



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Συμβολομετρία RADAR
και εφαρμογές στις γεωεπιστήμες

Ανδρικόπουλος Δημήτριος

Εξεταστική επιτροπή :
Καθηγητής Μερτίκας Στυλιανός (επιβλέπων)
Καθηγητής Χριστόπουλος Διονύσιος
Καθηγητής Ζερβάκης Μιχαήλ

XANIA 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια εφαρμογή της τεχνικής της διαφορικής συμβολομετρίας στην Δυτική Κρήτη, και πιο συγκεκριμένα στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού της Χρυσosκαλίτισσας. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε γιατί περιλαμβάνει την δυνατότητα μακροσκοπικής μελέτης μικρομετακινήσεων του εδάφους με ακρίβειες εκατοστού ή και χιλιοστού του μέτρου. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν 41 συνολικά εικόνες radar που λήφθηκαν από τους δορυφόρους ERS 1 και 2 .

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή σε βασικές έννοιες των εικονοληπτικών συστημάτων radar. Περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά συστήματα radar και η εξέλιξη τους με την αξιοποίηση του φαινομένου Doppler.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή της τεχνικής της συμβολομετρίας. Παρουσιάζονται οι παράμετροί της και ο ρόλος που παίζουν στην σύνθεση ενός συμβολογραφήματος, ενώ παράλληλα γίνεται μια εισαγωγή στον τρόπο ερμηνείας του συμβολογραφήματος.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία, το Diapason (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature). Παρουσιάζονται τα δεδομένα που απαιτούνται για την εκκίνηση του προγράμματος πριν από κάθε εφαρμογή καθώς και τα βασικά βήματα – υπορουτίνες του λογισμικού.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί την εφαρμογή της διπλωματικής εργασίας. Δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εικόνων SAR που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και του Μοντέλου Ψηφιακού Εδάφους της περιοχής. Περιγράφονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εφαρμογή, όπως είναι η έλλειψη συνοχής των εικόνων, η επίδραση της ατμόσφαιρας και της τοπογραφίας αλλά και ο περιορισμένος (σχετικά) αριθμός εικόνων που είχαμε στην διάθεσή μας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής. Γίνεται η ερμηνεία των συμβολογραφημάτων, υπολογίζονται οι μετατοπίσεις από αυτά και συγκρίνονται με τα θεωρητικά – αναμενόμενα αποτελέσματα. Τελικά εκτιμάται πως η περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας ανυψώνεται κατά 4,9 mm ετησίως σε σχέση με την ανατολική περιοχή των εικόνων.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα προβλήματα που κατέστησαν δύσκολη την ερμηνεία των συμβολογραφημάτων, σημαντικότερο των οποίων είναι η επίδραση της ατμόσφαιρας και παραθέτονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική επεξεργασία – συνέχεια τη εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να αφιερώσω μερικά λόγια στους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και η συμβολή των οποίων ήταν καθοριστική.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σ. Μερτίκα, επιβλέποντά μου κατά την διεκπεραίωση της εργασίας, για την καθοδήγησή του, την επιστημονική του υποστήριξη και κυρίως την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση της εργασίας. Επίσης τους καθηγητές κ. Μ. Ζερβάκη και κ. Δ. Χριστόπουλο που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην επιτροπή, για τον χρόνο που διέθεσαν κατά την διόρθωση της διπλωματικής και για τις υποδείξεις τους.

Το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου Γεωδαισίας & Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, και ιδιαίτερα την κα. Ε. Παπαδάκη για την πολύτιμη βοήθεια της σε όλα τα στάδια της διπλωματικής εργασίας, όπως και τον κ. Ξ. Φρατζή για την τεχνική υποστήριξη που προσέφερε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τα χρόνια φοίτησής μου στα Χανιά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Γενικά για τα Radar.....	2
1.3 Δομή και τρόπος λειτουργίας του Radar.....	3
1.4 Διαχωριστική ικανότητα.....	7
1.5 Φαινόμενο Doppler.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	15
2.1 Εισαγωγή στην συμβολομετρία.....	15
2.2 Αρχή της συμβολομετρίας.....	16
2.3 Περιορισμοί κατά την εφαρμογή.....	23
2.4 Ερμηνεία συμβολογραφήματος.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	34
3.1 Διαφορική συμβολομετρία.....	34
3.2 Το λογισμικό Diapason.....	36
3.3 Επιμέρους αλγόριθμοι του DIAPASON.....	38
3.4 Συμπληρωματικοί αλγόριθμοι DIAPASON.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	45
4.1 Περιοχή Εφαρμογής.....	45
4.2 Δεδομένα εικόνων.....	46
4.3 Μοντέλο Ψηφιακού Εδάφους.....	47
4.4 Επιλογές ζευγαριών – τεχνικές δυσκολίες.....	48
4.5 Άθροισμα συμβολογραφημάτων.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	60
5.1 Αποτελέσματα.....	60
5.2 Ερμηνεία – υπολογισμός μετατοπίσεων.....	62

5.3 Αναμενόμενη μετατόπιση.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	67
6.1 Συμπεράσματα.....	67
6.2 Προτάσεις.....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή

Κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει την εξέλιξη που υπάρχει στις γεωδαιτικές επιστήμες, και κυρίως στο θεωρητικό υπόβαθρο. Υπάρχουν πολλές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της θέσης ενός σημείου βάσει ενός ή και περισσότερων συστημάτων.(π.χ. GPS positioning, όδευση) Συνδυασμός των τεχνικών αυτών χρησιμοποιείται για την εύρεση της μετακίνησης ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο ή σύστημα. Αυτό που έλειπε έως τώρα από τις γεωδαιτικές επιστήμες είναι ο υπολογισμός της μετατόπισης μιας ευρείας περιοχής εδάφους σε βάθος χρόνου, χρησιμοποιώντας μακροσκοπικές μεθόδους, χωρίς την ανάγκη επιτόπιας έρευνας στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως εικόνες Radar SAR – δηλαδή εικόνες μεγάλης ευκρίνειας, τα δεδομένα των οποίων συμπεριλαμβάνουν εκτός από τις τιμές έντασης του σήματος που επιστρέφει και τις τιμές φάσης. Επακόλουθο αυτού είναι η ανάπτυξη μεθόδου η οποία αξιοποιεί τα δεδομένα πολλαπλών εικόνων SAR μιας περιοχής για τον υπολογισμό τυχόν μετατοπίσεων του εδάφους. Η μέθοδος αυτή είναι η καλούμενη Συμβολομετρία και αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ο ορισμός της συμβολομετρίας προέρχεται από το φαινόμενο της συμβολής του φωτός. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως η συμβολομετρία αξιοποιεί την κυματική φύση του φωτός και κυρίως την γωνία φάσης της λαμβανόμενης ακτινοβολίας. Το βασικό επακόλουθο της συμβολομετρίας, το συμβολογράφημα, δεν αποτελεί παρά έναν “χάρτη” κροσσών της περιοχής για κάποιο χρονικό διάστημα, οι οποίοι μπορούν στην συνέχεια να ερμηνευτούν ως μετατόπιση του εδάφους.

Με την διαφορική συμβολομετρία έχουμε την δυνατότητα εντοπισμού μικρομεταβολών στην επιφάνεια της γης καθώς και σε επιφάνειες πάγου ενώ η ανίχνευση αυτή πραγματοποιείται για περιόδους από μέρες έως χρόνια. Οι μετατοπίσεις που μπορούν να ανιχνευθούν είναι της τάξης του 1cm για εδαφική κάλυψη 100 χιλιομέτρων (ελάχιστη) και φτάνει τα 3mm για ένα μέτρο περίπου (μέγιστη). Όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες λήψης των εικόνων, η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να είναι της τάξεως του χιλιοστού. Μερικές από τις εφαρμογές της συμβολομετρίας είναι:

- Εδαφικές μετατοπίσεις λόγω:
 - α) ανθρωπογενών δραστηριοτήτων
 - β) γεωτεκτονικής
 - γ) Ηφαιστειακής δραστηριότητας
- Μελέτη βλάστησης
- Δημιουργία τοπογραφικών χαρτών υψηλής ανάλυσης
- Κλιματολογικές παρατηρήσεις.
- Μέτρηση ταχύτητας ψυχρών ρευμάτων στην Ανταρκτική

1.2 Γενικά για τα Radar

Η λέξη Radar επινόηθηκε το 1941 και αποτελεί ακρωνύμιο της αγγλικής έκφρασης Radio Detection and Distance. Μας υποδηλώνει ένα σύστημα που χρησιμοποιεί τεχνητή πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία για να υπολογίσει την απόσταση, το ύψος, την διεύθυνση και την ταχύτητα ενός αντικειμένου.

Το Radar συμπεριλαμβάνεται στα ενεργητικά συστήματα Τηλεπισκόπησης, εφόσον χρησιμοποιεί τεχνητή πηγή ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα, τα οποία ανιχνεύουν την ανακλώμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία των αντικειμένων από φυσικές πηγές όπως είναι ο Ήλιος.

Μια άλλη διαφορά του radar από τα άλλα συστήματα τηλεπισκόπησης είναι ότι τα δεδομένα καταγράφονται με βάση τον χρόνο μετάβασης και επιστροφής της ακτινοβολίας, και όχι με βάση τη γωνιακή απόσταση, όπως για παράδειγμα γίνεται στις φωτογραφικές μηχανές. Αυτό μας δίνει το πλεονέκτημα της καλύτερης ερμηνείας των δεδομένων έναντι αυτών της γωνιακής απόστασης καθώς όπως θα δούμε επιδέχονται επεξεργασία ευκολότερα.

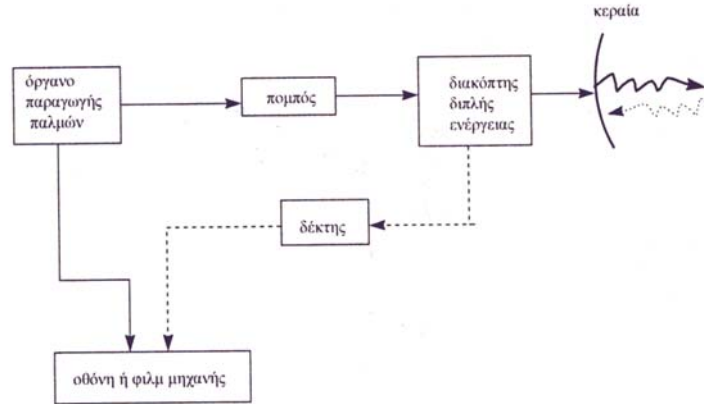
Οι πρώτες ανακαλύψεις σχετικές με την τεχνολογία radar έγιναν το 1873 με τις εξισώσεις του Maxwell σχετικά με τον ηλεκτρομαγνητισμό και κατόπιν το 1886 με τα πειράματα του Hertz. Ο Hertz ήταν αυτός που πρώτος παρήγαγε και μελέτησε τα πρώτα ραδιοκύματα σε συνθήκες εργαστηρίου ανακαλύπτοντας πως τα κύματα αυτά υπόκειντο σε φαινόμενα ανάκλασης και διάχυσης (scattering).

Αν και τα πρώτα συστήματα radar αναπτύχθηκαν από το 1903 για τον εντοπισμό πλοίων και την αποφυγή των μεταξύ τους συγκρούσεων, η πραγματική επανάσταση στα radar έγινε λίγο πριν και κατά την διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου, για στρατιωτικές εφαρμογές. Τα επερχόμενα χρόνια άρχισε και η επέκταση των εφαρμογών radar στην αστρονομία, καθώς τα επίγεια radar κρίθηκαν κατάλληλα για την παρατήρηση ουράνιων σωμάτων όπως τη Σελήνη, την Αφροδίτη, τον Άρη και τον Ήλιο. Για παράδειγμα, τον Ιανουάριο του 1946 είχαμε την πρώτη καταγραφή δεδομένων radar από την Σελήνη, ενώ το 1972 έγιναν οι πρώτες παρατηρήσεις από την Σελήνη, με την αποστολή του Apollo 17.

1.3 Δομή και τρόπος λειτουργίας του Radar

Το radar ως ενεργητικό σύστημα εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία. Αφού η ακτινοβολία ανακλαστεί από το έδαφος, καταγράφεται από το σύστημα με την χρήση κεραίας. Ο πομπός του radar βρίσκεται στο κάτω μέρος του αεροσκάφους και εκπέμπει ενέργεια πλευρικά του αεροσκάφους και εγκάρσια της διεύθυνσης πτήσης. Λόγω αυτής της μορφής τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως συστήματα SLAR (Side Looking Airborne Radar). Τα βασικά τους μέρη όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 είναι: η συσκευή

παραγωγής παλμών, η κεραία για την εκπομπή και την λήψη του σήματος και ο δέκτης για την καταγραφή του σήματος σε οθόνη ή φιλμ.

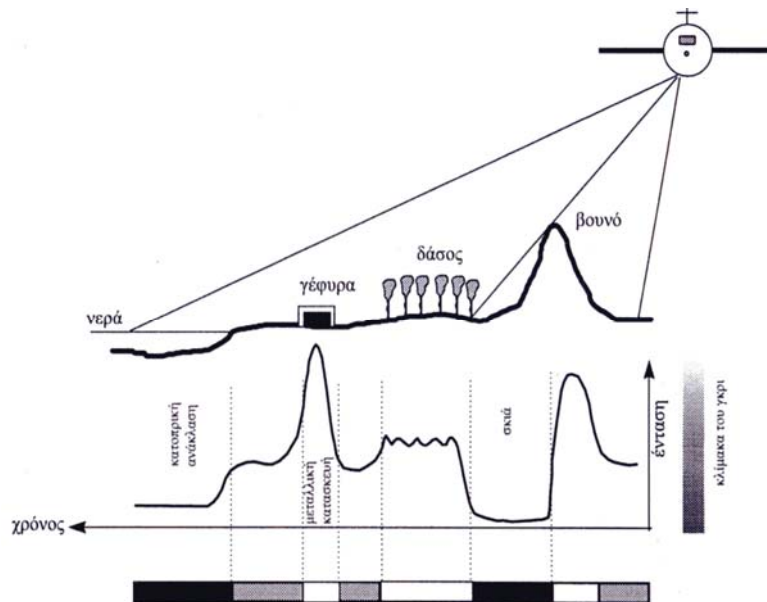


Σχήμα 1.1: Τα στοιχεία ενός radar πραγματικού ανοίγματος^[5].

Ο δέκτης του radar αρχικά καταγράφει την ένταση του σήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής και λήψης του. Στην συνέχεια για να προσδιοριστεί η θέση ενός σημείου στο έδαφος πολλαπλασιάζεται ο χρόνος διάδοσης του παλμού με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$. Η διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση πτήσης του αεροσκάφους ονομάζεται κατεύθυνση παρατήρησης (look direction) ενώ η γωνία από το ναδίρ μέχρι τον στόχο γωνία παρατήρησης (look angle).

Όπως αναφέρθηκε η θέση ενός σημείου υπολογίζεται βάσει του χρόνου εκπομπής και λήψης του σήματος του radar. Εντούτοις πληροφορία παρέχεται και από την ένταση του σήματος που επιστρέφει και καταγράφεται από τον δέκτη, καθώς συγκεκριμένου είδους στόχοι προσδίδουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στις εικόνες radar. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 η πλευρά ενός βουνού που αντικρίζει την κεραία, εξαιτίας του προσανατολισμού της σε σχέση με την κεραία του Radar, παρουσιάζει ισχυρή επιστροφή σήματος. Το βουνό εμποδίζει τον εκπεμπόμενο παλμό να προσπέσει πάνω στο έδαφος ακριβώς πίσω του. Συνεπώς δεν υπάρχει σήμα επιστροφής για αυτήν

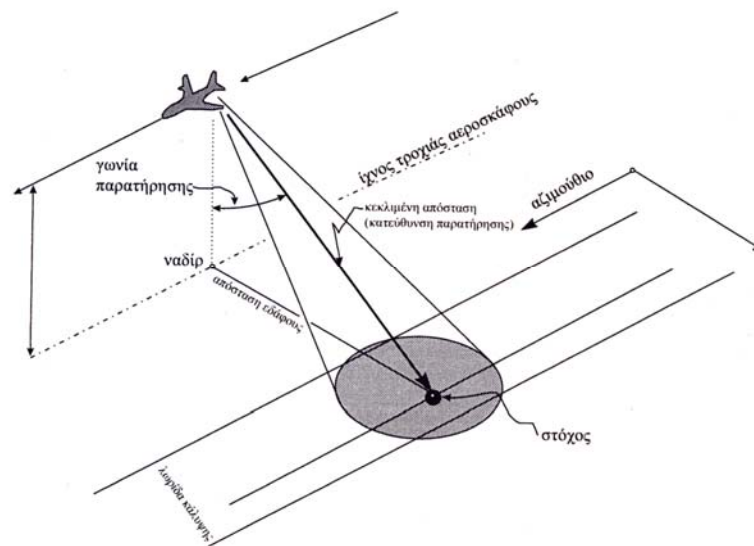
την υπό σκιά περιοχή. Σε αυτήν την περίπτωση η εν λόγω περιοχή απεικονίζεται σκοτεινή στην εικόνα και αφορά σε χαρακτηριστική σκιά του Radar.



Σχήμα 1.2: Η καταγραφή της ακτινοβολίας απο το radar, όπως αυτή ανακλάται από το έδαφος^[5].

Εν συνεχεία, η βλάστηση δημιουργεί μια «πιτσιλωτή» εικόνα (signature) μέσης έντασης, εξαιτίας των πολλαπλών μορφών, σχημάτων και προσανατολισμού των φυτών. Τα μεταλλικά αντικείμενα, όπως οι γέφυρες και τα πλοία, προκαλούν ισχυρά σήματα επιστροφής, εξαιτίας της γεωμετρίας και των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Τέλος, η ενέργεια του Radar που προσπίπτει σε ήρεμα νερά ανακλάται κατά μεγάλο ποσοστό μακριά από το σύστημα με γωνία ανάκλασης ίση με την γωνία πρόσπτωσης. Ελάχιστη ενέργεια επιστρέφει τότε στο σύστημα αποδίδοντας σκοτεινό σήμα. Λείες επιφάνειες όπως ασφαλτικοί τάπητες, επιφάνειες αποξηραμένων λιμνών, διάδρομοι αεροδρομίων, μεγάλοι δρόμοι, νερά χωρίς κυματισμούς κλπ. ονομάζονται στόχοι κατοπτρικής ανάκλασης (specular targets). Όταν οι επιφάνειες αυτές βρίσκονται κοντά στον άξονα πτήσης καταλήγουν σε σήμα ανοικτού τόνου του γκρι, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όταν βρίσκονται μακριά από τον άξονα πτήσης, δημιουργούν σκούρους τόνους του γκρι (μηδενική επιστροφή σήματος).

Ο παλμός επιστροφής του Radar μετατρέπεται σε γραμμή σάρωσης πάνω σε οθόνη αντιστοιχίζοντας σκούρους τόνους σε σήματα επιστροφής χαμηλής έντασης και φωτεινούς τόνους σε σήματα επιστροφής υψηλής έντασης. Η προκύπτουσα γραμμή σάρωσης καταγράφεται πάνω σε ρολό φίλμ που μετακινείται συγχρόνως με την ταχύτητα του αεροσκάφους. Καθώς το αεροσκάφος μετακινείται προς τα εμπρός, διαδοχικές γραμμές σάρωσης παράγονται ώστε να σχηματίσουν την τελική εικόνα του Radar.



Σχήμα 1.3: Η γεωμετρία ενός συστήματος radar^[5].

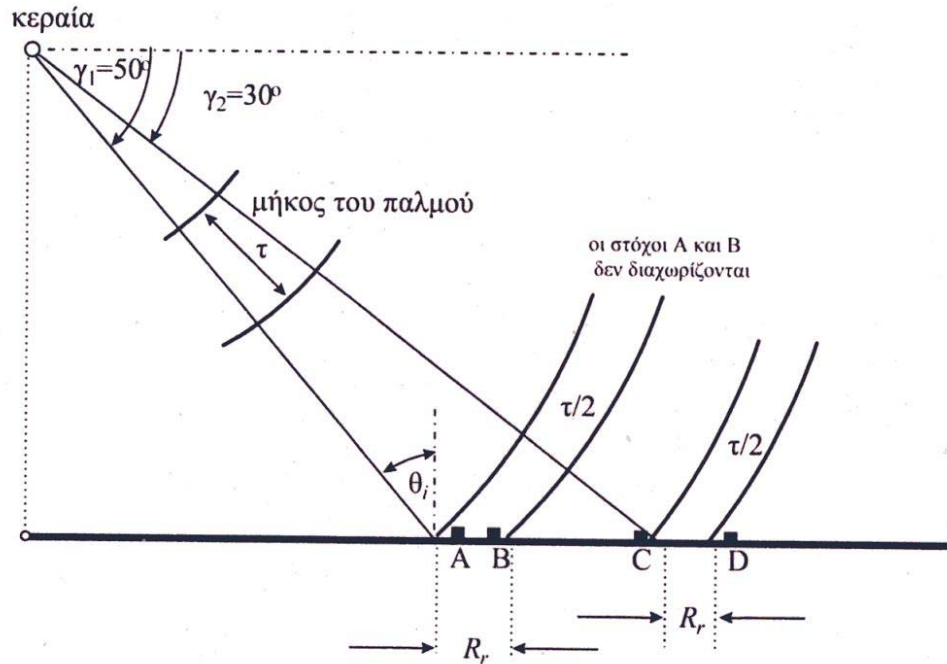
Από τα παραπάνω προκύπτει πως η θέση κάθε σημείου του εδάφους προσδιορίζεται στην εικόνα από τα διανύσματα αξιμούθιου και απόστασης κάθετης στην διεύθυνση πτήσης του αεροσκάφους. Κάθε γραμμή της εικόνας αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θέση του αεροσκάφους και είναι κάθετη στη διεύθυνση πτήσης ενώ κάθε στήλη αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την τροχιά πτήσης. Επομένως κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας ορίζεται από τη στήλη και τη γραμμή στην οποία ανήκει, ενώ το μέγεθος της κυψελίδας στο έδαφος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το ύψος πτήσης του αεροσκάφους και η απόσταση του εικονοστοιχείου από το ναδύρ του σκάφους. Ένας χρήσιμος ορισμός που έμμεσα μας δίνει το μέγεθος του εικονοστοιχείου και επομένως την χωρική ανάλυση της εικόνας είναι η διαχωριστική ικανότητα του radar.

1.4 Διαχωριστική ικανότητα

Η διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση περιγράφει την ικανότητα ενός συστήματος να διαχωρίζει τα αντικείμενα στην γεωμετρική τους διάσταση. Για τον καθορισμό της διαχωριστικής ικανότητας υπολογίζουμε το μέγεθος του ορθογωνίου του παλμού, όπως αυτός προβάλλεται στο έδαφος μια δεδομένη χρονική στιγμή. Εάν δύο αντικείμενα βρίσκονται εντός του ίδιου ορθογωνίου του παλμού, τότε θα εμφανιστούν σαν ένα αντικείμενο στην εικόνα και δεν θα είναι δυνατή η διάκρισή τους. Ο καθορισμός του μεγέθους του ορθογωνίου γίνεται με δύο διαφορετικά μεγέθη: την διαχωριστική ικανότητα στην οριζόντια απόσταση (range) και την διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο.

Διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση

Η Διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση (range) μας καθορίζει την διάσταση του παλμού στην διεύθυνση παρατήρησης του αεροσκάφους (Line of Sight ή LOS). Για να διαχωριστούν δύο αντικείμενα από το radar, θα πρέπει η ακτινοβολία που ανακλάται από αυτά να επιστρέφει στο radar σε διαφορετικούς χρόνους. Όπως δηλαδή φαίνεται και στο Σχήμα θα πρέπει τα δύο αντικείμενα να ανήκουν σε διαφορετικούς παλμούς σήματος. Ως μήκος παλμού τ ορίζουμε την *χρονική διάρκεια* ενός παλμού. Στην περίπτωση των radar το μήκος αυτό είναι της τάξεως των 0,7 μsec . Τα αντικείμενα ανήκουν σε διαφορετικό παλμό όταν το σήμα από αυτά καταγράφεται με χρονική διαφορά τουλάχιστον ίση με $\tau/2$.



Σχήμα 1.4: Διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση^[5].

