ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

‘‘Μελέτη Μικρομετακινήσεων Εδάφους στην Δυτική Κρήτη με χρήση Διαφορικής Συμβολομετρίας’’

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κουτσογιαννόπουλος

<u>Εξεταστική Επιτροπή</u>:
Μερτίκας Στυλιανός, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (Επιβλέπων)
Ζερβάκης Μιχαήλ, Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Παρτσινέβελος Παναγιώτης, Λέκτορας Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Χανιά, Απρίλιος 2011

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Μερτίκα Στυλιανό (Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης), διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής, για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Ζερβάκη Μιχαήλ (Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης), καθώς και τον Λέκτορα Καθηγητή κ. Παρτσινέβελο Παναγιώτη (Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης), για τη συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που εργάζονται στο Εργαστήριο Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Ειδικότερα την Παπαδάκη Ειρήνη για τις πολύτιμες συμβουλές σε θέματα συμβολομετρίας αλλά και διορθώσεις του παρόντος κειμένου, τον Ανδρικόπουλο Δημήτρη για συμβουλές πάνω σε θέματα συμβολομετρίας, και τον Ξενοφών Φραντζή για την διάθεση δεδομένων από επίγειους σταθμούς GPS.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη βοήθεια και την υποστήριξή της καθ’ όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, καθώς και πολλούς φίλους μου για την συμπαράσταση που μου παρείχαν.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει και αξιολογεί την τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar, με στόχο την μελέτη εδαφικών μετακινήσεων στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης. Η Κρήτη βρίσκεται κοντά στο όριο της σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας και χαρακτηρίζεται από μια γενική ανύψωση της τάξης των 6 mm/yr. Ωστόσο η πολύπλοκη γεωλογική δομή της, καθιστά την ανύψωση αυτή ανομοιογενή και έχει οδηγήσει στην διατύπωση διαφόρων απόψεων σχετικά με τις γεωτεκτονικές κινήσεις που την χαρακτηρίζουν.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 17 εικόνες SAR-Radar του δορυφόρου EnviSat για την δημιουργία συμβολογραφημάτων στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Κρήτης. Η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar επιτρέπει μία γενική εποπτεία της περιοχής μελέτης, παρέχοντας τη δυνατότητα εκτίμησης σχετικών κινήσεων μεταξύ σημείων στο συμβολογράφημα. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν στο χρονικό διάστημα 2002-2008 και η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Diapason. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δεδομένα από επίγειους σταθμούς GPS (Global Positioning System) που έχουν εγκατασταθεί στην περιοχή μελέτης από το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την τεχνική και παρουσιάζονται προτάσεις για ανάλογες μελλοντικές μελέτες.

Abstract

The purpose of this diploma thesis, is to apply and evaluate the technique of Differential Radar Interferometry, for land deformation measurements in Western Crete, Greece. Crete is located near the convergence boundary between the tectonic plates of Africa and Eurasia. The island of Crete is characterized by a general uplift that amounts to about 6 mm/yr. However, its complex geological structure, has led to the formulation of various views on the geotectonic movements that characterize it.

A total of 17 EnviSat-ASAR images were used, in order to generate interferograms covering the broader area of Western Crete. The technique of Differential Radar Interferometry (DInSAR) allows an overview of the study area, revealing mainly relative movements between areas on a SAR interferogram. The images used, cover the period between 2002-2008 and were processed using the software Diapason. The results were compared with data from GPS ground stations (Global Positioning System) that were established in the study area by the Department of Geodesy and Geomatics, of the Technical University of Crete. The technique was evaluated and useful conclusions came up, that should be taken into consideration for similar investigations in the future.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Στόχοι

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει και αξιολογεί την τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar, με στόχο την μελέτη εδαφικών μετακινήσεων στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης.

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μία γενική ανύψωση λόγω της θέσης κοντά στο όριο σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας. Ωστόσο η πολύπλοκη γεωτεκτονική δομή της, καθιστά την ανύψωση αυτή ανομοιογενή και έχει οδηγήσει στην διατύπωση διάφορων απόψεων σχετικά με τις γεωτεκτονικές κινήσεις που την χαρακτηρίζουν.

Η τεχνική της Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar επιτρέπει μία γενική εποπτεία της περιοχής μελέτης, παρέχοντας τη δυνατότητα εκτίμησης της σχετικής μετατόπισης μεταξύ σημείων στο συμβολογράφημα. Για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, χρησιμοποιήθηκαν 17 εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) του δορυφόρου EnviSat, που καλύπτουν το χρονικό διάστημα 2002-2008. Η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Diapason.

Στη συνέχεια αξιολογήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φάση του σήματος (πχ ατμόσφαιρα, τοπογραφία). Προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την τεχνική και παρουσιάζονται προτάσεις για ανάλογες μελλοντικές μελέτες.

1.2 Δομή

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μία περιγραφή της περιοχής μελέτης. Παρουσιάζονται πληροφορίες από υπάρχουσες γεωλογικές και γεωτεκτονικές μελέτες σχετικά με τις κινήσεις της Κρήτης, καθώς και δεδομένα από επίγειους σταθμούς GPS.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται οι βασικές αρχές της τεχνικής της συμβολομετρίας Radar. Επίσης παρουσιάζονται παράγοντες που επηρεάζουν τη φάση του σήματος.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η επεξεργασία αυτών με την χρήση του λογισμικού DIAPASON.

Στο Κεφάλαιο 5, παραθέτονται τα αποτελέσματά της επεξεργασίας, τεχνικές για την βελτίωση τους καθώς και συγκρίσεις με δεδομένα από GPS.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για παρόμοιες μελλοντικές μελέτες.

Κεφάλαιο 2

Περιοχή Μελέτης

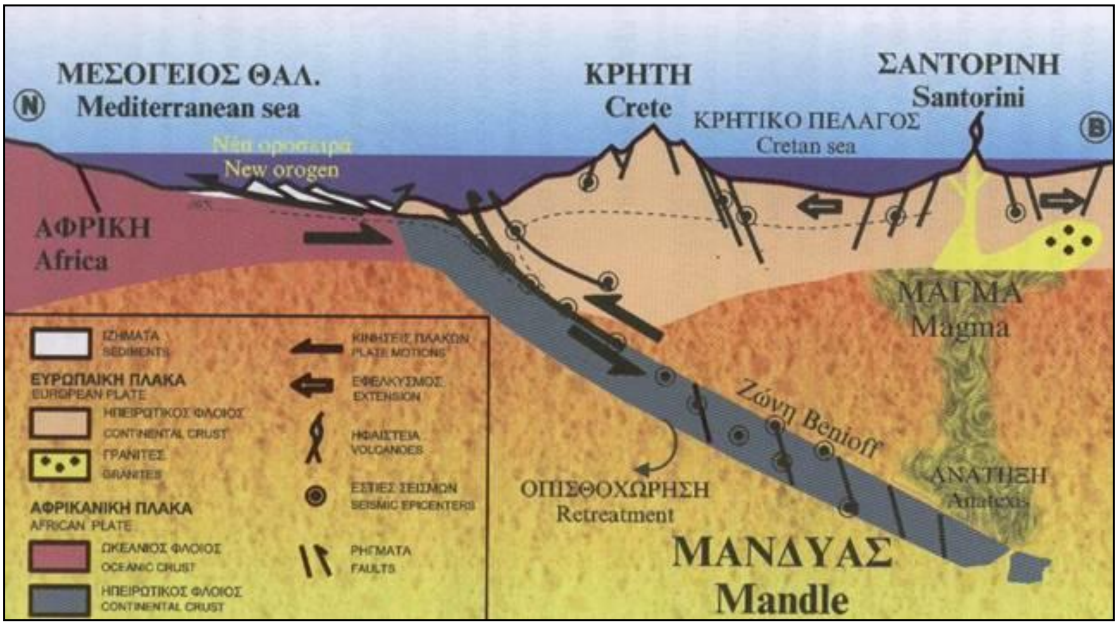
Εικόνα 2.1 Η περιοχή μελέτης (Google Earth)

Η περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής είναι η Δυτική Κρήτη, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.1. Η γεωμορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τριών βασικών ζωνών: 1) Την ορεινή ζώνη με υψόμετρο μεγαλύτερο των 400 μέτρων, 2) τη μέση ζώνη μεταξύ 200-400 μέτρων και 3) την χαμηλή ζώνη που αφορά στις περιοχές που εκτείνονται από την επιφάνεια της θάλασσας έως τα 200 μέτρα υψόμετρο. Οι δύο πρώτες ζώνες καταλαμβάνουν σχεδόν τα τρία πέμπτα της νήσου και αποτελούν μια συνεχή οροσειρά από τα δυτικά προς τα ανατολικά, διακοπτόμενη από μικρές κοιλάδες και φαράγγια. Η οροσειρά αυτή έχει έξι κορυφές που ξεπερνούν τα 2000 μέτρα με ψηλότερη την βουνοκορυφή Πάχνες που φτάνει τα 2453 μέτρα.

Τα σημεία της περιοχής μελέτης στα οποία θα δοθεί έμφαση είναι η βουνοκορφή Πάχνες (εικόνα 2.1), ως το κεντρικό σημείο της ορεινής ζώνης, καθώς και οι περιοχές Χρυσοσκαλίτισσα, Ροδάκινο και Σελί, όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από επίγειους σταθμούς GPS (Global Positioning System) του εργαστηρίου Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

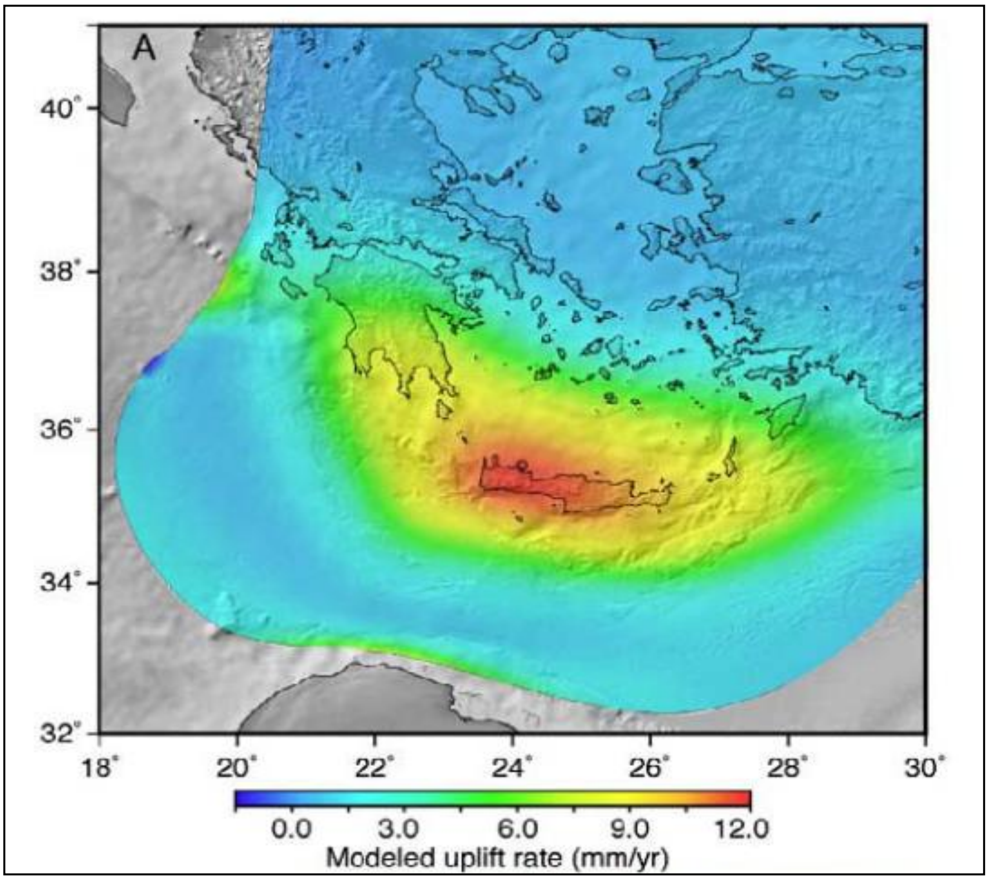
2.1 Γεωτεκτονικά Μοντέλα

Η γεωλογική δομή της Κρήτης συνδέεται άμεσα με την συνολική γεωλογική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο της ΒΔ –ΝΑ. Κάθε ζώνη, χαρακτηρίζεται από ορισμένη στρωματογραφική και λιθολογική διαδοχή των πετρωμάτων της όπως αυτά προέκυψαν από την επαλληλία των τεκτονικών γεγονότων που οδήγησαν στην δημιουργία του ορογενούς. Η σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Αφρικής και Ευρασίας, έχει ως επακόλουθο την δημιουργία της Ελληνικής ζώνης υποβύθισης (Σχήμα 2.1). Λόγω της θέσης της κοντά στο όριο σύγκλισης, η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μία γενική ανύψωση.



Σχήμα 2.1 Η σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Αφρικής και Ευρασίας.
(http://emeric.ims.forth.gr/)

Η ανύψωση αυτή έχει εκτιμηθεί ποσοτικά σε διαφορές μελέτες. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες η ανύψωση εκτιμάται της τάξης από μικρότερη του χιλιοστού έως και ενός εκατοστού ετησίως. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το αποτέλεσμα μιας πρόσφατης μοντελοποίησης της ανύψωσης αυτής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (*Ganas and Parsons, 2009*). Συνδυάζοντας διάφορα μοντέλα οι Ganas και Parsons, εκτίμησαν μία ανύψωση της τάξης των 6 mm/yr.

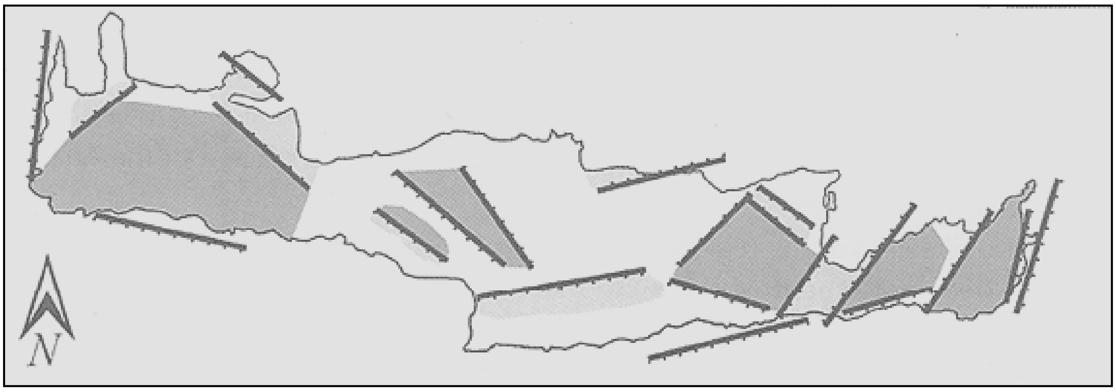


Σχήμα 2.2 Χάρτης μοντελοποίησης της ανύψωσης σε mm/yr
(Ganas and Parsons, 2009)

Η πολύπλοκη γεωτεκτονική δομή της Κρήτης καθιστά την ανύψωση αυτή ανομοιογενή και έχει οδηγήσει στην διατύπωση διάφορων απόψεων σχετικά με τις γεωτεκτονικές κινήσεις που την χαρακτηρίζουν. Ο κύριος παράγοντας επιρροής των κινήσεων αυτών είναι τα διάφορα ρήγματα.

Στην Δυτική Κρήτη παρατηρείται μεγάλος αριθμός ρηγμάτων που πολλά από αυτά χαρακτηρίζονται ως ενεργά. Τα ρήγματα αυτά σε γενικές γραμμές οριοθετούν περιμετρικά τα Λευκά Όρη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ρήγμα Σφακίων το οποίο έχει προκαλέσει την ανύψωση θαλάσσιων ιζημάτων. Άλλο παράδειγμα είναι τα υποθαλάσσια ρήγματα τα οποία οριοθετούν τη δυτική υφαλοκρηπίδα του νησιού. Τα ρήγματα αυτά έχουν γενική διεύθυνση Β-Ν, κατά την οποία παρατηρείται μία σχετικά μεγάλη συγκέντρωση μικροσεισμών.

Διάφορες μελέτες έχουν γίνει σχετικά με τον εντοπισμό των ρηγμάτων και την επιρροή τους στις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ διαφορετικών περιοχών της Κρήτης. Μία από τις μελέτες αυτές παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 όπου φαίνονται περιοχές που χαρακτηρίζονται από ανυψώσεις και καθιζήσεις.

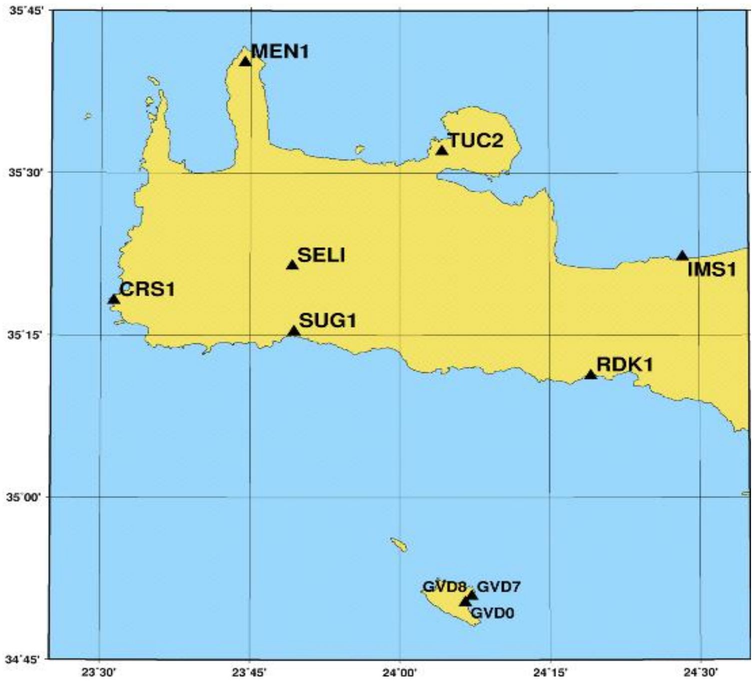


Σχήμα 2.3 Τεκτονικές κινήσεις του νησιού, με σκούρο γκρι οι ανυψώσεις και με ανοικτό οι καταβυθίσεις (Fassoulas, 2001)

Σύμφωνα με το μοντέλο του σχήματος 2.3, αναμένεται η ορεινή ζώνη της Δυτικής Κρήτης να ανυψώνεται σε σχέση με της γύρω περιοχές. Ωστόσο οι τεκτονικές κινήσεις αυτές αφορούν μεγάλες χρονικές περιόδους.

