτό. Το βιβλίο απευθύνεται σε μουσικούς, τεχνικούς ήχου και καλλιτέχνες που προσεγγίζουν το θέμα με δημιουργική διάθεση και που ενδιαφέρονται να κατανοήσουν τις βασικές αρχές σύνθεσης και επεξεργασίας ώστε να φτιάξουν τη δική τους μουσική, ηχητικές δομές, εγκαταστάσεις κ.λπ. χωρίς να έχουν κάποια προηγούμενη εμπειρία στο αντικείμενο.

«Μα εγώ θέλω να μάθω σύνθεση ήχου, όχι να γίνω προγραμματιστής».

Εντάξει, είναι σεβαστό. Πριν αποφασίσεις να παρατήσεις αυτό που διαβάζεις και να πας για μπέρα θα ήθελα να σε πείσω όχι για το αντίθετο, αλλά για τους λόγους




που μπορεί να σου είναι χρήσιμο να μάθεις σύνθεση ήχου χρησιμοποιώντας μία γλώσσα σαν το SuperCollider.

Καταρχάς για να ασχοληθεί κανείς με τη σύνθεση ήχου δεν είναι απαραίτητο να μάθει προγραμματισμό. Θα πρέπει να σου πω ότι ούτε εγώ είμαι προγραμματιστής. Αυτό όμως δε με εμποδίζει να χρησιμοποιώ τον υπολογιστή έως κάποιο επίπεδο ώστε να κατασκευάζω ηχητικές διαδικασίες -και κατ' επέκταση μουσική- που με ένα συμβατικό περιβάλλον εργασίας για ήχο (DAW¹) θα ήταν αδύνατες. Η αλήθεια είναι ότι θα μπορούσε αυτό το βιβλίο να παρουσιάσει τη θεωρία των τεχνικών σύνθεσης και να δώσει παραδείγματα χρησιμοποιώντας τα συνήθη εμπορικά προγράμματα. Υπάρχουν όμως αρκετοί λόγοι που κάνουν τη χρήση του SuperCollider αρκετά γοητευτική. Ορίστε μερικοί:

- Τα πιο πολλά προγράμματα που κυκλοφορούν στην αγορά έχουν φτιαχτεί για να κάνουν συγκεκριμένες λειτουργίες οι οποίες τις περισσότερες φορές είναι αυτές που χρειάζεται ένας μέσος χρήστης. Για παράδειγμα, δουλεύοντας μέσα σε ένα περιβάλλον ενός DAW οι διαδικασίες επεξεργασίας ενός αρχείου ήχου είναι πεπερασμένες και προκαθορισμένες από τον κατασκευαστή. Αν φανταστείς μία διαδικασία που θα ήθελες να εφαρμόσεις αλλά δεν είναι διαθέσιμη από το αντίστοιχο μενού του προγράμματος τότε απλά δεν μπορείς να κάνεις τίποτα. Αν το σκεφτείς, η δημιουργικότητά σου ως καλλιτέχνης και μουσικός εξαρτάται από τις δυνατότητες που σου παρέχει το πρόγραμμα που δουλεύεις. Εν γένει, ο τρόπος που έχει κατασκευαστεί και στηθεί ένα μηχανήμα μας υπαγορεύει και τον τρόπο δουλειάς. Αυτό δεν είναι περιοριστικό όταν έχουμε να κάνουμε με μηχανές που κάνουν πολύ συγκεκριμένη λειτουργία με μικρό βαθμό τυχαιότητας, π.χ. τα ψυγεία πρέπει να κρατούν το γάλα κρύο, (τουλάχιστον μέχρι το 2021 που γράφεται αυτό το βιβλίο τα περισσότερα ψυγεία κάνουν κάτι τέτοιο). Αυτό που -κατά την άποψή μου- θα έπρεπε να μας προβληματίζει είναι όταν ένα μηχανήμα περιορίζει τη φαντασία και τη δημιουργικότητά και κατ' επέκταση μας ωθεί σε συγκεκριμένες επιλογές κατά την παραγωγική διαδικασία ενός μουσικού κομματιού, μιας διαδραστικής εγκατάστασης, ενός βίντεο, κτλ. Ένας λόγος που η σύγχρονη εμπορική μουσική συχνά ακούγεται πανομοιότυπη είναι ότι οι περισσότεροι μουσικοί παραγωγοί χρησιμοποιούν τα ίδια εργαλεία που υπαγορεύουν συγκεκριμένες διαδικασίες, π.χ. ένα μεγάλο μέρος της επαναλαμβανόμενης χορευτικής μουσικής βασίζεται στην ακολουθία δύο συνηθισμένων εντολών εντός ενός DAW: Copy-Paste / Copy-Paste / Copy-Paste / Copy-Paste... Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα πρόγραμμα που παρέχει μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας, όπως είναι το SuperCollider, ο καλλιτέχνης έχει περισσότερες δυνατότητες να φτιάξει ηχητικές συνθέσεις πιο κοντά στη δική του φαντασία παρά σε αυτά που του επιτρέπει ο