Επομένως προκύπτει ότι η διαχωριστική ικανότητα στην κεκλιμένη απόσταση (slant range) είναι:

$$R_{sr} = \frac{\tau \cdot c}{2}$$

η οποία όταν προβάλλεται στο έδαφος (ground range) γίνεται:

$$R_r = \frac{\tau \cdot c}{2 \sin \theta} \approx \frac{\tau \cdot c}{2 \cos \gamma} \quad 2.1$$

τ : μήκος του παλμού

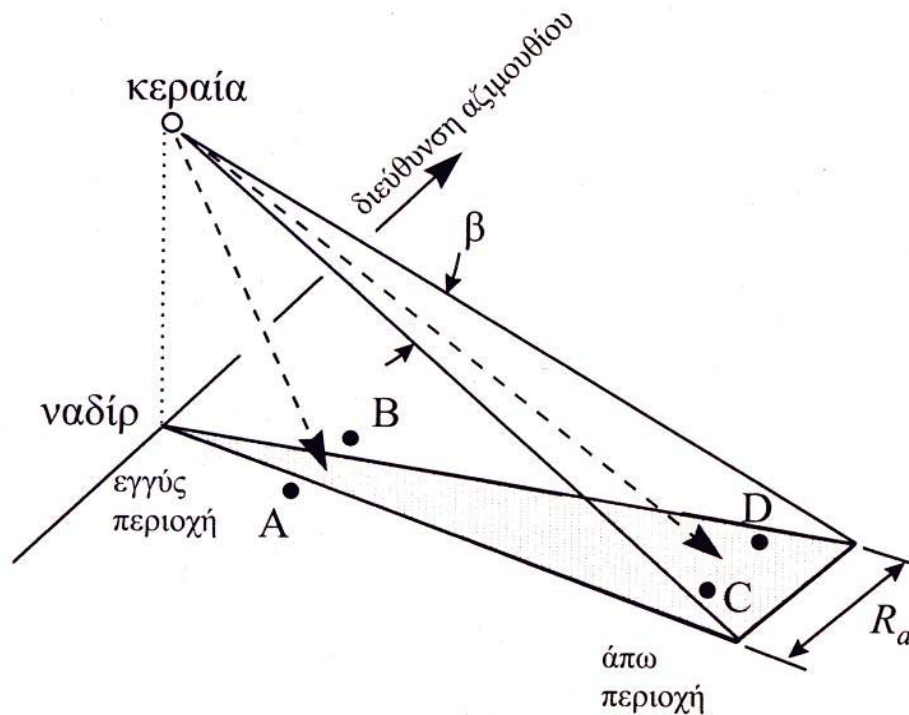
c : η ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

γ : γωνία βάθους (depression angle)

$\theta = (90 - \gamma)$ η γωνία παρατήρησης

Διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο

Η διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο μας δίνει την διάσταση του ορθογωνίου του παλμού παράλληλα στην διεύθυνση της πτήσης. Ο υπολογισμός της είναι παρόμοιος με αυτόν της διαχωριστικής ικανότητας στην απόσταση, με την διαφορά ότι αλλάζει η γεωμετρία. Η τιμή της δεν επηρεάζεται από το μήκος του παλμού αλλά από το πλάτος β_a της δέσμης ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Δύο σημεία A και B που βρίσκονται κοντά στην τροχιά του radar διαχωρίζονται, ενώ δύο άλλα σημεία C και D που απέχουν μεταξύ τους το ίδιο είναι δυνατόν να μην διαχωρίζονται αν βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το radar:



Σχήμα 1.5: Διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο^[5].

Αν το γωνιακό πλάτος β της δέσμης της κεραίας του Radar είναι: $\beta_a = 0.886 \frac{\lambda}{L_a}$ 2.2

τότε η διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο: $W_a = \frac{\lambda \cdot R}{L_a} \neq \beta_a \cdot R = 0.886 \frac{\lambda \cdot R}{L_a}$ 2.3

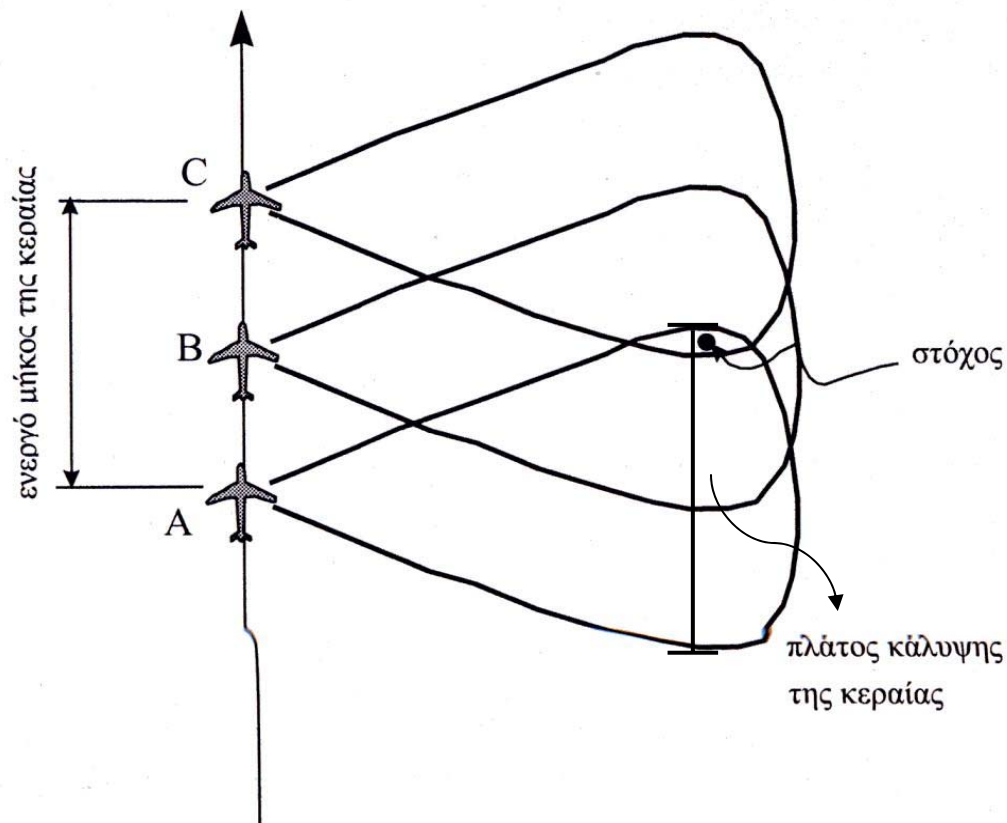
λ : μήκος κύματος της ακτινοβολίας λάθος στην σχέση 2.3, δεν μπορώ να διορθώσω

R: κεκλιμένη απόσταση από την κεραία μέχρι τον στόχο

L_a : το φυσικό μήκος της κεραίας

Για παράδειγμα αν έχουμε κεκλιμένη απόσταση $R = 8 \text{ km}$, τότε για μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\lambda = 0,86 \text{ cm}$ και μήκος κεραίας $L_a = 4,9 \text{ m}$, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση 2.3 ότι η διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο θα είναι ίση με 9,8 μέτρα.. Γενικά τα αποκαλούμενα radar πραγματικού ανοίγματος RAR (Real Aperture Radar) χρησιμοποιούν κεραία μέγιστου πρακτικού μήκους έτσι ώστε να επιτύχουν καλή διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο. Από την σχέση 2.3 προκύπτει ότι στην περίπτωση των συστημάτων RAR η διαχωριστική ικανότητα εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της κεραίας. Μια κεραία μεγάλου μήκους επιτρέπει στο σύστημα να εστιάζει ενέργεια σε στενή περιοχή του εδάφους. Η αδυναμία όμως του αεροσκάφους να μεταφέρει μεγάλη κεραία αποτελεί και το πρακτικό όριο για καλή διαχωριστική ικανότητα στα συστήματα RAR.

Το πρόβλημα του πεπερασμένου μεγέθους της κεραίας λύθηκε με την ανάπτυξη των συστημάτων radar συνθετικού ανοίγματος SAR (Synthetic Aperture Radar). Το σύστημα SAR εκμεταλλεύεται την πρόσω κίνηση του αεροσκάφους και την αρχή του φαινομένου Doppler, συνθέτοντας έτσι μια πολύ μεγαλύτερη ‘εικονική’ κεραία (Σχήμα 6). Για παράδειγμα, με μια φυσική κεραία φυσικού μεγέθους 1 ή 2 m μπορούμε να συνθέσουμε κεραία 600 m, ενώ με μια κεραία μήκους 11 m μπορούμε να συνθέσουμε κεραία μήκους 15 km.



Σχήμα 1.6: Η διαδικασία σύνθεσης της κεραίας σε ένα σύστημα SAR, εκμεταλλεύοντας την μετατόπιση συχνότητας κατά Doppler^[5].

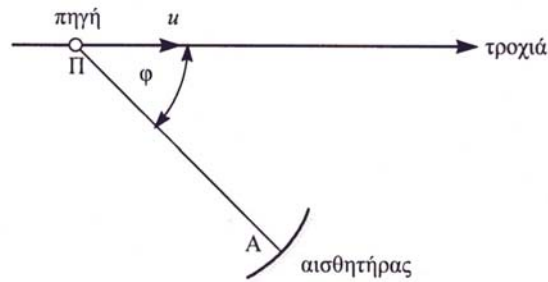
1.5 Φαινόμενο Doppler

Φαινόμενο Doppler καλούμε την μεταβολή στην συχνότητα που αντιλαμβάνεται ένας δέκτης σε σχέση με την συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού (ή ηχητικού) κύματος που εκπέμπει μια πηγή, όταν ο δέκτης και η πηγή βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Το φαινόμενο μπορεί να γίνει αντιληπτό στην καθημερινότητα. Για παράδειγμα εάν ένα τρέινο πλησιάζει ένα παρατηρητή, η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής είναι μεγαλύτερη από αυτήν στην περίπτωση που το τρέινο θα ήταν ακίνητο. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το τρέινο απομακρύνεται από τον παρατηρητή.

Έστω ότι μια πηγή Π μονοχρωματικής ακτινοβολίας κινείται κατά μια διεύθυνση, και ένας αισθητήρας A βρίσκεται υπό γωνία φ με την πηγή σε μια δεδομένη στιγμή όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. Ο αισθητήρας A θα δέχεται ακτινοβολία συχνότητας ν' διαφορετικής από την συχνότητα ν που εκπέμπει η πηγή Π . Η σχέση μεταξύ των δύο συχνοτήτων θα είναι:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{(1-\beta^2)\cos\varphi} \quad 2.4$$

όπου β ο λόγος της ταχύτητας u της πηγής προς την ταχύτητα c της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ή των ηχητικών κυμάτων) της πηγής.



Σχήμα 1.7: Η γεωμετρία του φαινομένου Doppler^[5].

Γενικά ισχύει ότι ο λόγος ταχυτήτων β είναι πολύ μικρός καθώς $u \ll c$ οπότε η μεταβολή στην συχνότητα $\Delta\nu$ δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση:

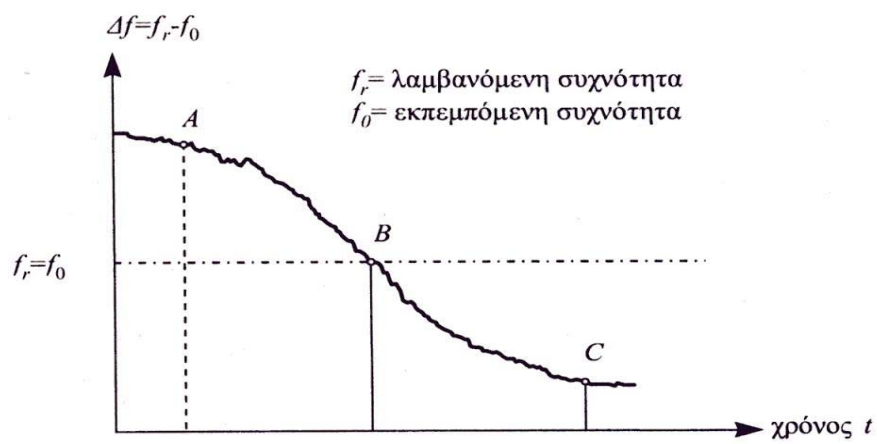
$$\Delta\nu = \nu' - \nu = \frac{\nu u}{c} \cos\varphi \quad 2.5$$

Το φαινόμενο Doppler εφαρμόζεται εκτενώς στα μικροκυματικά radar (SAR) για τον υπολογισμό της μεταβολής της συχνότητας. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η συχνότητα μεταβάλλεται αρχικά κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας από το radar έδαφος, λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ τους, και σαν δεύτερη φάση κατά την ανάκλαση της ακτινοβολίας από το έδαφος στο radar. Επομένως, η ολική μετατόπιση $\Delta\nu$ θα είναι διπλάσια της αρχικής:

$$\Delta\nu = \nu'' - \nu = \frac{2\nu u}{c} \cos\varphi = \frac{2u}{\lambda} \cos\varphi \quad 2.6$$

Ενδεικτικά να αναφέρουμε πως για ένα σκάφος που κινείται με ταχύτητα 300 m/s και εκπέμπει ακτινοβολία με συχνότητα 3×10^{10} Hz ή μήκος κύματος 1 cm, η τελική συχνότητα που λαμβάνεται θα έχει μεταβληθεί κατά $\Delta\nu = 6 \times 10^4$ Hz. Η σχετική μεταβολή είναι μόνο της τάξης του 2 ppm, παρόλ' αυτά είναι μετρήσιμη και χρήσιμη για τα συστήματα SAR.

Όπως προαναφέρθηκε τα συστήματα SAR χρησιμοποιούν την αρχή του φαινομένου Doppler. Η διαδικασία επεξεργασίας των σημάτων έτσι ώστε να φτάσουμε στην τελική εικόνα είναι αρκετά περίπλοκη. Το λαμβανόμενο σήμα, πέρα από τους χρόνους εκπομπής και λήψης της ακτινοβολίας από έναν στόχο στο έδαφος, περιλαμβάνει και την συχνότητα του παλμού που προέρχεται από τον συγκεκριμένο στόχο. Όταν ο στόχος εισέρχεται εντός του οπτικού πεδίου της δέσμης που εκπέμπεται από το αεροσκάφος, τότε το σήμα επιστροφής του στόχου είναι μετατοπισμένο προς υψηλότερες συχνότητες – θετικό Doppler. Όταν το αεροσκάφος είναι κάθετο προς την θέση του στόχου, τότε η συχνότητα δεν παρουσιάζει μετατόπιση – μηδενικό Doppler. Τέλος, όταν το σκάφος απομακρύνεται από τον στόχο, το σήμα επιστροφής έχει μικρότερη συχνότητα από τον εκπεμπόμενο παλμό – αρνητικό Doppler (Σχήμα 8). Οι διαφορές αυτές που εμφανίζονται μεταξύ της εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ακτινοβολίας καταγράφονται για κάθε στόχο και ονομάζονται ιστορικό φάσης (phase history)



Σχήμα 1.8: Το ιστορικό φάσης ενός στόχου λόγω Doppler^[5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εισαγωγή στην συμβολομετρία

Την ανάπτυξη των συστημάτων SAR διαδέχθηκε η τεχνική της δορυφορικής συμβολομετρίας, αξιοποιώντας εκτός από την ένταση (πλάτος του σήματος) και την φάση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας.

Όπως οποιοδήποτε ραδιοηλεκτρικό σήμα, η ακτινοβολία που επιστρέφει από το έδαφος στον ανιχνευτή έχει μια τιμή φάσης και κάποιο πλάτος. Το σύστημα SAR καταγράφει και τα δύο, παρέχοντας έτσι δεδομένα με την μορφή μιγαδικών αριθμών. Μετά την σύνθεση, για την παραγωγή της εικόνας SAR, η εικόνα εξακολουθεί να περιέχει τιμές πλάτους και φάσης για κάθε ξεχωριστό σημείο του εδάφους

- Το πλάτος αντιστοιχεί στην ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας και εξαρτάται από την ικανότητα του εδάφους να ανακλάσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς την κατεύθυνση του Radar. Ενδεικτικά, μια επιφάνεια από ήρεμο νερό, δεν επιστρέφει καθόλου ακτινοβολία στον ανιχνευτή, καθώς δρα ως καθρέπτης στέλνοντας την ακτινοβολία προς την αντίθετη κατεύθυνση. Παρόλ' αυτά τα περισσότερα φυσικά σώματα διαχέουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις, οπότε και προς τον ανιχνευτή. Οι πιο αποτελεσματικοί ανακλαστήρες είναι αυτοί που δημιουργούν διπλή ανάκλαση όπως ένα ζευγάρι καθρεπτών υπό κάθετη γωνία. Τέτοιες δομές είναι συνήθως τεχνητές, όπως οι πολυκατοικίες και τα πεζούλια των πεζοδρομίων στις αστικές περιοχές.
- Η φάση καθορίζεται από δύο παράγοντες: 1) από την λεγόμενη εσωτερική συμβολή (internal contribution) που εξαρτάται από την φύση του υλικού του εδάφους και τον τρόπο που αυτό μεταβάλλει την φάση λόγω ποικίλων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, και 2) από την διπλή διαδρομή που κάνει η ακτινοβολία μεταξύ του radar και του εδάφους (two-way path contribution). Η περιοχή του εδάφους που αντιπροσωπεύεται

από μία ψηφίδα στην εικόνα γενικά εμπεριέχει εκατοντάδες στοιχειώδεις στόχους, ο καθένας από τους οποίους συμβάλει διαφορετικά στην διαμόρφωση της τελικής τιμής φάσης και πλάτους της του εν λόγω εικονοστοιχείου. Παράλληλα, οι σχετικές θέσεις των στοιχειωδών στόχων προκαλούν μια μετατόπιση στην φάση (phase shift) καθώς η ακτινοβολία προσπίπτει σε αυτούς με διαφορετικούς χρόνους, από ότι στο κέντρο της ψηφίδας. Εφόσον το μήκος κύματος είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος της ψηφίδας, η μετατόπιση αυτή μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή. Ως αποτέλεσμα, η εσωτερική συμβολή, η οποία είναι αποτέλεσμα της συμβολής στόχων και επομένως εκατοντάδων μιγαδικών αριθμών, είναι εντελώς τυχαία. Εναντιθέσει η συμβολή λόγω της διπλής διαδρομής της ακτινοβολίας, είναι προσδιορίσιμη και αιτιοκρατική (deterministic) και είναι η μόνη που μπορεί να μετρηθεί και να αξιοποιηθεί με την μέθοδο της συμβολομετρίας.

Μαθηματικώς τις εικόνες SAR μπορούμε να τις εκφράσουμε ως ένα σύνολο μιγαδικών αριθμών για κάθε κυψελίδα διακριτού στοιχείου στο έδαφος:

$$P = I + j(\theta_{\text{int}} + \theta_{\text{path}})$$

όπου P: μιγαδικός αριθμός μιας ψηφίδας

I: το πλάτος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας.

θ_{int} : η φάση που οφείλεται στην εσωτερική συμβολή του στόχου

θ_{path} : η φάση που οφείλεται στην διπλή διαδρομή της ακτινοβολίας

2.2 Αρχή της συμβολομετρίας

Αν και οι τιμές της φάσης είναι εντελώς τυχαίες μεταξύ των ψηφίδων της εικόνας, ύπο ορισμένες προϋποθέσεις η εσωτερική συμβολή παραμένει η ίδια για μια ψηφίδα για δύο διαφορετικές λήψεις της εικόνας. Οι περισσότερες από τις προϋποθέσεις αυτές αφορούν την διατήρηση της γεωμετρίας της εικόνας κατά την λήψη και επεξεργασία του σήματος. Σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε έλλειψη συνοχής στις τιμές φάσεων (decorrelation),

κάτι που δυσχεραίνει την αξιοποίηση των τιμών. Γενικά τρεις είναι οι παράγοντες που συμβάλλουν στην δημιουργία αυτού του είδους θορύβου:

1) Μετατοπίσεις των στόχων (scatterer)

Σε περίπτωση υδάτινης μάζας, ή περιοχής με έντονη βλάστηση, οι στόχοι τείνουν να μετατοπιστούν σε χρονικό διάστημα λίγων millisecond. Αντίθετα βραχώδεις ή αστικές περιοχές αποτελούν στόχους που δεν μεταβάλλονται ακόμα και για χρόνια. Φυσικά υπάρχουν και οι ενδιάμεσες περιπτώσεις, όπου η συμβολομετρική φάση έχει αλλοιωθεί λόγω του θορύβου φάσης, σε τέτοιο όμως βαθμό, που να παραμένει χρήσιμη για διεξαγωγή ερμηνείας.

2) Διαφορετική γωνία παρατήρησης

Η φάση θα μεταβληθεί από το άθροισμα των επιστροφών ακτινοβολίας από τους στόχους, ακόμα και αν αυτοί δεν μετατοπίζονται κατά την πάροδο του χρόνου. Ως συνέπεια αυτού είναι ότι υπάρχει μια “κρίσιμη” μετατόπιση τροχιάς (baseline) κατά τις δύο λήψεις των εικόνων πάνω από την οποία η συμβολομετρική φάση είναι καθαρός θόρυβος. Η κρίσιμη μετατόπιση εξαρτάται από την διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση, από την συχνότητα του radar και από την απόσταση radar – στόχου. Στην περίπτωση του συστήματος ERS, η κρίσιμη μετατόπιση είναι περίπου 1150 μέτρα. Παρόλ'αυτά αυτό το είδος θορύβου φάσεως είναι δυνατόν να αφαιρεθεί με ειδική προεπεξεργασία των δύο εικόνων SAR με μία μέθοδο φιλτραρίσματος (common band filtering).

3) Μεταβολή στον όγκο των στόχων

Η κρίσιμη μετατόπιση μειώνεται σημαντικά όταν οι στοιχειώδεις στόχοι καταλαμβάνουν κάποιον όγκο, όπως στην περίπτωση πυκνής βλάστησης. Ο λόγος είναι ότι η φάση του σήματος είναι πολύ ευαίσθητο σε σχέση με την γωνία παρατήρησης. Οποιοσδήποτε μικρομεταβολές εντός του όγκου αυτού (π.χ. κινήσεις των φυλλωμάτων λόγω του ανέμου) επηρεάζουν σημαντικά την εσωτερική συμβολή, και αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που η ύπαρξη βλάστησης είναι προβληματική κατά την λήψη των εικόνων.

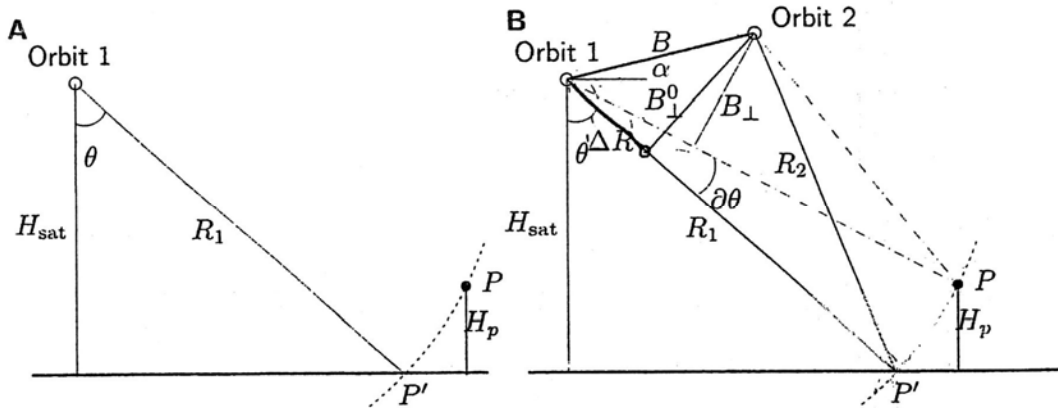
Κατά συμπέρασμα, οι διαφορές φάσεων μεταξύ δύο εικόνων της ίδιας περιοχής, που λήφθηκαν με συγκεκριμένο τρόπο, αφαιρεί την εσωτερική συμβολή και δίνει πρόσβαση σε χρήσιμες πληροφορίες, μέσω της συμβολής λόγω διπλής διαδρομής της ακτίνας, όπως θα δούμε παρακάτω με μαθηματικές σχέσεις. Κατά την επεξεργασία τους, είναι απαραίτητο οι δύο εικόνες να είναι απόλυτα εγγραφόμενες την μία πάνω στην άλλη χωρίς να αλλάξουμε τις τιμές φάσης, πριν υπολογίσουμε τις διαφορές φάσεων. Η ακρίβεια που απαιτείται είναι μεγάλη, καθώς τα σφάλματα πρέπει να περιοριστούν στα μερικά εκατοστά της διάστασης της ψηφίδας και φίλτρα παρεμβολής πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Στην αντίθετη περίπτωση όπου δεν έχουμε την απαιτούμενη ακρίβεια στην ταύτιση των δύο εικόνων, καλούμε πως έχουμε αποσυσχέτιση (decorrelation). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αποσυσχέτιση διακρίνεται σε δύο είδη:

- Χωρική αποσυσχέτιση: Προκαλείται όταν η γωνία παρατήρησης είναι αρκετά διαφορετική στις δύο λήψεις και επομένως δεν διατηρείται η ίδια γεωμετρία στις εικόνες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συνεγγραφούν (coregistered) επακριβώς
- Χρονική αποσυσχέτιση: Οφείλεται στο μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων, με αποτέλεσμα να έχουν επέλθει μεταβολές στην κατάσταση της επιφάνειας

Η διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων και υπολογισμού των διαφορών φάσεων για κάθε σημείο παράγει ένα διάγραμμα διαφορών φάσεων ονομαζόμενο συμβολογράφημα. Αυτές οι διαφορές είναι αναλογικές με τις διαφορές των χρόνων που έκανε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αν θεωρήσουμε πως η ταχύτητα διάδοσης είναι σταθερή, είναι επίσης αναλογικές με τις διαφορές των αποστάσεων μεταξύ radar και εδάφους, όπου 2π διαφορά φάσης αντιστοιχεί σε μισό μήκος κύματος.

