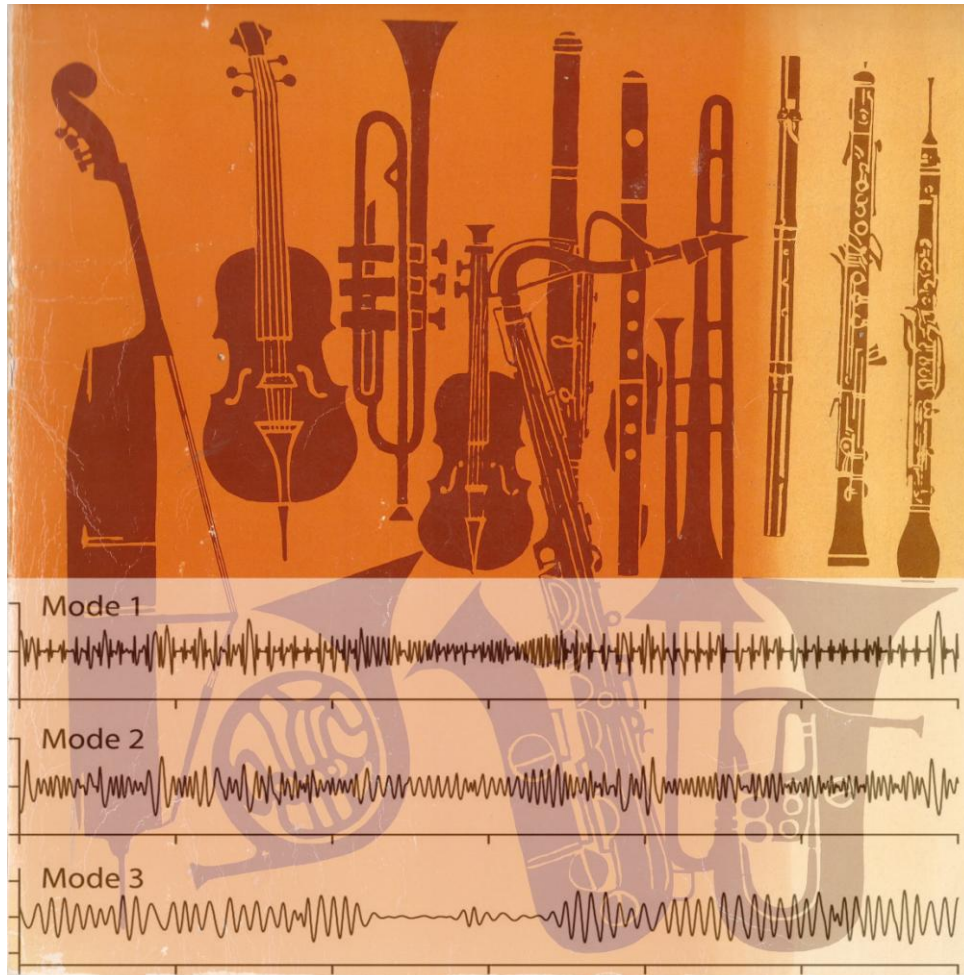


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση των κυματομορφών του κλαρίνου και της τρομπέτας με την μέθοδο EMD (Empirical Mode Decomposition)».

Εκπόνηση: Σκιαδάς Νίκος

Επίβλεψη: Κουζούπης Σπύρος

Ρέθυμνο 2011

Ευχαριστίες

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συμβάλανε στην υλοποίηση της:

Πρώτα από όλα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σπύρο Κουζούπη, ο οποίος με τη βοήθεια του συνέβαλε στην ολοκλήρωση κάθε κεφαλαίου της εργασίας ξεχωριστά.

Όλο το προσωπικό του παραρτήματος του ΤΕΙ Κρήτης στο Ρέθυμνο που σχετίζεται με τις παροχές που αυτό προσέφερε (Βιβλιοθήκη, γρήγορο ίντερνετ, εκτυπωτές κλπ).

Περίληψη

Η πτυχιακή ασχολείται με την μελέτη των κυματομορφών ενός χάλκινου και ενός ξύλινου πνευστού (τρομπέτα - κλαρίνο). Για κάθε όργανο συγκρίναμε ζευγάρια από νότες της ίδιας τονικότητας εκτελεσμένα όμως με διαφορετική ένταση και τεχνική. Οι αναλύσεις έγιναν με την μέθοδο EMD (Empirical Mode Decomposition).

Στο πρώτο κεφάλαιο, η εργασία καταπιάνεται με τον τρόπο που παράγεται ο ήχος στα χάλκινα και στα ξύλινα πνευστά μουσικά όργανα. Στο δεύτερο, παρουσιάζεται η μέθοδος ανάλυσης σημάτων EMD (Empirical Mode Decomposition) και οι διάφορες παραλλαγές της, ενώ στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο, υλοποιείται και εφαρμόζονται πολλές παραλλαγές της μεθόδου σε κυματομορφές από νότες τρομπέτας και κλαρίνου εκτελεσμένες με διάφορους τρόπους (π.χ. στακάτο, λεγκάτο, piano, forte, κ.λ.π.). Για κάθε διαφορετικά εκτελεσμένη νότα επισημαίνονται οι διαφορές όσον αφορά στις εντάσεις και τους χρόνους ανόδου των συνιστωσών της ανάλυσης και σχολιάζονται οι αναλύσεις των αποτελεσμάτων με τις διάφορες παραλλαγές της μεθόδου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή του ήχου στα πνευστά	1
1.2 Ταξινόμηση των πνευστών	2
1.3 Η παραγωγή του ήχου στα χάλκινα πνευστά	3
1.3.1 Βασικές πληροφορίες	3
1.3.2 Σύστημα βαλβίδων	4
1.3.3 Επίδραση του επιστομίου	8
1.3.4 Επίδραση της καμπάνας	10
1.3.5 Μελέτη οργάνων	15
1.3.6 Ισχύς και τονική ποιότητα	21
1.4 Μελέτη της κίνησης των χειλιών κατά το πολύ δυνατό παίξιμο στα χάλκινα	26
1.5 Η παραγωγή του ήχου στα ξύλινα πνευστά	29
1.5.1 Βασικές πληροφορίες	29
1.5.2 Ταλαντώνοντας αέριες στήλες	30
1.5.3 Τονικές οπές και βασική κλίμακα	34
1.5.4 Μελέτη οργάνων και της γλωττίδας	36
1.5.5 Ηχητική ακτινοβολία στα ξυλόφωνα	47
1.5.6 Τονισμός και συντονισμοί στα ξύλινα πνευστά	48
1.5.7 Τονική ποιότητα στο ξυλόφωνα	53
1.5.8 Άλλοι παράγοντες στους τόνους των ξύλινων πνευστών	62

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγικές έννοιες πάνω στον Μετασχηματισμό Hilbert – Huang	65
2.2 Η μέθοδος EMD	68
2.3 Φασματική ανάλυση Hilbert	71
2.4 Κριτήρια διακοπής (Stoppage Criteria)	73
2.5 Η επίδραση του τέλους της χρονοσειράς – Το πρόβλημα της πρόβλεψης για τις μη-στάσιμες διεργασίες.	78
2.6 Η μίξη των τρόπων (Mode mixing)	79
2.7 Μέθοδος EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)	81

2.8. Η μέθοδος CEEMD (Complementary EEMD)	83
2.8.1 Ανάλυση της μεθόδου	83
2.8.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου CEEMD	87
2.9 Παράδειγμα μετασχηματισμού EMD και EEMD σε απλά σήματα	89
Προτάσεις για τρόπους συνέχισης της παρούσας εργασίας	92

Κεφάλαιο 3

3.1 Βασικές πληροφορίες για τους ήχους και τις μεθόδους με τις οποίες αναλύθηκαν	93
3.2 Αναλύσεις των ήχων του κλαρίνου	97
3.2.1 Πληροφορίες και ανάλυση του 1ου ζευγαριού ήχων κλαρίνου	97
3.2.2 Πληροφορίες και ανάλυση του 2ου ζευγαριού ήχων κλαρίνου	102
3.2.3 Πληροφορίες και ανάλυση του 3ου ζευγαριού ήχων κλαρίνου	108
3.3 Αναλύσεις των ήχων της τρομπέτας	
3.3.1 Πληροφορίες και ανάλυση του 1ου ζευγαριού ήχων τρομπέτας	115
3.3.2 Πληροφορίες και ανάλυση του 2ου ζευγαριού ήχων τρομπέτας	121
3.3.3 Πληροφορίες και ανάλυση του 3ου ζευγαριού ήχων τρομπέτας	128
3.4 Μελέτη ήχων με μεταβλητό τονικό ύψος	140
3.5 Μελέτη δυο ήχων ατάκας με την μέθοδο CEEMD	148

<i>Παράρτημα Α</i>	156
<i>Παράρτημα Β</i>	158
<i>Παράρτημα Γ</i>	159
<i>Παράρτημα Δ</i>	162
<i>Παράρτημα Ε</i>	163
<i>Παράρτημα Ζ</i>	164

Αναφορές – Βιβλιογραφία	166
-------------------------	-----

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή στην παραγωγή του ήχου στα πνευστά

Για να παραχθεί ένας ήχος στα πνευστά όργανα, πρέπει η στήλη του αέρα που περιέχεται μέσα στον σωλήνα του οργάνου να τεθεί σε παλμική κίνηση. Αυτή η στήλη αρχίζει να πάλλεται καθώς τη χτυπάει ένα άλλο ρεύμα από αέρα, που δημιουργείται συνήθως από το φύσημα του εκτελεστή. Δεν αρκεί όμως να φυσήξει κανείς μέσα σε ένα σωλήνα για να παραχθεί κάποιος ήχος. Πρέπει το ρεύμα του αέρα που βγαίνει με την εκπνοή να ταλαντωθεί. Αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους.

Γνωρίζουμε ότι δυο από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ήχου είναι η *οξύτητα* και το *ηχόχρωμα*.

Στα πνευστά η *οξύτητα* επηρεάζεται από το μήκος της στήλης του αέρα που πάλλεται. Όσο μακρύτερος είναι ο σωλήνας, τόσο βαθύτερος είναι ο παραγόμενος φθόγγος (μικρότερη συχνότητα) ενώ, όσο κοντύτερος ο σωλήνας, τόσο οξύτερος ο φθόγγος (μεγαλύτερη συχνότητα).



Μακρύτερος σωλήνας - μικρότερη συχνότητα - βαθύτερος φθόγγος



Κοντύτερος σωλήνας - μεγαλύτερη συχνότητα - οξύτερος φθόγγος

Εικόνα 1: Σωλήνες διαφορετικού μήκους

Το *ηχόχρωμα* που, όπως γνωρίζουμε, καθορίζεται από τη σύνθεση των αρμονικών, επηρεάζεται κυρίως:

- Από τον τρόπο παραγωγής του ήχου (χρήση γλωττίδας, ταλαντώσεις χειλιών κλπ)
- Από το σχήμα του σωλήνα (κωνικό, κυλινδρικό κλπ).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι οι όροι «χάλκινα» και «ξύλινα» πνευστά επικράτησαν στις μέρες μας, αν και δεν αντιστοιχούν πάντα στην ύλη από την οποία κατασκευάζεται το όργανο. Πολλά από τα πρωτόγονα όργανα από ξύλο, κέρατο ζώου, ή άλλο υλικό παρμένο από τη φύση, κατατάσσονται στα «χάλκινα», ενώ πολλά

από τα «ξύλινα» πνευστά σήμερα είναι φτιαγμένα από μπρούντζο, ασήμι, εβονίτη ή και πλαστικό.

1.2 Ταξινόμηση των πνευστών

Ακουστικά, τα χάλκινα πνευστά θα μπορούσαν να ταξινομηθούν μαζί με τα ξυλόφωνα σε μια κατηγορία, αυτή των πνευστών. Όμως διαφέρουν σε πολλά σημεία ώστε τελικά ταξινομούνται σε ξεχωριστές κατηγορίες.

1) Δονήσεις της αέριας στήλης:

Οι δονήσεις της αέριας στήλης στα χάλκινα όργανα διατηρούνται από τις δονήσεις των χειλιών του οργανοπαίχτη αντί από αέριους πίδακες ή γλωττίδες. Εφόσον τα χείλη έχουν αρκετά μεγαλύτερη μάζα από ότι οι γλωττίδες των ξυλόφωνων, μπορούν πιο εύκολα να επηρεάσουν τις δονήσεις της αέριας στήλης.

2) Ιδιορυθμοί της αέριας στήλης:

Τα χάλκινα όργανα χρησιμοποιούν τους διάφορους ιδιορυθμούς της αέριας στήλης, όπως κάνουν και τα ξυλόφωνα, αλλά χρησιμοποιούν αρκετά περισσότερους από αυτούς. Η πλειοψηφία των χάλκινων έχουν μια πλήρη κλίμακα, που γίνεται διαθέσιμη γεμίζοντας τα κενά μεταξύ των ρυθμών.

3) Τρόπος παραγωγής των νοτών:

Για να παράγουμε τις νότες μεταξύ των ιδιορυθμών, τα χάλκινα όργανα αυξάνουν το συνολικό μήκος της αέριας στήλης προσθέτοντας επιπλέον κομμάτια σωλήνα αντί να ανοίγουν οπές στο σώμα του σωλήνα του οργάνου ώστε να μειώνουν το μήκος του. Επειδή δεν υπάρχουν ανοιχτές οπές στα τοιχώματα του σωλήνα, όλος ο ήχος των χάλκινων οργάνων προέρχεται από την καμπάνα.

4) Αποκλίσεις στις συχνότητες συντονισμού:

Τα ξυλόφωνα έχουν κυλινδρικούς και κωνικούς σωλήνες και καλά καθορισμένους και αρμονικώς σχετιζόμενους ιδιορυθμούς. Η παρουσία των καλυπτόμενων οπών αλλά και άλλοι παράγοντες προκαλούν αναπόφευκτες αποκλίσεις στις συχνότητες συντονισμού από αυτές των τέλειων κωνικών και κυλινδρικών σωλήνων. Αυτές οι αποκλίσεις μετατοπίζουν τους ιδιορυθμούς από τις συχνότητες που συνδέονται αρμονικά και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα

τονικά προβλήματα. Στα χάλκινα, οι αποκλίσεις της αέριας στήλης από τα απλά σχήματα εισάγονται εκουσίως και για να παράγεται μια μουσικά χρήσιμη σειρά από ιδιοσυχνότητες.

1.3 Η παραγωγή του ήχου στα χάλκινα πνευστά

1.3.1 Βασικές πληροφορίες

Στα όργανα αυτής της οικογένειας η παλμική κίνηση της στήλης του αέρα που περιέχει ο σωλήνας προκαλείται από τα χείλη του εκτελεστή, που τοποθετούνται μέσα σε ένα επιστόμιο σε σχήμα μικρού κώνου και, καθώς πιέζονται με το φύσημα, πάλλονται και λειτουργούν σαν διπλή γλωττίδα.

Η περιοχή της μουσικής έκτασης του οργάνου εξαρτάται κατ' αρχήν από το μήκος του σωλήνα. Για παράδειγμα, το μήκος του σωλήνα του κόρνου είναι μεγαλύτερο από αυτό της τρομπέτας, επομένως και οι νότες που θα παράγει θα είναι πιο μπάσες. Καθώς ο εκτελεστής φυσάει μέσα στο σωλήνα και πάλλονται τα χείλη μεταξύ τους, αναγκάζει τη στήλη του αέρα να πάλλεται σε όλο της το μήκος και να παράξει κάποιο φθόγγο που μπορεί να παίξει το όργανο. Για να παίξει και άλλους φθόγγους (χωρίς τη χρήση κλειδιών), θα πρέπει την ώρα που φυσάει μέσα στο επιστόμιο να σφίγγει και να χαλαρώνει τα χείλη του. Όσο πιο σφιγμένα είναι τα χείλη του, τόσο πιο ψηλή νότα θα παραχθεί και όσο πιο χαλαρά τα χείλη του, τόσο πιο μπάσα νότα θα παραχθεί. Οι φθόγγοι που μπορούν να παραχθούν με το σφίξιμο και το χαλάρωμα των χειλιών είναι περιορισμένοι: Με κάθε μήκος σωλήνα μπορεί να παραχθεί μόνο ένας βασικός φθόγγος και οι αρμονικοί του.

Όταν αλλάξει το μήκος του σωλήνα, ο βαθύτερος φθόγγος (θεμέλιος) και ολόκληρη η στήλη των αρμονικών θα αλλάξουν επίσης, πάντα όμως με την ίδια τάξη διαδοχής διαστημάτων. Πέρα από τους φθόγγους της αρμονικής στήλης είναι αδύνατο να παιχθούν οι ενδιάμεσοι. Αυτό ακριβώς ήταν το κύριο πρόβλημα που αντιμετώπιζαν οι εκτελεστές των χάλκινων πνευστών πριν τον 19^ο αιώνα, δηλαδή ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων φθόγγων. Για να αυξηθούν οι διαθέσιμοι φθόγγοι, έπρεπε κάθε φορά να αλλάξει το μήκος του σωλήνα, δημιουργώντας έτσι μια καινούργια σειρά αρμονικών. Τέτοια δυσκολία βέβαια δεν αντιμετώπιζαν οι εκτελεστές τρομπονιού, γιατί μπορούσαν εύκολα να αυξομειώσουν το μήκος του

σωλήνα με ένα «ολκωτό τμήμα» (βλέπε εικόνα 3). Αντί για βαλβίδες λοιπόν, ο σωλήνας έχει ένα «ολκωτό τμήμα», το οποίο αποτελείται από ένα κομμάτι πρόσθετου σωλήνα σε σχήμα U, που μετατοπίζεται μπρός – πίσω με το χέρι. Χάρη σε αυτό το σύστημα ο εκτελεστής μπορεί εύκολα να αυξομειώσει το σωλήνα στο μήκος που επιθυμεί. Οι εκτελεστές όμως της τρομπέτας και του κόρνου ή έπρεπε να έχουν μαζί τους όργανα διαφορετικών μεγεθών ή έπρεπε να χρησιμοποιούν επιπλέον τμήματα σωλήνα, τις λεγόμενες «σπείρες», που προσαρμόζονταν κάθε φορά στο όργανο, αυξάνοντας το συνολικό μήκος του σωλήνα.

Οι πιο σημαντικές προσπάθειες για την επίλυση του προβλήματος των χάλκινων πνευστών έγιναν γύρω στο 1795, με την κατασκευή μιας τρομπέτας που είχε οπές στο σωλήνα της (όμοιες με των ξύλινων πνευστών) και λίγο αργότερα με την επινόηση ενός τμήματος «ολκωτού σωλήνα», όμοιου με του τρομπονιού. Οι καινοτομίες αυτές απέτυχαν, γιατί απέβησαν σε βάρος του ηχοχρώματος και της ευελιξίας των οργάνων. Η τελική λύση δόθηκε γύρω στο 1815 με την επινόηση του *συστήματος των βαλβίδων* που έδωσε τη δυνατότητα στα χάλκινα πνευστά να παίζουν όλες τις νότες της χρωματικής κλίμακας.

1.3.2 Σύστημα βαλβίδων

Πριν αναλύσουμε το σύστημα των βαλβίδων πρέπει να αναφέρουμε ότι τα έμβολα στις βαλβίδες ταιριάζουν ακριβώς στους κυλίνδρους έτσι ώστε να μην μπορεί να υπάρχει διαρροή αέρα μέσω αυτών. Κάθε διαρροή θα είχε το ίδιο ατυχές αποτέλεσμα στους συντονισμούς, όπως ακριβώς λειτουργούν οι διαρροές αέρα και στα ξύλινα, κάνοντας το όργανο ασταθές και μη λειτουργικό.

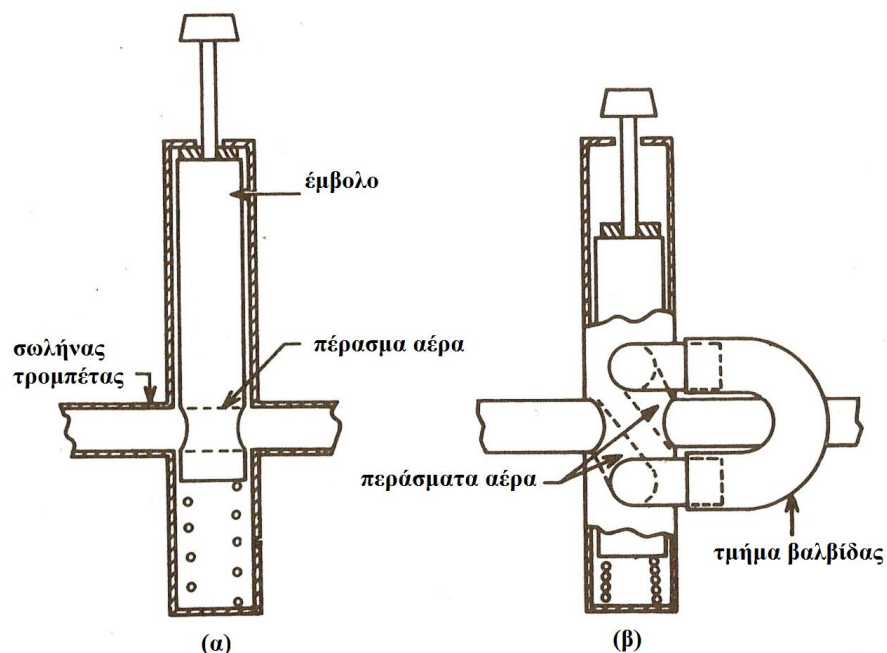
Στην τρομπέτα χρησιμοποιούνται τρεις βαλβίδες. Στην σειρά που συνηθίζεται (μετράμε από το τέλος του χείλους προς την καμπάνα), η δεύτερη βαλβίδα αντιστοιχεί σε ένα πρόσθετο κομμάτι σωλήνα που μετατοπίζει την συχνότητα προς τα κάτω κατά ένα ημιτόνιο. Η πρώτη βαλβίδα μετατοπίζει την συχνότητα προς τα κάτω κατά δύο ολόκληρα ημιτόνια, έναν τόνο δηλαδή. Ο συνδυασμός της βαλβίδας 1 και 2 δίνει μία μετατόπιση τριών ημιτόνων, ενός διαστήματος μικρής τρίτης δηλαδή. Η τρίτη βαλβίδα δίνει επίσης μετατόπιση τριών ημιτονίων, έτσι ο συνδυασμός των βαλβίδων 2 και 3 δίνουν μετατόπιση τεσσάρων ημιτονίων, ο συνδυασμός των 1 και 3

δίνουν μετατόπιση πέντε ημιτονίων, ενώ και οι τρεις βαλβίδες μαζί δίνουν έξι ημιτόνια.

Υπάρχει μια θεμελιώδης δυσκολία με την διάταξη του πρόσθετου μήκους σωλήνα μέσα από συνδυασμό των βαλβίδων, που διακρίνεται αμέσως. Αν η πρώτη και η δεύτερη βαλβίδα προσθέτει η κάθε μια πρόσθετο μήκος σωλήνα στο σωστό μήκος, ώστε να χαμηλώνουμε την τονικότητα κατά έναν τόνο και κατά τρία ημιτόνια αντίστοιχα, οι δύο βαλβίδες μαζί θα προσθέσουν ένα μήκος μικρότερο από το απαιτούμενο και έτσι θα χαμηλώσει η συχνότητα κατά τρία ημιτόνια μόνο. Αυτό μπορούμε να το δούμε και από την εικόνα 3 από τις θέσεις παιξίματος στο τρομπόνι. Από την στιγμή όπου κάθε επιτυχή επιμήκυνση του σωλήνα είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη, το ποσό των διαφορετικών κουρδισμάτων που χρειάζεται για να αλλάξουμε τον τόνο σε απόσταση ενός ημιτονίου, από την τρίτη στην τέταρτη θέση και από την πρώτη στην δεύτερη θέση, θα είναι διαφορετικό. Με άλλα λόγια η πρώτη βαλβίδα πρέπει να προσθέτει μήκος σωλήνα όσο για να πάμε από την πρώτη στην δεύτερη θέση στο τρομπόνι, αλλά ταυτόχρονα και όσο μήκος σωλήνα χρειάζεται για να πάμε από την τρίτη στην τέταρτη. Δυστυχώς αυτά είναι δύο διαφορετικά μεγέθη.

Την λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορούμε να την βρούμε αν αναφερθούμε σε πραγματικά νούμερα. Η τρομπέτα έχει περίπου 137 εκατοστά (54 ίντσες) μήκος. Είναι το ίδιο σε μήκος με έναν ανοιχτό σωλήνα χωρίς επιστόμιο και καμπάνα που μας δίνει τον πρώτο αξιοποιήσιμο συντονισμό στην Bb₃— είναι περίπου 148 εκατοστά (58.3 ίντσες). Για να χαμηλώσουμε τον τόνο κατά ένα ημιτόνιο χρειάζεται να διαιρέσουμε την συχνότητα με τον σταθερό όρο 1.05946. Μπορούμε να κάνουμε το ίδιο επίσης πολλαπλασιάζοντας το ισοδύναμο μήκος της αέριας στήλης με τον ίδιο σταθερό όρο, ποσό που μας δίνει μια αύξηση του μήκους κατά 5.946%, η στο περίπου στο 6%. Έπειτα, για να χαμηλώσουμε την τονικότητα της τρομπέτας κατά ένα ημιτόνιο πρέπει να την κάνουμε πιο μακριά κατά περίπου 6% των 148 εκατοστών, δηλαδή 8.8 εκατοστά επιπλέον που τα προσθέτει η δεύτερη βαλβίδα. Αυτό ισούται με νέο μήκος τρομπέτας τα 156.8 εκατοστά. Για να πέσουμε άλλο ένα ημιτόνιο χρειαζόμαστε άλλο ένα 6% του μήκους της τρομπέτας, δηλαδή άλλα 9.3 εκατοστά. Η νέα βαλβίδα πρέπει να προσθέσει τώρα 8.8 και 9.3 = 18.1 εκατοστά για να κατέβουμε κατά δύο ημιτόνια. Το ισοδύναμο μήκος γίνεται τώρα 148 + 18.1 = 166.1 εκατοστά. Το επόμενο μας βήμα θα χρειαζόταν άλλα 6% του συνολικού μήκους ή 9.9 εκατοστά, αλλά η δεύτερη βαλβίδα προσθέτει μόνο 8.8 εκατοστά, έτσι ο

συνδυασμός των βαλβίδων 1 και 2 είναι 1.1 εκατοστά κοντύτερος από το ποσό που χρειάζεται για να χαμηλώσουμε την τονικότητα κατά μια μικρή τρίτη.



Εικόνα 2 – Η δομή της βαλβίδας της τρομπέτας. (α) Έμβολο επάνω (β) Έμβολο κάτω

Την ίδια ασυμφωνία θα συναντήσουμε προφανώς όταν η τρίτη βαλβίδα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τις άλλες. Από την στιγμή που τα ζητούμενα μήκη είναι συνέπεια μιας ακολουθίας αριθμών που εμπλέκονται σε ποσοστά επί της εκατό, το ίδιο πρόβλημα θα υπάρχει σε όλα τα χάλκινα πνευστά που χρησιμοποιούν βαλβίδες σε συνδυασμό. Διάφορα συστήματα βαλβίδων έχουν εφευρεθεί στο παρελθόν για να λύσουν αυτό το πρόβλημα. Αυτά τα συστήματα είχαν πολύπλοκες μηχανικές διατάξεις, όπου πατώντας δυο βαλβίδες μαζί προστίθεται και ένα επιπλέον τμήμα μήκους, περισσότερο δηλαδή από το άθροισμα των δυο βαλβίδων ξεχωριστά. Σήμερα τέτοιες διατάξεις δεν χρησιμοποιούνται τουλάχιστον σε ευρεία χρήση.

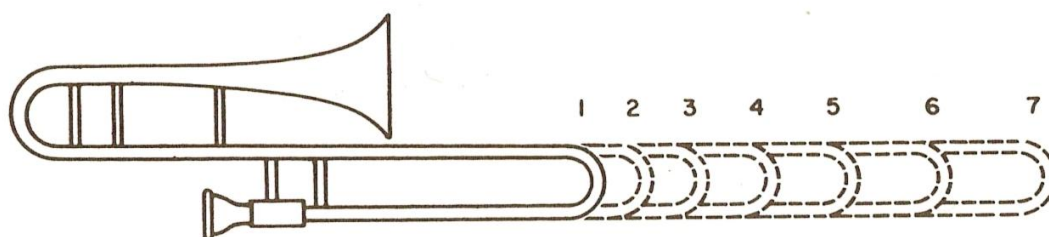
Στην πράξη, πάντως, συμβιβασμοί πρέπει να γίνουν για να ελαχιστοποιήσουμε τις ασυμφωνίες που παράγονται λόγω του συστήματος των βαλβίδων. Τα τμήματα των βαλβίδων (βλέπε εικόνα 2, στα δεξιά) για τις βαλβίδες 1 και 2 μπορούν να ρυθμιστούν ελαφρώς μακρύτερα από ότι θα έπρεπε κι έτσι τα δύο πρώτα ημιτόνια θα ήταν κατά πολύ λίγο ξεκούρδιστα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ακριβώς επειδή και το τρίτο ημιτόνιο θα ηχήσει ελαφρώς πιο κουρδισμένο, πολύ καλύτερα πάντως από το αν ήταν σωστά κουρδισμένα τα δυο πρώτα ημιτόνια. Παρόμοια, το τμήμα της τρίτης βαλβίδας μπορεί να ρυθμιστεί για να μας δίνει λίγο

παραπάνω από διάστημα τριών ημιτονίων, έτσι ώστε όταν χρησιμοποιηθεί μαζί με τις άλλες βαλβίδες να ακουστεί σχεδόν σωστά. Διάφοροι τρόποι κουρδίσματος έχουν προταθεί για το καλύτερο ακουστικό αποτέλεσμα.

Η ασυμφωνία είναι χειρότερη για τον συνδυασμό και των τριών βαλβίδων μαζί, όπως μπορεί κανείς να υποθέσει από την αριθμητική. Γι' αυτόν τον λόγο η μοντέρνα τρομπέτα μας δίνει την δυνατότητα να κουνάμε τα κομμάτια της τρίτης βαλβίδας με το αριστερό μικρό μας δάχτυλο, ενώ παίζουμε το όργανο (εικόνα 1, στο παράρτημα Α, ακριβώς δεξιά από τις βαλβίδες). Με το να επιμηκύνουμε το κομμάτι αυτό, όταν πατάμε όλες τις βαλβίδες μαζί, η ασυμφωνία αυτή θα αφαιρεθεί.

Για τα μικρότερα χάλκινα όργανα, τα προβλήματα με το σύστημα των βαλβίδων δεν είναι τόσο σημαντικά και ο οργανοπαίχτης μπορεί να τα εξουδετερώνει από τη στιγμή που τα χείλη του έχουν κομμάτι του ελέγχου των ηχούμενων συντονισμών του συστήματος. Στην τρομπέτα για παράδειγμα η παιζόμενη συχνότητα μπορεί να διαφέρει σε ένα εύρος των $\frac{3}{4}$ του ημιτονίου— 40 με 50 cents κάτω από το κανονικό παίξιμο έως και 30 και 40 cents επάνω. Μολαταύτα, ο τόνος παρεκκλίνει τονικά εάν η διόρθωση είναι υπερβολική, γι αυτό είναι καλύτερο να έχουμε το όργανο εξ αρχής σωστά κουρδισμένο. Οι λεπτομερείς ακουστικές εξηγήσεις για τον έλεγχο της παιζόμενης από τα χείλη συχνότητας είναι ακόμα υπό μελέτη.

Ο έλεγχος από τα χείλη είναι επίσης σημαντικός για την αντιστάθμιση των προβλημάτων που προκύπτουν στον μουσικό τονισμό από την αλλαγή της θερμοκρασίας στην αέρια στήλη.

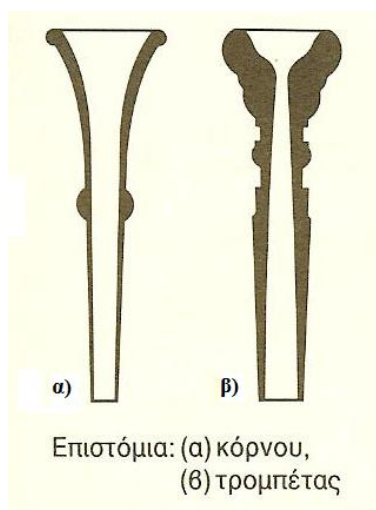


Εικόνα 3: Θέσεις παιζίματος στο τρομπόνι

1.3.3 Επίδραση του επιστομίου

Το επιστόμιο αποτελείται από ένα μικρό κύπελλο όπου τα χείλη προσαρμίζονται στην άκρη του. Το κύπελλο αυτό συνδέεται με ένα σωλήνα που σταδιακά μικραίνει η διάμετρος του σε σχέση με το υπόλοιπο όργανο. Στην εικόνα 4 μπορούμε να διακρίνουμε επιστόμια από δύο χάλκινα πνευστά.

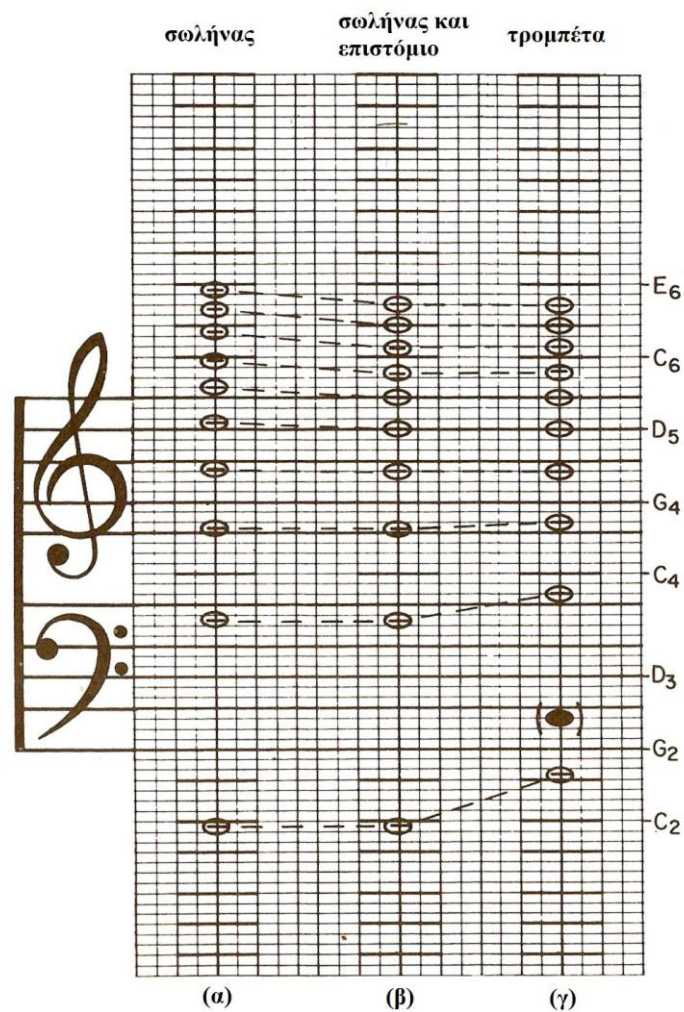
Αν το επιστόμιο προσαρτηθεί στον σωλήνα του οργάνου που επιθυμούμε και το κύπελλο θεωρείται κλειστό από τα χείλη, τότε ο σωλήνας θα έχει επιμηκυνθεί δραστικά. Για χαμηλές συχνότητες, όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι μεγάλο, το επιστόμιο δρα σαν ένα επιπλέον κομμάτι του σωλήνα του οργάνου και μάλιστα να είχε και τον ίδιο όγκο, πράγμα που δεν ισχύει. Για παράδειγμα, ένα δοσμένο επιστόμιο μετρήθηκε και βρέθηκε ότι έχει όγκο 6.5 κυβικά εκατοστά. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα σωλήνα με μήκος 5.7 εκατοστά και εσωτερική διάμετρο 1.2 εκατοστά. Έτσι, αν κόψουμε 5.7 εκατοστά από έναν σωλήνα και προσθέσουμε το επιστόμιο στο οποίο αναφερόμαστε, ο χαμηλότερος συντονισμός δεν θα αλλάξει.



Εικόνα 4: Επιστόμιο του κόρνου (αριστερά) και της τρομπέτας (δεξιά)

Οι υψηλοί συντονισμοί, όμως, δεν θα μείνουν अपαράλλαχτοι κατά την είσοδο του επιστομίου. Ο συνδυασμός του κυπέλλου (όταν είναι κλειστό από τα χείλη) και του σωλήνα είναι βασικά ένας συντονιστής *Helmholtz* (βλέπε παράρτημα Γ, ενότητα Β) κι έτσι έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Για το προαναφερθέν επιστόμιο, η συχνότητα συντονισμού μετρήθηκε στα 639 Hz, το ίδιο δηλαδή με αυτό για ένα κλειστό σωλήνα μήκους 13.5 εκατοστών. Γι' αυτό το λόγο σε αυτή την

συχνότητα το επιστόμιο προσθέτει πολύ στο μήκος του σωλήνα. Το γενικό αποτέλεσμα είναι ότι το επιστόμιο κάνει τον σωλήνα να μοιάζει μακρύτερος κατά ένα ποσό το οποίο μεγαλώνει, όσο μεγαλώνει και η συχνότητα. Σαν συνέπεια αυτού, ο κοντύτερος σωλήνας με την προσθήκη του επιστομίου έχει την ίδια συχνότητα συντονισμού με πριν, αλλά οι υψηλότεροι ιδιορυθμοί μετατοπίζονται σε χαμηλότερες από τις κανονικές τους τιμές. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο κέντρο της εικόνας 5. Το επιστόμιο έχει σπρώξει τους υψηλούς συντονισμούς εκεί όπου ανήκουν, από την PE5 και πάνω όπως δείχνουν και οι διακεκομμένες γραμμές στην εικόνα.

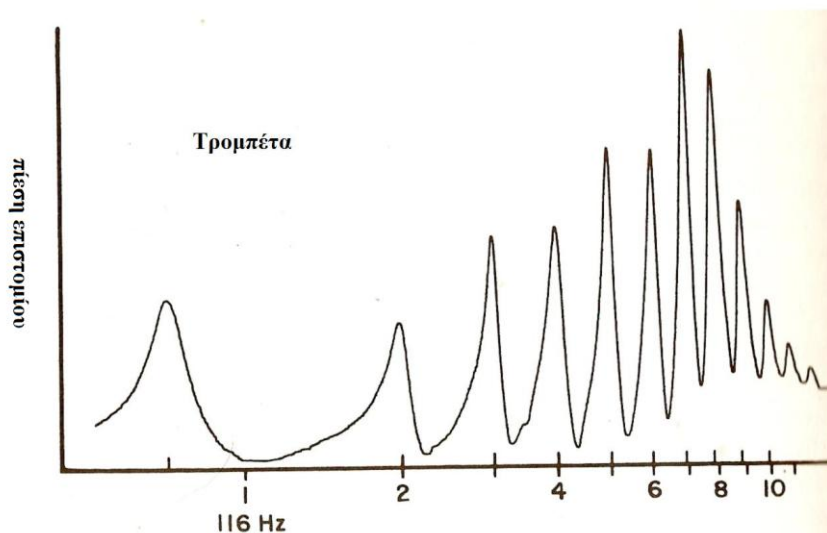


Εικόνα 5: Η εξέλιξη της τρομπέτας. (α) οι συντονισμοί σε απλό κλειστό σωλήνα (β) συντονισμοί σε σωλήνα με επιστόμιο (γ) συντονισμοί στην τρομπέτα

1.3.4 Επίδραση της καμπάνας

Το επόμενο βήμα είναι να ανεβάσουμε τους χαμηλότερους ιδιορυθμούς. Αυτό επιτυγχάνεται άμα αυξήσουμε τη διάμετρο του σωλήνα όσο πλησιάζουμε προς το ανοιχτό του άκρο, και έτσι να σχηματίσουμε τα γνωστά χαρακτηριστικά της καμπάνας των χάλκινων πνευστών. Η προσθήκη της καμπάνας αυξάνει τις συχνότητες για τους χαμηλούς συντονισμούς, ενώ αυτό ισχύει περισσότερο απ' όλους για τον χαμηλότερο συντονισμό. Αν ταυτόχρονα το συνολικό μήκος είναι σωστά προσαρμοσμένο, οι υψηλοί συντονισμοί θα μείνουν अपαράλλακτοι. Το πόσο ακριβώς θα αυξηθούν οι συχνότητες των χαμηλών συντονισμών θα εξαρτηθεί από τις λεπτομέρειες στο σχήμα της καμπάνας. Με σωστά σχεδιασμένο το επιστόμιο και την καμπάνα, οι συχνότητες των συντονισμών θα ταιριάζουν με αυτές που έχουμε συνηθίσει να ανήκουν στις τρομπέτες. Στην εικόνα 5 (γ) έχουν σχεδιαστεί οι συντονισμοί για μια πραγματική τρομπέτα. Τα στοιχεία αυτά τα αποκτήσαμε από τις συντονιστικές καμπύλες του οργάνου που προκύψαν από την μέθοδο της διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα (πληροφορίες για την μέθοδο αυτή δίνονται στο παράρτημα Γ.)

Οι συντονιστικές καμπύλες φαίνονται στην εικόνα 6. Ο δεύτερος, τρίτος, και οι υψηλότεροι ιδιορυθμοί βρίσκονται τώρα στα σωστά σημεία, σχηματίζοντας έγγιστα μια αρμονική σειρά. Οι συχνότητες τους είναι κοντά 2, 3, 4, κ.ο.κ φορές μια θεμελιώδη συχνότητα. Αυτή η θεμελιώδη συχνότητα δείχνεται από το μαύρο οβάλ που βρίσκεται εντός παρενθέσεων στη δεξιά στήλη (γ) της εικόνας 5. Ωστόσο, αυτό που μαρτυράει και η εικόνα 5 είναι ότι ο τόνος αυτός δεν υφίσταται ως πραγματικός ιδιορυθμός στην τρομπέτα. Θα αναφερόμαστε πλέον σε αυτήν ως εικονικό ιδιορυθμό. Ο χαμηλότερος πραγματικός ιδιορυθμός της τρομπέτας όπου μετακινήθηκε προς τα πάνω λόγω της καμπάνας (αλλά όχι πάρα πολύ) είναι παραπάνω από ένα διάστημα τετάρτης κάτω από τον εικονικό ιδιορυθμό, που συνηθίζουμε να περνάμε για τον χαμηλότερο συντονισμό.



Εικόνα 6: Καμπύλες συντονισμού για τρομπέτα, παραγόμενη με την μέθοδο διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα.

Είναι λάθος να νομίζουμε ότι η τρομπέτα είναι ένας σωλήνας ανοιχτός και στα δύο άκρα του, δίνοντας την θεμέλιο και τις αρμονικές της, και η θεμέλιος δεν χρησιμοποιείται, γιατί δίνει φτωχό ήχο. Βλέπουμε τουναντίον πως η πραγματική θεμέλιος της τρομπέτας –όπου είναι ο χαμηλότερος ιδιορυθμός– είναι πολύ ξεκούρδιστη σε σχέση με τους υπόλοιπους ιδιορυθμούς. Ο εικονικός ιδιορυθμός στην τρομπέτα δεν υφίσταντο σαν ιδιορυθμός του οργάνου, αλλά παράγεται ταλαντώνοντας τα χείλη μας στην κατάλληλη συχνότητα. Η παραγωγή του εικονικού ιδιορυθμού γίνεται με την βοήθεια του γεγονότος ότι οι αρμονικές του τόνου αυτού συμπίπτουν με τους υψηλότερους ιδιορυθμούς του οργάνου, ακόμα και αν η θεμέλιος δεν βρίσκεται κοντά σε κάποιον ιδιορυθμό. Με άλλα λόγια, η παρουσία του 2^{ου}, 3^{ου}, 4^{ου} κλπ αρμονικού, θα προκαλέσει ταλαντώσεις στην αέρια στήλη (και άρα και στο επιστόμιο) που θα επαναληφθούν στην θεμέλιο συχνότητα. Αυτό θα βοηθήσει τα χείλη να ταλαντωθούν σε αυτή την συχνότητα ακόμα κι αν η θεμέλιος δεν είναι παρούσα.

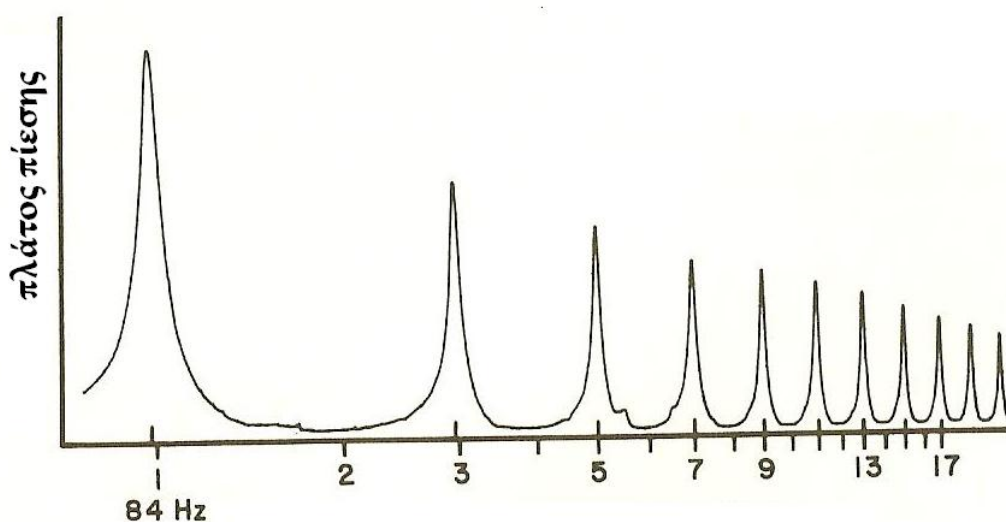
Η πρόσθεση της καμπάνας στην τρομπέτα μας δίνει ένα ακόμη αποτέλεσμα. Ο παραγόμενος τόνος είναι πολύ πιο δυνατός σε ένταση και πιο καθαρός σε ήχο από ότι αν παραγόταν από έναν κυλινδρικό σωλήνα χωρίς την καμπάνα. Υπάρχουν δύο λόγοι γι' αυτό. Πρώτον, βοηθείται η παραγωγή των αρμονικών του τόνου. Φανταστείτε, για παράδειγμα, ότι αν ηχήσουμε μια G3 σε έναν απλό σωλήνα μέσω του φουσίματος μας στην δεύτερη συχνότητα συντονισμού όπως φαίνεται στην εικόνα

5(α), οι αρμονικές της θα είναι οι G4, D5, G5, B5 κ.ο.κ. Από την ίδια εικόνα, όμως, βλέπουμε ότι εκτός από την D5, κανένας από τους αρμονικούς δεν βρίσκεται κοντά σε έναν συντονισμό. Έτσι η παραγωγή τους θα είναι φτωχή. Από την άλλη, στην εικόνα 5 (γ) οι αρμονικοί της Bb3, για παράδειγμα, συμπίπτουν με ιδιορυθμούς, έτσι θα παραχθούν σε ικανοποιητική ποσότητα. Δεύτερον, οι υψηλότεροι αρμονικοί θα ηχήσουν καλύτερα μέσω της καμπάνας παρά μέσω του απλού σωλήνα. Γνωρίζουμε πως το ηχητικό κύμα που ταξιδεύει κατά μήκος ενός σωλήνα αντανακλάται από το ανοιχτό άκρο. Αυτό ισχύει επίσης για την καμπάνα της τρομπέτας για ήχους με μεγάλα μήκη κύματος (μικρές συχνότητες). Ωστόσο, όταν ο ήχος γίνει αρκετά υψηλής συχνότητας, όπου το μήκος κύματος γίνει συγκρίσιμο με την περιφέρεια της καμπάνας, ξεκινά να ακτινοβολείται στο περιβάλλον αντί να αντανακλάται. Έτσι η καμπάνα ενός χάλκινου οργάνου αυξάνει την παραγωγή των αρμονικών και τους βοηθάει να ακτινοβοληθούν από το όργανο και έτσι αυξάνεται η ένταση του ήχου κατά την έξοδο (Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί, αν προσθέσουμε μια χοάνη στο τέλος ενός απλού σωλήνα. Τότε θα παραχθεί ένας πιο έντονος τόνος).

Οι καμπύλες συντονισμού για μια τρομπέτα, φαίνονται στην εικόνα 6. Για αυτές τις καμπύλες μια σχετική κλίμακα συχνοτήτων έχει σχεδιαστεί όσον αφορά την εικονική θεμέλιο συχνότητα των 116 Hz, και οι καμπύλες των συντονισμών έχουν σχεδιαστεί έτσι που ο δεύτερος συντονιστικός τρόπος να συμπίπτει με τον δεύτερο αρμονικό, στα 232 Hz. Οι θέσεις των συχνοτήτων συντονισμών φαίνονται στην ίδια εικόνα, και είναι στις κορυφές των καμπύλων. Οι αρμονικές μετά την δεύτερη, σχεδόν συμπίπτουν με την τρίτη, τέταρτη, πέμπτη κ.ο.κ αρμονική κι έτσι φτιάχνεται μια σειρά αρμονικών. Ο βαθμός στον οποίο οι συχνότητες των ιδιορυθμών συμπίπτουν με τις συχνότητες των αρμονικών είναι ένα κριτήριο για την ποιότητα του οργάνου.

Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε για τις καμπύλες συντονισμού (εικόνα 6) είναι ότι οι κορυφές των καμπύλων ανεβαίνουν σε ύψος πηγαίνοντας από τον δεύτερο αρμονικό προς τους επόμενους, μέχρι και τον έβδομο. Το αντίθετο συμβαίνει στις καμπύλες συντονισμού για έναν απλό σωλήνα, όπως βλέπουμε στην εικόνα 7. Για τον απλό σωλήνα, η πρώτη κορυφή είναι και η μεγαλύτερη και μετά ελαττώνονται με ομαλό τρόπο. Η υψηλότερη κορυφή για την τρομπέτα είναι η έβδομη, μετά από αυτήν γίνονται μικρότερες, και έως και αμελητέες μετά την δέκατη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αναφέρθηκε προηγουμένως. Για τον δέκατο συντονισμό, η συχνότητα

είναι γύρω στα 1170 Hz και αυτό αντιστοιχεί σε μήκος κύματος περίπου 30.48 εκατοστών, όσο και η διάμετρος της καμπάνας της τρομπέτας. Το κύμα σε αυτή την συχνότητα περισσότερο ακτινοβολείται παρά ανακλάται και έτσι δεν φτιάχνει ισχυρά στάσιμα κύματα και δεν δίνει μια έντονη κορυφή στην καμπύλη συντονισμού. Οι συχνότητες πάνω από 1400 Hz ανακλώνται πλήρως και δεν παρουσιάζουν καν κορυφές.



Εικόνα 7: καμπύλες συντονισμού για έναν απλό σωλήνα

Η αύξηση του ύψους των κορυφών των καμπύλων συντονισμού πηγαίνοντας από τον δεύτερο προς τον έβδομο συντονισμό οφείλεται στο επιστόμιο. Όπως έχει αναφερθεί, το επιστόμιο μπορεί να λειτουργήσει σαν *συντονιστής Helmholtz*, με μια συχνότητα συντονισμού γύρω στη συχνότητα του 6^{ου} ή του 7^{ου} ιδιορυθμού της τρομπέτας. Μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά (είναι πολύ εξεζητημένο για να το παραθέσουμε) ότι κοντά στην συχνότητα συντονισμού του επιστομίου και άμα αυτό έχει προστεθεί σε έναν σωλήνα, μεγαλώνει τα ύψη των κορυφών στις καμπύλες συντονισμών κατά έναν παράγοντα του 3 ή του 4. Αυτό ισχύει με την ύπαρξη καμπάνας και χωρίς. Η αύξηση του ύψους των κορυφών τα κάνει πιο εύκολα να ηχήσουν. Οι υψηλοί συντονισμοί είναι πιο δύσκολο να ηχήσουν σε απλό σωλήνα χωρίς το επιστόμιο. Από άποψη πρακτικότητας, το επιστόμιο συμβάλει στον διπλό ρόλο του να δίνει στο όργανο τον κατάλληλο τονισμό και να κάνει τις υψηλές νότες να ηχούν.

Μερικές φορές θεωρείται ότι τα χάλκινα όργανα έχουν μόνο ένα κούρδισμα. Είναι ένα λάθος συμπέρασμα το οποίο συνεπάγεται από την εφαρμογή της αρμονικής

σειράς που αφορά τις συχνότητες συντονισμού των χάλκινων οργάνων. Όπως είδαμε, η αρμονική σειρά δεν είναι απαραίτητα ακριβής. Από την στιγμή που οι συντονιστικοί ρυθμοί καταλαμβάνουν τις τελικές τους θέσεις αφού σχηματιστεί η καμπάνα, ένας σχηματισμός που δεν θα είναι εντελώς σωστός θα είχε ως αποτέλεσμα ασυμφωνίες στις θέσεις των συντονισμών. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει λόγος να θεωρούμε ότι υπάρχει ένας σχηματισμός που θα βάλει όλους τους συντονιστικούς ρυθμούς σε ακριβή αρμονική σειρά. Για να το κάνουμε συγκεκριμένο, παραθέτουμε μετρήσεις στους συντονισμούς μιας πραγματικής τρομπέτας. Αν το όργανο είχε κούρδιστεί σωστά, κάθε αρμονική θα ήταν πολλαπλάσια 2, 3, 4 κ.ο.κ φορές της συχνότητας του θεμέλιου. Κι όμως, οι μετρήσεις μαρτυράνε άλλα πράγματα. Αν ο δεύτερος αρμονικός ήταν ακριβώς διπλάσιος σε συχνότητα από τον θεμέλιο, τότε ο τρίτος και ο τέταρτος θα ήταν αισθητά ξεκούρδιστοι.

Τρίτος συντονισμός – 6μόρια

Τέταρτος συντονισμός – 25 μόρια

Πέμπτος συντονισμός – 34μόρια

Έκτος συντονισμός 16 μόρια

Έβδομος – 54 μόρια

Παραπάνω, βλέπουμε την απόκλιση των συντονισμών σε μόρια από ένα σωστό κούρδισμα. Αυτές οι αποκλίσεις πρέπει να διορθωθούν από τον οργανοπαίχτη. Έτσι είναι λάθος να πιστεύουμε ότι η τρομπέτα ή κάποιο άλλο χάλκινο όργανο αυτόματα παίζει σε σωστό κούρδισμα.

1.3.5 Μελέτη οργάνων

○ Η τρομπέτα

Κατά την πάροδο των χρόνων μια μεγάλη γκάμα από χάλκινα όργανα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Μερικά από αυτά είχαν πολύ περίεργη όψη. Τα περισσότερα στις μέρες μας θεωρούνται απαρχαιωμένα και σήμερα χρησιμοποιούνται κάποια σαφώς ορισμένα πρότυπα μοντέλα. Όλα τους είναι βασισμένα στις ακουστικές αρχές της τρομπέτας, με ένα επιστόμιο στο ένα άκρο και με μια καμπάνα στο άλλο άκρο, και όλα έχουν συχνότητες συντονισμού που πέρα από τον χαμηλότερο, ταιριάζουν στις αρμονικές σειρές.

Έχουμε ήδη περιγράψει τα βασικά ακουστικά γνωρίσματα της τρομπέτας. Έχει συνολικό μήκος στα 137 εκατοστά (54 ίντσες) και τμήματα του σωλήνα που μας επιτρέπει να κουρδίζουμε τις συχνότητες συντονισμού χωρίς την χρήση βαλβίδων. Οι τόνοι που μπορούν να παραχθούν χωρίς τη χρήση βαλβίδων ονομάζονται *ανοιχτοί τόνοι*. Η διάμετρος του κυρίως σωλήνα είναι περίπου 1.1 εκατοστά, λεπταίνοντας σταδιακά στα 0.9 εκατοστά στα τελευταία 12 με 24 εκατοστά από το επιστόμιο, και ανοίγει σε διάμετρο περίπου 11 εκατοστών στο τέλος της καμπάνας. Το όργανο αυτό έχει ένα αυστηρά κυλινδρικό τμήμα και ένα σχετικά μικρό τμήμα που ανοίγει η διάμετρος του. Η καμπάνα ξεκινάει λίγο μετά το τμήμα του σωλήνα που μας επιτρέπει να κουρδίζουμε, και καλύπτει το ένα τρίτο του συνολικού μήκους.

