



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Συμβολομετρία RADAR στην παρακολούθηση  
υψομετρικών παραμορφώσεων του εδάφους**

**Διπλωματική Εργασία**

**Μαρία Μπικουβαράκη**

**Συμβουλευτική επιτροπή :**  
Μερτίκας Στυλιανός (επιβλέπων)  
Παρτσινέβελος Παναγιώτης  
Μουσλοπούλου Βασιλική

**Χανιά 2011**

## **Περίληψη**

Συχνά παρατηρούνται υψομετρικές παραμορφώσεις στο έδαφος, οι οποίες έχουν προκληθεί από φυσικά αίτια (π.χ. σεισμοί, κατολισθήσεις, καθιζήσεις κλπ) ή από την ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. υπόγειες εκμεταλλεύσεις, υπεράντληση νερού κλπ). Η διαφορική συμβολομετρία RADAR συνθετικού ανοίγματος (DInSAR) είναι μία νέα τεχνική η οποία δύναται να μετρήσει αυτού του είδους τις παραμορφώσεις με ακρίβεια μερικών εκατοστών και συχνά χιλιοστών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας RADAR συνθετικού ανοίγματος στην περιοχή της Χρυσосκαλίτισσας, στο νοτιοδυτικό άκρο της νήσου Κρήτης. Η επιλογή της θέσης αυτής έγινε βάσει του γεγονότος ότι εμφανίζεται στην περιοχή μία τάση για ανύψωση της τάξεως των πέντε χιλιοστών ανά έτος.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων είναι το Repeat Orbit Interferometry PACkage (ROI\_PAC) το οποίο δημιουργήθηκε από το Jet Propulsion Laboratory της NASA, και το Caltech.

## **Abstract**

The Earth crust is often deformed by natural processes (e.g. earthquakes, landslides, subsidence, etc.) and/or human activity (e.g. underground mining, water pumping etc.). Differential Synthetic Aperture RADAR Interferometry (DInSAR) is a new technique that is able to measure these deformations with an accuracy of centimeters and sometimes millimeters. This thesis aims to apply differential SAR Interferometry at the area of Chrysoskalitissa in Southwestern Crete, Greece. The choice of this position was based on the fact that the ground surface at this area, is being uplifted at approximately five millimeters per year.

The computer program that was used for image processing, is Repeat Orbit Interferometry PACkage (ROI\_pac) which is created by Jet Propulsion Laboratory of NASA, and Caltech.

## **Δομή εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της χρήσης της τηλεπισκόπησης. Περιγράφονται οι στόχοι της τηλεπισκόπησης, καθώς και τα είδη των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για τη λήψη των εικόνων. Αναλύονται οι αρχές που διέπουν τη λειτουργία των RADAR καθώς και η γεωμετρία των συστημάτων αυτών. Παρουσιάζεται επίσης η ιστορία των εικονοληπτικών δορυφόρων ERS.

Κατόπιν γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των εικόνων SAR. Επισημαίνονται οι διάφορες παραμορφώσεις που ενδέχεται να παρουσιαστούν στις εικόνες αυτές, καθώς και η επιρροή της ατμόσφαιρας και άλλων πηγών θορύβου στο σήμα που καταγράφεται.

Στη συνέχεια, γίνεται μία εκτενής παρουσίαση της τεχνικής της συμβολομετρίας και οι πιθανές αιτίες των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στη διάρκεια της επεξεργασίας. Παρατίθενται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να συντεθεί ένα συμβολογράφημα, καθώς και η ερμηνεία των τελικών δεδομένων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό ROI\_PAC και τα δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή του, καθώς και τα τελικά δεδομένα που προκύπτουν. Ταυτόχρονα, γίνεται εφαρμογή στην περιοχή μελέτης. Αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, και ακολούθως γίνεται η επεξεργασία με το λογισμικό ROI\_PAC. Κατόπιν, γίνεται ανάλυση των επιμέρους διαδικασιών που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των εικόνων. Παρατίθενται οι εικόνες που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας μέχρι το τελικό γεωμετρικώς διορθωμένο συμβολογράφημα. Εξετάζονται όλοι οι παράγοντες που συμβάλλουν στη μετρούμενη φάση, και κατόπιν, ερμηνεύεται το αποτέλεσμα της διαδικασίας. Με τη συσχέτιση της τοπογραφίας με τη φάση, αποδεικνύεται ότι η παρατηρούμενη παραμόρφωση είναι πλασματική, και ότι το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε λόγω ατμοσφαιρικής συμβολής.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα από την εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας, και ειδικότερα για την περιοχή της Χρυσосκαλίτισσας. Αναφέρεται η τοπογραφία της περιοχής που ενδέχεται να προκάλεσε την επίδραση της ατμόσφαιρας, και δίνονται προτάσεις για την απαλοιφή της ατμοσφαιρικής συμβολής από τα συμβολογραφήματα.

## **Ευχαριστίες**

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους οι οποίοι συνέβαλαν καθοριστικά, με τη βοήθειά τους, στη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας μου.

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά της εργασίας μου, Καθηγητή κ Σ.Μερτίκα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, για τη συνολική του επιστημονική καθοδήγηση καθώς και για την υποστήριξη και την ενθάρρυνσή του κατά τη διάρκεια της διεκπεραίωσής της.

Ευχαριστώ επίσης τον κ Π.Παρτσινέβελο και την κα Β.Μουσλοπούλου που δέχτηκαν να συμμετέχουν στη συμβουλευτική επιτροπή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω σε όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, και κυρίως στην κα Ε.Παπαδάκη η οποία μου προσέφερε πολύτιμη βοήθεια και συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, και στον κ Ξ.Φρατζή για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συνεχή υποστήριξή τους, τη βοήθειά τους, και την υπομονή τους, όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **1. Εισαγωγή**

### **2. Βασικές έννοιες**

#### **2.1 Τηλεπισκόπηση**

#### **2.2 RADAR**

- 2.2.1 Εισαγωγή στα RADAR
- 2.2.2 Γεωμετρία και χωρική ανάλυση συστημάτων RADAR
- 2.2.3 Είδη εικονοληπτικών συστημάτων RADAR
- 2.2.4 Ιστορική αναδρομή του ERS (European Remote Sensing)
- 2.2.5 Ιστορική αναδρομή του Envisat

#### **2.3 Εικόνες SAR**

- 2.3.1 Εισαγωγή
- 2.3.2 Η σύνθετη εικόνα SAR
- 2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τις εικόνες SAR
- 2.3.4 Στίγματα RADAR (speckles)
- 2.3.5 Παραμορφώσεις στην εικόνα RADAR
- 2.3.6 Ανιούσα και κατιούσα τροχιά δορυφόρων

#### **2.4 Συμβολομετρία RADAR**

- 2.4.1 Εισαγωγή
- 2.4.2 Εφαρμογή συμβολομετρίας στον υπολογισμό υψομέτρων και τον προσδιορισμό εδαφικών παραμορφώσεων
  - 2.4.2.1 Θόρυβος
  - 2.4.2.2 Ατμοσφαιρική συμβολή
  - 2.4.2.3 Εσωτερική συμβολή
  - 2.4.2.4 Αποσυσχέτιση
- 2.4.3 Επεξεργασία εικόνων SAR και αποτελέσματα συμβολομετρίας (InSAR) και διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR)
  - 2.4.3.1 Είδη εικόνων
  - 2.4.3.2 Συμβολογράφημα
  - 2.4.3.3 Συνάφεια (coherence)

- 2.4.3.4 Τοπογραφία και τροχιές των δορυφόρων
- 2.4.3.5 Εξομάλυνση συμβολογραφήματος (interferogram flattening)
- 2.4.3.6 Υψόμετρο αμφισημίας (altitude of ambiguity)
- 2.4.3.7 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης (phase unwrapping)
- 2.4.3.8 Γεωμετρική διόρθωση (Geocoding)

### **3. Μελέτη περιοχής με το λογισμικό ROI\_PAC**

#### **3.1 Μελέτη περιοχής**

#### **3.2 Λογισμικό ROI\_PAC**

##### 3.2.1 Τύποι αρχείων (files)

#### **3.3 Προγράμματα οπτικοποίησης δεδομένων εξόδου**

#### **3.4 Δεδομένα**

#### **3.5 Επεξεργασία**

- 3.5.1 Έλεγχος διαδικασιών
- 3.5.2 Ρυθμίσεις των raw δεδομένων
- 3.5.3 Μετατροπή raw εικόνας σε SLC (focusing)
- 3.5.4 Multilooking
- 3.5.5 Εγγραφή εικόνας (coregistration)
- 3.5.6 Δημιουργία συμβολογραφήματος
- 3.5.7 Εξομάλυνση συμβολογραφήματος
- 3.5.8 Απαλοιφή τοπογραφίας
- 3.5.9 Καθορισμός της συσχέτισης
- 3.5.10 Μη γραμμικό προσαρμοζόμενο φιλτράρισμα συμβολογραφήματος
- 3.5.11 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης και καθορισμός απόλυτης φάσης
  - 3.5.11.1 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης
  - 3.5.11.2 Καθορισμός απόλυτης φάσης
- 3.5.12 Καθορισμός κάθετου ανύσματος βάσης (perpendicular baseline)
- 3.5.13 Γεωμετρική διόρθωση (geocoding)

### **3.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας**

#### **3.6.1 Παράγοντες δημιουργίας κροσσών**

3.6.1.1 Υψόμετρο αμφισιγμίας  $h_a$

3.6.1.2 Παραμόρφωση εδάφους λόγω ανύψωσης

3.6.1.3 Παραμόρφωση εδάφους λόγω σεισμικής δραστηριότητας

3.6.1.4 Ατμόσφαιρα

### **4.Συμπεράσματα - Προτάσεις**

Παράρτημα : Υπορουτίνες λογισμικού ROI\_PAC

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1 : ERS-2
- Εικόνα 2 : Envisat
- Εικόνα 3 : Εικόνα SAR από τον ERS
- Εικόνα 4 : Αριστερά: Στίγματα RADAR σε εικόνα.  
Δεξιά: Η ίδια εικόνα όπου έχουν αφαιρεθεί τα στίγματα.
- Εικόνα 5 : Τυπική μορφή συμβολογραφήματος, στο οποίο φαίνονται δύο περιοχές παραμόρφωσης του εδάφους
- Εικόνα 6 : Επάνω : Συμβολογράφημα παραμόρφωσης στην περιοχή Ρομπονα  
Κάτω : Τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης
- Εικόνα 7: Χάρτης συνάφειας περιοχής του Καΐρου. Με λευκό είναι οι περιοχές με μεγαλύτερη συνάφεια.
- Εικόνα 8: Παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους εξαιτίας υπόγειου ανθρακωρυχείου.
- Εικόνα 9 : Αριστερά: Συμβολογράφημα μιας περιοχής των ιταλικών Άλπεων από τον ERS.  
Δεξιά: Εξομαλυμένο συμβολογράφημα.
- Εικόνα 10 : Πάνω αριστερά: συμβολομετρική φάση SAR. Πάνω δεξιά: η αποκατεστημένη εκδοχή της.  
Κάτω: συμβολογράφημα με το κατάλληλο ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π που έχει προστεθεί στην αυθεντική φάση.
- Εικόνα 11 : Πάνω: εξομαλυμένο συμβολογράφημα  
Κάτω: το σχετικό DEM του βουνού Αίτνα που λήφθηκαν μέσω αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης και αναδόμησης εικονοστοιχείων.
- Εικόνα 12 : Επάνω, εικόνα SAR που έχει ληφθεί από τον ERS-1.  
Κάτω, η ίδια εικόνα μετά τη γεωκωδικοποίηση.
- Εικόνα 13 : Χάρτης της Ελλάδας
- Εικόνα 14 : Χάρτης Νομού Χανίων
- Εικόνα 15 : Περιοχή Ενδιαφέροντος
- Εικόνα 16 : Παράθυρα εφαρμογής ENVI
- Εικόνα 17 : Παράθυρα εφαρμογής RoiView
- Εικόνα 18 : DEM της ευρύτερης περιοχής
- Εικόνα 19 : DEM της περιοχής μελέτης



- Εικόνα 20 : Εικόνα εύρους του νομού Χανίων
- Εικόνα 21 : Εικόνα εύρους της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας
- Εικόνα 22 : Raw συμβολογράφημα του νομού Χανίων
- Εικόνα 23 : Raw συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας
- Εικόνα 24 : Εξομαλυμένο συμβολογράφημα του νομού Χανίων
- Εικόνα 25 : Εξομαλυμένο συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας
- Εικόνα 26 : Χάρτης συνάφειας της περιοχής μελέτης
- Εικόνα 27 : Συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας όπου έχει αφαιρεθεί η τοπογραφία και έχει εφαρμοστεί φίλτρο
- Εικόνα 28 : Αποκατεστημένη φάση της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας
- Εικόνα 29: Επάνω : Γεωκωδικοποιημένα δεδομένα της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας  
Κάτω : DEM της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας
- Εικόνα 30 : Χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για το γεωκωδικοποιημένο συμβολογράφημα
- Εικόνα 31 : Τομή A-A'

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1 : Απλοποιημένο μοντέλο καταγραφής τηλεπισκοπικών δεδομένων
- Σχήμα 2: Αρχή λειτουργίας του RADAR
- Σχήμα 3: Γεωμετρία τυπικού συστήματος απεικόνισης RADAR
- Σχήμα 4: RADAR πραγματικού ανοίγματος κεραίας SAR
- Σχήμα 5: Η διαδικασία σύνθεσης μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας
- Σχήμα 6: Εικονοληπτικό δορυφορικό σύστημα SAR
- Σχήμα 7 : Διάταξη εικονοστοιχείων εικόνας SAR
- Σχήμα 8: Η ημιτονοειδής συνάρτηση  $\sin\phi$  είναι περιοδική, με περίοδο  $2\pi$
- Σχήμα 9 : Ανάκλαση από διάφορες επιφάνειες
- Σχήμα 10 : Φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης, αναστροφής και σκίασης
- Σχήμα 11 : Παρατήρηση του ίδιου σημείου κατά την ανιούσα και κατά την κατιούσα τροχιά του δορυφόρου.
- Σχήμα 12: Γεωμετρία ενός δορυφορικού συμβολομετρικού συστήματος SAR
- Σχήμα 13 : Γεωμετρικοί παράγοντες ενός δορυφορικού συστήματος InSAR

- Σχήμα 14 : Μεταβολή της φάσης του σήματος λόγω μετακίνησης του εδάφους
- Σχήμα 15 : Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης.
- Σχήμα 16 : Μετατροπή συντεταγμένων συστήματος SAR σε χαρτογραφικό σύστημα, και αντίστροφα
- Σχήμα 17 : Η καταβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την ευρασιατική
- Σχήμα 18 : Διάγραμμα ροής λογισμικού ROI\_pac
- Σχήμα 19 : Συσχέτιση τοπογραφίας με φάση κατά μήκος της τομής A-A'

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1: Ονομασία και μήκη κύματος των RADAR
- Πίνακας 2: Συχνότητες λειτουργίας των RADAR
- Πίνακας 3 : Αρχεία ASCII
- Πίνακας 4 : Δυαδικά (binary) αρχεία
- Πίνακας 5 : Στοιχεία εικόνων
- Πίνακας 6 : Παράμετροι RADAR του ERS
- Πίνακας 7 : Στοιχεία DEM

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ως εδαφική παραμόρφωση χαρακτηρίζεται η επιφανειακή έκφραση διαφόρων διεργασιών, που λαμβάνουν χώρα σε μια περιοχή. Σε αυτές τις διεργασίες περιλαμβάνονται οι φυσικές, όπως είναι η σεισμική δραστηριότητα, τα ηφαίστεια, οι καθιζήσεις, οι κατολισθήσεις, και οι τεχνητές, οι οποίες προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως είναι οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Οι μετακινήσεις του εδάφους μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις κατασκευές και τη λειτουργία των τεχνικών έργων, γεγονός που δύναται να επιφέρει απώλειες και οικονομικές ζημίες.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις του εδάφους. Οι επίγειες παρατηρήσεις είναι οι παλαιότερες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στις γεωδαιτικές επιστήμες προκειμένου να υπολογιστεί η θέση ενός σημείου που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της Γης, και η μετατόπισή του σε σχέση με κάποιο άλλο σημείο της επιφάνειας της Γης. Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού, όπως το GPS μπορούν να υπολογίσουν τη θέση ενός σημείου της επιφάνειας της Γης, σε σχέση με ένα άλλο ή σε δεδομένο σύστημα αναφοράς, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να πραγματοποιηθούν επίγειες γεωδαιτικές μετρήσεις.

Η συμβολομετρία RADAR είναι μια νέα τεχνική η οποία χρησιμοποιεί εικόνες SAR και αναπτύσσεται από τις αρχές της δεκαετίας του '90. Η συμβολομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή χαρτών κάλυψης της Γης, καθώς και για την παρακολούθηση παραμορφώσεων του εδάφους με ακρίβεια μερικών χιλιοστών. Οι παραμορφώσεις υπολογίζονται πάντα σε σχέση με ένα άλλο σημείο της περιοχής, που θεωρείται ότι δεν έχει υποστεί παραμόρφωση. Η τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ευρεία περιοχή της επιφάνειας της Γης, σε βάθος χρόνου, χωρίς να υπάρχει ανάγκη επιτόπιας έρευνας της περιοχής μελέτης, γεγονός που αναδεικνύει τη συμβολομετρία σε σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ**

### **2.1 ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ**

Ο όρος τηλεπισκόπηση, χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αντίληψη αντικειμένων, φαινομένων, και χαρακτηριστικών, από απόσταση, βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η τηλεπισκόπηση, με την ευρεία έννοια, μπορεί να περιλαμβάνει την ανθρώπινη όραση και ακοή, καθώς και τις ακτίνες Χ που χρησιμοποιούνται στην ιατρική. Στον κλάδο των γεωεπιστημών, η τηλεπισκόπηση περιγράφει τη διαδικασία της απόκτησης πληροφοριών για μία περιοχή της επιφάνειας του εδάφους.

Η τηλεπισκόπηση αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα:

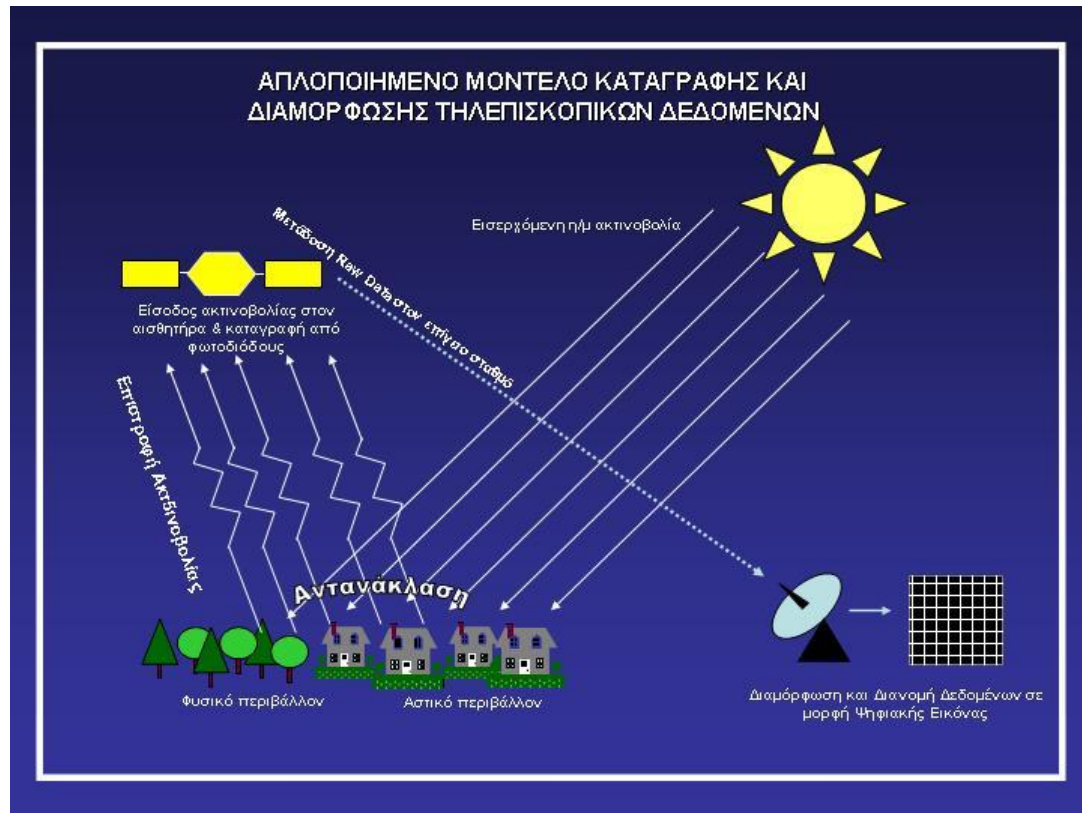
- οι στόχοι οι οποίοι είναι τα αντικείμενα που πρόκειται να μελετηθούν
- η τεχνική με την οποία θα γίνει η συλλογή των δεδομένων
- η ανάλυση και η ερμηνεία των δεδομένων που λήφθηκαν.

Η συλλογή των δεδομένων τηλεπισκόπησης γίνεται από ανιχνευτές οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται προσαρτημένοι είτε σε αεροσκάφη, είτε σε τεχνητούς δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η αρχή της λειτουργίας τους είναι να καταγράφουν το ποσοστό και τη φάση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αντανακλάται από τα διάφορα υλικά (Σχήμα 1). Το ποσοστό της ενέργειας που θα ανακλαστεί εξαρτάται από τη χημική σύσταση της επιφάνειας του στόχου, και από τις φυσικές του ιδιότητες όπως είναι η τραχύτητα και η κλίση του.

Οι ανιχνευτές, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο είδη: τους παθητικούς και τους ενεργητικούς ανιχνευτές. Οι παθητικοί ανιχνευτές χρησιμοποιούν μία ήδη υπάρχουσα πηγή ενέργειας, όπως είναι ο ήλιος, για να λάβουν τις μετρήσεις τους. Οι ενεργητικοί ανιχνευτές, παρέχουν οι ίδιοι την πηγή της ενέργειας που χρειάζεται. Τέτοιοι ενεργητικοί ανιχνευτές είναι και τα ραντάρ, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω [Καπαγερίδης,2010].

Μία άλλη διάκριση των ανιχνευτών βασίζεται στον αριθμό και το εύρος των φασματικών καναλιών τους. Οι ανιχνευτές που καταγράφουν σε μία φασματική ζώνη, ονομάζονται μονοφασματικοί. Όταν καταγράφουν δεδομένα σε όλο το ορατό τμήμα του φάσματος και στο υπεριώδες, προκύπτουν εικόνες που ονομάζονται παγχρωματικές. Οι ανιχνευτές που καταγράφουν σε περισσότερες από μία φασματικές ζώνες, είναι ευρέως διαδεδομένοι και ονομάζονται πολυφασματικοί.

Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει επιρροή από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στη λήψη των εικόνων, ανάλογα με τη φασματική ζώνη που καταγράφει ο ανιχνευτής.



Σχήμα 1 : Απλοποιημένο μοντέλο καταγραφής τηλεπισκοπικών δεδομένων (Βικιπαίδεια)

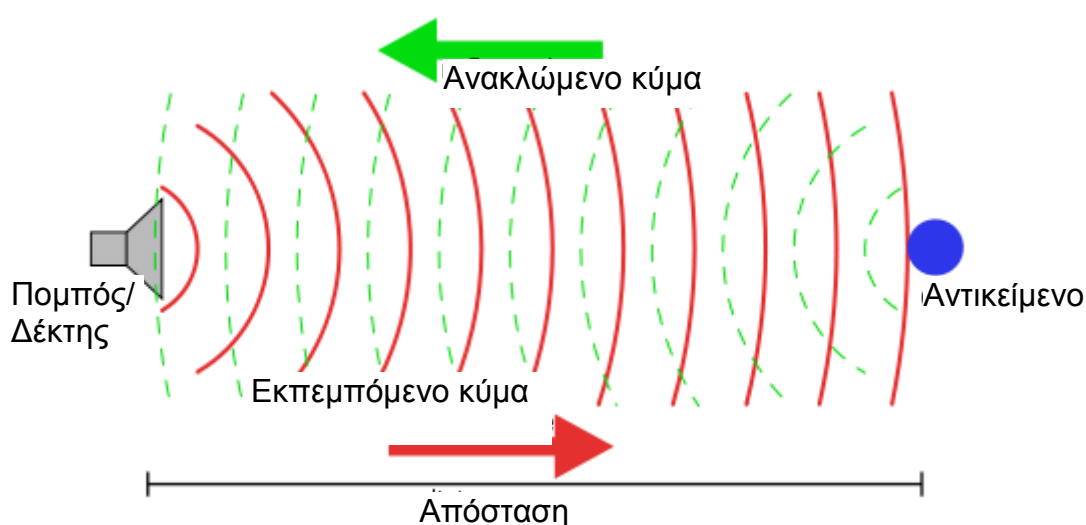
Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη λήψη των δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι δύο:

- Αερομεταφερόμενα συστήματα: Περιλαμβάνουν κάμερες τοποθετημένες σε αεροσκάφη που πετάνε σε ύψος 200-9000m. Οι εικόνες που λαμβάνουν παρέχουν μία στιγμιαία άποψη της γήινης επιφάνειας.
- Δορυφορικά συστήματα: Υπάρχουν διάφορων ειδών συστήματα εγκατεστημένα σε δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη σε ύψος 450-1000km. Η χωρική ανάλυση των εικόνων που λαμβάνονται είναι ανάλογη του τύπου του συστήματος.

## 2.2 RADAR

### 2.2.1 Εισαγωγή στα RADAR

Η λέξη RADAR είναι το ακρώνυμο των αγγλικών λέξεων RAdio Detection And Ranging. Πρόκειται για ένα ενεργητικό εικονοληπτικό σύστημα που εκπέμπει μικροκυματική ακτινοβολία σε συγκεκριμένη συχνότητα προς την επιφάνεια της γης. Στη συνέχεια καταγράφει την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία, δηλαδή το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο RADAR, και η οποία προέρχεται από ανάκλαση στις διάφορες επιφάνειες (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Αρχή λειτουργίας του RADAR: (Βικιπαίδεια)

Η διαφορά του RADAR από τα άλλα συστήματα τηλεπισκόπησης έγκειται στο γεγονός ότι το RADAR είναι ενεργό σύστημα. Παρέχοντας τη δική του ακτινοβολία, το RADAR λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλιακό φως και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Κατά κανόνα η λήψη δύναται να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.

Μια άλλη διαφορά είναι ότι το RADAR καταγράφει δεδομένα με βάση τον χρόνο μετάβασης και επιστροφής του σήματος, και όχι με βάση τη γωνιακή απόσταση όπως γίνεται στις φωτογραφικές μηχανές. Τα δεδομένα που λαμβάνονται με χρήση του χρόνου μετάβασης, είναι πιο εύκολο να ερμηνευτούν και να επεξεργαστούν, σε αντίθεση με αυτά που βασίζονται στη γωνιακή απόσταση.

Ένα τυπικό σύστημα RADAR αποτελείται από μία συσκευή παραγωγής μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται από έναν πομπό εκπομπής-λήψης με ηλεκτρονικό διακόπτη μετάπτωσης λειτουργίας. Ο

πομπός, μεταβιβάζει την ακτινοβολία σε μία κατευθυνόμενη κεραία η οποία μεταδίδει τον παλμό στο στόχο. Οι ανακλώμενοι παλμοί συλλέγονται από την ίδια κεραία και μεταβιβάζονται στον δέκτη ο οποίος τους ενισχύει και τους μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα τελικά καταγράφεται σε φιλμ ή σε ηλεκτρονικό μέσο.

Η χρονική διάρκεια κάθε παλμού είναι της τάξης των  $\mu\text{sec}$  και η ταχύτητα διάδοσής του είναι ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός. Το πλάτος του σήματος εξαρτάται από την ένταση του λαμβανόμενου παλμού. Σε κάθε λαμβανόμενο παλμό αντιστοιχεί μία γραμμή σάρωσης του φιλμ.

Το RADAR χρησιμοποιεί παλμούς μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε κανονικά χρονικά διαστήματα από πομποδέκτη μεταφερόμενο από αεροσκάφος ή δορυφόρο. Η ακτινοβολία αυτή, επιλέγεται να ανήκει σε συγκεκριμένες ζώνες μήκους κύματος (Πίνακας 1).

Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε βροχοπτώσεις και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αυξάνεται με το μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, τα μικροκύματα με μεγάλο μήκος κύματος, όπως τα L και τα P, έχουν την ικανότητα να διαπερνούν σε βάθος, επιφάνειες όπως άμμο, χιόνι και βλάστηση [Μερτίκας, 1999].