2.2 Δεδομένα Σταθμών GPS

Το εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, συλλέγει και επεξεργάζεται δεδομένα από διάφορους σταθμούς GPS στην Κρήτη. Οι σταθμοί αυτοί παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Σταθμοί GPS στην περιοχή μελέτης (GeoMatLab, TUC)

Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν κινήσεις οι οποίες αναλύονται με τρείς συνιστώσες. Οι οριζόντιες κινήσεις προσδιορίζονται από τις συνιστώσες N (ως προς τον Βορρά) και E (ως προς την Ανατολή). Αρνητικό πρόσημο στις μετρήσεις N και E εκφράζει κίνηση προς τα νότια (S) και δυτικά (W) αντίστοιχα. Οι κατακόρυφες συνιστώσες χαρακτηρίζονται από θετικό πρόσημο όταν πρόκειται για ανύψωση και αρνητικό πρόσημο όταν πρόκειται για καθίζηση. Οι κινήσεις των σταθμών αφορούν σε ταχύτητες της τάξης των χιλιοστών ανά έτος (mm/yr). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες ταχύτητες που έχουν καταγραφεί από τους σταθμούς ως προς το Διεθνές Σύστημα Αναφοράς ITRF 2005 (International Terrestrial Reference Frame 2005) και όπως αυτές έχουν υπολογιστεί από το εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής.

Σταθμός	**Ταχύτητα Ανατολή (mm/yr)**	**Ταχύτητα Βοράς (mm/yr)**	**Ταχύτητα Κατακόρυφης κίνησης (mm/yr)**
Χρυσοσκαλίτισσα (CRS1)	6.850	-11.480	2.748
Γαύδος (GVD0)	7.922	-12.455	1.057
Ρέθυμνο (IMS)	5.957	-8.961	-2.923
Πολυτεχνείο (TUC2)	7.662	-11.858	0.813
Ροδάκινο (RDK1)	8.228	-12.586	-3.620
Σελί (SELI)	8.376	-11.111	-1.636

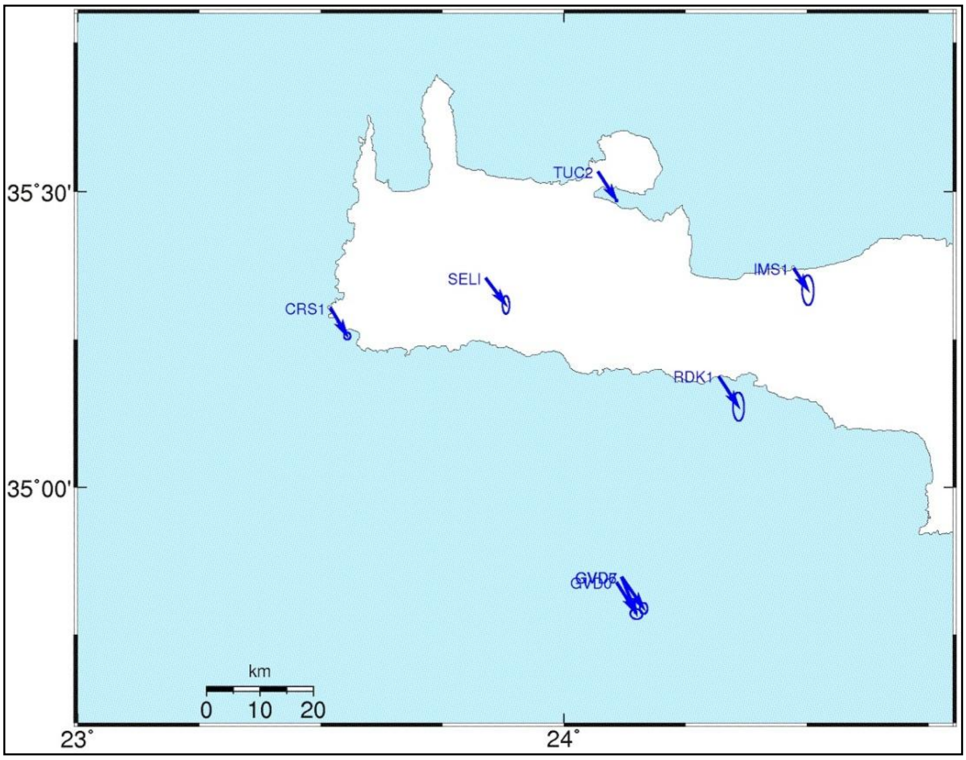
Πίνακας 2.1 Στοιχεία ταχυτήτων σταθμών GPS στην Δ.Κρήτη

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι από τους παραπάνω σταθμούς οι σταθμοί Σελί, Ροδάκινο και IMS έχουν εγκατασταθεί σχετικά πρόσφατα και έχουν καταγραφεί μετρήσεις μόλις 1-2 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις από τους εν λόγω σταθμούς να είναι ακόμα ανακριβείς και να χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές τυπικής απόκλισης (Πίνακας 2.2). Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 πιθανόν να αποκλίνουν αρκετά από τις πραγματικές ετήσιες ταχύτητες. Ωστόσο τα δεδομένα τους θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία έστω και ενδεικτικά.

Σταθμός	**Τυπική Απόκλιση Ανατολή (mm/yr)**	**Τυπική Απόκλιση Βοράς (mm/yr)**	**Τυπική Απόκλιση Κατακόρυφης κίνησης (mm/yr)**
Χρυσοσκαλίτισσα (CRS1)	0.564	0.610	2.451
Γαύδος (GVD0)	0.154	0.143	0.500
Ρέθυμνο (IMS)	0.993	2.559	7.308
Πολυτεχνείο (TUC2)	0.188	0.165	0.434
Ροδάκινο (RDK1)	0.957	2.448	7.297
Σελί (SELI)	0.589	1.538	3.023

Πίνακας 2.2 Τυπικές Αποκλίσεις για τις ταχύτητες του πίνακα 2.1

Οι οριζόντιες διευθύνσεις κίνησης που προκύπτουν από τους σταθμούς αυτούς απεικονίζονται διανυσματικά στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5Διανύσματα οριζόντιων κινήσεων για κάθε σταθμό GPS (GeoMatLab, TUC)

Προκύπτει λοιπόν ότι οι οριζόντιες κινήσεις της Κρήτης χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια ως προς την διεύθυνση κίνησης, και παραπλήσια μεγέθη μέτρων. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1 οι διαφορές στην κάθετη συνιστώσα είναι μεγάλες.

Καθώς κατά την επεξεργασία με συμβολομετρία που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια, δεν υπάρχει δυνατότητα διάκρισης μεταξύ οριζόντιων και κάθετων σχετικών μετατοπίσεων, θα θεωρηθεί πως οι σχετικές μετακινήσεις που εντοπίζονται αφορούν κυρίως στην κάθετη συνιστώσα.

Κεφάλαιο 3

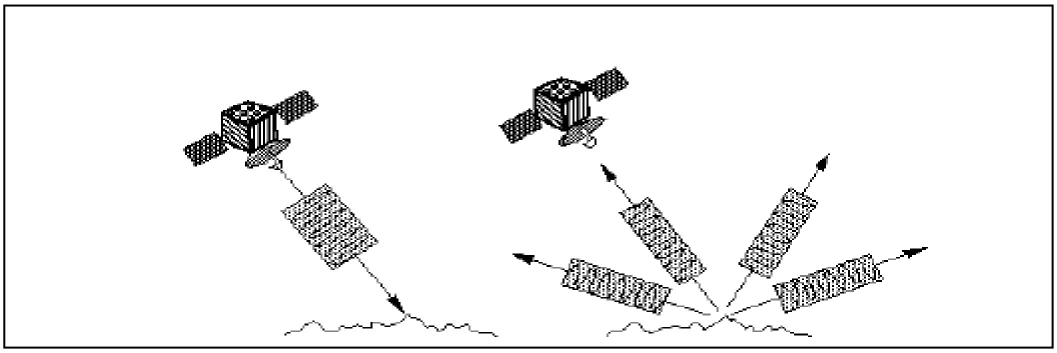
Συμβολομετρία Radar

3.1 Radar

3.1.1 Το Εικονοληπτικό Radar

Η λέξη Radar χρησιμοποιείται σαν ακρωνύμιο της αγγλικής έκφρασης "**Ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging", που υποδηλώνει ότι το σύστημα αυτό λειτουργεί στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων και ανιχνεύει την ανακλώμενη ή ακτινοβολούμενη ενέργεια από το έδαφος (Μερτίκας, 1999).

Το Radar είναι ένα ενεργό σύστημα που παρέχει την δική του ακτινοβολία και λειτουργεί εντελώς ανεξάρτητα από το ηλιακό φώς, και μπορεί επομένως να λειτουργεί κατά την διάρκεια και της ημέρας και της νύκτας. Ένα σύστημα Radar, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας και καταγράφει τις επιστροφές από τους στόχους της επιφάνειας της Γης.



Σχήμα 3.1 Radar σε δορυφόρο. Εκπομπή, ανάκλαση και επιστροφή ακτινοβολίας (ESA, 2007)

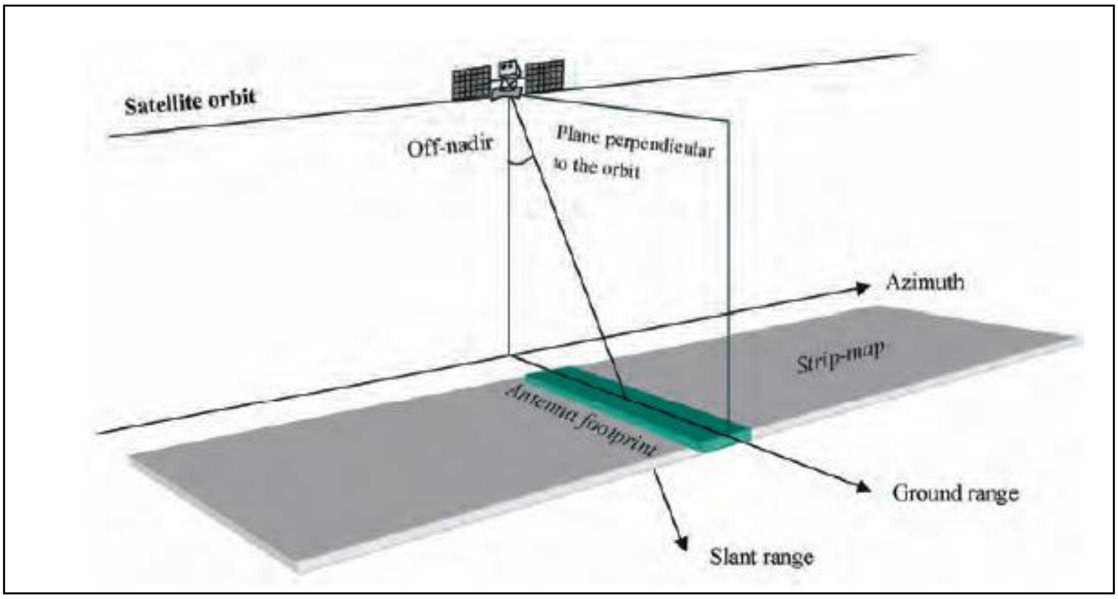
Τα δεδομένα καταγράφονται με βάση τον χρόνο μετάβασης και επιστροφής της ακτινοβολίας, και όχι την γωνιακή απόσταση. Οι εικόνες Radar μπορούν να ληφθούν από μεγάλες αποστάσεις με υψηλή χωρική ανάλυση. Το κάθε Radar χρησιμοποιεί μονοχρωματική σύμφωνη ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος (μεταξύ 1-1000mm).

3.1.2 Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR

Το Radar Συνθετικού Ανοίγματος Κεραίας (Synthetic Aperture Radar - SAR), αναπτύχθηκε για να δώσει λύση στο πρόβλημα του πεπερασμένου μήκους κεραίας των Radar Πραγματικού Ανοίγματος Κεραίας (Real Aperture Radar – RAR).

Η λέξη Aperture, δηλαδή άνοιγμα, αναφέρεται στο άνοιγμα της κεραίας που χρησιμοποιεί το Radar ώστε να συλλέξει την ανακλώμενη ακτινοβολία που επιστρέφει σε αυτό, και να δημιουργήσει την εικόνα. Η χωρική ανάλυση (Spatial Resolution) ενός συστήματος RAR καθορίζεται (μαζί με άλλους παράγοντες) από το μέγεθος της κεραίας που χρησιμοποιείται. Για κάθε δεδομένο μήκος κύματος, όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία τόσο καλύτερη είναι η χωρική ανάλυση. Ο περιορισμός αυτός οδήγησε στην ανάπτυξη του Radar συνθετικού ανοίγματος SAR ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλασματικό μεγάλο μήκος κεραίας.

Το σύστημα SAR εκμεταλλεύεται την κίνηση του φορέα του οργάνου (Δορυφόρος ή Αεροσκάφος) και την αρχή του φαινομένου Doppler, συνθέτοντας έτσι μια πολύ μεγαλύτερη εικονική κεραία σε σχέση με το σύστημα RAR.



Σχήμα 3.2 Σύστημα SAR σε δορυφόρο. (ESA, 2007)

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα κλασσικό σύστημα SAR σε δορυφόρο. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με το σύστημα radar, με την κεραία στραμμένη στην επιφάνεια της Γής κάθετα στην διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου. Η κλίση της κεραίας σε σχέση με το ναδίρ είναι συνήθως μεταξύ 20° και 50°. Η διεύθυνση εκπομπής-λήψης της ακτινοβολίας μεταξύ radar και εδάφους, ονομάζεται κεκλιμένη απόσταση (slant range).

Τα υπάρχοντα συστήματα SAR λειτουργούν στις ακόλουθες συχνότητες:
• C band – 5.3 GHz [ERS, Envisat,ο καναδέζικος Radarsat,
και οι αμερικάνικες δορυφορικές αποστολές (US shuttle missions)]
• L band – 1.2 GHz [ο ιαπωνικός J-ERS και ο ALOS]
• X band – 10 GHz [ο γερμανό-ιταλικός X-SAR]

Η περιοχή κάλυψης στο έδαφος ποικίλει από δορυφόρο σε δορυφόρο. Στην περίπτωση π.χ. των ERS η περιοχή κάλυψης στο έδαφος είναι περίπου 5 χιλιόμετρα στην διεύθυνση του Αζιμούθιου και 100 χιλιόμετρα κάθετα στην διεύθυνση της τροχιάς.

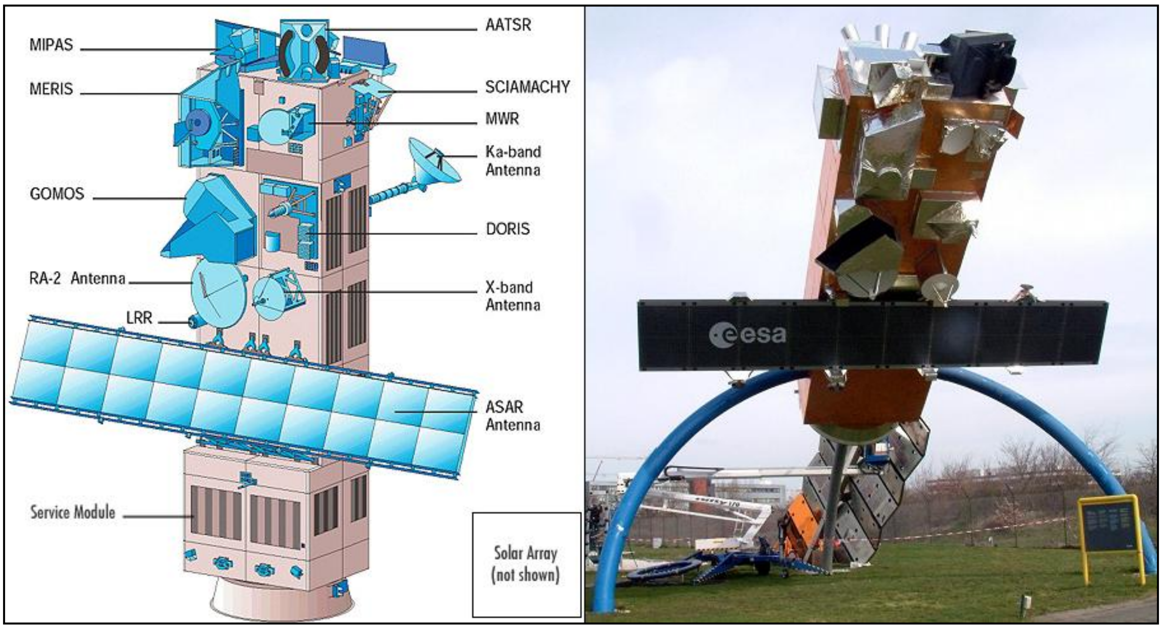
Μια ψηφιακή εικόνα SAR, μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένα μωσαϊκό από μικρά εικονοστοιχεία (pixels). Κάθε εικονοστοιχείο είναι συσχετισμένο με μία μικρή περιοχή της επιφάνειας της Γης, η οποία αποκαλείται διακριτό στοιχείο (resolution cell). Κάθε εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται από έναν μιγαδικό αριθμό που περιέχει πληροφορίες έντασης (amplitude) και φάσης (phase) της ακτινοβολίας, όπως αυτή ανακλάστηκε και επέστρεψε από όλους τους δυνατούς ανακλαστήρες (βράχους, βλάστηση, κτήρια κλπ) που εμπίπτουν στις διαστάσεις του εικονοστοιχείου.

Οι διαφορετικές στήλες της εικόνας συνδέονται με τις διαφορετικές αποστάσεις ως προς την κεκλιμένη διεύθυνση, ενώ οι διαφορετικές γραμμές με τις διαφορετικές θέσης του δορυφόρου (στην διεύθυνση του αζιμούθιου). Η θέση και η διάσταση του κάθε διακριτού στοιχείου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος SAR. Καθότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από τον δορυφόρο EnviSat, ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του εν λόγω δορυφορικού συστήματος.

3.1.3 Ο Δορυφόρος EnviSat

Ο δορυφόρος EnviSat (εικόνα 3.1), εκτοξεύτηκε το 2002 και είναι ο μεγαλύτερος δορυφόρος που είχε κατασκευαστεί ως τότε για την παρακολούθηση της Γης. Βρίσκεται σε μία κλίση 98.54 μοιρών με ηλιοσύγχρονη κυκλική τροχιά σε ύψος 800 km. Η χρονική του δειγματοληψία είναι κάθε 35 ημέρες. Η ανάλυση δεδομένων του EnviSat, οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τις διεργασίες του Γήινου συστήματος, όπως για παράδειγμα την αλλαγή του κλίματος.

Οι κύριοι στόχοι του EnviSat είναι:
-Να παρέχει συνέχιση των παρατηρήσεων που ξεκίνησαν από τους δορυφόρους ERS.
-Να εμπλουτίσει τις αποστολές των ERS, κυρίως σχετικά με τους Ωκεανούς και τους Πάγους.
-Να επεκτείνει το μέγεθος των παραμέτρων που παρατηρούνται για βελτιωμένη παρατήρηση του περιβάλλοντος.
-Να συνεισφέρει σημαντικά στις περιβαλλοντολογικές μελέτες, ιδιαίτερα στον τομέα της ωκεανογραφίας και της ατμοσφαιρικής χημείας.



Εικόνα 3.1 Ο δορυφόρος EnviSat σε σχέδιο (αριστερά) και εκθεσιακό ομοίωμα (δεξιά) (http://www.esa.int/)

Ο δορυφόρος EnviΣat είναι εξοπλισμένος με 10 διαφορετικά όργανα:

- Το όργανο MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), μετράει την ανακλαστικότητα του εδάφους και της ατμόσφαιρας.
- Το όργανο AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer), μετράει την θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και της γης.
- Το όργανο DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Intergrated by Satellite), καθορίζει την τροχιά του δορυφόρου εντός δέκα εκατοστών.
- GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)
- SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY)
- RA-2 (Radar Altimeter 2)
- MWR (MicroWave Radiometer)
- MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)
- LRR (Laser Retro-Reflector)
- Το όργανο ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar).