Το σχήμα (2.1) δείχνει πως μετρήσεις της απόστασης δεν είναι ικανές να διαχωρίσουν δύο σημεία P και P', τα οποία βρίσκονται στην ίδια κεκλιμένη απόσταση, αλλά είναι

μετατοπισμένα στην οριζόντια απόσταση στο έδαφος. Αν και η ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας μας δίνει μια ενδείξεις τοπογραφίας, η πληροφορία δεν είναι ποσοτικοποιήσιμη σε ικανοποιητική ακρίβεια. Το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί με την παρατήρηση των γωνιακών διαφορών μεταξύ ενός σημείου αναφοράς P' (σώμα αναφοράς) και ενός σημείου P το οποίο βρίσκεται στην ίδια πλάγια απόσταση με το P' , αλλά σε ύψος H_p πάνω από αυτό. Το σημείο αναφοράς P' μπορεί να αντικατασταθεί με ένα πραγματικό σημείο γειτονικό του P . Η συμβολομετρία SAR καθιστά δυνατόν αυτόν τον υπολογισμό των γωνιών με την παρατήρηση των δύο σημείων από ελαφρώς διαφορετική θέση στον χώρο. Η ενεργή απόσταση των 2 θέσεων στις οποίες είναι οι ανιχνευτές, μετρημένη κάθετα στην γωνία παρατήρησης αναφέρεται ως κάθετη ή ενεργή μετατόπιση τροχιάς $B_\perp$ (perpendicular or effective baseline). Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα όργανα δεν μπορούν να μετρήσουν άμεσα τις μικρές γωνιακές διαφορές, αυτές πρέπει να εξαχθούν από τις αποστάσεις μεταξύ των ανιχνευτών και της κυψελίδας διακριτών στοιχείων P (resolution cell) στο έδαφος, χρησιμοποιώντας απλή τριγωνομετρία.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρική απεικόνιση της μεθόδου συμβολομετρίας^[1]. (Α) Τα σημεία P και P' βρίσκονται στην ίδια απόσταση και δεν μπορούν να διαχωριστούν στην εικόνα, ενώ η διαφορά της γωνίας θ δεν μπορεί να μετρηθεί. (Β) Παρατηρώντας τα σημεία ταυτόχρονα από ένα άλλο σημείο μπορούμε να υπολογίσουμε την διαφορά φάσης $\partial\theta$ και στην συνέχεια από την απόσταση R_1 και το ύψος του radar H_{sat} υπολογίζουμε το σημείο H_p .

Είδαμε προηγουμένως ότι μια κυψελίδα διακριτού στοιχείου στο έδαφος μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$P = I + j(\theta_{\text{int}} + \theta_{\text{path}})$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση του Euler, την οποία δεν θα αποδείξουμε εδώ, η έκφραση γίνεται:

$$P = |P| e^{j(\theta_{\text{int}} + \theta_{\text{path}})} = |P| e^{j\theta} \quad 2.8$$

Έστω τώρα πως έχουμε τον ίδιο στόχο στο έδαφος για τις δύο εικόνες SAR, P_1 και P_2 :

$$\begin{aligned} P_1 &= |P_1| \exp(j\theta_1) \\ P_2 &= |P_2| \exp(j\theta_2) \end{aligned} \quad 2.9$$

Πολλαπλασιάζοντας τώρα το P_1 με τον συζυγή του P_2 καταφέρνουμε να υπολογίσουμε την διαφορά μεταξύ των δύο φάσεων ($\theta_1 - \theta_2$):

$$z = P_1 P_2^* = |P_1| |P_2| \exp(j(\theta_1 - \theta_2)) \quad 2.10$$

Οι παρατηρούμενες τιμές φάσεως για τις δύο τροχιές στις 2 εικόνες για κυψελίδα διακριτών στοιχείων P (resolution cell) είναι:

$$\begin{aligned} \theta_{1p} &= -\frac{2\pi 2R_1}{\lambda} + \theta_{\text{int},1p} \\ \theta_{2p} &= -\frac{2\pi 2R_2}{\lambda} + \theta_{\text{int},2p} \end{aligned} \quad 2.11$$

όπου R_1 και R_2 είναι οι γεωμετρικές αποστάσεις και $\theta_{\text{int},1p}$ και $\theta_{\text{int},2p}$ η φάση λόγω εσωτερικής συμβολής στις δύο εικόνες. Στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά σκέδασης (scattering characteristics) είναι ίδια κατά την καταγραφή των εικόνων, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι $\theta_{\text{int},1p} = \theta_{\text{int},2p}$, και η διαφορά φάσης μπορεί να γραφτεί ως:

$$\phi_p = \theta_{1p} - \theta_{2p} = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad 2.12$$

ή :

$$\partial\phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda}\partial\Delta R \quad 2.13$$

Βάσει τριγωνομετρίας, η διαφορά στην απόσταση που διανύει η ακτινοβολία ΔR μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\Delta R = B \sin(\theta - a) \quad 2.14$$

Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή ως far-field ή parallel-ray προσέγγιση. Εξαιτίας της ασάφειας λόγω του κύκλου 2π και ανακρίβειες στην τροχιά δεν είναι δυνατόν να παραγάγουμε το ΔR από αυτήν την σχέση. Παρολ'αυτά μπορούμε εύκολα να βρούμε την σχέση μεταξύ των αλλαγών στο ΔR και στο θ :

$$\partial\Delta R = B \cos(\theta^0 - a) \partial\theta \quad 2.15$$

όπου η αρχική τιμή του θ^0 λαμβάνεται για την επιφάνεια αναφοράς. Συνδυάζοντας τις 2.13 και 2.15 βρίσκουμε την σχέση μεταξύ των μεταβολών στην συμβολομετρική φάση και στην γωνία παρατήρησης θ :

$$\partial\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - a) \partial\theta \quad 2.16$$

Η μεταβολή στην συμβολομετρική φάση μπορεί να οριστεί ως η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης (unwrapped) φάσης ϕ και της αναμενόμενης φάσης θ ως προς ένα σώμα αναφοράς, όπως εξάγεται από την γεωμετρία της τροχιάς, οπότε:

$$\partial\phi = \phi - \theta \quad 2.17$$

Το ύψος του δορυφόρου πάνω από το σώμα αναφοράς είναι γνωστό και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$H_{sat} = R_1 \cos \theta \quad 2.18$$

Η παραγοντοποίηση της σχέσης αυτής μας δίνει την σχέση μεταξύ μιας μεταβολής της γωνίας παρατήρησης θ λόγω διαφοράς ύψους ∂H_{sat} :

$$\partial H_{sat} = -H_p = -R_{lp} \sin \theta_p^0 \partial \theta \quad 2.19$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.17) και (2.19) παράγουμε την σχέση μεταξύ του ύψους H_p και την διαφορά στην φάση $\partial \phi_p$:

$$H_p = -\frac{\lambda R_{lp} \sin \theta_p^0}{4\pi B_{\perp,p}^0} \partial \phi_p \quad 2.20$$

όπου

$$B_{\perp,p}^0 = B \cos(\theta_p^0 - a)$$

Η αρχική τιμή θ_p^0 λαμβάνεται για μια αυθαίρετη επιφάνεια αναφοράς, όπως σφαίρα ή ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Επαναλήψεις χρησιμοποιούνται για να βρούμε νέες τιμές της θ_p για ένα συγκεκριμένο ύψος πάνω από αυτήν την επιφάνεια αναφοράς. Θεωρώντας $\partial \phi_p = 2\pi$ υπολογίζουμε την διαφορά ύψους που αντιστοιχεί σε μετατόπιση φάσης 2π , το λεγόμενο ύψος ασάφειας (height of ambiguity):

$$h_a = \left| \frac{\lambda R_{lp} \sin \theta_p^0}{2\pi B_{\perp,p}^0} \right| \quad 2.21$$

Το μέτρο του h_a μας δείχνει την επίδραση που έχει η τοπογραφία της περιοχής στο συμβολογράφημα. Για παράδειγμα, ένα ζευγάρι εικόνων που έχει ύψος ασάφειας ίσο με 300 μέτρα, αλλά οι υψομετρικές διαφορές στην περιοχή φτάνουν τα 500 μέτρα, το συμβολογράφημα θα εμφανίσει συμβολή λόγω τοπογραφίας που είναι παρόμοιοι με τις υσοΰνεις καμπύλες.

Για να ολοκληρώσουμε τον υπολογισμό, συνδυάζουμε τις επιδράσεις της τοπογραφίας H_p και της επιφανειακής μετατόπισης των δύο στόχων D_p στις διαφορές που

εμφανίζονται στην συμβολομετρική φάση, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.13), (2.15) και (2.20):

$$\partial\phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(D_p - \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{lp} \sin \theta_p^0} H_p \right) \quad 2.22$$

Εφόσον η μετρούμενη συμβολομετρική φάση είναι το άθροισμα της φάσης αναφοράς θ και των μεταβολών της :

$$\phi_p = \mathcal{G}_p + \partial\phi_p \quad 2.23$$

και η φάση αναφοράς ορίζεται από την σχέση

$$\mathcal{G}_p = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_p^0 - a) \quad 2.24$$

καταλήγουμε στην σχέση:

$$\phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} \left(B \sin(\theta_p^0 - a) - D_p - \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{lp} \sin \theta_p^0} H_p \right) \quad 2.25$$

Χρησιμοποιώντας παραμέτρους του ERS, μια ενεργή μετατόπιση τροχιάς (effective baseline) ενός μέτρου μας δίνει διαφορά στην συμβολομετρική φάση της τάξεως των 4.5 μοιρών, που είναι αρκετά χαμηλότερα από το επίπεδο θορύβου που είναι 40 μοίρες, επομένως δεν ανιχνεύεται. Μια επιφανειακή μετατόπιση όμως της τάξης του ενός εκατοστού στην διεύθυνση της πλάγιας απόστασης μας δίνει διαφορά φάσης 127 μοίρες, η οποία ανιχνεύεται εύκολα.

2.3 Περιορισμοί κατά την εφαρμογή

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να εφαρμοστούν μόνο υπό κάποιες προϋποθέσεις:

1) Σταθερότητα της κατάστασης της επιφάνειας

Για να μπορέσουμε να παραβλέψουμε την εσωτερική συμβολή (internal contribution) κατά τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο εικόνων, θα πρέπει οι στοιχειώδεις στόχοι στην επιφάνεια να παραμείνουν όσο το δυνατόν πιο σταθεροί, σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε αποσυσχέτιση. Βραχύδεις και αστικές περιοχές για παράδειγμα εξασφαλίζουν μεγάλη σταθερότητα, σε αντίθεση με υδάτινες μάζες. Οι αγροτικές περιοχές μπορούν να θεωρηθούν σταθερές μόνο για κάποιες μέρες ή εβδομάδες. Εξαιρώντας τις ακραίες αυτές συνθήκες, η σταθερότητα της επιφάνειας εξαρτάται κυρίως από το κάλυμμα βλάστησης και το πώς το radar το αντιλαμβάνεται. Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος διαπερνά τμήμα του εδάφους, δίνοντας έτσι σήμα που είναι συγκροτημένο (composed) όσον αφορά τουλάχιστον στην εσωτερική συμβολή του εδάφους. Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την σταθερότητα της εσωτερικής συμβολής, κάθε συμβολογράφημα διαφορών φάσεων συνοδεύεται και από μία εικόνα «συνοχής» (coherency image), υποδεικνύοντας την σταθερότητα της κατάστασης των δύο εικόνων, επομένως και στην αξιοπιστία των τιμών φάσεων στο συμβολογράφημα.

Η εικόνα ή αλλιώς ο χάρτης συνοχής κατασκευάζεται υπολογίζοντας την τοπική συνοχή με την βοήθεια ενός μετακινούμενου παραθύρου διαστάσεων μερικών ψηφίδων στο αξιμουθίο και την απόσταση. Για κάθε παράθυρο λαμβάνει τιμή από με την σχέση:

$$C_{i,j} = 255 \frac{\left\| \sum_{i,j} z_{12} \right\|}{\sum_{i,j} \|z_{12}\|} \quad 2.26$$

όπου z_{12} όπως προκύπτει από την σχέση 2.10

Η τοπική συνοχή ουσιαστικά είναι ο συντελεστής συσχέτισης του ζευγαριού των εικόνων για τις τιμές έντασης και φάσης κατά τις δύο διευθύνσεις του αξιμουθίου και της απόστασης. Οι τιμές συνοχής λαμβάνουν τιμές από 0, όταν η συμβολομετρική φάση είναι καθαρός θόρυβος, έως την τιμή 1, όταν έχουμε απουσία θορύβου φάσεως.

2) Σταθερότητα κατά την λήψη

Μια άλλη συνθήκη, γεωμετρικής φύσεως, αφορά την διαφορά στην γωνία παρατήρησης μεταξύ των δύο εικόνων για τον ίδιο στόχο. Η διαφορά της γωνίας πρόσπτωσης τοπικά μεταβάλλει την μετατόπιση φάσης (phase shift) μεταξύ των στοιχειωδών στόχων μιας ψηφίδας εδάφους. Από την φασική μετατόπιση εξαρτάται άμεσα η εσωτερική συμβολή της ψηφίδας, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των τροχιών μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαφορά στην εσωτερική συμβολή. Αυτό θέτει κάποιους περιορισμούς στην μετατόπιση των τροχιών των δύο εικόνων (baseline). Για παράδειγμα για τον ERS η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από ένα χιλιόμετρο. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι δορυφόροι παρατήρησης έχουν τροχιά η οποία επαναλαμβάνεται ακριβώς μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, με ακρίβεια συνήθως αρκετά καλύτερη του ενός χιλιομέτρου. Ένα μέγεθος το οποίο μας βοηθάει να ελέγξουμε την σταθερότητα, και αναφέρθηκε προηγουμένως με την σχέση (2.21) είναι το λεγόμενο ύψος ασάφειας (height of ambiguity).

3) Ρυθμός μεταβολής φάσης (phase gradient)

Κατά το χρονικό διάστημα των δύο λήψεων η μεταβολή της διαφοράς φάσης δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποια τιμή πάνω από την οποία έχουμε απόλυτη αποσυσχέτιση των δεδομένων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι τιμές φάσης αποτελούνται από το δεκαδικό μέρος των κύκλων μόνο, οπότε μεταβολή φάσης πάνω από έναν κύκλο (2π) οδηγεί σε επικάλυψη των τιμών. Η μέγιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής φάσης δίνεται από την σχέση B_R/f_s κύκλοι ανά εικονοστοιχείο όπου B_R είναι το εύρος της συχνότητας του παλμού και f_s ο ρυθμός δειγματοληψίας του σήματος. Για τον ERS ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός φάσης είναι περίπου 0,822 κύκλοι ανά εικονοστοιχείο.

Σε περίπτωση παραμόρφωσης του εδάφους, ο ρυθμός μεταβολής της φάσης δεν πρέπει να ξεπερνά τους 0,822 κύκλους ανά εικονοστοιχείο στην διεύθυνση παρατήρησης του radar. Αυτό μεταφράζεται σε 2,9 χιλιοστά ανά μέτρο στις διαστάσεις τις εικόνας. Εάν

έχουμε βαθμιαία παραμόρφωση, τότε θα πρέπει να επιλέξουμε εικόνες με χρονικά διαστήματα τέτοια έτσι ώστε να μην προσεγγιστεί η μέγιστη κλίση παραμόρφωσης. Συνεπάγεται ότι ορισμένες γρήγορες παραμορφώσεις, όπως σε περίπτωση παγετώνων, δεν μπορούν να υπολογιστούν εάν δώσουν αυτήν την κλίση σε χρόνο μικρότερο του κύκλου τροχιάς του δορυφόρου.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η μέγιστη τιμή της κάθετης μετατόπισης τροχιάς για τις δύο λήψεις (perpendicular baseline) στα 1100 μέτρα περίπου. Η τιμή αυτή ορίζεται ως κρίσιμη μετατόπιση τροχιάς και μεταβάλλεται τοπικά σε σχέση με την κλίση του εδάφους. Γενικά όταν το έδαφος κλίνει προς το radar, λαμβάνει μικρότερες τιμές, που σημαίνει πως για περιοχές με έντονο ανάγλυφο θα πρέπει να επιλέγουμε ζευγάρια εικόνων με μικρότερη μετατόπιση τροχιάς ή μεγαλύτερο ύψος ασάφειας (height of ambiguity).

4) Ασάφεια (ambiguity)

Οι τιμές φάσεως δίνονται μόνο σε μη ακέραια τμήματα ενός κύκλου 2π . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλα τα αποτελέσματα να είναι ασαφή (ambiguous): γνωρίζουμε τις σχετικές μετατοπίσεις φάσεως για την περιοχή αλλά όχι τις απόλυτες τιμές. Η συμβολομετρία υπολογίζει τα υψόμετρα στην κλίμακα του ύψους ασάφειας h_a και τις κινήσεις του εδάφους προς τον δορυφόρο στην κλίμακα του μισού μήκους κύματος. Πολλές τεχνικές “ξεδιπλώματος” της συμβολομετρικής φάσης (phase unwrapping) έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί έτσι ώστε από τις συσχετιζόμενες αυτές τιμές να πάρουμε απόλυτα τιμές υψομέτρου ή παραμόρφωσης. Για παράδειγμα με την χρήση τέτοιων τεχνικών είναι δυνατόν από ένα συμβολογράφημα το οποίο έχει πολλούς κροσσούς λόγω τοπογραφίας (π.χ. λόγω μικρού ύψους ασάφειας) να δημιουργήσουμε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής.

5) Συνοχή (Continuity)

Απόλυτες μετρήσεις της κίνησης του εδάφους απαιτούν χωρική συνέχεια μεταξύ του εδάφους και ενός σημείου αναφοράς που θεωρείται σταθερό. Στην περίπτωση για παράδειγμα που μελετάμε μετατοπίσεις σε ένα νησί, ο μη-συσχετίσιμος χαρακτήρας της θάλασσας καθιστά αδύνατη την χρήση ενός γεωδαιτικού σημείου αναφοράς που βρίσκεται στην ηπειρωτική γη. Μια ασυνέχεια είναι ανεκτή παρόλ' αυτά αν είναι μικρή σε σχέση με τα διαστήματα των κροσσών συμβολής, όπως ένα μικρό ποτάμι σε μια περιοχή με μικρή κλίση παραμόρφωσης.

2.4 Ερμηνεία συμβολογραφήματος

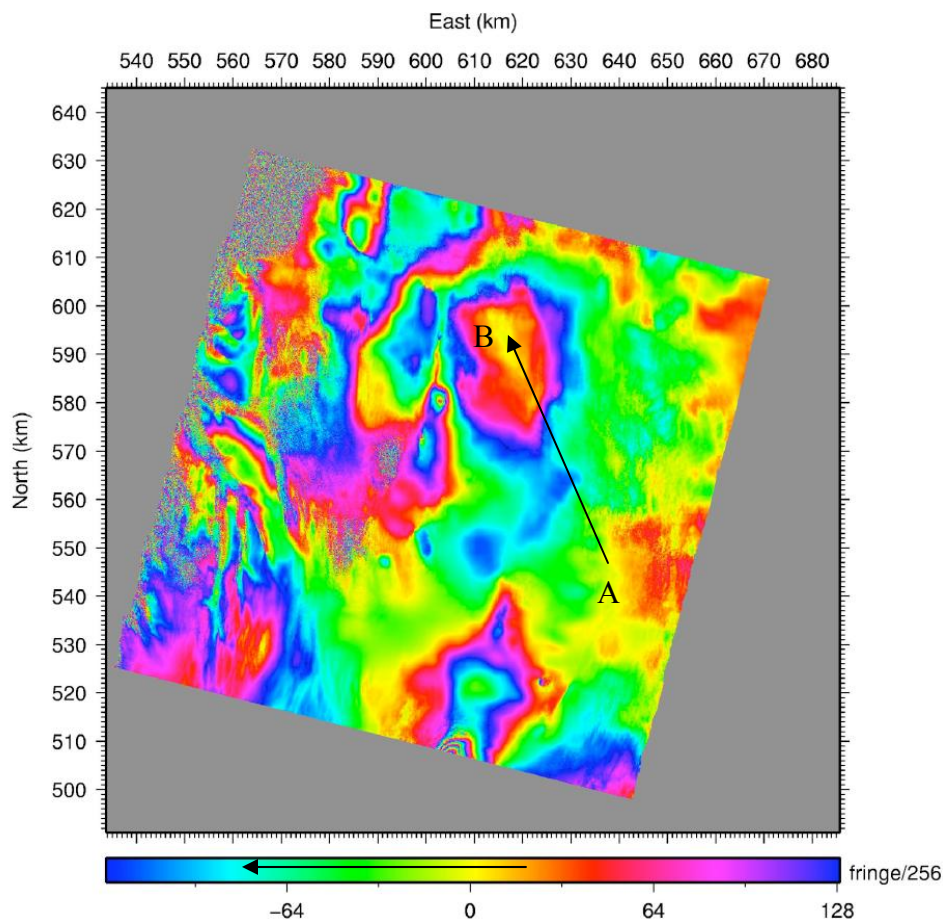
Το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω, και ιδιαίτερα στην ενότητα 2.2 είναι ένα συμβολογράφημα της μορφής που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (2.2). Ουσιαστικά το συμβολογράφημα εκφράζει ένα πεδίο *μεταβολών της διαφοράς φάσης*, εφαρμοζόμενο για οποιαδήποτε τμήμα της περιοχής.

Γειτονικές καμπύλες του ίδιου χρώματος, δηλαδή δύο διαδοχικοί κροσσοί συμβολής αντιπροσωπεύουν μετατόπιση της τάξεως του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων και για την συγκεκριμένη περιοχή. Στην περίπτωση π.χ. του ERS όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι 5,6 cm, η εδαφική μετατόπιση που εκφράζει ένας κροσσός στο συμβολογράφημα θα ισούται ακριβώς με $\lambda/2$, δηλαδή 2,8 cm. Αυτό οφείλεται στην διπλή διαδρομή που κάνει η ακτινοβολία: μία από τον πομπό έως τον στόχο και μία από τον στόχο έως τον δέκτη. Επομένως η διαφορά φάσης λόγω της απόστασης radar – στόχου θα έχει διπλασιαστεί μέχρι να επιστρέψει η ακτινοβολία στο radar.

Πώς όμως γνωρίζουμε την κατεύθυνση των μετατοπίσεων που εκφράζονται στο συμβολογράφημα; Αυτό που ουσιαστικά μας δίνει το συμβολογράφημα είναι η διαφορά της κεκλιμένης απόστασης (slant range) μεταξύ radar και εδάφους για το ίδιο σημείο στο χρονικό διάστημα των δύο λήψεων. Το αποτέλεσμα είναι όλες οι μετατοπίσεις να

υπολογίζονται κατά την διεύθυνση στόχου – radar (line of sight, LOS). Το μόνο που μας μένει να προσδιορίσουμε είναι η φορά των μετατοπίσεων, δηλαδή εάν ο στόχος πλησιάζει ή απομακρύνεται από το radar.

Έστω πως έχουμε μια απόσταση $A - B$ στην περιοχή που εξετάζουμε, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στα σύγχρονα λογισμικά προγράμματα το συμβολογράφημα συνοδεύεται από λωρίδα χρωμάτων που χρησιμεύει στην αντιστοιχία των θετικών και αρνητικών διαφορών φάσης ($-\pi$, π) με χρώματα. Αν κατά την διεύθυνση $A - B$ οι διαφορές φάσης τείνουν προς το $-\pi$, αυτό σημαίνει (σύμφωνα και με την σχέση 2.25) ότι μεταξύ των δύο λήψεων το σημείο B ως προς το σημείο A πλησίασε προς τον δορυφόρο, άρα ανυψώθηκε. Επισημαίνεται ξανά ότι η υπολογισμένη μετατόπιση αναφέρεται μόνο ως προς ένα άλλο σημείο αναφοράς της εικόνας το οποίο θεωρείται σταθερό (reference point, στην συγκεκριμένη περίπτωση του σημείου A), κάτι που δεν αποτελεί απόλυτη μέτρηση μετατόπισης. Η επιλογή του σημείου αναφοράς θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά, καθώς μπορεί να επηρεάσει την ερμηνεία του συμβολογραφήματος.



