ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

«Αξιοποίηση της συμβολομετρικής συνοχής από δορυφορικές εικόνες ERS στη δημιουργία θεματικών χαρτών κάλυψης γης»

Πτυχιακή εργασία της Πηνελόπης Κουρκούλη

Αθήνα, Φεβρουάριος 2008

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

«Αξιοποίηση της συμβολομετρικής συνοχής από δορυφορικές εικόνες ERS στη δημιουργία θεματικών χαρτών κάλυψης γης»

Πτυχιακή εργασία της Πηνελόπης Κουρκούλη
Επιβλέπων : Ισαάκ Παρχαρίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **4**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **5**

2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ **6**

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ 6
2.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΝΕΡΓΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ 7
2.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 8

3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΙΚΟΝΟΛΗΨΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΝΤΑΡ **16**

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΜΙΑ ΕΙΚΟΝΑ ΡΑΝΤΑΡ 16
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 17
3.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ 19
3.4 ΕΙΔΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΆΡ 21

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ **22**

4.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ 23
4.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ *23*
4.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ *25*
4.1.3Συμβολομετρική Συνοχή *27*
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ 28

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΝΟΧΗΣ **30**

5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΝΟΧΗΣ 31
5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ 33
5.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΥΝΟΧΗΣ 45

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **48**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **50**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αφορά την εκπόνηση μελέτης η οποία βασίζεται στην τεχνική της συμβολομετρίας. Ο λόγος για τον οποίο ασχολήθηκα με το παρών θέμα είναι επειδή πρόκειται για μία τεχνική η οποία έχει αναπτυχθεί ραγδαία την τελευταία δεκατετία και η οποία καλύπτει ένα αρκετά ευρύ φάσμα εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης. Για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και στην εκπόνηση της εργασίας, βοήθησε σημαντικά ο επιβλέπων καθηγητής μου κύριος Ισαάκ Παρχαρίδης, τον οποίο και ευχαριστώ καθώς ήταν εκείνος που με παρότρυνε να ασχοληθώ με την συγκεκριμένη τεχνική.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ευρωπαική Διαστημική Υπηρεσία Διαστήματος για την παροχή των εικόνων Ραντάρ, καθώς επίσης και τον Μιχάλη Φουμέλη υποψήφιο διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών για την βοήθειά του στην επιλογή των εικόνων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία, της οποίας το θέμα είναι η συμβολομετρική συνοχή σε σχέση με τους τύπους κάλυψης της γης, χρησιμοποιήθηκαν 22 εικόνες Ραντάρ, του δορυφόρου ERS, οι οποίες καλύπτουν χωρικά την περιοχή της Αθήνας και χρονικά της περίοδο 1992-1999. Έπειτα από την παραγωγή των εικόνων συνοχής, με χρονική διαφορά ανάμεσα στις 138 και 1335 ημέρες, εφαρμόστηκε μία διαδικασία παραγωγής της τελικής εικόνας συνοχής απεικονίζοντας τον μέσο όρο των τιμών. Προκειμένου να ταυτοποιηθούν και να ερμηνευθούν στατιστικά οι ιδιότητες των επιλεγμένων περιοχών εδαφικής κάλυψης, σε σχέση πάντα με την εικόνα συνοχής, χρησιμοποιήθηκε μια εικόνα υψηλής ανάλυσης QuicBird.

Επικαλύπτοντας την εικόνα συνοχής στην εικόνα QuickBird, αυτό επιτρέπει την συσχέτιση του βαθμού συνοχής με χαρακτηριστικά και ιδιότητες του αστικού περιβάλλοντος. Κατά κύριο λόγο οι αστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό συνοχής ενώ περιοχές με βλάστηση από χαμηλό βαθμό συνοχής. Τέλος, με την βοήθεια των παραπάνω δεδομένων εφαρμόστηκαν δυο κατηγορίες ταξινομήσεων (ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη) με σκοπό την τελική δημιουργία χαρτών κάλυψης γης.

ABSTRACT

In the present study coherence observations, in relation to the land-cover type, obtained using 22 ERS SAR Single Look Complex (SLC), images acquired over the metropolitan area of Athens covering the period 1992 – 1999 are presented. After generating single coherence images, with temporal separation varing between 138 and 1335 days, an averaging procedure

followed leading to the average coherence image. In order to identify and statistically interpret the properties of selected land cover types in terms of average degree of coherence, very high resolution QuickBird imagery was downloaded from Google Earth environment.

Overlay of coherence product on the QuickBird image allows correlating the level of coherence with characteristics and properties of the urban shell. Mainly urban areas are considered of high coherence, whereas areas with vegetation have low coherence. Finally, they were created classification maps, (supervised and unsupervised), using the above data in order to generate the final maps of land-cover types.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως ανέφερα και στον πρόλογο, η συγκεκριμένη εργασία ασχολήθηκε με την τεχνική της συμβολομετρίας, χρησιμοποιώντας 22 εικόνες Ραντάρ του δορυφόρου ERS 1,2 με στόχο την παραγωγή μιας εικόνας συμβολομετρικής συνοχής, η οποία απεικονίζει τις μέσες τιμές. Έπειτα, με την χρησιμοποίηση αυτής της εικόνας θα γίνει προσπάθεια παραγωγής χαρτών κάλυψης γης. Γι'αυτό τον λόγο επιλέγονται 8 τύποι εδαφικής κάλυψης, οι οποίοι στην συνέχεια αναλύονται στατιστικά με βάση τις μέσες τιμές συνοχής. Προκειμένου να προσδιοριστούν και να ερμηνευθούν στατιστικά οι ιδιότητες των επιλεγμένων τύπων κάλυψης εδάφους από την άποψη του μέσου βαθμού συνοχής, χρησιμοποιήθηκε μία εικόνα υψηλής ανάλυσης QuickBird η οποία πάρθηκε από το Google Earth. Τέλος, πραγματοποιείται η μέθοδος της ταξινόμησης με σκοπό την παραγωγή χαρτών κάλυψης γης των παραπάνω τύπων εδαφικής κάλυψης.

Τα αναμενόμενα αποτελέσματα που πρόκειται να επιφέρει η παρούσα εργασία, είναι οι υψηλές τιμές βαθμού συνοχής σε περιοχές που κυριαρχούνται κυρίως από αστικό περιβάλλον, καθώς επίσης και από γυμνά πετρώματα. Σε αντίθετη περίπτωση, χαμηλό βαθμό συνοχής θα εμφανίζουν περιοχές που καλύπτονται κατά κύριο λόγο με βλάστηση.

Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη της συμβολομετρίας ως ενός σημαντικού εργαλείου για την παραγωγή χαρτών κάλυψης γης, με την χρήση της Τηλεπισκόπησης, δίχως την χρησιμοποίηση κάποιου επίγειου μέσου. Αυτό είναι σημαντικό καθώς με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης αποφεύγει την χρονοβόρα έρευνα πεδίου.

Για την διαδικασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά: GAMMA για την παραγωγή της εικόνας της συμβολομετρικής συνοχής, το ERDAS IMAGINE για την γεωμετρική διόρθωση της εικόνας QuickBird, καθώς επίσης και για την παραγωγή των χαρτών ταξινόμησης, και τέλος το λογισμικό ARCGIS, για την τελική εμφάνιση και τελειοποίηση των τελικών χαρτών.

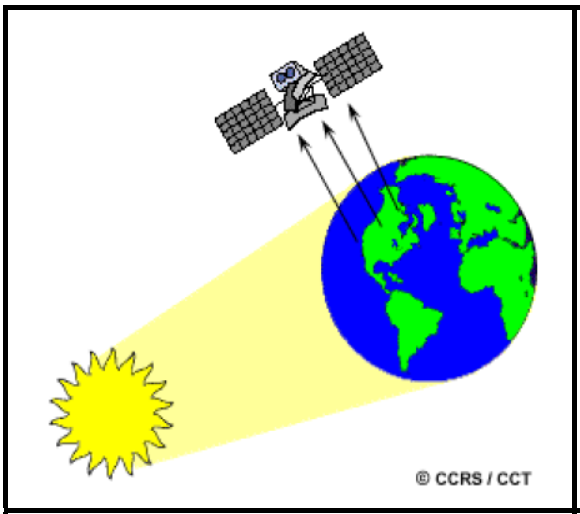
2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πρόκειται να γίνει μια εισαγωγή όσων αφορά τις βασικές αρχές της μικροκυματικής ακτινοβολίας και του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανάλυση της λειτουργίας των ενεργών δορυφορικών συστημάτων, και τέλος αναφορά στα μεγαλύτερα ενεργά δορυφορικά συστήματα.

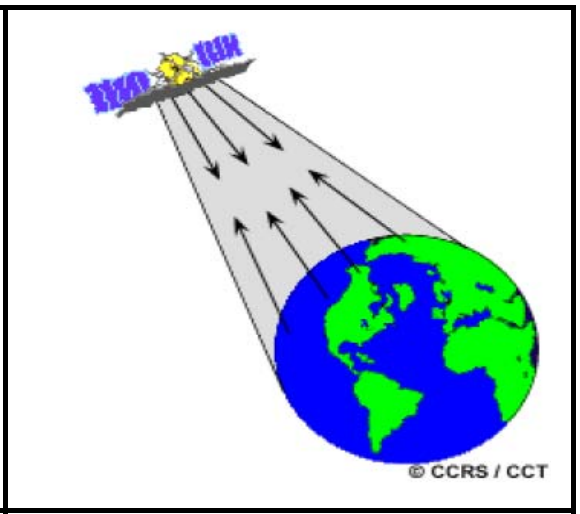
2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Το εύρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνθέτει το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το φάσμα αποτελείται από τμήματα ακτινοβολίας: το υπεριώδες (Ultraviolet), το ορατό (Visible), το υπέρυθρο (Infrared) και το μικροκυματικό (Microwave).

Το μικροκυματικό φασματικό τμήμα οριοθετείται μεταξύ του υπέρυθρου και των ραδιοκυμάτων, με μήκος κύματος από 0,1 cm έως 1 m. Συνεπώς, περιλαμβάνει τα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Σημαντικό πλεονέκτημα της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι η ικανότητά της να διαπερνά τα σύννεφα και επιφανειακά αντικείμενα ανάλογα με το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μικροκυματικό τμήμα λειτουργούν παθητικοί (Εικόνα 1α) αλλά και ενεργητικοί αισθητήρες (Εικόνα 1β).



Εικόνα 1α. Παθητικός αισθητήρας



Εικόνα 1β. Ενεργητικός αισθητήρας

Πηγή: CCRS / CCT

Τα συστήματα τα οποία καταγράφουν την ενέργεια η οποία διατίθεται με φυσικό τρόπο, καλούνται παθητικά (παθητικοί αισθητήρες). Αντίθετα, οι αισθητήρες οι οποίοι εκπέμπουν οι ίδιοι την ενέργειά τους, καλούνται ενεργητικοί (Μιγκίρος, Γ. , Παυλόπουλος, Α., Παρχαρίδης, Ι., Γατσής, Ι., Ψωμιάδης, Ε. ,2003).

2.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΝΕΡΓΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

Τα ενεργά συστήματα είναι εκείνα που καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από άλλη εξωτερική πηγή ή από το ίδιο το όργανο καταγραφής. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια προς την επιφάνεια και στην συνέχεια ανακλάται επιστρέφει και καταγράφεται η «ηχώ» του σήματος από το ίδιο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου οργάνου είναι τα Ραντάρs που εκπέμπουν στην περιοχή του μικροκυματικού τμήματος. Η ανάγκη των ενεργών συστημάτων σε ενέργεια είναι μεγάλη για το λόγο αυτό και η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής. Οι απεικονιστές μπορεί να είναι αερομεταφερόμενοι (συνήθως σε αεροπλάνα) ή σε διαστημικές εξέδρες (δορυφόρους).Η καταγραφή του χρόνου επιστροφής του παλμού στα όργανα του δορυφόρου είναι αυτή που καθορίζει τη θέση των γήινων χαρακτηριστικών επάνω στην εικόνα.

Το μήκος κύματος που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των ενεργών συστημάτων, κυμαίνεται μεταξύ 1mm – 100 cm κάτι που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα κάνει ικανά να διαπερνούν την ατμόσφαιρα κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες. Οι ενεργοί αισθητήρες περιλαμβάνουν τα εξής τα Ραντάρ, σκεδαστές (Scatterometers), Lidar, Laser Altimeter και ηχοβολιστικά μηχανήματα (Sounders).

Ένα σύστημα Ραντάρ δεν κοιτάζει κατευθείαν προς το ναδίρ, αλλά προς τα κάτω και πλαγίως. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το κυριότερο πλεονέκτημα των Ραντάρ είναι η ικανότητα της ακτινοβολίας να διαπερνά τα σύννεφα καθώς επίσης και η ικανότητα να καταγράφει την ακτινοβολία σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Γι’ αυτό το λόγο τα Ραντάρ καλούνται και παντός καιρού. Επιπλέον, ένας αισθητήρας Ραντάρ έχει την δική του πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένας ενεργός αισθητήρας ραντάρ, είτε αερομεταφερόμενος είτε διαστημικός, εκπέμπει την μικροκυματική ακτινοβολία με μία σειρά από παλμούς πάνω σε μια κεραία. Όταν η ενέργεια φθάνει στο στόχο, κάποιο μέρος της επιστρέφει πίσω στον αισθητήρα. Η μικροκυματική ακτινοβολία που επιστρέφει ανιχνεύεται, μετράται, και χρονομετρείται. Ο χρόνος που απαιτείται για την ενέργεια για να ταξιδέψει στο στόχο και την επιστροφή πίσω στον αισθητήρα καθορίζει την απόσταση ή το εύρος του αισθητήρα και του εκάστοτε στόχου. Με την καταγραφή του εύρους και του μεγέθους της ενέργειας που αντανακλάται από όλους τους στόχους καθώς το σύστημα διαπερνά μια περιοχή, με αυτό τον τρόπο μπορεί να παραχθεί μια δισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας

(Μιγκίρος, Γ. , Παυλόπουλος, Α., Παρχαρίδης, Ι., Γατσής, Ι., Ψωμιάδης, Ε. , 2003).

2.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται τα σημαντικότερα συστήματα τηλεπισκόπησης με χρήση Ραντάρ.

Πίνακας 1. Δορυφορικά συστήματα Ραντάρ

Δορυφόρος	**Χρονικό Διάστημα Λήψης**	**Περίοδος λειτουργίας**
SEASAT	3 ημέρες	1978 (3 μήνες)
SIR-C	1 ημέρα	Οκτώβριος 1994
ERS-1	3 ημέρες	1991 & 1994 (3 μήνες)
ERS	35 ημέρες	1994 -
ERS-1 / ERS-2	1 ημέρα	1995 – 2000
JERS-1	44 ημέρες	1992 – 1998
ENVISAT ASAR	35 ημέρες	2002 -
ERS-2 / ENVISAT ASAR	28 λεπτά	2002 -
ERS-2 / ENVISAT ASAR	35 ημέρες (± 28 λεπτά)	2002 -
PALSAR / PALSAR	46 ημέρες	2006 -
RADARSAT-1/RADARSAT-1	24 ημέρες	1995 -
RADARSAT-2/RADARSAT-2	24 ημέρες	Έναρξη λειτουργίας 2007
TerraSAR-X / TerraSAR-X	11 ημέρες	Έναρξη λειτουργίας 2007

- **ERS-1,2**

Το πρόγραμμα ERS (ευρωπαϊκό σύστημα δορυφόρων τηλεπισκόπησης) της ευρωπαϊκής διαστημικής υπηρεσίας είναι ένα από το πιο ουσιαστικά μέρη ενός σημαντικού ευρωπαϊκού προγράμματος παρατήρησης της γης σχετικά με: την μετεωρολογία, την κλιματολογία, την ωκεανογραφία, την διαχείριση των εδαφικών πόρων κτλ.

Ο ERS-1, ήταν ο πρώτος δορυφόρος αυτού του προγράμματος, ο οποίος εκτοξεύθηκε τον Ιούλιο του 1991.

Η αποστολή του ERS-1 περιστρέφεται ουσιαστικά στην πολυετή παρατήρηση των ωκεανών, των ζωνών πάγου και των

παράκτιων περιοχών. Η πλατφόρμα της φέρει ενεργά όργανα που μετρούν τις φυσικές παραμέτρους όπως τα σημαντικά ύψη κυμάτων, τις ταχύτητες και τις κατευθύνσεις αέρα, ή την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας. Ο ERS-1 είναι εξοπλισμένος με όργανα καταγραφής, τα οποία είναι (Πίνακας 2):

- Το AMI (Active Microwave Instrument) είναι ένα όργανο το οποίο συνδυάζει τις λειτουργίες δύο διαφορετικών Ραντάρ, το SAR (Synthetic Aperture Ραντάρ) και το Scatterometer. Τα όργανα αυτά δίνουν τρεις τρόπους καταγραφής που είναι το SAR image, το SAR wave και το Wave Scatterometer. Με το Image Mode επιτυγχάνονται εικόνες υψηλής ανάλυσης, πλάτους 100 km. Η εικόνα δημιουργείται από το χρόνο που απαιτείται για την επιστροφή και την ένταση του σήματος, τα οποία εξαρτώνται από το ανάγλυφο, τις διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας και της απόστασής της από το δορυφόρο. Το Scatterometer χρησιμοποιεί τρεις κεραίες για την μέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας.
- Το Ραντάρ Altimeter (RA) είναι ένα Ραντάρ το οποίο παρέχει ακριβείς μετρήσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας, των υψών κυμάτων, της ταχύτητας του ανέμου της επιφάνειας της θάλασσας και διάφορων παραμέτρων του πάγου.
- Το ATSR (Along Track Scanning Radiometer) και το MW (Microwave Sounder) συνδυάζουν το υπέρυθρο και το μικροκυματικό φάσμα για την μέτρηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας, στο επάνω τμήμα των νεφών, την κάλυψη των νεφών και τους ατμοσφαιρικούς υδρατμούς.
- Το PRARE (Precise Range and Range Rate Equipement) χρησιμοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό των δορυφορικών χαρακτηριστικών θέσης και τροχιάς, και για το γεωδαιτικό «καθορισμό» των επίγειων σταθμών.
- Το LLR (Laser Retro-Reflector) επιτρέπει τη μέτρηση της θέσης του δορυφόρου και της τροχιάς του χρησιμοποιώντας κυμαινόμενους σταθμούς (ranging stations) λέιζερ στο έδαφος (Μιγκίρος, Γ. , Παυλόπουλος, Α., Παρχαρίδης, Ι., Γατσής, Ι., Ψωμιάδης, Ε. 2003).

ERS-1	
ORBIT	INSTRUMENTS
Type: Near-circular, polar, Sun-synchronous Altitude: 782 to 785 km Inclination: 98.52 deg. Period: About 100 minutes Orbits per day: 14.3 Repeat cycle: 3-day, 35-day and 176-day	Active Microwave Instrument comprising a SAR (image and wave modes) and a Wind Scatterometer, Ραντάρ Altimeter, an Along Track Scanning Radiometer, Precise Range and Range-rate Equipment and Laser Retro-relectors
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά του ERS-1	
Πηγή: European Space Agency (ESA)	

Με άλλα λόγια, ο δορυφόρος ERS-1 περιλαμβάνει όργανα τα οποία επιτρέπουν την παρατήρηση της γης με υψηλή ακρίβεια, σε όλες τις καιρικές συνθήκες και καθ΄όλη την διάρκεια της μέρας.

