

Έξυπνο, εξειδικευμένο περιβαλλοντικό παρατηρητήριο στην Μεσσηνία

Παραδοτέο 5.1

Αλγόριθμοι ανάλυσης ακουστικών δεδομένων
και ταυτοποίησης ηχητικών πηγών



Δρ. Χρήστος Μάρκου, Διευθυντής Ερευνών, ΙΠΣΦ - ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος"

Δημήτριος Σταυρόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας, ΙΠΣΦ - ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος"

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
1 Εισαγωγή	3
2 Περιγραφή δεδομένων	4
2.1 Ακουστικά δεδομένα υποβάθρου	4
2.1.1 Τεχνικές πληροφορίες υδροφώνων και δεδομένων	4
2.1.2 Βαθμονόμηση δεδομένων	4
2.2 Προσομοίωση διπολικού παλμού	5
2.2.1 Προέλευση και κριτήριο επιλογής	5
2.2.2 Διαδικασία Προσομοίωσης	6
3 Μείωση του όγκου των ακουστικών δεδομένων	8
3.1 Κατασκευή συνόλων σήματος και υποβάθρου	8
3.2 Προεργασία δεδομένων	8
3.2.1 Εντοπισμός ηχητικών παλμών υποθαλάσσιας ζωής	8
3.2.2 Αφαίρεση συνεισφοράς χαμηλών συχνοτήτων	9
3.3 Χρήση μετασχηματισμού wavelet	11
3.4 Μελέτη απόδοσης αλγορίθμου	13
4 Κατηγοριοποίηση ηχητικών παλμών	16
4.1 Ταξινόμηση με χρήση αλγορίθμου μηχανικής μάθησης	16
5 Συμπεράσματα	18
Βιβλιογραφία	19

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η παρούσα αναφορά περιγράφει τα αποτελέσματα των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του Πακέτου Εργασίας 5 (ΠΕ5), με τίτλο “*Ανάπτυξη αλγορίθμων ανάληψης ακουστικών δεδομένων*”. Στο *Κεφάλαιο 1* γίνεται λεπτομερής αναφορά στα υποθαλάσσια ακουστικά δεδομένα τα οποία είχαν συλλεχθεί και χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο για την κατασκευή των αλγορίθμων. Επιπροσθέτως περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης ακουστικών διπολικών παλμών. Τέτοιου είδους παλμοί χρησιμοποιήθηκαν ως σήμα με βάση την αναγνώριση του οποίου κατασκευάστηκαν οι αλγόριθμοι. Η επιλογή του σήματος αυτού καθίσταται δόκιμη, δεδομένης της ιδιάζουσας μορφής του η οποία προϋποθέτει προηγμένες τεχνικές ανάλυσης για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του από το ακουστικό υπόβαθρο. Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζεται ένα σύνολο μεθόδων συχνοτικής ανάλυσης που στοχεύει στη μείωση του όγκου των ακουστικών δεδομένων. Περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού wavelet, συνεπικουρούμενου από μια αλληλουχία συχνοτικών φίλτρων. Επίσης γίνεται μια εκτίμηση της απόδοσης της μεθόδου αυτής. Το *Κεφάλαιο 3* πραγματεύεται την εφαρμογή *Μηχανικής Μάθησης Machine Learning*, μέσω χρήσης αλγορίθμου (*Boosted Decision Tree*), για την κατηγοριοποίηση των ηχητικών διπολικών παλμών σε σχέση με το υπόβαθρο. Τέλος, γίνεται μια αποτίμηση των σχετικών με το ΠΕ5 εργασιών και αναφέρονται οι προοπτικές εφαρμογής στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης που προβλέπει το ΠΕ8.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή δεδομένων

2.1 Ακουστικά δεδομένα υποβάθρου

Για την κατασκευή των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτού του πακέτου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υποθαλάσσιου ακουστικού υποβάθρου τα οποία ήδη διέθετε η ομάδα εργασίας. Αυτά είχαν συλλεχθεί τον Φεβρουάριο του 2018 από δύο υδρόφωνα τα οποία κατέγραφαν για περίπου ένα μήνα το ακουστικό υπόβαθρο σε θαλάσσιο βάθος περίπου 1600 m, Νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου.

2.1.1 Τεχνικές πληροφορίες υδροφώνων και δεδομένων

Τα δεδομένα υποθαλάσσιου ακουστικού υποβάθρου συλλέχθηκαν με τη χρήση δύο υδροφώνων *Loggerhead DSG-ST* [1]. Αυτά λειτουργούσαν ρυθμισμένα σε μια συχνότητα καταγραφής (sampling rate) ίση με 144 kHz. Η συνεχής καταγραφή διάρκειας δύο ωρών αντιστοιχούσε σε αρχείο όγκου ~ 2.1 GB για κάθε υδρόφωνο. Για την αποτελεσματική διαχείριση αυτού του μεγάλου όγκου δεδομένων, οι συνεχής καταγραφές διαμερίστηκαν σε κομμάτια ("chunks") χρονικής διάρκειας 5 ms. Δεδομένης της συχνότητας καταγραφής, κάθε τέτοιο chunk περιέχει 720 καταγραφές, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε περίοδο ~ 7 μ s.

2.1.2 Βαθμονόμηση δεδομένων

Οι καταγραφές των υδροφώνων πρέπει να μετατραπούν μέσω μιας διαδικασίας βαθμονόμησης, ώστε από τιμές πλάτους σε μια αυθαίρετη κλίμακα να προκύψουν τιμές σε μονάδες πίεσης. Η μεταβολή της πίεσης στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (P) προκαλεί οι μηχανικές τάσεις στον όγκο του, οι οποίες με τη σειρά τους επάγουν ηλεκτρικές τάσεις (V_{in}). Οι ηλεκτρικές τάσεις που προκύπτουν (V_{in}) ενισχύονται μέσω ενός DC-DC converter (V_{out}) και καταγράφονται.