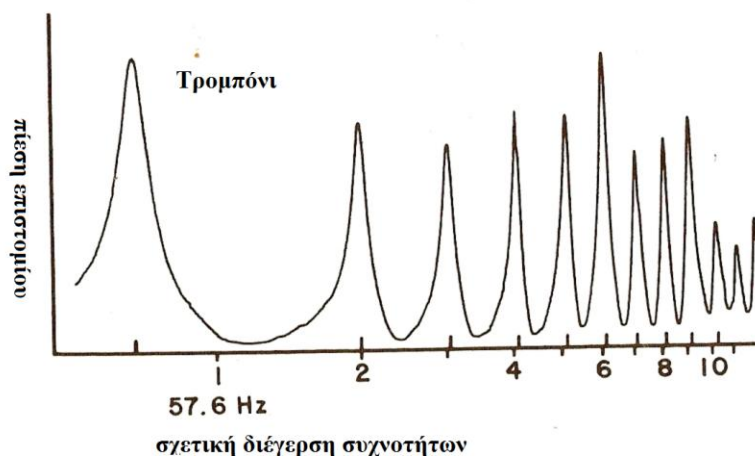
Η επικρατέστερη τρομπέτα είναι σε Bb, αλλά υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε άλλα μεγέθη που έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι τρομπέτες σε άλλα μεγέθη αξιοποιούνται σε υψηλές μουσικές κλίμακες, όπου τα κομμάτια της τρομπέτας απαιτούν μεγαλύτερη έκταση. Όλες οι τρομπέτες είναι όργανα μεταφοράς εκτός από την τρομπέτα σε C.

Η κορνέτα μοιάζει αρκετά με την τρομπέτα. Στο μεγαλύτερο του κομμάτι του σωλήνα, η διάμετρος του μεγαλώνει, και δεν μένει έτσι απλά κυλινδρικό. Έχει επίσης ένα επί πλέον τμήμα που αφαιρεί το συνολικό μήκος και δίνει μια διαφορετική εμφάνιση από αυτή της τρομπέτας, ο ήχος τους πάντως έχει μικρές διαφορές.

ο Το τρομπόνι

Όπως και η τρομπέτα, το τρομπόνι βγαίνει σε διάφορα μεγέθη. Το πιο σύνηθες για αυτό το όργανο είναι το τενόρο τρομπόνι σε Bb, ωστόσο, δεν θεωρείται όργανο μεταφοράς. Το μήκος του σωλήνα του τρομπονιού είναι το διπλάσιο από αυτό της τρομπέτας κι έτσι παίζει μια οκτάβα πιο κάτω. Η διάμετρος του σωλήνα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, περίπου 1.3 εκατοστά. Η καμπάνα καλύπτει το ένα τρίτο του συνολικού μήκους και ανοίγει σε διάμετρο στα τελευταία 16 με 20 εκατοστά από το επιστόμιο.

Το μπάσο τρομπόνι είναι μια πιο πολύπλοκη εκδοχή του οργάνου. Χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό μήκος του σωλήνα που μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα με την χρήση μιας απλής βαλβίδας η οποία χαμηλώνει την τονικότητα του οργάνου κατά το διάστημα μιας τέταρτης καθαρής (2 τόνοι και 1 ημιτόνιο). Σε αντίθεση με την επιμήκυνση της έκτασης του οργάνου προς τα κάτω, η διαθεσιμότητα της βαλβίδας κάνει πιο εύκολα να παιχτούν κάποια περάσματα, ενώ την ίδια στιγμή κάνει τα πράγματα πιο πολύπλοκα για τον οργανοπαίχτη, γιατί η πρόσθεση της βαλβίδας αλλάζει τις θέσεις παιξίματος.



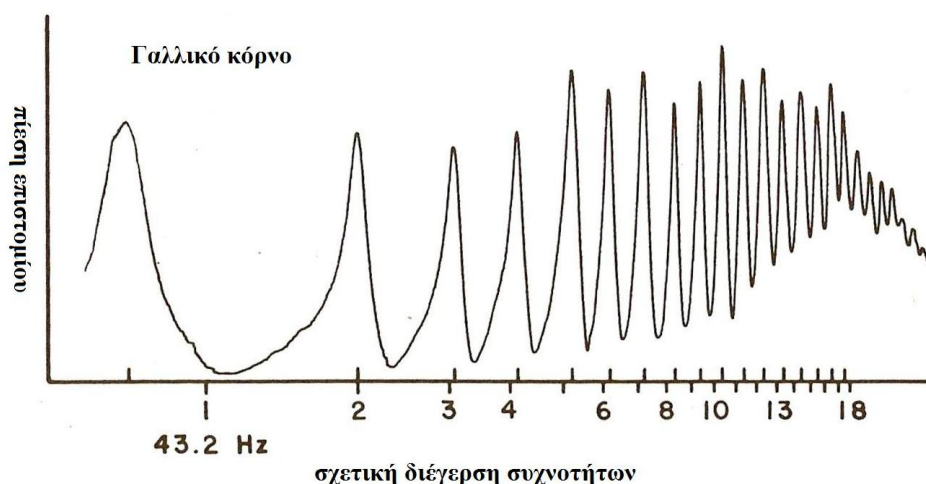
Εικόνα 8: Καμπύλες συντονισμού για το τρομπόνι

Η καμπύλες συντονισμού για το τρομπόνι φαίνονται στην εικόνα 8. Όπως και στην εικόνα 6 για την τρομπέτα, σχηματίστηκε μια σχετιζόμενη κλίμακα συχνοτήτων και ο δεύτερος ιδιορυθμός αντιστοιχεί σε διπλάσια συχνότητα από του θεμέλιου. Οι υψηλότεροι συντονισμοί σχεδόν συμπίπτουν με αντιστοιχία συχνοτήτων 3, 4, 5 κ.ο.κ φορές τη συχνότητα της θεμέλιου φτιάχνοντας έτσι μια αρμονική σειρά. Όπως και

στην περίπτωση της τρομπέτας, ο χαμηλότερος συντονισμός του τρομπονιού δεν ταιριάζει στην αρμονική σειρά, όντας αρκετά ξεκούρδιστος. Ο εικονικός συντονισμός στο τρομπόνι χρησιμοποιείται περισσότερο από ότι στην τρομπέτα και παράγεται με τον ίδιο τρόπο, ταλαντώνοντας δηλαδή τα χείλη στη θεμέλιο συχνότητα. Οι υψηλότερες αρμονικές του τόνου τότε ταιριάζουν με τις υψηλότερες συντονιστικές συχνότητες. Αυτό βοηθάει τα χείλη να παραμένουν στην θεμέλιο συχνότητα. Δείξαμε στην εικόνα 8 ότι οι κορυφές στους συντονισμούς μικραίνουν μετά τον ένατο συντονισμό, οπότε το τρομπόνι συνήθως δεν παίζει πέρα από αυτόν.

ο Το γαλλικό κόρνο

Το γαλλικό κόρνο βασίζεται στις ίδιες ακουστικές αρχές με τα άλλα χάλκινα πνευστά, αλλά έχει μια βασική διαφορά. Εκεί όπου η τρομπέτα και το τρομπόνι παίζουν περίπου μέχρι τον όγδοο ιδιορυθμό, στο κόρνο η αρμονική σειρά φτάνει μια οκτάβα πιο πάνω, μέχρι και τον 16^ο αρμονικό. Αυτό για να γίνει απαιτεί ότι οι υψηλοί ιδιορυθμοί πρέπει να παίζονται ξεκάθαρα και αποφασιστικά. Το σχήμα της αέρας στήλης στο κόρνο έχει αναπτυχθεί εμπειρικά για να είναι αυτό εφικτό. Ο σωλήνας είναι σε σχήμα μακριού κώνου με σταδιακή λέπτυνση της διαμέτρου του για περίπου τα δύο τρίτα του μήκους του, και έπειτα ανοίγει τη διάμετρο του απότομα σχηματίζοντας μια μεγάλη καμπάνα.



Εικόνα 9: Καμπύλες συντονισμού για το γαλλικό κόρνο

Οι καμπύλες συντονισμού για ένα F κόρνο φαίνονται στην εικόνα 9. Έχει περισσότερες κορυφές ιδιορυθμών από ότι το τρομπόνι, ο 15^{ος} αρμονικός αυτού του

οργάνου είναι ακόμα διακριτός. Από τον 17^ο όμως και πέρα οι κορυφές εξαφανίζονται απότομα λόγω της ακτινοβολίας τους από την καμπάνα.

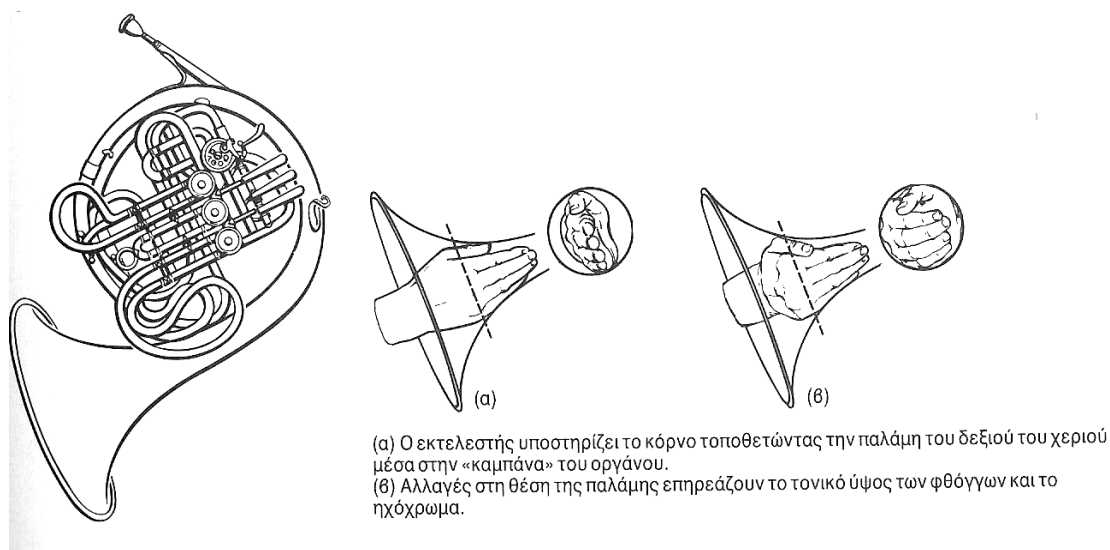
Το μήκος της αέριας στήλης του κόρνου είναι κάπως μεγαλύτερο από αυτό του τρομπονιού. Για να κρατήσει το φυσικό του μήκος σε λογικές διαστάσεις, το όργανο αυτό κουλουριάζεται κυκλικά. Το επιστόμιο του κόρνου διαφέρει από αυτό της τρομπέτας γιατί έχει πιο μεγάλο κύπελλο με πιο βαθμιαία μετάβαση στο πίσω μέρος του, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4 (β). Αυτό προφανώς συμβαίνει για να κάνουμε τις υψηλότερες κορυφές των συντονισμών πιο εύκολες να παιχτούν, παρ' όλο που η ακουστική θεωρία δεν το αποδεικνύει ακόμη. Αυτοί οι ισχυρισμοί είναι εικονογραφημένοι σε σχέδια που δείχνουν την αέρια στήλη να αποδεσμεύεται από το εσωτερικό του επιστομίου με πολλούς τρόπους και έτσι να δημιουργούνται διάφορες τονικές ιδιότητες. Κατά βάση όμως δεν έχουν νόημα και δεν πρέπει να παίρνονται στα σοβαρά.

Από τη στιγμή που το κόρνο παίζει σε ένα εύρος όπου οι συντονισμοί είναι κοντά μεταξύ τους, έχει πιο πολλές διαθέσιμες νότες και είναι πολύ ευέλικτο. Ωστόσο, δίνει και πάλι τις νότες που ανταποκρίνονται στους ιδιορυθμούς. Έτσι, όπως αρχικά χρησιμοποιήθηκε στην ορχήστρα, το μήκος του κόρνου επιλέχθηκε για να μας δίνει μια σειρά από συντονισμούς όπου οι συχνότητες τους ήταν στο κλειδί της μουσικής σύνθεσης που ερμήνευαν. Στην πράξη, αυτό έγινε εφικτό χρησιμοποιώντας απλά ένα κόρνο μαζί με εναλλακτικά κομμάτια που ονομάζονται *crooks* (μπαστούνια), τα οποία μπορούσαν να εισέλθουν στο σύστημα και να αλλάξουν το μήκος του οργάνου και να το βάλουν στο σωστό κλειδί. Αυτό συνήθως απαιτεί από τον οργανοπαίκτη να κουβαλάει πολλά κιλά από αυτά τα μπαστούνια για τις πρόβες και τις ηχογραφήσεις.

Επακολούθησε η ανακάλυψη ότι αν το κόρνο σχηματιζόταν έτσι όπου το χέρι να μπορούσε να τοποθετηθεί στην καμπάνα, η τονικότητα του οργάνου θα μπορούσε να μειωθεί σε ένα ποσό που εξαρτάται από το πόσο μακριά θα εισέλθει το χέρι. Βάζοντας το χέρι μέσα στο κόρνο, ελαττώνει την περιοχή που ταλαντώνεται η αέρια στήλη αλλά ταυτόχρονα αυξάνει τον ακουστικό όγκο στο τέλος της συντονισμένης αέριας στήλης και έτσι μειώνονται οι συχνότητες του συστήματος. Αυτή η τεχνική του κλεισίματος από το χέρι αναπτύχθηκε στο σημείο που η χρωματική κλίμακα μπορεί να παιχτεί σε κομμάτια του εύρους του οργάνου. Όπως και να 'χει, αυτή η

τεχνική διαφέρει σε ποιότητα από τις ανοιχτές νότες και επίσης χρειαζόταν τεράστια εξάσκηση για να αναπροσαρμόσει ο μουσικός το όργανο σε κάθε κλίμακα.

Η τοποθέτηση του χεριού στην καμπάνα έχει και ένα άλλο χρήσιμο αποτέλεσμα. Μειώνει την ακτινοβολία από τα υψηλής συχνότητας κύματα στην καμπάνα. Αντανακλώνται καλύτερα από την καμπάνα και φτιάχνουν ισχυρότερα στάσιμα κύματα σε υψηλές συχνότητες συντονισμού. Οι κορυφές των καμπύλων συντονισμού της εικόνας 8 παράχθηκαν με ένα ποσό πηλού που διαπλαθόταν κατάλληλα κάθε φορά εξομοιώνοντας έτσι την δράση του χεριού. Αν αφαιρεθεί ο πηλός, οι κορυφές των καμπύλων συντονισμού σταματάνε μετά τον 12^ο αρμονικό.



Εικόνα 10: Αριστερά βλέπουμε το κόρνο ενώ δεξιά στα (α) και (β) βλέπουμε τον ρόλο του χεριού στο όργανο.

Η ανάπτυξη των βαλβίδων και των εφαρμογών τους στο κόρνο διευκόλυνε τα προβλήματα του οργανοπαίκτη. Με την χρήση βαλβίδων, χρωματικοί τόνοι μπορούν να αποκομιστούν χωρίς να κλείνουμε την καμπάνα με το χέρι μας, και έγινε εφικτό να αλλάζουμε κλίμακες χωρίς την πρόσθεση των *crooks*. Η αρχή του να προσθέτουμε τμήματα σωλήνα είναι η ίδια όπως και στην τρομπέτα, ωστόσο οι βαλβίδες του κόρνου κατασκευάζονται διαφορετικά, βασισμένα στη λογική της περιστροφής τους και όχι της ολίσθησης ενός τμήματος σωλήνα.

Το κόρνο σε γενικές γραμμές αυτή την στιγμή θεωρείται διπλό όργανο, αφού λειτουργεί συνδυάζοντας ένα κόρνο σε F και ένα σε Bb. Το επιστόμιο και η καμπάνα εναλλάσσονται μέσω δυο ξεχωριστών διαύλων διαφορετικού μήκους μέσω μιας ξεχωριστής βαλβίδας που λειτουργεί με τον αντίχειρα. Οι τρεις βασικές βαλβίδες

έχουν δυο αέριους δρόμους και δύο σετ από μετακινούμενες βαλβίδες, μια για κάθε δίαυλο, έτσι ώστε οι τρεις βασικές βαλβίδες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα δυο κόρνα. Το μήκος του F κόρνου είναι περίπου 375 εκατοστά (148 ίντσες), 4/3 φορές το μήκος του τρομπονιού, έτσι ο πιο χαμηλός συντονισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μια τέταρτη κάτω από αυτή του τρομπονιού. Γενικά το F κόρνο χρησιμοποιείται για χαμηλές νότες ενώ το Bb για τις υψηλές. Εδώ δίνει περισσότερη σιγουριά στον οργανοπαίκτη που μπορεί να πιάσει τις νότες χωρίς να κινδυνεύει να παίξει το λάθος ιδιορυθμό. Το κόρνο συνήθως παίζεται με το ένα χέρι στην καμπάνα για έλεγχο της ποιότητας του τόνου και βοηθάει στον τονισμό των νοτών. Αφού αυτό χαμηλώνει την τονικότητα, αν το όργανο είναι κανονικά κουρδισμένο, οι κλειστές νότες θα είναι πιο κουρδισμένες από τις ανοιχτές.

Αν το χέρι φτάσει το βαθύτερο δυνατόν στην καμπάνα, ένας τόνος εντελώς διαφορετικής ποιότητας δημιουργείται και ονομάζεται stopped tone, δηλαδή σταματημένος τόνος. Η τονικότητα ξαφνικά ανεβαίνει κατά ένα ημιτόνιο όταν γίνεται αυτό και έτσι ο οργανοπαίκτης πρέπει να αλλάξει κλίμακα. Υπήρξε μεγάλη διαφωνία σχετικά με αυτή την άνοδο στην τονικότητα. Είναι απλό να σκεφτούμε— αλλά είναι λάθος— πως το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα επειδή μικρύνουμε την αέρια στήλη κατά την είσοδο του χεριού μέσα στο κόρνο.

Αυτό που συμβαίνει πραγματικά με την είσοδο του χεριού είναι μια προέκταση του αποτελέσματος που περιγράψαμε πιο πάνω. Ο ακουστικός όγκος στο τέλος του κόρνου αυξάνεται τόσο πολύ που οι συχνότητες όλων των ιδιορυθμών χαμηλώνουν κατά ένα ημιτόνιο της πραγματικής τους συχνότητας. Μια δοσμένη νότα παίζεται τότε στον επόμενο υψηλότερο ιδιορυθμό όταν σταματήσει το κόρνο, ο οποίος κανονικά χρησιμοποιείται για τη νότα έχοντας ξεκουρδιστεί. Αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί φυσώντας μια νότα στο κόρνο ενώ το χέρι σιγά – σιγά εισέρχεται στην θέση που παράγεται ο σταματημένος τόνος. Αν ο παίκτης προσπαθήσει να κρατήσει την τονικότητα με τα χείλη, ο συντονισμός σταδιακά πέφτει συχνοτικά μέχρι να φτάσει και στην τελική του συχνότητα η οποία βρίσκεται κάτω από την τιμή της πραγματικής του συχνότητας. Αν ο παίκτης προσπαθήσει να κρατήσει την τονικότητα, η νότα πηδάει αιφνίδια στον επόμενο συντονισμό καθώς εισέρχεται το χέρι, και καταλήγει υψηλότερα σε συχνότητα από την τιμή της πραγματικής του συχνότητας. Μια δοσμένη νότα σταματήματος είναι λοιπόν παιγμένη σε υψηλότερο ιδιορυθμό από ότι μια μη-σταματημένη νότα.

Άλλα όργανα

Διάφορα άλλα χάλκινα όργανα έχουν ανακαλυφθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα. Συμπεριλαμβάνονται όλα τους στις ακουστικές αρχές που προαναφερθήκαν. Η τούμπα είναι ένα λαμπρό παράδειγμα, καθώς έχει πολύ μακριά αέρια στήλη και παράγει πολύ χαμηλούς τόνους. Τα προβλήματα με τον συνδυασμό των βαλβίδων γίνονται αρκετά ενοχλητικά στα μεγαλύτερα όργανα: γι αυτόν τον λόγο μια τέταρτη βαλβίδα (και μερικές φορές και μια πέμπτη) συχνά προστίθεται στην τούμπα. Χαμηλώνει την τονικότητα κατά ένα διάστημα τετάρτης, όπως και η βαλβίδα στο μπάσο τρομπόνι, και έτσι αντικαθιστά τον συνδυασμό των βαλβίδων 1 και 3. Επίσης μεγαλώνει την έκταση του οργάνου προς τα κάτω.

Αν και τα περισσότερα χάλκινα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν θεωρούνται σήμερα απαρχαιωμένα, αξίζει να αναφερθούμε σε ένα από αυτά γιατί ήταν ακουστικά διαφορετικό, η οφικλείδα (ophicleide). Αυτό το όργανο ήταν υβριδικό. Φύσαγες με τα χείλη στο επιστόμιο αλλά το μήκος του σωλήνα άλλαζε από ανοιχτές οπές, όπως και στα ξύλινα πνευστά. Είχε τονικό εύρος πρακτικά το ίδιο με του μπάσους. Προφανώς δεν συνυπήρξε με τα υπόλοιπα πνευστά και τώρα απλά είναι ιστορικά αξιοπερίεργο.

1.3.6 Ισχύς και τονική ποιότητα

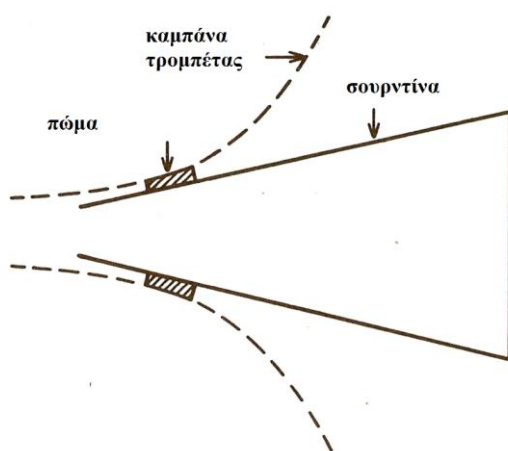
Τα χάλκινα όργανα είναι ικανά να παράγουν αξιοσημείωτη σε ισχύ ηχητική έξοδο. Το τρομπόνι για παράδειγμα μπορεί στιγμιαία να αναπτύξει πέντε Watt ακουστικής ισχύος, περισσότερο δηλαδή από οποιοδήποτε –μη κρουστό– όργανο. Αν παιχτεί fortissimo (πολύ δυνατά), το χάλκινο τμήμα μπορεί να υπερκαλύψει τα υπόλοιπα όργανα μιας συμφωνικής ορχήστρας. Αυτό δεν συμβαίνει γιατί ο οργανοπαίκτης μπορεί να βάλει περισσότερη ισχύ στα χάλκινα όργανα. Στην πραγματικότητα η ισχύς που ξοδεύεται δεν είναι και πολύ διαφορετική από αυτή των ξύλινων πνευστών. Επιπλέον, τα εσωτερικά στάσιμα κύματα που παράγονται στα χάλκινα δεν είναι πολύ διαφορετικά σε πλάτος από αυτά των ξύλινων. Μια τρομπέτα αν παιχτεί δυνατά, ας πούμε, θα αναπτύξει πίεση επιστομίου περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη του κλαρίνου. Αυτή είναι μια διαφορά μόνο κατά 6 dB. Οι ποιό

σημαντικές διαφορές στην ισχύ κατά την έξοδο του ήχου οφείλονται σε διαφορές κατά την ακτινοβολία του ήχου σε αυτές τις δυο κατηγορίες των πνευστών. Όπως εννοήθηκε, η καμπάνα ενός χάλκινου έχει μεγάλη περιοχή που επιτρέπει να ακτινοβολεί τον ήχο πιο αποτελεσματικά από ότι οι μικρές οπές των ξύλινων πνευστών.

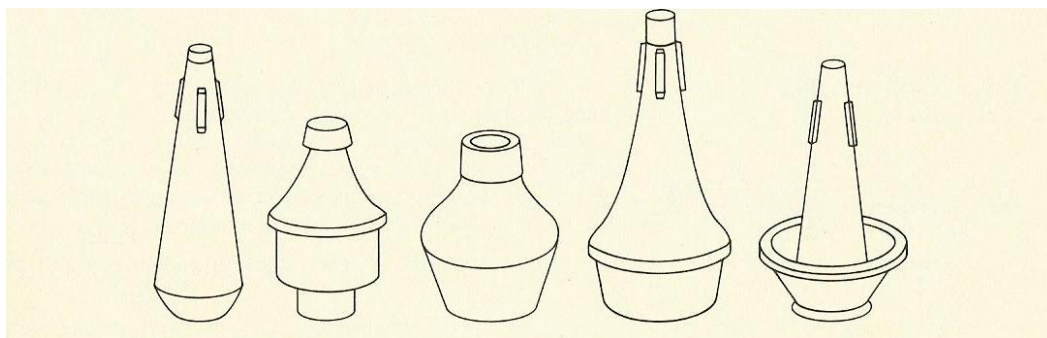
Ένα άλλο αποτέλεσμα την καμπάνας είναι ότι δίνει στα χάλκινα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας. Γνωρίζουμε ότι ο ήχος που εκπέμπεται από ένα άνοιγμα διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό ισχύει καθολικά αν το μήκος κύματος του ήχου είναι πολύ μεγαλύτερο από την διάμετρο της καμπάνας. Για την περίπτωση των ξύλινων, οι οπές είναι μικρές συγκριτικά με το μήκος κύματος οποιασδήποτε αρμονικής. Τα ξύλινα λοιπόν θα ακούγονται λίγο - πολύ το ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό θα ισχύει και για τους χαμηλά συχνοτικούς αρμονικούς των χάλκινων πνευστών, για τους οποίους το μήκος κύματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο της καμπάνας. Σε υψηλές συχνότητες, πάντως, όπου το μήκος κύματος γίνεται μικρότερο από την καμπάνα, φαινόμενα περίθλασης δεν θα συναντηθούν στα σοβαρά και ο αναδυόμενος ήχος θα είναι πολύ πιο συγκεντρωμένος διαμέσου των αξόνων του οργάνου. Αυτό σημαίνει ότι η τρομπέτα θα ακουστεί διαφορετικά, όταν την ακούμε από την μεριά που σημαδεύει το όργανο παρά από μια άλλη πλευρά. Ο οξύς ήχος της τρομπέτας στην συμφωνική ορχήστρα οφείλεται έως ένα βαθμό στο ότι τα όργανα σημαδεύουν προς το κοινό, αν και οι πιο μαλακοί ήχοι των κόρνων υπάρχουν επειδή τα όργανα σημαδεύουν προς την άλλη πλευρά, έτσι ώστε οι υψηλές αρμονικές να μην φθάσουν κατευθείαν στο κοινό. Οι παίκτες του κόρνου συχνά παραπονιούνται (και δικαιολογημένα) γιατί πρέπει να παίζουν στο πίσω μέρος της σκηνης με τα όργανα τους να στραμμένα προς τις κουρτίνες στο βάθος που απορροφά τον περισσότερο ήχο.

Ο παράγοντας ότι όλος ο ήχος βγαίνει από την καμπάνα κάνει εφικτή την χρήση *σουρντίνων* στα χάλκινα πνευστά. Οι *σουρντίνες* είναι βαθουλωτές συσκευές που εισέρχονται στην καμπάνα. Έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με διάφορα σχέδια. Μια απλή διάταξη *σουρντίνας* φαίνεται στην εικόνα 11. Υπάρχουν και άλλες ποικιλίες, αλλά η συμπεριφορά τους είναι παρόμοια. Η *σουρντίνα* στην εικόνα 11 δεν μπαίνει ολόκληρη στην καμπάνα. Κρατιέται μακριά από την καμπάνα μέσω πωμάτων που κρατάνε την σουρντίνα κοντά, αλλά αφήνουν τον αέρα να περνά μεταξύ του κενού μεταξύ των πωμάτων.

Η σουρντίνα στην εικόνα 11 είναι πάλι ένας συντονιστής *Helmholtz*. Ως τέτοιος προσθέτει άλλη μια κορυφή του στις καμπύλες συντονισμού του οργάνου στο οποίο τοποθετείται, και είναι σημαντικό πως αυτή η προστιθέμενη κορυφή είναι κάτω από την έκταση του οργάνου, αλλιώς ο μουσικός τονισμός θα ήταν εντελώς διαταραγμένος. Στην σωστή θέση, το ελάχιστο κενό μεταξύ της σουρντίνας και των κενών της καμπάνας χαμηλώνει περισσότερο την ακτινοβολία των χαμηλών συχνοτήτων σε σύγκριση με τις υψηλές. Αυτό αλλάζει την ποιότητα του ακτινοβολούμενου ήχου, μετατρέποντας τον σε ήχο μικρότερης έντασης αλλά ταυτόχρονα «ριγμένης» ποιότητας. Διάφορα είδη σουρντίνας παρουσιάζονται στην εικόνα 12.



Εικόνα 11: Διάταξη για σουρντίνα απλού τύπου

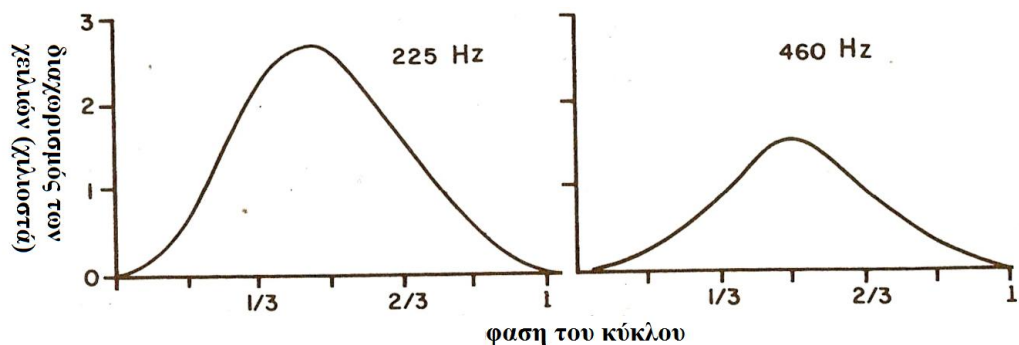


Εικόνα 12: Διάφορα είδη σουρντίνας

Η πηγή των αρμονικών στους τόνους των χάλκινων πνευστών δεν είναι τόσο προφανής όσο στα άλλα πνευστά. Στο κλαρίνο, το άνοιγμα και το κλείσιμο της γλωττίδας οδηγεί σε ριπές αέρα του αέρα, λόγω αυτού σχηματίζεται μια περιοδική ροή του αέρα με έναν σημαντικό αριθμό αρμονικών να παράγουν συντονισμούς στην αέρια στήλη. Τα χάλκινα πνευστά δεν συμπεριφέρονται κατ' αυτό τον τρόπο. Έχει

γίνει μελέτη της κίνηση των χειλιών όταν παίζουν τρομπέτα. Με την χρήση ενός διαφανούς επιστόμιου, τα δονούμενα χείλη μπορούν να φωτογραφίζονται διαρκώς σε ένα φιλμ. Αναλύοντας αυτές τις εικόνες βλέπουμε πως αντί για ομαλό άνοιγμα και κλείσιμο των χειλιών, αυτά κινούνται με σχεδόν ημιτονοειδή τρόπο (βλέπε εικόνα 13). Έτσι, τα χείλη δεν κινούνται με έναν τρόπο ώστε να γίνονται απότομες ριπές αέρα στο επιστόμιο. Ωστόσο, η πίεση μέσα στο επιστόμιο απέχει πολύ απ' το να την χαρακτηρίσουμε ημιτονοειδή. Κατά το περισσότερο του κύκλου ταλάντωσης, τα χείλη είναι ανοιχτά αρκετά πολύ ώστε η πίεση στο επιστόμιο είναι περίπου η ίδια με την πίεση στο στόμα του οργανοπαίκτη. Όμως, κατά το μικρότερο κομμάτι του κύκλου ταλάντωσης τα χείλη είναι κλειστά ή πολύ κοντά, και ο αέρας που διαχέεται από τα χείλη σταματάει στιγμιαία. Κατά αυτή τη διάρκεια του κύκλου η πίεση στο επιστόμιο πέφτει σε αισθητά χαμηλότερα επίπεδα. Η πίεση στο επιστόμιο έχει μια κυματομορφή με αιχμηρή κορυφή με μεγάλο αριθμό αρμονικών. Τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται στο όργανο επίσης περιέχουν αρμονικούς που δίνουν την χαρακτηριστική ποιότητα στον ακτινοβολούμενο ήχο.

Το υλικό από το οποίο φτιάχνονται τα χάλκινα πνευστά θεωρείται γενικά ότι επηρεάζει την ποιότητα του ήχου. Στην πραγματικότητα ο όρος «αυστηρά χάλκινος» υποδεικνύει τονική ποιότητα. Όπως και να 'χει οι απόψεις σε αυτό το θέμα –ως συνήθως– δίστανται. Ένας ερευνητής έφτιαξε μια τρομπέτα από ξύλο, σύμφωνα με την αναφορά του, και ο ήχος του έμοιαζε τόσο πολύ με ήχο κανονικής τρομπέτας που μόνο βλέποντας τις τρομπέτες μπορούσε κανείς να ξεχωρίσει ποιά είναι ποιά. Από την άλλη άκρη, ένας άλλος ερευνητής έφτιαξε μια τρομπέτα από χαρτί και ανέφερε ότι ο ήχος του ακουγόταν «αυστηρά χάρτινος».



Εικόνα 13: Κίνηση των χειλιών κατά την διάρκεια ενός κύκλου μιας δόνησης για δυο διαφορετικές νότες σε τρομπέτα

Θα έπρεπε να περιμένουμε οι ίδιοι παράγοντες να εφαρμόζουν και στα χάλκινα και στα ξύλινα πνευστά. Όταν το όργανο ηχεί, νιώθεις τους τοίχους να δονούνται. Ωστόσο, δεν θα έπρεπε να περιμένουμε ότι θα ακτινοβοληθεί τόσος πολύς ήχος που θα επηρεάσει την ποιότητα από τον ακτινοβολούμενο από το όργανο ήχο, ή να δονούνται επαρκώς για να επηρεάσουν το εσωτερικό στάσιμο κύμα. Έτσι λοιπόν, δεν περιμένουμε ότι τα υλικά θα έχουν κάποια σοβαρή επίδραση στον τόνο. Πειράματα στο κορνέτο καταλήγουν στο εξής συμπέρασμα: Η επικάλυψη του οργάνου με στόκο δεν άλλαξε την ποιότητα του ήχου. Από την στιγμή που μια τέτοια επικάλυψη θα σταματούσε τις δονήσεις από τον τοίχο, συμπεραίνουμε (τουλάχιστον γι' αυτό το όργανο) πως οι δονήσεις δεν είναι σημαντικός παράγοντας.

1.4 Η κίνηση των χειλιών κατά το πολύ δυνατό παίξιμο στα χάλκινα

Ένα χαρακτηριστικό των ορχηστρικών χάλκινων πνευστών είναι ότι το ηχόχρωμα δηλαδή το πλήθος των αρμονικών εξαρτάται έντονα από την ένταση με την οποία παίζουμε. Σε πολύ έντονα επίπεδα, ο ήχος γίνεται πιο «αυστηρά χάλκινος». Αυτό το αποτέλεσμα συμβαίνει λόγω μιας αξιοπρόσεχτης αύξησης της ενέργειας των υψηλότερων αρμονικών. Οι παίκτες χάλκινων πνευστών κάποιες φορές χρησιμοποιούν την αλλαγή αυτή του ηχοχρώματος σαν μορφή μουσικής έκφρασης. Είναι ενδιαφέρον να τονίσουμε ότι αυτό το αποτέλεσμα κυριαρχεί περισσότερο σε κάποια όργανα απ' ό,τι σε κάποια άλλα. Για παράδειγμα στο τρομπόνι ισχύει περισσότερο απ' ό,τι στο ευφώνιο.

Έχουμε ήδη αναφερθεί στον τρόπο με τον οποίο παράγεται ο ήχος στα χάλκινα πνευστά. Όμως σε αυτό το σημείο θα ασχοληθούμε με μια πρόσφατη μελέτη κατά την οποία, χάλκινα όργανα παίζονται σε μεγάλη ένταση και θα εξετάσουμε την σχέση μεταξύ της αλλαγής στην κίνηση των χειλιών και της παραγωγής του «αυστηρά χάλκινου» ήχου.

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι το σύστημα (regime) των χάλκινων πνευστών είναι κυρίως αποτέλεσμα της μη-γραμμικής διάδοσης της ακουστικής κυματομορφής σε όλο το εσωτερικό του οργάνου. Όταν ταλαντώσεις με μεγάλο πλάτος πίεσης παραχθούν από τα χείλη, το μπροστινό άκρο του κύματος πίεσης γίνεται πιο απότομο όσο προχωράει στο εσωτερικό του οργάνου. Αν η αέρια στήλη του οργάνου είναι ιδιαίτερα μακριά –και το πλάτος των ταλαντώσεων αρκετά μεγάλο– τότε η άνοδος της πίεσης γίνεται σχεδόν στιγμιαία. Αυτή η απότομη αντίδραση κάνει και τις αρμονικές του παραγόμενου τόνου να αυξάνονται.

Έχει επίσης προταθεί από κάποιους ερευνητές πως ο βαθμός με τον οποίο μπορούν τα χείλη να ανοίγουν γίνεται «κορεσμένος» κατά τη διάρκεια πολύ δυνατού παιξίματος όσο η κίνηση των χειλιών καθορίζεται αναγκαστικά από το δαχτυλίδι του επιστομίου (το πάνω μέρος, εκεί που ακουμπάμε τα χείλη). Αυτό το αποτέλεσμα συμβάλει σίγουρα στην δημιουργία του «αυστηρά χάλκινου» ήχου. Ένας ερευνητής (D.W.Martin) έκανε κάποιες μετρήσεις με τις οποίες έδειξε ότι κατά το mezzo forte (μέση – μεγάλη ένταση) παίξιμο στο κορνέτο, η μεταβολή της ανοιχτής περιοχής μεταξύ των χειλιών ήταν σχεδόν ημιτονοειδής. Άλλες μελέτες, που χρησιμοποιήθηκε

το τρομπόνι, έδειξαν ότι η ανοιχτή περιοχή μεταξύ των χειλιών δεν έχει εντελώς ημιτονοειδή συμπεριφορά. Στην πραγματικότητα, η φάση κατά την οποία τα χείλη κλείνουν διήρησε περισσότερο από την φάση κατά την οποία ανοίγουν. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν πιο ισχυρό σε παίξιμο μεγαλύτερης έντασης.

Πειραματική μέθοδος

Τρεις έμπειροι μουσικοί με πολυετή πείρα κλήθηκαν να παίξουν ζευγάρια από νότες της ίδιας τονικότητας αλλά διαφορετικής έντασης. Μια φορά με εντελώς «αυστηρά χάλκινο» ήχο (αν και όχι στο όριο της ακουστότητας) και την άλλη, σε κανονική ένταση. Σε απόσταση όσο η διάμετρος της καμπάνας του οργάνου τοποθετήθηκε ένα μικρόφωνο Briel and Kjaer 4192. Μια διάταξη μετατροπής πίεσης A PCM 106B εισήχθη στο εσωτερικό του επιστομίου για να συλλάβει την κυματομορφή της πίεσης κατά την είσοδο του οργάνου.

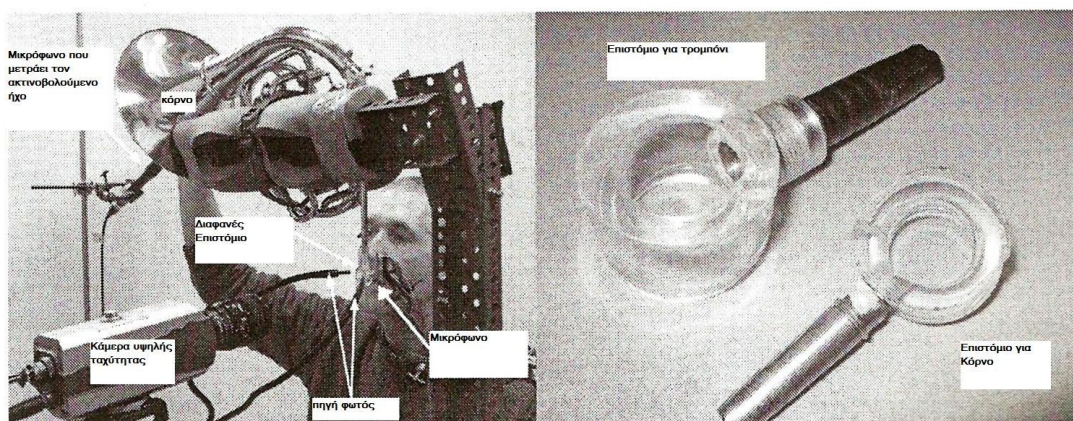
Η διάταξη του πειράματος φαίνεται στην εικόνα 14. Κατά την ηχογράφιση, ζητήθηκε από τους μουσικούς να τοποθετήσουν το χέρι τους στην καμπάνα του οργάνου όπως θα γινόταν κανονικά σε ορχηστρικό παίξιμο. Το χέρι τους θα έπρεπε να είναι στην ίδια θέση και για τους δύο τρόπους παιξίματος (forte και mezzo forte).

Για να έχουμε οπτική επαφή με τα χείλη, χρησιμοποιήθηκαν διάφανα επιστόμια (εικόνα 14 – στα δεξιά) . Οι ιδιότητες των επιστομίων ήταν ίδιες με αυτές των κανονικών επιστομίων και για να έχουμε τα σωστά αποτελέσματα και για να μπορούν οι οργανοπαίχτες να παίζουν όπως θα έπαιζαν σε κανονικές συνθήκες.

Η κίνηση των χειλιών συλλήφθηκε από μία κάμερα Phantom v.4 υψηλής ταχύτητας και κατέγραψε 6000 (τρομπόνι) και 8000 (κόρνο) καρέ ανά δευτερόλεπτο. Για τέτοιες ταχύτητες χρειάζεται μια δυνατή πηγή φωτός και έτσι χρησιμοποιήθηκε μια πηγή ψυχρού φωτός μοντέλο KL1500 για να φωτίζει τα χείλη. Οι σχηματισμοί των χελιών χωρίστηκαν σε μια σειρά από αριθμημένες ασπρόμαυρες εικόνες, μια για κάθε σχηματισμό.

Ορίστηκε ένα όριο στο γκρι για τις εικόνες αυτές. Όλα τα πίζελ (σχετικά με την ανοιχτή περιοχή των χειλιών) με βαθμονόμηση του γκρι κάτω από αυτό το όριο ορίστηκε ως άσπρο σε χρώμα ενώ αυτά με βαθμονόμηση μεγαλύτερη από αυτό το όριο ορίστηκε ως μαύρο σε χρώμα. Αυτή η «δυναδική» διαδικασία μπορεί να διακριθεί

και στην εικόνα 15. Σε κάθε εικόνα αφαιρέθηκαν τα μαύρα πίξελ και απόμεινε έτσι η ανοιχτή περιοχή των χειλιών.



Εικόνα 14 – Απεικόνιση του στησίματος του πειράματος (αριστερά) για το κόρνο. Δείχνει τον τρόπο που τοποθετήθηκαν τα μικρόφωνα, η κάμερα και η πηγή φωτός. Τα διαφανείς επιστόμια για το τρομπόνι και το κόρνο.

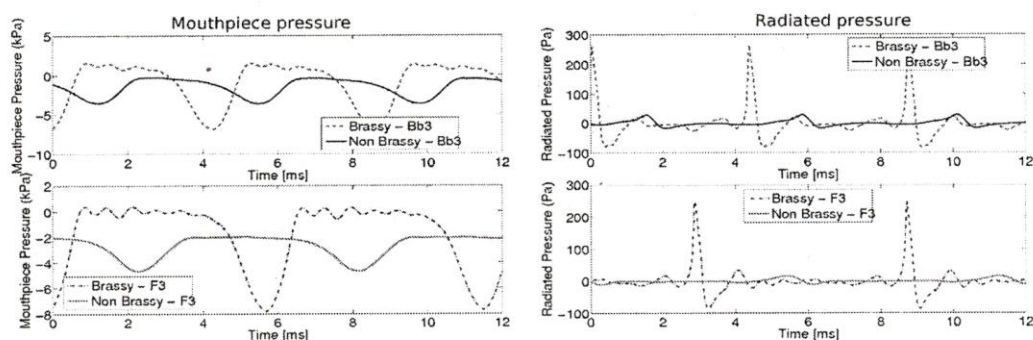


Εικόνα 15 – Ένα δείγμα εικόνας από τα χείλη, συμπεριλαμβανομένου την μεμονωμένη ανοιχτή περιοχή.

Αποτελέσματα

Η εικόνα 16 δείχνει παραδείγματα της πίεσης στο επιστόμιο και της πίεσης από την ηχητική ακτινοβολία, κατά την ηχογράφηση ενός τενόρου τρομπονιού που έπαιζε τις νότες F3 και Bb3, για χαμηλό σε ένταση παίξιμο και για δυνατό. Διερευνώντας τα σήματα της πίεσης στο επιστόμιο, βλέπουμε πως το πλάτος του σήματος αυξάνει όσο εκτεινόμαστε από ήρεμο παίξιμο προς το δυνατό, αλλά οι κυματομορφές είναι παρόμοιες. Σε αντίθεση με το σήμα για την πίεση της ηχητικής ακτινοβολίας από το όργανο, φαίνεται στην εικόνα 16 (δεξιά) ότι υπάρχει δραματική αλλαγή στη μορφή του σήματος της πίεσης μεταξύ ήρεμου παιχνιδιού και δυνατού. Μη γραμμική διάδοση συνεπάγεται παραποίηση του κύματος πίεσης που οδηγεί σε

βίαη αντίδραση την κυματομορφή. Εδώ φαίνεται καθαρά ο σχηματισμός της βίαης αντίδρασης στο εσωτερικό του σωλήνα του οργάνου. Αναλύοντας τα σήματα που παράχθηκαν, όταν αντί για τρομπόνι χρησιμοποιήθηκε κόρνο, η μελέτη καταλήγει σε παρόμοια συμπεριφορά



Εικόνα 16 – Κυματομορφές της πίεσης για το επιστόμιο (αριστερά) και την ακτινοβολία του ήχου (δεξιά) για ήρεμο και για δυνατό παίξιμο. Νότες Bb3 (πάνω) και F3(κάτω) το τενόρο τρομπόνι.

1.5 Η παραγωγή του ήχου στα ξύλινα πνευστά

1.5.1 Βασικές πληροφορίες

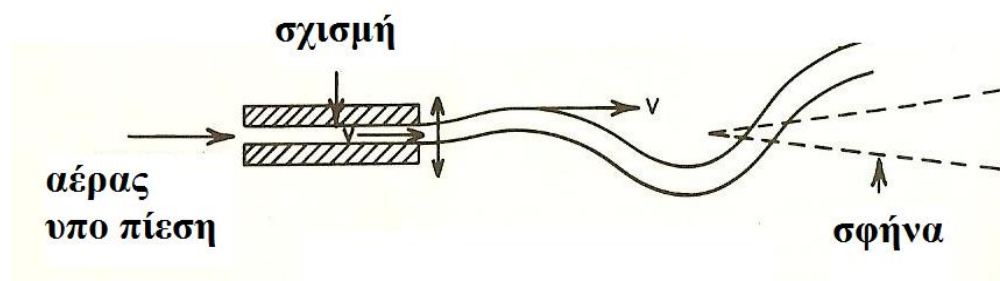
Όπως οι δονούμενες χορδές είναι η ακουστική βάση για την οικογένεια των εγχόρδων οργάνων, έτσι είναι οι δονήσεις αέριων στηλών για τα ξύλινα πνευστά. Ένας ανοιχτός κυλινδρικός σωλήνας (που είναι ανοιχτός και στα δύο άκρα) μετατρέπεται σε ένα φλάουτο. Ο κυλινδρικός σωλήνας που κλείνει από το ένα άκρο γίνεται κλαρίνο. Ο κωνικός σωλήνας μετατρέπεται σε όμποε και μπάσουν. Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται τα ξύλινα πνευστά έχει μικρές αποκλίσεις από απλούς κυλίνδρους και κώνους και αυτό αποδεικνύεται μεγάλης σημασίας.

Σε όλα τα ξύλινα πνευστά τα διαμήκη στάσιμα κύματα παράγονται και διατηρούνται στην αέρια στήλη μέσα στο όργανο. Τα ανοίγματα οπές στο όργανο καθορίζουν το μήκος των στάσιμων κυμάτων και τους επιτρέπουν να ακτινοβοληθούν μέσω αυτών. Για να παραχθεί ένα στάσιμο κύμα χρειάζεται ισχύς, και υπάρχουν δυο πρακτικοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να παρέχουμε ακουστική ισχύ στα ξύλινα πνευστά ώστε να δονήσουν την αέρια στήλη. Το φλάουτο χρησιμοποιεί την ταλάντωση της αέριας στήλης ενώ τα όργανα με γλωττίδα, όπως

μαρτυράει και το όνομα, χρησιμοποιούν μηχανικές δονήσεις ενός λεπτού κομματιού ενός ελαστικού υλικού που ονομάζεται γλωττίδα. Τα δύο αυτά συστήματα διαφέρουν πλήρως στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν. Ο τρόπος που λειτουργεί το φλάουτο μοιάζει απλός, αλλά η απλότητα είναι μόνο φαινομενική και εμπεριέχει μια σειρά από ακουστικά προβλήματα με τα οποία θα ασχοληθούμε παρακάτω.

1.5.2 Ταλαντώνοντας αέριες στήλες

Η φύση μερικές φορές φαίνεται να αρέσκεται στο να προσθέτει δυσκολίες σε συστήματα που κάποιος θα θεωρούσε πολύ απλά. Η κίνηση των υγρών είναι ένας καλός παραλληλισμός. Ας υποθέσουμε τώρα ότι σχηματίζουμε μια οπή σε ένα πολύ στενό κομμάτι από ξύλο και συνδέσουμε αυτή την οπή σε μια παροχή αέρα υπό πίεση, έτσι ώστε ένα λεπτό επίπεδο αέρα αναδύεται από την σχισμή. Αυτή η στήλη αέρα δεν ταξιδεύει προς μια κατεύθυνση όπως το νερό που βγαίνει από ένα λάστιχο, αλλά η κίνηση του μεταβάλλεται συνεχώς και αναπτύσσει μια κυματοειδή κίνηση με σταθερά αυξανόμενη κυμάτωση. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να το διακρίνει κανείς παρατηρώντας τον καπνό που ανυψώνεται από ένα τσιγάρο σε κάποιο δωμάτιο. Οι κυματισμοί σε μια σημαία από τον άνεμο είναι μια παρόμοια ενέργεια. Ανακαλύπτουμε ότι η ταχύτητα με την οποία κυματίζει η σημαία είναι περίπου η μισή από αυτή του αέρα που παράγει αυτή την κυμάτωση. Ομοίως, οι κυματισμοί που παράγονται στην αέρια στήλη και απορρέουν από την σχισμή ταξιδεύουν με ταχύτητα περίπου την μισή από αυτή που τους προκάλεσε.

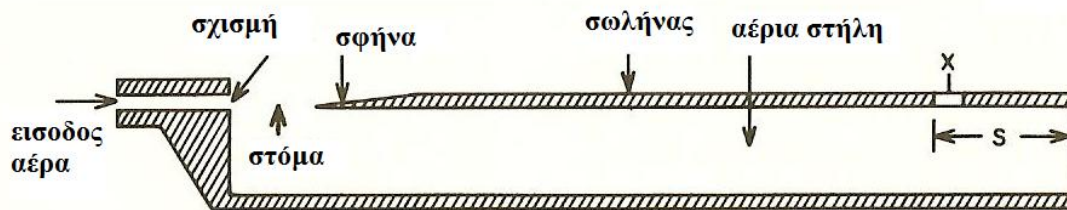


Εικόνα 17: Ένα ταλαντευόμενο αέριο στρώμα

Στην εικόνα 17 παρατηρούμε αυτή την συμπεριφορά. Οι ελαφρές κινήσεις του αέρα που αναδύεται από τη σχισμή στα περίχωρα είναι επαρκείς για να επιφέρουν

κυματισμούς που ταξιδεύουν κατά μήκος της ροής με σταθερά αυξανόμενο πλάτος, μέχρι που βρίσκεται ένα σημείο όπου η αέρια στήλη γίνεται πλήρως ασταθής και σκορπίζεται. Αν η κίνηση του αέρα που προκαλεί αστάθεια παράγεται από ένα ηχητικό κύμα, ταλαντώνεται στην κατεύθυνση που δείχνει το βέλος με τις δύο άκρες στην εικόνα 17 και οι κυματισμοί του αέρα θα έχουν την ίδια συχνότητα με του ηχητικού κύματος. Η ταχύτητα των μορίων του αέρα που προκαλούν τον κυματισμό μπορεί να είναι λιγότερο από 1/100 της ταχύτητας της αναδύμενης αέριας στήλης και ακόμα διέπουν την επακόλουθη κίνηση της στήλης. Αν τώρα βάλουμε μια σφήνα στον δρόμο της κυματιζόμενης αέριας στήλης (φαίνεται με την διακεκομμένη στην εικόνα 17), η στήλη θα ρέει εναλλασσόμενα από την μία άκρη της σφήνας στην άλλη για κάθε μισό του κύκλου της ταλάντωσης.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι η διάταξη της σχισμής και της σφήνας επισυναφθεί σε ένα σύστημα που έχει ιδιορυθμούς, όπως ένας σωλήνας που εμπεριέχει μία αέρια στήλη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 18. Με αυτή τη διάταξη, το φύσημα αέρα μέσω της σχισμής μπορεί να παράγει σταθερές ταλαντώσεις στην αέρια στήλη κοντά σε κάποιον ιδιορυθμό. Αυτό συμβαίνει με τον επακόλουθο τρόπο: όταν ο αέρας αρχικά φυσιέται μέσω της σχισμής, προκαλεί ένα συγκεκριμένο ποσό θορύβου. Αυτός ο θόρυβος είναι ένα μείγμα πολλών συχνοτήτων κι έτσι δημιουργούνται μικρές δονήσεις στην αέρια στήλη στις συχνότητες συντονισμού του σωλήνα. Ας υποθέσουμε τώρα ότι μόνο ο πρώτος (θεμέλιος) ιδιορυθμός του σωλήνα δονείται. Αέρας θα ρέει μέσα κι έξω από το κενό μεταξύ της σχισμής και του κώνου στη συχνότητα του συντονισμού. Αυτό το κενό ονομάζεται στόμα του σωλήνα. Ο ταλαντευόμενος αέρας ρέει στο στόμα και προκαλεί κυματώσεις στη αέρια στήλη των οποίων οι συχνότητες είναι ίδιες με αυτή του πρώτου ιδιορυθμού. Αν τώρα η ταχύτητα της αέριας στήλης έχει την σωστή τιμή σε σχέση με την απόσταση από τη σχισμή στη σφήνα, έχουμε ένα σύστημα όπου το στρώμα του αέρα εισέρχεται στον σωλήνα μέσω της σχισμής (φυσώντας κατά μήκος του εσωτερικού της σφήνας – εικόνα 18) και την ίδια στιγμή ο αέρας που περιτριγυρίζει ρέει επίσης μέσω του στόματος στον σωλήνα και πιέζεται κάτω. (Ο όρος κάτω εννοεί μακριά από το άκρο από το οποίο φυσιέται ο αέρας). Η αέρια στήλη έτσι βοηθά τον αέρα του σωλήνα στην κίνηση του και το πλάτος της ταλάντωσης μεγαλώνει. Ένα στάσιμο κύμα φτιάχνεται μέσα στον σωλήνα. Το στάσιμο κύμα αυτό λειτουργεί ως αντίδοτο στο εκτόπισμα του στόματος, από τη στιγμή που το στόμα είναι εντελώς ανοιχτό.



Εικόνα 18: Σύστημα ταλαντευόμενου αέριου στρώματος συνδεδεμένο σε μια αέρια στήλη

Οι ταλαντώσεις στο σωλήνα που παράγονται από τις δονήσεις της αέριας στήλης αυξάνονται σταδιακά μέχρις ότου η ενέργεια που χάνεται από την τριβή της κινούμενης αέριας στήλης στα τοιχώματα του σωλήνα και από ηχητικές ακτινοβολίες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου της δόνησης, ισούται με την ενέργεια που δίνεται από την αέρια στήλη κατά τον κύκλο. Η ισχύς που δίνεται από την αέρια στήλη είναι ίση με την ισχύ που σκορπίζεται από το στάσιμο κύμα, και το πλάτος της ταλάντωσης μένει σταθερό.

