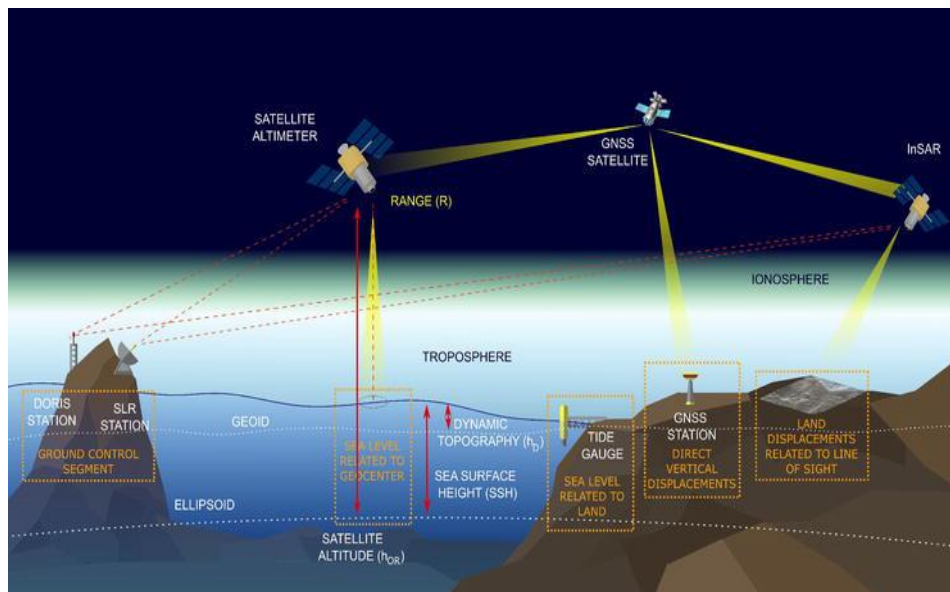




Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

“Δορυφορική Αλτιμετρία και Εφαρμογή σε Δεδομένα Θαλάσσιων και Παράκτιων Περιοχών”



Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Ανδριτσάνος (Καθηγητής Τμήματος Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής)

Γρηγόρης Μαντόπουλος

Αθήνα, 2024

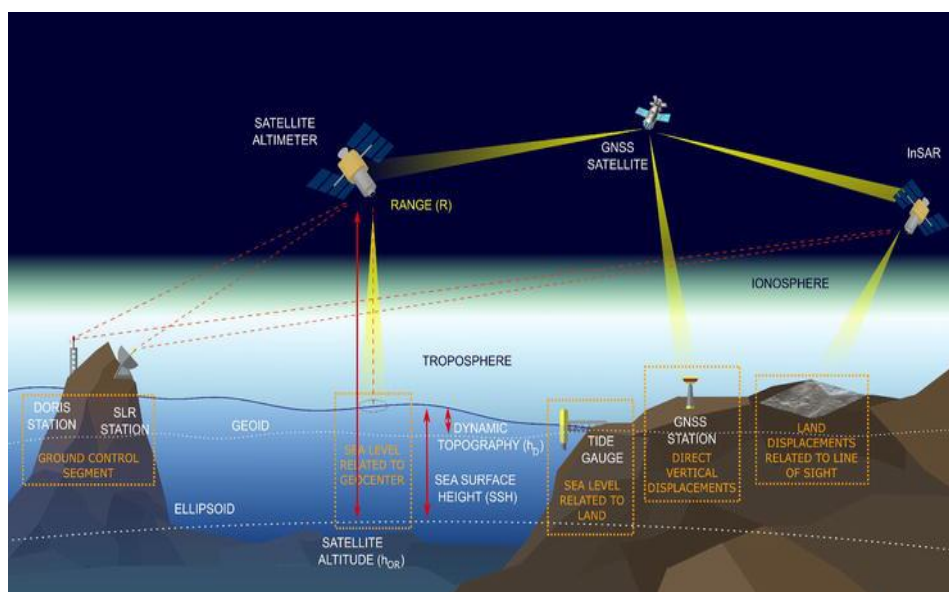
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

POSTGRADUATE PROGRAM: GEOSPATIAL TECHNOLOGIES



Master's Thesis

“Satellite Altimetry and Applications in Ocean and coastal Areas”



Supervising Professor: Dr. Vasilios Andritsanos (Department of Surveying and Geoinformatics Engineering University of West Attica)

Student: Gregory Mantopoulos

Athens, 2024

Η διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελής επιτροπή

Βασίλειος Ανδριτσάνος, Καθηγητής ΠΑΔΑ	Μιχαήλ Γιαννίου, Καθηγητής ΠΑΔΑ	Βασίλειος Παγούνης, Καθηγητής ΠΑΔΑ

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Μαντόπουλος Γρηγόρης),
Σεπτέμβριος 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **...Γρηγόρης Μαντόπουλος.....του...Ευαγγέλου.., με αριθμό μητρώου ...1707... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής.**

(Υπογραφή)



Δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές του τμήματος Τοπογραφίας που μου έδωσαν πολύτιμες γνώσεις και έναυσμα να εξερευνήσω τα επιμέρους αντικείμενα που αφορούν το κλάδο και τον επιβλέπων καθηγητή μου Βασίλειο Ανδριτσάνο για την επιμονή και τη καθοδήγηση που προσέφερε στην υλοποίηση της εργασίας μου.

Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Περίληψη.....	13
Abstract.....	13
Κατάλογος εικόνων.....	9
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στη δορυφορική αλτιμετρία.....	14
1.1 Κανόνες μετρήσεων ραδιομέτρων.....	15
1.2 Υπολογισμός αποστάσεων.....	18
1.2.1 Η ατμοσφαιρική διάθλαση.....	18
1.2.2 Ξηρή τροποσφαιρική διάθλαση.....	19
1.2.3 Η υγρή τροποσφαιρική διάθλαση.....	20
1.2.4 Η ιονοσφαιρική διάθλαση.....	21
1.3 Διορθώσεις της δυναμική θαλάσσια Επιφάνεια.....	21
1.4 Καθορισμός τροχιάς ακριβείας.....	22
1.4.1 Η διαδικασία του καθορισμού της τροχιάς.....	22
1.4.2 Βαρυτικές δυνάμεις.....	23
1.4.3 Τροχιακά Σφάλματα που σχετίζονται με τη γεωγραφική θέση.....	23
1.4.4 Σφάλματα του επίγειου συστήματος αναφοράς.....	24
1.4.5 Μη βαρυτικές δυνάμεις.....	24
1.5 Συστήματα εντοπισμού ακριβείας του δορυφόρου Topex Poseidon..	25
1.6 Διαδικασία εκτίμησης της τροχιάς.....	27
1.6.1 Δυναμικά μοντέλα.....	27
1.6.2 Μοντέλο μειωμένης δυναμικής.....	28
1.6.3 Ποιοτικός έλεγχος της απόδοσης.....	28
1.6.4 Γεωφυσικά φαινόμενα στην θαλάσσια δυναμική επιφάνεια.....	29
1.7 Συμπεράσματα πρώτου κεφαλαίου.....	30
Κεφάλαιο 2. Η ιστορία των αλτιμετρικών αποστολών.....	33
2.1 Δορυφορικές αποστολές από το 1978 εως σήμερα.....	33
2.2 Οι αποστολές Jason 3 και Sentinel 3.....	35
2.2.1 Δεδομένα επιπέδου 0 του δορυφόρου Sentinel 3.....	35
2.2.2 Δεδομένα επιπέδου 1 του δορυφόρου Sentinel 3.....	36
2.2.3 Δεδομένα επιπέδου 2 του δορυφόρου Sentinel 3.....	39

2.3 Η διαδικασία της βαθμονόμησης και της αξιολόγησης.....	40
2.4 Οι λειτουργικές φάσεις του δορυφόρου Jason3.....	40
2.5 Διαδικασία Cal/Val στον μόνιμο σταθμό της Γαύδου.....	41
2.5.1 Ο σταθμός βαθμονόμησης του αναμεταδότη CDN1.....	43
2.5.2 Τα αποτελέσματα βαθμονομήσεων και βαθμονόμηση διασταύρωσης μετρήσεων.....	45
2.6 Βαθμονόμηση ανάμεσα στους δορυφόρους Sentinel 3A και Sentinel3B.....	46
2.7 Η δομή ενός Quality Report για τον δορυφόρο Sentinel3B.....	47
2.8 Συμπεράσματα.....	48
Κεφάλαιο 3. Μέτρηση της θαλάσσιας στάθμης σε παράκτιες περιοχές.....	49
3.1 Εισαγωγή στη μέτρηση της θαλάσσιας στάθμης σε παράκτιες περιοχές.....	49
3.2 Καταγραφή της θαλάσσιας στάθμης στις παράκτιες περιοχές μέσω της δορυφορικής αλτιμετρίας.....	50
3.3 Τεχνικές βελτίωσης των δεδομένων της αλτιμετρίας στις παράκτιες περιοχές.....	52
3.4 Οι δορυφόροι Cryosat-2 και AltiKa και οι προοπτικές που παρουσιάζουν.....	53
3.5 Εξέλιξη των τεχνικών που εφαρμόζονται στη παράκτια αλτιμετρία....	55
3.6 Κυματομορφές από παράκτιες περιοχές.....	56
3.7 Ο αλγόριθμος X-TRACK.....	58
3.8 Εισαγωγή στη διαδικασία του επαναπροσδιορισμού των κυματομορφών.....	59
3.9 Ο Αλγόριθμος ALES.....	61
3.10 Ανάλυση της μορφής των κυματομορφών στις παράκτιες περιοχές..	62
3.11 Ο δορυφόρος Cryosat-2.....	64
3.12 Ανάπτυξη μοντέλου επαναπροσανατολισμού και εξίσωση Samosa..	64
3.13 Ανάλυση αλγορίθμων της αποστολής SWOT.....	65
3.14 Συμπερασματα κεφαλαίου.....	67

Κεφάλαιο 4. Παραδείγματα εφαρμογών δορυφορικής αλτιμετρίας στην ωκεανογραφία.....	68
4.1 Συνδυασμός αλτιμετρικών δεδομένων και αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης για τον εντοπισμό και την ανάλυση των δινών μεσαίας κλίμακας.....	68
4.2 Τα σετ δεδομένων.....	69
4.3 Ανάλυση του τοπικού ωκεάνιου μοντέλου για τη Δυτική Μεσόγειο....	71
4.4 Κινηματικές ιδιότητες των δινών.....	72
4.5 Χωρική κατανομή των δινών.....	73
4.6 Η κατεύθυνση της μετάδοσης των δινών.....	75
4.7 Ανάλυση των μετρήσεων του σημαντικού υψόμετρου κυματισμών SWh από αλτιμετρικά δεδομένα και συνδυασμός με μετρήσεις πεδίου από μετρητές ανάβασης των κυματισμών.....	77
4.8 Μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων.....	79
4.9 Ανάλυση αποτελεσμάτων της έρευνας.....	82
4.10 Συμπεράσματα έρευνας.....	85
Κεφάλαιο 5 Εφαρμογή δεδομένων αλτιμετρίας σε περιβάλλον Matlab.....	87
5.1 Τα δεδομένα.....	87
5.2 Η επεξεργασία των δεδομένων.....	88
5.3 Δειγματοληψία δεδομένων.....	98
5.4 Επιλογή Δεδομένων.....	101
5.5 Συμπεράσματα.....	104
Βιβλιογραφία.....	106
Ιστότοποι.....	109
Παράρτημα 1.....	130

Κατάλογος εικόνων και διαγραμμάτων

Εικόνα 1.1 Οι διαδικασίες μετρήσεων για την αποστολή SWOT. Πηγή: Ιστότοπος NASA.

Εικόνα 1.2 Τα συστήματα του δορυφόρου Torrex Poseidon.

Εικόνα 1.3 Η αύξηση της παγκόσμιας θαλάσσιας στάθμης από τους δορυφόρους Torrex/Poseidon και Jason. Πηγή: Πανεπιστήμιο του Colorado.

Εικόνα 1.4 Χαρακτηριστικά αλτιμετρικών δορυφόρων. Πηγή: Ανδριτσάνος Β. Διδακτορική διατριβή.

Εικόνα 1.5 Οι διορθώσεις και οι προσαρμογές που εφαρμόζονται στο μοντέλο υπολογισμού αλτιμετρικών δεδομένων. Πηγή: Chelton D.B : Satellite altimetry.

Εικόνα 2.1 Η αλυσίδα των αλγορίθμων LMR του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.

Εικόνα 2.2. Η αλυσίδα των αλγορίθμων PLMR του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.

Γράφημα 2.3 Η αλυσίδα των αλγορίθμων SAR_Ku του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.

Εικόνα 2.4 Τα τροχιακά επίπεδα των δορυφόρων Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Cryosat-2.

Εικόνα 2.5 Ο εξοπλισμός που προστέθηκε στο σταθμό βαθμονόμησης της Γαύδου χρονολογικά.

Εικόνα 2.6 Ο σταθμός βαθμονόμησης.

Εικόνα 2.7 Το δίκτυο σταθμών GNSS στην Κρήτη. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

Εικόνα 2.8 Η ταχύτητα και τα σφάλματα του δικτύου σταθμών στη Κρήτη. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

Γράφημα 2.9 Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του δορυφόρου Jason 3 για την απόκλιση του υψομέτρου της θαλάσσιας στάθμης. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

Γράφημα. 2.10 Το συνδυαστικό σφάλμα της απόστασης και του χρονομέτρου για τους δορυφόρους Sentinel 3A και Sentinel3B.

Εικόνα 3.1 Οι τοποθεσίες καταγραφής παλιρροιών και ο χρόνος της καταγραφής. Πηγή : Cipollini (2016).

Γράφημα 3.2 Το μέγεθος SLA (Sea Level Anomalies) για το πέρασμα του δορυφόρου Jason-1 από τη θάλασσα στη στεριά. Πηγή : Cipollini (2016).

Εικόνα 3.3 Αποστολές και προγράμματα που παράγουν αλτιμετρικά δεδομένα σε παράκτιες περιοχές. Πηγή : Cipollini (2016).

Γράφημα 3.4 Η εφαρμογή του αλγόριθμου ALES και η σύγκριση με τους κοινούς αλγόριθμους για το πέρασμα 044 του δορυφόρου Jason-2 πάνω από το νησί Έλμπα. Πηγή: Cipollini, 2016).

Γράφημα 3.5 Η τυπική απόκλιση της υπολογιζόμενης απόστασης σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για τις αποστολές Jason-2 και AltiKa. Πηγή: Cipollini 2016.

Γράφημα 3.6 Η απόδοση της Αλτιμετρίας SAR σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή. Πηγή Cipollini (2016).

Γράφημα 3.7 Το ποσοστό των παρατηρούμενων κυματομορφών σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή με βάση τη κατηγορία. Πηγή: Cipollini, 2018.

Γράφημα 3.8 Η παρεμβολή μιας ακτής στο αποτύπωμα του δορυφόρου Envisat και η φωτεινή ένδειξη στο κέντρο της κυματομορφής.

Γράφημα 3.9 Σύγκριση ανάμεσα στον αλγόριθμο ALES και SL_cci για τον δορυφόρο Envisat σε πέρασμα από παράκτια περιοχή στη Βαλτική. Πηγή: Cipollini 2018.

Γράφημα 3.10 Ιστόγραμμα σύγκρισης ανάμεσα στον αλγόριθμο ALES και SL_cci για τον δορυφόρο Envisat σε πέρασμα από παράκτια περιοχή στη Βαλτική. Πηγή: Cipollini 2018.

Εικόνα 3.11 Χάρτης εφαρμογής των δεδομένων X-Track. Πηγή: Cipollini 2018.

Εικόνα 3.12 Η περίπτωση της μετάβασης από θάλασσα σε ξηρά και η επίδραση της ξηράς στη κυματομορφή. Πηγή: C.Gommenginger 2011.

Εικόνα 3.13 Κατηγορίες σχημάτων των κυματομορφών για τον δορυφόρο Jason 2 με χρήση νευρωνικών δικτύων. Πηγή: C.Gommenginger 2011.

Εικόνα 3.14 Οι κυματομορφές σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή για το δορυφόρο Jason-2. Πηγή: C.Gommenginger 2011.

Εικόνα. 4.1 Η βαθυμετρία και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της θαλάσσιας περιοχής της Δυτικής Μεσογείου. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.2 Τα χαρακτηριστικά του συστήματος προσομοίωσης. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.3 Στιγμιότυπο της επιφανειακής θαλάσσιας θερμοκρασίας και των θαλάσσιων ρευμάτων της προσομοίωσης. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.4 Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με άλλο σετ δεδομένων. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.5 Το αποτέλεσμα των τριών μεθόδων για το μοντέλο προσομοίωσης της Δυτικής Μεσογείου. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.6 Κατανομή των δινών που εντοπίστηκαν σε σχέση με την ακτίνα τους από τα αλτιμετρικά δεδομένα αριστερά και από το μοντέλο προσομοίωσης δεξιά. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016

Εικόνα 4.7 Χωρική κατανομή του ποσοστού των δινών με ακτίνα μεγαλύτερη των 35 χιλιομέτρων που εντοπίστηκαν με τις μεθόδους του μοντέλου προσομοίωσης και με βάση τα αλτιμετρικά δεδομένα. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα 4.8 Το πλήθος των δινών που εντοπίστηκαν σε κάθε κελί για το μοντέλο προσομοίωσης και για τα αλτιμετρικά δεδομένα. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Εικόνα. 4.9 Η κατεύθυνση της μετάδοσης των δινών που εντοπίστηκαν. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016

Εικόνα. 4.10 Ο αριθμός των εντοπισμένων δινών ανά μήνα για το μοντέλο προσομοίωσης και για τα αλτιμετρικά δεδομένα

Εικόνα 4.11 Διαγράμματα για τους δείκτες ανωμαλιών της πυκνότητας, της ταχύτητας, και της παραμέτρου Okubo-Weiss

Εικόνα. 4.12 Η περιοχή μελέτης και οι θέσεις των μετρητών κυματισμών σε συνδυασμό με τα αποτυπώματα της τροχιάς του δορυφόρου SARAL/AltiKa. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.13 Η θέση των μετρητών κυματισμών, το βάθος του πυθμένα στο σημείο και η απόσταση από την ακτή. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.14 Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης της παραμέτρου SWh για σειρά δεδομένων αλτιμετρίας και μετρητών WRB με τη χρονική καθυστέρηση για τη τροχιά 152. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.15 Τα αθροιστικά ιστογράμματα για τις τιμές της παραμέτρου SWh για τα δεδομένα αλτιμετρίας και τους μετρητές WRB. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.16 Τα διαγράμματα διασποράς για τα δεδομένα με βάση τα δύο κριτήρια. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.17 Τα διαγράμματα διασποράς του ζεύγους σύγκρισης για τη Δυτική και την Ανατολική ακτή. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.18 Οι στατιστικές παράμετροι της σύγκρισης. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015. Εικόνα 4.19 Τα διαγράμματα διασποράς για τον κάθε μετρητή ξεχωριστά. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.20 Η σύγκριση του ζεύγους δεδομένων που πληρούν τις συνθήκες για την απόσταση και τη χρονική διαφορά. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015

Εικόνα 4.21 Η εφαρμογή των βαρών Cressman για τη μείωση του σφάλματος RMSE στα δεδομένα

Εικόνα 5.1 Οι ιδιότητες του αρχείου 1

Εικόνα 5.2 Οι μεταβλητές του χρόνου και του γεωγραφικού πλάτους για το πρώτο από τα 4 αρχεία

Εικόνα 5.3 Οι μεταβλητές για το γεωγραφικό μήκος και οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών

Εικόνα 5.4 Οι πληροφορίες για την μεταβλητή του προσαρμοσμένου σημαντικότερου υψόμετρου κυματισμών

Εικόνα 5.5 Οι μεταβλητές sw_h_bias και sw_h_uncertainty για το πρώτο αρχείο

Εικόνα 5.6 Οι τιμές του γεωγραφικού πλάτους σε συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο (ENVISAT)

Εικόνα 5.7 Οι τιμές του γεωγραφικού μήκους για το πρώτο αρχείο (ENVISAT) σε συνάρτηση με το χρόνο από το αρχείο NETCDF

Εικόνα 5.8 Οι τιμές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο. (ENVISAT)

Εικόνα 5.9 Το σφάλμα των παρατηρήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο. (ENVISAT)

Εικόνα 5.10 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων σε μέτρα για το πρώτο αρχείο ENVISAT

Εικόνα 5.11 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για το τρίτο αρχείο (ERS-2)

Εικόνα 5.12 Το σφάλμα των παρατηρήσεων για το τρίτο Αρχείο (ERS-2)

Εικόνα 5.13 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για το τρίτο Αρχείο (ERS-2)

Εικόνα 5.14 Οι πρώτες 13 τιμές για τις ημερομηνίες και ώρες του πρώτου αρχείου καταγραφής

Εικόνα 5.15 Οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών σε αντιπαράθεση με το χρόνο (λεπτά) από την έναρξη της καταγραφής για το πρώτο αρχείο (ENVISAT)

Εικόνα 5.16 Οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών σε αντιπαράθεση με το χρόνο (λεπτά) από την έναρξη της καταγραφής για το τρίτο αρχείο ERS-2.

Εικόνα 5.17 Οι καταγραφές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών για την αποστολή Envisat σε λεπτά από την αρχή καταγραφής.

Εικόνα 5.18 Οι καταγραφές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών για την αποστολή ERS-2 σε λεπτά από την αρχή της καταγραφής.

Εικόνα 5.19 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για τα δύο αρχεία της αποστολής ENVISAT με μέγεθος δείγματος 1000.

Εικόνα 5.20 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για την αποστολή ERS-2 με μέγεθος δείγματος 1000.

Εικόνα 5.21 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για την αποστολή ENVISAT με μέγεθος δείγματος 1000.

Εικόνα 5.22 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για την αποστολή ERS-2 με μέγεθος δείγματος 1000.

Εικόνα 5.23 Τα σημαντικότερα υψόμετρα κυματισμών για τις αποστολές ERS2(πορτοκαλί) και ENVISAT (μπλε χρώμα) στο νέο δείγμα.

Εικόνα 5.24 Τα αντίστοιχα σφάλματα της καταγραφής του παραπάνω δείγματος. Με πορτοκαλί χρώμο είναι η αποστολή ERS-2, ενώ με μπλε η αποστολή ENVISAT.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη των στοιχείων που απαρτίζουν την επιστήμη της δορυφορικής αλτιμετρίας. Με μια πρώτη ματιά γίνεται σύντομα αντιληπτό πως αρκετοί τομείς απαρτίζονται από τεχνικές και θεωρητικά τμήματα από διαφορετικούς κλάδους επιστημών και τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν είναι διεπιστημονικά και σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται θεωρητικά μέρη από έρευνα που έχει προηγηθεί πολλά έτη πριν την σύσταση των επιμέρους αποστολών. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνει αντιληπτό ποιά είναι τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν, είτε αντιμετωπίζονται μέχρι και σήμερα και να γίνει διεξοδική ανάλυση αυτών στο πλαίσιο που είναι εφικτό. Η εξέταση θα γίνει μέσω ερευνών που αφορούν γενικά το κλάδο της αλτιμετρίας, αλλά και συγκεκριμένα την αποστολή Topex/Poseidon, η οποία αποτελεί ορόσημο για τον κλάδο, καθώς πρόσφερε καινοτόμες λύσεις σε αρκετά προβλήματα που απασχολούσαν το κλάδο και συνείσφερε στη βελτίωση πολλών τεχνικών και παρείχε δεδομένα, τα οποία ήταν πολύτιμα για την πληθώρα νέων δορυφορικών αποστολών.

Abstract

The Master's Thesis aims to study the components that piece together the Satellite Altimetry as whole. With a first look we can understand that Radar Altimetry is the product of collaboration between many sciences and makes use of theory that precedes the missions by decades and more. The thesis aims to understand the problems and the troubleshooting techniques that were applied and to try and analyse the key components that brought us to the successful results of the present day. The study will focus on satellite altimetry researches and will make use of data and practices from Topex Poseidon mission, which along with other missions played a crucial role in the development and application of today's radar altimetry missions. The focus will be on both the data and the development techniques or practices that were a valuable contribution and assistance for present day missions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B τα ραντάρ αλτίμετρα εξυπηρετούν το σκοπό των μετρήσεων για στοιχεία που αφορούν τη θαλάσσια περιοχή, όπως υψόμετρα σε συσχέτιση με το γεωειδές, γεωμετρικές κυμάτων, παγόβουνων και στοιχεία που αφορούν τη θαλάσσια κυκλοφορία και τις παλίρροιες. Όπως και με τα αλτίμετρα παλμών φωτός το σήμα μεταδίδεται σε μικρούς παλμούς, όμως λόγω των μεγαλύτερων μηκών κύματος μπορεί να διαπεράσει τα σύννεφα. Αντίστοιχα με τον υπολογισμό του χρόνου που το σήμα ταξιδεύει υπολογίζεται η απόσταση από ένα στόχο. Η καλύτερη λειτουργία επιτυγχάνεται στις λείες επιφάνειες, όμως η παραμόρφωση που επιδέχεται το σήμα αποκαλύπτει πληροφορίες για τη τραχύτητα της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει. Στη περίπτωση των μετρήσεων σε χερσαία επιφάνεια είναι αναγκαία μια στενότερη δέσμη σήματος, η οποία θα έχει μικρότερο αποτύπωμα και θα μπορεί να διακρίνει καλύτερα τις έντονες εναλλαγές των κλίσεων. Σημαντικός είναι επιπλέον ο σχεδιασμός της τροχιακής θέσης του αισθητήρα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η ακριβής τοποθέτηση του γεωειδούς και να υπολογιστούν οι αποκλίσεις των επιφανειών από αυτό. Θα πρέπει επιπλέον το σήμα να διορθωθεί για την τροποποίηση που δέχεται από την ατμόσφαιρα. Η πρώτη δορυφορική αλτιμετρική αποστολή εκτοξεύθηκε το 1973 με την ονομασία Skylab και η επόμενη ήταν η GEOS-3, η οποία μέτρησε υψομετρικές διαφορές μεγαλύτερες των 60cm. Ακολούθησε ο δορυφόρος Seasat, ο οποίος δυσλειτούργησε μετά από 99 ημέρες, όμως στο ενδιάμεσο εκτέλεσε μετρήσεις με ακρίβεια των 10cm. Σαν αποτέλεσμα έδωσε τον χάρτη μορφολογίας του πυθμένα των ωκεανών. Στις μετρήσεις του αλτιμέτρου εφαρμόστηκε ψηφιακά φίλτρο, το οποίο αφαιρεί την επιρροή των ηλιακών και σεληνιακών παλιρροιών και πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετη διόρθωση για βαθυμετρικούς παράγοντες. Στο παραγόμενο αποτέλεσμα διακρίνονται τα ρήγματα, τα θαλάσσια βουνά οι τάφροι και άλλα χαρακτηριστικά του πυθμένα των ωκεανών.

Μετά τη συλλογή των πληροφοριών από ένα αλτιμετρικό σύστημα, υφίσταται μια διαδικασία επεξεργασίας. Η επεξεργασία ξεκινάει με τα Αρχεία Γεωφυσικών Δεδομένων (Geophysical Data Records – GDR), τα οποία περιλαμβάνουν τα απαραίτητα στοιχεία για να διορθώσουν τις μετρήσεις του δορυφόρου για ατμοσφαιρικά στοιχεία και να αφαιρεθούν όλες οι επεξεργασίες και τα δεδομένα που δεν είναι χρήσιμα. Συγκεκριμένα οι παρακάτω γεωφυσικές διορθώσεις πραγματοποιούνται στα αλτιμετρικά δεδομένα:

- Διορθώσεις για την ξηρή τροπόσφαιρα
- Διορθώσεις για την υγρή τροπόσφαιρα
- Διόρθωση για το ιονοσφαιρικό σφάλμα του σήματος
- Διόρθωση για το ηλεκτρομαγνητικό σφάλμα
- Διόρθωση για την αντίστροφη βαρομετρική διόρθωση

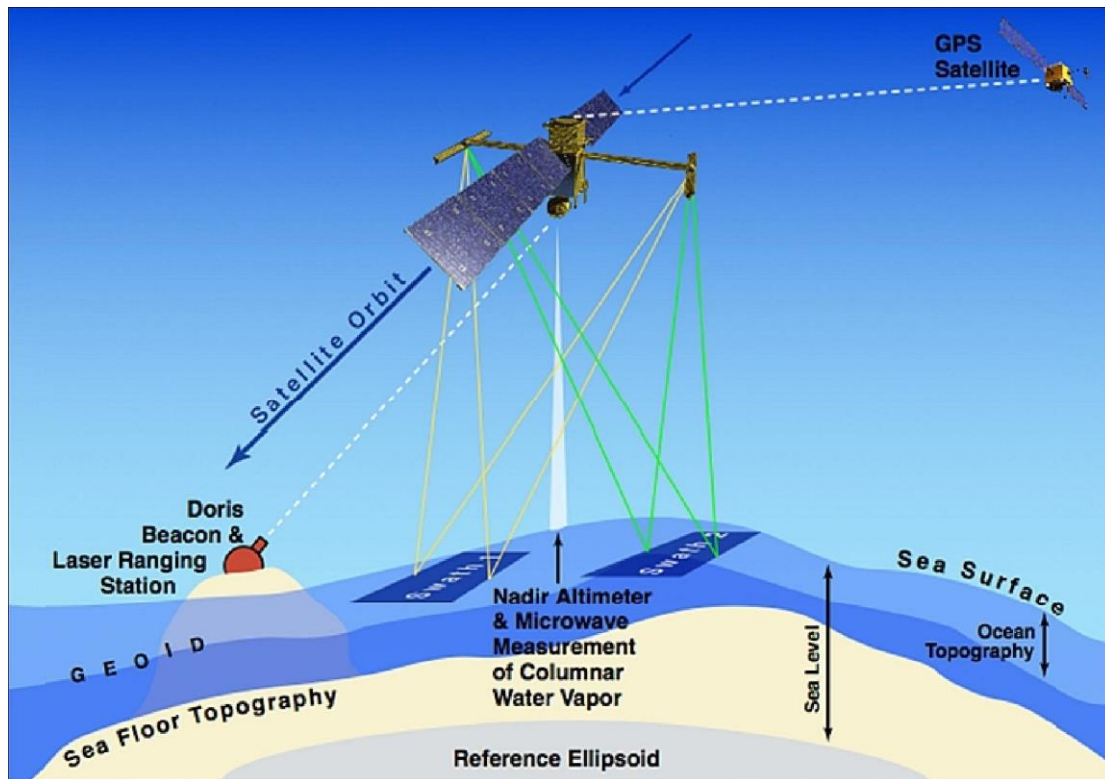
Μέσω των αρχείων γεωφυσικών δεδομένων προκύπτουν και δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και για φαινόμενα κυμάτων που είναι επικίνδυνα για τη ναυσιπλοΐα. Εφόσον διαπιστωθεί η ακρίβεια των δεδομένων και πως οι παραπάνω διορθώσεις έχουν εκτελεστεί σωστά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ο υπολογισμός της στάθμης της θάλασσας προκύπτει από τη σχετική της θέση σε αναφορά προς ένα επιλεγμένο ελλειψοειδές. Η τιμή h που υπολογίζει ο αλτιμετρικός δορυφόρος αφορά τη δυναμική θαλάσσια στάθμη.

1.1 ΚΑΝΟΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΩΝ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B οι βέλτιστες τιμές για τη δορυφορική αλτιμετρία με βάση τις φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας και της θαλάσσιας επιφάνειας είναι στις συχνότητες από 2 έως 18 GHz. Συγκεκριμένα η μπάντα S από 1.55-4.2, η μπάντα C από 4.2-5.75, η μπάντα X από 5.75-10.9 και η μπάντα KU από 10.9-22GHz. Η ανακλαστικότητα στην επιφάνεια της θάλασσας είναι αρκετά υψηλή σε αυτές τις συχνότητες πράγμα το οποίο επιτρέπει τη διάκριση ανάμεσα στο μετρητικό σήμα και τη φυσική θαλάσσια εκπομπή ακτινοβολίας. Στις χαμηλότερες συχνότητες συναντάται το φαινόμενο περιστροφής Faraday, η παρεμβολή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ιονόσφαιρα και παρεμβολές από ανθρώπινες δραστηριότητες που αφορούν την τηλεπικοινωνία, τη πλοήγηση και τις επείγουσες εφαρμογές ραντάρ για πολιτικούς και στρατιωτικούς σκοπούς.

Καθοριστικό ρόλο παίζει η ισχύς του σήματος, καθώς το σήμα διαπερνά τη τροπόσφαιρα, προσκρούει στη θάλασσα και ένα μέρος του απορροφάται, ενώ ένα μέρος του διασκορπάζεται και μόνο τμήμα αυτού επιστρέφει στον δορυφόρο. Λόγω της καμπυλότητας της θαλάσσιας επιφάνειας και της εφαρμογής τοπικών προσαρμογών του γεωειδούς γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στη γωνία στόχευσης και τη γωνία πρόσπτωσης, συγκεκριμένα γωνία σκόπευσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από το κέντρο μάζας του δορυφόρου και τη κορυφή της κεραίας μέχρι το σημείο της θάλασσας του βρίσκεται κατακόρυφα κάτω από τον δορυφόρο δηλαδή το λεγόμενο ναδίρ, ενώ η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από το σημείο εκκίνησης της δέσμης έως το σημείο που αυτό προσπίπτει στη θάλασσα. Επιπρόσθετοι παράγοντες είναι το μήκος κύματος λ , η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος P_i , η ενίσχυση του σήματος που εκπέμπεται και λαμβάνεται G ενώ η μεταβολή της ισχύος εκφράζεται από τον τύπο $D_{pi} = t^2 \times (G^2 \times \lambda^2 \times P_t) / (4\pi^3 \times R^4) \times \sigma$ όπου ο συντελεστής σ αφορά μονάδες επιφάνειας ενώ ο δείκτης $t(R, \theta)$ αφορά την

ατμοσφαιρική διαπερατότητα. Τέλος οι δείκτες δP και σ έχουν νόημα μόνο εάν αναφέρονται ως μέση τιμή και αφορούν όλη τη περιοχή του ίχνους δΑ.



Εικόνα 1.1 Οι διαδικασίες μετρήσεων για την αποστολή SWOT. Πηγή: Ιστότοπος NASA.

Επιπλέον τύποι αφορούν την τελική ισχύ του επιστρεφόμενου σήματος

$$P_r = t_\lambda^2 \frac{\lambda^2 P_t}{(4\pi)^3 R^4} \int_{A_f} G^2 \sigma_0 dA. \quad (1.1)$$

Η παράμετρος A_f αφορά τη περιοχή που διαφωτίζεται, η σ_0 μεταβλητή αφορά τις ιδιότητες της επιφάνειας, ενώ R και t_λ θεωρούνται σταθερές λόγω μικρού αποτυπώματος. Η τιμή G είναι μεταβλητή που αφορά τη λήψη κεραίας. Τέλος οι τιμές G, λ, P_t είναι γνωστές παράμετροι του συστήματος και R, t_λ είναι φυσικές παράμετροι του μέσου ανάμεσα στο στόχο και τον δορυφόρο.

$$\sigma_0 = \frac{(4\pi)^3 R^4}{t_\lambda^2 G_0^2 \lambda^2 A_{\text{eff}} P_t} P_r \quad (1.2)$$

Στη παραπάνω εξίσωση το G_0^2 αφορά την απόδοση της κεραίας διάνοιξης και η τιμή A_{eff} αφορά την ενεργή περιοχή αποτυπώματος.

Το μέγεθος σ_0 είναι η τελική τιμή για την οποία γίνεται διόρθωση και προσέγγιση της τιμής της μέσω αεροσκάφους με στόχο τον υπολογισμό της και θεωρείται πως με τη σωστή εφαρμογή ατμοσφαιρικών διορθώσεων είναι η ίδια για τα αεροσκάφη και τον

δορυφόρο με την παραδοχή ότι τα στοιχεία της διασκόρπισης του σήματος στο θαλάσσιο ίχνος είναι ίδιο για τα δύο μέσα.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να εξεταστεί είναι το θέμα της οπισθοσκέδασης του σήματος δηλαδή να εξεταστεί η ανακλαστικότητα της θαλάσσιας επιφάνειας. Με βάση την φυσική οπτική και τη γεωμετρική οπτική προκύπτει πως έχουμε πολύ καλή επαναφορά του σήματος που επιστρέφει όταν χρησιμοποιούνται πολύ μικρές γωνίες πρόσπτωσης.

$$\sigma_0(\theta \approx 0) = \pi \rho^2(0^\circ) \sec^4 \theta p(\zeta_x, \zeta_y) \Big|_{\zeta_x = \zeta_y = 0}, \quad (1.3)$$

Όπου το ζ αφορά τη SSH(Sea surface Height) σε σχέση με τη Μέση θαλάσσια στάθμη. Το $\rho(0^\circ)$ αφορά την ανακλαστικότητα Fresnel και το $p(S_x, S_y)$ αφορά την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας-πυκνότητας μεγάλων θαλάσσιων κυματισμών.

$$\sigma_0(\theta \approx 0) = \frac{\rho^2(0^\circ)}{2s^2} \sec^4 \theta \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{2s^2}\right), \quad (1.4)$$

Στη παραπάνω εξίσωση η μεταβλητή S^2 αφορά τη μέση τιμή του θαλάσσιου όγκου στο τετράγωνο και θ είναι η γωνία πρόσπτωσης.

Είναι σαφές πως η τραχύτητα της θαλάσσιας επιφάνειας αλλάζει με βάση την ταχύτητα του ανέμου και τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται. Συγκεκριμένα η ταχύτητα του ανέμου έχει άμεση σύνδεση με τις φασματικές ιδιότητες της θαλάσσιας επιφάνειας.

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να διερευνηθεί αφορά την εξασθένηση του σήματος από την ατμόσφαιρα. Παρατηρείται πως με την αύξηση της συχνότητας του εκπεμπόμενου σήματος αυξάνεται και το ποσοστό του σφάλματος, το οποίο εισέρχεται στη μέτρηση του σήματος, συνεπώς αυτό παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή της μπάντας και τις τελικής τιμής του σήματος που εκπέμπει ο δορυφόρος. Τέλος γίνεται μια εκτίμηση της συνολικής ποσοστιαίας μεταβολής του σήματος καθώς διαπερνάει την ατμόσφαιρα και διαχωρίζεται στη διόρθωση για καθαρή ατμόσφαιρα, για συννεφιασμένη και για βροχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διόρθωση για καθαρή ατμόσφαιρα η οποία αν δεν ληφθεί υπόψιν, μπορεί να εισάγει κρίσιμο σφάλμα στον υπολογισμό της απόστασης αλλά και της ταχύτητας του ανέμου της τάξεως του 20%, ενώ σημαντική επίδραση έχουν το οξυγόνο και η υγρασία. Για συννεφιασμένη ατμόσφαιρα το σφάλμα μπορεί να φτάσει το 40% και ανάλογα με τη πυκνότητα των νεφών και την ύπαρξη σταγονιδίων νερού είναι πιθανή

η αφαίρεση των μετρήσεων από τις γεωφυσικές επεξεργασίες δεδομένων. Τέλος για τις μετρήσεις σε βροχή, αναφορικά υπάρχουν μελέτες οι οποίες θέλουν να προσδιορίσουν το προφίλ της ατμόσφαιρας σε διάστημα βροχής με σκοπό να εξάγουν τις μετρήσεις αυτές και να τις αφαιρέσουν από τα δείγματα μετρήσεων λόγω μεγάλης αβεβαιότητας που προέρχεται από τα φαινόμενα της απορρόφησης και της διασκόρπισης του σήματος καθώς διαπερνά τα σταγονίδια του νερού.

1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ

Ο στόχος της αλτιμετρίας [1] είναι η μέτρηση της απόστασης του αλτιμέτρου από την θαλάσσια επιφάνεια. Εκπέμποντας έναν παλμό μικροκυμάτων με γνωστή ισχύ προς την επιφάνεια της θάλασσας, ο οποίος αλληλοεπιδρά με την θαλάσσια επιφάνεια και μέρος του αντανακλάται πίσω στον δορυφόρο. Στη συνέχεια καταμετράται ο χρόνος που ταξιδεύει το σήμα από τον δορυφόρο προς τη θάλασσα και πίσω στον δορυφόρο και με βάση τη σχέση

$R = (ct/2) - \Sigma \Delta R$ όπου ΔR είναι όλες οι διορθώσεις που αφορούν την ατμόσφαιρα και τα σφάλματα που αφορούν τον υπολογισμό της μέσης θαλάσσιας επιφάνειας.

Το μέγεθος του ίχνους του σήματος στη θάλασσα υπολογίζεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και αντίστροφα με το μέγεθος των διαστάσεων της κεραίας ενός δορυφόρου. Ένα ίχνος πλάτους 5Km απαιτεί κεραία με διάμετρο περίπου 7 μέτρων για τη συχνότητα των 13.6GHz πράγμα, το οποίο καθιστά μη πρακτική την εφαρμογή ενός συστήματος με αυτά τα χαρακτηριστικά. Σε προηγούμενη ενότητα περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της απόστασης και τα είδη των σφαλμάτων που εισέρχονται στη μέτρηση από την παρουσία υδρατμών, σωματιδίων από αέρια και των ελεύθερων ηλεκτρονίων, καθώς και από την θαλάσσια ταραχή στην επιφάνεια. Συνεπώς τα προβλήματα αυτά πρέπει να επιλυθούν, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της ακρίβειας του 1 εκατοστού στη μέτρηση της απόστασης.

1.2.1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, η επίδραση της ατμοσφαιρικής διάθλασης στη μέτρηση του αλτιμετρικού δορυφόρου εκφράζεται ως διόρθωση της μετρούμενης απόστασης δηλαδή ως το μέγεθος που πρέπει να αφαιρεθεί από τη μετρούμενη απόσταση για την διπλή διαδρομή του παλμού από τον δορυφόρο στο έδαφος ή τη θάλασσα και την επιστροφή του στο δορυφόρο. Αν δεν ληφθεί

υπόψη η διόρθωση για την ατμοσφαιρική διάθλαση λαμβάνουμε ως μετρούμενη απόσταση ένα μέγεθος το οποίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από την πραγματική απόσταση.

$$\Delta R = \frac{10^{-6}}{2} \int_0^{2R} N(z) dz = 10^{-6} \int_0^R N(z) dz \quad (1.5)$$

Όπου ΔR είναι η διόρθωση της απόστασης, R είναι το υψόμετρο του δορυφόρου, $dz=c/n'dt$, n =δείκτης διάθλασης και c =ταχύτητα του φωτός.

Η ατμοσφαιρική διάθλαση καθορίζεται από τις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης, των υδρατμών, της πυκνότητας των σταγονιδίων με μορφή σύννεφου και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας, τα οποία διαφέρουν χωρικά και χρονικά. Το σφάλμα που εισάγεται από τα σταγονίδια της βροχής διαφέρει ανάλογα τη πυκνότητα και μπορεί να εισάγει σφάλμα της τάξης των 2.5 εκατοστών. Η βροχή διαταράσσει τη μορφή του εκπεμπόμενου κύματος του παλμού, πράγμα το οποίο δημιουργεί πρόβλημα στον αλγόριθμο της ανίχνευσης του παλμού. Λόγω της ασάφειας που εισάγεται στον υπολογισμό οι μετρήσεις που είναι επηρεασμένες από πυκνά σταγονίδια βροχής ανιχνεύονται και διαχωρίζονται, ώστε να μη συμπεριληφθούν στη διαδικασία της επεξεργασίας.