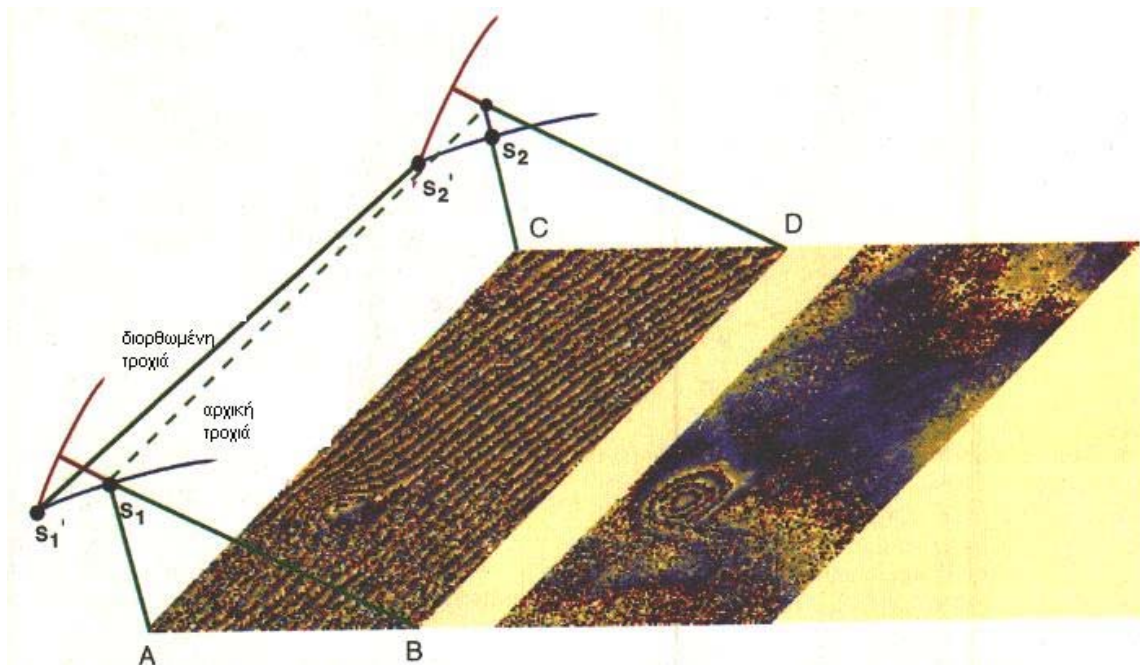
Σχήμα 2.2: Ένα τυπικό συμβολογράφημα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να υπολογίσουμε την μετατόπιση του εδάφους που είχαμε σε μια απόσταση δύο σημείων αρκεί να μετρήσουμε τους παρεμβαλλόμενους κροσούς και να πολλαπλασιάσουμε με $\lambda/2$. Φυσικά η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί όταν ήμαστε σίγουροι πως οι κροσοί συμβολής έχουν προκληθεί μόνο από την μετατόπιση του εδάφους.. Στην πραγματικότητα αυτό είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί καθώς υπάρχει μια σειρά παραγόντων που συμβάλλουν στην δημιουργία κροσσών.

Συμβολή από τις τροχιές

Το συμβολογράφημα δύο εικόνων radar παρουσιάζει πολλούς κροσούς συμβολής, κυρίως λόγω της αναπόφευκτης διαφοράς μεταξύ των δύο τροχιών του radar κατά τις

δύο λήψεις. Η διαφορά της απόστασης από το έδαφος έως τις δύο τροχιές είναι αρκετά μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, δημιουργώντας έτσι έναν μεγάλο αριθμό από «τροχιακούς» κροσσούς συμβολής (Σχήμα 2.3). Οι τροχιές είναι συνήθως γνωστές με μεγάλη ακρίβεια οπότε μπορούμε να αφαιρέσουμε την συμβολή τους από το συμβολογράφημα, αποκαλύπτοντας έτσι διαφορές φάσης από άλλα αίτια που μας ενδιαφέρουν περισσότερο, όπως είναι η τοπογραφία ή τυχόν κινήσεις του εδάφους.



Σχήμα 2.3: Η επίδραση της τροχιάς στο συμβολογράφημα^[3].

Συμβολή από την τοπογραφία

Η παρατήρηση του εδάφους από δύο ελαφρώς διαφορετικά σημεία μας δίνει ένα στερεοσκοπικό αποτέλεσμα που αναδεικνύει το ανάγλυφο της περιοχής με την μορφή κροσσών συμβολής, αντίστοιχων των ισοϋψών καμπυλών (Σχήμα 2.4). Η διαφορά του ύψους δύο διαδοχικών τέτοιων κροσσών ονομάζεται ύψος ασάφειας (height of ambiguity) και αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά την μαθηματική ερμηνεία της συμβολομετρίας, με την σχέση 2.21. Το ύψος ασάφειας μπορεί να έχει τιμή μερικών

μέτρων όταν η διαφορά των δύο τροχιών είναι η μέγιστη που η τεχνική συμβολομετρίας μπορεί να δεχτεί, οπότε έχουμε και μέγιστο στερεοσκοπικό αποτέλεσμα, ή να τείνει έως το άπειρο, στην περίπτωση που τα σημεία λήψεως των δύο εικόνων συμπίπτουν ακριβώς, οπότε δεν έχουμε στερεοσκοπικό αποτέλεσμα. Όταν η τοπογραφία της περιοχής είναι γνωστή με ακρίβεια τουλάχιστον της τάξης του ύψους συνάφειας, τότε είναι δυνατόν να αφαιρέσουμε τους κροσσούς λόγω τοπογραφίας από το συμβολογράφημα έτσι ώστε να φέρουμε στην επιφάνεια τους άλλους παράγοντες συμβολής.



Σχήμα 2.4: Ένα συμβολογράφημα προβαλλόμενο πάνω σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Φαίνεται καθαρά πως οι κροσσοί οφείλονται στην τοπογραφία, από τον τρόπο που επηρεάζονται από αυτήν^[3].

Συμβολή από κινήσεις του εδάφους

Οποιαδήποτε κίνηση ενός τμήματος του εδάφους στην εικόνα φαίνεται σαν μια μετατόπιση στην φάση ανιχνεύσιμη ως προς την σταθερότητα φάσης των υπολοίπων

σημείων της εικόνας. Εάν μια ομάδα ψηφίδων μετακινηθεί κατά ένα εκατοστό στην διεύθυνση παρατήρησης του radar, κατά την λήψη των δύο εικόνων, τότε η διπλή διαδρομή της ακτινοβολίας αλλάζει κατά δύο εκατοστά , ή 40% περίπου του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στον ERS-1. Αυτή η διαφορά είναι εύκολα ανιχνεύσιμη. Στην πράξη, κίνηση μισού μήκους κύματος στην διεύθυνση του radar δημιουργεί έναν κροσσό συμβολής.

Ατμοσφαιρική συμβολή

Ετερογενείς αλλαγές στην κατάσταση της ατμόσφαιρα μπορούν να οδηγήσουν σε μετατόπιση της φάσης, λόγω των μικρών μεταβολών στην ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Αυτές οι τοπικές μετατοπίσεις είναι γενικά μικρότερες από π κύκλους. Παρόλ'αυτά έχουν παρατηρηθεί μεταβολές στην φάση μέχρι και ενός κροσσού συμβολής, για συστήματα ERS-1, που μπορούν να αποδοθούν στην μείωση της πυκνότητας ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας, ή τριών με τεσσάρων κροσσών που συνδέθηκαν με τον σχηματισμό έντονης συννεφιάς. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε μετατόπιση φάσης είναι οι άνεμοι έντασης σε μεγάλο υψόμετρο και οι ομογενείς αλλαγές στην πίεση, θερμοκρασία και υγρασία στην ατμόσφαιρα, μεταξύ των δύο λήψεων.

Άλλοι παράγοντες

Σε μερικές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί κροσσοί συμβολής εξαιτίας του εξοπλισμού που χρησιμοποιούμε κατά την λήψη των δύο εικόνων. Πιο συγκεκριμένα, ο ταλαντωτής που παράγει την ακτινοβολία και είναι υπεύθυνος για το μήκος κύματος της, μπορεί να λειτουργήσει με σταθερό τρόπο μόνο για ορισμένο χρόνο, της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται στις δύο εικόνες να διαφέρει κατά ελάχιστα, παράγοντας «παλμούς». Οι παλμοί αυτοί παρουσιάζονται ως κροσσοί συμβολής που είναι κάθετοι προς την τροχιά του radar.

Άλλος παράγοντας που είναι ικανός να δημιουργήσει θόρυβο στο συμβολογράφημα είναι η αλλαγή των ραδιοηλεκτρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας της προς μελέτη περιοχής κατά την χρονική διάρκεια μεταξύ των λήψεων. Τέτοια αλλαγή μπορεί να παρατηρηθεί είτε από ανθρωπογενείς δράσεις στην περιοχή, είτε από μεταβολή της εμπεριεχόμενης υγρασίας στο έδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

DIAPASON

3.1 Διαφορική συμβολομετρία (Differential Interferometry)

Η διαφορική συμβολομετρία στοχεύει στον υπολογισμό των παραμορφώσεων του εδάφους χρησιμοποιώντας εικόνες SAR που έχουν ληφθεί σε διαφορετικούς χρόνους (repeat-pass interferometry). Εφόσον οι μεταβολές που βρίσκονται εντός του πεδίου παρατήρησης εισέρχονται απευθείας στο συμβολογράφημα, ανεξαρτήτου μετατόπισης (baseline), μπορούν να εκφραστούν ως τμήμα του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Δυστυχώς τα μη μηδενικά baselines πάντα θα προκαλούν κάποιες αποκλίσεις λόγω της τοπογραφίας. Η απόσταση των δορυφόρων μεταξύ τους κάθετα στην διεύθυνση παρατήρησης (effective baseline) πάντα θα αποκλίνει από το μηδέν καθώς i) είναι αδύνατο να μεταβάλλουμε έτσι την τροχιά του δορυφόρου ώστε να έχουμε μηδενικό baseline, και ii) η απόσταση των τροχιών εξαρτάται και από την γωνία παρατήρησης, η οποία μεταβάλλεται κατά μήκος της εικόνας, έτσι ακόμα και αν σε κάποια περιοχή της εικόνας έχουμε μηδενική απόσταση τροχιών αυτό δεν θα ισχύει και για τις υπόλοιπες.

Φυσικά το αν η απόσταση τροχιών προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις στο συμβολογράφημα εξαρτάται και από την τοπογραφία, δηλαδή το πόσο έντονο είναι το ανάγλυφο. Μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο και μεγάλη απόσταση τροχιών θα δώσει πολλούς κροσσούς λόγω τοπογραφίας, ενώ σε μια ομαλότερη περιοχή το πρόβλημα δεν θα είναι τόσο έντονο. Την επίδραση της τοπογραφίας μας την δείχνει το ύψος αμφισυνάφειας - συνοχής (altitude of ambiguity) (βλ. Κεφ. 2).

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την κατασκευή ενός διαφορικού συμβολογραφήματος. Η συνηθέστερη από αυτές, η μέθοδος των δύο περασμάτων (two-pass method), χρησιμοποιεί δύο εικόνες SAR, A και B και ένα μοντέλο ψηφιακού αναγλύφου (Digital Elevation Model, DEM). Το DEM χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των κροσσών συμβολής λόγω τοπογραφίας από το συμβολογράφημα μεταξύ των εικόνων A και B.

Ασφαλώς τυχόν σφάλματα στο DEM θα υπεισέλθουν στο συμβολογράφημα με την μορφή κροσσών που ακολουθούν την τοπογραφία.

Μια δεύτερη μέθοδος είναι η καλούμενη μέθοδος των τριών περασμάτων (three-pass method). Στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιείται έτοιμο DEM της περιοχής. Εναντιθέσει χρησιμοποιείται μία επιπλέον λήψη SAR (π.χ. εικόνα Γ) η οποία συνδυάζεται με μία από τις εικόνες Α ή Β για την δημιουργία ενός συμβολογραφήματος ενδεικτικού της τοπογραφίας της περιοχής. Πρόκειται για το καλούμενο *τοπογραφικό ζευγάρι*. στο οποίο θεωρούμε ότι 1) δεν έχουμε εδαφικές παραμορφώσεις, 2) η μετατόπιση τροχιάς είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχει ευαισθησία στην τοπογραφία, και 3) οι δύο εικόνες παρουσιάζουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους (coherent). Το συμβολογράφημα που προκύπτει από το ζευγάρι αυτό αφαιρείται από το αντίστοιχο των Α και Β, δίνοντας έτσι το καλούμενο διαφορικό συμβολογράφημα.

Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε την μέθοδο των τριών περασμάτων, χρησιμοποιώντας το τοπογραφικό ζευγάρι εικόνων Α και Γ, και το ζευγάρι παραμόρφωσης εικόνων Α και Β, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την επίδραση της διαφοράς της μετατόπισης τροχιάς ανάμεσα στα δύο ζευγάρια.. Η μέθοδος τριών περασμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν ανάμεσα στα δύο ζευγάρια η μία εικόνα είναι κοινή. Η εικόνα αυτή χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση των δύο ζευγαριών. Εξαιτίας των περιορισμένων συνδυασμών εικόνων που είναι διαθέσιμα για μια περιοχή, είναι δυνατόν να μην μπορέσουμε να επιλέξουμε τοπογραφικό ζευγάρι και ζευγάρι μετατόπισης με κοινή εικόνα μεταξύ τους. Επομένως είναι δυνατόν όλα τα υποψήφια ζευγάρια εικόνων να μας δίνουν απαγορευτικά μεγάλη μετατόπιση τροχιάς. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να επιλέξουμε την μέθοδο τεσσάρων περασμάτων (four-pass method) στην οποία το τοπογραφικό ζευγάρι και το ζευγάρι παραμορφώσεων δεν έχουν μεταξύ τους κοινή λήψη. Εφόσον τα δύο ζευγάρια μπορούν να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους τότε η μέθοδος είναι συγκρινόμενη με αυτή των τριών περασμάτων, αν και δυσκολίες στην ευθυγράμμιση ή τυχόν μεταβολές της ατμόσφαιρας για καποια των λήψεων καθιστούν την μέθοδο τεσσάρων περασμάτων δυσκολότερη στην εφαρμογή.

3.2 Το λογισμικό Diapason

Το εργαστήριο Γεωδαισίας & Γεωπληροφορικής χρησιμοποιεί το λογισμικό πρόγραμμα DIAPASON (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature). Πρόκειται για ένα προϊόν του τμήματος δορυφορικών συστημάτων της Γαλλικής Εταιρίας Διαστήματος, CNES (French Space Agency), και παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας διαφορικών συμβολογραφημάτων με την μέθοδο των δύο περασμάτων.

Δεδομένα που απαιτούνται πριν την εκκίνηση του προγράμματος:

1. Εικόνες SAR

Οι εικόνες radar που μπορεί το λογισμικό Diapason να επεξεργαστεί προέρχονται από τους δορυφόρους ERS, RADARSAT, JERS και ENVISAT. Γενικά παρέχονται σε δύο τύπους: RAW ή SLC (Single Look Complex). Οι εικόνες τύπου RAW περιλαμβάνουν τα πρωτογενή δεδομένα του radar αυτούσια, χωρίς αυτά να έχουν υποστεί καμιά επεξεργασία. Η επεξεργασία τους (focusing) οδηγεί στην δημιουργία εικόνων τύπου SLC οι οποίες είναι καλύτερης χωρικής ανάλυσης. Η μετατροπή των SAR εικόνων από RAW σε SLC είναι γνωστή ως focusing και βασίζεται σε μετρήσεις της συχνότητας Doppler (βλ. Κεφ. 1). Γενικά στην συμβολομετρία προτιμούνται οι εικόνες RAW, καθώς αποτελούν όπως είπαμε πρωτογενή δεδομένα και είναι πιο φθηνές από τις εικόνες τύπου SLC.

Οι εικόνες προμηθεύονται σε format τύπου CEOS το οποίο έχει καθιερωθεί από την Επιτροπή Δορυφορικών Παρατηρήσεων της Γης (Committee on Earth Observation Satellites, CEOS). Αποτελούνται από τέσσερα αρχεία:

- 6) αρχεία VDF και Leader: περιλαμβάνουν γενικές πληροφορίες για την εικόνα, όπως γεωμετρία, μέγεθος, ώρα λήψης, ταυτότητα τροχιάς κ.α.

- 7) αρχείο Data : είναι το αρχείο το οποίο περιλαμβάνει ουσιαστικά όλη την καταγραφή του σήματος (τιμές έντασης, φάσης και αλλαγής συχνότητας για κάθε σημείο στο έδαφος)
- 8) αρχείο null: είναι ένα κενό αρχείο το οποίο υποδηλώνει το τέλος των δεδομένων, και δεν έχει καμία πρακτική αξία κατά την επεξεργασία των εικόνων.

2. Μοντέλο ψηφιακού εδάφους (Digital Elevation Model, DEM)

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το διαφορικό συμβολογράφημα, θα πρέπει πρώτα να απαλείψουμε τους κροσσούς τοπογραφίας. Αυτό γίνεται με την διάθεση σε ψηφιακή μορφή, γνωστή ως Μοντέλο Ψηφιακού Εδάφους (Digital Elevation Model, DEM) του τοπογραφικού αναγλύφο της υπό μελέτη περιοχής. Δεν απαιτείται μεγάλη οριζοντιογραφική ακρίβεια του Μ.Ψ.Ε . Αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι το ύψος ασάφειας του συμβολογραφήματος. Συγκεκριμένα, για μεγάλο ύψος ασάφειας η ακρίβεια που απαιτείται στην τοπογραφία είναι μικρή. Κατά την διαδικασία υπολογισμού του συμβολογραφήματος το Μ.Ψ.Ε αξιοποιείται στα παρακάτω βήματα:

1) Καθορισμός της απόλυτης θέσης μια εικόνας στην περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία μιας πλαστής εικόνας (simulated image), – οι τιμές έντασης της οποίας εξαρτώνται μόνο από την κλίση του εδάφους της περιοχής – και την σύγκρισή της με την πραγματική εικόνα. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης της μισής κυψελίδας διακριτών στοιχείων του Μ.Ψ.Ε που χρησιμοποιήθηκε

2) Εγγραφή των δύο εικόνων με υπολογισμό των παραμορφώσεων που προκαλούνται σε αυτές κατά την καταγραφή από την τοπογραφία, για την εξαγωγή του συμβολογραφήματος. Οι ακρίβειες που κατορθώνονται είναι της τάξης των μερικών εκατοστών της ψηφίδας του Μ.Ψ.Ε.

3) Φιλτράρισμα των εικόνων με χρήση της τοπικής κλίσης. Τα φίλτρα αυτά βελτιώνουν τα αποτελέσματα σημαντικά, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ απότομων κλίσεων

4) Αφαίρεση των τροχιακών και τοπογραφικών συμβολών που αναμένονται, μετά από υπολογισμό τους από την κλίση του εδάφους.

5) Γεωμετρικός καθορισμός (γεωαναφορά) του τελικού προϊόντος με χαρτογραφικές ή γεωμετρικές συντεταγμένες. Το τελικό συμβολογράφημα εφαρμόζεται δύσκολα όταν είναι σε γεωμετρία βασισμένη στην απόσταση από το radar.

3. Δεδομένα τροχιάς

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε ότι για να μπορέσει να εφαρμοστεί η μέθοδος της συμβολογραφίας θα πρέπει να γνωρίζουμε τις ακριβείς τροχιές των δορυφόρων κατά τις λήψεις των εικόνων. Τα δεδομένα τροχιάς χρησιμεύουν στην εγγραφή των δύο εικόνων μεταξύ τους και με το Μ.Ψ.Ε (coregistration) αξιοποιώντας την ακριβή θέση του δορυφόρου κατά την λήψη των εικόνων.. Παράλληλα, μετατόπιση στην τροχιά συμβάλλει στην δημιουργία θορύβου στο συμβολογράφημα, τον οποίον μπορούμε να αφαιρέσουμε αν γνωρίζουμε τις ακριβείς τροχιές.

Τα δεδομένα αυτά παρέχονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency, ESA) και αποτελούν ακριβή δεδομένα θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου ανά τακτικά χρονικά διαστήματα μερικών δευτερολέπτων. Στο DIAPASON υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης ανάκτησης των μοντέλων των τροχιών από το Delft Technical University.

3.3 Επιμέρους αλγόριθμοι του DIAPASON

Η εφαρμογή της συμβολομετρίας με το λογισμικό DIAPASON μπορεί να διαχωριστεί σε τρία στάδια:

1) Προετοιμασία των εικόνων

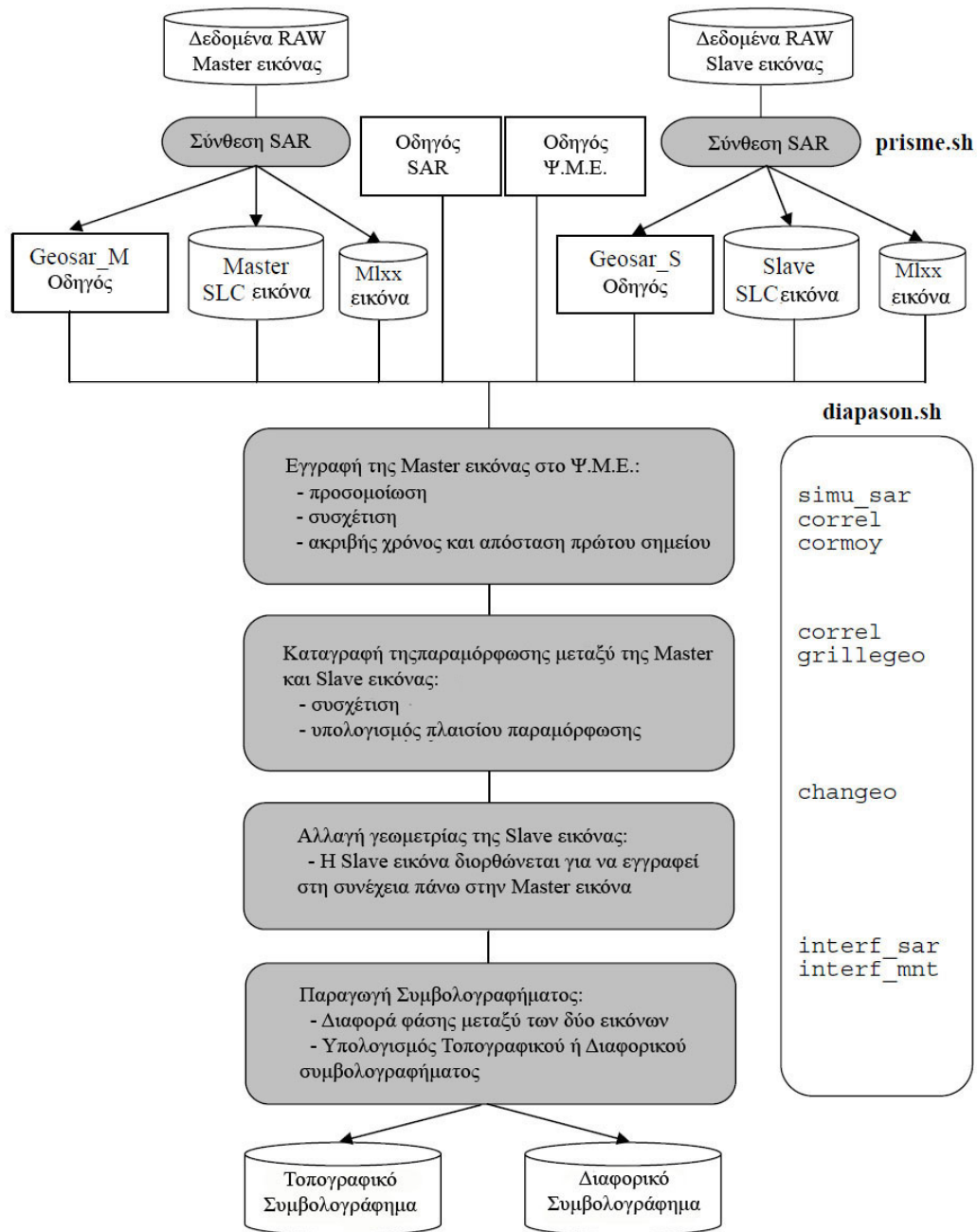
Όπως προαναφέρθηκε οι εισαγόμενες στο λογισμικό εικόνες βρίσκονται σε μία εκ των δύο μορφών: RAW ή SLC. Σε κάθε περίπτωση το DIAPASON πρέπει αρχικά να προετοιμάσει τις εικόνες σε κατάλληλο format και να εξάγει από αυτές κάποιες τιμές που

θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια. Οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται στο .lea αρχείο των εικόνων. Κάποιες ενδεικτικές τιμές που εξάγονται είναι ο αριθμός γραμμών και στηλών της εικόνας, μήκος κύματος ακτινοβολίας, ακριβής ώρα λήψης και το όνομα της τροχιάς. Από τα πιο σημαντικά μεγέθη που υπολογίζονται κατά το στάδιο αυτό είναι η μέση τιμή Doppler της εικόνας, η οποία χρησιμοποιείται σε πολλά βήματα της εφαρμογής στην συνέχεια.