¹Digital Audio Workstation (DAW): Είναι (συνήθως) ένα λογισμικό που επιτρέπει την ηχογράφηση, επεξεργασία και δημιουργία ήχου. Υπάρχουν πολλές εταιρείες που κατασκευάζουν DAW και τις περισσότερες φορές συνοδεύονται από πρόσθετα προγράμματα (plug-ins) που διευρύνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας του ήχου που παρέχει το κυρίως πρόγραμμα.

κατασκευαστής του λογισμικού. Αυτός είναι και ο πιο σημαντικός λόγος για να χρησιμοποιήσεις κανείς ένα τέτοιο πρόγραμμα. Υπάρχουν όμως και άλλοι.

- Δεν έχει κόστος, είναι ελεύθερο, όμορφο και άρα μπορεί να γίνει δικό σου. Μπορεί ο καθένας να το κατεβάσει, να το εγκαταστήσει και να αρχίσει να πειραματίζεται χωρίς να δώσει δεκάρα. Δε χρειάζεται να προσπαθήσεις να το βρεις σπασμένο...(you know what I mean). Επίσης υποστηρίζεται από μία κοινότητα χρηστών και όχι από μία εταιρεία οπότε έχει μάλλον μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσει σε βάθος χρόνου.
- Κάποιες έννοιες μπορούν να αναλυθούν με ευκολία μέσα από τη σύνταξη της γλώσσας του SuperCollider κι άρα ενδείκνυται για εκπαιδευτική χρήση.
- Έχει πολύ καλή μηχανή ήχου.
- Τρέχει παντού:   
- Έχει φτιαχτεί για καλλιτέχνες και μουσικούς κι έτσι δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο, μέχρι και εγώ μπορώ να προγραμματίσω στο SuperCollider, οπότε μπορεί ο καθένας.

Αν θέλεις λοιπόν να μάθεις για τη σύνθεση και επεξεργασία του ήχου και να παίξεις με το SuperCollider τότε προχώρα παρακάτω. Ο υπολογιστής είναι αρκετά πρωτόγονη μηχανή για αυτά που του ζητάμε να κάνει και μερικές φορές μας εκνευρίζει που δεν καταλαβαίνει τι του λέμε. Μόλις όμως μάθουμε πώς συμπεριφέρεται τότε μπορούμε να φτιάξουμε πολύ ενδιαφέροντα πράγματα.

Παρόλο που τα παραδείγματα του βιβλίου αφορούν κυρίως την έκδοση του προγράμματος για MacOS, η βασική δομή του κώδικα για τη δημιουργία ήχου είναι η ίδια σε οποιοδήποτε λειτουργικό. Πληροφορίες για την εγκατάσταση και λειτουργία του SuperCollider καθώς και τον πηγαίο κώδικα των παραδειγμάτων μπορείς να βρεις online στο synthesis.orestiskaramanlis.net.

Από αυτό το σημείο και στο εξής υποθέτω ότι έχεις εγκαταστήσει το πρόγραμμα και έχεις ήδη περάσει 5 λεπτά ώστε να αποκτήσεις στοιχειώδη οικειότητα με το περιβάλλον. Δηλαδή καταλαβαίνεις πού βρίσκεται το κάθε παράθυρο, έχεις ρίξει μία ματιά στα μενού και σου φαίνονται όλα @\$%*#. Βρίσκεσαι σε καλό δρόμο.

Τα κεφάλαια που ακολουθούν είναι γραμμένα σε καθημερινή γλώσσα, χρησιμοποιώντας ελάχιστα μαθηματικά, εστιάζοντας πάντοτε στο ηχητικό αποτέλεσμα κάθε τεχνικής. Η ορολογία παρουσιάζεται στα αγγλικά συνοδευόμενη από την αντίστοιχη ελληνική μετάφραση. Επειδή όμως πολλές έννοιες έχουν καθιερωθεί να χρησιμοποιούνται στη γλώσσα μας στα αγγλικά, κι επειδή είναι περισσότερο βοηθητικό όταν προγραμματίζουμε να γνωρίζουμε την αγγλική ορολογία, συχνά χρησιμοποιώ τους πρωτότυπους ορισμούς που είναι περισσότερο διαδεδομένοι. Φύγαμε!

1

Βασικές Έννοιες

Προτού αρχίσουμε να εξετάζουμε τις διαφορετικές τεχνικές σύνθεσης και να κάνουμε θόρυβο με το SuperCollider, υπάρχουν κάποιες βασικές έννοιες που σχετίζονται με τις ιδιότητες του ήχου και την αναπαράστασή του στον υπολογιστή. Είναι χρήσιμο να σου είναι ξεκάθαρες και δεν είναι πολλές. Ας τις δούμε εν συντομία.

