



Τμήμα Εθνομουσικολογίας Ιόνιο Πανεπιστήμιο

+ θεωρητική εργασία με θέμα: Ιστορία επεξεργασίας και ανάλυσης ήχου, Fourier-ιστορικά στοιχεία, ανάλυση φάσματος, ανάλυση φόρμουλας Fourier, ψηφιακά φίλτρα-ανάλυση εφαρμογή στη μουσική και στην τέχνη του ήχου.

Γεροντίδη Μαρίλια

(Α.Μ.:1836)

Επιβλέπον Διδάσκον: Αγιομυργιανάκης Βασίλειος

Ο ήχος είναι ένα ακουστικό σήμα. Όπως για κάθε σήμα έτσι κι αυτό μπορεί να προέρχεται από ένα φυσικό αντικείμενο όπως η φωνή, κάποιο όργανο, έχουν συνήθως συνεχή χρόνο με εξαιρέσεις στο πεδίο της κβαντικής φυσικής ή και να κατασκευαστεί από ανθρώπινα μέσα, είτε διακριτού είτε συνεχούς χρόνου ανάλογα με το αν η συσκευή που τα παράγει είναι ψηφιακή ή αναλογική, για την εξυπηρέτηση κάποιων σκοπών του όπως για παράδειγμα στο τομέα των τηλεπικοινωνιών, της υγείας, του διαδικτύου, της ρομποτικής, των τεχνών και της μουσικής.

[\(Αγιομυργιανάκης, Ληξούρι 2020\)](#)

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος ασχολείται με την επεξεργασία σημάτων στο πεδίο του χρόνου, του χώρου ή/και της συχνότητας, τα οποία αναπαρίστανται ως ακολουθίες αριθμών ή συμβόλων. Η ψηφιακή και η αναλογική επεξεργασία σήματος συναποτελούν το διεπιστημονικό γνωστικό πεδίο της επεξεργασία σήματος που βασίζονται σε τεχνικές των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Κάποιες εφαρμογές της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι η επεξεργασία ήχου, η αναγνώριση φωνής, η επεξεργασία σημάτων από σόναρ, ραντάρ και συστοιχίες αισθητήρων, η εκτίμηση φάσματος, η στατιστική επεξεργασία σήματος, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, η επεξεργασία σήματος στις τηλεπικοινωνίες, ο έλεγχος συστημάτων, η επεξεργασία βιοϊατρικών σημάτων και η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων. Ο σκοπός, στην ουσία, της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος συνήθως είναι η μέτρηση, το φιλτράρισμα ή η συμπίεση συνεχόμενων αναλογικών φυσικών σημάτων. [\(James D. Broesch, Dag Stranneby and William Walker. Digital Signal Processing: Instant access. Butterworth-Heinemann.\)](#)

## Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία της μελέτης του ήχου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ιστορία της επιστημονικής μελέτης των μηχανικών κυμάτων. Από πολύ νωρίς είχε γίνει η σύνδεση μεταξύ της συμπεριφοράς των μηχανικών κυμάτων, των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και του ήχου. Από τις πρώτες αναφορές θεώρησης του ήχου ως κύμα έγινε από τον Αριστοτέλη, ο οποίος αναφέρει πως ο ήχος χρειάζεται ένα μέσο για να διαδοθεί όπως ο αέρας και τα υγρά. Μάλιστα αναφέρει πως ο ήχος ανακλάται όπως και το φώς κι ότι έχουν κοινές ιδιότητες, όπως σήμερα γνωρίζουμε σύμφωνα με τη σωματιδιοκυματική φύση του φωτός. Περί το 1500 μ.Χ., ο πολυπράγμων Ιταλός επιστήμονας Leonardo Da Vinci που έζησε την περίοδο της Αναγέννησης, ανακάλυψε πως ο ήχος διαδίδεται ως κύματα. Αυτή είναι και μία πρώτη σαφή αναφορά στην κυματική φύση του ήχου. Περίπου έναν αιώνα αργότερα, ο Ιταλός φυσικός, μαθηματικός, αστρονόμος και φιλόσοφος Γαλιλαίος Γαλιλέι, ασχολήθηκε ιδιαίτερα με την κατανόηση του ήχου. Παρουσίασε πειράματα που αποδεικνύουν ότι η συχνότητα ενός ηχητικού κύματος καθορίζει το τονικό ύψος του ήχου. Περί το 1640 μ.Χ., ο Γάλλος θεολόγος, φιλόσοφος και μαθηματικός, πάτερ Marin Mersenne ήταν ο πρώτος που μέτρησε την ταχύτητα του ήχου. Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου, ο Mersenne χρησιμοποίησε το φαινόμενο της ηχούς. Μετρώντας τις χρονικές αποστάσεις μεταξύ ενός αρχικού ήχου και το χρόνο επιστροφής της ηχούς