Η συνολική ευαισθησία (sensitivity) ενός υδροφώνου ισούται με το άθροισμα της ευαισθησίας του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου και της ενίσχυσης (gain) του DC-DC converter. Για τα συγκεκριμένα υδρόφωνα η ευαισθησία του κρυστάλλου είναι $-201 \text{ dBV}/1\mu\text{Pa}$ ενώ το gain είναι $+33 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}$ [1]. Επομένως :

$$s_{total} = s_{piezo} + gain = -168 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa} \quad (2.1)$$

Με χρήση του ορισμού της ευαισθησίας του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου όπως και του ορισμού του gain, η σχέση (2.1) μπορεί να γραφεί ως :

$$s_{total} = 20 \log_{10} \frac{V_{in}/P}{1\text{V}/1\mu\text{Pa}} + 20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.2)$$

Από την οποία προκύπτει η γραμμική ευαισθησία, η οποία χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση :

$$\frac{V_{out}}{P} = 0.00398 \text{ V/Pa} \quad (2.3)$$

Σημειώνεται ότι πριν την μετατροπή σε μονάδες πίεσης με χρήση της (2.3), υπολογίζεται ο μέσος όρος του πλάτους και αφαιρείται από κάθε τιμή έτσι ώστε να αφαιρεθεί η συνεισφορά του DC offset.

Η παραπάνω διαδικασία βαθμονόμησης θα μπορεί να εφαρμοστεί στα δεδομένα που θα συλλεχθούν σύμφωνα με το ΠΕ7, αντικαθιστώντας το sensitivity και το gain με αυτά των υδροφώνων που θα χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή των δεδομένων.

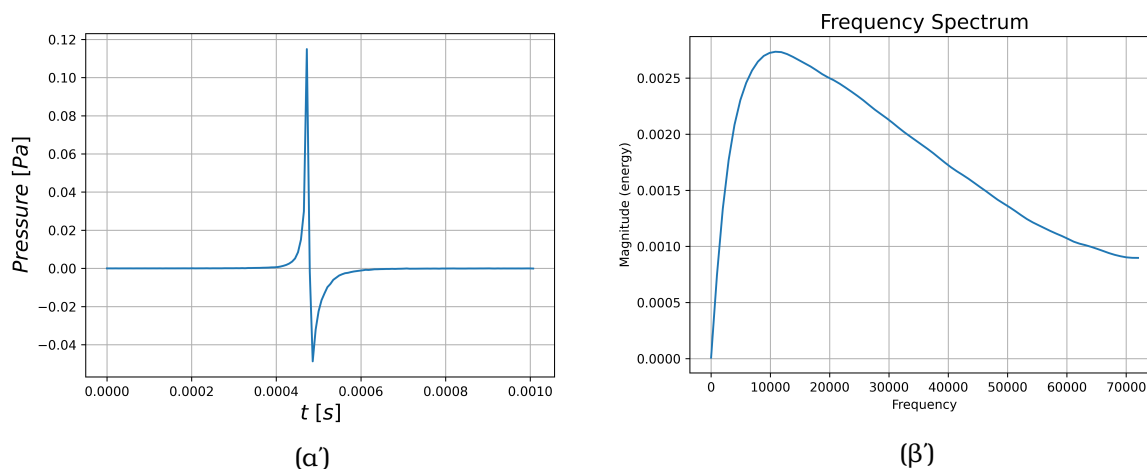
2.2 Προσομοίωση διπολικού παλμού

2.2.1 Προέλευση και κριτήριο επιλογής

Για την ανάπτυξη των σχετικών με το σκοπό του πακέτου αλγορίθμων, επιλέχθηκε ως σήμα ενδιαφέροντος ο διπολικός παλμός.

Μια φυσική διεργασία η οποία παράγει τέτοιου είδους παλμούς, είναι το *Θερμοακουστικό Φαινόμενο* [2]. Νετρίνα αστροφυσικής προέλευσης υπέρ-υψηλών ενεργειών (PeV-EeV κλίμακα) τα οποία αλληλεπιδρούν αδρονικά, εναποθέτουν ενέργεια σε έναν όγκο που προσγγίζεται από κύλινδρο ακτίνας μερικών εκατοστών και μήκους $\sim 20 \text{ m}$. Η ποσότητα της ενέργειας αυτής στην περίπτωση νετρίνων υπέρ-υψηλών ενεργειών, καθώς και η στιγμιαία (για την ηχητική χρονική κλίμακα) εναπόθεση της το θαλασσίνο νερό, θερμαίνουν το μέσο σε τέτοιο βαθμό ώστε να δημιουργήσουν σχετική διαφορά πίεσης και συνακόλουθα τη δημιουργία και διάδοση ηχητικού διπολικού παλμού.

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή αυτή είναι η ιδιόζουσα μορφή του συγκεκριμένου διπολικού παλμού (πολύ μικρή χρονική διάρκεια), η οποία καθιστά αναγκαία την χρήση



Σχήμα 2.1: Νειρινικός διπολικός παλμός (2.1α) και το φάσμα συχνοτήτων του με μετασχηματισμό Fourier (2.1β).