Το όργανο μετρήσεων ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), είναι ένα Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR), και αποτελεί το μεγαλύτερο όργανο μετρήσεων του δορυφόρου Envisat. Λειτουργεί σε C-band (5.3 GHz). Έχει την δυνατότητα λειτουργίας σε τρείς διαφορετικές χωρικές αναλύσεις, των 30x30m, 150x150m και 1000x1000m ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

3.2 Συμβολομετρία

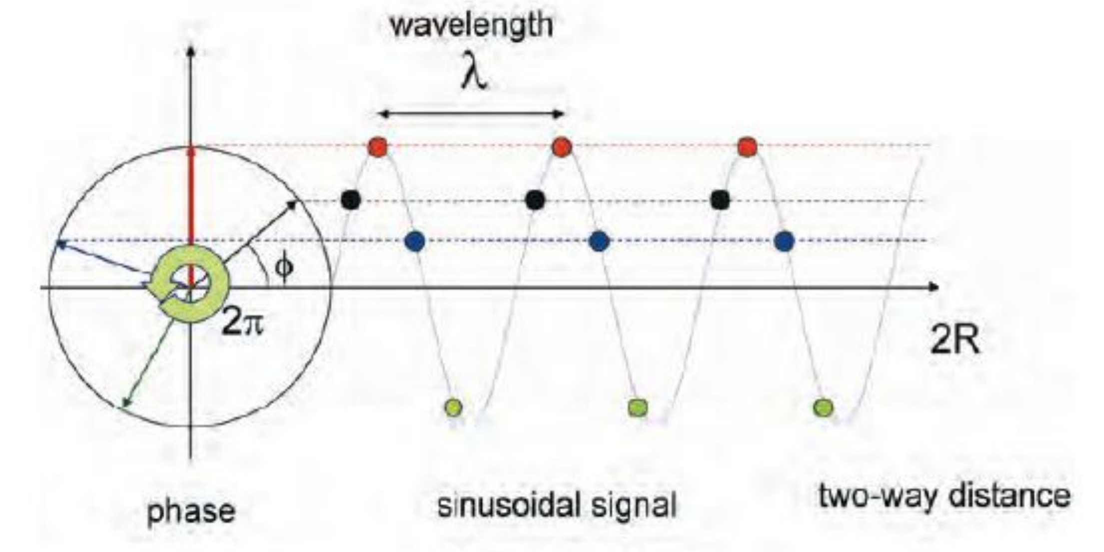
3.2.1 Εισαγωγή στη Συμβολομετρία Radar

Η Συμβολομετρία Radar ακλουθώντας την ανάπτυξη των συστημάτων SAR ξεκίνησε να αναπτύσσεται από την δεκαετία του '90. Ο ορισμός της συμβολομετρίας προέρχεται από το φαινόμενο της συμβολής του φωτός. Το φώς στην περίπτωση της συμβολομετρίας Radar είναι η μικροκυματική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας. Η τεχνική της συμβολομετρίας έχει, μεταξύ άλλων, τις εξής εφαρμογές:

- Παρατήρηση εδαφικών ανυψώσεων και καθιζήσεων
- Παρατήρηση σεισμών και ηφαιστειακών δραστηριοτήτων
- Μελέτη βλάστησης
- Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους
- Κλιματολογικές παρατηρήσεις
- Μέτρηση ταχύτητας ψυχρών ρευμάτων

Η μέθοδος αξιοποιεί την κυματική φύση της ακτινοβολίας μετρώντας την γωνία φάσης της λαμβανόμενης ακτινοβολίας. Το προϊόν της συμβολομετρίας ονομάζεται συμβολογράφημα και αποτελεί μια ψηφιακή εικόνα που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περιοχή και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Τα Radar συνθετικού ανοίγματος εκτός από τιμές έντασης μετρούν και τιμές φάσης. Η μικροκυματική ακτινοβολία (ή ποσοστό αυτής) που εκπέμπεται από το Radar επιστρέφει σε αυτό μετά από την ανάκλασή του στους στόχους της περιοχής, πραγματοποιώντας μία διπλή διαδρομή (Radar-Στόχος, Στόχος-Radar). Οι επιστροφές αυτές συνθέτουν την εικόνα SAR. Οι στόχοι που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το Radar έχουν διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ εκπομπής και λήψης. Λόγω της ημιτονοειδούς φύσης του εκπεμπόμενου κύματος, η καθυστέρηση αυτή, $\boldsymbol{\tau}$, αντιστοιχεί σε μία αλλαγή στην φάση, $\boldsymbol{\varphi}$, μεταξύ εκπεμπόμενης και ληφθείσας ακτινοβολίας. Η τιμή αυτή της αλλαγής της φάσης, $\boldsymbol{\varphi}$, είναι ανάλογη της διπλής διαδρομής μεταξύ Radar και στόχου δηλαδή $\boldsymbol{2R}$, και αντίστροφος ανάλογη με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η σχέση αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.3.



$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R$$

Σχήμα 3.3 Υπολογισμός φάσης όπου: ***φ*** *η φάση,* ***λ*** *το μήκος κύματος,* ***R*** *η απόσταση Radar και εκάστοτε στόχου (ESA, 2007).*

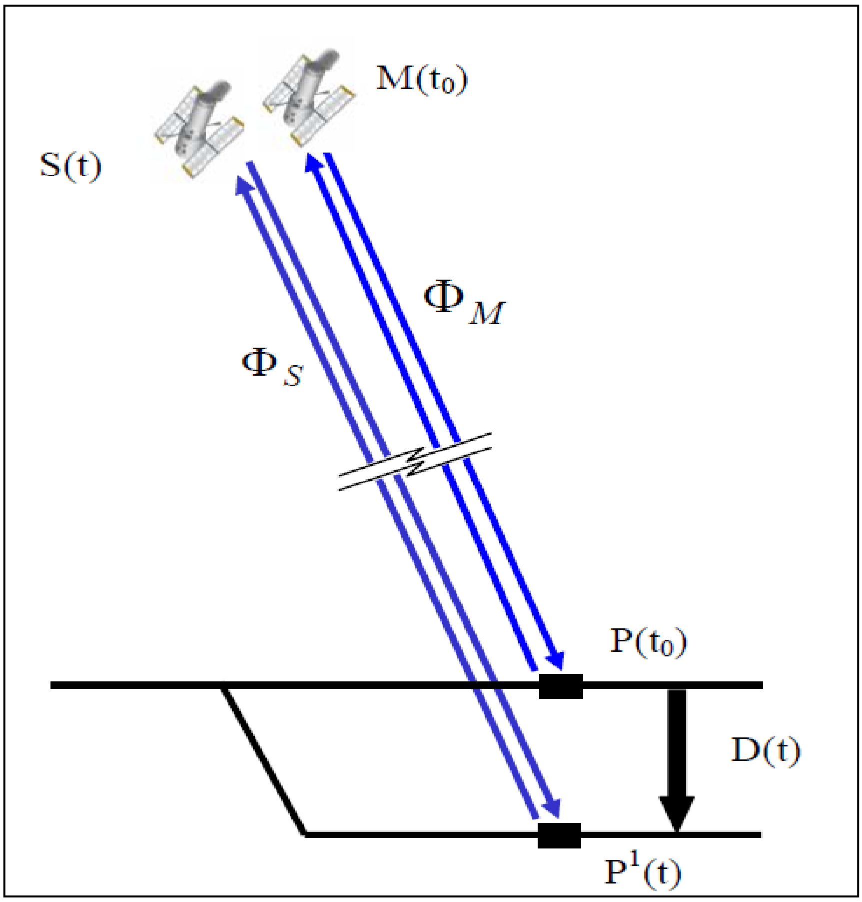
Σε μία εικόνα SAR η τιμή φάσης που έχει καταγραφεί για κάθε εικονοστοιχείο φαίνεται εντελώς τυχαία και από μόνη της δεν έχει κάποια πρακτική χρησιμότητα. Ωστόσο χρησιμοποιώντας μία δεύτερη εικόνα SAR και υπολογίζοντας την διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των δύο εικόνων προκύπτει μία νέα, ιδιαίτερα χρήσιμη εικόνα. Η εικόνα αυτή ονομάζεται συμβολογράφημα. Στο συμβολογράφημα, απεικονίζονται κροσσοί συμβολής οι οποίοι εκφράζουν διαφορές στην φάση μεταξύ των εικονοστοιχείων των δύο εικόνων.

Στην εργασία αυτή, η τεχνική της συμβολομετρίας που εφαρμόστηκε ονομάζεται Διαφορική Συμβολομετρία Radar (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar – DInSAR). Σε αυτήν την μέθοδο αξιοποιείται η χρονική διαφορά μεταξύ των δύο λήψεων, η οποία μπορεί να κυμαίνεται σε διάστημα μερικών μερών έως και ετών. Χρησιμοποιείται κυρίως για παρακολούθηση εδαφικών παραμορφώσεων, σεισμών και ηφαιστειακής δραστηριότητας.

3.2.2 Διαφορική Συμβολομετρία Radar (DInSAR)

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή της αρχής της μεθόδου της Διαφορικής Συμβολομετρίας Radar (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar – DInSAR). Η περιγραφή αυτή αφορά σε δορυφορικά SAR (Spaceborn DInSAR) και όχι πτήσεις αεροσκαφών (Airborn DInSAR)

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου DInSAR παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 και περιγράφεται στην συνέχεια.



Σχήμα 3.4 Απεικόνιση αρχής DInSAR για μέτρηση μετακίνησης επιφάνειας. (Crosetto, 2005)

Έστω ότι την χρονική στιγμή t_0 πραγματοποιείται μία λήψη εικόνας, $M(t_0)$. Κατά την λήψη αυτή καταγράφεται μία τιμή φάσης $Φ_M$ για το διακριτό στοιχείο του εδάφους $P(t_0)$. Έστω ότι μετά από πάροδο χρόνου t, πραγματοποιείται μία δεύτερη λήψη S(t) που αφορά στην ίδια περιοχή. Θεωρούμε ότι μετά τη διέλευση χρόνου $t΄ = t – t_0$ το σημείο $P(t_0)$ έχει μετατοπιστεί στην θέση $P^1(t)$. Μία νέα τιμή φάσης $Φ_S$ θα καταγραφεί στην δεύτερη εικόνα SAR στο αντίστοιχο διακριτό στοιχείο του εδάφους,

$P^1(t)$. Συνδυάζοντας τις δύο εικόνες SAR, υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο ξεχωριστά η διαφορά φάσης μεταξύ των καταγραφών κατά την πρώτη λήψη $M(t_0)$ και κατά την δεύτερη λήψη S(t). Το σύνολο των τιμών διαφορών φάσης για όλα τα διακριτά στοιχεία στο έδαφος και τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία στην εικόνα δημιουργούν το συμβολογράφημα.

Για κάθε εικονοστοιχείο, αν ΔΦ είναι η διαφορά φάσης, τότε ισχύει η σχέση:
$\mathbf{\Delta\Phi = \Phi_S - \Phi_M}$ *(Σχέση 3.1)*

Ωστόσο οι παραμορφώσεις του εδάφους δεν αποτελούν τον μοναδικό παράγοντα που επηρεάζει την μετρούμενη φάση. Εξίσου σημαντικοί είναι οι παράγοντες της τοπογραφίας και των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Με άλλα λόγια, η συνολική, μετρούμενη διαφορά φάσης $\Delta\Phi_{Total}$ ισούται με:

$\mathbf{\Delta\Phi_{Total} = \Phi_{Defo} + \Phi_{Topo} + \Phi_{Atm}}$ *(Σχέση 3.2)*

Όπου,

Φ_{Defo}, αναφέρεται στη διαφορά φάσης που προκύπτει από την παραμόρφωση του εδάφους μεταξύ των δύο λήψεων

Φ_{Topo}, αναφέρεται στη διαφορά φάσης που προκύπτει από την επίδραση της τοπογραφίας της περιοχής

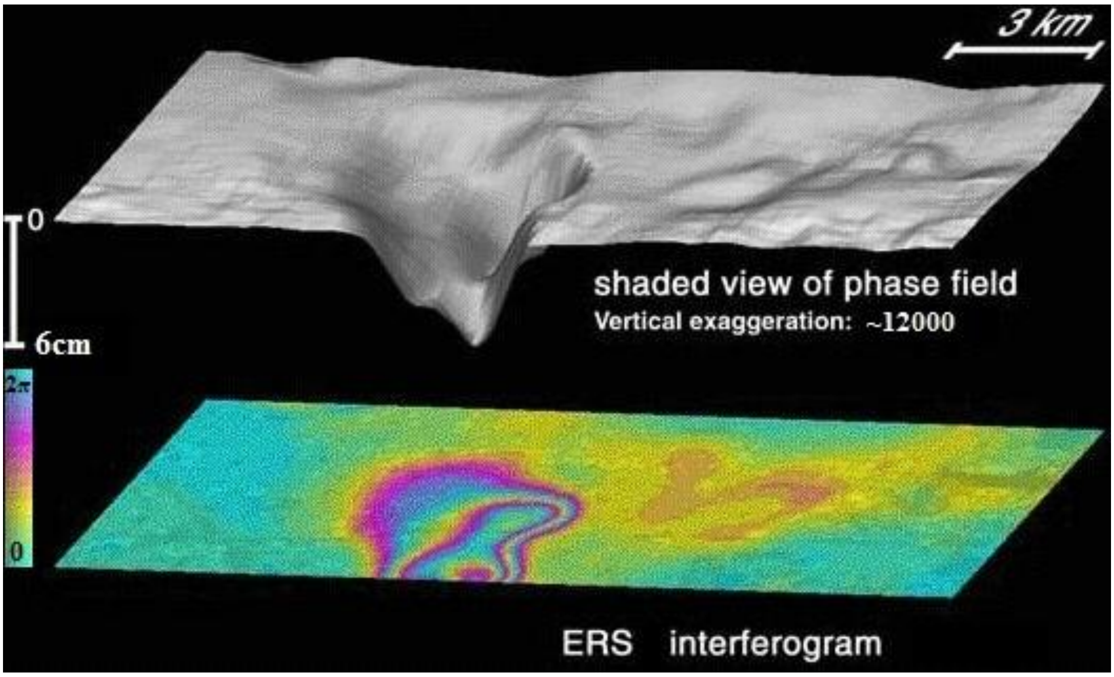
Φ_{Atm}, αναφέρεται στη διαφορά φάσης που προκύπτει από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Ανάλογα με τον σκοπό της εκάστοτε μελέτης, μπορεί να χρειάζεται η απομόνωση ενός συγκεκριμένου παράγοντα. Μελέτες που αποσκοπούν σε υψομετρικές πληροφορίες απομονώνουν τον παράγοντα της τοπογραφίας. Αντίστοιχα οι κλιματολογικές μελέτες αφορούν σε μελέτη του παράγοντα της ατμόσφαιρας Φ_{Atm}. Στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους παράγοντες της σχέσης 3.2 καθώς είναι απαραίτητοι στην κατανόηση της τεχνικής και της ερμηνείας συμβολογραφημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τους τρείς βασικούς παράγοντες της εδαφικής παραμόρφωσης, της τοπογραφίας και της ατμόσφαιρας, η μετρούμενη φάση επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που έχουν μικρότερη σημασία και θα αναφερθούν συνοπτικά στο κεφάλαιο 3.3.4.

3.3 Παράγοντες συμβολής Φάσης

3.3.1 Εδαφική Παραμόρφωση

Μεταξύ δύο λήψεων SAR, το έδαφος αναμένεται να έχει μετακινηθεί ανάλογα με την χρονική τους διαφορά και τα διάφορα Γεωτεκτονικά φαινόμενα που πραγματοποιήθηκαν. Κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από διαφορετικές κινήσεις σε βάθος χρόνου, αν και κάποιο έντονο φαινόμενο όπως ένας σεισμός, μπορεί να παραμορφώσει το έδαφος αρκετά ώστε να υπάρξουν σημαντικές μετατοπίσεις των στόχων του εδάφους και σε μικρό χρονικό διάστημα, δηλαδή λίγο πριν και αμέσως μετά την εκδήλωση του φαινομένου.



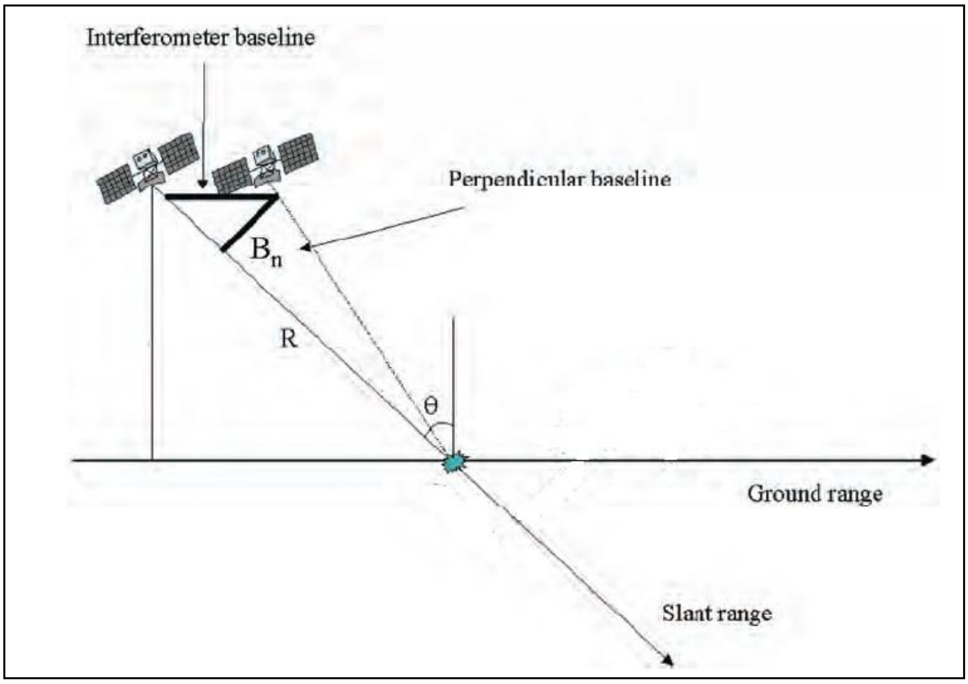
Εικόνα 3.2 Σχέση μεταξύ εδαφικής παραμόρφωσης και συμβολογραφήματος. (ESA, τροποποιημένο)

Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό παράδειγμα καθίζησης μίας περιοχής. Στο πάνω μέρος της εικόνας απεικονίζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο της εδαφικής παραμόρφωσης (με κάθετη υπερβολή κατά περίπου 12000 φορές). Η καθίζηση είναι της τάξης των 6 εκατοστών στην περιοχή και γίνεται αντιληπτή στο αντίστοιχο σημείο του συμβολογραφήματος (κάτω εικόνα) μέσω της διαδοχής χρωμάτων τα οποία ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο χρωματικό κύκλο (παλέτα χρωμάτων). Η επιλογή της παλέτας χρωμάτων για την ερμηνεία, είναι θέμα υποκειμενικό. Η διαδοχή ολόκληρου του χρωματικού κύκλου από ένα σημείο σε ένα άλλο, δηλαδή ένας συμβολομετρικός κροσσός, αντιπροσωπεύει μετατόπιση ίση με το μισό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, δηλαδή ίση με λ/2. Στην περίπτωση των ERS/ENVISAT το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι 5,6 cm οπότε η εδαφική μετατόπιση που εκφράζει ένας πλήρης κροσσός (πλήρης χρωματικός κύκλος) στο συμβολογράφημα είναι ίση με λ/2=2,8 cm. Για παράδειγμα στην εικόνα 3.4 από την άκρη του φαινομένου καθίζησης, έως το κέντρο εναλλάσσονται (από μωβ σε μωβ χρώμα) 2 κροσσοί περίπου που αντιστοιχών σε 5.6 εκατοστά. Όταν η τιμή της φάσης αυξάνεται κατά την διεύθυνση της νοητής γραμμής που συνδέει ένα σημείο σε ένα άλλο, σημαίνει το ότι δεύτερο σημείο απομακρύνεται από το Radar σε σχέση με το πρώτο σημείο, στην διεύθυνση παρατήρησης του Radar.