Πειραματικές μετρήσεις πάνω στο σύστημα της ταλαντευόμενης αέριας στήλης μας δείχνει ότι αν V είναι η ταχύτητα των κυματώσεων κατά μήκος της αέριας στήλης και v είναι η ταχύτητα του ίδιου του αέριου στρώματος τότε το V είναι περίπου $0.4v$, τότε οι κυματώσεις κινούνται με λίγο λιγότερη από την μισή ταχύτητα της αέριας στήλης. Συνεπάγεται λοιπόν ότι υπάρχει μια καθυστέρηση μεταξύ του χρόνου που παράγεται η ταραχή σε μια αέρια στήλη στη σχισμή και του χρόνου που αναπτύσσεται η κυμάτωση μέχρι οι ταραχές να φτάσουν στη σφήνα. Η χρονοκαθυστέρηση θα είναι απλά ο χρόνος που απαιτείται για την κυμάτωση να διανύσει την απόσταση από τη σχισμή μέχρι την σφήνα. Ας υποθέσουμε τώρα πως η ταραχή στο στόμα όπως φαίνεται στην εικόνα 18 οφείλεται στη δόνηση του αέρα μέσα κι έξω από την αέρια στήλη στον θεμέλιο ιδιορυθμό. Η ροή του αέρα που εναλλάσσεται στο στόμα θα μεταβεί από έξω σε μέσα σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Αυτό θα προκαλέσει την μεταβολή της αέριας στήλης από εξωτερική σε εσωτερική αργότερα, λόγω της χρονοκαθυστέρησης που περιγράψαμε πιο πάνω. Για σταθερές ταλαντώσεις που συντηρούνται στην αέρια στήλη σε ιδιορυθμούς, είναι αναγκαίο ότι η χρονοκαθυστέρηση θα αναλογεί σε έναν κύκλο της ταλάντωσης. Έπειτα θα ικανοποιήσουμε τη συνθήκη που περιγράφεται παραπάνω, ότι το αέριο στρώμα από

τη σχισμή ρέει στην αέρια στήλη κατά την διάρκεια που ο εξωτερικός αέρας φυσιέται στο εσωτερικό της αέριας στήλης μέσω του στόματος. (Αν η χρονοκαθυστέρηση δεν είναι απλά μια περίοδο του κύκλου, θα υπάρχουν στιγμές του κύκλου που οι δύο ροές θα είναι σε αντίθετη κατεύθυνση).

Ο χρόνος της καθυστέρησης εξαρτάται από την απόσταση από την σχισμή στην σφήνα και από την ταχύτητα V των κυματισμών κατά μήκος της αέριας στήλης. Η ταχύτητα V εξαρτάται από την ταχύτητα του αέριου στρώματος v και αυτό με την σειρά του εξαρτάται στην πίεση του φυσήματος. Αν η απόσταση μεταξύ της σχισμής και της σφήνας είναι σταθερή, συνεπάγεται ότι ο όρος για χρονοκαθυστέρηση μίας περιόδου (κι έτσι η συγκρότηση των ταλαντώσεων στη συχνότητα συντονισμού της αέριας στήλης) μπορεί να ικανοποιηθεί μόνο σε μια πίεση φυσήματος. (Είναι εφικτή η συγκρότηση μικρών ταλαντώσεων με χαρονοκαθυστερήσεις δύο, τριών τεσσάρων ή και περισσότερων περιόδων, αλλά μόνο η χρονοκαθυστέρηση της μιας περιόδου είναι μουσικά χρήσιμη.) Αν η πίεση φυσήματος μειωθεί κάπως, ο χρόνος καθυστέρησης αυξάνει λόγω των επακόλουθων μειώσεων στην ταχύτητα των κυματώσεων. Από τη στιγμή που το σύστημα χρειάζεται χρονοκαθυστέρηση απλά μιας περιόδου για να παράγει ταλαντώσεις, συνεπάγεται πως η συχνότητα ταλάντωσης θα χαμηλώσει για να δώσει μεγαλύτερη περίοδο. Αντίστροφα, μια αύξηση στην πίεση του φυσήματος θα αυξήσει την συχνότητα. Έτσι σε χαμηλότερη πίεση φυσήματος η τονικότητα συστήματος θα είναι ξεκούρδιστη και θα γίνει πιο απότομη σε μεγαλύτερη πίεση φυσήματος. Από τη στιγμή που η αέρια στήλη μπορεί να φτιαχτεί για να ταλαντώνει εύκολα μόνο τις συχνότητες κοντά στους συντονισμούς, η αλλαγή της τονικότητας λόγω της αλλαγής πίεσης φυσήματος είναι συνήθως μόνο ένα με δύο ημιτόνια.

Αν η πίεση φυσήματος αυξηθεί ραγδαία, ο χρόνος καθυστέρησης γίνεται τόσο σύντομος που οι ταλαντώσεις δεν μπορούν να συντηρηθούν σε συχνότητα συντονισμού. Ωστόσο, ο επόμενος ιδιορυθμός του συστήματος θα έχει μικρότερη περίοδο ώστε να μπορέσει να ταιριάξει με την μικρότερη χρονοκαθυστέρηση, έτσι ώστε οι δονήσεις να συγκροτηθούν στη συχνότητα του επόμενου ιδιορυθμού. Για έναν σωλήνα ανοιχτό στο πέρα άκρο, μακριά από το στόμα, αυτός ο ιδιορυθμός θα είναι περίπου διπλάσιας συχνότητας από τον θεμέλιο κι έτσι η τονικότητα θα ανέβει κατά μια οκτάβα. Για ένα σωλήνα κλειστό στο πέρα άκρο, η επόμενος μεγαλύτερος ιδιορυθμός θα είναι τρεις φορές ο θεμέλιος κι έτσι η τονικότητα θα ανέβει περίπου

μια δωδέκατη. Η διέγερση υψηλότερων ιδιορυθμών στην αέρια στήλη, όπως στο παράδειγμα που φυσώντας δυνατότερα αυξανόταν η ταχύτητα του αέριου στρώματος, ονομάζεται *overblowing* (θα το λέγαμε στα ελληνικά υπέρ-φύσημα). Αφού ο χρόνος καθυστέρησης βασίζεται στην απόσταση από τη σχισμή στη σφήνα όπως και στην ταχύτητα του αέριου στρώματος, συνεπάγεται πως μια αύξηση της απόστασης ενώ κρατάμε της πίεση φυσήματος σταθερή, θα αυξήσει την χρονοκαθυστέρηση και έτσι θα ελαττώσει επίσης τη συχνότητα της δόνησης. Αντίθετα χαμηλώνοντας την απόσταση σχισμής – σφήνας με σταθερή πίεση φυσήματος θα έχουμε αύξηση της συχνότητας και αν η απόσταση μειωθεί αρκετά, ο επόμενος ιδιορυθμός θα ταλαντωθεί. Αυτή η απόσταση σχισμής – σφήνας είναι έτσι πολύ σημαντική στον καθορισμό της συμπεριφοράς του συστήματος.

1.5.3 Τονικές οπές και βασική κλίμακα

Η χρήση συστημάτων ταλαντευόμενων αέριων στρωμάτων ώστε να παραχθούν μουσικοί ήχοι, μας πάει στις προϊστορικές εποχές. Πολλούς αιώνες πίσω κάποιοι άνθρωποι των σπηλαίων ανακάλυψαν ότι φυσώντας με τον σωστό τρόπο σε ένα κούφιο κόκκαλο ή σε κούφια ξύλα – ρόπαλα μπορούσαν να παράγουν έναν ευχάριστο ήχο. Οι άνθρωποι των σπηλαίων βρήκαν επίσης ότι μεγαλύτερα κομμάτια ξύλου παράγουν πιο χαμηλής συχνότητας ήχους. Λίγο αργότερα ανακαλύφθηκε ότι αν ανοίξουμε τρύπες στα τοιχώματα του βαθουλωτού ξύλου και τις καλύψουμε με τα δάχτυλα, ήχοι ποικίλης τονικότητας θα παραχθούν ανοίγοντας και κλείνοντας τις οπές. Αυτές οι τρύπες ονομάζονται τονικές οπές. Το να ανοίξουμε μια οπή σε μια άκρη του ξύλου είναι ίσο με το να κάνουμε την αέρια στήλη του κοντύτερη, και έτσι αυξάνεται η συχνότητα της δόνησης και έτσι και ως εκ τούτου και η τονικότητα.

Αν ανοίξουμε μια οπή στον σωλήνα στο σημείο X όπως φαίνεται στην εικόνα 18, ο σωλήνας θα συμπεριφερθεί σα να του μειώθηκε το μήκος. Το ποσό του κοντέματος θα εξαρτηθεί από το μέγεθος της τρύπας. Χωρίς καμία τρύπα στον σωλήνα, θα υπάρχει δεσμός πίεσης στο ανοιχτό τέλος. Το πλάτος της πίεσης δεν είναι ακριβώς μηδέν σε αυτό το σημείο, γιατί η ταλαντευόμενη αέρια στήλη στον σωλήνα ακτινοβολεί ήχο έξω από το ανοιχτό άκρο, αλλά το πλάτος είναι αρκετά μικρό

συγκρινόμενο με το πλάτος της πίεσης της κοιλίας μέσα στον σωλήνα. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε πως το ανοιχτό άκρο είναι μια πίεση δεσμού. Ανοίγοντας μια μεγάλη τρύπα στην πλευρά του σωλήνα θα αντιστοιχεί στο κόψιμο του σωλήνα στην άκρη της οπής που βρίσκεται πλησιέστερα στο επιστόμιο (το σημείο X στην εικόνα 18), δεδομένου ότι εκεί πρέπει να υπάρχει πίεση δεσμού σε αυτό το σημείο. Ωστόσο μια μικρή οπή δεν θα παράγει δεσμό πίεσης στο σημείο της οπής αλλά θα μειώσει λίγο το πλάτος της πίεσης σε αυτό το σημείο. Το στάσιμο κύμα στο σωλήνα είναι ελαφρώς κοντότερο, κι έτσι το αποτέλεσμα είναι σα να ανοίχτηκε μια τρύπα μεταξύ του ανοιχτού άκρου και του σημείου της οπής.

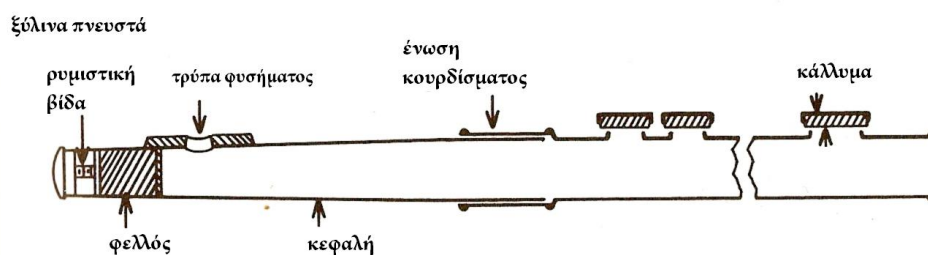
Κατά την πάροδο των αιώνων διάφορες προσαρμογές στο τονικό σύστημα των οπών που περιγράψαμε πιο πάνω βοήθησαν στην εξέλιξη του. Ένα είναι το απλό πρωτόγονο όργανο που ήταν φτιαγμένο από μπαμπού και μπορεί να βρεθεί σε πολλά καταστήματα με σουβενίρ που πουλάνε Οριεντάλ αγαθά και το οποίο μας δείχνει πολύ καλά τις βασικές αρχές των ξύλινων πνευστών. Ένα κούφιο κομμάτι μπαμπού παρέχεται στο ένα άκρο μαζί με ένα στόμιο, γυαλισμένο εντελώς από την μία μεριά ώστε να δημιουργήσει σχισμή που κατευθύνεται κατά μήκος του ραβδιού. Μια εγκοπή στην μεριά του ραβδιού εξασφαλίζει μια σφήνα πάνω στην οποία το αέριο στρώμα εισβάλλει. Το ξύλο που σχηματίζει τη σχισμή λέγεται firple (είδος φλάουτου) για αυτό μπορούμε να ονομάσουμε αυτόν τον συνδυασμό της σχισμής και σφήνας φλαουτοειδές επιστόμιο (firple mouthpiece). Το πέρα άκρο του σωλήνα του μπαμπού είναι ανοιχτό. Το αποτέλεσμα είναι απλά το σύστημα που δώσαμε στην εικόνα 18. Ένα τέτοιο όργανο μπορεί να παίζει επιτυχώς τους πέντε πρώτους ιδιορυθμούς της αέριας στήλης καθώς αυξάνεται η πίεση φυσήματος. Μια σειρά από τονικές οπές κατά μήκος της μας πλευράς του σωλήνα από μπαμπού, για να μπορούν να είναι καλυμμένες από τα δάχτυλα ή και ανοιχτές, μεταβάλλουν το δραστικό μήκος του σωλήνα και επιτρέπουν μια σειρά από νότες να παίζονται. Έξι οπές, τρεις για κάθε χέρι είναι αρκετές για να παρέχουν την βασική διατονική κλίμακα. Με όλες τις τρύπες κλειστές από τα δάχτυλα, παράγεται ο θεμέλιος του σωλήνα παράγει την χαμηλότερη νότα. Με το διαδοχικό σήκωμα των δακτύλων μας, ξεκινώντας από την τελευταία οπή (την πιο κοντινή στο ανοιχτό άκρο) παίζεται η διατονική κλίμακα, νότα τη νότα. Όταν και οι έξι οπές είναι ανοιχτές, θα φτάσουμε στην έβδομη νότα της κλίμακας. Τώρα, κλείνοντας όλες τις οπές ξανά και υπέρ-φυσώντας, η οκτάβα της θεμελίου έχει σχηματιστεί. Αν ξαναανοίξουμε τις οπές με διαδοχικό τρόπο, η κλίμακα

ξαναπαίζεται αλλά μια οκτάβα πιο πάνω. Το όργανο τώρα παίζει σε υψηλότερη κατάσταση (register). Το σημείο κατά το οποίο αλλάζουμε κατάσταση λέγεται σημείο διακοπής (break). Η βασική διάταξη των έξι δακτύλων μας παρέχει μια επτά νοτών κλίμακα που υπάρχει σε όλα τα ξύλινα. Αυτή η κλίμακα λέγεται βασική κλίμακα.

1.5.4 Μελέτη οργάνων και της γλωττίδας

ο Το φλάουτο

Το μοντέρνο φλάουτο είναι μια απώτερη ανακάλυψη του πρωταρχικού οργάνου που περιγράψαμε πιο πάνω. Η διατομή των τμημάτων του φλάουτου (οι αναλογίες είναι λίγο μεγεθυμένες για σαφήνεια) φαίνεται στην εικόνα 19. Το αέριο στρώμα φυσιέται έναντι του σωλήνα και όχι κατά μήκος, και παράγεται από ένα άνοιγμα που σχηματίζουμε με τα χείλη μας αντί να σχηματίζεται μέσα στο όργανο. Φυσάμε έναντι της άκρης μιας τρύπας (η τρύπα φυσήματος) που καλύπτει μια περιοχή του σωλήνα όπως φαίνεται στην εικόνα 19. Το ακριβές σχήμα και περίγραμμα αυτής της τρύπας έχει καθοριστεί μετά από έντονο πειραματισμό. Οι δονήσεις της αέριας στήλης έπειτα παράγονται από την ταλάντωση του αέριου στρώματος όπως περιγράψαμε και πιο πάνω. Τα χείλη από μόνα τους δεν δονούνται, όπως πιστεύουν μερικές φορές οι παίχτες του φλάουτου.



Εικόνα 19: Διατομή των βασικών στοιχείων ενός φλάουτου

Αφού το αέριο στρώμα που παράγει τις δονήσεις στην αέρια στήλη παράγεται από τα χείλη του οργανοπαίκτη και όχι από κάποια αμετάβλητη σχισμή, μπορούμε να μεταβάλλουμε την κατεύθυνση και τον όγκο την ώρα που παίζει, και η απόσταση από τη σχισμή που σχηματίζεται από τα χείλη στην άκρη της τρύπας φυσήματος μπορεί επίσης να ρυθμιστεί. Αυτό δίνει την δυνατότητα στον οργανοπαίκτη να έχει

σημαντικό έλεγχο στην τονικότητα και στην ακουστότητα του κάθε τόνου. Η τονικότητα μπορεί να ανέβει ή να κατέβει σε κάποιον βαθμό ρυθμίζοντας την απόσταση από τα χείλη στην άκρη της τρύπας φυσήματος, με την πίεση φυσήματος να μένει σταθερή. (Μια περίπλοκη διαδικασία είναι ότι κινώντας τα χείλη προς τα εμπρός, περισσότερη από την τρύπα φυσήματος καλύπτεται, χαμηλώνοντας τον ιδιορυθμό της αέριας στήλης). Αλλιώς, ο τόνος θα παιζόταν δυνατότερα αυξάνοντας την πίεση φυσήματος και ρυθμίζοντας την θέση των χειλιών για να αντισταθμίσουμε την αύξηση της τονικότητας που θα συνέβαινε. Ο παίχτης μπορεί να παίζει σε υψηλότερη κατάσταση (register) άμα φυσήξει πιο δυνατά και έτσι να αυξήσει την ταχύτητα του αέριου στρώματος. Αλλιώς, ο παίκτης μπορεί να κρατήσει την ένταση του φυσήματος σταθερή αλλά θα πρέπει να μετακινήσει τα χείλη του πιο κοντά στην τρύπα φυσήματος. Αυτό θα έχει το ίδιο αποτέλεσμα στο να φτάσει στον επόμενο συντονισμό. Στην πραγματικότητα, φυσικά, ο παίκτης κάνει όλα αυτά τα πράγματα αυτόματα λόγω της πολύχρονης εξάσκησης.

Το φλάουτο δεν χρησιμοποιεί ανοιχτές οπές που καλύπτονται με τα δάκτυλα. Στην πραγματικότητα αντί για όλες αυτές τις οπές είναι εφοδιασμένο με μεταλλικά καλύμματα που πιέζονται με τα δάκτυλα είτε απευθείας είτε μέσω ενός μηχανισμού μοχλών. Τα καλύμματα έχουν μαλακές άκρες για να μπορούν να κλείνουν με ομαλό τρόπο τις οπές.

Τα φλάουτα φτιάχνονται από πολλά υλικά, αλλά τα σύνηθες είναι το ξύλο και το μέταλλο. (ο όρος ξύλινο πνευστό για το φλάουτο δεν είναι και πολύ εύστοχος, αλλά συνηθίζεται να λέγεται.) Το σώμα του φλάουτου αποτελείται από τρεις περιοχές. Την κεφαλή, που περιλαμβάνει την τρύπα φυσήματος και ένα κινούμενο κομμάτι που αφορά το κούρδισμά, το κυρίως σώμα που φιλοξενεί κυρίως τα κλειδιά, και την άκρη του με τα κλειδιά για το μικρό δάχτυλο του δεξιού χεριού. Η σύνδεση μεταξύ της κεφαλής και του σώματος κινείται με σκοπό το κούρδισμα του οργάνου για μικρό εύρος. Η αέρια στήλη του οργάνου, αποκαλείται διάτρημα, είναι κυλινδρική, περίπου 1,9 εκατοστά σε διάμετρο, εκτός από την κεφαλή όπου είναι κωνική, που στενεύει σε μια διάμετρο περίπου 1,7 εκατοστά στο αντίθετο άκρο από το ανοιχτό άκρο του οργάνου. Αυτή η διαφορά, πάλι το αποτέλεσμα πολύ πειραματισμού, βοηθάει στο να κουρδιστούν οι καταστάσεις (registers) του οργάνου μεταξύ τους. Το στενό τέλος της κεφαλής κλείνεται από ένα κομμάτι φελλού, όπως φαίνεται και στην εικόνα 19. Η μικρή εσοχή μεταξύ της τρύπας φυσήματος και του

κομματιού φελλού αποτελεί άλλη μια σημαντική βοήθεια στο να κρατάμε τις καταστάσεις (registers) κουρδισμένες. Μικρές ρυθμίσεις στον φελλό επηρεάζουν κυρίως τις υψηλότερες νότες του οργάνου. Το συνολικό του μήκος είναι 67 εκατοστά (26.4 ίντσες). Το μήκος από την τρύπα φυσήματος μέχρι το ανοιχτό τέλος είναι περίπου 60 εκατοστά (23.7 ίντσες). Ένας ανοιχτός σωλήνας τέτοιου μήκους θα είχε έναν θεμέλιο συντονισμό που θα αντιστοιχούσε σε μια C#4 αλλά, στην πραγματικότητα η τονικότητα του θεμέλιου είναι ένα ημιτόνιο χαμηλότερα δηλαδή σε C4. Η βασική κλίμακα είναι αυτή των έξι οπών –εφτά νοτών όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως και ξεκινάει με μια D4 με τις έξι οπές του κλειστές. Εναλλακτικές οπές και κλειδιά χρησιμοποιούνται για παρέχουν κούρδισμα και για να μεγαλώσουν την έκταση στα χαμηλά, ώστε να πιάσουμε την C4.

Μικρότερα και μεγαλύτερα μοντέλα του πρότυπου φλάουτου έχουν φτιαχτεί. Το G φλάουτο είναι περίπου ένα τρίτο μακρύτερο από ένα σύνηθες φλάουτο και ακούγεται μια τέταρτη πιο κάτω σε έκταση. Το πίκολο, που είναι περίπου το μισό σε μήκος παίζει μια οκτάβα πιο πάνω.

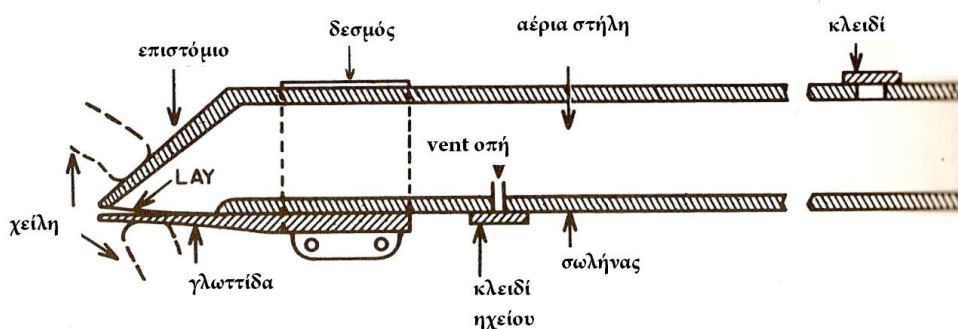
ο Φλογέρα

Η φλογέρα αποτελεί μια επεξεργασία του πρωτόγονου οργάνου από μπαμπού, που περιγράψαμε πιο πάνω, και έχει ένα φλαουτοειδές επιστόμιο επισυναπτόμενο στον σωλήνα του. Το σχήμα του είναι γενικά κωνικό, με το μικρό του άκρο να βρίσκεται μακριά από το επιστόμιο. Έχει την συνήθη κλίμακα των έξι οπών και δύο παραπάνω τονικές οπές. Αφού ο παίκτης δεν μπορεί να ελέγξει τον όγκο και την διεύθυνση του αέριου στρώματος, όπως γίνεται στο φλάουτο, το όργανο είναι μονοκόμματο. Για παράδειγμα η τονικότητα μιας νότας μπορεί να ανέβει με πιο έντονο φύσημα, έτσι το εύρος της έντασης είναι περιορισμένο. Ωστόσο, το αμετάβλητο επιστόμιο κάνει το όργανο σε γενικές γραμμές πιο εύκολο να παιχτεί από το φλάουτο και το τελευταίο διάστημα οι φλογέρες έχουν γίνει σε κάποιον βαθμό δημοφιλείς. Σήμερα, υπάρχουν πέντε μεγέθη φλογέρας που καλύπτουν συνολικά δύο οκτάβες: μπάσα φλογέρα F3, τενόρο C4, F4, σοπράνο C5 και οκτάβα F5

ο Το κλαρίνο

Οι δονούμενες γλωττίδες έχουν χρησιμοποιηθεί ως πηγές ήχου από την αρχαιότητα. Οι περισσότεροι από εμάς έχουν την εμπειρία από την χρήση γλωττίδας που παράγει έναν σύντομο και έντονο ήχο, και φυσικά μιλάμε για τον ήχο που παράγεται από το φύσημα μέσω ενός φύλλου που κρατάμε διπλωμένο στη μέση. Αν ένας τέτοιος μηχανισμός επισυναφθεί σε μια αέρια στήλη, τότε θα μπορούσε να παράγει ταλαντώσεις μέσα στην στήλη σε κάποιον ιδιορυθμό.

Το κλαρίνο είναι το πιο απλό παράδειγμα της παραγωγής ταλαντώσεων σε μια αέρια στήλη μέσω μιας δονούμενης γλωττίδας. Ένας κυλινδρικός σωλήνας, ανοιχτός στο ένα άκρο, κρατάει στο άλλο άκρο μία διάταξη που ονομάζεται επιστόμιο, στο οποία είναι δεμένη και η γλωττίδα. Η γλωττίδα κόβεται συνήθως από κάποιο ελαστικό μέσο όπως μια ποικιλία καλαμιού (*Arundo Donax*). Η γλωττίδα κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι επίπεδη στην μια πλευρά. Η άλλη πλευρά λιανίζεται μέχρι να μοιάζει με σφήνα που έχει πάχος μόλις 100μm στο λεπτό της άκρο. Η γλωττίδα προσδένεται στο επιστόμιο και στηρίζεται σε μια ειδικά επεξεργασμένη επιφάνεια που ονομάζεται lay με την βοήθεια ενός μηχανισμού δεσίματος που ονομάζεται ligature. Το lay λειαίνεται ώστε να αφήνει ένα μικρό άνοιγμα μεταξύ του άκρου της γλωττίδας και του άκρου του επιστομίου. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην εικόνα 20.



Εικόνα 20: Διατομή του κλαρίνου

Για να ηχήσει αυτή η διάταξη ο παίχτης παίρνει το επιστόμιο και την γλωττίδα στο στόμα του και πιέζει με το κάτω χείλος ενάντια στην γλωττίδα ώστε να κλείσει μερικώς το άνοιγμα της, όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Αέρας από τα πνευμόνια του παίχτη φυσείται διαμέσου του ανοίγματος στην αέρια στήλη του οργάνου. Η ροή αέρα συνήθως αρχίζει καλύπτοντας το άνοιγμα της γλωττίδας με την γλώσσα και

ξαφνικά την τραβάμε μακριά. Το πρώτο πακέτο αέρα που εισέρχεται στον σωλήνα θέτει σε ταλάντωση διάφορους συντονιστικούς ρυθμούς της αέριας στήλης. Ο βασικός ρυθμός έχει ένα δεσμό πίεσης στο ανοιχτό άκρο του σωλήνα. Η πίεση που εισέρχεται μέσω του επιστομίου δρα στην γλωττίδα και εναλλακτικά την σπρώχνει μακριά η την φέρνει πιο κοντά στο επιστόμιο. Το μέγεθος του ανοίγματος της γλωττίδας αλλάζει με την βασική συχνότητα. Κατά την διάρκεια του μισού κύκλου, όπου η πίεση στο επιστόμιο είναι μεγαλύτερη από ότι η μέση πίεση, το άνοιγμα είναι μεγαλύτερο και ανάστροφα. Ο αέρας βγαίνει από το στόμα του οργανοπαίκτη με μια πίεση φυσήματος η οποία δίνεται από τα πνευμόνια και η οποία είναι πάντα υψηλότερη από την πίεση του επιστομίου. Εάν αυτή η πίεση φυσήματος είναι αρκετά υψηλή, η ροή αέρα στο επιστόμιο είναι μεγαλύτερη στην χρονική στιγμή του κύκλου όταν η πίεση επιστομίου παίρνει την υψηλότερη τιμή της λόγω του μεγάλου ανοίγματος της γλωττίδας την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτή είναι η συνθήκη που απαιτείται για την δημιουργία των ταλαντώσεων της στήλης. Εάν ο αέρας έρεε προς το επιστόμιο αντί έξω από αυτό όταν η πίεση είναι υψηλότερη από την μέση πίεση τότε θα παρεχόταν ενέργεια στο σύστημα.

Οι ταλαντώσεις στην αέρια στήλη αναπτύσσονται σταδιακά, μέχρι που το μέγιστο της πίεσης επιστομίου κατά την διάρκεια του κύκλου είναι περίπου ίση με την πίεση φυσήματος. Σε αυτό το σημείο, η ενέργεια που παρέχεται ανά κύκλο γίνεται μικρή και το πλάτος των δονήσεων σταθεροποιείται σε μια τιμή ώστε η απώλεια ισχύος λόγω της τριβής στα τοιχώματα του σωλήνα και στην ηχητική ακτινοβολία είναι ίσες με την παρεχόμενη ισχύ.

Ο ρυθμός με τον οποίο ο αέρας ρέει στο επιστόμιο δεν εξαρτάται μόνο από τον όγκο του ανοίγματος της γλωττίδας, αλλά επίσης στην διαφορά μεταξύ της πίεσης επιστομίου και της πίεσης φυσήματος που παρέχεται από τον οργανοπαίκτη. Αν αυτή η πίεση φυσήματος δεν είναι αρκετά μεγάλη, ο αέρας θα ρεύσει έξω από το επιστόμιο παρά μέσα σε αυτό όταν η πίεση επιστομίου είναι μεγάλη. Το σύστημα τότε χάνει ενέργεια αντί να κερδίζει, και οι ταλαντώσεις δεν μπορούν να αναπτυχθούν. Το πραγματικό αποτέλεσμα αυτού είναι πως ένα συγκεκριμένο ελάχιστο πίεσης φυσήματος είναι αναγκαίο για να ακουστεί κάποιος ήχος, όπως ξέρει ο κάθε παίκτης κλαρίνου. Χρειάζεται αρκετή εξάσκηση για να φυσήξουμε σταθερά νότες σε χαμηλή ένταση, από τη στιγμή που μια παραμικρή μείωση στην πίεση φυσήματος κάτω από το ελάχιστο πίεσης φυσήματος θα σημαίνει την παύση κάθε τόνου.

Αφού το κλαρίνο έχει δεσμό πίεσης στο επιστόμιο, όμοια με έναν κλειστό σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο και ανοιχτό στο άλλο. Η θεμέλιος του συχνότητα είναι μισή από αυτή ενός σωλήνα ανοιχτού και στα δύο άκρα και του ίδιου μήκους. Γι' αυτό τα κλαρίνα ακούγονται περίπου μια οκτάβα πιο κάτω από το φλάουτα, αν και είναι σχεδόν του ίδιου μήκους.

Η κλίμακα του κλαρίνου

Αφού προμηθευτούμε ένα κλαρίνο, θα χρειαστεί να το αξιοποιήσουμε μουσικά παρέχοντας του διαφορετικές ακουστικές συχνότητες. Αυτό, πάλι το κάνουμε αλλάζοντας το μήκος της αέριας στήλης. Αν ανοίξουμε οπές στον σωλήνα του κλαρίνου στα σωστά μέρη και τις καλύψουμε με τα δάκτυλα μας ή αλλιώς, η κλίμακα μπορεί να ανεβαίνει ανοίγοντας μια τρύπα την φορά, ξεκινώντας από αυτήν που βρίσκεται μακρύτερα από το επιστόμιο. Οι συνηθισμένες έξι τρύπες θα μας δώσουν την έβδομη νότα της κλίμακας. Ωστόσο, αφού ο σωλήνας που είναι κλειστός στο ένα άκρο δονείται με ιδιορυθμούς που είναι ακανόνιστα πολλαπλάσια του θεμέλιου, ο επόμενος τρόπος ταλάντωσης του κλαρίνου έχει συχνότητα τρεις φορές αυτήν του θεμέλιου που μουσικά είναι μια οκτάβα και μια πέμπτη, ή μια δωδέκατη. Γι' αυτό, το κλαρίνο θα υπερφυσήσει την δωδέκατη αντί για την οκτάβα, και χρειάζεται να γεμίσει αυτά τα κενά μεταξύ της έβδομης και της δωδέκατης με εναλλακτικές οπές και κλειδιά.

Το κενό σε αυτή την κλίμακα καλύπτεται με τον ακόλουθο τρόπο: η χαμηλότερη νότα στο Bb κλαρίνο, χρησιμοποιώντας όλο το μήκος του οργάνου, γράφεται «E3», ενώ ακούγεται D3 έναν ολόκληρο τόνο κάτω. (Από την στιγμή που πολλά μουσικά όργανα είναι όργανα μετατόπισης, ακούγονται διαφορετικά από το πώς γράφονται, είναι βολικό εδώ να χρησιμοποιήσουμε εισαγωγικά που θα υποδηλώνουν τις γραμμένες νότες.) Η χαμηλότερη νότα της βασικής κλίμακας είναι η «G3» παρέχοντας δύο επιπλέον οπές και κλειδιά στα ημιτόνια που μεσολαβούν (F και F#). Η βασική κλίμακα τώρα ανεβαίνει από «G3» ανοίγοντας τις έξι οπές διαδοχικά, (με επιπρόσθετα κουμπιά που παρέχονται για κούρδισμα και ξεκούρδισμα) μέχρι που φτάνουμε στην «F4». Επιπλέον οπές παρέχονται πλησίον του επιστομίου και αν ανοιχτούν φτάνουμε σε μια «A#4». Αυτή είναι η υψηλότερη νότα στη χαμηλό κατάσταση (register) και λέγεται επίσης κατάσταση “καμινέτο” (chalumeau register).

Οι επιπρόσθετες οπές και τα επιπλέον κλειδιά χρειάζονται για να επιτρέπεται στο κλαρίνο να καλύπτει την έκταση μιας δωδέκατης σε αυτή την κατάσταση (register) και κάνει την τοποθέτηση των δακτύλων κάπως πιο πολύπλοκους από αυτή στα υπόλοιπα ξύλινα πνευστά.

Για να φτάσουμε στην επόμενη υψηλότερη νότα «B4» στην κλίμακα, όλες οι οπές ξανακλείνονται και το όργανο υπερφυσάται ώστε να παραχθεί ο επόμενος ιδιορυθμός μια δωδέκατη πιο πάνω από την αρχική χαμηλότερη νότα. Στο κλαρίνο, το υπερφύσημα επιτυγχάνεται ανοίγοντας μια μικρή οπή, την vent –οπή, στην πλευρά του σωλήνα, περίπου 15 εκατοστά κάτω από την άκρη του επιστομίου. Η οπή ουσιαστικά καταστρέφει τον χαμηλότερο ιδιορυθμό. Το πώς είναι αυτό εφικτό δίνεται στην εικόνα 27. Ο χαμηλότερος ιδιορυθμός μετακινείται από την θέση του όπως φαίνεται στην εικόνα 27 σε αυτήν που φαίνεται από την διακεκομμένη γραμμή όταν ανοιχθεί η vent –οπή. Οι υπόλοιποι χαμηλότεροι ιδιορυθμοί στην πραγματικότητα μένουν ανέπαφες. Με την vent –οπή ανοιχτή, το κλαρίνο λειτουργεί στον δεύτερο του ιδιορυθμό προκαλώντας την κατάσταση (register) του κλαρίνου. Για παίξιμο στην πρώτη κατάσταση η τρύπα κανονικά είναι κλειστή από ένα κάλυμμα που επισυνάπτεται σε ένα κλειδί που ονομάζεται το κλειδί ηχείου, και λειτουργεί με τον αριστερό αντίχειρα. Η vent –οπή και το κλειδί ηχείου φαίνεται στην εικόνα 20. Στην οπή είναι συνήθως παρέχεται ένα κοντό μεταλλικό κομμάτι σωλήνα που παρατείνει την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα, όπως δείχνεται, για να απωθεί την υγρασία από την ανάσα του παίκτη έτσι ώστε να μην φράξει την οπή.

Η κλίμακα τώρα ανεβαίνει κι άλλο, στην υψηλότερη κατάσταση από τις ανοιχτές οπές ξανά, όπως και πριν, αλλά με το κλειδί ηχείου ανοιχτό. Η βασική κλίμακα ξεκινάει με μια «D5» σε αυτή την κατάσταση και φτάνει σε μια «C6». Από εδώ και πέρα χρησιμοποιείται ο τρίτος ιδιορυθμός. Η παραγωγή αυτού του ιδιορυθμού βοηθείται από το άνοιγμα μιας από τις οπές των δακτύλων, αυτή που βρίσκεται πάνω από την οπή ηχείου. Μία δακτυλοθέτηση σαν κι αυτή λέγεται σταυρωτή-δακτυλοθέτηση (cross fingering).

Κατασκευή του κλαρίνου

Το μοντέρνο κλαρίνο χωρίζεται σε πέντε τμήματα: το επιστόμιο, τον σωλήνα, την επάνω ένωση, την κάτω ένωση, και την καμπάνα. Το επιστόμιο γενικά φτιάχνεται από σκληρό λάστιχο, πλαστικό και καμιά φορά γυαλί. Τα υπόλοιπα τμήματα γενικά φτιάχνονται από ξύλο ή στις λιγότερο ακριβές εκδοχές τους, από πλαστικό. Ο σωλήνας είναι το μικρού μήκους κομμάτι που συνδέει το επιστόμιο στην επάνω ένωση. Οι επάνω και κάτω ενώσεις, κουβαλάνε τον μηχανισμό των κλειδιών και έχουν τις βασικές έξι τρύπες, τρεις σε κάθε τμήμα, καθώς οι οπές καλύπτονται από τα δάκτυλα. Η καμπάνα είναι ένα ξεχωριστό τμήμα που συνδέεται στην κάτω ένωση. Δεν έχει ούτε οπές, ούτε κλειδιά. Ο σωλήνας του κλαρίνου δεν είναι κυλινδρικό σε όλο το μήκος του. Η κυλινδρική περιοχή ξεκινάει στα περίπου 4 εκατοστά από την άκρη του επιστομίου και εκτείνεται περίπου στα μισά της κάτω ένωσης με διάμετρο περίπου 1.5 εκατοστά. Από αυτό το σημείο μεγαλώνει προς τα έξω σε μια διάμετρο των 5.7 εκατοστών στο τέλος της καμπάνας.

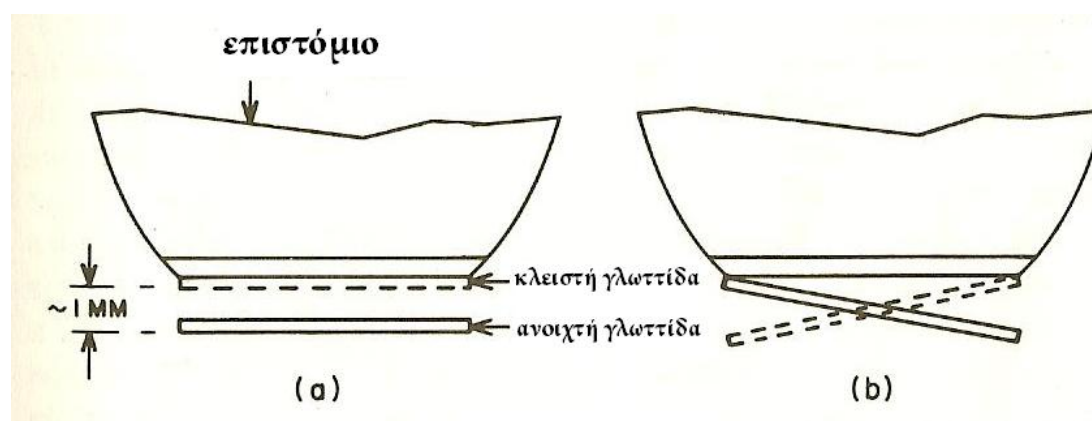
Όπως με τα φλάουτα, υπάρχει μια οικογένεια κλαρίνων διάφορων μεγεθών. Τα περισσότερα τους είναι όργανα μετατόπισης, με δακτυλοθετήσεις ίδιες με τις νότες που γράφονται αλλά ακούγονται διαφορετικά ανάλογα με το μέγεθος τους. Το πιο σύνηθες μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το κλαρίνο σε Gb του οποίου η ηχητική έκταση είναι από D3 σε Bb6, αλλά γράφονται έναν τόνο πιο ψηλά. Το κλαρίνο σε A είναι ένα ημιτόνιο χαμηλότερα από το Gb όργανο. Έτσι, ακούγεται μια μικρή τρίτη πιο χαμηλά από ότι γράφεται. Το μπάσο κλαρίνο ακούγεται μία οκτάβα πιο χαμηλά από το Bb όργανο, και το Eb κλαρίνο μια τετάρτη ψηλότερα.

Η συμπεριφορά της γλωττίδας

Η γλωττίδα του κλαρίνου, μαζί με το επιστόμιο, αποτελούν ζωτικό κομμάτι του οργάνου. Η επίπεδη όψη της γλωττίδας στερεώνεται κατά την επίπεδη έκταση του επιστομίου, το υπόλοιπο της γλωττίδας περισσεύει προς τα μπρός, όπως βλέπουμε στην εικόνα 20, ούτως ώστε η άκρη της γλωττίδας είναι κανονικά περίπου ένα χιλιοστό του μέτρου μακριά από την άκρη του επιστομίου. Αυτό φαίνεται επίσης στην εικόνα 21 (α) όπου παρατηρούμε μια εικόνα των άκρων της γλωττίδας και του επιστομίου. Όταν παίζεται το όργανο, το κάτω χείλος, μαζί με την πίεση του αέρα

μέσα στο στόμα, σπρώχνει την γλωττίδα στο μισό περίπου αυτής της απόστασης. Η γλωττίδα τότε δονείται γύρω από αυτή τη θέση. Για απαλούς τόνους η άκρη της γλωττίδας ποτέ δεν ακουμπάει το επιστόμιο. Καθώς αυξάνεται η πίεση φυσήματος, το πλάτος της δόνησης της γλωττίδας αυξάνει έως ότου για δυνατούς τόνους η άκρη της γλωττίδας είναι απέναντι της άκρης του επιστομίου για περίπου μισό σε κάθε κύκλο

Το κλαρίνο μπορεί να φυσηχτεί με ένα τεχνητό στόμιο, που αποτελείτο από ένα κουτί σφραγισμένο στο οποίο επισυνάπτεται το επιστόμιο και συνδέεται σε μια παροχή αέρα κάτω από πίεση. Ένα κομμάτι μαλακού υλικού συναρμολογείται στο κουτί και πιέζεται κόντρα στην γλωττίδα για να εξομοιώσει τα χείλη του παίκτη. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στον κλαρίνο να ακούγεται επ'αόριστον με αμετάβλητο τόνο (ένας τέτοιος τόνος γίνεται ενοχλητικός μετά από λίγο). Ένα παράθυρο τοποθετείται στο τεχνητό στόμιο ώστε να μπορούμε να παρακολουθούμε την γλωττίδα όσο δονείται.



Εικόνα 21: Όψη της γλωττίδας και του επιστομίου. (α) Κανονική δόνηση του άκρου της γλωττίδας για δυνατούς τόνους. (β) Ανεπιθύμητοι τύποι κίνησης που παράγουν ένα «στρίγκλισμα»

Με αυτή την διάταξη, επιτηρώντας την με ένα στροβοσκόπιο, βλέπουμε πως η γλωττίδα απλά ανοίγει και κλείνει και εισάγει ριπές αέρα στο επιστόμιο κάθε φορά που ανοίγει. Η κανονική κίνηση της γλωττίδας φαίνεται στην εικόνα 21 (α). Η άκρη της γλωττίδας κουνιέται πάνω και κάτω όπως δείχνεται, όλα τα κομμάτια κινούνται σχεδόν με το ίδιο πλάτος και την ίδια φάση.

Μερικοί παίκτες κλαρίνου έχουν την εντύπωση ότι μόνο οι γωνίες της γλωττίδας δονούνται. Ο λόγος για αυτή την πεποίθηση είναι ότι μπορεί να αποδειχτεί αν πάρουμε το λάθος άκρο του επιστομίου και ρουφάμε αντί να φυσάμε. Όταν γίνει αυτό, η γλωττίδα θα παρατηρηθεί να δονείται στις γωνίες της. Όπως και να 'χει, η

δόνηση που υφίσταται υπό αυτές τις συνθήκες, όπως παρατηρούμε με το στροβοσκόπιο, φαίνεται στην εικόνα 21 (β) και είναι μια περιστροφή πέρα δώθε γύρω από τον κεντρικό άξονα της γλωττίδας. Αυτή η δόνηση είναι υψηλής συχνότητας και ακούγεται σαν ένας από τα δυσάρεστα «στριγκλίσματα» στα οποία είναι επιρρεπής το κλαρίνο. Δεν ακούγεται άμα παίζεται το όργανο κανονικά.

Η περιστροφική δόνηση που μόλις περιγράφηκε δεν είναι η μόνη πηγή «στριγκλισμάτων». Υπάρχουν υψηλών συχνοτήτων ιδιορυθμοί στην αέρια στήλη, και η γλωττίδα μπορεί να τους διεγείρει με τον ίδιο τρόπο που διεγείρει τον θεμέλιο, δονούμενη με τον κανονικό της τρόπο που βλέπουμε στην εικόνα 21 (α). Επιπροσθέτως, η γλωττίδα έχει συχνότητα ιδιορυθμού στους περίπου 2000 με 3000 κύκλους το δευτερόλεπτο, κι εξαρτάται από το πόσο ελεύθερη είναι να δονηθεί στο στόμα του παίκτη, και μπορεί να δονηθεί με τον κανονικό τρόπο σε αυτή τη συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια ολόκληρη οικογένεια από «στριγκλίσματα». Η αντίσταση απόσβεσης που προέρχεται από τα χείλη του παίκτη που πιέζουν έναντι της γλωττίδας είναι βασική για την υπόταξη της τάσης να παράγει τέτοια «στριγκλίσματα». Αυτό μπορεί να φανεί άμα προσπαθήσουμε να παίζουμε το κλαρίνο με τα δόντια, παίζοντας έναντι της γλωττίδας αντί για τα χείλη. Το αποτέλεσμα θα είναι δυσάρεστο.

Στην κλειστή θέση, η τακτοποίηση της γλωττίδας έναντι του επιστομίου είναι πολύ σημαντική. Κάθε διαρροή αέρα μέσα στο όργανο σε αυτό το κομμάτι του κύκλου το κάνει δυσκολότερο να παίζει, αφού περισσότερος αέρας ρέει στο επιστόμιο όταν η πίεση του είναι χαμηλή παρά όταν η πίεση του είναι μεγάλη. Αυτό είναι απλά αντίθετο στην κατάσταση που χρειάζεται για να διατηρηθούν δονήσεις της αέριας στήλης, και σημαίνει ότι η ισχύς απορροφάται από την στήλη αντί για να ενισχύεται. Εάν το καμπύλωμα του lay του επιστομίου δεν είναι σωστό, η γλωττίδα δεν θα ταιριάζει σωστά στην κλειστή της θέση και ο αέρας θα μπορεί να διαρρέει από όλες τις μεριές. Αυτός ο παράγοντας είναι σημαντικός λόγω των διαφορών μεταξύ των επιστομίων. Λίγα χιλιοστά διαφορά στην άκρη του επιστομίου και θα έχουμε σημαντικές διαφορές στον τρόπο που παίζει.

Επιπροσθέτως, αν η γλωττίδα είναι στραβωμένη στην άκρη της ώστε δεν στέκεται επίπεδη έναντι του επιστομίου στην κλειστή της θέση, μια διαρροή θα υπάρξει. Από την στιγμή που οι γλωττίδες έχουν φτιαχτεί από ένα καλάμι που είναι ευπαθής σε υγρασία, όλα τους στραβώνουν σε κάποιον βαθμό όταν παίζονται. Αυτό

το στράβωμα δεν θα δημιουργήσει μόνο διαρροή αλλά θα επηρεάσει και την ποιότητα των τόνων. Η φυσική ποικιλία στην κατασκευή διαφόρων κομματιών καλαμιού, κάνει τις κάμπεις και τα στραβώματα μη προβλέψιμα για κάθε ξεχωριστή γλωττίδα. Αυτό σημαίνει ότι μια καλή γλωττίδα βρίσκεται λιγότερο ή περισσότερο κατά τύχη, όπως ξέρουν καλά οι παίκτες του κλαρίνου. Υπάρχουν συσκευές που μετράνε την ακαμψία της γλωττίδας του κλαρίνου, αλλά ένα τέτοιο μέτρο θα υποδείκνυε τίποτα παραπάνω από το αν μπορούμε να παίζουμε με την κάθε γλωττίδα, δεν θα έδινε όμως πληροφορίες για το πόσο καλά μπορεί να παίξει.

Το σαξόφωνο

Το σαξόφωνο είναι υβριδικού τύπου όργανο. Συνίσταται από μια μονή γλωττίδα σε ένα επιστόμιο όπως αυτή του κλαρίνου, συνδεδεμένο με έναν ευρύ κωνικό χάλκινο σωλήνα. Υπερφυσάει την οκτάβα, όπως το όμποε και το μπάσον, αλλά γενικά έχει την ίδια δακτυλοθεσία με το κλαρίνο. Διατίθεται σε πέντε μεγέθη, με το χαμηλότερο σε Aab1 (μπάσο) προς το υψηλότερο σε Ab3 (σοπράνο). Το σοπράνο σαξόφωνο είναι ίσιο, θυμίζει το όμποε. Τα άλλα μοντέλα είναι σπειρωτά για να κρατάνε το συνολικό τους μήκος εντός του διαχειρίσιμου μεγέθους. Το μπάσο σαξόφωνο έχει κάθετη περιστροφή 360 μοιρών στην καμπύλη του γι αυτό τον λόγο όπως φαίνεται και στην εικόνα 22



Εικόνα 22: Το μπάσο σαξόφωνο. Παρατηρήστε την κάθετη περιστροφή της καμπύλης του.

1.5.5 Ηχητική ακτινοβολία στα ξυλόφωνα

Παίζοντας οποιοδήποτε από τα όργανα με γλωττίδα, ο παίχτης παράγει ένα στάσιμο κύμα μέσα στο όργανο με ένα δεσμό πίεσης στο άκρο της γλωττίδας και μια κοιλία πίεσης περίπου στην πρώτη ανοιχτή οπή. Η ισχύς που δίνεται με το φύσημα διατηρεί μέσα στο όργανο τις ταλαντώσεις του στάσιμου κύματος. Η περισσότερη από την ισχύ χρησιμοποιείται για να υπερκαλύψει την τριβή της δονούμενης αέριας στήλης με τα τοιχώματα του σωλήνα. Ο ήχος ακτινοβολείται διαμέσου των ανοιχτών οπών και το μεγαλύτερο μέρος της ηχητικής ισχύος εξέρχεται από την πρώτη ανοιχτή οπή κοντά στο επιστόμιο και η περισσότερη από την εναπομένουσα από την δεύτερη ανοιχτή. Η πραγματική ηχητική ισχύς που ακτινοβολείται από τα ξυλόφωνα είναι μόνο ένα με δύο τις εκατό της πραγματικής ισχύος που πρέπει να εισέλθει στο όργανο για να διατηρήσει τις ταλαντώσεις του στάσιμου κύματος. Όπως στα περισσότερα μουσικά όργανα το ενεργειακό ισοζύγιο από άποψη απόδοσης είναι πολύ μικρό. Σε κάθε περίπτωση μόνο μικρή ισχύς χρειάζεται για να έχει ένας ήχος μια λογική ένταση. Συνεπώς η απόδοση δεν είναι σημαντικός παράγοντας.

Όταν ένα ξυλόφωνο παίζεται, κάποιος ακούει φυσικά το ακτινοβολούμενο κύμα και όχι το στάσιμο κύμα του εσωτερικού του οργάνου. Οι κλαρινίστες έχουν μερικές φορές την ψευδαίσθηση ότι ο ήχος αρχίζει από το επιστόμιο και ταξιδεύει όλο τον σωλήνα, όμως αυτό δεν είναι αληθές. Εκτός αν όλες οι τονικές οπές είναι κλειστές, η καμπάνα δεν συνεισφέρει σαν σημείο εξόδου του ήχου. Για να το αποδείξουμε αυτό, η καμπάνα του κλαρινέτου μπορεί να αφαιρεθεί τελείως ή να καλυφθεί αεροστεγώς από ένα φελλό χωρίς καμία ιδιαίτερη αλλαγή στον τόνο ή στην ηχηρότητα εκτός από τις δύο χαμηλότερες νότες κάθε κατάσταση. Όμοια η καμπάνα στο μπάσο (πνευστό όργανο) μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς σημαντική αλλαγή του τόνου του οργάνου για τις υψηλότερες νότες. Στα χάλκινα όργανα, όλη η ηχητική ενέργεια εξέρχεται από την καμπάνα, για όλες τις νότες.

1.5.6 Τονισμός και συντονισμοί στα ξύλινα πνευστά

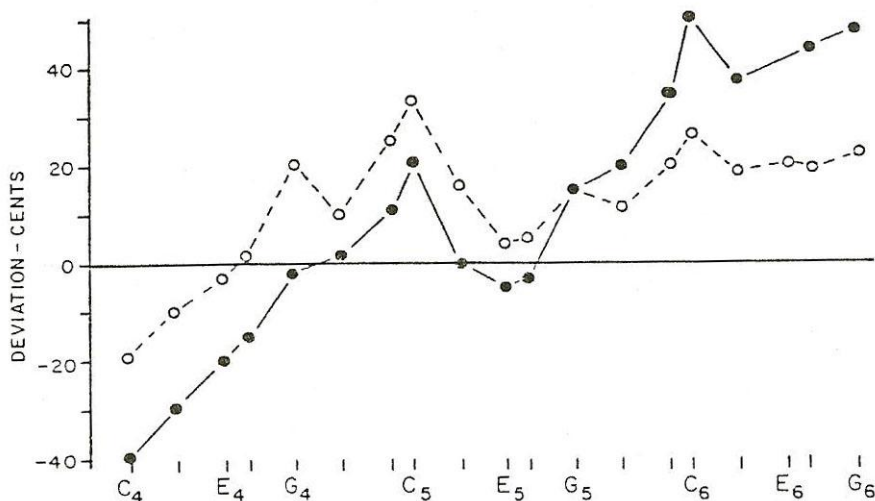
Τα ξυλόφωνα όπως κατασκευάζονται είναι μόνο κατά προσέγγιση οι κύλινδροι ή οι κώνοι πάνω στους οποίους είναι βασισμένα. Η απόκλιση από αυτά τα απλά μουσικά σχήματα είναι πολύ σημαντική μουσικά, αφού επηρεάζει την μουσική ποιότητα του οργάνου. Η βασική κλίμακα των έξι οπών – επτά νοτών (μαζί με τις προστιθέμενες οπές) χρησιμοποιείται σε όλα τα όργανα για τις δύο πρώτες κλίμακες και διαμέσου των σταυρωτών δακτυλισμών για τις παραπάνω κλίμακες. Αυτή η διαδικασία είναι εφικτή μόνο για αέρινες στήλες που περιέχουν κυλινδρικό ή κωνικό σχήμα. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά, επίσης αποδεικνύεται από πρακτικής άποψης γιατί μόνο αυτά τα σχήματα μπόρεσαν και επέζησαν της εξέλιξης των ξυλόφωνων. Για κάθε άλλο σχήμα αέριας στήλης είναι αδύνατο να χρησιμοποιούμε την ίδια σειρά από οπές για δύο διαφορετικές κλίμακες. Εάν οι οπές είναι έτσι τοποθετημένες ώστε να είναι κουρδισμένη μια κλίμακα, θα είναι ακούρδιστη η επόμενη κλίμακα. Έτσι, η κάθε απόκλιση των ξυλόφωνων από το κυλινδρικό ή κωνικό σχήμα θα σημαίνει ότι μια τονική οπή χρειάζεται σε γενικές γραμμές να έχει δυο διαφορετικές θέσεις για να είναι σωστή σε δύο κλίμακες. Συνεπώς, για να χρησιμοποιηθεί η ίδια οπή για τις δυο κλίμακες πρέπει να ικανοποιούνται διάφορες απαιτήσεις.

Το φλάουτο, για παράδειγμα, είναι διαφορετικό σε μια πληθώρα χαρακτηριστικών από ένα απλό ανοιχτό σωλήνα. Για όλες τις νότες εκτός από τη χαμηλότερη το ένα άκρο από τον ταλαντευμένο θύλακα αέρα είναι μια ανοιχτή πλάγια οπή του σωλήνα. Το τάπωμα για αυτή την οπή είναι ανοιχτό και αυτό έχει επίδραση στην ταλάντωση της αέριας στήλης. Το πραγματικό σχήμα είναι λοιπόν αρκετά πιο περίπλοκο ακουστικά από ότι για απλή ανοιχτή οπή. Όμοια το άλλο άκρο της αέριας στήλης είναι το επιστόμιο που λίγο πολύ καλύπτεται από το χείλη. Στην περίπτωση του φλάουτου ανάμεσα στα δυο άκρα υπάρχει ένας αριθμός από οπές που κλείνουν με τα πώματα που οδηγούνται από κλειδιά. Αυτά προσθέτουν επιπλέον όγκο σε αυτή την περιοχή συγκρινόμενο με τον επίπεδο σωλήνα. Το μήκος του φλάουτου ανάμεσα στο επιστόμιο και στο ανοιχτό άκρο με όλες τις οπές κλειστές είναι τέτοιο ώστε να ηχεί C#4 όπως η βασική. Ο επιπλέον όγκος προστίθεται από τις κλειστές οπές μαζί με την επίδραση από τα χείλη και το επιστόμιο και τελικά η βασική πάει κάτω ένα ημιτόνιο στο C4.

Οι συντονισμοί αυτού του πολύπλοκου συστήματος έχουν μετρηθεί από πειράματα εξωτερικής διέγερσης στην οποία η αέρια στήλη τέθηκε σε δόνηση από τον ήχο ενός εξωτερικού μεγαφώνου και οι δονήσεις της (αέριας στήλης) ανιχνεύτηκαν μέσω μικροφώνου. Στην περίπτωση του φλάουτου, το μικρόφωνο τοποθετείται στον φελλό και στην ένωση κεφαλής. Όταν οι συχνότητες των δυο πρώτων συντονιστικών ρυθμών του φλάουτου μετρούνται, βρίσκεται ότι διαφέρουν από τις συχνότητες που αναμένει κανείς λόγω του σωλήνα. Επιπλέον οι διαφορές δεν είναι ίδιες στις δύο κλίμακες, οι συχνότητες των ρυθμών στην παραπάνω κλίμακα είναι κάτι παραπάνω από το διπλάσιο της κάτω κλίμακας.