προηγμένων τεχνικών συχνοτικής ανάλυσης αλλά και ταξινόμησης (classification) για τον αποδοτικό εντοπισμό του μέσα στο ακουστικό υπόβαθρο. Παράδειγμα τέτοιου διπολικού παλμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1α, όπου διακρίνεται η εξαιρετικά μικρή χρονική διάρκεια του παλμού. Το φάσμα των συχνοτήτων που προκύπτει κατά μετασχηματισμό Fourier παρουσιάζεται για τον ίδιο παλμό στο Σχήμα 2.1β. Παρατηρείται μέγιστη τιμή στα ~ 10 kHz. Χαρακτηριστικό του φάσματος είναι το μεγάλο εύρος στην περιοχή της μέγιστης τιμής. Παρατηρείται ότι για τις τιμές ~ 6 kHz και ~ 20 kHz, το πλάτος είναι μειωμένο μόνο κατά $\sim 10\%$ σε σχέση με αυτό του μεγίστου στα ~ 10 kHz. Το γεγονός ότι στο φάσμα των συχνοτήτων κατά Fourier δεν αναδεικνύεται η συνεισφορά από συγκεκριμένες τιμές συχνοτήτων, δικαιολογείται από την έλλειψη περιοδικότητας του σήματος. Κατα συνέπεια, η συνήθης μέθοδος ανίχνευσης του σήματος μέσω αποσυνέλιξης με χρήση μετασχηματισμού Fourier είναι ανεπαρκής, και εναλλακτικές μέθοδοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Μια τέτοια περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 αποσκοπώντας στη μείωση του όγκου δεδομένων. Επιπροσθέτως, όπως ήδη έχει περιγραφεί, η προέλευση των παλμών αυτών δεν είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας αλλά φυσικής διεργασίας. Επομένως οι τεχνικές που αναπτύσσονται στην συγκεκριμένη εργασία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των αντίστοιχων φαινομένων.

2.2.2 Διαδικασία Προσομοίωσης

Η προσομοίωση για τη δημιουργία ενός συνόλου διπολικών παλμών αποτελείται από δύο βήματα. Κατά το πρώτο βήμα προσομοιώνεται η εναπόθεση της ενέργειας εξαιτίας της αδρονικής αλληλεπίδρασης που λαμβάνει χώρα εντός του θαλασσινού νερού. Για αυτό χρησιμοποιείται το λογισμικό *CORSIKA-IW*, το οποίο είναι έκδοση του *CORSIKA* [3], ευ-

ρέως διαδεδομένου στην κοινότητα της Αστροσωματιδιακής Φυσικής για την προσομοίωση αλληλεπίδρασης των κοσμικών ακτίνων με την ύλη. Κατά το δεύτερο βήμα προσομοιώνεται το θερμοακουστικό φαινόμενο με βάση την εναπόθεση ενεργειας του πρώτου βήματος. Αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός του παλμού σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση του πλάτους εξαιτίας της διάδοσης στο θαλασσινό νερό [4]. Η χρονική διακριτική ικανότητα με την οποία προσομοιώνονται οι παλμοί είναι 1 μ s. Ο παλμός του σχήματος 2.1α έχει παραχθεί με την παραπάνω διαδικασία προσομοίωσης και αντιστοιχεί σε απόσταση 200 m από την περιοχή εναπόθεσης ενέργειας 10 EeV.

Κεφάλαιο 3

Μείωση του όγκου των ακουστικών δεδομένων

3.1 Κατασκευή συνόλων σήματος και υποβάθρου

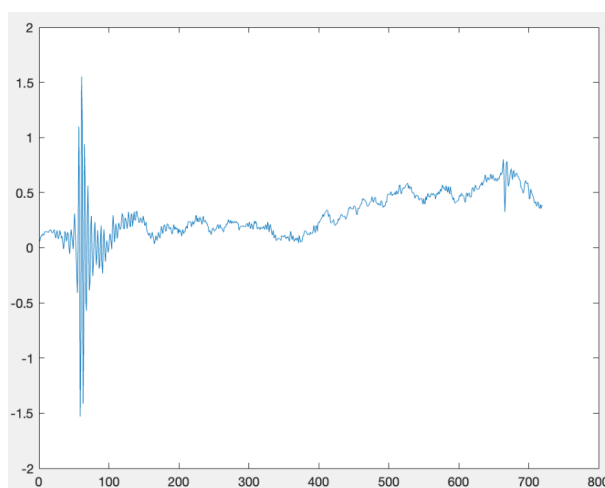
Για την ανάπτυξη των αλγορίθμων κατασκευάστηκαν δύο κλάσεις δεδομένων. Οι δύο αυτές κλάσεις αποτελούνται από chunks δεδομένων, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.2.1. Η πρώτη κλάση αφορά το υπόβαθρο, και αποτελείται από βαθμονομημένα chunks των ακουστικών καταγραφών που έχουν συλλεχθεί. Η δεύτερη κλάση αφορά το σήμα, και αποτελείται από βαθμονομημένα chunks στα οποία έχει πραγματοποιηθεί προσθήκη προσομοιωμένου διπολικού παλμού.

Καθώς η χρονική διακριτική ικανότητα της προσομοίωσης (1 μ s) διαφέρει από την περίοδο καταγραφής δεδομένων (7 μ s), πραγματοποιήθηκε κατάλληλο resampling στις χρονοσειρές των προσομοιωμένων παλμών για να μπορούν να προστεθούν στις χρονοσειρές των chunks υποβάθρου. Τα chunks που αποτελούν την κλάση υποβάθρου, όπως και αυτά στα οποία έγινε προσθήκη διπολικού παλμού επιλέχθηκαν εναλλάξ. Έτσι οι συνεισφορές του υποβάθρου κατανέμονται ομογενώς στις κλάσεις αυτές. Αυτή είναι μια σημαντική λεπτομέρεια, η οποία επιτρέπει στους αλγορίθμους εντοπισμού να μη μεροληπτούν υπέρ της επιλογής κάποιας κλάσης (unbiasedness), εξαιτίας διαφορετικής συνεισφοράς υποβάθρου στις κλάσεις αυτές.