Οι μετατοπίσεις που καταγράφονται μεταξύ αρχικής και τελικής λήψης (στην διεύθυνση παρατήρησης) είναι πάντα σχετικές κινήσεις μεταξύ σημείων στην περιοχή μελέτης. Για την αναγωγή τους σε απόλυτη μετατόπιση σε σχέση με κάποιο σύστημα αναφοράς, χρειάζεται η επιλογή σημείου με γνωστές συντεταγμένες και γνωστή σχετική κίνηση ως προς το σύστημα αναφοράς αυτό.

3.3.2 Τοπογραφία

Η γεωμετρία στο χώρο μεταξύ των δύο δορυφορικών λήψεων μπορεί να δώσει ένα στερεοσκοπικό αποτέλεσμα, το οποίο έχει ως συνέπεια την παρουσία της τοπογραφίας στο συμβολογράφημα με μορφή κροσσών που μοιάζουν με ισοϋψείς καμπύλες (εικόνα 3.3). Η απόσταση που δημιουργεί το στερεοσκοπικό αποτέλεσμα δεν είναι η νοητή γραμμή μεταξύ των δύο θέσεων λήψης αλλά το κάθετο άνυσμα αυτής ως προς την κεκλιμένη απόσταση (Perpendicular Baseline, B_n) μεταξύ των δύο λήψεων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.



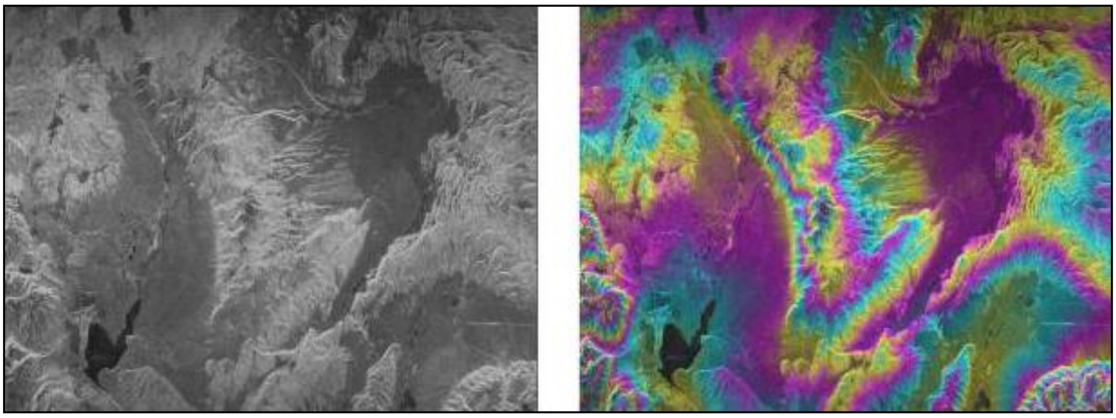
Σχήμα 3.5 Κάθετο άνυσμα τροχιάς των δύο λήψεων (Perpendicular Baseline) (ESA, 2007)

- **B_n**, Perpendicular Baseline
- **R**, Η απόσταση μεταξύ radar και στόχου
- **θ**, Η γωνία λήψης (συνήθως μεταξύ 20^o και 50^o)

Από τους παραπάνω παράγοντες προκύπτει ένα μέγεθος πολύ σημαντικό για την συμβολομετρία Radar. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται Ύψος Αμφισημίας (Altitude of Ambiguity) $\mathbf{h_a}$, και υπολογίζεται από την σχέση 3.3

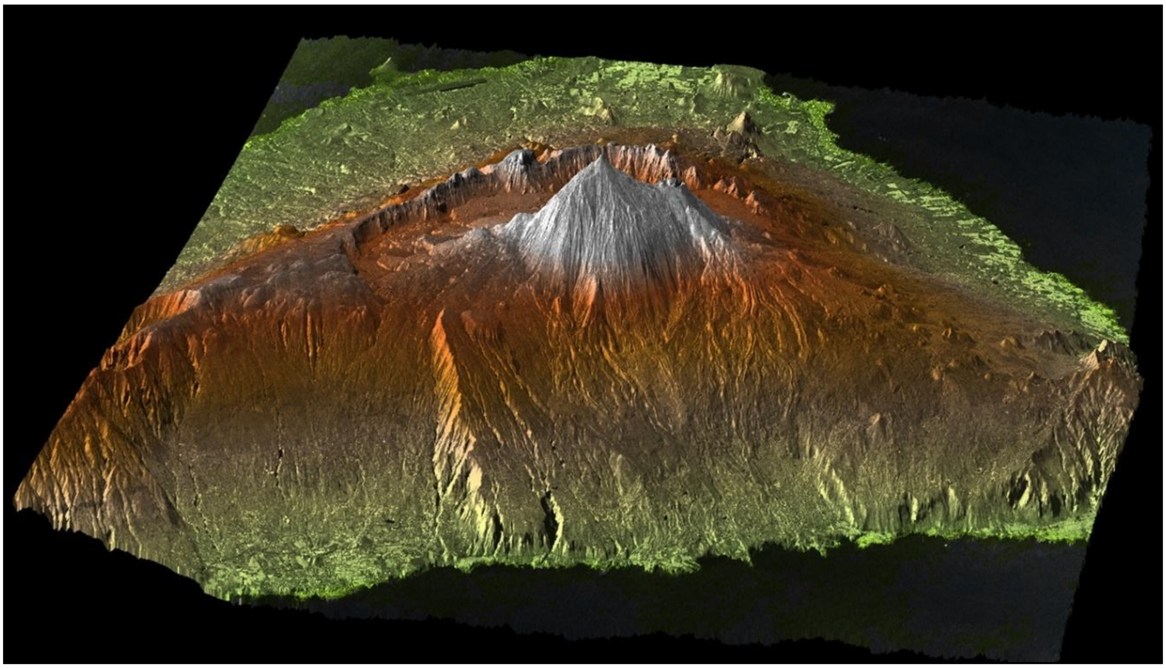
$$\boxed{h_a = \frac{\lambda R \sin\theta}{2B_n}}$$ Σχέση 3.3

Το μέγεθος αυτό είναι αντίστροφος ανάλογο με το $\mathbf{B_n}$ και εκφράζει άμεσα την επίδραση της τοπογραφίας της περιοχής στο συμβολογράφημα. Για παράδειγμα αν έχουμε ένα ζευγάρι με ύψος αμφισημίας 50 μέτρα, αλλά οι υψομετρικές διαφορές στην περιοχή φτάνουν τα 200 μέτρα, θα παρουσιαστεί η τοπογραφία στο συμβολογράφημα με μορφή κροσσών που μοιάζουν με ισοϋψείς καμπύλες, σχηματίζοντας έναν κροσσό για κάθε 50 μέτρα υψομετρικής διαφοράς. Αντίστοιχα, αν το ύψος αμφισημίας για την ίδια περιοχή είναι της τάξης των 300 μέτρων, μεγαλύτερο δηλαδή από το μέγιστο υψόμετρο που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης, δεν θα υπάρχει καμία επίδραση της τοπογραφίας.



Εικόνα 3.3 Η αριστερή εικόνα, είναι εικόνα Radar με τις φωτεινές περιοχές να αντιστοιχούν σε βραχώδεις ορεινές περιοχές, και τις σκοτεινές σε σχετικά επίπεδες εκτάσεις. Δεξιά φαίνεται συμβολογράφημα της ίδιας ακριβώς εικόνας, με εμφανή την επιρροή της τοπογραφίας, την οποία ακολουθούν οι συμβολομετρικοί κροσσοί (http://photojournal.jpl.nasa.gov/).

Σπάνια το ύψος αμφισημίας είναι μεγαλύτερο από την μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά σε μία περιοχή. Προκειμένου να απαλειφτεί ο παράγοντας της τοπογραφίας απαιτείται η χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους με καλή υψομετρική ακρίβεια. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, DEM (Digital Elevation Model), είναι μία ψηφιακή μορφή του υψομετρικού ανάγλυφου μίας περιοχής (εικόνα 3.4). Η απαιτούμενη ακρίβεια του DEM καθορίζεται από το ύψος αμφισημίας. Μεγαλύτερες τιμές στο ύψος αμφισημίας απαιτούν μικρότερη υψομετρική ακρίβεια. Για παράδειγμα αν η υψομετρική ακρίβεια του DEM είναι της τάξης των 100m, θα πρέπει το ύψος αμφισημίας του συμβολογραφήματος να είναι μεγαλύτερο από 100m.



Εικόνα 3.4 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από την αποστολή TanDEM-X του δορυφόρου TerraSAR-X, με χρήση TanDEM ζευγαριών. Στόχος της αποστολής η δημιουργία ενός ομογενούς DEM όλης της Γης μέσα στο 2014 (http://www.terrasar.de/)

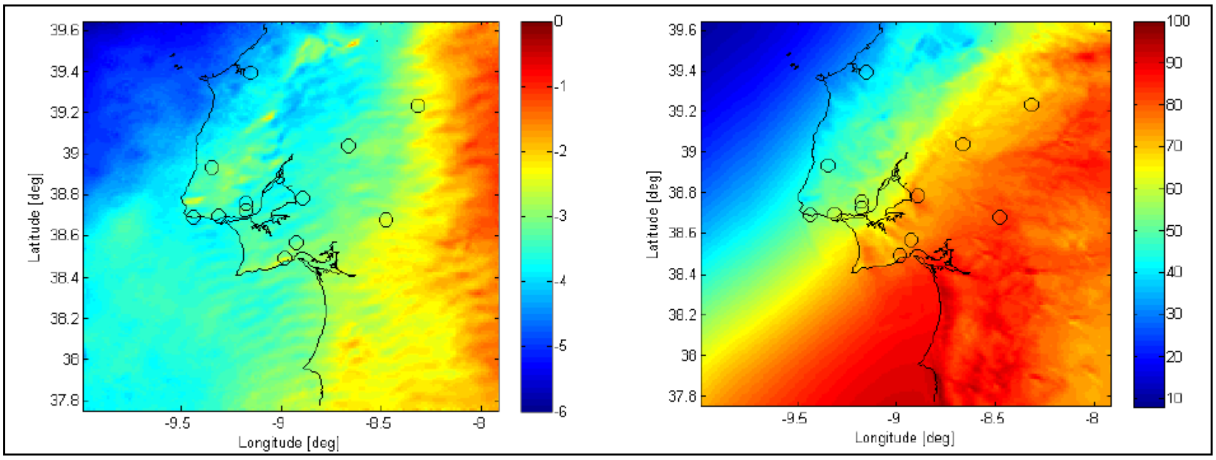
3.3.3 Ατμόσφαιρα

Η συμβολή της ατμόσφαιρας στην μετρούμενη φάση είναι δύσκολος και περίπλοκος παράγοντας τόσο στον εντοπισμό και όσο και στην απαλοιφή του. Μεταξύ δύο λήψεων SAR η κατάσταση της ατμόσφαιρας για κάθε σημείο στην περιοχή μελέτης μπορεί να διαφέρει από λίγο έως πολύ με αποτέλεσμα να επηρεάζεται διαφορετικά η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Η μεταβολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα να συμβάλει η ατμόσφαιρα στην μετρούμενη φάση με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μία από τις λήψεις SAR.

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ατμοσφαιρική επίδραση είναι οι εξής:

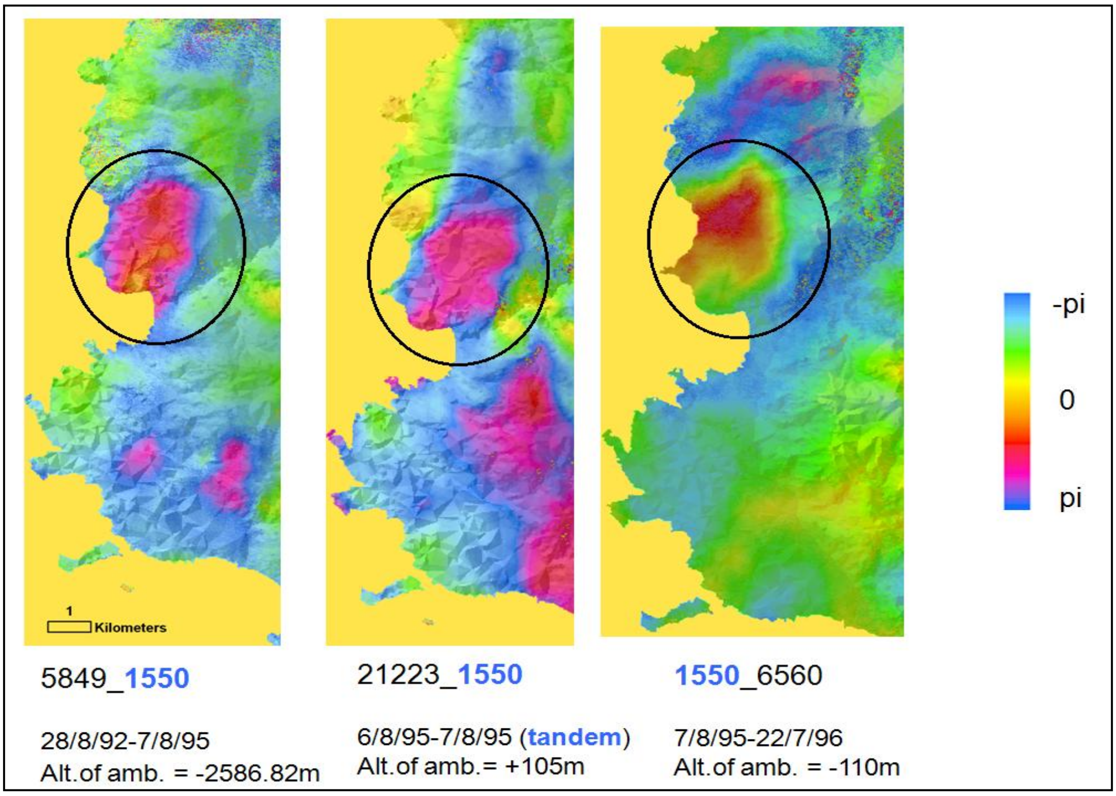
- Υγρασία
- Θερμοκρασία
- Πίεση
- Πυκνότητα ηλεκτρονίων (Κυρίως στην Ιονόσφαιρα)
- Καιρικές συνθήκες (συννεφιά, άνεμος, χιονοθύελλα κ.α.)

Ο προσδιορισμός και η ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στην συμβολομετρία radar, εξακολουθεί να απασχολεί έντονα το επιστημονικό κοινό. Τα ποιο συχνά μέσα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό και την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, είναι η χρήση ραδιομέτρων και η ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων από σταθμούς GPS ή μετεωρολογικά μοντέλα (πχ Weather Research and Forecasting – WRF model, εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5 Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται χρονική καθυστέρηση στο σήμα από την υδροστατική συνιστώσα της τροπόσφαιρας και δεξιά από την υγρασία. Τα δεδομένα είναι μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting) (Mateus, 2009).

Για τον εντοπισμό και την απομόνωση εικόνων με έντονες ατμοσφαιρικές επιδράσεις, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η τεχνική Pair-Wise Logic (Massonet and Feigl, 1995). Όταν συνδυαστεί μία τέτοια εικόνα με άλλες, τότε οι κροσσοί λόγω ατμόσφαιρας θα εμφανίζονται πάντα στην ίδια θέση. Συνεπώς έτσι μπορούν να αποκλεισθούν από την επεξεργασία εικόνες με έντονη την επίδραση της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 3.6 Έντονο ατμοσφαιρικό φαινόμενο στην κυκλωμένη περιοχή για την λήψη 1550 (GeoMatLab, TUC)

Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα. Συνδυάζοντας την εικόνα 1550 με τρείς διαφορετικές εικόνες, προέκυψε ένας κροσσός συμβολής σε μία συγκεκριμένη περιοχή και στα τρία συμβολογραφήματα, παρόλο που τα συμβολογραφήματα αυτά αφορούσαν διαφορετικές χρονικές περιόδους. Το αριστερό συμβολογράφημα υποδεικνύει πως ο κροσσός οφείλεται στην επίδραση της τοπογραφίας καθώς το συγκεκριμένο ζευγάρι έχει πολύ μεγάλο ύψος αμφισημίας. Έτσι γίνεται κατανοητό πως η συγκεκριμένη λήψη 1550 πρέπει να αποκλεισθεί από την επεξεργασία.

3.3.4 Άλλοι παράγοντες

Εκτός των τριών βασικών παραγόντων συμβολής, άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το συμβολογράφημα είναι:

Εξοπλισμός: Το Radar που παράγει την ακτινοβολία και καθορίζει το μήκος κύματος, μπορεί να λειτουργήσει με σταθερό τρόπο μόνο για μερικά δευτερόλεπτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τις δύο λήψεις να διαφέρει κατά ελάχιστα, παράγοντας παλμούς. Οι παλμοί αυτοί παρουσιάζονται ως κροσσοί συμβολής που είναι κάθετοι προς την τροχιά του Radar, ωστόσο διορθώνονται κατά την επεξεργασία.

Απόκλιση τροχιών: Ο δορυφόρος δεν περνά σχεδόν ποτέ από το ίδιο σημείο. Συνεπώς όταν οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο τροχιών είναι κατά πολύ μεγαλύτερες του μήκους κύματος, δημιουργούν έναν αριθμό από «τροχιακούς» κροσσούς συμβολής. Οι τροχιές είναι συνήθως γνωστές με μεγάλη ακρίβεια (Precise Orbits) σε αρχεία που είναι διαθέσιμα από διάφορες πηγές. Έτσι χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν πιο ακριβείς τροχιές, οι «τροχιακοί» κροσσοί αφαιρούνται από το συμβολογράφημα.

Ραδιοηλεκτρικά χαρακτηριστικά επιφάνειας: Η μεταβολή των Ραδιοηλεκτρικών χαρακτηριστικών σε σημεία της επιφάνειας μεταξύ των δύο λήψεων, μπορεί να δημιουργήσει θόρυβο στο συμβολογράφημα. Οι παράγοντες μεταβολής των ραδιοηλεκτρικών χαρακτηριστικών είναι είτε ανθρωπογενείς είτε από μεταβολή της υγρασίας στο έδαφος που υπεισέρχεται στην ατμόσφαιρα (Κεφ. 3.3.3).