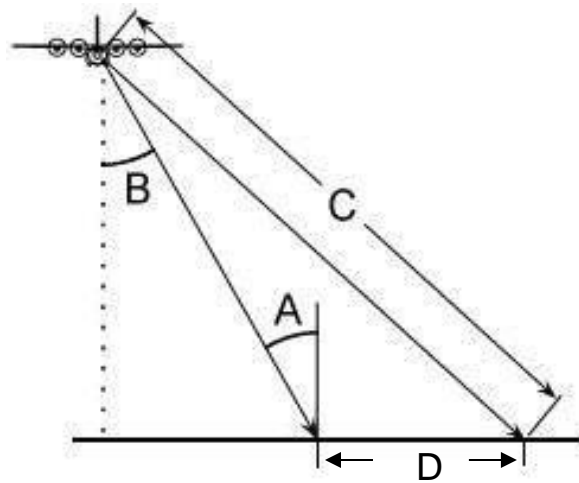
Πίνακας 1: Ονομασία και μήκη κύματος των RADAR (Μερτίκας, 1999)

Ονομασία Ζώνης	Συχνότητα (GHz).	Ζώνη μήκους κύματος $\lambda$ (cm)	Συμβατικές Ζώνες Radar
<b>Ka</b>	26,5 - 40	0,75 - 1,1	0,86 cm
<b>K</b>	18 - 25,5	1,1 - 1,67	
<b>Ku</b>	12,5 - 18	1,7 - 2,4	
<b>X</b>	8 - 12, 5	2,4 - 3,8	3 -3,2 cm
<b>C</b>	4 - 8	3,8 - 7,5	6 cm
<b>S</b>	2 - 4	7,5 - 15,0	
<b>L</b>	1 - 2	15 - 30	23,5 cm 24cm 25 cm
<b>P</b>	0,3 - 1	30 - 100	68 cm

### 2.2.2 Γεωμετρία και χωρική ανάλυση συστημάτων RADAR

Η γεωμετρία απεικόνισης ενός συστήματος RADAR είναι διαφορετική από εκείνη που χρησιμοποιείται στην λήψη αεροφωτογραφίας. Η πλατφόρμα (Σχήμα 3) ταξιδεύει προς τα εμπρός με διεύθυνση πτήσης κάθετα στο επίπεδο του

δισδιάστατου σχήματος, με το ναδίρ κάτω από την πλατφόρμα. Η διεύθυνση πτήσης είναι η διεύθυνση αζιμουθίου (azimuth). Η ακτινοβολία διαβιβάζεται κάθετα και πλάγια προς την κατεύθυνση της πτήσης. Η απόσταση C μεταξύ του RADAR και του στόχου στην επιφάνεια ονομάζεται κεκλιμένη απόσταση (slant range distance) και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του στόχου. Το εύρος της εδαφικής κάλυψης D (ground range distance) αναφέρεται στην εγκάρσια διάσταση, που είναι κάθετη στην κατεύθυνση πτήσης. Αυτή η γεωμετρία είναι γνωστή ως SLAR (Slide Looking Airborne Radar) και είναι χαρακτηριστική για όλα τα συστήματα τηλεπισκόπησης με RADAR που είναι μεταφερόμενα είτε από αεροσκάφος είτε από δορυφόρο.



Σχήμα 3: Γεωμετρία τυπικού συστήματος απεικόνισης RADAR

Το τμήμα της σάρωσης της εικόνας που είναι εγγύτερα στο ναδίρ της πλατφόρμας του ραντάρ, ονομάζεται εγγύς περιοχή (near range) ενώ το τμήμα της σάρωσης που είναι πιο μακριά από το ναδίρ, ονομάζεται άπω περιοχή (far range).

Η γωνία πρόσπτωσης A (incidence angle) είναι η γωνία του σήματος του RADAR με την κάθετο στην επιφάνεια της γης, η οποία αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την εγγύς στην άπω περιοχή. Η γωνία παρατήρησης B (look angle) είναι η γωνία με την οποία το RADAR παρατηρεί τη γήινη επιφάνεια και αυξάνει από την εγγύς προς την άπω περιοχή.

Η χωρική διακριτική ικανότητα εγκάρσια στην τροχιά (across track resolution) εξαρτάται από το μήκος του σήματος (Σχέση 1).

$$R_r = \frac{\tau c}{2 \sin \theta} \approx \frac{\tau c}{2 \sin \gamma} \quad (1)$$

Όπου:

$R_r$  : διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση (m)

$\tau$  : μήκος του παλμού (χρονική διάρκεια) (sec)



$c$  : ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (m/s)

$\theta$  : γωνία παρατήρησης (μοίρες)

$\gamma$  : γωνία βάθους (depression angle) (μοίρες)

Δύο στόχοι που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης θα διαχωρίζονται αν η εγκάρσια απόστασή τους είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος του παλμού έτσι ώστε τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματά τους φθάσουν στον δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Η ανάλυση στην εγκάρσια απόσταση εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, και μειώνεται αυξάνοντας το εύρος της δέσμης της ακτινοβολίας.

Η χωρική ανάλυση παράλληλα στην τροχιά (along track resolution) καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος του σήματος του RADAR και την κεκλιμένη απόσταση. Καθώς αυξάνει η απόσταση από το ναδίρ του δορυφόρου, η χωρική διακριτική ικανότητα του RADAR μικραίνει. Για να διαχωριστούν δύο στόχοι, πρέπει να έχουν απόσταση μεταξύ τους, μεγαλύτερη από το εύρος 'φωτισμού' της δέσμης στο έδαφος. Το εύρος δέσμης του RADAR είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το μήκος του ανοίγματος της κεραίας. Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της κεραίας  $L$ , τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση  $R_a$  (Σχέση 2).

$$R_a = \frac{\lambda H}{L \cos \theta} \quad (2)$$

Όπου:

$R_a$  : διαχωριστική ικανότητα παράλληλα στην τροχιά (m)

$\lambda$  : μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (m)

$H$  : υψόμετρο πτήσης (m)

$L$  : μήκος κεραίας (m)

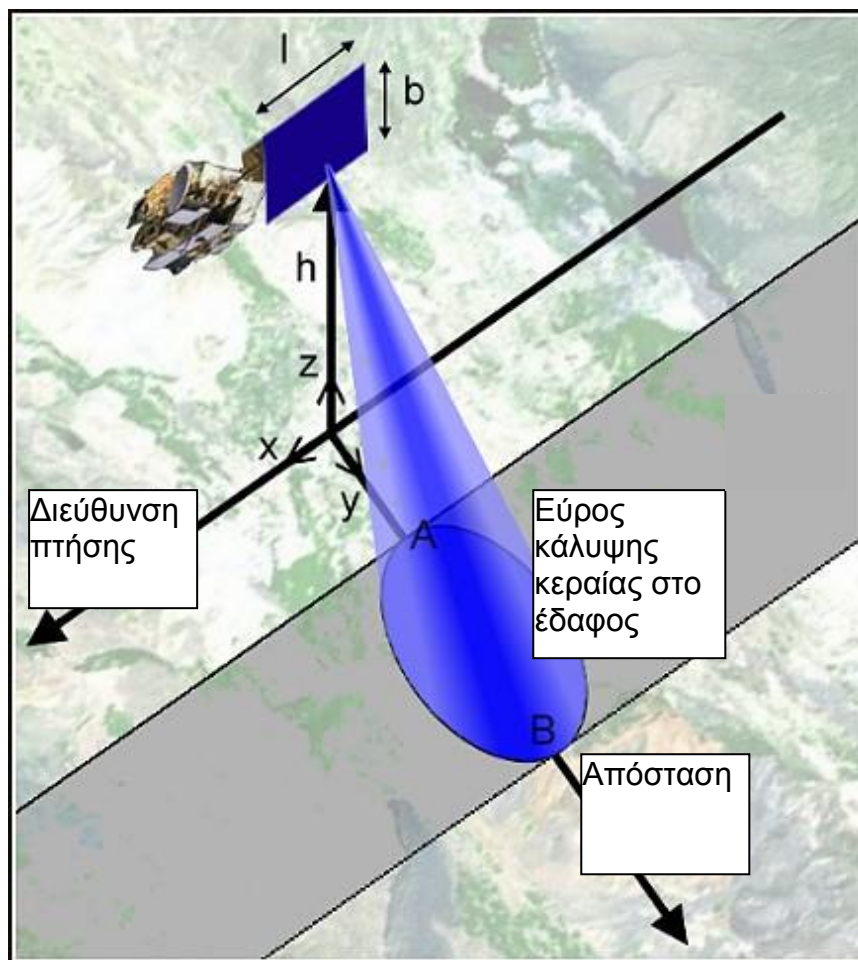
$\theta$  : γωνία παρατήρησης (μοίρες)

[UNAVCO facility]

### **2.2.3 Είδη εικονοληπτικών συστημάτων RADAR**

Υπάρχουν δύο είδη εικονοληπτικών συστημάτων RADAR που χρησιμοποιούνται στη δορυφορική τηλεπισκόπηση. Τα RADAR πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture RADAR - RAR) και τα RADAR συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture RADAR - SAR).

Τα RADAR πραγματικού ανοίγματος κεραίας χρησιμοποιούν το μέγιστο δυνατό μήκος κεραίας προκειμένου να εκπέμπουν στενή δέσμη ακτινοβολίας και να επιτύχουν καλή διαχωριστική ικανότητα κατά τη διεύθυνση της τροχιάς. Η διάσταση της περιοχής που καλύπτεται από τη δέσμη ακτινοβολίας του ραντάρ εξαρτάται από το άνοιγμα της κεραίας και από το μήκος κύματος του παλμού (Σχήμα 4). Όμως το μήκος της κεραίας στους δορυφόρους δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 15m λόγω τεχνικών περιορισμών. Το σχετικά μικρό μήκος της κεραίας αποτελεί και το περιοριστικό όριο στη χρήση των συστημάτων RAR.

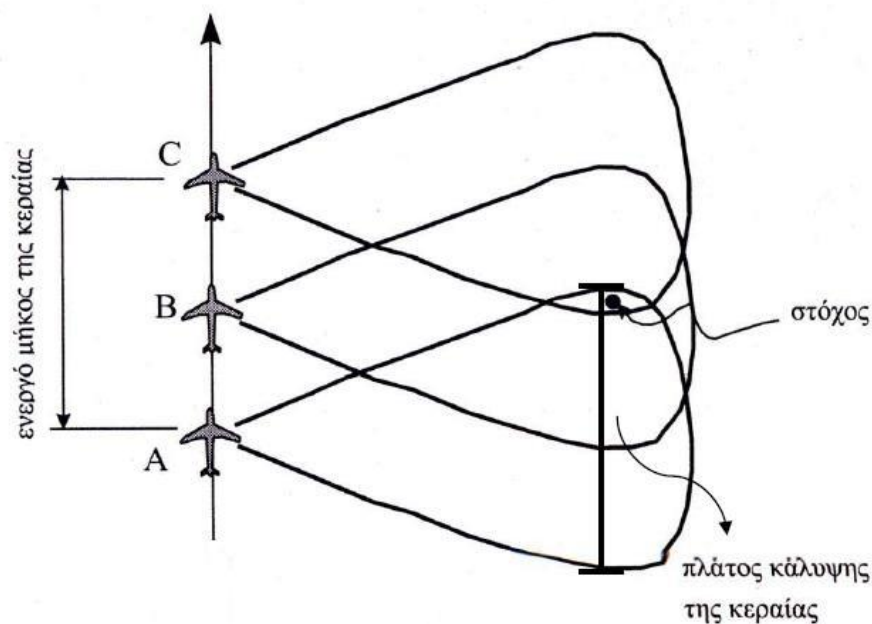


Σχήμα 4: RADAR πραγματικού ανοίγματος κεραίας SAR (Wikimedia Commons)

Για την επίλυση του προβλήματος λόγω πεπερασμένου μεγέθους της κεραίας, αναπτύχθηκε η τεχνολογία του RADAR συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR. Το SAR, χρησιμοποιώντας κεραία μικρού μήκους, μπορεί να συνθέσει μια πολύ μεγάλου μήκους 'εικονική' κεραία εκμεταλλευόμενο την πρόσω κίνηση του δορυφόρου και το φαινόμενο Doppler. Για παράδειγμα, με μία κεραία φυσικού μήκους 11m μπορεί να προσομοιωθεί κεραία 1,5km. Η πραγματική κεραία στο SAR

εκπέμπει παλμούς μεγάλου γωνιακού εύρους κατά την εγκάρσια διεύθυνση της τροχιάς, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η ακτίνα του SAR καλύπτει μεγάλη περιοχή στο έδαφος. Έτσι, ένας στόχος θα βρίσκεται στον χώρο της δέσμης φωτός της ακτινοβολίας για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς θα μετακινείται ο δορυφόρος. Δεδομένου ότι ο δορυφόρος συνεχίζει να μετακινείται, καταγράφονται όλα τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα από το στόχο, όσο αυτός βρίσκεται μέσα στη δέσμη ακτινοβολίας (Σχήμα 5). Το σημείο στο οποίο ο στόχος βγαίνει από το εύρος της ακτινοβολίας, καθορίζει και το μήκος της συνθετικής κεραίας.

Για ένα στόχο στην επιφάνεια του εδάφους, θα συμβούν οι παρακάτω διακυμάνσεις στη συχνότητα που θα ανιχνεύσει το RADAR. Αρχικά ο στόχος θα εισέλθει στο οπτικό πεδίο του RADAR και το επιστρεφόμενο σήμα θα μετατοπιστεί προς υψηλότερες συχνότητες λόγω της θετικής συμβολής Doppler. Όταν ο δορυφόρος θα βρίσκεται στο σημείο εγγύτερης απόστασης από το στόχο, δε θα εμφανίζεται το φαινόμενο Doppler και δε θα υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα σε σχέση με αυτή του εκπεμπόμενου παλμού. Τέλος, όταν ο δορυφόρος απομακρύνεται από το στόχο, οι συχνότητες του σήματος επιστροφής θα παρουσιαστούν μετατοπισμένες προς χαμηλότερες συχνότητες λόγω του αρνητικού Doppler. Οι στόχοι που βρίσκονται στην άπω περιοχή όπου το εύρος της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο, θα 'φωτιστούν' για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από εκείνους που βρίσκονται στην εγγύς περιοχή. Το εκτεταμένο εύρος της δέσμης του σήματος είναι ανάλογο με τη χρονική διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία έτσι ώστε η χωρική διαχωριστική ικανότητα να παραμένει σταθερή σε όλο το εύρος σάρωσης.



Σχήμα 5: Η διαδικασία σύνθεσης μεγάλης κεραίας (Μερτίκας, 1999)

#### **2.2.4 Ιστορική αναδρομή του ERS (European Remote Sensing)**

Ο Ευρωπαϊκός δορυφόρος τηλεπισκόπησης ERS-1 της ESA (European Space Agency) (Εικόνα 1), ήταν ο πρώτος δορυφόρος παρατήρησης της Γης που μετέφερε ένα εικονοληπτικό RADAR συνθετικού ανοίγματος. Με αυτή την εκτόξευση, τον Ιούλιο του 1991 και την επικύρωση των ικανοτήτων της συμβολομετρίας τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, μία διαρκώς αυξανόμενη ποσότητα εικόνων έγινε διαθέσιμη σε πολλές ερευνητικές ομάδες.

Ο ERS-2, που ήταν πανομοιότυπος με τον ERS-1, εκτός από το ότι είχε ένα παραπάνω όργανο, εκτοξεύτηκε το 1995.



Εικόνα 1: ERS-2 (Atelier Guarniero)

Λίγο μετά την εκτόξευση του ERS-2 της ESA αποφασίστηκε η ζεύξη των δύο σκαφών με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί η πρώτη «δίδυμη» αποστολή η οποία διήρκεσε εννέα μήνες, από τις 16 Αυγούστου 1995 μέχρι τα μέσα Μαΐου του 1996.

Κατά τη διάρκεια αυτής της αποστολής, οι τροχιές των δύο σκαφών προγραμματίστηκε να περνούν από το ίδιο σημείο κάθε 24 ώρες. Η τεράστια συλλογή ζευγών εικόνων από αυτή την αποστολή, παραμένει πολύ χρήσιμη ακόμα και σήμερα, διότι το σύντομο χρονικό διάστημα των 24 ωρών μεταξύ των λήψεων έχει σαν αποτέλεσμα πολύ υψηλή συμβολομετρική συσχέτιση (κεφ.1.4.2.4, κεφ.1.4.3.3).

Η αυξανόμενη συχνότητα και η ποιότητα των δεδομένων που είναι διαθέσιμα στους επιστήμονες, προσφέρουν τη δυνατότητα να παραχθούν λεπτομερή Μοντέλα Ψηφιακού Εδάφους (Digital Elevation Models - DEMs) και να παρατηρηθούν διαφοροποιήσεις στο έδαφος, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

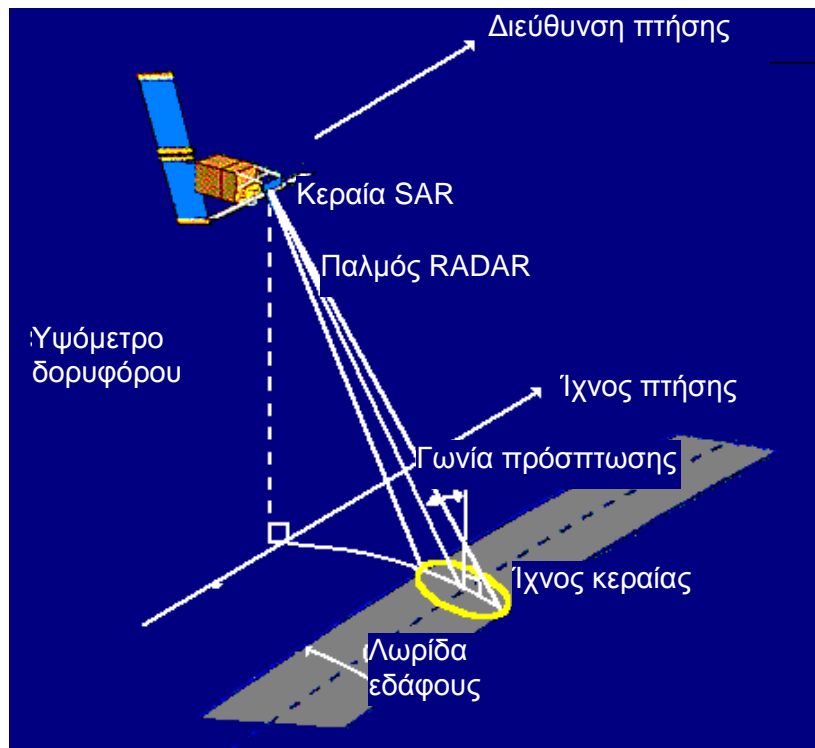
Η πολική τροχιά του ERS σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης (Α-Δ) δίνουν τη δυνατότητα λήψης της ίδιας περιοχής από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες σε κάθε περιστροφή του δορυφόρου. Ο συνδυασμός DEM που έχουν κατασκευαστεί με χρήση εικόνων που έχουν ληφθεί κατά την ανιούσα τροχιά (N-B) και την κατιούσα (B-N) μπορεί να μετριάσει τα προβλήματα εξαιτίας της γεωμετρίας λήψης, ειδικά σε περιοχές με υψηλό ανάγλυφο.

Τον Μάρτιο του 2000 ο δορυφόρος ERS-1 τέθηκε εκτός λειτουργίας. Ο ERS-2 συνέχισε να λειτουργεί αλλά με μικρότερη ακρίβεια λόγω μίας βλάβης που συνέβη τον Ιανουάριο του 2001 [ESA,2007].

## **2.3 ΕΙΚΟΝΕΣ SAR**

### **2.3.1 Εισαγωγή**

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα δορυφορικό εικονοληπτικό σύστημα SAR. Ο δορυφόρος μεταφέρει ένα RADAR με την κεραία να είναι στραμμένη προς την επιφάνεια της Γης. Η κλίση της κεραίας σε σχέση με το ναδίρ, ονομάζεται γωνία παρατήρησης (off-nadir angle) και στα σύγχρονα συστήματα έχει ένα εύρος μεταξύ 20° και 50°. Εξαιτίας της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης, η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι μεγαλύτερη από τη γωνία παρατήρησης. Όμως χάριν απλότητας, θεωρούμε ότι η Γη είναι επίπεδη, ως εκ τούτου η γωνία πρόσπτωσης θεωρείται ίση με τη γωνία παρατήρησης.



Σχήμα 6: Εικονοληπτικό δορυφορικό σύστημα SAR (Centre for Remote Imaging Sensing and Processing-CRISP)

Στην περίπτωση του ERS, το πλάτος κάλυψης της κεραίας στο έδαφος είναι περίπου 5 km κάθετα στη διεύθυνση της τροχιάς και περίπου 100 km κατά μήκος της διεύθυνσης της τροχιάς. Ο δορυφόρος ERS κινείται σε μία σχεδόν πολική τροχιά που διασχίζει τον ισημερινό σε γωνία  $9^\circ$  και βρίσκεται σε υψόμετρο 800 km.

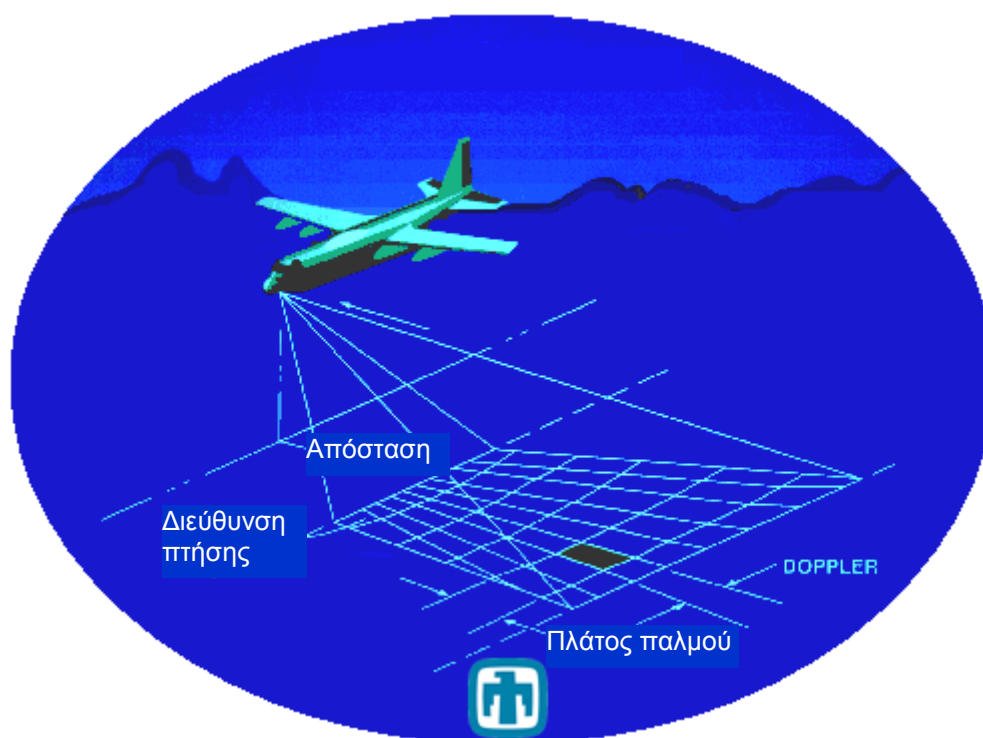
Τα εικονοληπτικά δορυφορικά συστήματα SAR λειτουργούν σε μία από τις παρακάτω συχνότητες:

Πίνακας 2: Συχνότητες λειτουργίας των RADAR

• C	5.3 GHz (πχ. ERS και Envisat, το канаδικό Radarsat, και οι αποστολές των ΗΠΑ)
• L	1.2 GHz (πχ. ο ιαπωνικός J-ERS και ο ALOS)
• X	10 GHz (πχ. το γερμανο-ιταλικό X-SAR)

### 2.3.2 Η σύνθετη εικόνα SAR

Μία σύνθετη εικόνα SAR, όπως κάθε εικόνα τηλεπισκόπησης είναι μια δισδιάστατη διάταξη από γραμμές και στήλες που αποτελούνται από επιμέρους εικονοστοιχεία (pixels). Οι διαφορετικές γραμμές της εικόνας αναφέρονται σε περιοχές με διαφορετική απόσταση κατά μήκος της διεύθυνσης πτήσης, ενώ οι διαφορετικές στήλες προσδιορίζουν περιοχές με διαφορετική εγκάρσια απόσταση (range) από το ίχνος του ραντάρ (Σχήμα 7). Κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε μια έκταση της επιφάνειας της Γης. Κάθε εικονοστοιχείο αποδίδει ένα σύνθετο αριθμό από πληροφορίες τόσο για τη φάση όσο και για το ποσοστό της μικροκυματικής ακτινοβολίας που ανακλάται από διάφορους στόχους (βράχοι, βλάστηση, κτίρια κλπ) που βρίσκονται σε αυτή την περιοχή. Τα δεδομένα αυτών των εικόνων αποθηκεύονται με ψηφιακή μορφή. Η μορφή αυτή, έχει ως πλεονέκτημα ότι καθιστά δυνατή την επεξεργασία τους, με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η εικόνα SAR εμφανίζεται ανεστραμμένη λόγω της γεωμετρίας του RADAR.



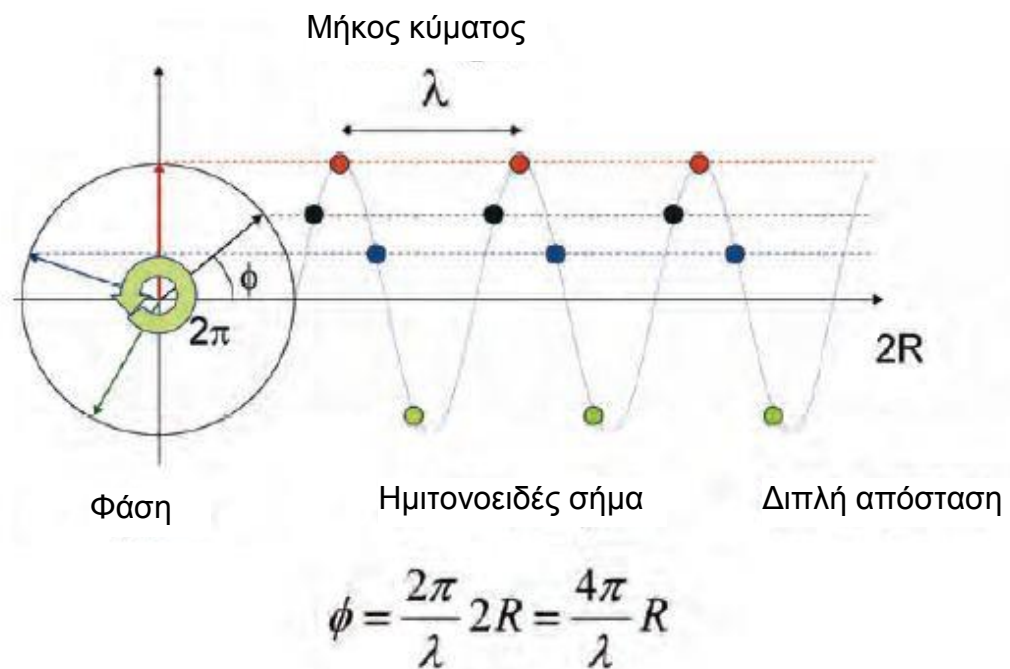
Σχήμα 7 : Διάταξη εικονοστοιχείων εικόνας SAR (Sandia National Laboratories)

Η θέση και οι διαστάσεις της περιοχής που αντιπροσωπεύει κάθε εικονοστοιχείο (δηλαδή η διαχωριστική ικανότητα) εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του



συστήματος SAR. Στην περίπτωση του ERS, το εικονοστοιχείο, έχει στο έδαφος διαστάσεις περίπου 5 m κατά γραμμή και 9,5 m κατά στήλη. Η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων εικονοστοιχείων είναι περίπου 4 m κατά γραμμή και 8 m κατά στήλη, λόγω επικάλυψης και προς τις δύο διευθύνσεις.

Η ακτινοβολία που μεταδίδεται από το RADAR αλληλεπιδρά με τους στόχους στο έδαφος και κατόπιν, επιστρέφει στο RADAR δέκτη (διπλή διαδρομή ακτινοβολίας). Οι ανακλαστές που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το ραντάρ (διαφορετικά υψόμετρα και κλίσεις), προκαλούν διαφορετικούς χρόνους επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος. Λόγω της ημιτονοειδούς μορφής του εκπεμπόμενου σήματος, αυτή η διαφορά χρόνου είναι ισοδύναμη με τη διαφορά φάσης  $\phi$  μεταξύ του εκπεμπόμενου σήματος και του σήματος επιστροφής. Συνεπώς, η διαφορά φάσης είναι ανάλογη με τη διπλή διαδρομή,  $2R$  της ακτινοβολίας, διαιρεμένη με το εκπεμπόμενο μήκος κύματος,  $\lambda$  (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Η ημιτονοειδής συνάρτηση  $\sin\phi$  είναι περιοδική, με περίοδο  $2\pi$  (ESA, 2007)

Εντούτοις, λόγω της περιοδικής φύσης του σήματος, οι αποστάσεις διαδρομής που διαφέρουν κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, προκαλούν ακριβώς την ίδια διαφορά φάσης.



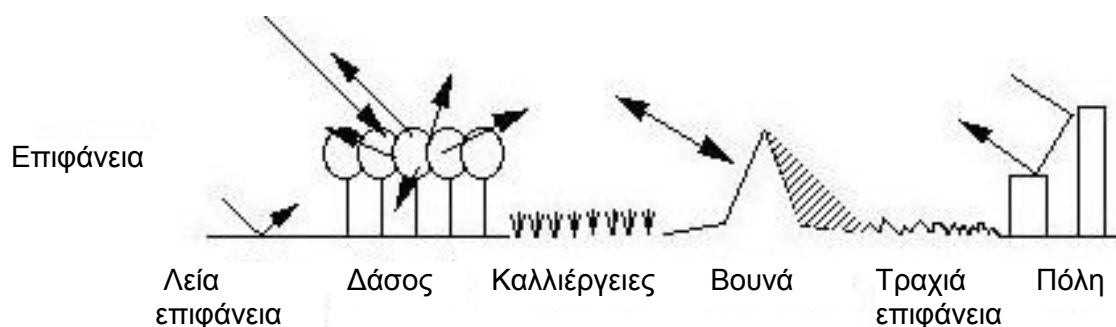
### 2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τις εικόνες SAR

Η εικόνα SAR περιέχει μετρήσεις της έντασης της ακτινοβολίας που ανακλάστηκε από τους στόχους, σε κάθε εικονοστοιχείο. Η ισχύς του σήματος που σκεδάζεται στα αντικείμενα της επιφάνειας της γης, εξαρτάται από τις ιδιότητες της πηγής και από τις ιδιότητες του στόχου.

Οι ιδιότητες της πηγής της ακτινοβολίας RADAR είναι:

- α) το μήκος κύματος  $\lambda$
- β) η πόλωση
- γ) η γωνία βάθους  $\gamma$  (depression angle)

Από την άλλη πλευρά, οι ιδιότητες των στόχων εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών (π.χ. υγρασία), και από το συντονισμό της ακτινοβολίας.



Σχήμα 9 : Ανάκλαση από διάφορες επιφάνειες (ESA)

Η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά την ένταση του σήματος επιστροφής. Συνήθως, οι βράχοι και οι αστικές περιοχές προκαλούν μεγάλη διάχυση της ακτινοβολίας, έτσι ώστε να ανιχνεύεται μεγαλύτερη ένταση του σήματος επιστροφής. Οι λείες επιφάνειες (θάλασσα, λίμνες κλπ) αποτελούν ισχυρούς ανακλαστές σε διευθύνσεις κάθετες από τη διεύθυνση πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, έτσι ώστε το σήμα επιστροφής να είναι ασθενές (Σχήμα 9).