3.2 Προεργασία δεδομένων

3.2.1 Εντοπισμός ηχητικών παλμών υποθαλάσσιας ζωής

Κατά τις διαδικασίες μελέτης και κατανόησης των δεδομένων υποβάθρου, παρατηρήθηκαν σήματα τα οποία οφείλονται σε υποθαλάσσια ζωή, όπως αυτό του σχήματος **3.1**. Τα σήματα αυτά (γνωστά και ως *dolphin clicks*) έχουν πολύ υψηλές συχνότητες και σύμφωνα



Σχήμα 3.1: Chunk με σήμα που οφείλεται σε θαλάσσια ζωή

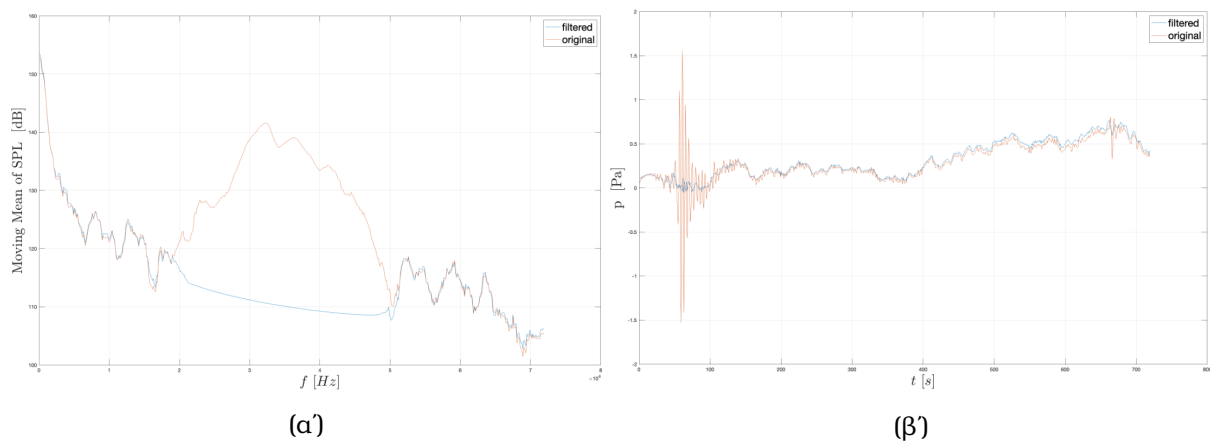
με την βιβλιογραφία προέρχονται από θηλαστικά [5]. Παρότι η αναγνώριση τέτοιου είδους σημάτων είναι ουσιαστική για σχετικές με την βιολογία μελέτες, ως προς την ανάπτυξη των παρόντων αλγορίθμων ταξινομούνται ως υπόβαθρο. Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη το υπόβαθρο να είναι κατανεμημένο ομογενώς και στις δύο κλάσεις, τα chunks που περιέχουν τέτοια σήματα αναγνωρίζονται και δεν συμπεριλαμβάνονται στην κατασκευή των συνόλων των δύο κλάσεων.

Για την αναγνώριση ηχητικών παλμών υποθαλάσσιας ζωής υψηλής συχνότητας, εφαρμόζεται ένα φίλτρο τύπου butterworth-bandstop. Κάθε chunk φιλτράρεται ώστε να αφαιρεθεί η συνεισφορά των συχνοτήτων στο εύρος (22 kHz, 48 kHz). Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται αυτή η εφαρμογή για το chunk του σχήματος 3.1. Στο σχήμα 3.2α έχει σχεδιαστεί η συνεισφορά των συχνοτήτων (Sound Pressure Level) για το συγκεκριμένο chunk, πριν (πορτοκαλί) και μετά (μπλε) από την εφαρμογή του φίλτρου butterworth/band-stop. Παρατηρείται ο περιορισμός των συχνοτήτων στο εύρος εφαρμογής του φίλτρου. Στο σχήμα 3.2β παρουσιάζεται η χρονοσειρά για το chunk πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου, με τον ίδιο χρωματικό κώδικα.

Παρατηρείται η επιτυχής αφαίρεση του προερχόμενου από υποθαλάσσια ζωή ηχητικού παλμού. Για την διαλογή των chunks που περιέχουν τέτοιου είδους παλμούς υπολογίζεται η διαφορά των δύο χρονοσειρών (μετά-πριν), και εφαρμόζεται κριτήριο που αφορά τη σχετική απόκλιση του μέγιστου πλάτους της από τη μέση τιμή.

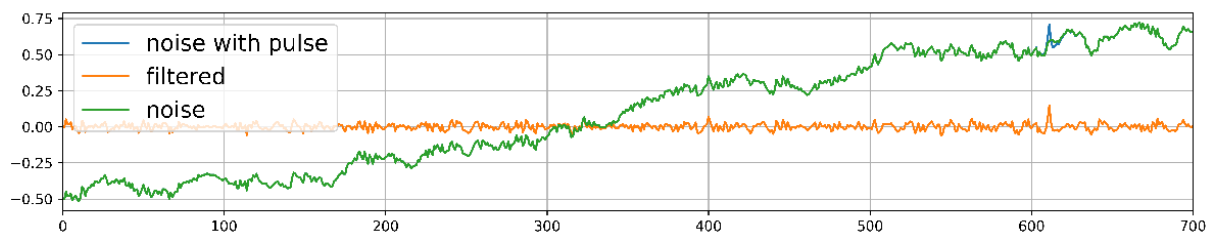
3.2.2 Αφαίρεση συνεισφοράς χαμηλών συχνοτήτων

Στο ακουστικό υποθαλάσσιο υπόβαθρο υπάρχει συνεισφορά από πηγές θορύβου χαμηλών συχνοτήτων (μηχανές καραβιών, γεωφυσική-σεισμική δραστηριότητα, βροχή κ.λ.π.). Οι χαμηλές συχνότητες είναι εκτός της περιοχής της ενδιαφέροντος και αφαιρούνται με



Σχήμα 3.2: Sound Pressure Level 3.2α και διαφορά χρονοσειράς πριν και μετά από την εφαρμογή του φίλτρου 3.2β).

την εφαρμογή ενός φίλτρου butterworth/high-pass. Με χρήση αυτού του υπερηχητικού φίλτρου αποκόπτεται η συνεισφορά των συχνοτήτων που βρίσκονται χαμηλότερα από την τιμή των 5 kHz.