Ο ERS-2 διαδέχθηκε τον ERS-1 τον Απρίλιο του 1995 και βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία. Αυτός ο δορυφόρος, είναι εξοπλισμένος με ένα πρόσθετο όργανο (το GOME), το οποίο επιτρέπει την μέτρηση του όζοντος της ατμόσφαιρας και την παρατήρηση των αλλαγών στην κάλυψη της βλάστησης. Αυτό κάνει την αποστολή του ERS-2 μεγαλύτερη από του ERS-1. Επιπρόσθετα, για 9 μήνες κατά την διάρκεια του 1995-1996, ο ERS-1 και ο ERS-2 λειτουργούσαν στην ίδια τροχιά την ημέρα εκτός από την tandem αποστολή.

- **ENVISAT**

Ο δορυφόρος ERS έχει αντικατασταθεί από τον ENVISAT η εκτόξευση του οποίου έγινε το 2000. Ένα προηγμένο σύστημα ραντάρ (ASAR),το οποίο παράγει υψηλής ποιότητας εικόνες στο μικροκυματικό τμήμα του φάσματος και λειτουργεί στην φασματική ζώνη C, εξασφαλίζει την συνέχεια του (SAR) της αποστολής ERS-1/2. Χαρακτηρίζεται από την ενισχυμένη ικανότητα που έχει όσον αφορά την κάλυψη , το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης, την πόλωση, και τον τρόπο λειτουργίας του.

ENVISAT	
ORBIT	INSTRUMENTS
Type: Sun-synchronous Altitude: 796 km Inclination: 98.5 deg. Period: About 100 minutes Repeat cycle: 35-days	GOMOS, AATSR, MWR, MERIS, MIPAS, SCIAMACHY, RA-2, DORIS, LRR
Πίνακας 3 . Χαρακτηριστικά του ENVISAT	
Πηγή: European Space Agency	

Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με τα εξής όργανα καταγραφής (Πίνακας 3):

- *(AATSR) Advanced Along-Track Scanning Radiometer*, το οποίο καταγράφει την θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και ουσιαστικά αποτελεί συνέχεια του οργάνου ATSR του δορυφόρου ERS.
- *(ASAR) Advanced Synthetic Aperture Ραντάρ*, το οποίο όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι ένα προηγμένο σύστημα ραντάρ και παράγει υψηλής ποιότητας εικόνες στο μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- *(DORIS) Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*, όργανο που χρησιμοποιείται για τον ακριβή εντοπισμό του δορυφόρου στο διάστημα επιτρέποντας ακόμα και την ακρίβεια λίγων εκατοστών.
- *(GOMOS) Global Ozone monitoring by Occultation of Stars*, είναι ένα όργανο το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση του όζοντος καθώς και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας.
- (LLR) Laser Retro-Reflector, το οποίο επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό της τροχιάς του δορυφόρου.
- (MERIS)Medium Resolution Imaging Spectrometer, το οποίο καταγράφει την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια και τα σύννεφα και την συγκέντρωση της χλωροφύλλης στους ωκεανούς και στα παράκτια δίκτυα.
- (MIPAS) Michelson Resolution for Passive Atmospheric Sounding, το οποίο καταγράφει πληροφορίες για την ατμοσφαιρική πίεση και την θερμοκρασία.
- (MWR) Microwave Radiometer, όργανο που καταγράφει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών.
- (RA-2) Ραντάρ Altimeter, το οποίο καταγράφει το ύψος των κυμάτων, την ταχύτητα των ανέμων, την τοπογραφία της γης και της θάλασσας.
- (SCIAMACHY) Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, όργανο το οποίο καταγράφει την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αέρια και αερολύματα.

➢ SEASAT

Ο Seasat ήταν ο πρώτος δορυφόρος που εκτοξεύθηκε τον Ιούνιο του 1978, ο οποίος σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση των ωκεανών της Γης και είχε πάνω του το πρώτο διαστημικό σύστημα SAR. Η τροχιά του ήταν σχεδόν πολική ύψους 800 km με

κλίση περίπου 108 μοιρών. Κάθε ημέρα ολοκληρώνονταν 14 τροχιές (Πίνακας 4).

Τα 5 συμπληρωματικά όργανα που καταγράφουν πληροφορίες για την επιφάνεια την θάλασσας είναι:

- *Ραντάρ Altimeter* το οποίο καταγράφει το ύψος του διαστημικού σκάφους από την επιφάνεια της θάλασσας.
- *Microwave scatterometer* το οποίο μετράει την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου.
- *Scanning multichannel microwave* το οποίο καταγράφει την θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας.
- *Visible and infrared radiometer* το οποίο προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά των νεφών, της ξηράς και του νερού.
- *Synthetic Aperture Ραντάρ (SAR)*, λειτουργεί στην μικροκυματική φασματική ζώνη L (L-band, 23 cm), HH πόλωση, και έχει σταθερή γωνία που επιτρέπει την παρακολούθηση τα κύματα της επιφάνειας της γης καθώς επίσης και την παρακολούθηση της θάλασσας των πόλων.

SEASAT	
ORBIT	INSTRUMENTS
Type: Sun-synchronous Altitude: 800 km Inclination: 108 deg. Period: 14 orbits/day Repeat cycle: 35-days	Ραντάρ Altimeter, Microwave scatterometer, Scanning multichannel microwave, Visible and infrared radiometer, Synthetic Aperture Ραντάρ (SAR)
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά του SEASAT	
Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing	

Ο Seasat SAR λειτούργησε για 105 ημέρες μέχρι τις 10 Οκτωβρίου του 1978, όταν ξαφνικά ένα ογκώδες κύκλωμα καταστράφηκε στο δορυφορικό ηλεκτρικό σύστημα. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του Seasat, συλλέχθηκαν περίπου 42 ώρες δεδομένων.

➢ RANTARSAT-1, 2

Οι δορυφόροι PANTARSAT είναι οι πρώτοι που εκτοξεύθηκαν από τον Καναδά. Ο PANTARSAT-1 εκτοξεύθηκε το 1995 και ο PANTARSAT-2 έχει προγραμματιστεί να εκτοξευθεί το 2007. Αυτοί οι δορυφόροι εστιάζουν στη χρήση των αισθητήρων ραντάρ για να παρέχουν πληροφορίες για τη γήινη επιφάνεια κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες ακόμη κατά την διάρκεια της νύχτας.

Ο RADARSAT -1 λειτούργησε για πέντε έτη και ήταν εξοπλισμένος με το ραντάρ SAR. Χρησιμοποιούσε μια ενιαία συχνότητα στο μικροκυματική φασματική ζώνη C. Το ραντάρ SAR έχει την μοναδική ικανότητα να διαμορφώνει και να κατευθύνει την δέσμη του ραντάρ σε εύρος 500 km με χωρική διακριτική που κυμαίνεται από 10 έως 100 m. Το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης κυμαίνεται από 20 έως περισσότερο από 50 μοίρες. Ο δορυφόρος παρέχει ολοκληρωμένη παγκόσμια κάλυψη. Η τροχιά του δορυφόρου επαναλαμβανόταν κάθε 24 ημέρες (Πίνακας 5). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο RADARSAT -1 είχε ηλιοσύγχρονη τροχιά. Αυτό είχε ως συνέπεια οι χρήστες να μπορούν επαναλαμβανόμενα να παρατηρούν την ίδια σκηνή στην ίδια τοπική ώρα. Επιπλέον, ο RADARSAT -1 μπορεί να μεταδώσει δεδομένα σε γήινους σταθμούς σε διαφορετική στιγμή σε σχέση με τους άλλους δορυφόρους, εκ των οποίων οι περισσότεροι χρησιμοποιούν μεσο-πρωινή τροχιά (mid-morning orbit).

RADARSAT-1	
ORBIT	INSTRUMENTS
Type: Sun-synchronous Altitude: 500 km Inclination: >50 deg. Repeat cycle: 24-days	Ραντάρ Altimeter, Microwave scatterometer, Scanning multichannel microwave, Visible and infrared radiometer, Synthetic Aperture Ραντάρ (SAR)
Πίνακας 5 . Χαρακτηριστικά του SEASAT	
Πηγή: Canada Centre for Remote Sensing	

Ο RADARSAT -2 έχει προγραμματιστεί να εκτοξευθεί το καλοκαίρι του 2007. Έχει σχεδιαστεί με σημαντικά και ισχυρά χαρακτηριστικά τα οποία περιλαμβάνουν χωρική διακριτική ικανότητα 3 m, ευελιξία στην επιλογή της πόλωσης, επιλογές αριστερής και δεξιάς απεικόνισης (left and right-looking), ανώτερη αποθήκευση δεδομένων και ακριβέστερες μετρήσεις της θέσης και του ύψους των διαστημικών σκαφών.

- **JERS-1**

Ο δορυφόρος JERS-1 τέθηκε σε πολική τροχιά τον Φεβρουάριο του 1992 και σταμάτησε την λειτουργία του τον Οκτώβριο του 1998. Ο JERS-1 κατασκευάστηκε από τους Ιάπωνες και έφερε επάνω του ένα οπτικό δέκτη OPS (Optical System) και ένα ραντάρ τύπου SAR (Πίνακας 6). Ο δέκτης OPS έφερε 8 φασματικές ζώνες, στο ορατό, κοντινό και μέσο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εν αντιθέσει με το SAR που λειτουργεί στην μικροκυματική φασματική ζώνη L.

JERS-1	
ORBIT	INSTRUMENTS
Type: Sun-synchronous Altitude: 568 km Resolution: 18 m Period: 14 orbits/day Repeat cycle: 44-days Swath Width: 75 km	OPS (Optical Sensor), SAR (Synthetic Aperture Ραντάρ)
Πίνακας 6 . Χαρακτηριστικά του JERS-1	
Πηγή: European Space Agency (ESA)	

Οι εφαρμογές της αποστολής εστίασαν στην έρευνα για τα γεωλογικά φαινόμενα, τις χρήσεις γης, παρατήρηση των παράκτιων περιοχών, γεωλογικών χαρτών, παρατήρηση του περιβάλλοντος και των φυσικών καταστροφών καθώς επίσης και της συμβολομετρίας με σκοπό την ανίχνευση τυχόν παραμόρφωσης.

- **ALOS**

Ο ALOS (Advanced Land Observing Satellite) ή αλλιώς Daichi, είναι ένας ιαπωνικός δορυφόρος ο οποίος τέθηκε σε τροχιά στις 24 Ιανουαρίου του 2006.

Ο συγκεκριμένος δορυφόρος παρέχει υψηλής ποιότητας δεδομένα, χαμηλού κόστους δεδομένα για απεικονίσεις τοπογραφίας, παρακολούθηση και μελέτη φυσικών καταστροφών και περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών. Επιπρόσθετα, ο ALOS παρέχει μια εναλλακτική πηγή δεδομένων καθώς επίσης και ένα αντίγραφο δεδομένων του Landsat.

Ο δορυφόρος ALOS είναι ένας από τους μεγαλύτερους δορυφόρους του κόσμου. Οι στόχοι του είναι η παροχή χαρτών για την Ιαπωνία και για άλλες χώρες συμπεριλαμβανομένου και των περιοχών της Ασίας και του Ειρηνικού. Επίσης, χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της βιώσιμης ανάπτυξης, των φυσικών καταστροφών , των φυσικών πόρων και τέλος αναπτύσσει την απαραίτητη τεχνολογία για την μελλοντική παρατήρηση της γης μέσω δορυφόρων.

Ο ALOS φέρει επάνω του 3 κύριους αισθητήρες.

- *PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping):* έχει σχεδιαστεί κυρίως για χαρτογραφήσεις. Αποτελείται από 3 τηλεσκόπια καθένα από τα οποία παρέχει χωρική διακριτική ικανότητα 2,5 m. Αυτές οι προδιαγραφές διευκολύνουν την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM), και επιτυγχάνουν ακρίβεια για τους χάρτες κλίμακας 1:25.000.

- *AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer, type 2:* είναι ένας αισθητήρας χρήσιμος για την παρακολούθηση του εδάφους και των παράκτιων ζωνών και παρέχει την καλύτερη χωρική κάλυψη και τους καλύτερους χάρτες ταξινόμησης χρήσεων γης όσον αφορά την παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθώς επίσης και των φυσικών καταστροφών.
- PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Ραντάρ): είναι ένας ενεργός μικροκυματικός αισθητήρας ο οποίος λαμβάνει εικόνες τόσο κατά την διάρκεια νεφοκάλυψης όσο και κατά την διάρκεια ημέρας και νύχτας. Έχει μια σειρά από λειτουργίες όπως:
  - ✓ Πολύ καλό σήμα ή υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα
  - ✓ Άμεση μετάδοση δεδομένων
  - ✓ ScanSAR
  - ✓ Polarimetric

Πίνακας 7. Φασματικές ζώνες μικροκυμάτων (γκρι φόντο-αερομεταφερούμενα και δορυφορικά συστήματα SAR).

Band	Frequency	Wavelength
VHF	30-300 MHz	10-1 m
P-band	280-390 MHz	107-77 cm
UHF	300 MHz – 1GHz	100-30 cm
L-band	1-2 GHz	30-15 cm
S-band	2-4 GHz	15-7.5 cm
C-band	4-8 GHz	7.5-3.75 cm
X-band	8-12.5 GHz	3.75-2.40 cm

Αυτήν την περίοδο, τα δορυφορικά συστήματα SAR λειτουργούν σε μια από τις ακόλουθες ζώνες μικροκυμάτων (Πίνακας 7):

- C - 5,3 GHz (ERS και Envisat, ο καναδικός δορυφόρος Radarsat, και οι αμερικάνικες αποστολές)
- L – 1,2 GHz (ο ιαπωνικοί J-ERS και ALOS)
- X – 10 GHz (ο γερμανο-ιταλικός X-SAR)

3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΙΚΟΝΟΛΗΨΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πρόκειται να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο συντίθεται και αποτελείται μια εικόνα Ραντάρ. Ειδικότερα, τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται η εικόνα,οι παραμορφώσεις που παρουσιάζουν καθώς επίσης και τα είδη των προϊόντων-εικόνων.Επιπλέον, θα ακολουθήσει η ανάλυση της γεωμετρίας της εικονοληψίας των συστημάτων ραντάρ.

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΜΙΑ ΕΙΚΟΝΑ ΡΑΝΤΑΡ

Όλες οι εικόνες Ραντάρ εμφανίζουν μία κοκκώδη ασπρόμαυρη υφή η οποία καλείται θόρυβος (speckle). Αυτό συμβαίνει τυχαία και προκαλείται από τις πολλαπλές διασκορπίσεις (scattering) του σήματος οι οποίες θα εμφανιστούν σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας.

Σε μια εικόνα Ραντάρ η φωτεινότητα των χαρακτηριστικών της εξαρτάται από το μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας η οποία επιστρέφει στο Ραντάρ από τους διάφορους στόχους της γήινης επιφάνειας. Το μέγεθος ή η ένταση της ανακλώμενης ενέργειας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια αλληλεπιδρά με την γήινη επιφάνεια, η οποία είναι μια λειτουργία διάφορων μεταβλητών ή παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος Ραντάρ (συχνότητα, πόλωση, γεωμετρία, κτλ.) καθώς επίσης και χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (χρήσεις γης, ανάγλυφο, τοπογραφία κτλ.). Επειδή όμως μερικά από τα παραπάνω χαρακτηριστικά συσχετίζονται μεταξύ τους, αλλαγές που λαμβάνουν χώρα σε διάφορες παραμέτρους επηρεάζουν την απόκριση άλλων παραμέτρων, των οποίων ο συνδυασμός επηρεάζει με την σειρά τους την ποσότητα της ενέργειας η οποία θα οπισθοσκεδαστεί. Κατά συνέπεια, η φωτεινότητα των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων σε μια εικόνα είναι συνήθως ένας συνδυασμός αρκετών μεταβλητών. Εντούτοις, ,μπορούν να ομαδοποιηθούν αυτά τα χαρακτηριστικά σε τρεις περιοχές που ελέγχουν πλήρως τις αλληλεπιδράσεις της ενέργειας με τους στόχους-αντικείμενα της επιφάνειας οι οποίες είναι:

- η τραχύτητα της επιφάνειας του στόχου
- η σχέση μεταξύ της γεωμετρίας της επιφάνειας με εκείνη του Ραντάρ
- διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου (υγρασία)

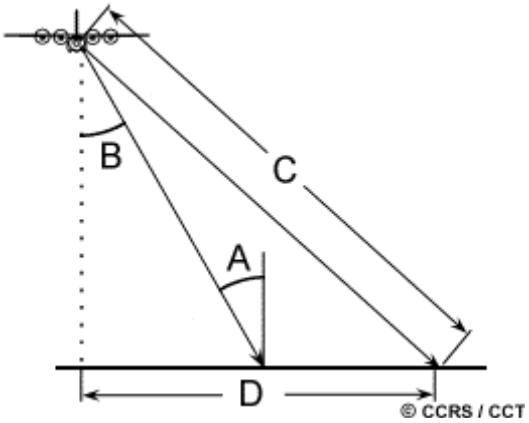
Η τραχύτητα της επιφάνειας ενός χαρακτηριστικού γνωρίσματος ελέγχει πώς η μικροκυματική ενέργεια αλληλεπιδρά με την επιφάνεια ή τον στόχο και είναι γενικά ο κυρίαρχος παράγοντας ο οποίος καθορίζει τους τόνους που απεικονίζονται σε μια εικόνα ραντάρ. Εάν μια επιφάνεια εμφανίζεται τραχιά ή ομαλή σε ένα ραντάρ εξαρτάται από το μήκος κύματος και την γωνία πρόσπτωσης.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά την διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται γραμμικά καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία των πετρωμάτων και των εδαφών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα υγρά εδάφη να εμφανίζονται φωτεινότερα στις εικόνες Ραντάρ απ' ότι τα ξηρά εδάφη. Άρα η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται όταν υπάρχει οποιοδήποτε ίχνος (Μερτίκας, Π.Σ,1999).

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

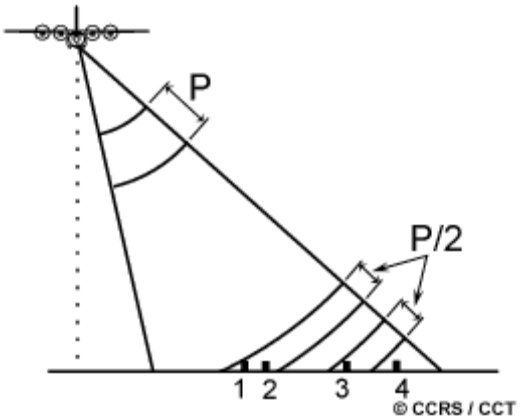
Η γεωμετρία απεικόνισης ενός συστήματος ραντάρ είναι διαφορετική από εκείνη των συστημάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως στην οπτική τηλεπισκόπηση. Η πλατφόρμα ταξιδεύει προς τα εμπρός στην κατεύθυνση πτήσης (A) με το ναδίρ (B) άμεσα κάτω από την πλατφόρμα. Η μικροκυματική ακτινοβολία διαβιβάζεται πλάγια και κάθετα προς την κατεύθυνση της πτήσης που «φωτίζει» ένα έυρος σάρωσης (C) το οποίο αντισταθμίζεται από το ναδίρ. Το εύρος (D) αναφέρεται στην εγκάρσια διάσταση που είναι κάθετη στην κατεύθυνση της πτήσης, ενώ το αζιμούθιο (E) αναφέρεται στην παράλληλη διάσταση που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της πτήσης. Αυτή η side-looking γεωμετρία είναι χαρακτηριστική για όλα τα συστήματα ραντάρ απεικόνισης (αερομεταφερόμενος ή διαστημικός).