Κεφάλαιο 4

Επεξεργασία

4.1 Δεδομένα

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 17 εικόνες EnviSat-ASAR. Οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων αυτών παραθέτονται στον πίνακα 4.1:

Εικόνα	Τροχιά (Orbit)	Ημερομηνία λήψεως
1	10267	16/2/2004
2	11770	31/5/2004
3	12771	5/7/2004
4	13273	13/9/2004
5	13774	18/10/2004
6	14776	27/12/2004
7	15277	31/1/2005
8	16279	11/4/2005
9	16780	16/5/2005
10	17782	25/7/2005
11	18283	29/8/2005
12	19285	7/11/2005
13	20788	20/2/2006
14	25297	1/1/2007
15	25789	5/2/2007
16	31309	25/2/2008
17	31810	31/3/2008

Πίνακας 4.1 Ημερομηνίες λήψης εικόνων

Το πλήθος αυτό των διαθέσιμων εικόνων δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ενός πλήθους συμβολογραφημάτων. Ωστόσο δεν είναι όλα τα ζεύγη κατάλληλα για συμβολομετρία. Επειδή η περιοχή μελέτης καλύπτει μεγάλο τμήμα της Δυτικής Κρήτης, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλες υψομετρικές μεταβολές, το ύψος αμφισημίας πρέπει να είναι μεγάλο. Ενδεικτικά για να μην συμβάλει καθόλου ο παράγοντας της τοπογραφίας θα πρέπει το ύψος αμφισημίας να είναι μεγαλύτερο από την μέγιστη υψομετρική διαφορά στην περιοχή, δηλαδή μεγαλύτερη από 2400 μέτρα. Ωστόσο κάτι τέτοιο σπάνια είναι εφικτό. Το ελάχιστο απαιτούμενο ύψος αμφισημίας ορίστηκε στα 100m, όση δηλαδή ήταν η υψομετρική ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς υπολογίστηκαν οι τιμές του ύψους αμφισημίας που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Τροχιακά Εικόνων	Περίοδος Λήψης	Διάρκεια σε Ημέρες	Ύψος Αμφισημίας (μέτρα)
10267-12271	16/2/2004-5/7/2004	141	209
11770-17782	31/5/2004-25/7/2005	421	11735
13273-13774	13/9/2004-18/10/2004	36	235
13273-18283	13/9/2004-29/8/2005	351	112
13273-19285	13/9/2004-7/11/2005	421	317
13774-18283	18/10/2004-29/8/2005	316	214
13774-19285	18/10/2004-7/11/2005	386	908
14776-16279	27/12/2004-11/4/2005	106	7768
16780-25297	16/5/2005-1/1/2007	596	182
18283-19285	29/8/2005-7/11/2005	71	173
20788-25798	20/2/2006-5/2/2007	351	422

Πίνακας 4.2 Επιλεγμένα ζεύγη με το αντίστοιχο ύψος αμφισημίας.

Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό DIAPASON (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature). Μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στο ζεύγος 11770-17782, καθώς χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο ύψος αμφισημίας (11735 μέτρα) και διάστημα ημερών (421 ημέρες) αρκετά ικανοποιητικό ώστε να αναδειχτούν εδαφικές μετατοπίσεις στο συμβολογράφημα.

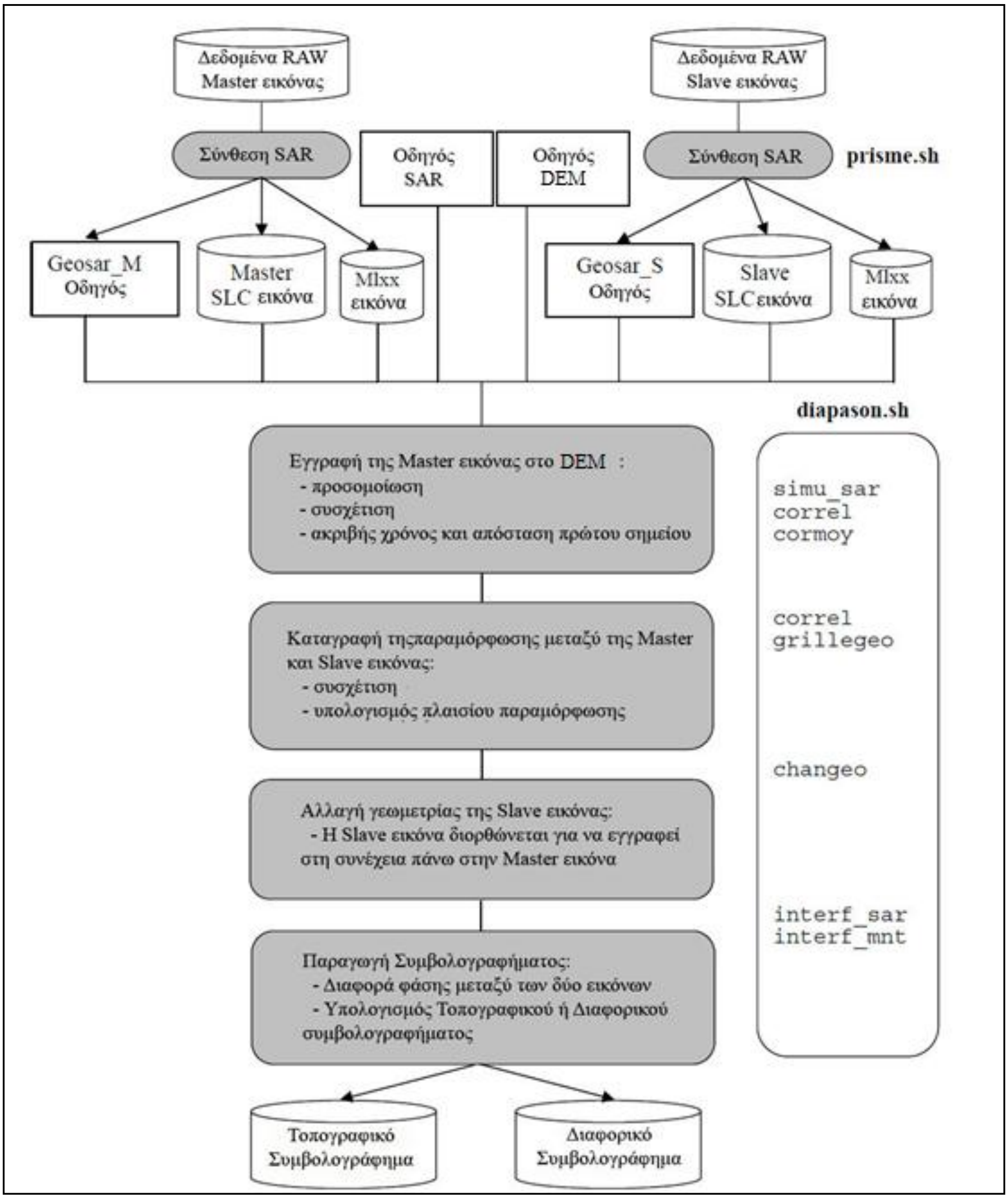
4.2 Μεθοδολογία

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί τόσο η επεξεργασία όσο και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτείται η χρήση κατάλληλων λογισμικών. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα DIAPASON (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature), για την παραγωγή συμβολογραφημάτων και το πρόγραμμα ENVI για την βελτιωμένη οπτικοποίηση των συμβολογραφημάτων.

4.2.1 DIAPASON

Το λογισμικό DIAPASON είναι προϊόν της πολυεθνικής εταιρίας Altamira, του οργανισμού CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Ως λογισμικό χαρακτηρίζεται από την βελτιστοποιημένη διαδικασία παραγωγής και επεξεργασίας συμβολογραφημάτων. Οι εικόνες που επεξεργάζεται είναι των δορυφόρων ERS1/2, RADARSAT, ENVISAT, ALOS, TerraSarX και JERS και είναι τύπου RAW ή SLC. Οι εικόνες τύπου RAW περιλαμβάνουν τα πρωτογενή δεδομένα του Radar. Η επεξεργασία τους οδηγεί στην δημιουργία εικόνων τύπου SLC (Single Look Complex), οι οποίες είναι εικόνες καλύτερης χωρικής ανάλυσης. Η μετατροπή των SAR εικόνων από RAW σε SLC ονομάζεται focusing και γίνεται μέσα στο DIAPASON. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, οι εικόνες ήταν εξαρχής SLC.

Οι επιμέρους αλγόριθμοι του DIAPASON για την παραγωγή συμβολογραφημάτων συνοψίζονται στο σχήμα 4.1 και θα αναλυθούν στην συνέχεια.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής λειτουργιών DIAPASON.
(Diapason User's Manual, μεταφρασμένο)

Η δημιουργία του συμβολογραφήματος υλοποιείται σε τρία στάδια:

1. Εισαγωγή Δεδομένων (Data Ingestion)
2. Μετατροπή δεδομένων RAW σε SLC (SAR focusing)
3. Επεξεργασία InSAR (InSAR processing)

Κατά το πρώτο στάδιο πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες διαδικασίες εξαγωγής των δεδομένων του SAR σε αρχεία συμβατά με το λογισμικό DIAPASON. Ενδεικτικά, δεδομένα που εξάγονται στα αρχεία που δημιουργεί το DIAPASON είναι ο αριθμός γραμμών και στηλών της SAR εικόνας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, η ακριβής ώρα λήψης, η τροχιά, καθώς και η μέση τιμή Doppler της εικόνας. Οι τιμές που εξάγονται για την κάθε εικόνα κατά το στάδιο αυτό συγκεντρώνονται σε ένα αρχείο τύπου .geosar (ASC II αρχείο).

Όπως προαναφέρθηκε, το δεύτερο στάδιο (SAR focusing) πραγματοποιεί την μετατροπή των RAW εικόνων σε SLC χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PRISME. Στην εργασία αυτή οι εικόνες ήταν είδη SLC.

Το τρίτο στάδιο (InSAR processing) αναλύεται σε επιμέρους βήματα:

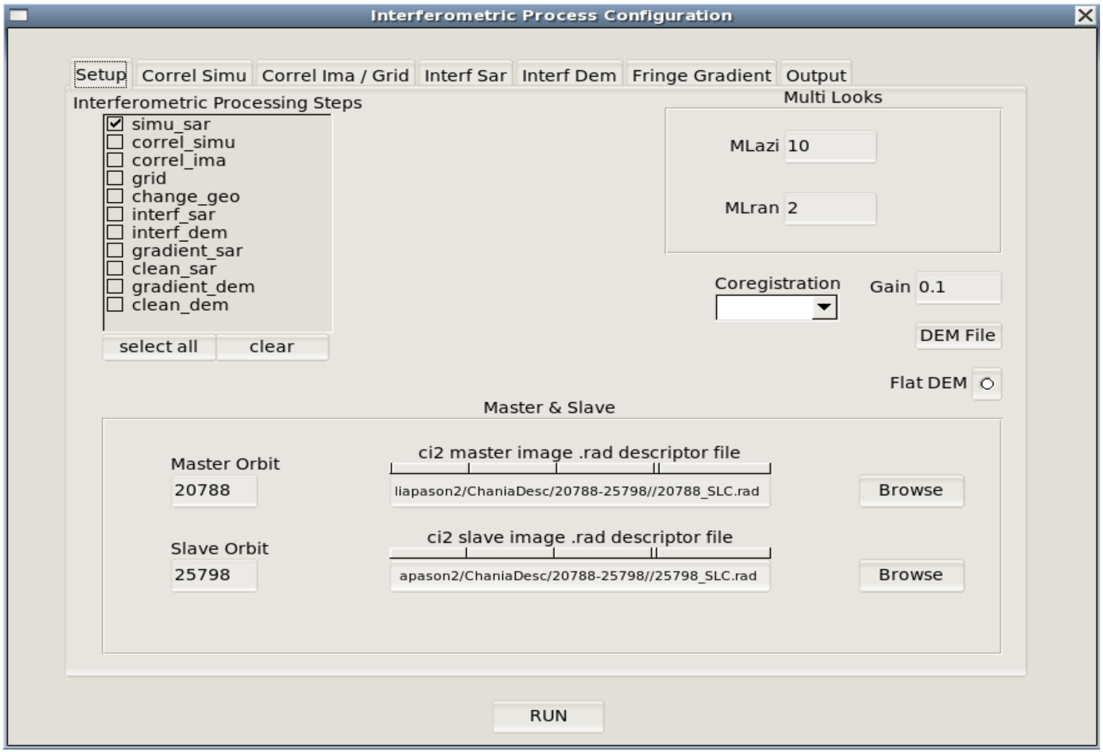
Α) Προσομοίωση (Simulation)

Για την δημιουργία ενός διαφορικού συμβολογραφήματος απαιτείται η χρήση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM). Το DEM μπορεί να είναι είτε πραγματικό (Real DEM), είτε τεχνητό και να αφορά σε μία σταθερή (τυχαία) τιμή υψομέτρου πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς (Flat DEM). Όταν η επεξεργασία αποσκοπεί στην εξάλειψη της τοπογραφίας από το συμβολογράφημα απαιτείται πραγματικό DEM με όσον το δυνατόν καλύτερη υψομετρική ακρίβεια. Χρησιμοποιώντας την γεωμετρία του Radar της αρχικής εικόνας (Master), κατασκευάζει μια τεχνητή (simulated) εικόνα αξιοποιώντας τις πληροφορίες υψομετρίας του DEM.

Β) Εγγραφή (Coregistration)

Στην συνέχεια ορίζονται οι ακριβείς τροχιές των λήψεων των εικόνων. Αυτές προκύπτουν από ακριβή δεδομένα τροχιάς (Precise Orbits). Πραγματοποιείται η εγγραφή της Master εικόνας με την Simulated (που προέκυψε στο προηγούμενο στάδιο) και μετέπειτα της Master με την Slave (τελική εικόνα), αξιοποιώντας την ακριβή θέση του δορυφόρου (precise range) κατά την λήψη των εικόνων (precise time). Η εγγραφή αυτή αποτελεί ουσιαστικά ταύτιση της γεωμετρίας των δύο εικόνων SAR, με στόχο να γίνει αντιστοίχιση των εικονοστοιχείων για την αφαίρεση των τιμών φάσης τους.

Γ) Δημιουργία Συμβολογραφήματος



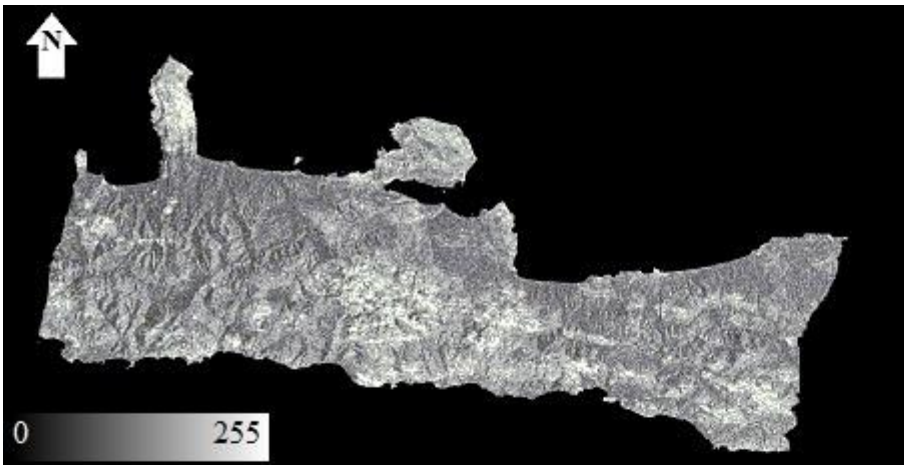
Εικόνα 4.1 Κονσόλα παραγωγής συμβολογραφημάτων (Interferometric Process Configuration)

Ακολουθεί ο υπολογισμός των διαφορών φάσης μεταξύ των εικόνων master και slave, για κάθε εικονοστοιχείο. Τα βασικά προϊόντα της επεξεργασίας είναι:

- Το αρχείο εντάσεων (amplitude file) το οποίο περιλαμβάνει τιμές έντασης. Οι τιμές έντασης εκφράζουν το μέγεθος της επιστροφής της ακτινοβολίας από τους στόχους στο Radar. Οι φωτεινές περιοχές αφορούν σε έντονες επιστροφές σήματος, ενώ οι σκοτεινές σε μικρές επιστροφές.

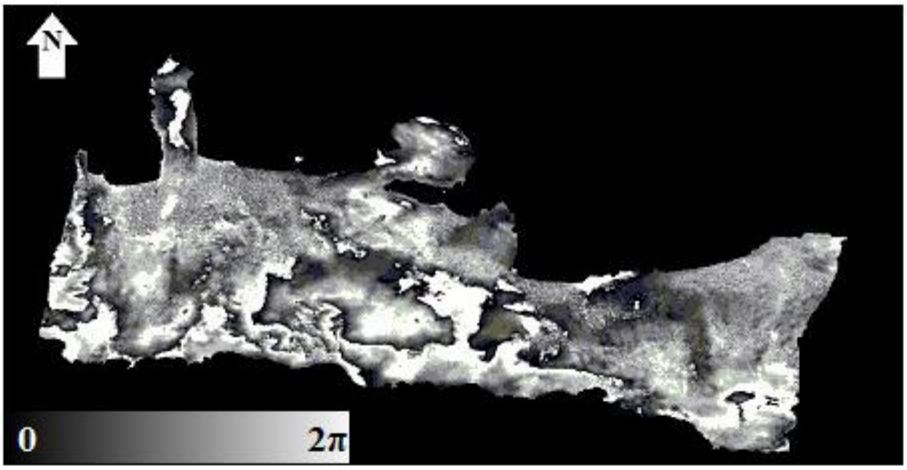
Εικόνα 4.2 Απεικόνιση αρχείου τιμών Έντασης (Amplitude file)

- Το αρχείο συνοχής (coherence file) το οποίο περιλαμβάνει τιμές συσχέτισης. Οι φωτεινές τιμές μεταφράζονται σε μεγάλη συσχέτιση. Αυτό σημαίνει πως οι στόχοι έχουν διατηρήσει τις ιδιότητές τους μεταξύ των δύο λήψεων. Αντίστοιχα οι σκοτεινές περιοχές εκφράζουν αποσυσχέτιση, δηλαδή οι ιδιότητες των στόχων έχουν μεταβληθεί μεταξύ των δύο λήψεων.



Εικόνα 4.3 Απεικόνιση αρχείου τιμών Συσχέτισης (Coherence file)

- Το αρχείο στο οποίο απεικονίζονται οι διαφορές φάσης ανάμεσα στα εικονοστοιχεία των δύο εικόνων SAR (phase file).