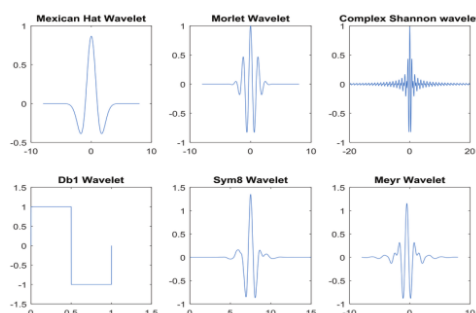
Σχήμα 3.3: Εφαρμογή του υπερηχητικού φίλτρου σε chunk στο οποίο έχει προστεθεί παλμός.

Η εφαρμογή της χρήσης αυτού του φίλτρου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3 για την χρονοσειρά ενός chunk το οποίο ανήκει στην κλάση του σήματος. Παρατηρείται η συνεισφορά του προσομοιωμένου διπολικού παλμού λίγο μετά την καταγραφή 600. Στο ίδιο διάγραμμα περιλαμβάνεται και η χρονοσειρά η οποία έχει υποστεί το φιλτράρισμα με το υπερηχητικό φίλτρο. Παρατηρείται πως το πλάτος στο σημείο που προστέθηκε ο παλμός παραμένει αμείωτο, ενώ ποιοτικά φαίνεται ο παλμός να διακρίνεται πιο καθαρά μέσα στο υπόβαθρο. Αυτή η ποιοτική παρατήρηση επιβεβαιώθηκε κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Συνεπώς επιλέχθηκε κατά την προεργασία των δεδομένων, όλα τα chunks των δύο κλάσεων να υποστούν επεξεργασία με το συγκεκριμένο υπερηχητικό φίλτρο.

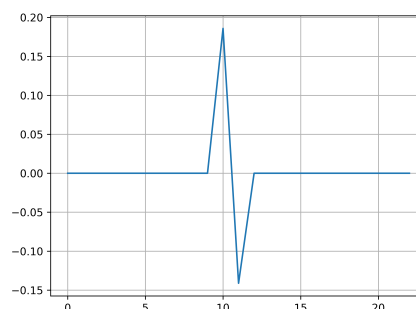
3.3 Χρήση μετασχηματισμού wavelet

Τα δεδομένα και των δύο κλάσεων, ύστερα από την προεργασία που υπόκεινται μέσω των δύο φίλτρων που περιγράφηκαν, βρίσκονται πριν το τελικό στάδιο στο οποίο ταξινομούνται ως σήμα ή υπόβαθρο.

Η αναγκαιότητα χρήσης προηγμένων μεθόδων συχνοτικής ανάλυσης ήταν ουσιαστικό κριτήριο για την επιλογή του συγκεκριμένου διπολικού παλμού, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.2.1. Το μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το βήμα για τον εντοπισμό του παλμού, είναι ο μετασχηματισμός wavelet [6]. Σε αντίθεση με τον μετασχηματισμό Fourier κατά τον οποίο ένα σήμα αναπτύσσεται ως γραμμικός συνδυασμός βάσης ημιτόνων και συνημιτόνων, κατά τον μετασχηματισμό wavelet, το σήμα αναπτύσσεται ως γραμμικός συνδυασμός συναρτήσεων όπως αυτές του σχήματος 3.4α. Συγκεκριμένα μια τέτοια συνάρτηση επιλέγεται ως η μητρική (mother wavelet), ενώ η βάση αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων όμοιων με τη μητρική, οι οποίες έχουν υποστεί επιμήκυνση ή συρρίκνωση στην χρονική κλίμακα. Ο εντοπισμός ενός σήματος με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου έχει το πλεονέκτημα του να είναι αποδοτικός στην αποσυνέλιξη σημάτων των οποίων η μορφή ταιριάζει με αυτή του wavelet. Συνεπώς σε αντίθεση με την εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier, η έλλειψη περιοδικότητας δεν είναι τροχοπέδη στη συγκεκριμένη τεχνική.



(α') Συνήθη wavelets



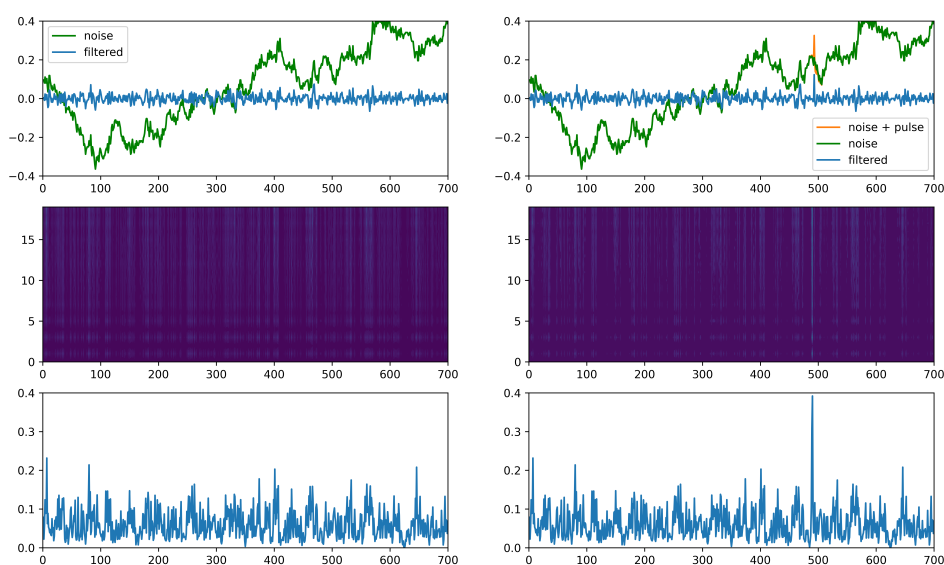
(β') ramp wavelet

Σχήμα 3.4: Συνήθη mother wavelets (3.4α'), καθώς και το επιλεχθέν "ramp" για την παρούσα ανάλυση (3.4β')

Υστερα από ενδελεχή μελέτη ως προς την απόδοση της ανάλυσης με χρήση διαφόρων μητρικών wavelets, αυτό που επιλέχθηκε παριστάνεται στο σχήμα (3.4β'), γνωστό και ως ramp. Αιτία φαίνεται να είναι η ασυμπτωτική κλίση της μορφής του παλμού καθώς τείνει στο μέγιστο (σχήμα 2.1α'), η οποία ταιριάζει με το πρώτο μισό μιας συρρικνωμένης μορφής του ramp.