1.2.2 Η ΞΗΡΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, η διόρθωση για την ξηρή αέρια μάζα είναι η μεγαλύτερη διόρθωση που υπολογίζεται για την εκτίμηση της απόστασης του δορυφόρου από σημείο ναδίρ.

$$N_{\text{dry}}(z) = \beta_{\text{dry}} P(z)/T(z), \quad (1.6)$$

Όπου P είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar, T είναι η θερμοκρασία σε K° και $\beta_{\text{dry}}=77.6^\circ K\text{mbar}^{-1}$.

Η διόρθωση της απόστασης που αφορά την ξηρή τροποσφαιρική διάθλαση σχετίζεται με την ατμοσφαιρική πίεση στο έδαφος ή τη θαλάσσια επιφάνεια.

Η εξίσωση με χρήση των αναπτυγμάτων Taylor είναι η παρακάτω σε cm

$$\Delta R_{\text{dry}} \approx 222.74 P_0/g_0(\Theta)$$

Όπου $g_0(\theta)$ είναι η βαρυτική επιτάχυνση σε $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ σε γεωγραφικό πλάτος θ και P_0 είναι η θαλάσσια πίεση σε mbar, ενώ η διόρθωση ΔR_{dry} είναι σε cm.

Ενώ είναι δυνατή η εκτίμηση της ατμοσφαιρικής πίεσης από την αλτιμετρία, είναι χρήσιμες οι μετρήσεις εδάφους της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά μήκος της περιοχής που καταγράφεται. Μια αξιόπιστη πηγή δεδομένων για την ατμοσφαιρική πίεση είναι το Ευρωπαϊκό Κέντρο προβλέψεων καιρού ECMWF. Μια μέση τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης παγκοσμίως είναι τα 1013mbar, ενώ ένα σφάλμα της εκτίμησης της τιμής πίεσης της τάξης των 5mbar, εισάγει σφάλμα μεγέθους 1cm στην εκτίμηση της απόστασης.

1.2.3 Η ΥΓΡΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, η διόρθωση για την υγρή τροποσφαιρική διάθλαση περιλαμβάνει τους υδρατμούς και τα σταγονίδια σε μορφή σύννεφων.

$$N_{\text{liq}}(z) = \beta_{\text{liq}} \rho_{\text{liq}}(z), \quad (1.7)$$

Όπου N_{liq} είναι ο δείκτης διαθλαστικότητας, ρ_{liq} είναι πυκνότητα των υδρατμών και $\beta_{\text{liq}} = 1.6 \times 10^6 \text{cm}^3 \text{g}^{-1}$

$$N_{\text{vap}}(z) = \beta_{\text{vap}} \frac{P_{\text{vap}}(z)}{T^2(z)} \quad (1.8)$$

Όπου T = Θερμότητα σε K° και P_{vap} είναι η πίεση των υδρατμών σε mbar.

Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι η υγρασία και τα σταγονίδια διαφέρουν σημαντικά κατά μήκος του κατακόρυφου διανύσματος, συνεπώς οι μετρήσεις στο έδαφος μπορούν να εισάγουν σφάλμα έως και 5cm στην εκτίμηση της απόστασης, καθώς η μέτρηση της υγρασίας στο έδαφος μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτή στην τροπόσφαιρα. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων για τη κατακόρυφη κατανομή των υδρατμών. Επειδή η κατανομή τους διαφέρει χωρικά και χρονικά και είναι αδύνατη η εκτίμηση της συγκέντρωσης και της κατανομής τους από άλλες αποστολές ετεροχρονισμένα, συνεπώς κάθε αλτιμετρική αποστολή πρέπει να συμπεριλαμβάνει ραδιόμετρο μικροκυμάτων, ώστε να μπορεί να υπολογίσει την διόρθωση της απόστασης που σχετίζεται με την υγρή τροποσφαιρική διάθλαση. Επιπρόσθετα είναι αναγκαία η συνεχή επιτήρηση και βαθμονόμηση του αλτιμετρικού συστήματος, ώστε να αξιολογείται σε τακτά διαστήματα η ακρίβεια και η προσαρμογή του συστήματος για πιθανές αλλαγές των μεταβλητών ή των συνθηκών που το επηρεάζουν.

1.2.4 Η ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, η διόρθωση της απόστασης που αφορά την ιονόσφαιρα σχετίζεται με την ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων στο πάνω τμήμα της ατμόσφαιρας

$$\Delta R_{\text{ion}} = 10^{-6} \int_0^R N_{\text{ion}}(z) dz = \frac{40.3 \times 10^6}{f^2} \int_0^R n_e(z) dz \quad (1.9)$$

Για μια συχνότητα των 13.6 GHz η διόρθωση ή αλλιώς ευαισθησία της απόστασης είναι 0.22cm/TECU όπου 1TECU αφορά το συνολικό φορτίο ηλεκτρονίων δηλαδή 10^{16} ηλεκτρόνια. Η διόρθωση μπορεί να αφορά από 1 TECU έως και 180 TECU κατά τη διάρκεια των φαινομένων υψηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας. Η διάθλαση λόγω της ιονόσφαιρας απαλείφεται με χρήση διπλής συχνότητας στις μπάντες Ku και C. Συγκεκριμένα το σφάλμα απαλείφεται μέσω μιας διαδικασίας βημάτων. Στο πρώτο βήμα υπολογίζεται η απόσταση για τις μπάντες αγνοώντας το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής διάθλασης. Στη συνέχεια οι μετρήσεις και στις 2 συχνότητες διορθώνονται για τη δυναμική κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας. Τέλος η επίδραση της ατμοσφαιρικής διάθλασης στη μπάντα Ku υπολογίζεται και απαλείφεται από τη μέτρηση της απόστασης μαζί με τα σφάλματα της ξηρής και υγρής τροπόσφαιρας που περιγράφονται παραπάνω. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός διπλής συχνότητας αλτιμέτρου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια για τη διόρθωση της ιονόσφαιρας η οποία μπορεί να εισάγει σφάλμα της τάξης μεγέθους των αρκετών εκατοστών.

1.3 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Το μετρούμενο σήμα αποτελεί τμήμα του παλμού, το οποίο έχει ανακλαστεί σε κάποιο μικρό τμήμα των κυματισμών μέσα στην περιοχή του αποτυπώματος της κεραίας τα οποία έχουν κάθετη διεύθυνση με την γωνία πρόσπτωσης του σήματος. Συνεπώς η μέτρηση πρέπει να διορθωθεί, καθώς οι τυχαίοι αυτοί κυματισμοί έχουν απόκλιση από τη μέση θαλάσσια στάθμη. Συνεπώς μετράται ο χρόνος από την εκπομπή του σήματος έως την επιστροφή του μεσαίου σημείου του έμπροσθεν άκρου της κυματομορφής που εκπέμπεται. Αυτό θεωρείται ότι αποτελεί τη διάμεσο τιμή του υψομέτρου των τυχαίων κυματισμών και αναφέρεται ως EM ή ηλεκτρομαγνητική θαλάσσια στάθμη. Η διόρθωση για τη θαλάσσια δυναμική επιφάνεια επηρεάζεται από δύο στοιχεία την ηλεκτρομαγνητική ασάφεια η οποία προκύπτει από την τραχύτητα των

κυματισμών και από την ασάφεια λόγω παράλλαξης. Το ζήτημα αυτό θα αναλυθεί περισσότερο σε μετέπειτα ενότητα

1.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, η διαδικασία του καθορισμού της ακριβούς θέσης του αλτιμετρικού συστήματος σε τακτά χρονικά διαστήματα και σε καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων με υψηλή ακρίβεια περιγράφεται στην τροχιακή εφημερίδα και ονομάζεται POD από τη φράση Precision Orbit Determination. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αναπτυγμένων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία διερευνούν τη τροχιά και τη ταχύτητα του δορυφόρου. Καθοριστικής σημασίας για τη βελτίωση της ακρίβειας του καθορισμού των τροχιών έπαιξε η αποστολή Torrex Poseidon.

1.4.1 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

Ο καθορισμός της τροχιάς πραγματοποιείται με τη χρήση ενός μοντέλου που περιγράφει τη τροχιά του δορυφόρου σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Το μοντέλο αυτό θα εισάγει σφάλματα, τα οποία οφείλονται στον εσφαλμένο καθορισμό του σημείου εκκίνησης του δορυφόρου, σφάλματα των παραμέτρων του μοντέλου και σφάλμα στον υπολογισμό των δυνάμεων που επιδρούν στη τροχιά του δορυφόρου. Τα GPS δίνουν τη δυνατότητα του συνεχόμενου προσδιορισμού της θέσης του δορυφόρου όμως παρακάτω θα αναλυθούν τα δυναμικά μέσα καθορισμού της τροχιάς τα οποία δίνουν υψηλότερη ακρίβεια καθορισμού της τροχιάς.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται μήκη τόξου πάνω στη τροχιά σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ οι δυνάμεις που επιδρούν στο δορυφόρο είναι είτε βαρυτικές είτε μη βαρυτικές.

1.4.2 ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, οι βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται στο δορυφόρο είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που προκαλούν σφάλμα

στον υπολογισμό της τροχιάς του δορυφόρου καθώς διαφέρουν ποσοτικά σε διαφορετικά γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Η δύναμη που ασκείται είναι ανεξάρτητη του μεγέθους και του σχήματος του δορυφόρου. Με αξιοποίηση δεδομένων από διάφορες δορυφορικές αποστολές έχουμε αρκετά στοιχεία για το βαρυτικό πεδίο της γης γεγονός το οποίο έχει βελτιώσει την ακρίβεια του υπολογισμού της τροχιάς καθώς σχεδόν εξαλείφεται το σφάλμα από τη βαρυτική έλξη. Το βαρυτικό πεδίο της γης δεν είναι σφαιρικό, συνεπώς οι διαταράξεις του βαρυτικού πεδίου προκαλούν διαταραχές στον υπολογισμό της ελλειπτικής κίνησης του δορυφόρου. Οι βαρυτικές επιδράσεις μειώνονται όσο αυξάνεται το υψόμετρο, συνεπώς αυτή η συνθήκη ήταν καθοριστική στην επιλογή του υψομέτρου των 1336 χιλιομέτρων στην αποστολή Topex Poseidon. Η κίνηση του δορυφόρου περιγράφεται από την ελλειπτική τροχιά σύμφωνα με την εξίσωση του Kepler. Η τροχιά επηρεάζεται τόσο από τη θαλάσσια παλίρροια που εκφράζεται από τη μετακίνηση των υδάτινων μαζών, όσο και από τη παλίρροια που απορρέει από τη πυκνότητα και τη σύνθεση του στερεού φλοιού της γης. Τα σημερινά στοιχεία που επιδρούν βαρυτικά στην τροχιά έχουν καταγραφεί αναλυτικά από τον IERS και είναι διαθέσιμα για χρήση και μελέτη. Το μοντέλο για το βαρυτικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή Topex Poseidon είναι το GEM-10 το οποίο υπολόγιζε τροχιακό σφάλμα της τάξης των 50cm. Σημαντική βελτίωση προσέφερε ο συνδυασμός δεδομένων από διαφορετικές αποστολές με αποτέλεσμα το JGM. Στη συνέχεια με χρήση των δεδομένων δορυφορικής τηλεμετρίας laser (Satellite Laser Ranging – SLR) και του συστήματος προσέγγισης της τροχιάς με την τεχνική Doppler (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite – Doris) που έγιναν διαθέσιμα από την αποστολή Topex Poseidon προέκυψε το ανανεωμένο JGM2. Εφόσον εξακριβώθηκε η αναγκαιότητα της βελτίωσης των δεδομένων που αφορούν τον υπολογισμό του βαρυτικού πεδίου, σχεδιάστηκαν δορυφορικές αποστολές αποκλειστικά για τον προσδιορισμό του βαρυτικού πεδίου και του γεωειδούς με πρώτη την αποστολή GRACE.

1.4.3 ΤΡΟΧΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, ένα σημαντικό μέρος του τροχιακού σφάλματος παρουσιάζει ένα γεωγραφικό μοτίβο που είναι αμετάβλητο σε σχέση με το χρόνο. Το σφάλμα αυτό οφείλεται σε ανυψωμένα ή χαμηλωμένα τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος και δε μπορεί να επιλυθεί με χρήση του μέσου όρου των παρατηρήσεων. Γενικά παρατηρούνται δύο είδη σφαλμάτων, τα σφάλματα του μέσου όρου και τα τυχαία σφάλματα. Το μέσο σφάλμα προκαλεί παραμόρφωση

στη μέση επιφάνεια της θάλασσας, ενώ το τυχαίο σφάλμα μπορεί να επηρεάσει τον υπολογισμό της διακύμανσης της δυναμικής θαλάσσιας επιφάνειας. Για την αποστολή T/P τα παραπάνω σφάλματα ήταν της τάξης των 2cm για το JGM2 και 0.9cm για το JGM3. Τα τροχιακά σφάλματα που προκύπτουν από τη βαρυτική έλξη παρατηρούνται απευθείας με μετρήσεις GPS για τον εντοπισμό του δορυφόρου.

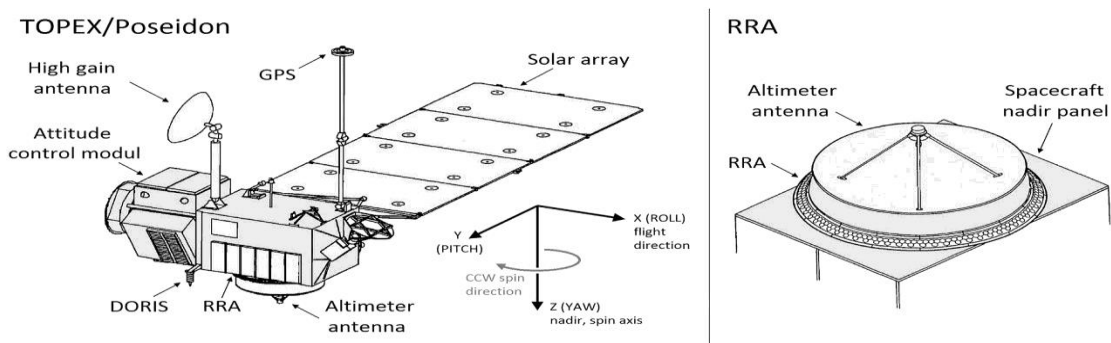
1.4.4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Αφορά μικρές μετατοπίσεις του συστήματος αναφοράς και μπορεί να επηρεάσει την ανάλυση δεδομένων που αφορούν μικρά τροχιακά τόξα, συνεπώς για τέτοιου είδους αναλύσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη το σφάλμα που προκύπτει από το επίγειο σύστημα αναφοράς. Ο τύπος του σφάλματος αυτού είναι σημαντικός καθώς μπορεί να επηρεάσει την επίλυση του βαρυτικού πεδίου, πράγμα το οποίο μειώνεται εφαρμόζοντας μια επαναληπτική διαδικασία. Ένα άλλο πρόβλημα προκύπτει καθώς ενώ το σύστημα για επιλύσεις μεγάλων τροχιακών τόξων δεν περιλαμβάνει σημαντικό σφάλμα κέντρωσης του συστήματος συντεταγμένων στους άξονες X-Y, είναι αρκετά εύκολο το σύστημα μπορεί να έχει απόκλιση(ολίσθηση) ως προς τον άξονα Z (σύμφωνα με Haines et al. 1996) της περιστροφής της γης, πράγμα το οποίο επηρεάζει τον υπολογισμό της θαλάσσιας στάθμης.

1.4.5 ΜΗ ΒΑΡΥΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, στη τροχιακή κίνηση του δορυφόρου παρεμβαίνουν αρκετές μη βαρυτικές δυνάμεις. Συγκεκριμένα πρόκειται για την ατμοσφαιρική αντίσταση, η οποία προέρχεται από τα σωματίδια που υπάρχουν στα ατμοσφαιρικά στρώματα και τα οποία παρουσιάζουν αυξομειώσεις ανάλογα με το σωματιδιακό φορτίο, αλλά και σύμφωνα με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα. Επιπλέον με τη τροχιά του δορυφόρου αλληλοεπιδρούν η ηλιακή και η επίγεια ακτινοβολία, με σημαντικό παράγοντα τις ηλιακές καταιγίδες, οι οποίες γίνεται προσπάθεια μέχρι και σήμερα ώστε να καταγράφονται και να λαμβάνονται υπόψη σε επαρκή βαθμό. Για την ατμοσφαιρική αντίσταση έχει γίνει επαρκής προσπάθεια ώστε να μοντελοποιηθεί η πυκνότητα των σωματιδίων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, ενώ για την αποστολή Topex Poseidon η επιλογή του υψομέτρου της αποστολής στα 1336km έγινε με σκοπό την σημαντική μείωση του σωματιδιακού φορτίου στο συγκεκριμένο στρώμα της ατμόσφαιρας και συνεπώς την ελάττωση της αντίστασης στην πορεία του δορυφόρου. Για την ακτινοβολία που προέρχεται από τη γη και τον ήλιο δεν είναι δυνατός ο σαφής υπολογισμός της αλληλεπίδρασης του κυμαινόμενου μεγέθους με τις πολύπλοκες επιφάνειες

του δορυφόρου, συνεπώς η επίλυση γίνεται με πολύπλοκα μοντέλα τα οποία περιγράφουν τα παραπάνω μεγέθη, όμως είναι αδύνατη η πλήρη και απόλυτη παραμετροποίηση της αλληλεπίδρασης αυτών με τα τμήματα του δορυφόρου συνεπώς γίνεται μια εκτίμηση αυτών των μεγεθών, η οποία γίνεται προσπάθεια να συμπίπτει με τα μετρήσιμα τροχιακά σφάλματα που παρατηρούνται. Συγκεκριμένα για την αποστολή TP σχεδιάστηκε ένα μοντέλο που τον χωρίζει σε 8 επιφάνειες και μετρά τις επιδράσεις των παραπάνω δυνάμεων στην μάζα του δορυφόρου.



Εικόνα1.2 Τα συστήματα του δορυφόρου Topex Poseidon.

1.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ TOPEX-POSEIDON

Από τα πέντε συστήματα εντοπισμού που διαθέτει ο δορυφόρος τα δύο μόνο αξιοποιούνται για τον καθορισμό της τροχιάς που εμφανίζεται στα στοιχεία των γεωφυσικών δεδομένων. Συγκεκριμένα το σύστημα SLR (Satellite Laser Ranging system) αποτελεί ένα σύστημα αρχικού εντοπισμού και λειτουργεί με την εκπομπή ενός οπτικού παλμού από το σύστημα εντοπισμού προς ένα κάτοπτρο στο δορυφόρο και η μέτρηση αφορά το χρόνο που ταξιδεύει ο παλμός από το σύστημα εντοπισμού μέχρι το δορυφόρο και πίσω στο σύστημα εντοπισμού. Μετά από διορθώσεις παρέχει μέτρηση υψηλής ακρίβειας της τάξης του 1 εκατοστού και συνεισφέρει σημαντικά στον υπολογισμό των τροχιακών σφαλμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αδυναμίες του συστήματος είναι η γεωγραφική κατανομή των σταθμών εντοπισμού και το γεγονός πως η μέτρηση δε μπορεί να πραγματοποιηθεί αν δεν υπάρχει καθαρός ουρανός. Επιπρόσθετα χρησιμοποιείται το σύστημα DORIS δηλαδή Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, το οποίο είναι ένα σύστημα που εκπέμπει προς μια κατεύθυνση από επίγειους μεταδότες συνεχόμενα στη συχνότητα των 2036.25MHz και 401.25MHz. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε από το CNES, το IGN και το GRGS με σκοπό την υψηλή ακρίβεια εντοπισμού δορυφόρων σε χαμηλά υψόμετρα και

συγκεκριμένα για την αποστολή Torex Poseidon. Ένας μετρητής στον δορυφόρο λαμβάνει το σήμα και μετράει τη φάση Doppler, από την οποία προκύπτει η σχετική απόσταση και ο ρυθμός μετάδοσης από τον εκάστοτε σταθμό. Μετά τη διόρθωση των σφαλμάτων χρόνου και ιονόσφαιρας το σύστημα DORIS προσφέρει μετρήσεις ακρίβειας μικρότερης του 1 χιλιοστού/sec. Μετρώντας συνεχόμενα από πολλαπλούς σταθμούς και συγκρίνοντας τις μετρήσεις με την εκτιμώμενη τροχιά, ο αλγόριθμος εντοπισμού καταλήγει σε μοναδική λύση, η οποία ικανοποιεί όλα τα μετρούμενα μεγέθη με αρκετά χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Τα δύο συστήματα αλληλοσυμπληρώνουν το ένα το άλλο καθώς το SLR συνδέει το τροχιακό κέντρο με το γεώκεντρο, ενώ το σύστημα DORIS προσφέρει σημαντική βελτίωση της ακρίβειας του εντοπισμού. Συμπληρωματικό στα παραπάνω είναι το σύστημα PRARE δηλαδή Precise Range Rate equipment, το οποίο μεταδίδει δύο σήματα στη μπάντα X (8489GHz) και στη μπάντα S (2048GHz). Το σήμα φτάνει στο σταθμό στο έδαφος, ο οποίος το αποκωδικοποιεί και υπολογίζει τη χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στις δύο μπάντες. Τα στοιχεία που λαμβάνονται στο έδαφος επεξεργάζονται σε μια κεντρική τοποθεσία (GFZ) και μετά την απαλοιφή των σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια της τάξεως των 4cm. Το σύστημα αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς οι μετρήσεις στις συχνότητες αυτές δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες, ενώ ένα μειονέκτημα είναι η πολυπλοκότητα των υπολογισμών και των συστημάτων που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή.

Επιπρόσθετα το αλτιμετρικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βελτίωση της ακρίβειας της τροχιάς του δορυφόρου. Συγκεκριμένα το αλτίμετρο προσφέρει μέτρηση της θαλάσσιας στάθμης της τάξης μερικών cm. Συνεπώς σε περιπτώσεις όπου το τροχιακό σφάλμα είναι μεγάλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί το τροχιακό σφάλμα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δορυφόρου ERS-1, στον οποίο δυσλειτούργησε το σύστημα PRARE, οπότε χρησιμοποιήθηκαν εκτιμήσεις από το ίδιο το αλτίμετρο για να εκτιμηθεί το τροχιακό σφάλμα, ενώ έγινε συνδυασμός δεδομένων και με άλλους δορυφόρους. Στοιχεία δείχνουν ότι σε σημεία ελέγχου όπως μια μεγάλη λίμνη όπου τα δεδομένα που λαμβάνει το αλτίμετρο έχουν ελάχιστη επιρροή από τη δυναμική θαλάσσια επιφάνεια και τις παλίρροιας δείχνουν σε συνδυασμό με επίγειες μετρήσεις ότι το αλτίμετρο δίνει αξιόπιστες μετρήσεις της τάξεως των μερικών εκατοστών και μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρόσθετο στοιχείο για την εκτίμηση της τροχιάς. Τέλος το σύστημα GPS του δορυφόρου, το οποίο βασίζεται σε ένα πλήθος δορυφόρων, οι οποίοι εκπέμπουν με υψηλή ακρίβεια τις εκτιμήσεις για τις γεωκεντρικές συντεταγμένες της θέσης τους. Με ελάχιστο αριθμό λήψης σήματος τους 4 δορυφόρους και με απαραίτητη συνθήκη τη διόρθωση του χρονομέτρου, ώστε να συγχρονιστεί το χρονόμετρο του δέκτη με αυτό του δορυφόρου και να καταγραφεί η διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο σήματα δηλαδή το εκπεμπόμενο και αυτό που αναπαράγει ο δέκτης. Με μέτρηση απευθείας στην φέρουσα συχνότητα μπορεί να

επιτευχθεί πολύ υψηλή ακρίβεια της τάξης των 2 εκατοστών μέσω της τεχνικής που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε γενικές γραμμές η τεχνολογία GPS σε συνδυασμό με ένα δίκτυο σταθμών μπορεί να προσφέρει αξιόπιστη ακρίβεια του εντοπισμού της τροχιάς του δορυφόρου σε συνθήκες που δεν περιλαμβάνουν παρεμβολές είτε επιλεκτική διαθεσιμότητα. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται στις νεότερες αποστολές όμως δεν έχουν αντικαταστήσει το συνδυασμό SLR/DORIS ο οποίος παρέχει την υψηλότερη ακρίβεια.

1.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, είναι απαραίτητη η συνεχής παρατήρηση της θέσης και ο υπολογισμός της ταχύτητας του δορυφόρου και η εισαγωγή των στοιχείων αυτών σε ένα σύστημα καθορισμού τροχιάς, το οποίο εκτιμάει την αρχική τιμή των μεγεθών αυτών και παράγει διορθώσεις των θεωρητικών τιμών σύμφωνα με τα μετρούμενα μεγέθη. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται a priori τιμές για τη θέση του σταθμού εντοπισμού, την γεωαναφορά, την επίδραση της ατμοσφαιρικής διάθλασης και υπολογίζεται μια εκτιμώμενη τιμή απόστασης C, η οποία συγκρίνεται με την μέτρηση της απόστασης O. Τα κατάλοιπα O-C μπορούν με χρήση της κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης να βελτιώσουν τη εκτίμηση της θέσης και να συμβάλλουν στον υπολογισμό παραμέτρων που αφορούν την αντίσταση και κατ' επέκταση τα μετρούμενα μεγέθη. Η εκτιμήσεις αυτές αποτελούν ένα πολύπλοκο μη γραμμικό πρόβλημα, το οποίο μπορεί να γραμμικοποιηθεί και να επιλυθεί μέσω μιας επαναληπτικής μεθόδου.

1.6.1 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Μια μέθοδος υπολογισμού της ακριβούς τροχιάς του δορυφόρου αποτελεί η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή μιας προσαρμοσμένης μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων που περιλαμβάνει συγκεκριμένες παραμέτρους του μοντέλου, μια εκτιμώμενη θέση και ταχύτητα, σε δεδομένα εντοπισμού πάνω σε ένα τόξο της τροχιάς. Η πρώτη εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιεί διόρθωση στην αρχική εκτιμώμενη κατάσταση του δορυφόρου και στα σφάλματα των παραμέτρων και υπολογίζει ένα νέο αρχικό διάνυσμα το οποίο τροφοδοτείται στην επόμενη επαναληπτική διαδικασία. Συνεπώς ο υπολογισμός του τροχιακού σφάλματος που προκύπτει από την ατμοσφαιρική αντίσταση και την ηλιακή ακτινοβολία βασίζεται στην πυκνότητα και την ποιότητα των δεδομένων εντοπισμού και στη συχνότητα των ανανεώσεων των καταλοίπων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ιδιαίτερη σημασία στον υπολογισμό της τροχιάς ακριβείας του δορυφόρου παίζει το μήκος τόξου που επιλέγεται και συγκεκριμένα η χρονική διάρκεια που καλύπτει. Τα συνήθη μήκη τόξου που

επιλέγονται κυμαίνονται από μια ημέρα έως και μερικές εβδομάδες. Η επιλογή μικρών τόξων παρουσιάζει ανακρίβειες στην κέντρωση του συστήματος και είναι πιο ευαίσθητη σε σφάλματα του εντοπισμού, ενώ τα μεγάλα τόξα εξομαλύνουν τα τροχιακά σφάλματα καθώς και τα σφάλματα παραμέτρων του μοντέλου. Συνήθως επιλέγονται μεγάλα τόξα για τους παραπάνω παράγοντες με κριτήριο να πληρούν τις προϋποθέσεις για την ακρίβεια των μετρήσεων.

1.6.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΙΩΜΕΝΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Πρόκειται για το ίδιο δυναμικό μοντέλο με τη προσθήκη ενός φίλτρου Kalman στην αρχική διαδικασία των εκτιμήσεων. Συγκεκριμένα αφορά τον υπολογισμό και την αντιμετώπιση των μη μοντελοποιημένων δεδομένων ως στοχαστικά, πράγμα το οποίο επιτρέπει τις αποκλίσεις των παρατηρήσεων από τη θεωρητική τροχιά. Η συνεχή παραγωγή εφημερίδας του δορυφόρου όπου κάθε στιγμή καταγράφονται τα δεδομένα που αφορούν τη τροχιά και τη θέση σε διαστάσεις είναι αποκλειστική δυνατότητα της τεχνολογίας GPS, όμως υπάρχει η δυνατότητα και στον συνδυασμό SLR/DORIS να καταγράφει κάποια στοιχεία που αφορούν ένα μοντέλο μειωμένης δυναμικής.

1.6.3 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, οι έλεγχοι αφορούν τη διαδικασία καταγραφής των RMS της διαφοράς ανάμεσα στην εκτιμώμενη τροχιά και την πραγματική τροχιά με βάση τη διαδικασία του εντοπισμού. Μια επιπρόσθετη λύση είναι η εφαρμογή πολλαπλών ελέγχων που καταγράφουν συγκεκριμένα τμήματα που παράγουν σφάλμα στην τροχιά και ο συνδυασμός τους με κάποιο τρόπο που θα ελαττώσει το συνολικό σφάλμα. Οι έλεγχοι αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε εσωτερικής ακρίβειας και εξωτερικής ακρίβειας. Συγκεκριμένα στους ελέγχους εσωτερικής ακρίβειας της τροχιάς περιλαμβάνονται η συσχέτιση της θεωρητικής τροχιάς με τα δεδομένα εντοπισμού. Μια τυπική διαδικασία είναι η χρήση των δεδομένων DORIS και PRARE, ενώ τα δεδομένα SLR αποκρύπτονται ή εξαιρούνται από την επίλυση. Με αυτό το τρόπο εάν τα δεδομένα SLR δείχνουν ακρίβεια υψηλότερη των εκατοστών σημαίνει πως η επίλυση του μοντέλου έχει πολύ υψηλή ακρίβεια και αντικατοπτρίζει την ακρίβεια της επίλυσης της τροχιάς. Εάν τα δεδομένα εντοπισμού δεν είναι διαθέσιμα ένας χρήσιμος έλεγχος είναι η απόκλιση μεταξύ στα δυο διανύσματα στη θέση τέλους του προηγούμενου και αρχής του επόμενου. Τα σημεία αυτά είναι ουσιαστικά το ίδιο σημείο θέσης στην ίδια χρονική στιγμή. Το αποτέλεσμα αυτού του ελέγχου όμως πρέπει να εξετάζεται με την απαραίτητη προσοχή καθώς δεν είναι απόλυτο. Παρόλα αυτά είναι ένας πολύ χρήσιμος έλεγχος που μπορεί να συνδράμει στον εντοπισμό και την επίλυση τροχιακού σφάλματος. Μια μέθοδος εξωτερικού

ελέγχου της τροχιάς είναι η σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού της τροχιάς. Στη περίπτωση του Torrex Poseidon η τροχιά που υπολογίζεται μέσω του GPS με τη μέθοδο μειωμένης δυναμικής, μπορεί να συγκριθεί με τη τροχιά που παράγει η δυναμική μέθοδος μέσω του συνδυασμού SLR/DORIS. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων προσφέρει απευθείας μέτρηση για την βαρύτητα και τη χωρική κατανομή των τροχιακών σφαλμάτων που προκαλεί η βαρυτική έλξη.

1.6.4 ΓΕΩΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Σύμφωνα με τον Chelton D.B, οι μετρήσεις των αποστάσεων μετατρέπονται στη θαλάσσια επιφάνεια σε σχέση με ένα ελλειψοειδές αναφοράς μετρώντας το ύψος της τροχιάς H , εφ' όσον έχει προηγηθεί ο καθορισμός της τροχιάς ακριβείας. Με γνωστά το H και το R η θαλάσσια επιφάνεια υπολογίζεται με τον τύπο $h = H - R$. Η θαλάσσια επιφάνεια μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες της $h = h_d + h_g + h_T + h_a$.

Το μέγεθος h_g αφορά τις αποχές, το μέγεθος h_d αναφέρεται στη θαλάσσια δυναμική επιφάνεια, h_T είναι το παλιρροιακό ύψος και h_a είναι η επιρροή της ατμοσφαιρικής πίεσης στη θαλάσσια επιφάνεια. Συγκεκριμένα οι κυματισμοί του γεωειδούς αφορούν τη μορφή που θα είχε η θαλάσσια επιφάνεια, εάν οι μόνες δυνάμεις που ασκούνταν ήταν η βαρυτική και αυτή της γήινης περιστροφής. Επειδή η επιρροή του μεγέθους h_g είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σαφής η ανάγκη του καθορισμού της επιφάνειας του γεωειδούς. Σε αυτό συνεισφέρουν τόσο μετρήσεις δορυφόρων που αναφέρονται σε μεγάλη κλίμακα, όσο και μετρήσεις επίγειες που αφορούν μικρή κλίμακα, ενώ ο συνδυασμός των δύο παραπάνω δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Μεγάλης σημασίας είναι οι εξειδικευμένες δορυφορικές αποστολές που αφορούν τον καθορισμό της επιφάνειας του γεωειδούς, οι οποίες στη διάρκεια τους παρείχαν πολύτιμα δεδομένα για τη βελτίωση της εκτίμησης που διαθέτουμε για το γεωειδές. Επειδή το γεωειδές εισάγει μεγάλη ασάφεια στον καθορισμό της θαλάσσιας επιφάνειας, οι μελέτες των αλτιμετρικών δεδομένων που αφορούν το καθορισμό της θαλάσσιας δυναμικής επιφάνειας είναι μόνο τμηματικά χρήσιμες. Συνεπώς είναι απαραίτητος ο εμπλουτισμός των δεδομένων που αφορούν την επιφάνεια του γεωειδούς, ώστε να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της θαλάσσιας δυναμικής επιφάνειας σε μικρές κλίμακες. Αντίθετα με το μέγεθος h_T είναι γνωστές οι κινήσεις της σελήνης και του ηλίου που συνεισφέρουν το μεγαλύτερο μέρος των παλιρροιών συνεπώς η πιθανή παραγωγή παλιρροιών μπορεί να υπολογιστεί σε οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας. Συγκεκριμένα οι πιθανές παλίρροιες έχουν αναλυθεί από το 1922 σε 389 αρμονικές συνιστώσες. Καθώς το σφάλμα που εισάγεται στις μετρήσεις είναι της τάξης των 10 έως 60 cm είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η ακριβής

συνεισφορά των παλιρροιών στην θαλάσσια επιφάνεια. Η αποστολή Torex Poseidon έπαιξε καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό του σφάλματος αυτού με υψηλή ακρίβεια της τάξης των 2-3cm. Συνίσταται προσοχή στον συνδυασμό αλτιμετρικών δεδομένων με δεδομένα από παλιρροιογράφο, καθώς τα αλτιμετρικά δεδομένα περιλαμβάνουν τη γεωκεντρική παλίρροια η οποία περιλαμβάνει τη παλίρροια του στερεού φλοιού μαζί με τη θαλάσσια παλίρροια, ενώ τα δεδομένα παλιρροιογράφου περιλαμβάνει μόνο δεδομένα για τη θαλάσσια παλίρροια. Τέλος η ατμοσφαιρική πίεση προκαλεί μια κατακόρυφη δύναμη στη θαλάσσια επιφάνεια και προκαλεί παραμορφώσεις, οι οποίες δεν οφείλονται στα γεωστροφικά ρεύματα και πρέπει να αφαιρεθεί ώστε να προκύψει η θαλάσσια δυναμική επιφάνεια. Σύμφωνα με τους Wunsch και Stammer(1997)

$$p(z_0) = p_a + \int_{z_0}^0 \rho_w g dz + \int_0^{h_a} \rho_w g dz . \quad (1.10)$$

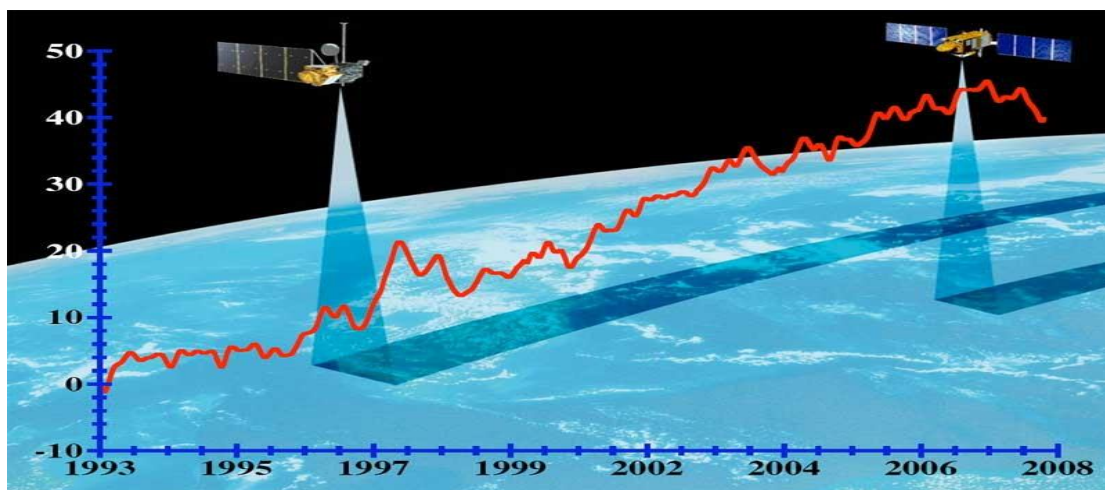
Όπου p είναι η πίεση, z είναι το βάθος, ρ_w είναι η πυκνότητα νερού και g είναι η βαρυτική επιτάχυνση.

Η επίλυση του παραπάνω ολοκληρώματος προκύπτει μέσω προσεγγιστικής διαδικασίας όπου αφαιρείται η στατική αντίστροφη βαρομετρική διόρθωση. Η στατική αυτή αντιμετώπιση του σφάλματος που προκύπτει προκαλεί ασάφεια, καθώς η μόνη πηγή δεδομένων για την ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι αυτή από μοντέλα πρόγνωσης του καιρού και υπολογίζεται πως προκαλεί σφάλμα στον υπολογισμό της δυναμικής θαλάσσιας επιφάνειας κατά 1cm/mbar.

1.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια πρώτη επαφή με τα δεδομένα και τα προβλήματα τα οποία παράγει και διαχειρίζεται ο κλάδος της δορυφορικής αλτιμετρίας. Είναι προφανές πως είναι αδύνατη η ανάλυση εις βάθος όλων των επιμέρους αντικειμένων και θεωρητικών τμημάτων που απαρτίζουν τον κλάδο, όμως έγινε προσπάθεια να καλυφθούν οι βασικοί τομείς που παράγουν σφάλμα και πως διαχειρίστηκαν αυτά τα προβλήματα οι επιστήμονες που σχεδίασαν τις αρχικές αλτιμετρικές αποστολές. Κάθε κομμάτι που επιλύεται σωστά καταγράφεται και εάν κριθεί απαραίτητο αξιοποιείται και σε μελλοντικές αποστολές, συνεπώς πολλές από τις καινοτομίες και τα αποτελέσματα των αποστολών Seasat και Torex Poseidon και Jason 1 χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα και βελτίωσαν τις αλτιμετρικές αποστολές που είναι ενεργές έως και σήμερα, συνεπώς έχει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον η μελέτη και η καταγραφή των αποτελεσμάτων τους και η πιθανή σύγκριση είτε μεταξύ τους είτε με τις σημερινές αποστολές. Οι αλγόριθμοι και

οι τεχνικές βελτιώνονται όμως τα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν παραμένουν, συνεπώς το επόμενο κεφάλαιο θα αφορά τη μελέτη και τη σύγκριση των αποστολών με σκοπό την εύρεση των διαφορών και των επιλύσεων στα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν.

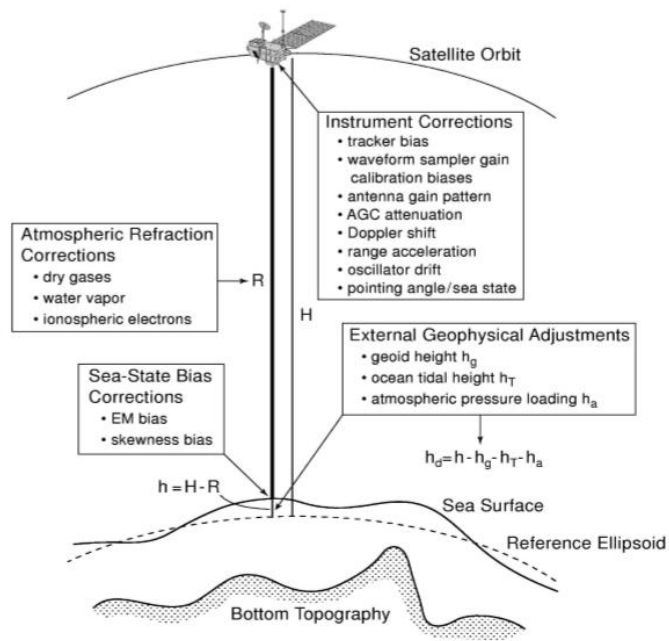


Εικόνα 1.3 Η αύξηση της παγκόσμιας θαλάσσιας στάθμης από τους δορυφόρους Topex/Poseidon και Jason. Πηγή: Πανεπιστήμιο του Colorado.

Πίνακας 3.1: Τα χαρακτηριστικά των αλτιμετρικών δορυφόρων.

δορυφόρος	ημερομηνία εκτόξευσης	μάζα (kg)	περίγειο - απόγειο	κλίση (°)	περίοδος (min)	υπεύθ. υπηρεσία
Geos-3	9/4/75	341	816-850	114.98	101.6	NASA
Seasat	28/7/78	2300	761-765	108.0	100.1	NASA/JPL
Geosat	13/3/85	635	775-779	108.1	100.7	US Navy
ERS1	17/7/91	2384	774-775	98.5	100.3	ESA
T/P	10/8/92	2402	1330-1342	66.0	112.4	NASA/CNES
ERS2	21/4/95	2516	783-784	98.6	100.5	ESA
GFO	10/2/98	;	785-788	108.1	100.6	US Navy
Jason-1	12/00	;	≈1336	≈66	≈112	CNES/NASA

Εικόνα 1.4 Χαρακτηριστικά αλτιμετρικών δορυφόρων. Πηγή: Ανδριτσάνος Β. Διδακτορική διατριβή.



Εικόνα 1.5 Οι διορθώσεις και οι προσαρμογές που εφαρμόζονται στο μοντέλο υπολογισμού αλτιμετρικών δεδομένων. Πηγή: Chelton D.B : Satellite altimetry.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ

Σκοπός του δεύτερου κεφαλαίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο σκοπός ήταν ο προσδιορισμός των εννοιών και των ζητημάτων που πραγματεύεται η δορυφορική αλτιμετρία. Αναλύθηκαν φαινόμενα που επιλύθηκαν με πρωτοποριακές τεχνικές και με εφαρμογές της θεωρίας τόσο των φυσικών επιστημών, αλλά και πολλών άλλων κλάδων. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας θεωρήθηκε σκόπιμο να διερευνηθούν οι ίδιες οι αποστολές που αφορούν την αλτιμετρία, να καθοριστούν βασικά στοιχεία που τις αφορούν, να συγκριθούν για ομοιότητες και διαφορές και στις ενότητες που ακολουθούν, ενώ θα εστιαστεί η προσοχή στις αποστολές Jason 3 και Sentinel 3 και στη διαδικασία της βαθμονόμησης που εφαρμόστηκε στα δύο αλτιμετρικά συστήματα, καθώς και θα αναλυθούν διεξοδικά οι διαφορές τους και να εξεταστούν οι δυνατότητες αξιοποίησης συνδυαστικών δεδομένων από τις δύο αποστολές.