1.1 Το Ηχητικό Κύμα: Συχνότητα & Πλάτος

Τα ηχητικά κύματα παράγονται από αντικείμενα που δονούνται (ή αλλιώς ταλαντώνονται) και μεταδίδονται μέσω του αέρα καθώς δημιουργούνται περιοχές μεγαλύτερης και μικρότερης πίεσης. Μόλις τα μόρια του αέρα διαταραχθούν από κάποια ηχητική πηγή, τότε φεύγουν από την κατάσταση ισορροπίας τους και αρχίζουν να σκουντάνε το ένα το άλλο, δημιουργώντας περιοχές μεγαλύτερης πίεσης, όταν τα μόρια πυκνώνουν μεταξύ τους, και μικρότερης πίεσης, όταν τα μόρια αραιώνουν. Με αυτήν τη διαδικασία της πύκνωσης και της αραιώσης των μορίων του αέρα διαδίδονται τα ηχητικά κύματα και είναι σημαντικό να το καταλάβεις για να αντιληφθείς τον τρόπο που αναπαριστούμε στον υπολογιστή μία κυματομορφή.

Το ανθρώπινο αυτί είναι αρκετά ευαίσθητο σε περιοδικές ταλαντώσεις. Μία ηχητική πηγή που ταλαντώνεται σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο μοτίβο -που επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά- δημιουργεί μία *περιοδική κυματομορφή* (periodic waveform). Κάθε πλήρη επανάληψη μιας περιοδικής κυματομορφής την ονομάζουμε *κύκλο* (cycle), ενώ ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος ονομάζεται *περίοδος* (period). Ο αριθμός των κύκλων ανά δευτερόλεπτο (cycles per second) ονομάζεται *συχνότητα* (frequency) και μετριέται σε Χερτς (Hertz ή Hz). Έτσι, όταν ακούμε τη νότα Λα στα 440 Hz από ένα ηχείο, ο κώνος δονείται (ταλαντώνεται) 440 φορές το δευτερόλεπτο ώστε να παραγάγει το ηχητικό κύμα που γίνεται αντιληπτό στα αυτιά μας ως ένα Λα. Το μέγεθος

αυτής της ταλάντωσης, που σχετίζεται με το πόσο έντονα δονείται η ηχητική πηγή, το ονομάζουμε πλάτος (amplitude) της κυματομορφής και μας δείχνει τη μεταβολή της πίεσης του αέρα. Το πλάτος μετριέται ως η απόσταση από το σημείο με τη μεγαλύτερη (ή τη μικρότερη) ατμοσφαιρική πίεση έως το σημείο ισορροπίας. Έτσι, ένα ηχητικό κύμα που έχει μεγαλύτερο πλάτος από ένα άλλο προκαλεί μεγαλύτερη αλλαγή στην πίεση του αέρα που την αντιλαμβανόμαστε ως έναν πιο δυνατό ήχο.¹

1.2 Το Πεδίο του Χρόνου

Ο πιο απλός τρόπος για να μετρήσουμε την πίεση του αέρα είναι με ένα μικρόφωνο. Με αυτό το πολύ όμορφο μηχανήμα μπορούμε να μετρήσουμε τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται από μία ηχητική πηγή και να μετατρέψουμε το ηχητικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα. Κι εδώ είναι που αρχίζει να γίνεται ενδιαφέρον το πράγμα διότι το ηλεκτρικό σήμα μπορούμε στη συνέχεια να το μετατρέψουμε σε ψηφία, να το εισάγουμε στον υπολογιστή και να το επεξεργαστούμε. Αλλά ας μην προτρέχουμε. Προς το παρόν μας ενδιαφέρει να δούμε πως μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα ηχητικό κύμα, και υπάρχουν δύο τρόποι: στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων.

Αν σχεδιάσουμε την πίεση του αέρα συναρτήσει του χρόνου σε δύο κάθετους άξονες, τότε το γράφημα θα μας δώσει την αναπαράσταση της κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου. Στον κάθετο άξονα τοποθετούμε την ατμοσφαιρική πίεση. Μεγαλύτερες τιμές πίεσης αντιστοιχούν σε υψηλότερο σημείο και αντίστροφα. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούμε τον χρόνο που τρέχει από αριστερά προς τα δεξιά. Δεν είναι τόσο δύσκολο και μοιάζει όπως στο διάγραμμα 1.1.