Οι τιμές που εξάγονται για την κάθε εικόνα κατά το στάδιο αυτό συγκεντρώνονται σε ένα αρχείο τύπου .geosar. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται σαν οδηγός σε όλη την εφαρμογή καθώς διαβάζεται από όλους τους αλγόριθμους και παράλληλα σε κάθε στάδιο ανανεώνεται με νέες παραμέτρους.

Σε περίπτωση που οι εικόνες βρίσκονται σε μορφή RAW, θα πρέπει να μετατραπούν σε SLC (focusing). Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα PRISME. Για την μετατροπή αυτήν αξιοποιούνται κυρίως τα δεδομένα τροχιάς και η τιμή Doppler που έχει υπολογιστεί προηγουμένως.

Παράλληλα με την SLC εικόνα, παράγεται και μια εικόνα “πολλαπλών παρατηρήσεων” (multilook image) η οποία αποτελείται μόνο από τιμές έντασης. Δημιουργείται χρησιμοποιώντας φίλτρο μέσης τιμής στην SLC εικόνα, επομένως είναι μικρότερης χωρικής ανάλυσης. Ένα τυπικό μέγεθος παραθύρου φίλτρου μέσης τιμής είναι 5x2, που σημαίνει ότι το μέγεθος της ψηφίδας της εικόνας που προκύπτει είναι πέντε φορές μεγαλύτερο στο αζιμούθιο και δύο στην απόσταση. Οι multilook εικόνες χρησιμοποιούνται σαν αναφορά στα επόμενα βήματα του Diapason για την εγγραφή των SLC εικόνων μεταξύ τους. Την διαδικασία αυτή βοηθάει το μικρό μέγεθος και η μικρή ανάλυση των εικόνων.



Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του DIAPASON.

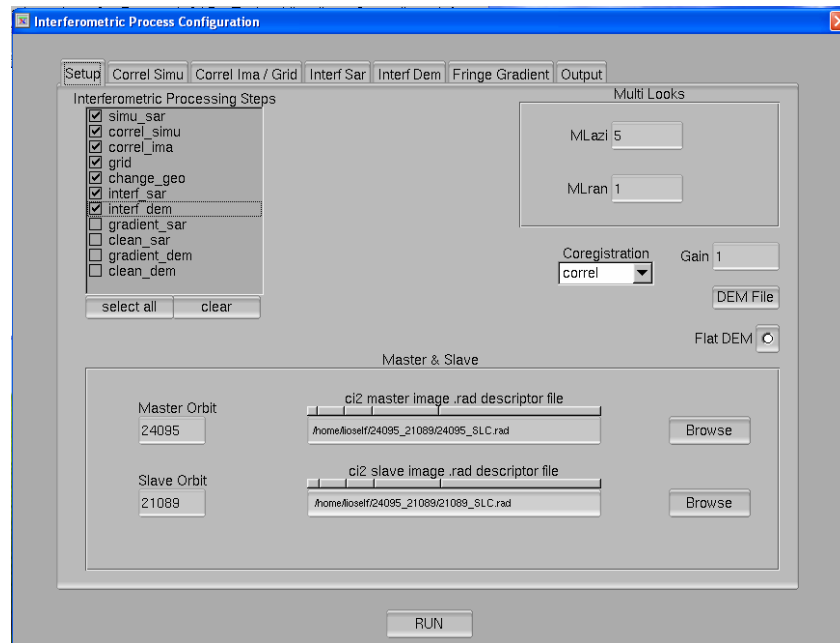
2) Εγγραφή των εικόνων

Για να λειτουργήσει η μέθοδο της συμβολομετρίας, θα πρέπει κάθε σημείο στόχος στο έδαφος να ταυτίζεται επακριβώς και στις δύο εικόνες. Η ταύτιση των εικόνων μεταξύ τους συνηθίζεται να ονομάζεται εγγραφή των εικόνων. Σε αντίθετη περίπτωση όπου η

γεωμετρία των εικόνων είναι διαφορετική, ο υπολογισμός διαφορών φάσεων δεν μας δίνει αιτιοκρατικά αποτελέσματα αλλά θόρυβο. Το γεγονός αυτό καθιστά το παρόν στάδιο ιδιαίτερα σημαντικό για την εφαρμογή.

Αρχικά το DIAPASON χρησιμοποιώντας την αρχική ώρα λήψης (precise time) της master (προγενέστερης) εικόνας κατασκευάζει μια τεχνητή (simulated) εικόνα αξιοποιώντας τις πληροφορίες τοπογραφίας του Μ.Ψ.Ε.. Στην συνέχεια, συγκρίνοντας τις τιμές έντασης της τεχνητής και της master εικόνας συσχετίζει την δεύτερη με το Μ.Ψ.Ε. διορθώνοντας παράλληλα την αρχική ώρα λήψης.

Έχοντας τώρα ορίσει την master εικόνα επακριβώς πάνω στο Μ.Ψ.Ε., μπορούμε τώρα να εγγράψουμε την slave (μεταγενέστερη) εικόνα πάνω σε αυτήν. Αυτό γίνεται με την δημιουργία πλεγμάτων (grids) τα οποία τεμαχίζουν τις δύο εικόνες σε παράθυρα σταθερών διαστάσεων εικονοστοιχείων. Κάθε παράθυρο της master εικόνας συγκρίνεται με τα παράθυρα της slave εικόνας χρησιμοποιώντας τις τιμές έντασης, και τελικά ταυτίζεται με εκείνο με το οποίο έχει την μεγαλύτερη συσχέτιση. Αυτό επαναλαμβάνεται για όλη την έκταση των εικόνων, και τελικά η slave εικόνα ανακατασκευάζεται έτσι ώστε να ταυτίζεται επακριβώς με την master.



Εικόνα 3.2: Το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής DIAPASON

3) Δημιουργία συμβολογραφήματος

Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται κυρίως η σχέση 2.10 του κεφαλαίου 2. Κατά το στάδιο αυτό δημιουργούνται τρία βασικά αρχεία:

amplitude file: είναι μια εικόνα τις περιοχής, που περιλαμβάνει τιμές έντασης μονο. Οι τιμές αυτές συνυπολογίζονται από τις εντάσεις των εικόνων master και slave, αποτελούν ουσιαστικά τον όρο $|P_1||P_2|$ της σχέσης 2.10.

coherence file: αποτελεί την εικόνα συνοχής για το συμβολογράφημα όπως προκύπτει από την σχέση 2.26, όπου φαίνεται σε ποιες περιοχές υπάρχει αποσυσχέτιση (decorrelation), και γενικά φαίνεται η ποιότητα του συμβολογραφήματος.

phase file: αποτελείται από τις διαφορές φάσεων ($\theta_1 - \theta_2$) των δύο εικόνων, δηλαδή είναι το συμβολογράφημα και ο κύριος στόχος της διαδικασίας.

3.4 Συμπληρωματικοί αλγόριθμοι DIAPASON

Fridge gradient & Clean

Το ζευγάρι των εντολών αυτών αφαιρούν από το συμβολογράφημα τους κροσσούς που οφείλονται στην μετατόπιση τροχιάς. Η διαδικασία αυτή συνήθως ονομάζεται οριζοντιοποίηση (flattening). Η εντολή Fringe_gradient υπολογίζει τον βαθμό μεταβολής φάσης (phase gradient) κατά τις διευθύνσεις αζιμουθίου και απόστασης και η εντολή Clean στην συνέχεια αφαιρεί την συμβολή τροχιάς από το συμβολογράφημα χρησιμοποιώντας τον βαθμό μεταβολής φάσης.

Power Spectrum Filtering

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζει ένα φίλτρο στο συμβολογράφημα, το οποίο αφαιρεί τον θόρυβο φάσης που οφείλεται στην διαφορετική γωνία παρατήρησης κατά τις δύο λήψεις. Γενικά εξομαλύνει το συμβολογράφημα, ειδικά σε περιοχές όπου η συνοχή (coherence) δεν είναι πολύ καλή. Ουσιαστικά αποτελεί ένα φίλτρο μέσης τιμής στον χώρο των μιγαδικών αριθμών, συνυπολογίζοντας τις τιμές έντασης και φάσης αυτών. Παρόλ'αυτά δεν θα πρέπει να γίνεται κατάχρησή του καθώς είναι δυνατόν να αφαιρέσει κροσσούς οι οποίοι είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

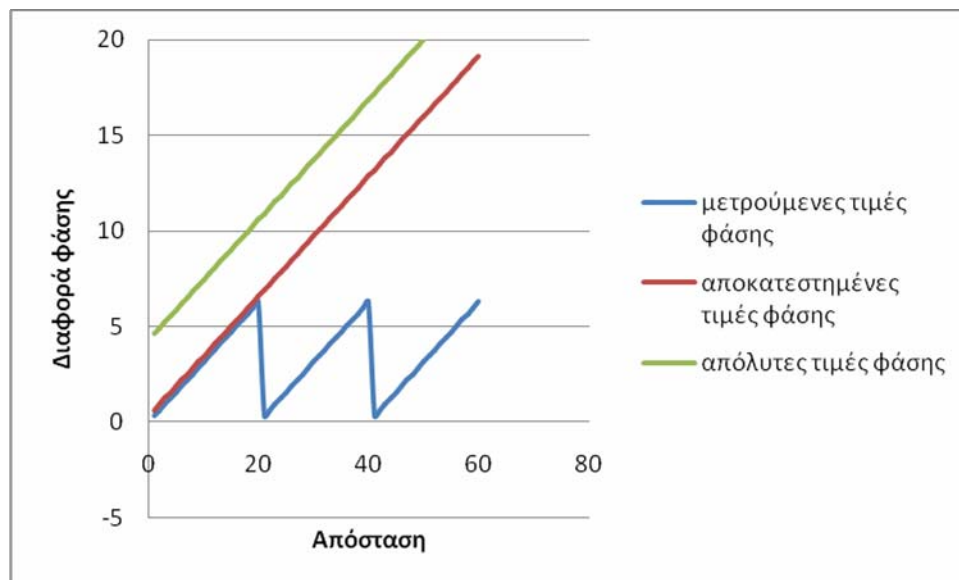
Interferogram unwrapping

Τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο συμβολογράφημα αποτελούνται από τα μη ακέραια μέρη της διαφοράς φάσης μεταξύ Master και Slave εικόνας, καθώς οι ακέραιοι κύκλοι έχουν χαθεί κατά την αφαίρεση των τιμών φάσεων μεταξύ τους. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι οι τιμές αυτές δεν είναι κατάλληλες αν επιθυμούμε να ποσοτικοποιήσουμε τις μετατοπίσεις. Η τεχνική αυτή που υπολογίζει τους ακέραιους κύκλους των διαφορών φάσης ονομάζεται αποκατάσταση φάσης και εκτελείται από ειδικό λογισμικό που συμπεριλαμβάνεται στο Diapason.

Οι αποκατεστημένες τιμές που προκύπτουν αποτελούνται από ακέραιες και δεκαδικές τιμές φάσης, και μπορούν στην συνέχεια να μετατραπούν σε μήκος μετατοπίσεων

ανάλογα με την συχνότητα της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται. Παράλληλα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση του δορυφόρου σε σχέση με κάθε σημείο στο έδαφος και η γωνία παρατήρησης της ακτινοβολίας.

Τα παραπάνω είναι δυνατόν να αποτελέσουν τα πρώτα βήματα για την δημιουργία ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους αν ο χρήστης το επιθυμεί. Για να είναι δυνατόν αυτό θα πρέπει να γνωρίζουμε πως το συμβολογράφημα που έχουμε επιλέξει δεν συμπεριλαμβάνει μετατοπίσεις του εδάφους και ατμοσφαιρικές ανωμαλίες. Επίσης θα πρέπει να έχει μικρό height of ambiguity έτσι ώστε να είναι μεγάλη η επίδραση της τοπογραφίας στο συμβολογράφημα. Αφού αυτό παραχθεί μπορεί στην συνέχεια να συσχετιστεί με ένα γεωμετρικό σύστημα αναφοράς βάσει ενός γνωστού σημείου στο συμβολογράφημα.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση των μετρήσιμων και των απόλυτων τιμών φάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Δεδομένα – επεξεργασία

4.1 Περιοχή Εφαρμογής

Η περιοχή την οποία μελετάμε αποτελεί το δυτικότερο τμήμα της Κρήτης και καλύπτει μία έκταση 45 x 10 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η άμεσα ενδιαφερόμενη περιοχή βρίσκεται στο νότιο τμήμα της εικόνας στον οικισμό της Χρυσosκαλίτισσας, με υψομετρικές διαφορές της τάξεως των 150 – 200 μέτρων περίπου. Η ευρύτερη περιοχή παρουσιάζει υψομετρικές διαφορές της τάξης των 600 μέτρων περίπου.

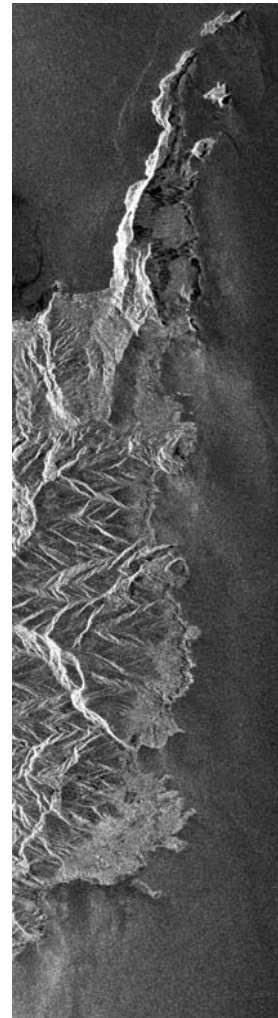
Ο λόγος που επιλέγουμε την συγκεκριμένη περιοχή οφείλεται στην γεωτεκτονική θέση της Κρήτης. Η ευρύτερη περιοχή βρίσκεται στα όρια της σύγκλισης της Ευρασιατικής με την Αφρικανική λιθοσφαιρική πλάκα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν έντονες δυναμικές εκφορτίσεις στον χώρο. Συγκεκριμένα με βάση διάφορα γεωτεκτονικά μοντέλα προβλέπεται ότι η Δυτική Κρήτη ανυψώνεται κατά μερικά χιλιοστά τον χρόνο.

Από το δυτικό άκρο της Κρήτης η Χρυσosκαλίτισσα είναι μία από τις περιοχές με το ομαλότερο ανάγλυφο, γεγονός που την κάνει προσιτή για την εφαρμογή. Παράλληλα στον οικισμό έχει εγκατασταθεί δορυφορικός σταθμός GPS, τα δεδομένα του οποίου μπορούν μετά από μακροχρόνια ανάλυση να συνδυαστούν με τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας.

4.2 Δεδομένα εικόνων

Τις εικόνες SAR τις προμηθευτήκαμε κατόπιν ειδικής παραγγελίας από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA, European Space Agency). Είναι σε πρωτογενή μορφή και καλύπτουν χρονικό διάστημα 9 ετών (Πίνακας 1). Σε όλες τις εικόνες, οι οποίες είναι στο σύνολο 41, η κατεύθυνση του δορυφόρου είναι κατιούσα (descending) και οι λήψεις έγιναν στις 9:05 π.μ. περίπου.

Τροχιά εικόνας	Ημερομηνία λήψης	ERS	Τροχιά εικόνας	Ημερομηνία λήψης	ERS
4847	19/6/1992	1	6560	22/7/1996	2
5849	28/8/1992	1	7061	26/8/1996	2
6350	2/10/1992	1	7562	30/9/1996	2
6851	6/11/1992	1	8063	4/11/1996	2
7352	11/12/1992	1	10067	24/3/1997	2
9356	30/4/1993	1	10568	28/4/1997	2
10358	9/7/1993	1	12071	11/8/1997	2
11360	17/9/1993	1	15578	13/4/1998	2
12362	26/11/1993	1	16079	18/5/1998	2
19720	23/4/1995	1	16580	22/6/1998	2
20722	2/7/1995	1	17081	27/7/1998	2
21223	6/8/1995	1	17582	31/8/1998	2
1550	7/8/1995	2	18083	5/10/1998	2
21724	10/9/1995	1	19085	14/12/1998	2
2051	11/9/1995	2	20087	22/2/1999	2
22225	15/10/1995	1	21089	3/5/1999	2
2552	16/10/1995	2	24095	29/11/1999	2
23227	24/12/1995	1	24596	3/1/2000	2
3554	25/12/1995	2	25598	13/3/2000	2
24229	3/3/1996	1	27101	26/6/2000	2
6059	17/6/1996	2	?		



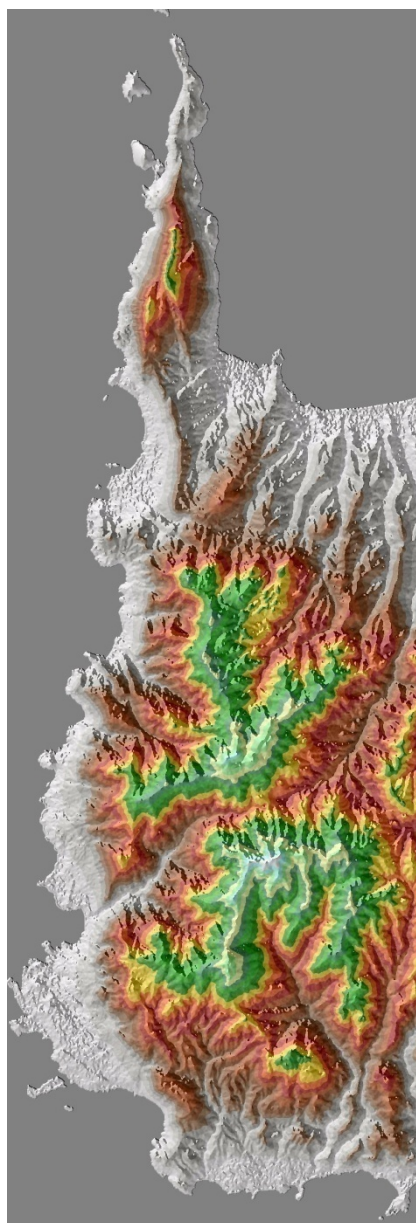
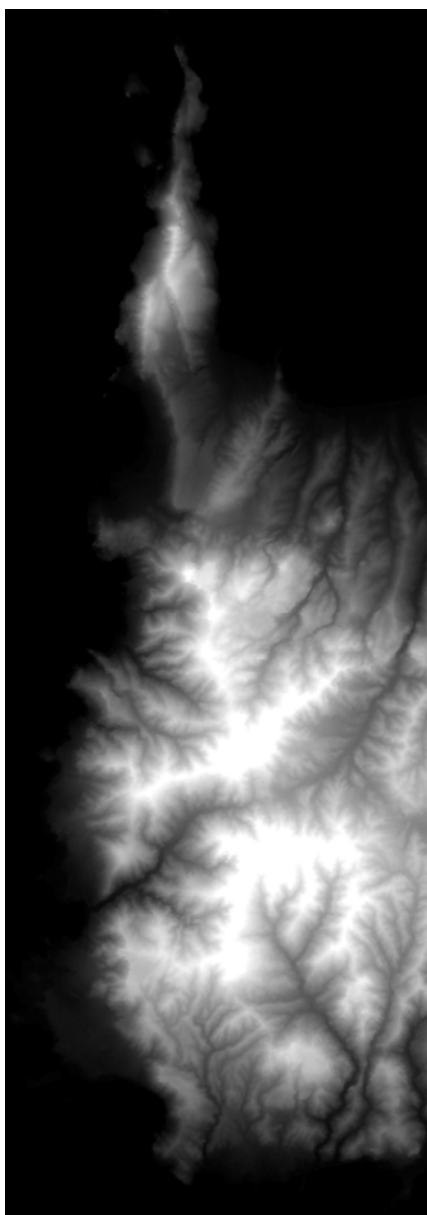
Πίνακας 4.1: Λίστα των διαθέσιμων εικόνων SAR για την περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας. Στα δεξιά παρουσιάζεται τμήμα μιας εικόνας SAR στην γεωμετρία του radar.

4.3 Μοντέλο Ψηφιακού Εδάφους

Το Μ.Ψ.Ε. που χρησιμοποιείται έχει δημιουργηθεί στερεοσκοπικά από δορυφορικές εικόνες SPOT με υψομετρική ακρίβεια ± 7 μέτρα. Η χωρική ανάλυση των εικονοστοιχείων φτάνει τα 20m. Λοιπά στοιχεία δίνονται στον Πίνακα 4.2.

Συσχετισμένο ελλειψοειδές	WGS84
Υψόμετρα από	Γεωειδές
Σύστημα συντεταγμένων	Χαρτογραφικό
Τετμημένη x πρώτου σημείου	728618.63632 μέτρα
Τεταγμένη y πρώτου σημείου	3946784.414396 μέτρα
Παρουσίαση	UTM
Ζώνη Ωρας	34

Πίνακας 4.2: Τεχνικά στοιχεία για το Μ.Ψ.Ε.



Εικόνες 4.1 – 4.2: Στα αριστερά παρουσιάζεται το Μ.Ψ.Ε. Υψηλές τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές υψομέτρου. Στα δεξιά γραφική απεικόνιση του αναγλύφου της περιοχής κατασκευασμένο τεχνητά από το Μ.Ψ.Ε.

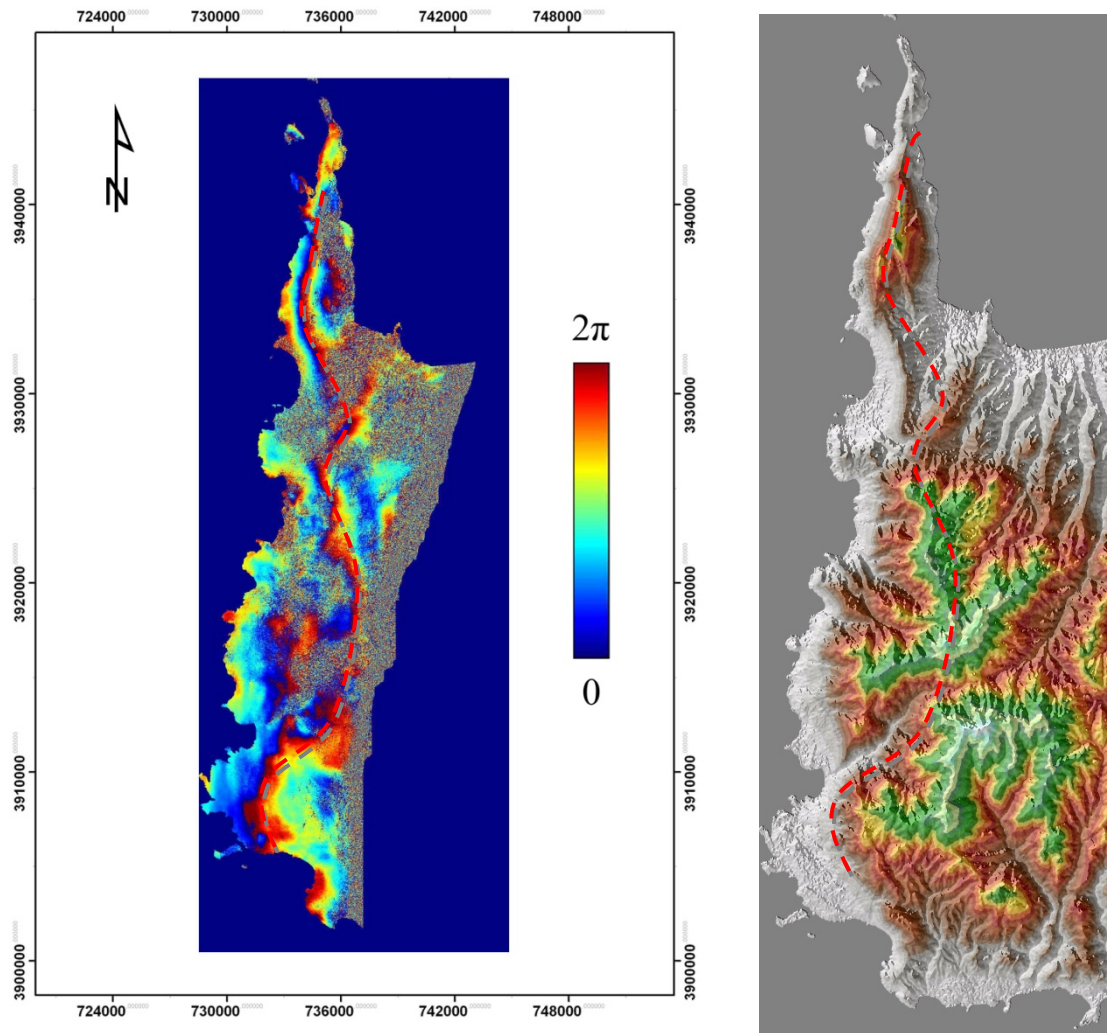
4.4 Επιλογές ζευγαριών – τεχνικές δυσκολίες

1) Ύψος ασάφειας

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ένας σημαντικός παράγοντας στην συμβολομετρία είναι το ύψος ασάφειας ή ha. Αν θεωρήσουμε για ένα συμβολογράφημα

πως δεν έχει μετατοπίσεις εδάφους ή επιδράσεις από την ατμόσφαιρα, μια τιμή $h_a=100m$ μεταφράζεται ως ένας κροσσός στο συμβολογράφημα για μια υψομετρική διαφορά των 100 μέτρων. Στην πραγματικότητα όμως η επίδραση της τοπογραφίας είναι μικρότερη, καθώς η συμβολή της λαμβάνεται υπόψιν κατά την παραγωγή του συμβολογραφήματος, με την χρήση του Ψ.Μ.Ε και αφαιρείται.