Μία εικόνα SAR αποδίδεται σε κλίμακα του γκρι όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Φωτεινά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές με έντονη διάχυση (αστικές περιοχές, δάση κλπ) ενώ σκοτεινά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές που προκαλούν χαμηλή διάχυση (νερό).



Εικόνα 3 :Εικόνα SAR από τον ERS (CRISP)

Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια του στόχου, εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του. Καθώς αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά, αυξάνει και η ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς είναι ανάλογη της αύξησης της περιεκτικότητας, εδαφών και πετρωμάτων, σε υγρασία. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό υγρασίας, εμφανίζονται φωτεινότερα στις εικόνες ραντάρ σε σχέση με τα ξηρά εδάφη. Όταν κάποια σώματα έχουν μικρή διηλεκτρική σταθερά, αυξάνεται η διείσδυση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό τους, διότι ανακλούν λιγότερη ενέργεια από ό,τι αν είχαν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά. Το βάθος διείσδυσης βέβαια, εξαρτάται και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Ο συντονισμός της ακτινοβολίας είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις εικόνες ραντάρ. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σε ορισμένες περιπτώσεις, την αύξηση της έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων από κάποια πολύ μικρά σώματα έτσι ώστε να είναι πολύ πιο έντονα από σήματα μεγαλύτερων σωμάτων (μεταλλικές κατασκευές). Ένα άλλο είδος συντονισμού (συντονισμός Bragg) συμβαίνει όταν η σκέδαση προέρχεται από σώματα που κάνουν μια περιοδική κίνηση (π.χ. κύματα θαλάσσης) με αποτέλεσμα, τα σήματα επιστροφής να

συμβάλλουν θετικά ή αρνητικά αναλόγως με το αν βρίσκονται σε φάση ή όχι μεταξύ τους. Κατά συνέπεια η ενέργειά τους ενισχύεται ή απαλείφεται αντιστοίχως.

#### **2.3.4 Στίγματα RADAR (speckles)**

Η παρουσία πολλαπλών ανακλαστών εντός του ίδιου εικονοστοιχείου στο έδαφος δημιουργεί το φαινόμενο των στιγμάτων που είναι κοινό για όλα τα εικονοληπτικά συστήματα RADAR (Εικόνα 4). Τα στίγματα είναι εμφανή στις εικόνες SAR αλλά όχι στις φωτογραφίες.

Αυτό το φαινόμενο των στιγμάτων είναι συνέπεια της συμβολής, άλλοτε θετικής και άλλοτε αρνητικής, των ανακλώμενων σημάτων από πολλούς μικρούς στοιχειώδεις ανακλαστές (με διαστάσεις ανάλογες του μήκους κύματος της ακτινοβολίας του RADAR) εντός ενός εικονοστοιχείου. Αυτά τα σήματα, τα οποία έχουν τυχαία φάση εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ των αντικειμένων, προστίθενται στην απευθείας ανακλώμενη ακτινοβολία.



Εικόνα 4 : Αριστερά: Στίγματα RADAR σε εικόνα

Δεξιά: η ίδια εικόνα όπου έχουν αφαιρεθεί τα στίγματα (ESA)

Τα στίγματα επηρεάζουν την ποιότητα και τη χρησιμότητα της εικόνας SAR. Οι εικόνες εμφανίζουν συχνά το φαινόμενο των στιγμάτων. Όμως, πραγματοποιώντας

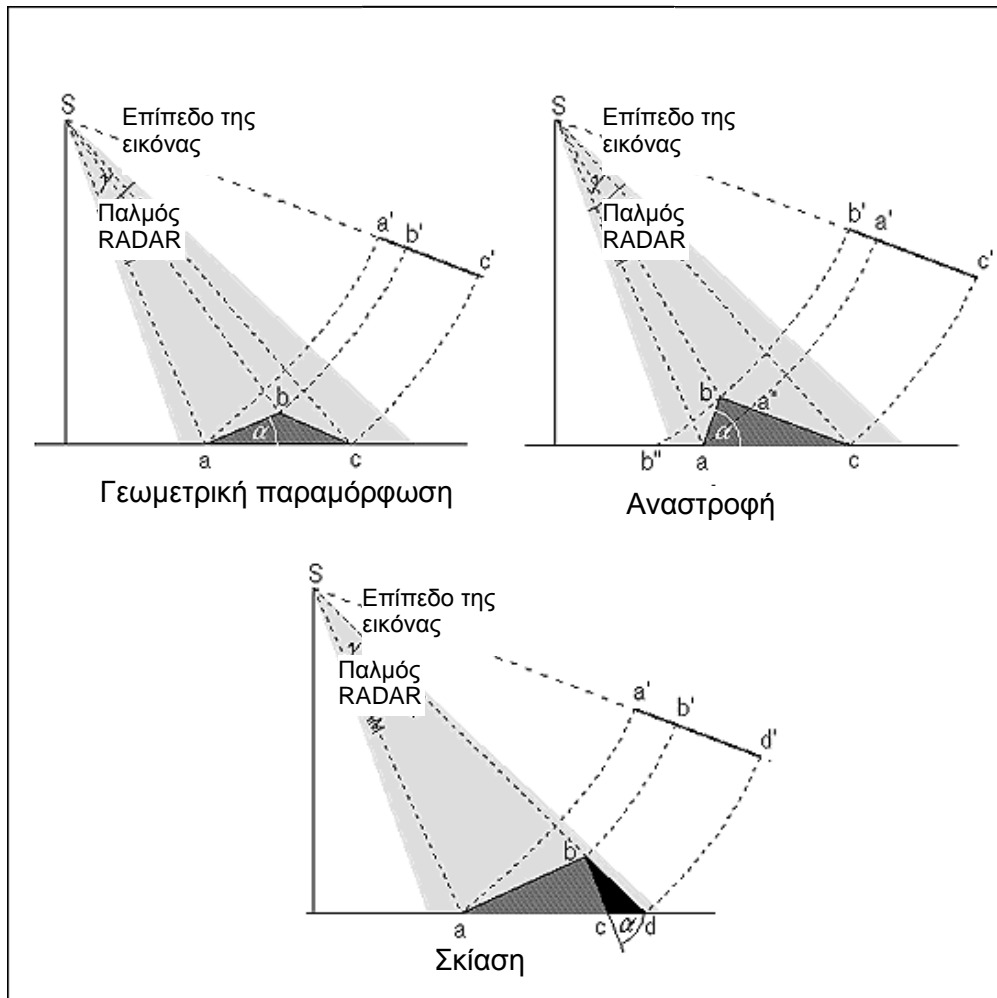
περισσότερες λήψεις της ίδιας περιοχής από ελαφρώς διαφορετικές οπτικές γωνίες, τα στίγματα περιορίζονται σημαντικά διότι ακυρώνονται οι τυχαίες τιμές. Επίσης, η εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα μπορεί να διορθώσει το φαινόμενο των στιγμάτων.

### **2.3.5 Παραμορφώσεις στην εικόνα RADAR**

Η περιοχή του εδάφους η οποία απεικονίζεται στην εικόνα RADAR εξαρτάται από την τοπογραφία, δηλαδή από την κλίση του εδάφους στην κατεύθυνση της τροχιάς, αλλά και κάθετα σε αυτή. Στην εγγύτερη περιοχή του ίχνους πτήσης (near range), τα εικονοστοιχεία εμφανίζονται συμπιεσμένα σε σχέση με εκείνα της απώτερης περιοχής (far range), τα οποία κατ' αντιστοιχία εμφανίζονται επιμηκυμένα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται γεωμετρική παραμόρφωση. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η γεωμετρική παραμόρφωση έχει σημαντική επίπτωση στην εικόνα SAR. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία που έχουν επιμηκυνθεί είναι φωτεινότερα εφόσον είναι μεγαλύτερα.

Μία άλλη παραμόρφωση είναι η σκίαση (shadowing). Στην περίπτωση που έχουμε ένα βουνό για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι στην πλευρά που είναι ορατή από το ραντάρ εμφανίζεται γεωμετρική παραμόρφωση λόγω της κλίσης. Όμως εμφανίζεται και σκίαση στην περιοχή του βουνού η οποία έχει αντίθετο προσανατολισμό και δεν είναι ορατή από το RADAR. Έτσι στην θέση της πλευράς του βουνού η οποία δε 'φωτίζεται' από το RADAR, εμφανίζεται μια σκοτεινή περιοχή. Η γεωμετρική παραμόρφωση και η σκίαση εξαρτώνται τόσο από την κλίση, όσο και από την απόσταση και τον προσανατολισμό του βουνού από το ίχνος πτήσης. Όσο αυξάνεται η κλίση και η απόσταση, τόσο αυξάνεται η γεωμετρική παραμόρφωση και η σκιά (Σχήμα 10).

Το RADAR ανιχνεύει ως πρώτο σήμα επιστροφής από τους ανακλαστές στο έδαφος, αυτό που διανύει τη μικρότερη διαδρομή. Αυτό σημαίνει ότι αν υπάρχει ένα ψηλό κτίριο, το σημείο από όπου θα επιστρέψει συντομότερα το σήμα, θα είναι η κορυφή του. Συνεπώς η κορυφή θα ανιχνευτεί πριν τη βάση. Το αποτέλεσμα θα είναι να εμφανιστεί στην εικόνα πρώτα η κορυφή, μετά το πλάι του, και τέλος η βάση του κτιρίου, σε σχέση με το ίχνος πτήσης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αναστροφή (layover).



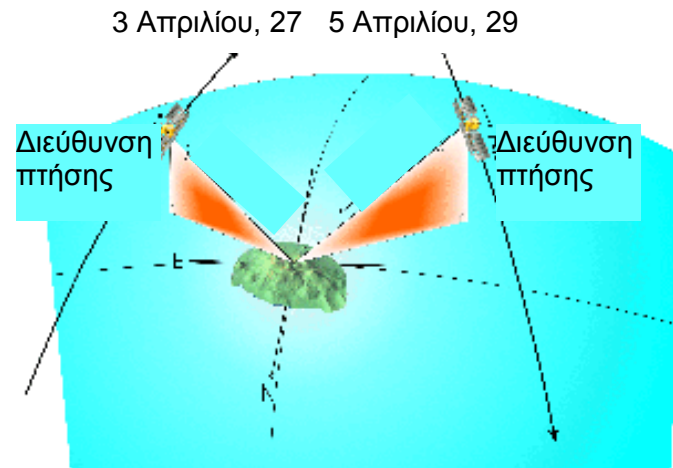
Σχήμα 10 :Φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης, αναστροφής και σκίασης (ESA)

### **2.3.6 Ανιούσα και κατιούσα τροχιά δορυφόρων**

Κάποιες από τις παραμορφώσεις οι οποίες εμφανίζονται στις εικόνες, μπορεί να διορθωθούν με το συνδυασμό εικόνων από την ανιούσα και την κατιούσα τροχιά των δορυφόρων (Σχήμα 11).

Ο ERS έχει δυνατότητα παρατήρησης της ίδιας περιοχής με γωνίες πρόσπτωσης  $-23^\circ$  και  $23^\circ$ . Η παρατήρηση της επιφάνειας ολόκληρης της Γης είναι εφικτή με τον συνδυασμό της τροχιακής δορυφορικής κίνησης κατά μήκος των παραλλήλων (σχεδόν πολική τροχιά), και της περιστροφής της Γης στο επίπεδο του ισημερινού. Αυτή η δυνατότητα προέρχεται από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της τροχιάς του δορυφόρου από το Νότο προς το Βορά (ανιούσα τροχιά) και από τον Βορά προς τον Νότο (κατιούσα τροχιά), η κεραία SAR είναι στραμμένη στην ίδια πλευρά του τροχιακού επιπέδου, σε συμφωνία με το διάνυσμα της ταχύτητας (π.χ. η κεραία του RADAR είναι πάντα στη δεξιά πλευρά του ίχνους, τόσο στην περίπτωση του ERS

όσο και στην περίπτωση του Envisat). Κατ' αυτό τον τρόπο, η ίδια περιοχή στο έδαφος, παρατηρείται από την κεραία SAR από τα ανατολικά κατά την κατιούσα τροχιά, και από τα δυτικά κατά τη διάρκεια της ανιούσας τροχιάς.



Σχήμα 11 : Παρατήρηση του ίδιου σημείου κατά την ανιούσα και κατά την κατιούσα τροχιά του δορυφόρου.

## 2.4 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ RADAR

### 2.4.1 Εισαγωγή

Η τεχνική της συμβολομετρίας RADAR έχει ευρύτατη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους παρατήρησης της επιφάνειας του εδάφους. Προέκυψε από την ανάπτυξη των συστημάτων SAR και είναι γνωστή ως InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR). Ειδικότερα, η διαφορική συμβολομετρία, χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων του εδάφους (π.χ. σεισμοί, κατολισθήσεις, καθιζήσεις, ηφαίστεια).

Μαθηματικά, οι εικόνες SAR μπορούν να εκφραστούν ως ένα σύνολο μιγαδικών αριθμών για κάθε εικονοστοιχείο στο έδαφος:

$$P = A e^{j(\varphi_{int} + \varphi_{path})} \quad (3)$$

όπου:

$P$  : ο μιγαδικός αριθμός ενός εικονοστοιχείου

$A$  : το πλάτος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας

$\varphi_{\text{int}}$  : η φάση λόγω εσωτερικής συμβολής του στόχου

$\varphi_{\text{path}}$  : η φάση λόγω διπλής διαδρομής της ακτινοβολίας

Για κάθε εικονοστοιχείο καταγράφονται δύο ειδών τιμές. Η μία αφορά το πλάτος του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, το οποίο εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο RADAR μετά από την αλληλεπίδρασή της με τον στόχο. Η άλλη αφορά τη φάση του σήματος επιστροφής και κυμαίνεται μεταξύ 0 και  $2\pi$  rad. Η τεχνική της δορυφορικής συμβολομετρίας InSAR και της διαφορικής δορυφορικής συμβολομετρίας DInSAR (Differential InSAR) εκμεταλλεύεται αυτό το πλεονέκτημα της καταγραφής του σήματος επιστροφής με τη μορφή μιγαδικών αριθμών (ένταση και φάση).

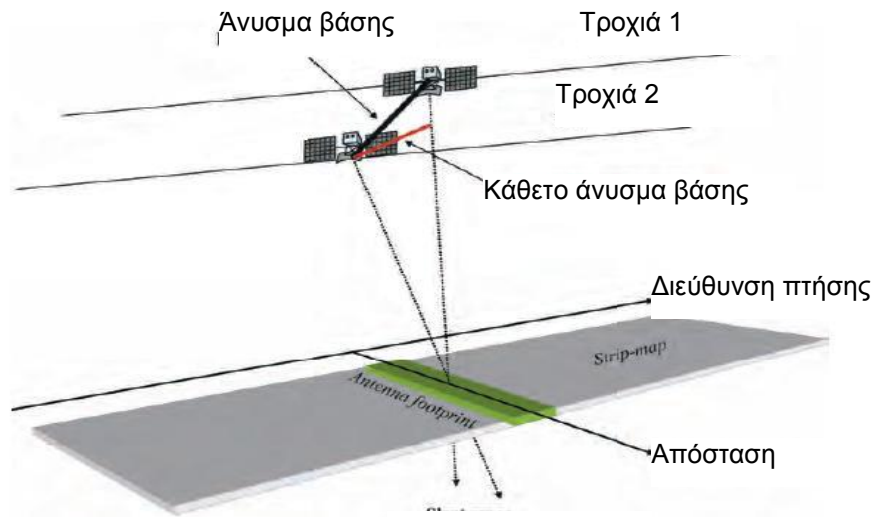
Οι τιμές της φάσης εξαρτώνται από δύο παράγοντες:

- 1) Από την εσωτερική συμβολή, η οποία σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του υλικού του στόχου.
- 2) Από τη διπλή διαδρομή της ακτινοβολίας μεταξύ RADAR και εδάφους.

Η φάση λόγω της διπλής διαδρομής της ακτινοβολίας, μπορεί να προσδιοριστεί και να υπολογιστεί. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για την εσωτερική συμβολή η οποία είναι τυχαία. Αυτό συμβαίνει διότι σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας SAR απεικονίζεται μία, σύνθετης μορφής, πληροφορία από πολλαπλούς στόχους.

Για να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας, πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο εικόνες του ίδιου στόχου. Ένας δορυφόρος SAR μπορεί να παρατηρήσει την ίδια περιοχή από ελαφρώς διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αυτό δύναται να γίνει είτε την ίδια χρονική στιγμή, με δύο RADAR προσαρμοσμένα πάνω στην πλατφόρμα του δορυφόρου, ή σε διαφορετικές στιγμές, εκμεταλλευόμενοι τις επαναλαμβανόμενες τροχιές του ίδιου δορυφόρου. Γι' αυτούς τους δορυφόρους, η περίοδος μεταξύ των λήψεων είναι 1, 35, ή ένα πολλαπλάσιο του 35, σε μέρες. Στους σύγχρονους δορυφόρους είναι πιο μικρό το διάστημα της δειγματοληψίας. Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) ονομάζεται συμβολομετρικό άνωσμα βάσης (interferometer baseline). Η κάθετη προβολή του στη διεύθυνση παρατήρησης, ονομάζεται κάθετο άνωσμα βάσης (perpendicular baseline) (Σχήμα 12).





Σχήμα 12 :Γεωμετρία δορυφορικού συμβολομετρικού συστήματος SAR (ESA,2007)

#### 2.4.2 Εφαρμογή συμβολομετρίας στον υπολογισμό υψομέτρων και τον προσδιορισμό εδαφικών παραμορφώσεων

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μόνο σημειακό ανακλαστή σε κάθε εικονοστοιχείο, του οποίου δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου. Αυτοί οι σημειακοί ανακλαστές παρατηρούνται από δύο συστήματα SAR, από ελαφρώς διαφορετικές οπτικές γωνίες. Σε αυτή την περίπτωση, η φάση θα εξαρτιόταν μόνο από τη διαφορά της κατεύθυνσης της τροχιάς για κάθε μία από τις εικόνες SAR στο θεωρούμενο εικονοστοιχείο, δηλαδή από τη γεωμετρία του συστήματος.

Όταν ένα σημείο αναφοράς στο έδαφος αναγνωριστεί, η απόκλιση της διαφοράς της κατεύθυνσης της τροχιάς  $\Delta r$  που καταλήγει στο πέρασμα από το εικονοστοιχείο αναφοράς σε ένα άλλο, μπορεί να δοθεί με μία απλή έκφραση (μία προσέγγιση για μικρά ανύσματα βάσης και εικονοστοιχεία που δεν είναι σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους) που εξαρτάται από μερικούς γεωμετρικούς παράγοντες (Σχήμα 13).

Οι παράμετροι είναι:

- Το κάθετο άνυσμα βάσης  $B_n$
- Η απόσταση  $R$  μεταξύ RADAR και επίγειου στόχου
- Η μετατόπιση μεταξύ των εικονοστοιχείων κατά μήκος της καθέτου στην κλίση

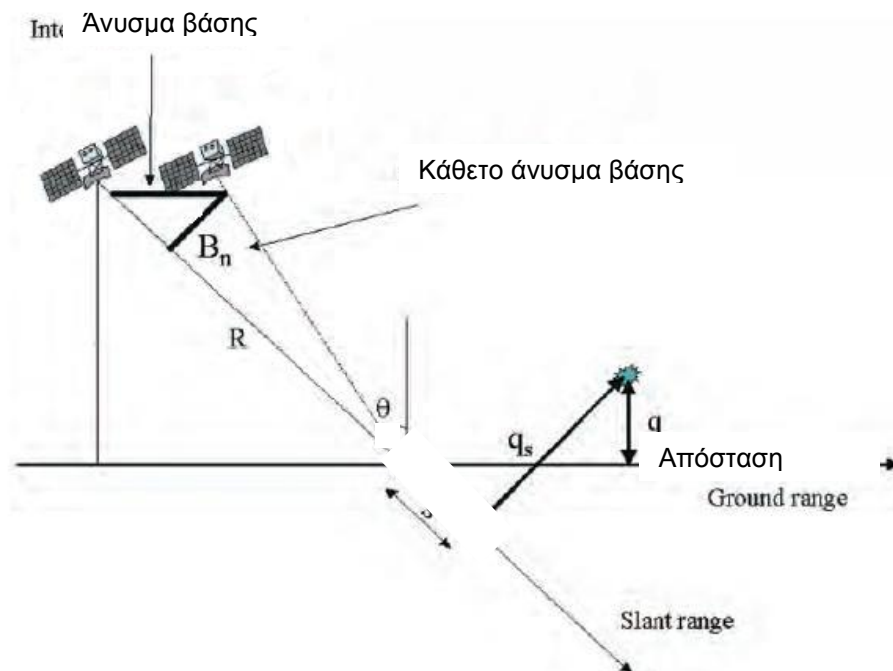
$q_s$  (Σχήμα 13)



$$\Delta r = \frac{-2B_n q_s}{R} \quad (4)$$

Η διακύμανση της συμβολομετρικής φάσης  $\Delta\phi$  είναι ανάλογη με το  $\Delta r$  διαιρεμένο με το εκπεμπόμενο μήκος κύματος  $\lambda$ .

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R} \quad (5)$$



Σχήμα 13 :Γεωμετρικοί παράγοντες ενός δορυφορικού συστήματος InSAR (ESA, 2007)

#### 2.4.2.1 Θόρυβος

Υπάρχουν τρεις τύποι θορύβου, που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν:

1. Θόρυβος φάσης εξαιτίας μεταβολής των ανακλαστών με το χρόνο.

Σε κάθε εικονοστοιχείο υπάρχουν πολλοί στοιχειώδεις ανακλαστές. Κάθε ένας από αυτούς, μπορεί να μεταβληθεί κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων SAR. Η μεταβολή στο χρόνο αυτών των στοιχειωδών ανακλαστών, έχει ως

αποτέλεσμα να εμφανίζεται στις εικόνες θόρυβος φάσης.

Στην περίπτωση λεκάνης νερού ή περιοχής με πυκνή βλάστηση, οι ανακλαστές μεταβάλλονται ακόμα και μετά από λίγα ms (π.χ. όταν υπάρχει άνεμος), ενώ βραχώδεις ή αστικές περιοχές παραμένουν σταθερές ακόμα και μετά από χρόνια. Ασφαλώς υπάρχουν και ενδιάμεσες καταστάσεις όπου η συμβολομετρική φάση εξακολουθεί να είναι χρήσιμη ακόμα και αν εμφανίζεται θόρυβος. Ο πολύ απότομος ρυθμός μεταβολής έχει ως επίπτωση να μην ανιχνεύονται οι αλλαγές και να χάνεται η συνοχή. Για να μη χαθεί η συνοχή θα πρέπει ο ρυθμός μεταβολής ανά εικονοστοιχείο να είναι μικρότερος από  $\lambda/2$ .

## 2. Θόρυβος φάσης εξαιτίας διαφορετικής γεωμετρίας.

Η πιο σημαντική επίδραση αυτού του φαινομένου είναι ότι υπάρχει ένα κρίσιμο άνυσμα βάσης πάνω από το οποίο, η συμβολομετρική φάση είναι καθαρός θόρυβος. Το κρίσιμο άνυσμα βάσης εξαρτάται από τη διάσταση του εικονοστοιχείου στο έδαφος (και από την κλίση του εδάφους), από τη συχνότητα του ραντάρ, και από την απόσταση ανιχνευτή-στόχου. Στην περίπτωση του ERS, το κρίσιμο άνυσμα βάσης για οριζόντιο έδαφος είναι περίπου 1150 m.

## 3. Θόρυβος φάσης εξαιτίας χωρικής σκέδασης.

Θόρυβος μπορεί να εμφανιστεί και στην περίπτωση του όγκου ανάκλασης, όταν οι ανακλαστές δεν είναι διευθετημένοι σε επίπεδη επιφάνεια αλλά καταλαμβάνουν όγκο (πχ τα κλαδιά ενός δέντρου).

### 2.4.2.2 Ατμοσφαιρική συμβολή

Δεδομένου ότι η λήψη δύο εικόνων SAR δεν είναι ταυτόχρονη, η διαδρομή της ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση μπορεί να επηρεαστεί διαφορετικά από την ατμόσφαιρα.

Ιονόσφαιρα :

Η επίδραση της ιονόσφαιρας είναι μικρή, και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των ιόντων. Η συγκέντρωση εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, την ηλιακή ακτινοβολία, το γεωγραφικό πλάτος κλπ.

- Απόσβεση της ακτινοβολίας ανάλογα με την πυκνότητα των ιόντων.
- Στιγμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης της ακτινοβολίας, δηλαδή εκτροπή της διεύθυνσης των μικροκυμάτων.
- Περιστροφή Faraday, δηλαδή περιστροφή του επιπέδου πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος λόγω της αλληλεπίδρασής του με το μαγνητικό πεδίο της Γης.
- Συγκεκριμένα στρώματα της ιονόσφαιρας διαταράσσουν τη διέλευση των μικροκυμάτων.

Τροπόσφαιρα :

Η τροπόσφαιρα είναι το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας ως περίπου το ύψος των 10km. Στην τροπόσφαιρα επηρεάζεται κυρίως το δορυφορικό σήμα, προκαλώντας εξασθένιση.

Αιτίες επιβράδυνσης ακτινοβολίας :

- Μεταβολές στην πίεση και τη θερμοκρασία (εξαρτάται από την εποχή).
- Μεταβολή του ποσοστού υγρασίας, δηλαδή περιεκτικότητας σε υδρατμούς.

Το φαινόμενο αυτό έχει επίπτωση στην ακρίβεια και στην ποιότητα των μετρήσεων του υψομέτρου και της παραμόρφωσης του εδάφους.

#### 2.4.2.3 Εσωτερική συμβολή

Η εσωτερική συμβολή μπορεί να απαλειφθεί χρησιμοποιώντας τις διαφορές φάσεων μεταξύ δύο εικόνων SAR, γεγονός που δίνει πρόσβαση σε χρήσιμες πληροφορίες. Προκειμένου να γίνει η επεξεργασία των δύο εικόνων, είναι βασικό να είναι απόλυτα εγγραφόμενες η μία επάνω στην άλλη. Είναι απαραίτητο να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα. Η περίπτωση στην οποία δεν υπάρχει απόλυτη ακρίβεια κατά την ταύτιση των δύο εικόνων, ονομάζεται αποσυσχέτιση (decorrelation).

#### 2.4.2.4 Αποσυσχέτιση

Τα δύο είδη αποσυσχέτισης είναι:

- χωρική αποσυσχέτιση: οφείλεται στο ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, η γωνία παρατήρησης του στόχου στις δύο διαφορετικές λήψεις έχει μεγάλη διαφορά,

με αποτέλεσμα να αλλάζει η γεωμετρία της λήψης και οι δύο εικόνες να μη μπορούν να ταυτιστούν απόλυτα (coregistration).

- Χρονική αποσυσχέτιση: προκαλείται όταν το μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο λήψεων είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να έχουν προκύψει διαφοροποιήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

### **2.4.3 Επεξεργασία εικόνων SAR και αποτελέσματα συμβολομετρίας (InSAR) και διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR)**

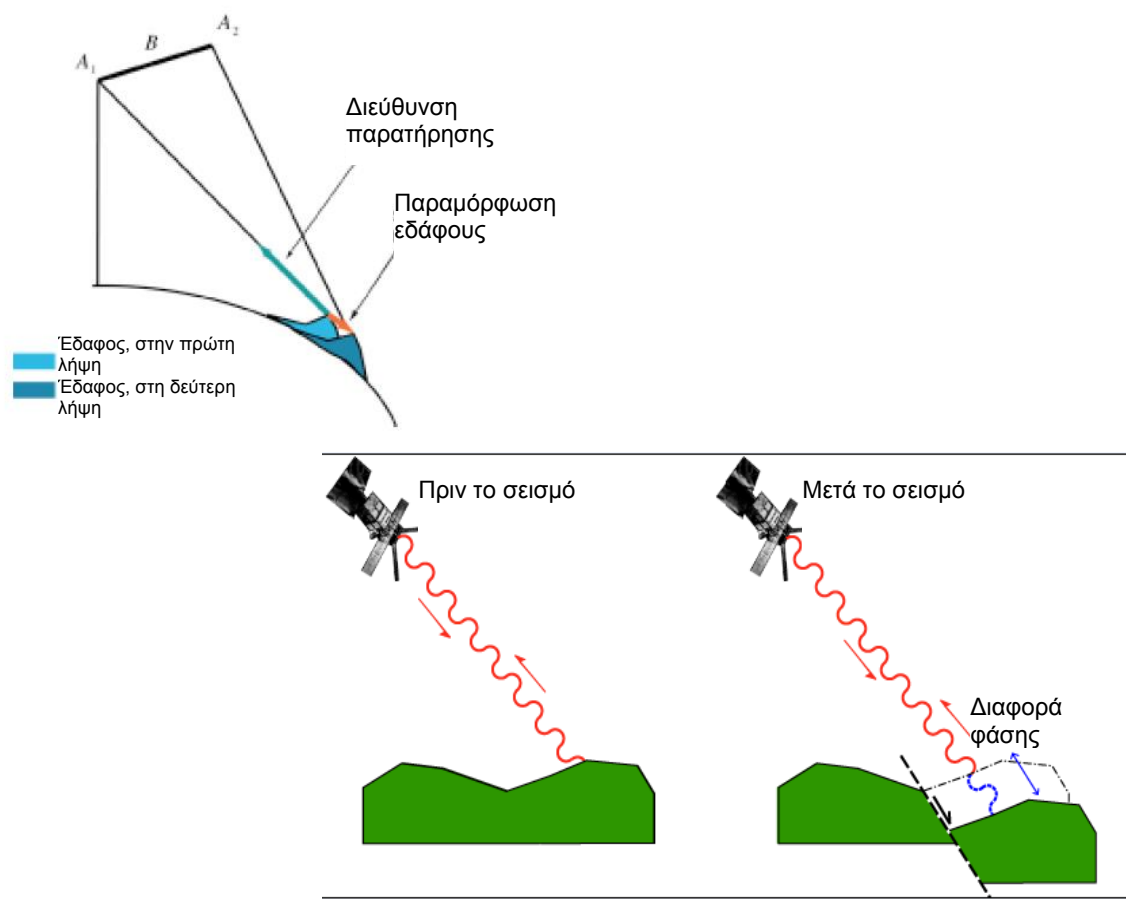
#### **2.4.3.1 Είδη εικόνων**

Οι εικόνες που περιλαμβάνουν αυτούσια τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από το RADAR είναι τύπου raw. Κατά την επεξεργασία τους (focusing) μετατρέπονται σε εικόνες SLC (Single Look Complex) και έχουν καλύτερη χωρική ανάλυση. Οι εικόνες SLC είναι αυτές που θα υποστούν περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να δημιουργηθεί το συμβολογράφημα. Υπάρχει βεβαίως η δυνατότητα, η επεξεργασία να ξεκινήσει απευθείας από εικόνες SLC. Οι δύο εικόνες SAR που χρησιμοποιούνται, ονομάζονται master και slave και εγγράφονται η μία επάνω στην άλλη με τη βοήθεια του Μοντέλου Ψηφιακού Εδάφους (DEM) και των δορυφορικών τροχιών.