Αν έχεις κάνει ποτέ ηχογράφηση στον υπολογιστή τότε σίγουρα έχεις δει κυματομορφή. Η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης -όπως εμφανίζεται στο γράφημα 1.1- είναι στην ουσία η μεταβολή του ηλεκτρικού σήματος έτσι όπως μετρήθηκε από το μικρόφωνο που τοποθετήθηκε στον χώρο.

Από εδώ και στο εξής με τη λέξη *κυματομορφή* θα αναφέρομαι στο σχήμα ενός τέτοιου γραφήματος.

1.3 Το Πεδίο των Συχνοτήτων

Στη φύση μία ηχητική πηγή που δονείται και παράγει ηχητικά κύματα δεν ταλαντώνεται σε μία μόνο συχνότητα αλλά σε πολλές ταυτόχρονα. Η κυματομορφή που δημιουργείται περιέχει πάντα αρκετές συχνότητες που η κάθε μία έχει διαφορετική ισχύ. Παραδείγματος χάριν, μία χορδή που παίζει τη νότα Ντο² δεν ταλαντώνεται μόνο με συχνότητα 261 φορές το δευτερόλεπτο αλλά και σε πολλαπλάσια αυτής. Τα 261 Hz για το μεσαίο Ντο είναι βέβαια

¹Ελπίζω να μην αναγκαστείς να κάνεις σκονάκι τους παραπάνω ορισμούς γιατί σημαίνει ότι χρειάστηκε να δώσεις γραπτές εξετάσεις, οι οποίες είναι για όλους (φοιτητές και καθηγητές) μια βαρετή διαδικασία που στο τέλος δε θυμάται κανείς τίποτα.

²Εδώ εννοώ το μεσαίο Ντο-4 που αντιστοιχεί σε συχνότητα 261.63 Hz.

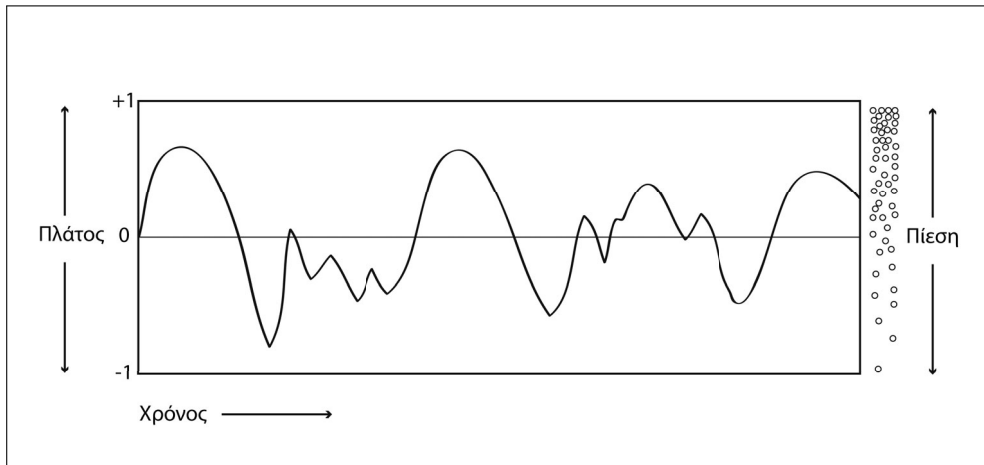


Figure 1.1: Αναπαράσταση κυματομορφής στο πεδίο χρόνου.

σημαντικός αριθμός καθώς αντιστοιχεί στο συνολικό μήκος της χορδής και την ονομάζουμε *θεμελιώδη συχνότητα* (fundamental frequency). Αν οι υπόλοιπες συχνότητες που συνυπάρχουν μαζί με τη θεμελιώδη είναι ακέραια πολλαπλάσια της τότε ονομάζονται *αρμονικές* (harmonics). Στην περίπτωση της χορδής μας, η συχνότητα στα 261 Hz αφορά τη θεμελιώδη συχνότητα (1^η αρμονική), η συχνότητα στα 522 Hz (261 x 2) είναι η 2^η αρμονική και αντιστοιχεί στο μισό μήκος της χορδής, η συχνότητα στα 783 Hz (261 x 3) είναι η 3^η αρμονική, ... κτλ.

Στα αγγλικά χρησιμοποιείται ο όρος *partials* για να αναφερθούμε σε όλες τις συχνотικές συνιστώσες ενός ήχου ασχέτως αν είναι ακέραια πολλαπλάσια ή όχι. Με άλλα λόγια μία αρμονική συχνότητα είναι ένα partial, ένα partial δεν είναι κατ' ανάγκη μία αρμονική.