Το τμήμα της σάρωσης της εικόνας που είναι πιο κοντά στο ναδίρ της πλατφόρμας του ραντάρ καλείται εγγύς περιοχή (near range) (A) ενώ το τμήμα της σάρωσης που είναι πιο μακριά από το ναδίρ καλείται άπω περιοχή (far range) (B).



Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ του σήματος του ραντάρ και της επιφάνειας της γης (A) η οποία αυξάνεται όταν μετακινείται από την εγγύς προς της άπω περιοχή. Η γωνία κατόπτευσης (B) είναι η γωνία στην οποία το ραντάρ "εξετάζει" την επιφάνεια. Στην εγγύς περιοχή, η γεωμετρία μπορεί να αναφερθεί ως απότομη, σε σχέση με την άπω περιοχή, όπου η γεωμετρία είναι επιφανειακή. Και στις δύο περιπτώσεις η κεραία ραντάρ μετρά την ακτινωτή γραμμή απόστασης μεταξύ του ραντάρ και του κάθε στόχου στην επιφάνεια. Αυτή η απόσταση καλείται κεκλιμένη (C). Η εδαφική απόσταση (D) είναι η αληθινή οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο που μετριέται στο κεκλιμένο εύρος (slant range).

Το εύρος ή η εγκάρσια ανάλυση (range or across-track resolution) εξαρτάται από το μήκος του σήματος (P). Δύο ευδιάκριτοι στόχοι που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης θα επιλυθούν στην εγκάρσια απόσταση εάν ο χωρισμός τους είναι μεγαλύτερος από το μισό μήκος του σήματος. Για παράδειγμα, οι στόχοι 1 και 2 δεν θα είναι ευδιαχώριστοι σε αντίθεση με τους 3 και 4. Η εγκάρσια ανάλυση (slant range resolution) παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το εύρος. Αντίθετα, όταν προβάλλεται στις επίγειες συντεταγμένες, η ανάλυση στην εγκάρσια απόσταση θα είναι εξαρτώμενη της γωνίας πρόσπτωσης. Κατά συνέπεια, για μία αμετάβλητη κεκλιμένη ανάλυση, η εγκάρσια ανάλυση θα μειωθεί αυξάνοντας το εύρος.

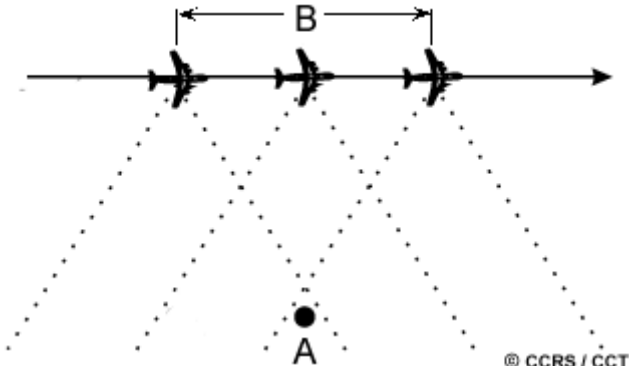


Το αζιμούθιο ή η παράλληλη ανάλυση (along track resolution) καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος του σήματος του ραντάρ και της κεκλιμένης απόστασης. Αυτό το εύρος δέσμης (A) της ακτινοβολίας είναι ένα μέτρο του πλάτους του εύρους φωτισμού. Καθώς ο φωτισμός του ραντάρ διαδίδει την αυξανόμενη απόσταση από τον αισθητήρα, η ανάλυση αζιμουθίου αυξάνεται (γίνεται πιο αδρή). Σε αυτήν την απεικόνιση, οι στόχοι 1 και 2 στην εγγύς περιοχή θα ήταν ευδιαχώριστοι, αλλά οι στόχοι 3 και 4 στην άπω περιοχή δεν θα είναι ευδιαχώριστοι.Το εύρος δέσμης ραντάρ είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το μήκος της κεραίας (επίσης καλείται άνοιγμα) κάτι που σημαίνει ότι μια μακρύτερη κεραία (ή άνοιγμα) θα παράγει μια στενότερη ακτίνα και μια λεπτότερη (αδρανή) ανάλυση.

Η λεπτότερη παράλληλη αναλυση (range resolution) μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ενός μικρότερου μήκους σήματος, το οποίο μπορεί να γίνει με ορισμένες προδιαγραφές. Η λεπτότερη ανάλυση αζιμουθίου μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του μήκους της κεραίας. Εντούτοις, το πραγματικό μήκος της κεραίας είναι περιορισμένο από αυτό που μπορεί να μεταφερθεί σε μια αερομεταφερόμενη ή διαστημική πλατφόρμα.

Για τα αερομεταφερόμενα ραντάρ, οι κεραίες περιορίζονται συνήθως σε ένα έως δύο μέτρα. Για τους δορυφόρους μπορεί να είναι 10 έως 15 μέτρα αντίστοιχα. Για να υπερνικήσουν αυτόν τον περιορισμό μεγέθους, η μπροστινή κίνηση της πλατφόρμας της ειδικής καταγραφής και της επεξεργασία των διασκορπισμένων ηχώ χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν μια πολύ μακριά κεραία και να αυξήσουν έτσι την ανάλυση του αζιμούθιου.

Η παρακάτω εικόνα επεξηγεί πώς αυτό επιτυγχάνεται. Αν ένας στόχος (A) αρχικά εισάγει την ακτίνα ραντάρ (1), οι διασκορπισμένες ηχοί καταγράφονται από κάθε εκπεμπόμενο σήμα.



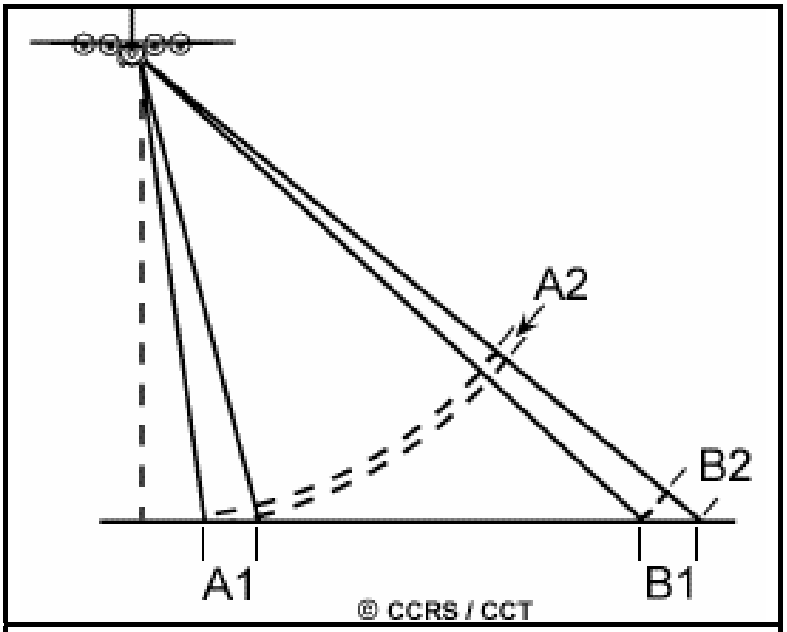
Εικόνα 2 . Καταγραφή ενός στόχου από ένα σύστημα Ραντάρ
Πηγή: CCRS/CCT

Δεδομένου ότι η πλατφόρμα συνεχίζει να μετακινείται, καταγράφονται όλες οι ηχοί από το στόχο για κάθε σήμα καθόλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που ο στόχος είναι μέσα στην ακτίνα του σήματος. Το σημείο στο οποίο ο στόχος αφήνει την ακτίνα ραντάρ (2) κάποιο χρόνο αργότερα, καθορίζει το μήκος της προσομοιωμένης ή συντεθειμένης κεραίας (B). Οι στόχοι στην άπω περιοχή, όπου η ακτίνα είναι ευρύτερη θα φωτιστεί για μια μακρύτερη χρονική περίοδο απ'ότι αντικείμενα που βρίσκονται στην εγγύς περιοχή. Το εκτεταμένο εύρος της δέσμης του σήματος, συνδυάζεται με τον αυξανόμενο χρόνο ενός στόχου που βρίσκεται μέσα στην ακτίνα καθώς η επίγεια σειρά (ground range) αυξάνεται, έτσι ώστε η ανάλυση να παραμένει σταθερή σε ολόκληρο το εύρος σάρωσης. Αυτή η μέθοδος καλείται συνθετικό άνοιγμα ραντάρ, ή SAR. Τα περισσότερα αερομεταφερόμενα και διαστημικά ραντάρ χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο ραντάρ.

3.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

Όπως συμβαίνει με όλα τα συστήματα τηλεπισκόπησης, η γεωμετρία ενός ραντάρ οδηγεί σε ορισμένες γεωμετρικές παραμορφώσεις που αφορούν την εικόνα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν βασικές διαφορές των εικόνων ραντάρ που οφείλονται στη side-looking γεωμετρία του, και στο γεγονός ότι το ραντάρ είναι κυρίως ένας μηχανισμός που μετρά την απόσταση. Η παραμόρφωση του slant-range εμφανίζεται επειδή το ραντάρ

μετρά την απόσταση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων σε slant-range και όχι την αληθινή οριζόντια απόσταση κατά μήκος του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κλίμακα της εικόνας να ποικίλει και να κινείται από την εγγύς περιοχή σε μια μακρινή περιοχή. Αν και οι στόχοι A1 και B1 είναι του ίδιου μεγέθους στο έδαφος, οι προφανείς διαστάσεις τους σε slant range (A2 και B2) είναι διαφορετικές (Εικόνα 3). Αυτό αναγκάζει τα αντικείμενα-στόχους που βρίσκονται στην εγγύς περιοχή να εμφανίζονται συμπιεσμένα σχετικά με την άπω περιοχή.



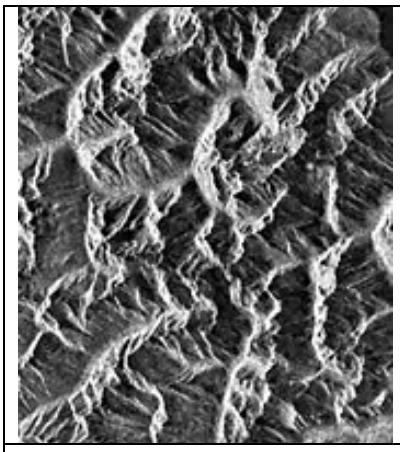
Εικόνα 3. Σχήμα παραμορφώσεων των αντικειμένων πάνω στη γη.
Πηγή: CCRS/CCT

Το Layover (αναστροφή) (Εικόνα 4), λαμβάνει χώρα όταν το σήμα του Ραντάρ φθάνει στην κορυφή ενός ψηλού χαρακτηριστικού-στόχου (B) προτού να φθάσει στην βάση (A). Το σήμα επιστροφής από την κορυφή του στόχου, επειδή αυτή είναι πιο κοντά στην κεραία του Ραντάρ, θα φθάσει νωρίτερα απ' ότι το σήμα από τη βάση του. Συνεπώς, αντί στην εικόνα να εμφανιστεί πρώτα η βάση και έπειτα η κορυφή, γίνεται αναστροφή (layover) των σημάτων και έτσι εμφανίζεται πρώτα η κορυφή και μετά η βάση.

Μια άλλη μορφή παραμόρφωσης μιας εικόνας Ραντάρ είναι η σμίκρυνση (foreshortening) (Εικόνα 4). Όταν το σήμα του Ραντάρ φτάνει στη βάση ενός ψηλού στόχου που κλίνει προς το Ραντάρ (π.χ. βουνό) πριν αυτό φτάσει στην κορυφή, τότε προκαλείται σμίκρυνση. Μεγαλύτερη σμίκρυνση συμβαίνει όταν το σήμα του Ραντάρ είναι κάθετο στην κλίση έτσι ώστε η κλίση, η βάση και η κορυφή να απεικονίζονται ταυτόχρονα.

Τόσο η σμίκρυνση όσο και η αναστροφή καταλήγουν σε σκιά. Η σκιά του Ραντάρ λαμβάνει χώρα όταν η δέσμη του Ραντάρ δεν είναι ικανή να «φωτίσει» την επιφάνεια της γης. Οι σκιές συντελούνται πίσω από κάθετα γνωρίσματα ή πλαγιές με απότομες

κλίσεις. Έτσι, εφόσον η δέσμη του σήματος δεν φτάνει στη γήινη επιφάνεια, οι σκιασμένες περιοχές θα εμφανιστούν σκοτεινές στην εικόνα.



Σμίκρυνση	Αναστροφή	Σκιές

Εικόνα 4 . Είδη παραμορφώσεων μιας εικόνας Ραντάρ.

3.4 ΕΙΔΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΆΡ

Τα δεδομένα παρέχονται σε ένα από τα παρακάτω formats.

- ✓ Ακατέργαστα δεδομένα (Raw)
- ✓ Single Look Complex (SLC)
- ✓ Εικόνα ακριβείας - Precision Image (PRI)

Τα Raw δεδομένα είναι δεδομένα τα οποία έχουν ληφθεί από το Ραντάρ, παραδείγματος χάρη σύνθετα εκτιμημένα δείγματα (complex valued samples) των διαδοχικών ηχών που λαμβάνονται από το Ραντάρ καθώς κινείται κατά μήκος της διαδρομής της πτήσης. Κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη ηχώ που διασκορπίζεται πίσω στο Ραντάρ από τα αντικείμενα-στόχους. Αξίζει να ληφθεί υπόψη ότι για κάθε στόχο υπάρχουν εκατοντάδες διάφορα echoes τα οποία αποκτούνται καθώς το Ραντάρ κινείται. Τα raw δεδομένα είναι ελαφρώς «θορυβώδη».

Τα δείγματα του Ραντάρ μπορούν να καταγραφούν σε μία από τις δύο μορφές. Εάν το λαμβανόμενο σήμα ήταν στη ζώνη βάσης, (heterodyned to baseband), τότε κάθε δείγμα είναι ένα σύνθετο ζευγάρι οριζόμενο από τα κανάλια I και Q.

Τα raw δεδομένα παρέχονται ως σύνθετα δείγματα με την μορφή bytes είτε ως ενιαίο πραγματικό byte ανά δείγμα, είτε ως IQ μορφή (σύνθετα ζευγάρια bytes), το οποίο αποτελείται από το πραγματικό (I) και το φανταστικό μέρος (Q). Από τα Raw δεδομένα αποκτούνται εικόνες SLC και PRI.

Οι SLC (Single Look Complex) εικόνες λαμβάνονται έπειτα από φιλτράρισμα των raw δεδομένων τόσο στο εύρος (range) όσο και στο αζιμούθιο (azimuth). Οι εικόνες SLC έχουν τις φυσικές συντεταγμένες του SAR, π.χ. slant range/azimuth γεωμετρία. Οι

SLC εικόνες όπως φαίνεται και από το όνομά τους, παρέχονται σε σύνθετη μορφή. Συνήθως, χρησιμοποιούνται 2 ή 4 bytes που αντιστοιχούν στο πραγματικό μέρος και αντίστοιχα 1 ή 2 bytes στο φανταστικό μέρος. Η μορφή του εικονοστοιχείου μιας εικόνας SLC μπορεί να είναι είτε ένα ζευγάρι από 2-byte (μικρών ακέραιων αριθμών-short integer), είτε ένα ζευγάρι από 4-bytes (δεκαδικές τιμές-float values). Για παράδειγμα, οι SLC εικόνες που υποβάλλονται σε επεξεργασία από το ESA PAFs δίνονται σε μορφή 2-byte.

Να σημειωθεί ότι οι SLC εικόνες για την SAR συμβολομετρία χρησιμοποιούνται σαν βάση για την δημιουργία των MLI εικόνων.

Οι MLI εικόνες (multi-look images) δημιουργούνται από τις SLC χρησιμοποιώντας τον χωρικό μέσο. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των διάφορων διαδοχικών εικονοστοιχείων μιας εικόνας SLC στο εύρος (range) και/ή στο αζιμούθιο. Αυτό καλείται επίσης multi-looking. Ο αριθμός των looks μιας εικόνας MLI αντιστοιχεί στον μέσο όρο των εικονοστοιχείων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ERS δορυφόρου 1x5 multi-looking αποτελείται από τον μέσο όρο 5 εικονοστοιχείων στο αζιμούθιο και 1 εικονοστοιχείου στο εύρος για την απόκτηση ενός εικονοστοιχείου. Η τελική MLI εικόνα είναι 5-look. Οι MLI εικόνες εμφανίζουν λιγότερο θόρυβο (speckle) αλλά επίσης μικρότερη ανάλυση συγκρινόμενη με μια εικόνα SLC. Με άλλα λόγια οι εικόνες MLI αντιπροσωπεύουν την ένταση οπισθοσκέδασης ενός στόχου.

Οι PRI (Precision Images) εικόνες παράγονται από τις raw εικόνες διαχωρίζοντας το εύρος της ζώνης του Doppler σε υποζώνες και έπειτα τον υπολογισμό του μέσου όρου των συντεθειμένων στοιχείων για κάθε υποζώνη. Σε αντίθεση, με τις SLC εικόνες, οι PRI εικόνες είναι σε γεωμετρία ground-range/azimuth (εδαφικής απόστασης). Οι PRI εικόνες χαρακτηρίζονται από το πώς πολλά ανεξάρτητα δείγματα έχουν υπολογιστεί έτσι ώστε να δημιουργηθεί η εικόνα. Ο αριθμός των ανεξάρτητων δειγμάτων αναφέρεται ως ένας αριθμός ανεξάρτητων looks. Οι συγκεκριμένες εικόνες παρέχονται σαν αληθινά δεδομένα, είτε με 2 ή 4 bytes για κάθε εικονοστοιχείο .

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

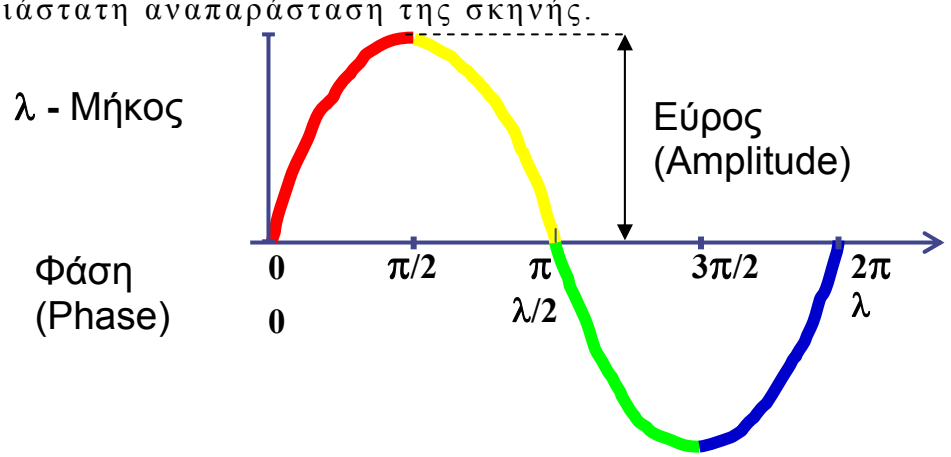
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται η θεωρία της συμβολομετρίας καθώς και οι βασικές αρχές που την διέπουν. Συγκεκριμένα θα αναλυθεί η συμβατική ή αλλιώς η απλή συμβολομετρία και τέλος οι εφαρμογές της.