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση αρχείου τιμών διαφοράς Φάσης (Phase file)

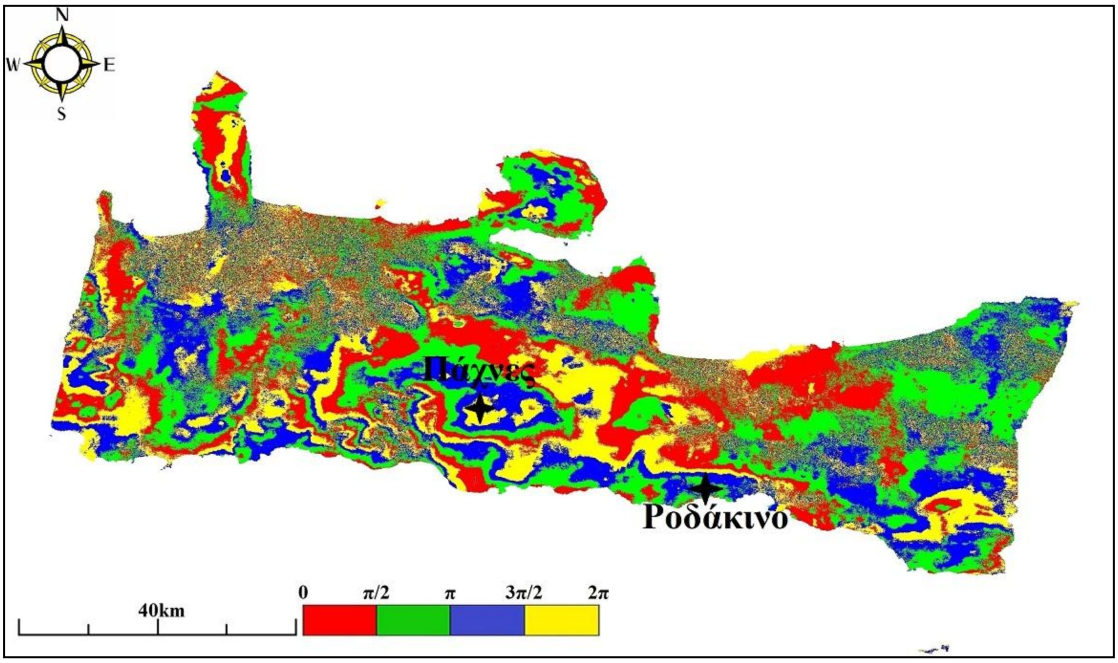
Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Επεξεργασίας

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν περιγράφονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα τις επεξεργασίας. Μελετήθηκαν και τα 11 συμβολογραφήματα του πίνακα 4.2. Ωστόσο δεν κρίθηκαν όλα τα ζευγάρια κατάλληλα για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Τα περισσότερα χαρακτηρίζονταν από έντονη αποσυσχέτιση μεταξύ των δύο λήψεων master και slave, καθιστώντας την εξαγωγή συμπερασμάτων αδύνατη (Παράρτημα Ι).

Τα συμβολογραφήματα που θα ερμηνευτούν στο πρώτο υποκεφάλαιο είναι τα 11770-17782 και 14776-16279. Στην συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική του αθροιστικού συμβολογραφήματος που αποτελείται από τα επιμέρους συμβολογραφήματα 13273-13774, 13774-18283 και 18283-19285 καθώς και η τεχνική της αποκατάστασης φάσης (phase unwraping) στην περίπτωση του συμβολογραφήματος 11770-17782. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την τεχνική της συμβολομετρίας με τα δεδομένα από τους σταθμούς GPS.

5.1 Συμβολογραφήματα 11770-17782 και 14776-16792



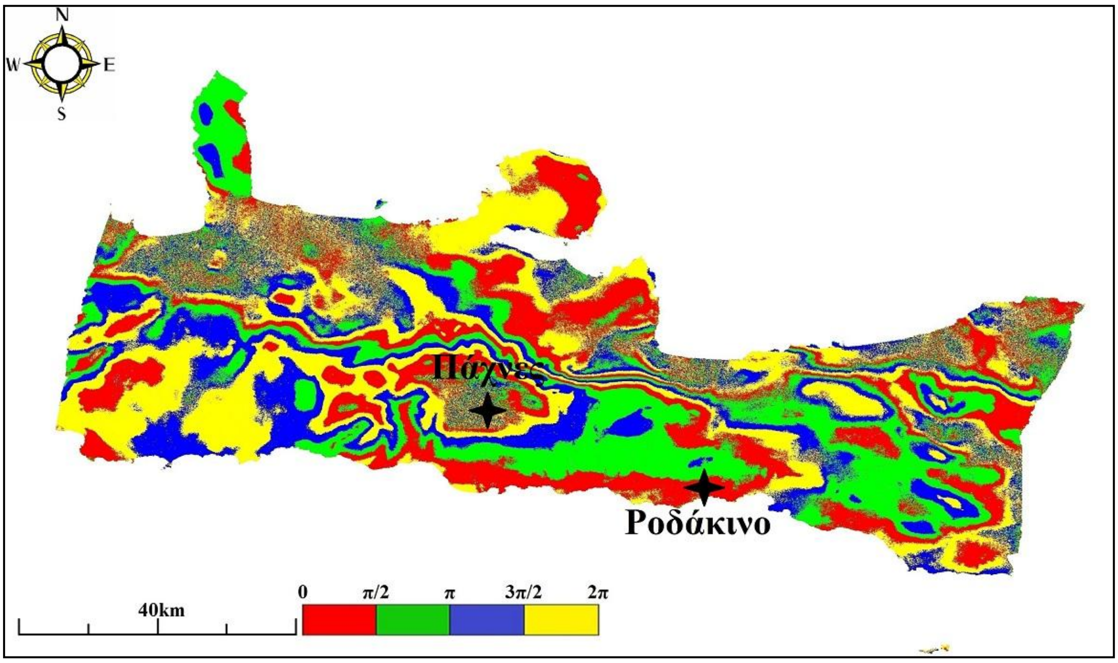
Εικόνα 5.1. Συμβολογράφημα 11770-17782

Το συμβολογράφημα 11770-17782 αφορά στην περίοδο μεταξύ 31 Μαιου 2004 και 25 Ιουλίου 2005. Ο λόγος της επιλογής του είναι το μεγάλο ύψος αμφησημίας που υπολογίσθηκε στα 11735m. Το μέγεθος αυτό θεωρητικά οδηγεί στην απαλοιφή της επίδρασης της έντονης τοπογραφίας στην περιοχή. Επιπλέον, το μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων (421 ημέρες) επιτρέπει την ανάδειξη εδαφικών παραμορφώσεων στην περιοχή.

Στην εικόνα 5.1 παρατηρείται ότι, μεταξύ Ροδακίνου και Πάχνεων, εναλλάσονται συνολικά 6 χρώματα. Παρατηρώντας την διαδοχή των χρωμάτων από το Ροδάκινο στις Πάχνες παρατηρείται ότι οι τιμές φάσης αυξάνουν προς τις Πάχνες. Αυτό σημαίνει πώς οι Πάχνες απομακρύνονται από το Ραντάρ σε σχέση με το Ροδάκινο, στην διεύθυνση παρατήρησης. Η απομάκρυνση αυτή είναι της τάξης των 4,2 cm για το χρονικό διάστημα των 421 ημερών (6*0,7 cm). Συνεπώς σε διάστημα ενός έτους, η σχετική τους μετατόπιση είναι 3,6 cm στην διεύθηνση παρατήρησης του δορυφόρου.

Επειδή οι οριζόντιες κινήσεις της Κρήτης χαρακτηρίζονται από σχετική ομοιογένεια, αναμένεται η σχετική μετατόπιση αυτή να αφορά κυρίως στην κατακόρυφη συνιστώσα.

Το μέγεθος της σχετικής μετατόπισης μεταξύ των δύο σημείων είναι αρκετά μεγάλο για να οφείλεται αποκλειστικά σε εδαφική παραμόρφωση. Οπότε είναι πολύ πιθανή η επίδραση της ατμόσφαιρας. Δεν υπάρχει δυνατότητα διάκρισης της επίδρασης αυτής στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 5.2. Συμβολογράφημα 14776-16279

Ομοίως το συμβολογράφημα 14776-16279 (εικόνα 5.2) χαρακτηρίζεται από μεγάλο ύψος αμφισημίας (7768μ). Οπότε θεωρητικά δεν αναμένεται επίδραση της τοπογραφίας της περιοχής στο συμβολογράφημα. Το διάστημα μεταξύ των λήψεων των εικόνων είναι 106 ημέρες. Είναι εμφανές ότι η πυκνότητα των κροσσών είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το συμβολογράφημα 11770-17782, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο μικρό σχετικά διάστημα των 106 ημερών. Ωστόσο υπάρχει έντονη αποσυσχέτιση στην βουνοκορφή των Λευκών Όρων. Αυτό θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η πρώτη λήψη πραγματοποιήθηκε στις 27 Δεκεμβρίου ενώ η δεύτερη στις 11 Απριλίου. Συνεπώς κατά την πρώτη λήψη υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η βουνοκορφή να ήταν καλυμμένη με χιόνι ενώ στην δεύτερη όχι.

Κατά την νοητή γραμμή που συνδέει το Ροδάκινο και τις Πάχνες, εναλλάσσεται ένας πλήρης χρωματικός κύκλος, που αντιστοιχεί σε σχετική μετατόπιση 2,8 cm διάστημα 106 ημερών. Ή αλλιώς σε ετήσια σχετική μετατόπιση της τάξης των 9,6 εκατοστών. Η πολύ μεγάλη αυτή τιμή, λογικά οφείλεται σε έντονες ατμοσφαιρικές επιδράσεις, καθώς η μία λήψη πραγματοποιήθηκε κατά την χειμερινή περίοδο ενώ η άλλη την άνοιξη.

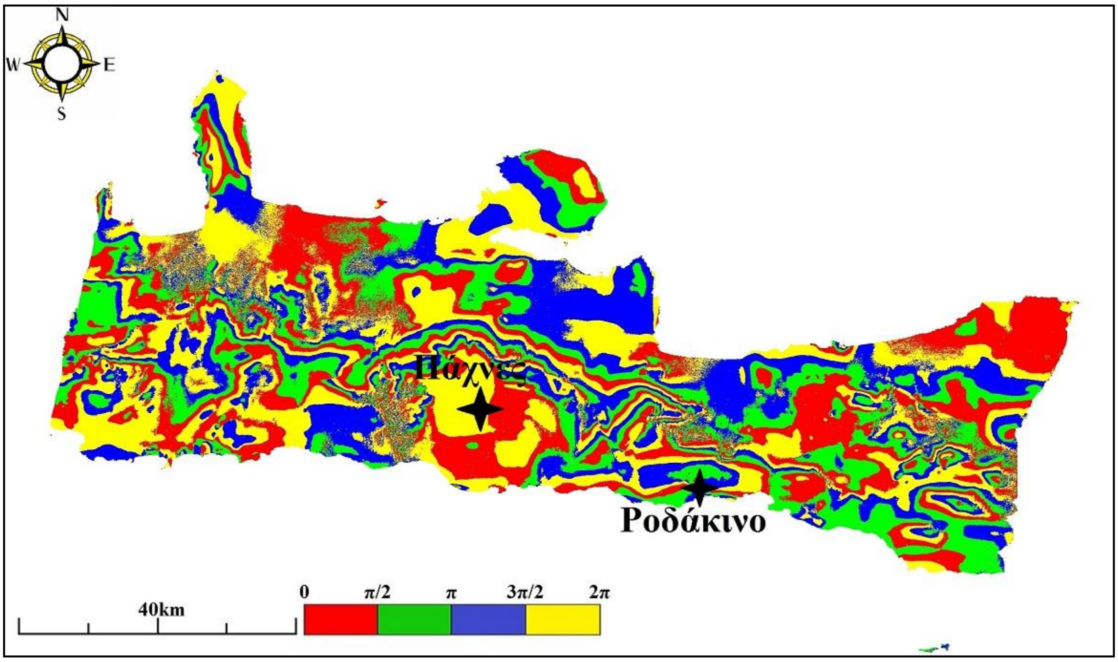
5.2 Αθροιστικό Συμβολογράφημα

Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιείται η μέθοδος του αθροιστικού συμβολογραφήματος (Stacking). Κατά την μέθοδο αυτή, συνδυάζεται ένας αριθμός συμβολογραφημάτων σε ένα αθροιστικό συμβολογράφημα (Sandwell, 2008). Το τελικό αθροιστικό συμβολογράφημα αφορά σε χρονικό διάστημα μεταξύ της λήψης της πρώτης master εικόνας του πρώτου ζεύγους εικόνων και της slave εικόνας του τελευταίου ζεύγους.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Απαλείφεται εντελώς η επίδραση της ατμόσφαιρας από τις ενδιάμεσες λήψεις.
- Τα αποτελέσματα αφορούν μεγαλύτερες χρονικές περιόδους από ότι ένα συμβολογράφημα, που για το ίδιο διάστημα θα χαρακτηριζόταν από έντονη αποσυσχέτιση.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα ζευγάρια 13273-13774, 13774-18283 και 18283-19285 (παρουσιάζονται στο παράρτημα). Τα τρία ζευγάρια που παράγουν το αθροιστικό συμβολογράφημα έχουν τα εξής υψόμετρα αμφισημίας: 235μ (13273-13774), 214μ (13774-18283), 173μ (18283-19285). Στην ορεινή ζώνη αναμένονται έντονες επιδράσεις της υψομετρίας. Μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας λήψης η χρονική διάρκεια είναι 421 ημέρες, αντίστοιχη δηλαδή με εκείνη στην περίπτωση του συμβολογραφήματος 11770-17782.



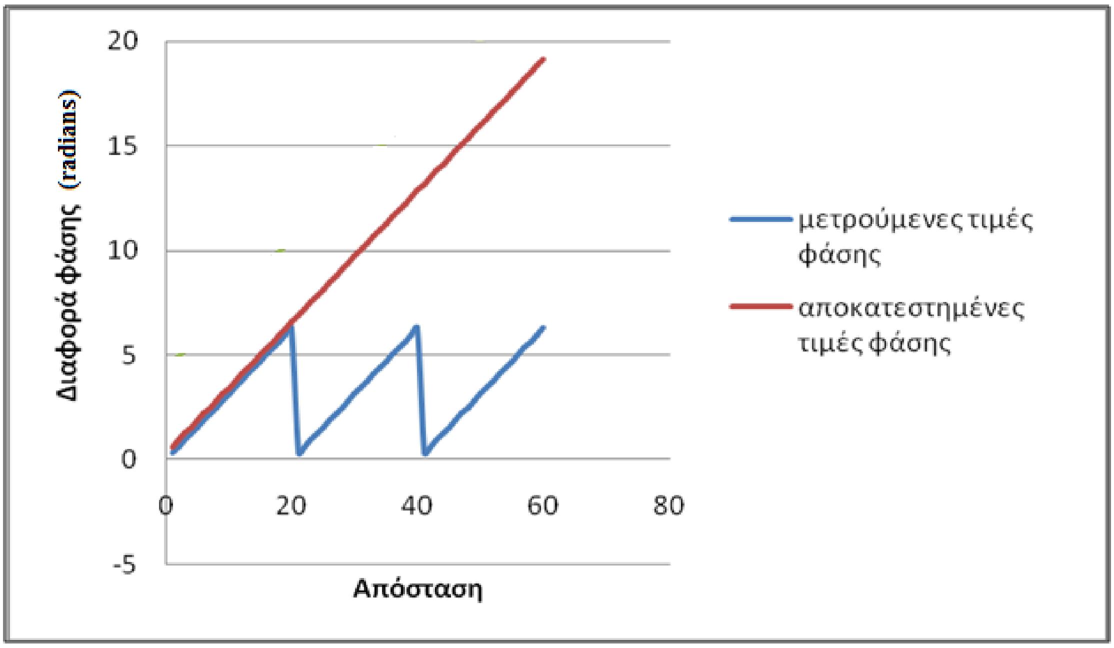
Εικόνα 5.3. Αθροιστικό συμβολογράφημα.

Στο αθροιστικό συμβολογράφημα (εικόνα 5.3) παρατηρείται η έντονη επίδραση της τοπογραφίας κυρίως βόρεια των Πάχνεων. Μεταξύ Ροδάκινου και Πάχνεων παρατηρείται μία πλήρης διαδοχή χρωμάτων του κύκλου (από πράσινο σε πράσινο) συν ένα με δύο χρώματα (κόκκινο – κίτρινο). Αυτό μεταφράζεται σε μία σχετική μετατόπιση των Πάχνεων σε σχέση με το Ροδάκινο κατά 3,5-4,2 cm σε διάστημα 421 ημερών. Ή αλλιώς σε ετήσια σχετική μετατόπιση της τάξης των 3-3,6 cm. Ωστόσο η μείωση των τιμών φάσης από το Ροδάκινο στις Πάχνες, μεταφράζεται σε απομάκρυνση του Ροδάκινου σε σχέση με τις πάχνες ως προς την στην διεύθυνση παρατήρησης του Radar. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ανάλογο με εκείνο του συμβολογραφήματος 11770-17782 όσων αφορά το μέγεθος της σχετικής μετατόπισης αλλά αντίθετο ως προς την διεύθυνση της σχετικής κίνησης.

Το ποιο πιθανό σενάριο στην περίπτωση αυτή είναι οι κροσσοί του αθροιστικού συμβολογραφήματος να αφορούν στην επίδραση της τοπογραφίας, καθώς τα υψόμετρα αμφισημίας κυμαίνονταν στα 200m ενώ στην περιοχή μελέτες υπήρχαν πολύ απότομες υψομετρικές διαφορές.

5.3 Αποκατάσταση Φάσης Συμβολογραφήματος (Phase Unwrapping)

Με την τεχνική της αποκατάστασης της φάσης του συμβολογραφήματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ακέραιων κύκλων των διαφορών φάσης. Οι αποκατεστημένες τιμές φάσης μπορούν στην συνέχεια να μετατραπούν σε σχετικές παραμορφώσεις εδάφους ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται (ESA TM-19, 2007).



Σχήμα 5.1 Αποκατάσταση Φάσης (Phase Unwrapping)

Σε ένα συμβολογράφημα πριν γίνει η αποκατάσταση φάσης, οι καταγεγραμμένες τιμές φάσης σε κάθε εικονοστοιχείο είναι μεταξύ 0 έως 2π radians (ή –π έως π). Μετά την εφαρμογή της τεχνικής κάθε εικονοστοιχείο θα έχει μία τιμή φάσης σε ένα εύρος μεταξύ μιας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής (πχ μεταξύ -11 έως +10 radians).

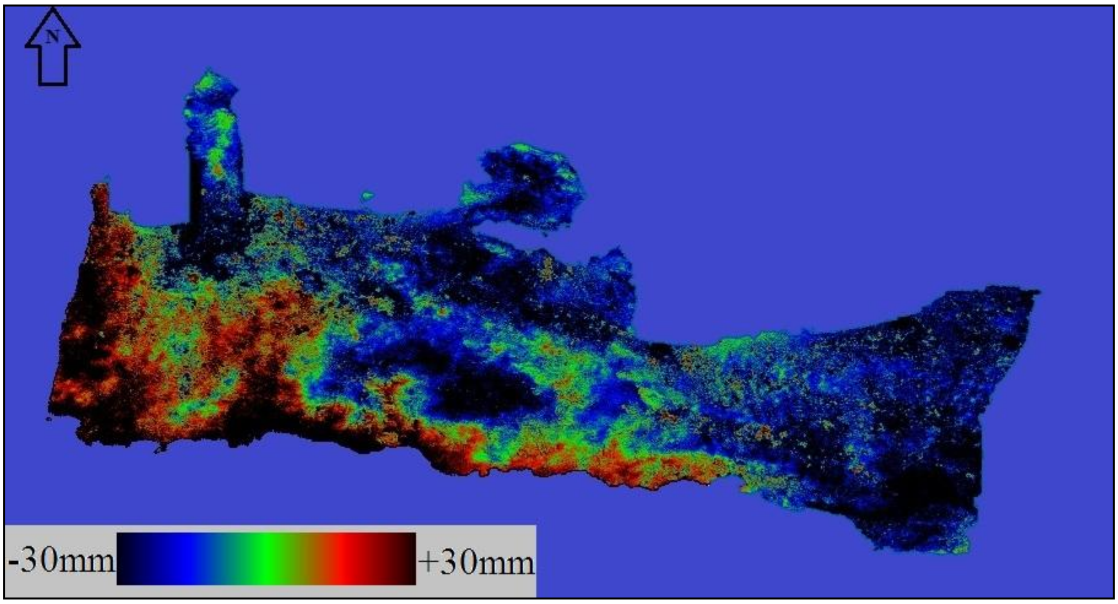
Στην περίπτωση του ASAR-EnviSat (Δηλαδή για λ=5,6cm), ισχύουν τα εξής:

2π radians αντιστοιχούν σε 2,8 cm

1 radian αντιστοιχεί σε X cm

X = (1/2π) * 2,8 = 0,44 cm

Οι τιμές αυτές μετατόπισης δεν είναι ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς αλλά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό σχετικών μετατοπίσεων μεταξύ δυο σημείων. Για παράδειγμα αν σε μία περιοχή έχει καταγραφεί μία τιμή -3 mm και σε μία άλλη +2 mm, η σχετική μετατόπιση των σημείων αυτών θα είναι 5mm.