Ένας τρόπος για να δούμε το συχνотικό περιεχόμενο του ήχου είναι με το *φασματογράφημα* (spectrogram). Το φασματογράφημα μας δείχνει την ισχύ που έχουν οι διαφορετικές συχνотικές συνιστώσες στον χρόνο. Στην εικόνα³ 1.2 φαίνεται το φασματικό διάγραμμα μιας ηχογράφησης άρπας διάρκειας περίπου 5 δευτερολέπτων. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο χρόνος, στον κάθετο άξονα βρίσκονται οι συχνотότητες και η ισχύς της κάθε συχνотότητας είναι ανάλογη της φωτεινότητας. Όσο μεγαλύτερο είναι δηλαδή το πλάτος μιας συχνотικής συνιστώσας τόσο πιο φωτεινή είναι και η συγκεκριμένη περιοχή.

Παρατήρησε πως η αρχή κάθε νότας που παίζει το όργανο είναι ορατή ως μία φωτεινή κάθετη ζώνη. Οι παράλληλες οριζόντιες φωτεινές γραμμές αναπαριστούν τις συχνотότητες που είναι παρούσες κάθε φορά. Όπως βλέπεις, η θεμελιώδης συχνотότητα κάθε νότας εξασθενεί πιο αργά από τις αρμονικές. Αυτό συμβαίνει σε αρκετά ακουστικά όργανα.

³ Η φασματική ανάλυση έχει γίνει με το Sonic Visualiser. Πρόκειται για ένα συμπαθητικό λογισμικό που μας επιτρέπει να εξετάσουμε ένα αρχείο ήχου στα πεδία χρόνου και συχνотότητων. Αν σε ενδιαφέρει μπορείς να το κατεβάσεις ελεύθερα από το sonicvisualiser.org.

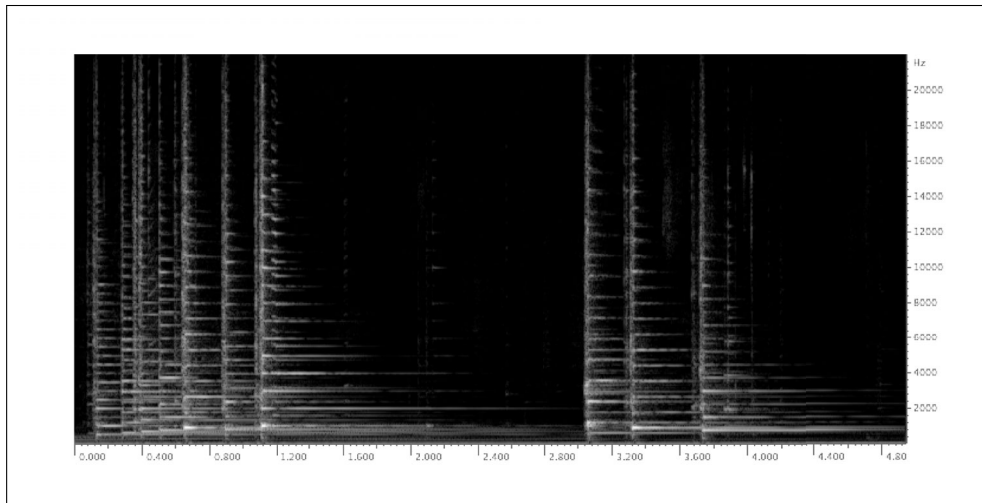


Figure 1.2: Φασματογράφημα μιας ηχογράφησης άρπας.

Το γράφημα 1.3 απεικονίζει στο πεδίο του χρόνου (επάνω) και στο πεδίο των συχνοτήτων (κάτω) ένα ρυθμικό μοτίβο παιγμένο στα τύμπανα. Εδώ φαίνεται ότι τα κρουστά χτυπήματα έχουν ενέργεια σε μεγαλύτερο εύρος του φάσματος, καλύπτουν δηλαδή περισσότερες συχνοτικές περιοχές ταυτόχρονα.