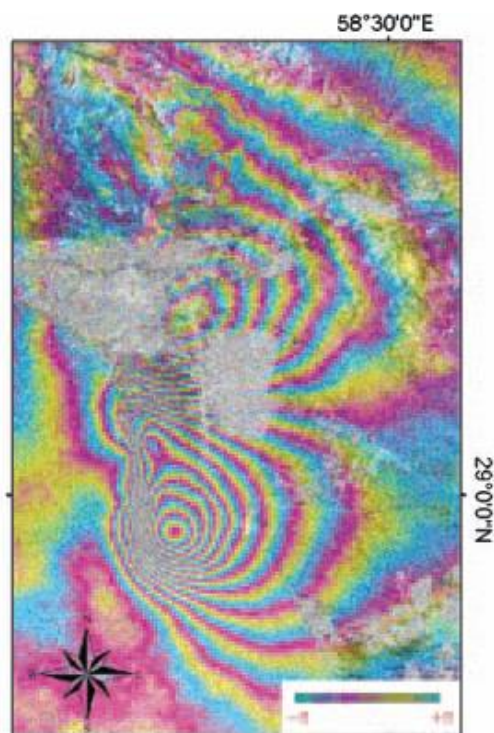
Τα προϊόντα που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας είναι το συμβολογράφημα, και ο χάρτης συνάφειας.

#### **2.4.3.2 Συμβολογράφημα**

Το συμβολογράφημα είναι ο χάρτης μεταβολών της διαφοράς φάσης και είναι μία εικόνα που αποτελείται από κροσσούς συμβολής (fringes). Οι κροσσοί συμβολής μοιάζουν με ισοϋψείς καμπύλες (Εικόνα 5). Προκαλούνται από τις μεταβολές της διαφοράς φάσης και δηλώνουν τις σχετικές μετατοπίσεις του εδάφους (Σχήμα 14). Οι κροσσοί συμβολής αναπαρίστανται με διαφορετικά χρώματα έτσι ώστε η σειρά με την οποία εμφανίζονται, να φανερώνει αν υπάρχει καθίζηση ή ανύψωση του εδάφους.



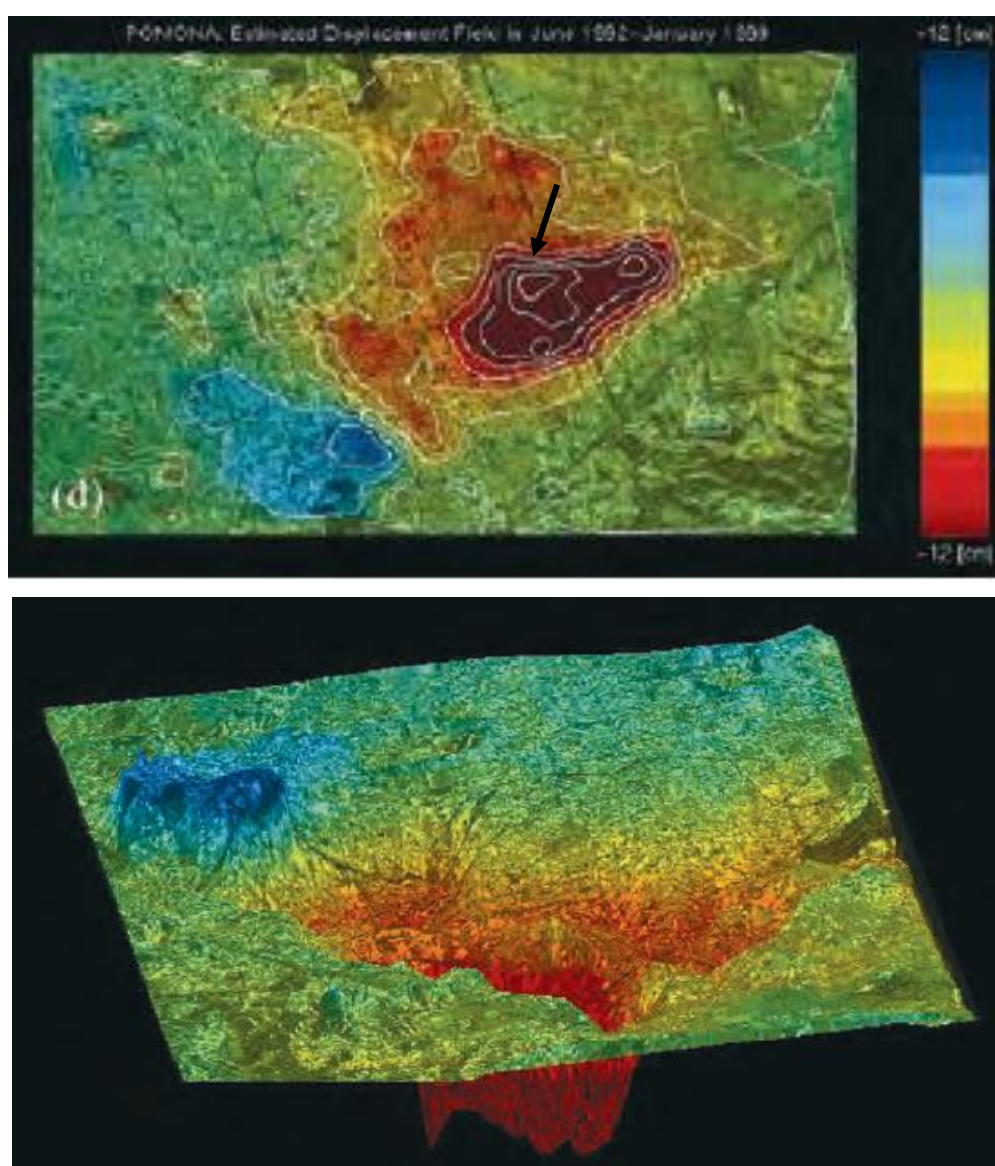
Σχήμα 14 : Μεταβολή της φάσης του σήματος λόγω μετακίνησης του εδάφους



Εικόνα 5: Τυπική μορφή συμβολογραφήματος, στο οποίο φαίνονται δύο περιοχές παραμόρφωσης του εδάφους

Μετρώντας τον αριθμό των κροσσών συμβολής σε κάθε παραμόρφωση, μπορεί να υπολογιστεί το μέγεθός της.

Για παράδειγμα, στο συμβολογράφημα της Εικόνας 6, παρατηρείται σε μία περιοχή το  $\frac{1}{2}$  του κροσσού συμβολής. Ο κάθε κροσσός συμβολής, στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 24cm παραμόρφωσης. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη περιοχή, εμφανίζονται 12cm παραμόρφωσης. Η διεύθυνση που δείχνει το βέλος είναι η διεύθυνση κατά τη οποία αυξάνονται οι τιμές φάσης. Άρα, προς αυτή τη διεύθυνση εμφανίζεται καθίζηση.



Εικόνα 6 : Επάνω : Συμβολογράφημα παραμόρφωσης στην περιοχή Pomona  
Κάτω : Τρισδιάστατη απεικόνιση της παραμόρφωσης

Το συμβολογράφημα  $I$  προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό, κάθε εικονοστοιχείου, της πρώτης εικόνας SAR (master) με τον συζυγή (conjugate) του μιγαδικού αριθμού του αντίστοιχου εικονοστοιχείου της δεύτερης (slave) λήψης (Σχέση 6).

$$I = P_1 \times P_2^* \quad (6)$$

Όπου, με τη βοήθεια της σχέσης 3 προκύπτει ότι :

$$I = A e^{i(\varphi_{int1} + \varphi_{path1})} A e^{i(-\varphi_{int2} - \varphi_{path2})} \quad (7)$$

$$I = A^2 e^{i(\varphi_{int1} + \varphi_{path1} - \varphi_{int2} - \varphi_{path2})} \quad (8)$$

Αφού θεωρούμε ότι η εσωτερική συμβολή ( $\varphi_{int}$ ) παραμένει η ίδια, μπορεί να απαλειφθεί, και η σχέση γίνεται:

$$I = A^2 e^{i(\varphi_{path1} - \varphi_{path2})} \quad (9)$$

Η διαφορά  $\varphi_{path1} - \varphi_{path2}$  είναι το  $\Delta\varphi$  του συμβολογραφήματος.

Το συμβολογράφημα δηλαδή, περιέχει πληροφορίες για το πλάτος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας ( $A^2$ ) καθώς και πληροφορίες για τη φάση της.

Στο συμβολογράφημα υπάρχει συμβολή από τις τροχιές των δορυφόρων, από την τοπογραφία, από την παραμόρφωση του εδάφους (που είναι το ζητούμενο στη διαφορική συμβολομετρία), από την ατμόσφαιρα, και από τον θόρυβο.

Ειδικότερα :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{DEM} \quad (10)$$

Όπου:

$\Delta\varphi_{atm}$  = διαφορά φάσης που οφείλεται στην ατμόσφαιρα

$\Delta\varphi_{def}$  = διαφορά φάσης που οφείλεται στην παραμόρφωση του εδάφους

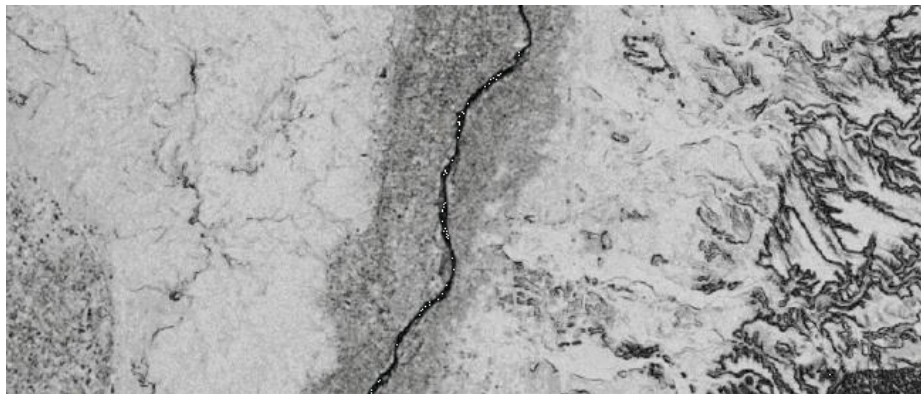
$\Delta\varphi_{DEM}$  = διαφορά φάσης που οφείλεται στην τοπογραφία

Σε αυτή τη σχέση, αν υπάρχει διαθέσιμο DEM, τότε απαλείφονται οι κροσσοί λόγω τοπογραφίας  $\Delta\varphi_{DEM}$ . Επίσης, αν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι παρόμοιες κατά τις λήψεις των εικόνων, απαλείφεται και η ατμοσφαιρική συμβολή  $\Delta\varphi_{atm}$ . Έτσι, σε ιδανικές συνθήκες, η διαφορά φάσης που ανιχνεύεται, προκαλείται μόνο από την εδαφική παραμόρφωση  $\Delta\varphi_{def}$ .

#### 2.4.3.3 Συνάφεια (coherence)

Ο θόρυβος φάσης μπορεί να υπολογιστεί για ένα ζευγάρι εικόνων SAR από το μέγεθος της τοπικής συνάφειας  $\gamma$ . Η τοπική συνάφεια είναι ο συντελεστής συσχέτισης του ζεύγους των εικόνων SAR υπολογισμένου σε ένα μικρό χωρικό παράθυρο εύρους μερικών εικονοστοιχείων, όταν όλα τα επιμέρους στοιχεία της φάσης (Σχέση 10), κυρίως λόγω κλίσης του εδάφους, έχουν εκτιμηθεί. Τα στοιχεία της φάσης σε τόσο μικρό χωρικό παράθυρο, είναι σε πρώτη προσέγγιση γραμμικά τόσο προς την διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου όσο και κάθετα σε αυτήν. Συνεπώς, μπορούν να υπολογιστούν από το ίδιο το συμβολογράφημα με μεθόδους ανίχνευσης συχνότητας σύνθετων ημιτονοειδών θορύβου (πχ Fast Fourier Transform).

Οι τιμές της συνάφειας κυμαίνονται από 0, όταν η συμβολομετρική φάση οφείλεται μόνο σε θόρυβο, μέχρι 1, στην περίπτωση πολύ καλής συσχέτισης των ιδιοτήτων του στόχου μεταξύ δύο λήψεων. Ο χάρτης συνάφειας (Εικόνα 7) είναι ουσιαστικά το κριτήριο για το μέγεθος στο οποίο έχουν μεταβληθεί οι ιδιότητες των στόχων στο διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων.



Εικόνα 7 :Χάρτης συνάφειας περιοχής του Καΐρου. Με λευκό είναι οι περιοχές με μεγαλύτερη συνάφεια (ESA, 2007).

Στα σημεία που η συνάφεια παίρνει πολύ μικρές τιμές, μπορούν να εφαρμοστούν φίλτρα τα οποία εξομαλύνουν τον θόρυβο και βελτιώνουν την εικόνα του συμβολογραφήματος.

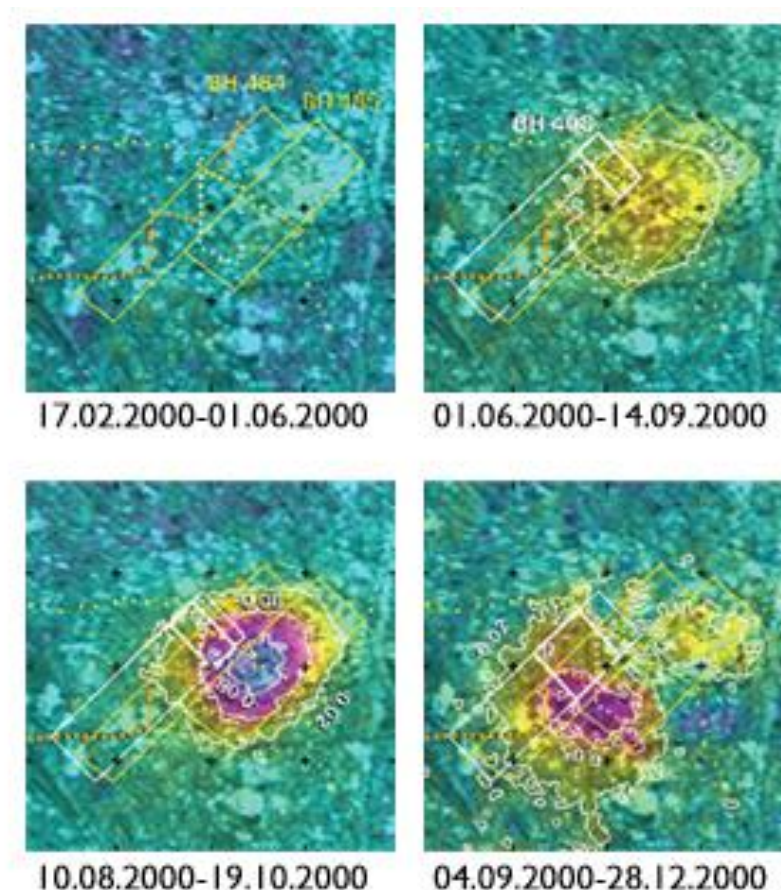
#### 2.4.3.4 Τοπογραφία και τροχιές των δορυφόρων

Όταν υπάρχει διαθέσιμο DEM της περιοχής μελέτης, η υψομετρική συμβολή μπορεί



να αφαιρεθεί από τη συμβολομετρική φάση. Με αυτό τον τρόπο, στην περίπτωση της διαφορικής συμβολομετρίας – DInSAR, μπορεί να υπολογιστεί η παραμόρφωση του εδάφους. Η βασική ιδέα της διαφορικής συμβολομετρίας είναι η απαλοιφή του όρου της τοπογραφίας από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση. Αυτό επιτρέπει την ανάδειξη της φάσης που σχετίζεται με διαφορικές κινήσεις που έλαβαν χώρα στο διάστημα μεταξύ δύο λήψεων (Εικόνα 8). Η συμβολομετρία SAR είναι αποτελεσματική κυρίως για μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διεύθυνση παρατήρησης (π.χ. ανυψώσεις, καθυζίσεις).

Μία ακόμη πληροφορία που είναι απαραίτητη ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της συμβολομετρίας, είναι οι ακριβείς τροχιές των δορυφόρων κατά τη λήψη των εικόνων. Αυτά τα δεδομένα χρησιμεύουν στην εγγραφή των εικόνων με το DEM σε κοινό σύστημα αναφοράς, καθώς επίσης και στην αφαίρεση του θορύβου που ενδεχομένως να υπάρχει εξαιτίας της μετατόπισης της τροχιάς.

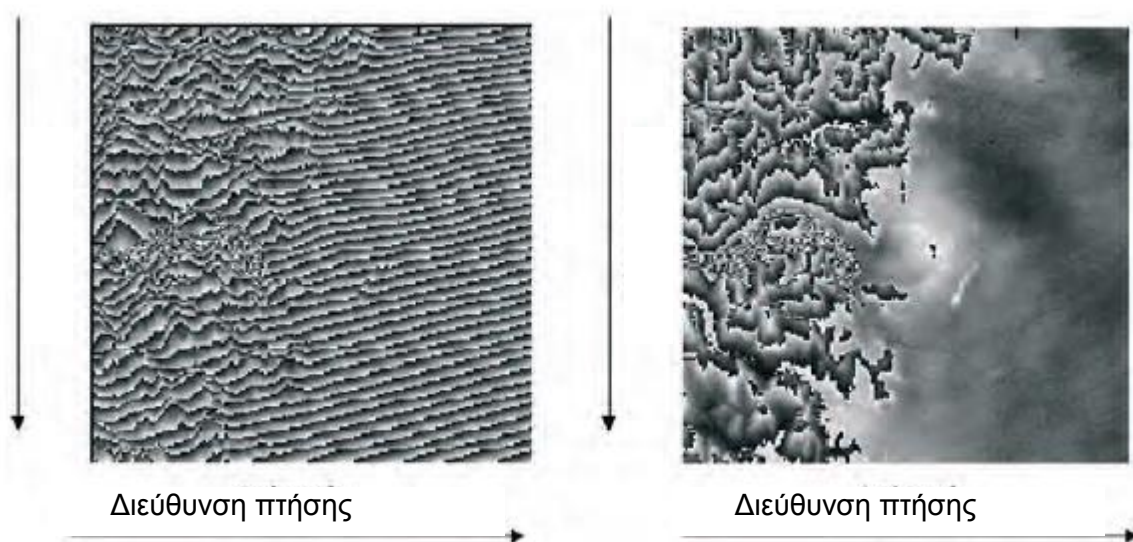


Εικόνα 8 :Παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους εξαιτίας υπόγειου ανθρακωρυχείου. (ESA)

#### 2.4.3.5 Εξομάλυνση συμβολογραφήματος (interferogram flattening)

Στην επεξεργασία πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η καμπυλότητα της Γης. Το κάθετο άνυσμα βάσης μπορεί να υπολογιστεί από τα ακριβή δεδομένα, και η μεταβολή της φάσης που οφείλεται στην καμπυλότητα της Γης μπορεί να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί από τη φάση του συμβολογραφήματος με τη βοήθεια του DEM. Στην περίπτωση που το DEM της περιοχής δεν είναι διαθέσιμο, χρησιμοποιείται τεχνητό DEM με σταθερό υψόμετρο και γνωστό ελλειψοειδές αναφοράς. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εξομάλυνση συμβολογραφήματος, και σαν αποτέλεσμα παράγεται ένα συμβολογράφημα ανάλογο με το σχετικό υψόμετρο του εδάφους. Τα περισσότερα λογισμικά επεξεργασίας, το κάνουν αυτόματα κατά την απαλοιφή της τοπογραφίας.

Ένα παράδειγμα εξομάλυνσης συμβολογραφήματος φαίνεται στην Εικόνα 9, όπου υπάρχει το συμβολογράφημα ενός τμήματος των Άλπεων, στην αριστερή πλευρά, το οποίο έχει καταγραφεί από δεδομένα του ERS-1 και του ERS-2 (καταγεγραμμένα με διαφορά μίας ημέρας, με άνυσμα βάσης ίσο με 30m). Το εξομαλυμένο συμβολογράφημα φαίνεται στη δεξιά πλευρά. Εδώ, οι ασυνέχειες φάσης μοιάζουν με ισούψείς καμπύλες. Το υψόμετρο μεταξύ δύο παρακείμενων ασυνεχειών ονομάζεται υψόμετρο αμφισημίας (altitude of ambiguity  $h_a$ ) και μπορεί να υπολογιστεί από τις συμβολομετρικές παραμέτρους.



Εικόνα 9 : Αριστερά: Συμβολογράφημα μιας περιοχής των ιταλικών Άλπεων από τον ERS. Δεξιά: Εξομαλυμένο συμβολογράφημα (ESA, 2007).

#### 2.4.3.6 Υψόμετρο αμφισημίας (altitude of ambiguity)

Υψόμετρο αμφισημίας  $h_a$  ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά που παράγει μία αλλαγή φάσης  $2\pi$  μετά την εξομάλυνση του συμβολογραφήματος. Το υψόμετρο αμφισημίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το κάθετο άνωσμα βάσης:

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n} \quad (11)$$

Στην περίπτωση του ERS με  $\lambda=5,5\text{cm}$ ,  $\theta=23^\circ$ , και  $R=850\text{km}$  η εξίσωση (11) (σε μέτρα) γίνεται:

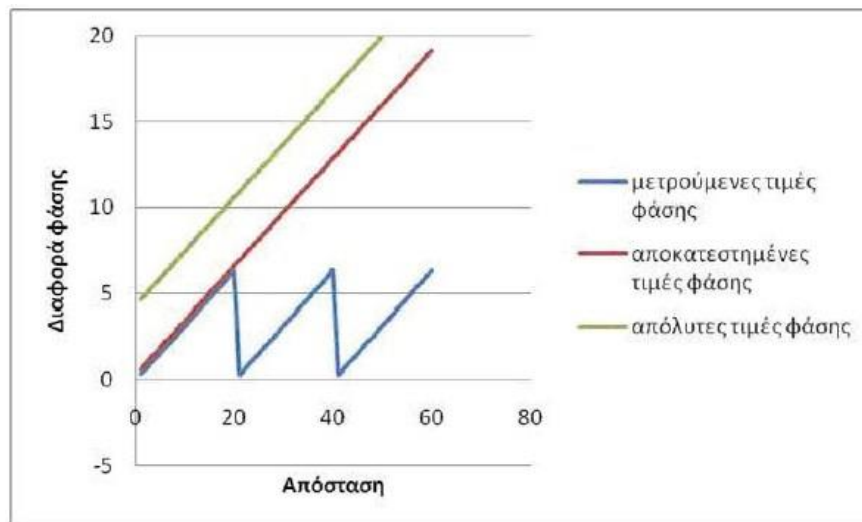
$$h_a \approx \frac{9300}{B_n} \quad (12)$$

Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί ένα κάθετο άνωσμα βάσης 100m, μία διαφορά συμβολομετρικής φάσης  $2\pi$  αντιστοιχεί σε μία υψομετρική διαφορά περίπου 93m. Γενικά, ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνωσμα βάσης, τόσο πιο ακριβής είναι η μέτρηση του υψομέτρου. Εντούτοις, υπάρχει ένα ανώτερο όριο στις τιμές που μπορεί να πάρει το κάθετο άνωσμα βάσης, πάνω από το οποίο τα συμβολομετρικά σήματα δε συσχετίζονται και δε μπορεί να παραχθεί ένας κροσσός συμβολής. Συμπερασματικά υπάρχει ένα βέλτιστο άνωσμα βάσης, το οποίο μεγιστοποιεί το ποσοστό του σήματος προς το θόρυβο. Στην περίπτωση του ERS αυτό το βέλτιστο άνωσμα βάσης είναι περίπου στα 300-400m. [ESA, 2007]

#### 2.4.3.7 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης (phase unwrapping)

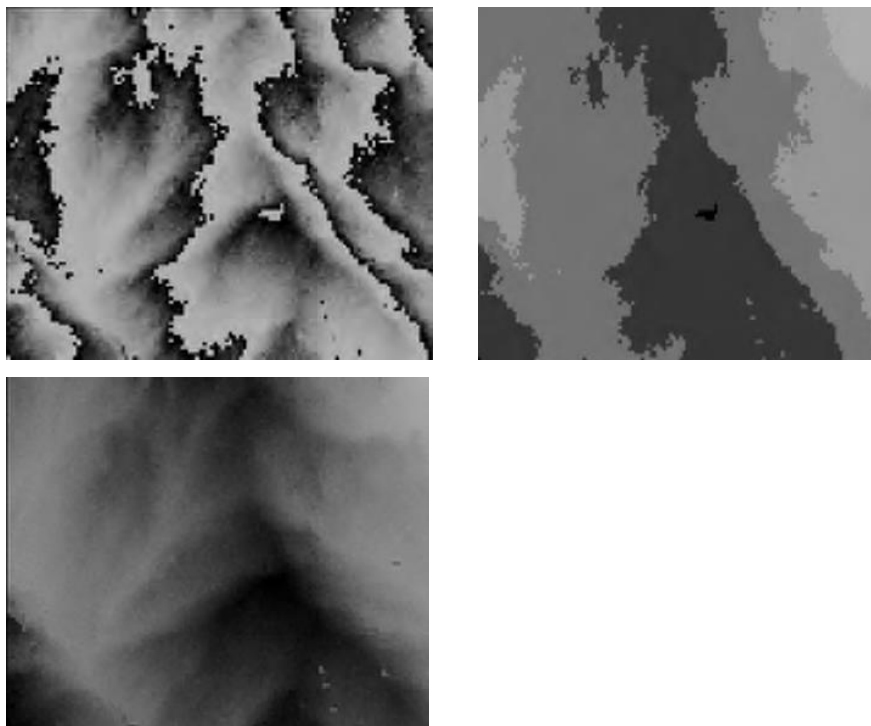
Το εξομαλυμένο συμβολογράφημα παρέχει μια μέτρηση του σχετικού υψομέτρου του εδάφους. Η πληροφορία που εκμεταλλεύεται η συμβολομετρία είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στις δύο εικόνες, η οποία μετριέται σε rad. Στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα έχουν διαγραφεί οι ακέραιοι κύκλοι των τιμών φάσης με αποτέλεσμα η διαφορά φάσης να κυμαίνεται από  $-\pi$  έως  $\pi$ .

Η διαδικασία της εύρεσης και πρόσθεσης του κατάλληλου ακέραιου πολλαπλασίου του  $2\pi$  στις τιμές φάσης, έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί η πραγματική υψομετρική διακύμανση, ονομάζεται αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης.



Σχήμα 15 :Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης.

Ένα παράδειγμα αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης φαίνεται στην Εικόνα 10, στην οποία φαίνονται η συμβολομετρική φάση SAR, η αποκατεστημένη εκδοχή της, και ένα συμβολογράφημα με το σωστό ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  που έχει προστεθεί στην αρχική φάση.

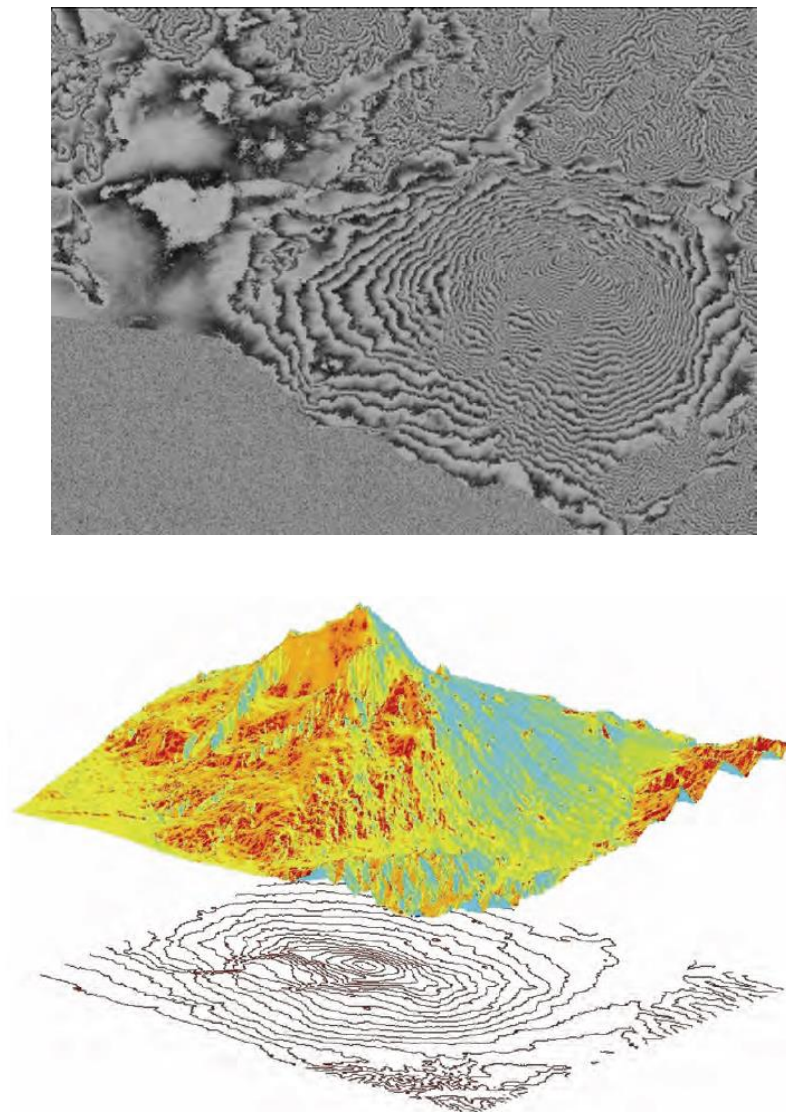


Εικόνα 10 : Πάνω αριστερά: συμβολομετρική φάση SAR. Πάνω δεξιά: η αποκατεστημένη εκδοχή της. Κάτω: συμβολογράφημα με το κατάλληλο ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  που έχει προστεθεί στην αρχική φάση. (ESA, 2007)



Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης. Εντούτοις θα πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως η αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης δεν έχει μία μοναδική λύση, και θα πρέπει να εκμεταλλευθεί μία *a priori* πληροφορία. Όταν οι συμβολομετρικές φάσεις αποκατασταθούν, θα παραχθεί ένας χάρτης υψομετρικών διαφορών. Αυτό είναι το πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί ένα DEM. Ο χάρτης υψομετρικών διαφορών του SAR θα πρέπει να αναφέρεται σε ένα συμβατικό ελλειψοειδές (πχ WGS84) και η αναδόμηση εικονοστοιχείων σε ένα κάρναβο (πχ UTM).