4.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

4.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

Η τεχνική της συμβολομετρίας έχει σημειώσει ευρεία ανάπτυξη τα τελευταία 15 χρόνια και έχει γίνει μία από τις πιο χρήσιμες μεθόδους ανίχνευσης και παρακολούθησης της παραμόρφωσης του εδάφους. Οι κινήσεις του εδάφους οφείλονται κυρίως στα διάφορα φυσικά φαινόμενα, όπως καθιζήσεις, σεισμούς, κατολισθήσεις. Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις η παραμόρφωση μπορεί να οφείλεται και σε ανθρωπογενείς παράγοντες που σχετίζονται με την άντληση υδάτων, την ύπαρξη ορυχείων κ.λπ. Επιπρόσθετα, η συμβολομετρία βοηθά στην ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου καθώς επίσης και στην παραγωγή τοπογραφικών χαρτών. Να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη χωρίζεται στην απλή ή συμβατική συμβολομετρία της οποίας τα τεχνικά χαρακτηριστικά θα αναλυθούν παρακάτω, καθώς επίσης και στην συμβολομετρία των σταθερών ανακλαστήρων.

Όσον αφορά το τεχνικό μέρος της απλής τεχνικής, η συμβολομετρία αποτελείται από 2 εικόνες Ραντάρ μιας περιοχής, οι οποίες έχουν αποκτηθεί από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα (δηλαδή στο χώρο) ή στο χρόνο. Όταν ένας στόχος παρατηρείται κάτω από δύο ελαφρώς διαφορετικές γωνίες, η ανύψωση μπορεί να ανακτηθεί επιτρέποντας έτσι μια τρισδιάστατη αναπαράσταση της σκηνής.



Εικόνα 5 . Διάγραμμα της φάσης και του μήκους κύματος.
Πηγή: GAMMA Remote Sensing

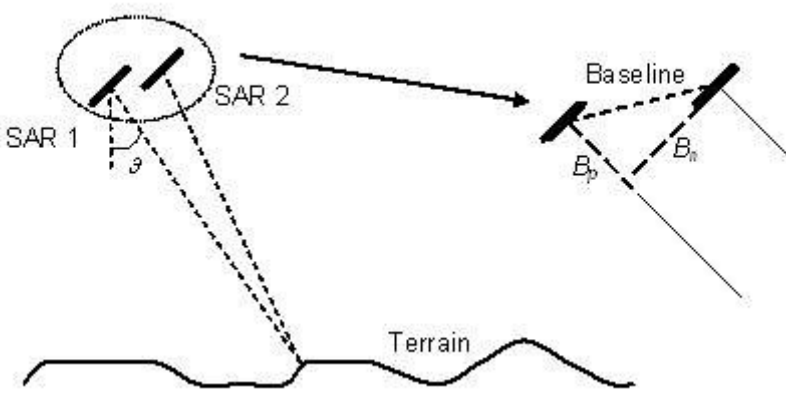
Παρόλο που οι SAR εικόνες αποτελούνται τόσο από το εύρος (amplitude) όσο και από την φάση (Εικόνα 4), η πληροφορία που περιλαμβάνεται στην φάση δεν είναι τόσο αξιοποιήσιμη όσο είναι για τους διάσπαρτους στόχους. Η φάση κυμαίνεται μεταξύ 0 και 2π. Ο θόρυβος (speckle) δεν επηρεάζει σημειακά αντικείμενα. Σε

αυτή την περίπτωση η φάση είναι καλά καθορισμένη και μπορεί να αξιοποιηθεί. Επιπλέον, οι εικόνες που λαμβάνονται από ίδιες σχεδόν θέσεις, εμφανίζουν περίπου τον ίδιο θόρυβο (speckle). Συνεπώς, στη συμβολομετρία όχι μόνο το εύρος (amplitude) του σήματος του Ραντάρ αλλά επίσης και η φάση δίνει χρήσιμη πληροφορία για τις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης. Αυτό συμβαίνει, επειδή η παρεμβολή των δύο σημάτων που περιέχονται στις δύο εικόνες ακυρώνει τις τυχαίες συμβολές (συνεισφορές) στη φάση.

Η συμβολομετρική φάση, είναι η διαφορά φάσης μεταξύ 2 εικόνων οι οποίες έχουν ληφθεί από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις, συμπεριλαμβανομένου της «πληροφορίας της γεωμετρίας» επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παραγωγή της τρισδιάστατης θέσης του στοιχείου διασποράς (scatter element). Η συμβολομετρία έχει αναπτυχθεί σε μία αποτελεσματική τεχνική που αφορά στην παραγωγή τοπογραφικών χαρτών.

Μια περαιτέρω ανάπτυξη της συμβολομετρίας είναι η διαφορική συμβολομετρία. Με την βοήθεια της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) μπορούν να παραχθούν χάρτες μετατόπισης που οφείλονται σε γεωφυσικά αίτια. Η ακρίβεια της εκτίμησης της φάσης χαρακτηρίζεται από τον βαθμό συνοχής των εικόνων. Η συνοχή(coherence) των εικόνων μειώνεται όταν αυξάνεται η ένταση της σκέδασης καθώς επίσης και όταν υπάρχουν χρονικές αλλαγές μεταξύ των λήψεων των δύο εικόνων (Ferretti et al, 1998).

Ένα απλό παράδειγμα ενός συμβολομετρικού SAR εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα), στην οποία δύο κεραίες Ραντάρ (SAR 1 και SAR 2) παρατηρούν ένα αντικείμενο-στόχο που βρίσκεται στο έδαφος από δύο διαφορετικές θέσεις στο χώρο.



Εικόνα 6. Παρατήρηση ενός στόχου από διαφορετικές θέσεις
Πηγή: GAMMA Remote Sensing

Σ'ένα τέτοιο SAR σύστημα, η απόσταση μεταξύ δύο κεραιών που παρατηρούν μια συγκεκριμένη περιοχή από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα, αναφέρεται ως βασική γραμμή (baseline) (Εικόνα). Η βασική γραμμή αν

αναλυθεί στο καρτεσιανό επίπεδο χωρίζεται σε δύο παραμέτρους, την κάθετη βασική γραμμή Bp (κάθετη στην γραμμή του σήματος) και την παράλληλη Bn (παράλληλη στην γραμμή του σήματος).

Εάν δύο εικόνες SAR λαμβάνονται ταυτόχρονα από δύο κεραίες τότε καλείται single-pass συμβολομετρία. Για την single-pass συμβολομετρία οι δύο κεραίες πρέπει να τοποθετηθούν σε μία πλατφόρμα, με τη μια κεραία να εκπέμπει σήματα και τις δύο να λαμβάνουν τα σήματα τα οποία επιστρέφουν πίσω στο Ραντάρ. Αυτή η διαμόρφωση εξετάζεται χαρακτηριστικά για τα αερομεταφερόμενα συστήματα. Το μόνο σύστημα που κάνει την single-pass συμβολομετρία είναι αυτό που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της αποστολής Shuttle Radar Topography Mission(SRTM).

Από την άλλη, όταν δύο εικόνες έχουν αποκτηθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τότε καλείται repeat-pass συμβολομετρία. Οι εικόνες μπορούν να αποκτηθούν είτε από τον ίδιο αισθητήρα είτε από αισθητήρες που βρίσκονται σε διαφορετικές πλατφόρμες (π.χ. ERS-1 και ERS-2, ERS και ENVISAT ASAR).

4.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ

Η μέθοδος της συμβολομετρίας χαρακτηρίζεται από κάποιες βασικές παραμέτρους.

Το σήμα που λαμβάνεται από το Ραντάρ από μια απόσταση R έχει ύψος (A) το οποίο σχετίζεται με την ένταση σκέδασης του στόχου και φάση (φ) η οποία σχετίζεται με την διπλή διαδρομή του σήματος μεταξύ του ραντάρ και του στόχου. Αυτή η διαδρομή μεταξύ του ραντάρ και του στόχου είναι η απόσταση μεταξύ του ραντάρ και του αισθητήρα. Επιπλέον, αξίζει να ειπωθεί ότι υπάρχουν επιπτώσεις στη φάση που προκύπτουν από την ανάλυση του εικονοστοιχείου επειδή διαφορετικοί σκεδαστές εντοπίζονται σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο εικονοστοιχείο. Μια περαιτέρω συμβολή στην φάση προκύπτει όταν το σήμα-κύμα "ταξιδεύει" με διηλεκτικές ιδιότητες διαφορετικές του κενού (π.χ. υδρατμοί και υγρό στρώμα χιονιού).

Η φάση φ του σήματος SAR $g = A\, e^{j\varphi}$ μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\Phi = -(4\pi/\lambda)\, R + \varphi_{scatter} + \varphi_{delay} \qquad (1)$$

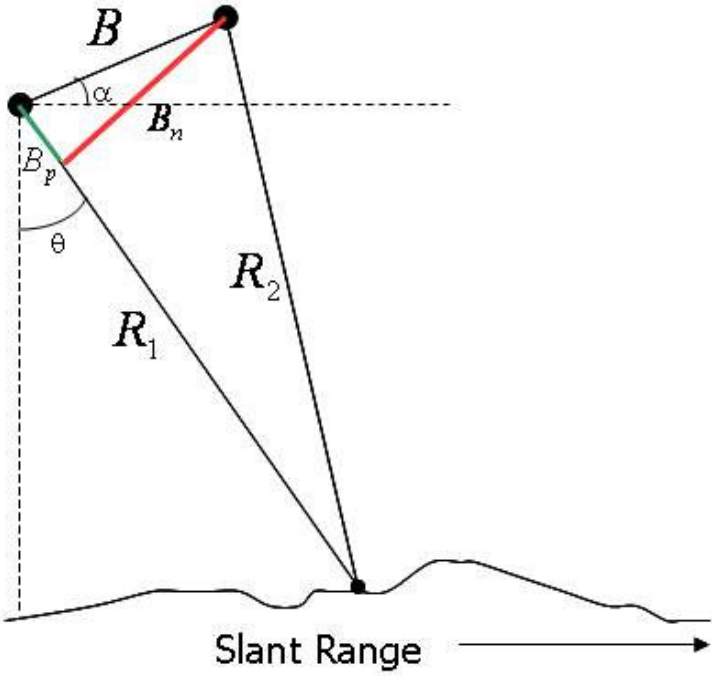
όπου το πρώτο μέρος της εξίσωσης, εκφράζει την φάση που αφορά την διπλή κατεύθυνσης πορεία μεταξύ του ραντάρ και του στόχου. Το δεύτερο μέρος εκφράζει τις επιδράσεις της φάσης σε επίπεδο σκεδαστή και το τρίτο μέρος ενεργεί σε ένα διηλεκτρικό μέσο ανάμεσα στο ραντάρ και τον στόχο.

Εάν υπολογιστεί η διαφορά των φάσεων ενός στόχου ο οποίος "βλέπεται" από δυο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα και έχουν slant range distance R1 και R2, τότε η εξίσωση γίνεται:

$$\varphi=\Delta\Phi=\varphi_2-\varphi_1= -(4\pi/\lambda)(R2-R1) + \Delta\varphi_{scatter} + \Delta\Phi_{delay} \quad (2)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος. Η διαφορά φάσης φ, σχετίζεται με την διαφορά μήκους των πορειών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή ο στόχος εντοπίζεται από δυο ελαφρώς διαφορετικές γωνίες, τότε οι δομές του θορύβου (speckle) είναι σχεδόν ίδιες, κάτι που σημαίνει ότι η διαφορές τους είναι ελάχιστες.
Το τελικό προιόν καλείται συμβολογράφημα. Το συμβολογράφημα είναι μία σύνθετη εικόνα με μέγεθος που δίνεται από το προιόν των ευρών SAR και η φάση (InSAR φάση) δίνεται από την εξίσωση (2). Με άλλα λόγια, ένα συμβολογράφημα παράγεται από διαγώνιο πολλαπλασιασμό, εικονοστοιχείο επί εικονοστοιχείο, η πρώτη εικόνα πολλαπλασιάζεται με την σύνθετη κλίση της. Κατά συνέπεια, το εύρος (amplitude) των συμβολογραφημάτων είναι το εύρος της πρώτης εικόνας που πολλαπλασιάζεται με αυτήν της δεύτερης, ενώ η φάση της (η συμβολομετρική φάση) είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων.

Όπωςφαίνεται και στην Εικόνα 7, η διαφορά φάσης είναι ίση με την παράλληλη παράμετρο της βασικής γραμμής, Bp.



Εικόνα 7. Απεικόνιση της βασικής γραμμής (baseline)

Λαμβάνοντας υπόψην ότι ανάμεσα στην παράλληλη και την κάθετη βασική γραμμή υπάρχει μία απλή γεωμετρική διόρθωση, η InSAR φάση μπορεί να σχετιστεί με την κάθετη γραμμή,Bn.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την πληροφορία ενός συμβολογραφήματος είναι:

- Ο χωρικός διαχωρισμός στο διάστημα μεταξύ των συστημάτων SAR και

- το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των λήψεων μιας εικόνας (μόνο στην περίπτωση repeat-pass).

Η χωρική βασική γραμμή (baseline) ενός συμβολομετρικού ζευγαριού δεν μπορεί να είναι αυθαίρετη αλλά έχει ένα ανώτερο όριο, επάνω από το οποίο τα σχήματα του θορύβου (speckle) των εικόνων SAR δεν συσχετίζονται με κανένα άλλο. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η κρίσιμη τιμή της βασικής γραμμής στην οποία εμφανίζεται πλήρης συσχετισμός δίνεται από την ανίσωση (Goldstein et al., 1998).

$$Bn \leq R\,\lambda / 2\,Lc\cos\theta \qquad (3)$$

όπου Lc η παράμετρος που αντιπροσωπεύει το μέγεθος της ανάλυσης του εικονοστοιχείου σε γεωμετρία slant range και θ η γωνία πρόσπτωσης. Για τους δορυφόρους ERS και ENVISAT η κρίσιμη βασική γραμμή είναι περίπου 1100 μ (R=850 km, θ=23°, Lc=25m, λ=5.6cm).

Στην διαμόρφωση της repeat-pass συμβολομετρίας οι σκεδαστές μπορεί να μετακινηθούν σε ένα εικονοστοιχείο ανάλυσης ή οι διηλεκτρικές τους ιδιότητες μπορεί να αλλάξουν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι επιφάνειες που είναι καλυμμένες με νερό και δενδροκάλυψη στην πρώτη περίπτωση, και στη δεύτερη, τις υγρές επιφάνειες ή επιφάνειες που καλύπτονται με χιόνι. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα σήματα που σκεδάζονται πίσω στο ραντάρ διαφέρουν και είναι μερικώς συσχετισμένα λόγω του χρονικού διαστήματος μεταξύ των λήψεων των εικόνων. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι χαρακτηριστικά χρονικά ασταθείς σκεδαστές έχουν τις διαστάσεις μερικών εκατοστών ή και λιγότερο, και η χρονική μη συσχέτιση (decorrelation) είναι περισσότερο έντονη στα μικρότερα μήκη κύματος, π.χ. X- και C-κανάλι.

4.1.3 Συμβολομετρική Συνοχή

Οι σύνθετες τιμές που συνθέτουν ένα συμβολογράφημα αναφέρονται σε σύνθετες τιμές συνοχής γ. Η σύνθετη συνοχή έχει οριστεί ως εξής (Born et al., 1980):

$$\gamma = \frac{E\{g_1 g_2^*\}}{\sqrt{E\{|g_1|^2\} \cdot E\{|g_2|^2\}}} \qquad (4)$$

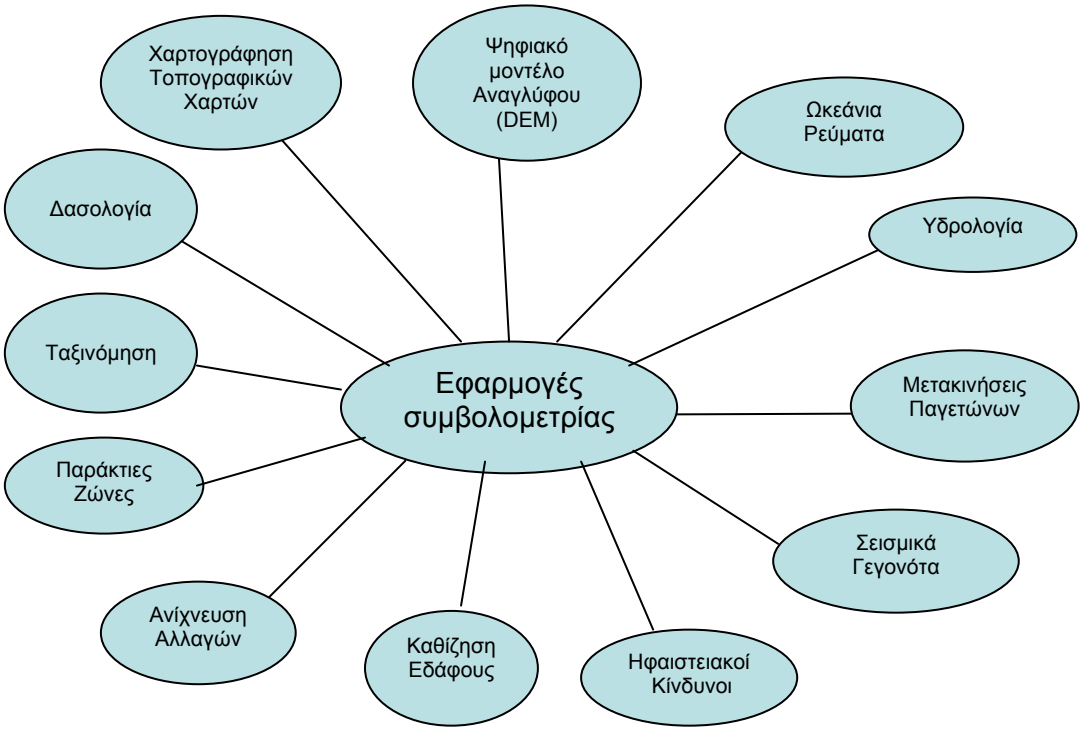
Στην παραπάνω εξίσωση, οι παράμετροι g_1 και g_2 δηλώνουν τις δύο σύνθετες εικόνες SAR και η παράμετρος E{ } αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη τιμή. Το μέγεθος (magnitude) και η φάση ενός σύνθετου συμβολογραφήματος αναφέρονται

γενικά σαν βαθμός συνοχής ή απλούστερα ως συνοχή και η συμβολομετρική (InSAR) φάση αντίστοιχα.