στην πηγή αυτού του ήχου, μπόρεσε να κάνει μία εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου με σφάλμα μικρότερο από δέκα τοις εκατό σε σχέση με σύγχρονες μετρήσεις. Το 1660 μ.Χ., ο Ιρλανδός φυσικός Ρόμπερτ, διεξήγαγε πειράματα σχετικά με τη διάδοση του ήχου και απέδειξε ότι απαιτείται ένα μέσο όπως ο αέρας ή το νερό για να επιτευχθεί η παραγωγή και διάδοση ενός ηχητικού κύματος

Η μαθηματική μελέτη της διάδοσης του ήχου ξεκίνησε με την έκδοση του βιβλίου με τίτλο «Principia» του Άγγλου φυσικού, μαθηματικού, αστρονόμου, φιλόσοφου, αλχημιστή και θεολόγου, Σερ Ισαάκ Νεύτων (Sir Isaac Newton) το 1686 μ.Χ. . Ο Νεύτων διατύπωσε μία θεώρηση του ήχου ως παλμούς πίεσης που διαδίδονται μεταξύ γειτονικών κινούμενων σωματιδίων. Επίσης, τυποποίησε μία σύνδεση μεταξύ της ταχύτητας του ήχου σε ένα μέσο και της πυκνότητας ή δυνατότητας συμπίεσης του μέσου αυτού. Η θεωρία του Νεύτωνα, αποτέλεσε εργαλείο για τη μετέπειτα επιστημονική και μαθηματική μελέτη του ήχου από επιστήμονες όπως οι Joseph Louis Lagrange, Johann Bernoulli και Leonard Euler το 18<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. Στα μέσα του 18ου αιώνα, ο Ελβετός μαθηματικός και φυσικός Daniel Bernoulli εξήγησε πως μία χορδή μπορεί να ταλαντώνεται με περισσότερες από μία συχνότητες, αυτές που ονομάζουμε «αρμονικές συχνότητες».

Η πλήρης μαθηματική θεώρηση του ήχου άρχισε να ολοκληρώνεται το 19<sup>ο</sup> αιώνα από το Γερμανό φυσικό Γκέοργκ Ωμ (Georg Simon Ohm). Ο Ωμ ασχολήθηκε και με την Ακουστική καθώς εφάρμοσε την αρμονική ανάλυση (μέθοδο απεικόνισης των περιοδικών λειτουργιών μέσω τριγωνομετρικών σειρών) του Γάλλου φυσικού και μαθηματικού Ζοζέφ Φουριέ. Το 1877 ο Αμερικανός εφευρέτης και επιχειρηματίας Τόμας Έντισον είναι ο πρώτος που επιτυγχάνει να καταγράψει ήχο με μηχανικό τρόπο με τον ο Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ και τον Λούις Γκλας και τον Εμίλ Μπερλινερ να ακολουθούν στα χνάρια του έργου του. Ο Edison πειραματίστηκε και με την ασύρματη μετάδοση ήχου όπως έκαναν επίσης οι Amos Dolbear και Guglielmo Marconi. Ο Marconi μάλιστα ανέπτυξε ιδέες που οδήγησαν στη δημιουργία του ραδιοφώνου βασισμένος στα πειράματα και ευρήματα του Heinrich Rudolf Hertz πάνω στα «κύματα hertz», δηλαδή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνοτήτων 3kHz-300MHz.