Στην Εικόνα 11 φαίνεται ένα παράδειγμα εξομαλυμένου συμβολογραφήματος του βουνού Αίτνα, και το DEM που δημιουργήθηκε μέσω της αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης και της αναδόμησης εικονοστοιχείων.

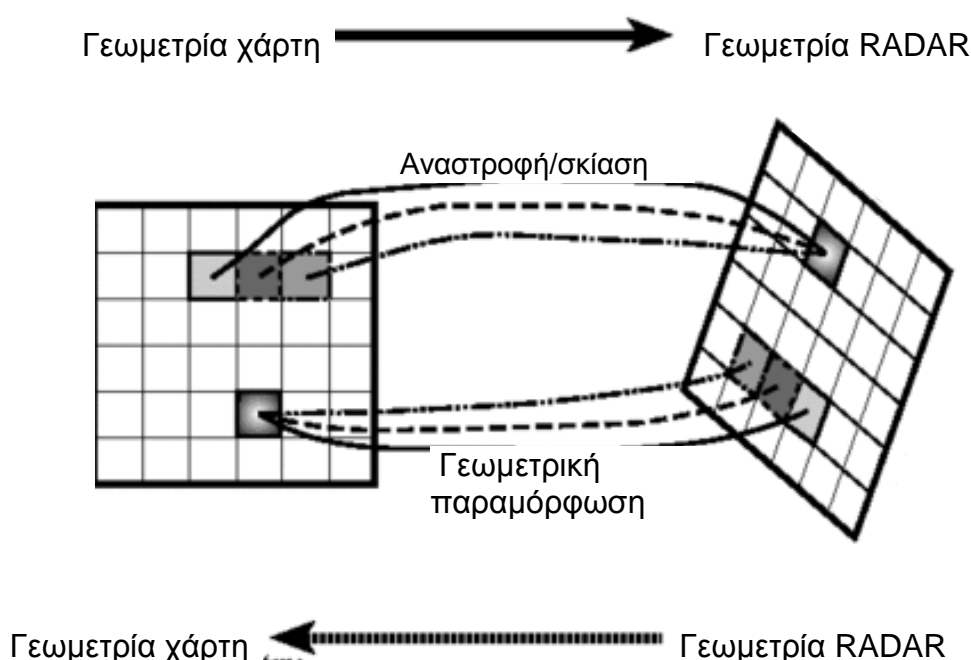


Εικόνα 11 : Πάνω: εξομαλυμένο συμβολογράφημα και κάτω: το σχετικό DEM του βουνού Αίτνα που δημιουργήθηκαν μέσω αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης και αναδόμησης εικονοστοιχείων.

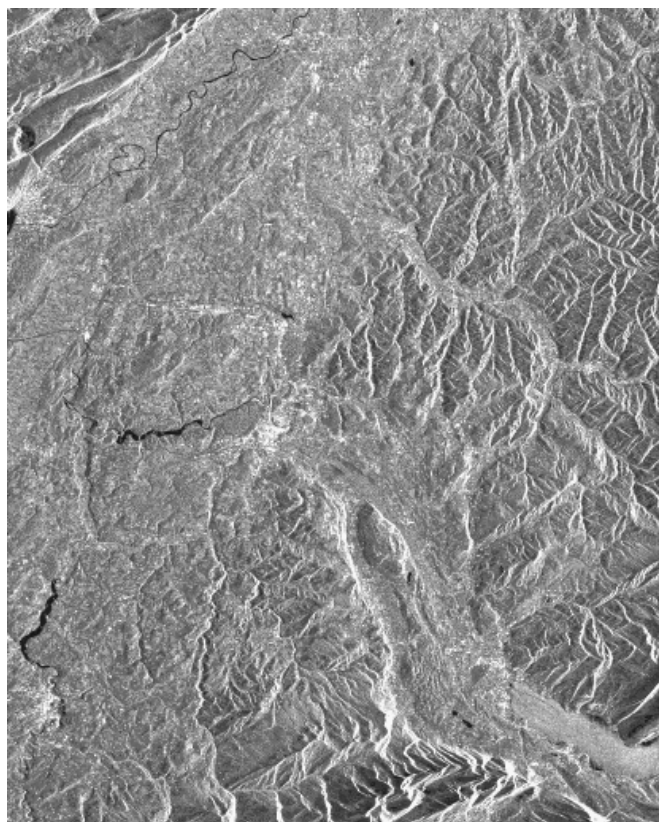
Οι αποκαταστημένες τιμές που προκύπτουν, λαμβάνοντας υπόψη και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε, μπορούν να μετατραπούν σε τιμές εδαφικής παραμόρφωσης. Αναλόγως με το σύστημα SAR με το οποίο έχουν ληφθεί οι εικόνες, κάθε κροσσός συμβολής αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη εδαφική παραμόρφωση (π.χ. στον ERS-2 η παραμόρφωση είναι 28mm). Για να υπολογιστεί αυτή η παραμόρφωση, μετρώνται οι κροσσοί συμβολής στο συμβολογράφημα, στις περιοχές ενδιαφέροντος.

#### 2.4.3.8 Γεωμετρική διόρθωση (Geocoding)

Η γεωμετρική διόρθωση του συμβολογραφήματος ορίζεται ως η μετατροπή της εικόνας, από την καταγραφή σε γεωμετρία RADAR (slant range) στη γεωμετρία του DEM, σε γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων (Εικόνα 12). Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η αντιστοίχιση του κάθε σημείου του συμβολογραφήματος σε συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας της Γης σε δεδομένη χαρτογραφική προβολή. Σε αυτή τη φάση περιορίζονται ως ένα βαθμό οι γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως η αναστροφή (Σχήμα 17) [Schwabisch].



Σχήμα 16 : Μετατροπή συντεταγμένων συστήματος SAR σε γεωμετρία χάρτη, και αντίστροφα (University of Zurich, Department of Geography)



Εικόνα 12 : Επάνω, εικόνα SAR που έχει ληφθεί από τον ERS-1. Κάτω, η ίδια εικόνα μετά τη γεωκωδικοποίηση. (University of Zurich, Department of Geography)

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROI PAC

#### 3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το πεδίο στο οποίο θα γίνει η μελέτη είναι η περιοχή της Χρυσοσκαλίτισσας η οποία βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της Κρήτης (Εικόνες 13-14-15). Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον, διότι έχει υπολογιστεί από γεωτεκτονικά μοντέλα ότι υφίσταται ανύψωση της τάξεως των πέντε χιλιοστών ανά έτος. Αυτό οφείλεται στη γεωτεκτονική θέση της Κρήτης, η οποία αποτελεί μέρος του 'Ελληνικού τόξου' που ξεκινάει από την Κεφαλονιά, διασχίζει το νότιο Ιόνιο ανατολικά της Πελοποννήσου, περνάει από την Κρήτη, και καταλήγει στη Ρόδο. Η Κρήτη βρίσκεται στο όριο επαφής και σύγκλισης της αφρικανικής με την ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα, όπου η πρώτη βυθίζεται με ταχύτητα περίπου 4,5 εκατοστών το χρόνο κάτω από τη δεύτερη (Σχήμα 17). Ο χώρος αυτός είναι το πιο δραστήριο, γεωλογικά, τμήμα του ενεργού νότιου ηπειρωτικού περιθωρίου της ευρασιατικής πλάκας.

Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος είναι 10 x 10 τετραγωνικά χιλιόμετρα και οι υψομετρικές διαφορές είναι της τάξεως των 150-200 μέτρων, ενώ στην ευρύτερη περιοχή ανατολικά της Χρυσοσκαλίτισσας, παρουσιάζονται υψομετρικές διαφορές της τάξεως των 600 μέτρων.

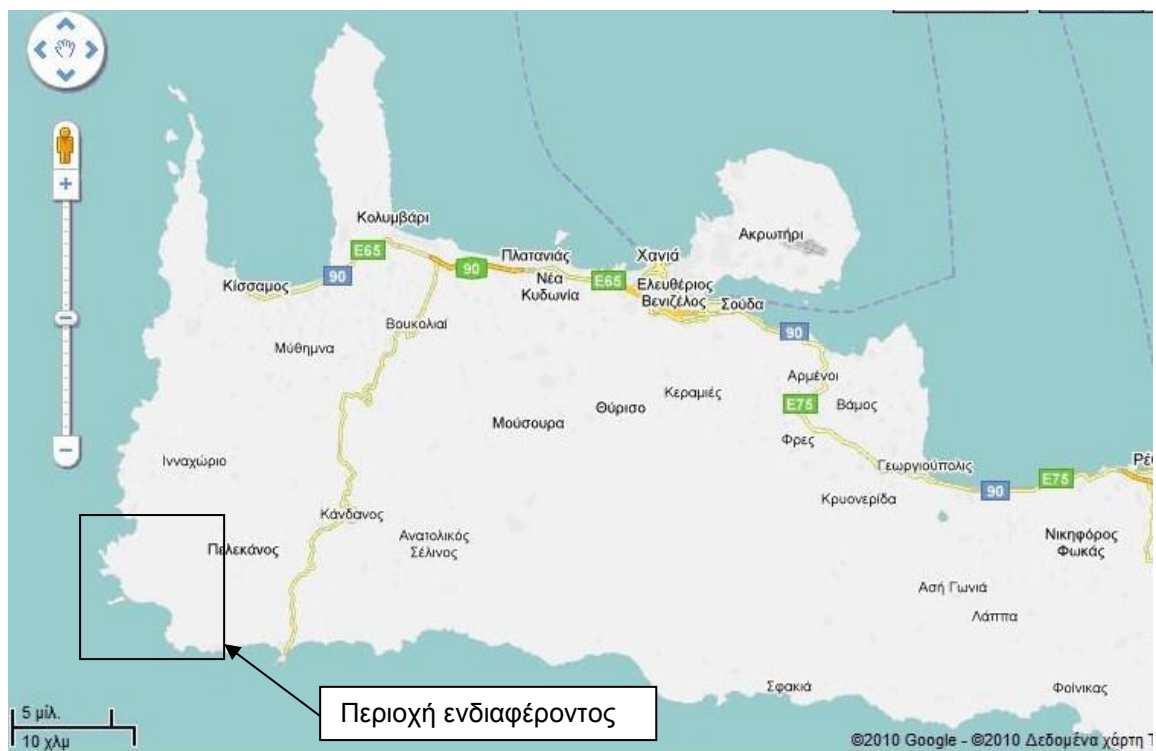


Σχήμα 17 : Η καταβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την ευρασιατική (Buildnet)





Εικόνα 13 : Χάρτης της Ελλάδας (Google Maps)



Εικόνα 14 : Χάρτης Νομού Χανίων (Google Maps)

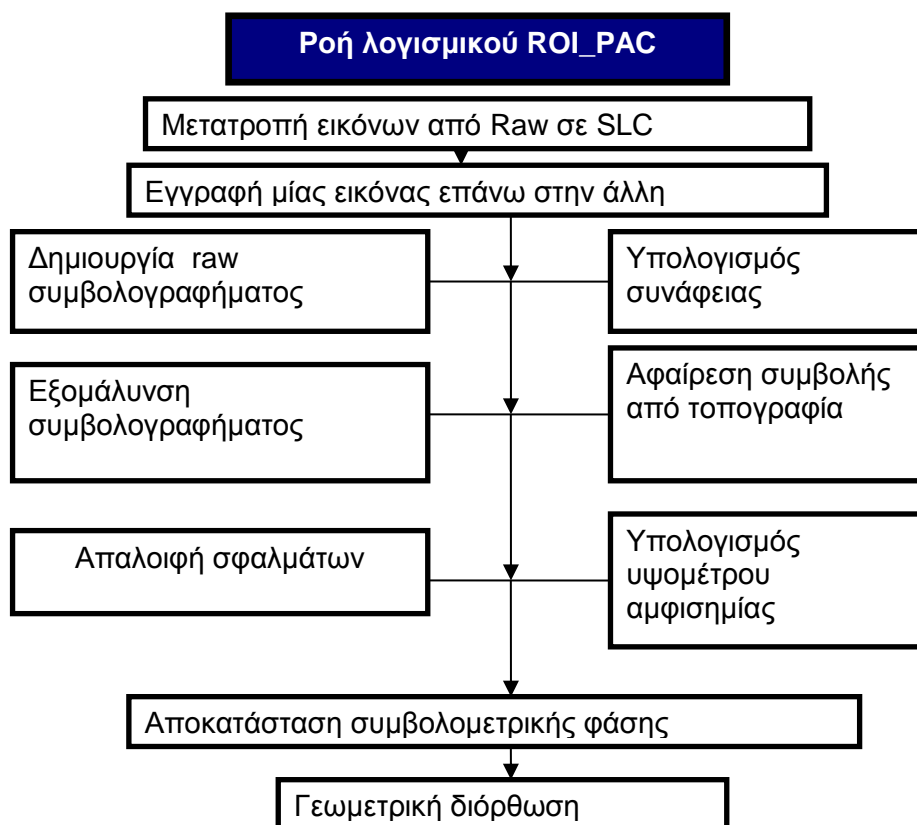


Εικόνα 15 : Περιοχή Ενδιαφέροντος (Google Earth)

### 3.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROI\_PAC

Για την επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ROI\_PAC (Repeat Orbit Interferometry PACkage). Το λογισμικό αυτό, δημιουργήθηκε από το Jet Propulsion Laboratory της NASA, και το Caltech. Το ROI\_PAC δημιουργήθηκε για την επεξεργασία εικόνων SAR και τη δημιουργία διαφορικών συμβολογραφημάτων. Λειτουργεί σε περιβάλλον UNIX. Είναι ένα λογισμικό που διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας συμπεριλαμβάνεται και η εκμάθηση αυτού του λογισμικού.

Παρακάτω θα περιγραφούν οι αλγόριθμοι και οι διαδικασίες (Σχήμα 18) που εφαρμόζονται στο ROI\_PAC. Η γλώσσα προγραμματισμού είναι η Perl ενώ κάποιες επιμέρους αλγοριθμικές συναρτήσεις είναι γραμμένες σε Fortran ή C.



Σχήμα 18 : Διάγραμμα ροής λογισμικού ROI\_PAC

### 3.2.1 Τύποι αρχείων (files)

Το ROI\_PAC χρησιμοποιεί διάφορα είδη αρχείων τόσο για τα αρχεία εισαγωγής (input files) όσο και για τα παραγόμενα αρχεία (output files). Τα παραγόμενα αρχεία που δημιουργούνται έχουν συγκεκριμένες καταλήξεις (suffices) οι οποίες προσδιορίζουν τον τύπο τους.

Πίνακας 3 : Αρχεία ASCII

ΑΡΧΕΙΟ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ
‘Αρχείο’.rsc.hst	Ιστορικό αναγνώσεων και εγγραφών (reads and writes) του ‘Αρχείο’.rsc
‘Αρχείο’.rsc	Metadata όπως το άνυσμα βάσης και δεδομένα τροχιάς
*.off	Μετατοπίσεις θέσης (offsets) που μετρήθηκαν μεταξύ των δύο εικόνων

*.out	Πληροφορίες για τα παραγόμενα προϊόντα ενός προγράμματος
*.aff	Αφφινικός μετασχηματισμός της προσομοιωμένης σε χάρτη εικόνας SAR σε πραγματική εικόνα SAR
*.proc	Ειδικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία
*.in	Δημιουργείται από τα ROI-PAC scripts και χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου

Πίνακας 4 : Δυαδικά (binary) αρχεία

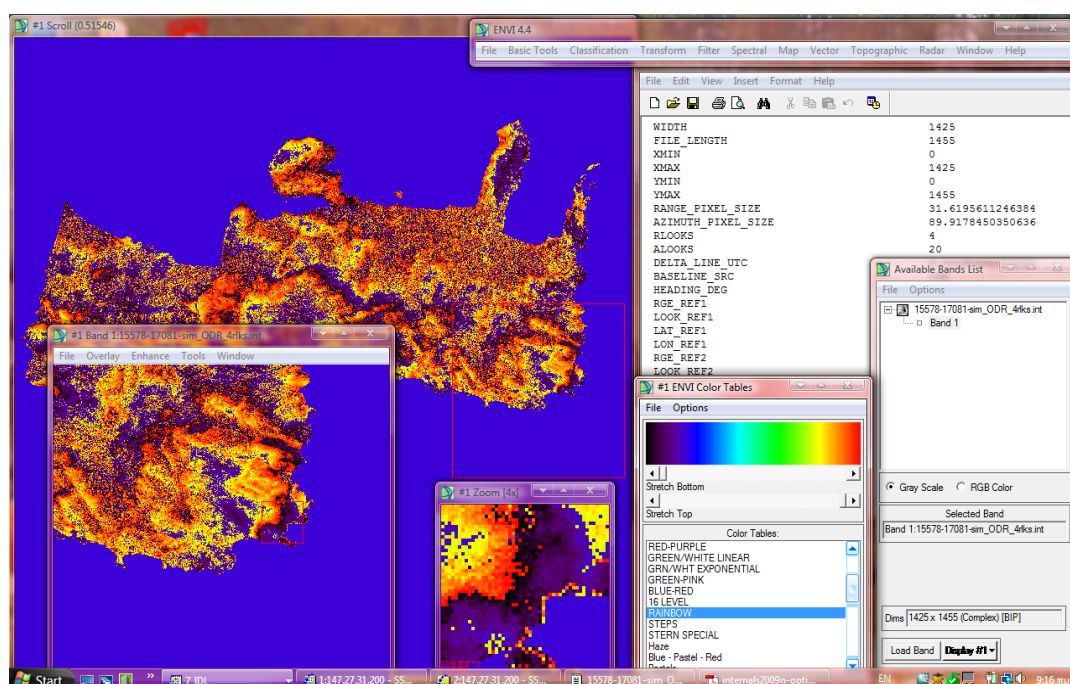
ΑΡΧΕΙΟ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ
*.raw	raw δεδομένα
*.int	Πραγματικό και το φανταστικό μέρος του συμβολογραφήματος με μορφή μιγαδικών αριθμών
*.amp	Τιμές εύρους (amplitude) των δύο εικόνων SAR που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του συμβολογραφήματος
*.slc	Πραγματικά και τα φανταστικά μέρη της εικόνας SLC με μορφή μιγαδικών αριθμών
*.hgt	Προσομοιωμένη εικόνα εύρους και υψομέτρων SAR σε συντεταγμένες ραντάρ
*.unw	Εικόνα εύρους SAR και αποκατεστημένη φάση
*.flg	flags που χρησιμοποιήθηκαν και προέκυψαν από την αποκατάσταση φάσης
*.msk	Εικόνα εύρους SAR και συνάφεια, με μηδενικά στις περιοχές που δε λαμβάνονται υπόψη
*.trans	Αντίστροφος μετασχηματισμός από συντεταγμένες SAR σε συντεταγμένες DEM
*.dem	DEM σε συντεταγμένες UTM

### 3.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Το ένα από τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων είναι το ENVI το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και προσφέρει δυνατότητες για βελτίωση των αντιθέσεων, και χρωματισμό των εικόνων (Εικόνα 16).

Στις σύνθετες εικόνες (complex) υπάρχει η δυνατότητα επιλογής προβολής. Οι επιλογές που υπάρχουν είναι οι παρακάτω :

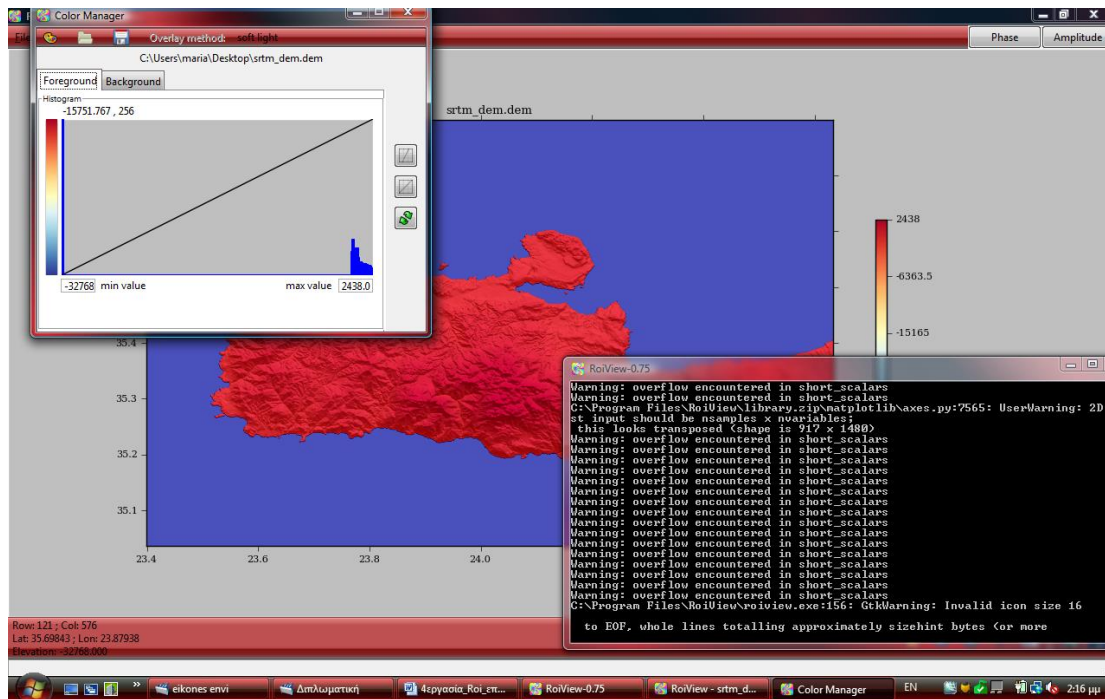
- Real  $I$  : Το πραγματικό μέρος της εικόνας
- Imaginary  $R$  : Το φανταστικό μέρος της εικόνας
- Power : Η ποσότητα ενέργειας του σήματος επιστροφής
- Magnitude  $|z|$  : Η φωτεινότητα του κάθε εικονοστοιχείου  $|z| = \sqrt{R^2 + I^2}$  (13)
- Phase : Η φάση του σήματος επιστροφής



Εικόνα 16 : Παράθυρα εφαρμογής ENVI

Το δεύτερο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των εικόνων είναι το RoiView. Το RoiView είναι ένα πρόγραμμα το οποίο διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο (<http://sourceforge.net/projects/roiview/>) και δημιουργήθηκε για την οπτικοποίηση εικόνων συμβολομετρίας, ειδικά για προϊόντα ROI\_PAC. Αυτό το πρόγραμμα χρειάζεται ελάχιστη καθοδήγηση από το χρήστη, διότι συλλέγει τις πληροφορίες για το μέγεθος και τον τύπο της εικόνας από το rsc αρχείο που τη συνοδεύει, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα από τυχόν λάθη του χρήστη. Όπως και το ENVI, έτσι και το RoiView προσφέρει δυνατότητα για χρωματισμό των εικόνων (Εικόνα 17).





Εικόνα 17 : Παράθυρα εφαρμογής RoIView

### 3.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι εικόνες της περιοχής μελέτης επιλέχθηκαν με κριτήριο τη διαθεσιμότητα και τη δυνατότητα δημιουργίας συμβολογραφήματος από αυτές. Οι εικόνες έχουν διατεθεί από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία διαστήματος (ESA-European Space Agency) και τα στοιχεία τους παρατίθενται στον Πίνακα 5:

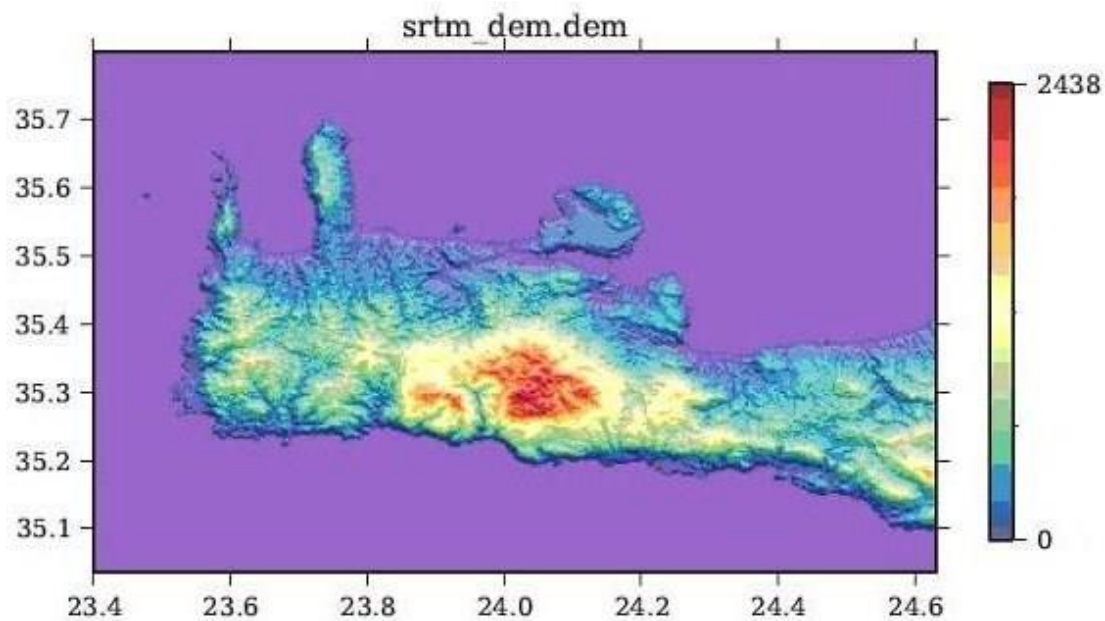
Πίνακας 5 : Στοιχεία εικόνων

<b>Τροχιά</b>	<b>15578</b>	<b>17081</b>
<b>Δορυφόρος</b>	ERS-2	ERS-2
<b>Τύπος</b>	RAW	RAW
<b>Format</b>	CEOS	CEOS
<b>Κατεύθυνση</b>	Κατιούσα	Κατιούσα
<b>Ημερομηνία λήψης</b>	13 Απριλίου 1998	27 Ιουλίου 1998
<b>Ώρα λήψης</b>	9:04	9:04
<b>Αριθμός γραμμών</b>	28371	28371
<b>Αριθμός εικονοστοιχείων ανά γραμμή</b>	5616	5616

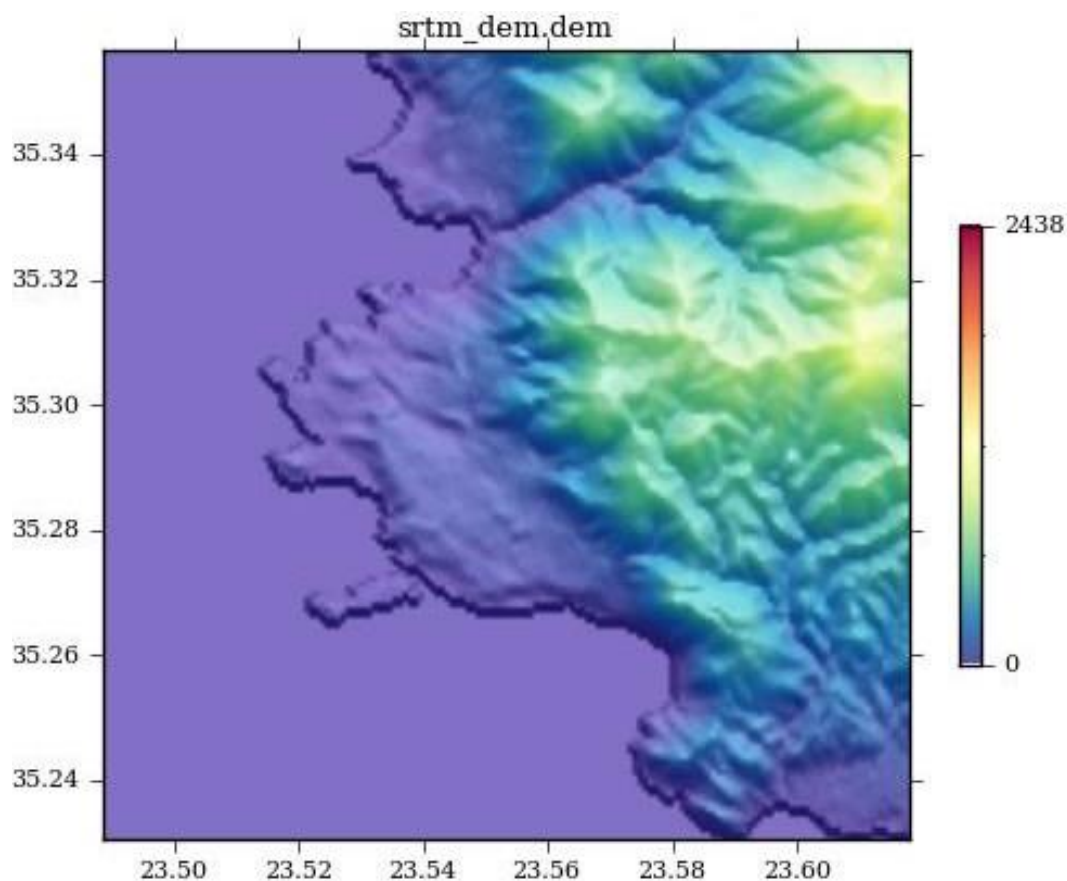
Το DEM που χρησιμοποιείται προέρχεται από την αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) της NASA, που έλαβε χώρα το 2000. Τα στοιχεία του δίνονται στον Πίνακα 6 [Smith,Sandwell,2003. Global Land Cover Facility. CGIAR-CSI] :

Πίνακας 6 : Στοιχεία DEM

<b>Χωρική ανάλυση</b>	90m
<b>Συσχετισμένο ελλειψοειδές</b>	WGS84
<b>Υψόμετρα</b>	Από ελλειψοειδές
<b>Σύστημα συντεταγμένων</b>	Γεωγραφικό
<b>Τετμημένη x πρώτου σημείου</b>	23.3991669999
<b>Τεταγμένη y πρώτου σημείου</b>	35.79999999
<b>Προβολή</b>	LATLON
<b>Απόλυτο σφάλμα (Ευρώπη-Ασία)</b>	6,2m
<b>Απόλυτη υψομετρική ακρίβεια</b>	16m
<b>Απόλυτη οριζόντια ακρίβεια</b>	20m



Εικόνα 18 : DEM της ευρύτερης περιοχής



Εικόνα 19 : DEM της περιοχής μελέτης

### 3.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

#### 3.5.1 Έλεγχος διαδικασιών

Η κύρια εντολή που χρησιμοποιείται στο ROI\_PAC είναι η **process\_2pass.pl**. Η διαδικασία ξεκινά από τα raw δεδομένα και καταλήγει στους χάρτες παραμόρφωσης εδάφους. Η εντολή αυτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπει επί μέρους επεξεργασία των δεδομένων. Άρα αν ένα συγκεκριμένο μέρος της διαδικασίας αποτύχει ή διακοπεί, η επεξεργασία μπορεί να επανεκκινηθεί από εκεί που είχε μείνει, μετά τη διόρθωση του προβλήματος. Η process\_2pass.pl καλεί πολλές άλλες υπορουτίνες οι οποίες αποτελούν τα ενδιάμεσα στάδια της επεξεργασίας και θα περιγραφούν παρακάτω. Ο τρόπος σύνταξης των υπορουτινών βρίσκεται στο Παράρτημα1.