Η συνοχή μετρά τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ δύο εικόνων SAR. Στην repeat-pass δομή μπορεί να ειπωθεί ότι μετρά επίσης την χρονική σταθερότητα της εικόνας. Η συνοχή είναι μία ομαλοποιημένη ποσότητα με τιμές μεταξύ 0 και 1. Σε περίπτωση που η συνοχή παίρνει τιμές που είναι πολύ κοντά στο μηδέν, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει καθόλου συσχετισμός μεταξύ των εικόνων ραντάρ. Αντιθέτως, όταν οι τιμές της συνοχής είναι πολύ κοντά στο 1 αυτό υποδηλώνει πως ένα πολύ σταθερό και δυνατό σκεδαζόμενο αντικείμενο (scattering object). Η συμβολομετρική φάση έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 2π και γι'αυτό τον λόγο η εικόνας της συμβολομετρικής φάσης εμφανίζει μία σειρά από κροσσούς. Δύο συνεχόμενοι κροσσοί αντιπροσωπεύουν διαφορά φάσης 2π. Περιοχές με χαμηλή συνοχή χαρακτηρίζονται από «θορυβώδη» συμβολομετρική φάση. Με άλλα λόγια, η συνοχή των εικόνων είναι η μονάδα μέτρησης του θορύβου της φάσης ή της ικανότητας διάκρισης των κροσσών.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ

Η τεχνική της συμβολομετρίας έχει αναπτυχθεί σε πολλές εφαρμογές (Εικόνα 8). Η ευρύτερα διαδεδομένη είναι εκείνη που εφαρμόζεται σε σεισμικά γεγονότα.



Εικόνα 8 . Εφαρμογές Συμβολομετρίας.
Πηγή: University of Alaska (ASF)

Συγκεκριμένα, τα σεισμικά γεγονότα συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα σε προηγούμενα μη αγνωρισμένα ρήγματα και η

«πρόβλεψη» των σεισμών μοιάζει αδύνατη. Αυτά τα γεγονότα παραμένουν παρά την σχεδόν 100ετή εντατική μελέτη του φαινομένου του σεισμού. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που αποκτιούνται από τους δορυφόρους σε τροχιά 800 χλμ επάνω από τη γη η τεχνική της συμβολομετρίας έχει τη δυνατότητα να λύσει αυτά τα προβλήματα. Για πρώτη φορά, με την τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να χαρτογραφηθούν οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια της γης σε μια μεγάλη χρονική και χωρική κλίμακα με μεγάλη ακρίβεια εκατοστού ή και ακόμη χιλιοστού. Εκτός από τον εντοπισμό τυχόν παραμόρφωσης πριν και μετά την πραγματοποίηση ενός σεισμικού γεγονότος, παραμορφώσεις μπορούν να εντοπιστούν σε ηφαιστειακές περιοχές καθώς επίσης και σε περιοχές παγετώνων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως για να εφαρμοστεί η συμβολομετρία δεν απαιτεί κάποιον ακριβό εξοπλισμό στην γήινη επιφάνεια. Συνεπώς, μπορεί να συλλέξει δεδομένα ακόμα και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές της γης. (Wright T.,2002 and Wang C. et al 2004).

Άλλη εφαρμογή στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συμβολομετρία είναι η καθίζηση του εδάφους η οποία προκαλείται από ένα αριθμό φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (π.χ. άντληση υδάτων, άντληση πετραιλαίου, ύπαρξη ορυχείων κτλ.).

Όσον αφορά τα ορυχεία, η εφαρμογή της συμβολομετρίας είναι σημαντική, καθώς η ιστορία έχει καταγράψει πολλά θανατηφόρα γεγονότα καθίζησης του εδάφους. Οι βράχοι που βρίσκονται πάνω από τα ορυχεία μπορεί να μην έχουν επαρκή υποστήριξη και κατά συνέπεια καταρρέουν λόγω του δικού τους βάρους, είτε κατά την διάρκεια των εργασιών στα ορυχεία είτε έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα από την ολοκλήρωσή τους. Με αυτή την τεχνική είναι δυνατό να αποτραπούν τέτοιου είδους γεγονότα (Ge et al, 2003).

Επιπρόσθετα, η δυναμική των ποταμών και η υδρολογική συμπεριφορά επηρεάζονται έντονα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες τόσο στις επιφάνειες απορροής όσο και στις κοίτες πλημμυρών. Η γνώση της πρόσφατης και ιστορικής δυναμικής των ποταμών σχετίζονται με μορφολογικές και δομικές αλλαγές στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. ιζηματογένεση, συσσώρευση, μετακίνηση κοιτών του ποταμού) είναι ένας ουσιαστικός παράγοντας στην αξιολόγηση του κινδύνου των πλημμυρών (Stabel et al, 2003).

Επίσης, για την ανάκτηση βιο-φυσικών και γεωφυσικών πληροφοριών, η συμβολομετρία χρησιμοποιέται στις εξής εφαρμογές:

- δασολογία
- αγροκαλλιέργειες
- ταξινόμηση χρήσεων γης
- παγετοί
- πυκνότητα βλάστησης και διάβρωση

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΝΟΧΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συμβολομετρική συνοχή εκφράζει τον βαθμό συνοχής ή συσχέτισης μεταξύ δύο εικόνων. Με άλλα λόγια αντιπροσωπεύει μια μέτρηση της σταθερότητας του σήματος που σκεδάζεται πίσω στο SAR πάνω από μια περιοχή ενδιαφέροντος.

Οι απόλυτες τιμές της συμβολομετρικής συνοχής κυμαίνονται μεταξύ του 0 και 1. Όταν η τιμή της συνοχής είναι πολύ κοντά στο 0, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πλήρης μη-συνοχή των εικόνων. Αντιθέτως, όταν η τιμή της συνοχής πλησιάζει την τιμή του 1 αυτό υποδεικνύει ένα πολύ σταθερό και δυνατό σημείο-στόχο όσον αφορά το σήμα, καθώς επίσης και πλήρη συνοχή των εικόνων. Η απώλεια συνοχής εμφανίζεται όταν αλλάζουν οι φυσικές ή/και οι γεωμετρικές ιδιότητες του εδάφους (π.χ. η βλάστηση, το νερό, καλλιέργειες κτλ.) και κατά συνέπεια η σταθερότητα της φάσης του σήματος. Η απώλεια συνοχής μεταξύ δύο λήψεων μπορεί να παρεμποδίσει την συμβολομετρική ανάλυση, γιατί αυτός ο λόγος μπορεί να θεωρηθεί ακριβής ως προς την εκτίμηση της συμβολομετρικής φάσης.

Η συμβολομετρική συνοχή εξαρτάται κυρίως από:

- την βασική γραμμή (Baseline): ο χωρικός διαχωρισμός των δύο κεραιών πρέπει να είναι μικρότερος από την κρίσιμη αποτελεσματική βασική γραμμή (Prati C., Rocca F., 1993 και Gatelli A.et al, 1994).

- Centroid Doppler: τα φάσματα Doppler αζιμουθίου των δύο περασμάτων πρέπει να έχουν ικανοποιητική επικάλυψη, δηλαδή οι δύο έρευνες πρέπει να δουν τη σκηνή κάτω από την ίδια γωνία (Prati C., Rocca F., 1992).

- Τον πρόσθετο θόρυβο σε κάθε σήμα.

Εάν δύο σήματα δεν έχουν ληφθεί ταυτόχρονα (one-pass συμβολομετρία) αλλά σε διαφορετικούς χρόνους κατά τη διάρκεια δύο επαναλαμβανόμενων περασμάτων πάνω από την ίδια περιοχή (repeat-pass) τα ακόλουθα πρόσθετα αποτελέσματα του μη συσχετισμού μειώνουν τη συνοχή, τα οποία θα αναλυθούν περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο, και είναι :

- η αλλαγή της γεωμετρίας μέσα στο κύτταρο ψηφίσματος κατά τη διάρκεια του χρόνου μεταξύ των δύο λήψεων των εικόνων,
- η αλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων των μηχανισμών σκέδασης κατά τη διάρκεια του χρόνου μεταξύ των δύο λήψεων
- η αλλαγή της συμπεριφοράς του μέσου διάδοσης (ατμοσφαιρικά αποτελέσματα) (Schwäbisch M., Geudtner D., 1995)

Το ποσό του χρονικού decorrelation περιγράφει τις διαδικασίες που εμφανίζονται στις κλίμακες μεγέθους του μήκους κύματος σημάτων με ένα χρονικό ψήφισμα που καθορίζεται από το χρονικό διάστημα επανάληψης (χρονική βασική γραμμή). Η ευαισθησία της συνοχής στις αλλαγές στα χαρακτηριστικά των μηχανισμών σκέδασης μπορεί εγκαίρως να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μιας ευρείας ποικιλίας διαδικασιών της επιφάνειας της γης και των αντίστοιχων τύπων επιφάνειας.

5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΝΟΧΗΣ

Αναλυτικότερα, η συνοχή μπορεί να χωριστεί σε μια σειρά από παραμέτρους, καθεμία από τις οποίες εκφράζει μια συγκεκριμένη αιτία μη-συσχέτισης (decorelation).

Υπάρχουν δύο κύριες παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στη συνοχή των εικόνων μεταξύ των λήψεων τους. Ο πρώτος αφορά τις αλλαγές στις ιδιότητες της επιφάνειας της γης και ειδικά οι αλλαγές που είναι σχετικές με τους τύπους κάλυψης του εδάφους. Αυτές οι αλλαγές είναι ανάλογες ως προς το χρόνο μεταξύ των λήψεων. Κανονικά ξηρές περιοχές με χωρίς ή με αραιή βλάστηση παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά συνοχής, ενώ σε αντίθετη περίπτωση γίνεται αναφορά σε χρονική μη-συνοχή (decorellation). Η δεύτερη παράμετρος αφορά τις διαφορές ως προς τη θέση του δορυφόρου τη στιγμή των λήψεων, οι οποίες προκαλούν γεωμετρικές διαφορές στην εξέταση της ίδιας περιοχής (χωρικό decorellation). Η πρόσθετη μείωση της συνοχής θα μπορούσε να παραχθεί από τις αλλαγές των ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης (ατμοσφαιρικά αποτελέσματα) (Hanssen, 2001).

$$|\gamma| = |\gamma|_{processor} \cdot |\gamma|_{noise} \cdot |\gamma|_{azimuth} \cdot |\gamma|_{spatial} \cdot |\gamma|_{temporal} \quad (5)$$

Ο παραπάνω τύπος εκφράζει μία σειρά παραγόντων όπως αναφέρθηκαν και πιο πάνω , κάθε ένα από τους οποίους εκφράζει μια συγκεκριμένη αιτία μη-συνοχής (decorrelation) (Zebker et al, 1992).

Συγκεκριμένα, ο πρώτος παράγοντας $|\gamma|_{processor}$ εκφράζει την μη συνοχή που οφείλεται στο σύστημα SAR και στον επεξεργαστή InSAR που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή την εικόνας συνοχής.

Η δεύτερη παράμετρος $|\gamma|_{noise}$ εκφράζει την μη συνοχή που προκαλείται από τον θερμικό θόρυβο (thermal noise) του δέκτη. Εφ' όσον η αναλογία του πλήθους των στόχων και του θορύβου είναι υψηλή, τότε αυτός ο όρος είναι αμελητέος. Ο τρίτος παράγοντας $|\gamma|_{azimuth}$ προκαλεί την μη-συνοχή λόγω της μη τέλειας επικάλυψης των φασματικών ζωνών των εικόνων στην κατεύθυνση του αζιμουθίου. Οι δύο φασματικές ζώνες μετατοπίζονται επειδή οι τροχιές μπορεί να μην είναι παράλληλες ή/και οι γεωμετρίες τους να είναι διαφορετικές. Γι'αυτό τον λόγο ένας στόχος που βρίσκεται στο έδαφος παρατηρείται από δυο διαφορετικές θέσεις. Το decorrelation στο αζιμούθιο μπορεί να εκφραστεί με την

εφαρμογή ενός band-pass φίλτρου που διατηρεί κοινή μόνο τη ζώνη αζιμουθίου για τις δύο εικόνες. Η επόμενη παράμετρος $|\gamma|_{spatial}$ εκφράζει την μη-συνοχή λόγω της μη τέλειας επικάλυψης των φασματικών ζωνών των εικόνων στην range κατεύθυνση. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα του χωρικού διαχωρισμού μεταξύ των δύο κεραιών στο διάστημα. Από την στιγμή που ένα αντικείμενο-στόχος παρατηρείται κάτω από δύο ελαφρώς διαφορετικές γωνίες κατόπτευσης, τότε το φάσμα του αντικειμένου δεν επικαλύπτεται πλήρως. Μπορεί να αποδειχθεί πως η χωρική μη-συνοχή αυξάνει με την αύξηση της βασικής γραμμής (baseline) (Gatelli et al.,1994).

Αν στην γήινη επιφάνεια υπάρχει δάσος, αστική περιοχή, καλλιέργειες κτλ., τότε ο παράγοντας της χωρικής μη-συνοχής μπορεί να διασπαστεί σε 2 τομείς, με την υπόθεση ότι η σταθερή λειτουργία της σκέδασης εξαρτάται μόνο από το υψόμετρο (Askne et al., 1997):

$$|\gamma|_{spatial} = |\gamma|_{slant\text{-}range} \cdot |\gamma|_{volume} \qquad (6)$$

Στην παραπάνω εξίσωση η πρώτη παράμετρος αντιστοιχεί στην μη-συνοχή λόγω μιας επίπεδης επιφάνειας και μπορεί να αντισταθμιστεί με την εφαρμογή ενός κοινού φίλτρου φασματικών ζωνών.

Κατά συνέπεια, η χωρική μη συνοχή μπορεί να ερμηνευθεί απλά από την άποψη του $|\gamma|_{volume}$ που εισάγεται από τον όγκο επάνω από την επίπεδη επιφάνεια. Όσο παχύτερος είναι ο όγκος και όσο μεγαλύτερη είναι η κάθετη βασική γραμμή, τόσο ισχυρότερη είναι η μη συνοχή του όγκου (Askne et al., 1993).

Από την άλλη πλευρά, η τελευταία παράμετρος $|\gamma|_{temporal}$ της εξίσωσης (5) εκφράζει την μη-συνοχή λόγω αλλαγών ως προς την σκέδαση ενός στόχου μεταξύ των «περασμάτων». Για παράδειγμα, αυτό εμφανίζεται σε περίπτωση που υπάρχει αλλαγή στην λειτουργεία της ανακλαστικότητας της γης. Τόσο γεωμετρικές όσο και οι διηλεκτρικές διακυμάνσεις μπορεί να προκαλέσουν χρονική μη συσχέτιση (decorrelation). Το αποτέλεσμα κάθε φορά είναι διαφορετικό καθώς εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που υπάρχει μεταξύ των εικόνων, το αντικείμενο το οποίο παρατηρείται και από τις ιδιότητες του ραντάρ (π.χ. μήκος κύματος, πόλωση, γωνία κατόπτευσης).

Συνοψίζοντας, φωτεινές περιοχές καταδεικνύουν υψηλό βαθμό συνοχής ενώ αντίθετα, σκούρες περιοχές αντιπροσωπεύουν χαμηλό βαθμό συνοχής. Επιπλέον, περιοχές με απότομες κλίσεις περιοχές με βλάστηση ή με ανάγλυφο που αλλάζει συνέχεια εμφανίζουν χαμηλό βαθμό συνοχής. Επίσης, όταν το χρονικό διάστημα μεταξύ των εικόνων είναι αρκετά μεγάλο ή όταν η βασική γραμμή είναι πολύ μεγάλη τότε αυτό οδηγεί σε χαμηλό βαθμό συνοχής. Τέλος, τεχνικές λεπτομέρειες όπως φτωχή

εγγραφή (coregistration) μεταξύ των εικόνων ή φτωχό resampling μπορεί να προκαλέσει χαμηλό βαθμό συνοχής[1].

5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε μια εικόνα συνοχής, η οποία σχετίστηκε και ερμηνεύθηκε με βάση τον τύπο χρήσεων γης.

Για την παραγωγή αυτή της εικόνας, χρειάστηκαν 22 C-band SLC (Single Look Complex) εικόνες, οι οποίες λήφθησαν από τον δορυφόρο ERS(1&2) (Πίνακας 9).Οι εικόνες καλύπτουν χρονικά την περίοδο 1992-1999 και χωρικά την αστική περιοχή της Αθήνας. Το DEOS[2] παρείχε τις ακριβείς τροχιές του ERS1&2 της τάξης 5-6 εκατοστών και χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός των ζευγαριών των 22 εικόνων, εφαρμόστηκε στα ζευγάρια των οποίων η βασική γραμμή ήταν κάτω από 200 μέτρα (Bp<200μ).

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την επεξεργασία των εικόνων ήταν (Εικόνα 6):

- εγγραφή των εικόνων SLC
- εφαρμογή common-band φίλτρου στο αζιμούθιο και στο εύρος
- παραγωγή του συμβολογραφήματος
- εκτίμηση και υπολογισμός της συμβολομετρικής βασικής γραμμής
- αφαίρεση της τοπογραφίας
- υπολογισμός και παραγωγή της συμβολομετρικής συνοχής

Για τον λόγο ότι μια τέτοια είδους ανάλυση που χρησιμοποιεί πολλά χρονικά δεδομένα, απαιτεί τέλεια «εγγραφή» των εικόνων SAR, η απλούστερη προσέγγιση που την εξασφαλίζει είναι η χρησιμοποίηση μίας κύριας (master) εικόνας πάνω στην οποία χαρτογραφούνται όλες οι άλλες. Το κριτήριο επιλογής της κύριας εικόνας (master) είναι ο συνδυασμός της με τις υπόλοιπες εικόνες να δίνει την ελάχιστη βασική γραμμή (baseline). Η ακριβής εγγραφή μεταξύ της κύριας εικόνας και των υπολοίπων προκειμένου να αποφευχθούν λάθη, εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγόριθμους που οδηγούν σε ακρίβεια του ενός εικονοστοιχείου. Η συνολική αφαίρεση της υπόλοιπης τοπογραφικής φάσης σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο, είναι συνήθως πολύ δύσκολη στην πράξη και πρέπει να θεωρηθεί ως πρόσθετη πηγή λάθους. Στην παρούσα περίπτωση, η πόλη της Αθήνας και οι γύρω αστικές περιοχές της περιβάλλονται από βουνά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν

[1] University of Alaska, http//:www.asf.alaska.edu/about_sar.
[2] Department of Earth Observation and Space Systems, http://www.deos.tudelft.nl/

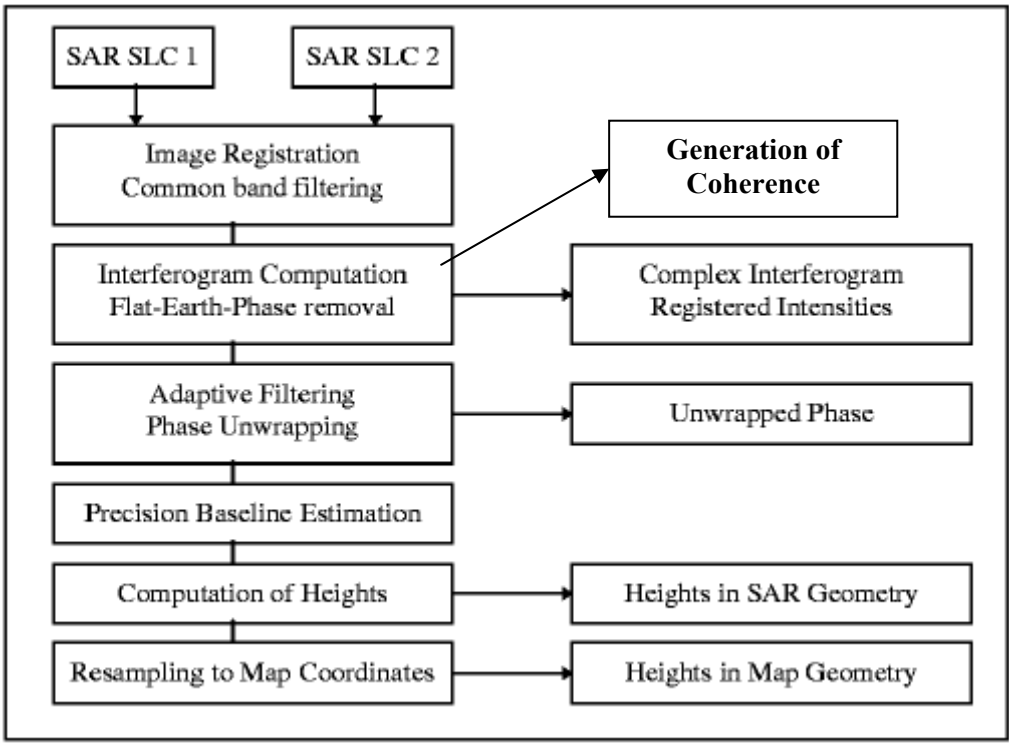
σοβαρά προβλήματα κατά την εγγραφή της κύριας εικόνας και του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM). Κατά συνέπεια, δόθηκε αρκετή προσοχή ώστε η εγγραφή να εξασφαλιστεί με ακρίβεια της τάξης του λιγότερο από ένα εικονοστοιχείο τόσο στην διεύθυνση του εύρους (range) όσο και του αζιμούθιου. Επιπλέον, έγιναν διορθώσεις στην φάση των κλίσεων κατά τη διάρκεια του υπολογισμού της συνοχής με σκοπό να αντισταθμίσουν την επίδραση της τοπογραφίας.