Η εικόνα 22 δείχνει τα αποτελέσματα τέτοιων μετρήσεων σε φλάουτο. Οι διαφορές είναι ζωγραφισμένες στην κατακόρυφη διεύθυνση σαν διαφορές εκατοστών των ιδιορυθμών από τις τιμές που πρέπει να έχουν. Η συνεχής γραμμή στην εικόνα 22 είναι για τους ιδιορυθμούς που βρίσκονται με την παραπάνω μέθοδο και απέχουν περίπου μισό ημιτόνιο από τις πραγματικές τιμές. Η πάνω κλίμακα είναι πολύ πιο αιχμηρή σε σύγκριση με την χαμηλότερη.

Όταν το όργανο παίζεται οι συχνότητες για τις νότες δίνονται από την διακεκομμένη καμπύλη στην εικόνα 10 και οι διαφορές φαίνεται να είναι μικρότερες. Ο λόγος είναι ότι ο παίχτης μπορεί να αλλάζει το κατά πόσο τα χείλη του καλύπτουν το επιστόμιο και αυτή η αλλαγή στην συχνότητα παιξίματος προκαλείται από την αλλαγή στην ακουστική μάζα του αέρα στο επιστόμιο. Η συνεχής γραμμή στην εικόνα 22 έχει φτιαχτεί με σταθερό το ποσοστό κάλυψης του επιστομίου από τα μηχανικά χείλη. Όμως όταν το όργανο ηχεί, ο παίχτης καλύπτει όλο και πιο πολύ το επιστόμιο καθώς η κλίμακα ανεβαίνει. Η περισσότερη κάλυψη βοηθά σε καλύτερο τόνο, με αποτέλεσμα ο τόνος να γίνεται πιο επίπεδος. Το τάπωμα στην σύνδεση κεφαλής κρατάει τις υψηλές νότες από το να γίνουν τόσο επίπεδες. Η συχνότητα μιας δεδομένης νότας μπορεί να επηρεαστεί από περίπου μισό ημιτόνιο μέχρι και $\frac{1}{4}$ του ημιτονίου κάτω, αλλάζοντας την ταχύτητα φυσήματος και την διεύθυνση, αλλά κάτω από συνθήκες κανονικού παιξίματος είναι ανάμεσα στα μερικά εκατοστά της συχνότητας συντονισμού. Ο σχεδιασμός του μοντέρνου φλάουτου είναι να φέρει τους συντονισμούς πολύ κοντά στις συχνότητες που θεωρητικά αναμένονται να είναι μουσικά χρήσιμες.

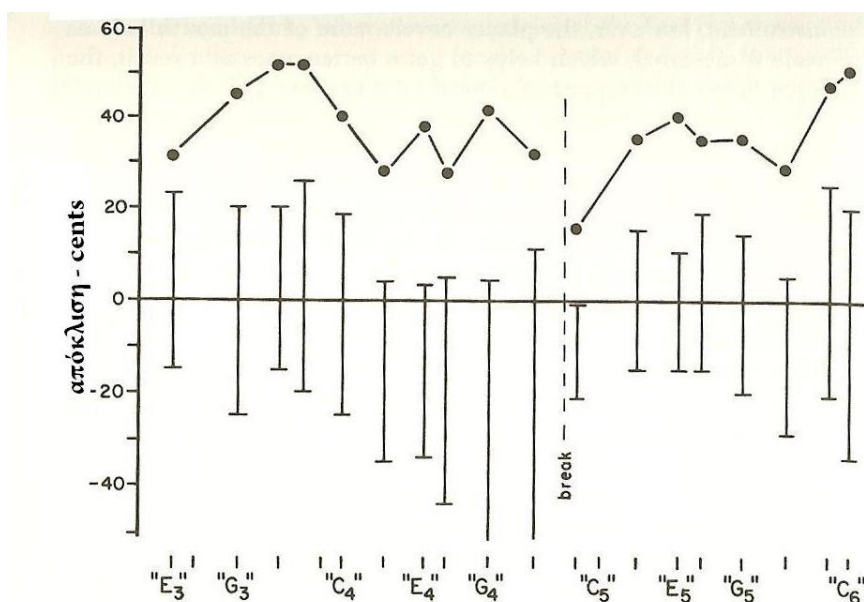


Εικόνα 22 – Αποκλίσεις σε εκατοστά από τις συχνότητες που παράχθηκαν με εξωτερική διέγερση και τις ηχούμενες συχνότητες ενός φλάουτου που παίζει σύμφωνα με το 12τονο διάστημα. Η συνεχής γραμμή δείχνει τις συχνότητες που μετρήθηκαν με τη μέθοδο εξωτερικής διέγερσης ενώ η διακεκομμένη δείχνει τις ηχούμενες συχνότητες κατά το φύσημα.

Το κλαρίνο έχει προβλήματα παρόμοιου χαρακτήρα. Ο σχεδιασμός του έχει επίδραση κυρίως στις χαμηλές νότες. Το μήκος του Bb οργάνου είναι 67 εκατοστά (26.3 ίντσες) από την αρχή του επιστομίου μέχρι το τέλος της καμπάνας. Ένας απλός κυλινδρικός σωλήνας που προσδένεται σε ένα επιστόμιο κλαρίνου με κανονισμένο το μήκος του για να δίνει την ίδια συχνότητα συντονισμού όπως την χαμηλότερη του ίδιου του κλαρίνου πρέπει να έχει μήκος 60 εκατοστά (23.5 ίντσες). Έτσι έχουμε περίπου 7 εκατοστά διαφορά για να πετύχουμε την ίδια συχνότητα. Ο λόγος γι αυτό είναι η μεγάλη διάμετρος του κανονικού οργάνου. Μετρήσεις των συχνοτήτων συντονισμού του κλαρίνου έχουν γίνει με διάφορους τρόπους διέγερσης και έδειξαν ότι όλες οι συντονιστικές συχνότητες είναι παραπάνω από τις συχνότητες του παιχνίματος. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 23 όπου οι κύκλοι δίνουν σε εκατοστά τις αποκλίσεις των συντονιστικών συχνοτήτων από αυτές της κανονικής κλίμακας και οι κατακόρυφες γραμμές δίνουν προσεγγιστικά τις περιοχές των πραγματικά παιζόμενων συχνοτήτων. Το διάκενο ανάμεσα στις καταστάσεις (registers) δείχνεται με την κατακόρυφη γραμμή κουκίδων. Οι συχνότητες των συντονισμών στην υψηλότερη κατάσταση δεν είναι ακριβώς τρεις φορές αυτό του χαμηλού, λόγω του φαινομένου των καλυπτόμενων τονικών οπών. Στο κλαρίνο μια ακόμα πολυπλοκότητα ξεκινάει από το γεγονός ότι το επιστόμιο δεν έχει κυλινδρικό σώμα

μέχρι την άκρη του, αλλά έχει σφηνοειδή μορφή για το μέρος που είναι στην άκρη της γλωττίδας.

Οι παιζόμενες συχνότητες του κλαρίνου είναι χαμηλότερες από ότι οι ιδιορυθμοί λόγω της συμπεριφοράς της γλωττίδας. Η άκρη της είναι πολύ λεπτή και ελαφριά και η μετατόπιση της ακολουθεί αρκετά τις αλλαγές της πίεσης του επιστομίου. Όμως το φαινόμενο απόσβεσης των χειλιών του οργανοπαίκτη το κάνει να υστερεί λίγο πίσω από αυτές τις αλλαγές πίεσης και μπορεί να δειχθεί ότι αυτό προκαλεί το γεγονός ότι η παιζόμενη συχνότητα είναι κάτω από τη συχνότητα συντονισμού. Ο παίκτης μπορεί να ελέγχει το χάσμα αλλάζοντας την πίεση στα χείλη. Έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της συχνότητας του παιξίματος που δείχνεται στην εικόνα 23.



Εικόνα 23: Απόκλιση σε μόρια από τους ιδιορυθμούς και τις ηχούμενες συχνότητες ενός κλαρίνου από τις σύμφωνα με το 12τονο διάστημα συχνότητες, για διάφορες νότες της κλίμακας. Οι συνεχόμενες γραμμές δείχνουν συχνότητες που μετρήθηκαν με διέγερση μέσω τριχοειδούς σωλήνα. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το εύρος των ηχούμενων συχνοτήτων

Το όμποε και το μπάσουν έχουν πολυπλοκότερες παρόμοιες με αυτού του φλάουτου και του κλαρίνου. Καλυμμένες τονικές οπές είναι παρούσες στις περισσότερες νότες. Ο σωλήνας των δυο οργάνων δεν είναι απλός κώνος, τα διάφορα κομμάτια του μπάσουν για παράδειγμα έχουν κωνικούς σωλήνες με διαφορετική γωνία. Ακόμα, ο κώνος δεν είναι πλήρης μέχρι την άκρη αλλά διακόπτεται

συντομότερα, κομμένος στην άκρη εκεί που ενώνεται το επιστόμιο. Το μπάσο θα ήταν περίπου 30 εκατοστά μακρύτερο αν ο κόνος ήταν τέλειος. Αυτοί οι παράγοντες προκαλούν αποκλίσεις των συχνοτήτων συντονισμού και τις αναμενόμενες συχνότητες στις κλίμακες. Όπως στο κλαρίνο, ο παίκτης αντιμετωπίζει αυτά τα προβλήματα διαμέσου της πίεσης των χειλιών του πάνω στην γλωττίδα, με έναν όμοιο μηχανισμό.

Το μπάσουν επιδεικνύει την κακή απόδοση των ξυλόφωνων πολύ καλά. Πρακτικά, κάθε νότα αυτού του οργάνου είναι ξεκούρδιστη και χρειάζεται να κουρδιστεί με την βοήθεια των χειλιών. Στην πραγματικότητα, μερικές νότες μπορούν να αλλαχθούν μέχρι και τρία ημιτόνια. Αυτή η κατάσταση, μαζί με το κλείσιμο της μισής οπής που χρειάζεται για μερικές νότες, κάνει το μπάσουν ένα δύσκολο και μη συνεργάσιμο όργανο. Έκτος από την προσαρμογή κλειδιών το όργανο λίγο έχει αλλάξει τους τελευταίους αιώνες. Καμιά φορά ονομάζεται “Fossil” (απολίθωμα) και χρειάζεται ακόμα δουλειά για την ακουστική του βελτίωση.

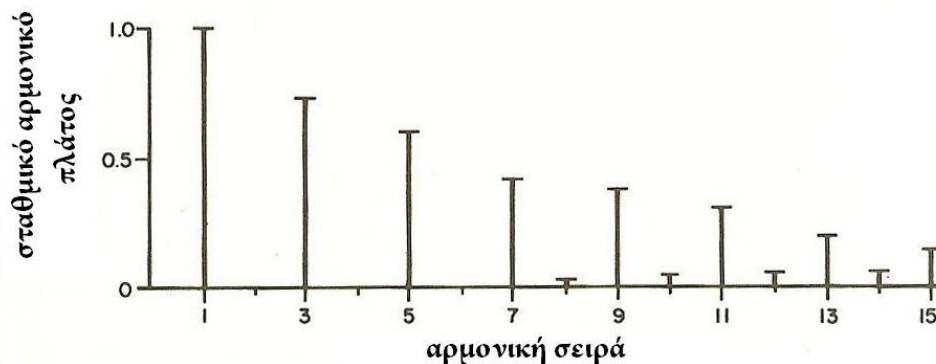
Ένας επιπλέον παράγοντας πολυπλοκότητας στα τονικά χαρακτηριστικά των ξυλόφωνων είναι το γεγονός ότι οι αέριες στήλες έχουν μέσα τους καθαρό αέρα μόνο όταν δεν παίζονται. Κατά το φυσιολογικό παίξιμο περιέχουν μείγμα αέρα με υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα από την αναπνοή του παίκτη. Η αναλογία των συστατικών αλλάζει κάθε φορά ανάλογα με το παίξιμο του παίκτη και μπορεί να αλλάξει κατά το μήκος του οργάνου ανάλογα με το ποσό του μήκους του οργάνου που χρησιμοποιείται. Επειδή η συχνότητα του ήχου είναι διαφορετική σε αυτά τα διάφορα στοιχεία, οι συντονιστικές συχνότητες του οργάνου συνεχώς θα αυξομειώνονται γύρω από τη μέση τιμή τους. Οι αποκλίσεις δεν είναι τόσο μεγάλες αλλά ο παίκτης πρέπει να τις αντιμετωπίσει.

Επιπροσθέτως, επειδή η ταχύτητα του ήχου σε ένα αέριο αλλάζει με την θερμοκρασία, οι συντονιστικές συχνότητες του οργάνου θα αλλάζουν ανάλογα καθώς θα θερμαίνεται η αναπνοή του παίκτη. Το φαινόμενο εξαρτάται από το πόσο μέρος του οργάνου είναι αρκετά πιο «επίπεδο» όταν παίζεται σε εξωτερικό χώρο μια κρύα μέρα απ' ότι σε ένα θερμαινόμενο αμφιθέατρο. Η αλλαγή της συχνότητας με την θερμοκρασία είναι περίπου 3% αύξηση ανά βαθμό αύξησης της εκατόβαθμης κλίμακας και δεν είναι καθόλου αμελητέο ποσό.

1.5.7 Τονική ποιότητα στα ξυλόφωνα

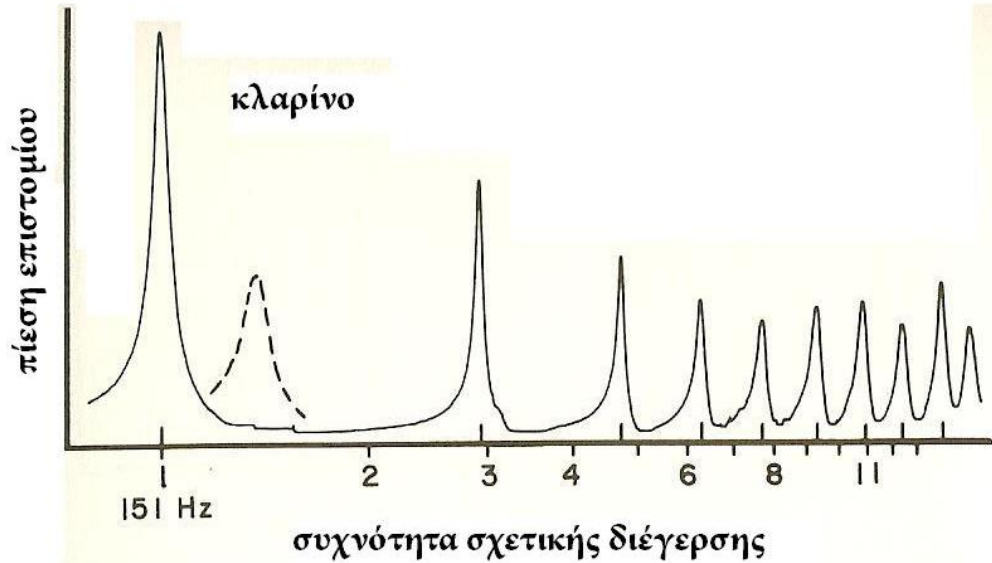
Οι αποκλίσεις των σωλήνων των ξυλοφώνων από τα απλά κυλινδρικά και κωνικά σχήματα δεν επηρεάζουν μόνο τον τόνο, μετατοπίζοντας τους υψηλούς συντονισμούς των αερίων στηλών, επηρεάζουν και την τονική ποιότητα. Όταν το κλαρίνο παίζεται μαλακά η γλωττίδα δεν ακουμπά το επιστόμιο, η κίνηση της είναι σχεδόν ημιτονοειδής και ο τόνος αρκετά φτωχός. Όταν η πίεση φυσήματος αυξάνεται ώστε να παράγονται ηχηροί τόνοι, η γλωττίδα είναι σε επαφή με το επιστόμιο λίγο περισσότερο από το μισό του κύκλου όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από την χρήση του στροβοσκοπίου. Αέρας μετά επιτρέπεται να εισέλθει μέσα στο επιστόμιο με τη μορφή γρήγορων παλμών και η ροή αέρα είναι μια μίξη μιας σταθερής (μέση τιμή) ροής συν μια πολύπλοκη δόνηση στην οποία όλοι οι αρμονικοί του θεμέλιου είναι παρόντες. Αυτοί οι αρμονικοί θα προκαλέσουν δονήσεις σε κάθε ταλάντωση της αέριας στήλης που βρίσκεται κοντά σε κάποιον ιδιορυθμό.

Για παράδειγμα στην εικόνα 24 δείχνεται μια καμπύλη συντονισμού για ένα μεταλλικό σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο του, που πάρθηκε με τη βοήθεια διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα. Οι ιδιορυθμοί είναι με μεγάλη ακρίβεια 3, 5, 7 κ.ο.κ φορές η θεμέλιος συχνότητα. Εάν το επιστόμιο του κλαρίνου με γλωττίδα τοποθετηθεί σε αυτόν τον μεταλλικό σωλήνα και μετρηθεί ξανά η νέα καμπύλη συντονισμού με την ίδια μέθοδο, θα πάρουμε μια καμπύλη παρόμοια με την προηγούμενη εκτός από τις μικρές αλλαγές στις θέσεις των υψηλών συντονισμών (πάνω από τον 11^ο αρμονικό). Αυτές οι αλλαγές οφείλονται στο εσωτερικό σχήμα του επιστομίου του κλαρίνου και δεν είναι τόσο σημαντικές για την παρούσα ανάλυση.



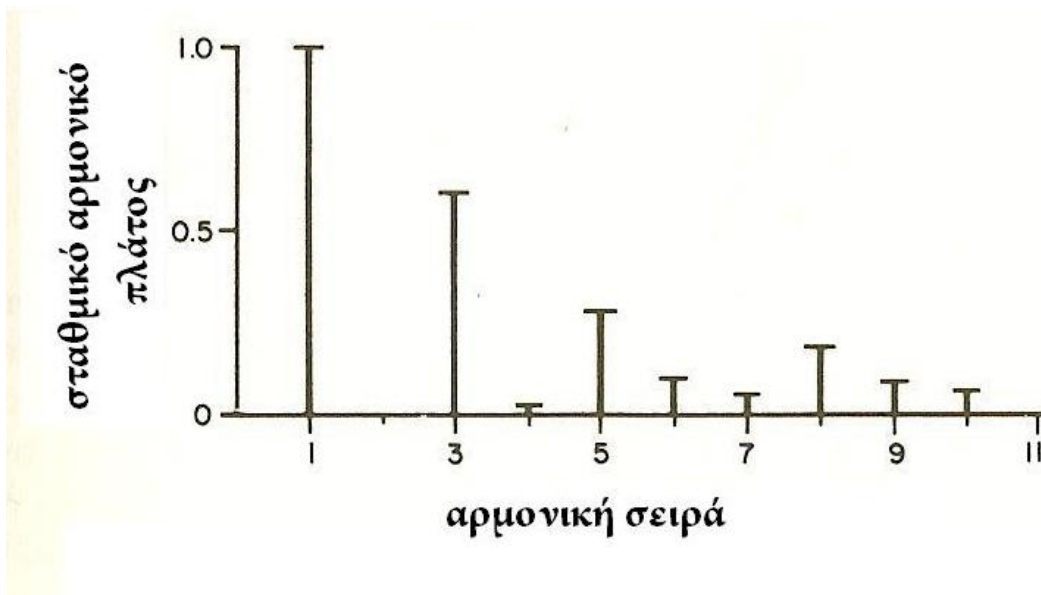
Εικόνα 24: Αρμονική δομή των εσωτερικών στάσιμων κυμάτων που παράγονται σε μεταλλικό σωλήνα εξοπλισμένο με ένα επιστόμιο κλαρίνου που ακούγεται μέσω φυσήματος. Το ακριβές πλάτος των αρμονικών έχει πολλαπλασιαστεί από τα νούμερα του ώστε να σχεδιαστεί το σταθμικό τους πλάτος που φαίνεται στην εικόνα.

Τώρα εάν φυσήξουμε το επιστόμιο με τον συνηθισμένο τρόπο ώστε να παραχθεί μία δόνηση στον μεταλλικό σωλήνα στην θεμέλιο συχνότητα του, ένα εσωτερικό στάσιμο κύμα θα κάνει την εμφάνιση του το οποίο εμπεριέχει κυρίως περιττούς αρμονικούς, αφού οι συχνότητες τους σχετίζονται με τους ιδιορυθμούς. Οι άρτιοι αρμονικοί έχουν μικρά πλάτη, αφού οι συχνότητες τους βρίσκονται στο ενδιάμεσο των συχνοτήτων συντονισμού. Στην εικόνα 25 φαίνεται η δομή των αρμονικών αυτού του στάσιμου κύματος. Το πλάτος κάθε αρμονικής έχει πολλαπλασιαστεί από το νούμερο της για να δοθεί το ειδικό βάρος (με βάρος) που δείχνεται στην εικόνα 25. Έτσι το ειδικό πλάτος του τρίτου αρμονικού είναι τρεις φορές το μετρούμενο πλάτος. Αφού μπορούμε να δείξουμε ότι όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του αρμονικού, τόσο καλύτερα ακτινοβολείται από το όργανο, έτσι το ειδικό πλάτος δίνει μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του πώς το ανθρώπινο αυτί θα αντιληφθεί την πραγματική δομή των αρμονικών. Επίσης κάνει τους αρμονικούς πιο αντιληπτούς στο γράφημα.

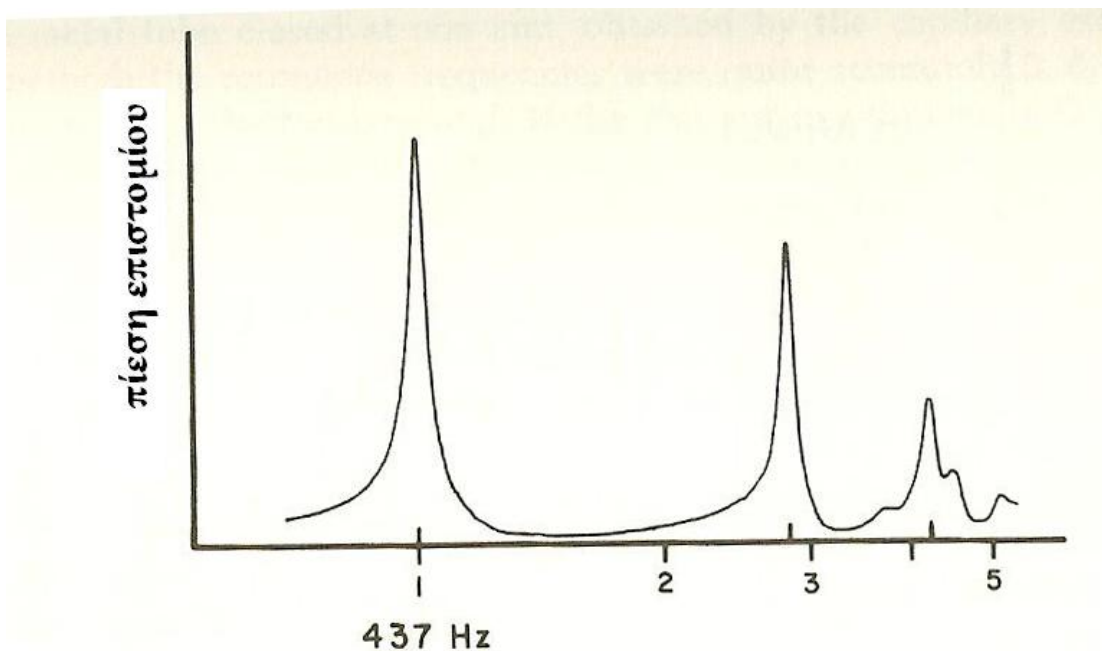


Εικόνα 25: Καμπύλες συχνότητας για τη νότα «E3» στο κλαρίνο. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την θέση του χαμηλότερου συντονισμού με την οπή *–vent* ανοιχτή.

Εάν χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα για να φτιάξουμε την καμπύλη συντονισμού του κλαρίνου, βρίσκουμε ότι αυτή διαφέρει σημαντικά από αυτή του κυλινδρικού μεταλλικού σωλήνα. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 26 για τη νότα «E3» στο κλαρίνο. Οι ιδιορυθμοί που δίνονται από τις κορυφές που αναπαρίστανται στην καμπύλη, όπως και προηγούμενα, από μικρές κατακόρυφες γραμμές ζωγραφισμένες πάνω από τον οριζόντιο άξονα. Οι συχνότητες των αρμονικών (σαν πολλαπλάσια του θεμέλιου) δίνονται από μικρές κατακόρυφες γραμμές ακριβώς κάτω από τον οριζόντιο άξονα. Μπορούμε να δούμε ότι οι ιδιορυθμοί απέχουν όλο και περισσότερο από τις συχνότητες των αρμονικών καθώς πάμε σε υψηλότερες τιμές. Η καμπύλη συντονισμού είναι «συμπιεσμένη» επειδή οι ιδιορυθμοί είναι χαμηλότεροι από τις αντίστοιχες συχνότητες των αρμονικών. Για τη νότα «E3», ο όγδοος αρμονικός είναι κοντά στον πέμπτο συντονισμό. Τώρα, εάν φυσήξουμε το κλαρίνο και η δομή των αρμονικών του εσωτερικού στάσιμου κύματος αναλυθεί, βρίσκουμε ότι ο όγδοος αρμονικός είναι αρκετά τονισμός σε αυτόν τον τόνο, όπως θα περίμενε κανείς, αφού βρίσκεται κοντά σε συντονισμό και αυτό δείχνεται στην εικόνα 27.



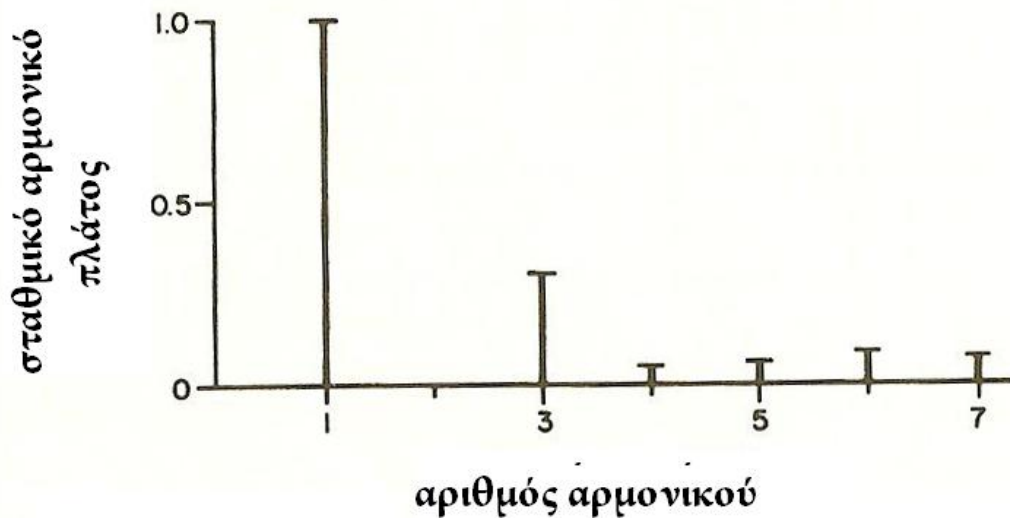
Εικόνα 26: Σταθμικό αρμονικό πλάτος στο εσωτερικό στάσιμο κύμα κλαρίνου που ηχεί σε «E3»



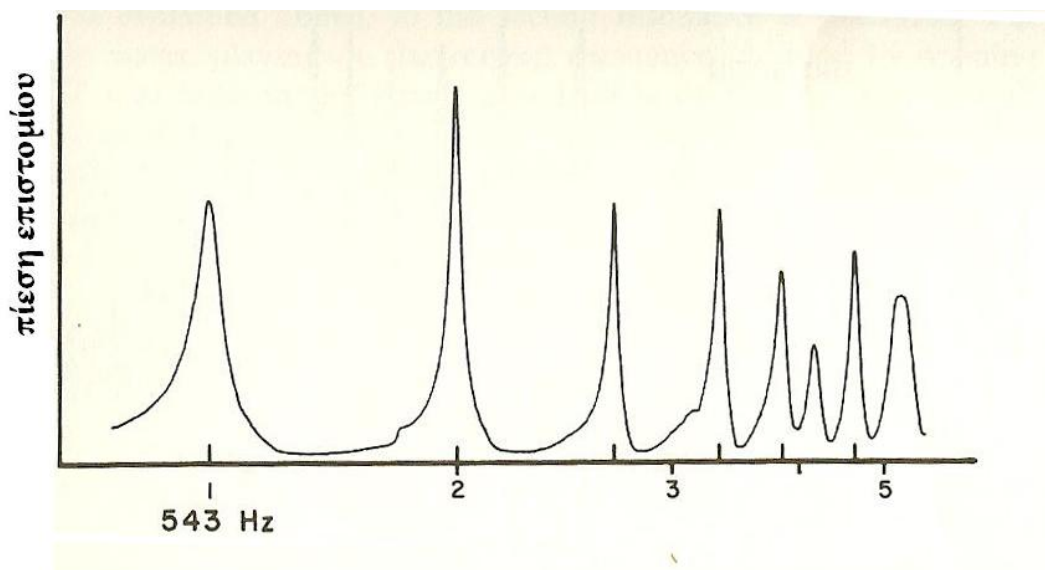
Εικόνα 27: Καμπύλες συντονισμού για τη νότα «A#4» στο κλαρίνο.

Καθώς η κλίμακα ανεβαίνει, οι συντονισμοί λιγοστεύουν. Για τη νότα «A#4» μόλις πριν το χάσμα από την υψηλότερη κατάσταση, υπάρχουν μόνο δύο καλοί συντονισμοί. Όπως φαίνεται στην εικόνα 28. Σαν συνέπεια, ο τόνος έχει λίγους ισχυρούς αρμονικούς, όπως φαίνεται στην εικόνα 29. Η έλλειψη αρμονικών σε αυτή την περιοχή είναι υπεύθυνη για την φτηνή ποιότητα των επονομαζόμενων “τόνων

λαιμού” (από την άποψη ότι πιο πολύ προσφέρει στο ηχόχρωμα ο λαιμός παρά το ίδιο το όργανο) του κλαρίνου.

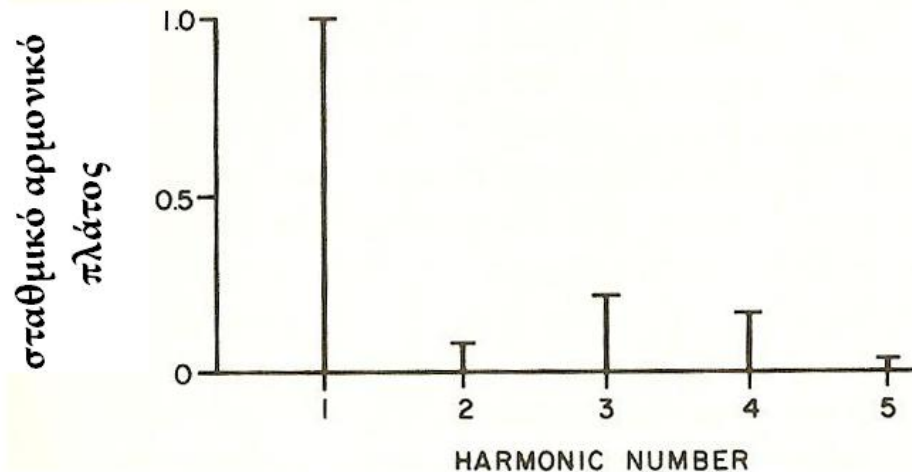


Εικόνα 28: Σταθμική αρμονική δομή του εσωτερικού στάσιμου κύματος σε κλαρίνο που ηχεί σε «Λα#4».



Εικόνα 29: Καμπύλες αρμονικών για τη νότα «D5» στο κλαρίνο.

Στην υψηλότερη κατάσταση πάνω από το διάκενο, υπάρχει μικρή ανταπόκριση ανάμεσα στις συχνότητες των αρμονικών και αυτές των συντονισμών όπως μπορεί να ειπωθεί πλέον από την εικόνα 30. Γι' αυτόν το λόγο, η ποιότητα του τόνου του κλαρίνου είναι διαφορετική στην υψηλότερη κατάσταση.

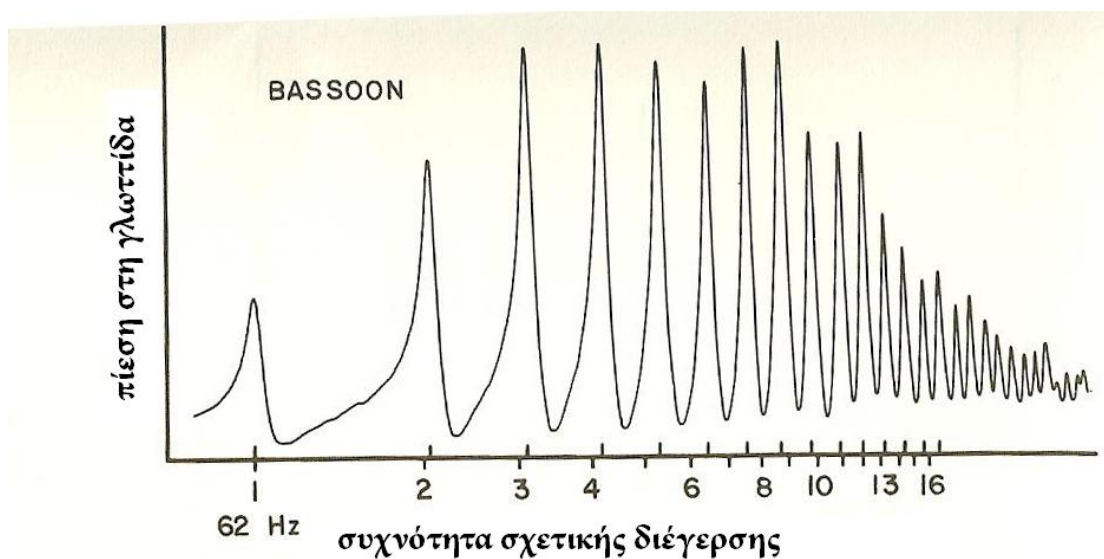


Εικόνα 30: Σταθμική αρμονική δομή του εσωτερικού στάσιμου κύματος στο κλαρίνο που ηχεί σε «Pε5».

Καμπύλες συντονισμού μπορούν να φτιαχτούν και για το μπάσουν χρησιμοποιώντας ξανά τη μέθοδο της διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα. Η καμπύλη για την χαμηλότερη νότα Bb1 του μπάσουν φαίνεται στην εικόνα 31. Εκεί φαίνονται περίπου δυο δωδεκάδες αρμονικών. Επιπλέον η καμπύλη συντονισμού είναι απλωμένη, δηλαδή οι συχνότητες των ιδιορυθμών είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες αρμονικές συχνότητες. Αυτή είναι η ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά από του κλαρίνου. Εάν το άπλωμα στο μπάσουν ή η συμπίεση στο κλαρίνο είναι σημαντικά στο ορθό παίξιμο τους ή εάν είναι κάτι τυχαίο, δεν έχει ακόμα διευκρινιστεί.

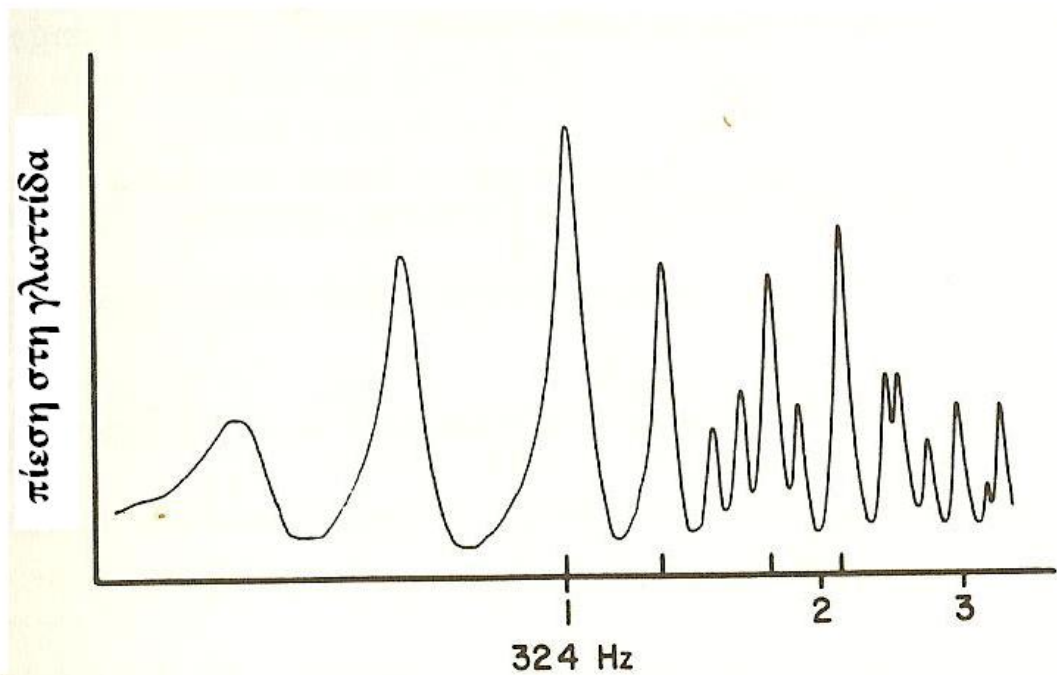
Καθώς η κλίμακα ανεβαίνει από τη χαμηλότερη νότα, οι καμπύλες συντονισμού γίνονται λιγότερο πολύπλοκες, από ότι φαίνεται στην εικόνα 30. Η συμπεριφορά είναι όμοια με αυτή των καμπυλών συντονισμού του κλαρίνου. Ο αριθμός των καλά καθορισμένων συντονισμών, γίνεται μικρότερος και καθώς ανεβαίνουμε σε συχνότητα, στο τέλος γίνεται δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς κορυφές και η καμπύλη συντονισμού, παίρνει την μορφή μικρών ακανόνιστων κορυφών. Για παράδειγμα στη νότα G2 του μπάσουν υπάρχουν τέσσερις καλές κορυφές συντονισμού, με συχνότητες αρκετά κοντά στις συχνότητες των αρμονικών. Για τη νότα F, μόλις πριν το χάσμα υπάρχει ένας μόνο ισχυρός συντονισμός, ξεχνώντας τη βασική, η καμπύλη συντονισμού γι' αυτή τη νότα φαίνεται στην εικόνα 31. Όπως μπορεί να δει κανείς από αυτή την καμπύλη, όλοι οι υψηλοί συντονισμοί είναι μικροί και οι συχνότητες τους δεν συμπίπτουν με τις συχνότητες των αρμονικών. Για τις

νότες πάνω από το χάσμα, το όργανο παίζεται στον δεύτερο συντονισμό. Για τις πρώτες τρεις νότες, μέχρι την G#3, ο χαμηλότερος συντονισμός εξασθενεί σε μέγεθος και μετατοπίζεται σε συχνότητα από την οπή που παρέχεται από το half holing, μια από τις τονικές οπές. Όπως έχει εξηγηθεί, έτσι διαλέγεται ο δεύτερος συντονισμός. Για τις επόμενες νότες, το παίξιμο στον δεύτερο συντονισμό βοηθιέται από το άνοιγμα μιας μικρής οπής στο σωλήνα. Αυτή η οπή ανοίγεται διαμέσου μιας μικρής προεξοχής σε σχήμα μανιταριού και σκεπάζεται από ένα τάπωμα (pad) που ελέγχεται από το κλειδί του αριστερού αντίχειρα που ονομάζεται κλειδί whisper, το οποίο είναι ανοιχτό για τη νότα A3 και πάνω.



Εικόνα 31: Καμπύλες συντονισμού για τη χαμηλότερη νότα, Σ1b1 στο μπάσσουν.

Ο δεύτερος συντονισμός χρησιμοποιείται για τις νότες μέχρι τη D4. Η επόμενη νότα E4 παίζεται με σταυρωτή δακτυλοθεσία, η οπή μειώνει το ύψος των δύο πρώτων συντονισμών και ενισχύει την δόνηση του οργάνου στον τρίτο συντονισμό. Αυτή η συμπεριφορά επιδεικνύεται από την καμπύλη συντονισμού για τη νότα Eb4 που φαίνεται στην εικόνα 32. Η καμπύλη αυτή επίσης δείχνει ότι δεν υπάρχουν συντονισμοί τοποθετημένοι ώστε να ενισχύουν τις υψηλές αρμονικές. Αυτό είναι ενδεικτικό των υψηλών νοτών των οργάνων. Εάν ένας συντονισμός συμπίπτει με έναν αρμονικό πάνω από τον θεμέλιο, αυτό μόνο τυχαία μπορεί να συμβεί.



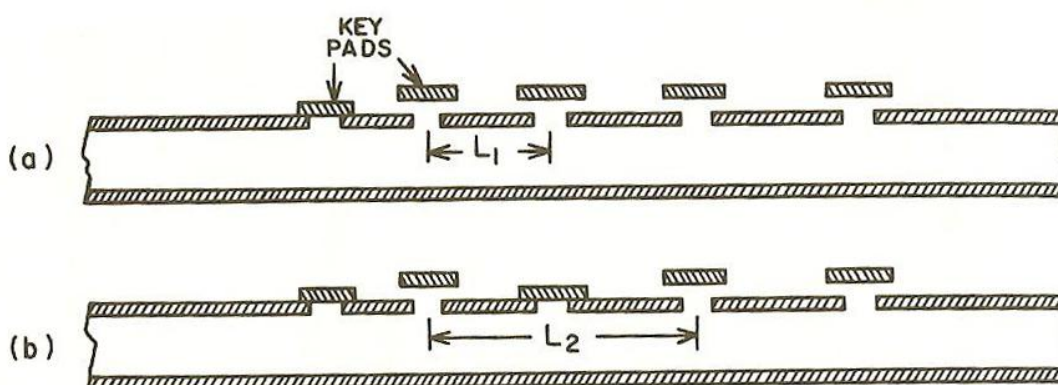
Εικόνα 32: Καμπύλες συντονισμού για σταυρωτή δακτυλοθεσία στη νότα E4 στο μπάσσουν.

Στο μπάσσουν, οι τονικές οπές είναι σχετικά μικρές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι το μέρος του οργάνου, πριν την πρώτη ανοιχτή οπή, έχει μια σημαντική επίδραση στους συντονισμούς του μέρους του οργάνου που παράγει τον τόνο, πολύ περισσότερο από τα άλλα ξυλόφωνα πνευστά. Ανοίγοντας ή καλύπτοντας μια τονική οπή στο χαμηλό μέρος του μπάσσουν, μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική αλλαγή στην τονική ποιότητα των υψηλών νοτών του οργάνου. Γι' αυτόν τον λόγο οι παίκτες του μπάσσουν έχουν έναν διαθέσιμο αριθμό δακτυλοθεσίας ώστε να βελτιώσουν την τονική ποιότητα ορισμένων τόνων.

Πολύ περισσότερη δουλειά χρειάζεται να γίνει στο μπάσσουν και στα άλλα ξυλόφωνα για να εξαχθούν οι σχέσεις ανάμεσα στη δομή του οργάνου, τις θέσεις των συντονισμών και την αρμονική δομή του τόνου. Σήμερα όχι μόνο έχουμε άγνοια για αυτές τις σχέσεις, αλλά δεν μπορούμε καν με φυσικούς όρους να ερμηνεύσουμε την διαφορά ενός «καλού» τόνου και «κακού» τόνου.

Στα πρώτα χρόνια των ξυλόφωνων οργάνων, σταυρωτές δακτυλοθεσίες χρησιμοποιούνταν για τους χρωματικούς τόνους. Εάν παίζουμε μια νότα στο όργανο, (χωρίς να χρησιμοποιήσουμε όλο το μήκος) και έπειτα κλείσουμε την οπή ακριβώς κάτω από την πρώτη ανοιχτή οπή, αφήνοντας τις υπόλοιπες οπές ανοιχτές, το τονικό ύψος του οργάνου πέφτει περίπου ένα ημιτόνιο. Όμως οι τόνοι που παράγονται με

αυτόν τον τρόπο έχουν φτωχή ποιότητα και η χρήση των σταυρωτών δακτυλοθεσιών έχουν πλέον εγκαταλειφτεί (εκτός από μερικές νότες του μπάσου). Αντίθετα οι χρωματικοί τόνοι παρέχονται από επιπρόσθετες τονικές οπές που έχουν ταπώματα (pads) και κλειδιά. Ο λόγος της φτωχής ποιότητας των τόνων των σταυρωτών δακτυλοθεσιών είναι η επίδραση στους υψηλούς ρυθμούς του οργάνου του μέρους του σωλήνα πριν από την πρώτη ανοιχτή οπή. Οι σταυρωτές δακτυλοθεσίες βάζουν μια μακρύτερη περιοχή του σωλήνα πριν την πρώτη ανοιχτή οπή, όπως φαίνεται στην εικόνα 33. Για την κανονική δακτυλοθεσία, ένα μήκος L_1 του σωλήνα είναι πριν την πρώτη ανοιχτή οπή, για τη σταυρωτή δακτυλοθεσία ένα μεγαλύτερο μήκος L_2 είναι πριν την πρώτη ανοιχτή οπή. Αυτά φαίνονται στην εικόνα 33 (α) και (β). Το αποτέλεσμα αυτού του μεγαλύτερου μήκους είναι να ωθήσει τους υψηλότερους ιδιορρυθμούς της αέρας στήλης ακόμα πιο μακριά από τις συχνότητες των αρμονικών από ότι είναι συνήθως. Έτσι το αρμονικό περιεχόμενο του τόνου μειώνεται περαιτέρω και αυτό οδηγεί σε πιο φτωχή ποιότητα.



Εικόνα 33: (α) Κανονική δακτυλοθεσία (β) σταυρωτή δακτυλοθεσία.

1.5.8 Άλλοι παράγοντες στους τόνους των ξύλινων πνευστών

Άλλος παράγοντας που επιδρά στην ποιότητα των τόνων που παράγονται είναι οι γλωττίδες, όπως κάθε παίκτης γνωρίζει. Μία γλωττίδα κλαρίνου, στην ανοιχτή της θέση μακριά από το επιστόμιο, μπορεί να δονηθεί στην υψηλή συχνότητα της οποίας η τιμή εξαρτάται από το ποσό της γλωττίδας που εκτείνεται πέρα από τα χείλη του οργανοπαίχτη και η οποία είναι συνήθως 2000Hz. Αυτό έχει την τάση να αυξάνει το πλήθος των αρμονικών των οποίων οι συχνότητες είναι κοντά σε αυτήν της γλωττίδας. Επιπλέον, στην κλειστή της θέση, ένα ελαφρό λύγισμα της άκρης της γλωττίδας μπορεί να αφήσει κομμάτια της γλωττίδας ελεύθερα να δονούνται, διότι δεν έχουν επαφή με το επιστόμιο. Υψηλής συχνότητας δονήσεις σε αυτές τις περιοχές της γλωττίδας μπορεί να παραχθούν σε μέρος του κύκλου.

Γενικά, οι γλωττίδες των ξυλόφωνων έχουν μια αρκετά πολύπλοκη και απρόβλεπτη συμπεριφορά και είναι μια διαρκής πηγή προβλημάτων. Αρκετή ανάλυση χρειάζεται ακόμα πριν κατανοήσουμε πλήρως την συμπεριφορά της. Συνθετικά υλικά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για γλωττίδες αλλά μέχρι τώρα δεν έχουν αποδειχθεί και ιδιαίτερα επιτυχή, καθώς οι λεπτομέρειες των ποιοτήτων που είναι απαραίτητες για να έχουμε μια καλή γλωττίδα δεν είναι ακόμα γνωστές.

Για να κλείσουμε το ζήτημα, θα χρειαστεί να κάνουμε μια διευκρίνιση όσον αφορά το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα όργανα. Η πίστη στην σπουδαιότητα του υλικού των ξυλόφωνων για τα τονικά χαρακτηριστικά του οργάνου υπάρχει πιθανόν από την παρατήρηση ότι, όταν το ξυλόφωνο παίζεται υπάρχουν καμιά φορά δονήσεις στον σωλήνα που μπορούν να γίνουν αντιληπτές από τα δάκτυλα. Στο κλαρινέτο (αυτές) οι δονήσεις είναι περισσότερο αυτές που μεταφέρονται στο σώμα κατευθείαν από την γλωττίδα. Υποτίθεται ότι οι δονήσεις των τοιχωμάτων μπορούν να ακτινοβολήσουν ήχο και αυτό είναι μέρος του τόνου του ξυλόφωνου, και που μπορεί να επηρεάσει το εσωτερικό στάσιμο κύμα και να αλλάξει την ποιότητα του. Όμως πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι ο ήχος που ακτινοβολείται από τα τοιχώματα είναι ασήμαντος μπροστά στον ήχο που κανονικά ακτινοβολείται από το όργανο και ότι η επίδραση των δονήσεων των τοιχωμάτων στο εσωτερικό στάσιμο κύμα είναι ασήμαντη. Συνεπάγεται ότι το υλικό των οργάνων δεν είναι παράγοντας του τόνου. Εάν ένα χρυσό φλάουτο ηχεί διαφορετικά από ένα ασημένιο είναι γιατί είναι διαφορετικά στις κατασκευαστικές τους δομές και όχι γιατί έχουν διαφορά στο

μέταλλο. Ένα κομμάτι από εύκαμπτο πλαστικό σωλήνα που συνδέεται με το επιστόμιο ενός κλαρινέτου και έχοντας τις κατάλληλες τονικές οπές θα ηχεί αρκετά όμοια με ένα κανονικό κλαρινέτο.

Εν ολίγοις, το υλικό των πνευστών μπορεί να επιλεγθεί με βάση την ποιότητα για την εύκολη κατασκευή και παίξιμο και όχι για την επίδραση του στο παίξιμο.

Πολυφωνία

Η άκρη της γλωττίδας είναι αρκετά λεπτή και ελαφριά και έτσι μπορεί εύκολα να κινείται από τις μεταβολές της πίεσης που παράγονται σε αυτήν από τις δονήσεις της αέρια στήλης. Αυτός είναι ο λόγος που διατηρούνται τα στάσιμα κόμματα μέσα στον σωλήνα όπως έχουμε εξηγήσει προηγουμένως. Η γλωττίδα έχει τη δικιά της συχνότητα συντονισμού αλλά η συχνότητα αυτή είναι μακριά από τις υπόλοιπες και έτσι δεν υπάρχει επικάλυψη. (Η ίδια θεώρηση ισχύει και στο φλάουτο το οποίο χρησιμοποιεί μια αέρια γλωττίδα χωρίς συχνότητα συντονισμού.) Όταν τα ξυλόφωνα όργανα παίζονται με τον κανονικό τρόπο, οι δονήσεις της γλωττίδας δηλώνονται σαν σταθερές, έχοντας μια πολύπλοκη κυματοσυνάρτηση που αποτελείται από μια βασική μαζί με έναν αριθμό από αρμονικούς που είναι απλά πολλαπλάσια του θεμέλιου. Η αέρια στήλη δονείται με αντίστοιχο τρόπο. Τα συνηθισμένα διαστήματα στις οπές των ξύλινων και οι δακτυλοθεσίες είναι σχεδιασμένα για να τοποθετούν τους συντονισμούς της αέριας στήλης το μακρύτερο δυνατόν σε τέτοια μέρη όπου ενδυναμώνονται τέτοιοι σταθεροί συντονισμοί.

Ωστόσο, η γλωττίδα και η αέρια στήλη μπορούν εύκολα να δονηθούν ταυτόχρονα σε συχνότητες που δεν έχουν αρμονική σχέση. Χρησιμοποιώντας ασυνήθιστες δακτυλοθεσίες, είναι εφικτό να εκτοπιστούν οι συντονισμοί της αέριας στήλης που η στήλη μπορεί να δονήσει σε δύο συχνότητες που δεν συνδέονται αρμονικά, έτσι ώστε η υψηλότερη συχνότητα να μην είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της χαμηλότερης. Το αποτέλεσμα είναι ένας τόνος με αρκετά ασυνήθιστη ποιότητα. Μπορεί να εμπεριέχονται μία ή δύο συνιστώσες που να διακρίνονται από το αυτί ως ξεχωριστοί τόνοι, ή μπορεί να έχει έναν απότομο, ασταθή και χαρακτηριστικά χτυπητό. Τέτοιοι τόνοι ονομάζονται πολυφωνικοί, και η χρησιμότητά τους στην μουσική ακόμα διερευνάται.

Για παράδειγμα η δακτυλοθεσία για τη νότα «G3» στο κλαρίνο άμα σηκώσουμε το πρώτο δάκτυλο σε κάθε χέρι θα οδηγήσει στην παραγωγή ενός πολυφωνικού τόνου όπου δύο ευδιάκριτοι και σχεδόν αυτόνομοι τόνοι θα ακουστούν, ο ένας γειτονικός στην Ρε4 και ο άλλος περίπου στην Σι5, μια οκτάβα και μία έκτη παραπάνω. Πολυφωνία μπορεί να διακριθεί και στο φλάουτο, στο όμποε και στο μπάσον. Οι ακουστικές λεπτομέρειες αυτών των τόνων ακόμα διερευνούνται.

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγικές έννοιες πάνω στον Μετασχηματισμό Hilbert – Huang,

Ο Μετασχηματισμός Hilbert-Huang (Hilbert-Huang Transform - HHT) είναι το αποτέλεσμα δύο μεθόδων. Του Εμπειρικού Τρόπου Αποσύνθεσης (Empirical Mode Decomposition - EMD) και της Φασματικής Ανάλυσης Hilbert (Hilbert Spectral Analysis - HSA). Αυτές οι μέθοδοι έχουν εισαχθεί από τον Huang πρόσφατα [1996, 1998, 1999, 2003] ειδικά για την ανάλυση δεδομένων από μη-γραμμικές και μη-στάσιμες διεργασίες. Οι αναλύσεις δεδομένων είναι ένα απαραίτητο βήμα προς την κατανόηση των φυσικών διαδικασιών, αλλά παραδοσιακά οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιούνται κυρίως με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Τα προβλήματα των αναλύσεων από την μεριά του μετασχηματισμού Fourier παρουσιάστηκαν διεξοδικά από τον Huang [1998]. Καθώς η ανάλυση δεδομένων είναι σημαντική τόσο για θεωρητικές μελέτες όσο και για πειραματικές, χρειαζόμασταν άμεσα νέες μεθόδους για να κερδίσουμε μια πιο βαθιά διορατικότητα στις υποκείμενες διαδικασίες που στην πραγματικότητα παράγουν τα δεδομένα. Οι μέθοδοι που χρειαζόμαστε δεν μπορούν να περιορίζονται σε γραμμικές και στάσιμες διεργασίες, και πρέπει να αποδίδουν αποτελέσματα με φυσικό νόημα.

Ο μετασχηματισμός HHT αναπτύχθηκε έχοντας ως “κίνητρο” αυτές τις ανάγκες: Αρχικά, επειδή οι φυσικές διεργασίες είναι κυρίως μη-γραμμικές και μη-στάσιμες, υπάρχουν πολύ περιορισμένες επιλογές στις μεθόδους ανάλυσης χρονοσειρών που μπορούν να εξάγουν δεδομένα από αυτές τις διεργασίες. Οι διαθέσιμες μέθοδοι είτε αφορούν γραμμικές αλλά μη-στάσιμες διεργασίες (όπως η αναλύσεις wavelet, Wagner-Ville, και διάφορα μικρής διάρκειας φασματογραφήματα Fourier, όπως αυτές συνοψίζονται από τους Priestley [1988], Cohen [1995], Daubechies [1992] και Flandrin [1999]) είτε μη-γραμμικές αλλά στάσιμες και στατιστικά νομοτελειακές διεργασίες (όπως οι διάφορες αναπαραστάσεις φασικών διαγραμμάτων στο επίπεδο και η μέθοδος ενσωματωμένης χρονικής υστέρησης, όπως αυτές συνοψίστηκαν από τους Tong [1990], Diks [1997], και Kantz [1997]. Για να εξετάσουμε δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο, δηλαδή μη-γραμμικές και μη στατικές διεργασίες, χρειαζόμασταν επειγόντως νέες προσεγγίσεις.)

Βέβαια, οι μη-γραμμικές διεργασίες χρειάζονται ειδικό χειρισμό. Πέρα από την περιοδικότητα, θέλουμε να μάθουμε τις λεπτομερείς δυναμικές στην επεξεργασία των δεδομένων. Ένα από τα τυπικά χαρακτηριστικά των μη-γραμμικών διεργασιών, όπως εισήχθη από τον Huang [1998], είναι η ενδο-κυματική διαμόρφωση (intra-wave modulation), η οποία υποδηλώνει ότι η στιγμιαία συχνότητα αλλάζει κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης. Ας εξετάσουμε ένα πολύ απλό μη-γραμμικό σύστημα που δίνεται από την εξίσωση του Duffing χωρίς απώλειες,

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + x + \varepsilon x^3 = \gamma \cos \omega t, \quad (1)$$

όπου ε είναι μια παράμετρος όχι απαραίτητα μικρή και γ είναι το πλάτος μιας περιοδικής οδηγούσας συνάρτησης με συχνότητα ω .