### 3.5.2 Ρυθμίσεις των raw δεδομένων

Το λογισμικό ROI\_PAC απαιτεί τη χρήση δεδομένων ραντάρ σε format raw τα οποία υφίστανται την επεξεργασία παράλληλα. Για να προετοιμαστούν τα δεδομένα raw για τη διαδικασία διαμόρφωσης της εικόνας πρέπει μελετηθούν τα παρακάτω :

α) Format των δεδομένων. Συνήθως είναι σε CEOS format που περιλαμβάνει πληροφορίες για το μέγεθος του αρχείου, το υψόμετρο και την ταχύτητα του δορυφόρου, τις συντεταγμένες της περιοχής που απεικονίζεται, και την ημερομηνία και ώρα της λήψης της εικόνας.

β) Διόρθωση χαμένης γραμμής (missing line correction). Σε περίπτωση που υπάρχει κάποια γραμμή στην εικόνα, η οποία δεν περιλαμβάνει δεδομένα, τότε αντιγράφεται η προηγούμενη γραμμή και τοποθετείται στη θέση της χαμένης. Αυτό γίνεται για να μπορέσει να εγγραφεί η μία εικόνα στην άλλη.

γ) Παράμετροι ραντάρ. Οι παράμετροι που πρέπει να είναι γνωστοί, είναι η συχνότητα του παλμού και το μήκος κύματός του. Στον πίνακα 7 αναφέρονται οι παράμετροι ραντάρ για τον ERS.

pulse repetition interval, $t_{PRI}$	595.27 $\mu$ s
pulse repetition frequency, $f_{PRF}$	1679.9 Hz
sampling frequency, $f_s$	18.962 MHz
pulse length, $p$	37.12 $\mu$ s
chirp slope, $K$	418.91 GHz/s
wavelength,	5.6666 cm
carrier frequency, $f_c$	5.29 GHz
bandwidth, $f_{BW}$	15.55 MHz

Πίνακας 7 : παράμετροι ραντάρ του ERS (Buckley, 2000)

Παραγόμενα δεδομένα :

- 'date'.raw = raw δεδομένα στο format του ROI\_PAC
- 'date'.raw.rsc = metadata για τα raw δεδομένα

hdr\_data\_points\_'date'.rsc = δεδομένα τροχιάς

### 3.5.3 Μετατροπή raw εικόνας σε SLC (focusing)

Η μετατροπή των εικόνων από raw σε SLC είναι μια απαραίτητη διαδικασία. Λόγω της χρήσης του Doppler για τη δημιουργία μεγάλου μήκους κεραίας, διαβιβάζονται διαδοχικοί παλμοί από το RADAR προς κάθε στόχο, με αποτέλεσμα το σήμα που λαμβάνεται από αυτόν, να είναι διασκορπισμένο κατά μήκος της γραμμής πτήσης. Αυτό επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας raw, με επακόλουθο να εμφανίζεται θολή. Η μετατροπή της εικόνας, έχει ως σκοπό να συλλέξει το σήμα μιας περιοχής, που είναι διασκορπισμένο σε πολλά εικονοστοιχεία της εικόνας raw, σε ένα μοναδικό εικονοστοιχείο της εικόνας SLC.

Για να γίνει η εκτέλεση αυτής της διαδικασίας πρέπει η εικόνα να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα (patches). Για κάθε ένα από αυτά τα παράθυρα θα υπάρχουν κάποιες γραμμές στην αρχή και στο τέλος όπου δε θα εμφανίζεται όλο το εύρος του Doppler. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί αν αλληλεπικαλυφθούν τα όμορα παράθυρα και σαν αποτέλεσμα, να δοθούν μόνο αυτές οι γραμμές οι οποίες εμφανίζουν όλο το εύρος του Doppler [Buckley,2000].

Παραγόμενα δεδομένα :

- 'date'.slc.rsc = metadata για την εικόνα SLC
- 'date'.slc = εικόνα SLC
- 'date1'\_'date2'\_baseline.rsc = άνυσμα βάσης

### 3.5.4 Multilooking

Οι εικόνες SLC (single look complex) χρησιμοποιούνται σαν βάση για τη δημιουργία των εικόνων MLI (multi-look images). Οι MLI εικόνες δημιουργούνται από τις SLC χρησιμοποιώντας τον χωρικό μέσο. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των διάφορων

διαδοχικών εικονοστοιχείων μίας εικόνας SLC στην απόσταση και στη διεύθυνση τροχιάς. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται multilooking. Ο αριθμός των looks μίας εικόνας MLI αντιστοιχεί στον μέσο όρο των εικονοστοιχείων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ERS, το 1 x 5 multilooking προκύπτει από τον μέσο όρο 5 εικονοστοιχείων κατά μήκος της γραμμής πτήσης και 1 εικονοστοιχείου εγκάρσια στη γραμμή πτήσης, για την απόκτηση ενός τελικού εικονοστοιχείου. Η τελική εικόνα MLI είναι 5-looks. Οι MLI εικόνες παρουσιάζουν λιγότερα στίγματα αλλά και μικρότερη ανάλυση, συγκρινόμενες με τις εικόνες SLC [Κουρκούλη,2008].

### 3.5.5 Εγγραφή εικόνας (coregistration)

Η διαδικασία εγγραφής αφορά τον υπολογισμό των μετατοπίσεων που έχουν η μία εικόνα ως προς την άλλη, τόσο κατά τη διεύθυνση της τροχιάς, όσο και κάθετα σε αυτήν. Εφόσον ο δορυφόρος δεν περνάει ακριβώς από την ίδια θέση, είναι αναμενόμενο η λήψη να μην αφορά ακριβώς την ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά να υπάρχει μία μικρή απόκλιση. Αυτές οι μετατοπίσεις πρέπει να ληφθούν υπόψιν, ώστε η master και η slave εικόνες να μην εγγραφούν λανθασμένα.

Για να υπολογιστούν αυτές οι μετατοπίσεις κατά μήκος της διεύθυνσης τροχιάς και κάθετα σε αυτή, ακολουθείται μία διαδικασία συσχέτισης μεταξύ των τιμών του εύρους στις δύο εικόνες. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, ο χρήστης μπορεί να εξαιρέσει από τις εικόνες, τις περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει καλή συσχέτιση.

Παραγόμενα δεδομένα :

- `date1'_'date2'_baseline.rsc` = άνυσμα βάσης και αρχικός υπολογισμός των μετατοπίσεων (offsets)
- `'date1'-'date2'_ampcor.gross.off.out` = αδρομερής βελτιωμένος υπολογισμός των αρχικών μετατοπίσεων

### 3.5.6 Δημιουργία συμβολογραφήματος

Η διαδικασία της δημιουργίας του συμβολογραφήματος είναι περίπλοκη λόγω της μεταβολής που υπάρχει ανάμεσα στις δύο εικόνες. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στο

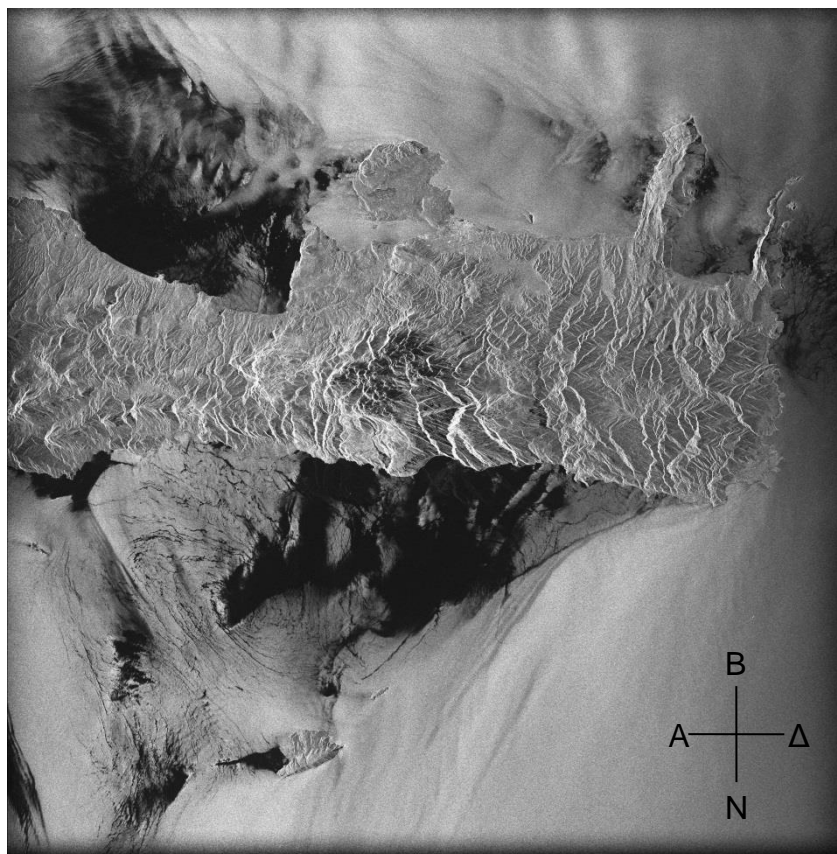
γεγονός ότι οι δύο εικόνες έχουν ληφθεί από διαφορετική οπτική γωνία. Κατά τη δημιουργία του συμβολογραφήματος, πολλοί στοιχειώδεις ανακλαστές εντός του ίδιου εικονοστοιχείου προκαλούν φαινόμενα στιγμάτων. Τα στίγματα μπορεί να αποφευχθούν αν εφαρμοστούν φίλτρα σε κάθε μία εικόνα, πριν από τη δημιουργία του συμβολογραφήματος [Gatelli et al., 1994].

Το συμβολογράφημα δημιουργείται με τον πολλαπλασιασμό κάθε εικονοστοιχείου της μίας εικόνας με το συζυγή αριθμό του αντίστοιχου εικονοστοιχείου της άλλης. Σε αυτό το σημείο, το συμβολογράφημα περιέχει την τοπογραφία και την παραμόρφωση του εδάφους. Όμως το σήμα που κυριαρχεί στο συμβολογράφημα, προέρχεται από την καμπυλότητα της Γης. Πριν να αφαιρεθεί αυτό το σήμα, πρέπει να καθοριστεί με ακρίβεια το άνωσμα βάσης.

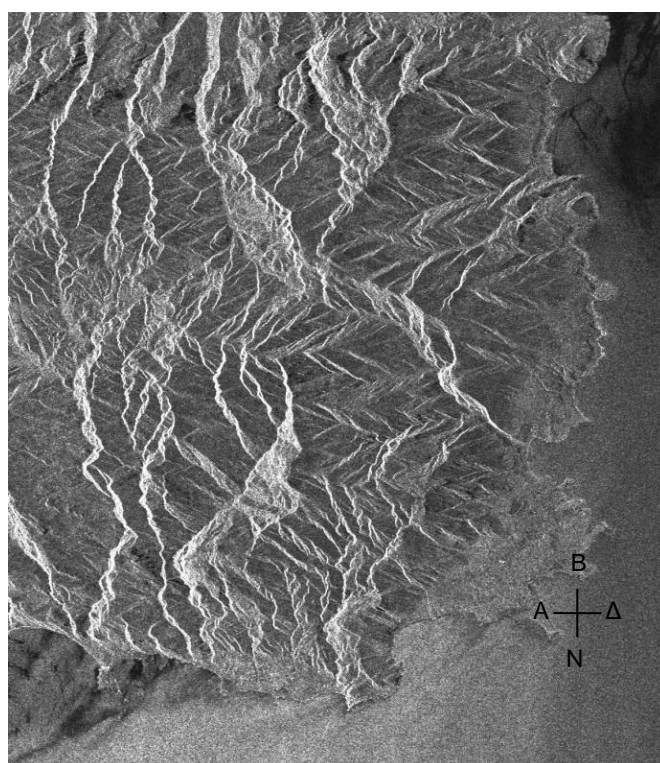
Παραγόμενα δεδομένα :

- 'date1'-'date2'.int = raw συμβολογράφημα που περιέχει τη συμβολή από όλα τα επιμέρους στοιχεία (τροχιές, τοπογραφία, ατμόσφαιρα κλπ)
- 'date1'-'date2'.amp = εύρος (amplitude)

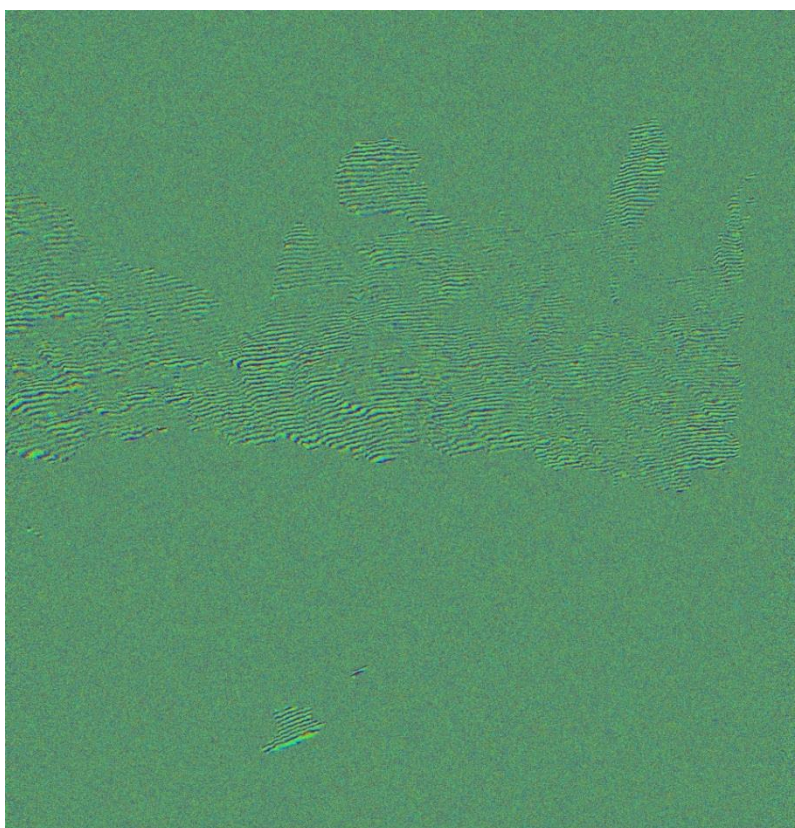
Για την περιοχή ενδιαφέροντος, προέκυψαν δύο εικόνες. Η πρώτη, είναι μία εικόνα που περιλαμβάνει μόνο τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, και ονομάζεται εικόνα εύρους. Η εικόνα εύρους μοιάζει με φωτογραφική απεικόνιση, η οποία έχει τις γεωμετρικές παραμορφώσεις του ραντάρ (π.χ. αναστροφή, σκίαση) (Εικόνες 20-21). Η δεύτερη εικόνα που κατασκευάστηκε, είναι το αρχικό (raw) συμβολογράφημα (Εικόνες 22-23). Το raw συμβολογράφημα αποτελείται από πολλούς κροσσούς συμβολής, και δεν δίνει κάποια ουσιαστική πληροφορία.



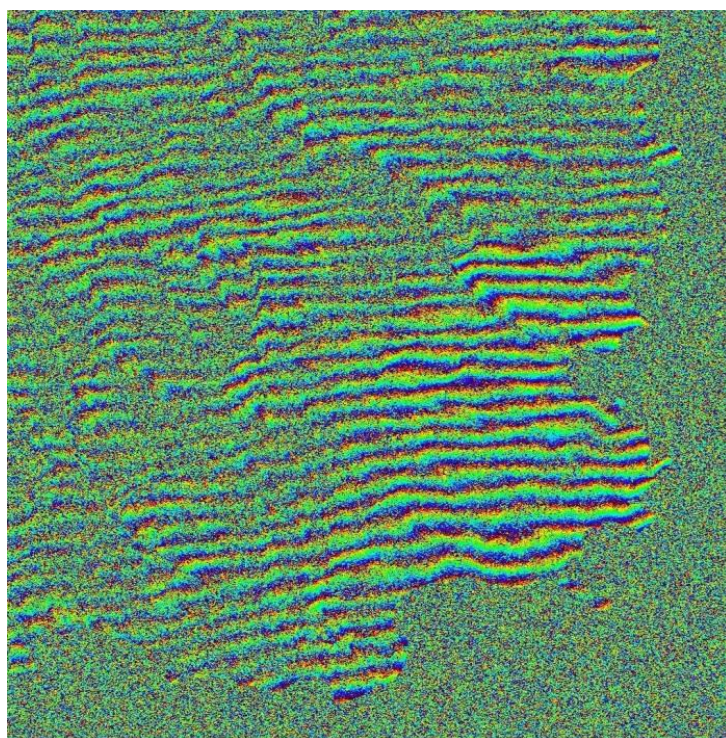
Εικόνα 20 : Εικόνα εύρους του νομού Χανίων (ανεστραμμένη λόγω της γεωμετρίας του RADAR)



Εικόνα 21 : Εικόνα εύρους της περιοχής της Χρυσосκαλίτισσας



Εικόνα 22 : Raw συμβολογράφημα του νομού Χανίων



Εικόνα 23 : Raw συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσοσκαλίτισσας



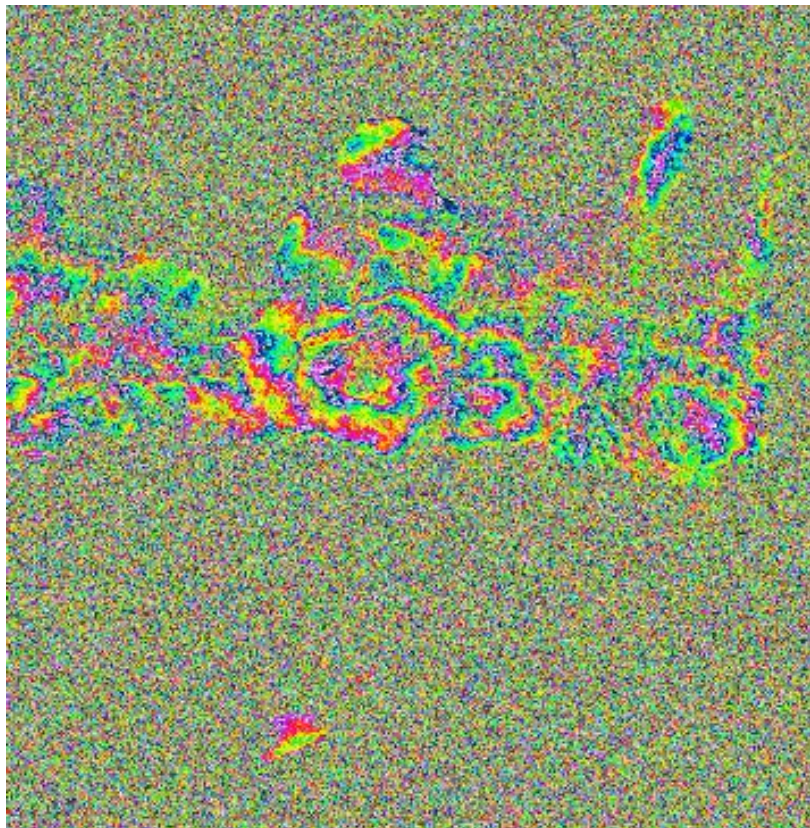
### 3.5.7 Εξομάλυνση συμβολογραφήματος

Στο raw συμβολογράφημα, κυριαρχεί το σήμα το οποίο προέρχεται από την καμπυλότητα της Γης, το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί. Αυτό γίνεται με τη διαδικασία της εξομάλυνσης, όπου ένας πολύ μεγάλος αριθμός κροσσών, απαλείφεται. Μετά από την εξομάλυνση, το συμβολογράφημα, ακόμα αποτελείται από αρκετούς κροσσούς συμβολής, και εξακολουθεί να μην μπορεί να δώσει αρκετές πληροφορίες.

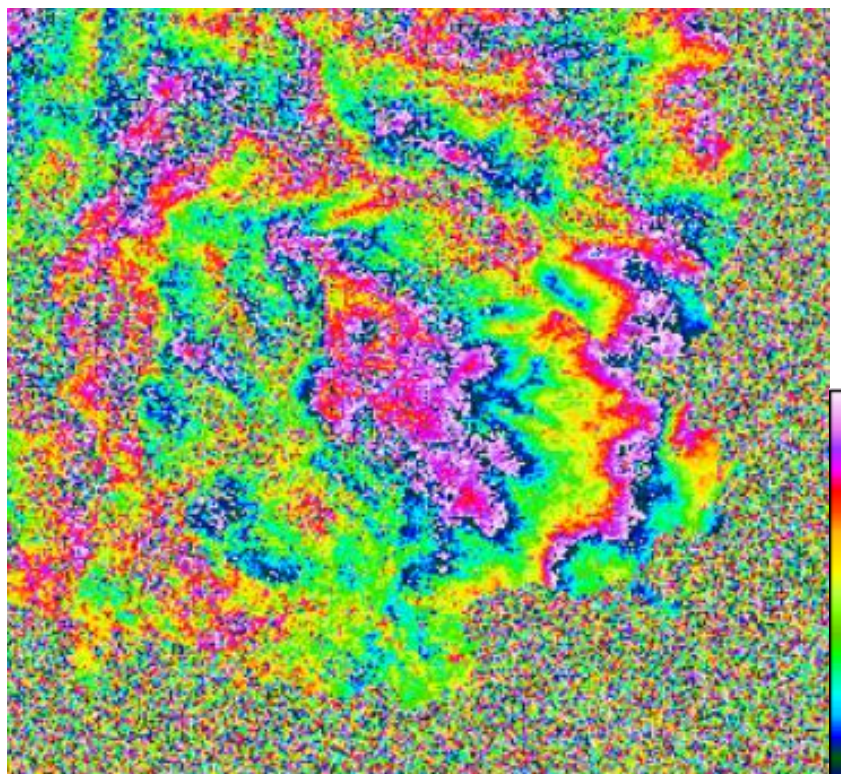
Παραγόμενα δεδομένα :

- flat\_OrbitType\_date1-date2.int = εξομαλυμένο συμβολογράφημα
- ramp\_OrbitType\_4rlks.unw και ramp\_OrbitType.unw = περιέχουν τη φάση που αφαιρέθηκε λόγω τροχιάς, και το άνυσμα βάσης μεταβάλλεται θεωρώντας μηδενική τοπογραφία

Η διαδικασία της εξομάλυνσης του συμβολογραφήματος της περιοχή μελέτης, έδωσε το παρακάτω αποτέλεσμα :



Εικόνα 24 : Εξομαλυμένο συμβολογράφημα του νομού Χανίων



Εικόνα 25 : Εξομαλυμένο συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσосκαλίτισσας

Μετά την εξομάλυνση του συμβολογραφήματος ενδέχεται να εμφανιστούν παράλληλοι κροσσοί συμβολής ως προς διάφορες διευθύνσεις, συνήθως λόγω παρεκκλίσεων του ανύσματος βάσης. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να υπολογιστεί ο ρυθμός μεταβολής των τιμών της φάσης (phase gradient) τόσο ως προς τη διεύθυνση πτήσης όσο και ως προς την κεκλιμένη απόσταση και να απαλειφθεί από το συμβολογράφημα. Οι τροχιές υπολογίζονται εκ νέου.

### 3.5.8 Καθορισμός της συσχέτισης

Το εύρος των τιμών φάσης σχετίζεται με τον συντελεστή συσχέτισης,  $\gamma$  (Σχέση 25). Όταν υπάρχουν πηγές θορύβου, ο συντελεστής συσχέτισης γίνεται μικρότερος από την τιμή 1, και προκαλείται αποσυσχέτιση. Ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως τυχαίες διακυμάνσεις του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος του RADAR. Αυτό οδηγεί στο να θεωρηθούν τα σήματα των εικόνων master  $S_1$  και slave  $S_2$  ως τυχαίες διαδικασίες. Η συνοχή  $\gamma$  των  $S_1$  και  $S_2$  μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως [Ziemer and Tranter, 1995 ; Hagberg et al, 1995] :



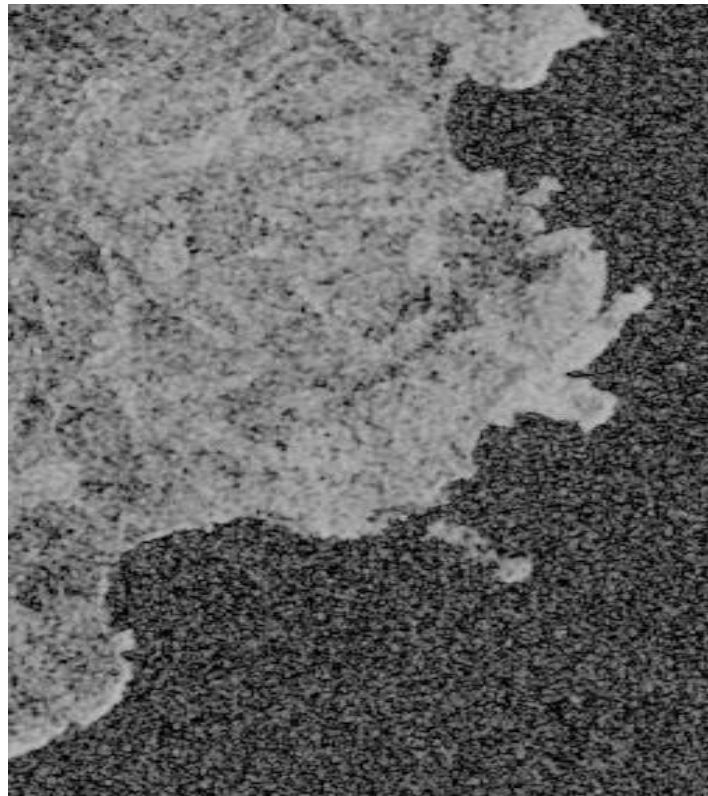
$$\gamma = \frac{S_1 S_2^*}{\sqrt{(S_1 S_1^*)(S_2 S_2^*)}} \quad (25)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης  $\gamma$  είναι το εύρος της συνοχής. Με άλλα λόγια, η συνάφεια μπορεί να καθοριστεί από ένα χωρικό μέσο όρο, για μία συγκεκριμένη στιγμή. Υπολογιστικά, ο συντελεστής συσχέτισης για ένα δεδομένο εικονοστοιχείο, εκτιμάται ως ένας σταθμισμένος χωρικός μέσος σε ένα παράθυρο διάστασης  $N \times N$  εικονοστοιχείων [Hagberg et al, 1995 ; Rosen et al, 1996].

Όσο μειώνεται ο συντελεστής συσχέτισης, τόσο αυξάνεται η τυπική απόκλιση των τιμών φάσης. Όταν η τυπική απόκλιση των τιμών φάσης είναι υψηλή, γίνεται πιο περίπλοκη η διαδικασία αποκατάστασης της συμβολομετρικής φάσης, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε σφάλματα στην αποκατεστημένη φάση. Μία προσέγγιση για να μειωθούν τα σφάλματα είναι να αποκατασταθεί η φάση μόνο στα εικονοστοιχεία στα οποία η συσχέτιση βρίσκεται πάνω από ένα δεδομένο κατώφλι. Μία άλλη προσέγγιση είναι να εφαρμοστούν φίλτρα στο συμβολογράφημα.

Παραγόμενα δεδομένα :

- 'date1'-'date2'.cor = μέσος όρος του εύρους των δύο εικόνων και συσχέτιση (Εικόνα 26)



Εικόνα 26 : Χάρτης συνάφειας της περιοχής μελέτης

### 3.5.9 Απαλοιφή τοπογραφίας

Το ROI\_PAC αρχικά εγγράφει το DEM, αφού πρώτα προβληθεί η γεωμετρία του στο σύστημα γεωμετρίας του ραντάρ, μέσω γεωμετρικής προσομοίωσης. Μετά την προβολή του DEM σε συντεταγμένες ραντάρ, εγγράφεται στο συμβολογράφημα, και μπορεί πλέον να αφαιρεθεί η τοπογραφία.

Παραγόμενα δεδομένα :

- SIM\_raw.hgt = εύρος (amplitude) και υψόμετρο (height) σε γεωμετρία ραντάρ
- SIM\_4rlks.hgt και SIM\_4rlks.hgt = εύρος και υψόμετρο μετά από παρεμβολή στην προσομοίωση
- cul.out = παράμετροι αφινικού μετασχηματισμού
- 'date1'-'date2'\_Rlooks\_sim\_SIM.aff = αποτέλεσμα αφινικού μετασχηματισμού

### 3.5.10 Μη γραμμικό προσαρμοζόμενο φιλτράρισμα συμβολογραφήματος

Σε μία εικόνα RADAR, η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία που καταγράφεται, προκύπτει από το σύνολο των επιμέρους ανακλαστών μέσα σε κάθε εικονοστοιχείο. Το συμβολομετρικό φάσμα αποτελείται από στενές ζώνες σήματος και φαρδιές ζώνες θορύβου [Fielding, 2009]. Το ROI\_PAC φιλτράρει το συμβολομετρικό φάσμα χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο σχεδιασμένο από τους Goldstein και Werner (1998), έτσι ώστε να αυξηθεί η αναλογία του σήματος προς το θόρυβο [Fielding, 2009].

