



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΘΕΜΑ:

Μελέτη παραμορφώσεων με χρήση διαχρονικής
συμβολομετρίας SAR στην περιοχή των Κυθήρων.

Του

Γεωργίου Μπαλλά

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτρης Παραδείσης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους οι οποίοι συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και στην περάτωση των σπουδών μου στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή της ΣΑΤΜ κύριο Δημήτρη Παραδείση για την ανάθεση και εποπτεία της συγκεκριμένης εργασίας. Θερμές ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτορα Σταυρούλα Αλατζά η οποία με την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε πάνω στο αντικείμενο μελέτης βοήθησε αμέριστα στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον Ιωάννη Παπουτσή, ερευνητή του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Ευχαριστώ την κυρία Αγγελική Μαρίνου, μέλος Ε.ΔΙ.Π. του Εργαστηρίου Ανώτερης Γεωδαισίας, η οποία με παρότρυνε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της διαφορικής συμβολομετρίας κατά τη διάρκεια εκπόνησης του Μαθήματος-Θέματος. Ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Ξάνθο Παπανικολάου για τις πληροφορίες που μου προσέφερε σχετικά με τον σταθμό GPS που βρίσκεται στα Κύθηρα. Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσαν καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα την κυρία Ευαγγελία Λάμπρου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ανιδιοτελή συμπαράσταση και στήριξή τους από την έναρξη των σπουδών μου έως και την περαίωσή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά μήκος του ελληνικού νησιωτικού τόξου, παρατηρείται η εντονότερη σεισμική δραστηριότητα όχι μόνο στον Ελλαδικό χώρο αλλά και σε ολόκληρη την Ευρώπη, γεγονός που καθιστά την συγκεκριμένη περιοχή ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για γεωλογικές και τεκτονικές μελέτες. Τα Κύθηρα αποτελούν τμήμα αυτού του τόξου, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντικό πλήθος καταγεγραμμένων σεισμικών γεγονότων στην ευρύτερη επικράτεια του νησιού. Η πιο πρόσφατη ισχυρή σεισμική δόνηση που έπληξε το νησί, ήταν στις 8 Ιανουαρίου του 2006 με μέγεθος 6.7 της κλίμακας Ρίχτερ και σημειώθηκε σε θαλάσσια περιοχή ανατολικά του νησιού.

Η παρακολούθηση των υψομετρικών μεταβολών της γήινης επιφάνειας με τηλεπισκοπικές μεθόδους έχει παρουσιάσει σημαντική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της οικονομίας χρόνου και κόστους συγκριτικά με επίγειες μεθόδους. Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή SAR είναι ένα τηλεπισκοπικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή απεικονίσεων της επιφάνειας του εδάφους οι οποίες έχουν αρκετά υψηλή ανάλυση. Η επεξεργασία των εικόνων SAR με τη μέθοδο της διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) δύναται να παράγει παραμορφώσεις του εδάφους με ακρίβεια της τάξης του χιλιοστού.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη χρονοσειρών στην περιοχή των Κυθήρων για τον εντοπισμό των εδαφικών παραμορφώσεων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε επεξεργασία δορυφορικών εικόνων SAR, με μεθόδους διαφορικής συμβολομετρίας (DInSAR) και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών (PSInSAR).

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν SLC εικόνες SAR, των δορυφόρων Sentinel 1A και Sentinel 1B, ανοδικής και καθοδικής τροχιάς, για την χρονική περίοδο 2015-2018. Αρχικά, η προεπεξεργασία των εικόνων, για τη δημιουργία των συμβολογραμμάτων, πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πακέτο SNAP, μέσω των ρουτινών του `snar2stamps` (Foumelis et al., 2018). Στη συνέχεια, η μελέτη των χρονοσειρών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου StaMPS (Hooper et al., 2012) με εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας των σταθερών σκεδαστών (PSInSAR). Τέλος, προσδιορίστηκαν οι μετατοπίσεις του εδάφους για την περιοχή των Κυθήρων κατά τη διεύθυνση του δορυφόρου (Line Of Sight) και δημιουργήθηκαν χάρτες παραμορφώσεων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς για την χρονική περίοδο 2015-2018.

ABSTRACT

Along the Hellenic arc, the most intense seismic activity is observed not only in Greece's territory but also throughout Europe, making this area particularly interesting for geological and tectonic studies. Kythira is part of this arch, resulting in a significant number of recorded seismic events in the wider territory of the island. The most recent strong earthquake that hit the island occurred on 8 January 2006, with a magnitude of 6.7 on the Richter scale and was recorded in a marine area east of the island.