Στη σχέση (1), εάν η παράμετρος ε ήταν μηδέν, το σύστημα θα ήταν γραμμικό, και η λύση εύκολη. Πάντως για ένα μικρό ε , το σύστημα είναι μη-γραμμικό, αλλά μπορεί να λυθεί εύκολα με την μέθοδο διαταραχών. Άμα το ε δεν είναι μικρό (σε σχέση με τη μονάδα), τότε το σύστημα είναι πλήρως μη-γραμμικό. Καμία από τις γνωστές μεθόδους ανάλυσης δεν προσφέρεται για τη λύση του συστήματος αυτού. Πρέπει να καταφύγουμε σε αριθμητικές λύσεις, όπου όλων των ειδών οι περιπλοκότητες όπως οι διακλαδώσεις και το χάος μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Ακόμα και με αυτές τις πολυπλοκότητες, ας εξετάσουμε την ποιοτική φύση της λύσης για την σχέση (1), ξαναγράφοντας την με ένα ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, όπως:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + x(1 + \varepsilon x^2) = \gamma \cos \omega t, \quad (2)$$

Τα σύμβολα ορίζονται όπως και στη σχέση (1). Η ποσότητα μέσα στην παρένθεση μπορεί να ειδωθεί ως μια μεταβαλλόμενη σταθερά ελατηρίου ή ως ένα μεταβαλλόμενο μήκος εκκρεμούς. Από αυτή την άποψη, μπορούμε να δούμε ότι η συχνότητα μπορεί να αλλάζει από περιοχή σε περιοχή και από στιγμή σε στιγμή, ακόμα και εντός ενός κύκλου ταλάντωσης.

Όπως υπέδειξε ο Huang [1998], αυτή η ενδο-κυματική μεταβλητή συχνότητα είναι το “σήμα κατατεθέν” των μη-γραμμικών συστημάτων. Στο παρελθόν, δεν υπήρχε κάποιος ξεκάθαρος τρόπος για την απεικόνιση της ενδο-κυματικής

μεταβλητής συχνότητας χρησιμοποιώντας αναλύσεις που βασίζονται στον Fourier, εκτός από την προσφυγή στις αρμονικές.

Ακόμα και με την κλασική Χαμιλτονιανή προσέγγιση, κατά την οποία η συχνότητα προσδιορίζεται ως ο ρυθμός της αλλαγής της Χαμιλτονιανής σε σχέση με την κίνηση δεν μπορούμε να έχουμε βαθύτερη γνώση, γιατί στον ορισμό της κίνησης εμπλέκεται και η ορμή μέσω των γενικευμένων συντεταγμένων. Κατ' αυτό τον τρόπο, δεν υπάρχει κάποια στιγμιαία τιμή (για τη συχνότητα). Έτσι, το καλύτερο που μπορούσαμε να κάνουμε για οποιοδήποτε μη-γραμμικά παραμορφωμένη κυματομορφή στις προσεγγίσεις του παρελθόντος ήταν να αναφερόμαστε σε αρμονικές παραμορφώσεις. Οι αρμονικές παραμορφώσεις είναι, στην πραγματικότητα, μια φτωχή εναλλακτική διότι είναι το αποτέλεσμα που αποκτάμε από την επιβολή μιας γραμμικής δομής πάνω σε ένα μη-γραμμικό σύστημα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα μπορεί να βγάζουν απόλυτα μαθηματικό νόημα, αλλά ταυτόχρονα δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Το τρόπος περιγραφής του συστήματος που δίνει φυσικό νόημα θα έχει να κάνει με την στιγμιαία συχνότητα.

Ο ευκολότερος τρόπος να υπολογίσουμε τη στιγμιαία συχνότητα είναι με τον μετασχηματισμό Hilbert, μέσω του οποίου μπορούμε να βρούμε το συζυγή μιγαδικό $y(t)$, από οποιαδήποτε πραγματική συνάρτηση $x(t)$ τάξεως L^p ,

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

όπου το P εκφράζει την κύρια τιμή του ολοκληρώματος). Με το μετασχηματισμό Hilbert έχουμε

$$z(t) = x(t) + j y(t) = a(t) e^{j\theta(t)} \quad (4)$$

όπου

$$a(t) = (x^2 + y^2)^{1/2}, \quad \theta(t) = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (5)$$

Εδώ, το a είναι το στιγμιαίο συνάρτηση πλάτους και θ είναι η στιγμιαία συνάρτηση φάσης. Έτσι, η στιγμιαία κυκλική συχνότητα είναι απλά:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

Καθώς η στιγμιαία συχνότητα καθορίζεται μέσω μιας παραγώγου, είναι τοπική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη λεπτομερή μεταβολή της συχνότητας, συμπεριλαμβανόμενης της ενδο-κυματικής μεταβλητής συχνότητας. Όσο απλός κι αν είναι αυτός ο ορισμός, η υλοποίησή του δεν είναι διόλου απλή. Για να αναπαραστήσουμε τις εξισώσεις που αφορούν το πλάτος και την φάση, θα χρειαστεί οι εξισώσεις να ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες.

2.2 Η μέθοδος EMD

Έχουμε ήδη αναφέρει πως ο μετασχηματισμός HHT είναι το αποτέλεσμα του Εμπειρικού Τρόπου Αποσύνθεσης (Empirical Mode Decomposition - EMD) και της Φασματικής Ανάλυσης Hilbert (Hilbert Spectral Analysis - HSA).

Η μέθοδος EMD είναι μια προσαρμοστική μέθοδος ανάλυσης δεδομένων κατά την οποία αποσυντίθεται οποιαδήποτε χρονοσειρά σε εγγενείς τρόπους ταλάντωσης. Στην πραγματικότητα είναι ένας αλγόριθμος αποσύνθεσης ενός σήματος βασισμένος στην επιτυχή απομάκρυνση στοιχειωδών σημάτων (οι λεγόμενες IMF) από το συνολικό σήμα. Κάθε συνιστώσα που ονομάζεται IMF εκ του *Intrinsic Mode Function*, είναι μια στενή φασματική ζώνη, διαμορφωμένη κατά πλάτος και συχνότητα, που μας επιτρέπει τον υπολογισμό της στιγμιαίας φάσης και της στιγμιαίας συχνότητας σαν κομμάτι του μετασχηματισμού Hilbert-Huang.

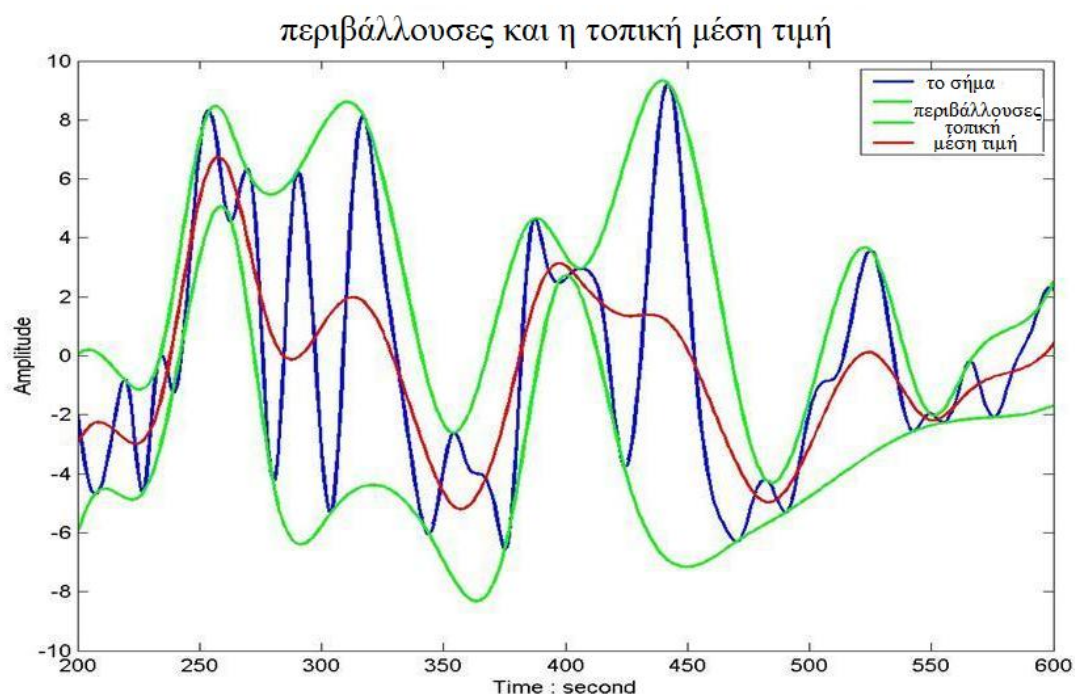
Φυσικά, η προϋπόθεση για να ορίσουμε ορθώς μια στιγμιαία συχνότητα είναι ότι οι συναρτήσεις IMF είναι συμμετρικές σε σχέση με την τοπική μέση τιμή και έχουν αριθμό σημείων που τέμνουν τον μηδενικό άξονα που είναι ίδιος με τον αριθμό των ακρότατων (μεγίστων και ελαχίστων).

Κάθε IMF ορίζεται σαν μια συνάρτηση που ικανοποιεί τις δυο παρακάτω συνθήκες:

- 1) Το πλήθος του αριθμού των ακρότατων (τα μέγιστα και τα ελάχιστα) πρέπει είτε να ισούται είτε να διαφέρει το μέγιστο κατά ένα σε όλη τη χρονοσειρά.
- 2) Η μέση τιμή που προκύπτει από την περιβάλλουσα των μεγίστων και την περιβάλλουσα των ελαχίστων να είναι παντού μηδέν.

Η αποσύνθεση στη μέθοδο EMD βασίζεται στην απλή υπόθεση ότι κάθε σύνολο δεδομένων αποτελείται από διαφορετικούς εγγενείς τρόπους ταλάντωσης. Κάθε εγγενής τρόπος ταλάντωσης, γραμμικός ή μη γραμμικός, αναπαριστά μια απλή ταλάντωση η οποία θα είναι επίσης συμμετρική σε σχέση με την τοπική μέση τιμή. Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή η χρονοσειρά μπορεί να εμπεριέχει πολλούς διαφορετικούς τρόπους ταλάντωσης που συνυπάρχουν. Όλοι οι τρόποι αυτοί μαζί μας δίνουν την τελική χρονοσειρά.

Κάθε ένας από τους «ιδιόμορφους τρόπους ταλάντωσης» αναπαριστάται από μία IMF, όπως ορίζεται παρακάτω. Στο Σχήμα 1 βλέπουμε πως ορίζονται οι περιβάλλουσες και η τοπική μέση τιμή.



Σχήμα 1: Καμπύλη δεδομένων, περιβάλλουσες και τοπική μέση τιμή.

Το να γνωρίζουμε τον μετασχηματισμό Hilbert των IMF συνιστωσών είναι μόνο η αρχή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, πρέπει να αποσυνθέσουμε τα δεδομένα σε αρκετές IMF αφού οι περισσότερες χρονοσειρές εμπεριέχουν περισσότερους από έναν «ιδιόμορφους τρόπους ταλάντωσης». Ένας συστηματοποιημένος τρόπος για να εξάγουμε τις IMF, είναι η διαδικασία «διαλογής» ή «κοσκινίσματος» (Sifting Process), η οποία γίνεται ως ακολούθως:

- 1) Προσδιορίζουμε όλα τα τοπικά ακρότατα (μέγιστα και ελάχιστα) του σήματος $x(t)$.
- 2) Συνδέουμε όλα τα μέγιστα με κυβικές πολυωνυμικές συναρτήσεις (splines, εξηγούνται στο παράρτημα Z), ώστε να φτιαχτεί η περιβάλλουσα των μεγίστων $e_{\max}(t)$. Με την ίδια διαδικασία για τα ελάχιστα φτιάχνουμε την περιβάλλουσα των ελαχίστων $e_{\min}(t)$.
- 3) Υπολογίζουμε την τοπική μέση τιμή από τις δύο περιβάλλουσες μέσω της:
$$m(t) = [e_{\min}(t) + e_{\max}(t)] / 2.$$
- 4) Υπολογίζουμε το $d(t) = x(t) - m(t)$.
- 5) Λαμβάνουμε το $d(t)$ ως το νέο σήμα $x(t)$. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία ξανά, ώσπου το $d(t)$ να γίνει μια μηδενικού-μέσου ακολουθία σύμφωνα με ένα κριτήριο διακοπής (το οποίο θα εξετάσουμε παρακάτω).
- 6) Από τη στιγμή που έχουμε την μηδενικού-μέσου ακολουθία $d(t)$, αυτή ορίζεται ως η πρώτη IMF και συμβολίζεται με c_1 .
- 7) Η πρώτη IMF (IMF 1) αφαιρείται από το αρχικό σήμα και το υπόλοιπο χρησιμοποιείται σαν το νέο σήμα $x(t)$. Η διαδικασία διαλογής (sifting process) επαναλαμβάνεται για να πάρουμε τη δεύτερη IMF (IMF 2).
- 8) Συνεχίζοντας έτσι, αποκτούμε την τρίτη, τέταρτη IMF κλπ. (δηλαδή c_3, c_4, \dots) Αυτή η διαδικασία σταματά όταν το υπόλοιπο είναι μία *μονότονη συνάρτηση* η οποία έχει μόνο ένα μέγιστο ή ένα ελάχιστο.

Στην πράξη, μετά από συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων, το υπολειπόμενο σήμα δεν περιέχει πληροφορίες που έχουν νόημα. Έτσι, από ένα σημείο και μετά η διαδικασία διαλογής σταματάει περιορίζοντας την τυπική απόκλιση η οποία υπολογίζεται για δύο συνεχόμενες διαδικασίες κοσκινίσματος. Το κατώφλι τίθεται συνήθως στη τιμή 0.2 ή 0.3.

Επίσης, το νούμερο των μεγίστων μειώνεται καθώς οδεύουμε προς IMF μεγαλύτερης τάξης, πράγμα που μας εγγυάται ότι η διαδικασία διαλογής τελειώνει με έναν πεπερασμένο αριθμό από IMF. Βασικά, η διαδικασία διαλογής εξαλείφει τα 'επιβαίνοντα' κύματα και κάνει τις IMF συμμετρικές ώστε να ανακτήσουμε στιγμιαίες συχνότητες που να έχουν σημασία.

Οι IMF συνιστώσες, αναπαριστούν απλούς τρόπους ταλάντωσης που είναι ενσωματωμένοι στο σήμα και είναι πολύ πιο γενικοί σε σύγκριση με τις απλές

αρμονικές συναρτήσεις. Σαν επαλήθευση για την πληρότητα της σχέσης 7, μπορούμε να ανακατασκευάσουμε το αρχικό μας σήμα, προσθέτοντας όλες τις IMF συνιστώσες και το υπόλοιπο. Υποθέτουμε ότι έχουμε n IMF συνιστώσες (c_1, c_2, \dots, c_n) και ένα υπόλοιπο r_n , διατεταγμένα σε σειρά από την συντομότερη στην μεγαλύτερη περίοδο, δηλαδή από την υψηλότερη συχνότητα στην χαμηλότερη. Η αναλογία μεταξύ των συχνοτήτων μας βοηθάει στο να περιεργαστούμε την πραγματική σημασία των IMF.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (7)$$

2.3 Φασματική ανάλυση Hilbert

Από τη στιγμή που έχουμε τις IMF, ο μετασχηματισμός Hilbert μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μία συνιστώσα ώστε να βρούμε τα πλάτη και τις στιγμιαίες συχνότητες μέσω των σχέσεων 5 και 6. Επιπροσθέτως, η σχέση 7 μπορεί να γραφτεί ξανά, με τον εξής τρόπο:

$$x(t) = \Re \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(\tau) d\tau} \quad (8)$$

όπου \Re είναι το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού.

Η κατανομή χρόνου/συχνότητας του πλάτους ορίζεται ως το φάσμα πλάτους του Hilbert ή απλά φάσμα Hilbert $H(\omega, t)$. Σε οποιοδήποτε χρόνο t , η στιγμιαία συχνότητα ω και το πλάτος υπολογίζονται ταυτοχρόνως έτσι ώστε οι τιμές αυτές να προσδίδονται στο φάσμα Hilbert, $H(\omega, t)$. Το $a_j(t)$ είναι ένας συντελεστής αναπτύγματος εξαρτημένος από τον χρόνο, όμοιος με τη σταθερά στο ανάπτυγμα του Fourier και το ω_j είναι η στιγμιαία συχνότητα για τον χρόνο τ , που διαφέρει από τη σταθερή συχνότητα ω_j στον μετασχηματισμό Fourier, σχέση (9). Αναπαριστά μια γενικευμένη έκφραση του αναπτύγματος Fourier.

$$x(t) = \Re \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \omega_j t} \quad (9)$$

Έχοντας ορίσει το φάσμα Hilbert, το περιθωριακό φάσμα Hilbert $h(\omega)$ ορίζεται στην σχέση (10). Είναι ένα μέτρο της συνολικής συμβολής της ενέργειας από κάθε συχνότητα καθόλη τη διάρκεια της χρονοσειράς. Παρέχει έτσι έναν ποσοτικό τρόπο για να περιγραφεί η αναπαράσταση χρόνου-συχνότητας-ενέργειας, ολοκληρώνοντας ως προς το χρόνο το φάσμα Hilbert σε όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς.

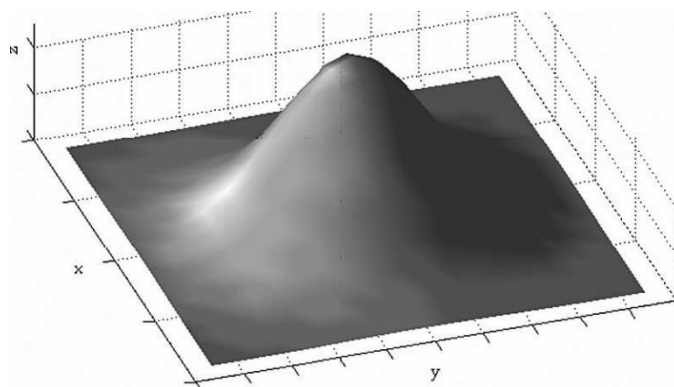
$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (10)$$

Όπου T είναι η συνολική διάρκεια της χρονοσειράς.

Μια άλλη ολοκλήρωση σε όλη την έκταση των συχνοτήτων είναι η στιγμιαία ενέργεια $IE(t)$, η οποία ορίζεται στη σχέση (11) και παρέχει πληροφορίες για την χρονική μεταβολή της ενέργειας.

$$IE(t) = \int_{\omega} H(\omega, t) d\omega \quad (11)$$

Η αναπαράσταση του ακατέργαστου φάσματος Hilbert, δίνει επιθυμητά και ποσοτικά αποτελέσματα. Αλλά, η υψηλή ανάλυση και τα μικρά διάσπαρτα σημεία στο διάγραμμα χρόνου-συχνότητας-ενέργειας δεν είναι εύκολο να ερμηνευτούν στο ακατέργαστο φάσμα Hilbert. Έτσι, ένα Γκαουσιανά σταθμισμένο φίλτρο Laplace εφαρμόζεται στο φάσμα Hilbert. Το σχηματικό διάγραμμα αυτού του φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 2. Έτσι μία πιο «λεία» εικόνα μπορεί να επιτευχθεί σε σχέση με την αρχική παρουσίαση με τη χρήση φιλτραρίσματος σε δύο διαστάσεις.



Σχήμα 2: Δισδιάστατο φίλτρο Laplace σταθμισμένο κατά Gauss.

2.4 Κριτήρια διακοπής (Stoppage Criteria)

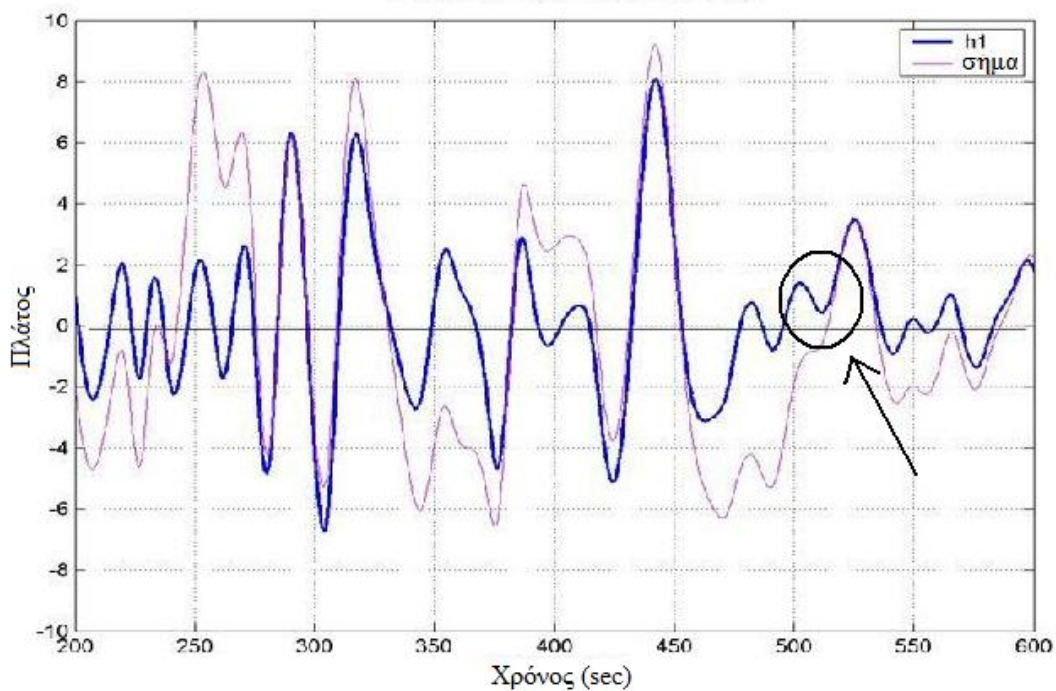
Έχουμε ήδη αναφέρει τη διαδικασία «διαλογής» ή «κοσκινίσματος» ως ένα συστηματοποιημένο τρόπο για να εξάγουμε τις IMF. Μια IMF, ας την ονομάσουμε h_l , εκ κατασκευής πρέπει να ικανοποιεί τα δύο κριτήρια που αναφέραμε κατά τον ορισμό του. Όμως οι αλλαγές του συστήματος αναφοράς από ορθογώνιες συντεταγμένες σε καμπυλόγραμμες μπορεί να προκαλέσει ανωμαλίες όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3, όπου διάφορα τοπικά ακρότατα (μέγιστα ή/και ελάχιστα) βρίσκονται ακόμα ανάμεσα σε διαδοχικές τμήσεις του άξονα του μηδενός. Για να εξαλείψουμε αυτές τις ανωμαλίες, η διαδικασία διαλογής πρέπει να επαναληφθεί όσες φορές χρειαστεί μέχρι να μην παρατηρούνται πια ‘επιβαίνοντα’ κύματα. Στα μετέπειτα βήματα της διαδικασίας «διαλογής», το h_l θεωρείται ως το σήμα μας. Έτσι:

$$h_l - m_{l1} = h_{l1}, \quad (12)$$

Όπου, το m_{l1} είναι το τοπικό μέσο της περιβάλλουσας των μεγίστων και ελαχίστων του h_l .

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί k φορές και έτσι το h_k δίνεται από

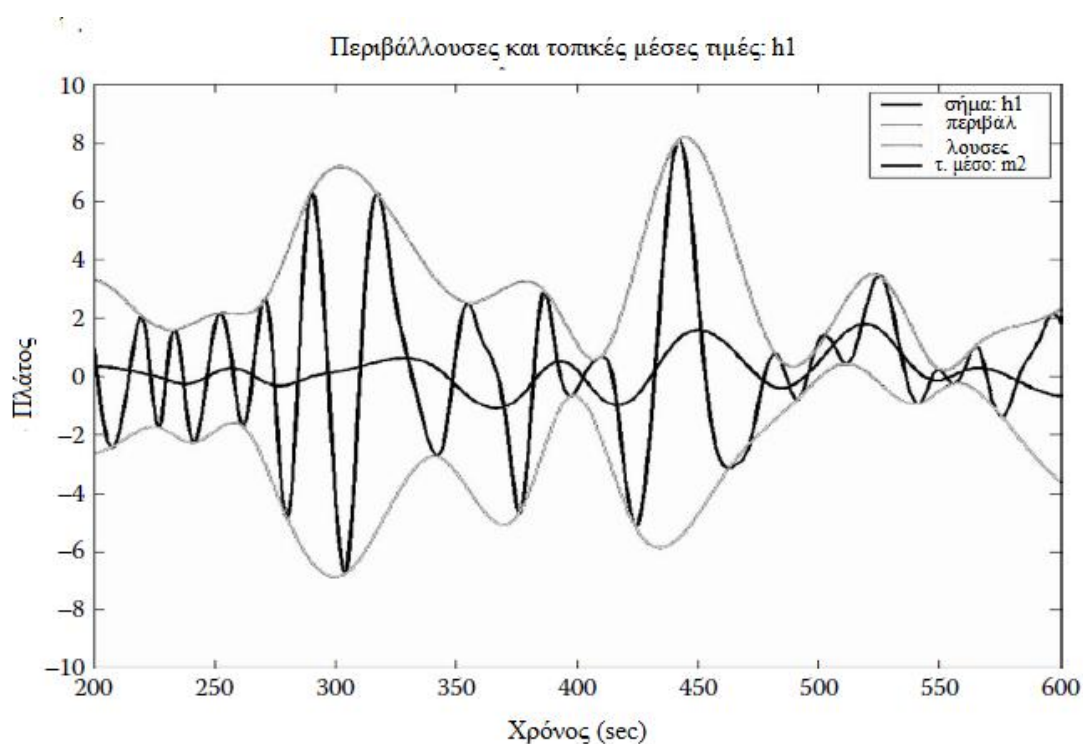
$$h_{l(k-1)} - m_{lk} = h_{lk} \quad (13)$$



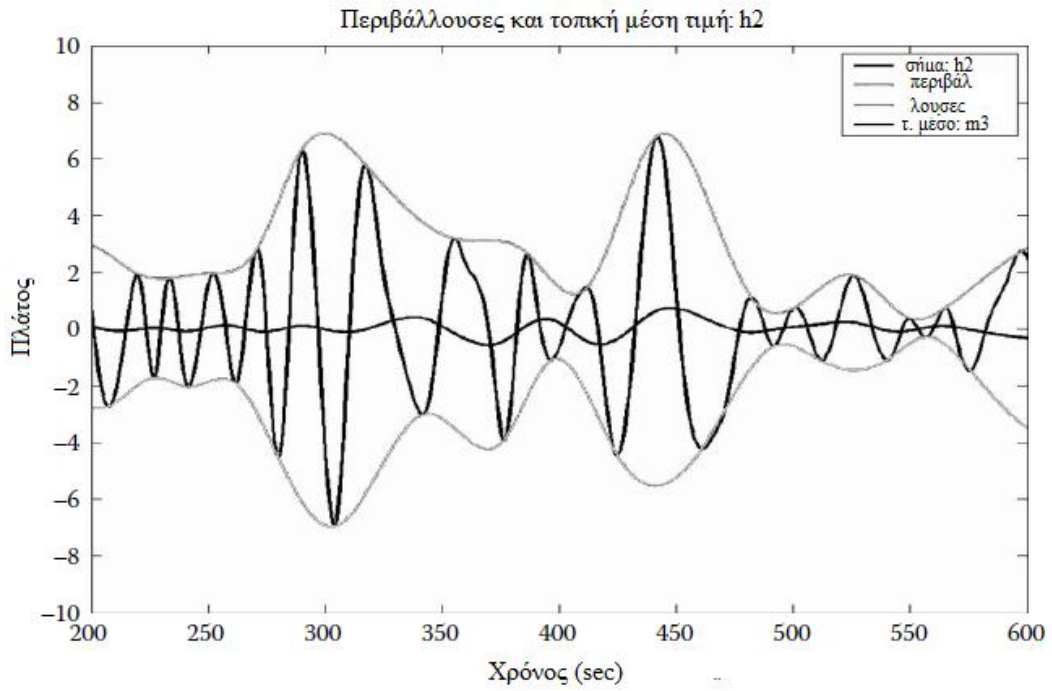
Σχήμα 2: Παράδειγμα ελαχίστου που δεν βρίσκεται κάτω από τον άξονα του μηδενός.

Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία, η μέση τιμή πλησιάζει το μηδέν όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4, 5 και 6. Θεωρητικά, αυτό το βήμα μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές, αλλά κάθε φορά που τα αποτελέσματα των επαναλήψεων φέρνουν την μέση τιμή πιο κοντά στο μηδέν, κάνουν και τις μεταβολές του πλάτους κάθε κύματος πιο απαλές. Ωστόσο, η μεταβολή του πλάτους πρέπει να αναπαριστά τη φυσική σημασία της διεργασίας. Άρα η διαδικασία της επανάληψης αν και εξυπηρετεί το χρήσιμο σκοπό του να πλησιάζει η μέση τιμή στο μηδέν, μπορεί να απαλείψει το φυσικό νόημα από τις συνιστώσες εάν συνεχιστεί για πολύ.

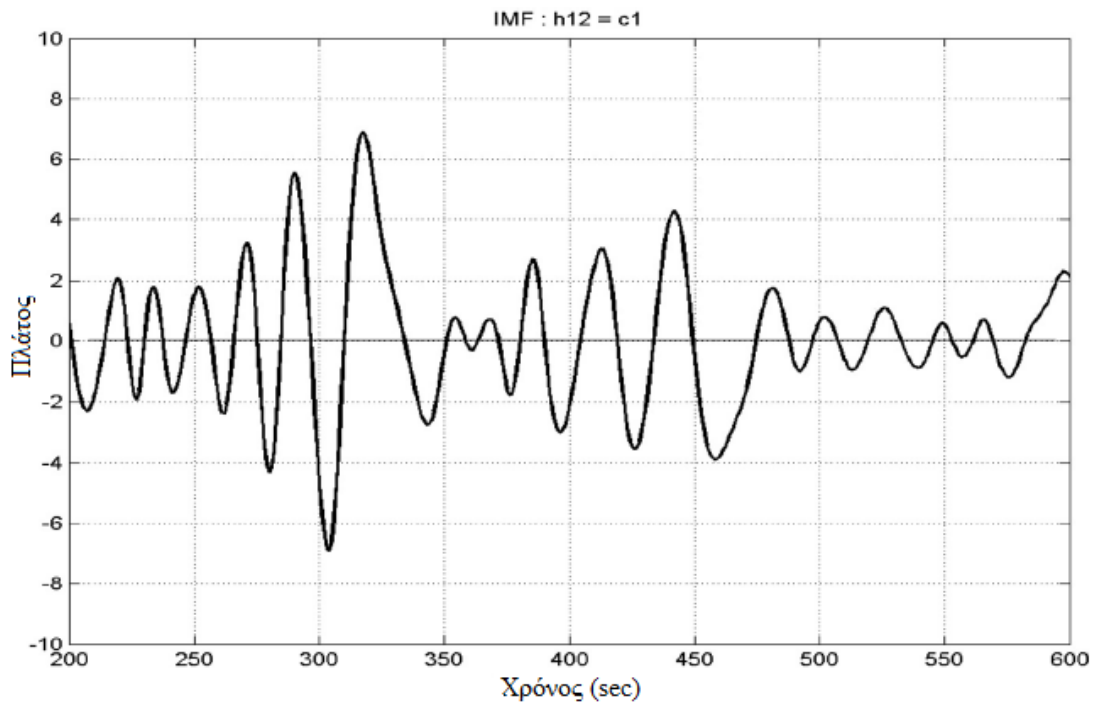
Για την επίτευξη της ισορροπίας μεταξύ μίας σε λογικό βαθμό μικρής μέσης τιμής και της διατήρησης της φυσικής έννοιας στη συνιστώσα που προκύπτει, έχουν προταθεί δύο «κριτήρια διακοπής» για την αναδρομική διαδικασία. Τα κριτήρια αυτά στην πραγματικότητα καθορίζουν το πλήθος των βημάτων που θα λάβουν χώρα κατά τη διαδικασία διαλογής έως ότου δημιουργηθεί μία IMF. Γι αυτό το λόγο είναι κρίσιμης σημασίας στην επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου EMD.



Σχήμα 4: Επανάληψη της διαδικασίας διαλογής χρησιμοποιώντας το h_1 ως σήμα.



Σχήμα 5: Επανάληψη της διαλογής με τη χρήση του h_2 ως σήμα.



Σχήμα 6: Μετά από 12 επαναλήψεις, αποκτήσαμε την πρώτη IMF.

Το πρώτο κριτήριο για τη διακοπή μοιάζει με το τεστ σύγκλισης του Cauchy, όπου πρώτα προσδιορίζουμε ένα άθροισμα των διαφορών, SD , όπως παρακάτω:

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2(t)} \quad (12)$$

Η διαδικασία διαλογής (Sifting Process) θα σταματήσει όταν το SD γίνει μικρότερο από έναν προκαθορισμένο αριθμό. Αυτός ο ορισμός είναι ελαφρώς διαφοροποιημένος από τον πρώτο, που πρότεινε ο Huang [Huang 1998] όπου το SD οριζόταν απλά ως

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{h_{k-1}^2(t)} \quad (13)$$

Το μειονέκτημα αυτού του παλιού ορισμού του Huang (σχέση 13), είναι πως η τιμή του SD μπορεί να κυριαρχηθεί από τις τοπικές μικρές τιμές του h_{k-1} , ενώ ο ορισμός της σχέσης 12, αθροίζει όλες τις συνεισφορές σε όλη τη διάρκεια της χρονοσειράς μας.

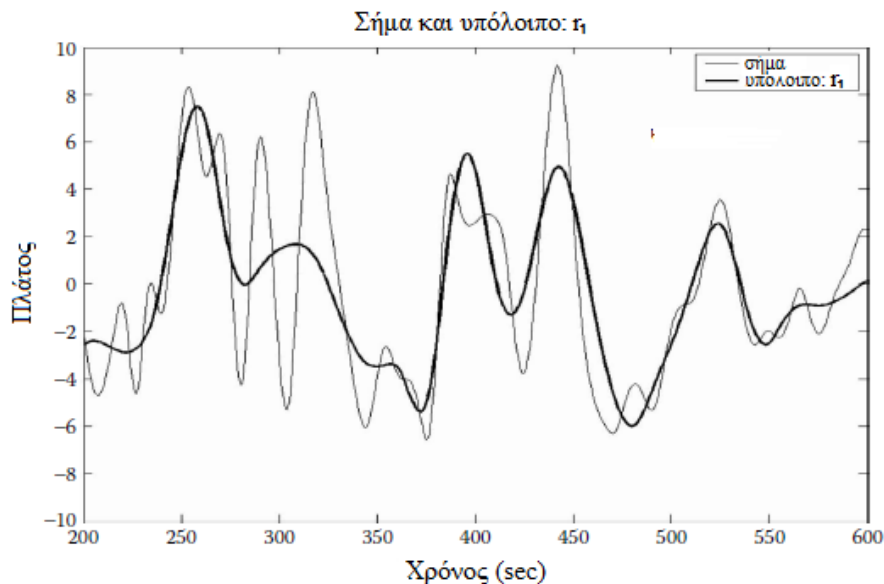
Παρ' όλα αυτά, ακόμα και με αυτή την τροποποίηση, υπάρχει ακόμα ένα πρόβλημα με την φαινομενικά σωστή μαθηματικά προσέγγιση. Σε αυτόν τον ορισμό, το σημαντικό κριτήριο ότι ο αριθμός των μεγίστων και των ελαχίστων πρέπει να είναι ίσος ή διαφέρει το πολύ κατά ένα με το πλήθος των τμήσεων του μηδενικού άξονα, δεν έχει ελεγχθεί. Για να ξεπεράσουμε αυτή την πρακτική δυσκολία, ο Huang [Huang 1993, 2003] πρότεινε ένα δεύτερο εναλλακτικό κριτήριο διακοπής.

Το δεύτερο κριτήριο διακοπής, βασίζεται σε έναν αριθμό που αποκαλούμε ο *αριθμός-S*, ο οποίος ορίζεται ως το πλήθος των διαδοχικών βημάτων της διαδικασίας διαλογής έως ότου ο αριθμός των ελαχίστων και των μεγίστων είναι ίσος ή διαφέρει το πολύ κατά ένα, με το πλήθος των τμήσεων του μηδενικού άξονα. Ο S -αριθμός αυτός κρατιέται σταθερός. Μετά από διεξοδικούς πειραματισμούς, ο Huang [2003] χρησιμοποίησε αυτή την μέθοδο για να ορίσει ένα 'κριτήριο εμπιστοσύνης' για την μέθοδο EMD, το οποίο θα συζητηθεί αργότερα.

Όταν η προκύπτουσα συνάρτηση ικανοποιεί ένα από τα δυο κριτήρια που αναφέραμε πιο πάνω, αυτή η συνιστώσα ορίζεται ως η πρώτη IMF, c_1 , όπως φαίνεται

και στο Σχήμα 6. Μπορούμε τότε να διαχωρίσουμε την c_1 από το υπόλοιπο σήμα μέσω της σχέσης 14.

$$X(t) - c_1 = r_1 \quad (14)$$



Σχήμα 7: Σύγκριση μεταξύ του σήματος και του υπολοίπου r_1 μετά την αφαίρεση του πρώτου IMF, c_1 . Παρατηρούμε ότι το υπόλοιπο συμπεριφέρεται ως ένα κινούμενο τοπικό μέσο του σήματος που διχотоμεί όλα τα κύματα.

Το υπόλοιπο φαίνεται και στο σχήμα 7. Από τη στιγμή που το υπόλοιπο r_1 περιέχει πληροφορίες ακόμα με μεγαλύτερες περιόδους, ορίζεται ως το νέο σήμα και εκτίθεται στην ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί σε όλα τα επακόλουθα r_j και το αποτέλεσμα είναι:

$$\begin{aligned} r_1 - c_2 &= r_2, \\ &\dots \\ r_{n-1} - c_n &= r_n \end{aligned} \quad (15)$$

Αθροίζοντας τις σχέσεις 14 και 15, τελικά καταλήγουμε στο

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (16)$$

2.5 Η επίδραση του τέλους της χρονοσειράς - Το πρόβλημα της πρόβλεψης για τις μη-στάσιμες διεργασίες.

Οι επιδράσεις του τέλους (των τελευταίων σημείων) των χρονοσειρών, απασχολεί κάθε γνωστή μέθοδο ανάλυσης δεδομένων. Ο πιο αποδεκτός και ήπιος τρόπος για να αντιμετωπίσουμε αυτές τις επιδράσεις είναι μέσω της χρήσης διαφόρων ειδών παραθυροποίησης, όπως γίνεται συνήθως και στην ανάλυση Fourier. Τέτοιες πρακτικές αναπόφευκτα θυσιάζουν κάποια σημαντικά δεδομένα κοντά στα άκρα του σήματος. Επιπροσθέτως, η χρήση παραθύρων αποτελεί σοβαρό εμπόδιο όταν το σήμα είναι σύντομο. Στη περίπτωση της ανάλυσης HHT, είναι απαραίτητη η επέκταση του σήματος πέραν της υφιστάμενης έκτασης του, επειδή για τον καθορισμό μίας IMF χρησιμοποιούνται συναρτήσεις spline που διέρχονται από τα ακρότατα. Άρα χρειάζεται μία μέθοδος που να καθορίζει τις καμπύλες των συναρτήσεων spline μεταξύ του τελευταίου διαθέσιμου ακρότατου και του τέλους της έκτασης του σήματος. Αντί για παραθυροποίηση, ο Huang [1998] εισήγαγε ένα τρόπο ώστε να επεκτείνουμε το σήμα έτσι ώστε να εξάγουμε κάποια πληροφορία από όλο το διαθέσιμο σήμα.

Η επέκταση του σήματος είναι μια ριψοκίνδυνη διαδικασία ακόμα και για τις γραμμικές και στάσιμες διεργασίες. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε είναι το πώς να κάνουμε προβλέψεις για μη-γραμμικές και μη-στάσιμες στοχαστικές διεργασίες. Έτσι, οι νομοτελειακές υποθέσεις που ενδεχομένως να χρησιμοποιούσαμε για γραμμικές – στάσιμες διεργασίες πρέπει να εγκαταλειφθούν ώστε να αντιμετωπίσουμε τον πολύπλοκο πραγματικό κόσμο. Τα δεδομένα προέρχονται κυρίως από μεγάλης διάστασης μη-γραμμικές και μη-στάσιμες διεργασίες. Είναι αυτά τα συστήματα προβλέψιμα; Ποιές συνθήκες πρέπει να επιβάλουμε στο πρόβλημα ώστε να το κάνουμε προβλέψιμο; Πόσο καλά μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ακρίβεια των προβλέψεων; Οι προβλέψεις δεν μπορούν να βασίζονται μόνο σε δεδομένα του παρελθόντος. Πρέπει κανονικά να εμπλακεί και το «υποβόσκον» σύστημα. Μπορούν τα διαθέσιμα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν για να βγάλουμε αρκετές πληροφορίες ώστε να κάνουμε μια πρόβλεψη; Αυτό το θέμα είναι ένα ανοικτό ερώτημα προς το παρόν.

Εν τούτοις, ο μετασχηματισμός EMD έχει ένα πλεονέκτημα που βοηθάει την ανάλυση: δεν χρειάζεται να προβλεφθεί όλο το σήμα, αλλά μόνο η IMF, η οποία έχει πιο περιορισμένο εύρος ζώνης, αφού όλες οι IMF έχουν το ίδιο περίπου αριθμό

ακρότατων με το πλήθος των τμήσεων του άξονα του μηδενός. Επιπροσθέτως, αυτό που απαιτείται επί της ουσίας είναι η τιμή και η τοποθεσία του επόμενου ακρότατου και όχι όλου του σήματος. Αν και ο στόχος είναι συγκεκριμένος, αποτελεί ακόμα μια πρόκληση καθώς δεν έχουμε φτάσει σε αυτόν.

Μια μελέτη πάνω στο ζήτημα παρουσιάζεται συνοπτικά στο παράρτημα Ε όπου θα αναφερθούμε στην *Κατοπτρική Επέκταση (Mirror Extending)*, μια προσέγγιση για την βελτίωση στο πρόβλημα των άκρων.

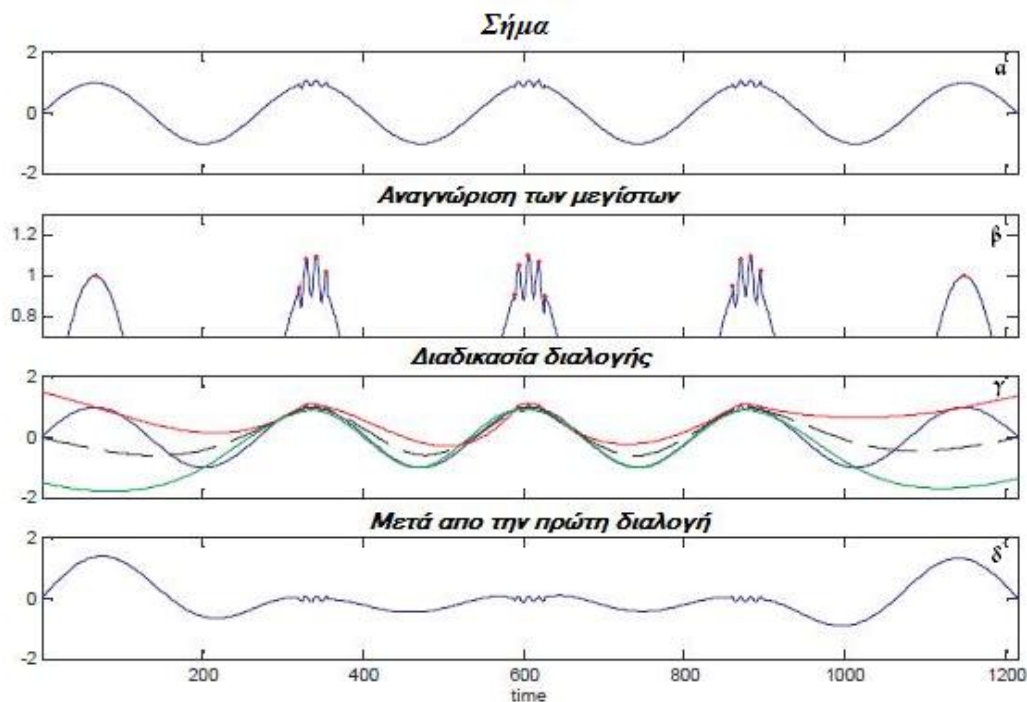
2.6 Η μίξη των τρόπων (Mode mixing)

Μίξη των τρόπων (mode mixing), γίνεται όταν κάθε IMF αποτελείται από ταλαντώσεις σε δραματικά διαφορετικές κλίμακες, οι οποίες προκαλούνται συνήθως από διακοπές στους κινητήριους μηχανισμούς. Όταν συμβεί η μίξη των τρόπων, η IMF μπορεί από μόνη της να παύει να έχει φυσικό νόημα, γεγονός που υποδηλώνει ψευδώς ότι μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές φυσικές διεργασίες που αντιπροσωπεύονται σε ένα τρόπο (mode). Ακόμη και αν η τελική χρόνο-συχνοτική απεικόνιση θα μπορούσε να απαλύνει σε κάποιο βαθμό την κατάσταση της μίξης, απλά και μόνο η κάθε μετάβαση από τη μία κλίμακα στην άλλη, θα έκανε ανεπανόρθωτη ζημιά στον καθαρό διαχωρισμό των τρόπων. Αυτό το μειονέκτημα παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην εργασία του Huang [1999], στην οποία τα μοντελοποιημένα δεδομένα ήταν ένα μείγμα από διακοπτόμενες υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις οι οποίες επέβαιναν σε ένα συνεχόμενο χαμηλής συχνότητας ημιτονοειδές σήμα. Ένα πανομοιότυπο παράδειγμα με αυτό που χρησιμοποιήθηκε από τον Huang [1999], θα παρουσιάσουμε κι εμείς εδώ.

Το σήμα και η διαδικασία του Sifting παρουσιάζεται στο σχήμα 8. Το θεμελιώδες κομμάτι του σήματος είναι ένα χαμηλής συχνότητας ημιτονοειδές κύμα με πλάτος την μονάδα. Στις τρεις μεσαιές κορυφές του κύματος που είναι χαμηλής συχνότητας, υπάρχουν επιβαίνουσες υψηλής συχνότητας διακοπτόμενες ταλαντώσεις με πλάτος 0.1, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 8α.

Η διαδικασία διαλογής (Sifting Process) ξεκινάει με την αναγνώριση των ακρότατων στο σήμα. Στη περίπτωση μας, βρίσκονται 15 τοπικά μέγιστα με το πρώτο και το τελευταίο να έρχονται από τη θεμέλιο και τα άλλα 13 να προκαλούνται κυρίως από τις διακοπτόμενες ταλαντώσεις (Σχήμα 8β). Σαν αποτέλεσμα η πάνω περιβάλλουσα (των μεγίστων δηλαδή) δεν μοιάζει ούτε με την πάνω περιβάλλουσα της θεμελίου

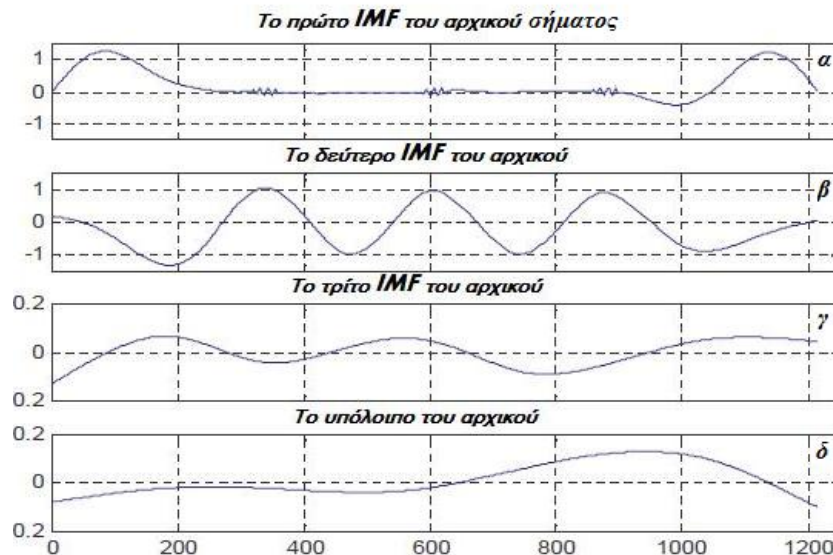
(που είναι μία ευθεία γραμμή πλάτους 1), ούτε με αυτή των διακοπτόμενων ταλαντώσεων. Η προκύπτουσα περιβάλλουσα είναι ένας αρκετά στρεβλός συνδυασμός και των δύο (η κόκκινη γραμμή στο Σχήμα 8γ). Συνεπώς, η αρχική εκτίμηση της πρώτης IMF (Σχ. 8δ) είναι ο συνδυασμός τόσο της χαμηλής συχνότητας θεμελίου όσο και της υψηλής συχνότητας διακοπτόμενων κυμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, δυσκολεύοντας έτσι την αναπαράσταση και την αναγνώριση της υποκείμενης φυσικής διεργασίας.



Σχήμα 8: Η αρχική διαδικασία διαλογής α) το σήμα, β) αναγνωρίζουμε τα τοπικά μέγιστα (κόκκινες κουκίδες), γ) η πάνω περιβάλλουσα (κόκκινο), η κάτω περιβάλλουσα (μπλε) και η μέση τιμή τους (μαύρο), δ) η διαφορά μεταξύ του σήματος και της μέσης τιμής.

Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, ο Huang [1999] πρότείνει ένα τεστ εξέτασης των διακοπών, το οποίο υποκειμενικά εξάγει ταλαντώσεις με περιόδους σημαντικά μικρότερες από μία προεπιλεγμένη τιμή κατά την διάρκεια της διαδικασίας διαλογής. Η μέθοδος αυτή δουλεύει πολύ καλά για αυτό το παράδειγμα. Εν τούτοις, για πιο πολύπλοκα σήματα με μεταβαλλόμενες και συνεχώς κατανεμημένες κλίμακες, δεν μπορεί να βρεθεί ένα μοναδικό κριτήριο για το τεστ εξέτασης των διακοπών. Το πιο ενοχλητικό θέμα με αυτό το υποκειμενικά προεπιλεγμένο κριτήριο είναι ότι στερείται φυσικής αιτιολόγησης και καθιστά τον αλγόριθμο EMD μη-προσαρμοστικό. Επιπροσθέτως, η μίξη των τρόπων είναι ο

κύριος λόγος που γίνεται ασταθής ο αλγόριθμος EMD. Κάθε μικρή διαταραχή μπορεί να δημιουργήσει και ένα νέο σύνολο από IMF. Προφανώς, οι διακοπές εμποδίζουν την μέθοδο EMD να εξορύξει σήματα παρόμοιας κλίμακας. Για να αντιμετωπισθούν αυτά τα προβλήματα, εισήχθηκε η μέθοδος EEMD, που αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 9: Οι IMF από το σήμα που φαίνεται στο σχήμα 8.

2.7 Μέθοδος EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

Γενικά όλα τα σήματα δεδομένων είναι "συγχωνεύσεις" καθαρών σημάτων και θορύβου. Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια των μετρήσεων, χρησιμοποιούμε την μέθοδο της μέσης τιμής ενός συνόλου μετρήσεων (ensemble mean), όπου τα δεδομένα συλλέγονται ξεχωριστά και το καθένα περιέχει έχει διαφορετικό θόρυβο. Για να γενικεύσουμε αυτήν την ιδέα της μεθόδου του συνόλου μετρήσεων (ensemble), εισάγεται θόρυβος σε μία χρονοσειρά (σύνολο δεδομένων $x(t)$), έτσι ώστε να έχουμε ένα ανάλογο ενός φυσικού πειράματος το οποίο θα επαναλαμβανόταν πολλές φορές (δηλ. ξεχωριστές παρατηρήσεις). Ο προστιθέμενος λευκός θόρυβος αντιμετωπίζεται σαν ο πιθανός τυχαίος θόρυβος που θα αποτυπωνόταν στη διαδικασία της μέτρησης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η i -οστή παρατήρηση $x_i(t)$ θα είναι:

$$x_i(t) = x(t) + w_i(t) \quad (17)$$

Κάθε φορά ο λευκός θόρυβος $w_i(t)$ δεν είναι ο ίδιος. Παρ' όλο που η πρόσθεση θορύβου μπορεί να μικρύνει το λόγο σήματος προς θόρυβο, ο πρόσθετος λευκός θόρυβος θα παρέχει μια ομοιόμορφη κατανομή αναφοράς που θα διευκολύνει την επεξεργασία μέσω του EMD, διότι ο χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο δεν επηρεάζει την μέθοδο αποσύνθεσης αλλά στην πραγματικότητα την βοηθάει στο να αποφύγει τη μίξη των τρόπων (Mode Mixing, την οποία εξηγήσαμε στο κεφάλαιο 2.3). Με αυτά τα επιχειρήματα, προχωράμε ένα βήμα παρακάτω λέγοντας πως ο πρόσθετος λευκός θόρυβος μπορεί να μας βοηθήσει στο να εξάγουμε τα πραγματικά σήματα από τη χρονοσειρά, μία μέθοδος που ονομάζεται Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) και η οποία είναι στην πραγματικότητα μία μέθοδος ανάλυσης δεδομένων υποβοηθούμενη από θόρυβο, κοινώς NADA (Noise Assisted Data Analysis).

Σε σχέση με τη διαδικασία της μεθόδου EMD, καταλήγουμε στο γεγονός ότι η μέθοδος EEMD θα περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- α) Πρόσθεση χρονοσειράς λευκού θορύβου στο επιθυμητό σήμα.
- β) Αποσύνθεση του σήματος με τον πρόσθετο λευκό θόρυβο σε IMF.
- γ) Επανάληψη των (α) και (β) βημάτων συνεχόμενα, αλλά με διαφορετικές χρονοσειρές από λευκό θόρυβο κάθε φορά.
- δ) Αποκόμιση των μέσων τιμών του συνόλου των αντίστοιχων IMF σαν τελικό αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα της αποσύνθεσης, χρησιμοποιώντας την μέθοδο EEMD, είναι ότι οι πρόσθετες χρονοσειρές από λευκό θόρυβο αλληλοακυρώνονται μέσω της τελικής μέσης τιμής των αντίστοιχων IMF.

Η αρχή της μεθόδου EEMD είναι απλή: ο πρόσθετος λευκός θόρυβος θα απλωθεί ομοιόμορφα σε όλο το διάστημα του χρόνου και της συχνότητας με όλες τις αποτελούμενες συνιστώσες με διαφορετικές κλίμακες χωρισμένες από την τράπεζα των φίλτρων. Όταν το σήμα προστεθεί σε αυτό το ομοιόμορφο λευκό φόντο, τα κομμάτια του σήματος που έχουν διαφορετικές κλίμακες αυτομάτως προβάλλονται στις κατάλληλες κλίμακες αναφοράς που έχουν παραχθεί από τον λευκό θόρυβο του φόντου. Βέβαια, κάθε ξεχωριστή αποσύνθεση μπορεί να επιφέρει πολύ θορυβώδη αποτελέσματα, γιατί κάθε μία από τις αποσυντιθέμενες συνιστώσες αποτελείται από

το σήμα και από τον πρόσθετο λευκό θόρυβο. Η μέση τιμή του συνόλου θεωρείται ως το αληθινό αποτέλεσμα, γιατί στο τέλος είναι το μόνο εναπομένον κομμάτι του σήματος ιδιαίτερα αν λάβουμε αρκετά μεγάλο πλήθος από προστιθέμενους θορύβους.

Για τις κρίσιμες ιδέες που αναπτύσσουμε εδώ, μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- 1) Μία συλλογή από λευκούς θορύβους οι οποίοι ακυρώνονται μεταξύ τους σε ένα χωρο-χρονικό σύστημα με αποτέλεσμα μόνο το σήμα να μπορεί να επιβιώσει και να παραμείνει τελικά.
- 2) Πεπερασμένος, όχι απειροελάχιστος, λευκός θόρυβος, είναι απαραίτητος για να αναγκάσει το σύνολο και να εξαντλήσει όλες τις πιθανές λύσεις.
- 3) Η πραγματική και ουσιαστική απάντηση σε σχέση με τη μέθοδο EMD δεν είναι αυτή που δεν έχει καθόλου θόρυβο. Είναι αυτή που προκύπτει από την μέση τιμή ενός μεγάλου αριθμού δοκιμών οι οποίες αποτελούνται από το σήμα και τον πρόσθετο θόρυβο.

Η μέθοδος EEMD χρησιμοποιεί όλα τα σημαντικά στατιστικά χαρακτηριστικά του θορύβου. Η EEMD χρησιμοποιεί τη δυνατότητα διαχωρισμού σε διαφορετικές κλίμακες που έχει η μέθοδος EMD και επιτρέπει στην μέθοδο EMD να είναι ένα αληθινό σύνολο από δυαδικά φίλτρα. Με την προσθήκη πεπερασμένου θορύβου, η EEMD μειώνει κατά πολύ το πρόβλημα του Mode mixing και διατηρεί μοναδικότητα της αποσύνθεσης. Ως εκ τούτου η EEMD αποτελεί σημαντική βελτίωση της μεθόδου EMD.