Σε κάθε περίπτωση, η περιοχή που εξετάζουμε έχει έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, με υψομετρική διαφορά που φτάνει τα 600 μέτρα. Από τις χ εικόνες SAR που είχαμε στην διάθεσή μας είναι δυνατόν να προκύψουν 820 συμβολογραφήματα. Από αυτά μόνο στην περίπτωση των 60 ισχύει h_a μεγαλύτερο του 100. Ύστερα από δοκιμές καταλήγουμε σε h_a ίσο με **75 για κατώτατο όριο** στην επιλογή ζευγαριού εικόνων, καθώς παρατηρούμε πως για τέτοιες τιμές η επίδραση της τοπογραφίας στα συμβολογραφήματα δεν είναι σημαντική. Τα συμβολογραφήματα των υπολοίπων συνδυασμών περιλαμβάνουν και κροσσούς τοπογραφίας, όπως το ζευγάρι 24095 – 27101 με ύψος ασάφειας h_a ίσο με 64, όπως φαίνεται παρακάτω:

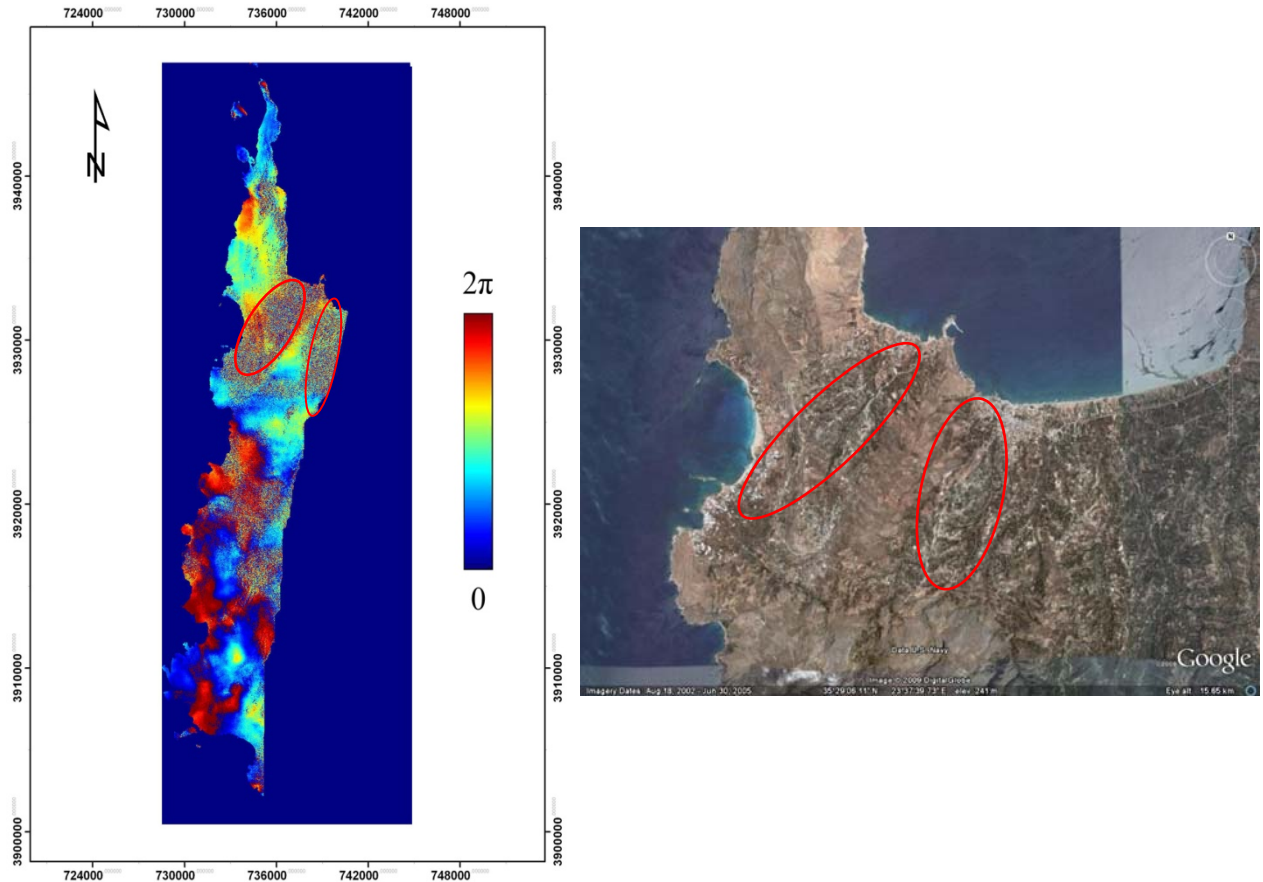


Εικόνα 4.3: Συμβολογράφημα από τις εικόνες 24095 – 27101. Συγκρινόμενο με το Μ.Ψ.Ε δεξιά διακρίνεται εύκολα η επίδραση της τοπογραφίας.

2) Συνοχή

Πέραν από το γεγονός ότι μικρό h_a προκαλεί παράλληλα απώλεια συνοχής μεταξύ των εικόνων λόγω μεγάλης διαφοράς στην γωνία παρατήρησης του εδάφους στις δύο χρονικές στιγμές, απώλειες συνοχής έχουμε και για άλλους λόγους, όπως η ύπαρξη βλάστησης και η μεγάλη χρονική απόσταση μεταξύ των δύο εικόνων (Κεφάλαιο 2). Τα περισσότερα συμβολογράφηματα που δημιουργούμε εμφανίζουν απώλεια συνοχής ή αποσυσχέτιση (decorrelation) σε κάποια βόρεια και κεντρικά τμήματα της εικόνας, όπως

φαίνεται παρακάτω. Ωστόσο δεν δυσκολεύει την εφαρμογή στην περιοχή της Χρυσοκαλίτισσας, η οποία γενικά στερείται βλάστησης και έντονου αναγλύφου.

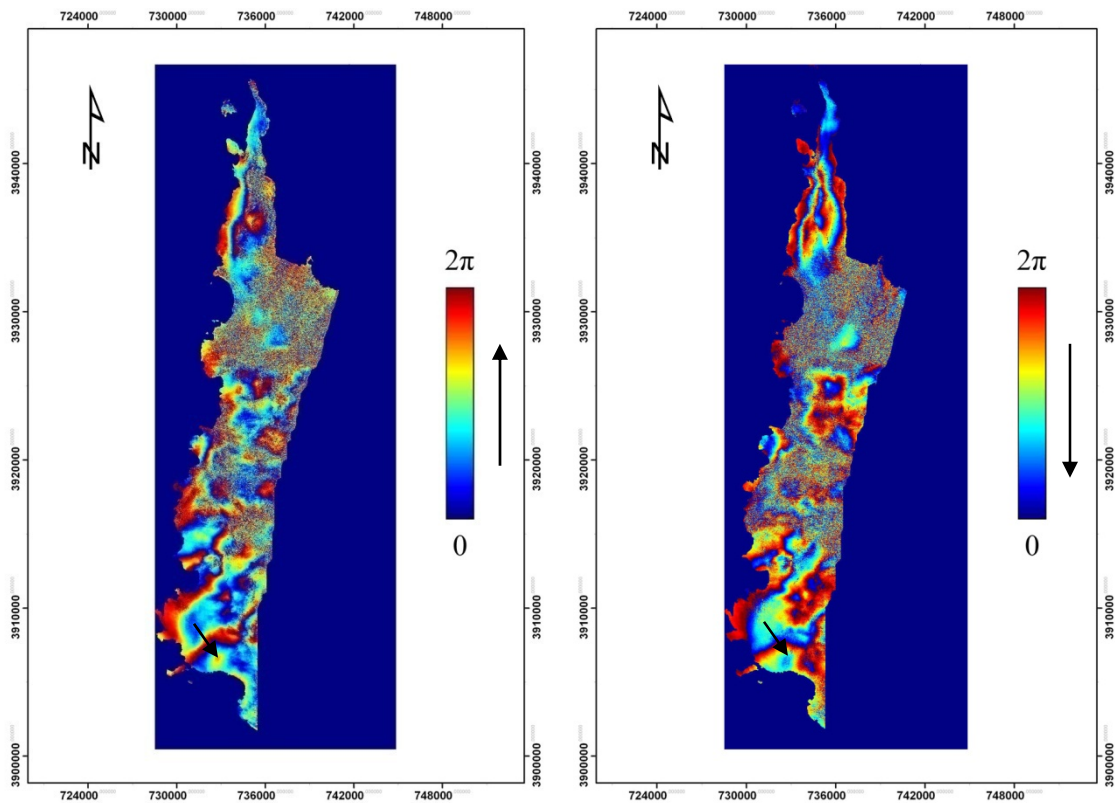


Εικόνα 4.4: Ένα τυπικό συμβολογράφημα με απώλεια συνοχής στο βόρειο τμήμα. Στην φωτογραφία δεξιά (google earth) διακρίνεται η ύπαρξη βλάστησης η οποία οδηγεί στην αποσυσχέτιση των εικόνων.

3) Ατμόσφαιρα

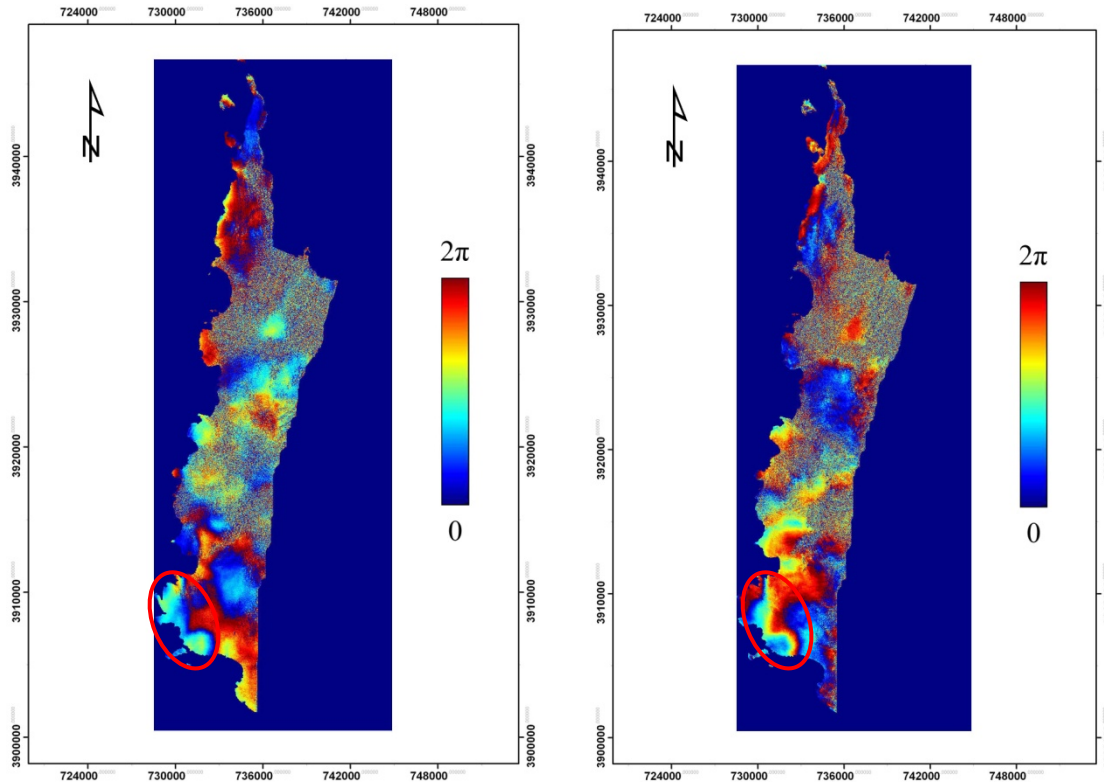
Σε πολλά από τα συμβολογραφήματα παρατηρείται έντονα η επίδραση της ατμόσφαιρας. Η επίδραση αυτή μπορεί να οφείλεται σε ακραίες συνθήκες τις ατμόσφαιρας κατά την

ημερομηνία λήψης της μίας εκ των δύο εικόνων. Η περίπτωση αυτή ανιχνεύεται εύκολα όταν έχουμε περισσότερα από ένα συμβολογραφήματα που περιέχουν την εικόνα αυτή. Παρακάτω φαίνεται η περίπτωση της εικόνας 12071 σε δύο διαφορετικά συμβολογραφήματα. Παρατηρούμε πως η φορά των κροσσών στα δύο συμβολογραφήματα είναι ανεστραμμένη. Ο λόγος είναι ότι στο πρώτο ζευγάρι η εικόνα 12071 είναι η δεύτερη χρονικά (slave) ενώ στο δεύτερο η πρώτη (master). Στην περίπτωση που οι εμφανίσεις αυτές στους κροσσούς οφείλονταν σε μετατόπιση του εδάφους τότε θα εμφανιζόντουσαν μόνο στο ένα συμβολογράφημα αν η μετατόπιση έγινε στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Εάν οι μετατοπίσεις ήταν για μεγάλο βάθος χρόνου (π.χ. γεωτεκτονικής φύσεως) τότε οι εμφανίσεις των κροσσών θα υπήρχαν και στα δύο συμβολογραφήματα αλλά θα είχαν την ίδια φορά.



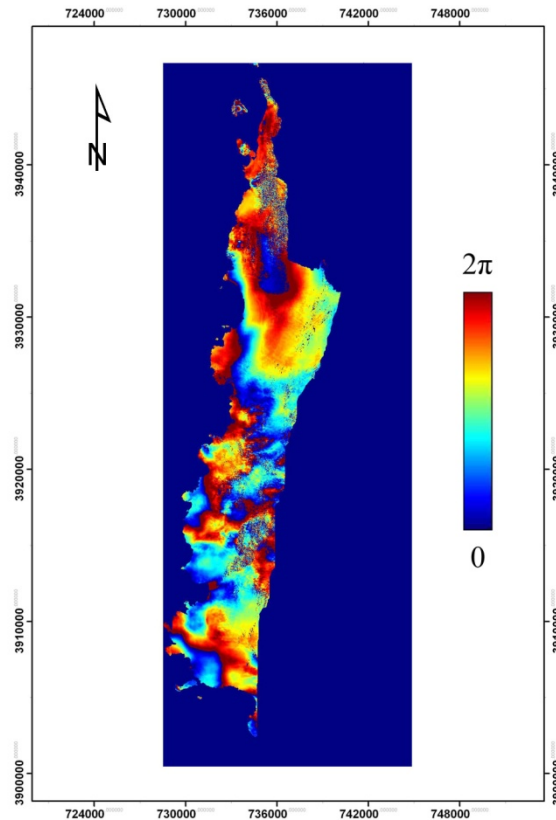
Εικόνες 4.5 – 4.6: Τα συμβολογραφήματα των ζευγών εικόνων 1550 – 12071 και 12071 – 21089 αντίστοιχα όπου φαίνεται έντονα η συμβολή της ατμόσφαιρας που περιλαμβάνεται στην εικόνα 12071. Η φορά των κροσσών είναι αντίθετη στις δύο περιπτώσεις.

Η ατμοσφαιρική ανωμαλία δεν είναι τόσο εμφανής σε όλες τις περιπτώσεις. Μπορεί να εμφανίζεται με την μορφή «κηλίδων» (σαν σταγόνες) που καλύπτουν μικρή έκταση στο συμβολογράφημα, όπως στην περίπτωση της εικόνας 17081:



Εικόνες 4.7 – 4.8: Τα συμβολογραφήματα των εικόνων 7562 – 17081 και 17081 – 21089 αντίστοιχα. Διακρίνεται ο σχηματισμός στην κάτω αριστερά περιοχή, ο οποίος οφείλεται στην εικόνα 17081, από απόκλιση της ατμόσφαιρας.

Η ατμόσφαιρα δεν γίνεται πάντοτε αντιληπτή. Η ιδανική περίπτωση στην οποία οι συνθήκες ατμόσφαιρας κατά τις δύο χρονικές περιόδους είναι ίδιες είναι αρκετά σπάνια με αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές να έχουμε αλλοίωση (καθυστέρηση) του σήματος στα δεδομένα μας. Για παράδειγμα, το παρακάτω συμβολογράφημα έχει προκύψει από τις εικόνες 22225 και 2552 με ημερομηνίες 15/10/1995 και 16/10/1995, και με $h_a = 450$:



Εικόνα 4.9: Συμβολογράφημα από τις εικόνες 22225 και 2552, οι οποίες απέχουν χρονικά μία μέρα.

Λόγω της τιμής του h_a η οποία στην περίπτωση μας είναι ικανοποιητική θα περιμέναμε το συμβολογράφημα να είχε λιγότερους κροσσούς καθώς το χρονικό διάστημα των λήψεων είναι αρκετά μικρό για να έχουμε μετατοπίσεις του εδάφους. Προκύπτει όμως ότι ακόμα και για διάστημα μιας ημέρας, οι μεταβολές στην κατάσταση της ατμόσφαιρας μπορούν να δημιουργήσουν θόρυβο στο συμβολογράφημα. Το πρόβλημα όπως είναι λογικό είναι μεγαλύτερο όταν η μετατόπιση που προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε έχει μικρές τιμές και επικαλύπτεται από τον θόρυβο.

4) Χρονική απόσταση λήψεων

Το χρονικό διάστημα μεταξύ των εικόνων που επιλέγουμε δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο έτσι ώστε να διατηρείται η συνοχή των εικόνων και να μην έχουμε χρονική αποσυσχέτιση (temporal decorrelation). Παράλληλα, το προτιμώμενο χρονικό διάστημα

εξαρτάται και από τις μετατοπίσεις που αναμένουμε να ανιχνεύσουμε. Στην περίπτωση μας οι μετατοπίσεις αυτές είναι της τάξης των χιλιοστών ανά έτος, επομένως τα ζευγάρια εικόνων που επιλέγουμε είναι για διάστημα 1 – 3 ετών.

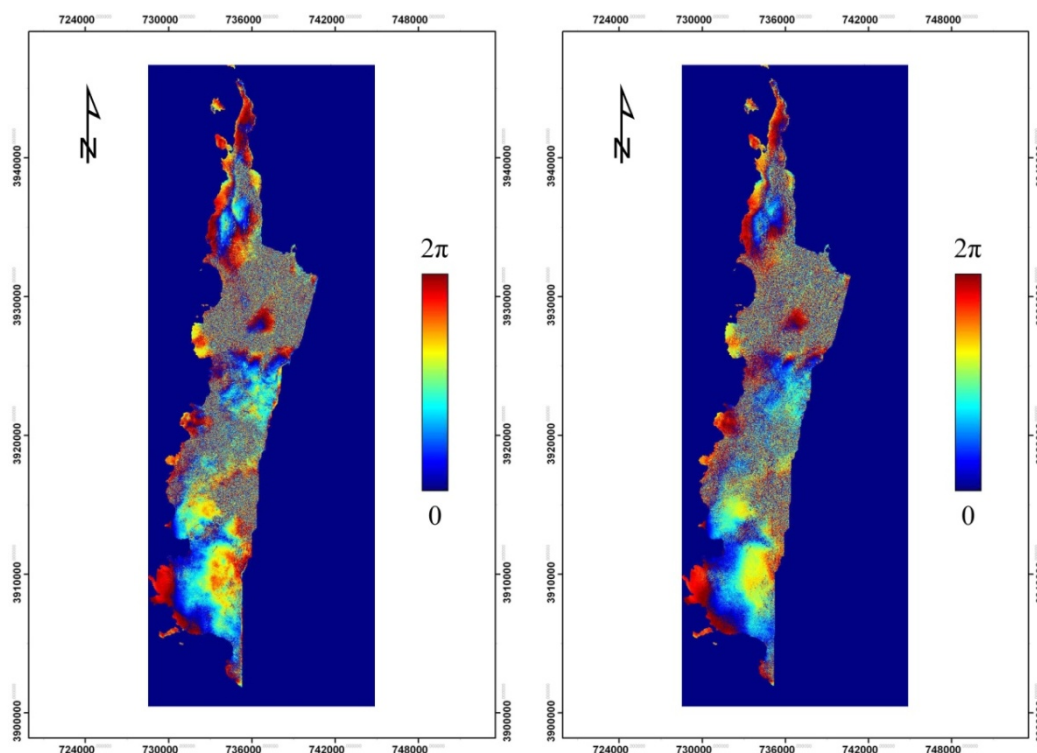
Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς τα συμβολογραφήματα που παράχθηκαν είναι τα παρακάτω:

No	Temporal Sep.	Alt. of Ambiguity	MASTER/SLAVE	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1	105	h=-11m	4847 6350									
2	1459	h=277m	4847 6059									
3	35	h=-26m	5849 6350									
4	70	h=-19m	5849 6851									
5	105	h=968.66m	5849 7352									
6	1073	h=-101.6m	5849 2123									
7	1074	h=-2650m	5849 1550									
8	35	h=-82.95	6350 6851									
9	350	h=-237m	6350 11360									
10	420	h=-58.5m	6350 12362									
11	1248	h=-4495m	6350 24229									
12	385	h=-194m	6851 12362									
13	1143	h=-755m	6851 23227									
14	2159	h=-211m	6851 18083									
15	969	h=-721.7m	7352 1850									
16	210	h=-612m	9356 12362									
17	968	h=129m	9356 23227									
18	526	h=1395	19720 7562									
19	1191	h=-99m	19720 17081									
20	1	h=105m	21223 1550									
21	141	h=-83m	21223 3554									
22	351	h=2702m	21223 6560									
23	350	h=-109m	1550 6560									
24	420	h=-23m	1550 7562									
25	735	h=-76.46m	1550 12071									
26	1120	h=-251m	1550 17582									
27	1365	h=-99.9m	1550 21089									
28	1	h=-64.67m	21724 2051									
29	1	h=-29.59m	22225 2552									
30	1	h=-36.58m	23227 3554									
31	70	h=-85.19m	23227 24229									
32	210	h=-81.55m	3554 6560									
33	875	h=-461m	3554 16079									
34	910	h=-1058m	3554 16580									
35	1470	h=-973m	3554 24596									
36	1260	h=-140m	24229 18083									
37	665	h=-134.43	6059 24095									
38	665	h=-98m	6560 16079									
39	700	h=-75m	6560 16580									
40	770		6560 17582									
41	840	h=-190m	7061 19085									
42	560	h=-101m	7562 15578									
43	665	h=-90m	7562 17081									
44	770	h=-84m	10067 21089									
45	140	h=-113m	10067 12071									
46	945	h=-943m	10568 24095									
47	630	h=-325m	12071 21089									
48	105	h=-1088.5	13578 17081									
49	595	h=-2302m	16079 24596									
50	560	h=-372m	16580 24596									
51	280	h=-43m	17081 21089									
52	245	h=-71.41m	17582 21089									
53	490	h=-63.88	17582 24596									
54	455	h=-241.42	19085 25598									
57	210	h=-64.16	24095 27101									
55	245	h=-33.72	21089 24596									

4.5 Άθροισμα συμβολογραφημάτων

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στην κλασσική συμβολομετρία είναι η συσσώρευση συμβολογραφημάτων (stacking). Κατά αυτήν, τα συμβολογραφήματα μιας περιοχής αθροίζονται και προκύπτει ένα νέο, του οποίου η τιμή φάσης για κάθε pixel είναι το άθροισμα των τιμών φάσης για κάθε μεμονωμένο συμβολογράφημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κροσσοί φάσης να αθροίζονται και αυτοί, και να εμφανίζονται στο τελικό συμβολογράφημα.