Από το 1925, τα ηλεκτρονικά αρχίζουν να αποκτούν ρόλο στην, καταγραφή, μετάδοση κι αναπαραγωγή ήχου. Η Western Electric παρουσίασε συστήματα ηλεκτρικής καταγραφής κι αναπαραγωγής ήχου που αναπτύχθηκαν από τα εργαστήρια Bell Labs της AT&T το 1925. Το 1928, ο George Neumann ίδρυσε εταιρία παραγωγής μικροφώνων και τότε ξεκίνησε η παραγωγή του πρώτου εμπορικά διαθέσιμου πυκνωτικού μικρόφωνου. Το 1933 είχαμε την εφεύρεση της ραδιοφωνικής μετάδοσης με διαμόρφωση συχνότητας από τον Αμερικανό μηχανικό Edwin Armstrong. Το 1948, ξεκινά η παραγωγή των δίσκων βινυλίου με διάμετρο 12 ιντσών. Το 1949, οι μικρότεροι δίσκοι βινυλίου των 45 στροφών ανά λεπτό με διάμετρο επτά ιντσών γίνονται εμπορικά διαθέσιμη από την εταιρία RCA. Το 1982 έχουμε ένα άλμα στην αναπαραγωγή κι εγγραφή ήχου καθώς παρουσιάζεται στην αγορά ο πρώτος ψηφιακός «συμπαγής δίσκος» ή compact disc (“CD”) από τις εταιρίες Philips και Sony. Παράλληλα με τη βελτιστοποίηση στο τομέα της ποιότητας στα μέσα αποθήκευσης του ηχητικού σήματος αναπτύχθηκαν και τα ανάλογα λογισμικά επεξεργασίας του όπου μετά το 2000 ξεκίνησαν να παρουσιάζουν τεράστια

ποικιλομορφία μέσα από τις δυνατότητες επεξεργασίας που προσέφεραν στους χρήστες([Σωτηρόπουλος, Αθήνα 2017](#)).

Πλέον στις μέρες μας τα συμπεράσματα όλων αυτών των ιστορικών βημάτων έχουν εμπλουτιστεί μέσα από την ανάπτυξη της τεχνολογίας δίνοντάς μας δυνατότητες, στην επεξεργασία ψηφιακών ηχητικών σημάτων, ενίσχυσης / διαμόρφωσης έντασης, διαμόρφωση στερεοφωνικής ηχητικής εικόνας (panning, stereo width), διαμόρφωση πολυκαναλικού ήχου, μετατροπή τονικού ύψους (pitch shifting / pitch bending), μετατροπή χρονικής διάρκειας (time stretching), δημιουργία επανάληψης (delay effects: delay, reverb, echo, phaser, chorus κτλ.), φιλτράρισμα – ισοστάθμιση (filtering / EQ), Μίξη κυματομορφών(mixing/sequencing, cross-fading), Αποθορυβοποίηση / επιδιόρθωση σφαλμάτων (noise reduction / restoration), συμπίεση([Λουφόπουλος, Ληξούρι 2006](#)).

Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τις παραπάνω επεξεργασίες ψηφιακά πρέπει πρώτα το ψηφιακό σύστημα να μετατρέψει τον ήχο σε κώδικα ψηφίων, να τον αναλύσει και, σε αρκετές περιπτώσεις, να τον αποθηκεύσει σε ψηφιακό αρχείο. Έτσι, οι ακόλουθες διαδικασίες είναι απαραίτητες και καθοριστικές για την τελική διαμόρφωση του ηχητικού αποτελέσματος της επεξεργασίας:

- Ψηφιοποίηση (διαμόρφωση δειγματοληψίας-κβαντισμός-κωδικοποίηση)
- Γραφική αναπαράσταση, ψηφιακή/φασματική ανάλυση.

Τα βασικά στάδια της ψηφιοποίησης του ήχου είναι τα εξής:

- Δειγματοληψία(Η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι διπλάσια από τη μέγιστη συχνότητα του δείγματος σύμφωνα με το θεώρημα του Nyquist Shannon)
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση

Κατά την ψηφιοποίηση του ήχου αρχικά λαμβάνονται δείγματα ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (δειγματοληψία). Στη συνέχεια τα δείγματα αντιστοιχούνται σε συγκεκριμένες τιμές πλάτους, ή ‘στάθμες’, ανάλογα με τη μεταβολή τάσης που έχει καταγραφεί στο κάθε δείγμα (κβαντισμός). Τέλος, οι τιμές που έχουν οριστεί κατά τον κβαντισμό οργανώνονται σε μία σειρά ψηφίων.