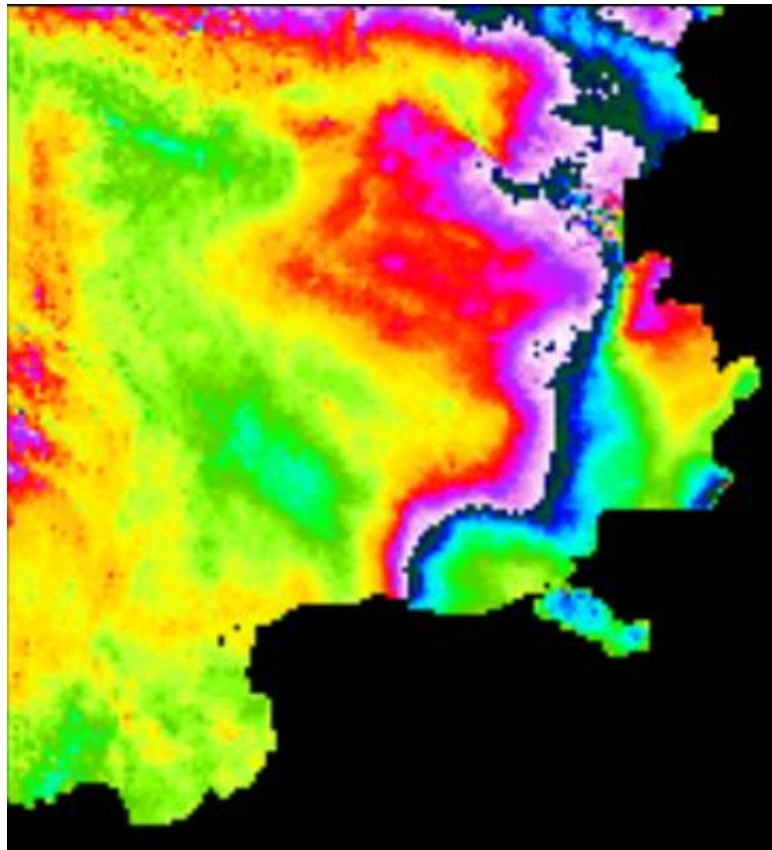
Παραγόμενα δεδομένα :

- filt\_'date1'-'date2'-sim\_'OrbitType'\_Rlooks\_unw.rlks.int = φιλτραρισμένο συμβολογράφημα
- phase\_var\_PRC\_4rlks.msk = συνάφεια, μετά από εφαρμογή κατωφλίου διακύμανσης
- low\_cor\_PRC\_4rlks.msk = αποτέλεσμα φιλτραρίσματος με επιλογή και αποκοπή ορισμένων μηκών κύματος (masking)

Σε αυτή τη φάση γίνεται η απαλοιφή της τοπογραφίας από το συμβολογράφημα της περιοχής μελέτης, ώστε να μην υπάρχει συμβολή από αυτήν στις τιμές φάσης. Η τοπογραφία είναι σημαντικός παράγοντας εμφάνισης κροσσών συμβολής, και πρέπει

να αφαιρεθεί. Η διαδικασία απαλοιφής της τοπογραφίας, γίνεται με τη βοήθεια του DEM από όπου αντλούνται πληροφορίες για τα υψόμετρα της περιοχής.

Κατόπιν γίνεται το φιλτράρισμα του παραγόμενου συμβολογραφήματος προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος, και να αυξηθεί η αναλογία της έντασης του σήματος προς την ένταση του θορύβου. Το συμβολογράφημα που προέκυψε είναι το παρακάτω :



Εικόνα 27 : Συμβολογράφημα της περιοχής της Χρυσosκαλίτισσας όπου έχει αφαιρεθεί η τοπογραφία και έχει εφαρμοστεί φίλτρο

### **3.5.11 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης και καθορισμός απόλυτης φάσης**

Στη συμβολομετρία, η απόλυτη φάση (absolute phase) είναι αυτή που σχετίζεται άμεσα με την τοπογραφία και τις παραμορφώσεις του εδάφους. Όμως η απόλυτη φάση αντιπροσωπεύει την μετρούμενη φάση στην οποία έχει προστεθεί το κατάλληλο πολλαπλάσιο του  $2\pi$ . Αυτό το πολλαπλάσιο του  $2\pi$  που πρέπει να προστεθεί σε κάθε τιμή φάσης, βρίσκεται μέσω της διαδικασίας της αποκατάστασης

φάσης. Για να μετατραπεί η μετρούμενη φάση σε απόλυτη, πρέπει να ακολουθηθεί μία διαδικασία δύο βημάτων :

- 1) αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης
- 2) καθορισμός απόλυτης φάσης [S.Buckley, 2000]

Οι σχέσεις που συνδέουν τη μετρούμενη φάση  $\varphi_{\text{measured}}$ , την αποκατεστημένη φάση  $\varphi_{\text{unwrapped}}$ , και την απόλυτη φάση  $\varphi_{\text{absolute}}$  είναι οι παρακάτω:

$$\varphi_{\text{measured}} = \text{mod}(\varphi_{\text{absolute}} 2\pi) \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{absolute}} = \varphi_{\text{unwrapped}} + \varphi_{\text{offset}} \quad (13)$$

Το  $\varphi_{\text{offset}}$  μπορεί να καθοριστεί με δύο τρόπους :

- 1) Σημείο αναφοράς στο έδαφος στο οποίο έχει εγκατασταθεί σταθμός GPS, έτσι ώστε να είναι γνωστές οι συντεταγμένες και το υψόμετρο
- 2) Σημείο που επιλέγεται στην εικόνα ως σημείο αναφοράς, σε περιοχές που δεν αναμένεται παραμόρφωση. Σε αυτή την περίπτωση, όλες οι μετρήσεις μετατοπίσεων γίνονται σε σχέση με το υψόμετρο αυτού του σημείου.

#### 3.5.11.1 Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή, για την αποκατάσταση της φάσης στη συμβολομετρία RADAR : αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων, και αλγόριθμοι βασισμένοι στα κατάλοιπα φάσης. Οι αλγόριθμοι διαφέρουν μεταξύ τους στο πόσο προσαρμοσμένες είναι οι ασυνέχειες της πραγματικής φάσης (εξαιτίας θορύβου, αναστροφής κλπ). Οι αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων ενσωματώνουν τον ρυθμό μεταβολής της φάσης εφαρμόζοντας περιορισμούς στη συνέχεια και την ομαλότητα στην φάση. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στα κατάλοιπα, θέτουν όρια στην πορεία της ένταξης αναγνωρίζοντας και συνδέοντας ασυνέχειες φάσης που ονομάζονται κατάλοιπα φάσης (residues) [Zebker and Lu, 1997].

#### 3.5.11.2 Καθορισμός απόλυτης φάσης

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τον καθορισμό της απόλυτης φάσης. Οι δύο πιο σημαντικές είναι : η φασματική προσέγγιση (spectral approach), και η προσέγγιση σημείου ελέγχου του εδάφους (ground control point approach).

Η φασματική προσέγγιση διαιρεί το πλήρες εύρος, με κεντρική συχνότητα  $f$ , σε υψηλότερες και χαμηλότερες ζώνες, με κεντρικές συχνότητες  $f_{\text{upper}}$  και  $f_{\text{lower}}$ . Στη

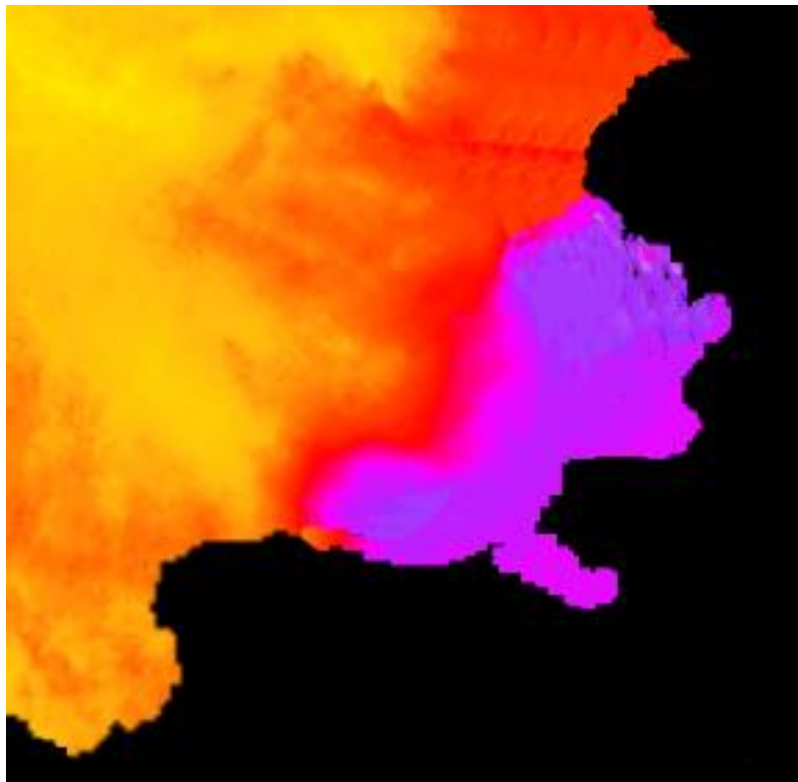
συνέχεια υπολογίζονται τα δύο, χαμηλότερης ανάλυσης, συμβολογράφηματα για τις  $f_{upper}$  και  $f_{lower}$  και συνδυάζονται για να κατασκευαστεί το διαφορικό συμβολογράφημα [Madsen and Zebker, 1992 ; Madsen, Zebker and Martin, 1993].

Η προσέγγιση σημείου ελέγχου του εδάφους χρησιμοποιεί τη μη αποκατεστημένη φάση και τις μετρήσεις του υψομέτρου της επιφάνειας του εδάφους σε γνωστές θέσεις.

Παραγόμενα δεδομένα :

- `filt_'date1'_'date1'_sim_'OrbitType'_'Rlooks'_unw_c'UnwrappedThreshold'`  
.unw = αποκατεστημένη φάση
- `filt_'date1'-'date2'-'sim'_'OrbitType'_'Rlooks_unw'.rlks_cut.flg` = κατάλοιπα φάσης

Στο συμβολογράφημα της περιοχής ενδιαφέροντος όπου έγινε η απαλοιφή της τοπογραφίας και το φιλτράρισμα, γίνεται η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης και η μετατροπή της σε απόλυτη φάση χρησιμοποιώντας τη φασματική προσέγγιση. Το αποτέλεσμα, είναι ένα συμβολογράφημα που περιλαμβάνει μόνο τις απόλυτες τιμές φάσης (Εικόνα 28).



Εικόνα 28 : Αποκατεστημένη φάση της περιοχής της Χρυσοσκαλίτισσας

### 3.5.12 Καθορισμός κάθετου ανύσματος βάσης (perpendicular baseline)

Το άνυσμα βάσης είναι η διαφορά της απόστασης μεταξύ των δύο κεραιών λήψης εικόνων. Ο καθορισμός, ο υπολογισμός και η εφαρμογή του ανύσματος βάσης, είναι από τα πιο σημαντικά ζητήματα στη συμβολομετρία RADAR. Ο βαθμός στον οποίο συμβάλλει η τοπογραφία του εδάφους στις τιμές φάσης, εξαρτάται από το άνυσμα βάσης. Συνεπώς, ένα σφάλμα σε αυτό, θα προκαλέσει πλασματικούς κροσσούς συμβολής σε ένα διαφορικό συμβολογράφημα. Επιπροσθέτως, τα σφάλματα στο άνυσμα βάσης, οδηγούν και σε σφάλματα στη διαδικασία αναπαράστασης των υψομέτρων [Rosen P. et al].

Παραγόμενα δεδομένα :

- 'date1'-'date2'\_baseline.rsc = επανακαθορισμένο άνυσμα βάσης

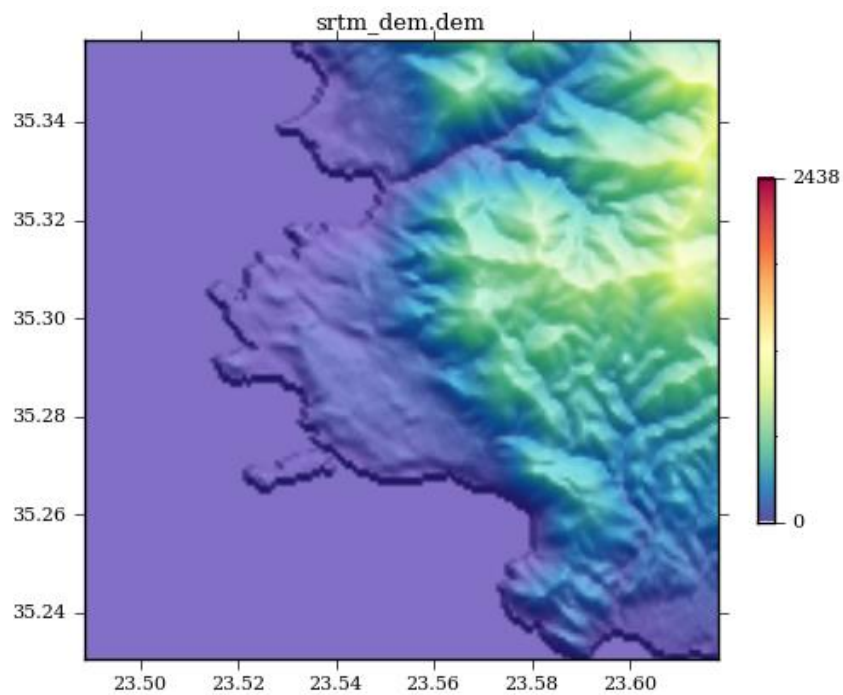
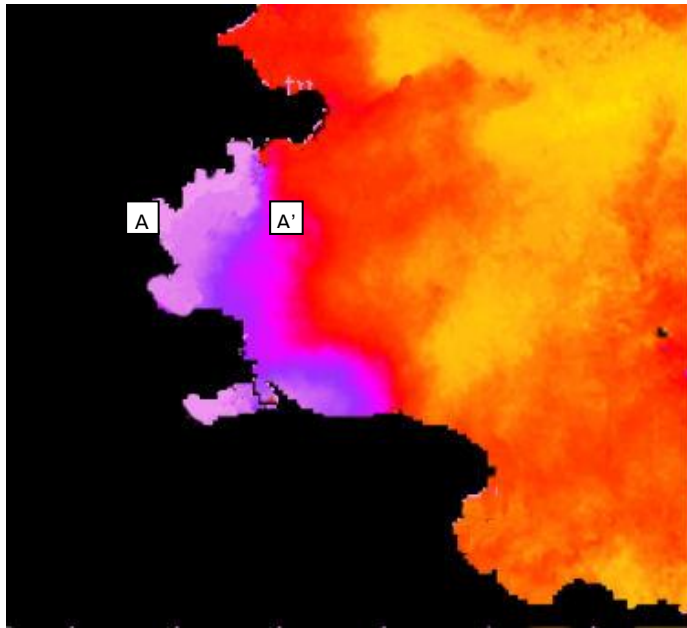
### 3.5.13 Γεωμετρική διόρθωση (geocoding)

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει τη γεωμετρική διόρθωση των δεδομένων προσδιορίζοντας τις παραμέτρους μετασχηματισμού μεταξύ της γεωμετρίας RADAR και ενός επιλεγμένου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η προβολή των αποτελεσμάτων σε οποιοδήποτε υπόβαθρο (π.χ. χάρτες, δορυφορικές εικόνες) για περεταίρω ερμηνεία [Παρχαρίδης, 2009].

Παραγόμενα δεδομένα :

- geo\_'date1'-'date2'\_unw = γεωμετρικώς διορθωμένο συμβολογράφημα

Μετά τη γεωμετρική διόρθωση των δεδομένων που έχουν προκύψει για την περιοχή μελέτης, μετασχηματίζεται η εικόνα από τη γεωμετρία RADAR, στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του DEM. Το τελικό αποτέλεσμα είναι το ακόλουθο :



Εικόνα 29 :

Επάνω : Γεωμετρικώς διορθωμένα δεδομένα της περιοχής της Χρυσосκαλίτισσας

Κάτω : DEM της περιοχής της Χρυσосκαλίτισσας



22,6 m

-10,9 m

Εικόνα 30 : Χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για το γεωμετρικώς διορθωμένο συμβολογράφημα

Στο συμβολογράφημα, κάθε ακολουθία χρωμάτων από το σκούρο μπλε στο ανοικτό μοβ αναπαριστά έναν κροσσό συμβολής. Άρα μετρώντας τις εναλλαγές των χρωμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος, μπορεί να υπολογιστεί η παραμόρφωση. Η παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση παρατήρησης, μεταξύ των σημείων A και A' είναι 8mm. Παρατηρώντας τη διάταξη των χρωμάτων, διαφαίνεται αν η μετατόπιση είναι ανύψωση (κατεύθυνση μείωσης τιμής φάσης) ή καθίζηση (κατεύθυνση αύξησης τιμής φάσης) κατά τη διεύθυνση παρατήρησης (Line-Of-Sight). Η διάταξη των χρωμάτων στη συγκεκριμένη περίπτωση καταδεικνύει ότι πρόκειται για καθίζηση του σημείου A σε σχέση με το σημείο A'.

Συγκρίνοντας οπτικά το DEM με το γεωμετρικώς διορθωμένο συμβολογράφημα, φαίνεται ότι οι κροσσοί συμβολής ακολουθούν την τοπογραφία.

### **3.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ**

#### **3.6.1 Παράγοντες δημιουργίας κροσσών**

##### **3.6.1.1 Υψόμετρο αμφισημίας $h_a$**

Το υψόμετρο αμφισημίας, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σημαντικός παράγοντας στην επεξεργασία εικόνων συμβολομετρίας διότι καθορίζει τη συνεισφορά της τοπογραφίας στην εμφάνιση των κροσσών συμβολής.

Το υψόμετρο αμφισημίας στο ζευγάρι εικόνων που μελετήθηκε είναι 1088m. Δεδομένου ότι οι τιμές του υψομέτρου στην περιοχή κυμαίνονται μεταξύ 200-300m, αυτό το υψόμετρο αμφισημίας είναι αρκετά υψηλό έτσι ώστε η επίδραση της τοπογραφίας να θεωρείται αμελητέα.



### **3.6.1.2 Παραμόρφωση εδάφους λόγω ανύψωσης**

Η ευρύτερη περιοχή της Χρυσосκαλίτισσας παρουσιάζει ανύψωση, της τάξεως των πέντε χιλιοστών ανά έτος. Αυτή η μετατόπιση, προκαλεί την εμφάνιση κροσσών συμβολής όταν υπάρχει χρονική απόσταση μεταξύ των δύο λήψεων, τουλάχιστον ενός έτους. Οι εικόνες έχουν χρονική διαφορά λήψης περίπου τριών μηνών. Σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα, η αναμενόμενη παραμόρφωση δε θα μπορούσε να ανιχνευτεί διότι βρίσκεται στα όρια ανίχνευσης της συμβολομετρίας. Άρα δεν προβλέπεται να εμφανιστούν

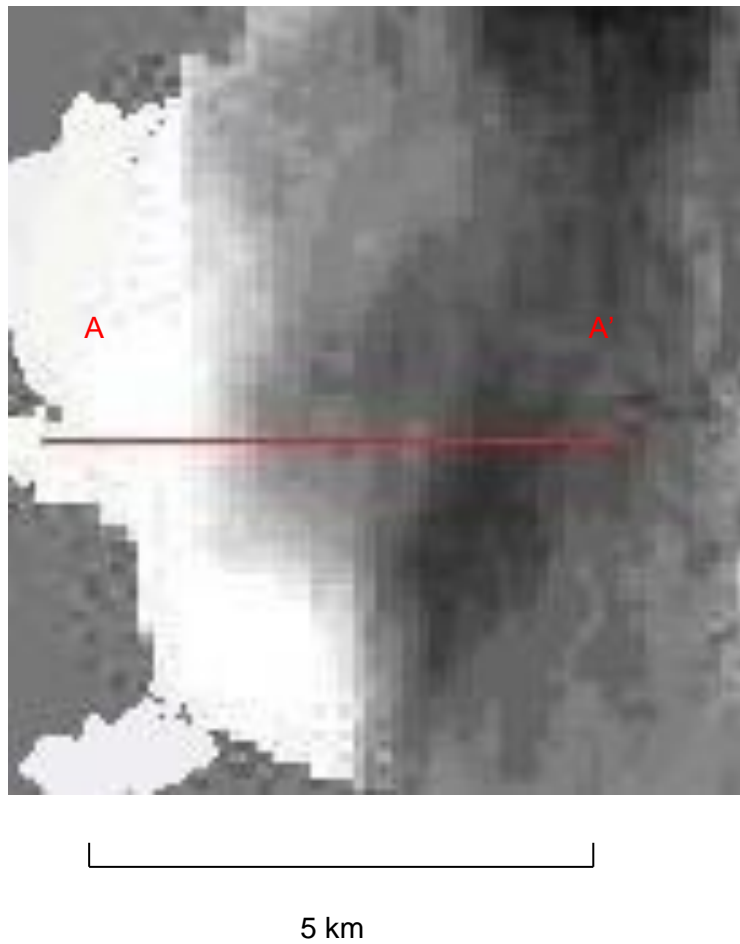
### **3.6.1.3 Παραμόρφωση εδάφους λόγω τεκτονικής δραστηριότητας**

Στην περιοχή της Χρυσосκαλίτισσας, (σε περιοχή 10km x 10km) δεν παρατηρήθηκε καθόλου τεκτονική δραστηριότητα στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ των δύο λήψεων. Άρα αποκλείεται το ενδεχόμενο να υπήρξε τεκτονική παραμόρφωση του φλοιού της Γης, στην περιοχή.

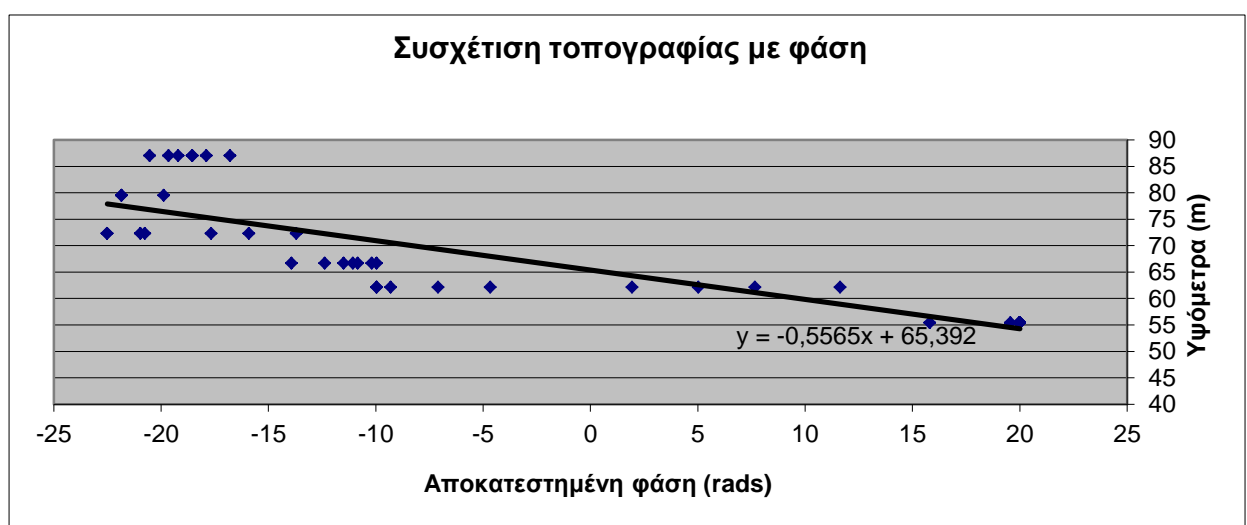
### **3.6.1.4 Ατμόσφαιρα**

Η διαφορετική ατμοσφαιρική υγρασία, θερμοκρασία, και πίεση μεταξύ των δύο λήψεων, έχει ορατή επίδραση στην συμβολομετρική φάση. Η επίδραση της ατμόσφαιρας ενδέχεται να προκαλέσει επιβράδυνση της ταχύτητας των μικροκυμάτων. Αυτή η επιβράδυνση αυξάνει τον ακέραιο αριθμό κύκλων φάσης άνισα για κάθε απεικόνιση. Έτσι, τελικά δημιουργούνται πλασματικοί κροσσοί λόγω ατμόσφαιρας (atmospheric artifacts).

Στο γεωμετρικώς διορθωμένο συμβολογράφημα (Εικόνα 29), είναι ορατό το γεγονός ότι οι κροσσοί ακολουθούν την τοπογραφία. Για να μελετηθεί περεταίρω αυτό το ενδεχόμενο, έγινε συσχέτιση της τοπογραφίας με τη φάση, κατά μήκος της τομής A-A' (Εικόνα 31).



Εικόνα 31 : Τομή A-A'



Σχήμα 19 : Συσχέτιση τοπογραφίας με φάση κατά μήκος της τομής A-A'.

Από το διάγραμμα συσχέτισης της τοπογραφίας με τη φάση κατά μήκος της τομής A-A' (Σχήμα 19), φαίνεται ότι υπάρχει σαφής συσχέτιση, η οποία ακολουθεί μία γραμμή τάσης. Αυτό σημαίνει ότι οι κροσσοί συμβολής που παρατηρήθηκαν στο τελικό συμβολογράφημα είναι αποτέλεσμα της συμβολής της ατμόσφαιρας και δεν πρόκειται για πραγματική παραμόρφωση.

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Από την επεξεργασία των διαθέσιμων εικόνων SAR, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ROI\_PAC, παρουσιάστηκε ότι υπάρχει μία μετατόπιση στην περιοχή. Το ζευγάρι των εικόνων που μελετήθηκαν έχουν χρονική διαφορά τριών μηνών. Η αναμενόμενη ανύψωση της περιοχής είναι της τάξεως των 5mm ανά έτος, αλλά η παραμόρφωση που εμφανίζεται να υπάρχει στην περιοχή, μεταξύ των δύο σημείων στα οποία έγινε σύγκριση, είναι καθίζηση μεγέθους 8mm.

Ως εκ τούτου, έγινε μελέτη των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν την εμφάνιση κροσσών συμβολής. Το υψόμετρο αμφοσημίας είναι υψηλό έτσι ώστε μπορεί να αποκλειστεί η συμβολή της τοπογραφίας, καθώς επίσης αποκλείστηκαν και άλλοι παράγοντες που στη δεδομένη περίπτωση δεν ισχύουν (π.χ. παραμορφώσεις λόγω σεισμικής δραστηριότητας). Έτσι, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η εμφανιζόμενη μετατόπιση είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ατμόσφαιρας, και δεν πρόκειται για πραγματική παραμόρφωση.

Η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να ποσοτικοποιηθεί. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, με τον όρο ατμόσφαιρα, περιλαμβάνονται διάφοροι παράγοντες. Η ατμοσφαιρική υγρασία επηρεάζει τη διάδοση της ακτινοβολίας, καθώς και τη διάχυσή της. Η στρωματοποίηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας και η ατμοσφαιρική πίεση, προκαλούν καθυστερήσεις στη διάδοση της ακτινοβολίας, συσχετισμένες με την τοπογραφία.

Η περιοχή μελέτης είναι παράκτια και έχει βουνά σε μικρή απόσταση (περίπου 3km). Αυτό προκαλεί τον εγκλωβισμό της υγρασίας, η οποία προέρχεται κυρίως από την εξάτμιση της θάλασσας και τους δυτικούς ανέμους. Έτσι, στην περιοχή υπάρχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας που εξαρτάται κυρίως από την εποχή και τις καιρικές συνθήκες.

Υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσης της επίδρασης της ατμόσφαιρας από το συμβολογράφημα, με τους παρακάτω τρόπους :

- Φιλτράρισμα χρονοσειρών (time series filtering)
- Συσχετισμός φάσης με τοπογραφία (correlation of phase with topography)
- Καθυστέρηση υγρασίας με χρονική και χωρική παρεμβολή (CGPS zenith wet delay interpolated spatially and temporally)
- Μετρήσεις ατμοσφαιρικής υγρασίας από την απορρόφηση των ανακλώμενων παλμών κοντά στο υπέρυθρο (water vapor measurements from absorption of reflected near IR)
- Μετρήσεις ατμοσφαιρικής υγρασίας από ραδιόμετρα που καταγράφουν στο θερμικό υπέρυθρο και στα μικροκύματα (water vapor measurements from thermal IR and microwave radiometers)
- Υπολογισμός ατμοσφαιρικής υγρασίας από αριθμητικά καιρικά μοντέλα (water vapor estimates from numerical weather models)

[Fielding E., Fishbein E., 2009]

Οι παραπάνω διορθώσεις μπορούν να γίνουν με τα μοντέλα διόρθωσης υγρασίας MERIS (ESA: Envisat – 2002) και MODIS (NASA: Terra – 2000, Aqua – 2002) καθώς επίσης και με τη διαδικτυακή υπηρεσία OSCAR – Online Services for Correcting Atmosphere in Radar (NASA – 2009) η οποία βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης, και θα τεθεί σε λειτουργία μέσα στα επόμενα δυο χρόνια.