Εικόνα 5.5. Συμβολογράφημα 11770-17782 μετά την αποκατάσταση φάσης.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από το συμβολογράφημα 11770-17782 μετά την αποκατάσταση φάσης, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά εργαλεία του λογισμικού ENVI. Για κάθε σημείο ενδιαφέροντος στο συμβολογράφημα, επιλέχθηκε μία γειτονιά εικονοστοιχείων που το περιβάλλουν, και υπολογίστηκε η μέση τιμή (σε radians) για κάθε περιοχή. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μετατροπή από radians/421 days σε mm/yr. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

	Χρυσοσκαλίτισσα	Σελί	Πάχνες	Ροδάκινο
Radians/421days	-4,48	-2,56	+2,66	-1,94
mm/yr	+17,1	+9,7	-10,1	+7,4

Πίνακας 5.1. Μέση τιμή σε radians/421 days, και μετατροπή σε mm/yr (Συμβολογράφημα 11770-17782)

Τα μεγέθη αυτά του πίνακα 5.1 αφορούν σε σχετικές μετατοπίσεις. Για παράδειγμα μεταξύ των σημείων Χρυσοσκαλίτισσα και Σελί, οι τιμές φάσης είναι +17,1 mm/yr και +9,7 mm/yr αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει πως η Χρυσοσκαλίτισσα απομακρύνεται σε σχέση με το Σελί κατά 7,4 mm/yr στην διεύθυνση παρατήρησης του Radar.

5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Συμβολομετρίας – GPS

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων της συμβολομετρίας, με τα δεδομένα των επίγειων σταθμών GPS. Τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας που θα χρησιμοποιηθούν είναι αυτά που προέκυψαν με την τεχνική αποκατάστασης φάσης για το συμβολογράφημα 11770-17782 (Κεφ. 5.3, πίνακας 5.1)

Στην συμβολομετρία δεν υπάρχει δυνατότητα ανάλυσης της σχετικής μετατόπισης αυτής σε οριζόντια και κάθετή. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι οριζόντιες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των σημείων στην περιοχή χαρακτηρίζονται από σχετική ομοιογένεια. Για τον λόγο αυτό η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της συμβολομετρίας θα γίνει με τις κατακόρυφες που έχουν καταγραφεί από τους επίγειους σταθμούς GPS. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 5.2.

	Συμβολομετρία (mm/yr)	GPS (mm/yr)
Χρυσοσκαλίτισσα - Σελί	7,4	4,38
Σελί - Ροδάκινο	2,3	2
Χρυσοσκαλίτισσα - Ροδάκινο	9,7	6,36
Ροδάκινο - Πάχνες	17,5	*

Πίνακας 5.2. Ετήσιες σχετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις (mm/yr)

Οι σχετικές μετατοπίσεις που προκύπτουν από την συμβολομετρία κρίνονται σχετικά μεγάλες. Οι αντίστοιχες τιμές από τους σταθμούς GPS αφορούν αποκλειστικά στην κατακόρυφη συνιστώσα και χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα κυρίως για την περίπτωση των σταθμών Σελί και Ροδάκινο, όπου τα δεδομένα αφορούν σε μικρό χρονικό διάστημα καταγραφής (κεφ. 2.2).

Εάν υποτεθεί ότι η ταχύτητα καθίζησης που καταγράφεται στον σταθμό του Ροδάκινου είναι πραγματική, καθώς και ότι η σχετική μετατόπιση που μετρήθηκε με την χρήση συμβολομετρίας μεταξύ Πάχνεων και Ροδάκινου αφορά κατά κύριο λόγω κατακόρυφη κίνηση, τότε εκτιμάται ένας ετήσιος ρυθμός καθίζησης της τάξης των 2 cm/yr της βουνοκορυφής σε σχέση με το ITRF 2005. Το μέγεθος αυτό είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις και όχι σε εδαφική παραμόρφωση, ωστόσο δεν υπάρχει η δυνατότητα στα πλαίσια της εργασίας αυτής να απομονωθεί η επίδραση της ατμόσφαιρας.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την τεχνική της συμβολομετρίας Radar, και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντικές μελέτες.

Συμπεράσματα:

- Από τα συμβολογραφήματα που μελετήθηκαν, και θεωρώντας ότι η ατμόσφαιρα δεν έχει αλλοιώσει τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η Κρήτη χαρακτηρίζεται από ανομοιογενείς κινήσεις. Στην πραγματικότητα όμως τα μεγέθη των σχετικών μετακινήσεων που προέκυψαν δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα καθώς η επίδραση της ατμόσφαιρας ήταν πολύ πιθανή.

- Η Δυτική Κρήτη αποτελεί μία δύσκολη σχετικά περιοχή για εφαρμογές της τεχνικής της συμβολομετρίας. Αυτό οφείλεται καταρχάς στην έντονη τοπογραφία που τη διακρίνει και που περιορίζει τον αριθμό των χρήσιμων ζευγαριών εικόνων SAR, που μπορούν να δημιουργήσουν συμβολογραφήματα με μεγάλα υψόμετρα αμφισημίας. Στην εργασία αυτή λόγω της μικρής σχετικά διαθεσιμότητας εικόνων, υπήρχε η δυνατότητα δημιουργίας δύο μόνο συμβολογραφημάτων με ικανοποιητικό υψόμετρο αμφισημίας για την απαλοιφή του τοπογραφικού ανάγλυφου.

- Λόγο του ότι η περιοχή μελέτης περιβάλλεται από θάλασσα, οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις σε μία εικόνα SAR αναμένονται έντονες. Για παράδειγμα, η αυξημένη υγρασία που προέρχεται από την θάλασσα είναι δυνατόν να εγκλωβισθεί μεταξύ ορεινών όγκων, να δημιουργήσει καλοσχηματισμένους κροσσούς σε ένα συμβολογράφημα και να οδηγήσει έτσι σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Προτάσεις για ανάλογες μελλοντικές μελέτες:

- Κρίνεται θεμιτό να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός διαθέσιμων εικόνων για τη δημιουργία συμβολογραφημάτων. Τα ζευγάρια πρέπει να χαρακτηρίζονται αφενός από μεγάλα υψόμετρα αμφισημίας αφετέρου να καλύπτουν χρονικά διαστήματα ικανά για την ανάδειξη μικρομετακινήσεων εδάφους. Στις περισσότερες βέβαια περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται εικόνες με μεγάλη χρονική απόκλιση μεταξύ τους υπάρχει αυξημένος ο κίνδυνος αποσυσχέτισης μεταξύ των δύο λήψεων.

- Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις στο συμβολογράφημα είναι δυνατόν οδηγήσουν σε εσφαλμένη ερμηνεία των κροσσών. Κρίνεται πολύ σημαντική η μελέτη και η χρήση τεχνικών για τον εντοπισμό και την απαλοιφή των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στα συμβολογραφήματα.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Μερτίκας, Σ.Π. (1999). *Τηλεπισκόπιση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

Διεθνής

1. A. Ferretti, A.M. Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, D. Massonnet (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, Ed. Karen Fletcher, European Space Agency (TM -19), ESA Pub. ESTEC, The Netherlands.
2. D. Massonet, K.L. Feigl (1998). *Radar Interferometry and its Applications to the changes of the Earth's Surface,* Reviews of Geophysics, 36(4): 441-500, doi:10.1029/97RG03139.
3. A. Ganas, T. Parsons (2009). *Three-dimensional model of Hellenic Arc deformation and origin of the Cretan uplift*, Journal of Geophysical Research, VOL. 114, B06404, 14 PP, doi:10.1029/2008JB005599.
4. *Diapason Version 4.2 GUI Guide* (2006). CNES, Issue 4.10 – English.
5. *EnviSat ASAR Product Handbook* (2007). European Space Agency, Issue 2.2.
6. M. Crosetto, B. Crippa, E. Biescas, O. Monserrat, M. Agudo (2005). *State-of-the-art of Land Deformation Monitoring using Differential SAR Interferometry*. Document retrieved from: http://earth.esa.int/fringe05/proceedings/papers/161_warren.pdf
7. P. Mateus, G. Nico, R. Tomé, J. Catalão, P. Miranda (2009). *Approaches to Mitigate Atmosphere Artefacts in SAR Interferograms: GPS vs. WRF Model.* Document retrieved from: http://earth.eo.esa.int/workshops/fringe09/proceedings/papers/s3_5mate.pdf
8. D. Massonet, K.L. Feigl (1995). *Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms*, Geophysical Research Letters, 22(12): 1537-1540, doi:10.1029/95GL00711.

9. D.T. Sandwell, E.J. Price (1998). *Phase gradient approach to stacking* interferograms, JGR, 103: 30183-30204.

10. Fassoulas C. (2001). *The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active European margin: the Herakleon basin, Crete, Greece*, Journal of Geodynamics, 31(1):49-70.

Διαδίκτυο

1. http://www.esa.int/
2. http://www.nasa.gov/
3. http://emeric.ims.forth.gr/
4. http://www.terrasar.de/

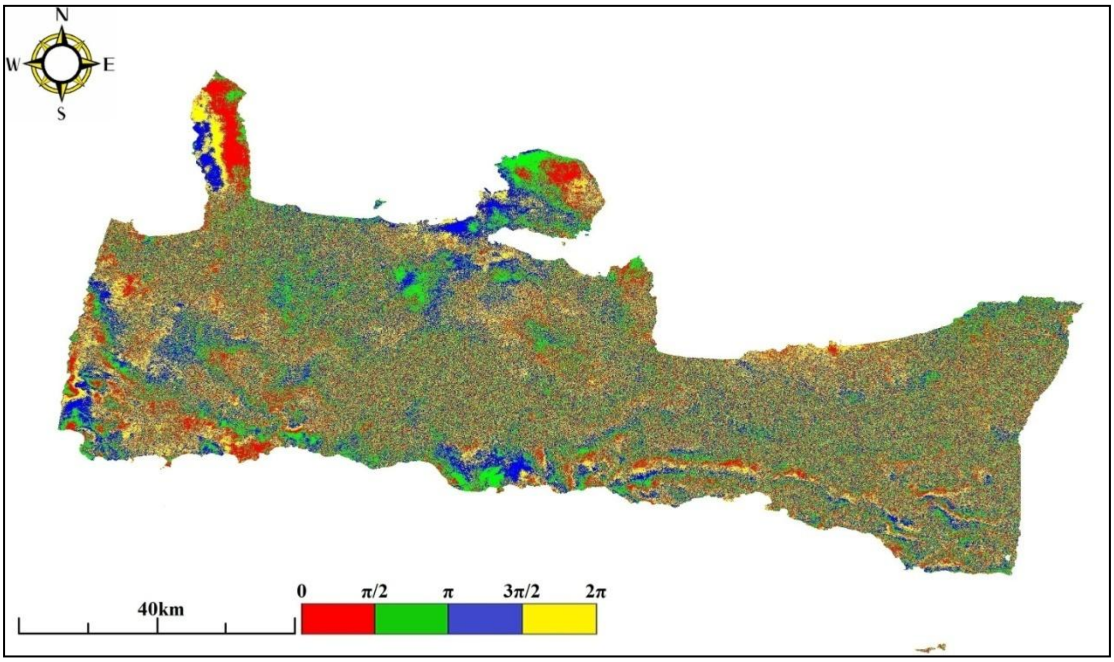
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

I. **Συμβολογραφήματα**

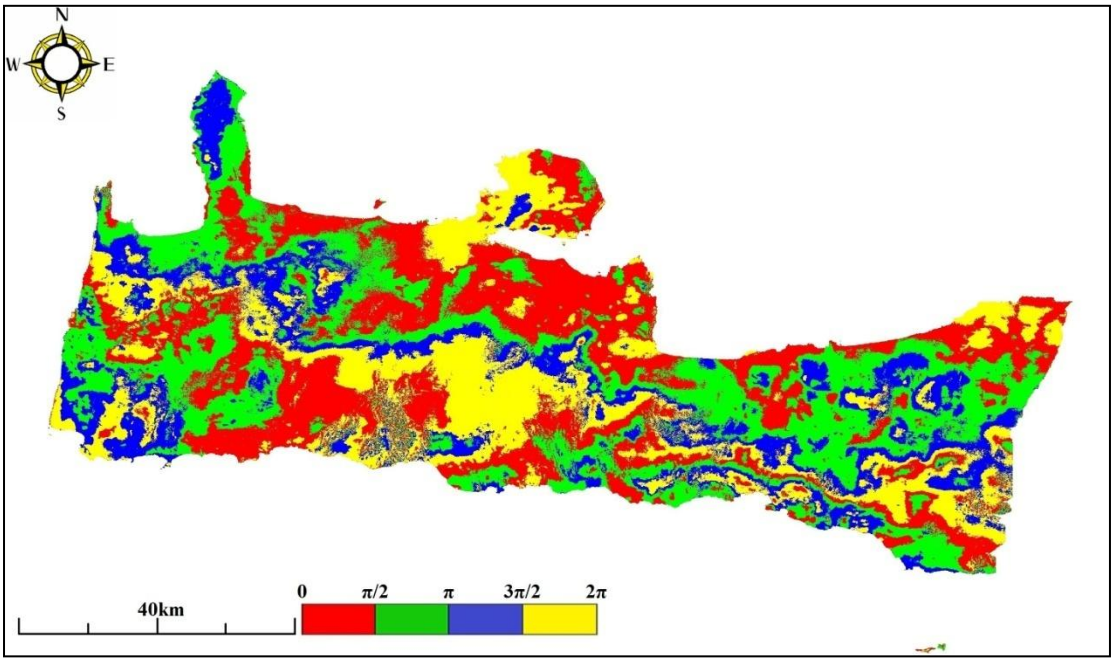
II. **GPS**

III. **Ενδεικτικά αρχεία DIAPASON**

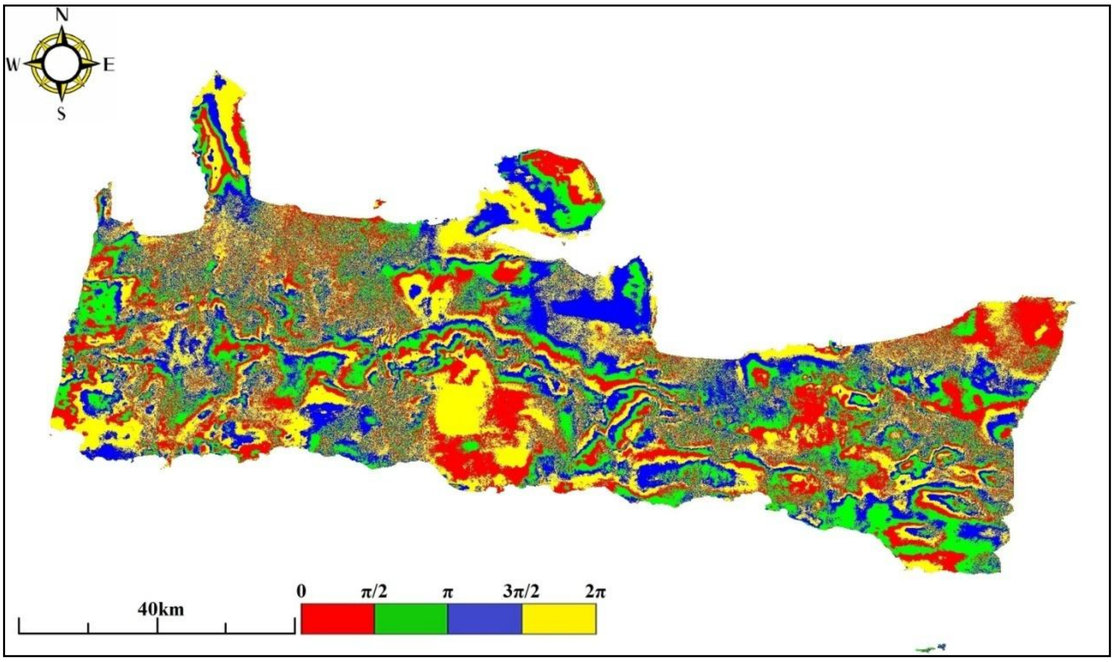
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Συμβολογραφήματα



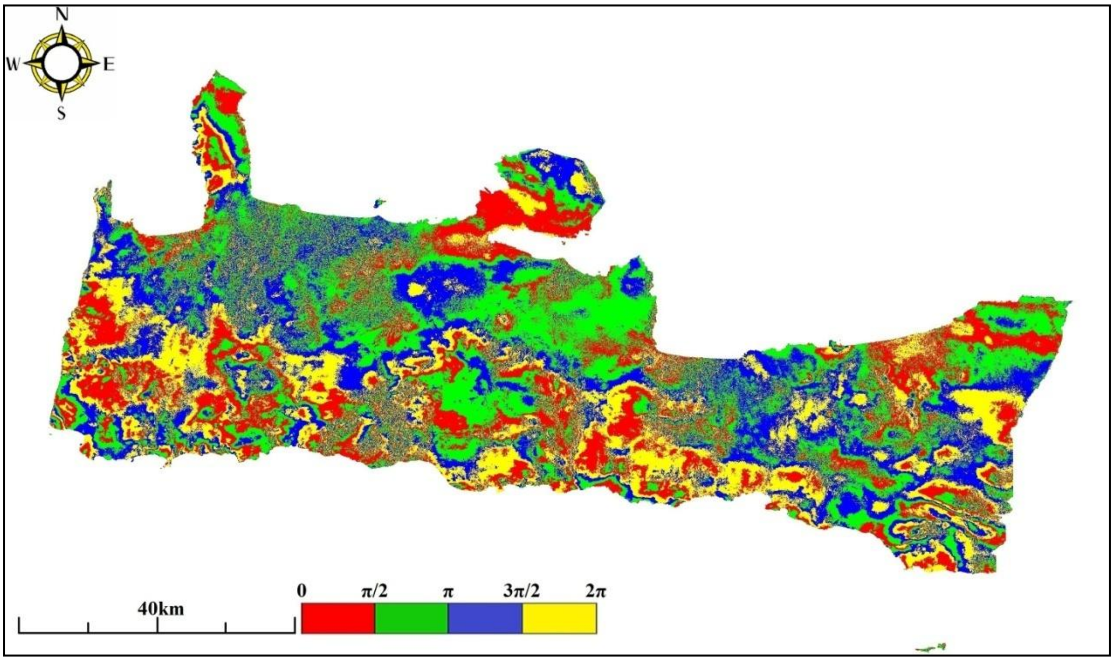
Συμβολογράφημα 10267-12271, δεν χρησιμοποιήθηκε στην ερμηνεία λόγω έντονης αποσυσχέτισης.