Τα ψηφιακά συστήματα που εμπλέκονται σε αυτές τις διεργασίες είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα Μουσικά όργανα(synthesizers – workstations), οι οικιακές οπτικοακουστικές συσκευές, οι ολοκληρωμένες μονάδες υλικού(Digital Audio Workstations /Processors:ψηφιακοί μίκτες, πολυκάναλα μαγνητόφωνα, μονάδες εφέ κτλ.), τα συστήματα ψηφιακής ραδιοφωνίας, τα δορυφορικά συστήματα μετάδοσης μουσικής πληροφορίας, τα οποία φέρουν συγκεκριμένα υποσυστήματα(Μετατροπείς σήματος(ADC – DAC = Analog to Digital Converters – Digital to Analog Converters), συστήματα κωδικοποίησης (PCM, ADPCM,OCF), ψηφιακοί επεξεργαστές ήχου, συστήματα αποθήκευσης ηχητικών δεδομένων, λογισμικά επεξεργασίας)([Λουφόπουλος, Ληξούρι 2006](#)). Τυχόν λάθη σε αυτά τα βήματα της ψηφιοποίησης μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις aliasing που οφείλονται στη λάθος δειγματοληψία, sampling gitter όταν τα δείγματα δε

κατανέμονται σωστά στο χρόνο και quantization ή αλλιώς θόρυβος κβαντισμού όπου είναι η διαφορά που παρουσιάζει ένα ηχητικό σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό και διορθώνεται με το dithering([Αγιομυργιανάκης, Ληξούρι 2020](#)).

Σε ότι αφορά τη γραφική αναπαράσταση, ψηφιακή/φασματική ανάλυση οφείλουμε να αναφερθούμε στην ανάλυση Fourier που είναι ένα καλά εδραιωμένο αντικείμενο στην εφαρμοσμένη μαθηματική ανάλυση η οποία μας αποκαλύπτει σημαντική πληροφορία στο συχνотικό όμως χώρο η οποία δεν είναι εμφανής στην χρονική αναπαράσταση του σήματος. Χρησιμοποιείται δηλαδή για ανάλυση χρονικών σημάτων στο πεδίο συχνοτήτων, περιγράφοντας τη φασματική συμπεριφορά του σήματος. Το αποτέλεσμα του είναι ένα σύνολο συντελεστών, οι οποίοι απεικονίζουν το σήμα ως ένα γραμμικό συνδυασμό ημιτονοειδών συναρτήσεων διαφορετικών συχνοτήτων δεδομένου ότι αυτό είναι περιοδικό. Να σημειώσουμε ότι μία από τις βασικότερες εφαρμογές του μετασχηματισμού Fourier στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος είναι η εκτίμηση του φάσματος ισχύος (power spectrum) μιας ακολουθίας. Η ανάγκη για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου φάσματος προκύπτει σε μια ποικιλία εφαρμογών π.χ. την μέτρηση του θορύβου αλλά και των ισχυρών συχνοτήτων του σήματος ([Χριστοπούλου, Πάτρα 2007](#)). Αρχικά εμφανίστηκε ο Discrete Fourier Transform όπου έβγαζε το άπειρο ολοκλήρωμα από τη σχέση και το αντικατέστησε με πεπερασμένο αριθμό βημάτων και στη συνέχεια έχουμε τον Fast Fourier Transform ο οποίος χρησιμοποιεί έναν ειδικό αλγόριθμο για τον υπολογισμό των αρμονικών σαν ομάδα και όχι κάθε έναν ξεχωριστά([Βασάλος, Αθήνα 2016](#)).

Τα ψηφιακά φίλτρα προσομοιάζουν τη λειτουργία των αναλογικών φίλτρων γιατί και κατηγοριοποιούνται με τον ίδιο τρόπο περιγράφοντας τα ως ψηφιακές μονάδες ηχητικής επεξεργασίας οι οποίες μεταβάλλουν το συχνотικό περιεχόμενο(φάσμα) ενός σήματος, ενισχύοντας ή εξασθενώντας συγκεκριμένες περιοχές / ζώνες συχνοτήτων.