2.8. Η μέθοδος CEEMD (Complementary EEMD)

2.8.1 Ανάλυση της μεθόδου

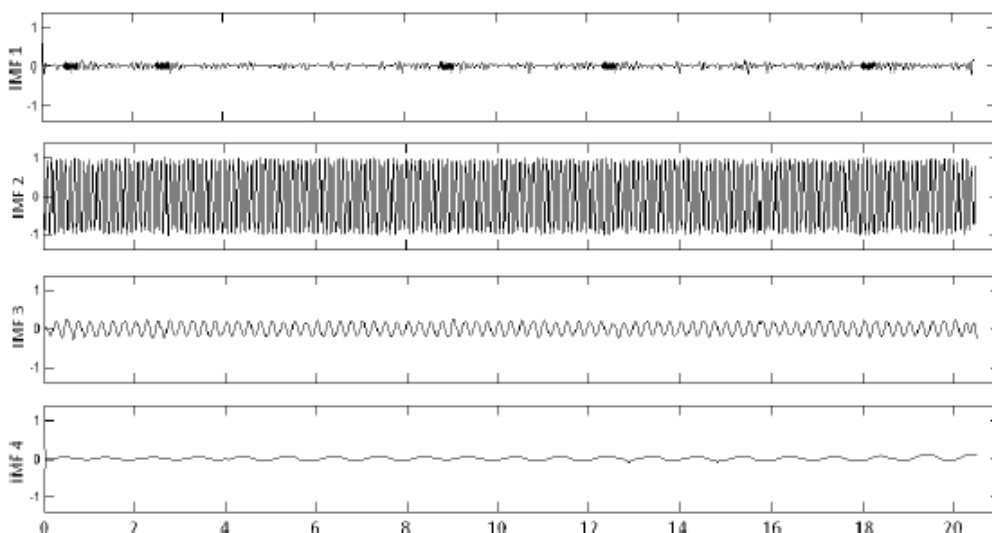
Στην νέα μέθοδο CEEMD, προστίθεται στο αρχικό σήμα λευκός θόρυβος σε πανομοιότυπα ζευγάρια (ένα θετικό και ένα αρνητικό) ώστε να παραχθούν δύο γκρουπ από στατιστικά σύνολα από IMFs. Έτσι, μπορούμε να εξάγουμε δύο μείγματα που έχουν συντεθεί από το αρχικό σήμα και τον προστιθέμενο θόρυβο, όπως δείχνεται στη σχέση,

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ N \end{bmatrix}$$

όπου S είναι το αρχικό σήμα, N είναι ο προστιθέμενος λευκός θόρυβος, M_1 είναι το άθροισμα του αρχικού σήματος με τον θετικό θόρυβο και το M_2 το άθροισμα του αρχικού σήματος με τον αρνητικό.

Τα σύνολα των IMF που λάβαμε από αυτά τα θετικά μείγματα, συμβάλουν σε σύνολα από IMF με θετικά υπόλοιπα προστιθέμενων λευκών θορύβων. Ομοίως, τα σύνολα των IMF που λάβαμε από τα αρνητικά μείγματα, συμβάλουν σε αντίστοιχα σύνολα από IMF με αρνητικά υπόλοιπα προστιθέμενων λευκών θορύβων.

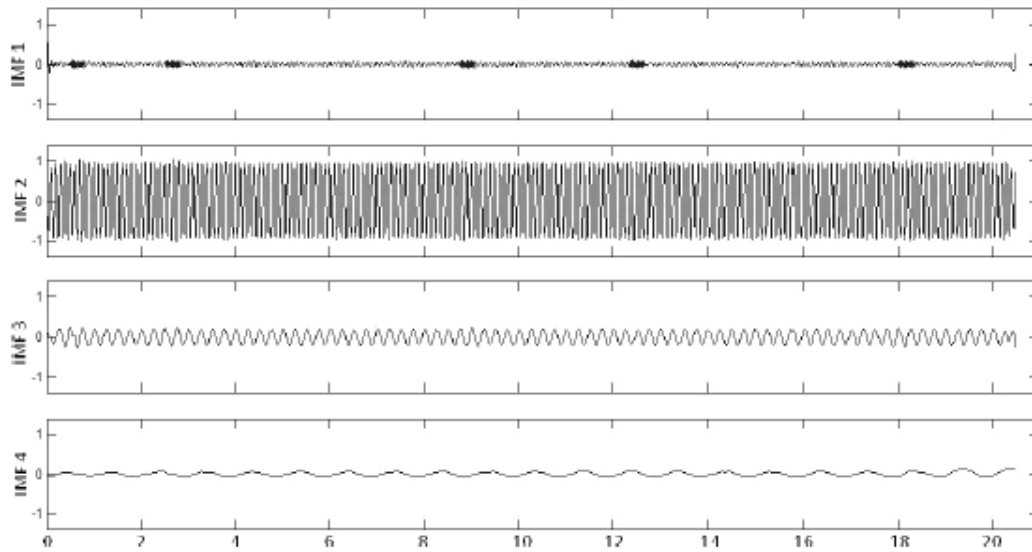
Έτσι, το τελικό σύνολο των IMF είναι αυτό που αποτελείται και από τα δύο με τους θετικούς και τους αρνητικούς θορύβους.



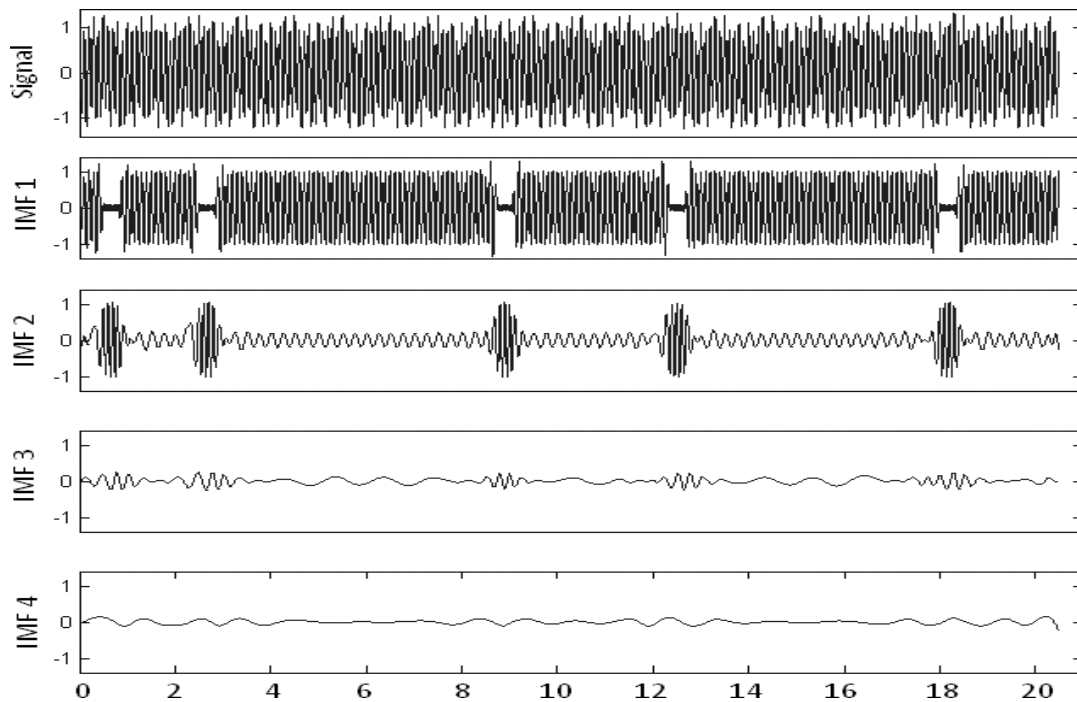
Σχήμα 10: Οι παραγόμενες IMF από προσομοιωμένη χρονοσειρά με τη μέθοδο CEEMD.

Το σχήμα 10 δείχνει τις IMF που εξήχθησαν από προσομοιωμένη χρονοσειρά χρησιμοποιώντας 20 ζεύγη λευκού θορύβου. Επίσης μέσω της μεθόδου CEEMD εξήχθησαν 4 IMF για το σήμα αυτό οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές που εξήχθησαν μέσω της μεθόδου EEMD (Σχήμα 11). Για σύγκριση παραθέτουμε και την ανάλυση του ίδιου προσομοιωμένου σήματος μέσω της μεθόδου EMD (Σχήμα 12).

Η IMF 1 δείχνει το μείγμα από το διακοπτόμενο σήμα και κάποια υπολείμματα από τον προστιθέμενο λευκό θόρυβο. Οι IMF 2-4 είναι τα συστατικά των ημιτονοειδών κυμάτων από τα οποία αποτελείται η προσομοιωμένη χρονοσειρά.



Σχήμα 21: Οι παραγόμενες IMF από προσομοιωμένη χρονοσειρά με τη μέθοδο EEMD.

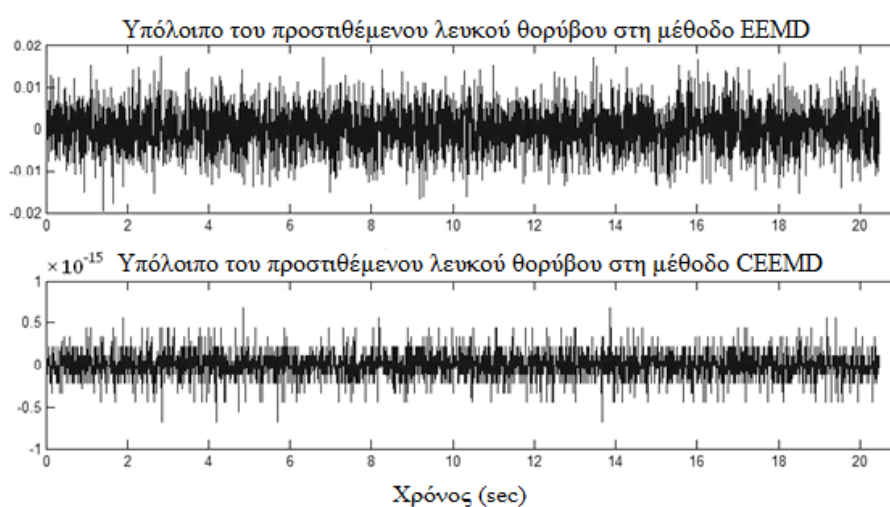


Σχήμα 32: Οι παραγόμενες IMF από προσομοιωμένη χρονοσειρά με τη μέθοδο EMD.

Με το μάτι δύσκολα θα έβλεπε κάποιος διαφορά στα αποτελέσματα της μεθόδου EEMD και της CEEMD για συγκεκριμένο σήμα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει μια ειδοποιός διαφορά μεταξύ των ανασχηματισμένων σημάτων μέσω των IMF και του αρχικού σήματος. Το τελικό υπόλοιπο που παράγεται από τις δύο μεθόδους

EEMD και της CEEMD και ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αρχικού και των ανακατασκευασμένων σημάτων, διαφέρει κατά πολύ και αναπαρίσταται στο σχήμα 13.

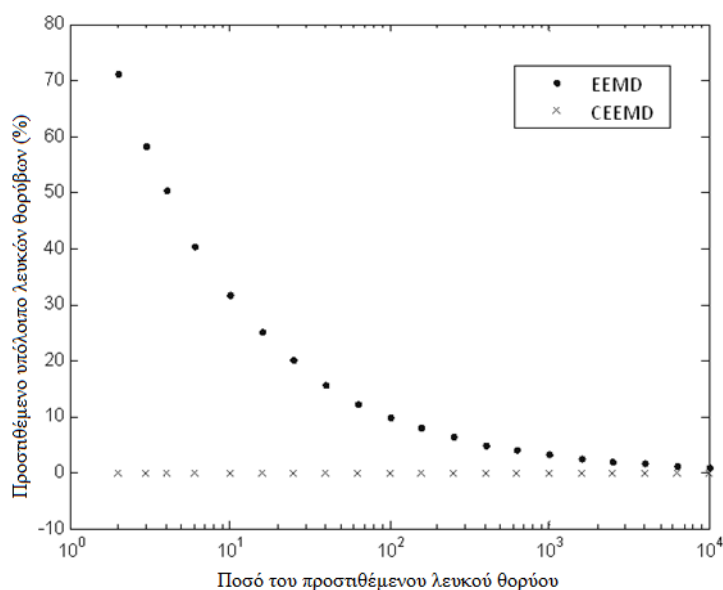
Ενώ το υπόλοιπο από την μέθοδο EEMD έχει ένα μέσο πλάτος περίπου 0.03, το αντίστοιχο υπόλοιπο από το CEEMD έχει μέσο πλάτος κοντά στο 0 (της τάξης του 10^{-15}). Ένα τέτοιου μεγέθους σφάλμα θα μπορούσε να αποδοθεί σε αριθμητικά σφάλματα που παράχθηκαν κατά τους υπολογισμούς. Άρα η CEEMD μπορεί να βελτιώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σήματος μέσω της εξάλειψης του υπολοίπου από τον προστιθέμενο λευκό θόρυβο.



Σχήμα 13: Τα υπόλοιπα του προστιθέμενου λευκού θορύβου που παράγονται από τις δύο μεθόδους EEMD και CEEMD.

2.8.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου CEEMD.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων CEEMD και EEMD, μπορούμε να καταλήξουμε ότι θα μπορούσε να υπάρξει μία οικονομία στο χρόνο υπολογισμού, εάν μας ενδιαφέρει η ανακατασκευή του τελικού σήματος, καθώς τα ζεύγη του λευκού θορύβου θα μπορούσαν αποτελεσματικά να μειώσουν το τελικό υπόλοιπο του λευκού θορύβου. Ως απόδειξη για τα πλεονεκτήματα της μεθόδου CEEMD, έχει γίνει ένα αριθμητικό πείραμα. Σε αυτό το πείραμα, διαφορετικοί αριθμοί (από $10^{0.2}$ έως 10^4) του προστιθέμενου λευκού θορύβου χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν το υπόλοιπο του λευκού θορύβου εκφρασμένο σαν ποσοστό επί του 100 (%). Τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού, όπως φαίνονται και στο σχήμα 14, δείχνουν πως για την μέθοδο EEMD το υπόλοιπο εξαρτάται από το ποσό του προστιθέμενου λευκού ήχου όπως ήταν και αναμενόμενο ενώ η μέθοδος CEEMD μπορεί να εξαλείψει το υπόλοιπο του προστιθέμενου λευκού θορύβου ανεξάρτητα από τον αριθμό των θορύβων που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 14: Ποσό του προστιθέμενου λευκού θορύβου

Πέρα από την εξάλειψη του θορύβου στο υπόλοιπο, οι επιδόσεις των δυο αυτών μεθόδων είναι ίδιες συγκρινόμενες με βάση τα σφάλματα RMS για κάθε IMF. Ο πίνακας 1 συνοψίζει τα αποτελέσματα για το ποσοστό (επί τις εκατό) του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (percentage mean squared errors, PMSE) της κάθε

επικρατούσας συνιστώσας και του υπολοίπου του προστιθέμενου λευκού θορύβου, σε αυτό το τεστ. Φυσικά η μεγάλη σημασία των μέσων λαθών στο τετράγωνο υποδεικνύει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των αρχικών σημάτων και των παραγόμενων και ως εκ τούτου δίνουν μια φτωχότερη επίδοση στην αποσύνθεση των σημάτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 1, οι μέθοδοι EEMD και CEEMD έχουν παρόμοιες επιδόσεις στην αποσύνθεση των σημάτων όταν έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο ποσό λευκού θορύβου.

<i>Αριθμός λευκών θορύβων</i>	<i>PMSE της 1ης συνιστώσας (%)</i>		<i>PMSE της 2ης συνιστώσας (%)</i>		<i>Υπόλοιπο των προστιθέμενων λευκών θορύβων (%)</i>	
	EEMD	CEEMD	EEMD	CEEMD	EEMD	CEEMD
40	2.08	1.89	19.78	19.56	13.43	0
80	1.83	1.67	19.56	19.67	9.68	0
160	1.69	1.60	19.13	19.62	6.80	0
320	1.62	1.58	18.59	18.59	4.7	0
640	1.57	1.56	18.88	15.50	3.45	0
1280	1.54	1.57	18.48	18.59	2.37	0
2560	1.55	1.56	18.52	18.48	1.69	0

Πίνακας 1: Το υπόλοιπο του προστιθέμενου λευκού θορύβου και το ποσοστό (επί τις εκατό) του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (PMSE), μεταξύ των αρχικών σημάτων/των αντίστοιχων τους IMF με την χρήση της EEMD και της CEEMD, χρησιμοποιώντας διαφορετικό αριθμό λευκών θορύβων.

Σημείωση: Το υπόλοιπο του προστιθέμενου λευκού θορύβου φαίνεται σαν αναλογία μεταξύ της ενεργειακής πυκνότητας του υπολοίπου και του προστιθέμενου λευκού θορύβου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα φαίνεται σαν ποσοστό επί της 100 που συσχετίζεται με την μέση τετραγωνική ενέργεια της συνιστώσας. Ο αριθμός των προστιθέμενων λευκών θορύβων που χρησιμοποιείται στην μέθοδο CEEMD είναι ο μισός από αυτόν που χρησιμοποιείται στην EEMD ώστε να γίνει η σύγκριση στην ίδια κλίμακα υπολογισμών.

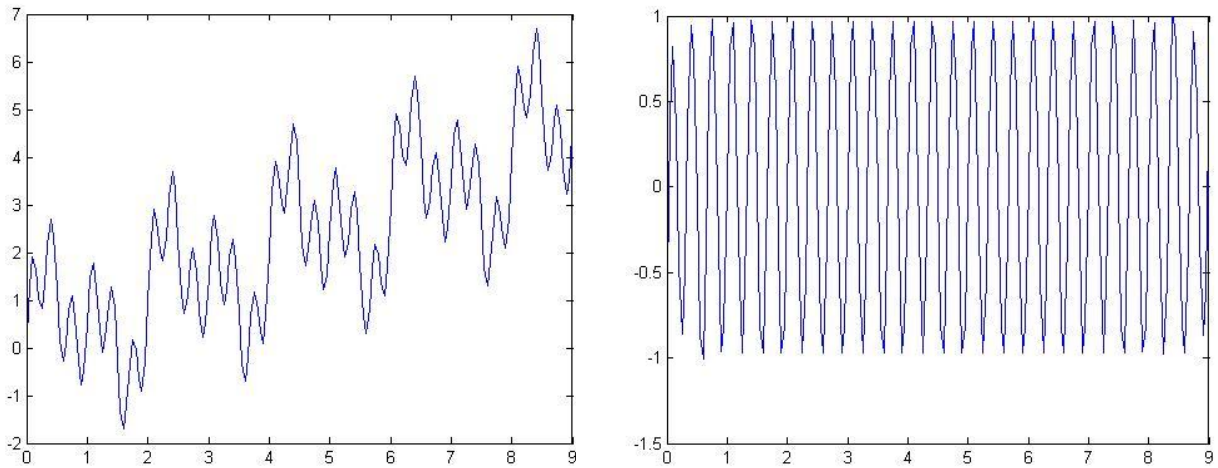
2.9 Παραδείγματα μετασχηματισμού EMD και EEMD σε απλά σήματα.

- Παράδειγμα μετασχηματισμού EMD σε απλό σήμα

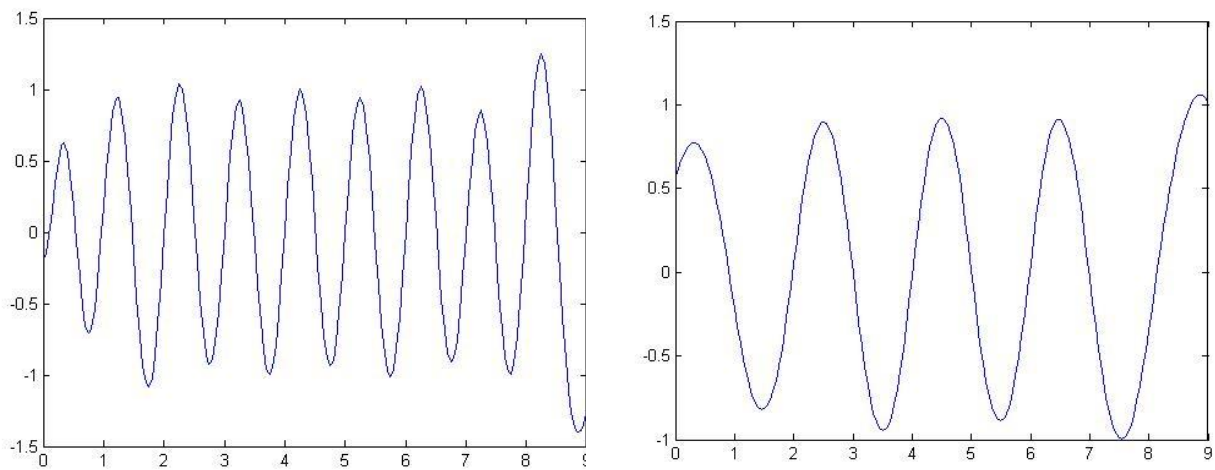
Η παραγωγή των IMF με την μέθοδο EMD για το σήμα

$$x = 0.5t + \sin(\pi t) + \sin(2\pi t) + \sin(6\pi t), \text{ όπου } 0 < t < 9 \text{ s}$$

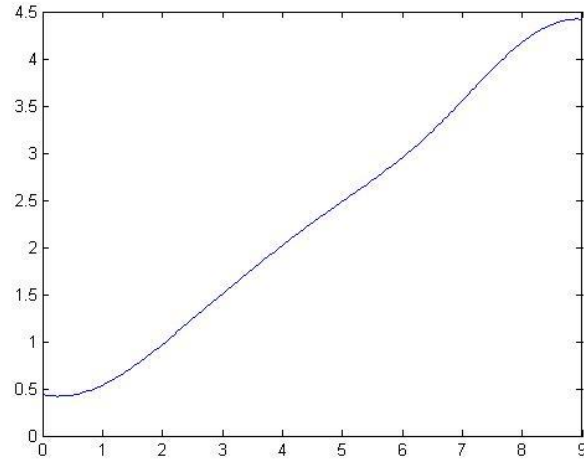
(19)



Σχήμα 15: Το σήμα πριν τον μετασχηματισμό (αριστερά) και η πρώτη IMF (δεξιά)



Σχήμα 16 :Η δεύτερη IMF (αριστερά) και η τρίτη (δεξιά)

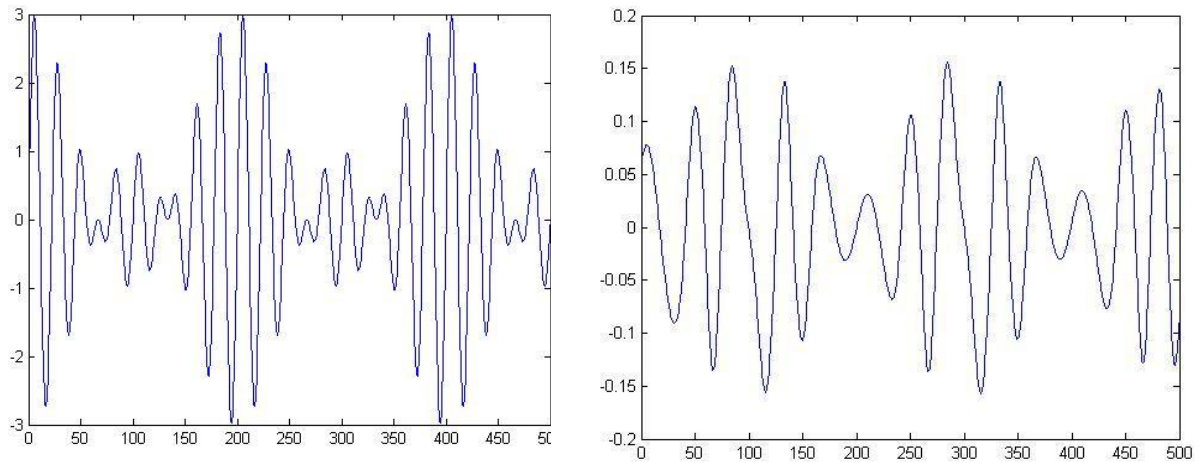


Σχήμα 17 :Το υπόλοιπο (παρατηρούμε πως είναι μονοτονική συνάρτηση)

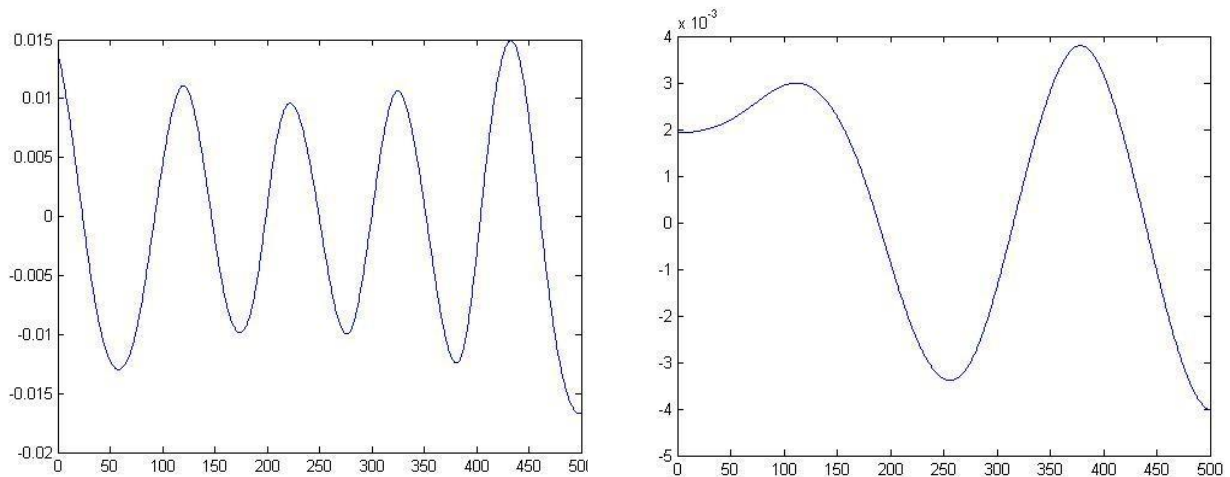
- Παράδειγμα μετασχηματισμού EEMD σε απλό σήμα

Η παραγωγή των IMF με την μέθοδο EEMD για το σήμα

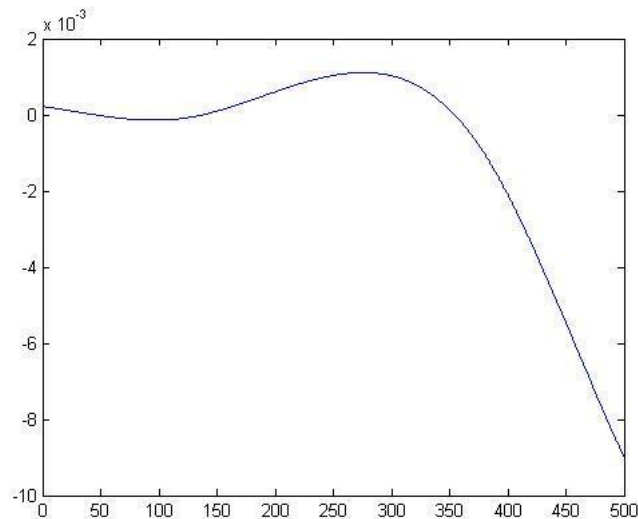
$$x = \sin(2\pi 0.04t) + \sin(2\pi 0.045t) + \sin(2\pi 0.05t), \text{ όπου } 0 < t < 500 \text{ s} \quad (20)$$



Σχήμα 18 : Το σήμα πριν τον μετασχηματισμό (αριστερά) και η πρώτη IMF (δεξιά)



Σχήμα 19 :Η δεύτερη IMF (αριστερά) και η τρίτη (δεξιά)



Σχήμα 20. Το υπόλοιπο.

Παρατηρώντας το υπόλοιπο στο Σχ. 20, βλέπουμε ότι έχει και μέγιστο και ελάχιστο, αν και κανονικά πρέπει να είναι μια συνάρτηση μονοτονική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι από ένα σημείο και μετά προσθέσαμε τις τελευταίες IMF, οι οποίες δεν έχουν κάποια φυσική σημασία. Το «εσφαλμένο» υπόλοιπο λοιπόν το παραθέτουμε επίτηδες για να δείξουμε ότι στην πραγματικότητα αυτό το σήμα έχει κι άλλες IMF οι οποίες έχουν ενταχθεί στο υπόλοιπο.

Προτάσεις για τρόπους συνέχισης της παρούσας εργασίας.

Η μελέτη των μετασχηματισμών EMD, EEMD και CEEMD μπορεί να αποφέρει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά τις ιδιότητες των διαφόρων μουσικών οργάνων. Έτσι, η μελέτη όλων των οικογενειών των μουσικών οργάνων (έγχορδα, μεμβρανόφωνα, ιδιόφωνα) με χρήση του μετασχηματισμού Huang θα μας βοηθήσει στην περαιτέρω εξαγωγή συμπερασμάτων για τα όργανα αυτά.

Χρήσιμες επίσης πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν και για τις διάφορες τεχνικές παιξίματος κάθε οργάνου, π.χ. τι αλλαγές γίνονται στον ήχο από το πέρασμα από μία νότα σε άλλη με διάφορες τεχνικές κ.ο.κ.

Χρησιμοποιώντας διαγράμματα Χρόνου-Συχνότητας, οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ανάκτηση των μελωδικών μερών όταν διαφορετικά όργανα ηχούν ταυτόχρονα.

Κεφάλαιο 3

3.1 Βασικές πληροφορίες για τους ήχους και τις μεθόδους με τις οποίες αναλύθηκαν

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δεδομένων που εισαγάγαμε προς επεξεργασία με τη χρήση τριών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτοί πραγματοποιούν την ανάλυση EMD (και FFT), και μας δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης όλων των αποτελεσμάτων αλλά και των γραφημάτων που αφορούν τη μορφή, τη στιγμιαία συχνότητα και την περιβάλλουσα κάθε IMF ξεχωριστά. Οι ήχοι επιλέχθηκαν με το σκεπτικό της μελέτης της συμπεριφοράς του ήχου των πνευστών οργάνων (ιδιαίτερα κατά την ατάκα κάθε νότας, κατά το σταθερό μέρος της νότας αλλά και κατά την μετάβαση από νότα σε νότα, σύμφωνα με διαφορετικές τεχνικές παιξίματος). Με βάση αυτούς τους ήχους έγινε και σχολιασμός της απόδοσης κάθε αντίστοιχου κώδικα για κάθε μέθοδο.

Στην εργασία, χρησιμοποιήθηκαν ήχοι από δυο πνευστά όργανα, το κλαρίνο (ξύλινο πνευστό) και την τρομπέτα (χάλκινο πνευστό). Για να βγουν κατάλληλα συμπεράσματα, οι ήχοι αναλύονται σε ζευγάρια στην παρακάτω σειρά.

Κλαρίνο

- Η πρώτη δυάδα αφορά νότες σταθερού πλάτους παιγμένες με τον ίδιο τρόπο, στην τονικότητα της νότας A, 4^{ης} οκτάβας (440 Hz), σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση.
- Β) Η δεύτερη δυάδα αφορά πάλι νότες σταθερού πλάτους παιγμένες με τον ίδιο τρόπο και σε διαφορετική ένταση, σε διαφορετική όμως τονικότητα, στη νότα A# 4^{ης} οκτάβας (465 Hz).
- Γ) Η τρίτη δυάδα έχει να κάνει με ατάκες κλαρίνου. Μια απότομη και μια πιο ομαλή. Η τονικότητα τους είναι στην A 4^{ης} οκτάβας (440 Hz).

Τρομπέτα

Με το ίδιο σκεπτικό χωρίζουμε κι εδώ τις νότες σε δυάδες.

- Η πρώτη είναι νότες σταθερού πλάτους παιγμένες με τον ίδιο τρόπο, στη νότα A4 (440 Hz) σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση.
- Η δεύτερη δυάδα αφορά πάλι νότες σταθερού πλάτους παιγμένες με τον ίδιο τρόπο και σε διαφορετική ένταση, σε διαφορετική όμως τονικότητα, στη νότα A#4 (465 Hz).
- Η τρίτη δυάδα έχει να κάνει με ατάκες τρομπέτας. Μια απότομη και μια πιο ομαλή. Η τονικότητα τους είναι στην A4 (440 Hz).
- Ακόμα, θα παραθέσουμε την σύγκριση ήχων από νότες που μεταβάλουν το τονικό τους ύψος. Πιο συγκεκριμένα ο πρώτος ήχος, ανεβαίνει την κλίμακα από την Ab4 (415 Hz) έναν τόνο, μέχρι την A#4 (466 Hz). Ο δεύτερος την κατεβαίνει ένα ημιτόνιο από την D#5 (626 Hz) στην D5 (573 Hz). Να σημειωθεί ότι το όργανο εδώ παρουσιάζει απόκλιση στην τονικότητα περίπου 4 με 10 cents, πράγμα που δεν αλλοιώνει τα δικά μας αποτελέσματα.

Τέλος θα υπολογίσουμε και θα συγκρίνουμε τους μέσους όρους των χρόνων ανόδου των αρμονικών για ήχους από ατάκες κλαρίνου σε δυνατό και μαλακό παίξιμο στις νότες A4, B4, C5, B5 ώστε να προσπαθήσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις ιδιότητες τους.

Οι ήχοι που χρησιμοποιήσαμε

Οι ήχοι που χρησιμοποιήθηκαν, διαλέχτηκαν από CD με ηχογραφημένους ήχους sample. Συγκεκριμένα, διαλέξαμε τα vol.6 και vol.8. της “Sonart Audio”, που περιέχει ηχογραφημένα samples από κλαρίνο και τρομπέτα, σε διάφορους τρόπους παιξίματος και σε μια σειρά τονικότητες.

Η διάρκεια των ήχων που εισαγάγαμε προς ανάλυση ήταν πολύ μικρή, περίπου 200 ms, καθ' ότι ο μετασχηματισμός EMD σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες μόνο για έναν ήχο. Αυτό εξαρτάται κατά βάση από το πλήθος των αρμονικών που παρουσιάζει το όργανο. Συνεπώς όχι τόσο το κλαρίνο, αλλά η τρομπέτα που παρουσιάζει μεγάλο πλήθος αρμονικών είναι αυτή που χρειάστηκε περισσότερο χρόνο για να μελετηθεί. Πρώτα όμως ας δώσουμε τις βασικές πληροφορίες που αφορούν τις μεθόδους που μας δίνουν τους μετασχηματισμούς.

Μέθοδοι ανάλυσης

Θα αναλύσουμε τους ήχους με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Και οι τρεις πραγματοποιούν μετασχηματισμό EMD.

Μέθοδος 1: Με τη μέθοδο αυτή, αφού εισάγουμε τα δεδομένα που έχουμε επιλέξει, μας δίνεται η δυνατότητα να διαλέξουμε το μέρος του ήχου που θα αναλυθεί. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιεί μετασχηματισμό EMD χωρίς όμως να δίνει την επιλογή στον χρήστη να διαλέξει το πλήθος των IMFs που θα παραχθεί κι έτσι παράγει όσες υποδεικνύονται στα κριτήρια του κώδικα που χρησιμοποιεί.

Μέθοδος 2: Σαν βελτίωση της μεθόδου 1 ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί ένα σήμα επικάλυψης (βλέπε κεφάλαιο 2, mode mixing) ώστε να υπερβεί διάφορα προβλήματα στον μετασχηματισμό EMD. Το σήμα επικάλυψης που προστίθεται είναι μόνο ένα σήμα ημιτόνου με συχνότητα που είναι 200 Hz παραπάνω από την μεγαλύτερη αρμονική. Μετά από αυτή την διαδικασία γίνεται ο μετασχηματισμός EMD. Επίσης, δίνεται η επιλογή στον χρήστη να διαλέξει το πλήθος των IMFs που θέλει να εξάγει.

Μέθοδος 3: Εξάγει τα IMFs αφού προσθέσει και αφαιρέσει το δοσμένο ημίτονο επικάλυψης από τον χρήστη. Σαν βελτίωση της προηγούμενης μεθόδου, δίνεται η επιλογή να διαλέγουμε για κάθε ξεχωριστή IMF το δικό της σήμα επικάλυψης. Εδώ το σήμα επικάλυψης που προστίθεται είναι ένα σήμα ημιτόνου με συχνότητα που είναι 200 Hz παραπάνω από την εκάστοτε αρμονική. Μετά από αυτή την διαδικασία γίνεται ο μετασχηματισμός EMD. Δίνεται επίσης και εδώ η επιλογή στον χρήστη να διαλέξει το πλήθος των IMFs που επιθυμεί να εξάγει.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζουμε συνολικά την τονικότητα, τον τρόπο παιξίματος των ήχων, καθώς και τις μεθόδους με τις οποίες έγινε η ανάλυση. Έχει εισαχθεί επίσης βαθμολογία, που προσδιορίζει την ακρίβεια των αναλύσεων.

Πίνακας 1: Τρόποι, τονικότητα και οι μέθοδοι με τις οποίες αναλύθηκαν οι ήχοι που χρησιμοποιήσαμε.

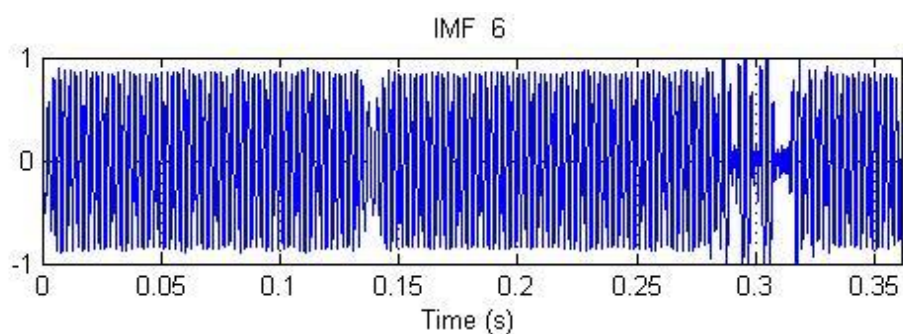
Κλαρίνο	Νότα	Ομαλή ατάκα	Απότομη ατάκα	Σταθερή νότα χαμηλής έντασης	Σταθερή νότα υψηλής έντασης	Μετάβαση	EMD	EMD Με 1 ημίτονο επικάλυψης	EMD Με πολλά ημίτονα επικάλυψης	CEEMD
	A ₄	X	X	X	X		7	5	7	
	A# ₄			X	X		7	5	7	
	A ₄ , B ₄ , C ₅ , B ₅	X	X							9
Τρομπέτα	A ₄	X	X	X	X		6	6	8	
	A# ₄			X	X		6	6	8	
	Ab ₄ -> A# ₄					X	7	6	8	
	D# ₅ -> D ₅					X	7	6	8	

Πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν γίνει επίσης αναλύσεις με την μέθοδο EEMD, αλλά μόνο για σήματα ελέγχου (βλ. κεφάλαιο 2.9).

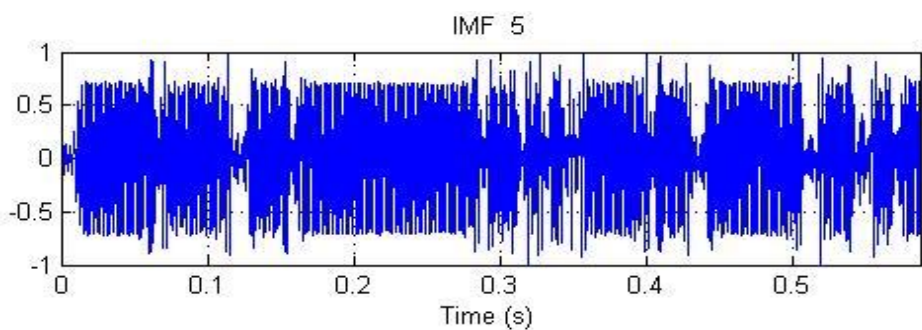
3.2 Αναλύσεις των ήχων του κλαρίνου

3.2.1 Πληροφορίες και ανάλυση του 1^{ου} ζευγαριού ήχων κλαρίνου

α) Ζευγάρι ήχων Κλαρίνου, παιγμένο με τον ίδιο τρόπο, σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση, στην A4 (440 Hz)



Εικόνα 1: Το έκτο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 1 και αφορά τον ήχο χαμηλής έντασης



Εικόνα 2 : Το πέμπτο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 1 και αφορά τον ήχο υψηλότερης έντασης

Πίνακας 2: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις εμπεριέχουν στον ήχο χαμηλής έντασης (4 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	6 ^ο	3 ^ο	5 ^ο
2 (880)	5 ^ο	-	4 ^ο
3 (1320)	5 ^ο , 4 ^ο	2 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο
4 (1760)	4 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 3: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις περιλαμβάνουν στον ήχο ψηλότερης έντασης (7 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	5 ^ο	3 ^ο	7 ^ο
2 (880)	4 ^ο	-	6 ^ο
3 (1320)	4 ^ο	2 ^ο	5 ^ο , 4 ^ο
4 (1760)	3 ^ο	-	3 ^ο , 2 ^ο
5 (2200)	3 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
6 (2640)	3 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
7 (3080)	2 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 4: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο χαμηλής έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	10K – 13.2K	1600- 1900	1620- 1890
2 ^ο	5K – 10K	1100 – 1600	1310 – 1330
3 ^ο	1650 – 6K	400 -500	1150 – 1520
4 ^ο	920 – 2300	50 – 150	860 – 900
5 ^ο	740 – 1500		370 – 590
6 ^ο	400 – 520		
7 ^ο	200 – 300		
8 ^ο	100 – 200		
9 ^ο	50 – 100		
10 ^ο	30 – 60		
11 ^ο	15 – 30		
12 ^ο	5 – 15		
13 ^ο	4 – 6		

Πίνακας 5: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο υψηλότερης έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	10K – 11.9K	2200 – 3200	1890 – 3235
2 ^ο	2.6K – 8K	885 – 1515	1620- 1890
3 ^ο	1K – 3K	416 – 460	1700 – 1850
4 ^ο	870 – 1.5K	200 – 300	1310 – 1330
5 ^ο	400 – 560	50 – 100	1150 – 1550
6 ^ο	200 – 400	50 – 100	860 – 900
7 ^ο	120 – 280	20 – 60	400 – 520
8 ^ο	100 – 200	10 – 20	
9 ^ο	50 – 90		
10 ^ο	30 -60		
11 ^ο	15 – 30		
12 ^ο	7 – 20		
13 ^ο	2 – 8		
14 ^ο	2 – 4		

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο εξάγονται 13 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης εξάγονται 14. Όταν η αντιστοιχία των αρμονικών είναι 4 στο χαμηλό παίξιμο και 7 στο δυνατό.

Στιγμιαίες συχνότητες:

• *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 13 IMFs που εξάγονται, μόνο τρία περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Αυτό ισχύει μόνο στο 6^ο IMF. Στα άλλα δυο (4^ο και 5^ο) παρατηρείται μίξη τρόπων, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών ανεβαίνει στις 4. Ξανά, μόνο το 5^ο IMF κινείται με κέντρο την 1^η αρμονική. Στα υπόλοιπα (2^ο, 3^ο και 4^ο) παρατηρείται πάλι μίξη τρόπων.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Κατά το παίξιμο χαμηλής έντασης από την 1^η μέχρι και την 3^η IMF, είναι εξαιρετικά μικρά. Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν. Από το 7^ο IMF μέχρι και το τέλος μικραίνουν πάλι.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Το αναμενόμενο θεωρητικά θα ήταν να βρούμε τα πλάτη που αντιστοιχούν σε αρμονικές σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια όπως. Όπως, λαμβάνοντας υπ' όψιν το Masking effect, τα κριτήρια του κώδικα αλλά και τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις..

Μέθοδος 2: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο ζητήσαμε 4 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης ζητήσαμε 8.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 4 IMFs που εξάγονται, τα τρία περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Η αρμονική που δεν περιλαμβάνεται σε κανένα IMF είναι η 2^η. Τέλος, δεν παρατηρείται εδώ μίξη των αρμονικών σε κάποιο IMF. Μόνο μια IMF δεν περιέχει συχνότητα αρμονικής.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών είναι ξανά 3. Τώρα, η 2^η και η 4^η αρμονική δεν εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Το τρίτο IMF έχει εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια γύρω από τη συχνότητα όπως 1^η αρμονικής. Όμως τα

υπόλοιπα δεν ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών για την 1^η IMF η οποία περιλαμβάνει την 5^η, 6^η και 7^η αρμονική.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs που περιέχουν αρμονικές, κινούνται γύρω από τα πλάτη των αρμονικών αλλά με ανεβοκατεβάσματα. Το πλάτος του 4^{ου} IMF είναι εξαιρετικά μικρό.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα της ανάλυσης EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις.

Μέθοδος 3 : Στο χαμηλής έντασης παίξιμο ζητήσαμε 5 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης ζητήσαμε 7.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 5 IMFs που εξάγονται, και τα 5 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Αυτό ισχύει κάπως λιγότερο στο 3^ο IMF. Ακόμα, η 3^η αρμονική περιλαμβάνεται και στο 2^ο και στο 3^ο IMF. Το 5^ο IMF σε αντίθεση με τα άλλα, δεν καταφέρνει να εξαχθεί γύρω από την συχνότητα της 1^{ης} αρμονικής που του αντιστοιχεί.

Υψηλότερη ένταση: Ξανά, όλα τα IMFs περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Οι εντάσεις τους αναλογούν στις εντάσεις των αρμονικών. Τα 6^ο, 4^ο, 3^ο και 2^ο IMFs έχουν εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια γύρω από τη συχνότητα των αρμονικών που περιλαμβάνουν. Μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τον αρμονικό που περιέχει παρατηρείται στο 7^ο IMF – 1^ο αρμονικό. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών για την 1^η IMF η οποία περιλαμβάνει την 5^η, 6^η και 7^η αρμονική.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

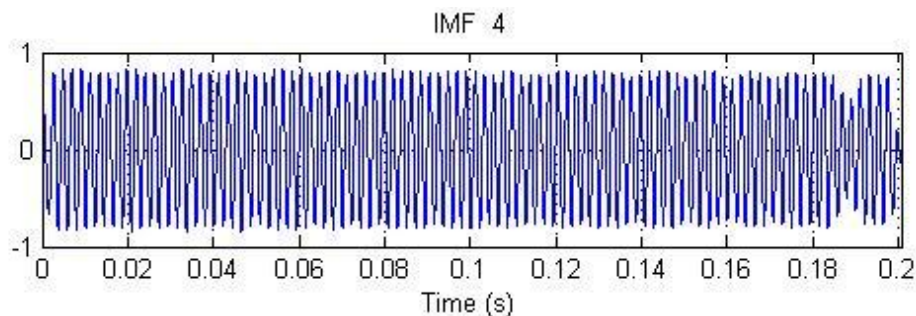
Ξανά, τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

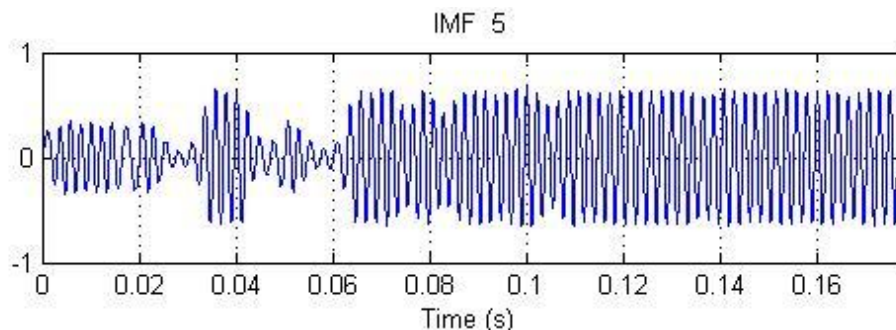
Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα όπως μεθόδου EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις.

3.2.2 Πληροφορίες και ανάλυση του 2^{ου} ζευγαριού ήχων κλαρίνου

β) Ζευγάρι ήχων Κλαρίνου, παιγμένο με τον ίδιο τρόπο, σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση, στην A#4 (465 Hz)



Εικόνα 3: Το τέταρτο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 2 και αφορά τον ήχο χαμηλής έντασης



Εικόνα 4: Το πέμπτο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 2 και αφορά τον ήχο υψηλότερης έντασης

Πίνακας 6: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMF's που τις εμπεριέχουν στον ήχο χαμηλής έντασης (5 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (467)	5 ^ο	4 ^ο	6 ^ο
2 (934)	-	3 ^ο	5 ^ο
3 (1401)	4 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο
4 (1868)	3 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	2 ^ο
5 (2335)	2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 7: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMF's που τις εμπεριέχουν στον ήχο υψηλότερης έντασης (8 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (467)	6 ^ο	5 ^ο	10 ^ο
2 (934)	-	4 ^ο	9 ^ο
3 (1401)	5 ^ο , 4 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	8 ^ο , 7 ^ο
4 (1868)	4 ^ο , 3 ^ο	2 ^ο	6 ^ο , 5 ^ο
5 (2334)	3 ^ο	2 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο
6 (2801)	3 ^ο	1 ^ο	2 ^ο
7 (3268)	3 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
8 (3736)	3 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 8: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο χαμηλής έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	5K – 10K	1K – 4K	1690 – 2300
2 ^ο	2K – 6K	1400 – 2440	1750 – 1950
3 ^ο	1K – 2.24K	553 - 1700	1390 – 1410
4 ^ο	1289 – 1515	440 – 500	1360 – 1460
5 ^ο	460 - 475	200 – 300	930 – 950
6 ^ο	200 – 400	100 – 150	400 – 700
7 ^ο	200 – 400	50 - 100	
8 ^ο	50 – 150	20 – 40	
9 ^ο	40 – 80	20 – 30	
10 ^ο	25 – 30		
11 ^ο	12 - 28		
12 ^ο	7 – 8		

Πίνακας 9: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο υψηλής έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	5K – 10K	2.1K – 4.8K	3.1K – 4K
2 ^ο	4 K – 6K	1400 – 2650	2670 – 2890
3 ^ο	1265 – 3762	1000 – 1670	1970 – 2650
4 ^ο	1100 - 2285	500 – 1600	2200 – 2400
5 ^ο	960 - 1450	440 – 480	1830 – 1940
6 ^ο	435 - 500	200 – 300	1800 – 1900
7 ^ο	200 – 300	50 – 150	1390 – 1410
8 ^ο	200 – 300	50 – 100	1376 – 1440
9 ^ο	50 – 150	20 – 60	890 – 990

10 ^ο	50 – 100		410 – 650
11 ^ο	30 – 50		
12 ^ο	20 – 30		
13 ^ο	5 – 15		
14 ^ο	2 – 10		

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο εξάγονται 12 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης εξάγονται 14. Όταν η αντιστοιχία των αρμονικών είναι 5 στο χαμηλό παίξιμο και 8 στο δυνατό.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 12 IMFs που εξάγονται, μόνο τέσσερα περιέχουν συχνότητες αρμονικών ενώ η 2^η αρμονική δεν εμπεριέχεται σε κανένα IMF. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Η εξαίρεση είναι το 5^ο IMF (1^η αρμονική) όπου παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στην στιγμιαία συχνότητα. Ακόμα, δεν παρατηρείται μίξη τρόπων σε κανένα IMF.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των αρμονικών που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών εξακολουθεί να είναι ο ίδιος. Πάλι η 2^η αρμονική δεν εμπεριέχεται σε κανένα IMF. Και αντίστοιχα, μόνο το 6^ο IMF κινείται με κέντρο την 1^η αρμονική. Μίξη τρόπων παρατηρείται στην 3^η και 4^η αρμονική που εμπεριέχονται σε δυο IMFs ταυτόχρονα.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Στα IMFs που δεν περιλαμβάνουν συχνότητες αρμονικών, τα πλάτη τους είναι εξαιρετικά χαμηλά. Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών που εμπεριέχουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Το αναμενόμενο θεωρητικά θα ήταν να βρούμε τα πλάτη που αντιστοιχούν σε αρμονικές σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια όπως. Όπως, λαμβάνοντας υπ' όψιν το Masking effect, τα κριτήρια του κώδικα αλλά και τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις.

Μέθοδος 2: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο αλλά και στο υψηλότερης, ζητήσαμε 9 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 9 IMFs που εξάγονται, τα 4 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η συχνότητα δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα των αρμονικών. Εξαιρεση αποτελεί το 4^η IMF (1^η αρμονική) που κινείται με κέντρο την συχνότητα της 1^{ης} αρμονικής. Όλες οι αρμονικές εμπεριέχονται σε κάποια IMF. Τέλος, παρατηρείται μίξη των αρμονικών στο 1^ο και 2^ο IMF.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών είναι 5. Όλες οι αρμονικές εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Κανένα IMF δεν έχει εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια γύρω από τη συχνότητα των αρμονικών που εμπεριέχουν με εξαίρεση το 5^ο IMF και αυτό χωρίς να ισχύει για όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών στο 4^ο και 3^ο IMF.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs που περιέχουν αρμονικές, κινούνται γύρω από τα πλάτη των αρμονικών. Το πλάτος του 4^ο IMF είναι εξαιρετικά μικρό.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα της ανάλυσης EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια

σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις. Εκεί όπου τα IMFs έχουν εξαχθεί με καλύτερο τρόπο, τα πλάτη παρουσιάζουν σταθερότητα σε μεγάλο βαθμό. Αυτό δηλαδή συμβαίνει κυρίως στα IMFs που αντιστοιχούν στην 1^η αρμονική.

Μέθοδος 3 : Στο χαμηλής έντασης παίξιμο ζητήσαμε 6 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης ζητήσαμε 10.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 6 IMFs που εξάγονται, και τα 6 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η συχνότητα κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που περιλαμβάνουν και μάλιστα χωρίς σοβαρές αποκλίσεις με εξαίρεση το 6^ο IMF (1^η αρμονική). Ακόμα, η 3^η αρμονική περιλαμβάνεται και στο 4^ο και στο 3^ο IMF.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ξανά, όλα τα IMFs περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Οι εντάσεις αναλογούν στις εντάσεις των αρμονικών. Όλα τα IMFs έχουν εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια γύρω από τη συχνότητα των αρμονικών που περιλαμβάνουν με εξαίρεση το 1^ο το 3^ο και το 10^ο. Μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τον αρμονικό που περιέχει παρατηρείται στο 10 IMF – 1^ο αρμονικό. Επίσης, παρατηρείται μίξη των αρμονικών για το 8^ο και 7^ο IMF, το 6^ο και 5^ο, το 4^ο και 3^ο.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

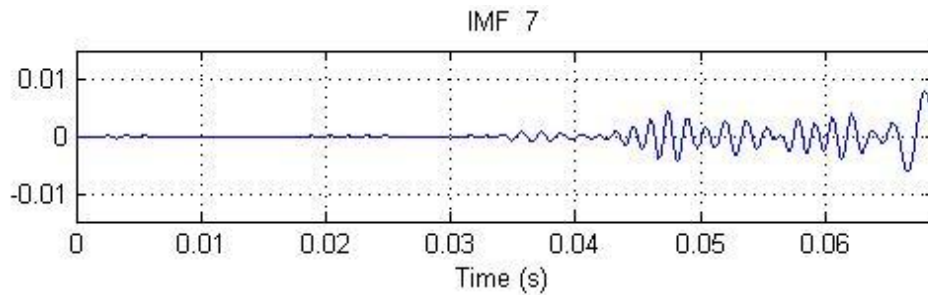
Ξανά, τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

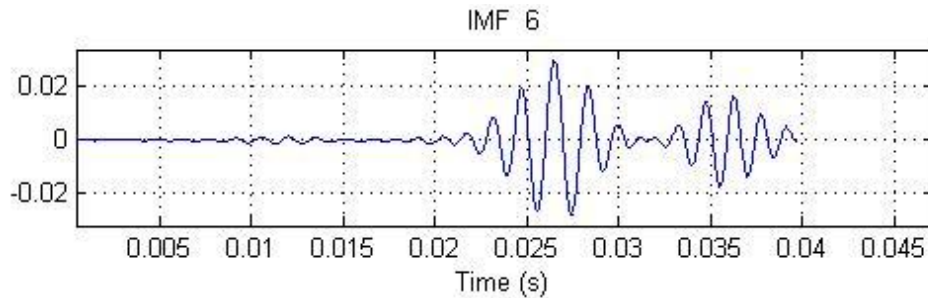
Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα όπως μεθόδου EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις. όμως σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους εδώ είναι σχετικά σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

3.2.3 Πληροφορίες και ανάλυση του 3^{ου} ζευγαριού ήχων κλαρίνου

Γ) Ζευγάρι από ατάκες Κλαρίνου, παιγμένες με διαφορετικό τρόπο, ομαλά και απότομα, στην τονικότητα της A4 (440 Hz)



Εικόνα 5: Το έβδομο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 3 και αφορά τον ήχο ομαλής ατάκας



Εικόνα 6: Το έκτο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 3 και αφορά τον ήχο απότομης ατάκας

Πίνακας 10: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις εμπεριέχουν, στον ήχο ομαλής ατάκας (5 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	6 ^ο	3 ^ο , 4 ^ο	7 ^ο
2 (880)	5 ^ο	-	6 ^ο
3 (1320)	4 ^ο , 5 ^ο	2 ^ο	5 ^ο , 4 ^ο
4 (1760)	4 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
5 (2200)	3 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 11: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMF's που τις περιέχουν, στον ήχο απότομης ατάκας (5 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	6 ^ο	5 ^ο	6 ^ο
2 (880)	5 ^ο	4 ^ο	5 ^ο
3 (1320)	5 ^ο , 4 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο
4 (1760)	4 ^ο	-	2 ^ο
5 (2200)	4 ^ο , 3 ^ο	-	1 ^ο

Πίνακας 12: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο ομαλής ατάκας

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμαϊάς συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμαϊάς συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμαϊάς συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	5K – 10K	2.2K – 5.4K	1850 – 2540
2 ^ο	4K – 6K	1170 – 1600	1700 - 1820
3 ^ο	1K – 4.5K	380 – 530	1760 – 1800
4 ^ο	800 – 1600	300 – 450	1300 – 1400
5 ^ο	420 – 1150	100 – 300	1290 – 1350
6 ^ο	430 – 465	50 – 150	800 – 960
7 ^ο	100 – 300	50 – 150	550 - 650
8 ^ο	100 – 200	30 – 40	
9 ^ο	50 – 70		
10 ^ο	20 – 30		

Πίνακας 13: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο απότομης ατάκας

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	5K – 10.4K	3.1K – 5.9K	1850 – 3400
2 ^ο	4K – 8K	2.5K – 3.6K	1500 – 1900
3 ^ο	2K – 5.8K	1000 – 1600	1100 – 1500
4 ^ο	1K – 2.6K	820 – 1400	1250 - 1350
5 ^ο	820 – 1370	430 – 450	750 – 940
6 ^ο	350 – 520	100 – 300	510 – 830
7 ^ο	120 – 280	100 – 200	
8 ^ο	100 – 300	30 – 60	
9 ^ο	40 – 110		
10 ^ο	30 – 35		

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στην ομαλή αλλά και στην απότομη ατάκα εξάγονται 10 IMFs, για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 5 στην ομαλή και 5 στο απότομο παίξιμο.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- **Ομαλή ατάκα:**

Από τα 10 IMFs που εξάγονται, μόνο τέσσερα περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Δεν υπάρχει αρμονική που να μην εμπεριέχεται σε κάποιο IMF. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Η εξαίρεση είναι το 6^ο IMF (1^η αρμονική) όπου παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στην στιγμιαία συχνότητα. Ακόμα, παρατηρείται μίξη τρόπων καθώς η 3^η αρμονική εμπεριέχεται σε δυο IMF.