The monitoring of altitude variations in terrestrial surface by remote sensing has shown significant growth in recent decades due to time and cost savings compared to terrestrial methods. Synthetic Aperture Radar (SAR) is a remote sensing system widely used to produce ground-level imaging that has a sufficiently high resolution. The processing of SAR images using the SAR Interferometry Differential (DInSAR) technique can produce soil deformations with millimeter accuracy.

The objective of this dissertation is the identification of ground deformation in Kythira island, through time series analysis. For this purpose, SAR images were processed using the Persistent Scatterer Interferometry (PSInSAR) technique, which is a method of Differential SAR Interferometry (DInSAR).

SLC SAR images, from 2015 to 2018, of Sentinel 1A and Sentinel 1B satellites for ascending and descending satellite orbit, were selected and processed. Initially, pre-processing of images, in order to produce interferograms, was performed with SNAP software through the snap2stamps routines (Foumelis et al., 2018). Then, the time-series analysis was carried out using StaMPS software (Hooper et al., 2012) with the Persistent Scatterer Interferometry (PSInSAR) technique. Finally, ground displacements for the island of Kythira, were identified along the Line of Sight (LOS) direction of the satellite's antenna and deformation maps were produced for ascending and descending satellite orbit for the time period 2015-2018.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
Κατάλογος Εικόνων.....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	15
Κατάλογος συντομογραφιών.....	16
1. Εισαγωγή.....	19
2. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης.....	21
2.1. Σεισμικότητα Ελλαδικού χώρου.....	21
2.2. Τεκτονικότητα Νοτίου Αιγαίου.....	22
2.3. Τεκτονικό υπόβαθρο περιοχής μελέτης.....	24
2.3.1. Σεισμικότητα Κυθήρων.....	27
3. Θεωρία SAR.....	33
3.1. Εισαγωγή στο RADAR.....	33
3.2. Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος ή SAR.....	37
3.3. Δορυφόροι SAR.....	38
3.3.1. Ο δορυφόρος Sentinel.....	42
3.4. Χαρακτηριστικά εικόνας SAR.....	48
3.4.1. Το φαινόμενο της κηλίδωσης (Speckle).....	52
3.4.2. Γεωμετρία λήψης.....	53
3.4.3. Παράμετροι που επηρεάζουν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα.....	55
3.4.4. Πολικότητα σήματος.....	58
4. Συμβολομετρία SAR (InSAR).....	61
4.1. Το πείραμα του Young.....	61
4.2. Αρχή της συμβολομετρίας.....	62
4.3. Σφάλματα στην συμβολομετρική φάση.....	64
4.3.1. Γεωμετρικές παραμορφώσεις των SAR λήψεων.....	64
4.3.1.1. Σμίκρυνση (Foreshortening).....	64
4.3.1.2. Πτύχωση (Layover).....	65
4.3.1.3. Σκιά (Shadowing).....	66

4.4. Στάδια επεξεργασίας InSAR	66
4.4.1. Εστίαση (Focusing)	68
4.4.2. Συμπροσαρμογή (Coregistration).....	69
4.4.3. Συμβολόγραμμα (Interferogram).....	69
4.4.4. Συνοχή φάσης (Phase coherence).....	70
4.4.5. Αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης (Flat earth removal).....	72
4.4.6. Ξετύλιγμα της φάσης (Phase unwrapping)	73
4.4.7. Μετατροπή συμβολογράμματος σε χάρτη κατακόρυφων παραμορφώσεων (Phase to displacement)	74
4.4.8. Γεωαναφορά - γεωκωδικοποίηση (Geocoding).....	75
4.5. Διαχρονική Συμβολομετρία SAR	76
4.5.1. Μέθοδος σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry)....	76
4.5.2. Μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset).....	78
5. Επεξεργασία εικόνων SAR	79
5.1. Δεδομένα.....	79
5.2. Επεξεργασία με το λογισμικό SNAP.....	85
5.2.1. Split-Orbit	86
5.2.2. Backgeocoding.....	86
5.2.3. Enhanced spectral diversity.....	86
5.2.4. Deburst	87
5.2.5. Subset	87
5.2.6. Interferogram	87
5.2.7. Topographic phase removal	87
5.2.8. Export to StaMPS.....	88
5.3. Επεξεργασία με το λογισμικό StaMPS	89
6. Αποτελέσματα	95
6.1. Αποτελέσματα PS.....	95
6.1.1. Αποτελέσματα ανοδικής τροχιάς.....	95
6.1.2. Αποτελέσματα καθοδικής τροχιάς.....	98
7. Συμπεράσματα.....	103

Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1: Η Ευρασιατική πλάκα, η Αφρικανική πλάκα, η Αιγαιακή μικροπλάκα και η μικροπλάκα της Ανατολίας (<http://francisco191.blogspot.com/2017/08/tectonic-boundaries-surrounding-greece.html>) 21
- Εικόνα 2: Το ελληνικό νησιωτικό τόξο, το ρήγμα της Κεφαλλονιάς (ΚΦ), το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας (ΝΑΦ) και οι τάφροι Plini (PT) και Strabo (ST) (Χαράλαμπος Κράνης, 2001) 22
- Εικόνα 3: Χάρτης της Ελλάδας όπου απεικονίζονται το ελληνικό νησιωτικό τόξο, το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου, η πρόταφρος και η οπισθόταφρος (Αναστασία Κυρατζή, 2005) 23
- Εικόνα 4: Γεωλογικοί σχηματισμοί νοτίου Αιγαίου (Αναστασία Κυρατζή, 2005) 24
- Εικόνα 5: Χάρτης όπου απεικονίζονται τα ενεργά ρήγματα στο κεντρικό και νότιο τμήμα των Κυθήρων. Επίσης φαίνονται οι μεγάλοι οικισμοί του νησιού, το υδρογραφικό δίκτυο καθώς και η τοπογραφία της περιοχής (Ευαγγελία Ζωβοΐλη, 2016) 25
- Εικόνα 6: Γεωλογικός – Νεοτεκτονικός χάρτης Κυθήρων (Δάναμος, 1992, Λέκκας, 2005) 26
- Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης Κυθήρων όπου απεικονίζονται περιοχές οι οποίες υπέστησαν καταστροφές έπειτα από τον σεισμό στις 8/1/2006. Ο μπλε κύκλος (Α1) υποδηλώνει ζημιές σε λιμενικές και παράκτιες κατασκευές. Οι κόκκινοι κύκλοι (Β1-Β8) αντιπροσωπεύουν περιοχές όπου παρατηρήθηκαν κατολισθήσεις, πτώσεις βράχων και καταστροφές κατά μήκος του οδικού δικτύου. Ο πράσινος κύκλος (C1) υποδηλώνει προβλήματα υδροδότησης στο χωριό Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006) 28
- Εικόνα 8: Καταστροφές σε κτήρια και υποδομές των Κυθήρων έπειτα από τον σεισμό στις 8/1/2006. α) Κατολισθήση στο χωριό Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006) β) Κατάρρευση κτηρίου στα Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006), γ) Βλάβες στον Ιερό ναό Αγίας Τριάδος στα Μητάτα (Ευαγγελία Ζωβοΐλη, 2016) και δ) Πτώσεις βράχων (Β2-Εικόνα7) κοντά στα Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006) 29
- Εικόνα 9: Χάρτης του επικέντρου του κύριου σεισμού ανατολικά των Κυθήρων στις 8/1/2006 (άστρο) και των μετασεισμών που ακολούθησαν. Η μετασεισμική ζώνη έχει μήκος 28 χιλιόμετρα. Σχεδόν όλες οι εστίες των μετασεισμών βρίσκονται σε βάθη μεταξύ 55 και 75 χιλιομέτρων, σχηματίζοντας έτσι ένα σχεδόν κατακόρυφο επίπεδο διάρρηξης ορθογωνίου σχήματος με διαστάσεις 28 χλμ x 20 χλμ. (Μαρία Ειρήνη Νικολήνταγα κ.ά., 2008) 30
- Εικόνα 10: Καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα σε ακτίνα 60 χιλιομέτρων από το νησί των Κυθήρων μεγέθους 4 Ρίχτερ και άνω στην χρονική περίοδο από 31/1/2006 έως 10/1/2019. Με μπλε απεικονίζονται οι σεισμοί εστιακού βάθους έως 15 χιλιομέτρων, με πράσινο οι σεισμοί εστιακού βάθους 15 έως 30 χιλιομέτρων, με κίτρινο οι σεισμοί εστιακού βάθους 30 έως 60 χιλιομέτρων και με πορτοκαλί οι σεισμοί εστιακού βάθους 60 έως 100 χιλιομέτρων (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) 31