Τα πλέον πιο διαδεδομένα ψηφιακά φίλτρα στην επεξεργασία ηχητικού σήματος είναι τα Comb Filters τα οποία είναι στην ουσία μια σειρά καθυστερήσεων, ο συνδυασμός ενός σήματος με τον καθυστερημένο αντίγραφο του. Εδώ συναντούμε διάφορες κατηγοριοποιήσεις με μικρές διαφορές μεταξύ τους:

-Echo: ένα ή περισσότερα επαναλαμβανόμενα σήματα προστίθενται στο αρχικό σήμα (αίσθηση 'ηχούς')

-Reverb: τα επαναλαμβανόμενα σήματα (echoes) προστίθενται στο αρχικό με καθυστέρηση μικρότερη από 50 msec. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία της αίσθησης της ηχητικής αντανάκλασης

-Flanger: στο αρχικό σήμα προστίθεται επεξεργασμένο σήμα (delayed signal) με εναλλασσόμενη χρονική καθυστέρηση (συνήθως μικρότερη από 10 ms).

-Phaser: το αρχικό σήμα χωρίζεται σε 2 τμήματα. Το ένα τμήμα του φιλτράρεται ώστε να αποκτήσει διαφορετική φάση και έπειτα τα 2 τμήματα προστίθενται.

-Chorus: στο αρχικό σήμα προστίθενται επαναλήψεις μικρής αλλά σταθερής χρονικής καθυστέρησης (περίπου 5-10 ms). Το αποτέλεσμα δίνει την αίσθηση 'πολλών φωνών' που συνοδεύουν τη βασική (αρχικό σήμα) σε unisono. Συχνά, για να

αποδοθεί πιστότερα η αίσθηση πολλών φωνών, τα επαναλαμβανόμενα τμήματα μπορεί να αναπαράγονται και με ελαφρά τονική απόκλιση (pitch shifting).

Οι σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας (και ειδικά ορισμένες εικονικές συσκευές /software) συχνά δίνουν τη δυνατότητα συνδυασμού των παραπάνω εφαρμογών (ταυτόχρονη επεξεργασία του σήματος με πολλαπλές μεθόδους) αλλά και τη δυνατότητα συνδυασμού των delay effects με άλλες διαδικασίες επεξεργασίας (πχ. φίλτρα, pitch shifting κ.α.) ([Λουφόπουλος, Ληξούρι 2006](#)).

## Αναφορές

- 1<sup>η</sup>: Αγιομυργιανάκης Β. Github repository ‘dsp’, Ιόνιο Πανεπιστήμιο 2020  
[https://github.com/Vasileios/dsp/blob/master/Slides/03\\_CombFilter.pdf](https://github.com/Vasileios/dsp/blob/master/Slides/03_CombFilter.pdf)
- 2<sup>η</sup>: James D. Broesch, Dag Stranneby and William Walker. Digital Signal Processing: Instant access. Butterworth-Heinemann 2004.
- 3<sup>η</sup>: Σωτηρόπουλος Α. Ν. Διπλωματική Εργασία Καθορισμός παραμέτρων πιστής αναπαραγωγής ήχου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα 2017
- 4<sup>η</sup>: Λουφόπουλος Α. Σημειώσεις για το μάθημα Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου Θεωρία Μέρος Α, Ιόνιο Πανεπιστήμιο Ληξούρι 2006
- 5<sup>η</sup>: Χριστοπούλου Ε. Β. Διδακτορική Διατριβή Ψηφιακή Επεξεργασία Ηλιακών Εικόνων, Πανεπιστήμιο Πατρών 2007.  
[https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1095/1/Nimertis\\_Christopoulou.pdf](https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1095/1/Nimertis_Christopoulou.pdf)
- 6<sup>η</sup>: Βασάλος Γ. Πτυχιακή Εργασία Αποτύπωση μουσικής σε παρτιτούρα/ταμπλατούρα μέσω υπολογιστή, Χαροκοπείο Πανεπιστήμιο Αθηνών 2016 <http://estia.hua.gr/file/lib/default/data/17392/theFile>

## Πηγές από το ίντερνετ:

- [http://www.aes.org/aeshc/docs/audio.history.timeline.html?fbclid=IwAR2\\_Ml0bRmhwQAi\\_maCmCftIOPOU49eiA3\\_N79Ey5Bxf\\_9WSFx\\_Mwq6B6Vk](http://www.aes.org/aeshc/docs/audio.history.timeline.html?fbclid=IwAR2_Ml0bRmhwQAi_maCmCftIOPOU49eiA3_N79Ey5Bxf_9WSFx_Mwq6B6Vk)
- <http://users.uoa.gr/~apgiannop/undergraduate/fourier-analysis-and-music.pdf>
- [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1\\_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82#cite\\_ref-1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1_%CF%83%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82#cite_ref-1)