- **Απότομη ατάκα:**

Ο αριθμός των αρμονικών που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών πέφτει στους 3. Πάλι δεν υπάρχει αρμονική που να μην εμπεριέχεται σε κάποιο IMF. Ενώ κανένα IMF δεν έχει εξαχθεί με κέντρο κάποια αρμονική. Μίξη τρόπων παρατηρείται στο 3^ο, 4^ο και 5^ο IMF.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Στα IMF's που δεν περιλαμβάνουν συχνότητες αρμονικών, τα πλάτη τους είναι εξαιρετικά χαμηλά. Στα IMF's που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών που εμπεριέχουν.

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, τα IMF's που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Εδώ η μελέτη του πλάτους αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, κάθε IMF σταθεροποιεί την τιμή της σε διαφορετικό χρονικό διάστημα. Φυσικά άμα η μέθοδος αυτή δεν παρουσίαζε κυματώσεις στις στιγμιαίες συχνότητες αλλά και μίξη τρόπων ταλάντωσης σε διάφορα IMF's τα αποτελέσματα θα ήταν ακόμα πιο σημαντικά. Παρ' όλα αυτά,

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 6^ο IMF δεν έχει σχεδόν μηδενικό πλάτος από το 0 μέχρι και το 0.055s, ενώ από εκεί μέχρι το 0.065 μεγαλώνει απότομα και σταθεροποιείται.

Το 5^ο IMF αρχίζει να μεγαλώνει από το 0.03s μέχρι και το 0.06 όπου σταθεροποιείται.

Το 4^ο IMF αρχίζει να μεγαλώνει από το 0.03s μέχρι και το 0.06 όπου σταθεροποιείται ενώ

Το 3^ο IMF αρχίζει να μεγαλώνει το πλάτος του στα 0.04s όπου εκεί παρουσιάζει πολύ απότομη άνοδο και σταθεροποίηση.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 6^ο IMF αρχίζει να μεγαλώνει το πλάτος του από το 0.01s ομαλά μέχρι το 0.04s όπου και σταθεροποιείται.

Το 5^ο IMF αρχίζει να μεγαλώνει το πλάτος του από το 0.02s όπου λίγο πιο απότομη κίνηση, σταθεροποιείται στα 0.04s.

Το 4^ο μεγαλώνει το πλάτος του από το 0.015 έως το 0.025 απότομα και έπειτα από το 0.25 έως το 0.4 ομαλά.

Το 3^ο ξεκινάει να μεγαλώνει το πλάτος του από το 0.02s έως το 0.03 ομαλά και έπειτα απότομα από το 0.03s έως το 0.04s όπου και σταθεροποιείται.

Μέθοδος 2: Στην ομαλή αλλά και στην απότομη ατάκα εξάγονται 8 IMFs, για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 5 στην ομαλή και 5 στο απότομο παίξιμο.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Ομαλή ατάκα:*

Από τα 8 IMFs που εξάγονται, τα πέντε περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Η δεύτερη αρμονική δεν εμπεριέχεται σε κάποιο IMF. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Αυτό αλλάζει για το 2^ο και 3^ο IMF που κινούνται με κέντρο την 3^η και 1^η αρμονική αντίστοιχα. Ακόμα, παρατηρείται μίξη τρόπων καθώς η 1^η αρμονική εμπεριέχεται σε δυο IMF.

- *Απότομη ατάκα:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών πέφτει στα 3. Εδώ, η 4^η και 5^η αρμονική δεν εμπεριέχονται σε κανένα IMF. Μίξη τρόπων παρατηρείται στο 4^ο IMF.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Στα IMFs που δεν περιλαμβάνουν συχνότητες αρμονικών, τα πλάτη τους είναι εξαιρετικά χαμηλά. Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών που εμπεριέχουν.

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Εδώ η μελέτη του πλάτους αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, κάθε IMF σταθεροποιεί την τιμή της σε διαφορετικό χρονικό διάστημα.

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 4^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.02s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.04s.

Το 3^ο IMF παρουσιάζει μικρή άνοδο από το 0.02s μέχρι το 0.04s και σταθεροποιείται με απότομη άνοδο στο 0.05s

Το 2^ο IMF παρουσιάζει μικρή άνοδο από το 0.02s μέχρι το 0.04s και σταθεροποιείται με απότομη άνοδο στο 0.06s

Το 1^ο IMF παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το 2^ο.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 5^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει πολύ ομαλά από το 0 έως το 0.04s. Εκεί σταθεροποιεί και το πλάτος του

Το 4^ο IMF μέχρι το 0.02s έχει σχεδόν μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.02s ανεβαίνει απότομα και σταθεροποιεί το πλάτος του σχεδόν αμέσως.

Το 3^ο IMF μέχρι και το 0.15s δεν ανεβάζει το πλάτος του ενώ από το 0.15s μέχρι και το 0.04s ανεβαίνει ομαλά, όπου και σταθεροποιείται.

Μέθοδος 3: Στην ομαλή ατάκα εξάγονται 7 IMFs και στην απότομη 6, για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 5 στην ομαλή και 5 στο απότομο παίξιμο.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Ομαλή ατάκα:*

Από τα 7 IMFs που εξάγονται, όλα εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν με μια σχετική ακρίβεια. Ακόμα, παρατηρείται μίξη τρόπων καθώς η 3^η και 4^η αρμονική εμπεριέχονται σε δυο IMF.

- *Απότομη ατάκα:*

Όλα τα IMFs εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών. Ξανά, οι κυματώσεις είναι μικρές, και άρα τα IMFs έχουν εξαχθεί με βάση τις συχνότητες των αρμονικών. Εδώ, 3^η αρμονική εμπεριέχονται και στο 4^ο και στο 3^ο IMF.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Η μέθοδος αυτή, δεν πιάνει σωστά το ύψος των πλατών. Για παράδειγμα η 1^η αρμονική (7^ο IMF) φαίνεται να έχει πλάτος μικρότερο της 5^{ης} (1^ο IMF).

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, δεν υπάρχει αντιστοιχία στα πλάτη με αυτά των αρμονικών.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Εδώ, αν και το ύψος των πλατών σίγουρα είναι λάθος, η κίνηση του πλάτους παρουσιάζει ενδιαφέρον. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, κάθε IMF σταθεροποιεί την τιμή της σε διαφορετικό χρονικό διάστημα.

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 7^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.035s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.045s.

Το 6^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.045s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.05s.

Το 5^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.02s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.045s.

Το 4^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.03s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.045s.

Το 3^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.035s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.055s.

Το 2^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.03s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.065s ενώ

Το 1^ο IMF ξεκινάει να ανεβαίνει από το 0.03s και σταθεροποιεί το πλάτος του στα 0.055s.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 6^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.01s έως το 0.02s όπου και σταθεροποιείται.

Το 5^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.01s έως το 0.025s όπου και σταθεροποιείται.

Το 4^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.01s έως το 0.025s όπου και σταθεροποιείται.

Το 3^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.015s έως το 0.025s όπου και σταθεροποιείται.

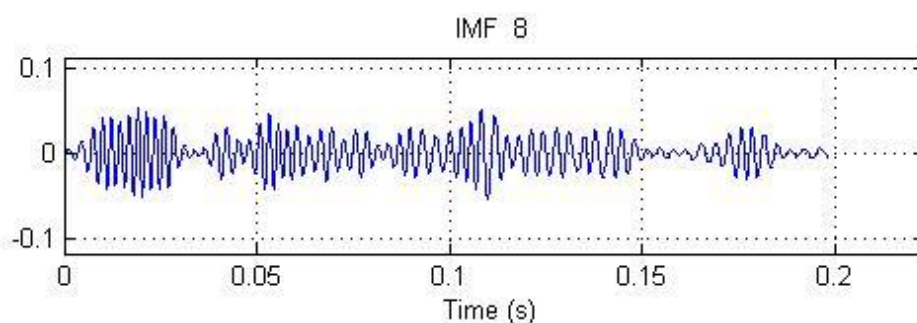
Το 2^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.015s έως το 0.03s όπου και σταθεροποιείται και τέλος

Το 1^ο IMF ξεκινάει και ανεβαίνει από το 0.02s έως το 0.03s όπου μετά από μια απότομη άνοδο στο σημείο αυτό, σταθεροποιείται.

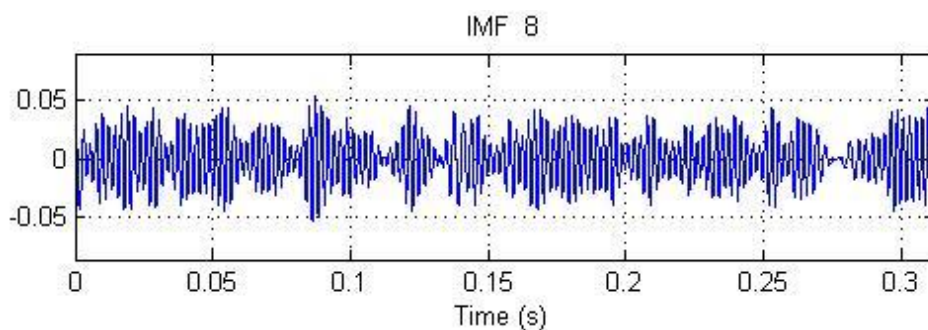
3.3 Αναλύσεις των ήχων της τρομπέτας

3.3.1 Πληροφορίες και ανάλυση του 1^{ου} ζευγαριού ήχων τρομπέτας

α) Ζευγάρι ήχων Τρομπέτας, παιγμένο με τον ίδιο τρόπο, σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση, στην Α 4^{ης} οκτάβας (440 Hz)



Εικόνα 7: Το όγδοο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 1 και αφορά τον ήχο χαμηλής έντασης



Εικόνα 8: Το όγδοο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 1 και αφορά τον ήχο υψηλότερης έντασης

Πίνακας 14: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις περιέχουν στον ήχο χαμηλής έντασης (18 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	8 ^ο , 7 ^ο	6 ^ο	18 ^ο
2 (880)	7 ^ο , 6 ^ο	5 ^ο	17 ^ο , 16 ^ο
3 (1320)	6 ^ο , 5 ^ο	4 ^ο	16 ^ο
4 (1760)	5 ^ο , 4 ^ο	-	14 ^ο
5 (2200)	4 ^ο έως 2 ^ο	3 ^ο	13 ^ο , 12 ^ο

6 (2640)	4 ^ο έως 2 ^ο	3 ^ο	13 ^ο έως 10 ^ο
7 (3080)	4 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	9 ^ο , 8 ^ο , 6 ^ο
8 (3520)	3 ^ο έως 1 ^ο	2 ^ο	7 ^ο έως 3 ^ο
9 (3960)	3 ^ο έως 1 ^ο	2 ^ο	5 ^ο έως 1 ^ο
10 (4400)	3 ^ο έως 1 ^ο	1 ^ο	4 ^ο έως 1 ^ο
11 (4840)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
12 (5280)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
13 (5720)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
14 (6160)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
15 (6600)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
16 (7040)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
17 (7480)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
18 (7920)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 15: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις εμπεριέχουν στον ήχο ψηλότερης έντασης (18 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	8 ^ο	8 ^ο	18 ^ο
2 (880)	7 ^ο	7 ^ο	17 ^ο , 16 ^ο
3 (1320)	6 ^ο	6 ^ο	15 ^ο
4 (1760)	5 ^ο	-	15 ^ο , 14 ^ο
5 (2200)	4 ^ο	5 ^ο	13 ^ο , 12 ^ο
6 (2640)	4 ^ο , 3 ^ο	4 ^ο	11 ^ο έως 10 ^ο
7 (3080)	1 ^ο έως 4 ^ο	4 ^ο	10 ^ο , 9 ^ο , 6 ^ο
8 (3520)	4 ^ο έως 1 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	9 ^ο έως 6 ^ο
9 (3960)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο	7 ^ο έως 4 ^ο
10 (4400)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	5 ^ο έως 2 ^ο
11 (4840)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	5 ^ο έως 2 ^ο
12 (5280)	2 ^ο , 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο

13 (5720)	2 ^ο , 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
14 (6160)	2 ^ο , 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
15 (6600)	2 ^ο , 1 ^ο	2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
16 (7040)	1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
17 (7480)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
18 (7920)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 16: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο χαμηλής έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	3.1K – 10K	4K – 8K	3.5K – 7.5K
2 ^ο	2K – 7K	2.4K – 3.7K	3.7K – 5K
3 ^ο	2K – 4.5K	2K – 3K	3.1K – 4.7K
4 ^ο	1700 – 3.3K	1100 – 1600	2.7K – 4.5K
5 ^ο	1050 – 2000	860 – 900	3200 – 4000
6 ^ο	820 – 1470	400 – 500	2900 – 3700
7 ^ο	400 – 1000	200 – 400	3500 – 3700
8 ^ο	230 – 440	100 – 150	2700 – 3200
9 ^ο	100 – 200	50 – 70	3000 – 3100
10 ^ο	70 – 90	30 – 40	2300 – 2700
11 ^ο	30 – 70	15 – 20	2600 – 2700
12 ^ο	10 – 20		2000 – 2900
13 ^ο	5 – 15		2100 – 2300
14 ^ο			1600 – 1900
15 ^ο			900 – 1700
16 ^ο			850 – 1400
17 ^ο			500 – 900
18 ^ο			350 – 610

Πίνακας 17: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο υψηλότερης έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	3K – 10K	5K – 9K	5.1K – 8.9K
2 ^ο	3K – 7K	4K – 7K	4.4K – 7.4K
3 ^ο	2.3K – 5K	3.1K – 6.2K	4.7K – 5.4K
4 ^ο	2K – 3.8K	2200 – 3800	3.9K – 5.1K
5 ^ο	1000 – 3000	1800 – 2900	3800 – 4900
6 ^ο	820 – 1400	1100 – 1600	2900 – 3700
7 ^ο	500 – 900	640 – 1100	3600 – 4200
8 ^ο	400 – 460	280 – 580	3300 – 3900
9 ^ο	200 – 300	200 – 500	3000 – 3600
10 ^ο	100 – 200	150 – 300	2200 – 3300
11 ^ο	70 – 100	50 – 150	2300 – 2800
12 ^ο	40 – 60	40 – 60	2000 – 2600
13 ^ο	15 – 30	10 – 20	1800 – 2200
14 ^ο	10 – 15	15 – 20	1500 - 2000
15 ^ο	6 - 10		1100 – 1700
16 ^ο			820 – 1300
17 ^ο			860 – 920
18 ^ο			280 – 640

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο εξάγονται 13 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης εξάγονται 15. Όταν η αντιστοιχία των αρμονικών είναι 18 στο χαμηλό παίξιμο και 18 στο δυνατό.

Στιγμαϊκές συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 13 IMFs που εξάγονται, μόνο 8 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σε όλα τα IMFs, παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών παραμένει 8. Μόνο το 8^ο IMF κινείται με κέντρο την 1^η αρμονική. Στα υπόλοιπα παρατηρείται πάλι μίξη τρόπων ταλάντωσης.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν. Από το 9^ο IMF μέχρι και το τέλος μικραίνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Το αναμενόμενο θεωρητικά θα ήταν να βρούμε τα πλάτη που αντιστοιχούν σε αρμονικές σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια όπως. Όπως, λαμβάνοντας υπ' όψιν το Masking effect, τα κριτήρια του κώδικα αλλά και τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις..

Μέθοδος 2: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο ζητήσαμε 11 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης ζητήσαμε 14.

Στιγμαϊκές συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 11 IMFs που εξάγονται, τα 6 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Από αυτά η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής στο 4^ο, 5^ο και 6^ο. Η αρμονική που δεν περιλαμβάνεται σε κανένα IMF είναι η 4^η. Επίσης,

παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε κάποια IMF. 5 IMF δεν περιέχουν συχνότητα αρμονικής.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών είναι τώρα 8. Τώρα, η 4^η αρμονική δεν εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Το 5^ο, 6^ο, 7^ο και 8^ο IMF έχει εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια γύρω από τη συχνότητα των αρμονικών που περιέχουν. Όμως τα υπόλοιπα δεν ακλουθούν την ίδια συμπεριφορά. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε διάφορες IMF.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs που περιέχουν αρμονικές, κινούνται γύρω από τα πλάτη των αρμονικών αλλά με ανεβοκατεβάσματα.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα της ανάλυσης EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις και δεν είναι σταθερά όπως απαιτεί η θεωρία.

Μέθοδος 3 : Στο χαμηλής και στο υψηλότερης έντασης παίξιμο ζητήσαμε 18 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Όλα τα IMFs περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η στιγμιαία συχνότητα δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Αυτό δεν ισχύει μόνο στο 9^ο IMF. Πολλές αρμονικές, ειδικά οι υψηλότερες εμπεριέχονται σε πολλά IMFs.

Υψηλότερη ένταση: Εδώ γενικά ισχύει ότι και για την χαμηλή ένταση. Μόνο το 17^ο IMF κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε πολλά IMFs.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

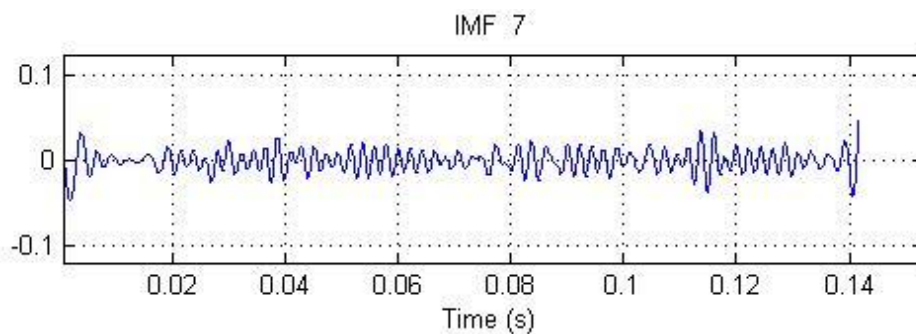
Ξανά, τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

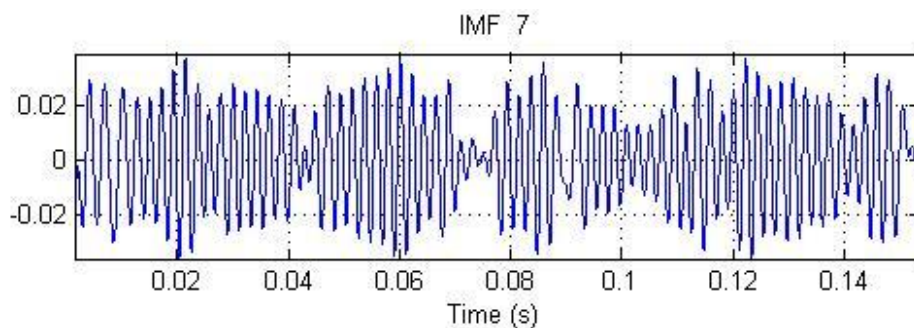
Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα όπως μεθόδου EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις.

3.3.2 Πληροφορίες και ανάλυση του 2^{ου} ζευγαριού ήχων τρομπέτας

B) Ζευγάρι ήχων Τρομπέτας, παιγμένο με τον ίδιο τρόπο, σε χαμηλή και υψηλότερη ένταση, στην A#4 (467 Hz)



Εικόνα 9: Το έβδομο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 2 και αφορά τον ήχο χαμηλής έντασης



Εικόνα 10: Το έβδομο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 2 και αφορά τον ήχο υψηλότερης έντασης

Πίνακας 18: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις περιέχουν στον ήχο χαμηλής έντασης (18 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (467)	8 ^ο , 5 ^ο	7 ^ο , 6 ^ο	18 ^ο , 17 ^ο
2 (934)	7 ^ο έως 5 ^ο	5 ^ο	16 ^ο , 15 ^ο
3 (1401)	6 ^ο , 5 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	15 ^ο , 14 ^ο
4 (1868)	5 ^ο , 4 ^ο	3 ^ο	14 ^ο , 13 ^ο
5 (2334)	4 ^ο , 3 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	12 ^ο , 11 ^ο , 2 ^ο
6 (2801)	4 ^ο έως 2 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	11 ^ο έως 9 ^ο , 2 ^ο
7 (3268)	4 ^ο έως 2 ^ο	2 ^ο	9 ^ο έως 7 ^ο , 5 ^ο , 3 ^ο , 2 ^ο
8 (3736)	3 ^ο έως 1 ^ο	-	7 ^ο έως 5 ^ο , 3 ^ο , 2 ^ο
9 (4203)	3 ^ο έως 1 ^ο	1 ^ο	6 ^ο , 3 ^ο , 2 ^ο
10 (4670)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο
11 (5137)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο
12 (5604)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
13 (6071)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
14 (6538)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	-
15 (7005)	1 ^ο	1 ^ο	-
16 (7472)	1 ^ο	1 ^ο	-
17 (7939)	1 ^ο	1 ^ο	-
18 (8406)	1 ^ο	1 ^ο	-

Πίνακας 19: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMF's που τις εμπεριέχουν στον ήχο ψηλότερης έντασης (18 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχρότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (467)	8 ^ο , 7 ^ο	7 ^ο , 6 ^ο	18 ^ο , 17 ^ο
2 (934)	7 ^ο , 6 ^ο	-	16 ^ο
3 (1401)	6 ^ο έως 4 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	15 ^ο , 14 ^ο
4 (1868)	5 ^ο , 4 ^ο	5 ^ο , 3 ^ο	14 ^ο , 13 ^ο
5 (2334)	5 ^ο έως 2 ^ο	5 ^ο , 3 ^ο , 2 ^ο	12 ^ο
6 (2801)	4 ^ο έως 2 ^ο	5 ^ο , 3 ^ο , 2 ^ο	11 ^ο , 4 ^ο , 1 ^ο
7 (3268)	4 ^ο έως 2 ^ο	2 ^ο	10 ^ο , 8 ^ο , 7 ^ο , 4 ^ο , 2 ^ο , 1 ^ο
8 (3736)	4 ^ο έως 2 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	9 ^ο , 6 ^ο έως 1 ^ο
9 (4203)	3 ^ο , 2 ^ο	1 ^ο	5 ^ο έως 1 ^ο
10 (4670)	3 ^ο , 2 ^ο	1 ^ο	5 ^ο έως 1 ^ο
11 (5137)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο
12 (5604)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
13 (6071)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
14 (6538)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
15 (7005)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
16 (7472)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
17 (7939)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο
18 (8406)	1 ^ο	1 ^ο	1 ^ο

Πίνακας 20: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο χαμηλής έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας <i>(Μέθοδος 1)</i>	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας <i>(Μέθοδος 2)</i>	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας <i>(Μέθοδος 3)</i>
1 ^ο	3.5K – 10K	4K – 8.6K	2.1K – 6.2K
2 ^ο	2.7K – 6.7K	2K – 3.5K	2.9K – 5K
3 ^ο	2K – 4.5K	1.4K – 2.8K	3.9K – 5.1K
4 ^ο	1700– 3.3K	1100 – 1600	3.3K –4.1K
5 ^ο	1250 – 2300	800 - 1500	3200 – 4000
6 ^ο	916 – 1700	300 – 550	3300 – 4100
7 ^ο	535 – 1000	320 – 700	2900 – 3400
8 ^ο	220 – 490	100 – 300	3200 – 3400
9 ^ο	150 – 300	80 – 150	2500– 3300
10 ^ο	100 – 150	30 – 90	2700 – 2900
11 ^ο	40 – 80	20 – 40	2000 – 3000
12 ^ο	20 – 40		2000 – 2500
13 ^ο	18 – 20		1600 – 2300
14 ^ο			1300 – 2100
15 ^ο			900 – 1730
16 ^ο			930 – 1200
17 ^ο			600 – 800
18 ^ο			350 – 610

Πίνακας 21: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο υψηλότερης έντασης

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	2.5K – 10.1K	3.7K – 8.5K	3.2K – 9.1K
2 ^ο	2K – 8K	2K – 4K	3K – 5K
3 ^ο	2 K – 4.8K	1.4K – 3K	3.9K – 4.7K
4 ^ο	1.4K – 3.9K	1200 – 1500	2.4K – 4.2K
5 ^ο	1400 – 2350	1800 – 2900	3500 – 4200
6 ^ο	900 – 1500	320 – 820	3600 – 3800
7 ^ο	500 – 900	300 – 500	2900 – 3600
8 ^ο	420 – 480	100 – 300	3200 – 3300
9 ^ο	100 – 400	100 – 200	3100 – 3500
10 ^ο	100 – 250	20 – 80	2700 – 2800
11 ^ο	50 – 100	20 – 30	2600 – 2900
12 ^ο	30 – 60	20 – 30	2300 – 2400
13 ^ο	15 – 25		1600 – 1900
14 ^ο	10 – 20		1300 - 1900
15 ^ο			1300 - 1500
16 ^ο			730 – 1300
17 ^ο			400 – 920
18 ^ο			280 – 640

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο εξάγονται 13 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης εξάγονται 14. Όταν η αντιστοιχία των αρμονικών είναι 18 στο χαμηλό παίξιμο και 18 στο δυνατό.

Στιγμαϊκές συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 13 IMFs που εξάγονται, μόνο 8 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σε όλα τα IMFs, παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών παραμένει 8. Μόνο το 8^ο IMF κινείται με κέντρο την 1^η αρμονική. Στα υπόλοιπα παρατηρείται πάλι μίξη τρόπων ταλάντωσης.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν. Από το 9^ο IMF μέχρι και το τέλος μικραίνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Το αναμενόμενο θεωρητικά θα ήταν να βρούμε τα πλάτη που αντιστοιχούν σε αρμονικές σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια όπως. Όπως, λαμβάνοντας υπ' όψιν το Masking effect, τα κριτήρια του κώδικα αλλά και τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις..

Μέθοδος 2: Στο χαμηλής έντασης παίξιμο ζητήσαμε 11 IMFs ενώ σε υψηλότερης έντασης ζητήσαμε 12.

Στιγμαϊκές συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Από τα 11 IMFs που εξάγονται, τα 7 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Από αυτά η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής στο 5^ο

και στο 6^ο. Η αρμονική που δεν περιλαμβάνεται σε κανένα IMF είναι η 8^η. Επίσης, παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε κάποια IMF.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Ο αριθμός των IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών είναι ξανά 7. Τώρα, η 2^η αρμονική δεν εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Το 4^ο και το 7^ο IMF έχει εξαχθεί με γύρω από τη συχνότητα των αρμονικών που περιέχουν. Όμως τα υπόλοιπα δεν ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά. Ακόμα, παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε διάφορες IMF.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs που περιέχουν αρμονικές, κινούνται γύρω από τα πλάτη των αρμονικών αλλά με ανεβοκατεβάσματα.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα της ανάλυσης EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις και δεν είναι σταθερά όπως απαιτεί η θεωρία.

Μέθοδος 3 : Στο χαμηλής και στο υψηλότερης έντασης παίξιμο ζητήσαμε 18 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Χαμηλή ένταση:*

Όλα τα IMFs περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η στιγμιαία συχνότητα δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Αυτό δεν ισχύει μόνο στο 10^ο IMF. Πολλές αρμονικές, ειδικά οι υψηλότερες εμπεριέχονται σε πολλά IMFs.

- *Υψηλότερη ένταση:*

Όλα τα IMFs περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε αυτά η στιγμιαία συχνότητα δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Όμως εδώ, τα IMFs που κινούνται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής είναι περισσότερα. Το

6°, το 8°, το 10°, το 12° και το 15°. Όμως, παρατηρείται μίξη των αρμονικών σε πάρα πολλά IMFs.

Τα πλάτη:

- *Χαμηλή ένταση:*

Τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

- *Υψηλότερη ένταση:*

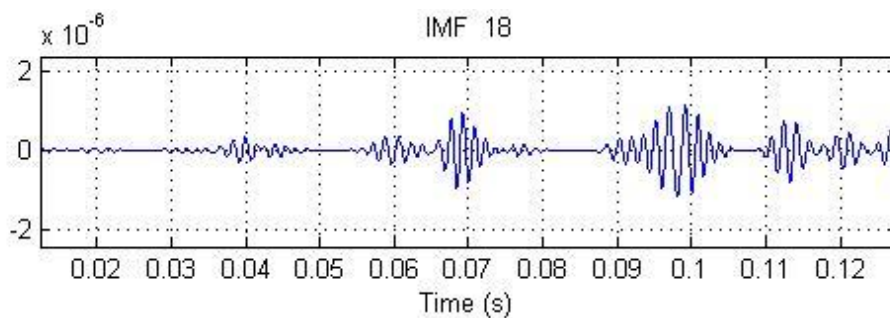
Εναντί, τα πλάτη των IMFs με αυτή τη μέθοδο δεν ακολουθούν απαραίτητα τα πλάτη των αρμονικών που περιλαμβάνουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

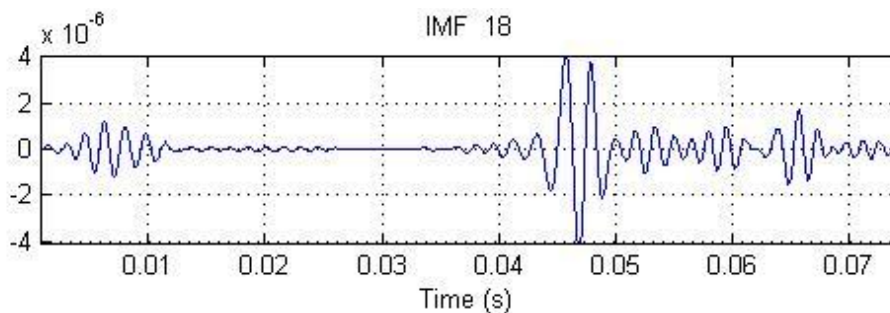
Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα μειονεκτήματα της μεθόδου EMD όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, επισημαίνουμε πάλι ότι τα πλάτη παρουσιάζουν μια σειρά από κυματώσεις και αποκλίσεις.

3.3.3 Πληροφορίες και ανάλυση του 3^{ου} ζευγαριού ήχων τρομπέτας

Γ) Ζευγάρι από ατάκες τρομπέτας, παιγμένες με διαφορετικό τρόπο, ομαλά και απότομα, στην τονικότητα της A 4^{ης} οκτάβας (440 Hz)



Εικόνα 11: Το δέκατο όγδοο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 3 και αφορά την ομαλή ατάκα



Εικόνα 12: Το δέκατο όγδοο IMF (αντιστοιχεί στην πρώτη αρμονική) που εξάγεται με την μέθοδο 3 και αφορά την απότομη ατάκα

Πίνακας 22: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMF's που τις εμπεριέχουν, στον ήχο ομαλής ατάκας (16 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (440)	8 ^ο , 7 ^ο	7 ^ο	18 ^ο
2 (880)	7 ^ο , 6 ^ο	6 ^ο , 5 ^ο	18 ^ο έως 16 ^ο
3 (1320)	6 ^ο έως 4 ^ο	5 ^ο , 4 ^ο	16 ^ο , 15 ^ο
4 (1760)	5 ^ο , 4 ^ο	4 ^ο , 3 ^ο	15 ^ο έως 13 ^ο
5 (2200)	5 ^ο έως 1 ^ο	4 ^ο έως 1 ^ο	13 ^ο , 12 ^ο
6 (2640)	4 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο	12 ^ο , 11 ^ο
7 (3080)	4 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο	10 ^ο έως 8 ^ο
8 (3520)	4 ^ο έως 1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	9 ^ο έως 6 ^ο
9 (3960)	3 ^ο έως 1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	8 ^ο έως 4 ^ο
10 (4400)	3 ^ο έως 1 ^ο	1 ^ο	6 ^ο έως 2 ^ο
11 (4840)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	4 ^ο έως 2 ^ο
12 (5280)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο
13 (5720)	1 ^ο	1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο
14 (6160)	1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
15 (6600)	1 ^ο	-	2 ^ο , 1 ^ο
16 (7040)	1 ^ο	-	2 ^ο

Πίνακας 23: Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις περιέχουν, στον ήχο απότομης ατάκας (16 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (<i>Μέθοδος 1</i>)	Αντιστοιχία σε IMF (<i>Μέθοδος 2</i>)	Αντιστοιχία σε IMF (<i>Μέθοδος 3</i>)
1 (440)	9 ^ο , 8 ^ο	9 ^ο , 8 ^ο	18 ^ο
2 (880)	8 ^ο , 7 ^ο	7 ^ο	17 ^ο έως 15 ^ο
3 (1320)	7 ^ο έως 5 ^ο	6 ^ο , 5 ^ο	16 ^ο , 15 ^ο
4 (1760)	5 ^ο έως 4 ^ο	5 ^ο	14 ^ο , 13 ^ο
5 (2200)	5 ^ο έως 3 ^ο	5 ^ο έως 3 ^ο	14 ^ο έως 12 ^ο
6 (2640)	5 ^ο έως 2 ^ο	4 ^ο έως 2 ^ο	12 ^ο
7 (3080)	5 ^ο έως 2 ^ο	4 ^ο έως 2 ^ο	10 ^ο έως 8 ^ο
8 (3520)	5 ^ο έως 1 ^ο	4 ^ο έως 2 ^ο	9 ^ο , 8 ^ο
9 (3960)	5 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο	7 ^ο έως 4 ^ο
10 (4400)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο	6 ^ο έως 1 ^ο
11 (4840)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο
12 (5280)	2 ^ο , 1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	3 ^ο έως 1 ^ο
13 (5720)	2 ^ο , 1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
14 (6160)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
15 (6600)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο
16 (7040)	2 ^ο , 1 ^ο	1 ^ο	2 ^ο , 1 ^ο

Πίνακας 24: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο ομαλής ατάκας

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	2K – 7.3K	2K – 6.4K	5.3K – 6.7K
2 ^ο	2K – 5.5K	2K – 4K	4.3K – 8.5K
3 ^ο	1.8K – 4.4K	1.4K – 3.5K	4.5K – 6K
4 ^ο	1100 – 3600	1270 – 2416	3660 – 4950
5 ^ο	1095 – 2200	820 – 1500	3800 – 4780
6 ^ο	800 – 1600	820 – 900	3400 – 4420
7 ^ο	330 – 880	400 – 440	3320 – 4390
8 ^ο	370 – 445	220 – 240	2800 – 4090
9 ^ο	210 – 330	75 – 150	2860 – 3810
10 ^ο	100 – 200		2940 – 3376
11 ^ο	50 – 100		2345 – 3035
12 ^ο			2040 – 2700
13 ^ο			1670 – 2440
14 ^ο			1420 – 2075
15 ^ο			980 – 1820
16 ^ο			820 – 1540
17 ^ο			770 – 1000
18 ^ο			300 – 900

Πίνακας 25: Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF στον ήχο απότομης ατάκας

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1 ^ο	3.1K – 12.4K	4K – 6K	3.4K – 9.9K
2 ^ο	2.5K – 7.8K	2.6K – 5.7K	4.2K – 7.4K
3 ^ο	2K – 5.1K	1.9K – 5K	4.3 – 5.4K
4 ^ο	1360 – 4000	2000 – 3700	3900 – 4800
5 ^ο	1160 – 4000	1000 – 2500	3900 – 4700
6 ^ο	1000 – 2000	1060 – 1740	3700 – 4500
7 ^ο	805 – 1500	660 – 940	3370 – 4010
8 ^ο	315 – 850	320 – 600	2820 – 3570
9 ^ο	270 - 491	200 – 550	2610 – 3700
10 ^ο	100 – 210	100 – 300	2520 – 3100
11 ^ο	100 – 200	50 – 120	2745 – 2930
12 ^ο	50 – 100	40 – 60	2005 – 2730
13 ^ο	20 – 35		1895 – 2450
14 ^ο			1530 – 2250
15 ^ο			860 – 1635
16 ^ο			810 – 1475
17 ^ο			585 – 1015
18 ^ο			358 – 1010

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Στην ομαλή ατάκα εξάγονται 11 IMFs και στην απότομη 13, για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 16 στην ομαλή αλλά και στην απότομη ατάκα.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Ομαλή ατάκα:*

Από τα 11 IMFs που εξάγονται, 8 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Δεν υπάρχει αρμονική που να μην εμπεριέχεται σε κάποιο IMF. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν, χωρίς εξαιρέσεις. Ακόμα, παρατηρείται μίξη τρόπων σε όλες τις αρμονικές.

- *Απότομη ατάκα:*

Ο αριθμός των αρμονικών που εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών ανεβαίνει στους 9. Πάλι δεν υπάρχει αρμονική που να μην εμπεριέχεται σε κάποιο IMF. Ενώ κανένα IMF δεν έχει εξαχθεί με κέντρο κάποια αρμονική. Μίξη τρόπων παρατηρείται ξανά σε όλες τις αρμονικές.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Στα IMFs που δεν περιλαμβάνουν συχνότητες αρμονικών, τα πλάτη τους είναι εξαιρετικά χαμηλά. Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών που εμπεριέχουν.

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Εδώ η μελέτη του πλάτους αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, κάθε IMF σταθεροποιεί την τιμή της σε διαφορετικό χρονικό διάστημα. Φυσικά άμα η μέθοδος αυτή δεν παρουσίαζε κυματώσεις στις στιγμιαίες συχνότητες αλλά και μίξη τρόπων ταλάντωσης σε διάφορα IMFs τα αποτελέσματα θα ήταν ακόμα πιο σημαντικά. Παρ' όλα αυτά,

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 8^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.01s ενώ πέφτει απότομα στα περίπου 0.025s και στα 0.05s. Δεν σταθεροποιείται εμφανώς καθ' όλη τη διάρκεια.

Το 7^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.01s και από εκεί μέχρι το τέλος παραμένει σχετικά σταθερό.

Το 6^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.015s. Από εκεί και πέρα δεν σταθεροποιείται εμφανώς, καθ' όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 5^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.02s και έπειτα αποκτά μια σχετική σταθεροποίηση και ταυτόχρονα παρουσιάζει πολλές κυματώσεις.

Το 4^ο IMF, ξανά, μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.02s και έπειτα αποκτά μια σχετική σταθεροποίηση και ταυτόχρονα παρουσιάζει πολλές κυματώσεις.

Το 3^ο IMF σταθεροποιεί το πλάτος του στο 0.025s και έπειτα παρουσιάζει μια σχετική σταθερότητα.

Το 2^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.17s περίπου και έπειτα δεν σταθεροποιείται σε κάποιο σημείο.

Το 1^ο IMF, ξανά, μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.017s περίπου και έπειτα δεν σταθεροποιείται σε κάποιο σημείο.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 9^ο IMF κρατάει σταθερό το πλάτος του από το 0.01s μέχρι το 0.03s. Έπειτα σχεδόν μηδενίζεται και στο 0.05s μεγιστοποιείται.

Το 8^ο IMF ανεβαίνει και μεγιστοποιείται στο 0.05s. Έπειτα ξαναπέφτει αλλά κρατιέται σχετικά σταθερό.

Το 7^ο IMF ανεβαίνει και μεγιστοποιείται στο 0.05s και έπειτα δεν σταθεροποιείται σε κάποιο σημείο.

Το 6^ο IMF μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.02s, έως το 0.05 πέφτει και έπειτα ανεβαίνει και πάλι.

Το 5^ο IMF είναι σχετικά σταθερό. Μέγιστο παρουσιάζει στο 0.037s περίπου.

Το 4^ο IMF κινείται σχετικά σταθερά μέχρι το 0.055 όπου μεγιστοποιείται. Έπειτα παρουσιάζει πτώση.

Το 3^ο IMF είναι σχετικά σταθερό. Μεγιστοποιείται στο 0.02s

Το 2^ο IMF είναι σχετικά σταθερό και μεγιστοποιείται στο 0.042s.

Το 1^ο IMF μεγιστοποιείται στο 0.075s, έπειτα μηδενίζεται στο 0.02s και μεγιστοποιείται πάλι από το 0.035s και μετά.

Μέθοδος 2: Στην ομαλή αλλά και στην απότομη ατάκα εξάγονται 8 IMFs, για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 5 στην ομαλή και 5 στο απότομο παίξιμο.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Ομαλή ατάκα:*

Από τα 9 IMFs που εξάγονται, τα 7 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Όλες οι αρμονικές εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Αυτό αλλάζει για το 7^ο και 6^ο IMF που κινούνται με κέντρο την 1^η και 2^η αρμονική

αντίστοιχα. Ακόμα, παρατηρείται μίξη τρόπων καθώς από τις 10 αρμονικές που περιέχει ο ήχος, μόνο η πρώτη εμπεριέχεται μόνο σε ένα IMF. Τέλος, η 15^η και η 16^η αρμονική δεν εμπεριέχονται σε κανένα IMF.

- *Απότομη ατάκα:*

Από τα 12 IMF που εξάγονται, τα 9 εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών.

Όλες οι αρμονικές εμπεριέχονται σε κάποιο IMF. Μίξη τρόπων παρατηρείται σε όλα τα IMF εκτός από το 7^ο που περιλαμβάνει συχνότητες που αφορούν μόνο την 2^η αρμονική.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Στα IMFs που δεν περιλαμβάνουν συχνότητες αρμονικών, τα πλάτη τους είναι εξαιρετικά χαμηλά. Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών που εμπεριέχουν.

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, τα IMFs που αντιστοιχούν σε αρμονικές ή μίξη αρμονικών παρουσιάζουν αντίστοιχο πλάτος ενώ τα υπόλοιπα πολύ μικρό.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 7^ο IMF ανεβαίνει ομαλά και μεγιστοποιείται στο 0.1s. Έπειτα σταθεροποιείται μέχρι το τέλος της διάρκειας του.

Το 6^ο IMF φαίνεται να μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.006s, ενώ μετά παραμένει σχετικά σταθερό, παρουσιάζοντας όμως ανεβοκατεβάσματα.

Το 5^ο IMF ανεβαίνει μέχρι το 0.016 όπου και σταθεροποιείται. Λίγο πριν παρουσιάζει τοπικό μέγιστο στο 0.009s.

Το 4^ο IMF παρουσιάζει μικρό πλάτος μέχρι το 0.012s όπου μεγιστοποιείται. Από αυτό το σημείο και μετά παρουσιάζει σχετικά σταθερό και κοντά στο μέγιστο πλάτος.

Το 3^ο IMF πάλι, παρουσιάζει μικρό πλάτος μέχρι το 0.012s όπου μεγιστοποιείται. Από αυτό το σημείο και μετά παρουσιάζει σχετικά σταθερό και κοντά στο μέγιστο πλάτος.

Το 2^ο IMF φαίνεται να μεγιστοποιεί το πλάτος του στο 0.005s, ενώ μετά παραμένει σχετικά σταθερό, παρουσιάζοντας όμως ανεβοκατεβάσματα.

Το 1^ο IMF παρουσιάζει μηδενικό πλάτος μέχρι περίπου το 0.013s, σημείο που αρχίζει να μεγαλώνει απότομα έως και το 0.02 που φτάνει το μέγιστο του. Μέχρι το τέλος του ήχου, το πλάτος παραμένει λίγο πιο κάτω από το μέγιστο.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 9^ο IMF παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στο πλάτος του. Μέγιστο παρουσιάζει στο 0.06 περίπου.

Το 8^ο IMF ξανά, παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στο πλάτος του. Μέγιστο παρουσιάζει στο 0.06s περίπου.

Το 7^ο IMF ξεκινάει με πλάτος ίσο με το μισό του μεγίστου του από το 0 έως το 0.01 όπου ξανακατεβαίνει. Από το 0.01s ανεβαίνει σχετικά σταθερά έως και το 0.065s περίπου, σημείο που αγγίζει το μέγιστο του.

Το 6^ο IMF διατηρεί σταθερό το πλάτος του από την αρχή του χρόνου έως και το 0.06s περίπου, όπου ανεβαίνει λίγο, αγγίζει το μέγιστο και έπειτα παραμένει σταθερό.

Το 5^ο IMF παρουσιάζει διαρκώς αποκλίσεις στο πλάτος του. Όμως σε γενικές γραμμές, παρουσιάζει σταδιακή άνοδο καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 4^ο IMF ξεκινάει από μηδενικό πλάτος, ανεβαίνει γρήγορα και πέφτει αρκετά στο 0.015s. Από εκεί και πέρα μεγαλώνει έως το 0.04s και διατηρείται σχετικά σταθερό.

Το 3^ο IMF ξεκινάει με πλάτος ίσο με το μισό του μεγίστου που παρουσιάζει στο 0.03s. Διατηρείται σχετικά σταθερό καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 2^ο IMF ξεκινάει με πλάτος ίσο με το ένα τέταρτο (1/4) του μεγίστου που παρουσιάζει στο 0.065s. Αν και παρουσιάζει διαρκώς αποκλίσεις, διατηρείται σχετικά σταθερό καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 1^ο IMF ανεβάζει αμέσως το πλάτος του σε μικρό βαθμό. Έπειτα ξαναπέφτει στο 0.015s. Από το 0.015 και έπειτα ανεβαίνει διαρκώς και πιάνει μέγιστο στο 0.07s. Από εκεί και πέρα πέφτει λίγο.

Μέθοδος 3: Στην ομαλή ατάκα εξάγονται 18 IMFs και στις δυο περιπτώσεις για την αντιστοιχία των αρμονικών να είναι 16 στην ομαλή και στο απότομο παίξιμο.

Στιγμιαίες συχνότητες:

- *Ομαλή ατάκα:*

Από τα 18 IMFs που εξάγονται, όλα εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών. Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της

αρμονικής που εμπεριέχουν. Μίξη αρμονικών παρουσιάζεται διαρκώς καθώς μόνο η 1^η αρμονική εμπεριέχεται σε ένα και μόνο IMF.

- *Απότομη ατάκα:*

Όλα τα IMFs εμπεριέχουν συχνότητες αρμονικών. Ξανά, Η στιγμιαία συχνότητα των IMFs δεν κινείται απαραίτητα με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής που εμπεριέχουν. Εδώ κάθε IMF εμπεριέχει πάνω από μια αρμονική εκτός από το 7^ο που αφορά μόνο τη 2^η αρμονική.

Τα πλάτη:

- *Ομαλή ατάκα:*

Η μέθοδος αυτή, δεν πιάνει σωστά το ύψος των πλατών.

- *Απότομη ατάκα:*

Όμοια, δεν υπάρχει αντιστοιχία στα πλάτη με αυτά των αρμονικών.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Εδώ, αν και το ύψος των πλατών σίγουρα είναι λάθος, η κίνηση του πλάτους παρουσιάζει ενδιαφέρον. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, κάθε IMF σταθεροποιεί την τιμή του σε διαφορετικό χρονικό διάστημα.

- *Για την ομαλή ατάκα:*

Το 18^ο IMF ξεκινάει από μηδενικό πλάτος, ανεβαίνει σταθερά μέχρι το 0.06 όπου παρουσιάζει μέγιστο και μετά, παρουσιάζοντας κυματώσεις, πέφτει λίγο.

Το 17^ο IMF ξεκινάει από μηδενικό πλάτος και το μεγιστοποιεί στο 0.1s. Το πλάτος παρουσιάζει διαρκώς αποκλίσεις στην ένταση του.

Το 16^ο IMF είναι σχεδόν σε όλη του τη διάρκεια μηδενικό, εκτός από το 0.06 όπου παρουσιάζει μέγιστο και το 0.04s και στο 0.1s και 0.12s που μεγαλώνει στιγμιαία.

Το 15^ο IMF σε γενικές γραμμές κινείται γύρω από το μηδέν και παρουσιάζει στιγμιαίες αυξήσεις, όπως στο 0.09s όπου μεγιστοποιείται στιγμιαία.

Το 14^ο IMF σε γενικές γραμμές κινείται γύρω από το μηδέν και παρουσιάζει στιγμιαίες αυξήσεις, όπως στο 0.06s όπου μεγιστοποιείται στιγμιαία.

Το 13^ο IMF σε γενικές γραμμές κινείται γύρω από το μηδέν και παρουσιάζει στιγμιαίες αυξήσεις, όπως στο 0.017s όπου μεγιστοποιείται στιγμιαία.

Το 12^ο IMF σε γενικές γραμμές κινείται γύρω από το μηδέν και παρουσιάζει στιγμιαίες αυξήσεις, όπως στο 0.06s όπου μεγιστοποιείται στιγμιαία.

Το 11^ο IMF διατηρεί σχεδόν μηδενικό πλάτος καθ όλη τη διάρκεια του ήχου και παρουσιάζει τοπικά μέγιστα κοντά στο 0.02s, το 0.04s το 0.01s και το 0.012s.

Το 10^ο IMF παρουσιάζει πλάτος που κινείται σε μηδενικό επίπεδο. Σταδιακά ανεβαίνει σε μικρό βαθμό. Τοπικό μέγιστο παρουσιάζει στο 0.01s περίπου

Το 9^ο IMF ξεκινάει από μηδενικό πλάτος και από το 0.015s και έπειτα το ανεβάζει λίγο ενώ πολλές αποκλίσεις και κυματώσεις είναι αισθητές καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 8^ο IMF παρουσιάζει μια σχετικά σταθερότητα στο πλάτος του, που ξεκινάει σαν μηδενικά αλλά μεγιστοποιείται κοντά στο 0.02s. Καθ όλη τη διάρκεια του παρουσιάζει τοπικά μέγιστα.

Το 7^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται προς το τέλος του ήχου.

Το 6^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται προς το τέλος του ήχου.

Το 5^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται από το 0.025s έως το 0.045s

Το 4^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 3^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 2^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει απότομα στο μέγιστο του όπου με κυματώσεις μεν, παραμένει μέχρι το τέλος του ήχου.

Το 1^ο IMF αν και παρουσιάζει κυματώσεις στο πλάτος του σε όλη τη διάρκεια του ήχου, το ανεβάζει σταθερά μέχρι το 0.06s όπου παρουσιάζει μέγιστο. Έπειτα σταθεροποιείται.

- *Για την απότομη ατάκα:*

Το 18^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.05s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 17^ο IMF ξανά, παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.05s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 16^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.07s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 15^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.05s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 14^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.07s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 13^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος που τελικά ανεβαίνει λίγο πάνω από το μηδέν. Παρουσιάζει διαρκώς κυματώσεις και τοπικά μέγιστα.

Το 12^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.05s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 11^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.06s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 10^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος που τελικά ανεβαίνει λίγο πάνω από το μηδέν. Παρουσιάζει διαρκώς κυματώσεις και τοπικά μέγιστα.

Το 9^ο IMF παρουσιάζει γενικά μηδενικό πλάτος εκτός από τα σημεία 0s έως 0.01s και 0.04s έως 0.065s όπου παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο.

Το 8^ο IMF παρουσιάζει μηδενικό πλάτος που σταθεροποιείται στο 0.015s. Διαρκώς παρουσιάζει τοπικά μέγιστα.

Το 7^ο IMF παρουσιάζει μηδενικό πλάτος που σταθεροποιείται στο 0.015s. Διαρκώς παρουσιάζει τοπικά μέγιστα

Το 6^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται στο 0.008s, στο 0.047s και στο 0.072s.

Το 5^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.015s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Εμφανίζονται 5 τοπικά μέγιστα από το 0.025s έως το 0.07 περίπου.

Το 4^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.002s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 3^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος αλλά στο 0.002s ανεβαίνει και κρατιέται σχετικά σταθερό. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται καθ όλη τη διάρκεια του ήχου.

Το 2^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος έως το 0.022s όπου ανεβαίνει απότομα στο μέγιστο του όπου με κυματώσεις μεν και μια μικρή άνοδο, οδεύει μέχρι το τέλος του ήχου.

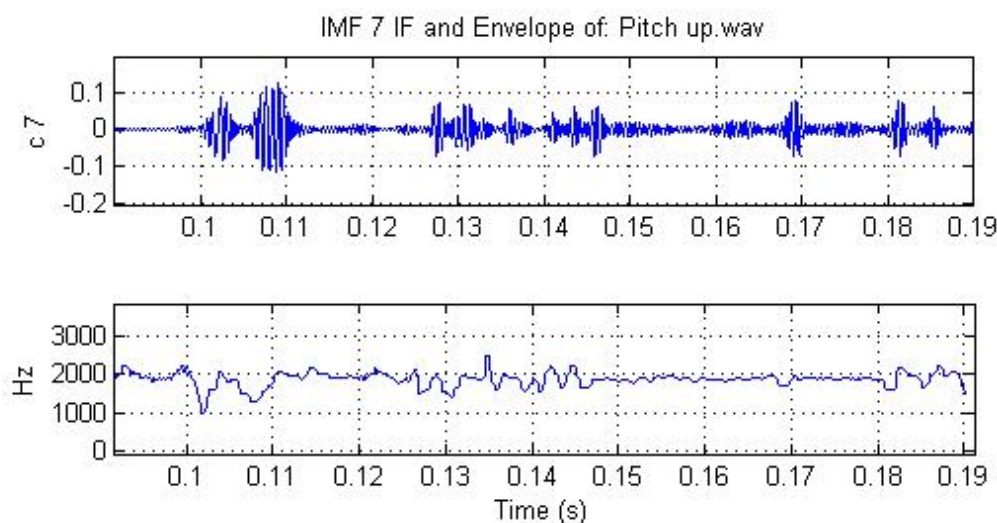
Το 1^ο IMF ξεκινάει με μηδενικό πλάτος έως το 0.022s όπου ανεβαίνει απότομα στο μέγιστο του όπου με κυματώσεις μεν και μια μικρή άνοδο, οδεύει μέχρι το τέλος του ήχου. Τοπικά μέγιστα εμφανίζονται καθ όλη τη διάρκεια.

3.4 Μελέτη ήχων με μεταβλητό τονικό ύψος

Ανάλυση με την μέθοδο EMD ήχων που μεταβάλλουν το τονικό τους ύψος.

α) Ήχος που μεταβάλλει το ύψος του από την Ab 4^{ης} οκτάβας (415 Hz) έναν τόνο, μέχρι την A# 4^{ης} οκτάβας (466 Hz).

*Κάθε ήχος που αναλύεται αποτελείται από δυο μέρη, αυτό που παίζει την Ab και αυτό που παίζει την A#. Οι αρμονικοί που αντιστοιχούν στην Ab είναι οι μονοί σε αριθμό ενώ οι ζυγοί είναι της A# (βλ. πρώτη στήλη πίνακας 25).