2.1 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ ΑΠΟΤΟ 1978 ΕΩΣ ΣΗΜΕΡΑ

Η αποστολή Seasat είναι η πρώτη δορυφορική αποστολή που αφορούσε την καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας. Εκτοξεύθηκε τον Ιούνιο του 1978 και ήταν σε λειτουργία για 105 μέρες. Ο δορυφόρος διέθετε αλτιμετρικό ραντάρ, μικροκυματικό ραδιόμετρο, ραντάρ συνθετικού διαφράγματος. Παρότι είχε πολύ σύντομη διάρκεια προσέφερε πληθώρα χρήσιμων πληροφοριών και ωφέλησε σημαντικά επόμενες αποστολές που είχαν αντίστοιχο χαρακτήρα. Τα δεδομένα του δορυφόρου αφορούσαν τους ανέμους στη θαλάσσια επιφάνεια, τη θερμοκρασία στη θαλάσσια επιφάνεια, ύψη κυματισμών και εσωτερικούς κυματισμούς, το νερό στην ατμόσφαιρα, τα παγόβουνα και την ωκεάνια τοπογραφία.

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της Nasa, σημαντικές αποστολές για τις εφαρμογές αλτιμετρίας είναι η αποστολή Skylab που διήρκησε από τον Μάιο του 1973 έως τον Φεβρουάριο του 1974, η αποστολή Geos-3 που λειτούργησε από τον Απρίλιο του 1975 έως τον Ιούλιο του 1979, η αποστολή Geosat που λειτούργησε από τον Οκτώβριο του 1985 έως τον Ιανουάριο του 1990 και η αποστολή ERS-1 που λειτούργησε από τον Ιούλιο του 1991 έως τον Μάρτιο του 2000.

Ακολούθησε η αποστολή TopEx/Poseidon η οποία διήρκησε από το 1992 έως τον Ιανουάριο του 2006. Σύμφωνα με τον ιστότοπο της NASA η αποστολή αυτή κατέγραψε τα μοτίβα της θαλάσσιας κυκλοφορίας και με συνδυασμό δεδομένων με μοντέλα βελτίωσε την κλιματική πρόγνωση. Συγκεκριμένα κατέγραψε την θαλάσσια

στάθμη παγκοσμίως με ακρίβεια της τάξης των λίγων εκατοστών, χαρτογράφησε τις παλίρροιες σε παγκόσμια κλίμακα, κατέγραψε τα θαλάσσια ρεύματα και την επιρροή τους στη κλιματική αλλαγή, κατέγραψε τις εναλλαγές των θαλάσσιων ρευμάτων σύμφωνα με τις λεκάνες που αναφέρονταν και συνείσφερε στην αξιολόγηση των μοντέλων ωκεάνιας κυκλοφορίας. Τέλος κατέγραψε την θερμοκρασία των ωκεανών και των θαλασσών επί μια δεκαετία, χαρτογράφησε τη θερμότητα που αποθηκεύεται στο πάνω στρώμα του ωκεανού ανά έτη και βοήθησε στη καλύτερη κατανόηση του βαρυτικού πεδίου της γης. Ο δορυφόρος διέθετε αλτίμετρο κατασκευασμένο από τη NASA, το οποίο χρησιμοποιούσε τις μπάντες C (5.3GHz) και KU (13.6GHz) και ένα δεύτερο αλτίμετρο που κατασκευάστηκε από το CNES στη μπάντα KU (13.65GHz), όμως μόνο ένα από τα δύο μπορούσε να είναι σε λειτουργία κάθε μεμονωμένη στιγμή. Ο δορυφόρος διέθετε το TOPEX ραδιόμετρο μικροκυμάτων, το οποίο λειτουργούσε στα 17, 21 και 37 GHz , το οποίο συνεισφέρει στη διόρθωση για την υγρή ατμοσφαιρική διάθλαση. Επιπρόσθετα διέθετε 3 συστήματα εντοπισμού, το σύστημα SLR που λειτουργεί με τεχνολογία Laser κυρίως σε καθαρό ουρανό, το σύστημα DORIS που βασίζεται σε ένα παγκόσμιο δίκτυο 50 σταθμών, οι οποίοι μεταδίδουν σήμα το οποίο φτάνει σε έναν δέκτη τον οποίο φέρει ο δορυφόρος. Τέλος έφερε σύστημα GPS, το οποίο μπορούσε να καταγράφει ανά πάσα στιγμή τη θέση του δορυφόρου με ακρίβεια λίγων εκατοστών, το οποίο είναι κρίσιμο ώστε να έχουμε μετρήσεις υψομέτρων από το αλτίμετρο μεγάλης ακρίβειας. Η αποστολή που συνέχισε την αποστολή Topex/Poseidon είναι η JASON η οποία λαμβάνει το όνομα από τη φράση Joint Altimetry Satellite Oceanography Network αλλά αποτελεί και αναφορά στον μύθο του Ιάσωνα και των αργοναυτών. Τα όργανα που διέθετε ο δορυφόρος ήταν ίδιου τύπου με αυτά του δορυφόρου Topex/Poseidon, με τη διαφορά ότι ο Jason 1 φέρει μόνο ένα αλτίμετρο το οποίο ονομαζόταν Poseidon 2 ως αναφορά στη πρώτη αποστολή και λάμβανε στοιχεία GPS για εντοπισμό από ανανεωμένο σύστημα, το οποίο διαθέτει υψηλής ακρίβειας δεδομένα με μορφή εφημερίδων. Η αποστολή λειτούργησε από τον Δεκέμβριο του 2001 έως τον Ιούλιο του 2013, συνεπώς για κάποιο διάστημα λειτουργούσε παράλληλα με την αποστολή Poseidon. Επίσης λειτούργησε παράλληλα με την αποστολή Jason2 για την οποία συνείσφερε με ειδική μέθοδο στην βαθμονόμηση του νέου δορυφόρου μέσω της διασταύρωσης των μετρήσεων. Ο δορυφόρος Jason2 αποτέλεσε τον τρίτο αλτιμετρικό δορυφόρο, ο οποίος λειτούργησε από τον Ιούνιο του 2008 έως τον Οκτώβριο του 2019. Ο δορυφόρος Jason2 είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας 4 οργανισμών , της NASA, του CNES, του NOAA και του EUMETSAT. Τα παραγόμενα προϊόντα από τις αποστολές αυτές υποστηρίζουν πολλές εφαρμογές και τομείς που έχουν χρήση τόσο για κράτη όσο και για εμπορικούς σκοπούς μεταξύ απλών χρηστών. Συγκεκριμένα μερικοί τομείς που ωφελούνται άμεσα είναι η κλιματική έρευνα, η ανίχνευση τροπικών κυκλώνων, η καθοδήγηση των πλοίων σε ωκεανούς, οποιαδήποτε τεχνική εργασία όπως εξορύξεις ή δημιουργία υποδομών σε ωκεανούς, αλιεία, μελέτες για κοραλλιογενείς υφάλους και ανίχνευση συντριμμιών ή επικίνδυνων υλικών. Τέλος είναι απαραίτητα δεδομένα για τη πρόγνωση του καιρού για δημόσια ασφάλεια και για εμπορικούς σκοπούς.

2.2 ΟΙ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ JASON-3 ΚΑΙ SENTINEL-3

Η αποστολή Jason 3 ή Joint Altimetry Satellite Oceanography Network 3 είναι όπως και οι προαναφερθείσες αποστολές το αποτέλεσμα της συνεργασίας των οργανισμών NASA, NOAA, EUMETSAT, CNES. Σκοπός της αποστολής είναι η παροχή δεδομένων που αφορούν την αύξηση της στάθμης των θαλασσών, τη θερμοκρασία της θαλάσσιας επιφάνειας. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα του NOAA, ο δορυφόρος μετράει το ίδιο σημείο ανά διαστήματα 9.9 ημερών, με κλίση 66.05 μοίρες, απόγειο 1380km, περίγειο 1328km. Όπως και οι προηγούμενες αποστολές διαθέτει ένα αλτίμετρο ραντάρ, ένα ραδιόμετρο μικροκυμάτων, τεχνολογία GPS, τα συστήματα SLR/DORIS, ενώ στόχος της αποστολής είναι ο υπολογισμός της παγκόσμιας στάθμης των ωκεανών και των θαλασσών κάθε 10 μέρες με ακρίβεια των μερικών εκατοστών, ώστε να διασφαλιστεί η συνέχεια των δεδομένων από τις προηγούμενες αποστολές. Είναι ήδη σε τροχιά η αντικατάσταση του μέσω του Jason CS ο οποίος μετονομάστηκε σε Sentinel 6 Michael Freilich προς τιμή του πρώην διευθυντή της NASA.

Η αποστολή Sentinel 3 αποτελεί μέρος του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus και κατασκευάστηκε από την Ευρωπαϊκή διαστημική υπηρεσία. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της ESA, ο δορυφόρος λειτουργεί σε διπλή συχνότητα Ku και C με σκοπό να αντλήσει την διόρθωση της ιονόσφαιρας. Ο τύπος των αρχείων είναι ο Standard Archive Format for Europe, ενώ τα αρχεία που περιέχουν μετρήσεις είναι σε format netCDF. Ένα αρχείο επιπέδου 2 περιέχει τα εξής αρχεία, ένα μειωμένο αρχείο δεδομένων που περιέχει ένα υποσύνολο των βασικών παραμέτρων της μπάντας 1Hz Ku, ένα πρότυπο αρχείο δεδομένων που περιέχει τις βασικές παραμέτρους της μπάντας Ku και της μπάντας C και ένα ενισχυμένο αρχείο που περιέχει τις παραμέτρους της μπάντας Ku και C μαζί με τις κυματομορφές και τα δεδομένα για την επεξεργασία των δεδομένων. Υπάρχουν 3 τύποι δεδομένων, συγκεκριμένα τα level 0, τα οποία είναι τα ακατέργαστα δεδομένα απευθείας από το δορυφόρο και τα οποία δεν είναι διαθέσιμα στους τελικούς χρήστες, τα δεδομένα επιπέδου 1 που περιέχουν τις διορθώσεις για τα ίδια τα όργανα και τα level 2 που περιέχουν τις διορθώσεις για τα γεωφυσικά φαινόμενα. Ο δορυφόρος Sentinel 3 φέρει ένα διπλής συχνότητας αλτίμετρο, το οποίο αντλεί τις κατασκευαστικές του πληροφορίες από τις αποστολές Envisat, Cryosat και Jason2 και ονομάζεται SRAL, ένα ραδιόμετρο μικροκυμάτων (MWR) για τη διόρθωση της υγρής τροπόσφαιρας, ένα πακέτο εξοπλισμού για την ακριβή καταγραφή τροχιάς που περιλαμβάνει ένα σύστημα GNSS, ένα σύστημα DORIS και έναν ανακλαστήρα laser (Laser RetroReflector).

2.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ 0 ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ SENTINEL-3

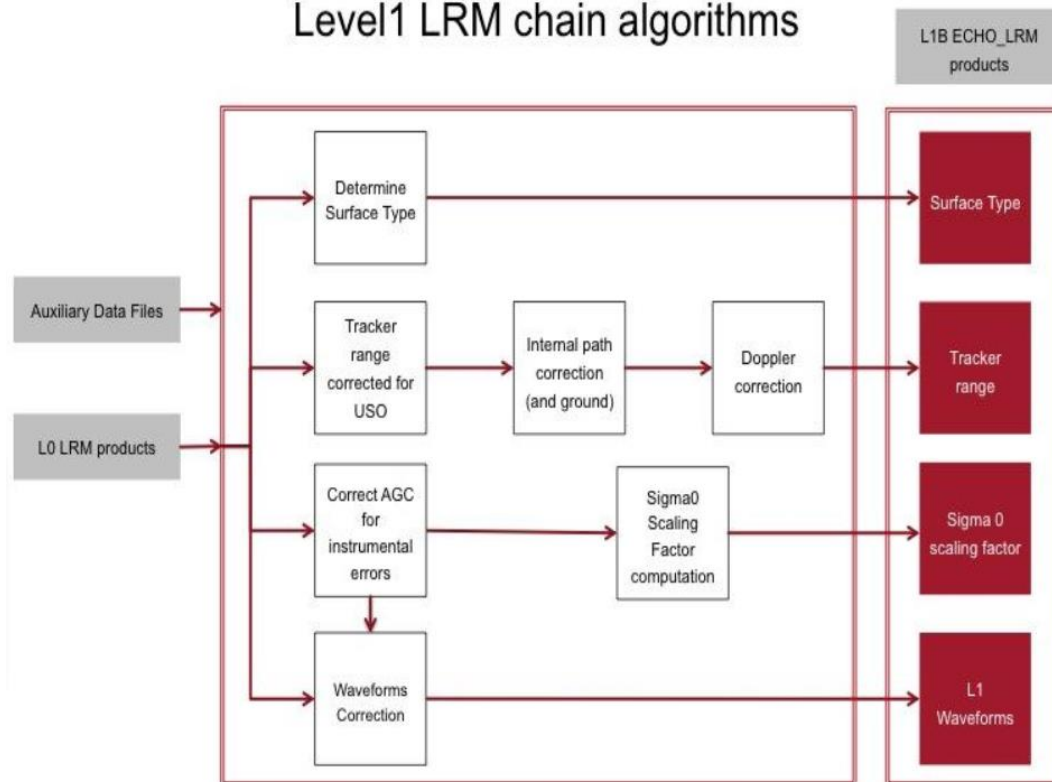
Σύμφωνα με τον ιστότοπο του προγράμματος Copernicus, περιλαμβάνουν 3 τύπους δεδομένων, τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης, τα οποία διαχωρίζονται με βάση τη χρονική διαθεσιμότητα τους και την χωρική ανάλυση, συγκεκριμένα τα NRT (Near

Real Time) που παρέχονται έως λίγες ώρες από την καταγραφή, τα δεδομένα STC (Short Time Critical) που παρέχονται μια ημέρα μετά τη καταγραφή και τα δεδομένα NTC (Non Time Critical) που διατίθενται ένα μήνα αργότερα και τέλος για τα δεδομένα επιπέδου 0 διατίθενται σε πλήρη ανάλυση και διακριτική ικανότητα στα 300 μέτρα ανά pixel (SSP), τα δεδομένα που αφορούν τον εξοπλισμό για την ραδιομετρική βαθμονόμηση και τη φασματική βαθμονόμηση, τα οποία είναι διαθέσιμα σε NRT και δεν είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Τα παραπάνω δεδομένα διαχωρίζονται σε δεδομένα CAL1 και CAL2. Τέλος υπάρχουν διαφορετικά δεδομένα επιπέδου 0 για τη λειτουργία LRM και τη λειτουργία SAR και για τη μπάντα που εκπέμπεται. Ο αλγόριθμος που χειρίζεται τη χρονολόγηση των μετρήσεων θα μετατρέπει τις ενσωματωμένες χρονικές ενδείξεις σε χρόνο GPS, θα αναφέρει τον χρόνο της μέτρησης στη χρονική στιγμή που το σήμα ανακλάται από την επιφάνεια, θα αναφέρει την χρονική ένδειξη της μέτρησης στο μέσο του κύκλου εντοπισμού και τέλος θα μετατρέψει το χρόνο σε UTC με ημερομηνία αναφοράς την 1-1-2000 η οποία μετατροπή περιλαμβάνει και τα άλματα δευτερολέπτων. Οι συντεταγμένες του γεωγραφικού μήκους, γεωγραφικού πλάτους και υψόμετρο παρέχονται από την ομάδα ακριβούς εντοπισμού στο ερευνητικό κέντρο ESOC στο Ντάρμστατ της Γερμανίας. Συγκεκριμένα το αρχείο εντοπισμού περιλαμβάνει τον εντοπισμό του δορυφόρου σε συνδυασμό με τον χρόνο UTC, ενώ η διαδικασία επεξεργασίας επιπέδου 1 παρεμβάλλει τη θέση στον ακριβή χρόνο των μετρήσεων και με αυτό τον τρόπο υπολογίζει την ακριβή θέση του συστήματος δορυφόρου και εδαφοψηφίδας χρονικά.

2.2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ 1 ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ SENTINEL-3

Τα δεδομένα επιπέδου 1 του δορυφόρου σύμφωνα με τον ιστότοπο του προγράμματος Copernicus χωρίζονται σε τρεις αλυσίδες επεξεργασίας. Η πρώτη είναι η LRM (Low Resolution Mode), η οποία περιλαμβάνει τον καθορισμό της επιφάνειας πρόσπτωσης, διόρθωση των αποστάσεων για μετατόπιση της συχνότητας USO (Ultra Stable Oscillator) υπολογισμός της διόρθωσης Doppler, διόρθωση του εξοπλισμού AGC (Automatic Gain Control) για σφάλματα των οργάνων, ο υπολογισμός του συντελεστή κλίμακας σ0, ο οποίος χρησιμοποιείται στο επίπεδο 2 της επεξεργασίας για τον υπολογισμό των υπολειπόμενων σφαλμάτων (residuals) της οπισθοσκέδασης και τη διόρθωση των κυματομορφών.

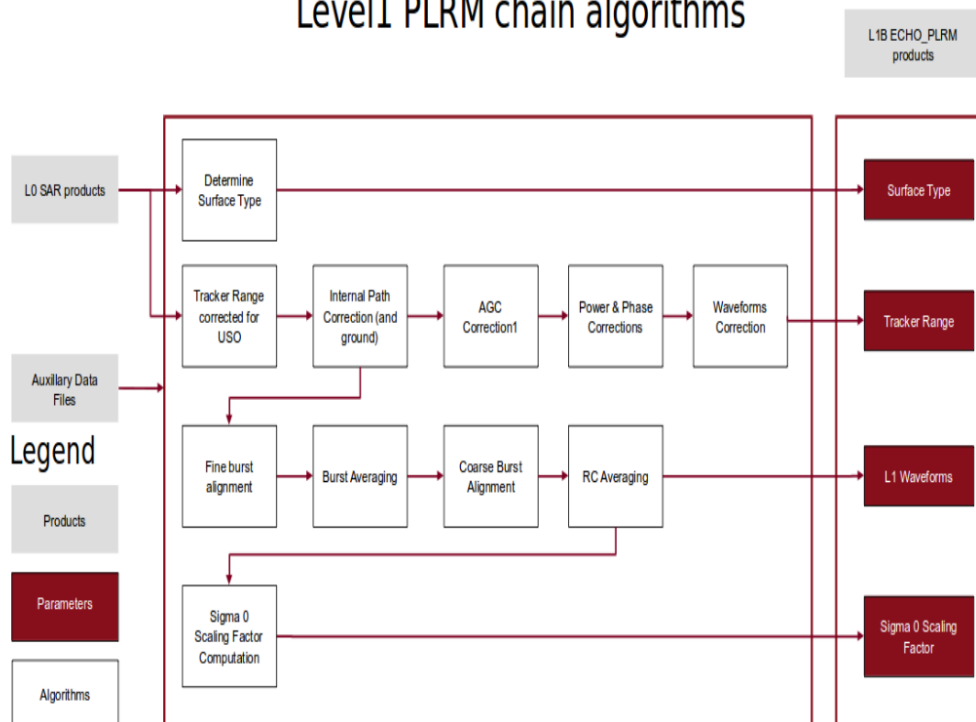
Level1 LRM chain algorithms



Εικόνα 2.1 Η αλυσίδα των αλγορίθμων LMR του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.



Level1 PLRM chain algorithms



Εικόνα 2.2. Η αλυσίδα των αλγορίθμων PLMR του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.

Σύμφωνα με τον ιστότοπο του προγράμματος Copernicus οι βασικοί αλγόριθμοι της αλυσίδας επιπέδου 1 SAR Ku περιλαμβάνουν τον καθορισμό της επιφάνειας πρόσπτωσης, τη διόρθωση των αποστάσεων για σφάλμα εσωτερικής διαδρομής, την εφαρμογή διορθώσεων ισχύος και φάσης στο σήμα, τη διόρθωση των κυματομορφών, τον υπολογισμό της θέσης των επιφανειών, τον καθορισμό της κατεύθυνσης της ακτίνας Doppler, τη παραγωγή των ακτινών Doppler στον τομέα των συχνοτήτων μέσω μετασχηματισμών FFT, τον υπολογισμό και τη εφαρμογή των διορθώσεων Doppler, τον υπολογισμό και την εφαρμογή των διορθώσεων των κεκλιμένων αποστάσεων, τη συμπίεση της κυματομορφής, τη διόρθωση της ευθυγράμμισης του ιχνηλάτη, τον υπολογισμό του συντελεστή κλίμακας σ_0 , ο οποίος χρησιμοποιείται στο επίπεδο 2 της επεξεργασίας για τον υπολογισμό των καταλοίπων της οπισθοσκέδασης και τέλος τον υπολογισμό όλων των ακτινών Doppler που αντιστοιχούν στην ίδια επιφάνεια.

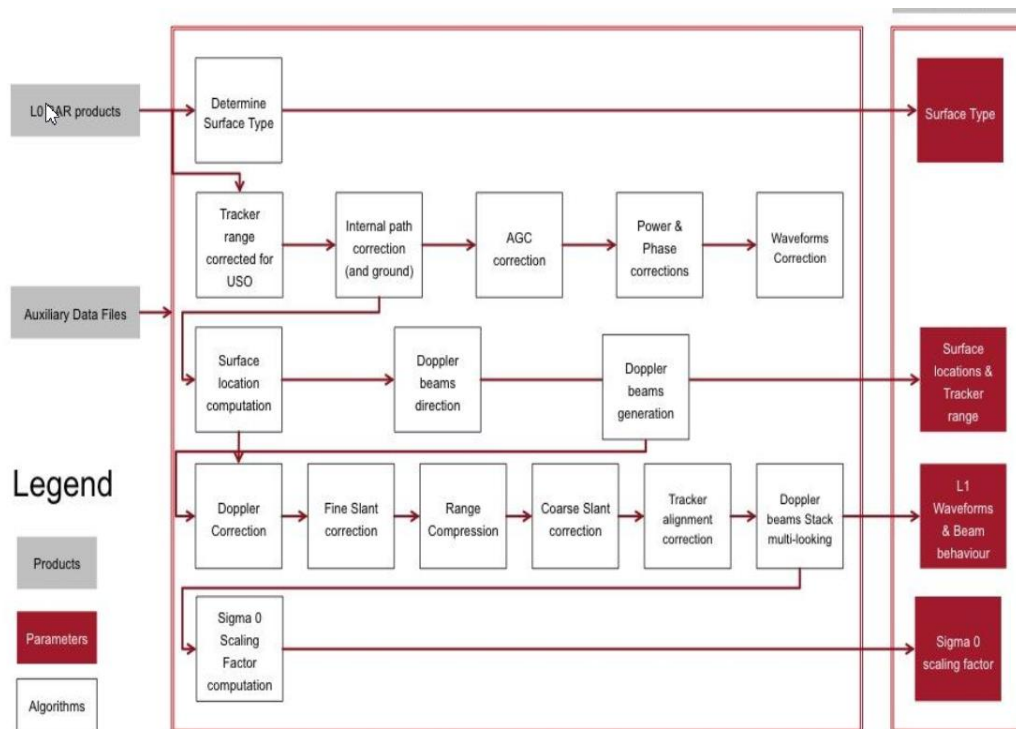


Figure 3: Level-1 SAR_Ku chain (Credit: isardSAT)

Γράφημα 2.3 Η αλυσίδα των αλγορίθμων SAR_Ku του επιπέδου 1 επεξεργασίας για τον δορυφόρο Sentinel 3. Πηγή: Ιστότοπος του προγράμματος Copernicus.

2.2.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ 2 ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ SENTINEL-3.

Η πρώτη επεξεργασία στα δεδομένα επιπέδου 2 είναι η εφαρμογή αλγορίθμων που θα μετατρέψουν τις κυματομορφές και θα παράγουν μετρήσεις αποστάσεων, τα υπολειπόμενα σφάλματα της οπισθοσκέδασης, την ταχύτητα του ανέμου πάνω από

τον ωκεανό και το κρίσιμο ύψος κυματισμού. Υπάρχουν διαφορετικοί αλγόριθμοι που εφαρμόζονται ανάλογα τον τύπο του εδάφους για ωκεανό, για παγόβουνα και για θαλάσσιο πάγο. Η δεύτερη επεξεργασία αφορά την εφαρμογή όλων των διορθώσεων στις μετρήσεις για γεωφυσικές παραμέτρους. Οι αλγόριθμοι χωρίζονται περαιτέρω σε 3 τύπους, τους αλγόριθμους που παράγουν γεωφυσικές παραμέτρους χωρισμένες σε διακριτά χρονικά διαστήματα, τους αλγόριθμους που υπολογίζουν το επιστρεφόμενο σήμα και τις φυσικές παραμέτρους που το αφορούν και τέλος τους αλγόριθμους που πραγματοποιούν αλτιμετρικές και ραδιομετρικές γεωφυσικές επεξεργασίες. Γίνεται περαιτέρω διαχωρισμός των αποτελεσμάτων για δεδομένα που αφορούν τη ξηρά και την αρμοδιότητα έχει η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία, ενώ για τα δεδομένα του ωκεανού και θαλασσών αρμόδιος οργανισμός είναι ο EUMETSAT.

2.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Η διαδικασία της βαθμονόμησης περιλαμβάνει την αξιολόγηση του αλτιμέτρου SRAL, μέσω της αναφοράς κυκλικής παρακολούθησης. Αυτό γίνεται μέσω 3 λειτουργιών βαθμονόμησης CAL1, CAL2 και AUTOCAL καθώς και των θερμοκρασιών του δορυφόρου μιας πλήρους κυκλικής περιόδου 27 ημερών.

Η διόρθωση CAL1 για τη χρονική καθυστέρηση είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει τον υπολογισμό του υψομέτρου της θαλάσσιας στάθμης. Οι κυματομορφές CAL2 χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν τις στρεβλώσεις που δημιουργεί η λειτουργία του συστήματος μεταφοράς. Οι βασικοί στόχοι των εργασιών βαθμονόμησης και αξιολόγησης των δεδομένων είναι η αξιολόγηση της εγκυρότητας και της ποιότητας των δεδομένων του αλτιμετρικού δορυφόρου, η παρακολούθηση της εγκυρότητας κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής δραστηριότητας του δορυφόρου και η συνεχής βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων.

Η διαδικασία της αξιολόγησης περιλαμβάνει τη ποσοτικοποίηση του σφάλματος για τα δεδομένα επιπέδου 1 και 2, την αξιολόγηση έναντι επιτόπιων μετρήσεων, την αξιολόγηση σε συνδυασμό με άλλες αλτιμετρικές αποστολές, σύγκριση κυματισμών και ανέμων με τα στοιχεία από μοντέλα, αξιολόγηση των θαλάσσιων πάγων με τον δορυφόρο CRYOSAT, αξιολόγηση της εσωτερικής διαδικασίας βαθμονόμησης, μακροχρόνια παρακολούθηση των γεωφυσικών δεδομένων για συνοχή και ποιότητα.

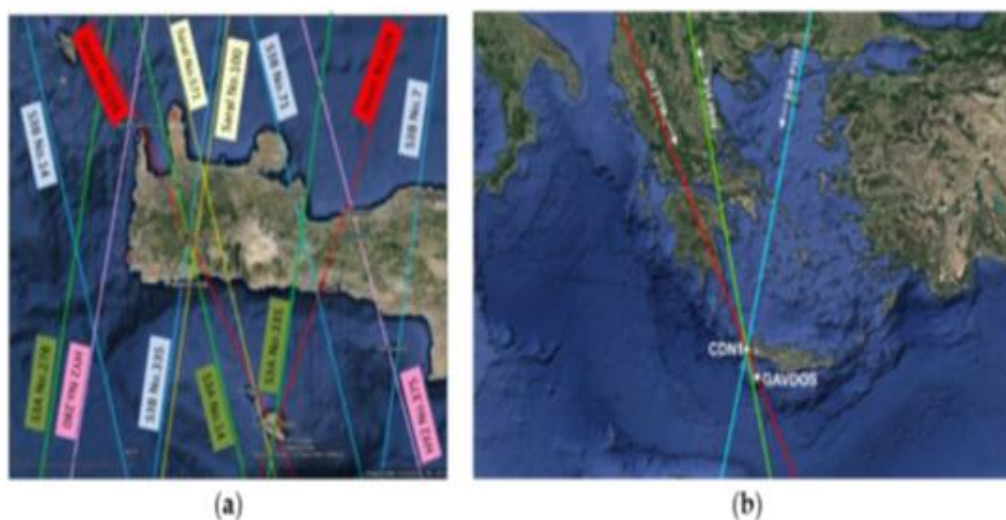
2.4 ΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ JASON-3

Ο δορυφόρος Jason 3 πέρασε από 2 λειτουργικές φάσεις, την φάση της επαλήθευσης η οποία διήρκησε 9 μήνες και την επιχειρησιακή. Ο δορυφόρος πέρασε τη διαδικασία βαθμονόμησης και αξιολόγησης αμέσως μόλις βρέθηκε σε λειτουργική κατάσταση και η τροχιά του σταθεροποιήθηκε και τα όργανα του λειτουργούσαν σε ικανοποιητικό βαθμό. Αυτή η φάση περιλάμβανε ένα σύνολο ποιοτικών ελέγχων μέσω της αναφοράς κυκλικής παρακολούθησης, της αξιολόγησης όλων των λειτουργιών και συστημάτων, την απόλυτη γεωαναφορά του και βαθμονόμηση με χρήση επιτόπιων μετρήσεων αλλά και σε συνδυασμό με άλλες αποστολές. Τα στάδια της πρώτης φάσης διαχωρίζονται με βάση τα δεδομένα και αρχικά βαθμονομήθηκαν και αξιολογήθηκαν όλα τα δεδομένα που είναι σχεδόν άμεσα διαθέσιμα OGDR (Operational Geophysical Data Records) και σε δεύτερο στάδιο αυτά που γίνονται διαθέσιμα έπειτα από επεξεργασία IGDR (Intermediate Geophysical Data Records) και GDR (Geophysical Data Records). Η επιχειρησιακή φάση ξεκίνησε όταν όλα τα δεδομένα και οι αλγόριθμοι είχαν αξιολογηθεί, ενώ είχαν εφαρμοστεί και όλες οι απαραίτητες αλλαγές οι οποίες φέρνουν την αποστολή στην ίδια επιχειρησιακή

ικανότητα με τις άλλες αλτιμετρικές αποστολές. Σε αυτό το στάδιο πλέον παράγονται όλα τα προϊόντα και γίνεται σε τακτά διαστήματα έλεγχος Cal/Val με σκοπό την διατήρηση της ποιότητας και την αποφυγή παρεκκλίσεων από τη λειτουργική κατάσταση.

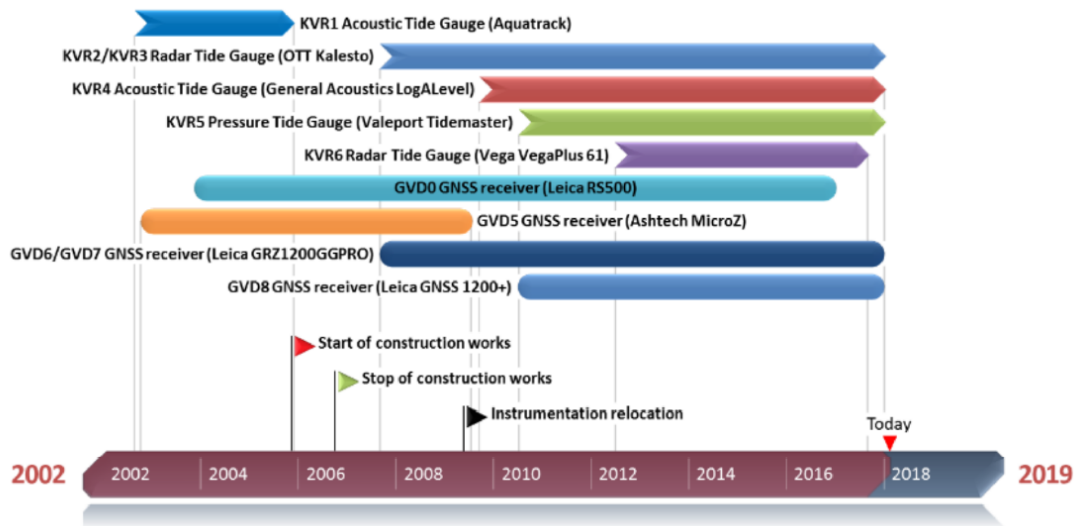
2.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ CAL/VAL ΣΤΟΝ ΜΟΝΙΜΟ ΣΤΑΘΜΟ ΣΤΗ ΓΑΥΔΟ

Σύμφωνα με τον Μέρτικα (2018), ο σταθμός βαθμονόμησης της Γαύδου συνεισφέρει διπλό έργο στη διαδικασία της βαθμονόμησης και αξιολόγησης των αλτιμετρικών δορυφόρων, καθώς η θέση του επιλέχθηκε γιατί αποτελεί σημείο τομής των τροχιακών επιπέδων για τις αλτιμετρικές αποστολές. Αυτό καθιστά δυνατή τη σύγκριση των μετρήσεων των δορυφόρων με ακριβείς μετρήσεις πεδίου (ground truth) αλλά και σε συνδυασμό μεταξύ τους, το οποίο είναι πολύτιμο για τη διαδικασία βαθμονόμησης και αξιολόγησης των μετρήσεων.



Εικόνα 2.4 Τα τροχιακά επίπεδα των δορυφόρων Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Cryosat-2.

Η Γαύδος αποτελεί μια εγκατάσταση, η οποία καταμετρά την απόλυτη θαλάσσια στάθμη και εξυπηρετεί τη διαδικασία της βαθμονόμησης των δορυφόρων. Η τοποθεσία είναι πολύ κοντινή στο ίχνος της τροχιάς στο έδαφος της σειράς δορυφόρων Jason. Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης ξεκίνησε το 2001, ενώ η λειτουργία ξεκίνησε το 2004. Αρχικά εγκαταστάθηκαν 2 δέκτες GNSS, 2 παλιρροιογράφοι, ένας φάρος συστήματος DORIS, ένας αναμεταδότης μικροκυμάτων και μετεωρολογικοί αισθητήρες. Στη συνέχεια προστέθηκε εξοπλισμός για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των αποστολών.

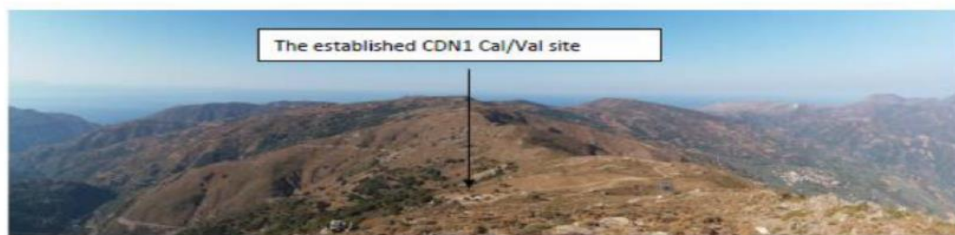


Εικόνα 2.5 Ο εξοπλισμός που προστέθηκε στο σταθμό βαθμονόμησης της Γαύδου χρονολογικά.

Στα σημαντικά επιτεύγματα του μόνιμου σταθμού της Γαύδου είναι η απόλυτη βαθμονόμησης της σειράς Jason, ενώ το 2016 ο Ευρωπαϊκός δορυφόρος Sentinel 3A βαθμονομήθηκε απόλυτα με βάση δύο συγκεκριμένα περάσματα πάνω από το σταθμό.

2.5.1 Ο ΣΤΑΘΜΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΗ CDN1.

Άλλο ένα σημείο στην ορεινή περιοχή της Κρήτης έχει επιλεγεί από την Ευρωπαϊκή διαστημική υπηρεσία καθώς αποτελεί το σημείο τομής των τροχιών της σειράς Sentinel 3 και Sentinel 6.



(a)



(b)

Εικόνα 2.6 Ο σταθμός βαθμονόμησης.

Η τοποθεσία επιθεωρήθηκε το 2014 και μέχρι το 2015 ήταν πλήρως λειτουργική για τη διαδικασία βαθμονόμησης.

Site	Latitude (Deg)	Longitude (Deg)	Ell.Height (m)	$\sigma(\text{lat})$ (mm)	$\sigma(\text{lon})$ (mm)	$\sigma(\text{h})$ (mm)	Time Span (Years)
CDN0	N 35 20 16.024403	E 23 46 46.854649	1049.5183	1.9	2.5	7.6	2014.49–2018.44
CDN2	N 35 20 16.291142	E 23 46 46.829187	1050.4080	1.7	1.9	8.0	2016.40–2018.44
CRS1	N 35 18 12.649002	E 23 31 17.263955	21.2075	2.0	1.8	5.4	2008.18–2018.44
GVD0	N 34 50 18.578282	E 24 6 31.908077	123.8719	2.2	1.6	5.6	2003.04–2017.35
GVD7	N 34 50 52.744567	E 24 7 11.205655	20.1685	1.5	1.8	5.8	2009.37–2018.44
GVD8	N 34 50 52.612206	E 24 7 11.399223	22.2757	1.6	1.9	6.2	2010.50–2018.44
IMS1	N 35 22 12.547506	E 24 28 20.982681	35.9138	1.8	1.6	5.0	2010.19–2015.19
MEN2	N 35 40 12.897887	E 23 44 26.308798	265.7064	2.9	3.1	5.9	2013.26–2018.25
RDK1	N 35 11 15.375737	E 24 19 6.539699	25.5337	3.7	1.9	9.0	2009.18–2017.44
SEL1	N 35 21 14.334437	E 23 50 22.305407	1038.0693	1.9	2.1	4.7	2009.52–2013.80
TUC2	N 35 31 59.482697	E 24 4 14.015013	160.8894	2.0	1.9	4.6	2004.47–2018.44

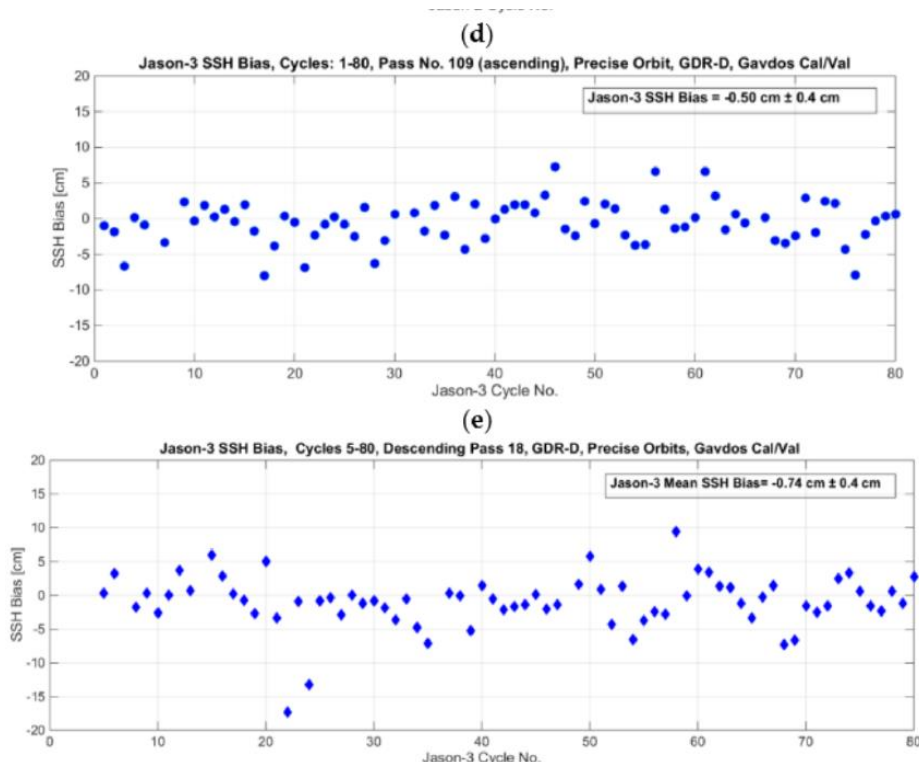
Εικόνα 2.7 Το δίκτυο σταθμών GNSS στην Κρήτη. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

Site	vN (m/Year)	vE (m/Year)	vUP (m/Year)	σvN (m)	σvE (m)	σvUP (m)	Time Span (Years)
CDN0	-0.0129	0.0092	0.0009	0.0003	0.0005	0.0015	2014.49–2018.44
CDN2	-0.0129	0.0063	0.0002	0.0007	0.0006	0.0036	2016.40–2018.44
CRS1	-0.0124	0.0068	-0.0011	0.0002	0.0001	0.0003	2008.18–2018.44
GVD0	-0.0128	0.0081	0.0000	0.0002	0.0001	0.0004	2003.04–2017.35
GVD7	-0.0138	0.0086	-0.0004	0.0001	0.0002	0.0005	2009.37–2018.44
GVD8	-0.0143	0.0082	-0.0007	0.0002	0.0002	0.0007	2010.50–2018.44
IMS1	-0.0131	0.0078	-0.0004	0.0002	0.0002	0.0006	2010.19–2015.19
MEN2	-0.0146	0.0058	-0.0001	0.0005	0.0005	0.0007	2013.26–2018.25
RDK1	-0.0128	0.0081	0.0010	0.0004	0.0002	0.0009	2009.18–2017.44
SEL1	-0.0112	0.0077	-0.0010	0.0004	0.0005	0.0009	2009.52–2013.80
TUC2	-0.0124	0.0075	-0.0006	0.0001	0.0001	0.0002	2004.47–2018.44

Εικόνα 2.8 Η ταχύτητα και τα σφάλματα του δικτύου σταθμών στη Κρήτη. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

2.5.2 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων για τους δορυφόρους. Η διασταύρωση γίνεται μέσω μιας τυποποιημένης μεθόδου και τα δεδομένα των δορυφόρων (μετρήσεις) συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές που έχουν μετρηθεί στο έδαφος από τον σταθμό βαθμονόμησης. Η θαλάσσια περιοχή όπου πραγματοποιείται η βαθμονόμηση έχει επιλεγεί με μεγάλη προσοχή για την εφαρμογή του γεωειδούς και έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα βαθυμετρίας και επιτόπιες μετρήσεις, τα οποία στοιχεία χρησιμοποιούνται ως ground truth τιμές για τις μετρήσεις του δορυφόρου.

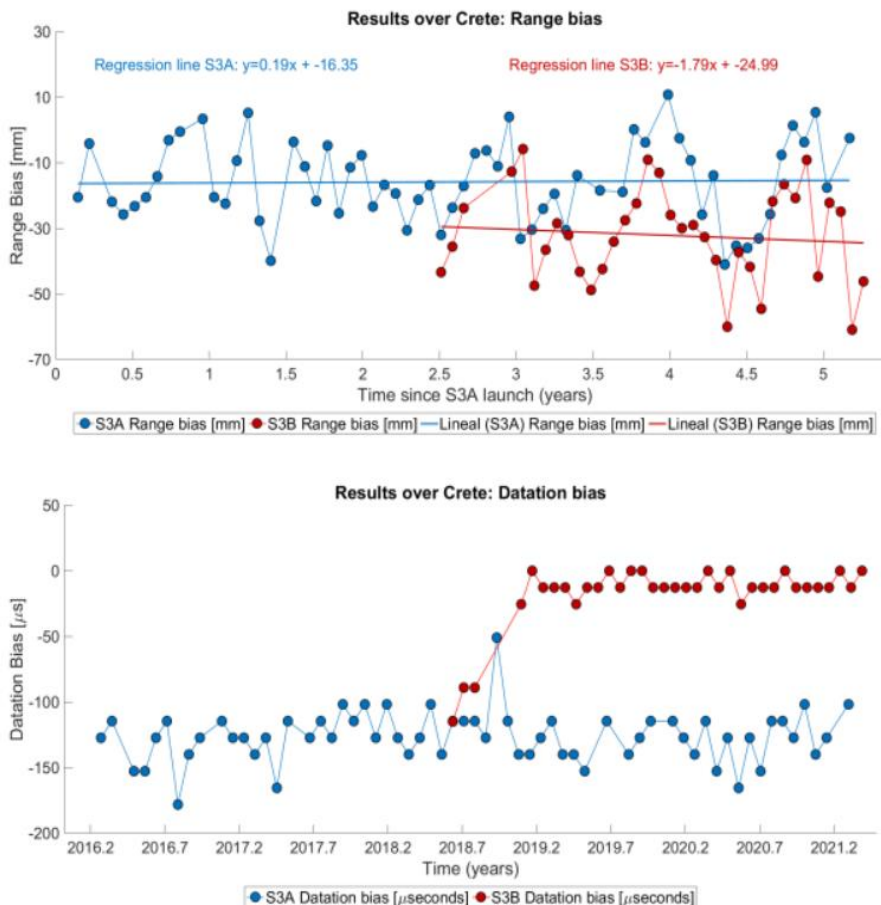


Γράφημα 2.9 Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του δορυφόρου Jason 3 για την απόκλιση του υψομέτρου της θαλάσσιας στάθμης. Πηγή: Στέλιος Μέρτικας, 2018

Το Νοέμβριο του 2016 οι αποστολές Sentinel 3 (κύκλος 11) και Jason 3 (κύκλος 28) βρέθηκαν σε ένα σπάνιο γεγονός πάνω από τον σταθμό με διαφορά μόνο μερικών δευτερολέπτων, συνεπώς μέτρησαν την ίδια περιοχή και οι συνθήκες ήταν ίδιες για τους δύο δορυφόρους. Η απόκλιση της απόστασης για την αποστολή Sentinel3 μετρήθηκε στα 20mm, ενώ για τον δορυφόρο Jason3 μετρήθηκε στα 45mm. Λαμβάνουμε λοιπόν σαν αποτέλεσμα μια διαφορά 25mm ανάμεσα στις μετρήσεις των δύο δορυφόρων.