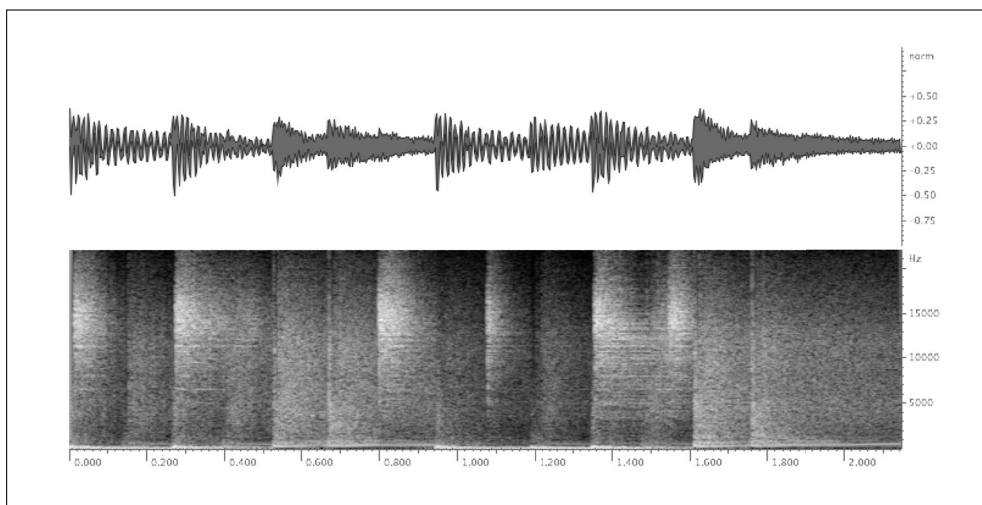


Figure 1.3: Αναπαράσταση μιας ρυθμικής λούπας ταυτόχρονα στο πεδίο χρόνου και στο πεδίο συχνοτήτων.

1.4 Η Φάση

Όπως είδαμε προηγουμένως, ένα περιοδικό ηχητικό κύμα επαναλαμβάνεται με το ίδιο μοτίβο ξανά και ξανά. Η αρχική θέση μέσα στον κύκλο από όπου ξεκινάει το κύμα ονομάζεται *αρχική φάση* (initial phase).

Στο διάγραμμα 1.4 έχουμε δυο ημιτονοειδείς κυματομορφές με ίδια συχνότητα και ίδιο εύρος πλάτους. Η πρώτη κυματομορφή αρχίζει από το 1 και ολοκληρώνει έναν κύκλο ξανά στο 1. Η δεύτερη κυματομορφή αρχίζει από το -1 και ολοκληρώνει έναν πλήρη κύκλο στο -1. Σε αυτήν την ειδική περίπτωση που το ένα κύμα έχει ακριβώς αντίθετη φάση από το άλλο, είναι δηλαδή εκτός φάσης κατά 180 μοίρες, όταν προστεθούν⁴ μεταξύ τους το ένα θα ακυρώσει το άλλο. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση που τα κύματα δεν είναι πλήρως εκτός φάσης τότε κάποιες συχνότητες εξασθενούν και άλλες ενισχύονται (λόγω συμβολής) ανάλογα με τη διαφορά φάσης των δύο κυματομορφών⁵.

1.5 Το Ψηφιακό Σήμα

Έχουμε δει ότι η μεταβολή της πίεσης του αέρα που προκαλεί μία ηχητική πηγή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα μέσω του μικροφώνου. Η πίεση που δέχεται το μικρόφωνο είναι *ανάλογη* του ηλεκτρικού σήματος που παράγει. Για να μπορέσουμε να εισαγάγουμε αυτό το σήμα στον υπολογιστή χρειαζόμαστε ένα σύστημα που θα μας επιτρέψει να μετατρέψουμε το αναλογικό σήμα (που είναι συνεχές) σε ψηφιακό (που είναι διακριτό). Η συσκευή αυτή στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως ADC (Analog to Digital Converter) και η λειτουργία της είναι να παίρνει το αναλογικό σήμα και να το μετατρέπει σε ψηφία που θα εισαχθούν στον υπολογιστή. Ας εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τη διαδικασία.

Θα έχεις ακούσει ότι οι υπολογιστές δουλεύουν με 0 και 1. Χρησιμοποιούν δηλαδή *bits*. Κάθε bit είναι ένα δυαδικό ψηφίο που μπορεί να πάρει την τιμή 0 ή 1. Δε θα σε μπερδέψω με μαθηματικά, όμως είναι χρήσιμο να έχεις μια ιδέα για το πώς λειτουργεί το σύστημα αφού από τα bits εξαρτάται και η ποιότητα του ήχου που θα φτιάξεις. Κάθε bit λοιπόν μπορεί να πάρει δύο τιμές. Χρησιμοποιώντας 1-bit μπορούμε να εκφράσουμε δύο διαφορετικές καταστάσεις, 0 ή 1. Χρησιμοποιώντας 2-bit μπορούμε να εκφράσουμε 4 διαφορετικές καταστάσεις αφού οι πιθανοί συνδυασμοί των 2-bit είναι [0,0], [0,1], [1,0], [1,1]. Με 3-bit μπορούμε να εκφράσουμε 8 διαφορετικές καταστάσεις κ.ο.κ. Κάθε φορά οι διαφορετικοί συνδυασμοί που μπορούμε να πάρουμε βρίσκονται υψώνοντας το 2 στην αντίστοιχη δύναμη των αριθμών των bit που χρησιμοποιούμε. Προσπάθησε να τα θυμηθείς αυτά γιατί θα μας είναι χρήσιμα παρακάτω.

⁴Για να προσθέσουμε δύο κύματα προσθέτουμε τις τιμές που λαμβάνουν σημείο προς σημείο στον άξονα του χρόνου.