Η μέθοδος με την οποία χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός wavelet παρουσιάζεται με τη βοήθεια του σχήματος 3.5. Η αριστερή στήλη αφορά ένα chunk, ενώ η δεξιά αφορά

το ίδιο chunk με την προσθήκη διπολικού παλμού (περίπου στο σημείο της καταγραφής 500). Στην πρώτη σειρά παριστάνονται οι χρονοσειρές πίεσης όπως καταγράφηκαν (πράσινο), μετά την εφαρμογή του υπερηφατικού φίλτρου (μπλέ), ενώ για τη δεξιά στήλη τονίζεται και η προσθήκη του διπολικού παλμού (πορτοκαλί). Στην μεσαία σειρά παρουσιάζονται οι πίνακες με τα πλάτη των συντελεστών για το μετασχηματισμό wavelet που περιγράφηκε. Ο κάθετος άξονας αντιστοιχεί στις 19 συναρτήσεις που προκύπτουν από το ramp wavelet, ενώ ο οριζόντιος άξονας συνεχίζει να αντιστοιχεί στον αριθμό καταγραφής μέσα στο chunk. Παρατηρούνται σχετικά μεγαλύτερα πλάτη των συντελεστών για τις καταγραφές πάνω στις οποίες προστέθηκε ο διπολικός παλμός.



Σχήμα 3.5: Εφαρμογή μετασχηματισμού wavelet στην ίδια χρονοσειρά με παλμό (δεξιά) και χωρίς παλμό (αριστερά).

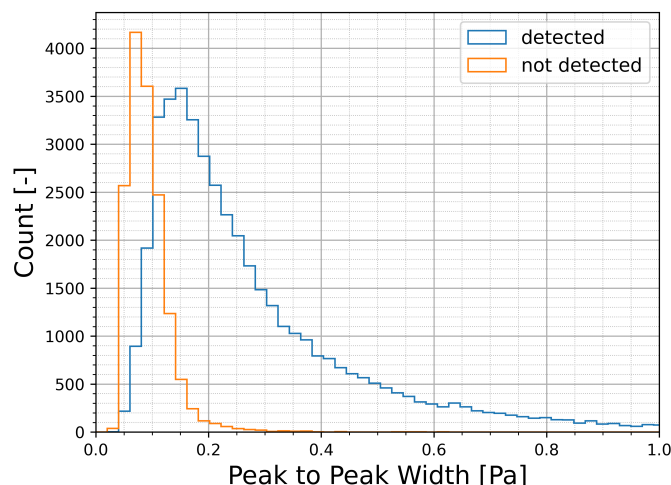
Για την ποσοτικοποίηση αυτής της ένδειξης διαχωρισμού που φαίνεται να προκύπτει, εργαστήκαμε ως εξής. Αρχικά, έγινε άθροιση των συντελεστών των 19 wavelets που αντιστοιχούν σε κάθε καταγραφή. Πρακτικά αυτό σημαίνει άθροιση κατά στήλη στα δύο μεσαία διαγράμματα του σχήματος 3.5, το αποτέλεσμα των οποίων παρουσιάζεται στα διαγράμματα της τρίτης και τελευταίας γραμμής. Σε αυτό το σημείο διακρίνονται ξεκάθαρα οι σημαντικά μεγαλύτερες τιμές που αντιστοιχούν στις καταγραφές στις οποίες προστέθηκε ο παλμός. Τέλος ορίζουμε μια ποσότητα που χαρακτηρίζει κάθε chunk, της οποίας η τιμή ισούται με το μέγιστο άθροισμα των συντελεστών του μετασχηματισμού wavelet, ως προς τη μέση τιμή των αθροισμάτων για τις υπόλοιπες καταγραφές του chunk (max/mean).

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την εφαρμογή του μετασχηματισμού wavelet, προκύπτουν

μεγάλες τιμές των συντελεστών στα άκρα των χρονοσειρών εξαιτίας της ασυνέχειας. Αυτές οι τιμές είναι πλασματικές και αυτό αντιμετωπίζεται απορρίπτοντας μικρό αριθμό καταγραφών στα άκρα των χρονοσειρών. Η ενδοχόμενη απώλεια σήματος εξαιτίας αυτού του τεχνάσματος θα αντιμετωπιστεί είτε με κάποια μικρή αλληλεπικάλυψη μεταξύ των χρονοσειρών, είτε με συσχετισμό των καταγραφών των υδροφώνων. Στην περίπτωση των δεδομένων που αναμένονται τα υδρόφωνα θα είναι συγχρονισμένα με κοινό ρολόι, κάτι που ενισχύει την αποδοτικότητα της δεύτερης περίπτωσης.