Η εφαρμογή της συμβολομετρίας είναι αποτελεσματική, αρκεί να τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Αρχικά, χρειάζεται να είναι γνωστή η περιοχή μελέτης. Πρέπει να υπάρχει κάποια γενική ιδέα για το ποια είναι τα αναμενόμενα αποτελέσματα, η τάξη μεγέθους τους, καθώς και το χρονικό διάστημα στο οποίο εκδηλώνονται οι παραμορφώσεις. Οι εικόνες απαιτείται να επιλέγονται σε χρονική απόσταση ικανή να εμφανίσει την προβλεπόμενη παραμόρφωση, αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε να υπάρχει αποσυσχέτιση από άλλους παράγοντες. Επίσης η ποσότητα των ζευγαριών των εικόνων που πρόκειται να μελετηθούν, πρέπει να είναι επαρκής, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση και να μειωθούν τα σφάλματα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ελληνικές

- Καπαγερίδης Ι. (2010), Εισαγωγή στην τηλεπισκόπηση και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Σημειώσεις θεωρίας και εργαστηρίου, μαθήματος: «Εισαγωγή στην τηλεπισκόπηση και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών», ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα γεωτεχνολογίας και περιβάλλοντος.
- Κουρκούλη Π. (2008), Αξιοποίηση της συμβολομετρικής συνοχής από δορυφορικές εικόνες ERS στη δημιουργία θεματικών χαρτών κάλυψης γης. <http://estia.hua.gr:8080/dspace/bitstream/123456789/645/1/kourkoulh.pdf>
- Παρχαρίδης Ι. (2009). Χαρτογράφηση της εδαφικής παραμόρφωσης στην περιοχή του νομού Ηλείας με τη χρήση της διαφορικής συμβολομετρίας από δορυφόρους ραντάρ. <http://www.latsis-foundation.org/pbf/uploads/file/parxaridis.pdf>

### Διεθνείς

- Buckley S.(2000), Roi\_Pac documentation
- CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information), <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Crosetto.M et al. State of the art of land deformation monitoring sing differential SAR interferometry. <http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/126-crosetto.pdf>
- ESA (2007), InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing.
- Schwabisch M. A fast and efficient technique for SAR interferogram geocoding. <http://www.intermap.com/uploads/1170700435.pdf>
- Fielding E.(2009), ROI\_PAC internals <http://www.roipac.org/ShortCourse?action=AttachFile&do=get&target=Internal-s-slides.pdf>
- Fielding E., Fishbein E. (2009), MERIS ans OSCAR: Online Services for Correcting Atmosphere in Radar
- Gatelli et al (1994), The wavenumber shift in SAR interferometry, <http://www.geo.uzh.ch/~ofrey/SARbibliography/Author/GATELLI-F.html>
- Global Land Cover Facility, <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm/index.shtml>

- Hagberg A. et al (1995), Dynamic front transitions and spiral vortex nucleation.
- Lwin A.(2006), Geomorphological mapping with respect to amplitude, coherence, and phase information of ERS SAR tandem pair.  
[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/12\\_WG-VIII-12/21.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/12_WG-VIII-12/21.pdf)
- Madsen S. and Zebker H. (1992), The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=175328](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=175328)
- Madsen S., Zebker H. and Martin J. (1993), Performance evaluation of the JPL TOPSAR system: an across track interferometric SAR system for topographic mapping. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/36466/1/93-1932.pdf>
- Rosen P. et al, Synthetic aperture radar Interferometry.  
[http://74.125.155.132/scholar?q=cache:WEg0GewAGk4J:scholar.google.com/&hl=el&as\\_sdt=2000&as\\_vis=1](http://74.125.155.132/scholar?q=cache:WEg0GewAGk4J:scholar.google.com/&hl=el&as_sdt=2000&as_vis=1)
- Smith B., Sandwell D.(2003), Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data,  
<http://www.agu.org/journals/ABS/2003/2002GL016643.shtml>
- UNAVCO facility, <http://facility.unavco.org/>
- UNAVCO facility, [http://facility.unavco.org/insar-class/sar\\_summary.pdf](http://facility.unavco.org/insar-class/sar_summary.pdf)
- Zebker A., Lu Y. (1997), Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms.  
<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josaa-15-3-586>
- Ziemer and Tranter,(1995), Signals and systems: continuous and discrete.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

- Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Γεωδυναμικό Ινστιτούτο,  
<http://www.gein.noa.gr/services/info.html>
- Καπαγερίδης Ι. (2006), Εισαγωγή στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών.  
[http://airlab.teikoz.gr/geope/downloads/kapageridis/rs\\_theory.pdf](http://airlab.teikoz.gr/geope/downloads/kapageridis/rs_theory.pdf)
- Καρτάλης Κ. & Φειδάς Χ. (2006). Αρχές και εφαρμογές δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Β.Γκιούρδας Εκδοτική, Αθήνα.
- Μερτίκας Σ.Π. (1999). Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας. Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
- Νάσερ Α. (2010). Διερεύνηση των τεχνικών παραμέτρων και μηχανισμών της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης ασύρματου καναλιού δορυφορικής κινητής τηλεφωνίας.  
[http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/4082/3/Nimertis\\_Nasser\(ele\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/4082/3/Nimertis_Nasser(ele).pdf)
- Παπαδάκη Ε. (2007). DIAPASON-Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature
- Πλακίδης Ε. (2006). Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature
- Τσούλης Δ. Σύγχρονες εφαρμογές συμβολομετρίας VLBI/InSAR/LISA.  
[http://e-topo.web.auth.gr/TOMEIS\\_INDEX/tomeasa/tsoulis/Give/tsoulis\\_mtp\\_vlbi.pps](http://e-topo.web.auth.gr/TOMEIS_INDEX/tomeasa/tsoulis/Give/tsoulis_mtp_vlbi.pps)
- Φαφούτης Ι. (2003), Γεωμετρική διόρθωση, βελτίωση, μετασχηματισμοί και υπέρθεση εικόνας SAR.
- NTUA, Διαδικασία παραγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους με χρήση SAR απεικονίσεων. [ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/9158/interferometry.pps](http://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/9158/interferometry.pps)
- NTUA, (2001) Αρχές των ραντάρ.  
<http://www.itia.ntua.gr/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>

### Διεθνής

- Allen C., Interferometric synthetic aperture radar.  
<http://74.125.155.132/scholar?q=cache:jn-On80o->

EMJ:scholar.google.com/+Allen+Interferometric+synthetic+aperture+radar&hl=en&as\_sdt=2000&as\_vis=1

- Árnadóttir T. et al (2005), Postseismic deformation following the June 200 earthquake sequence in the south Iceland seismic zone.  
[http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/ArnadottirEtAl2005JGR\\_2005JB003701.pdf](http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/ArnadottirEtAl2005JGR_2005JB003701.pdf)
- Árnadóttir T. et al (2006), Kinematic models of plate boundary deformation in southwest iceland derived from GPS observations.  
<http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JB003907.shtml>
- Baran I. (2004), Advanced satellite radar interferometry for small-scale surface deformation detection. <http://adt.curtin.edu.au/theses/available/adt-WCU20050203.120213/unrestricted/01Front.pdf>
- Barbieri M. et al, The Izmit earthquake: A quick post-seismic analysis with satellite observations. <http://esapub.esrin.esa.it/eqq/eqq64/izmit.pdf>
- Berlarbi-Delaï A. et al, Microwave short range interferometric radar.  
<http://www.nsti.org/procs/MSM98/13/T4.5.3>
- Berthier E. et al (2005), Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery.  
[http://etienne.berthier.free.fr/download/Berthier\\_et\\_al\\_RSE\\_2005.pdf](http://etienne.berthier.free.fr/download/Berthier_et_al_RSE_2005.pdf)
- Berthier E. et al (2006), The level of the Grímsvöth subglacial lake, Vatnajökull, Iceland, monitored with SPOT5 images.  
[http://etienne.berthier.free.fr/download/Berthier\\_et\\_al\\_EPSL\\_2006.pdf](http://etienne.berthier.free.fr/download/Berthier_et_al_EPSL_2006.pdf)
- Borgström S. (2009), On the integration between DInSar and geodetic data for ground deformation monitoring in the neapolitan volcanic district.
- Catita C. et al (2004), InSAR time series analysis of the July 1998 azores earthquake.  
<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a723688048>
- Cheney M. (2002), Introduction to synthetic aperture radar (SAR) and SAR interferometry. <http://www.rpi.edu/~cheney/papers/atsarf.pdf>
- Chlieh M. et al (2004), Crystal deformation and fault slip during the seismic cycle in the north Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations.
- Clifton A. et al (2002), Surface effects of faulting and deformation resulting from magma accumulation at the Hengill triple junction SW Iceland 1994-1998.  
<http://www.ingentaconnect.com/content/els/03770273/2002/00000115/00000001/art00319>



- CNES (1996), Philosophy & instructions for use of the diapason interferometry software system developed at CNES.
- Comet+, Radar Interferometry.  
[http://comet.nerc.ac.uk/for\\_schools\\_radar1.html](http://comet.nerc.ac.uk/for_schools_radar1.html)
- Cong D.C., Feigl K. (1999), Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam 1963-1994.  
<http://perso.numericable.fr/~feigkurt/FeiglCong1999JGeodesy.pdf>
- Disperati L. et al, Land subsidence monitoring in the Lucca Plain (central Italy) with ERS 1-2
- Dixon T.H. (1995). SAR interferometry and surface change detection.  
<http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/index.html>
- Dubois L. et al (2008), Three dimensional mechanical models for the June 2000 earthquake sequence in the south Iceland seismic zone. [http://web.univ-pau.fr/~dkomati1/published\\_papers/Dubois\\_Tectonophysics\\_2008.pdf](http://web.univ-pau.fr/~dkomati1/published_papers/Dubois_Tectonophysics_2008.pdf)
- ESA\_European Space Agency. SAR image geocoding.  
[http://earth.esa.int/applications/data\\_util/SARDOCS/spaceborne/Radar\\_Courses/Radar\\_Course\\_III/SAR\\_image\\_geocoding.htm](http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/SAR_image_geocoding.htm)
- ESA, An Overview of SAR Interferometry.  
<http://earth.esa.int/workshops/ers97/program-details/speeches/rocca-et-al/>
- Fadil A., Active tectonics of the western Mediterranean: Geodetic evidence for rollback of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rib Mountains, Morocco. <http://ecommons.library.cornell.edu/handle/1813/5277>
- Farr et al, The shuttle radar topography mission.  
[http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_paper.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf)
- Feigl K. et al, Crystal deformation near Hengill volcano, Iceland 1993-1998: Coupling between volcanism and faulting inferred from elastic modelling of Satellite Radar Interferograms.
- Feigl K. (2002), Estimating earthquake source parameters from geodetic measurements.  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B8H3C-4PJCB0-1F&\\_user=10&\\_coverDate=12%2F31%2F2002&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=search&\\_origin=search&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=1455917030&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=99b05131137bec850fda983c1e9a598a&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B8H3C-4PJCB0-1F&_user=10&_coverDate=12%2F31%2F2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1455917030&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=99b05131137bec850fda983c1e9a598a&searchtype=a)
- Feigl K., Sargent A., Jack D. (1995), Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: Application to the December

4, 1992 Landers aftershock.

<http://www.agu.org/journals/ABS/1995/94GL03212.shtml>

- Feigl K., Dupré E. (1999), RNGCHN: A program to calculate displacement components from dislocations in an elastic half-space with applications for modelling geodetic measurements of crustal deformation. <http://www-gpsg.mit.edu/~kurt/rngchn/rngchn.html>
- Feigl K. et al (2002), Estimating slip distribution for the İsmiit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT, and SPOT measurements. <http://bssa.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/92/1/138>
- Feigl K., Thatcher W. (2006), Geodetic observations of post-seismic transients in the context of the earthquake deformation cycle. <http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/FeiglThatcher2006CRGeoscience.pdf>
- Feigl K. Thurber C. (2009), A method for modelling radar interferograms without phase unwrapping: application to the M 5 Fawnskin, California earthquake of 1992 December 4. <http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/FeiglThurber2009GJIpreprint.pdf>
- Ferhat G. et al (1998), Geodetic measurement of tectonic deformation of the southern Alps and Provence, France, 1947-1994. <http://perso.numericable.fr/~feigkurt/FerhatEtAl1998EPSL.pdf>
- Fourmelis M. et al (2009), Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry. [http://www.remsenslab.geol.uoa.gr/papers/Foumelis\\_etal\\_2009.pdf](http://www.remsenslab.geol.uoa.gr/papers/Foumelis_etal_2009.pdf)
- GAMMA Remote Sensing. Differential interferometry and geocoding package. <http://www.gamma-rs.ch/software/diff-geo-differential-sar-processor-geocoding.html>
- GEOWARN-Geospatial Warning Systems. Differential radar interferometry (DInSAR). <http://www.geowarn.ethz.ch/index.asp?ID=12>
- Hanssen R., Klees R. (1998), Applications of SAR interefrometry in terrestrial and atmospheric mapping. <http://doris.tudelft.nl/Literature/hanssen98.pdf>
- Hellwich O., Basic principles and current issues of SAR Interferometry. [http://74.125.155.132/scholar?q=cache:AcBTY4hqk28J:scholar.google.com/+Hellwich++Basic+principles+and+current+issues+of+SAR+Interferometry&hl=el&as\\_sdt=2000&as\\_vis=1](http://74.125.155.132/scholar?q=cache:AcBTY4hqk28J:scholar.google.com/+Hellwich++Basic+principles+and+current+issues+of+SAR+Interferometry&hl=el&as_sdt=2000&as_vis=1)
- Kohlhasse A., Feigl K., Measuring the quality of precise orbits by applying InSAR: An approach to avoid orbital tuning. <http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/KohlhasseEtAl2003JGeodesy.pdf>

- Kohlhasse A. et al (2003), Applying differential InSAR to orbital dynamics: a new approach of estimating ERS trajectories.  
<http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/KohlhasseEtAl2003JGeodesy.pdf>
- Kontoes C. et al , Two examples of using ERS-2 SAR Interferometry in Greece. Study of the September 7, 1999 Athens earthquake and the Nisyros volcano activity. [http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/gothenburg/054konto.pdf](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/gothenburg/054konto.pdf)
- Li et al.(2005), Quantitative study of atmospheric effects in spaceborn InSAR measurements. <http://www.springerlink.com/content/c5178n6k537pr448/>
- Madsen N., On absolute phase determination techniques in SAR Interferometry <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/30062/1/95-0488.pdf>
- Massonet D. et al (1993), The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar Interferometry.  
<http://www.nature.com/nature/journal/v364/n6433/abs/364138a0.html>
- Massonet D., Feigl K. (1995), Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M = 6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993.  
<http://www.agu.org/journals/ABS/1995/95GL01088.shtml>
- Massonet D., Feigl K. (1995), Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms.  
<http://www.agu.org/pubs/crossref/1995/95GL00711.shtml>
- Massonet D. et al (1994), Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake.  
<http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/MassonetEtAl1994Nature369227a0.pdf>
- Massonet D. et al (1996), Coseismic deformation field of the M=6.7 Northridge, California earthquake of January 17, 1994 recorded by two radar satellites using radar Interferometry.  
<http://www.agu.org/journals/ABS/1996/96GL00729.shtml>
- NPA Satellite Mapping, Differential Interferometry.  
[http://www.pipemon.com/documents/NPA\\_Diff\\_2pager\\_310806.pdf](http://www.pipemon.com/documents/NPA_Diff_2pager_310806.pdf)
- NPA Satellite Mapping, InSAR Basis-A brief guide to SAR interferometry.  
[http://www.npagroup.com/insar/whatisinsar/insar\\_simple.htm#SAR](http://www.npagroup.com/insar/whatisinsar/insar_simple.htm#SAR)
- Pagli C. et al (2003), Triggered fault slip on June 17, 2000 on the Reykjanes, Peninsula SW-Iceland captured by radar Interferometry.  
[http://www.raunvis.hi.is/~rikke/Pagli\\_et\\_al\\_GRL03.pdf](http://www.raunvis.hi.is/~rikke/Pagli_et_al_GRL03.pdf)

- Pagli C. et al (2006), Deflation of the Askja volcanic system: Constraints of the deformation source from combined inversion of satellite radar interferograms and GPS measurements.  
<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=17601367>
- Papadimitriou P. et al (2002), The  $M_w=6.0$ , 7 September 1999 Athens earthquake. <http://www.geophysics.geol.uoa.gr/papers/makro/makro194.pdf>
- Parcharidis I. et al (2006), Subsidence monitoring within the Athens basin (Greece) using space radar interferometric techniques.  
<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2006/5805/58050505.pdf>
- Pedersen R., Sigmundsson F. (2004), InSAR based sill model links spatially offset areas of deformation and seismicity for the 1994 unrest episode at Eyjafjallajökull volcano, Iceland.  
<http://www.agu.org/journals/ABS/2004/2004GL020368.shtml>
- Pedersen R. et al (2003), Fault slip distribution of two June 2000  $M_w 6.5$  earthquakes in south Iceland estimated from joint inversion of InSAR and GPS measurements.  
[http://www.raunvis.hi.is/~rikke/Pedersen\\_et\\_al\\_EPSL03.pdf](http://www.raunvis.hi.is/~rikke/Pedersen_et_al_EPSL03.pdf)
- Pedersen R. et al (2001), Coseismic interferograms of two  $M_s=6.6$  earthquakes in the south Iceland seismic zone, June 2000.  
<http://europa.agu.org/?uri=/journals/gl/2001GL013235.xml&view=article>
- Peltzer G. et al (1994), Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar Interferometry: New insights into the Landers earthquake.  
<http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/PeltzerHudnutFeigl1994JGR94JB01888.pdf>
- Qulin Tan et al. Study on radar differential interferometry technology and its application to earthquake using ERS 1-2 SAR data : A case study in China.  
<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/143.pdf>
- Reilinger R. et al (2000), Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999,  $M=7.5$ , Izmit, Turkey earthquake.  
<http://www.geology.wisc.edu/~feigl/Reprints/ReilingerEtAl2000Science.pdf>
- Research and Technology Organisation (2004), Radar polarimetry and Interferometry. [http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-081///EN-SET-081-\\$\\$TOC.pdf](http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-SET-081///EN-SET-081-$$TOC.pdf)
- Roberts M. (2005), Jökulhlaups: A reassessment of floodwater flow through glaciers.  
[http://www.eos.ubc.ca/~mjelline/453website/eosc453/E\\_prints/newfer06/2003RG000147.pdf](http://www.eos.ubc.ca/~mjelline/453website/eosc453/E_prints/newfer06/2003RG000147.pdf)

- Rocca F. Introduction to InSAR, lecture 1.  
[http://earth.eo.esa.int/dragon/Rocca2\\_SAR\\_differential\\_interferometry.pdf](http://earth.eo.esa.int/dragon/Rocca2_SAR_differential_interferometry.pdf)
- Rodríguez et al, An assessment of the SRTM topographic products.  
[http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_D31639.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf)
- Sansosti E.(2009), Synthetic aperture radar interferometry: Principles and applications
- Sansosti E.(2009), Advanced techniques for surface deformation analysis.
- Schmidt D.A.(2002), Roi\_Pac resource guide.  
<http://igppweb.ucsd.edu/~fialko/insar/roipac.pdf>
- Smith L., Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology.  
<http://www.geog.ucla.edu/downloads/297/164.pdf>
- Smith B., Sandwell D.(2003), Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data.  
[http://www.spaceweather.ac.cn/publication/jgrs/2003/Geophysical\\_Research\\_Letters/2002GL016643.pdf](http://www.spaceweather.ac.cn/publication/jgrs/2003/Geophysical_Research_Letters/2002GL016643.pdf)
- Strozzi T. et al. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry.
- Tahayt A. et al (2008), The Al Hoceima (Morocco) earthquake of 24 February 2004, analysis and interpretation of data from ENVISAT ASAR and SPOT5 validated by ground-based observations.  
[http://etienne.berthier.free.fr/download/Tahayt\\_et\\_al\\_RSE\\_2009.pdf](http://etienne.berthier.free.fr/download/Tahayt_et_al_RSE_2009.pdf)
- Trota A. (2006), Deformation studies at Furnas and Sete Cidades volcanoes (São Miguel island, Azores). Velocities and further investigations.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2006.03039.x/abstract>
- University of Zurich-Department of Geography. SAR geocoding.  
<http://www.geo.uzh.ch/en/units/rsl/research/radar-remote-sensing-sarlab/research-projects/sar-geocoding/>
- USGS, Using satellites to monitor deformation: radar Interferometry.  
[http://volcanoes.usgs.gov/insar/more\\_insar.html](http://volcanoes.usgs.gov/insar/more_insar.html)
- Van Zyl J., Radar and synthetic aperture radar basics.  
[www.photogrammetry.ethz.ch/general/.../tutradar/3\\_radar1\\_1.ppt](http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/.../tutradar/3_radar1_1.ppt)
- Vettore A. et al (2008), Space-based surface change detection with differential synthetic aperture radar (SAR) Interferometry: potentialities and preliminary investigations.  
<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/486.pdf>

- Wikipedia, Interferometric synthetic aperture radar.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric\\_synthetic\\_aperture\\_radar](http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric_synthetic_aperture_radar)
- Wikipedia, Geocoding. <http://en.wikipedia.org/wiki/Geocoding>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

### Υπορουτίνες λογισμικού ROI\_pac

#### Raw δεδομένα

- Για ERS-1 και ERS-2 : make\_raw.pl
- Για άλλους δορυφόρους : make\_raw\_(όνομα δορυφόρου\*).pl  
+ envisat=envi, alos=alos, jers-1=jers

#### Μετατροπή raw εικόνας σε slc

- roi\_prep.pl = προετοιμάζει τα αρχεία εισαγωγής για το πρόγραμμα roi, για κάθε εικόνα, και δημιουργεί αρχεία 'date'.slc.rsc
- baseline.pl = υπολογίζει το άνωσμα βάσης μεταξύ των δύο τροχιών, για την περιοχή που καλύπτει η εικόνα
- roi = κάνει το focusing και παράγει μία εικόνα 'date'.slc

#### Εγγραφή εικόνας

- raw2ampintcor.pl = εκτελεί τη συνέχεια της επεξεργασίας
- make\_offset.pl = υπολογίζει το δυσδιάστατο πεδίο των offsets μεταξύ των δύο εικόνων SLC
- offset.pl = καλείται από την make\_offset.pl, και τρέχει το πρόγραμμα ampcor
- fitoff = πρόγραμμα που καλεί η make\_offset.pl και εκτελεί έναν πρώτο τραχύ αφφινικό μετασχηματισμό
- PlotOffset.pl = εμφανίζει στην οθόνη τα offsets

#### Δημιουργία συμβολογραφήματος

- resamp.pl = καλείται από την raw2ampintcor.pl
- resamp\_roi = πρόγραμμα που καλεί η resamp.pl και προσαρμόζει μία πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού στην εικόνα slave για να τη διαμορφώσει κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να συνεγγραφεί στην εικόνα master

### Εξομάλυνση συμβολογράφου

- reference.hgt = κατασκευάζεται από την raw2ampintcor.pl και είναι ένα πλάσματικό DEM
- diffnsim.pl = καλείται από την raw2ampintcor.pl για να υπολογίσει και να αφαιρέσει τη φάση που βασίζεται στο reference.hgt και την τροχιά, από το raw συμβολογράφημα
- look.pl = καλείται από την raw2ampintcor.pl για να κάνει έλεγχο στα flat\_PRC\_'date1-date2'.int, ramp\_PRC.unw και reference.hgt

### Απαλοιφή τοπογραφίας

- dem2diff.pl = καλείται από την process\_2pass.pl και καλεί την make\_sim.pl
- make\_sim.pl = μετατρέπει τα αρχεία τροχιάς σε αρχεία 'date'.orrm
- gradient.pl = καλείται από την make\_sim.pl για να υπολογίσει την κλίση (gradient) του αρχείου DEM.dem και δημιουργεί DEM.slp
- IntSim = πρόγραμμα που καλείται από την make\_sim.pl για να κάνει την προσομοίωση σε γεωμετρία ραντάρ και παράγει αρχεία SIM\_raw.hgt (αρχείο rmg με εύρος και ύψος)
- Aik\_resample = πρόγραμμα που καλείται από την make\_sim.pl για να κάνει παρεμβολή στην προσομοίωση και παράγει αρχεία SIM\_4rlks.hgt (αρχείο rmg με εύρος και ύψος)
- synth\_offset.pl = καλείται από την dem2diff.pl για να ελέγξει την συνεγγραφή της προσομοιωμένης εικόνας και της εικόνας SAR
- offset.pl = καλείται από την synth\_offset.pl και τρέχει το πρόγραμμα ampcor για να κάνει αρχικά ένα χονδροειδή συνδυασμό (ampmag\_gross.off) και μετά έναν ακριβέστερο (ampmag.off)
- fitoff = πρόγραμμα που καλείται από τη synth\_offset.pl για να καθορίσει τον αφφινικό μετασχηματισμό μεταξύ της προσομοίωσης και της εικόνας SAR και προκύπτει το cull.out
- synth2radar.pl = καλείται από τη dem2diff.pl για να μετατρέψει κατάλληλα την προσομοίωση (resampling) ώστε να εγγραφεί απόλυτα με την εικόνα SAR χρησιμοποιώντας αφφινικό μετασχηματισμό
- find\_affine.pl = καλείται από τη synth2radar.pl για να εξάγει τις παραμέτρους του αφφινικού μετασχηματισμού από το cull.out και τις βάζει σε ένα αρχείο 'date1-date2'\_Rlooks\_sim\_SIM.aff



- rect.pl = καλείται από τη synth2radar.pl για να κάνει τη μετατροπή και παράγει το radar\_4rlks.hgt (θεωρώντας ότι Rlooks\_sim=4) που πρέπει να εγγραφεί στην εικόνα SAR
- diffnsim.pl = καλείται από τη dem2diff.pl για να υπολογίσει τη φάση λόγω της τοπογραφίας με την καμπυλότητα της Γης και την τροχιά, και την αφαιρεί από το συμβολογράφημα, παράγοντας Rlooks\_sim
- process\_2pass.pl = ελέγχει τα outputs της dem2diff.pl και μετατρέπει τα Rlooks\_sim σε Rlooks\_unw (σε αυτό το στάδιο διαφαίνονται οι σεισμοί)

#### Καθορισμός της συσχέτισης

- make\_cor.pl = καλείται από την raw2ampintcor.pl, και τρέχει το cchz\_wave για να υπολογίσει τη συσχέτιση του εξομαλυμένου συμβολογραφήματος
- look.pl = καλείται από την raw2ampintcor.pl για να κάνει έλεγχο στο 'date1-date2'.cor

#### Μη γραμμικό προσαρμοζόμενο φιλτράρισμα συμβολογραφήματος

- int2filtmaskunwrap.pl = καλείται από την process\_2pass.pl για να κάνει φιλτράρισμα και αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης
- filter.pl = καλείται από την int2filtmaskunwrap.pl για να κάνει το φιλτράρισμα, βασιζόμενο στην Filt\_method (μέθοδος) που μπορεί να είναι είτε psfilt (προεπιλεγμένη μέθοδος φιλτραρίσματος), είτε adapt\_filt (κάνει δεύτερο φιλτράρισμα σε περίπτωση που υπάρχει πολύς θόρυβος)
- make\_mask.pl = καλείται από την int2filtmaskunwrap.pl για να κάνει φιλτράρισμα με επιλογή και αποκοπή ορισμένων μηκών κύματος (masking) της περιοχής που θα γίνει η αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης
- phase\_slope και phase\_mask = προγράμματα που καλεί η int2filtmaskunwrap.pl και κάνουν masking ανάλογο με την τοπική διακύμανση της φάσης για να απομακρύνουν περιοχές με χαμηλή συνάφεια
- int\_thr = πρόγραμμα που καλεί η make\_mask.pl για να κάνει masking που βασίζεται στο εύρος, και αποκόπτει τις πολύ σκοτεινές περιοχές
- sigma\_thresh = πρόγραμμα που καλεί το phase\_mask για να εφαρμόσει κατώφλι διακύμανσης και το μετατρέπει σε ενεργή συνάφεια
- make\_mask.pl = συνδυάζει το χαμηλού εύρους masking με το masking συνάφειας

### Αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης και καθορισμός απόλυτης φάσης

- new\_cut.pl = καλείται από την int2filtmaskunwrap.pl για να κάνει τα πρώτα βήματα
- unwrap.pl = καλείται από την int2filtmaskunwrap.pl για να ολοκληρωθεί η αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης, με προϊόν το filt\_'date1-date2'\_sim\_'orbit-type'\_'Rlooks'\_unw\_'UnwrappedThreshold'.unw
- residue = καλείται από την new\_cut.pl για να υπολογίσει τα κατάλοιπα φάσης (residues) από το συμβολογράφημα
- trees = πρόγραμμα που καλεί η new\_cut.pl για να δημιουργήσει phase cuts ώστε να συνδέσει τα residues
- corr\_flag = πρόγραμμα που καλεί η unwrap.pl για να συνδιάσει το μασκάρισμα αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης με τα phase cut trees
- grass = πρόγραμμα που καλεί η unwrap.pl για να κάνει αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης μεταξύ των phase cut trees ξεκινώντας από το κέντρο της εικόνας (seed) που θεωρείται ότι έχει μηδενική φάση
- unw\_seedx και unw\_seedy = προγράμματα που αλλάζουν το σημείο seed (προαιρετικά)

### Εναλλακτική μέθοδος αποκατάστασης συμβολομετρικής φάσης :

- icu.pl = καλείται από την int2filtunw.pl και καλεί το πρόγραμμα icu
- icu = πρόγραμμα που κάνει την αποκατάσταση φάσης σε τμήματα, γεγονός που του επιτρέπει να κάνει αποκατάσταση σε πολύ μεγάλες εικόνες που δε μπορούν να αποκατασταθούν με άλλα προγράμματα

### Καθορισμός κάθετου ανύσματος βάσης (perpendicular baseline)

- phase2base.pl = καλείται από την process\_2pass.pl
- baseest = πρόγραμμα που καλεί η phase2base.pl για να εκτιμήσει το νέο άνυσμα βάσης και να αποθηκεύσει το αποτέλεσμα
- diffnsim.pl = καλείται και πάλι από την process\_2pass.pl για να αφαιρέσει τη φάση λόγω της τροχιάς και της τοπογραφίας υπολογίζοντας τη με το νέο άνυσμα βάσης

### Γεωκωδικοποίηση (geocoding)

- radar2geo.pl = καλείται από την process\_2pass.pl για να γεωκωδικοποιήσει την τελική αποκατεστημένη φάση από τις συντεταγμένες ραντάρ στις γεωγραφικές συντεταγμένες
- make\_geomap.pl = καλείται από τη radar2geo.pl για να δημιουργήσει το αρχείο του μετασχηματισμού της γεωκωδικοποίησης `geomap_(Rlooks_unw)rlks.trans`
- IntSim = πρόγραμμα που καλεί η make\_geomap.pl για να κάνει τον αντίστροφο αφφινικό μετασχηματισμό από την προσομοίωση στο ραντάρ