Πίνακας 8 .Κατάλογος των εικόνων ραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν (Track:465 – Frame:2835) και οι βασικές γραμμές που υπολογίστηκαν (η κύρια εικόνα orbit:6832).

	Ημερομηνία	**Τροχιά(Orbit)**	**Mission**	**$B_\perp$**
1	25/11/1992	7123	ERS-1	+510
2	30/12/1992	7624	ERS-1	-441
3	23/06/1993	10129	ERS-1	-31
4	10/11/1993	12133	ERS-1	+82
5	16/06/1995	20493	ERS-1	-112
6	21/07/1995	20994	ERS-1	+167
7	25/08/1995	21495	ERS-1	-23
8	30/09/1995	2323	ERS-2	+732
9	04/11/1995	2824	ERS-2	+569
10	08/12/1995	22998	ERS-1	+311
11	13/01/1996	3826	ERS-2	+43
12	22/03/1996	24501	ERS-1	-1029
13	06/07/1996	6331	ERS-2	+397
14	*10/08/1996*	*6832*	*ERS-2*	*0*
15	19/10/1996	7834	ERS-2	+579
16	13/12/1997	13846	ERS-2	-522
17	15/08/1998	17353	ERS-2	-42
18	19/09/1998	17854	ERS-2	-504
19	28/11/1998	18856	ERS-2	-82
20	22/05/1999	21361	ERS-2	-65
21	26/06/1999	21862	ERS-2	+354
22	31/07/1999	22363	ERS-2	+354

Για την εκτίμηση της συμβολομετρικής συνοχής, μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι οι διαστάσεις του εξεταζόμενου παραθύρου. Το μεγάλο μέγεθος παραθύρων απαιτείται συχνά στα συμβολογραφήματα χαμηλής συνοχής προκειμένου να υπολογιστούν οι ακριβείς τιμές για τη συνοχή και για να επιτρέψει των διαχωρισμό μεταξύ περιοχών του θορύβου και περιοχών χαμηλής συνοχής. Ωστόσο η επιλογή ενός πολύ μεγάλου παραθύρου θα μπορούσε να προκαταλάβει την εκτίμηση

προς υψηλότερες τιμές σε περιοχές χαμηλής συνοχής, υποβιβάζοντας την εκτίμηση της συνοχής σε περιοχές υψηλής συνοχής. Σε αυτήν την περίπτωση μια καλή λύση ήταν ένα παράθυρο με διάσταση εικονοστοιχείων 12x12 στη σειρά και το αζιμούθιο, το οποίο αντιπροσωπεύει συνολικό αριθμό 144 εικονοστοιχείων. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα σύνολο από είκοσι μία εικόνες. Σε δύο περιπτώσεις θα μπορούσαν να προσδιοριστούν τα τοπογραφικά υπόλοιπα, λόγω της ανεπαρκούς προσομοίωσης και της αφαίρεσης της τοπογραφικής φάσης ως αποτέλεσμα των πολύ μεγάλων βασικών γραμμών, και έτσι δεν ενσωματώθηκαν στην επόμενη ανάλυση.



Εικόνα 9 . Διάγραμμα της συμβολομετρικής *επεξεργασίας*.
Πηγή: GAMMA Remote Sensing

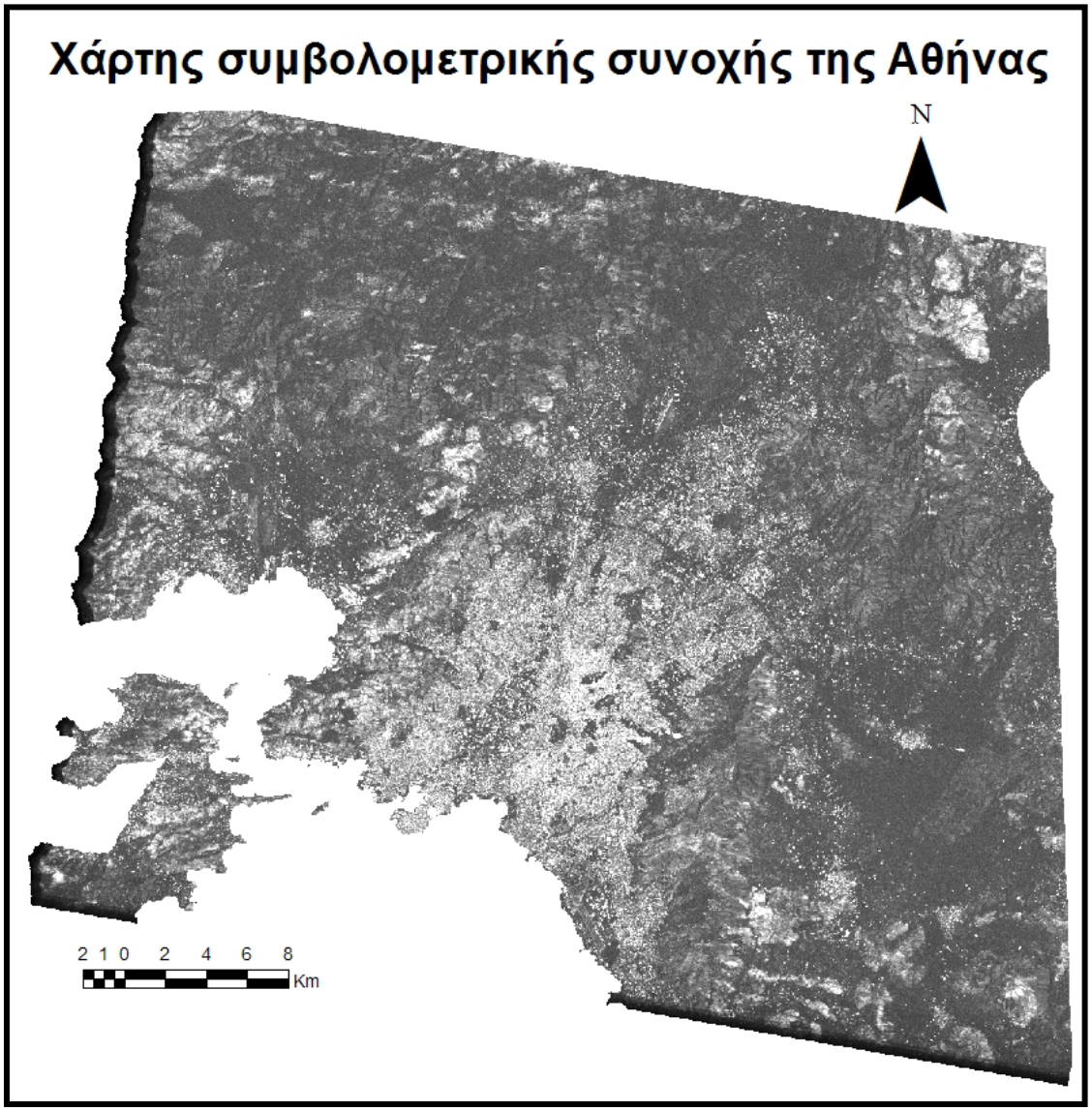
Ο μετασχηματισμός των εικόνων συνοχής από τη γεωμετρία της εικόνας Ραντάρ σε πραγματικές συντεταγμένες εκτελέσθηκε σε δύο βήματα. Κατ' αρχάς, διορθώθηκε μια έκταση (παραμορφώσεις αναστροφής και σκιές) και έπειτα το γεωμετρικά διορθωμένο προϊόν, βασίστηκε στην SAR γεωμετρία της κύριας εικόνας και στα ακριβή τροχιακά δεδομένα. Σε ένα δεύτερο βήμα εφαρμόστηκε βελτίωση στις ήδη γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες χρησιμοποιώντας τα επιλεγμένα σημεία εδαφικού ελέγχου (GCPs).

Η τελική εικόνα του μέσου όρου συνοχής υπολογίστηκε με τον υπολογισμό του μέσου όρου (εικονοστοιχείο με εικονοστοιχείο) των τιμών της συνοχής για κάθε μία εικόνα.

Προκειμένου να προσδιοριστούν και να ερμηνευθούν στατιστικά οι ιδιότητες των επιλεγμένων τύπων κάλυψης γης από την άποψη του μέσου βαθμού της εικόνας συνοχής, προμηθεύτηκαν από το Google Earth εικόνες Quickbird πολύ

υψηλής ανάλυσης. Η διόρθωση της εικόνας QuickBird εφαρμόσθηκε χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες κάποιων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της κάθε εικόνας (π.χ. γωνίες κτιρίων, διασταυρώσεις δρόμων).

Ως καταλληλότερη χαρτογραφική προβολή επιλέχθηκε η UTM WGS'84 (Ζώνη 34 N) και για περαιτέρω ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα περιβάλλον GIS.

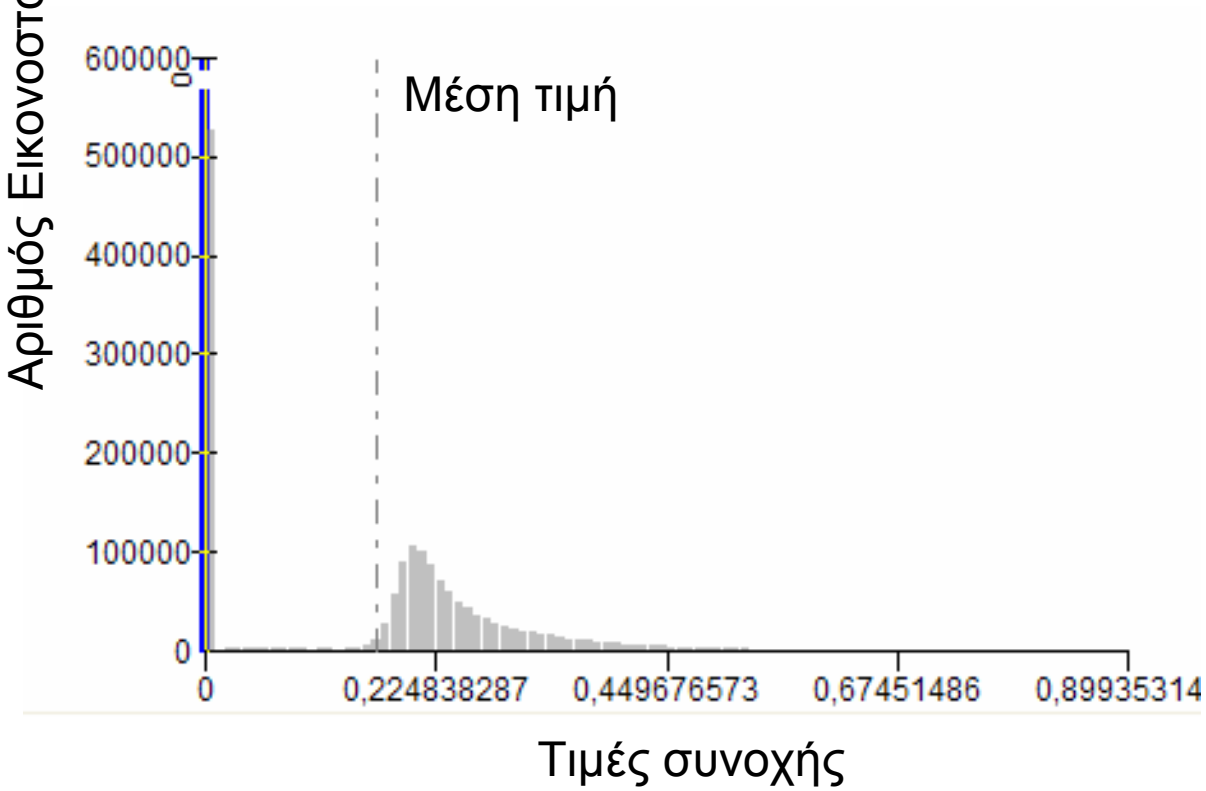


Εικόνα 10 . Μέση συμβολομετρική συνοχή σε προβολή UTM WGS'84. Τα έντονα εικονοστοιχεία αντιπροσωπεύουν περιοχές με υψηλό βαθμό συνοχής ή περιοχές που κυριαρχούνται από σημεία-ανακλαστήρες, ενώ τα σκοτεινά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές χωρικής ή/και χρονικής ασυνέχειας (χαμηλός βαθμός συνοχής).

Από την οπτική ερμηνεία της παραγόμενης εικόνας της συμβολομετρικής συνοχής (Εικόνα 7,8), είναι προφανές ότι τα φωτεινά εικονοστοιχεία αντιπροσωπεύουν περιοχές υψηλού

βαθμού συνοχής ή περιοχές που κυριαρχούνται από σημεία-ανακλαστήρες. Από τη άλλη πλευρά, τα σκοτεινά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε περιοχές που είναι μη συσχετισμένες (decorrelation) χωρικά ή/και χρονικά (χαμηλός βαθμός συνοχής).

Συνολικά, αξίζει να σημειωθεί η αστική περιοχή της Αθήνας είναι πολύ καλά καθορισμένη στη μέση εικόνα συνοχής καθώς επίσης και μερικές ορεινές περιοχές χωρίς την ύπαρξη σημαντικής βλάστησης, ενώ οι περιβάλλουσες περιοχές που κυριαρχούνται από βλάστηση περιέχονται στις σχετικά χαμηλές μέσες τιμές συνοχής. Επιπλέον, όπως παρατηρείται στο διάγραμμα , η μέση τιμή της εικόνας συνοχής είναι πολύ χαμηλή, κάτι που σημαίνει ότι η εικόνα κυριαρχείται από χαμηλή συνοχή. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στις διαφορετικές χρονολογίες όπου έχουν ληφθεί οι εικόνες Ραντάρ,είτε στις διαφορετικές περιόδους (καλοκαίρι-χειμώνας), στις αλλαγές που μπορεί να έχουν γίνει (π.χ. βλάστηση, κατασκευή ενός κτιρίου, κατάρρευση κτιρίου κτλ.).



Εικόνα 11 . Διάγραμμα εικόνας μέσης συνοχής.

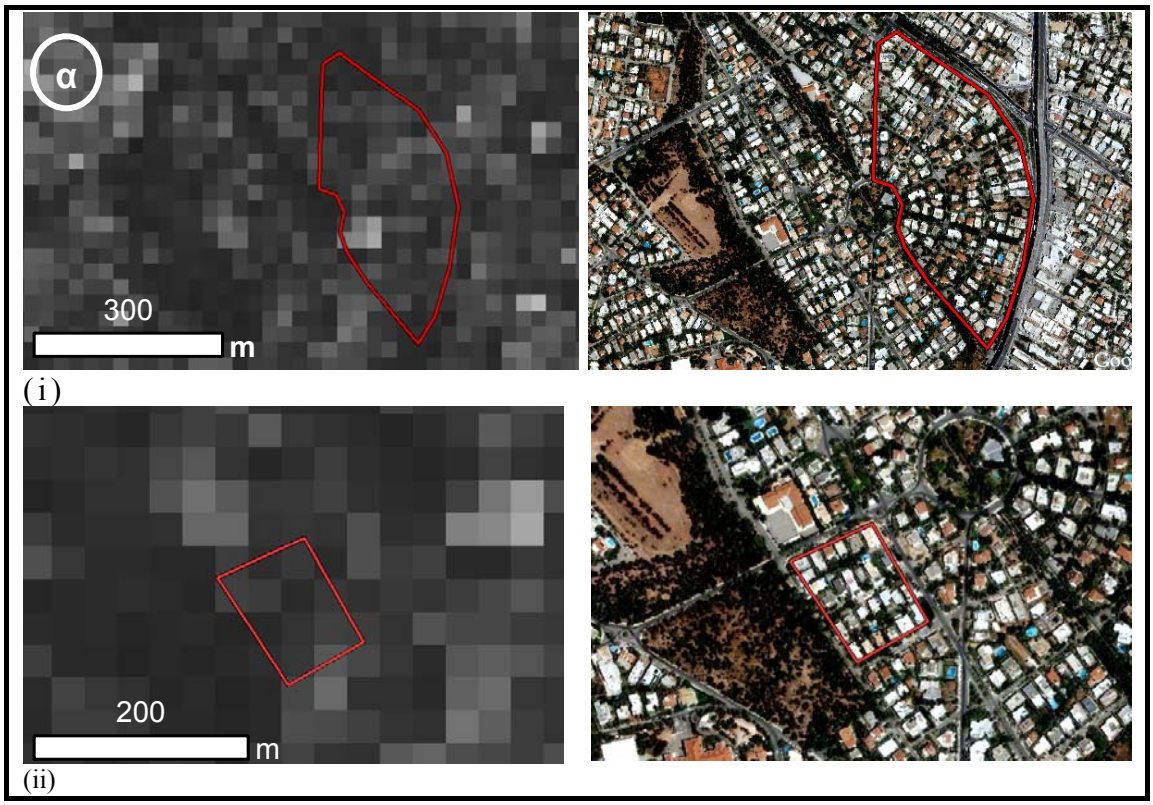
Προκειμένου να ερευνηθεί λεπτομερέστερα η μεταβλητότητα των μέσων τιμών συνοχής για τους επιλεγμένους τύπους κάλυψης της γης, δύο έως τέσσερις περιοχές ενδιαφέροντος (AOI) για κάθε τύπο κάλυψης της γης (Εικόνα 9) εντοπίστηκαν στην εικόνα QuickBird και έπειτα υπολογίστηκαν οι στατιστικές τους ιδιότητές (Πίνακας 9).