2.6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΥΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥΣ SENTINEL-3A ΚΑΙ SENTINEL-3B

Σύμφωνα με τον ιστότοπο του προγράμματος Copernicus, τα αποτελέσματα των περασμάτων των δορυφόρων πάνω από τη Κρήτη δίνουν για τον δορυφόρο Sentinel3A μια αρνητική μέτρηση της απόστασης 15.8mm και σφάλμα χρονομέτρου της τάξης των 126.52μsec, ενώ για το δορυφόρο Sentinel3B μετράται αρνητική απόσταση 32.14mm μικρότερη από την αναμενόμενη και σφάλμα χρονομέτρησης της τάξης των -17.84μsec.



Γράφημα. 2.10 Το συνδυαστικό σφάλμα της απόστασης και του χρονομέτρου για τους δορυφόρους Sentinel 3A και Sentinel3B.

2.7 Η ΔΟΜΗ ΜΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ (QUALITY REPORT) ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΟΡΥΦΟΡΟ SENTINEL_3B

Σύμφωνα με τον ιστότοπο του οργανισμού Copernicus, μια αναφορά ποιότητας συνοψίζει την αξιολόγηση ενός αλτιμετρικού συστήματος και χωρίζεται σε τμήματα με βάση το όργανο. Τα Quality Reports διαχωρίζονται στις εξής πέντε κατηγορίες.

- Την αξιολόγηση του αλτιμέτρου SRAL(Sentinel-3 Radar Altimeter), όπου συγκεκριμένες παράμετροι παρακολουθούνται και αναλύονται ώστε να χαρακτηριστεί η επίδοση του, κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η πρώτη παράμετρος είναι η ανταπόκριση του σημείου-στόχου (CAL-1), ενώ η δεύτερη είναι η λειτουργία μεταφοράς του οργάνου (CAL-2).
- Το ραδιόμετρο μικροκυμάτων αξιολογείται σε δύο διακριτά χρονικά σημεία. Η σύντομης διάρκειας αξιολόγηση εστιάζει στην εσωτερική βαθμονόμηση και στη θερμοκρασία της φωτεινότητας στα NRT δεδομένα. Η μεσοπρόθεσμη αξιολόγηση βασίζεται στην εσωτερική βαθμονόμηση και στις γεωφυσικές παραμέτρους.
- Η αξιολόγηση των δεδομένων του ωκεανού, εστιάζει στα θαλάσσια δεδομένα επιπέδου 2 με την παρακολούθηση των παραμέτρων της θαλάσσιας στάθμης, το σημαντικό υψόμετρο κυματισμών, τα υπολειπόμενα σφάλματα οπισθοσκέδασης και την θαλάσσια ταχύτητα του ανέμου.
- Η αναφορά των κυματισμών και του υψομέτρου περιλαμβάνει τη παρακολούθηση των παραμέτρων σ_{θ} , τη ταχύτητα ανέμου, το σημαντικό υψόμετρο κυματισμών. Τα διαθέσιμα δεδομένα συγκρίνονται με αυτά από διαθέσιμα μοντέλα και με επιτόπιες μετρήσεις των μεγεθών.
- Η αναφορά των επίγειων και θαλάσσιων πάγων περιλαμβάνει την αξιολόγηση των δεδομένων επιπέδου 2 που αφορούν τα παγόβουνα και το θαλάσσιο πάγο. Χρησιμοποιούνται τα NTC (Non Time Critical) δεδομένα.
- Η αναφορά των επίγειων υδάτων αξιολογεί τα δεδομένα επιπέδου 2 που αφορούν τα επίγεια ύδατα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γίνεται σαφές πως στις αποστολές που μελετήθηκαν λειτουργούν μεγάλο πλήθος οργάνων και αλγορίθμων, οι οποίοι πρέπει να βαθμονομηθούν με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και να καταγράφεται η κατάσταση και τα αποτελέσματα λεπτομερώς σε αναφορές, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τη υγεία και την ποιότητα των δεδομένων του αλτιμετρικού δορυφόρου. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η διαδικασία βαθμονόμησης των συστημάτων μέσω επίγειων μόνιμων σταθμών, οι οποίοι παρέχουν πολύτιμα δεδομένα απόλυτης ακρίβειας με τα οποία μπορούν να συγκριθούν οι μετρήσεις των αλτιμετρικών συστημάτων και να φανούν τυχόν σφάλματα ή ανακρίβειες στις μετρήσεις. Εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση δεδομένων από διαφορετικές αποστολές, οι οποίες έχουν ταυτόχρονο πέρασμα από τους σταθμούς ελέγχου και βαθμονόμησης, συνεπώς αρκετές από τις παραμέτρους που εισάγουν σφάλμα είναι κοινές, συνεπώς μπορεί να γίνει ευκολότερα η σύγκριση της σχετικής ακρίβειας ανάμεσα σε διαφορετικά συστήματα. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η συνεχής μελέτη και παρακολούθηση της πορείας και της υγείας του συστήματος και μια πηγή δεδομένων είναι οι αναφορές ποιότητας (quality reports) που είναι διαθέσιμες για κάθε σύστημα και για κάθε επιμέρους τμήμα του δορυφόρου. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκε η εφαρμογή των μετρήσεων στις βέλτιστες δυνατές συνθήκες με σκοπό την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ακρίβειας, ώστε να βαθμονομηθεί σωστά και να γίνουν γνωστές τυχόν παρεκκλίσεις των μετρήσεων.

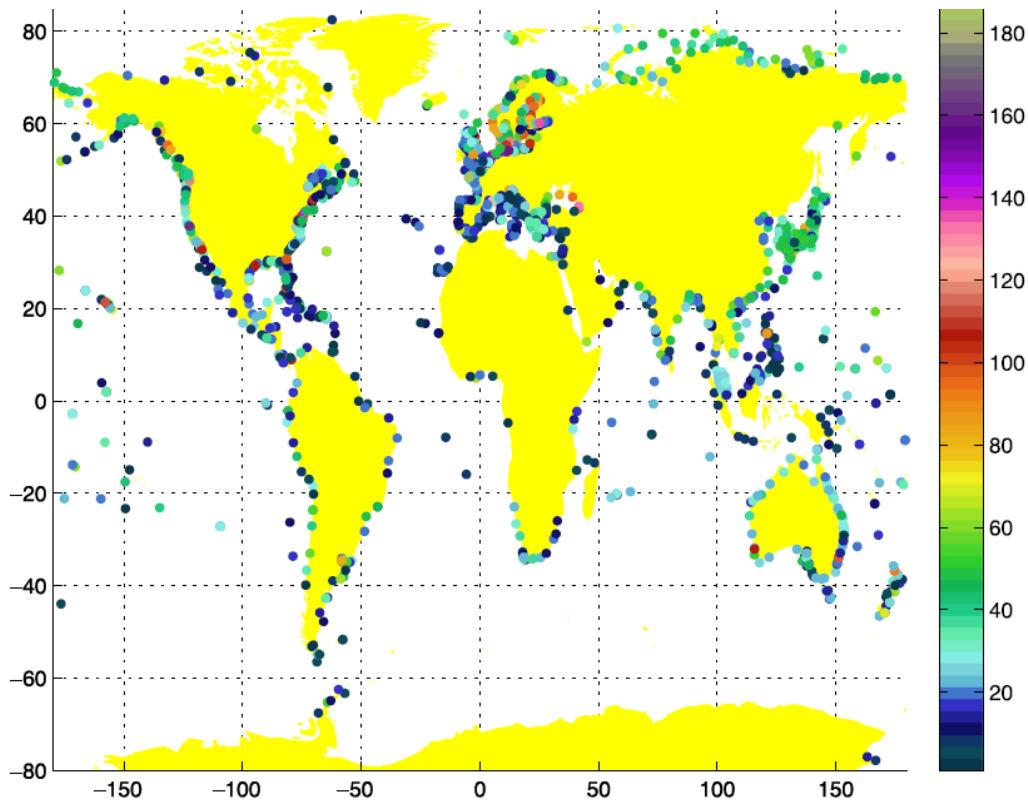
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Σε προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα των δορυφορικών αποστολών αλτιμετρίας για τη καταγραφή τη θαλάσσιας στάθμης και για πληθώρα άλλων εφαρμογών. Έχει παρατηρηθεί πως με τα υπάρχοντα συστήματα και τους αλγόριθμους εφαρμογής το σφάλμα της εκτίμησης της θαλάσσιας στάθμης ανεβαίνει εκθετικά όσο πλησιάζουμε στην ακτή. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να εξεταστούν οι λόγοι που συμβαίνει αυτό, ποιες είναι οι πιθανές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν και η προσαρμογή των δεδομένων που έχουν καταγραφεί για τις θαλάσσιες περιοχές κοντά στην ακτή στα πραγματικά δεδομένα που μπορούν να καταγραφούν από παλιρροιογράφους. Θα γίνει αναφορά σε υπάρχουσες αποστολές που πρωτοπόρησαν στη βελτίωση του συγκεκριμένου σφάλματος και στις προοπτικές για το μέλλον.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τον Cipollini (2016), η καταγραφή της θαλάσσιας στάθμης με παλιρροιογράφους έχει αρχή στο Άμστερνταμ από το 1700, ενώ και σε άλλες μεγάλες πρωτεύουσες υπάρχουν εγγραφές παλιρροιών από τον 18^ο αιώνα και μετά, ενώ ο πρώτος αυτόματος παλιρροιογράφος χρονολογείται στο 1972 στην Αγγλία. Τα επόμενα χρόνια άρχισαν να καταγράφονται σε περισσότερες τοποθεσίες τα στοιχεία των παλιρροιών. Τα δεδομένα αυτά είναι διάσπαρτα σε αρκετές περιοχές του πλανήτη, όμως έχουν μειονεκτήματα τα οποία συνοψίζονται ως εξής σύμφωνα με τον Cipollini (2016)

- Αρκετοί παλιρροιογράφοι είναι στην στεριά είτε σε νησιά, πράγμα που περιορίζει τα δεδομένα για τα ωκεάνια ρεύματα. Επιπλέον αρκετοί από αυτούς είναι στο Βόρειο Ημισφαίριο.
- Τα δεδομένα δεν είναι συνεχή στη χρονική κλίμακα και πριν το 1960 είναι ελάχιστα έως ανύπαρκτα.
- Οι παλιρροιογράφοι είναι προσκολλημένοι στη στεριά η οποία όμως κινείται, λόγω της μετακίνησης του φλοιού και των μετακινήσεων τεκτονικών πλακών.
- Δεν υπάρχει ενιαίο σύστημα αναφοράς των υψομέτρων, παρότι έχει συσταθεί συνεπώς δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη αξιοποίηση πολλαπλών δεδομένων μαζί.

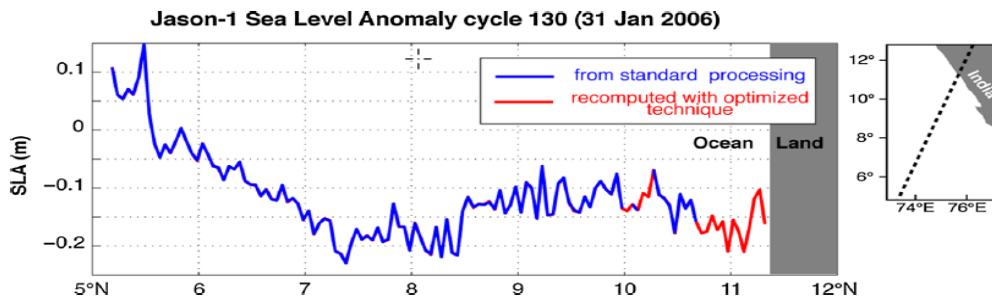


Εικόνα 3.1 Οι τοποθεσίες καταγραφής παλιρροιών και ο χρόνος της καταγραφής. Πηγή : Cirrollini (2016).

Από το 1933 και έπειτα έχουν καταγραφεί και είναι διαθέσιμα μέσω του οργανισμού PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) δεδομένα παλιρροιών από περισσότερες από 2000 τοποθεσίες. Από αυτές οι 289 καταγράφουν μέσω τεχνολογίας GPS τις κατακόρυφες μετακινήσεις, οι οποίες είναι απαραίτητη η γνώση τους, ώστε να μη καταγράφεται ως αλλαγή της θαλάσσιας στάθμης η μετακίνηση τη γήινου φλοιού.

3.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΣΩ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Cirrollini (2016) η αλτιμετρία παρέχει εδώ και πολλά έτη δεδομένα για την θαλάσσια στάθμη, την ταχύτητα του ανέμου και το κρίσιμο ύψος κυματισμών.



Γράφημα 3.2 Το μέγεθος SLA (Sea Level Anomalies) για το πέρασμα του δορυφόρου Jason-1 από τη θάλασσα στη στεριά. Πηγή : Cipollini (2016).

Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει τα δεδομένα που μαρκάρονται ως μη έγκυρα και εξαιρούνται από τις διαδικασίες της επεξεργασίας για τη συμβατική αλιμετρία. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την βελτίωση του παραπάνω προβλήματος είναι οι εξελιγμένοι αλγόριθμοι εντοπισμού και διορθώσεων και συγκεκριμένα τα Project PISTACH και COASTALT του CNES και τις ESA εστίασαν στη παραπάνω τεχνική. Το project X-TRACK εφαρμόζει τη τεχνική της παρακολούθησης και της προσαρμογής των παράκτιων δεδομένων.

ID	Produced by	Altimeter	Product level	Posting rate	Coverage	Download from	Comments
AVISO	CLS, CNES CNES	e1, tx, e2, en, j1, j2, c2 (LRM/PRLM), sa, h2	L2, L3, L4 also L4	1 Hz	Global + European regions + Arctic + SW Indian	AVISO+	Widely used reference dataset processed with standard techniques. Distribution of global, Mediterranean Sea, Black Sea products is migrating to CMEMS during 2016
CMEMS	CLS CNES	e1, tx, e2, en, j1, j2, c2 (LRM/PRLM), sa (s3a to be added soon)	L3 L3 for assimilation	1 Hz	Global + European regions	marine.copernicus.eu	Marine environment monitoring service of the EC/ESA Copernicus programme, providing products and services for all marine applications
PISTACH	CLS CNES	j2	L2	20 Hz	Global	AVISO+	<i>Experimental Jason-2 products for hydrology and coastal studies with specific processing. Will be discontinued at the end of 2016 in favour of PEACHI</i>
PEACHI	CLS CNES	sa, (j2 to be added soon)	L2	40 Hz	Global	AVISO+	<i>Experimental SARAL/AltiKa products including dedicated retracking and corrections leading to more accurate products for coastal zones, hydrology and ice. From 2017 expected to generate also j2 products</i>
X-TRACK	LEGOS-CTOH	tx, j1, j2, gfo, en	L2, L3	1 Hz 20 Hz (test)	23 regions	CTOH AVISO+	<i>Specific processing using improved data screening and latest corrections available (see Sect. 6)</i>
RADS	EUMETSAT, NOAA, TUDelft	gs, e1, tx, pn, e2, gfo, j1, n1, j2, c2, sa	L2	1 Hz	Global	TUDelft	Widely used dataset, mirrored by tens of sites worldwide, with continuously updated corrections, but no specific coastal processing
ALES	NOC	j2, n1, (j1, j3 to be added soon)	L2	20 Hz	Global, <50 km from coast	PODAAC	<i>Experimental products from the ALES processor included in SGRD-type files alongside the standard products and corrections</i>

Table 1 continued

ID	Produced by	Altimeter	Product level	Posting rate	Coverage	Download from	Comments
SARvatore	ESA-ESRIN	c2 (SAR only)	L2	20 Hz	SAR mode regions	ESA GPOD	<i>On-demand Processing service for the CryoSat-2 SAR mode data where the user can configure some processing parameters to meet specific requirements (for instance for the coastal zone)</i>
COP	ESA	c2 (LRM/PLRM)	L2	20 Hz	Global	ESA	<i>Global products for CryoSat-2 from an ocean processor (output is in PLRM over the SAR mode regions)—but no specific coastal processing</i>

The italic text highlights those products that are provided at a higher post rate (20 or 40 Hz, corresponding to along-track distances of approximately 350 and 175 m, respectively) and are therefore more amenable to coastal altimetry applications

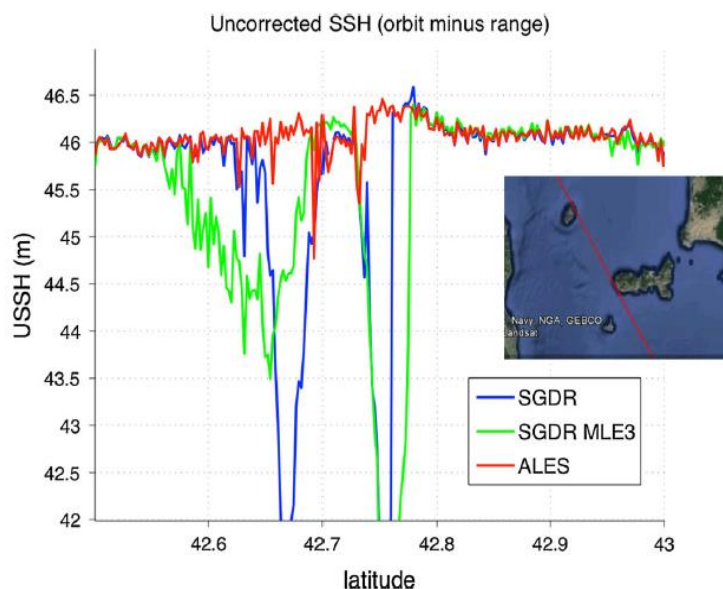
Εικόνα 3.3 Αποστολές και προγράμματα που παράγουν αλιμετρικά δεδομένα σε παράκτιες περιοχές. Πηγή : Cipollini (2016).

3.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Σύμφωνα με τον Cirollini (2016), η εξίσωση υπολογισμού της απόστασης είναι ως εξής: Υψόμετρο επιφάνειας = Υψόμετρο τροχιάς – (απόσταση + διορθώσεις). Το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε περιέχει το σφάλμα από το γεωειδές, και από το ωκεανογραφικό σήμα. Αφαίρεση μιας μέσης επιφάνειας της θάλασσας αφαιρεί το σφάλμα από το χρονικά αμετάβλητο γεωειδές και τη μέση δυναμική επιφάνεια και παρέχει την μεταβολή του θαλάσσιου επιπέδου, θεωρώντας ως δεδομένο ότι διορθώθηκαν τα σφάλματα παλίρροιας και ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση των μετρήσεων στη παράκτια περιοχή μπορούν να εφαρμοστούν 2 τεχνικές συγκεκριμένα η βελτίωση του υπολογισμού της απόστασης και η βελτίωση των διορθώσεων για τα γεωφυσικά, τα ατμοσφαιρικά και τα επίγεια σφάλματα. Οι παλμοί που επιστρέφουν στο δορυφόρο καταγράφονται χρονικά με την μορφή κυματομορφών και στη συνέχεια στέλνονται στον επίγειο σταθμό, όπου γίνεται επαναπροσδιορισμός του σήματος και με βάση αυτή την επεξεργασία αποκωδικοποιούνται το ύψος της στάθμης της θάλασσας, το σημαντικό ύψος κυματισμών και η οπισθοσκέδαση του ραντάρ. Για την επεξεργασία αξιοποιούνται αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων είτε μέγιστης πιθανότητας. Σε μια απόσταση της τάξεως των 10 χιλιομέτρων από την ακτή, οι παλμοί παύουν να συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, συνεπώς προκύπτει ανάγκη για βελτίωση των μεθόδων επαναπροσδιορισμού. Το πρόβλημα δεν είναι μόνο η παρουσία γης στο αποτύπωμα του δορυφόρου, αλλά η παρουσία πολύ φωτεινών στόχων, κυρίως ήρεμων υδάτων σε προστατευμένες περιοχές. Οι λύσεις που έχουν προταθεί περιλαμβάνουν την κατηγοριοποίηση των κυματομορφών και τον επαναπροσδιορισμό τμημάτων της κυματομορφής που δεν έχουν επηρεαστεί ή έχουν επηρεαστεί λιγότερο από τα αντικείμενα των παράκτιων περιοχών. Μια λύση που παρουσιάστηκε είναι αυτή του αλγόριθμου Adaptive Leading-Edge Subwaveform (ALES) από τον Pasaro το 2014. Ο ALES είναι ένας αλγόριθμος όπου το δεύτερο παράθυρο και η επεξεργασία επιλέγεται με βάση τα αποτελέσματα του σημαντικού υψομέτρου κυματισμού στη πρώτη επεξεργασία και εφαρμόζεται με ένα τρόπο έτσι ώστε να μην αλλοιώνεται σε μεγάλο βαθμό της η κυματομορφή, ενώ η σύγκριση πραγματοποιείται σε σχέση με μια πρότυπη μη αλλοιωμένη κυματομορφή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή του αλγόριθμου ALES σε συνδυασμό με τους καθορισμένους αλγόριθμους για ένα πέρασμα του JASON-2 σε τροχιά της οποίας το αποτύπωμα εφάπτεται με την ακτή του νησιού ELBA στην Μεσόγειο. Η εφαρμογή των συνηθισμένων αλγόριθμων δίνει ένα μη ρεαλιστικό αποτέλεσμα για την θαλάσσια στάθμη κοντά στην ακτή, ενώ το αποτέλεσμα του αλγόριθμου ALES είναι εμφανώς πιο κοντά στην ρεαλιστική τιμή (βλ. Γράφημα 3.4). Σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα σύμφωνα με τον Cirollini (2016) πρέπει να αξιολογηθούν σύμφωνα με την ανάγκες των ζητούμενων αποτελεσμάτων και να διασταυρωθούν με αληθείς τιμές για να εκτιμηθεί η ακρίβεια τους, τα οποία στοιχεία μπορούν να συνεισφέρουν οι παλιρροιογράφοι. Αντίστοιχης σημασίας με την βελτίωση του αλγόριθμου επαναπροσδιορισμού, είναι η βελτίωση του υπολογισμού του σφάλματος της υγρής

τροπόσφαιρας. Η διόρθωση όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα είναι σχεδόν αναλογική σε σχέση με την παρουσία υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Ο υπολογισμός τους γίνεται είτε μέσω ενός ραδιόμετρου μικροκυμάτων που διαθέτει ο δορυφόρος, είτε γίνεται εκτίμηση μέσω ενός μοντέλου. Μόλις μπει στεριά στο αποτύπωμα του δορυφόρου το ραδιόμετρο μικροκυμάτων αποτυγχάνει να δώσει μέτρηση και τα μοντέλα αποτυγχάνουν να αποδώσουν με ακρίβεια τις εναλλαγές των υδρατμών σε μικρή κλίμακα και δεν πληρούν τις προδιαγραφές ακρίβειας.



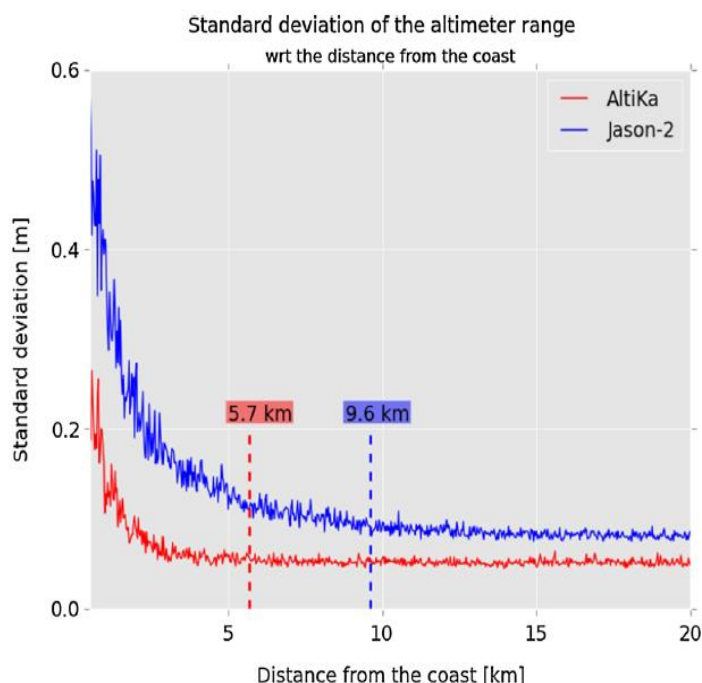
Γράφημα 3.4 Η εφαρμογή του αλγόριθμου ALES και η σύγκριση με τους κοινούς αλγόριθμους για το πέρασμα 044 του δορυφόρου Jason-2 πάνω από το νησί Έλμπα. Πηγή: Cipollini, 2016).

Η αποστολή Jason-2 έφερε εξελιγμένο ραδιόμετρο μικροκυμάτων, το οποίο υπολογίζει τη διόρθωση για την υγρή τροπόσφαιρα και το σφάλμα του εκτιμάται στα 1.2cm μέχρι τα 5km κοντά σε στεριά. Μια άλλη αναβάθμιση προέρχεται από τη διόρθωση GPD (GNSS Related Path Delay) του Fernandes (2015), ο οποίος προτείνει την χρήση δικτύων GNSS κοντά στην ακτή τα οποία υπολογίζουν την καθυστέρηση του σήματος λόγω της τροπόσφαιρας και τη εφαρμογή των αποτελεσμάτων στην επίλυση γεγονός που βελτιώνει σημαντικά το αποτέλεσμα της επίλυσης.

3.4 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ CRYOSAT-2 ΚΑΙ ALTIKA ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ

Σύμφωνα με τον Cipollini ο δορυφόρος AltiKa φέρει στον εξοπλισμό του ένα Αλτίμετρο που εκπέμπει στη μπάντα Ka (36.5GHz) και με αποτύπωμα 8km, αντί για 20km του Jason-2. Αυτή η σύνθεση παρέχει καλύτερη κατακόρυφη ανάλυση, όμως έχει κόστος την υψηλότερη ευαισθησία στη βροχή. Οι υψηλής ακρίβειας μετρήσεις που παρέχονται είναι πολύτιμες για τον υπολογισμό της θαλάσσιας στάθμης και της

θαλάσσιας δυναμικής. Συγκεκριμένα η διεργασία του CNES PEACHY παράγει δεδομένα με υψηλό ρυθμό για παράκτιες περιοχές, για παγόβουνα και για επίγεια ύδατα. Τα δεδομένα της αποστολής AltiKa είναι άριστης ποιότητας για τον ωκεανό και για τις παράκτιες περιοχές παραμένουν αρκετά καλά μέχρι μια απόσταση 5km από τις ακτές.

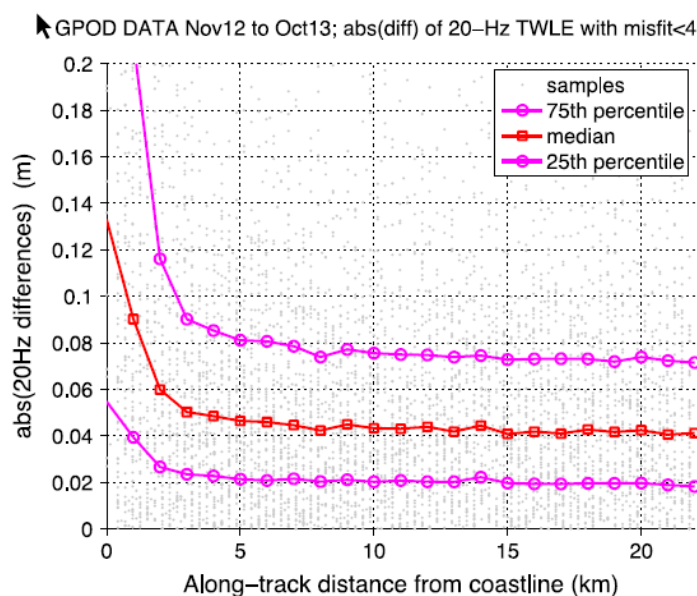


Γράφημα 3.5 Η τυπική απόκλιση της υπολογιζόμενης απόστασης σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για τις αποστολές Jason-2 και AltiKa. Πηγή: Cipollini 2016.

Παρατηρείται ότι για την αποστολή Jason-2, ο θόρυβος αυξάνεται στα 10km, ενώ για την αποστολή AltiKa παραμένει σταθερός μέχρι τα 5km.

Οι αξιολογήσεις των μετρήσεων μπορούν να ολοκληρωθούν σε συνδυασμό με επιτόπιες μετρήσεις, ώστε να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα του δορυφόρου AltiKa στις παράκτιες περιοχές. Συγκεκριμένες έρευνες που αξιολόγησαν τα δεδομένα και συμπέραναν αυτό που οι αξιολογήσεις των οργάνων δίνουν ένδειξη πως ισχύει είναι η έρευνα του Trouin (2015), ο οποίος ερεύνησε τα θαλάσσια ρεύματα σε απόσταση 10km από την ακτή και βρήκε πως συμπίπτουν με τις επιτόπιες μετρήσεις, ενώ ο Pascual (2015) αξιοποίησε βελτιωμένους αλγόριθμους και διορθώσεις για γεωφυσικά φαινόμενα και κατέληξε σε παρόμοιο αποτέλεσμα. Οι Birol και Nino σύγκριναν δεδομένα του δορυφόρου AltiKa με αυτά του Jason-2 και έλαβαν πιο αξιόπιστα δεδομένα από τον AltiKa για τις παράκτιες περιοχές και ο Hareef Baba Shaed (2015) σύγκρινε δεδομένα από σημαντικά ύψη κυματισμών του δορυφόρου με αυτά από επιτόπιες μετρήσεις και βρήκε συσχέτιση σε επίπεδο 0.85 έως 0.98. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν την μακροχρόνια αξία που έχουν οι μετρήσεις που παρέχει ο δορυφόρος AltiKa και ότι θα παίξει σημαντικό ρόλο στην έρευνα για την βελτίωση των αλτιμετρικών δεδομένων στις παράκτιες περιοχές.

Ο δορυφόρος Cryosat-2 εκτοξεύθηκε τον Απρίλιο του 2010 με σκοπό την παρακολούθηση της κρούσφαιρας μέσω των μετρήσεων για το πάχος των πάγων. Το ραντάρ αλτιμέτρο που φέρει ο δορυφόρος Cryosat-2 είναι προηγούμενη έκδοση του αλτιμέτρου SRAL, το οποίο φέρει ο δορυφόρος Sentinel3-A. Η απόδοση των δεδομένων SAR έχουν αξιολογηθεί πρόσφατα για περιοχές στις ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου.



Γράφημα 3.6 Η απόδοση της Αλτιμετρίας SAR σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή. Πηγή Cipollini (2016).

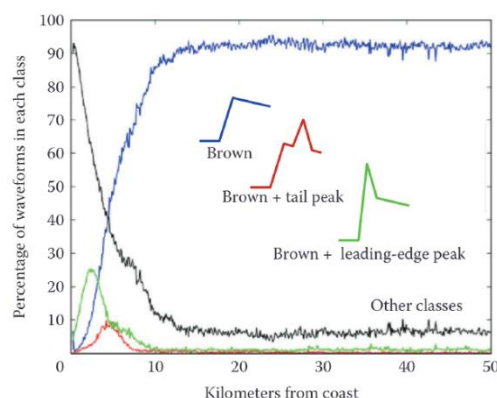
3.5 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με τον Cipollini (2016), η καταγραφή της θαλάσσιας στάθμης ξεκινά αιώνες πριν με τη χρήση παλιρροιογράφων. Στη συνέχεια γίνεται σαφή αναφορά στη βελτίωση των τεχνικών και των δεδομένων που παράγει η παράκτια αλτιμετρία. Τα βελτιωμένα αποτελέσματα προέρχονται όχι μόνο από την ανάπτυξη νέων αλγόριθμων και τεχνικών διόρθωσης για γεωφυσικά δεδομένα, αλλά επίσης από τον σχεδιασμό καινοτόμων αλτιμέτρων όπως αυτό που φέρει η αποστολή AltiKa με χρήση της μπάντας Ka, καθώς και με τη χρήση της τεχνολογίας ραντάρ συνθετικού διαφράγματος στην αποστολή Cryosat-2. Η αξιολόγηση των στοιχείων από τους εσωτερικούς ελέγχους πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης με δεδομένα παλιρροιογράφου και λήφθηκαν αποτελέσματα της ακρίβειας του δορυφόρου σε σχέση με τα επιτόπια δεδομένα, στην έρευνα που αφορά τις παράκτιες περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου με ακρίβεια ανά περιοχή τα 4 έως και τα 9cm. Ακολούθησε η έρευνα στην περιοχή των δυτικών ακτών της Αφρικής, όπου έγινε προσπάθεια να εξεταστεί η συνέχεια των τάσεων από τον ανοιχτό ωκεανό στις παράκτιες περιοχές με περιορισμένη επιτυχία. Είναι σαφής η τάση για συνεχή εξέλιξη και βελτίωση τόσο των τεχνικών που αφορούν τις διορθώσεις και την εφαρμογή των μετρήσεων στις παράκτιες περιοχές και θεωρείται πως στο μέλλον η αλτιμετρία θα μπορεί να

υποστηρίζει με υψηλή ακρίβεια τις μετρήσεις και έρευνες στις παράκτιες περιοχές, όπως και πιο σύνθετα γεγονότα όπως την βραχυπρόθεσμη παλίρροια που προκαλούν καταιγίδες και τις αξιολόγηση των μοντέλων κυματισμού στις ακτές. Τέλος θεωρείται πως οι μελλοντικές αποστολές θα φέρουν τεχνολογία, η οποία θα επιλύσει την όποια ασάφεια υπάρχει για την σύγκριση και ταύτιση της συνέχειας ανάμεσα στα αλτιμετρικά δεδομένα στις ακτές και τα δεδομένα των παλιρροιογράφων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το αποτύπωμα της τροχιάς της περιοχής που μελετάται.

3.6 ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Σύμφωνα με τον Cipollini (2018), το μοντέλο του Brown (1977) είναι μια αξιόπιστη εκτίμηση για το 90% των κυματομορφών έως τα 10-15km από την ακτή. Η απόκλιση από το μοντέλο του Brown συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές, τις προστατευμένες περιοχές βάσει μορφολογίας και την αλλοίωση των δεδομένων, καθώς η στεριά εισέρχεται στο αποτύπωμα των μετρήσεων, όπως επίσης και η περίπτωση της ηχούς που προκαλείται από ήρεμα νερά και την ισχυρή ανάκλαση του σήματος.

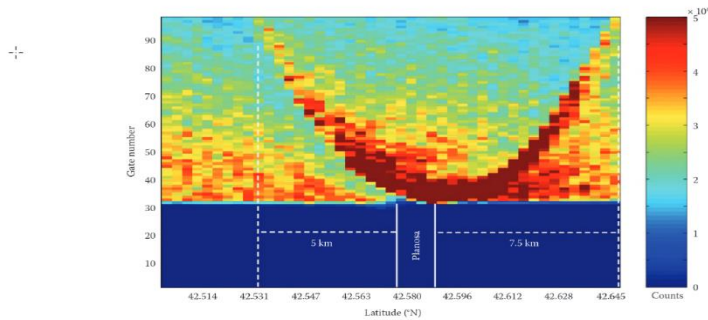


Γράφημα 3.7 Το ποσοστό των παρατηρούμενων κυματομορφών σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή με βάση τη κατηγορία. Πηγή: Cipollini, 2018.

Σύμφωνα με τον Pasaro (2014) υπάρχουν 4 τρόποι αντιμετώπισης των κυματομορφών που δεν συμπεριφέρονται σύμφωνα με το μοντέλο του Brown.

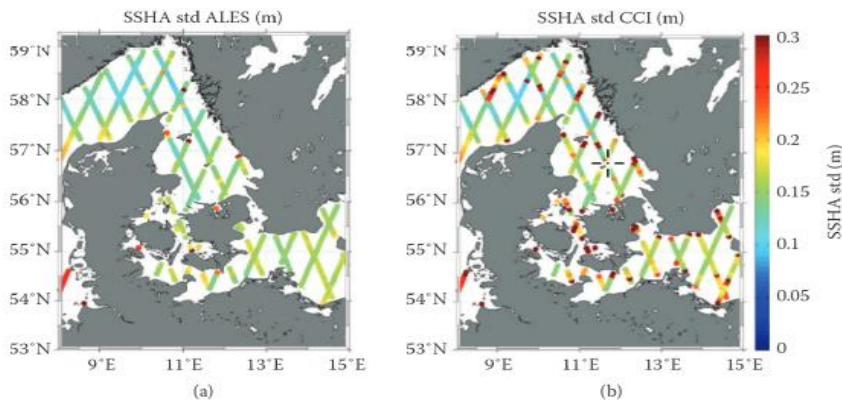
- Αλγόριθμοι διάφορων τύπων που κατηγοριοποιούν τις κυματομορφές με βάση το σχήμα και την εφαρμογή μεθόδων για τη προσαρμογή των δεδομένων σε κάθε κατηγορία.
- Εμπειρικά μοντέλα στα οποία εφαρμόζονται κατάλληλες συναρτήσεις-παράθυρα για τον επαναπροσδιορισμό των κυματομορφών.
- Η εφαρμογή μιας στοίβας κυματομορφών με σκοπό τον εντοπισμό φωτεινών αντικειμένων και τον καθαρισμό της στοίβας από αυτά πριν τον επαναπροσδιορισμό.

- Η εφαρμογή μιας κυματομορφής που είναι υποσύνολο της αρχικής, η οποία περιέχει την αρχή του κύματος, αλλά αφαιρεί την ουρά η οποία προκαλεί παραμόρφωση.

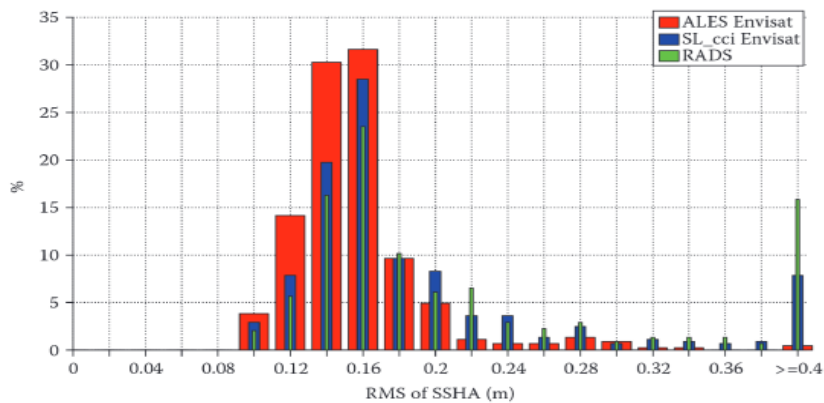


Γράφημα 3.8 Η παρεμβολή μιας ακτής στο αποτύπωμα του δορυφόρου Envisat και η φωτεινή ένδειξη στο κέντρο της κυματομορφής.

Η περίπτωση χρήσης ενός υποσυνόλου της κυματομορφής γίνεται η πιο διαδεδομένη μέθοδος, παραμένει όμως η αδυναμία πως εάν σε μια κυματομορφή η αρχή (Leading Edge) είναι επηρεασμένη από σφάλματα, το αποτέλεσμα της επεξεργασίας θα είναι ανάλογα των δεδομένων εισόδου.



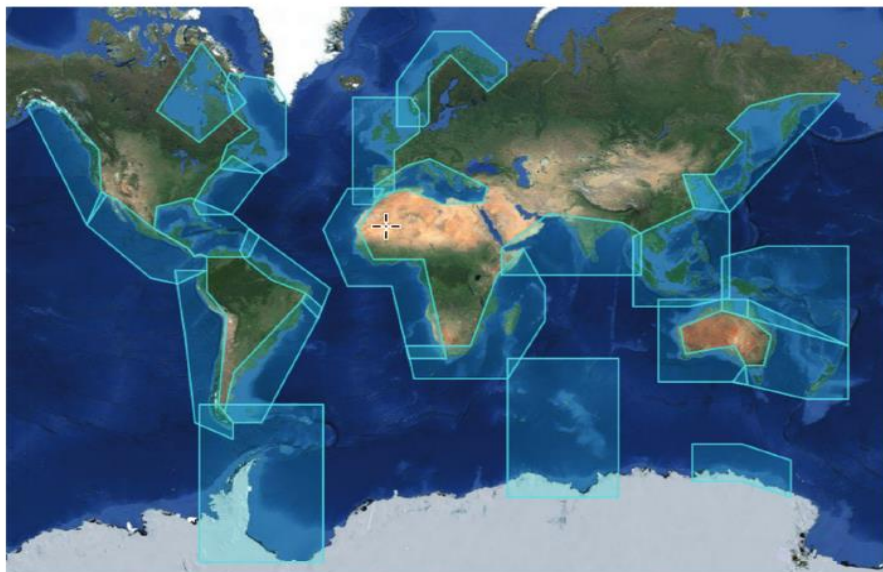
Γράφημα 3.9 Σύγκριση ανάμεσα στον αλγόριθμο ALES και SL_cci για τον δορυφόρο Envisat σε πέρασμα από παράκτια περιοχή στη Βαλτική. Πηγή: Cipollini 2018.



Γράφημα 3.10 Ιστόγραμμα σύγκρισης ανάμεσα στον αλγόριθμο ALES και SL_cci για τον δορυφόρο Envisat σε πέρασμα από παράκτια περιοχή στη Βαλτική. Πηγή: Cipollini 2018.

3.7 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ X-TRACK

Σύμφωνα με τον Cipollini (2018) μια πηγή αλιμετρικών δεδομένων για παράκτιες περιοχές αποτελεί ο αλγόριθμος X-Track, ο οποίος εστιάζει στην μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων και ειδικότερα ισοσταθμίζει κατάλληλα την αναλογία ποιότητας – ποσότητας δεδομένων για τοπικές περιοχές. Συγκεκριμένα, μεγάλο μέρος των διαθέσιμων δεδομένων αξιολογούνται για επισφαλείς μετρήσεις και καθορίζεται ο συνολικός αριθμός των χρήσιμων δεδομένων για κάθε περιοχή μελέτης. Επιπροσθέτως, στην επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από διαφορετικές αποστολές, συνεπώς καταλήγουμε σε δεδομένα που διασταυρώνονται από διαφορετικές αποστολές και διατίθενται αρκετά παράκτια δεδομένα, στα οποία από παλιές αποστολές έχει εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια η διακύμανση της θαλάσσιας στάθμης.



Εικόνα 3.11 Χάρτης εφαρμογής των δεδομένων X-Track. Πηγή: Cipollini 2018.