Η επιλογή της τεχνικής αυτής στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προκειμένου να απαλειφθεί η ατμοσφαιρική επίδραση από τα συμβολογραφήματα. Έστω ότι μετά από μελέτη διαφόρων συμβολογραφημάτων προκύπτει ότι μια εικόνα SAR έχει έντονες συνθήκες ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση π.χ. της εικόνας 12071.διαθέτουμε δύο συμβολογραφήματα στα οποία η εικόνα έχει χρησιμοποιηθεί τόσο ως slave (Εικόνα 4.5) όσο master (Εικόνα 4.6). Όπως αναφέραμε, οι κροσσοί λόγω ατμόσφαιρας θα έχουν αντίθετη φορά στα δύο συμβολογραφήματα. Εάν όμως προσθέσουμε τα δύο συμβολογραφήματα, είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ένα νέο συμβολογράφημα αντίστοιχο με εκείνο που θα προέκυπτε αν χρησιμοποιούσαμε την πρώτη και τρίτη εικόνα. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι λόγω των μικρών χρονικών διαστημάτων των επιμέρους συμβολογραφημάτων είναι δυνατόν να περιοριστούν τα φαινόμενα που προκαλούν αποσυσχέτιση. Επιπλέον η μελέτη των τυχόν επιδράσεων της ατμόσφαιρας περιορίζεται μόνο στην πρώτη και τελευταία εικόνα.



Εικόνες 4.10 – 4.11: Η αριστερή εικόνα αποτελεί άθροισμα των συμβολογραφημάτων 1550 – 12071 και 12071 – 21089. Η δεξιά εικόνα είναι το συμβολογράφημα των εικόνων 1550 – 21089.

Άλλη εφαρμογή της μεθόδου είναι στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε μικρές μετατοπίσεις σε μεγάλο βάθος χρόνου και δεν διαθέτουμε αρκετά ζευγάρια εικόνων για αυτό το χρονικό διάστημα. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού είναι να παράγουμε συμβολογραφήματα που να καλύπτουν όλο το διάστημα που μας ενδιαφέρει και να τα προσθέσουμε. Γενικά προτιμάται τα επιμέρους συμβολογραφήματα να αφορούν σε ίσα χρονικά διαστήματα έτσι ώστε η μετατόπιση να εκδηλώνεται με τον ίδιο ρυθμό μετατόπισης φάσης (phase gradient).

Στην περίπτωση όπου τα συμβολογραφήματα που αθροίζουμε είναι δύο με σκοπό να αφαιρέσουμε την επίδραση της τοπογραφίας από το ένα, τότε αναφερόμαστε σε συμβολομετρία τριών ή τεσσάρων περασμάτων, ανάλογα με το αν υπάρχει κοινή εικόνα ανάμεσα στα δύο συμβολογραφήματα (Κεφάλαιο 3).

Το μεγαλύτερο ελάττωμα που παρουσιάζει η τεχνική είναι η απώλεια της συνοχής στην περιοχή όσο τα αθροιζόμενα συμβολογραφήματα αυξάνονται. Γενικά η αποσυσχέτιση

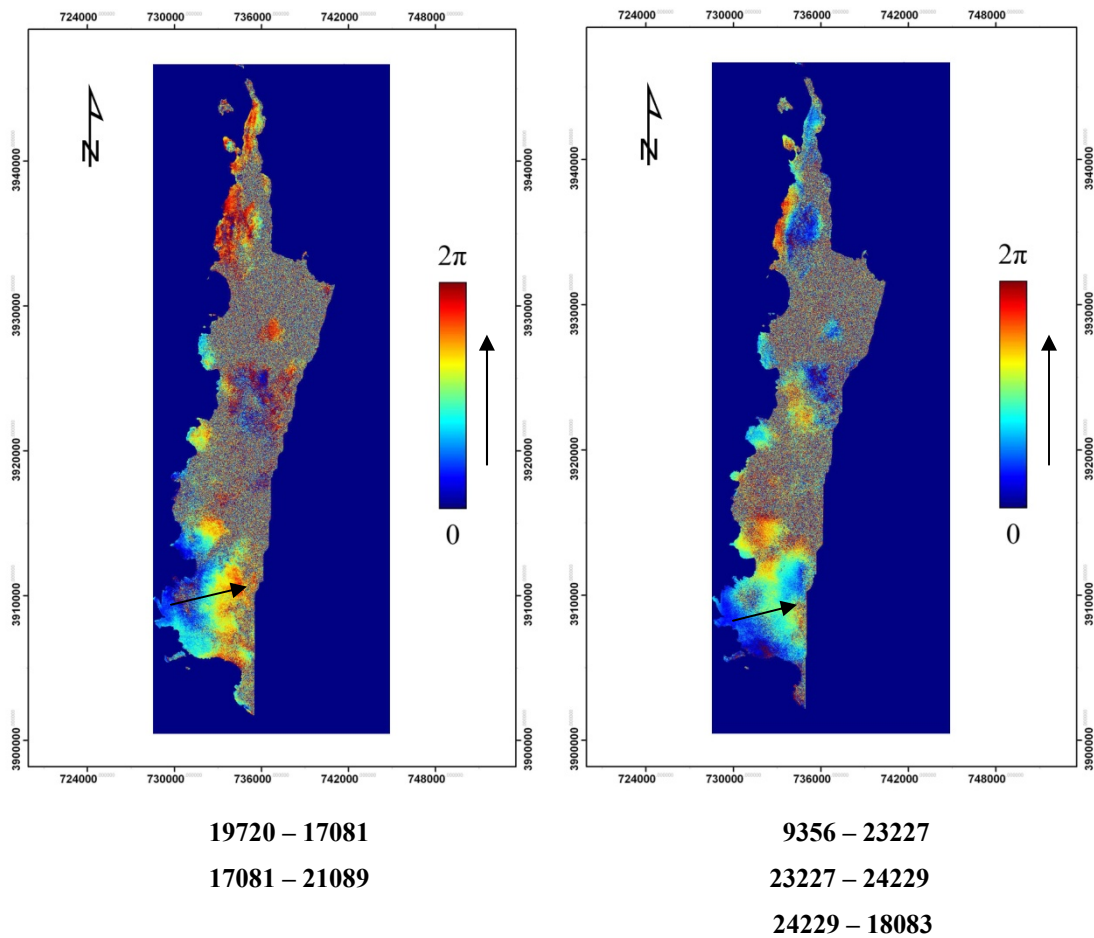
(decorrelation) συσσωρεύεται από τα επιμέρους συμβολογραφήματα στο τελικό, με αποτέλεσμα ανάλογα με την περιοχή (χωρική αποσυσχέτιση ή spatial decorrelation) και τα χρονικά διαστήματα που καλύπτουν (χρονική αποσυσχέτιση ή temporal decorrelation) ο αριθμός τους να μειώνεται. Στην παρούσα εφαρμογή δεν χρησιμοποιούμε πάνω από τέσσερα συμβολογραφήματα προς άθροισμα.

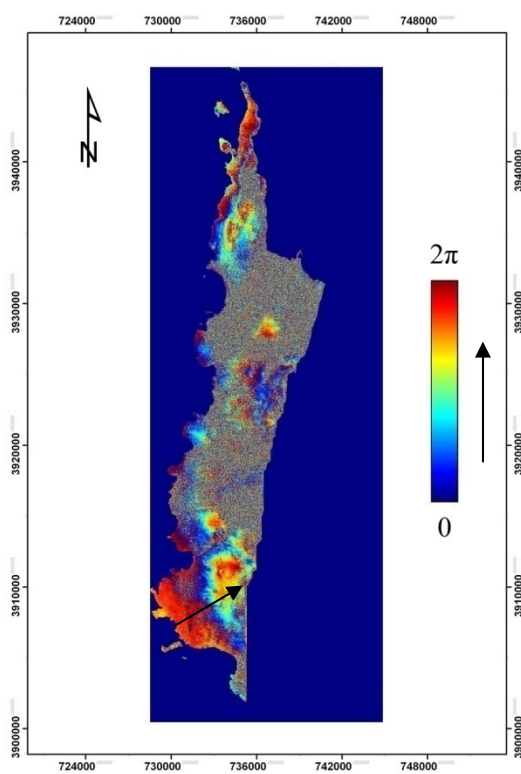
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΕΡΜΗΝΕΙΑ

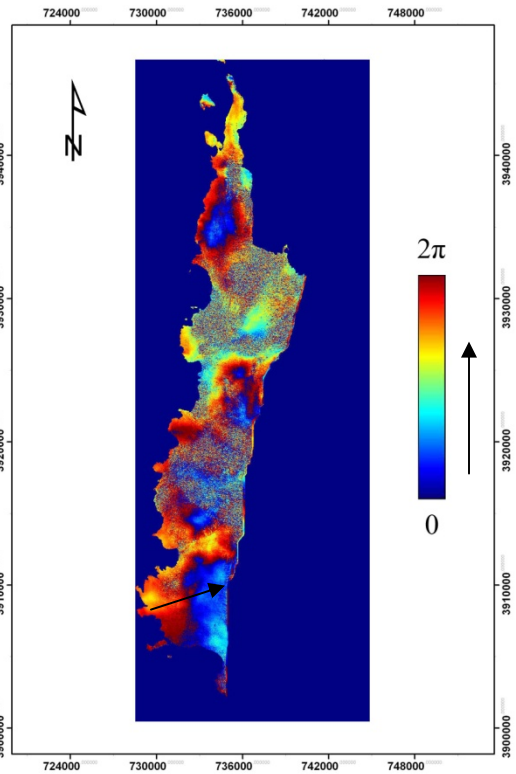
5.1 Αποτελέσματα

Με βάση τους περιορισμούς που θέσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο παράγουμε τα παρακάτω συμβολογραφήματα:

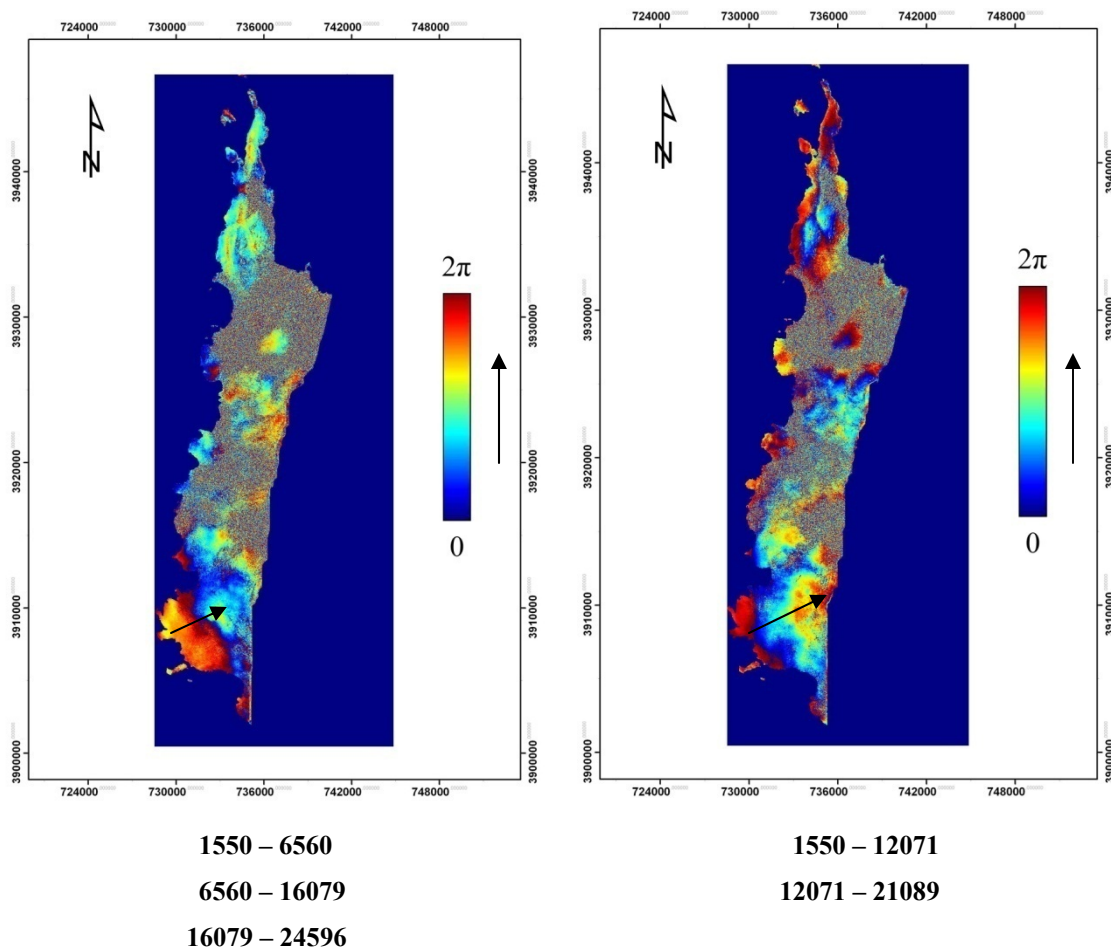




7352 – 1550
 1550 – 17582
 17582 – 21089



6350 – 6851
 6851 – 23227



Τα συγκεκριμένα, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς έχουν προκύψει από άθροισμα δύο έως τεσσάρων συμβολογραφημάτων. Η χρήση των παραπάνω συμβολογραφημάτων κρίνεται απαγορευτική, λόγω της μεγάλης αποσυσχέτισης που συσσωρεύεται στις εικόνες. Ήδη η μισή περιοχή των εικόνων καθίσταται μη αξιοποιήσιμη λόγω της υψηλής αποσυσχέτισης, αν και η περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας που μας ενδιαφέρει δεν έχει επηρεαστεί έντονα.

5.2 Ερμηνεία – Εκτίμηση παραμόρφωσης

Παρατηρούμε ότι φαίνεται να υπάρχει μια μετατόπιση στην διεύθυνση του βέλους για κάθε συμβολογράφημα. Η φορά των κροσσών είναι κοινή και στα έξι, κατά την οποία το

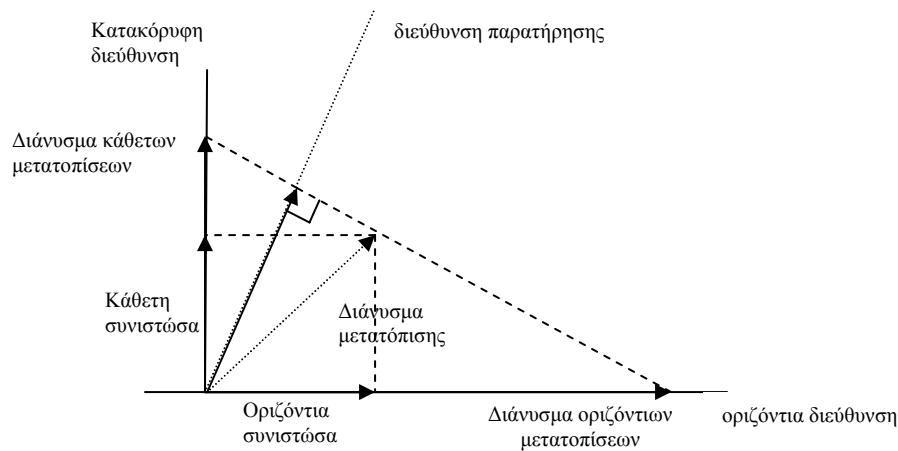
δυτικό τμήμα δείχνει να απομακρύνεται κατά την διεύθυνση παρατήρησης – ή το ανατολικό πλησιάζει – με διαφορετικό μέτρο σε κάθε περίπτωση. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς κάθε συμβολογράφημα καλύπτει και διαφορετικό χρονικό διάστημα, το οποίο ορίζεται από την πρώτη και την τελευταία εικόνα που χρησιμοποιούνται. Θεωρούμε πως ένας κύκλος αποτελείται από 10 χρώματα. Παράλληλα γνωρίζουμε πως ένας κύκλος αφορά σε μετατόπιση ίση με $\lambda/2$ ή 2,8 εκατοστά. Μετρώντας τις εναλλαγές των χρωμάτων, υπολογίζουμε την μετατόπιση μεταξύ της πρώτης και τελευταίας ημερομηνίας λήψης για κάθε άθροισμά συμβολογραφημάτων. Παρατηρώντας την διάταξη των χρωμάτων (αυξάνεται ή μειώνεται η φάση πάνω στην διεύθυνση του βέλους) είναι δυνατόν να δούμε αν η περιοχή κινείται προς τον δορυφόρο (ανύψωση) ή αν απομακρύνεται από αυτόν (καθίζηση).

No	Εικόνες	Χρονικό διάστημα (μέρες)	Χρώματα	Μετατόπιση στην διεύθυνση παρατήρησης (cm)	Μετατόπιση ανά έτος (cm)	Κατακόρυφη μετατόπιση ανά έτος (cm)
1	1550-6560-16079-24596	1610	5	2	0,45	0,51
2	6350-6851-23227	1178	4	1,6	0,50	0,55
3	7352-1550-17582-21089	2334	7	2,8	0,44	0,49
4	9356_-23227-24229-18083	1984	3	1,2	0,22	0,25
5	19720-17081-21089	1471	4	1,6	0,40	0,44
6	1550-12071-21089	1365	6	2,4	0,64	0,72
				Μέση τιμή	0,44	0,49

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός μετατοπίσεων.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την ετήσια παραμόρφωση του εδάφους καθώς και την μέση τιμή για όλα τα συμβολογραφήματα. Επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε την

κατακόρυφη μετατόπιση της περιοχής. Η συμβολομετρία ανιχνεύει μόνο την συνιστώσα των μετατοπίσεων στην διεύθυνση του radar. Γνωρίζουμε πως για τους δορυφόρους ERS 1 – 2 η γωνία παρατήρησης είναι περίπου 23° , παρόλ' αυτά η γωνία δεν συμπίπτει με την γωνία πρόσπτωσης η οποία είναι μεγαλύτερη λόγω καμπυλότητας της Γης. Το Diapason έχει την δυνατότητα να καταγράψει τις δύο αυτές γωνίες για κάθε εικονοστοιχείο. Μπορούμε έτσι να εκτιμήσουμε την μέση γωνία πρόσπτωσης της εικόνας ως $26,25^\circ$ περίπου.



Σχήμα 5.1: διάνυσμα μετατόπισης στον χώρο.

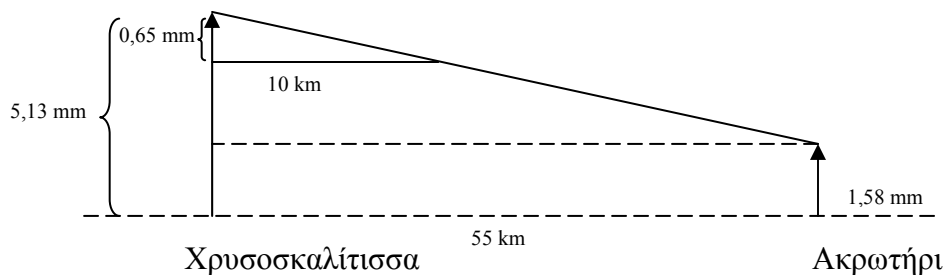
Λόγω της φύσεως της μεθόδου δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την γωνία των συνολικών μετατοπίσεων στον χώρο. Για την ανάγκη της εφαρμογής όμως θα θεωρήσουμε πως έχουμε μόνο κατακόρυφες μετατοπίσεις και μηδενικές οριζόντιες (στην πραγματικότητα δεν ισχύει). Στην περίπτωση αυτή οι μετατοπίσεις αυτές θα είναι ίσες με:

$$s = \frac{4,4mm}{\cos(26,25^\circ)} = 4,9mm$$

5.3 Αναμενόμενη μετατόπιση

Από τις αρχές του 2007 έχει εγκατασταθεί στην Χρυσοσκαλίτισσα σταθμός GPS. Μετά από έναν χρόνο λειτουργίας του σταθμού προκύπτει ότι η περιοχή ανυψώνεται με μία μέση ετήσια ταχύτητα της τάξης των 5,13 χιλιοστών / χρόνο. Αντίστοιχα σταθμός GPS στην περιοχή του Ακρωτηρίου δείχνει ανύψωση της τάξεως των 1,58 χιλιοστών ανά έτος. Επομένως η σχετική μετατόπιση της Χρυσοσκαλίτισσας ως προς το Ακρωτήριο είναι $5,13 - 1,58 = 3,55$ χιλιοστά. Η μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου 55 χιλιόμετρα όμως, ενώ η περιοχή του συμβολογραφήματος που μελετάμε είναι έκτασης 10 χιλιομέτρων. Εάν θεωρήσουμε πως η βαθμίδα μετατόπισης μεταξύ Ακρωτηρίου και Χρυσοσκαλίτισσας είναι σταθερή, δηλαδή ότι η μετατόπιση αυξάνεται γραμμικά με την σχετική απόσταση, η σχετική μετατόπιση που αναμένεται να ανιχνεύσουμε στο συμβολογράφημα για την κατακόρυφη διεύθυνση είναι:

$$s = 3,55 \cdot \frac{10}{55} = 0,65 \text{ χιλιοστά}$$



Σχήμα 5.2: Υπολογισμός θεωρητικής υψομετρικής μετατόπισης βάσει μετρήσεων GPS.

Η θεωρητική αυτή τιμή έχει αρκετά μεγάλη διαφορά από αυτήν που υπολογίσαμε κατά την εφαρμογή. Το πιο πιθανόν είναι αυτό να οφείλεται σε διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης μεταξύ Ακρωτηρίου – Χρυσοσκαλίτισσας, και έτσι η μετατόπιση στο πιο δυτικό τμήμα της Κρήτης να είναι μεγαλύτερη. Επίσης η παραδοχή που κάνουμε ότι δεν

υπάρχουν οριζόντιες μετατοπίσεις πιθανόν να μην ισχύει, γεγονός που οδηγεί σε υπερεκτίμηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Για παράδειγμα, αν είχαμε μια οριζόντια μετατόπιση της τάξεως των 5mm, αυτό θα σήμαινε πως η κατακόρυφη μετατόπιση θα ήταν 3,4mm περίπου.

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως η ελάχιστη μετατόπιση που η συμβολογραφία μπορεί να ανιχνεύσει είναι περίπου 1 cm ανά 100 χιλιόμετρα, ή 1 mm ανά 10 χιλιόμετρα λόγω μικρής ανακρίβειας στα δεδομένα των τροχιών και στις τιμές φάσεις. Παράλληλα το σφάλμα της μεθόδου εκτιμάται βιβλιογραφικά στο 5% του μήκους κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται, στην συγκεκριμένη περίπτωση δηλαδή το σφάλμα είναι ίσο με 2,8 mm. Αυτό σημαίνει πως για διάστημα ενός χρόνου η τεχνική δεν μπορεί να ανιχνεύσει την αναμενόμενη μετατόπιση στην περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας. Αυτό το πρόβλημα λύνεται στην περίπτωσή μας αν τα συμβολογραφήματα είναι χρονικού διαστήματος μεγαλύτερου του ενός έτους, οπότε και η ανιχνεύσιμη μετατόπιση θα είναι μεγαλύτερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το συμπέρασμα που προκύπτει από τα συμβολογραφήματα είναι πως η περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας ανυψώνεται κατά 4,9 mm σε σχέση με το ανατολικότερο τμήμα της δυτικής Κρήτης. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τις τιμές GPS που διαθέτουμε, οι οποίες δείχνουν ανύψωση της περιοχής, της τάξης των 5,13 mm. Παρόλ' αυτά η μετατόπιση που προκύπτει από την εφαρμογή είναι σχετική φύσεως που αφορά μόνο την περιοχή των εικόνων, ενώ οι τιμές GPS είναι απόλυτες. Γενικά τα συμπεράσματα που εξάγουμε κατά την διπλωματική εργασία είναι:

- Οι διαθέσιμες εικόνες και οι πιθανοί συνδυασμοί τους αποτελούν το πιο σημαντικό κριτήριο για την επιτυχή εφαρμογή της συμβολομετρίας. Όλα τα προβλήματα, από την υψηλή αποσυσχέτιση έως την επίδραση της ατμόσφαιρας ξεκινούν από την επιλογή των εικόνων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των διαθέσιμων εικόνων τόσο αυξάνει η πιθανότητα υπέρβασης των προβλημάτων αυτών.
- Η επίδραση της ατμόσφαιρας αποτελεί τον πιο αστάθμητο παράγοντα κατά την παραγωγή του συμβολογραφήματος καθώς δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί και να ποσοτικοποιηθεί. Υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσής της με την τεχνική της συσσώρευσης των συμβολογραφημάτων εάν οι τιμές συνοχής μας το επιτρέπουν. Ακόμη όμως και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να κάνουμε την παραδοχή ότι τα δεδομένα φάσης της πρώτης και της τελευταίας χρονικά εικόνας δεν έχουν υποστεί αλλοίωση λόγω επίδρασης της ατμόσφαιρας.
- Είναι αρκετά σημαντικό κατά το ξεκίνημα της εφαρμογής να γνωρίζουμε την περιοχή που μελετάμε αλλά και το τι ακριβώς ψάχνουμε να βρούμε.. Στην περίπτωση που ερευνούμε μικρομετακινήσεις του εδάφους θα πρέπει να έχουμε μια γενική εκτίμηση για την ένταση αυτών, αλλά και το χρονικό διάστημα στο οποίο εκδηλώνονται. Η

διαδικασία της εφαρμογής μπορεί να γίνει αρκετά διαφορετικά στην μελέτη των μετατοπίσεων από ένα σεισμό σε αντίθεση με την μελέτη τεκτονικών μετατοπίσεων που γίνονται σε μεγάλο βάθος χρόνου.

- Στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν αδύνατον να υπολογίσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την αναμενόμενη μετατόπιση του εδάφους στην περιοχή. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι τυχόν επιδράσεις ατμόσφαιρας και τοπογραφίας στα συμβολογραφήματα. Παράλληλα, η μετατόπιση που προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε είναι πολύ κοντά στα ανιχνεύσιμα όρια της συμβολομετρίας. Παρόλ' αυτά επιβεβαιώνεται η ύπαρξη της σε πολλά από αυτά, γεγονός που καθιστά την εφαρμογή αξιοποιήσιμη.

6.2 Μελλοντικές προτάσεις

- Στην παρούσα εφαρμογή η αναμενόμενη μετατόπιση είναι υπερβολικά μικρή ώστε η μέθοδος να μας δώσει αξιόπιστα δεδομένα, κυρίως λόγω των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Εάν οι αναμενόμενες παραμορφώσεις ήταν μεγαλύτερες, εντός των ορίων του ρυθμού μεταβολής φάσης πάντα, τότε πιθανόν οι επιδράσεις αυτές να μην ήταν τόσο σημαντικές.
- Για την ανίχνευση μικρής μετατόπισης τεκτονικής φύσεως θα ήταν καλύτερα να έχουμε στην διάθεση μας περισσότερες εικόνες με όσο το δυνατόν μεγάλες τιμές h_a για χρονικό διάστημα π.χ. δύο ή τριών ετών, προκειμένου να μπορούμε να κάνουμε περισσότερους συνδυασμούς εικόνων.
- Η μέθοδος συμβολομετρίας τριών και τεσσάρων περασμάτων (Κεφάλαιο 3) αξίζει να μελετηθεί για πιθανόν καλύτερη αφαίρεση των κροσσών τοπογραφίας από τα συμβολογραφήματα.

- Μια άλλη τεχνική που αξίζει να χρησιμοποιηθεί είναι η τεχνική των Μόνιμων Σκεδαστών (Permanent Scatterers). Αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου της συμβολομετρίας. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι πως κατά την εφαρμογή ορίζονται κάποια σημεία στις εικόνες ως σταθερά στην πάροδο του χρόνου (π.χ. κτήρια και γενικότερα μεταλλικές κατασκευές), και έτσι μπορούμε κατά κάποιο τρόπο να αγνοήσουμε εξωτερικές επιδράσεις.
- Ένας Δεύτερος γεωδαιτικός δορυφορικός σταθμός στην περιοχή θα βοηθούσε αρκετά, έτσι ώστε να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης των σχετικών μεταβολών που παρατηρούνται στην εικόνα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.Ramon F. Hanssen: Rasar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis

2.Coert Olmsted :Scientific SAR User's Guide, July 1993

3.Massonnet – Feigl: Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface, 1998

4.ESA: Philosophy of Diapason, Technical manual, 2005

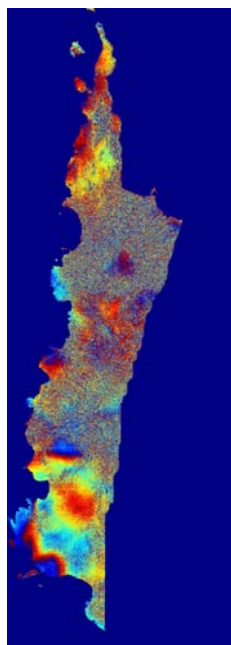
5.Σ. Μερτικας: Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας, 2001

Πηγές Διαδικτύου

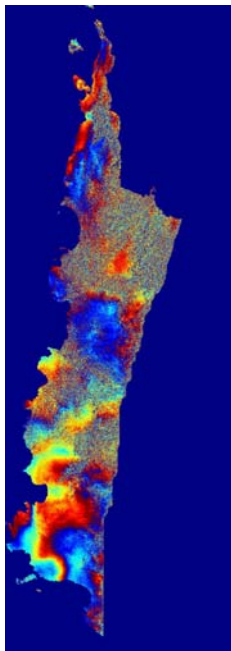
[6.http://comet.nerc.ac.uk/schoolssar_interpret.html](http://comet.nerc.ac.uk/schoolssar_interpret.html) Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes and Tectonics

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μεμονωμένα Συμβολογραφήματα

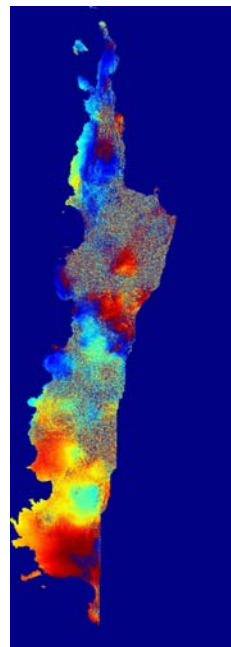
Τα παρακάτω συμβολογραφήματα είναι αυτά που χρησιμοποιήσαμε για να προκύψουν τα αθροίσματα συμβολογραφημάτων του Πίνακα 5.1



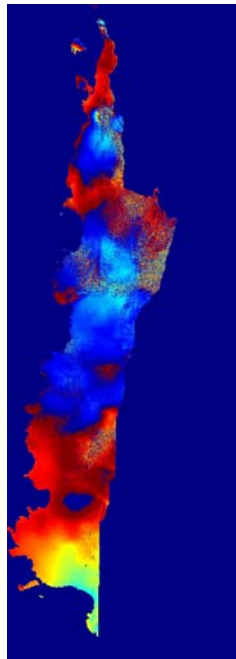
19720 – 17081



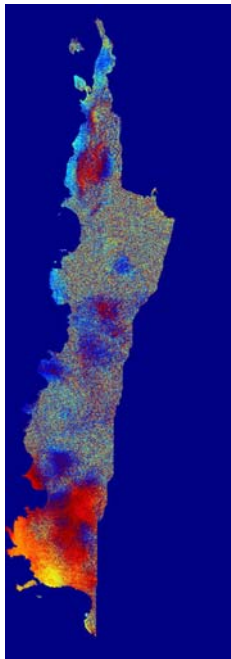
17081 – 21089



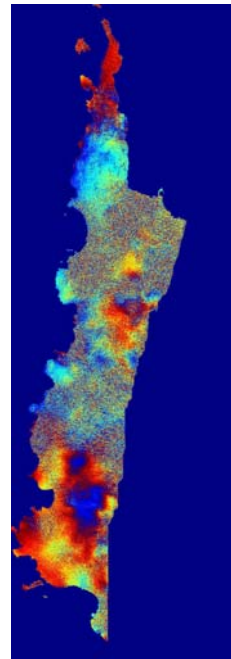
9356 – 23227



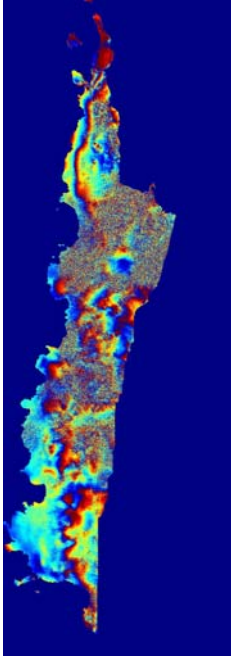
23227 – 24229



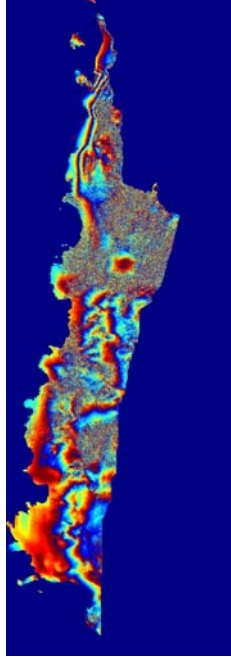
24229 – 18083



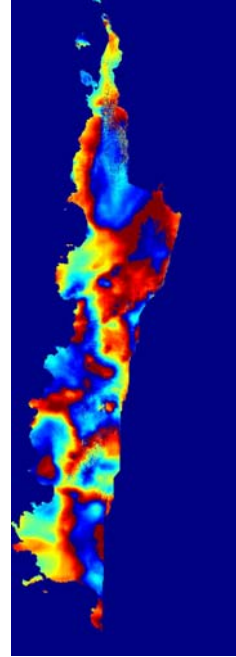
7352 – 1550



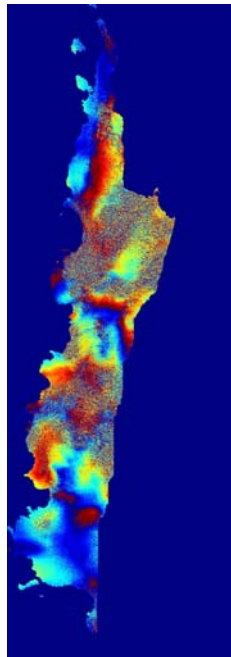
1550 – 17582



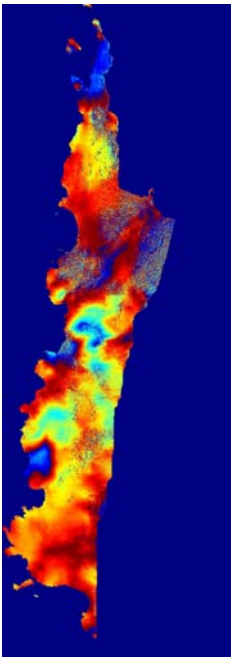
17582 – 21089



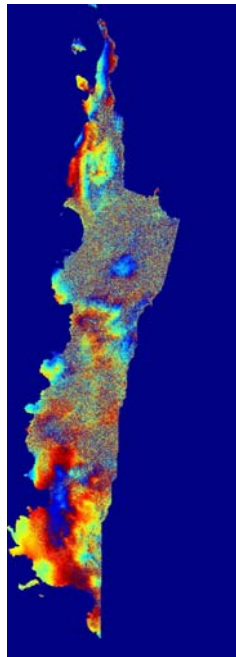
6350 – 6851



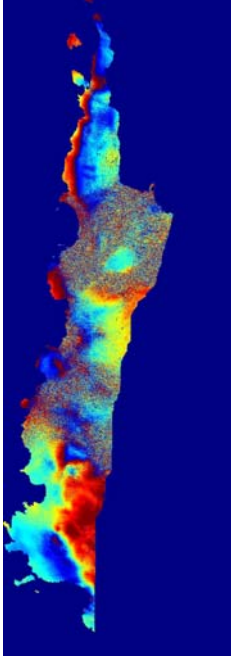
6851 – 23227



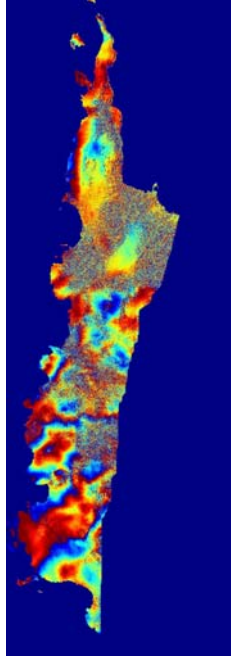
1550 – 6560



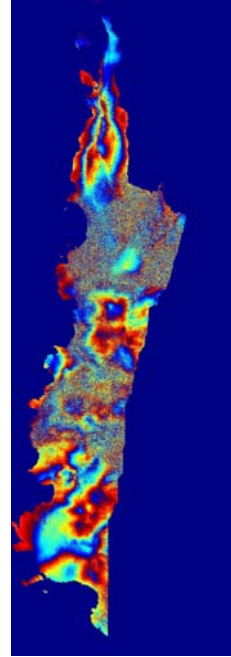
6560 – 16079



16069 – 24596



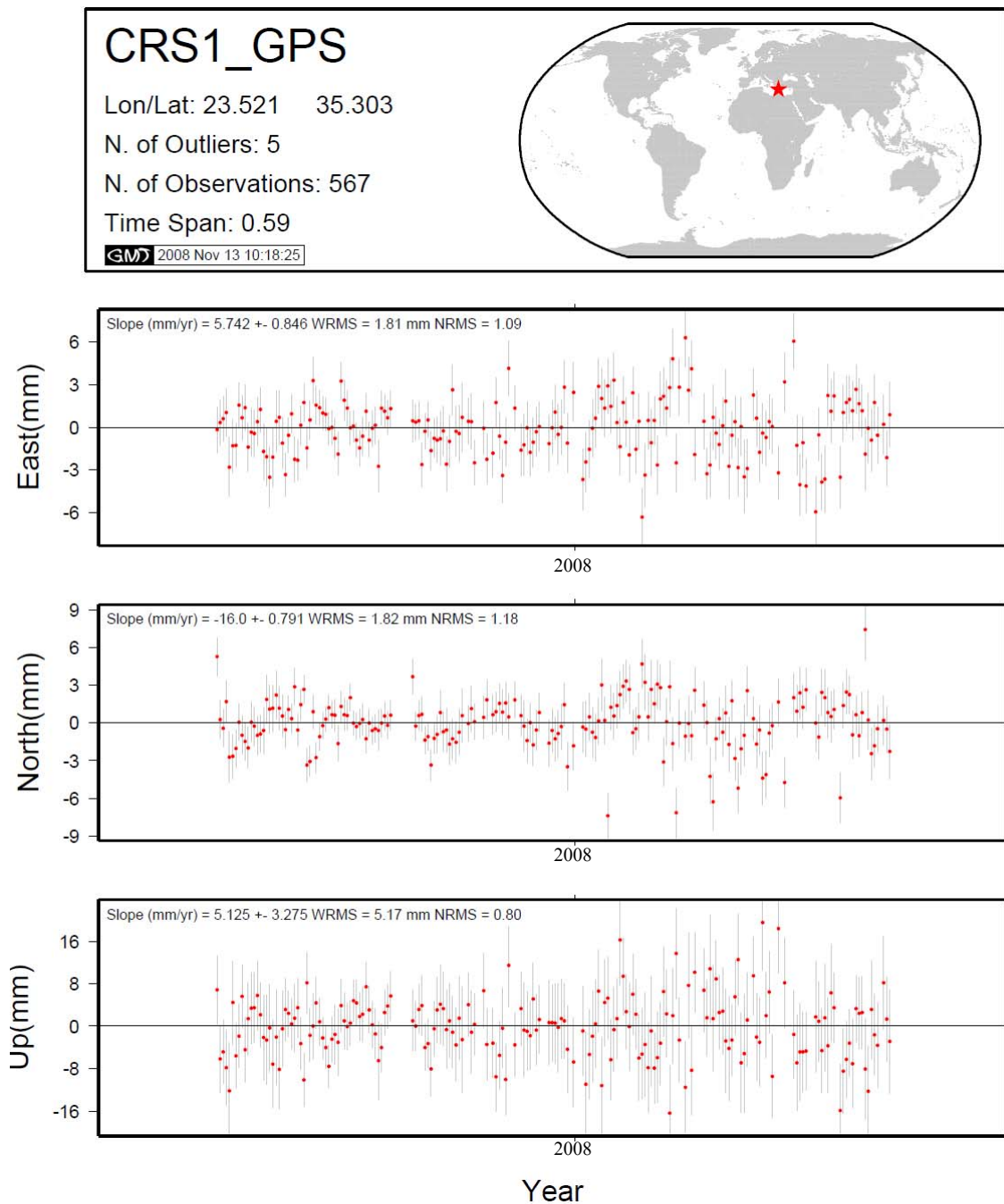
1550 – 12071



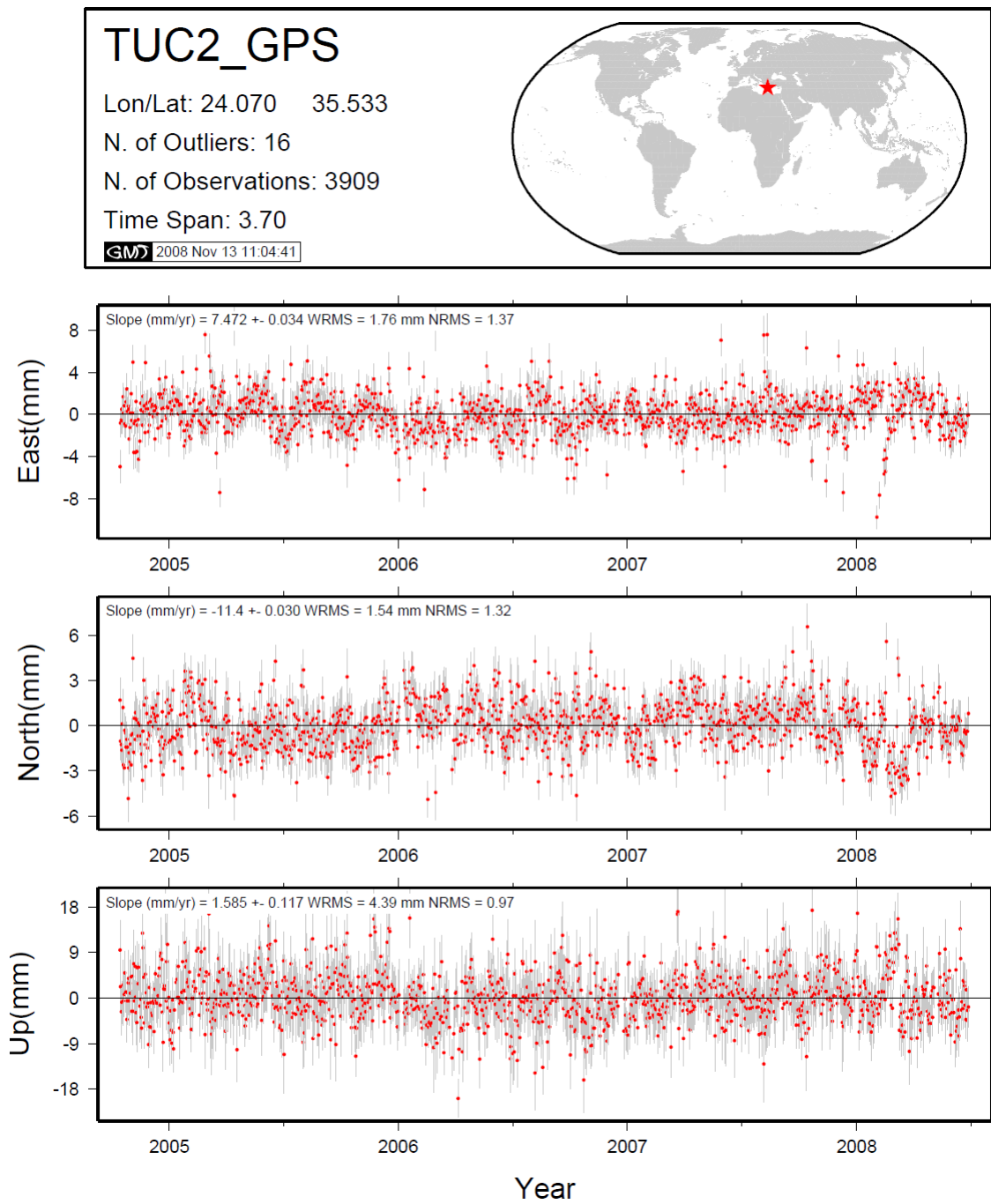
12071 – 21089

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Δεδομένα μετατοπίσεων GPS

α) Σταθμός Χρυσοκαλίτισσας



β) Σταθμός Ακρωτηρίου



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Ενδεικτικό αρχείο geosar

```
-----
DESCRIPTOR FILE OF A RADAR IMAGE
(each line must be an iso-doppler)
(chaque ligne image doit etre un iso-doppler)
-----
LNG                                     ENGLISH
-----
GENERIC INFORMATION
-----
ORBIT NUMBER                           6560
FRAME NUMBER                           2897
SATELLITE PASS                         DESCENDING
AREA                                   ---
NAME OF THE SITE                       ---
STATUS                                 PROCESSED
-----
GENERIC SENSOR INFORMATION
-----
SENSOR NAME                            ERS2
MODE                                   Band C - IMAGE
MODE
SWATH                                  ---
POLARISATION                           VV
-----
SENSOR INFORMATION
-----
LOOKING                                RIGHT
SAMPLING FREQUENCY
18962468.0000000000
PRF                                     1679.9023936392
CARRIER FREQUENCY
5290517382.5574417114
ORBIT INCLINATION                       98.5420000000
-----
DATA EXTRACTION INFORMATION
-----
DATA INFO FILE
/home/lioself/21223_6560//DATA_EXTRACT_INFO_6560.dat
DATA FIRST RECORD                       2
DATA RECORD SIZE                        11644
DATA FIRST POINT                        413
RAW COUNTER POSITION                     211
SWST VALUE                              878
FIRST SWST                              900
LAST SWST                               878
DATA NUMBER OF ROWS                     28374
DATA NUMBER OF COLUMNS                 5616
-----
EXTRACTED RAW DATA INFORMATION
-----
```

RAW FILE	
/home/lioself/21223_6560//6560_RAW.c5b	
RAW DATA TYPE	C5B
RAW TOTAL NUMBER OF ROWS	28374
RAW TOTAL NUMBER OF COLUMNS	5704
NPRI	9
PRI VALUE	2820
RAW PROCESSOR	PGS-ERS
RAW PAF	I-PAF
EXTRACTION DATE	08-12-2008

SAR PROCESSING PARAMETER	

SAR PROCESSOR	PRISME
VERSION	2.0
PROCESSING DATE	08-12-2008
RANGE COMPRESSION RATE	858.5000000000
CHIRP LENGTH	768.0000000000
AZIMUTH DOPPLER FILE	
/home/lioself/21223_6560/doppler_6560	
AZIMUTH DOPPLER NUMBER OF COLUMN	1
AZIMUTH DOPPLER NUMBER OF LINE	1
AZIMUTH DOPPLER VALUE	0.0642176126
FIRST AZIMUTH COMPRESSION RATE	1312.3796021892
AZIMUTH COMPRESSION RATE SLOPE	0.0130472602
RESTITUTION DOPPLER	0.0000000000
PRESUMMING RATE	1
FIRST PROCESSED LINE	1
FIRST PROCESSED COLUMN	1
NUMBER OF LINES PROCESSED	28000
NUMBER OF COLUMNS PROCESSED	5704
SLC GAIN	100.0000000000
SLC DATA TYPE	CI2
SLC NUMBER OF ROWS	28000
SLC NUMBER OF COLUMNS	5704
SLC FILE	
/home/lioself/21223_6560//6560_SLC.ci2	
ML AZIMUTH	5
ML RANGE	1
ML GAIN	10.0000000000
ML DATA TYPE	OCT
ML NUMBER OF ROWS	5600
ML NUMBER OF COLUMNS	5704
ML FILE	
/home/lioself/21223_6560//6560_ml51.oct	

GEOGRAPHIC PARAMETER	

ORBIT TYPE	DELFT
ORBIT PRECISION	PRECISE
ORBITAL FILE	
/home/lioself/21223_6560/precise_6560.orb	
REDUCED ISO-DOPPLER	0.0000000000

JULIAN DAY OF THE FIRST LINE	17004
TIME OF THE FIRST LINE	32697.8060000000
NEAR RANGE (NR)	829884.6488125668
LINE SPACING	4.4957262657
PIXEL SPACING RANGE	7.9048902812
AZIMUTH UNDERSAMPLING	1
RANGE UNDERSAMPLING	1
PRECISE NEAR RANGE	---
PRECISE TIME	---
PRECISE RATIO	---
DEM TYPE	NONE
DEM DESCRIPTOR	---
CENTER LATITUDE	35.2631344000
CENTER LONGITUDE	24.0559507000
LL LATITUDE	---
LR LATITUDE	---
UL LATITUDE	---
UR LATITUDE	---
LL LONGITUDE	---
LR LONGITUDE	---
UL LONGITUDE	---
UR LONGITUDE	---
DATUM	WGS84
CALIBRATION CONSTANT	---
DOPPLER CONSTANT TERM	---
DOPPLER LINEAR TERM	---
DOPPLER QUADRATIC TERM	---
CHIRP POWER	---
CHIRP TYPE	---