Εικόνα 13: Το έβδομο IMF και οι στιγμιαίες συχνότητες (αντιστοιχεί στις 5^{ες} αρμονικές) στον ήχο μεταβλητού ύψους από Ab σε A#

Πίνακας 26 Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις περιέχουν στον ήχο μεταβλητής τονικότητας (11 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (415)	6°, 5°	6°, 5°	11°
1 (466)	6°, 5°	6°	11°
2 (830)	4°, 3°	4°	10°
2 (932)	4°, 3°	5°, 4°	10°
3 (1245)	3°, 2°	3°	9°
3 (1398)	3°, 2°	4° έως 2°	9°

4 (1660)	2°, 1°	2°	8°
4 (1864)	3° έως 1°	4° έως 2°	7°
5 (2075)	2°, 1°	2°	7°, 6°
5 (2330)	2°, 1°	2°, 1°	6°, 5°
6 (2490)	2°, 1°	2°	5°, 4°
6 (2796)	2°, 1°	2°, 1°	4°, 3°
7 (2905)	1°	2°, 1°	3° έως 1°
7 (3262)	1°	1°	2°, 1°
8 (3320)	-	-	2°, 1°
8 (3728)	1°	1°	-
9 (3735)	-	-	-
9 (4194)	1°	-	-
10 (4150)	-	-	-
10 (4660)	-	-	-
11 (4565)	-	-	-
11 (5128)	-	-	-

Πίνακας 27 Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1	1.5K – 3.1K / 1.7K - 4.2K	2.5K – 3.1K / 3K – 3.8K	2.8K – 3.6K / 2.7K – 3.6K
2	1K – 2.8K / 1.6K – 3K	1K – 3K / 1K – 3K	2.4K – 3.1K / 3K – 3.6K
3	720 – 1.4K / 1.2K – 2.3K	1K – 1.5K / 1K – 2.3K	2.7K – 3K / 2.8 – 3.5K
4	635 – 1.100 / 880 – 1500	660 – 970 / 816 – 1500	2400 – 2600 / 2700 - 2900
5	355 – 460 / 350 – 890	300 – 800 / 835 – 1000	2300 – 2600 / 2200 – 2370
6	250 – 510 / 315 – 600	240 – 530 / 300 – 635	1850 – 2155 / 2300 – 2400
7	100 – 200 / 200 – 340	100 – 250 / 200 – 300	1880 – 2200 / 1800 – 1965
8	90 – 150 / 100 – 250	50 – 125 / 125 – 250	1450 – 1680 / 1200 – 1800
9	40 – 100 / 70 – 90	50 – 100 / 40 – 100	2250 – 2650 / 2300 – 2440
10	20 – 50 / 10 – 50	30 – 50 / 20 – 80	970 – 1345 / 1000 – 1450
11	20 – 50 / 30 – 50	10 – 30 / 20 – 25	570 – 1100 / 730 – 1100
12	5 – 15 / 10 – 20	5 - 10 / 10 – 15	400 – 663 / 390 – 710

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από Ab σε A#, παράγονται 11 ζευγάρια αρμονικών. Η μέθοδος αυτή εξάγει 12 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 12 IMFs που εξάγονται, μόνο 6 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σε όλα τα IMFs, παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές. Επίσης, τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs δεν είναι ίδια. Δηλαδή, παραδείγματος χάριν, το 1^ο IMF εμπεριέχει από την 4^η έως την 9^η αρμονική ενώ για την A# εμπεριέχει από τον 5^ο έως τον 8^ο. Αυτό ισχύει για τα περισσότερα IMFs. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Αυτό αλλού ισχύει περισσότερο και αλλού λιγότερο.

Μέθοδος 2: Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από Ab σε A#, παράγονται 11 ζευγάρια αρμονικών. Η μέθοδος αυτή εξάγει 12 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 12 IMFs που εξάγονται, μόνο 6 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σε όλα τα IMFs, παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές. Επίσης, παρατηρούμε πάλι ότι τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs δεν είναι ίδια. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Εδώ, αυτό ισχύει σε όλα τα IMFs σε γενικές γραμμές και λίγο λιγότερο σε αυτά που δεν αντιστοιχούν σε κάποια αρμονική.

Μέθοδος 3 : Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από Ab σε A#, παράγονται 11 ζευγάρια αρμονικών. Έτσι, ζητήσαμε κι εμείς 11 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 11 IMFs που εξάγονται, και οι 11 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε 5 από τα 11 (από το 3^ο έως το 7^ο), η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο τις αρμονικές που τους αντιστοιχούν. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι δεν κινείται με κέντρο τις συχνότητες των αρμονικών πάντα όλο το ζευγάρι αλλά μερικές φορές μόνο για την μια νότα (4^ο, 6^ο και 7^ο). Μίξη των τρόπων ταλάντωσης παρατηρείται από το 7^ο έως το 1^ο IMF. Επίσης, παρατηρούμε πάλι ότι τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs δεν είναι της ίδιας αντιστοιχίας. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

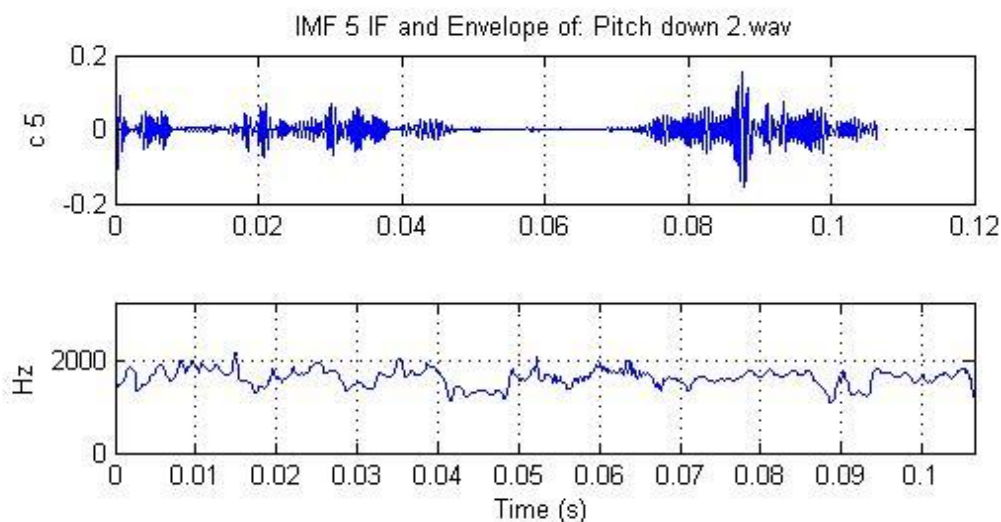
Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών δεν αντιστοιχούν με αυτά των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Εδώ, αυτό ισχύει σε όλα τα IMFs σε γενικές γραμμές.

β) Ήχος που μεταβάλλει το ύψος του από την D# 5^{ης} οκτάβας (626 Hz) στην D 5^{ης} οκτάβας (573 Hz).



Εικόνα 14: Το πέμπτο IMF (αντιστοιχεί στις 3^{ες} αρμονικές) για τον ήχο μεταβλητής τονικότητας από D#5 σε D5

Πίνακας 28 Αριθμός αρμονικών και αντιστοιχία στα IMFs που τις εμπεριέχουν στον ήχο μεταβλητής τονικότητας (7 αρμονικές)

Αριθμός Αρμονικής και συχνότητα (Hz)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 1)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 2)	Αντιστοιχία σε IMF (Μέθοδος 3)
1 (626)	4 ^ο	4 ^ο	7 ^ο
1 (573)	5 ^ο	4 ^ο	7 ^ο
2 (1252)	3 ^ο	3 ^ο	6 ^ο
2 (1146)	3 ^ο έως 1 ^ο	3 ^ο	6 ^ο
3 (1878)	2 ^ο	2 ^ο	5 ^ο
3 (1719)	3 ^ο , 2 ^ο	2 ^ο	5 ^ο
4 (2504)	1 ^ο	1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο
4 (2292)	2 ^ο	1 ^ο	3 ^ο , 2 ^ο
5 (3130)	1 ^ο	-	1 ^ο
5 (2865)	2 ^ο , 1 ^ο	-	2 ^ο , 1 ^ο
6 (3756)	-	-	-

6 (3438)	1 ^ο	-	-
7 (4382)	-	-	-
7 (4011)	-	-	-

Πίνακας 29 Το εύρος των συχνοτήτων που περιλαμβάνει το κάθε IMF

Αριθμός IMF	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 1)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 2)	Αποκλίσεις στιγμιαίας συχνότητας (Μέθοδος 3)
1	2.6K – 3.4K / 2.4K – 4K	2.2K – 2.8K / 2K – 3K	2.8K – 3.4K / 2.3K – 3.2K
2	1.5K – 2.2K / 1.3K – 3.2K	1.8K – 1.9K / 1.6K – 1.8K	2.4K – 2.5K / 2K – 3K
3	940 – 1280 / 1.1K – 1.8K	1235 – 1260 / 1100 – 1150	2450 – 2490 / 2220 – 2270
4	610 – 630 / 1080 – 1180	610 – 630 / 570 – 585	1630 – 2000 / 1800 – 2200
5	200 – 470 / 140 – 300	350 – 450 / 170 – 400	1310 – 1880 / 1560 – 1800
6	140 – 300 / 330 – 450	100 – 300 / 90 – 300	820 – 1355 / 820 – 1400
7	100 – 300 / 150 – 300	25 -120 / 100 – 150	640 – 1015 / 360 – 860
8	40 – 80 / 80 – 150	10 – 50 / 10 – 50	
9	20 – 60 / 40 – 100	5 – 20 / 5 – 20	
10	15 – 20 / 20 – 40	20 – 40 / 10 – 20	

Παρατηρήσεις πάνω στην ανάλυση των ήχων από τρεις μεθόδους:

Μέθοδος 1: Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από Ab σε A#, παράγονται 7 ζευγάρια αρμονικών. Η μέθοδος αυτή εξάγει 10 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 10 IMFs που εξάγονται, μόνο 4 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σε όλα τα IMFs, παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή αυτά τα IMFs εμπεριέχουν περισσότερες από μια αρμονικές. Επίσης, τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs δεν είναι ίδια. Δηλαδή, παραδείγματος χάριν, το 2^ο IMF εμπεριέχει από την 3^η έως την 5^η αρμονική για την D# ενώ για την D εμπεριέχει μόνο την 3^η. Αυτό ισχύει για τα περισσότερα IMFs. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Αυτό αλλού ισχύει περισσότερο και αλλού λιγότερο.

Μέθοδος 2: Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από D# σε D, παράγονται 7 ζευγάρια αρμονικών. Η μέθοδος αυτή εξάγει 10 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 12 IMFs που εξάγονται, μόνο 6 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Και σε αυτά που εμπεριέχονται, η συχνότητα τους δεν κινείται με κέντρο την συχνότητα της αρμονικής. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν το 2^ο, 3^ο και 4^ο IMF όπου κινούνται με κέντρο τις 3 πρώτες αρμονικές. Εδώ, δεν παρατηρείται μίξη των τρόπων ταλάντωσης και τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs είναι ίδια. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών είναι αντίστοιχα των αρμονικών ή τις μίξης των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Εδώ, αυτό ισχύει σε όλα τα IMFs σε γενικές γραμμές και λίγο λιγότερο σε αυτά που δεν αντιστοιχούν σε κάποια αρμονική.

Μέθοδος 3 : Για τον συγκεκριμένο ήχο παίξιμο νότας με μεταβλητό ύψος από D# σε D παράγονται 7 ζευγάρια αρμονικών. Όμοια, ζητήσαμε κι εμείς 7 IMFs.

Στιγμιαίες συχνότητες:

Από τα 7 IMFs που εξάγονται, και τα 7 περιέχουν συχνότητες αρμονικών. Σε παραπάνω από τα μισά, η στιγμιαία συχνότητα κινείται με κέντρο τις αρμονικές που τους αντιστοιχούν. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι δεν κινείται με κέντρο τις συχνότητες των αρμονικών πάντα όλο το ζευγάρι αλλά μερικές φορές μόνο για την

μια νότα (6° , 7° και 8°). Μίξη των τρόπων ταλάντωσης παρατηρείται από στο 4° και 5° IMF. Επίσης, παρατηρούμε πάλι ότι τα ζευγάρια των αρμονικών που εμπεριέχονται στα IMFs δεν είναι της ίδιας αντιστοιχίας. Οι πιο υψηλές αρμονικές δεν περιλαμβάνονται σε κανένα IMF. Τέλος, κατά την διάρκεια που τελειώνει η μία νότα και ξεκινάει η άλλη, η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζει μεγάλες κυματώσεις.

Τα πλάτη:

Στα IMFs που εμπεριέχουν συχνότητες των αρμονικών δεν αντιστοιχούν με αυτά των αρμονικών ή τις μίξεις των αρμονικών που εμπεριέχουν.

Τα πλάτη κατά την πάροδο του χρόνου:

Τα πλάτη γενικά, άλλα περισσότερο άλλα λιγότερο, παρουσιάζουν κυματώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Κατά την αλλαγή από την μια νότα στην άλλη γενικά το πλάτος τείνει να είναι μηδενικό. Εδώ, αυτό ισχύει σε όλα τα IMFs σε γενικές γραμμές.

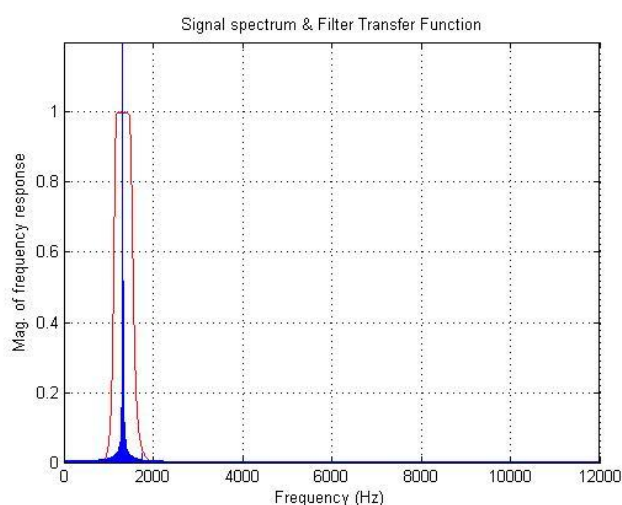
3.5 Μελέτη δυο ήχων ατάκας με την μέθοδο CEEMD.

Η μέθοδος αυτή, φιλτράρει ένα συγκεκριμένο συχνοτικό εύρος και στη συνέχεια πραγματοποιεί μετασχηματισμό eemd , αφού προσθέσουμε και ένα ημίτονο επικάλυψης.

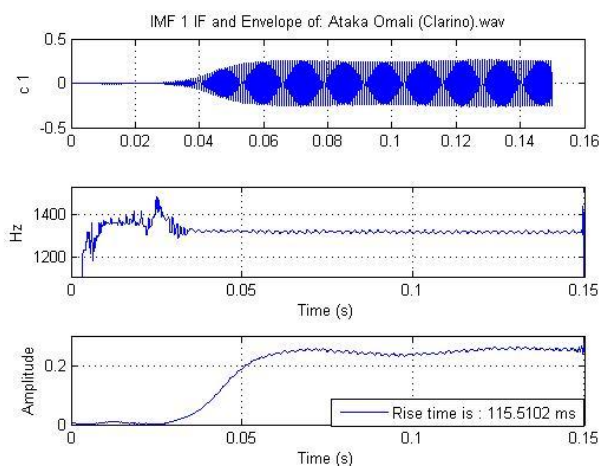
Οι δοκιμές έγιναν πάνω στους δυο ήχους ατάκας που έχουμε ήδη αναλύσει πιο πάνω στο ίδιο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα εδώ είναι πολύ ακριβή τόσο στον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας όσο και στον υπολογισμό του χρόνου ανόδου της κάθε αρμονικής ξεχωριστά.

Ο στόχος των συγκεκριμένων αναλύσεων είναι να υπολογιστεί ο μέσος όρος του χρόνου ανόδου των αρμονικών ώστε να δούμε αν είναι εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις ιδιότητες των αρμονικών στο κλαρίνο.

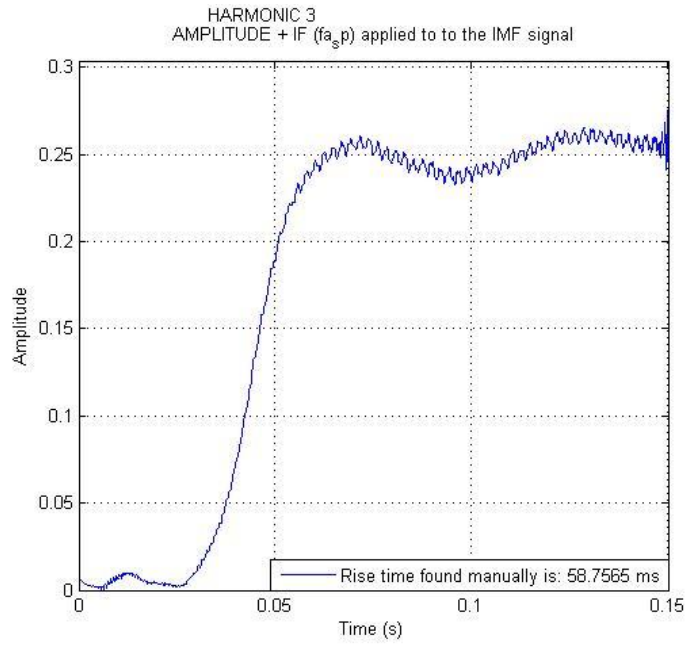
Οι νότες που χρησιμοποιήσαμε είναι οι: A4, B4, C5, B5.



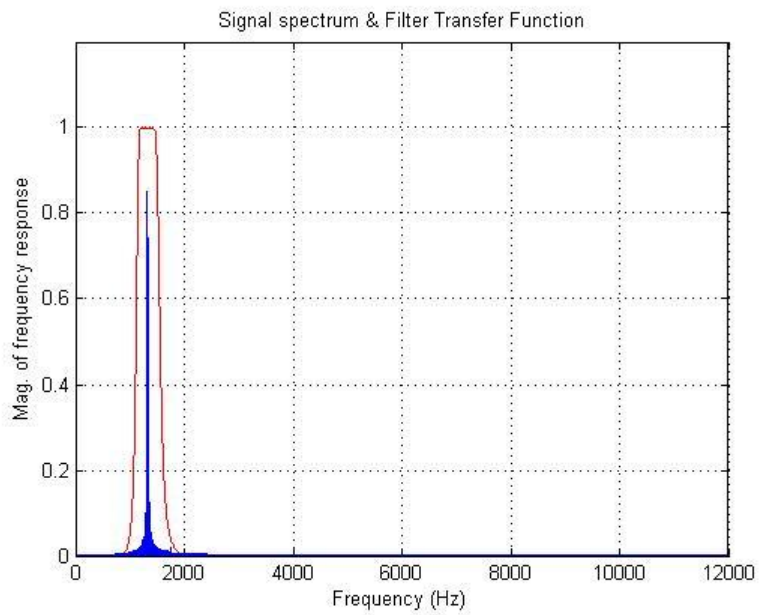
Εικόνα 15: Η τρίτη αρμονική στον ήχο της ομαλής ατάκας, απομονωμένη με την βοήθεια του φίλτρου.



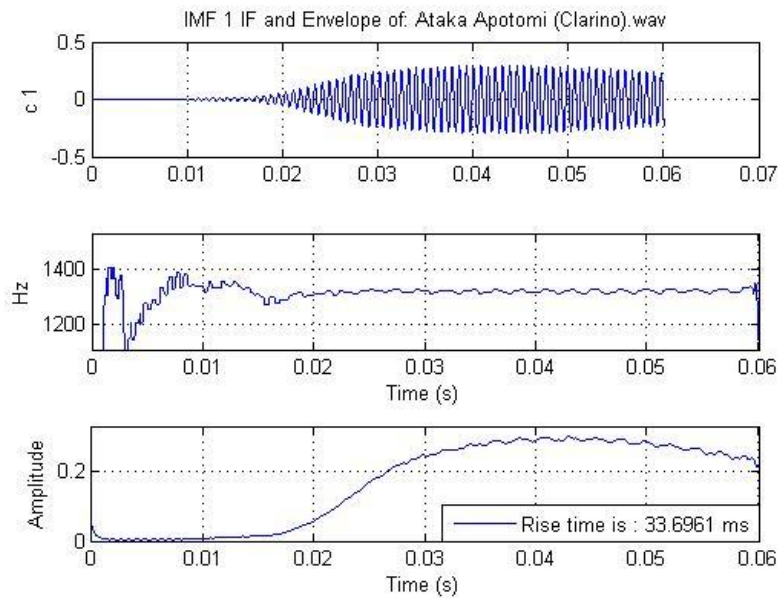
Εικόνα 16: Το IMF της τρίτης συχνότητας του ήχου ομαλής ατάκας, η στιγμιαία συχνότητα και το πλάτος (ο χρόνος ανόδου που φαίνεται υπολογίζεται με αυτόματο τρόπο από την μέθοδο)



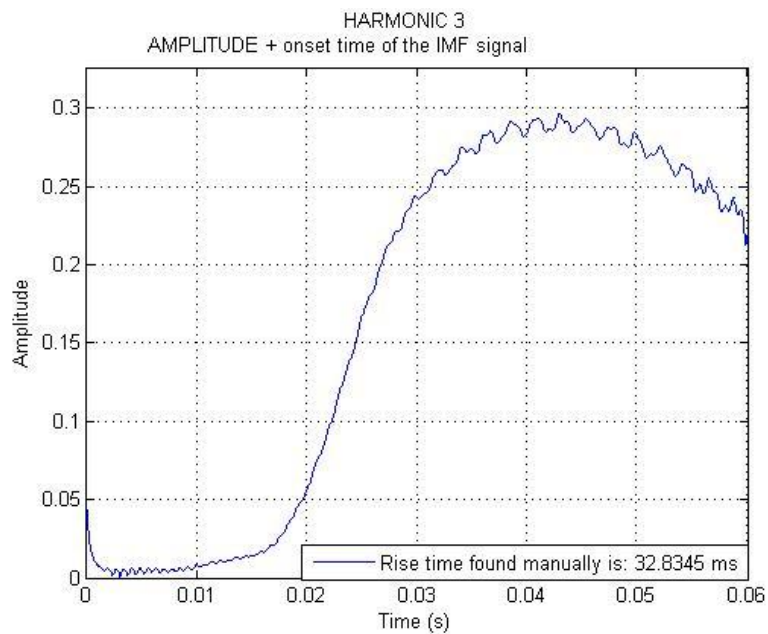
Εικόνα 17: Το πλάτος της τρίτης αρμονικής στον ήχο ομαλής ατάκας και ο manual υπολογισμός του χρόνου ανόδου.



Εικόνα 18: Η τρίτη αρμονική στον ήχο της απότομης ατάκας, απομονωμένη με την βοήθεια του φίλτρου.



Εικόνα 19: Το IMF της τρίτης συχνότητας του ήχου απότομης ατάκας, η στιγμιαία συχνότητα και ο χρόνος ανόδου (με αυτόματο υπολογισμό από την μέθοδο)



Εικόνα 20: Το πλάτος της τρίτης αρμονικής στον ήχο απότομης ατάκας και ο manual υπολογισμός του χρόνου ανόδου.

Πίνακας 30: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της ομαλής ατάκας κλαρίνου, νότας A4

Αρμονική (Hz)	Χρόνος ανόδου (ms)
1 (440)	60.7
2 (880)	81.2
3 (1320)	58.7
4 (1760)	64.4
5 (2200)	106.4

Πίνακας 31: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της απότομης ατάκας κλαρίνου, νότας A4

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (440)	40.2
2 (880)	32.1
3 (1320)	32.8
4 (1760)	40.0
5 (2200)	30.2

Πίνακας 32: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της ομαλής ατάκας κλαρίνου, νότας B4

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (494)	88.5
2 (990)	147.0
3 (1484)	56.0
4 (1978)	126.3
5 (2469)	64.6
6 (2966)	40.0
7 (3460)	56.0
8 (3955)	47.0

Πίνακας 33: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της απότομης ατάκας κλαρίνου, νότας B4

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (494)	36.0
2 (990)	-
3 (1484)	35.6
4 (1978)	40.1
5 (2469)	35.7
6 (2966)	30.4
7 (3460)	39.7
8 (3955)	28.2

Πίνακας 34: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της ομαλής ατάκας κλαρίνου, νότας C5

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (523)	55.6
2 (1045)	40.6
3 (1570)	91.5
4 (2098)	89.5
5 (2616)	37.1
6 (3140)	45.3
7 (3664)	44.6
8 (4187)	47.1

Πίνακας 35: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της απότομης ατάκας κλαρίνου, νότας C5

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (523)	47.4
2 (1045)	30.1
3 (1570)	31.3
4 (2098)	35.0
5 (2616)	32.5
6 (3140)	27.8
7 (3664)	33.2
8 (4187)	21.7

Πίνακας 36: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της ομαλής ατάκας κλαρίνου, νότας B5

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (983)	72.7
2 (1964)	40.8
3 (2948)	70.1
4 (3931)	56.4
5 (4913)	68.5

Πίνακας 37: Χρόνοι ανόδου των αρμονικών της απότομης ατάκας κλαρίνου, νότας B5

Αρμονική	χρόνος ανόδου (ms)
1 (983)	32.7
2 (1964)	26.9
3 (2948)	23.2
4 (3931)	21.7
5 (4913)	29.1

Πίνακας 38: Μέσος όρος του χρόνου ανόδου όλων των αρμονικών για την ομαλή ατάκα.
(για την 6^η, την 7^η και 8^η αρμονική αναφερόμαστε στις νότες B4 και C5 που έχουν οκτώ αρμονικές)

Αρμονική	μ.ο. χρόνου ανόδου (ms)
1	69.4
2	77.4
3	69.1
4	84.2
5	69.2
6	42.7
7	50.3
8	47.1

Πίνακας 39: Μέσος όρος του χρόνου ανόδου όλων των αρμονικών για την απότομη ατάκα.
(για την 6^η, την 7^η και 8^η αρμονική αναφερόμαστε στις νότες B4 και C5 που έχουν οκτώ αρμονικές)

Αρμονική	μ.ο. χρόνου ανόδου (ms)
1	34.0
2	29.7
3	30.7
4	34.2
5	31.9
6	29.1
7	36.5
8	25.0

Συμπεράσματα:

Το συμπέρασμα που μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε από τους παραπάνω πίνακες είναι ότι η μέθοδος αυτή φεύγει από τη λογική του μετασχηματισμού EMD καθώς απομονώνουμε εμείς την κάθε συχνότητα αλλά από την άλλη μεριά, δίνει πολύ ακριβή αποτελέσματα.

Χρόνοι ανόδου

Όσον αφορά τους χρόνους ανόδου μπορούμε να πούμε τα εξής:

- *Στην ομαλή ατάκα*

Δεν μπορεί να γίνει κάποια γενική παρατήρηση καθώς η κίνηση των χρόνων ανόδου στις αρμονικές διαφέρει από νότα σε νότα. Για παράδειγμα η αρμονική που παρουσιάζει τον μεγαλύτερο χρόνο ανόδου στις διαδοχικές νότες A4, B4 και C5 είναι αντίστοιχα η 5^η, η 2^η και η 3^η. Επίσης οι B4 και C5 που έχουν 8 αρμονικές αντί των 5 της A4 δείχνουν να έχουν ίδια συμπεριφορά στις τρεις τελευταίες αρμονικές από την άποψη ότι απαιτούν γενικά μικρό χρόνο ανόδου.

Τέλος η υψηλότερη νότα που μελετήσαμε, η B5 που αποτελείται από πέντε αρμονικές, παρουσιάζει τον υψηλότερο χρόνο ανόδου στην 1^η αρμονική.

Παρατηρώντας τον πίνακα 38 μπορούμε να πούμε ότι η 4^η αρμονική έχει την τάση να είναι σε όλους του υπό μελέτη ήχους μεγάλη σε διάρκεια. Έτσι, αν και σε καμία νότα δεν είναι αυτή με τον μεγαλύτερο χρόνο ανόδου, τον αποκτάει κατά μέσο όρο.

Επίσης, όσες νότες περιλαμβάνουν πάνω από πέντε αρμονικές παρουσιάζουν και τον μικρότερο, σε σχέση με τις πέντε προηγούμενες, χρόνο ανόδου. Πάντως τα στοιχεία που μας δίνει ο πίνακας αυτός δεν θα πρέπει να μας δώσουν έναυσμα για γενικά συμπεράσματα.

- *Στην απότομη ατάκα,*

Τα πράγματα είναι διαφορετικά καθ' ότι μπορούμε να αναφερθούμε σε μια γενική συμπεριφορά που όμως δεν ισχύει καθολικά. Αναφερόμαστε εδώ στην ιδιότητα της θεμελίου να απαιτεί τον μεγαλύτερο χρόνο ανόδου από όλες τις υπόλοιπες αρμονικές. Αυτό δεν ισχύει μόνο στην νότα B4 όπου η 4^η και η 7^η αρμονική φαίνεται να απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο μόνο κατά 3 και 4 ms αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες αρμονικές δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια τάση καθώς σε κάθε νότα ξεχωριστά δεν υπάρχει κάποια κοινή κίνηση των αντίστοιχων αρμονικών. Η μη ύπαρξη κοινής κίνησης μεταξύ των αρμονικών είναι που μας οδηγεί, σύμφωνα με τον πίνακα 39, σε λάθος συμπεράσματα άμα προσπαθήσουμε να γενικεύσουμε υπολογίζοντας τους μέσους όρους. Σύμφωνα με τον πίνακα, θα έπρεπε να υπάρχει μια τάση η 4^η και η 7^η αρμονική να απαιτούν και τον μεγαλύτερο χρόνο ανόδου. Παρατηρώντας όμως μια – μια τις αρμονικές στον κάθε ήχο ξεχωριστά, βλέπουμε πως αυτό αποτελεί την εξαίρεση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Λίγα λόγια για την ιστορική προέλευση της τρομπέτας

Σκόπιμο κρίνεται πριν περάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο που αφορά τα ξύλινα πνευστά να αναφερθούν εισαγωγικά *λίγα λόγια για την τρομπέτα*, καθώς ήχοι της θα χρησιμοποιηθούν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Η ονομασία της τρομπέτας (tromba στα Ιταλικά) προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη «στρόμβος» που σήμαινε «μεγάλο θαλάσσιο κοχύλι». Ο σωλήνας της σύγχρονης τρομπέτας είναι αναδιπλωμένος για πρακτικούς λόγους (η αρχαία σάλπιγγα που ήταν πρόγονος της είχε ευθύ σωλήνα). Το σχήμα του είναι κυλινδρικό και καταλήγει σε «καμπάνα» που ανοίγει ελαφρά. Η τρομπέτα έχει τρεις βαλβίδες. Είναι όργανο με ηχητική ευλυγισία, και ο λαμπρός και γεμάτος του ήχος καλύπτει μια μουσική έκταση από τρεις σχεδόν οκτάβες.

Στη συμφωνική ορχήστρα χρησιμοποιείται η τρομπέτα σε Bb και μερικές φορές η τρομπέτα σε ντο, ενώ για κομμάτια που είναι γραμμένα στην ψηλή περιοχή της μουσικής έκτασης χρησιμοποιούνται μικρότερες τρομπέτες (σε D, σε Eb κ.α.).

Χάλκινες σάλπιγγες μπορεί να συναντήσει κανείς σε όλους τους αρχαίους μεγάλους πολιτισμούς όπως της Κίνας, της Αιγύπτου, της Ελλάδας, της Ρώμης κλπ. Δύο ευθείες σάλπιγγες –η μία ασημένια και η άλλη χάλκινη– που βρέθηκαν στον τάφο του Αιγύπτιου Φαραώ Τουταγχαμών, είναι οι παλαιότερες που έχουν φτάσει στα χέρια μας και χρονολογούνται από το 1350 π.Χ.

Στο μεσαίωνα οι σάλπιγγες χρησιμοποιούνταν κυρίως για στρατιωτικούς και τελετουργικούς σκοπούς, και έπαιζαν λαμπρές φανφάρες (απλό κομμάτι για χάλκινα πνευστά που παίζεται κυρίως σε χαμηλούς φθόγγους και αναγγέλλει την εμφάνιση κάποιου επίσημου προσώπου σε κάποια τελετή.) βασισμένες στον περιορισμένο αριθμό φθόγγων που έδινε η στήλη των αρμονικών.

Λίγο μετά το 1600 με το καινούργιο αναδιπλωμένο σχήμα που έχει επικρατήσει μέχρι τις μέρες μας, η τρομπέτα εμφανίζεται συχνά στις ορχήστρες της εποχής και κυρίως σε όπερες ή σε έργα εκκλησιαστικής μουσικής, ενισχύοντας το αίσθημα σε σκηνές χαράς ή θριάμβου.

Προς το τέλος του 17^{ου} αιώνα, οι τρομπετίστες είχαν αρχίσει να εξελίσσουν μια δύσκολη τεχνική εκτέλεσης στην ψηλότερη περιοχή της μουσικής έκτασης του οργάνου. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο παιξίματος, ο εκτελεστής χρησιμοποιούσε τους οξύτερους φθόγγους της αρμονικής στήλης, από τον όγδοο και πάνω, οι οποίοι,

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

επειδή δεν άφηναν μεγάλα κενά μεταξύ τους, μπορούσαν να αποδώσουν μια μελωδία και όχι μόνο μια φανφάρα, όπως γινόταν μέχρι τότε. Τόσο η ψηλότερη αυτή περιοχή της μουσικής έκτασης της τρομπέτας όσο και η τεχνική εκτέλεσης ονομάστηκαν «κλαρίνο».

Η τεχνική αυτή εγκαταλείφθηκε σύντομα. Από την εποχή του Χάυντν και του Μότσαρτ οι τρομπετίστες είχαν επανέλθει και πάλι στον παλιό τρόπο παιξίματος. Όπως έχει αναφερθεί, η «φυσική» τρομπέτα αντικαταστήθηκε το 1815 από τη «χρωματική» (με βαλβίδες) και από τότε καθιερώθηκε σαν ένα από τα μελωδικά όργανα της ορχήστρας.



Εικόνα 1: Η τρομπέτα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Λίγα λόγια για την ιστορική προέλευση του κλαρίνου

Σκόπιμο κρίνεται να αναφερθούν εισαγωγικά λίγα λόγια για το κλαρίνο, μιας και ήχοι του θα χρησιμοποιηθούν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Το κλαρίνο κατασκευάζεται από ξύλο, εβονίτη ή σπανιότερα από μέταλλο. Η παραγωγή του ήχου με απλή γλωττίδα και το κυλινδρικό σχήμα του σωλήνα δίνουν στο όργανο αυτό το χαρακτηριστικό του ηχόχρωμα.

Έχει τη μεγαλύτερη μουσική έκταση από όλα τα ξύλινα πνευστά (μεγαλύτερη από τρεις οκτάβες). Είναι όργανο με μεγάλη ηχητική ευελιξία και μπορεί να εκτελεί με μεγάλη ακρίβεια τρίλλιες, γρήγορα άλματα ή περάσματα, αρπίσματα κλπ., γι' αυτό οι συνθέτες του εμπιστεύονται συχνά σολιστικά μέρη στα έργα τους.

Είναι ένα όργανο πλούσιο σε ηχοχρώματα. Η ποιότητα του ήχου του, που είναι λιγότερο ένρινη από του όμποε, ποικίλλει ανάλογα με το ύψος της οκτάβας που παίζει. Ένα από τα χαρακτηριστικά του ηχοχρώματα είναι το λεγόμενο *chalumeau* (ονομάζεται έτσι από το ομώνυμο όργανο από το οποίο κατάγεται), που παράγεται από τη χαμηλότερη οκτάβα της μουσικής του έκτασης. Οι νότες που παίζονται σε αυτή την οκτάβα είναι σκοτεινές, θερμές και βελούδινες.

Η καλύτερη περιοχή της μουσικής του έκτασης βρίσκεται από τη νότα Β (Τρίτη γραμμή του πενταγράμμου μιλώντας για το κλειδί του σολ) και πάνω, με εξαίρεση μερικούς σκληρούς και διαπεραστικούς φθόγγους στην ψηλή του περιοχή.

Τα κλαρίνα που χρησιμοποιούνται σήμερα στην ορχήστρα παρουσιάζονται σε διαφορετικά μεγέθη. Τα πιο συνηθισμένα είναι σε Βb και σε Α, ενώ στις μάντες χρησιμοποιείται συνήθως ένα μικρότερο κλαρίνο σε Eb (*quartino*). Είναι και τα τρία όργανα μεταφερόμενης τονικότητας.

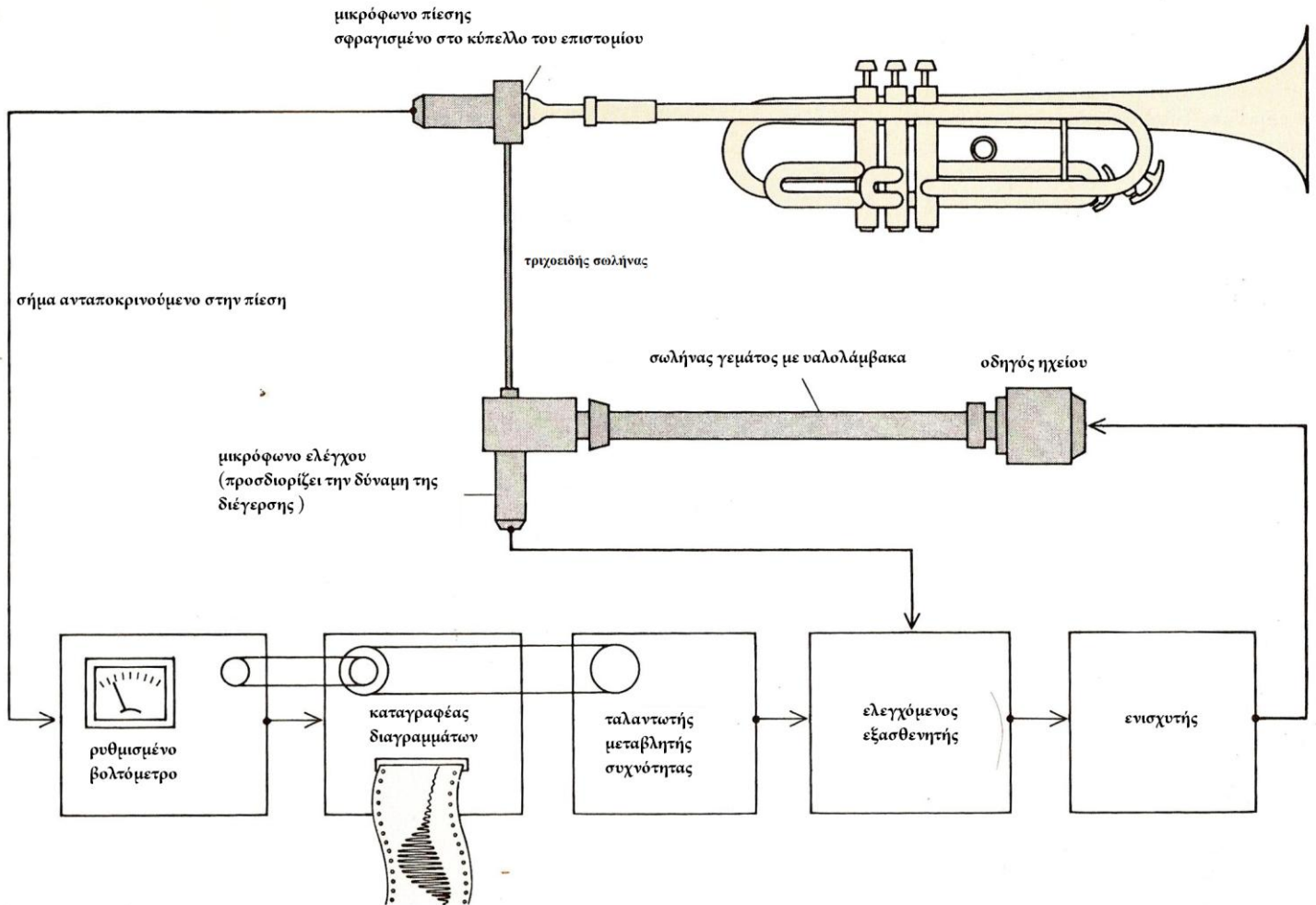


Εικόνα 2: Το κλαρίνο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Έννοιες που χρειάζονται επεξηγήσεις

Α) Μέθοδος διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα



Εικόνα 3: Διάταξη της μεθόδου διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα.

Η μέθοδος διέγερσης μέσω τριχοειδούς σωλήνα χρησιμοποιεί έναν οδηγητή ενός ηχείου σαν αντλία για να τροφοδοτήσει μια ροή διέγερσης μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα στο κύπελλο του επιστομίου του υπό μελέτη οργάνου. Ένα μικρόφωνο ελέγχου στέλνει σήματα σε έναν εξασθενητή για να σιγουρευτούμε πως η ακουστική διέγερση που εισέρχεται στον τριχοειδή σωλήνα, παραμένει σταθερή. Η ανταπόκριση του οργάνου στην πίεση, κι έτσι και η εσωτερική του αντίσταση, εντοπίζεται από ένα δεύτερο μικρόφωνο που είναι σφηνωμένο στο κύπελλο του επιστομίου. Το σήμα από το μικρόφωνο κατευθύνεται σε ένα συχνοτικά επιλεκτικό βολτόμετρο που είναι συνδεδεμένο αλυσιδωτά με έναν ταλαντωτή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Ένας καταγραφέας διαγραμμάτων που συνδέεται με το βολτόμετρο σχεδιάζει τις συντονιστικές συχνότητες

Β) Συντονιστής Helmholtz

Ο συντονιστής Helmholtz (1821-1894) είναι ένα είδος δονούμενου συστήματος. Η συχνότητα συντονισμού f του μπουκαλιού δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{Vl}} \quad (1)$$

Όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα (343m/s) στους 20 βαθμούς κελσίου, V ο όγκος του συντονιστή (m^3), l το μήκος του λαιμού του συντονιστή (m) και α η επιφάνεια του λαιμού (m^2), f σε Hz. Δηλαδή η αέρια μάζα μέσα στον συντονιστή ταλαντώνεται δίνοντας τη χαρακτηριστική συχνότητα Helmholtz ανάλογα με τις διαστάσεις του συστήματος. Η μάζα του αέρα στον λαιμό παίζει το ρόλο του εμβόλου και η μάζα μέσα στον συντονιστή τον ρόλο του ελατηρίου.

Γ) Το στροβοσκόπιο

Τα στροβοσκόπια είναι όργανα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής αντικειμένων. Αποτελούνται από μια γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων ειδικής κατασκευής, από έναν προβολέα με λυχνία ευγενούς αερίου, καθώς και από τα απαιτούμενα κυκλώματα σκανδάλης. Η γεννήτρια αναβοσβήνει τη λυχνία του στροβοσκοπίου, σε συχνότητες ρυθμιζόμενες από βαθμολογημένη κλίμακα. Φωτίζοντας με τη λυχνία ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο και ρυθμίζοντας τη συχνότητα της γεννήτριας ακριβώς ίση με τη συχνότητα περιστροφής του αντικειμένου, το αντικείμενο παρουσιάζεται ακίνητο. Έτσι, τα φύλλα της έλικας ενός ανεμιστήρα περιστρεφόμενου με ταχύτητα 1600 στροφές ανά λεπτό, φωτιζόμενα με κοινό φως, δεν διακρίνονται, λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής. Αν όμως φωτιστούν με στροβοσκόπιο, του οποίου η συχνότητα φωτισμού, είναι 1600 λάμψεις (flashing) ανά λεπτό, τότε σε κάθε άναμμα του προβολέα η έλικα θα βρίσκεται στην ίδια θέση και ο παρατηρητής θα βλέπει την έλικα ακίνητη. Αν η συχνότητα του στροβοσκοπίου γίνει 1599, τότε η έλικα θα φαίνεται να κινείται με ταχύτητα μιας μόνο στροφής ανά λεπτό. Αν η συχνότητα του

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

στροβοσκοπίου γίνει 1601, η έλικα θα φαίνεται να κινείται αντίθετα με ταχύτητα και πάλι μιας στροφής ανά λεπτό.

Η συχνότητα της γεννήτριας των στροβοσκοπίων αρχίζει από 100 λάμπεις ανά λεπτό και ανέρχεται συνήθως ως τις 25000, σε τρεις περιοχές συχνοτήτων. Εξαίρεση αποτελούν ορισμένοι νεώτεροι τύποι, η συχνότητα των οποίων ανέρχεται στις 150000 λάμπεις ανά λεπτό. Τα στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία: για την ακριβή μέτρηση των στροφών των μηχανών και την άνετη και λεπτομερή παρακολούθηση των μεταβολών βασικών εξαρτημάτων τους, όπως πιθανές κάμψεις αξόνων κλπ, για την παρατήρηση και μέτρηση της ταχύτητας οδοντωτών μηχανισμών στους ρότορες των μηχανών κ.α. Επιπλέον χρησιμοποιούνται για τη φωτογράφιση αντικειμένων τα οποία κινούνται με μεγάλη ταχύτητα, όπως είναι τα βλήματα των όπλων, έλικες κ.α. Τέλος με τα στροβοσκόπια επαληθεύονται βασικοί νόμοι της Φυσικής, όπως π.χ. η σχέση της συχνότητας και του μήκους κύματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης ξύλινων – χάλκινων πνευστών

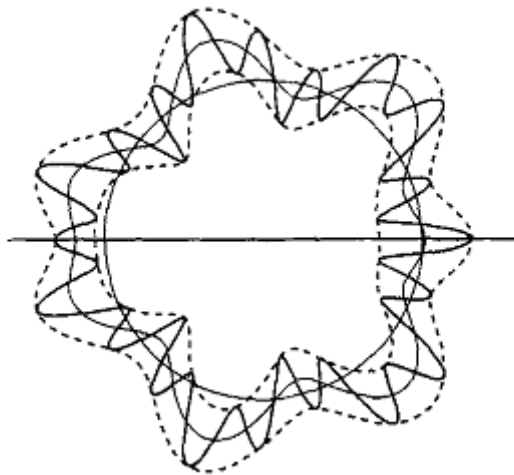
ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

ΑΕΡΟΦΩΝΑ (ΠΝΕΥΣΤΑ)		
ΗΧΟΓΟΝΟ ΣΩΜΑ	Στήλη του αέρα που περικλείεται στο σωλήνα του οργάνου	
ΟΞΥΤΗΤΑ	Εξαρτάται από το μήκος της στήλης του αέρα που πάλλεται	
ΗΧΟΧΡΩΜΑ	Εξαρτάται κυρίως από: <ul style="list-style-type: none"> - τον τρόπο παραγωγής του ήχου, δηλαδή τον τρόπο που προκαλείται η παλμική κίνηση της στήλης του αέρα (χρήση γλωττίδων, επιστομιών, χείλη εκτελεστή κλπ.). - το σχήμα του σωλήνα (κωνικό, κυλινδρικό, στρογγυλό κλπ.). 	
	ΞΥΛΙΝΑ ΠΝΕΥΣΤΑ	ΧΑΛΚΙΝΑ ΠΝΕΥΣΤΑ
ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ύψους φθόγγων	Η αυξομείωση της στήλης του αέρα επιτυγχάνεται με το άνοιγμα και κλείσιμο οπών που βρίσκονται πάνω στο σώμα του οργάνου	Από κάθε μήκος σωλήνα μπορεί να παραχθεί μία αρμονική στήλη, από την οποία ο εκτελεστής διαλέγει, με το σφίξιμο ή χαλάρωμα των χειλιών του, τους φθόγγους που του χρειάζονται. Στα "φυσικά" κόρνα και τρομπέτες το μήκος του σωλήνα μπορούσε ν' αλλάξει με "σπείρες", ενώ στα "χρωματικά" (από το 1815 και μετά) χρησιμοποιούνται οι "βαλβίδες". Το τρομπόνι, χάρη στο "ολισθαίνον τμήμα" του, μπορούσε πάντα να αυξομειώνει χωρίς δυσκολία το μήκος του σωλήνα του.
ΠΑΛΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ στήλης του αέρα	Προκαλείται με φύσημα: <ul style="list-style-type: none"> - σε μία ειδική εγκοπή (π.χ. φλάουτο, πίκολο) - μέσα από ειδικό επιστόμιο (π.χ. φλάουτο με ράμφος) - μέσα από απλή γλωττίδα (π.χ. κλαρινέτο, μπάσο κλαρινέτο, σαξόφωνο). - μέσα από διπλή γλωττίδα (π.χ. όμποε, αγγλικό κόρνο, φαγκότο, κόντρα φαγκότο) 	Επιτυγχάνεται με τα χείλη του εκτελεστή που, καθώς πιέζονται με το φύσημα στο επιστόμιο του οργάνου, κραδαίνονται και λειτουργούν σαν διπλή γλωττίδα
ΣΥΜΦΩΝΙΚΗ ΟΡΧΗΣΤΡΑ	Περιλαμβάνει: <ul style="list-style-type: none"> - φλάουτα και πίκολο - όμποε και αγγλικό κόρνο - κλαρινέτα και μπάσο κλαρινέτο - φαγκότα και κόντρα φαγκότο - σαξόφωνο (σε ορισμένες περιπτώσεις) 	Περιλαμβάνει: <ul style="list-style-type: none"> - τρομπέτες - κόρνα - τρομπόνια - τούμπα - κορνέτο (σε ορισμένες περιπτώσεις)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Κατοπτρική Επέκταση (Mirror Extending), μια λύση στο πρόβλημα των επιδράσεων των άκρων (End Effects).

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2.2.4, οι περιβάλλουσες της χρονοσειράς προσδιορίζονται από τις κυβικές συναρτήσεις spline. Στα άκρα παράγωγοι πρώτης ή δεύτερης τάξης απαιτούνται για την μέθοδο με τα splines. Αφού η καμπύλη των δεδομένων δεν παρέχει καμία πληροφορία για τις περιβάλλουσες στα άκρα, οι παράγωγοι δεν μπορούν να βρεθούν εκτός αν τα δεδομένα επεκταθούν και στα δύο άκρα. Μία μέθοδος που εισήχθη από τον Huang και που παρουσιάσαμε στο κεφ. 2.2.4 προσθέτει κάποια χαρακτηριστικά κύματα και στα δύο άκρα, τελικά δεν είναι όμως αξιόπιστη και δεν παρέχει μοναδικότητα, αφού δίνει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα αν αλλάξουμε λίγο τις προστιθέμενες κυματομορφές. Μέχρι τώρα, δεν υπάρχει κάποια θεωρητική αρχή στο πως να επεκτείνουμε τα άκρα μιας χρονοσειράς. Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζουμε μια νέα μέθοδο που ονομάζεται Κατοπτρική Επέκταση (Mirror Extending) και εισήχθη από τους Zhao Jin-ring και Huang Da-ji, το 2001.



Εικόνα 4: Οι δύο διακεκομμένες γραμμές είναι για την πάνω και την κάτω περιβάλλουσα. Η συμπαγής γραμμή είναι η μέση τιμή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4, τα δεδομένα στο επάνω επίπεδο (συνεχής γραμμή) επεκτείνεται στο κάτω επίπεδο (διακεκομμένη γραμμή). Αλλά μόνο το επάνω επίπεδο χρησιμοποιείται σαν το αποτέλεσμα της μεθόδου EMD.

Οι IMF προσδιορίζονται για όλο τον κύκλο δεδομένων που φαίνεται στην εικόνα 4 από την 1^η IMF ως την τελευταία, χωρίς επιπλέον επέκταση.

Λόγω του ότι δεν υπάρχουν άκρα στο επεκταμένο κυκλικό σετ δεδομένων, η προσαρμογή των spline θα είναι διαφορετική από την προσέγγιση του κεφ. 2.2.4.

Τέλος ας αναφέρουμε ότι σε αυτό το σημείο απλά ανοίξαμε το ζήτημα ώστε να υποδείξουμε κάποιες λύσεις στις επιδράσεις στα άκρα. Για περισσότερες πληροφορίες για την μέθοδο Mirror Extend, μπορεί κάποιος να ανατρέξει στη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα στο άρθρο της αντίστοιχης εργασίας.

Επεξήγηση εννοιών.

1) Δυαδική τράπεζα φίλτρου.

Μια δυαδική τράπεζα φίλτρου είναι μια συλλογή από ζωνοπερατά φίλτρα με σταθερό σχήμα της ζώνης διέλευσης (όπως π.χ. αυτό μιας κανονικής κατανομής), όπου τα γειτονικά φίλτρα καλύπτουν το μισό ή το διπλό από το εύρος ζώνης του κάθε συγκεκριμένου φίλτρου της τράπεζας. Τα συχνοτικά εύρη των φίλτρων μπορούν να υπερκαλύπτονται. Για παράδειγμα ένα απλό δυαδικό φίλτρο μπορεί περιλαμβάνει φίλτρα με συχνοτικά παράθυρα: από 50 έως 120 Hz, 100 έως 240 Hz, 200 έως 480 Hz κλπ.

2) Συναρτήσεις splines

Οι συναρτήσεις splines είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μας για να ενώνουν ομαλά μεταξύ τους τα διακριτά σημεία από τα μέγιστα και τα ελάχιστα για να βγούνε οι περιβάλλουσες. Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στα splines δίνουμε τους παρακάτω συνδέσμους:

<http://www.doc.ic.ac.uk/~dfg/AndysSplineTutorial/>

<http://mathworld.wolfram.com/CubicSpline.html>

Αναφορές - Βιβλιογραφία

- [Backus 1969], Backus John, “The Acoustical Foundations of Music”, 1969, «W.W. Norton and Company», 2nd Edition.
- [Benade 1976], Benade A.H. “Fundamentals of Musical Acoustics”, 1976, Dover Publications, Inc., 2nd Edition.
- [Cohen 1995], Cohen, L. «Time-Frequency Analysis», Prentice Hall, 1995, Englewood Cliffs, NJ.
- [Daubechies 1992] Daubechies, I. «Ten Lectures on Wavelets» 1992, SIAM, Philadelphia.
- [Diks 1997] Diks, C. Nonlinear Time Series Analysis. , 1997, World Scientific Press, Singapore.
- [Feldman 2008], Feldman Michael, “Theoretical analysis and comparison of the Hilbert transform decomposition methods”, 2008, Mechanical Systems and Signal Processing 22, 509-519.
- [Flandrin 1999] Flandrin, P. «Time-Frequency/Time-Scale Analysis», 1999, Academic Press, San Diego, CA.
- [Huang 1998] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, S. H., Zheng, Q., Tung, C. C., and Liu, H. H. , «The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis», 1998, Proc. Roy. Soc. London, A454, 903–995.
- [Huang 1996] Huang N. E., Long, S. R., and Shen, Z. «Frequency downshift in nonlinear water wave evolution», 1996, Advances in Appl. Mech. 32, 59–117.
- [Huang 1999] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R. «A new view of nonlinear water waves — the Hilbert spectrum», 1999, Ann. Rev. Fluid Mech. 31, 417–457.
- [Huang 2003] Huang, N. E., and Long, S. R. «A generalized zero-crossing for local frequency determination», 2003, U.S. Patent pending.
- [Huang 2004] Huang, N. E. and Wu, Z, «A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method», 2004. Proc. Roy. Soc. London, A460, 1597–1611.

[Huang 2005], Huang E. Norden, “Introduction to Hilbert-Huang Transform and Some Recent Developments”, 2005, εκδ. Taylor & Francis Group

[Hutchins 1978], Carleen Maley Hutchins, “The Physics of music”, [Συλλογές από το περιοδικό Scientific American], 1978, εκδ. “Freeman”.

[Kantz 1997] Kantz, H., and Schreiber, T. Nonlinear Time Series Analysis. 1997, Cambridge University Press, Cambridge.

[Priestley 1988], Priestley, M. B. «Nonlinear and nonstationary time series analysis», 1988, Academic Press, London.

[Rao 2008], Rao A. Ramachandra, HSU En-Ching, ‘Hilbert-Huang transform analysis of hydrological and environmental time series’, Springer science and business media B.V.

[Rato 2008] Rato, R.T., Ortigueira, M.D, “On the HHT, its problems, and some solutions”, Mechanical Systems and Signal Processing 22, 1374-1394, 2008.

[Stevenson 2009], Stevenson Samuel, Campbell Murray, Bromage Seona, Chick John, Gilbert Joel, “Motions of the lips of brass players during extremely loud playing”, 2009, J.Acoust. Soc. Am 125.

[Tong 1990] Tong, H «Nonlinear Time Series Analysis», 1990, Oxford University Press, Oxford.

[Yang 2008], Yang Wen-Xian, “Interpretation of mechanical signals using an improved Hilbert-Huang transform”, 2008, Mechanical Systems and Signal Processing 22, 1061-1071,

[Zhao 2001], Zhao Jin-Ping, Huang Da-Ji, «Mirror extending and circular spline function for empirical mode decomposition method», 2001, Journal of Zhejiang University V.2, No3, 247 - 252