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οκτώ (8) τύποι κάλυψης γης, αστική περιοχή (αραιή-πυκνή δόμηση), γυμνά εδάφη, βλάστηση (αραιό-πυκνό δασικό, αραιό-πυκνό θαμνώδες) και

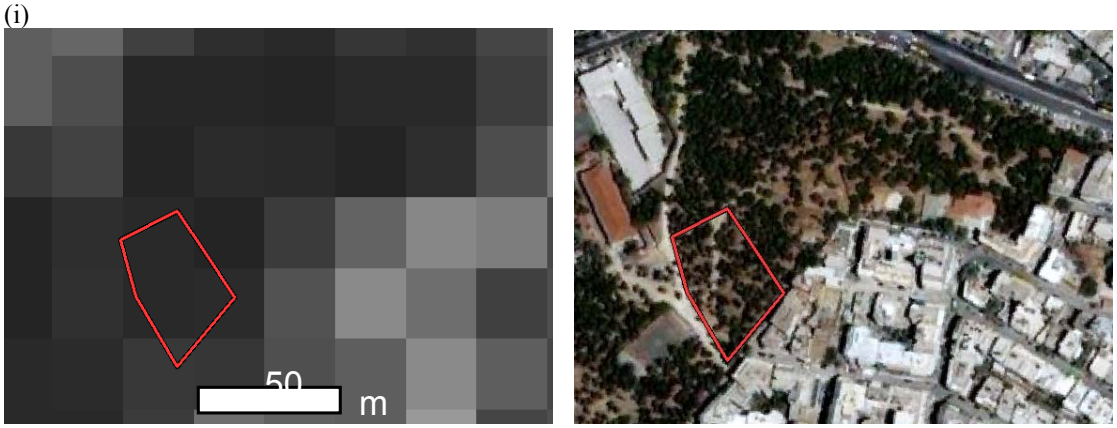
γυμνό πέτρωμα. Προκειμένου να ληφθεί υπόψην η πυκνότητα των κτιρίων μέσα στο αστικό περιβάλλον, για τον λόγο αυτό ο τύπος κάλυψης γης της αστικής περιοχής διαιρέθηκε σε περιοχές με πυκνή δόμηση και περιοχές με αραιή δόμηση.

Επιπρόσθετα, ένα άλλο γεγονός που λήφθηκε υπόψη όταν γινόταν η αντιστοίχηση των διάφορων τύπων κάλυψης γης στην εικόνα QuickBird ήταν οι περιοχές με layover και περιοχές με σκιά σε κάθε μια από τις εικόνες της συμβολομετρικής συνοχής. Για να αποφευχθούν τέτοιες περιοχές όπου οι τιμές της συνοχής είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της παρεμβολής (interpolation), η επιλογή των κατάλληλων περιοχών για την ανάλυση έγινε αμφίδρομα ελέγχοντας τόσο την εικόνα QuickBird όσο όλες τις εικόνες.

Οι στατιστικές ιδιότητες κάθε τύπου κάλυψης γης από την άποψη της μέσης συνοχής παρουσιάζονται στον Πίνακα . Με βάση αυτά τα στατιστικά δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα παρουσιάζοντας το βαθμό αλλαγής των μέσων τιμών της μέσης συνοχής μεταξύ των τύπων κάλυψης γης (Διάγραμμα 1).

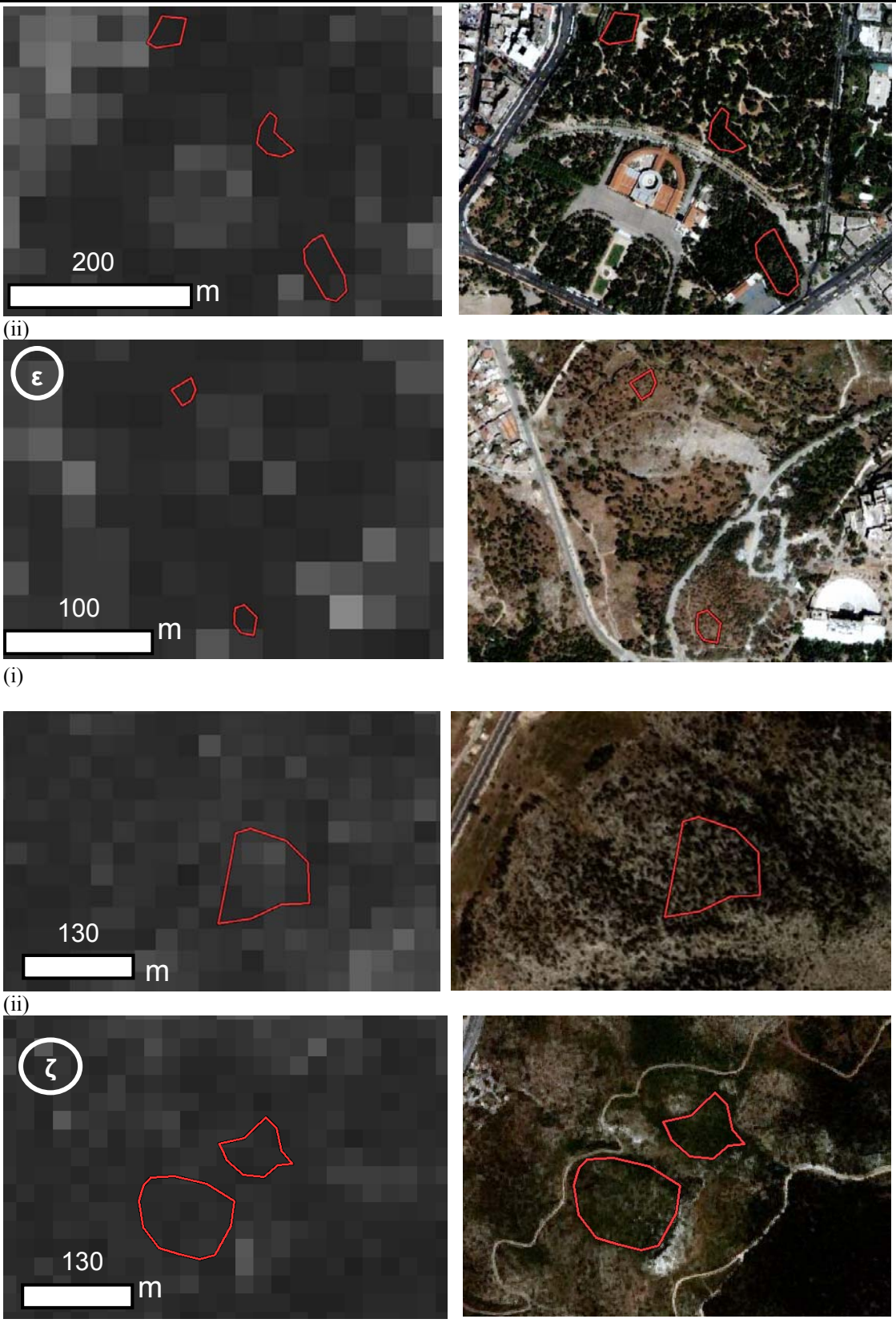


(i)

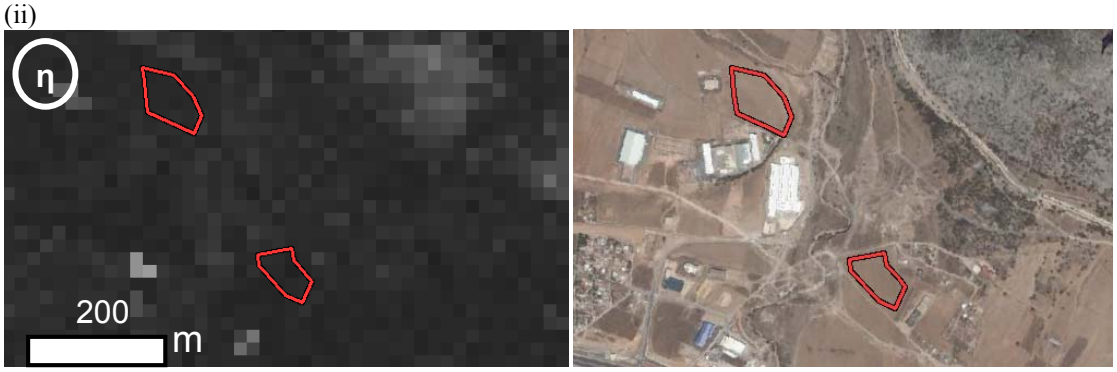


(ii)

(i)


2
130
m
(i)
130
m
(ii)
3
100
m
(i)
200
m
(ii)

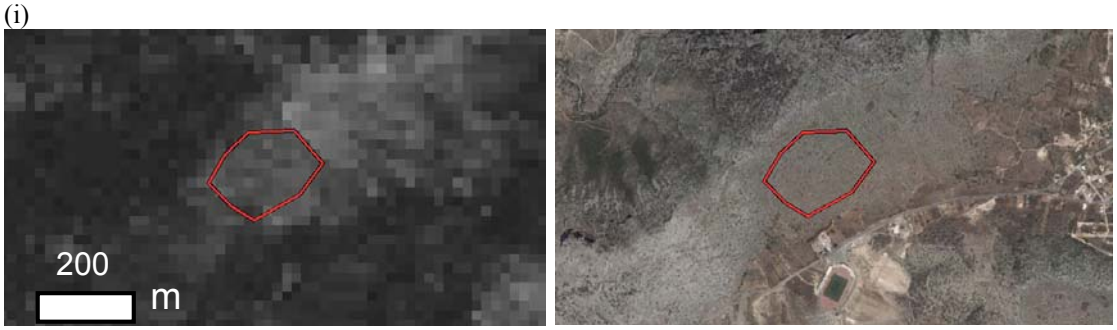
(ii)



(i)

(ii)

(i)

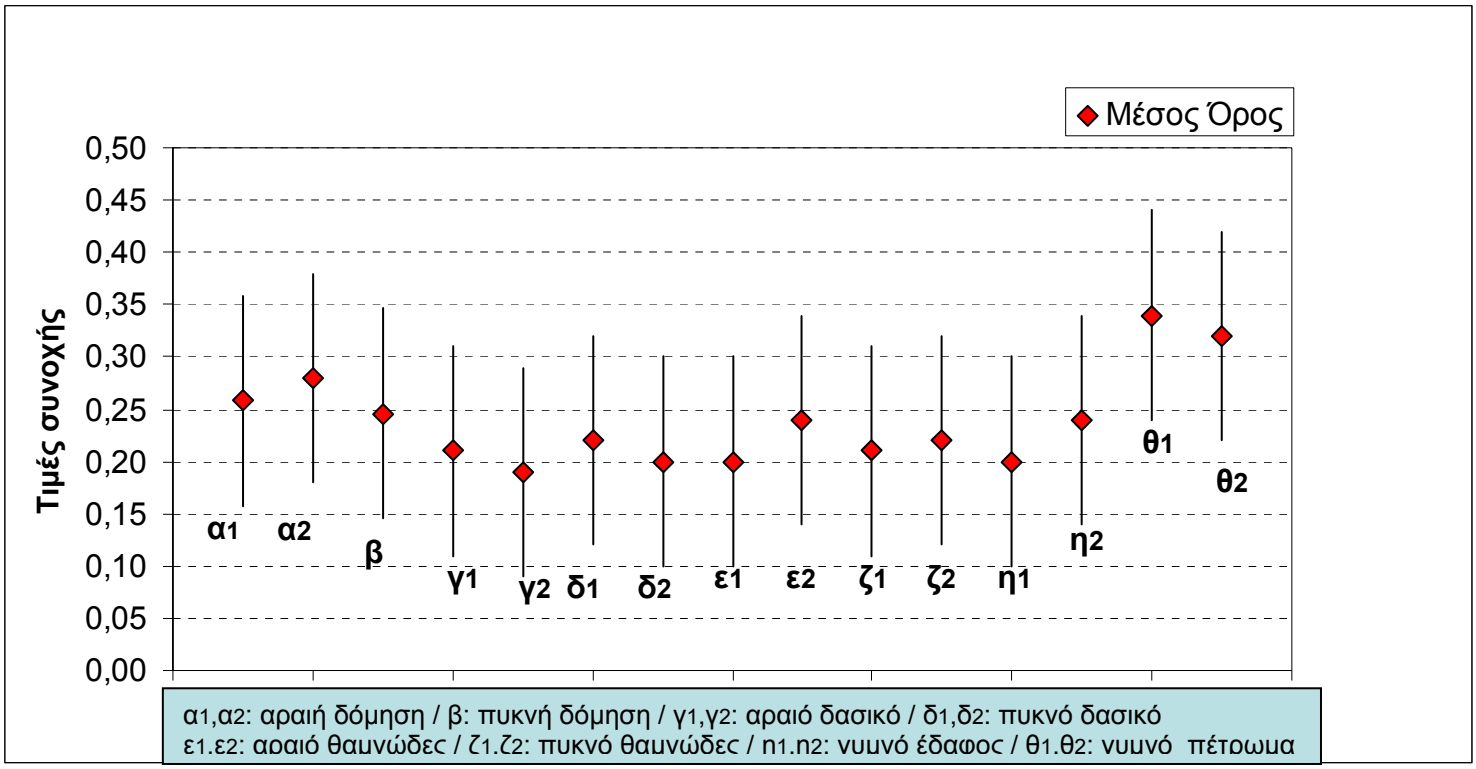


(ii)

Εικόνα 12 . Εικόνα συνοχής (αριστερή στήλη) και οι αντίστοιχες περιοχές στην εικόνα υψηλής ανάλυσης Quickbird (δεξιά στήλη). Οι επιλεγμένες περιοχές (AOI) αντιπροσωπεύουν τους διάφορους τύπους κάλυψης γης που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική ανάλυση, αραιή δόμηση [α-(i),(ii)], πυκνή δόμηση (β), αραιό δασικό [γ-(i),(ii)], πυκνό δασικό [δ-(i),(ii)], αραιό θαμνώδες [ε-(i),(ii)], πυκνό θαμνώδες [ζ-(i),(ii)], γυμνό έδαφος [η-(i),(ii)], γυμνό πέτρωμα [θ-(i),(ii)].

Πίνακας 9. Στατιστικά δεδομένα που υπολογίστηκαν από τον μέσο όρο της συνοχής για κάθε επιλεγμένο τύπο κάλυψης γης.

	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μέσος Όρος	Σταθερή Απόκλιση
Αραιή Δόμηση 1	0,20	0,32	0,26	0,04
Αραιή Δόμηση 2	0,20	0,54	0,28	0,07
Πυκνή Δόμηση	0,14	0,38	0,25	0,05
Αραιό Δασικό 1	0,19	0,22	0,21	0,01
Αραιό Δασικό 2	0,18	0,19	0,19	0,04
Πυκνό Δασικό 1	0,20	0,26	0,22	0,05
Πυκνό Δασικό 2	0,18	0,23	0,20	0,03
Αραιό Θαμνώδες 1	0,19	0,21	0,20	0,01
Αραιό Θαμνώδες 2	0,20	0,28	0,24	0,02
Πυκνό Θαμνώδες 1	0,18	0,26	0,21	0,03
Πυκνό Θαμνώδες 2	0,22	0,23	0,22	0,04
Γυμνό Έδαφος 1	0,17	0,24	0,20	0,04
Γυμνό Έδαφος 2	0,18	0,28	0,24	0,03
Γυμνό Πέτρωμα 1	0,21	0,51	0,34	0,07
Γυμνό Πέτρωμα 2	0,17	0,52	0,32	0,08



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα που δείχνει την αλλαγή του μέσου όρου των τιμών της συνοχής μεταξύ των τύπων κάλυψης.

Όπως φαίνεται διάγραμμα, είναι ενδιαφέρον ότι η απόδοση κάθε τύπου κάλυψης γης πάντα σε σχέση με την εικόνα της μέσης συνοχής, είναι θεωρητικά αναμενόμενη. Με άλλα λόγια, τα μέσα επίπεδα συνοχής διαφορετικών τύπων κάλυψης γης θα μπορούσαν να εξηγηθούν άμεσα από τη συμπεριφορά των διάφορων αντικειμένων ως προς την οπισθοσκέδαση των φυσικών ιδιοτήτων κάθε ομάδας εικονοστοιχείων (Srivastava et al, 1998). Κατά συνέπεια, ο υψηλός βαθμός μέσης συνοχής εντοπίζεται σε τύπους της αστικής περιοχής (αραιή και πυκνή δόμηση) και στα γυμνά εδάφη, ενώ η βλάστηση γενικά διατηρεί τις χαμηλότερες τιμές της μέσης συνοχής, των οποίων οι τιμές των διάφορων τύπων κάλυψης παραμένουν σχεδόν ίδιες. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών περιοχών με αραιή δόμηση και των περιοχών πυκνής δόμησης δεν είναι τόσο μεγάλες, με τις τιμές των τελευταίων να είναι ελαφρώς υψηλότερες δείχνοντας σχετικά μια παρόμοια συμπεριφορά αυτών των τύπων κάλυψης γης. Επιπλέον, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στα γυμνά πετρώματα, των οποίων οι τιμές είναι ελαφρώς υψηλότερες από εκείνες του τύπου πυκνής δόμησης.