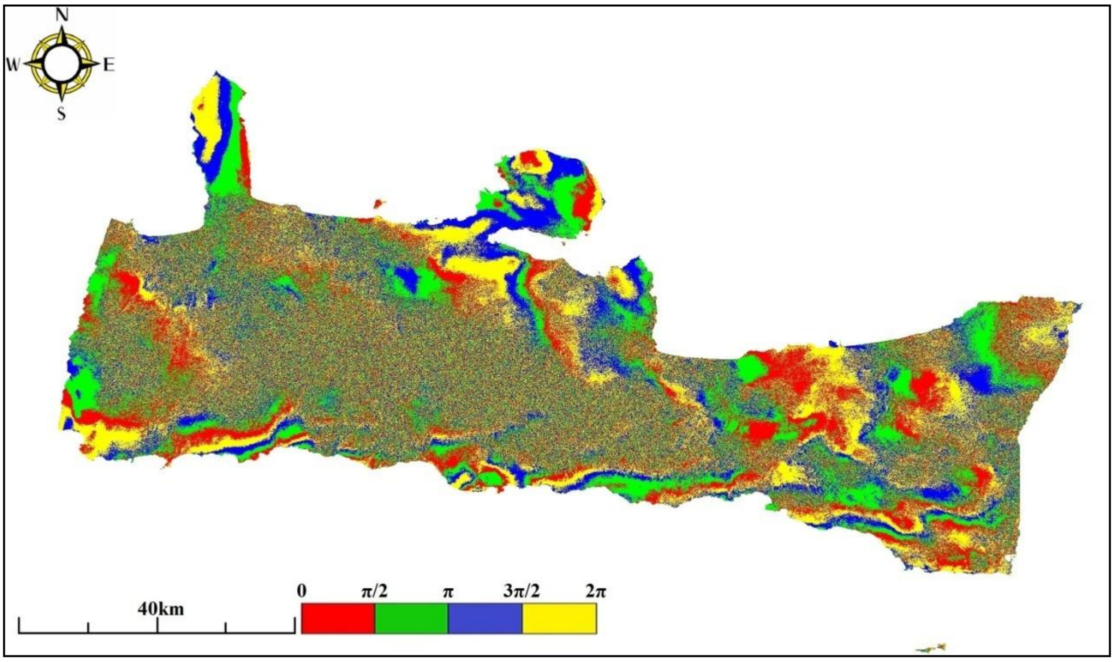
Συμβολογράφημα 13273-13774, χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του αθροιστικού συμβολογραφήματος.



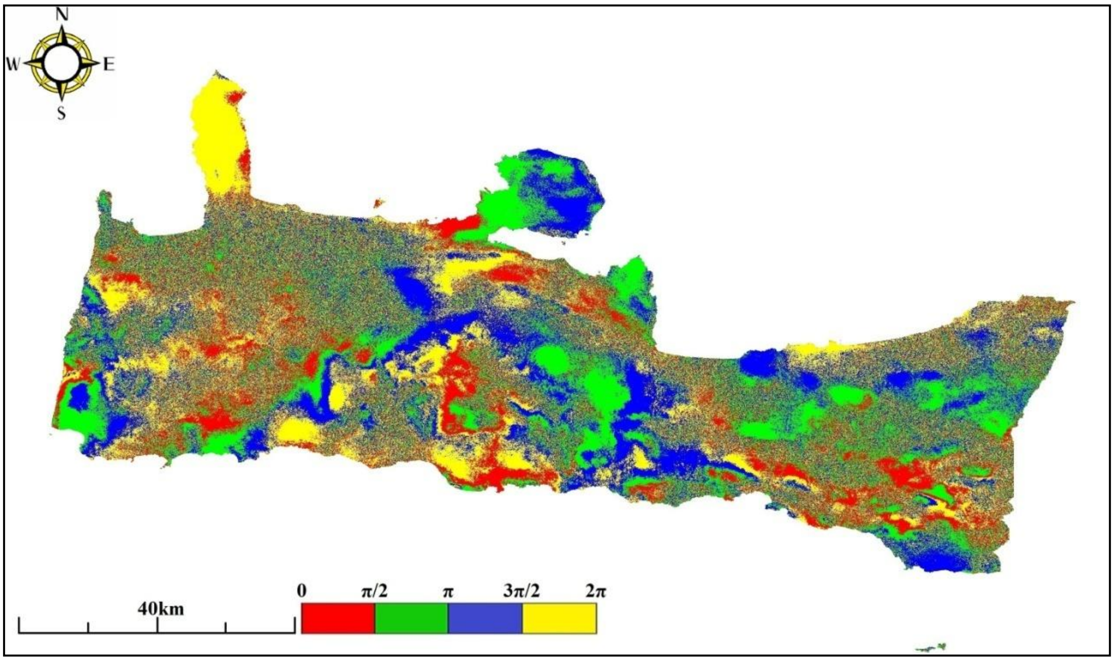
Συμβολογράφημα 13774-18283, χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του αθροιστικού συμβολογραφήματος.



Συμβολογράφημα 18283-19285, χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του αθροιστικού συμβολογραφήματος.

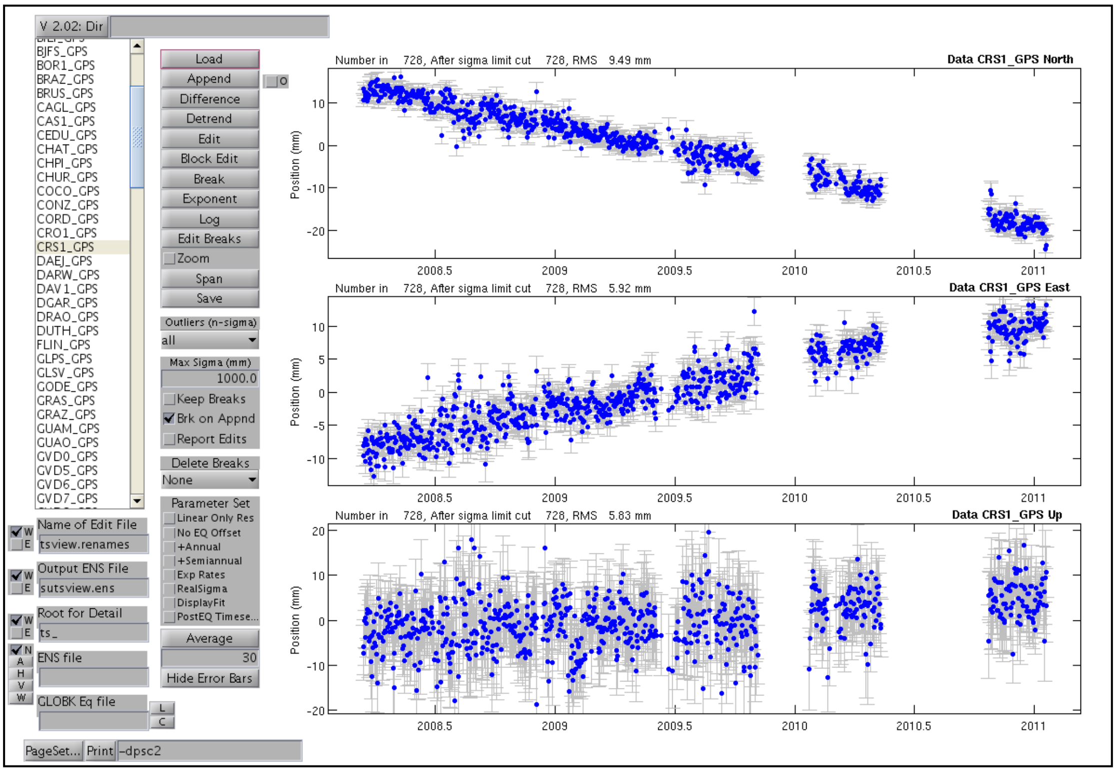


Συμβολογράφημα 20788-25798, δεν χρησιμοποιήθηκε στην ερμηνεία λόγω έντονης αποσυσχέτισης.

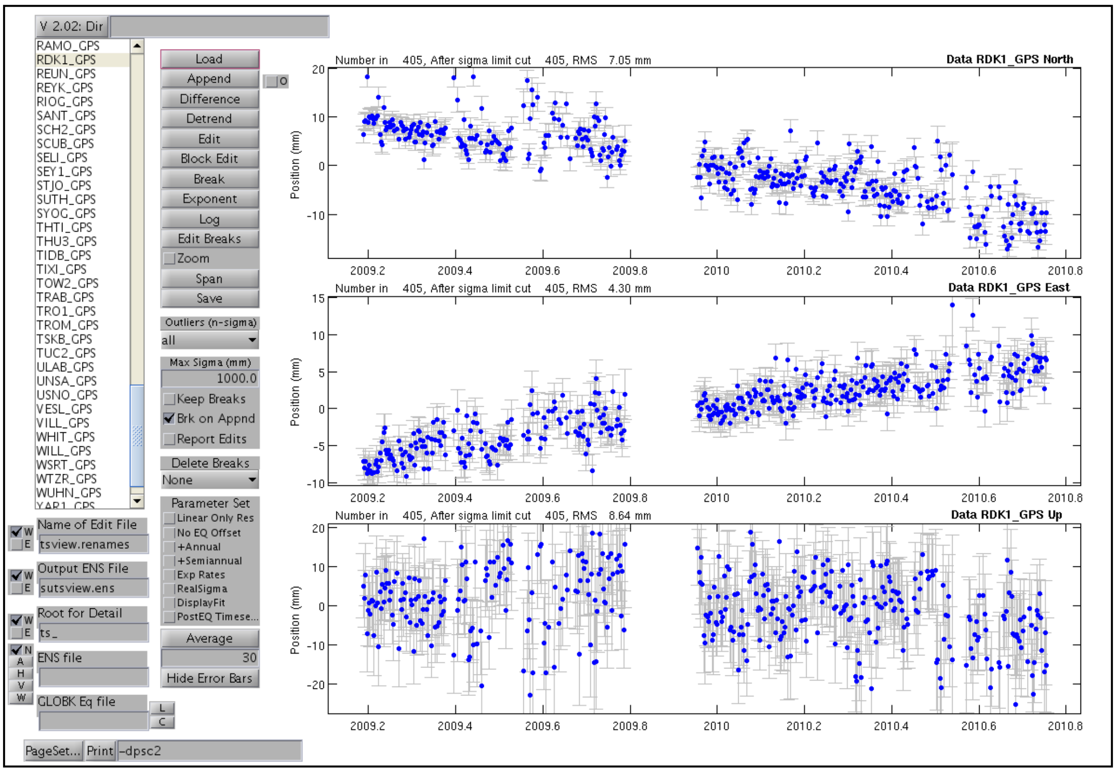


Συμβολογράφημα 16780-25297, δεν χρησιμοποιήθηκε στην ερμηνεία λόγω έντονης αποσυσχέτισης.

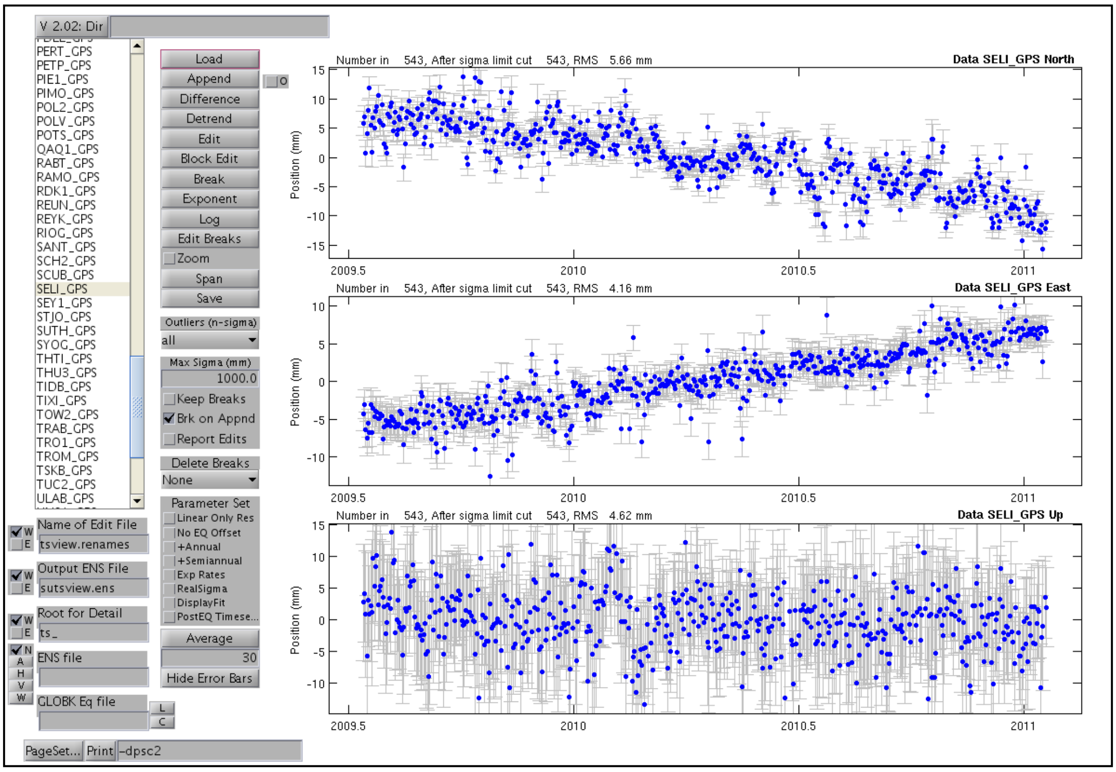
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Δεδομένα σταθμών GPS



Καταγραφές σταθμού GPS Χρυσοσκαλίτισσας (GeoMatLab, TUC).



Καταγραφές σταθμού GPS Ροδάκινου (GeoMatLab, TUC).



Καταγραφές σταθμού GPS Σέλι (GeoMatLab, TUC).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Ενδεικτικά Αρχεία DIAPASON

.geosar αρχείο της αρχικής λήψης 11770 του συμβολογραφήματος 11770-17782:

```
---------------------------
DESCRIPTOR FILE OF A RADAR IMAGE
(each line must be an iso-doppler)
(chaque ligne image doit κtre un iso-doppler)
---------------------------

LNG                              ENGLISH

---------------------------
GENERIC INFORMATION
---------------------------

ORBIT NUMBER                     11770

FRAME NUMBER                     ---

SATELLITE PASS                   DESCENDING

AREA                             ---

NAME OF THE SITE                 ---

STATUS                           PRECISE

---------------------------
GENERIC SENSOR INFORMATION
---------------------------

SENSOR NAME                      ENVISAT

MODE                             IMS

SWATH                            2

POLARISATION                     V/V

---------------------------
SENSOR INFORMATION
---------------------------

LOOKING                          RIGHT

SAMPLING FREQUENCY               19207680.0000000000

PRF                              1652.4156494141

CARRIER FREQUENCY                5331004416.0000000000

ORBIT INCLINATION                98.5500000000

---------------------------
DATA EXTRACTION INFORMATION
---------------------------
```

DATA INFO FILE /home/diapason2/ChaniaDesc/11770-17782//DATA_EXTRACT_INFO_11770.dat

DATA FIRST RECORD ---

DATA RECORD SIZE 20801

DATA FIRST POINT 18

RAW COUNTER POSITION ---

SWST VALUE ---

FIRST SWST ---

LAST SWST ---

DATA NUMBER OF ROWS 26899

DATA NUMBER OF COLUMNS 5196

EXTRACTED RAW DATA INFORMATION

RAW FILE ---

RAW DATA TYPE ---

RAW TOTAL NUMBER OF ROWS ---

RAW TOTAL NUMBER OF COLUMNS ---

NPRI ---

PRI VALUE ---

RAW PROCESSOR ASAR/4.07

RAW PAF D-PAC

EXTRACTION DATE 05-AUG-2009

SAR PROCESSING PARAMETER

SAR PROCESSOR ASAR

VERSION 4.07

PROCESSING DATE 05-AUG-2009

RANGE COMPRESSION RATE ---

CHIRP LENGTH ---

AZIMUTH DOPPLER FILE /home/diapason2/ChaniaDesc/11770-17782//doppler_11770

AZIMUTH DOPPLER NUMBER OF COLUMN 1

AZIMUTH DOPPLER NUMBER OF LINE 1

AZIMUTH DOPPLER VALUE 0.1028281650

FIRST AZIMUTH COMPRESSION RATE ---

AZIMUTH COMPRESSION RATE SLOPE ---

RESTITUTION DOPPLER 0.0000000000

PRESUMMING RATE 1

FIRST PROCESSED LINE 1

FIRST PROCESSED COLUMN 1

NUMBER OF LINES PROCESSED ---

NUMBER OF COLUMNS PROCESSED ---

SLC GAIN ---

SLC DATA TYPE CI2

SLC NUMBER OF ROWS 26899

SLC NUMBER OF COLUMNS 5196

SLC FILE /home/diapason2/ChaniaDesc/11770-17782//11770_SLC.ci2

ML AZIMUTH 10

ML RANGE 2

ML GAIN 0.1000000000

ML DATA TYPE OCT

ML NUMBER OF ROWS 2689

ML NUMBER OF COLUMNS 2598

ML FILE /home/diapason2/ChaniaDesc/11770-17782//11770_ml102.oct

----
GEOGRAPHIC PARAMETER

ORBIT TYPE DELFT

ORBIT PRECISION PRECISE

ORBITAL FILE /home/diapason2/ChaniaDesc/11770-17782/precise_11770.orb

REDUCED ISO-DOPPLER 0.0000000000

JULIAN DAY OF THE FIRST LINE 19874

TIME OF THE FIRST LINE	30896.9845970000
NEAR RANGE (NR)	826824.8260837635
LINE SPACING	4.0481877300
PIXEL SPACING RANGE	7.8039736700
AZIMUTH UNDERSAMPLING	1
RANGE UNDERSAMPLING	1
PRECISE NEAR RANGE	826823.5114424333
PRECISE TIME	30896.9816069693
PRECISE RATIO	---
DEM TYPE	TRUE
DEM DESCRIPTOR	/home/diapason2/ENVISIZ/masked_dem50.dat
CENTER LATITUDE	35.5848692676
CENTER LONGITUDE	24.1670652813
LL LATITUDE	34.9133090000
LR LATITUDE	35.1091150000
UL LATITUDE	35.8727900000
UR LATITUDE	36.0692430000
LL LONGITUDE	24.6291820000
LR LONGITUDE	23.4935870000
UL LONGITUDE	24.8878570000
UR LONGITUDE	23.7370810000
DATUM	WGS84
CALIBRATION CONSTANT	32284.9414062500
DOPPLER CONSTANT TERM	235.7236785889
DOPPLER LINEAR TERM	-808649.9375000000
DOPPLER QUADRATIC TERM	873508032.0000000000
CHIRP POWER	4.4882316589
CHIRP TYPE	---