3.8 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ

Συμφωνα με τη Cristine Pascale Gommenginger (2011) μια βασική προϋπόθεση για την ωκεανογραφία είναι ένα μοντέλο γεωειδούς και από τη θεωρητική βάση της ωκεανογραφίας γνωρίζουμε πως το ύψος της θαλάσσιας επιφάνειας προκύπτει από το υψόμετρο του δορυφόρου εφόσον αφαιρεθεί η διόρθωση της απόστασης. Συγκεκριμένα η δυναμική θαλάσσια τοπογραφία (DT) προκύπτει από τη μέση δυναμική τοπογραφία (MDT) και από την ανωμαλία της στάθμης της θαλάσσιας επιφάνειας (SLA). Με συνδυασμό των τεχνολογιών SLR, GPS και DORIS μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια της τάξεως των 2 εκατοστών. Για να γίνει αυτό απαιτείται να πραγματοποιηθούν διορθώσεις για την τροπόσφαιρα, την ιονόσφαιρα, διορθώσεις επιφάνειας, διορθώσεις οργάνων και εξωτερικές γεωφυσικές παραμέτρους. Την ανάλυση καθορίζουν η διεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς, η διεύθυνση κατά πλάτος και η διεύθυνση του ναδίου. Κατά τη διαδικασία της καταγραφής παλμού σε λειτουργία LRM (Low Resolution Mode) έχουμε αποτελέσματα για την ισχύ του σήματος, για τη παράμετρο SWh, για τη ταχύτητα του ανέμου, και την απόσταση (από το δορυφόρο στη μέση στάθμη), ενώ η ανάλυση είναι μερικά χιλιόμετρα. Από τη κλίση της πρώτης ακμής του επιστρεφόμενου παλμού μετράται το SWh, ενώ από τη παράμετρο σ_0 (ισχύ του σήματος) αποκτάται πληροφορία για τη ταχύτητα του ανέμου. Συγκεκριμένα περισσότερος χρόνος καταγραφής της ισχύος συνιστά παρουσία ανέμων. Κατά τη διαδικασία SAR Mode την οποία διαθέτουν οι δορυφόροι Sentinel 3 και Cryosat2, εκπέμπονται 66 παλμοί φωτός με την σειρά 1 C-band, 64 Ku Band και 1 C-band, ενώ γίνεται αξιοποίηση του φαινομένου Doppler στην κατά μήκος διεύθυνση για την απόκτηση λεπτής λωρίδας και υψηλότερη ανάλυση μέσω του κατακερματισμού της δέσμης φωτός σε τμήματα ακτίνων. Το σήμα που επιστρέφει δεν είναι το ίδιο με το εκπεμπόμενο, αλλά έχει μετατοπιστεί (ολίσθηση) με βάση τον εαυτό του. Κάθε δέσμη μετά τοποθετείται σε συγκεκριμένη θέση στο έδαφος, ενώ για κάθε εδαφοψηφίδα έχουμε πολλαπλές λήψεις- επιστροφές από διαφορετικά σημεία. Οι δέσμες στη συνέχεια στοιβάζονται και τροποποιούνται σε ενδιάμεση τιμή για τη μείωση του θορύβου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση του SNR και της ανάλυσης κατά μήκος. Κάθε σημείο λαμβάνει διαφορετικές δέσμες με διαφορετική ισχύ, ενώ οι μορφή των κυματομορφών I1b στον ωκεανό εξαρτώνται από το τύπο λειτουργίας (LRM/SAR). Καθώς οι κυματομορφές διαφέρουν απαιτούν διαφορετικούς αλγόριθμους επαναπροσδιορισμού για την ανοιχτή θάλασσα, τις παράκτιες περιοχές, και τα ύδατα σε χερσαίες επιφάνειες. Συνεπώς κατά τη λειτουργία LRM έχουμε παλμό με δέσμη 10km κατά μήκος και κατά πλάτος της τροχιάς, κατά τη λειτουργία μη εστιασμένου SAR ο παλμός έχει μήκος 300μέτρα κατά μήκος της τροχιάς και 10km κατά πλάτος της τροχιάς. Τέλος στην διαδικασία FFSAR έχουμε δέσμη 50 εκατοστών κατά μήκος και 10km κατά πλάτος της τροχιάς. Η τελευταία λειτουργία παίζει σημαντικό ρόλο στη καταγραφή χερσαίων υδάτων. Ταυτόχρονα οι μετρήσεις στην ακτή παραμένουν προβληματικές λόγω της παρουσίας χερσαίων επιφανειών στο αποτύπωμα της δέσμης.

Στη περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων και οι εκτιμήσεις από τις κυματομορφές δεν είναι αξιόπιστες και δεν μπορούν να αξιοποιηθούν χωρίς τη κατάλληλη επεξεργασία και την επιλογή.

Ο έλεγχος εκτελείται στις L1B κυματομορφές και η διαδικασία του επαναπροσδιορισμού αφορά την διαδικασία της εύρεσης της πρώτης ακμής της επιστρεφόμενης L1B κυματομορφής και την τοποθέτηση της ηχούς της κυματομορφής στο κατάλληλο μοντέλο που αντιστοιχεί στην επιφάνεια που εκτιμάται ότι αφορά η μέτρηση. Στη συνέχεια γίνεται χρήση πολλαπλών μοντέλων και εφαρμόζεται σε αυτά ο παλμός του σήματος με τη διαδικασία της βέλτιστης προσαρμογής σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια όπως το κριτήριο εξομάλυνσης υπολειπόμενων σφαλμάτων (normalized residuals – NRE). Κατά τη προσαρμογή του επιστρεφόμενου σήματος στα μοντέλα για διαφορετικές καταστάσεις του ωκεανού πραγματοποιούνται στατιστικοί έλεγχοι και συγκρίσεις, ενώ λαμβάνονται υπόψιν η ανταπόκριση του σημείου στον παλμό, η μορφή του επιστρεφόμενου σήματος και η στατιστική κατανομή του υψομέτρου της επιφάνειας, η οποία μοντελοποιεί παράλληλα με τα πραγματικά δεδομένα και αυτά της προσομοίωσης της θαλάσσιας κατάστασης. Με τη κατάλληλη προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα έχουμε τις εκτιμήσεις για τις τιμές των SW_h, της ταχύτητας των ανέμων και για το υψόμετρο. Εναλλακτικά εμπειρικοί αλγόριθμοι όπως οι (OCOG, threshold, B retracker) επεξεργάζονται τα στατιστικά στοιχεία της κυματομορφής και εξάγουν μόνο τη θέση του μέσου της ακμάζουσας κλίσης και της ισχύος. Η θέση της LEP (Leading Edge Point) επιλέγεται με βάση τη τιμή της ισχύος και συγκεκριμένα όταν ο παλμός ξεπερνάει μια τιμή A η οποία εμπειρικά ορίζεται ως όριο. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάζει μικρότερο χρόνο επεξεργασίας, αλλά διαθέτει χαμηλότερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Τα L2 προϊόντα περιλαμβάνουν τη διαδικασία του επαναπροσδιορισμού και διαθέτουν την εκτίμηση για το SW_h, την απόσταση και την ισχύ του σήματος (σ_0). Συνεπώς γίνεται σαφές πως κάθε αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού λειτουργεί με βάση το σενάριο, δηλαδή εάν εφαρμόζεται σε λειτουργία LRM, SAR και pLRM. Τέλος τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε εκδόσεις σχεδόν πραγματικού χρόνου με χαμηλή ακρίβεια και διάθεση περίπου στις 3 ώρες, καθώς και στις 2 ημέρες με μεσαία ακρίβεια δεδομένων STC (Short Time Critical) και σε NTC (Non Time Critical) με τη καλύτερη δυνατή ακρίβεια και διάθεση περίπου στον 1 μήνα από την παρατήρηση. Η επικύρωση των δεδομένων γίνεται με σύγκριση με παλιρροιογράφο κοντά στη ξηρά και καταγραφή του RMS error. Στα 10km συνήθως έχουμε κοντινές τιμές (σχεδόν 10cm), ενώ προσοχή δίνεται και στη χρονική αλληλουχία των παρατηρήσεων αλλά και στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από τα δύο μέσα. Έχει γίνει σαφές από προηγούμενες έρευνες πως στη λειτουργία LRM και στη λειτουργία SAR υπάρχει διαφορετική ανάλυση, συνεπώς απαιτούνται διαφορετικοί αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού για τη λήψη σωστών αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα απαιτείται διαφορετική στρατηγική επεξεργασίας για τον ανοιχτό ωκεανό, για παράκτιες περιοχές και για χερσαία ύδατα. Τέλος λόγω της χρήσης διαφορετικών αλγόριθμων retracker έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα,

ενώ πολύ υψηλή σημασία δίνεται και στις διορθώσεις για τις γεωφυσικές παραμέτρους.

3.9 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ALES

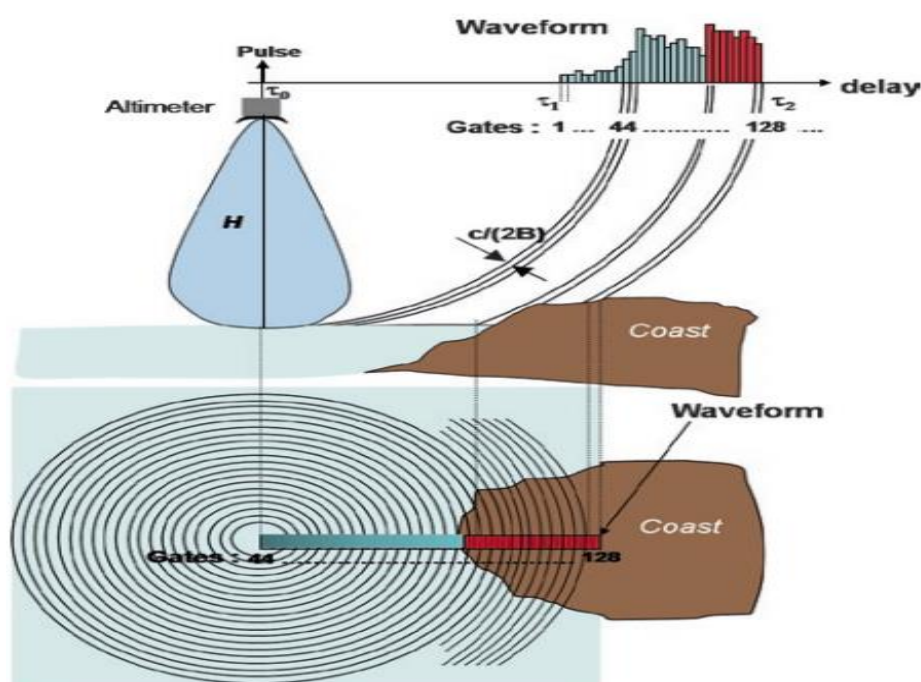
Συμφωνα με τη Cristine Pascale Gommenginger (2011) ,μια ιδιαίτερα απαιτητική περιοχή για την ανάκτηση δεδομένων της μέσης στάθμης της θάλασσας είναι οι περιοχές στις οποίες η θάλασσα είναι καλυμμένη με πάγο ή τμήματα πάγου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το επιστρεφόμενο σήμα έχει πολύ διαφορετική μορφή από το επιστρεφόμενο σήμα στην ανοιχτή θάλασσα. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι το ίδιο με αυτό στα παράκτια και τα χερσαία ύδατα. Η στρατηγική που ακολουθείται για να αντιμετωπιστεί το παρόν πρόβλημα είναι μέσω ενός αλγόριθμου επαναπροσδιορισμού, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να επιλέγει την καταλληλότητα του σήματος με βάση τη κατάσταση της θάλασσας και σύμφωνα με τη πρώτη κλίση του πίσω άκρου του σήματος. Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει βελτίωση των αποτελεσμάτων για τα παράκτια και τα χερσαία ύδατα και η σύγκριση τους με τα δεδομένα από παλιρροιογράφους και από επιτόπιες μετρήσεις δείχνουν τη καλύτερη συσχέτιση των δεδομένων που αξιοποιούν τον αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού σε σχέση με τα δεδομένα που προκύπτουν από τους κλασικούς αλγόριθμους για την ανοιχτή θάλασσα. Η ανάλυση του επιστρεφόμενου παλμού είναι γνωστή καθώς και η μορφή της λ κυματομορφής, η οποία χαρακτηρίζεται από μια απότομη πρώτη ακμή και συνεχίζει με μια φθίνουσα πίσω ακμή. Το σχήμα και η μορφή αυτή έχει μελετηθεί και αναπαρασταθεί σύμφωνα με το μοντέλο των Brown και Hayne. Στη περίπτωση των παράκτιων περιοχών και των χερσαίων υδάτων παρατηρείται απόκλιση της κυματομορφής από το μοντέλο. Το κοινό σημείο σε αυτές τις συνθήκες είναι η παρουσία σημείων με υψηλά υπολειπόμενα σφάλματα οπισθοσκέδασης, τα οποία διαταράσσουν την αναμενόμενη κυματομορφή. Οι διαδικασίες για το καθορισμό της περιοχής μελέτης αφορούν την οριοθέτηση της σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος, τη καταγραφή των ακτογραμμών και των ορίων τους. Στη συνέχεια ακολουθεί η απόκτηση των δεδομένων αλτιμετρίας και ο ορισμός της περιόδου χρήσης, η απόκτηση δεδομένων SLA (Sea Level Anomalies) για τη περιοχή, η απόκτηση δεδομένων παλιρροιογράφων με προσοχή στη χωρική και τη χρονική τους κατανομή. Τα παραπάνω μέσα μπορούν να καταγράψουν τη θαλάσσια στάθμη με ακρίβεια της τάξης του ενός εκατοστού, η οποία επαρκεί ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αληθής τιμή (ground truth) για τα δεδομένα αλτιμετρίας, ενώ η καταγραφή των χερσαίων υδάτων αρκετές φορές επιτυγχάνει ακρίβεια της τάξεως των μερικών χιλιοστών.

Ο τρόπος για να αποκτηθεί η βέλτιστη δυνατή ακρίβεια για τον υπολογισμό της απόστασης, αποστέλλεται η κυματομορφή σε επίγειους σταθμούς και ο τελικός προσδιορισμός των γεωφυσικών παραμέτρων υπολογίζεται στην γη. Ο σκοπός του επαναπροσδιορισμού είναι η προσαρμογή ενός μοντέλου στην κυματομορφή. Η τελική μέτρηση της απόστασης είναι συνδυασμός της μέτρησης στο δορυφόρο με το αποτέλεσμα της διαδικασίας του επαναπροσδιορισμού και τον υπολογισμό της θέσης του μπροστινού άκρου σε σχέση με το σταθερό σημείο παρακολούθησης στο

παράθυρο ανάλυσης. Περισσότερα στοιχεία για το μαθηματικό μοντέλο και τις μεθόδους του αλγόριθμου βρίσκονται στην έρευνα των Pasaro και Cipollini (2014).

3.10 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Σημαντικό μέρος για την ανάλυση και την επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί η παρατήρηση και η καταγραφή της μορφής των κυματομορφών όταν το ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου πλησιάζει την ακτή, ενώ παράγοντες όπως η γεωμετρία και το είδος της χερσαίας επιφάνειας μπορεί να επηρεάσει το σχήμα της κυματομορφής. Στη περίπτωση της μετάβασης από τον ωκεανό στη ξηρά, έχουμε ένα μέρος του αποτυπώματος του δορυφόρου πάνω από τη ξηρά και ένα μέρος πάνω από τη θάλασσα. Στη περίπτωση αυτή η ισχύς του σήματος που θα λάβει ο δορυφόρος θα εξαρτάται από το ποσοστό που αντιστοιχεί στην ξηρά και τη θάλασσα, αλλά και στις ανακλαστικές ιδιότητες αυτών των δύο επιφανειών (στο υπολειπόμενο σφάλμα οπισθοσκέδασης).

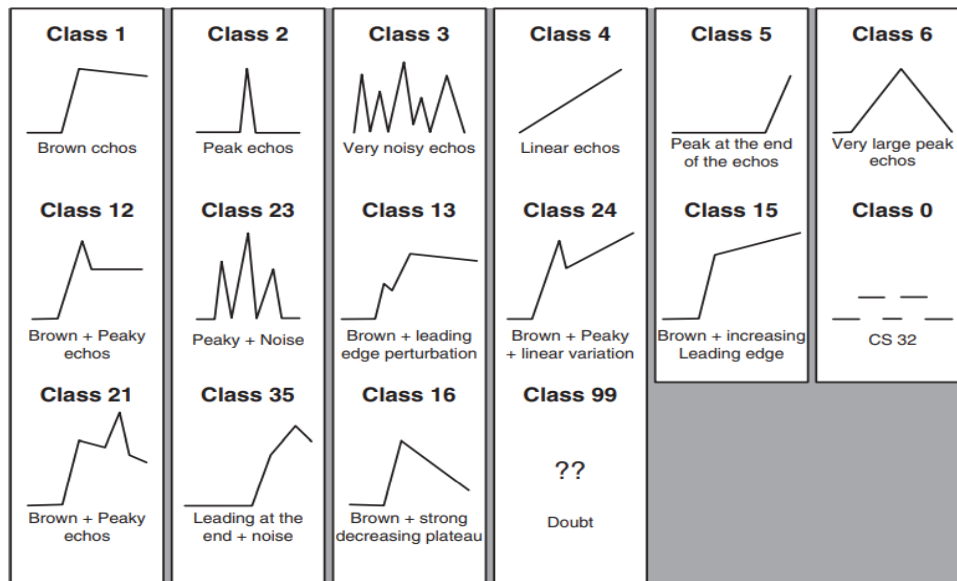


Εικόνα 3.12 Η περίπτωση της μετάβασης από θάλασσα σε ξηρά και η επίδραση της ξηράς στη κυματομορφή. Πηγή: C.Gommenginger 2011.

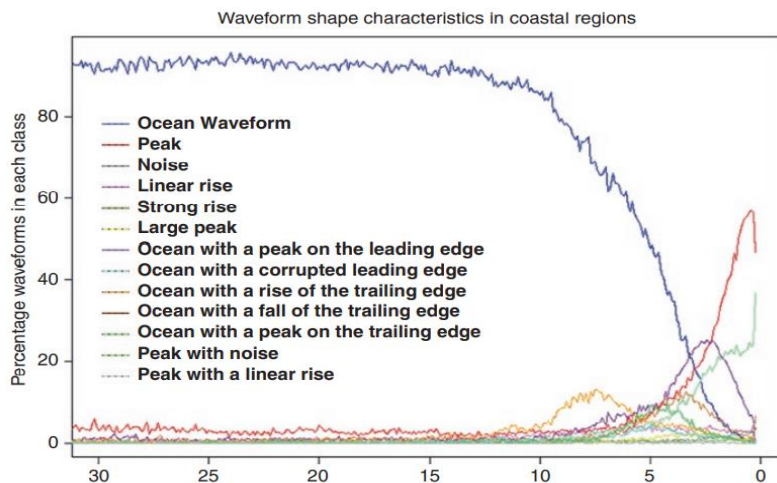
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα της κυματομορφής είναι η γεωμετρία και το ανάγλυφο της ακτογραμμής και η φύση του εδάφους αλλά και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται αυτό.

Κατά τη μετάβαση από τη θάλασσα στη ξηρά παρατηρούνται αρκετά σχήματα στις κυματομορφές, οπότε είναι χρήσιμο αυτά να κατηγοριοποιηθούν με σκοπό την

ανάλυση και να διερευνηθεί εάν κάποιο από αυτά εμφανίζεται με μεγαλύτερη συχνότητα από κάποια άλλα σε συγκεκριμένα είδη χερσαίων επιφανειών.



Εικόνα 3.13 Κατηγορίες σχημάτων των κυματομορφών για τον δορυφόρο Jason 2 με χρήση νευρωνικών δικτύων. Πηγή: C.Gommenginger 2011.



Εικόνα 3.14 Οι κυματομορφές σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή για το δορυφόρο Jason-2. Πηγή: C.Gommenginger 2011.

Το 94% των κυματομορφών σε απόσταση 15km ή μεγαλύτερη από τη ξηρά συμφωνούν με το μοντέλο του Brown.

3.11 Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ CRYOSAT-2

Η έρευνα αφορά τον αλτιμετρικό εξοπλισμό που φέρει ο Cryosat-2, ο οποίος διαθέτει (3) λειτουργίες, την Low Resolution Mode (LRM), την Synthetic Aperture Radar Mode(SARM) και τη SARin. Οι παραπάνω λειτουργίες του δορυφόρου είναι αποκλειστικές, το οποίο σημαίνει ότι δε μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή. Οι λειτουργίες LRM και SARM εκπέμπουν παρόμοιους παλμούς. Η κύρια διαφοροποίηση αφορά τη συχνότητα των επαναλήψεων με την οποία μεταδίδονται οι παλμοί και προκύπτουν ζητήματα κατά τη συσχέτιση και αποσυσχέτιση των παλμών μεταξύ τους. Μια λύση του παραπάνω προβλήματος είναι η επιλογή παλμών SARM με τέτοιο τρόπο ώστε η ακολουθία που προκύπτει να διαθέτει PRF το οποίο να είναι όμοιο με αυτό από τη λειτουργία LRM. Δηλαδή $m=PRF(SARM)/PRF(LRM)$.

Ο υπολογισμός για το δορυφόρο CRYOSAT-2 δίνει $m=9$. Συνεπώς κάθε δέσμη έχει ως αποτέλεσμα 8 αποσυσχετισμένες κυματομορφές. Η συλλογή ενός κάθε 9 SARM κυματομορφές έχει ως αποτέλεσμα ένα μικρότερο αριθμό ανεξάρτητων κυματομορφών και καθορίζεται ως ψευδο-LRM. Συγκεκριμένα για τις κυματομορφές SARM πρέπει να γίνει επεξεργασία πριν γίνει ο εντοπισμός τους. Τα βήματα ώστε να μετατραπούν τα δεδομένα σε μορφή που να είναι συμβατά με τη διαδικασία του εντοπισμού είναι η εφαρμογή ενός πλαισίου διόρθωσης των καθυστερήσεων, η συμπερίληψη της λειτουργίας AGC (Automatic Gain Control), μετατροπή των δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων IFFT, η μετατροπή των δεδομένων σε ισχύ και η μη συνεχής ενσωμάτωση κυματομορφών με ρυθμό περίπου 20Hz. Καθοριστική σημασία έχει η εξασφάλιση του ίδιου αριθμού παλμών από τις δύο μεθόδους. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η επιλογή ενός κάθε 9 SAR FBR, ώστε να σχηματιστεί η ακολουθία “ψευδο-LMR”. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι για να επιτευχθεί ίδιος αριθμός παλμών για το ένα δευτερόλεπτο από τα LRM δεδομένα, έπρεπε να μετατραπούν 3 δευτερόλεπτα από SARM σε ψευδο-LRM.

3.12 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΗ SAMOSA.

Το σχήμα των SARM επιστεφόμενων κυματομορφών είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές της συμβατικής αλτιμετρίας, οπότε οι αλγόριθμοι εντοπισμού κυματομορφών τύπου Brown δεν μπορούν να λειτουργήσουν με δεδομένα τύπου SARM. Το αρχικό μοντέλο κυματομορφών χρησιμοποιεί κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις, συγκεκριμένα χρησιμοποιεί Guassian κατανομή για να περιγράψει τα στατιστικά του ωκεανού, κυκλικό μοτίβο κεραίας, συνυπολογισμός της καμπυλότητας μόνο κατά μήκος της τροχιάς και μη συνυπολογισμός της ακτινικής επιτάχυνσης. Το θεωρητικό μέρος και οι εξισώσεις του μοντέλου προκύπτουν από τον C.Martin-Puig (2008) και σημειώνεται πως η κυματομορφή SARM μπορεί να εκφραστεί ως το αποτέλεσμα της συνέλιξης 3 στοιχείων. Η συμπερίληψη της κατά

μήκος τροχιάς καμπυλότητας της γης πραγματοποιεί μικρή αλλαγή στις σταθερές, αλλά όχι στη μορφή των εξισώσεων. Επιπλέον το μοντέλο συμπεριλαμβάνει την επιτάχυνση του δορυφόρου η οποία δεν είναι παράλληλη στη θαλάσσια επιφάνεια. Αυτή η παράμετρος έχει σημαντική επιρροή στην παραγόμενη κυματομορφή, καθώς προκαλεί μια ολίσθηση στη κατά μήκος τροχιά και αλλάζει την ευθυγράμμιση του όγκου της κεραίας με το κατοπτρικό σημείο. Σημειώνεται ότι μόνο η κατά πλάτος διάσταση της κυματομορφής επηρεάζει σημαντικά τις διακυμάνσεις στο υψόμετρο της θάλασσας. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση μιας συνάρτησης πλαισίου (Hamming) πριν τη μετατροπή σε πεδίο συχνοτήτων βελτιώνει σημαντικά την συμφωνία ανάμεσα στη πραγματική και τη μοντελοποιημένη κυματομορφή. Θεωρητική αξιολόγηση των επιδόσεων ακρίβειας των μοντέλων Samosa για τον υπολογισμό του SWH σε διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις με βάση συντελεστή εκτίμησης μεγαλύτερης πιθανότητας. Εφαρμόστηκε η μέθοδος CRLB και στα δύο μοντέλα και υπολογίστηκε μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμού για το μοντέλο Samosa2. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση προυπολογισμού σφαλμάτων για το βελτιωμένο μοντέλο η οποία συνυπολογίζει τη χρήση non Gaussian στατιστικά θαλάσσιας επιφάνειας, την εισαγωγή ελλειπτικού μοντέλου κεραίας, τον συνυπολογισμό της επιρροής των καμπυλοτήτων της γης κατά μήκος της τροχιάς και τις επιδράσεις της ακτινικής ταχύτητας. Το μοντέλο Samosa2 έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί ο χρήστης να συμπεριλάβει κάθε μια από τις βελτιώσεις ή να την αποκλίσει ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Συγκεκριμένα η εφαρμογή μη Gaussian γεωμετρίας θαλάσσιας επιφάνειας έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στη βελτίωση της ακρίβειας, ενώ σε μεγάλες τιμές SWH η εφαρμογή στατιστικών Gaussian θαλάσσιας επιφάνειας προσφέρει βελτίωση της τάξης 2cm. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι μεγαλύτερες τιμές λοξότητας μεταφράζονται σε χειρότερη ακρίβεια στο μοντέλο. Συνοψίζοντας το μοντέλο Samosa 2 είναι πιο ακριβές από το μοντέλο Samosa 1, όμως όταν συμπεριληφθούν όλες οι βελτιώσεις που είναι διαθέσιμες παρατηρείται μια μικρή μείωση της ακρίβειας στο μοντέλο Samosa 2.

3.13 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ SWOT.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του αλγόριθμου OBP (On Board Processor) οι δύο παλμοί ραντάρ λαμβάνονται σε μορφή I/Q από τη πλακέτα SADC (Science Analog to Digital Converter) και επεξεργάζονται χωριστά με τις ακόλουθες διαδικασίες.

- 1) Συμπίεση εύρους δηλαδή φιλτράρισμα μέσω φίλτρου αντιστοίχισης FFT, όπου πραγματοποιείται υπολογισμός του FFT της ηχώ του ραντάρ, πολλαπλασιασμός με τη συνάρτηση αναφοράς και υπολογισμός του ανάστροφου FFT στο τελικό σήμα ενώ απορρίπτεται η αποκλεισμένη περιοχή.
- 2) Παρεμβολή με βάση το εύρος για το κανάλι μετάδοσης, για να επιτευχθεί ταυτόχρονη εγγραφή ανάμεσα στα κανάλια.
- 3) Εκτίμηση κεντροειδούς Doppler (κλασματικό μέρος) με μέθοδο εκτίμησης φάσης σε ακατέργαστα δεδομένα. Αυτή η εκτίμηση χρησιμοποιείται κατά τη συμπίεση αζιμουθίου για το κεντράρισμα του φάσματος Doppler στα 0Hz με σκοπό την ελαχιστοποίηση της απώλειας SNR.

Πολλαπλασιασμός κάθε γραμμής εύρους με το συζυγές της προηγούμενης. Εκτέλεση του μέσου όρου σε αζιμουθίο και εύρος για καθορισμένη ανάλυση. Υπολογισμός φάσης και φιλτράρισμα. Υπολογισμός της γραμμικής προσαρμογής στη φάση ως συνάρτηση της γραμμικής τροχιάς.

- 4) Nr γραμμές θα χρησιμοποιηθούν στη συμπίεση του αζιμουθίου, οι οποίες στρέφονται σε γωνία και αποθηκεύονται στη μνήμη, καθώς τα επόμενα βήματα λειτουργούν στη κατεύθυνση του αζιμουθίου και πραγματοποιούν επεξεργασία σε μια πύλη εύρους για ένα διαδοχικό αριθμό παλμών κάθε φορά.
- 5) Επεξεργασία SAR χωρίς εστίαση αζιμουθίου για κάθε συλλογή πυλών εμβέλειας από μια σειρά διαδοχικών παλμών.
- 6) Υπολογισμός του συμβολογράμματος για κάθε ένα από τις Nβ δέσμες εξόδου πολλαπλασιάζοντας το συμπιεσμένο σήμα του ενός καναλιού με το συζυγές του άλλου.
- 7) Ισοπέδωση φάσης εξαρτώμενης από το εύρος παρεμβολογράμματος. Η ράμπα φάσης αντιστοιχεί στη συμβολομετρική φάση μιας σφαιρικής επιφάνειας αναφοράς που ρυθμίζεται αργά κατά μήκος της τροχιάς ενώ λαμβάνεται υπόψη το υψόμετρο της πλατφόρμας και οι τοπογραφικές διακυμάνσεις.
- 8) Υπολογισμός της ισχύος της εικόνας για κάθε μία από τις δέσμες εξόδου και για κάθε κανάλι κατά πολλαπλασιάζοντας το συμπιεσμένο σήμα με το συζυγές του.
- 9) Εκτέλεση πολλαπλής εμφάνισης του μέσου όρου του συμβολογράμματος και της ισχύος των εικόνων για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ανάλυση 500 m (κατά μήκος πίστας) x 500 m (cross-track).

Κατά την επεξεργασία εδάφους, οι ακόλουθες διορθώσεις απαιτούνται για να αντισταθμιστούν ορισμένες από τις απλοποιήσεις OBP και άλλες πηγές σφαλμάτων που εισάγουν ασάφειες. Πληροφορίες για τη στάθμη του διαστημικού σκάφους απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτών των διορθώσεων.

1. Αφαίρεση της γωνιακής συστηματικής μεροληψίας που προκύπτει από τις γραμμές ίσου-εύρος και τις γραμμές ίσης φάσης με τα αποτελέσματα να μην ευθυγραμμίζονται.

2. Επανάληψη της δειγματοληψία των δοκών για προσαρμογή στις διαφορετικές γεωμετρικές θέασης.

3. Υπολογισμός του ύψους για κάθε διόρθωση δέσμης για τις ελαφρώς διαφορετικές γραμμές βάσης.

4. Εκτέλεση του βέλτιστου μέσου όρου δέσμης.

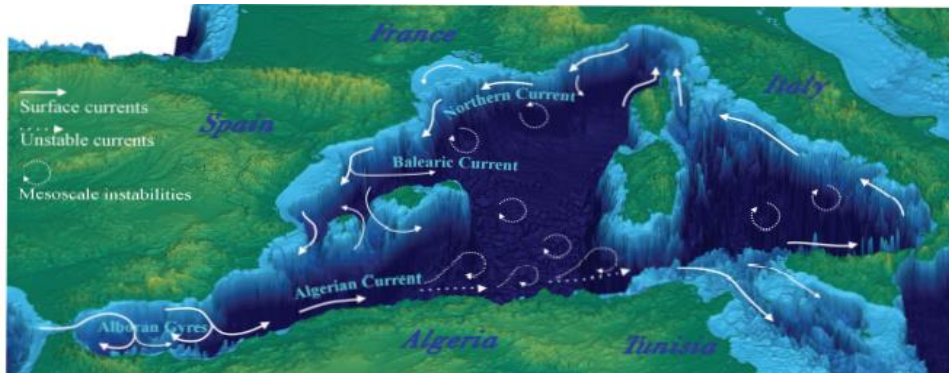
3.14 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν παραπάνω παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον καθώς γίνεται προσπάθεια όχι μόνο να επεκταθεί η δορυφορική αλτιμετρία στις παράκτιες περιοχές, αλλά παρουσιάζεται σημαντική πρόοδος στην ανάκτηση και επεξεργασία ήδη καταγεγραμμένων δεδομένων από το παρελθόν, τα οποία με μετέπειτα επεξεργασία θα δώσουν μεταδεδομένα για τις παράκτιες περιοχές σε βάθος χρόνου. Οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν είναι μόνο ένα μέρος αυτών που εφαρμόζονται στις σύγχρονες αποστολές και αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την αλτιμετρία στον ανοιχτό ωκεανό, η αλτιμετρία στις παράκτιες περιοχές είναι σε μεγάλο μέρος σε πειραματικό στάδιο, συνεπώς είναι σημαντική και η πιθανότητα εξελίξεων η οποία θα αλλάξει τα μέχρι τώρα γνωστά δεδομένα και τις μεθόδους επεξεργασίας. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι μετρήσεις παλιρροιογράφων οι οποίοι προσφέρουν τιμές για σύγκριση (ground truth και validation), ενώ οι αλγόριθμοι επεξεργασίας εστιάζουν στο να λύσουν ή να περιορίσουν υπάρχοντα προβλήματα στη καταγραφή και στην ερμηνεία των δεδομένων από τους αλτιμετρικούς δορυφόρους. Ρόλο κλειδί παίζει ο δορυφόρος AltiKa, ο οποίος φέρει καινοτομίες που θα επηρεάσουν σημαντικά το μέλλον της αλτιμετρίας και ο αλγόριθμος ALES, ο οποίος παρέχει την αξιοποίηση των δεδομένων με το βέλτιστο προς το παρών τρόπο και φέρνει την αλτιμετρία σε πολύ μικρή απόσταση από την ακτή. Εκτιμάται πως στο προσεχές μέλλον τα παρόντα προβλήματα θα επιλυθούν σε ικανοποιητικό βαθμό και η παράκτια αλτιμετρία θα γίνει μια πραγματικότητα καθώς τα δεδομένα της θα είναι πολύτιμα για να φανεί η επίδραση των θαλάσσιων φαινομένων στις παράκτιες περιοχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑ

4.1 ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ ΜΕΣΑΙΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.

Σύμφωνα με τον Chelton [1] οι δίνες μεσαίας κλίμακας είναι ένα πολύ σύνθητες φαινόμενο και αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της ωκεάνιας κυκλοφορίας και διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή, καθώς μεταφέρουν με μη ευθύγραμμο τρόπο μέρος της ωκεάνιας μάζας μαζί με τη θερμότητα και τα λοιπά συστατικά που περιέχει. Με τη κατάλληλη διάταξη μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές μεγάλης κλίμακας στην ωκεάνια διάταξη παρέχοντας ενέργεια στην αρχική κυκλοφορία πράγμα το οποίο τις καθιστά απαραίτητο συστατικό το οποίο πρέπει να μελετηθεί για το προσδιορισμό της ωκεάνιας πληροφορίας. Η παρατήρηση και η μελέτη τους υλοποιείται με μετρήσεις πεδίου εδώ και πολλά χρόνια, όμως η μικρή κλίμακα συγκεκριμένα στη περιοχή της Μεσογείου καθιστά προβληματική τη συστηματική παρατήρηση και μελέτη τους. Συγκεκριμένα εφαρμογές που αφορούν αλτιμετρικά δεδομένα μας δίνουν πολύτιμα στοιχεία που αφορούν τις δίνες στην περιοχή της Μεσογείου και τα χαρακτηριστικά τους όπως το μέγεθος, το πλάτος και η διαδρομή διάδοσης. Χρήσιμη είναι η καταγραφή και ανάλυση προτύπων που δημιουργούνται, ενώ μια πολύτιμη μέθοδος είναι η εφαρμογή του εντοπισμού των δινών, μέσω ενός μοντέλου υψηλής ανάλυσης που αφορά την περιοχή, ενώ παρεμβάλλονται αλτιμετρικοί χάρτες. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας παρέχει χρήσιμα δεδομένα για τις δίνες μεσαίας κλίμακας που υπάρχουν στη περιοχή. Σημειώνεται πως η επιφανειακή κυκλοφορία στην Δυτική Μεσόγειο είναι κυρίως κυκλωνική, ενώ σε κάποιες περιοχές της λεκάνης παρατηρείται ισχυρή δραστηριότητα από δίνες. Η διαδικασία της παρεμβολής των αλτιμετρικών χαρτών σε ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης της Δυτικής Μεσογείου επιτρέπει την εξαγωγή της δραστηριότητας των δινών μεσαίας κλίμακας.



Εικόνα. 4.1 Η βαθυμετρία και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της θαλάσσιας περιοχής της Δυτικής Μεσογείου. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Για τα δεδομένα που αφορούν τη θαλάσσια στάθμη υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης βαθμονομημένων χαρτών που περιλαμβάνουν τη δυναμική τοπογραφία γνωστή ως ADT (Absolute Dynamic Topography). Συγκεκριμένα από την AVISO είναι διαθέσιμοι ημερήσιοι βαθμονομημένοι χάρτες που περιλαμβάνουν τη δυναμική τοπογραφία, ενώ ο κάρναβος έχει διακριτική ικανότητα που φτάνει το 1/8 της μοίρας. Για τη παραγωγή των δεδομένων αυτών αξιοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα με βέλτιστη παρεμβολή, καθώς η τεχνική αυτή διορθώνει τα σφάλματα της κυματομορφής και το θόρυβο των μετρήσεων. Σημαντική είναι η χρήση στα δεδομένα κατά μήκος των δορυφόρων ενός φίλτρου για την ισχύ του σήματος το οποίο περιορίζει το θόρυβο.

4.2 ΤΑ ΣΕΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

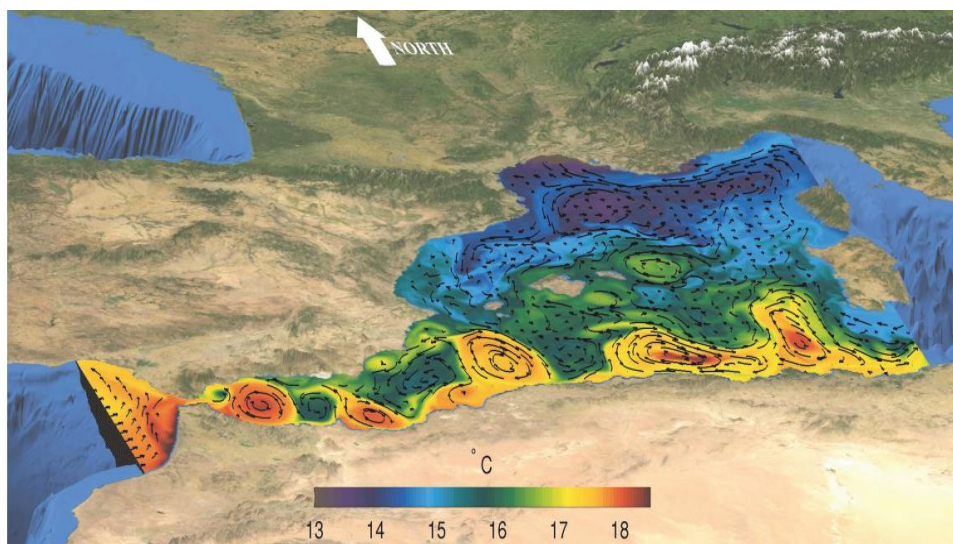
Για τη μελέτη των δινών μεσαίας κλίμακας της Μεσογείου αξιοποιήθηκε ένα τοπικό μοντέλο ωκεάνιου συστήματος το οποίο σχεδιάστηκε σύμφωνα με την έρευνα του Shcheretkin (2005). Το σύστημα αυτό αποτελεί μια ελεύθερη τρισδιάστατη επιφάνεια η οποία έχει ενταχθεί στο σύστημα συντεταγμένων σίγμα σύμφωνα με την έρευνα του (Haney, R. 1991), το οποίο αξιοποιείται για ωκεανογραφικές έρευνες και αποτελείται από διακριτές διαφορικές εξισώσεις και υδροστατικές προσεγγίσεις. Το μοντέλο εκτείνεται από τον κόλπο του Καντίθ έως τη Κορσική και τη Σαρδηνία. Η οριζόντια του ανάλυση επιτρέπει την διάκριση των κυματομορφών μήκους 24 χιλιομέτρων, το οποίο με τη σειρά του δίνει την δυνατότητα να αναπαρασταθούν δίνες με ακτίνα κύκλου ίση με 6 χιλιόμετρα. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός βαθυμετρικών δεδομένων από το μοντέλο των Smith και Sandwell του 1997 με ένα πιο λεπτομερές βαθυμετρικό μοντέλο για τη περιοχή του Γιβραλτάρ. Η ατμοσφαιρική επιρροή αναπαρίσταται σύμφωνα με το σετ δεδομένων του

Saha (2010) το οποίο διαθέτει χωρικό κάρναβο των 35 χιλιομέτρων με χρονικό βήμα 6 ωρών και περιλαμβάνει μια τυπική διατύπωση για τη θερμοκρασία την ορμή και τις εισροές γλυκού νερού από τους ποταμούς.

Table 1. Characteristics of the ROMSWMED32 Simulation

Area	WMed: 7.4°W–10°E 34.6°N–44.7°N
Period	1993–2012
Horizontal resolution	1/32°
Forcings	NCEP-CFSR (6 h, 35 km)
Boundaries	NEMOMED12 (daily)
Sponge	Yes (45 km)
Nudging	2-D at boundaries
Outputs	Daily averages
Vertical levels: Number (θ_S, θ_B)	32 (6.5, 1.5)
$r_{x0(\max)}$	0.2
Δt	240 s
Nb barotropic steps	25
Background vertical mixing	0
Bottom drag	Linear ($\gamma = 0,0003 \text{ m s}^{-1}$)

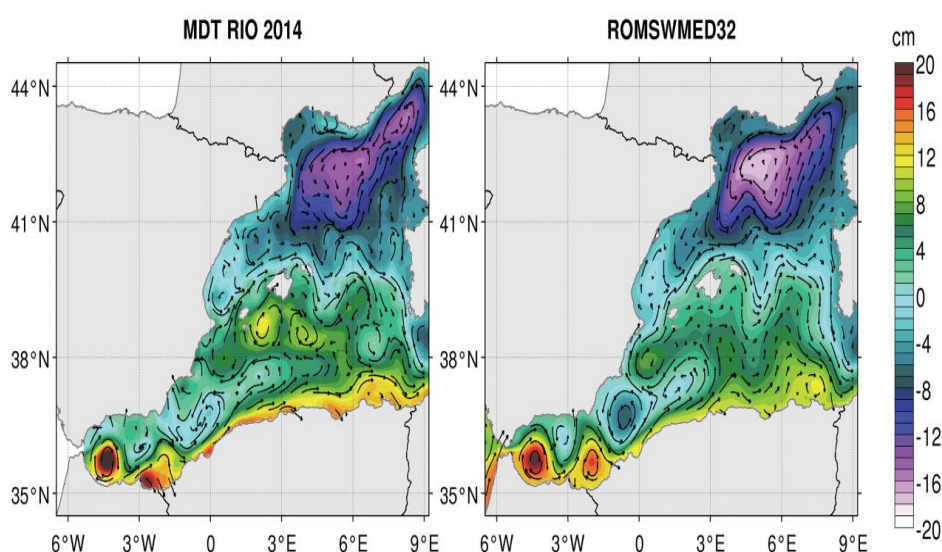
Εικόνα 4.2 Τα χαρακτηριστικά του συστήματος προσομοίωσης. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.