⁵Για να καταλάβεις πώς λειτουργεί η διαφορά φάσης δοκίμασε το εξής: Άνοιξε ένα μονοφωνικό αρχείο ήχου σε ένα οποιοδήποτε DAW και τοποθέτησέ το σε ένα track. Στη συνέχεια φτιάξε ένα αντίγραφο του track μαζί με το αρχείο ήχου. Καθώς οι δύο πανομοιότυπες κυματομορφές βρίσκονται σε τέλεια φάση άκουσέ τις ταυτόχρονα δοκιμάζοντας να ωθήσεις ελάχιστα προς τα μπρος τη μία από τις δύο. Παρατηρείς τις αλλαγές που προκαλούνται στο ηχόχρωμα; Αν όχι, παράτα τα.

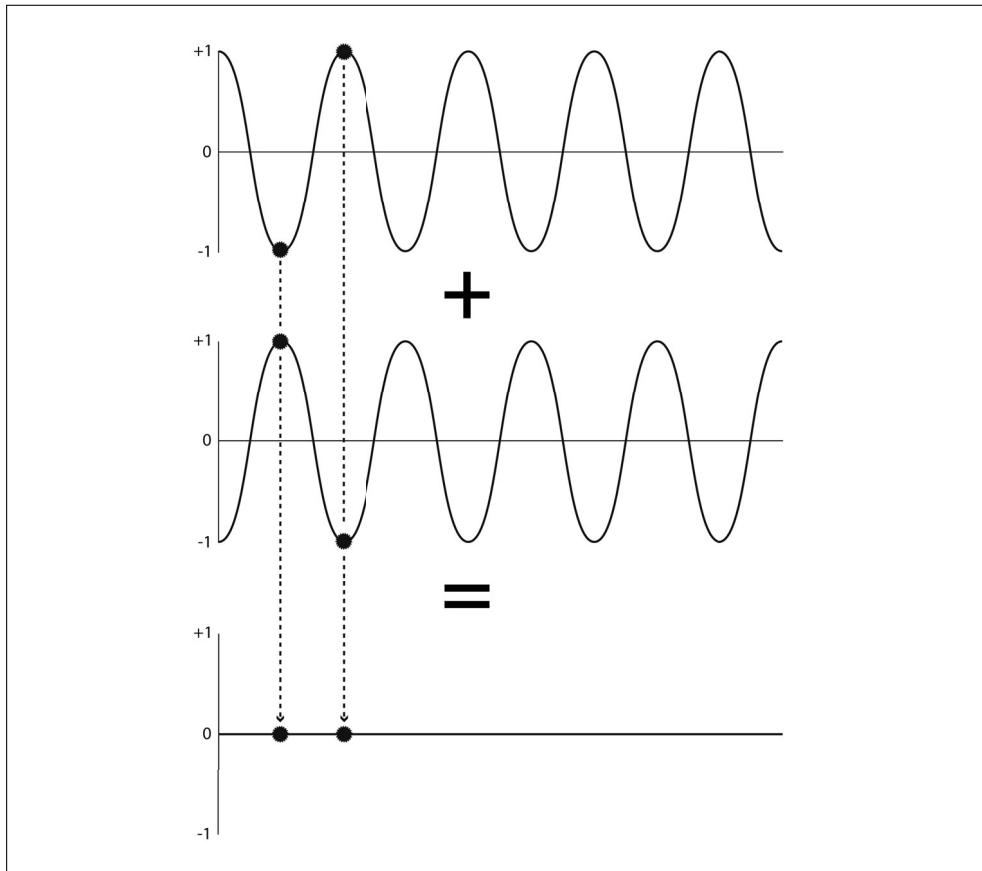


Figure 1.4: Πρόσθεση δύο κυματομορφών που βρίσκονται πλήρως εκτός φάσης

Για να μετατραπεί το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα σε ψηφιακό, ο ADC παίρνει δείγματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αν τα δείγματα έχουν σχετικά καλή ανάλυση και είναι χρονικά πολύ κοντά το ένα στο άλλο, τότε μπορούμε με επιτυχία να αναπαραστήσουμε την αναλογική κυματομορφή στον ψηφιακό κόσμο. Για κάθε δείγμα που παίρνουμε μετράμε το πλάτος του σήματος χρησιμοποιώντας ένα πλήθος από bits και αποθηκεύουμε την τιμή στη μνήμη του υπολογιστή. Κατ' επέκταση όσο περισσότερα bits χρησιμοποιούμε τη στιγμή της δειγματοληψίας, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουμε στη μέτρηση και άρα μπορούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια να αναπαραστήσουμε την αρχική κυματομορφή.