3.4 Μελέτη απόδοσης αλγορίθμου

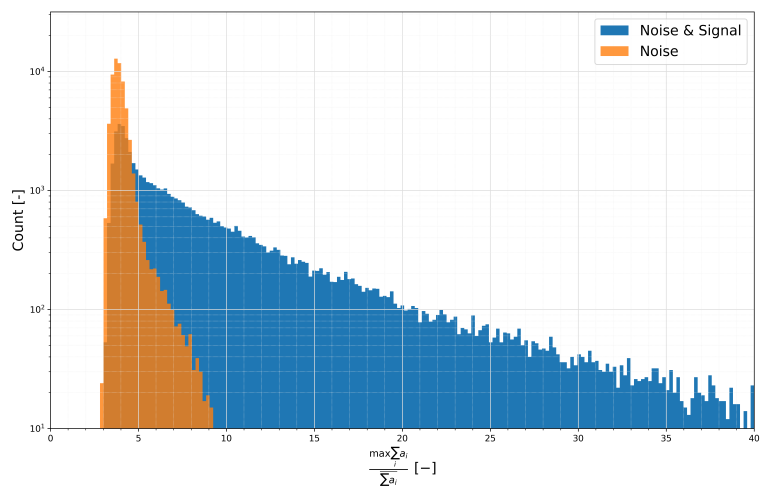
Η αξιολόγηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται με βάση τα κάτωθι διαγράμματα. Αρχικά ορίζουμε δύο υποκλάσεις που ανήκουν στην κλάση του σήματος, σε αυτή δηλαδή που έχουμε προσθέσει παλμό. Η μία υποκλάση αφορά τα chunks στα οποία η μέγιστη τιμή του αθροίσματος των συντελεστών για κάθε καταγραφή είναι στην περιοχή που προστέθηκε ο παλμός, ενώ η άλλη αφορά τα chunks στα οποία αυτό δεν συμβαίνει. Οι δύο υποκλάσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6 ως προς τις κατανομές του peak-to-peak πλάτους του παλμού ο οποίος προστέθηκε. Παρατηρείται η ικανότητα του μετασχηματισμού wavelet να παρέχει εντοπισμό του διπολικού παλμού. Διακρίνεται ποιοτικά η ικανότητα του εντόπισμού της συντριπτικής πλειονότητας των παλμών με peak-to-peak πλάτος μεγαλύτερο από 0.15 Pa, ενώ δεδομένων των τιμών πίεσης του υποδάθρου, είναι εντυπωσιακό πως εντοπίζονται παλμοί με peak-to-peak πλάτος ακόμη και μικρότερο από 0.1 Pa.



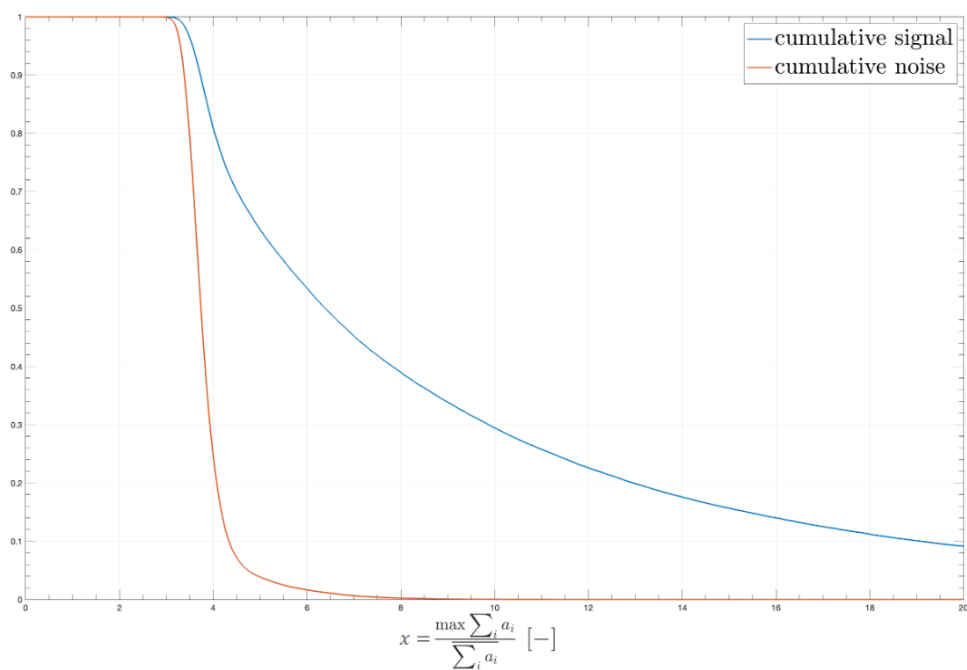
Σχήμα 3.6: Κατανομή πλάτους (peak-to-peak) παλμού, για chunks στα οποία ο προστιθέμενος παλμός εντοπίζεται από το max/mean (detected), και για chunks στα οποία δεν εντοπίζεται (not detected).

Για να ποσοτικοποιήσουμε την απόδοση του αλγορίθμου χρησιμοποιούμε την μεταβλητή max/mean, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι κατανομές των τιμών του max/mean για τις δύο κλάσεις, όπου φαίνεται η διαχωριστική ικανότητα που προσφέρει ο συνδυασμός του μετασχηματισμού wavelet και του τεχνάσματος για την κατασκευή της μεταβλητής αυτής.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το ποσοστό των chunks που γίνεται αποδεκτό για κάθε κλάση, ως συνάρτηση της ελάχιστης τιμής του max/mean για την οποία επιλέγουμε να κάνουμε αποδεκτό ένα chunk (πιό απλά, να εφαρμόσουμε το *cut*). Παρατηρείται η ικανότητα για μείωση του όγκου των δεδομενων, καθώς ενώ η καμπύλη που αντιστοιχεί στο υπόβαθρο έχει μια δραστικά απότομη μείωση για max/mean ~ 4 , η καμπύλη που αντιστοιχεί στο σήμα μειώνεται ομαλά. Ενδεικτικά, αν επιλέξουμε ως ελάχιστη τιμή max/mean ίσο με 4, γίνεται αποδεκτό περίπου το 20% των chunks υποβάθρου, κάνοντας παράλληλα αποδεκτό το 80% των chunks του σήματος.



Σχήμα 3.7: Κατανομές max/mean για σήμα και υπόβαθρο.



Σχήμα 3.8: Ποσοστό των chunks που γίνονται αποδεκτά συναρτήσει της ελάχιστης τιμής του max/mean που τίθεται ως κριτήριο.