Εικόνα 4.3 Στιγμιότυπο της επιφανειακής θαλάσσιας θερμοκρασίας και των θαλάσσιων ρευμάτων της προσομοίωσης. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΟΠΙΚΟΥ ΩΚΕΑΝΙΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΥΤΙΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

Σκοπός του μοντέλου είναι η αναπαράσταση της παραγωγής και της μετάδοσης των μεσαίας κλίμακας δινών στη Δυτική Μεσόγειο. Θα εξεταστούν δύο παραδείγματα αξιολόγησης του μοντέλου. Σύμφωνα με τον Romain Escudier είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει την ωκεάνια θαλάσσια κυκλοφορία, όπως αυτή αναπαρίσταται σε παραπάνω διάγραμμα.

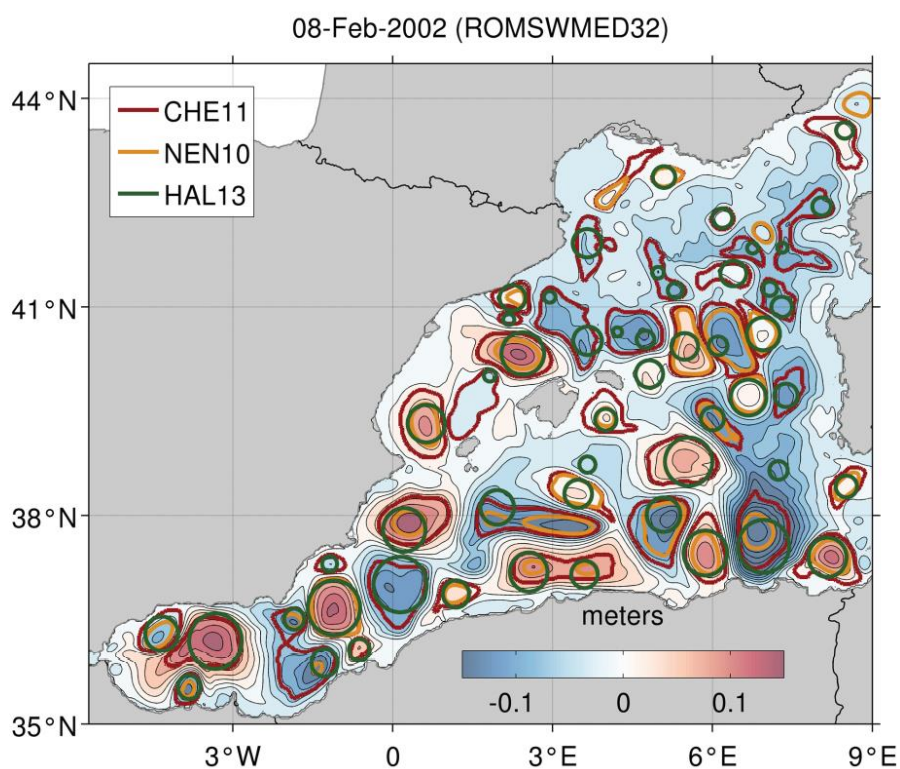


Εικόνα 4.4 Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με άλλο σετ δεδομένων. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Στο παραπάνω διάγραμμα δεξιά απεικονίζεται η μέση απόλυτη δυναμική τοπογραφία της προσομοίωσης για το διάστημα 1993-2012, ενώ αριστερά απεικονίζεται η μέση δυναμική τοπογραφία από την έρευνα της Rio (2014) με προσθήκη των επιφανειακών θαλάσσιων ανωμαλιών (Sea Level Anomalies – SLA) η οποία αποτελούσε τη καλύτερη προσέγγιση της μέσης θαλάσσιας κυκλοφορίας για τη περιοχή μελέτης κατά τη διάρκεια της έρευνας. Με σύγκριση των δύο αναπαραστάσεων εξάγεται το συμπέρασμα πως η μέση κυκλοφορία του μοντέλου επιτυγχάνει να αναπαραστήσει σημαντικά χαρακτηριστικά των δινών μεσαίας κλίμακας όπως το Αλγεριανό Ρεύμα, τις Αλβοριανές περιστροφές καθώς και το Βόρειο ρεύμα.

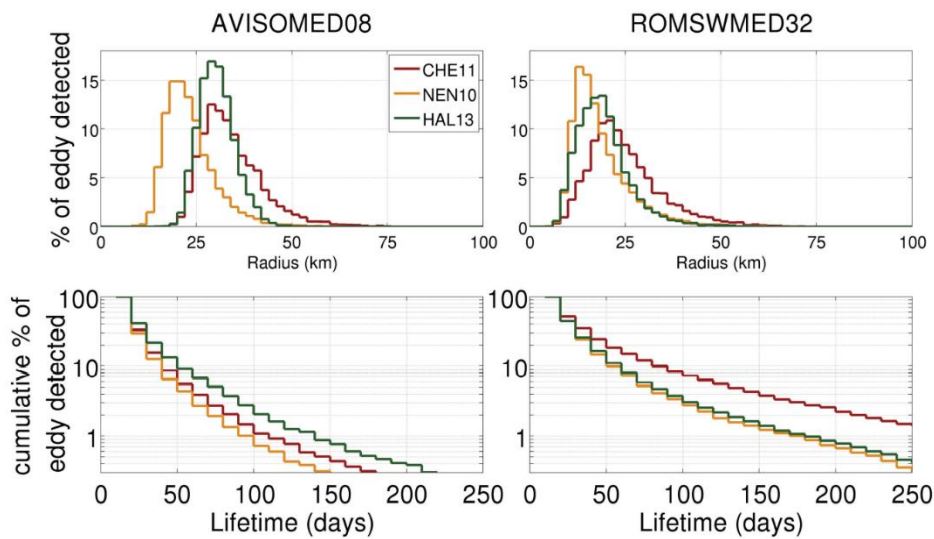
4.4 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ

Για τον εντοπισμό των δινών στη Δυτική Μεσόγειο χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με τον Romain Escudier ο συνδυασμός τριών μεθόδων, συγκεκριμένα η μέθοδος των κλειστών περιγραμμάτων της επιφανειακής θαλάσσιας ανωμαλίας, η μέθοδος της γεωμετρίας των ταχυτήτων και η μέθοδος του συνδυασμού της παραμέτρου Okubo-Weiss (σύμφωνα με τους Okubo(1970) και Weiss 1991) με τα κλειστά περιγράμματα. Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν στα σετ δεδομένων και μόνο τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που ήταν σταθερά και στις τρεις μεθόδους παρουσιάζονται για να ενισχυθεί η αξιοπιστία τους. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εντοπισμού των δινών εξετάζονται τα δεδομένα για τις τρεις μεθόδους στα διαβαθμισμένα δεδομένα αλιμετρίας, αλλά και στα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα 4.5 Το αποτέλεσμα των τριών μεθόδων για το μοντέλο προσομοίωσης της Δυτικής Μεσογείου. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

Παρατηρείται πως και για τις τρεις μεθόδους εντοπίζονται περισσότερες δίνες στο μοντέλο προσομοίωσης, γεγονός που οφείλεται στο ότι το μοντέλο μπορεί να επιλύσει μικρότερες κλίμακες από τα αλιμετρικά δεδομένα.

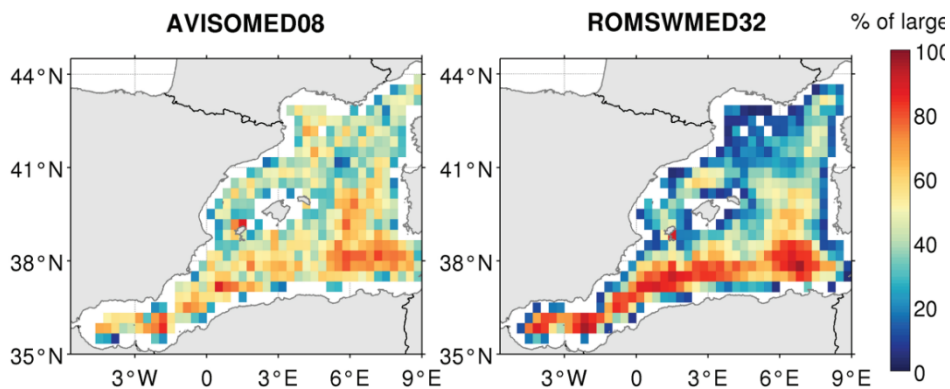


Εικόνα 4.6 Κατανομή των δινών που εντοπίστηκαν σε σχέση με την ακτίνα τους από τα αλιμετρικά δεδομένα αριστερά και από το μοντέλο προσομοίωσης δεξιά. Πηγή: Romain Escudier, Imedeia 2016

Παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζει τις δίνες να έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής και αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το μοντέλο έχει για κάθε ημέρα σταθερά δεδομένα εισόδου, ενώ τα αλιμετρικά δεδομένα υπάρχει η πιθανότητα να μην έχουν επαρκή κάλυψη σε μια περιοχή καθημερινά συνεπώς μια δίνη με μεγαλύτερο χρόνο ζωής να απεικονίζεται σε αυτά ως περισσότερες δίνες με μικρότερο χρόνο ζωής.

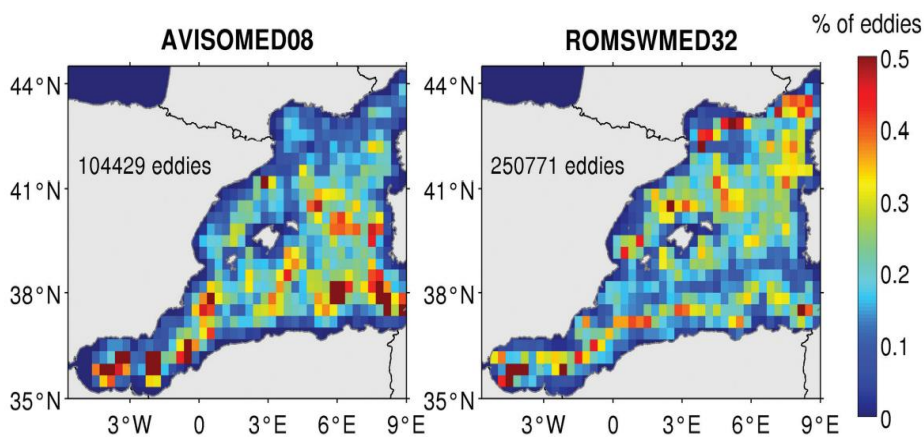
4.5 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ

Από το μοντέλο προσομοίωσης είναι διαθέσιμα τα δεδομένα για τα κέντρα των δινών για όλο το διάστημα ανάμεσα στα έτη 1993-2012. Σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στο μοντέλο και τα αλιμετρικά δεδομένα παρουσιάζονται στο Βόρειο Ρεύμα όπου πολλές δίνες εντοπίζονται στο μοντέλο προσομοίωσης, αλλά όχι στα αλιμετρικά δεδομένα.



Εικόνα 4.7 Χωρική κατανομή του ποσοστού των δινών με ακτίνα μεγαλύτερη των 35 χιλιομέτρων που εντοπίστηκαν με τις μεθόδους του μοντέλου προσομοίωσης και με βάση τα αλιμετρικά δεδομένα. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

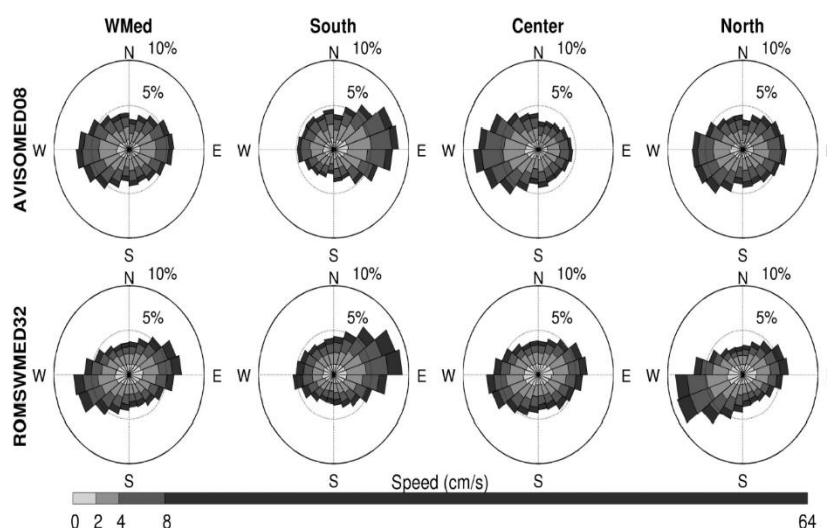
Παρατηρείται πως στο Βόρειο Ρεύμα υπάρχει μεγάλος αριθμός από μικρότερες δίνες σε σχέση με το Αλγεριανό Ρεύμα όπου οι δίνες είναι μεγαλύτερες και εντοπίζονται σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό από τα αλιμετρικά δεδομένα, τα οποία αδυνατούν να διακρίνουν την πληροφορία που εμφανίζεται στο μοντέλο προσομοίωσης για το Βόρειο Ρεύμα.



Εικόνα 4.8 Το πλήθος των δινών που εντοπίστηκαν σε κάθε κελί για το μοντέλο προσομοίωσης και για τα αλιμετρικά δεδομένα. Πηγή: Romain Escudier, Imedea 2016.

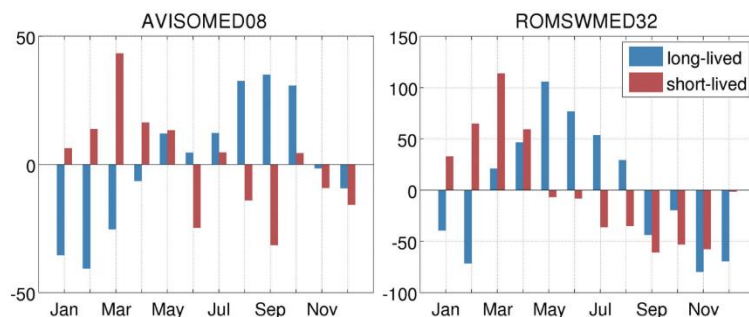
4.6 Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΝΩΝ

Σύμφωνα με τον Romain Escudier, ο αριθμός των δινών που εντοπίζονται σε καθημερινή βάση για το πλήρες διάστημα είναι 15 για την αλιμετρία και 34 για το μοντέλο προσομοίωσης.



Εικόνα. 4.9 Η κατεύθυνση της μετάδοσης των δινών που εντοπίστηκαν. Πηγή: Romain Escudier, Imedeia 2016.

Παρατηρείται πως στο σύνολο της Δυτικής Μεσογείου και για το σύστημα προσομοίωσης, αλλά και τα αλιμετρικά δεδομένα παρουσιάζεται μια τάση για κίνηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης, ενώ στα δεδομένα στις επιμέρους περιοχές παρατηρείται στο Νότιο τμήμα ισχυρή μετάδοση προς τα Ανατολικά, ενώ αντίθετα στο Βόρειο τμήμα η διεύθυνση μετάδοσης είναι προς τη Δύση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στο κεντρικό τμήμα για τα αλιμετρικά δεδομένα παρουσιάζεται μετάδοση προς τα Δυτικά, ενώ στο μοντέλο προσομοίωσης η μετάδοση είναι προς τα Ανατολικά και τα Δυτικά. Στη περίπτωση του μοντέλου προσομοίωσης το πολικό ιστόγραμμα της διεύθυνσης μετάδοσης επιβεβαιώνει την ύπαρξη ενός ετήσιου κύκλου, ενώ για τα αλιμετρικά δεδομένα δεν είναι ξεκάθαρη η συχνότητα του μοτίβου κυκλοφορίας.

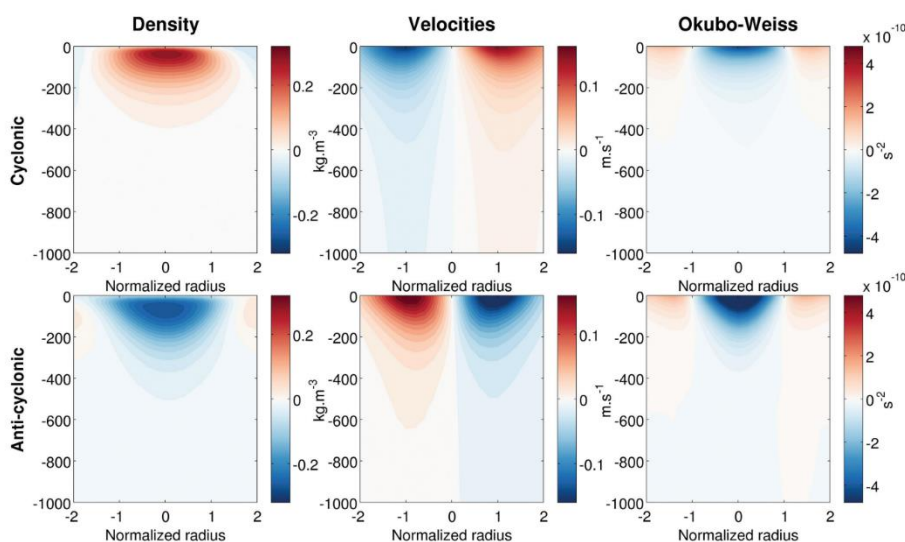


Εικόνα. 4.10 Ο αριθμός των εντοπισμένων δινών ανά μήνα για το μοντέλο προσομοίωσης και για τα αλιμετρικά δεδομένα.

Το ιστόγραμμα επιβεβαιώνει το προηγούμενο συμπέρασμα πως στο αριθμητικό μοντέλο είναι ευκολότερος ο εντοπισμός και η συνέχιση της παρατήρησης, συνεπώς δίνεται σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερος αριθμός από δίνες μεγάλης διάρκειας.

Το αριθμητικό μοντέλο παρέχει πληροφορία για τη τρισδιάστατη δομή των δινών.

Οι κυκλωνικές δίνες δίνουν αρνητική ανωμαλία θερμοκρασιών και θετική ανωμαλία στον δείκτη αλατότητας, συνεπώς θετικές ανωμαλίες στη πυκνότητα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι κυκλώνες ανεβάζουν στην επιφάνεια το παγωμένο και με μεγαλύτερο δείκτη αλατότητας νερό, ενώ αντίθετα οι αντικυκλώνες κατεβάζουν το παγωμένο νερό σε μεγαλύτερο βάθος. Τα φαινόμενα αυτά επεκτείνονται μέχρι και σε απόσταση που ισούται με 1.5 φορές το μήκος της ακτίνας που παρατηρείται.



Εικόνα 4.11 Διαγράμματα για τους δείκτες ανωμαλιών της πυκνότητας, της ταχύτητας, και της παραμέτρου Okubo-Weiss. Στα παραπάνω διαγράμματα ο άξονας X αφορά την απόσταση από το κέντρο της δίνης, ενώ ο άξονας Y το βάθος. Παρατηρείται ότι οι αντικυκλώνες έχουν μικρότερη διάμετρο όσο αυξάνεται το βάθος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενότητα αυτή είχε σαν σκοπό την ανάδειξη των ιδιοτήτων των δινών μεσαίας κλίμακας και το ρόλο της αλτιμετρίας στον εντοπισμό και την παρακολούθηση τους. Σαν πηγή αναφοράς χρησιμοποιήθηκε μια διεπιστημονική έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2016, η οποία ανέδειξε αρκετά ζητήματα προς επίλυση όσον αφορά τις δυνατότητες των δεδομένων από τους αλτιμετρικούς δορυφόρους. Μερικά από τα αποτελέσματα της έρευνας είναι ότι το υψηλής ανάλυσης μοντέλο προσομοίωσης έχει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα από το σετ δεδομένων της αλτιμετρίας, και ότι η μέση ακτίνα των δινών μειώνεται από 30km για τα αλτιμετρικά δεδομένα σε 25km στο μοντέλο. Επιπρόσθετα οι περισσότερες δίνες και στα δύο σετ δεδομένων έχουν χρόνο ζωής μικρότερο από 13 μέρες. Τέλος για την κατακόρυφη δομή των δινών, παρατηρείται ότι οι αντικυκλωνικές δίνες έχουν κωνικό σχήμα και ότι όλες οι δίνες στην περιοχή έχουν διαπλάτυνση στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης.

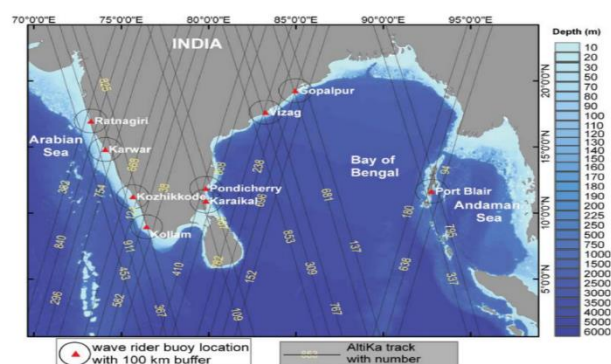
4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΥ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (SW_h) ΑΠΟ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (BUOYS).

Σύμφωνα με την έρευνα που διεξήχθη από τον K.Hareef Baba Shaeb στη περιοχή Nagpur της Ινδίας το 2015 πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υπολογισμών της παραμέτρου SW_h από τα δεδομένα της αλτιμετρικής αποστολής AltiKa με το ύψος κυματισμών από επιτόπιους μετρητές υψομέτρου κυματισμών (buoys), οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε εννιά σημεία παράκτια στην ακτή του Ινδικού Ωκεανού με σκοπό την αξιολόγηση των παρατηρήσεων του δορυφόρου στις περιοχές κοντά στην ακτή. Η παράμετρος SW_h αφορά τη μέση τιμή του ενός τρίτου του μεγαλύτερου ύψους κυματισμού που παρατηρείται και εκτιμάται με βάση την κλίση της πρώτης ακμής του επιστρεφόμενου σήματος στον δέκτη του αλτιμέτρου. Η παράμετρος αυτή μετριέται συστηματικά σε παγκόσμια κλίμακα από το 1978 και μετά με αρχή τον δορυφόρο SeaSat και στη συνέχεια από μεγάλο αριθμό δορυφόρων οι οποίοι καταγράφουν τιμές συστηματικά μέχρι και σήμερα. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκε δείγμα μετρήσεων της παραμέτρου από τον δορυφόρο AltiKa, ο οποίος είναι προϊόν συνεργασίας ανάμεσα στον Ινδικό Οργανισμό Ερευνών του Διαστήματος και το Γαλλικό Κέντρο Γεωχωρικών Ερευνών (CNES). Ο σκοπός της αξιολόγησης της παραμέτρου SW_h είναι ο εντοπισμός των σφαλμάτων που υπεισέρχονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και η αξιολόγηση περισσότερων

περιοχών θα προσφέρει τη δυνατότητα των συγκρίσεων σε παγκόσμια κλίμακα. Η πρώτη αξιολόγηση των δεδομένων ανέμου και κυματισμών πραγματοποιήθηκε στο δορυφόρο GeoSat το 1987 από την Ella Dobson et al. Η αξιολόγηση των παραμέτρων ενισχύει την αξιοπιστία των μετρήσεων και επιτρέπει την χαρτογράφηση της θαλάσσιας κατάστασης παγκοσμίως.

Αυτό ισχύει σε μεγάλο βαθμό για την αλιμετρία που εφαρμόζεται στον ανοιχτό ωκεανό, όμως όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα στις παράκτιες περιοχές είναι δυσκολότερη η εξαγωγή και η αξιοποίηση των πληροφοριών για πλήθος παράγοντες όπως θόρυβος και τα σφάλματα που παρατηρούνται στις μετρήσεις όταν στο ίχνος της τροχιάς εισάγεται τμήμα του ηπειρωτικού κορμού της στεριάς. Το πρόβλημα αυτό αντισταθμίζει ο δορυφόρος AltiKa με χρήση ενός αλιμέτρου στη συχνότητα Ka η οποία έχει υψηλότερη συχνότητα και μικρότερο αποτύπωμα στο έδαφος, πράγμα το οποίο οδηγεί σε καλύτερη χωρική ανάλυση. Επιπρόσθετα διαθέτει διπλό αριθμό εισόδων (128) σε σχέση με τον δορυφόρο EnviSat, πράγμα το οποίο οδηγεί σε καλύτερη δειγματοληψία του επιστρεφόμενου σήματος και συνεπώς μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της παραμέτρου του σημαντικού υψομέτρου κυματισμών.

Η έρευνα συμπεριλαμβάνει δεδομένα των δεκατριών πρώτων κύκλων της δορυφορικής αποστολής SARAL/AltiKa για το χρονικό διάστημα από τον Μάρτιο του 2013 έως τον Ιούνιο του 2014. Για την αξιολόγηση της απόδοσης των δεδομένων αλιμετρίας στη περιοχή, επιλέχθηκαν εννιά μετρητές υψομέτρου κυμάτων στις περιοχές της Ανατολικής ακτής (Βεγγάλη), τη Δυτική ακτή (Αραβική θάλασσα) και τις νήσους Andaman και Nicobar.



Εικόνα. 4.12 Η περιοχή μελέτης και οι θέσεις των μετρητών κυματισμών σε συνδυασμό με τα αποτυπώματα της τροχιάς του δορυφόρου SARAL/AltiKa. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Station	Longitude (East)	Latitude (North)	Water Depth (m)	Distance from shoreline (km)	AltiKa tracks crossing a buffer of 100 km around the buoy
Gopalpur	84.967	19.267	20	1.7	137, 152, 681 & 696
Karaikal	79.875	10.91	12	2	109, 410, 567 & 868
Karwar	74.083	14.824	15	4.6	296, 754, 840 & 911
Kollam	76.445	8.979	22	8.6	38, 367, 582 & 825
Kozhikkode	75.668	11.241	21	1.6	124, 367 & 668
Pondicherry	79.842	11.874	15	5.7	567 & 868
Port Blair	92.765	11.661	19	1.3	94, 180, 337, 638 & 795
Ratnagiri	73.263	16.977	13	1.6	382,453 & 911
Vizag	83.266	17.634	18	1	238, 309, 767, 782 & 853

Εικόνα 4.13 Η θέση των μετρητών κυματισμών, το βάθος του πυθμένα στο σημείο και η απόσταση από την ακτή. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Η απόσταση των μετρητών κυματισμών από την ακτή είναι της τάξης από 1Km έως 10Km, ενώ οι τροχιές που αξιοποιήθηκαν είναι σε απόσταση έως 100Km από τον δέκτη. Ο δορυφόρος AltiKa αποτελεί τη συνέχιση της αποστολής Envisat και λειτουργεί στη συχνότητα Ka-Band 35.75 GHz με 500MHz εύρος ζώνης. Η ανάλυση των χαρακτηριστικών του επιστρεφόμενου σήματος παρέχει εκτιμήσεις του οπισθοσκεδαζόμενου υπολειπόμενου σφάλματος (residual) και της ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο. Σύμφωνα με τον Brown (1979) η κλίση της πρώτης ακμής του επιστρεφόμενου σήματος είναι στοιχείο που αξιοποιείται για τον υπολογισμό της παραμέτρου SW_h. Ο σχεδιασμός της αποστολής στόχευε σε υπολογισμό της παραμέτρου SW_h με ακρίβεια 10% ή 6.3cm, ενώ τα δεδομένα της μελέτης παρέχονται από το προσωρινό αρχείο γεωφυσικών δεδομένων (IGDR) στη απλή μορφή τους, ενώ τα προϊόντα αλτιμετρίας σχεδιάστηκαν και διανεμήθηκαν από την AVISO.

4.8 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα της παραμέτρου SW_h για τους κυματικούς μετρητές συλλέχθηκαν από την Ινδική κεντρική υπηρεσία πληροφοριών ωκεανού (INCOIS). Οι δέκτες συλλέγουν δεδομένα για την οριζόντια και την κατακόρυφη επιτάχυνση με χρήση επιταχυνσιόμετρου και ενσωματωμένης πυξίδας και υπολογίζουν την κατεύθυνση της μετακίνησης στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα σύμφωνα με τους Barstow και Kollstad (1991). Οι μετατοπίσεις μετατρέπονται σε δισδιάστατα φάσματα κυματικής ενέργειας, τα οποία αναπαριστούν κατανομές κυματικών ενεργειών σε διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις. Οι αναπόσπαστες κυματικές παράμετροι, όπως το SWH (H_s), το μέγιστο κυματικό ύψος H_{max}, η περίοδος αιχμής κύματος (T_p), και η μέση κυματική περίοδος T_m υπολογίζονται από το κυματικό φάσμα. Ο χρόνος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο UTC (Universal Coordinated Time) και τα δεδομένα καταγράφονται συνεχόμενα στα 1.28Hz και τα δεδομένα για κάθε 30 λεπτά παρέχονται ως ένα αρχείο. Οι εννιά κυματικοί δέκτες επιλέχθηκαν με βάση τη συνέχεια των δεδομένων τους, ώστε να έχουν ελάχιστες ασυνέχειες για τα δεδομένα από το Μάρτιο του 2013 έως τον Ιούνιο του 2014. Η σύγκριση των δεδομένων από τα

WRB (Wave Rider Buoys) και τον δορυφόρο AltiKa έγινε με βάση στατιστικά δεδομένα, συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν αλτιμετρικά δεδομένα για τα οποία το τροχιακό αποτύπωμα απέχει 50Km και 100Km αντίστοιχα από το κυματικό δέκτη (WRB) και το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις μετρήσεις του αλτιμέτρου επιλέχθηκε στα 30 λεπτά, ώστε να αντιστοιχεί σε αυτό των κυματικών δεκτών.

Για τον καθορισμό των παρατηρήσεων που αναλύθηκαν εφαρμόστηκαν το κριτήριο 1 που αφορά παρατηρήσεις με χρονικό περιθώριο 30 λεπτά και σε απόσταση 50km από τους μετρητές WRB και το κριτήριο 2 που αφορά παρατηρήσεις με χρονικό περιθώριο 30 λεπτών και απόσταση 100km από τους μετρητές WRB. Τα παραπάνω κριτήρια έδωσαν σαν αποτέλεσμα 166 ζεύγη δεδομένων για το πρώτο κριτήριο και 551 ζεύγη δεδομένων για το δεύτερο. Οι στατιστικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση είναι η απόκλιση, η ρίζα μέσης τετραγωνικής αποκλίσεως, η παράμετρος SI και ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r και με A_i συμβολίζονται οι παρατηρήσεις SWh της αλτιμετρίας, ενώ με B_i συμβολίζονται οι παρατηρήσεις SWh των WRB.

$$r = \frac{\sum((A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B}))}{\sqrt{\sum(A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum(B_i - \bar{B})^2}} \quad (4.1)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(A_i - \bar{A}) - (B_i - \bar{B})]^2}}{\bar{B}} \quad (4.2)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum (A_i - B_i) \quad (4.3)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (A_i - B_i)^2} \quad (4.4)$$

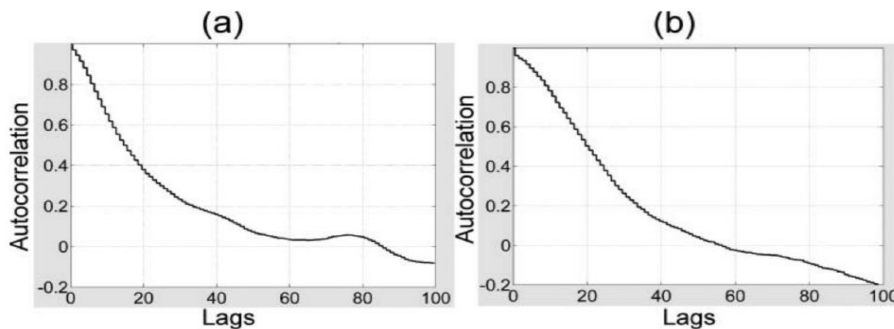
Για την σύγκριση των δορυφορικών και των επιτόπιων μετρήσεων σημαντικό ρόλο έχει η χρονική και χωρική συνοχή των παρατηρήσεων, ενώ η χωρική αυτοσυσχέτιση υπολογίζει τη συσχέτιση μεταξύ παρατηρήσεων που έχουν απόσταση μεταξύ τους. Η παράμετρος k για τη χρονοκαθυστέρηση ορίζεται ως ο αριθμός των βημάτων που μια σειρά παρατηρήσεων μετατοπίζεται ως προς τον εαυτό της κατά τη διαδικασία της αυτοσυσχέτισης.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

$$\bar{x} = \sum_{t=1}^{N-k} \frac{x_t}{N} \quad (4.6)$$

Όπου k είναι η χρονοκαθυστέρηση, x_t είναι τα δεδομένα με βήμα t , N είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και \bar{x} είναι η μέση τιμή των παρατηρήσεων.

Η σημασία της χωρικής συνοχής στην αξιολόγηση των δεδομένων αλτιμετρίας έχει υπογραμμιστεί στις έρευνες των Bhandari (1995) και Hareef (2015).



Εικόνα 4.14 Παράδειγμα αυτοσυσχέτισης της παραμέτρου SWh για σειρά δεδομένων αλτιμετρίας και μετρητών WRB με τη χρονική καθυστέρηση για τη τροχιά 152. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Σύμφωνα με τον Sarkar (2002) μπορούν να χρησιμοποιηθούν το σύνολο των επιτόπιων μετρήσεων με χρήση ενός σχεδίου χρήσης βαρών. Η τεχνική αυτή διορθώνει το σφάλμα που προκύπτει από τη χωρική και χρονική ασυμβατότητα των παρατηρήσεων και βελτιώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της διαφοράς μέσω του πολλαπλασιασμού των χρονικών διαφορών ανάμεσα στις παρατηρήσεις με τα βάρη που προκύπτουν σύμφωνα με την έρευνα του Cresman (1954).

$$W(t) = \frac{\tau^2 - t^2}{\tau^2 + t^2} \quad t < \tau$$

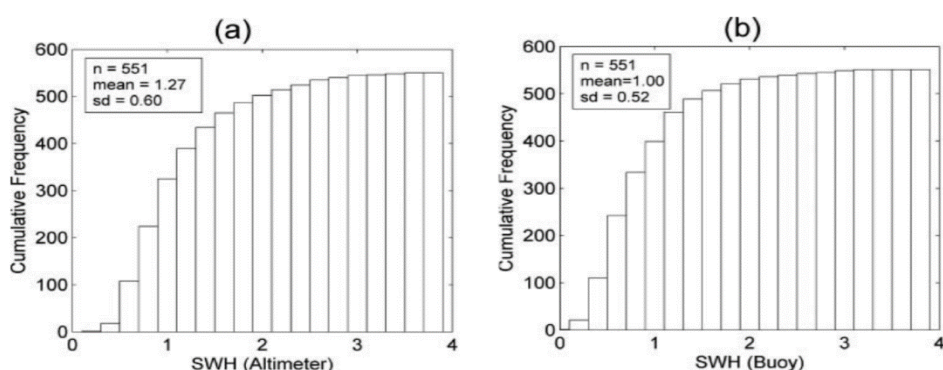
$$W(t) = 0 \quad t \geq \tau \quad (4.7)$$

Ο χρόνος t είναι η χρονική διαφορά ανάμεσα στα σετ δεδομένων, ενώ η παράμετρος τ αφορά μια τιμή της συνάρτησης-παραθύρου (φίλτρο) πέρα από την οποία η συνάρτηση παίρνει τη τιμή μηδέν. Με βάση την έρευνα του Sarkar (2002) η τιμή τ για τη παράμετρο SWh μπορεί να πάρει τιμές από 0.5 ώρες έως 3 ώρες, ενώ στην έρευνα

του (K. Hareef Baba Shaeb 2015), η τιμή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 1.5 ώρα. Με αντίστοιχο τρόπο ένα κατώφλι για τα 100km απόσταση ορίζεται και για τη χωρική συνοχή των δεδομένων. Ο συνδυασμός των βαρών με τη μέθοδο της αυτοσυσχέτισης βελτιώνει το εκτιμώμενο μέσο τετραγωνικό σφάλμα και βοηθάει τη χωρική και χρονική συνοχή των σετ δεδομένων.

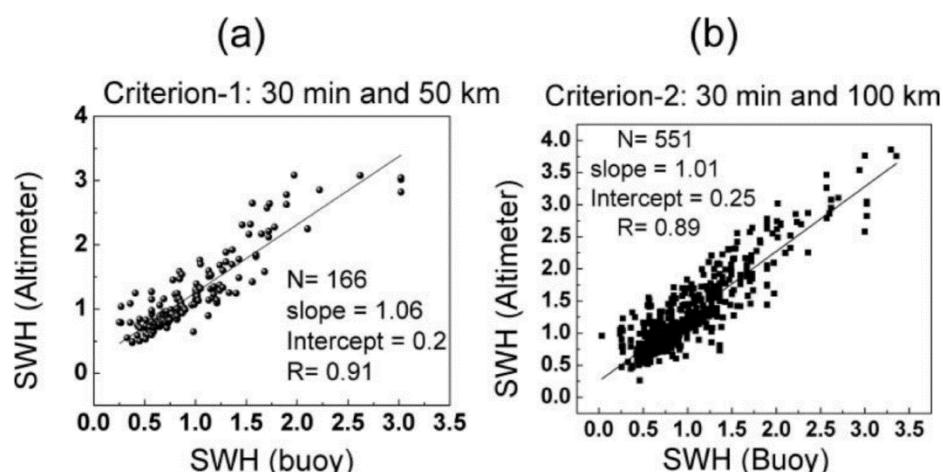
4.9 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα ιστογράμματα για τη παράμετρο SWH από τα δεδομένα αλιμετρίας και τους μετρητές WRB με χρονική διαφορά στα 30 λεπτά και απόσταση τα 100Km δείχνουν ότι η πλειοψηφία των τιμών βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 0 μέτρα και 2.5 μέτρα.



Εικόνα 4.15 Τα αθροιστικά ιστογράμματα για τις τιμές της παραμέτρου SWH για τα δεδομένα αλιμετρίας και τους μετρητές WRB. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

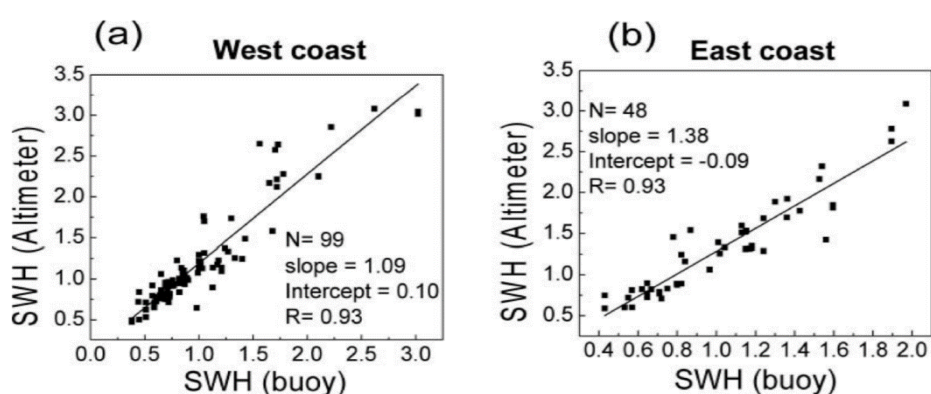
Παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα της αλιμετρίας με τους μετρητές WRB



Εικόνα 4.16 Τα διαγράμματα διασποράς για τα δεδομένα με βάση τα δύο κριτήρια. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Η προσαρμοσμένη κλίση των διαγραμμάτων διασποράς είναι 1.06, πράγμα το οποίο υποδεικνύει υπερεκτίμηση της τάξης του 6%, ενώ τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα

της εκτίμησης είναι 0.25 μέτρα και 0.36 μέτρα αντίστοιχα. Οι πηγές του σφάλματος είναι η χωρική και χρονική ασυνέχεια και εσωτερικά σφάλματα των μετρητών WRB. Η συσχέτιση των δεδομένων φτάνει το 91% και υποδεικνύει πως τα δεδομένα αλτιμετρίας μπορούν να καταγράψουν με υψηλή ακρίβεια την εποχική μεταβλητότητα της παραμέτρου SWH. Η περίπτωση του δεύτερου κριτηρίου παρέχει μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων για μια πιο εμπειριστατωμένη στατιστική ανάλυση και η κλίση των διαγραμμάτων διασποράς είναι 1.01, δηλαδή υπάρχει πλήρης συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα της αλτιμετρίας και των μετρητών WRB. Σε επόμενο βήμα έγινε σύγκριση των δεδομένων με διαχωρισμό των μετρητών της Δυτικής ακτής με αυτούς της Ανατολικής ακτής με βάση το κριτήριο 1 με σκοπό την ανάδειξη τοπικών παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της σύγκρισης.



Εικόνα 4.17 Τα διαγράμματα διασποράς του ζεύγους σύγκρισης για τη Δυτική και την Ανατολική ακτή. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Station	N	SI	Bias	RMSE	R	Slope	LCL* (Slope)	UCL* (Slope)	Intercept	LCL (Intercept)	UCL (Intercept)
West Coast											
Karwar	31	0.89149	0.11081	0.16556	0.9115	0.72629	0.60433	0.84825	0.34134	0.23265	0.45003
Kollam	10	0.18567	0.29493	0.36436	0.96112	1.34341	1.0481	1.63871	-0.1008	-0.4639	0.26228
Kozhikkode	14	0.32597	0.36558	0.49221	0.91382	1.48511	1.08926	1.88097	-0.126	-0.5596	0.30757
Ratnagiri	44	0.16919	0.167	0.24429	0.96581	1.03773	0.95207	1.12339	0.12724	0.02151	0.23296
West coast buoys pooled data	99	0.21763	0.19041	0.28784	0.93541	1.08769	1.00494	1.17043	0.10344	0.011	0.19588
East Coast											
Gopalpur	12	0.18562	0.26327	0.33526	0.95943	1.52222	1.22288	1.82156	-0.3207	-0.668	0.02652
Karaikal	4	0.19788	0.42158	0.45016	0.84457	1.03418	-0.4953	2.56368	0.39011	-1.0976	1.87784
Pondicherry	12	0.13662	0.22083	0.25571	0.96193	1.1298	0.91495	1.34466	0.09832	-0.121	0.31766
Vizag	20	0.30657	0.34181	0.47258	0.93783	1.50091	1.23414	1.76767	-0.1914	-0.499	0.11626
East coast buoys pooled data	48	0.24659	0.29858	0.39292	0.93435	1.37618	1.22085	1.5315	-0.0911	-0.2633	0.0812
Island											
Port Blair	19	0.8727	0.6531	0.7489	0.5153	2.01808	0.30064	2.3127	-0.1992	-0.0413	1.03835

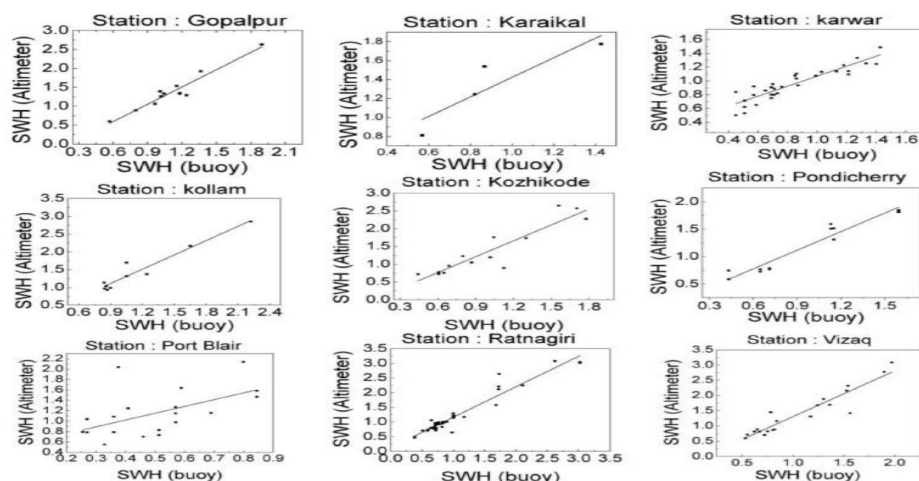
*LCL - lower limit of 95% confidence level, UCL - Upper limit of 95% confidence level.