Ωστόσο, οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές για τους διάφορους τύπου κάλυψης της γης παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό επικάλυψης, γεγονός το οποίο θα μπορούσε εν μέρει να αποδοθεί σε μεμονωμένα εικονοστοιχεία ή σε σχετικά ακραίες τιμές που

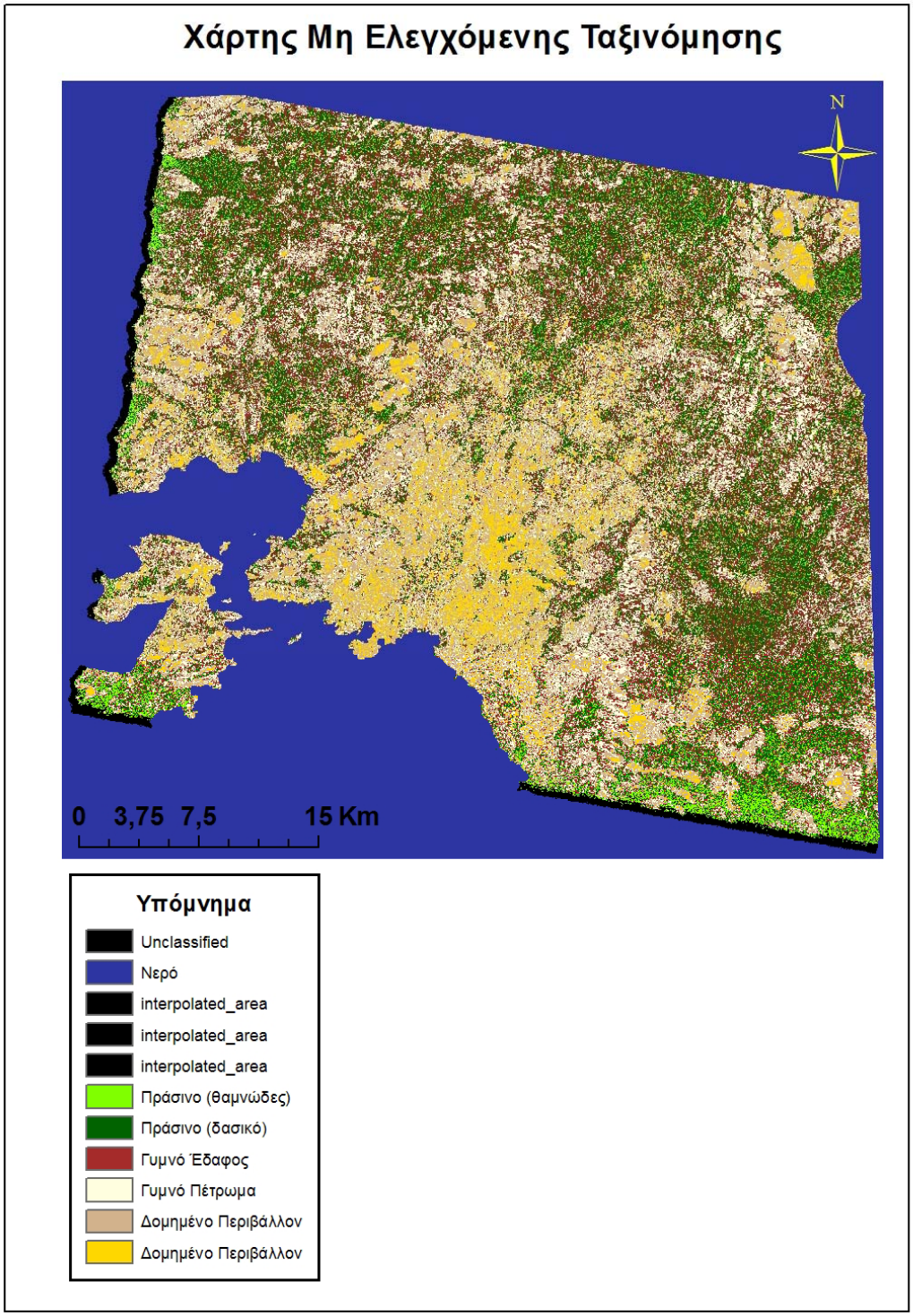
υπάρχουν μέσα στα επιλεγμένα πολύγωνα για κάθε τύπο κάλυψης. Αξίζει να ειπωθεί ότι οι στατιστικές τιμές είναι περισσότερο «ευπαθή» σε λάθη τα οποία αφορούσαν την γεωμετρική διόρθωση της εικόνας Quickbird ή/και των δεδομένων της συμβολομετρικής συνοχής.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα της συνοχής οι μέγιστη τιμή (0,89) εμφανίζεται να υποβαθμίζονται σε σύγκριση με τον μέγιστου βαθμού συνοχής που επιτεύχθηκε (μεταξύ 0.76 – 0,98) σε κάθε μια από τις εικόνες συνοχής που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέσου όρου συνοχής της εικόνας. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι στη μέση εικόνα, η συνοχή θα μπορούσε να «χαθεί» όχι μόνο ως αποτέλεσμα των αλλαγών κάλυψης της γης, αλλά και λόγω άλλων παραμέτρων όπως η χωρική ασυνέχεια (decorrelation) μεταξύ των ζευγαριών SAR που εξετάστηκαν για την παραγωγή της τελικής εικόνας συνοχής. Συνεπώς, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι οι προσπάθειες πρόβλεψης του βαθμού συνοχής για μια μέση εικόνα συνοχής όπως κατά την εξέταση ενός απλού ζευγαριού SAR εξετάζοντας απλά την κάλυψη της γης από βλάστηση, το κλίμα, το ανάγλυφο και το χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων των εικόνω κ.λπ. δεν πρέπει να είναι πάντα γεγονός.

Ωστόσο, είναι σαφές ότι παρόλο που η συνοχή υποβαθμίζεται από την άποψη των μέγιστων τιμών, κάτι που σημαίνει διαφορές στη μέση εικόνα συνοχής μεταξύ των διάφορων τύπων κάλυψης γης που διατηρούνται επιτρέποντας μια πιο ακριβή διαφοροποίηση των τύπων κάλυψης γης. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή τέτοιων μέσων τιμών συνοχής για την περαιτέρω ανάλυση, όπως για λόγους ταξινόμησης κάλυψης της γης, πρέπει να προτιμηθεί από τη χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων συνοχής ενός απλού ζευγαριού εικόνων SAR.

5.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΥΝΟΧΗΣ

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται οι ταξινομήσεις της εικόνας συνοχής. Στην εικόνα εφαρμόστηκαν και



Εικόνα 10. Χάρτης Μη Ελεγχόμενης Ταξινόμησης.

οι δύο μέθοδοι της ταξινόμησης : μη ελεγχόμενη ή αυτόματη unsupervided) και ελεγχόμενη (supervised).

Η ταξινόμηση είναι κυρίως μέθοδος της Στατιστικής και αφορά τον διαχωρισμό αντικειμένων και την ένταξή τους σε δύο ή περισσότερες ομάδες. Ο διαχωρισμός ή αλλιώς η «διαφοριοποίηση» των αντικειμένων είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο εφαρμόζεται η ταξινόμηση. Κατά δεύτερο λόγο, ένας άλλος στόχος της εφαρμογής αυτής είναι η επιλογή ενός κατάλληλου αλγόριθμου έτσι ώστε να ταξινομηθούν τα αντικείμενα σε ομάδες.

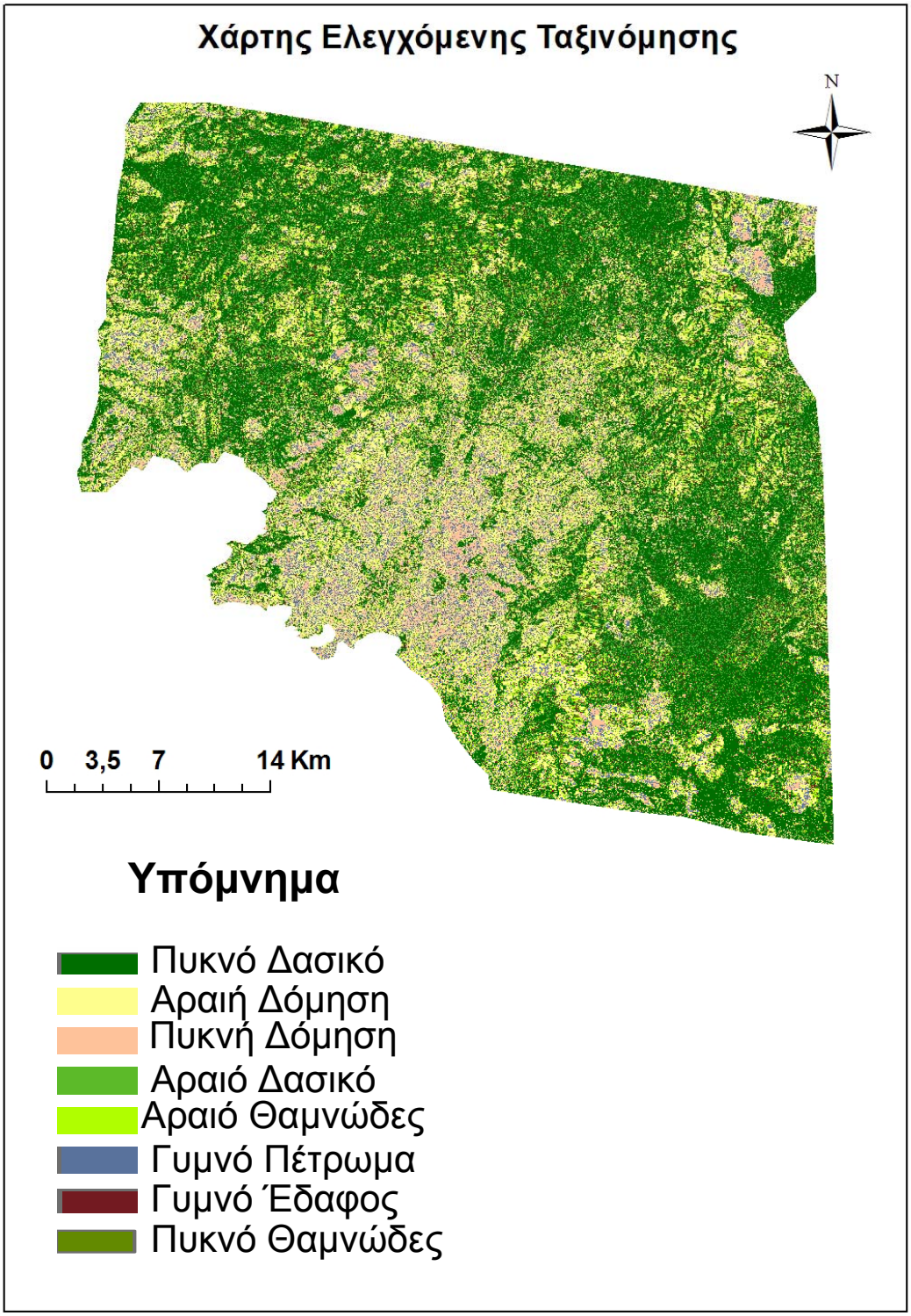
Ο απλούστερος τρόπος για την ταξινόμηση μια εικόνας είναι η εξέταση κάθε εικονοστοιχείου ξεχωριστά και να τοποθετηθεί σε μια τάξη ανάλογα με τις τιμές της φωτεινότητάς του.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ταξινόμησης. Η μία καλείται μη ελεγχόμενη ή αυτόματη ταξινόμηση (unsupervised classification) ενώ η δεύτερη καλείται ελεγχόμενη ταξινόμηση (supervised classification). Αναλυτικότερα, στην μη ελεγχόμενη ταξινόμηση τα εικονοστοιχεία της εικόνας διαχωρίζονται σε τάξεις χωρίς όμως ο χρήστης να γνωρίζει εκ των προτέρων για το είδος της πληροφορίας (π.χ. αν πρόκειται για δάσος, νερό, καλλιέργειες κτλ.) που περιέχεται σε κάθε τάξη. Από την άλλη πλέυρά, η ελεγχόμενη ταξινόμηση γίνεται εξ'ολοκλήρου από την καθοδήγηση του χρήστη. Η διαφορά της συγκεκριμένης ταξινόμησης σε σχέση με την προηγούμενη, είναι ότι σε αυτή την διαδικασία ο χρήστης επιλέγει τα εικονοστοιχεία τα οποία αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά τα οποία γνωρίζει εκ των προτέρων ή τα οποία μπορεί να τα ταυτοποιήσει με την βοήθεια μια σειράς πηγών (αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες, έρευνα πεδίου, τοπογραφικούς χάρτες κτλ.).

Όσον αφορά την μη ελεγχόμενη ταξινόμηση (Εικόνα 10), επιλέχθηκαν 10 κλάσσεις (πλην της τάξης που αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία τα οποία είναι αταξινόμητα-unclassified). Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια αντιστοίχησης κάθε ομάδας σε ένα συγκεκριμένο είδος πληροφορίας, διαδικασία αρκετά δύσκολη, καθώς πολλά εικονοστοιχεία κάλυπταν πάνω από μία τάξεις. Η συγκεκριμένη αντιστοίχηση έγινε με την χρησιμοποίηση της εικόνας QuickBird. Έτσι, οι ομάδες που δημιουργήθηκαν αντιπροσώπευαν τις εξής πληροφορίες: αταξινόμητα εικοστοιχεία, το νερό, αστικό πράσινο (θαμνώδες και δασικό), γυμνό έδαφος, γυμνό πέτρωμα και δομημένο περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί, πως τρεις ομάδες εικονοστοιχείουν αντιπροσωπεύουν τις περιοχές που κυριαρχούνται από παρεμβολή (interpolation).

Όσον αφορά την ελεγχόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την ποιοτικότερη ανάλυση των δεδομένων. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση βασίζεται σε αλγόριθμους οι οποίοι με την χρήση τους χαρακτηρίζουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένο τύπο εδαφικής κάλυψης. Βασική ιδέα της ελεγχόμενης ταξινόμησης είναι η δυνατότητα του χρήστη να καθορίζει περιοχές για «εκπαίδευση» (training fields), οι οποίες απεικονίζουν και αντιπροσωπεύουν περιοχές γνωστής

εδαφικής κάλυψης. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό πως η επιλογή αυτών των περιοχών αποτελεί βασικό και κρίσιμο βήμα στην συγκεκριμένη μέθοδο ταξινόμησης.



Εικόνα 11. Χάρτης Ελεγχόμενης Ταξινόμησης.

Αξίζει να ειπωθεί πως η ελεγχόμενη ταξινόμηση έχει πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα. Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

α) ο χρήστης ελέγχει εξ' ολοκλήρου το σύνολο των επιλογών του είδους της πληροφορίας που θέλει να εισάγει στην ταξινόμηση

β) ο χρήστης αντιμετωπίζει το πρόβλημα προσδιορισμού της αντιστοιχείας των φασματικών ομάδων που περιέχουν τα είδη της πληροφορίας

Επιπρόσθετα, εξίσου σημαντικά είναι τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου τα οποία είναι:

α) η πιθανότητα οι περιοχές που έχουν καθοριστεί από τον χρήστη να μην αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ομάδες πληροφορίας

β) τα δεδομένα που επιλέγονται μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για ολόκληρη την εικόνα

γ) η αντιστοιχεία των προβλεπόμενων περιοχών «εκπαίδευσης» (όπως απεικονίζονται στις δορυφορικές εικόνες κτλ.), με εκείνες που φαίνονται στην εικόνα (Μερτίκας, 1999).

Για την πραγματοποίηση του χάρτη ελεγχόμενης ταξινόμησης (Εικόνα 11), χρησιμοποιήθηκαν 4-5 περιοχές ενδιαφέροντος (AOI, Area Of Interest) για κάθε τύπο εδαφικής κάλυψης –με την βοήθεια πάντα της δορυφορικής εικόνας QuickBird– έτσι ώστε η ταξινόμηση να είναι όσο το δυνατό αντιπροσωπευτική. Παρόλα αυτά, ο χάρτης της ελεγχόμενης ταξινόμησης εμφανίζει κάποια σφάλματα καθώς όπως παρατηρείται και στον πίνακα , οι τιμές της εικόνας συνοχής δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανά τύπο κάλυψης γης. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο είναι εμφανής η κάλυψη ορισμένων περιοχών με κάποιες άλλες.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η δημιουργία μιας εικόνας συνοχής με την βοήθεια της τεχνικής της συμβολομετρίας, παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την μελέτη της «συμπεριφοράς» των διάφορων τύπων εδαφικής κάλυψης και κατ' επέκταση της παραγωγής χαρτών κάλυψης γης.

Κάθε τύπος εδαφικής κάλυψης σύμφωνα με την εικόνα μέσης συνοχής εμφανίζει αναμενόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, στους τύπους κάλυψης της αστικής δόμησης και των γυμνών πετρωμάτων, ο βαθμός συνοχής είναι υψηλότερος σε σχέση με άλλους εδαφικούς τύπους κάλυψης, όπως η βλάστηση που οι τιμές συνοχής είναι αρκετά χαμηλές.

Ωστόσο, οι στατιστικές τιμές της μέσης εικόνας συνοχής είναι πιθανό να εμφανίζουν σφάλματα τα οποία προέρχονται

κυρίως από την γεωμετρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας QuickBird.

Επιπλέον, στη μέση εικόνα, η συνοχή θα μπορούσε να υποβαθμιστεί λόγω των αλλαγών που λαμβάνουν χώρα σε κάθε τύπο κάλυψης της γης, αλλά και λόγω άλλων παραμέτρων όπως η χωρική μη συσχέτιση (decorrelation) μεταξύ των ζευγαριών SAR που εξετάστηκαν για την παραγωγή της τελικής εικόνας συνοχής. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό πως οι προσπάθειες πρόβλεψης του βαθμού συνοχής για μια μέση εικόνα συνοχής όπως κατά την εξέταση ενός απλού ζευγαριού SAR εξετάζοντας απλά την κάλυψη της γης όπως τη βλάστηση κτλ, χωρίς λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως: το κλίμα, το ανάγλυφο και το χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων των εικόνων κ.λπ, δεν παράγει τόσο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Εν συνεχεία, αξιοποιώντας τα στατιστικά δεδομένα της εικόνας συνοχής για κάθε τύπο κάλυψης γης, παράχθηκαν χάρτες κάλυψης γης, με σκοπό την απεικόνιση της θεματικής τους πληροφορίας. Όπως αναφέρθηκε και στον κύριο κορμό της εργασίας, τα αποτελέσματα κατά κύριο λόγο ήταν αναμενόμενα, παρόλα τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν. Εν κατακλείδι, η παραγωγή της εικόνας συνοχής μέσω της τεχνικής της συμβολομετρίας, αποδείχθηκε σημαντικά αξιοποίησιμη με σκοπό την παραγωγή θεματικών χαρτών κάλυψης γης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μιγκίρος, Γ. , Παυλόπουλος, Α., Παρχαρίδης, Ι., Γατσής, Ι., Ψωμιάδης, Ε. (2003), *Τηλεπισκόπηση: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*, Αθήνα.

Μερτίκας, Π.Σ.(1999), *Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας*, Αθήνα, ΙΩΝ.

Hanssen, R.F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*,USA , Kluwer Academic Pub.

Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation,* Italy, Karen Fletcher.

Καρτάλης Κ., Φειδάς Χ. (2006), *Αρχές και εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης*, Αθήνα.

Askne, J., Dammert, P. B. G., Ulander, L. M. H., Smith, G., "C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, 1, pp. 25-35, 1997.

Gatelli, F., Monti Guarnieri, A., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F., "The wavenumber shift in SAR interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, 4, pp. 855-865, 1994.

Schwäbisch, M., Geudtner, D., "Improvement of phase and coherence map using azimuth prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR," Proceedings of IGARSS'95, Florence, 10-14 July, pp. 205-207, 1995.

Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., Vachon, P. W., "Coherence estimation for SAR imagery," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, 1, pp. 135-149, 1999.

Zebker, H. A., Villasenor, J., "Decorrelation in interferometric radar echoes," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, 5, pp. 950-959, 1992.

Goldstein, R. M., Zebker, H.,Werner C. L., "Satellite radar interferometry: Two dimentional phase unwrapping", Radio Science, vol. 23, 4, pp. 713-720, 1988.

Askne J. & Hagberg O., Potential of Interfeormetric SAR for classification of Land surfaces. Proceedings. of the International

Geosciences & Remote Sensing Symposium, Tokyo, 985-987, 1993.

Zebker H.A., Vilasenor S., IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 30 (5), 560-567, 1992.

Wang C., Zhang H., Shan X., Ma J., Liu Z., Chen S., Lu G., Tang and Guo Z., "Applying SAR Interferometry for Ground Deformation Detection in China", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 70, No 10, pp. 1157-1165, 2004.

Wright T.J., "Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry", Phil, Trans, R. Soc. Lond. 360, 2873-2888, 2002.

Srivastava S.K., Jayaraman V., "Relating interferometric signature of repeat pass ERS-1 SAR signals to dynamic land cover changes", Indian Space Research Organization, 1998.

Stabel Ms.E., Loffler E., "Optimised mapping of flood extent and floodplain structures by radar eo-methods", Proceedings of FRINGE Workshop, 2003.

Ge L., Chang H-C., Qin L., Chen M., Rizos C., "Differential radar interferometry for mine subsidence monitoring", Proceedings 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, 2003.

Prati C., Rocca F., "Use of the Spectral Shift in SAR Interferometry", Proc. of the First ERS-1 Symposium, Cannes, pp. 691-696, November 1993.

Alaska Satellite Facility, στην ιστοσελίδα http//:www.asf.alaska.edu/about_sar

Department of Earth Observation and Space Systems, http://www.deos.tudelft.nl/