Κεφάλαιο 4

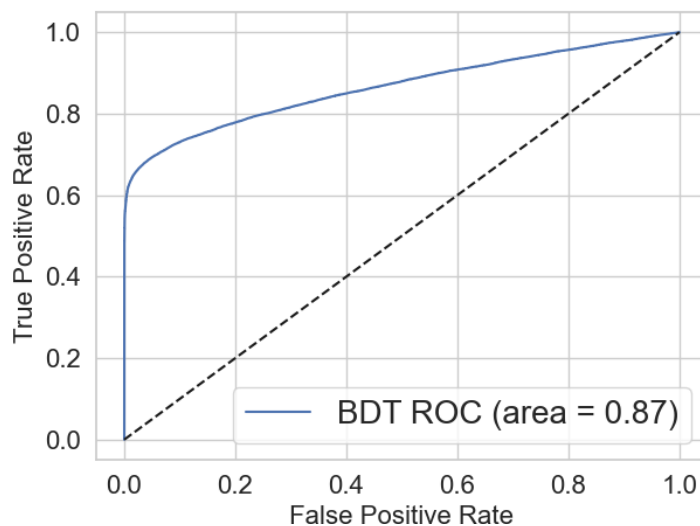
Κατηγοριοποίηση ηχητικών παλμών

Σκοπός του αλγορίθμου που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο είναι η ταξινόμηση ηχητικών σημάτων. Ο νετρινικός διπολικός παλμός θεωρείται ομοίως σήμα ενδιαφέροντος, με βάση τα ίδια κριτήρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.1. Για την ανάπτυξη αλγορίθμου με σκοπό την κατηγοριοποίηση των ηχητικών παλμών, γίνεται κατασκευή κλάσεων σήματος και υποβάθρου όπως και προεργασία των chunks όπως περιγράφηκαν στις παραγράφους 3.1 και 3.2.

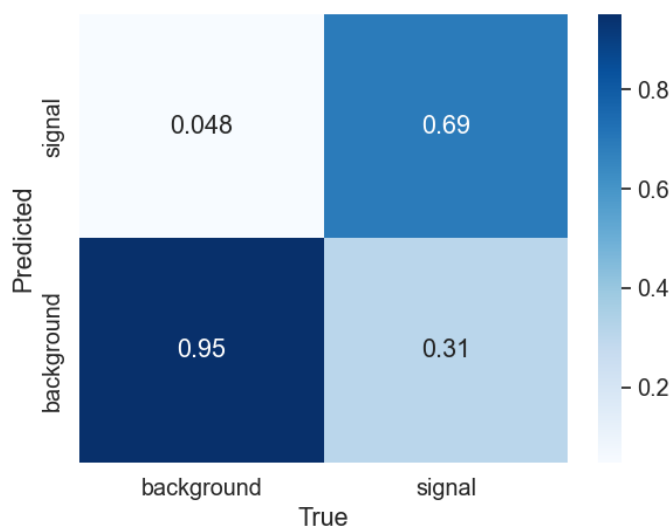
4.1 Ταξινόμηση με χρήση αλγορίθμου μηχανικής μάθησης

Για την ταξινόμηση των παλμών, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος Μηχανικής Μάθησης τύπου Boosted Decision Tree (BDT) (με χρήση της Gradient μεθόδου ενίσχυσης) μέσω του λογισμικού *scikit-learn* [7]. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 18, και εξήχθησαν ή κατασκευάστηκαν από τον πίνακα των συντελεστών συσχέτισης του μετασχηματισμού wavelet. Η κατασκευή των μεταβλητών αυτών πραγματοποιήθηκε μέσω πράξεων μεταξύ των γραμμών του πίνακα, μέσω λόγων μεταξύ των μέγιστων και των μέσων τιμών των γραμμών του πίνακα, καθώς επίσης και τιμές από διαφορετικής τάξης νόρμες του πίνακα.

Ο Φασικός χώρος των παραμέτρων του αλγορίθμου Μηχανικής Μάθησης ελέγχθηκε με σκοπό να γίνει επιλογή των βέλτιστων τιμών τους. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τον αριθμό των δέντρων του αλγορίθμου, την τιμή της παραμέτρου ενίσχυσης, καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος του δέντρου. Τα chunks τα οποία έχουν κατασκευαστεί στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και εκτίμηση απόδοσης του αλγορίθμου Μηχανικής Μάθησης. Το αποτέλεσμα περιγράφεται από την καμπύλη του σχήματος 4.1 και από τον confusion matrix στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη ROC για την εκτίμηση της απόδοσης του αλγορίθμου Μηχανικής Μάθησης.



Σχήμα 4.2: Confusion Matrix για τον αλγόριθμο Μηχανικής Μάθησης που αναπτύχθηκε.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο του πακέτου εργασίας υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι με σκοπό του την μείωση του όγκου των δεδομένων και την ταξινόμηση ηχητικών παλμών. Ως σήμα ενδιαφέροντος επιλέχθηκε ο νετρινικός διπολικός παλμός, καθώς η δυσκολία για τον εντοπισμό του συνιστά σημαντικό κίνητρο για να αναπτυχθούν προηγμένες τεχνικές συχνοτικής ανάλυσης και ταξινόμησης μέσω αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης. Σύμφωνα με τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων, οι εργασίες στο πλαίσιο του παρόντος πακέτου κρίνονται επιτυχείς.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://www.loggerhead.com/dsgst>
- [2] G.A. Askarian, Atom. Energ. 3 (1957) 152.
- [3] J. Bolmont. Corsika-iw: a modified version of corsika for cascade simulations in ice or water. 2008.
- [4] https://github.com/DimiStav/acoustic_nu_pulse
- [5] (2013) Frontiers in Physiology, 4 APR, art. no. Article 52.
- [6] Torrence, Christopher, and Gilbert P. Compo. "A practical guide to wavelet analysis." Bulletin of the American Meteorological society 79.1 (1998): 61-78.
- [7] Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa et al., JMLR 12, pp. 2825-2830, 2011.