Εικόνα 4.18 Οι στατιστικές παράμετροι της σύγκρισης. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Τα δεδομένα της σύγκρισης δείχνουν πως οι παρατηρήσεις αλιμετρίας υπερεκτιμούν την τιμή της παραμέτρου SWH, με τα δεδομένα της Ανατολικής ακτής να ξεπερνούν το 20% στην υπερεκτίμηση της τιμής, ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης στην ανατολική ακτή να είναι 26% μεγαλύτερο από αυτό της Δυτικής ακτής.

432

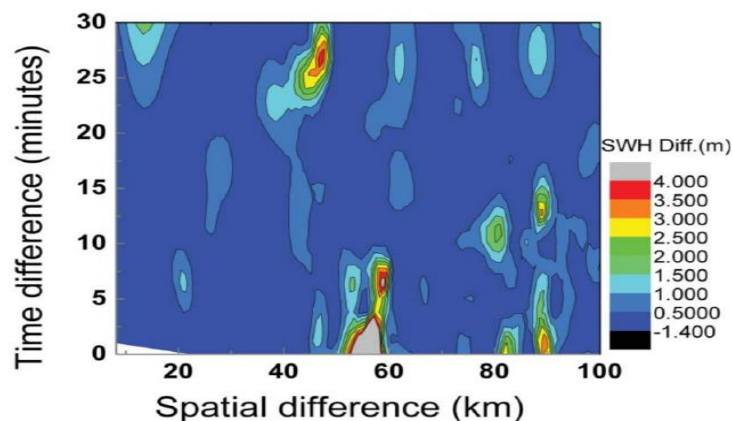
K. Hareef Baba Shaeb et al.



Εικόνα 4.19 Τα διαγράμματα διασποράς για τον κάθε μετρητή ξεχωριστά. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

Τα δεδομένα δείχνουν διαφορά στα αποτελέσματα για τις δύο ακτές γεγονός που οφείλεται σε παλίρροιες και δίνες μεσαίας κλίμακας οι οποίες επηρεάζουν την Ανατολική ακτή. Η υπερεκτίμηση των δεδομένων αλιμετρίας αποδίδεται στο μικρότερο πλήθος παρατηρήσεων του δορυφόρου και σε άλλες γεωφυσικές παραμέτρους στη περιοχή μελέτης.

Η τιμή της διακύμανσης των δεδομένων για τη παράμετρο SWH που βρίσκονται μέσα στο χρονικό παράθυρο των 30 λεπτών και το χωρικό παράθυρο των 100km, οδηγεί στο συμπέρασμα πως, μέχρι τα 40km δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές, ενώ από τα 45km και πάνω υπάρχει σαφής αύξηση των διαφορών, πράγμα το οποίο συμπίπτει με την έρευνα του Hwang et al. (1998) ο οποίος σημειώνει πως είναι αναμενόμενη η αποσυσχέτιση των μετρήσεων όσο αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στο ίχνος του δορυφόρου και τους μετρητές WRB.



Εικόνα 4.20 Η σύγκριση του ζεύγους δεδομένων που πληρούν τις συνθήκες για την απόσταση και τη χρονική διαφορά. Πηγή: K. Hareef Baba Shaeb 2015.

	30 min & 50 km	30-min & 100 km	Reduction in RMSE (%)	
			30 min & 50 km	30 min & 100 km
RMSE	0.3594	0.3821		
Time-weighted RMSE	0.3409	0.3656	5.15	4.32
Distance-weighted RMSE	0.2674	0.1658	25.6	56.6

Εικόνα 4.21 Η εφαρμογή των βαρών Cressman για τη μείωση του σφάλματος RMSE στα δεδομένα.

4.11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σύμφωνα με τους K. Hareeb Baba Shaed et al., η εφαρμογή χωρικών βαρών στις παρατηρήσεις οδηγεί σε πολύ σημαντική μείωση των σφαλμάτων της εκτίμησης συγκεκριμένα της της τάξης του 25% για το πρώτο κριτήριο και του 56% για το δεύτερο. Τα παραπάνω αποτελέσματα συστήνουν πως η χωρική απομάκρυνση του αποτυπώματος του δορυφόρου από τους δέκτες WRB συνιστά σημαντικότερη πηγή σφάλματος απ' ότι η χρονική διαφορά ανάμεσα στις παρατηρήσεις. Τα στατιστικά δείχνουν πως οι παρατηρήσεις του δορυφόρου Saral/AltiKa επιτυγχάνουν την επιθυμητή ακρίβεια ακόμα και σε περιοχές κοντά στην ακτή. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης είναι μικρότερο από 0.4m ανάμεσα στις παρατηρήσεις του δορυφόρου και τους μετρητές WRB, ενώ παρατηρείται πως υπάρχει μικρή υπερεκτίμηση των παρατηρήσεων του δορυφόρου κοντά στην ακτή. Υπάρχει σαφής διαφορά ανάμεσα στα στατιστικά των ζευγαριών για τη Δυτική και την Ανατολική ακτή, με την Ανατολική να παρουσιάζει μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης 26% μεγαλύτερο. Επιπρόσθετα παρατηρείται πως το απόλυτο σφάλμα των μετρήσεων της παραμέτρου SWH αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή του και πως η διαφορές των υψομέτρων αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου με τον μετρητή WRB, ενώ μικρότερο ρόλο παίζει η χρονική διαφορά ανάμεσα στις καταγραφές. Τα παραπάνω στοιχεία συντελούν στην επικύρωση της

δυνατότητας του δορυφόρου Saral/Altika να παρατηρήσει με ικανοποιητική ακρίβεια την παράμετρο SWh σε περιοχές κοντά στην ακτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

Σκοπός του πέμπτου κεφαλαίου είναι η εξερεύνηση των εφαρμογών και των εργαλείων που μπορούν να αξιοποιηθούν για την επεξεργασία και την απεικόνιση των δεδομένων που παρέχονται από τις δορυφορικές αποστολές αλτιμετρίας. Στη παρούσα εφαρμογή θα επιλεγούν δεδομένα που παρέχονται δωρεάν από τις δορυφορικές αποστολές και είναι ευρέως διαθέσιμα σε διαδικτυακούς ιστότοπους. Είναι σημαντική η κατανόηση του περιεχομένου αυτών των δεδομένων καθώς και των συνοδευτικών αρχείων που παρέχονται καθώς αυτά μπορεί να περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα ή τη δυνατότητα αξιοποίησης για εξειδικευμένες εφαρμογές. Γίνεται σαφές πως τα δεδομένα αυτά έχουν ένα είδος πολυπλοκότητας και η χρήση τους απαιτεί προσοχή και εφαρμογή πρακτικών με ακρίβεια ώστε να μετατραπούν σε μορφές που είναι εύκολα αξιοποιήσιμες. Η παρούσα εφαρμογή στοχεύει στη δημιουργία ενός αρχείου σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, το οποίο θα μπορεί να πραγματοποιήσει ανάγνωση, επεξεργασία αρχείων Netcdf και στη συνέχεια να αξιοποιεί δεδομένα από διαφορετικές δορυφορικές αποστολές και να συγχρονίζει τα αρχεία με σκοπό την ευκολότερη χρήση και απεικόνιση γραφημάτων που απεικονίζουν τα δεδομένα

5.1 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρέχονται δωρεάν από τον ιστότοπο της ESA. Η μορφή είναι Netcdf και αποτελεί ένα πρότυπο που παρέχει τη δυνατότητα της δημιουργίας, πρόσβασης και διαμοιρασμού δεδομένων σε πίνακες. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου προτύπου είναι η ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα και αποτελεί τύπο δεδομένων ανοιχτού κώδικα, δηλαδή η τρόπος και η κωδικοποίηση του προτύπου είναι ανοιχτά και διαθέσιμα για ανάγνωση και επεξεργασία στο κοινό. Αποτελεί υποστηριζόμενο πρότυπο από μεγάλο εύρος προγραμμάτων και έχει δημιουργήσει μεγάλο πλήθος από πρότυπα και προδιαγραφές και είναι διεθνώς αναγνωρισμένα από τη κοινότητα που επεξεργάζεται και διαμοιράζει γεωχωρικά δεδομένα.

Ιστότοπος:<https://hm-lbr-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/TDPforOceanWaves/tree>

Πρώτο αρχείο:

EN1_F4A_ALT_TDP_WA_011_0462_20021121T000225_20021121T005243_V01.nc

Δεύτερο αρχείο:

EN1_F4A_ALT_TDP_WA_011_0463_20021121T005243_20021121T014301_V01.nc

Τα αρχεία είναι διαθέσιμα στις παραθέσεις στο τέλος του κεφαλαίου για προσπέλαση και μπορούν να αναζητηθούν και διαδικτυακά στον ιστότοπο της ESA με βάση την ημερομηνία.

Τα πρώτα δύο αρχεία αποτελούν τμήμα των δεδομένων της δορυφορικής αποστολής ENVISAT συγκεκριμένα για το έτος 2002 και περιλαμβάνουν τμήμα του 11ου κύκλου και του 462ου και 463ου περάσματος αντίστοιχα, ενώ η χρονική στιγμή της καταγραφής αναφέρεται στις πρώτες πρωινές ώρες της 21ης Νοεμβρίου από 00:02:25π.μ στη πρώτη καταγραφή έως και 01:43:01π.μ στη δεύτερη καταγραφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα αυτά αφορούν τις τιμές των σημαντικού ύψους κυματισμών όπως αυτά καταγράφηκαν από το αλτίμετρο, καθώς και ότι οι παραπάνω καταγραφές είναι δύο τμήματα συνεχών μετρήσεων δηλαδή η μια καταγραφή διαδέχεται την προηγούμενη.

Τρίτο αρχείο:

ER2_F4A_ALT_TDP_WA_079_0462_20021121T003036_20021121T012054_V01.nc

Τέταρτο αρχείο:

ER2_F4A_ALT_TDP_WA_079_0463_20021121T012054_20021121T021112_V01.nc

Τα επόμενα δύο αρχεία περιέχουν τμήμα των δεδομένων της δορυφορικής αποστολής ERS-2 για το έτος 2002 και περιλαμβάνουν τμήμα του 79ου κύκλου της δορυφορικής αποστολής και του 461ου και 462ου περάσματος αντίστοιχα, ενώ η χρονική στιγμή της καταγραφής αναφέρεται στις πρώτες πρωινές ώρες της 21ης Νοεμβρίου από τη 00:30:36 στη πρώτη καταγραφή έως τη 02:11:12 στη δεύτερη αντίστοιχα. Όμοια με τα πρώτα δύο αρχεία αποτελεί συνεχές τμήμα μετρήσεων της αποστολής και διαδέχεται η μια την άλλη.

5.2 Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα όπως αναφέρθηκε είναι σε μορφή Netcdf. Για την ανάγνωση και απεικόνιση θα αξιοποιηθεί το λογισμικό Matlab, το οποίο δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων Netcdf και παρέχει πλήθος εντολών και συναρτήσεων που υποστηρίζουν την επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων.

Ο πλήρης κώδικας σε Matlab παρατίθεται στο Παράρτημα. Αρχικά μέσω της εντολής filename αποθηκεύτηκαν τα δεδομένα κάθε αρχείου σε μια μεταβλητή και με την εντολή ncdisp παρουσιάζονται τα περιεχόμενα των αρχείων. Το κάθε αρχείο περιέχει ένα πίνακα με τις ιδιότητες του.


```

netcdf4
Global Attributes:
  Conventions = 'CF-1.8'
  title = 'FDR4ALT Thematic Data Products : Ocean Waves'
  institution = 'ESA'
  source = 'FDR4ALT Processing Baseline V1.0'
  FDR_input = 'FDR ALT V1.0'
  history = 'Creation 20230414T093416.1457641'
  contact = 'ESA pierre.femenias@esa.int, CLS aollivier@groupcls.com'
  processing_center = 'CLS core system ; CNES CST'
  reference_document = 'FDR4ALT Products Requirements and Format Specification, C
  mission_name = 'ENVISAT'
  altimeter_sensor_name = 'RA-2'
  cycle_number = '11'
  pass_number = '462'
  first_meas_time = '20021121T000225.512203008'
  last_meas_time = '20021121T005243.115308032'
  ellipsoid_ref = 'WGS84'
  large_scale_uncertainty = '0.05'
  identifier_product_DOI = '10.5270/ESA-4427c33'
  identifier_product_DOI_authority = 'http://dx.doi.org/'

```

Εικόνα 5.1 Οι ιδιότητες του αρχείου 1.

Στις ιδιότητες παρατηρούνται πληροφορίες όπως ο τίτλος, το κέντρο επεξεργασίας, το ελλειψοειδές αναφοράς και η αβεβαιότητα μεγάλης κλίμακας.

Ένα σημαντικό τμήμα των δεδομένων που βρίσκεται στον πίνακα ιδιοτήτων είναι οι μεταβλητές και οι μετρήσεις που ενδιαφέρουν. Συγκεκριμένα για το πρώτο αρχείο, παρουσιάζεται απόσπασμα των δεδομένων:

```

time = 13545
Variables:
  time
    Size:      13545x1
    Dimensions: time
    Datatype:  double
    Attributes:
      _FillValue = 9.969209968386869e+36
      standard_name = 'time'
      long_name = 'time in UTC'
      units = 'days since 1990-01-01 00:00:00'
      calendar = 'gregorian'

  latitude
    Size:      13545x1
    Dimensions: time
    Datatype:  int32
    Attributes:
      _FillValue = 2147483647
      standard_name = 'latitude'
      units = 'degrees_north'
      scale_factor = 1e-06
      valid_min = -90000000
      valid_max = 90000000
      comments = 'Positive latitude is North latitude, negative latitude is South

```

Εικόνα 5.2 Οι μεταβλητές του χρόνου και του γεωγραφικού πλάτους για το πρώτο από τα 4 αρχεία.

Στο παραπάνω πίνακα παρατηρούνται σημαντικές πληροφορίες όπως το σύστημα αναφοράς χρόνου και την αρχή των μετρήσεων, ενώ για το γεωγραφικό πλάτος τις μονάδες μέτρησης και σε τι αναφέρονται οι θετικές και αρνητικές μετρήσεις. Μια

πολύ βασική πληροφορία αποτελεί επίσης η διάσταση των πινάκων για τις μεταβλητές αλλά και ποιοτικές πληροφορίες.

```

longitude
  Size:      13545x1
  Dimensions: time
  Datatype:  int32
  Attributes:
    _FillValue      = 2147483647
    standard_name   = 'longitude'
    units           = 'degrees_east'
    scale_factor    = 1e-06
    valid_min       = 0
    valid_max       = 359999999
    comments        = 'East longitude relative to Greenwich meridian'

swh_adjusted
  Size:      13545x1
  Dimensions: time
  Datatype:  int16
  Attributes:
    _FillValue      = 32767
    long_name       = 'Sea surface wave significant height adjusted'
    units           = 'm'
    scale_factor    = 0.001
    add_offset      = 0
    valid_min       = 0
    valid_max       = 32767
    coordinates     = 'longitude latitude'

```

Εικόνα 5.3 Οι μεταβλητές για το γεωγραφικό μήκος και οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών.

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούνται οι διαστάσεις των πινάκων για τις μεταβλητές και παρέχονται πληροφορίες για τις συντεταγμένες και για τις μονάδες μέτρησης του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών.

```

coordinates longitude latitude
swh_adjusted_filtered
  Size:      13545x1
  Dimensions: time
  Datatype:  int16
  Attributes:
    _FillValue      = 32767
    long_name       = 'Sea surface wave significant height filtered with EMD'
    units           = 'm'
    scale_factor    = 0.001
    add_offset      = 0
    valid_min       = 0
    valid_max       = 32767
    coordinates     = 'longitude latitude'

```

Εικόνα 5.4 Οι πληροφορίες για την μεταβλητή του προσαρμοσμένου σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών.

Σημειώνεται ότι η μεταβλητή `swh_adjusted_filtered` έχει υποστεί επεξεργασία από ένα εμπειρικό μοντέλο που αφορά την αποσύνθεση των σημάτων με βάση εμπειρικές συναρτήσεις AM/FM σε εσωτερικές συναρτήσεις διαμόρφωσης (IMFs).

```
_bias_adjusted
  Size:      13545x1
  Dimensions: time
  Datatype:  int16
  Attributes:
    _FillValue = 32767
    long_name  = 'Global bias of Significant Wave Height with respect to ENVISAT data'
    units      = 'm'
    scale_factor = 0.001
    add_offset  = 0
    valid_min   = -32767
    valid_max   = 32767
    comment     = 'Adding this value to swh allows recovering the original L2 swh value'
    coordinates = 'longitude latitude'

_uncertainty
  Size:      13545x1
  Dimensions: time
  Datatype:  int16
  Attributes:
    _FillValue = 32767
    long_name  = 'Uncertainty on top-of-Significant Wave Height'
    units      = 'm'
    scale_factor = 0.001
    add_offset  = 0
    valid_min   = 0
    valid_max   = 32767
    coordinates = 'longitude latitude'
    comments    = 'This uncertainty is based on the residual between the filtered and the non-f
```

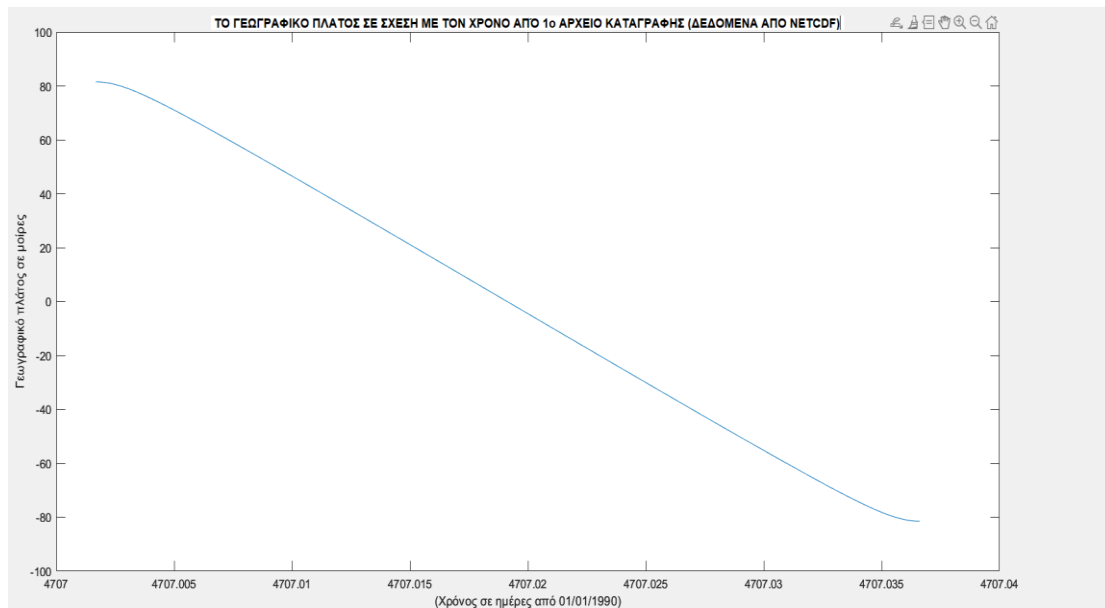
Εικόνα 5.5 Οι μεταβλητές `swh_bias` και `swh_uncertainty` για το πρώτο αρχείο.

Αναφέρεται στο αρχείο πληροφοριών ότι αν προστεθεί το σφάλμα των τιμών στην μεταβλητή `swh` είναι δυνατή η ανάκτηση της αρχικής L2 τιμής για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών. Η αβεβαιότητα των τιμών βασίζεται στο υπολειπόμενο σφάλμα ανάμεσα στις φιλτραρισμένες και μη φιλτραρισμένες τιμές για τη τιμή `swh`.

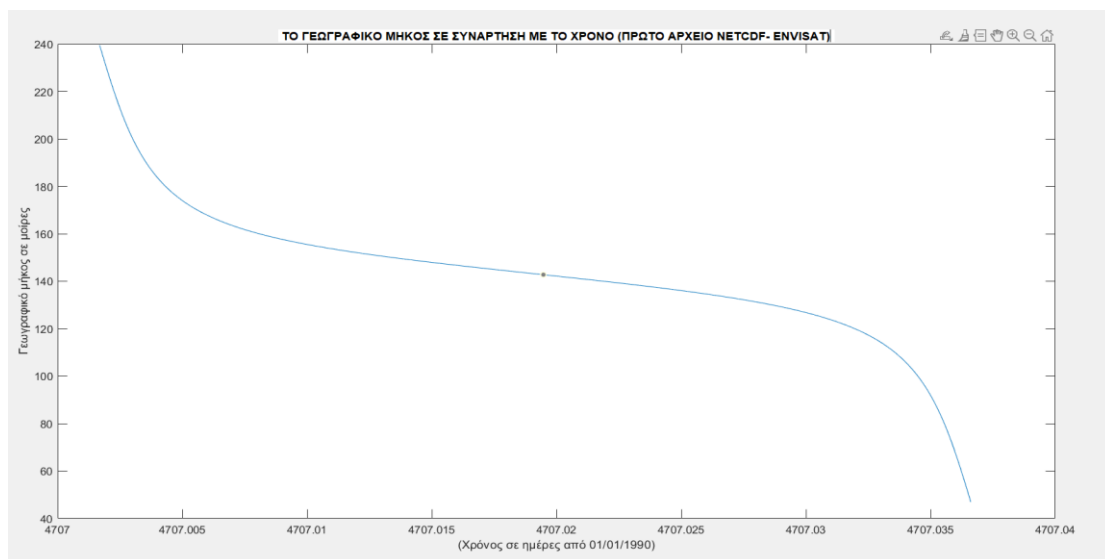
Τα παραπάνω στοιχεία ελήφθησαν και για τα τέσσερα αρχεία που φορτώθηκαν.

Το επόμενο βήμα αφορά τη φόρτωση των μεταβλητών μέσω της εντολής `ncread`.

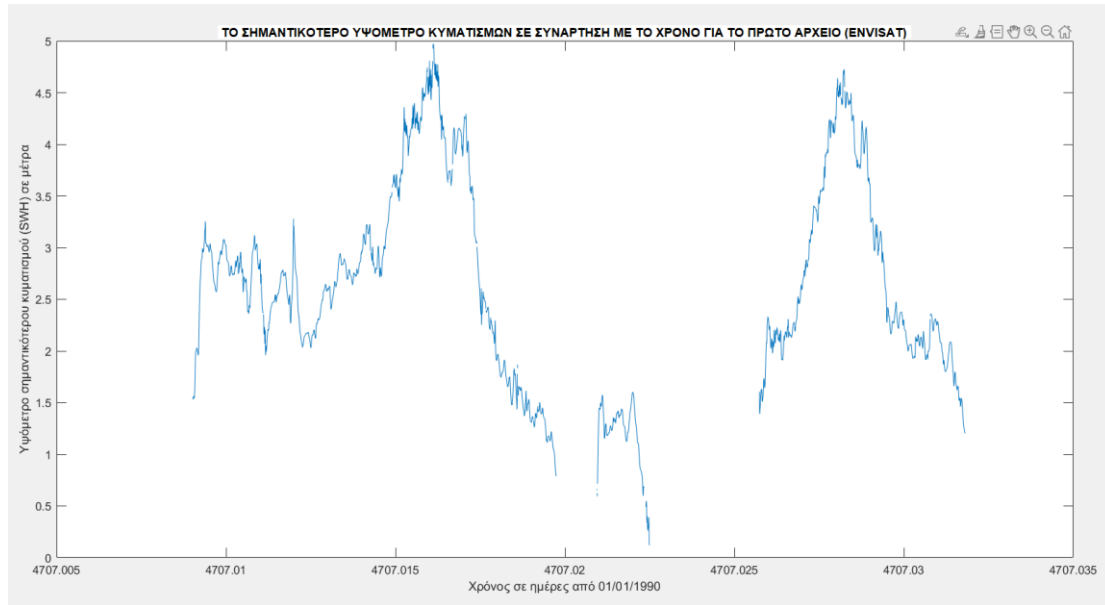
Αφού εκτελέστηκε η εντολή για το πρώτο αρχείο και για τις μεταβλητές `Longitude`, `Latitude`, `Swh_adjusted_filtered` και `time` και ορίστηκαν τα ονόματα των μεταβλητών στις οποίες θα αποθηκευτούν, ελήφθησαν ως δεδομένα εξόδου 4 νέοι πίνακες διαστάσεων 13535x1 με μορφή `Double`.



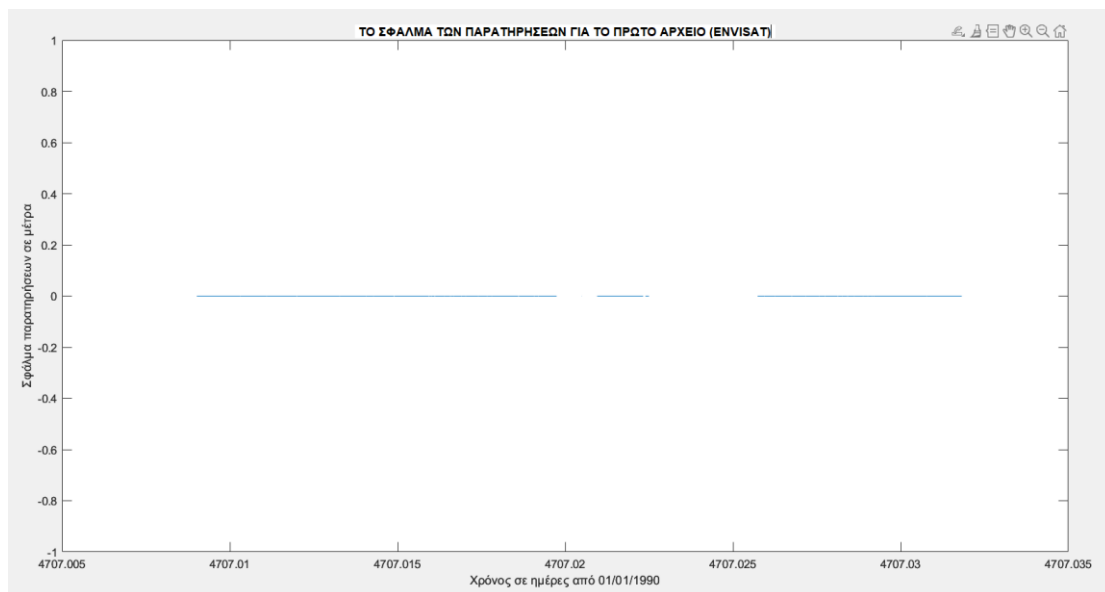
Εικόνα 5.6 Οι τιμές του γεωγραφικού πλάτους σε συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο (ENVISAT)



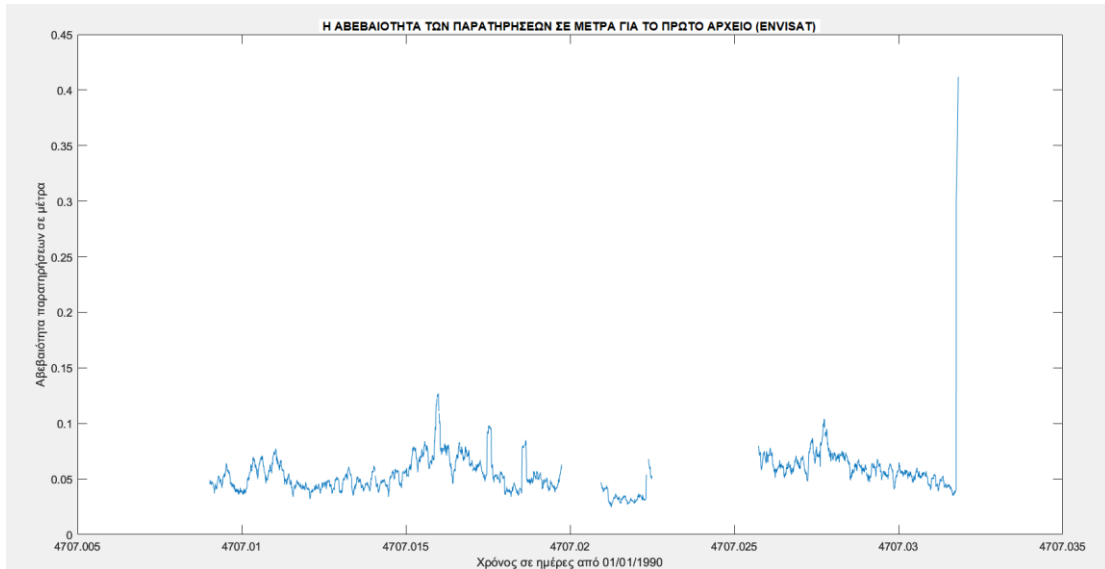
Εικόνα 5.7 Οι τιμές του γεωγραφικού μήκους για το πρώτο αρχείο (ENVISAT) σε συνάρτηση με το χρόνο από το αρχείο NETCDF.



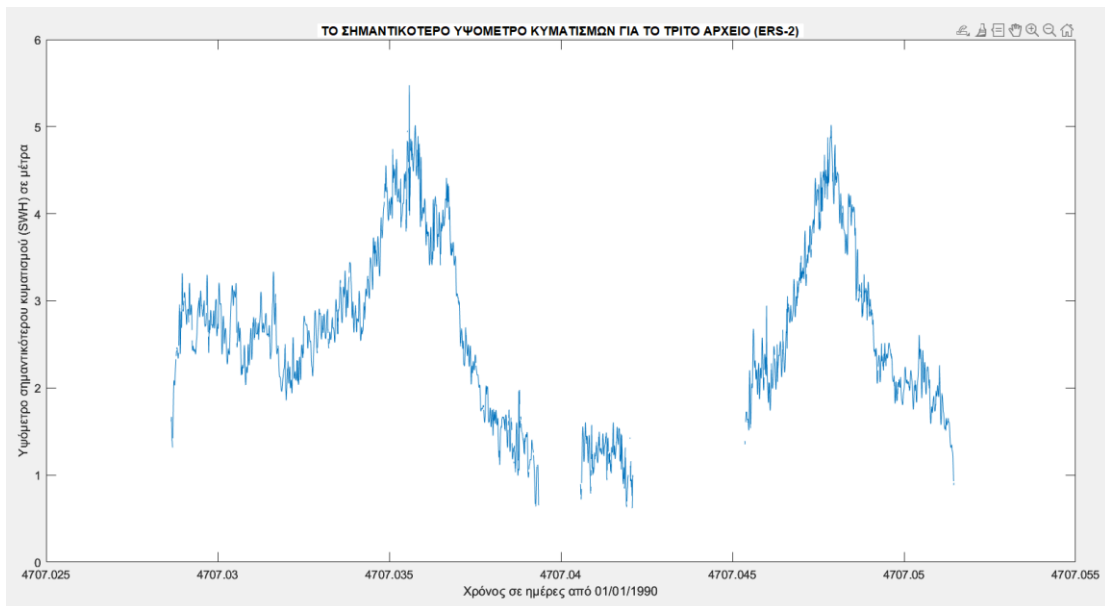
Εικόνα 5.8 Οι τιμές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο. (ENVISAT)



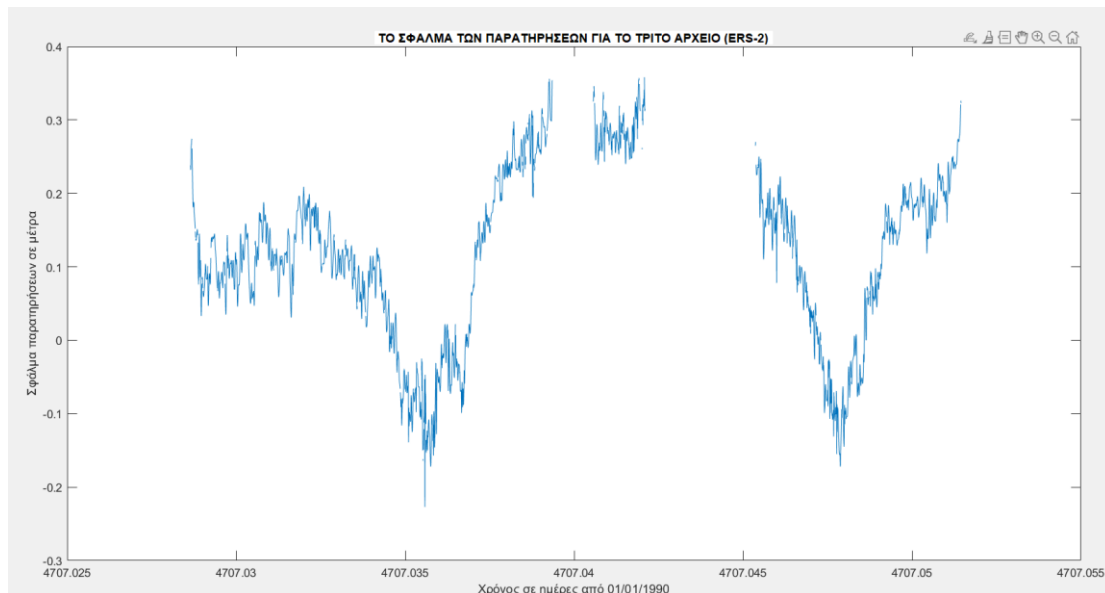
Εικόνα 5.9 Το σφάλμα των παρατηρήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο για το πρώτο αρχείο. (ENVISAT)



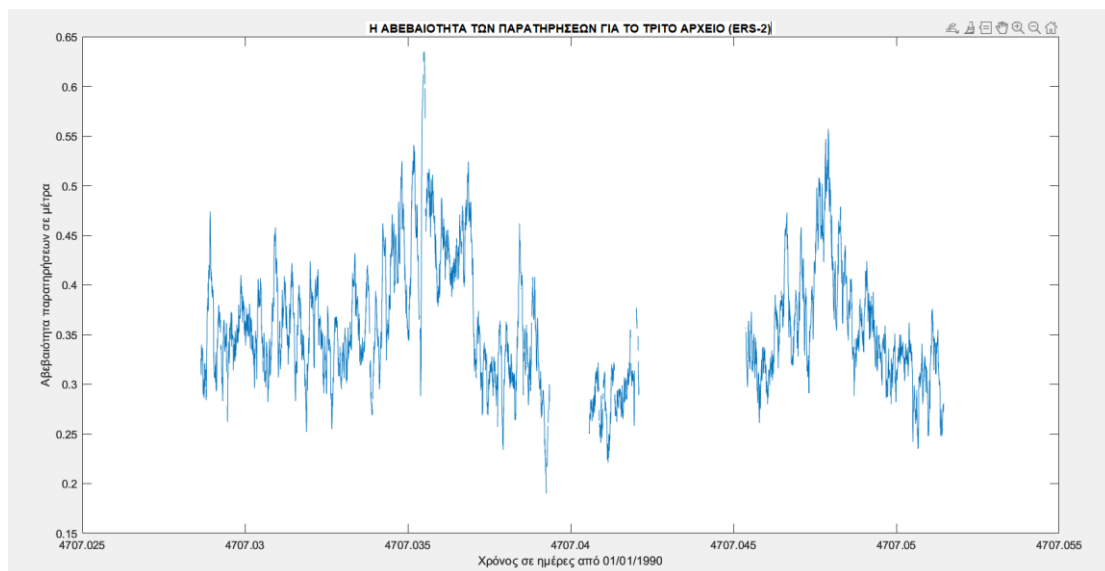
Εικόνα 5.10 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων σε μέτρα για το πρώτο αρχείο ENVISAT.



Εικόνα 5.11 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για το τρίτο αρχείο (ERS-2).



Εικόνα 5.12 Το σφάλμα των παρατηρήσεων για το τρίτο Αρχείο (ERS-2)



Εικόνα 5.13 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για το τρίτο Αρχείο (ERS-2)

Παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων και τα σφάλματα των παρατηρήσεων είναι μεγαλύτερα για την αποστολή ERS-2.

Να σημειωθεί ότι η καταγραφή του χρόνου γίνεται με βάση το Γρηγοριανό Ημερολόγιο σε ημέρες με αρχή την 01-01-1990 και ώρα 00:00:00.

Με χρήση της εντολής `datestr` μπορούμε να μετατρέψουμε τον χρόνο σε μια μορφή που να είναι καλύτερα κατανοητή σε τι αναφέρεται.

```
'2002-11-21 00:02:25 '  
'2002-11-21 00:02:25 '  
'2002-11-21 00:02:25 '  
'2002-11-21 00:02:26 '  
'2002-11-21 00:02:26 '  
'2002-11-21 00:02:26 '  
'2002-11-21 00:02:26 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:27 '  
'2002-11-21 00:02:28 '
```

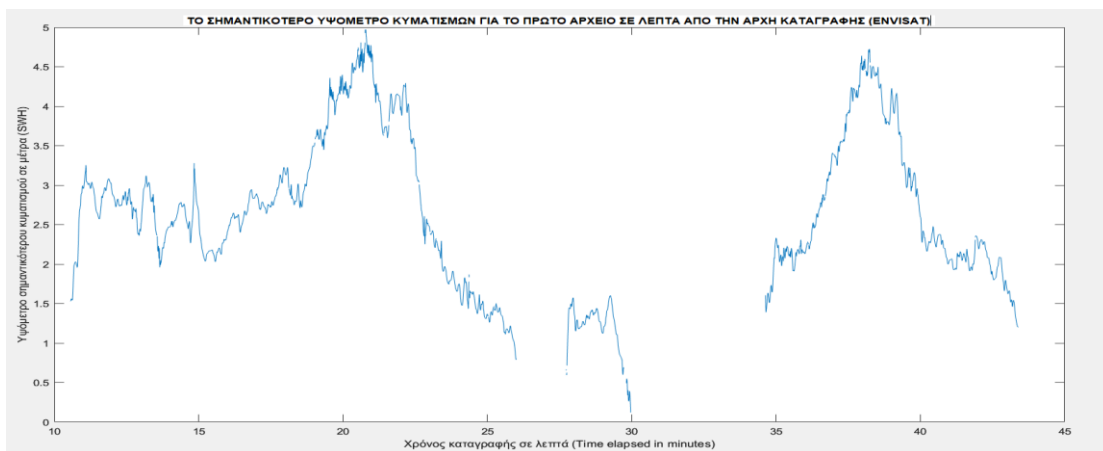
Εικόνα 5.14 Οι πρώτες 13 τιμές για τις ημερομηνίες και ώρες του πρώτου αρχείου καταγραφής.

Αξίζει να σημειωθεί πως για τον ορισμό της πρώτης καταγραφής χρησιμοποιήθηκε η εντολή `datetime`, ενώ για τον καθορισμό του προτύπου της ημερομηνίας χρησιμοποιήθηκε η εντολή `datestr` και το επιστρεφόμενο αποτέλεσμα αποτελεί έναν πίνακα 13545x19 ενώ η μορφή είναι `Char`.

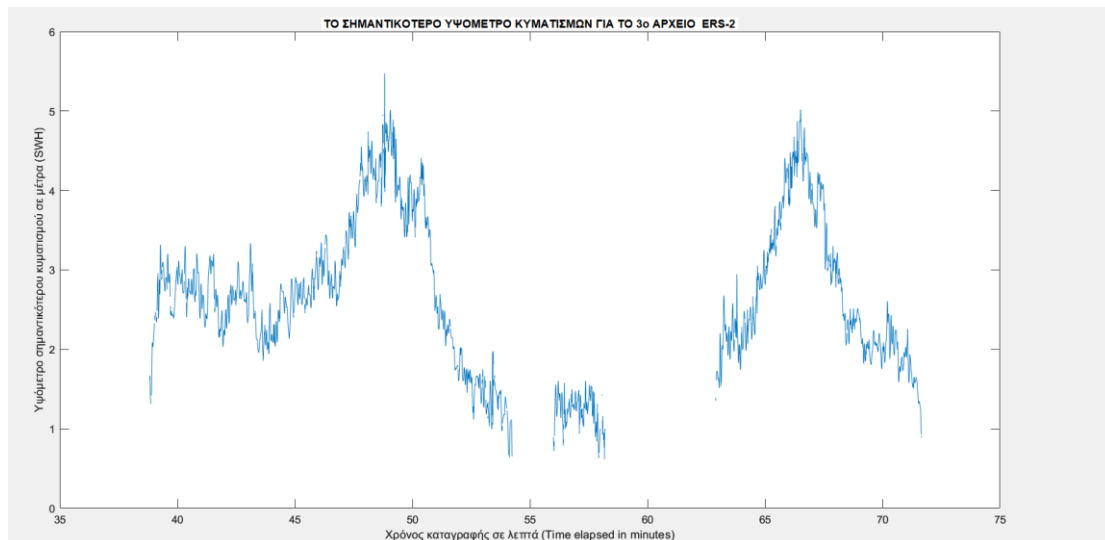
Ενώ αυτή η μορφή μπορεί να βοηθήσει να κατανοηθεί σε ποια ημερομηνία και ποια ώρα αναφερόμαστε, ο τύπος `char` δεν μπορεί να απεικονιστεί σε αντίθεση με τις άλλες μεταβλητές.

Ο τρόπος για να είναι δυνατή η αναπαράσταση των δεδομένων με το χρόνο είναι η μετατροπή του αρχείου του χρόνου σε λεπτά και η αφαίρεση της πρώτης τιμής από αυτά.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί μετατροπή του χρόνου όλων των αρχείων σε λεπτά από την έναρξη καταγραφής και λαμβάνουμε τα εξής γραφήματα.

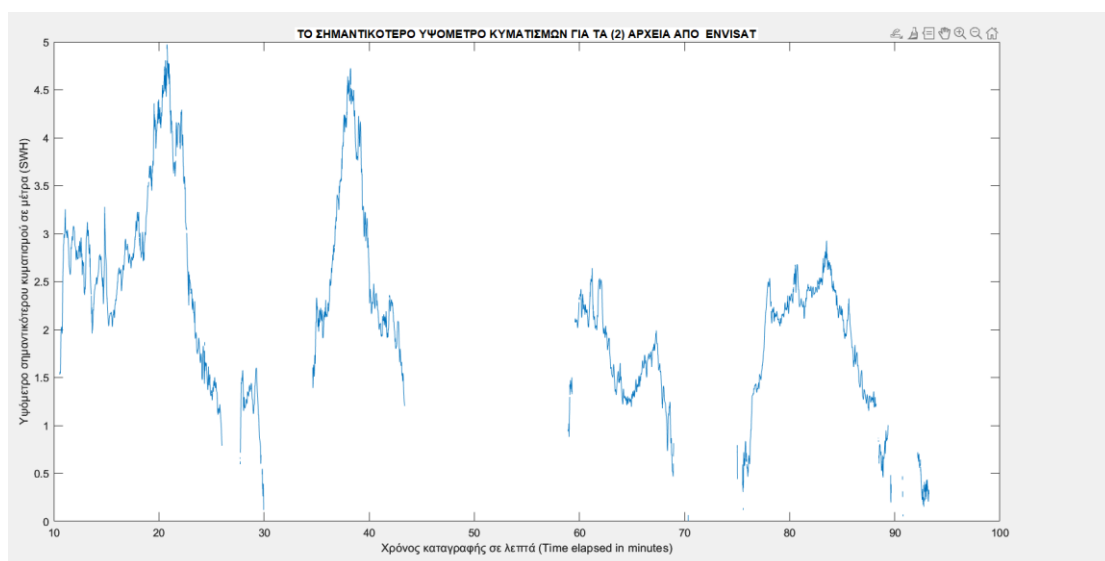


Εικόνα 5.15 Οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών σε αντιπαράθεση με το χρόνο (λεπτά) από την έναρξη της καταγραφής για το πρώτο αρχείο (ENVISAT)

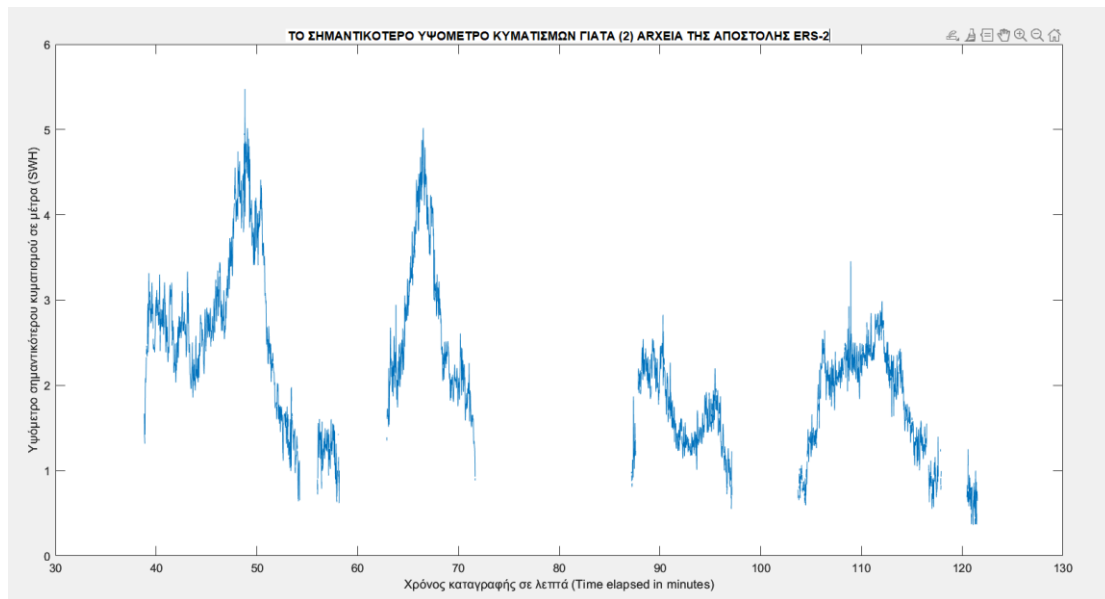


Εικόνα 5.16 Οι τιμές για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών σε αντιπαράθεση με το χρόνο (λεπτά) από την έναρξη της καταγραφής για το τρίτο αρχείο ERS-2.

Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε συγχώνευση των αρχείων καταγραφής για όλες τις μεταβλητές με βάση την αποστολή. Το αποτέλεσμα είναι μια μεταβλητή για κάθε αποστολή με όλα τα επιμέρους δεδομένα από τα δύο προηγούμενα αρχεία.



Εικόνα 5.17 Οι καταγραφές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών για την αποστολή Envisat σε λεπτά από την αρχή καταγραφής.



Εικόνα 5.18 Οι καταγραφές του σημαντικότερου υψομέτρου κυματισμών για την αποστολή ERS-2 σε λεπτά από την αρχή της καταγραφής.

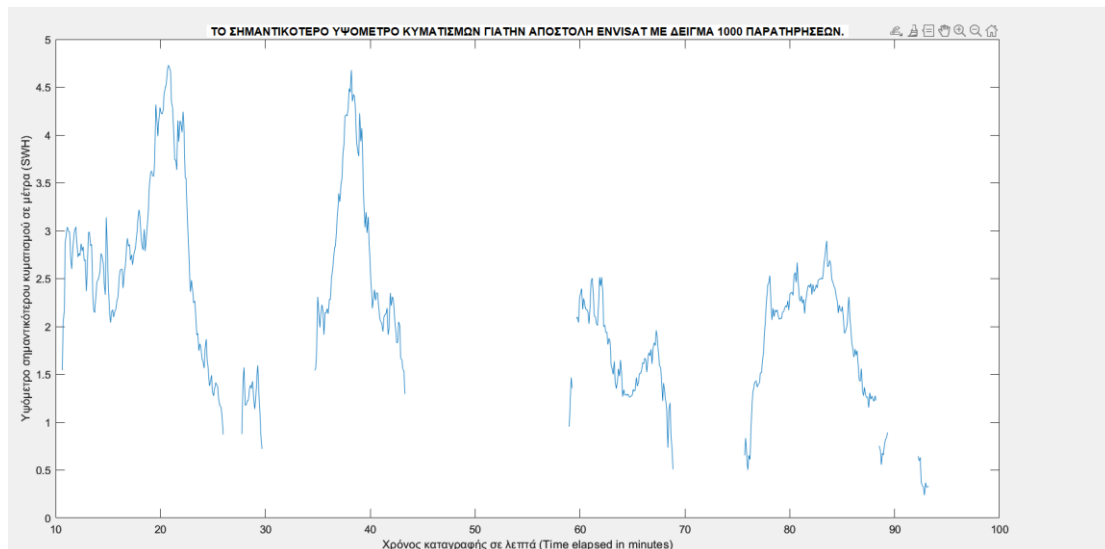
Παρατηρείται ότι οι καταγραφές έχουν χρονική διαφορά 28 λεπτά και 12 δευτερόλεπτα.

5.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

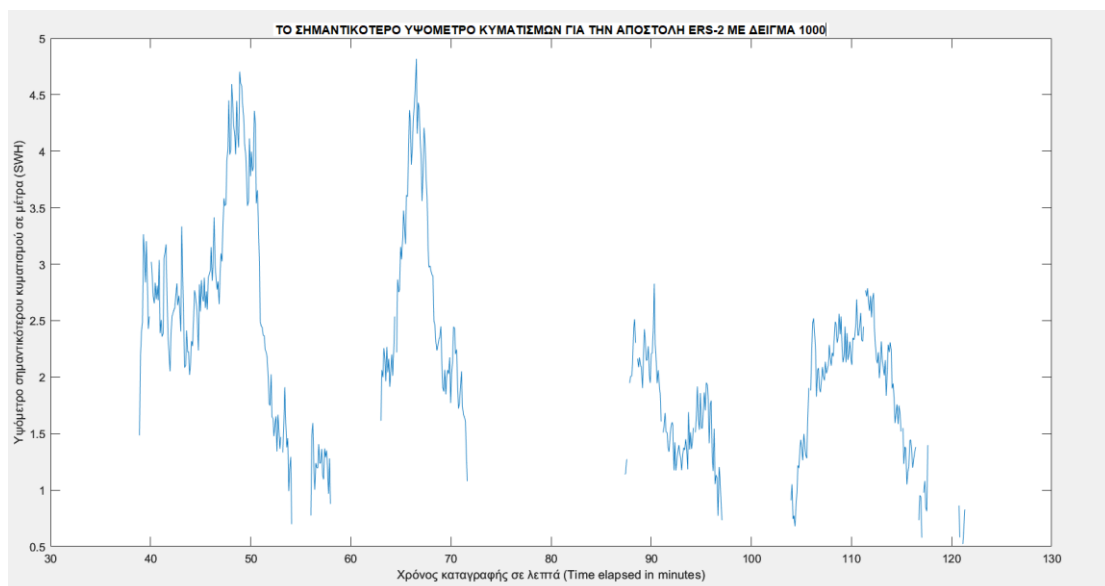
Αφού πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή όλων των αρχείων παρατηρήθηκε ότι για την αποστολή ENVISAT είναι διαθέσιμα όλα τα δεδομένα σε πίνακες διαστάσεων 13545x1 και στα δύο αρχεία. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε περίπτωση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε πράξεις πινάκων ή να αντιπαραθέσουμε τα στοιχεία των μεταβλητών σε πίνακες, βάσεις δεδομένων και γραφήματα. Στη περίπτωση της αποστολής ERS-2 έχουμε πίνακες διαστάσεων 15016x1 για το πρώτο αρχείο και πίνακες διαστάσεων 15136x1 για το δεύτερο αρχείο. Μια μέθοδος για να μετατρέψουμε τα διαθέσιμα δεδομένα μας σε πίνακες με ίδιες διαστάσεις είναι η μέθοδος της δειγματοληψίας. Με βάση λοιπόν τις ανάγκες της εφαρμογής μπορούμε να επιλέξουμε από τα διαθέσιμα δεδομένα ένα δείγμα το οποίο να είναι ικανό να καλύψει τις απαιτήσεις για απεικόνιση των δεδομένων και ταυτόχρονα να πληροί τις προδιαγραφές για ίσο μέγεθος πινάκων με σκοπό τη περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

Για τις ανάγκες αυτής της εφαρμογής επιλέξαμε να κάνουμε συγχώνευση των πινάκων για την αποστολή ENVISAT και για την αποστολή ERS-2 πράγμα το οποίο μας έδωσε νέους πίνακες διαστάσεων 27090x1 για την αποστολή ENVISAT και πίνακες 30152x1 για την αποστολή ERS-2. Στη συνέχεια λαμβάνουμε δείγμα με βήμα 27 για τις πρώτες 27000 μετρήσεις στα δεδομένα της αποστολής ENVISAT μέχρι και με βήμα 30 για τις πρώτες 30000 μετρήσεις στα δεδομένα της αποστολής ERS-1.

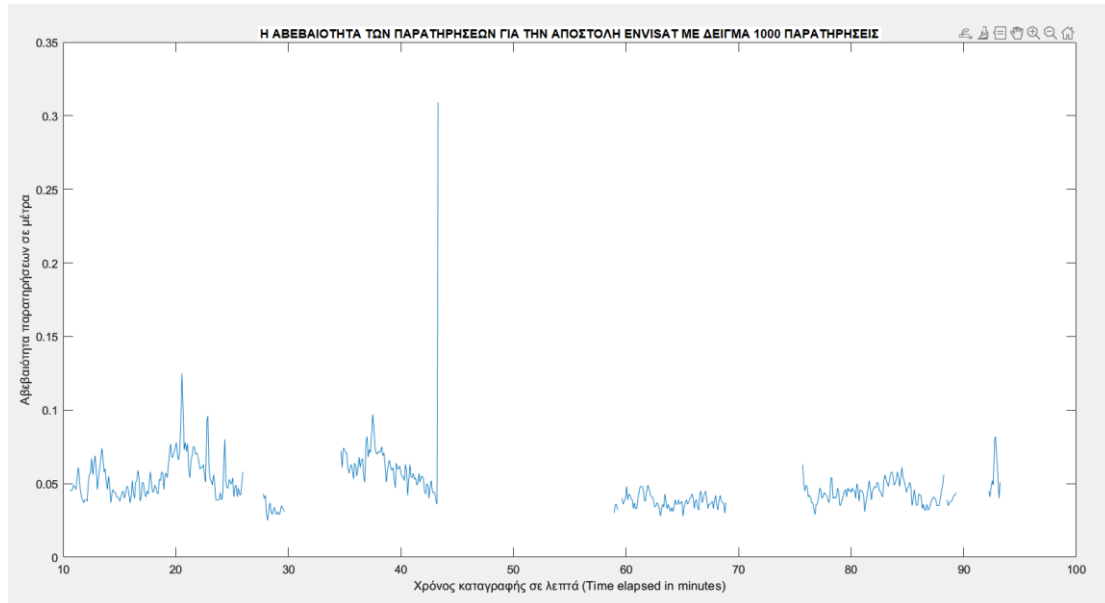
Το αποτέλεσμα είναι πίνακες 1000x1 για όλες τις μεταβλητές των αποστολών.



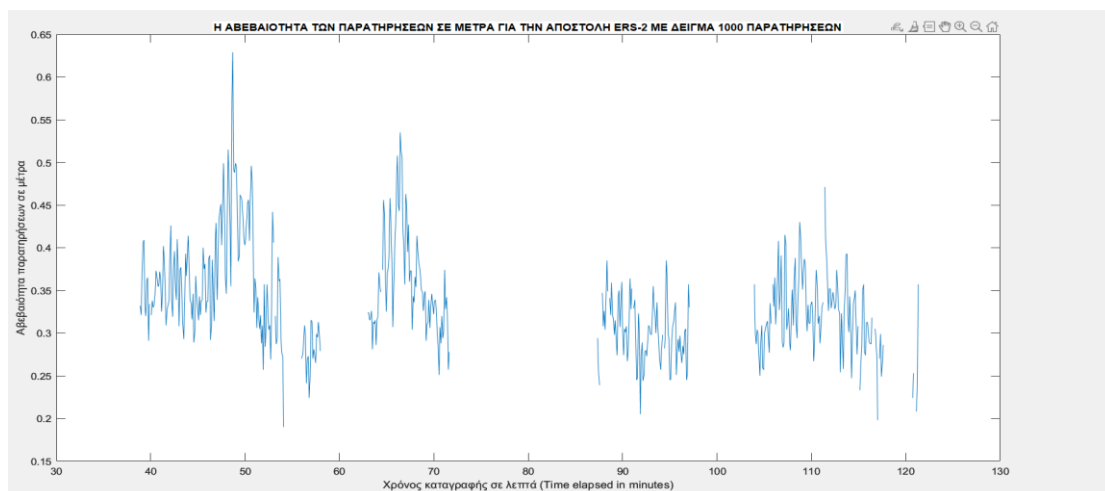
Εικόνα 5.19 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για τα δύο αρχεία της αποστολής ENVISAT με μέγεθος δείγματος 1000.



Εικόνα 5.20 Το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για την αποστολή ERS-2 με μέγεθος δείγματος 1000.



Εικόνα 5.21 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για την αποστολή ENVISAT με μέγεθος δείγματος 1000.



Εικόνα 5.22 Η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων για την αποστολή ERS-2 με μέγεθος δείγματος 1000.

Παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων είναι μεγαλύτερη για την αποστολή ERS-2.

Συμπερασματικά, ενώ η μέθοδος αυτή μας δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα για το μέγεθος των πινάκων των μεταβλητών, είναι χρήσιμο όμως να αναφερθεί ότι περιλαμβάνει εξαιρετικά σημαντική απώλεια δεδομένων, καθώς από το αρχικό μέγεθος καταγραφής που είχαμε με 27090 παρατηρήσεις για την αποστολή ENVISAT και 30152 παρατηρήσεις για την αποστολή ERS-2 αφαιρέσαμε 26090 και 29152 παρατηρήσεις αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το τροχιακό αποτύπωμα του δορυφόρου ENVISAT προηγείται από αυτό του ERS-2 κατά περίπου μισή ώρα, συνεπώς δεν είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την

σχετική ακρίβεια των παρατηρήσεων, καθώς όταν φτάσει ο δορυφόρος ERS-2 στο ίδιο σημείο στο χώρο που βρισκόταν ο δορυφόρος ENVISAT η μεταβολή των παρατηρήσεων μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα των παρατηρήσεων, είτε σε αλλαγή των συνθηκών στη περιοχή μελέτης. Συνεπώς επειδή δεν είναι ασφαλής η εξαγωγή συμπερασμάτων με τη παραπάνω σύγκριση, η μόνη χρήσιμη πληροφορία που μπορούμε να εξάγουμε είναι η μέγιστη τιμή και ο μέσος όρος σε κάθε δείγμα.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή που καταγράφεται για το σημαντικότερο υψόμετρο κυματισμών για την αποστολή ERS-2 είναι 5.475 μέτρα ενώ για την αποστολή ENVISAT είναι 4.972 μέτρα.

Όπως φαίνεται παραπάνω, ενώ με τη μέθοδο της δειγματοληψίας λύθηκε το ζήτημα των διαστάσεων των διανυσμάτων των μεταβλητών, αυτό δε σημαίνει ότι τα δεδομένα είναι συγχρονισμένα. Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι η καταγραφή δεδομένων αρχίζει 28 λεπτά και 11 δευτερόλεπτα νωρίτερα στην αποστολή ENVISAT και λήγει 28 λεπτά και 12 δευτερόλεπτα νωρίτερα αντίστοιχα από αυτή της αποστολής ERS-2.

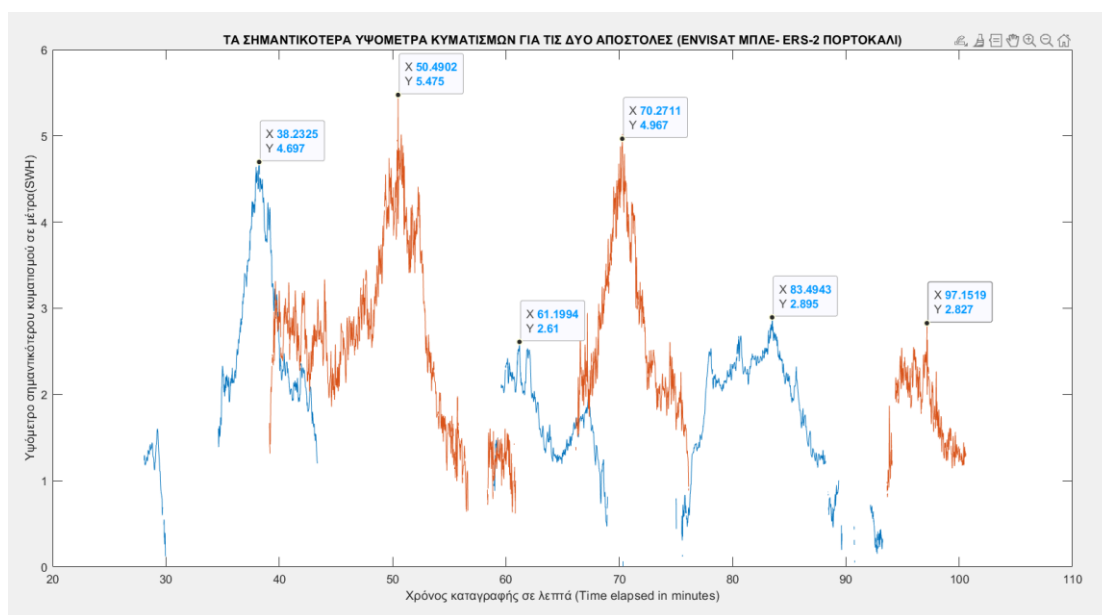
5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στη παραπάνω ενότητα εξετάστηκε μια μέθοδος για την δειγματοληψία δεδομένων αλτιμετρίας με σκοπό την ταύτιση των διαστάσεων των διανυσμάτων των μεταβλητών, πράγμα το οποίο θα διευκολύνει την επεξεργασία, αποθήκευση και τροποποίηση των δεδομένων. Όπως είδαμε σε παραπάνω γράφημα με τη δειγματοληψία με σταθερό βήμα λάβαμε ένα δείγμα, το οποίο είναι ικανό να περιγράψει τη μεταβλητή σε ικανοποιητικό βαθμό, το οποίο ωστόσο δεν συγχρονίζει της μεταβλητές χρονικά.

Για να επιτύχουμε τον συγχρονισμό των δεδομένων θα αξιοποιήσουμε μέρος των αποτελεσμάτων από προηγούμενη ενότητα όπου και παρατηρήθηκε ότι η αρχή της καταγραφής στην αποστολή ENVISAT ξεκινάει στις 00:02:25π.μ , ενώ η καταγραφή της αποστολής ERS-2 στις 00:30:36π.μ. Αντίστοιχα το τέλος της καταγραφής για την αποστολή ENVISAT είναι στις 01:43:00π.μ ενώ για την αποστολή ERS-2 στις 02:11:12π.μ. Συγκεκριμένα για την αποστολή ENVISAT έχουμε 27090 παρατηρήσεις σε χρονικό διάστημα 6059 δευτερολέπτων με βάση τα αποτελέσματα προηγούμενης ενότητας, το οποίο αντιστοιχεί σε 4,47 παρατηρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Συνεπώς για την αποστολή ENVISAT θα πρέπει να αφαιρεθούν για τα πρώτα 1692 δευτερόλεπτα καταγραφής 7563 παρατηρήσεις. Αυτό θα φέρει τα δεδομένα μας στις 19527 παρατηρήσεις. Αντίστοιχα για την αποστολή ERS-2 υπολογίζεται αντίστοιχα 4,98 παρατηρήσεις ανά δευτερόλεπτο, οπότε θα πρέπει να αφαιρεθούν 8426 μετρήσεις από το τέλος της καταγραφής, πράγμα το οποίο μας φέρνει στις 21726 παρατηρήσεις. Θα αφαιρέσουμε από το τέλος της καταγραφής και τις υπόλοιπες 2199 παρατηρήσεις με σκοπό να έχουμε ίδια διάσταση πινάκων στις μεταβλητές μας.

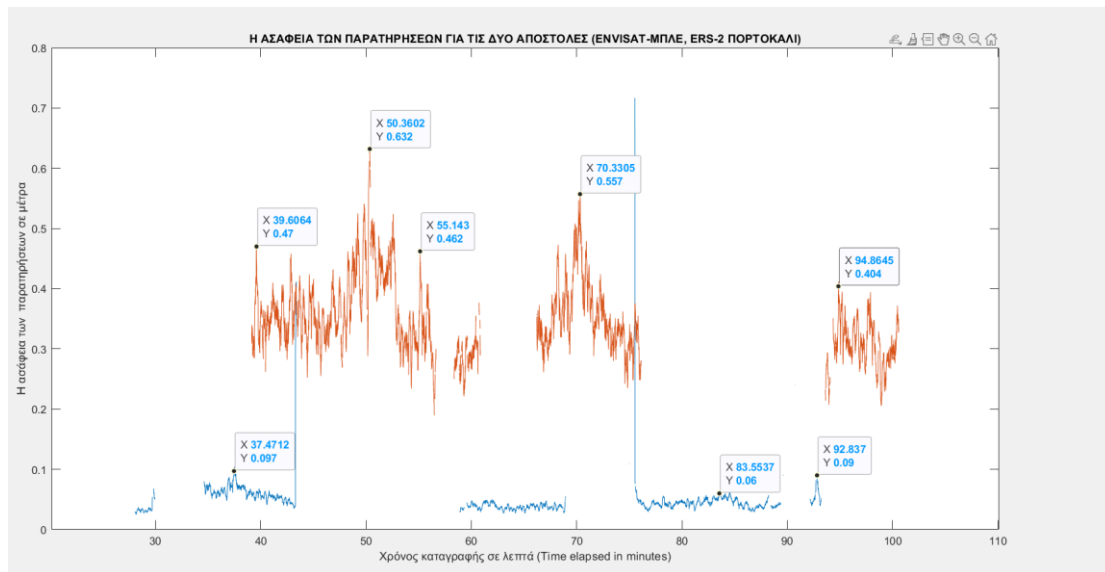
Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, λαμβάνουμε νέους πίνακες για τις μεταβλητές μας που πλέον περιέχουν 19529 παρατηρήσεις.

Παρατηρείται στο νέο δείγμα ότι παρότι ξεκινάμε με μερικά δευτερόλεπτα διαφορά στις καταγραφές, στο τέλος της καταγραφής έχουμε αρκετά λεπτά απόκλιση. Αυτό οφείλεται κυρίως στον ρυθμό καταγραφής των δεδομένων για τις διαφορετικές δορυφορικές αποστολές τον οποίο και υπολογίσαμε νωρίτερα, με την αποστολή ERS-2 να καταγράφει με λίγο μεγαλύτερο ρυθμό από την αποστολή ENVISAT στη περίπτωση του δείγματος από τα αρχεία μας.



Εικόνα 5.23 Τα σημαντικότερα υψόμετρα κυματισμών για τις αποστολές ERS2(πορτοκαλί) και ENVISAT (μπλε χρώμα) στο νέο δείγμα.

Παρατηρείται πως η αποστολή ERS-2 καταγράφει μεγαλύτερα ύψη κυματισμών στα σημεία καμπής των παρατηρήσεων.



Εικόνα 5.24 Τα αντίστοιχα σφάλματα της καταγραφής του παραπάνω δείγματος. Με πορτοκαλί χρώμα είναι η αποστολή ERS-2, ενώ με μπλε η αποστολή ENVISAT.

Παρατηρείται ότι η αποστολή ERS-2 παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα από την αποστολή ENVISAT για το δείγμα καταγραφής που επιλέχθηκε.

Πρέπει οπωσδήποτε να τονιστεί ότι οι διαφορές που παρατηρούνται **ΔΕΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΕΝΔΕΙΞΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ**, καθώς όταν η αποστολή ERS-2 φτάσει στο ίδιο σημείο (με ακρίβεια περίπου 1km με βάση τις προδιαγραφές) με την αποστολή ENVISAT οι συνθήκες που καταγράφει στην περιοχή μελέτης (σημαντικό υψόμετρο κυματισμών) είναι ενδεχόμενο να έχουν αλλάξει. Κατ' αυτό τον τρόπο δεν μπορούν να εξεταστούν τα αποτελέσματα ως προς την εσωτερική ακρίβεια. Είναι χρήσιμο όμως να καταγραφούν τα τοπικά μέγιστα των παρατηρήσεων καθώς μέσω αυτών μπορούμε να λάβουμε εικόνα για τη μεταβολή των κυματισμών στην περιοχή μελέτης.

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τη παραπάνω εφαρμογή έγινε μια προσπάθεια να γίνουν αντιληπτές οι δυνατότητες που παρέχουν τα σύγχρονα συστήματα Αλτιμετρίας στο κοινό και στον εξειδικευμένο χρήστη. Μέσω της αξιοποίησης εμπορικών, είτε ελεύθερων λογισμικών υπάρχει η δυνατότητα ανάγνωσης, προσπέλασης, επεξεργασίας και απεικόνισης ελεύθερων δεδομένων, τα οποία παρέχονται από διεθνείς οργανισμούς και πανεπιστήμια με σκοπό την απεικόνιση, την αναπαράσταση γραφημάτων και τη καλύτερη κατανόηση των γεωφυσικών και γεωχωρικών δεδομένων. Είναι σαφές πως απαιτείται κάποια εξοικείωση και γνώση βασικών παραμέτρων, αλλά με την κατάλληλη εκπαίδευση και έμφαση στα στοιχεία των δεδομένων, μπορεί ένας μέσος χρήστης να αποκτήσει πρόσβαση σε μεγάλο εύρος πληροφοριών που αφορά τις γεωχωρικές επιστήμες, τη τηλεπισκόπηση τη Γεωδαισία, τη πληροφορική. Με βάση τα δεδομένα ανοιχτού κώδικα και τα ανοιχτά λογισμικά, μπορεί να επεξεργαστεί οποιοσδήποτε δεδομένα ευρείας κλίμακας και να αποκτήσει γνώσεις και πληροφορίες για τα γεωχωρικά και γεωφυσικά στοιχεία. Μέσω της παραπάνω εφαρμογής σε περιβάλλον Matlab, το οποίο αποτελεί εμπορικό λογισμικό, πραγματοποιήθηκε ανάγνωση, επεξεργασία και απεικόνιση γεωχωρικών δεδομένων με σκοπό τη κατανόηση των περιεχομένων τους και τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τα δεδομένα. Ο χρήστης θα πρέπει να δείξει ιδιαίτερη προσοχή στα metadata, καθώς περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τα δεδομένα, ενώ η μετέπειτα επεξεργασία προαπαιτεί κάποια εκπαίδευση και εξοικείωση του χρήστη με τα δεδομένα. Στην εφαρμογή που υλοποιήθηκε παρουσιάστηκαν προβλήματα με την σωστή ανάγνωση, τη μετατροπή των μεταβλητών, ενώ γίνεται αντιληπτό ότι κάθε παρατήρηση είναι αναπόσπαστη με τα δεδομένα της ασάφειας και των σφαλμάτων της. Έγινε προσπάθεια να επιτευχθεί ο συγχρονισμός των δεδομένων από τα αρχεία Netcdf με σκοπό την ευκολότερη διαχείριση, την επεξεργασία και η μετατροπή τους σε μορφή, η οποία θα είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη σε άλλες εφαρμογές ή βάσεις δεδομένων. Παρατηρήθηκε πως όταν συγχρονίζονται δεδομένα από διαφορετικές αποστολές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στοιχεία όπως η ακρίβεια των παρατηρήσεων, η ασάφεια και η συχνότητα λήψης των παρατηρήσεων. Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι η εσωτερικές παράμετροι του αλτιμέτρου παίζουν σημαντικό ρόλο στην καταγραφή και στον συγχρονισμό των δεδομένων, συνεπώς ο χρήστης και κατ'επέκταση οι αλγόριθμοι συγχρονισμού θα πρέπει με κάποιο τρόπο να λαμβάνουν υπόψη τα εσωτερικά χαρακτηριστικά της κάθε δορυφορικής αποστολής. Σε μετέπειτα στάδιο που δεν εξετάζεται στη παρούσα εφαρμογή λαμβάνονται μεγάλο πλήθος δεδομένων, τα οποία έχουν υποστεί προεπεξεργασία με αυτόματους ή ημιαυτόματους τρόπους και προχωράμε σε αναλύσεις μεγάλης κλίμακας με σκοπό τη πρόβλεψη και τη δημιουργία μοντέλων. Σε γενικές γραμμές η αλτιμετρία προσφέρει πληθώρα εφαρμογών με σκοπό την αντίληψη φαινομένων, τη διαχείριση και τη λήψη αποφάσεων. Είναι στα χέρια των

χρηστών η διαδικασία της ανάγνωσης, της επεξεργασίας και της εφαρμογής σωστών τεχνικών για τη μετέπειτα διαχείριση και ανάλυση με σκοπό τη σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων. Στα επιμέρους συμπεράσματα της εφαρμογής, τα δεδομένα του δορυφόρου ENVISAT παρουσιάζουν μεγαλύτερη εσωτερική ακρίβεια και φαίνονται πιο αξιόπιστα, τουλάχιστον στο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε, ωστόσο απαιτείται πολύ μεγαλύτερο δείγμα δεδομένων για την εξαγωγή σωστού συμπεράσματος.

Βιβλιογραφία

Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Lee-Lueng, Fu, Callahan, P. 2000. Satellite Altimetry. Oregon: Corvallis. [1]

Cipollini, P., Calafat, M., Jevrejeva, S., Melet, A., Prandi, P., 2016. Monitoring Sea Level in the Coastal Zones with Satellite Altimetry and Tidal Gauges. Southampton: National Oceanography Centre. [2]

Mertikas, S., Donlon, C., Femenias, P., Mavrocordatos, C., Tziavos, I., Vergos, G., Galanakis, D., Tripolitsiotis, A., Frantzis, X., Guinle, T., 2018. Fifteen Years of Cal/Val Service to Reference Altimetry Missions: Calibration of Satellite Altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece. Chania: Technical University of Crete. [3]

Vignudelli, S., Birol, F., Benveniste, J., Raynal, M., Roinard, H. 2018. Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. Pisa: (CNR-IBF). [4]

Andritsanos, B., 2000. Βέλτιστος Συνδυασμός επίγειων και δορυφορικών δεδομένων με τη χρήση φασματικών μεθόδων για εφαρμογές στη γεωδαισία και την ωκεανογραφία. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. [5]

Haslop, E., Sanchez-Roman, A., Pascual, A., Rodriguez, D., Reeve, K., Yannice, F. Raynal, M., 2017. Sentinel-3A Views Ocean Variability More Accurately at Finer Resolution. Palma de Mallorca: ICTS-SOCIB (Balearic Islands Coastal Ocean Observing and Forecasting System). [6]

Creteaux, J., Calmant, S., Berge-Nguyen, M., Jamangulova, N., Satylkanov, R., Lyard, F., Perosanz, F., Verron, J., Montazem, A.S., Le Guilcher, G., Leroux, D., Barrie, J., Maisongrande, P., Bonnefond, P., 2018. Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan). Toulouse: Laboratoire d'Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales. [7].

Escudier, R., Pascual, A., Renault, L., Brasseur, P., Chelton, D., Beuvier, J., 2017. Eddy properties in the Western Mediterranean Sea from Satellite Altimetry and a numerical simulation. Esporles: IMEDEA, UIB-CSIC. [8]

Dasenakis, E., Karavoltos, S., Ladakis, E., Paraskevopoulou, V., 2015. Χημική Ωκεανογραφία. Ζωγράφου: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. [9]

Makinen, J., 2008. The Treatment of the permanent tide in EUREF products. Masala: Finish Geodetic Institute. [10]

Merged Topex/Poseidon product, User Handbook. France: AVISO. [11]

- Shaeb-Kannemadugu, H.B, Arur, A., Kumar-Joshi, A., Bhandari, S.M., 2015 Comparison of near coastline Significant Wave Height Measurements. Nagpur India. Regional Remote Sensing Center. [12]
- Marcello Passaro, Paolo Cipollini, Stefano Vignudelli, Graham D. Quartly, Helen M. Snaith 2014. ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. GSNOCS, University of Southampton, UK. [13]
- Fernandes-Hernandes , I.,Rodriguez, I., Tobias, G., Calle, D., Carbonell, E., Seco-Granados, G., Simon, J., Blasi, R., 2015. Testing GNSS High Accuracy and Authentication. European Commision, Galileo’s Commercial Service [14]
- Troupin, C., Pascual, A., Valladeau, G., Pujol, I., Lana, A., Heslop, E., Ruiz, S., Torner, M., Picot, N., Tintore, J., 2015. Illustration of the emerging capabilities of SARAL/AltiKa in the coastal zone using a multi-platform approach. Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA), Esporles, SPAIN and Collecte Localisation Satellites (CLS), Space Oceanography Division, Ramonville Saint-Agne, FRANCE [15]
- Pascual, A.,Lana, A., Troupin, C., Ruiz, S., Yannice, F., Escudier, R., Tintore, J., 2015. Assessing SARAL/AltiKa Delayed-Time Data in the Coastal Zone: Comparisons with HF Radar Observations, Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, IMEDEA (CSIC-UIB), Mallorca, Spain [16]
- Birol, F., Niño, F., 2015. Ku– and Ka-band Altimeter Data in the Northwestern Mediterranean Sea: Impact on the Observation of the Coastal Ocean Variability. Centre de Topographie des Oceans et de l’Hydrosphere (CTOH) and Laboratoire d’Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS) [17]
- Brown, G. S. (1977). The average impulse response of a rough surface and its applications. IEEE Trans.Antennas Propag., 25, 67–74. [18]
- Cipollini, P., Benveniste, J., Birol, F., Fernandes, J. , Passaro, M., Vignudelli, S., 2018. Satellite altimetry in coastal regions. Southampton: National Oceanography Centre [19]
- Smith, W., Sandwell, D. 1997. Global Sea Floor Topography From Satellite altimetry and ship depth soundings. National Oceanic and Atmospheric Administration. [20]
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., et al. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(8), 1015–1057. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1> [21]
- Pujol, M.-I. and Larnicol, G. (2005). Mediterranean sea eddy kinetic energy variability from 11 years of altimetric data. Journal of Marine Systems, 58(3-4):121–142. 16, 27, 61, 88, 125 [22]
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 9(4):347–404. 35, 42 [23]

Haney, R. L., 1991: On the pressure gradient force over steep topography in sigma-coordinate ocean models. *J.Phys. Oceanogr.* [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0610:OTPGFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0610:OTPGFO>2.0.CO;2) [24]

M.-H. Rio, S. Mulet , N. Picot 2014. Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents CLS, Ramonville Saint-Agne, France and CNES, Toulouse, France. [25]

Okubo A, 1970. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences *Deep Sea Res.* 17 445 [26]

Weiss J, 1991 The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics *Physics D* 48 273 [27]

Dobson, E., Monaldo, F., Goldhirsh, J., Wilkerson, J., 1987. Validation of Geosat altimeter-derived wind speeds and significant wave heights using buoy data. *John HopkinS APL Technical Digest.* [28]

Barstow S. F. and Kollstad T., 1991. Field trials of the directional waverider, Garrad Hassan and Partners Ltd Bristol, England, UK [29]

Bhandari, S.M., Varma, A.K. 1996. Potential of simultaneous dual-frequency radar altimeter measurements from Topex/Poseidon for rainfall estimation over oceans, Meteorology and Oceanography Group, Space Applications Centre (ISRO), Ahmedabad-380 053, India [30]

Sarkar, A., Basu, S., Varma, A., Kshatriya, J.R., 2002. Autocorrelation analysis of ocean surface wind vectors. *Proceedings of the Indian Academy of science.* [31]

Cressman, G., 1954. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review* 87:367-374. [32]

Hwang, P.A., Teague, W.T., Jacobs, G.A., Wang, D.W., 1998. A statistical comparison of wind speed, wave height and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region. *Journal of Geophysics Research* 103(5):10451-10468 [33]

Gommenginger, C.P., Thibaut, P., Fenoglio, L., Quartly, G., Deng, X., Gomez-Enri, J., Challenor, P., Gao, Y., (2011). Coastal Altimetry, National Oceanography Centre, Southampton. [34]

Rew, R., Davis, G., 1996. Unidata Program Center. University Corporation for atmospheric research. Boulder Colorado. [35]

Wunsch, C., and Stammer, D. (1997). Atmospheric Loading and the Oceanic "Inverted Barometer" effect. *Rev. Geophys.*, 35, 79–107. [36]

Martin-Puig, C., Marquez, J., Ruffini, G., Raney, R.K., Benveniste, J., (2008). SAR Altimetry Applications. European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) [37]

Haines, B. J., Christensen, E., Guinn, J., Norman, R., Marshal, J., (1996) Observations of TOPEX/POSEIDON orbit errors due to gravitational and tidal modeling errors using the global positioning system. In "GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborne Applications," Vol. 115, IAG Symposia, Springer [38]

Ιστότοποι

<https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/copernicus-detail> [1]

<https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/jason-3> [2]

<https://swot.jpl.nasa.gov/mission/overview/> [3]

<https://www.satoc.eu/projects/samosa/> [4]

<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html> [5]

<https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex-poseidon/summary/> [6]

<https://cnes.fr/en> [7]

<https://www.fdr4alt.org/> [8]

<https://hm-lbr-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/TDPforOceanWaves/tree> [9]

[https://podaac.jpl.nasa.gov/Altimetric Data Information/Missions](https://podaac.jpl.nasa.gov/Altimetric%20Data%20Information/Missions) [10]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Κώδικας σε περιβάλλον λογισμικού Matlab [1]

```
clear;
clc;
%Ανάγνωση δεδομένων πρώτου αρχείου
filename1='1.nc';
ncdisp(filename1);
swh1=ncread(filename1,'swh_adjusted_filtered');
lon1=ncread(filename1,'longitude');
lat1=ncread(filename1,'latitude');
time1=ncread(filename1,'time');
bias1=ncread(filename1,'swh_bias_adjusted');
error1=ncread(filename1,'swh_uncertainty');
%Ανάγνωση δεδομένων δεύτερου αρχείου
filename2='2.nc';
ncdisp(filename2);
swh2=ncread(filename2,'swh_adjusted_filtered');
lon2=ncread(filename2,'longitude');
lat2=ncread(filename2,'latitude');
time2=ncread(filename2,'time');
bias2=ncread(filename2,'swh_bias_adjusted');
error2=ncread(filename2,'swh_uncertainty');
%Ανάγνωση δεδομένων τρίτου αρχείου
filename3='3.nc';
ncdisp(filename3);
swh3=ncread(filename3,'swh_adjusted_filtered');
lon3=ncread(filename3,'longitude');
lat3=ncread(filename3,'latitude');
time3=ncread(filename3,'time');
bias3=ncread(filename3,'swh_bias_adjusted');
error3=ncread(filename3,'swh_uncertainty');
%Ανάγνωση δεδομένων τέταρτου αρχείου
filename4='4.nc';
ncdisp(filename4);
swh4=ncread(filename4,'swh_adjusted_filtered');
lon4=ncread(filename4,'longitude');
lat4=ncread(filename4,'latitude');
time4=ncread(filename4,'time');
bias4=ncread(filename4,'swh_bias_adjusted');
error4=ncread(filename4,'swh_uncertainty');
%Μετατροπή χρόνου από μέρες σε μορφή ημερομηνίας
T1N=(time1);
```

```

T_ref1=datetime('1990','yyyy');
T1N1=T_ref1+(T1N);
T1F=datestr(T1N1,'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
%Μετατροπή χρόνου δεύτερου αρχείου
T2N=(time2);
T_ref2=datetime('1990','yyyy');
T2N2=T_ref2+(T2N);
T2F=datestr(T2N2,'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
%Μετατροπή χρόνο τρίτου αρχείου
T3N=(time3);
T_ref3=datetime('1990','yyyy');
T3N3=T_ref3+(T3N);
T3F=datestr(T3N3,'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
%Μετατροπή χρόνου τέταρτου αρχείου
T4N=(time4);
T_ref4=datetime('1990','yyyy');
T4N4=T_ref4+(T4N);
T4F=datestr(T4N4,'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
%Συγχώνευση δεδομένων αρχείων για ENVISAT
lon5=[lon1;lon2];
lon6=[lon3;lon4];
lat5=[lat1;lat2];
lat6=[lat3;lat4];
swh5=[swh1;swh2];
swh6=[swh3;swh4];
%Μετατροπή χρόνου σε λεπτά από έναρξη καταγραφής
ts1=time1*24*60;
ts1N=ts1-ts1(1);
ts2=time2*24*60;
ts2N=ts2-ts1(1);
ts3=time3*24*60;
ts3N=ts3-ts1(1);
ts4=time4*24*60;
ts4N=ts4-ts1(1);
%Συγχώνευση δεδομένων χρόνου και σφαλμάτων/ασάφειας
ts5N=[ts1N;ts2N];
ts6N=[ts3N;ts4N];
bias5=[bias1;bias2];
bias6=[bias3;bias4];
error5=[error1;error2];
error6=[error3;error4];
%Δειγματοληψία για ENVISAT
LQ1=lon5(1:27:27000);
LQ2=lat5(1:27:27000);
LQ3=swh5(1:27:27000);

```

```

LQ4=ts5N(1:27:27000);
LQ5=bias5(1:27:27000);
LQ6=error5(1:27:27000);
%Δειγματοληψία για ERS-2
LQ7=lon6(1:30:30000);
LQ8=lat6(1:30:30000);
LQ9=swh6(1:30:30000);
LQ10=ts6N(1:30:30000);
LQ11=bias6(1:30:30000);
LQ12=error6(1:30:30000);
%Επιλογή δεδομένων για ENVISAT
LQ13=lon5(7564:27090);
LQ14=lat5(7564:27090);
LQ15=swh5(7564:27090);
LQ16=ts5N(7564:27090);
LQ17=bias5(7564:27090);
LQ18=error5(7564:27090);
%Επιλογή δεδομένων για ERS-2
LQ19=lon6(1:19527);
LQ20=lat6(1:19527);
LQ21=swh6(1:19527);
LQ22=ts6N(1:19527);
LQ23=bias6(1:19527);
LQ24=error6(1:19527);
%FIGURE 1
%plot(time1,lat1);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες');
%FIGURE2
%plot(time1,lon1);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Γεωγραφικό μήκος σε μοίρες');
%FIGURE3
%plot(time1,swh1);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού (SWH) σε μέτρα');
%FIGURE4
%plot(time1,bias1);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Σφάλμα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE5
%plot(time1,error1);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Αβεβαιότητα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE6

```



```

%plot(time3,swh3);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού (SWH) σε μέτρα');
%FIGURE7
%plot(time3,bias3);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Σφάλμα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE8
%plot(time3,error3);
%xlabel('Χρόνος σε ημέρες από 01/01/1990');
%ylabel('Αβεβαιότητα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE9
%plot(ts1N,swh1);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE10
%plot(ts3N,swh3);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE11
%plot(ts5N,swh5);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE12
%plot(ts6N,swh6);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE 13
%plot(LQ4,LQ3);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE 14
%plot(LQ10,LQ9);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα (SWH)');
%FIGURE 15
%plot(LQ4,LQ6);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Αβεβαιότητα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE16
%plot(LQ10,LQ12);
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Αβεβαιότητα παρατηρήσεων σε μέτρα');
%FIGURE 17

```

```
%plot(LQ16,LQ15,'DisplayName','LQ5');hold on;plot(LQ16,LQ21,'DisplayName','LQ4');hold
off;
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Υψόμετρο σημαντικότερου κυματισμού σε μέτρα(SWH)');
%FIGURE 18
%plot(LQ16,LQ18,'DisplayName','LQ5');hold on;plot(LQ16,LQ24,'DisplayName','LQ4');hold
off;
%xlabel('Χρόνος καταγραφής σε λεπτά (Time elapsed in minutes)');
%ylabel('Η ασάφεια των παρατηρήσεων σε μέτρα');
```