Η συχνότητα με την οποία παίρνουμε τα δείγματα ονομάζεται *συχνότητα δειγματοληψίας* (sampling rate) και εκφράζεται σε αριθμό δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας το κιλοχέρτζ (KHz). Μία διαδεδομένη συχνότητα δειγματοληψίας στις μέρες μας είναι τα 44.1 KHz. Σε αυτήν την περίπτωση ο ADC λαμβάνει 44,100 δείγματα το δευτερόλεπτο στην προσπάθειά του να

αναπαραστήσει την κυματομορφή⁶. Έτσι, κάθε $1/44,100 = 0.0000227$ ⁷ του δευτερολέπτου παίρνουμε ένα δείγμα, κάνουμε τη μέτρηση της τιμής του πλάτους και προχωράμε στο επόμενο. Η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στο γράφημα 1.5 όπου το αναλογικό σήμα (επάνω) δειγματοληπτείται σε διακριτούς χρόνους για να ανακατασκευαστεί στον ψηφιακό κόσμο.

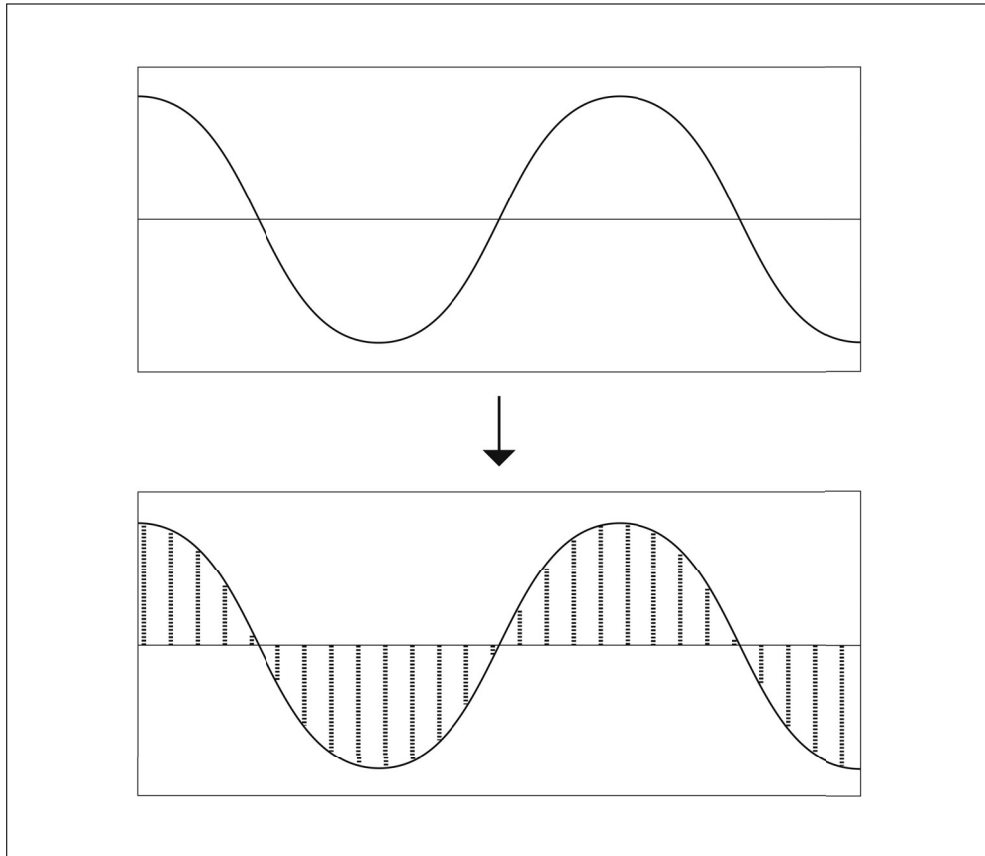


Figure 1.5: Δειγματοληψία ενός αναλογικού ημιτονοειδούς σήματος.

Αντίστροφα, όταν θέλουμε να ακούσουμε ένα αρχείο ήχου που έχουμε στον υπολογιστή τότε χρησιμοποιούμε έναν μετατροπέα σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό (Digital to Analog Converter ή DAC). Αυτός διαβάζει διαδοχικά τους δυαδικούς αριθμούς που περιέχονται στο αρχείο ήχου και τους μετατρέπει σε ηλεκτρικό ρεύμα που με τη σειρά του δονεί τον κώνο του ηχείου. Είναι σημαντικό η ταχύτητα που ο DAC διαβάζει το αρχείο να ταυτίζεται με την αρχική ταχύτητα που έγινε η δειγματοληψία.

⁶Άλλες συνήθεις συχνότητες δειγματοληψίας είναι τα 48 KHz, 88.2 KHz, 96 KHz, 192 KHz, κ.ά.

⁷Η πραγματική τιμή είναι 0.000022675737.