Εικόνα 11: Αρχή λειτουργίας συστήματος radar (Δημήτριος Ιακωβίδης, 2016)	35
Εικόνα 12: a) Ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (Τροποποιημένη από www.easycalculation.com), b) Αλτιμετρικό ραντάρ (δορυφόρος TOPEX/Poseidon) (www.aviso.altimetry.fr), c) Ραντάρ διασκορπισμού (δορυφόρος της αποστολής ERS) (Τροποποιημένη από Anna Maria Sempreviva et al., 2008)	36
Εικόνα 13: Φυσικό και συνθετικό άνοιγμα κεραίας συστήματος SAR (Δημήτρης Δεληκαράογλου)	38
Εικόνα 14: Περιοχή κάλυψης ΨΜΕ SRTM (Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)	39
Εικόνα 15: Σύγκριση ΨΜΕ SRTM χωρικής ανάλυσης 30 μέτρων και 90 μέτρων σε περιοχή της Τανζανίας (NASA/JPL-Caltech/National Geospatial Intelligence Agency, 2014)	40
Εικόνα 16: Διεύθυνση διάδοσης ακτινοβολίας κεραίας SAR του δορυφόρου Sentinel-1. Στην ανοδική τροχιά η ακτινοβολία έχει ανατολική διεύθυνση, ενώ στην καθοδική τροχιά κατευθύνεται δυτικά. (https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda-e.html#q2-9)	43
Εικόνα 17: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος SAR της δορυφορικής αποστολής Sentinel-1 (ESA)	43
Εικόνα 18: Η αριστερή λωρίδα (IW1) και οι υπολωρίδες της εικόνας ανοδικής τροχιάς που λήφθηκε στις 6/4/2018 και χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση, όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα SNAP κατά το στάδιο επεξεργασίας S-1 TOPS Split	44
Εικόνα 19: Γεωμετρία λήψης εικόνων με την τεχνική TOPSAR (Wei Yang et al., 2016)	45
Εικόνα 20: Η πρώτη λωρίδα εικόνας SAR που λήφθηκε πάνω από την Toulouse a) με την τεχνική TOPSAR και b) με την τεχνική ScanSAR. Δεν έχει εφαρμοστεί διόρθωση Scalloping. Με την τεχνική ScanSAR χρειάστηκαν 33 υπολωρίδες, ενώ με την τεχνική TOPSAR μόνο 9. Είναι εμφανής η επίδραση του Scalloping στην εικόνα ScanSAR η οποία συμβάλλει σε χαμηλή τιμή του SNR (Adriano Meta et al., 2008)	46
Εικόνα 21: Οι δορυφόροι Sentinel-1 και Sentinel-2 (SENSAGRI)	47
Εικόνα 22: Διανυσματική απεικόνιση μιγαδικού αριθμού εικόνας SAR στο μιγαδικό επίπεδο όπου φαίνεται ο φανταστικός (imaginary) και ο πραγματικός (real) άξονας. Ακόμη, φαίνεται το πλάτος (A) και η φάση (φ) του κύματος (Alberto Moreira, 2013)	49
Εικόνα 23: Κεκλιμένη απόσταση γειτονικών εικονοστοιχείων	50
Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση μήκους παλμού και μήκους κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	50
Εικόνα 25: Παλμός γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας (Samiur Rahman, 2010)	51
Εικόνα 26: Η ημιτονοειδής μορφή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας της κεραίας του συστήματος SAR (ESA)	52

Εικόνα 27: Εικόνα SAR από τον δορυφόρο ERS-2, όπου απεικονίζεται το αεροδρόμιο Linate στο Μιλάνο της Ιταλίας. Είναι εμφανή τα στίγματα (speckles) στις ομογενείς περιοχές που περιβάλλουν το αεροδρόμιο. (Alessandro Ferretti et al., 2007)	53
Εικόνα 28: Γεωμετρία λήψης εικόνων SAR	54
Εικόνα 29: α) Το φαινόμενο της διπλής ανάκλασης (double bounce) (Τροποποιημένη από Sybrand van Beijma et al., 2014), β) Γωνία μεταξύ του τοίχου του κτιρίου και της διεύθυνσης αζιμουθίου	56
Εικόνα 30: Εικόνες εύρους (εντάσεως φωτεινότητας) από λήψεις του δορυφόρου TerraSAR-X. Φαίνεται η υψηλή ανακλαστικότητα λείων επιφανειών (ασφαλτοστρωμένος δρόμος, θάλασσα, ποτάμι, λίμνη) (Τροποποιημένη από Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)	57
Εικόνα 31: Βαθμός διείδυσης ακτινοβολίας στα δέντρα για διάφορες περιπτώσεις μήκους κύματος. α) κανάλι X, β) κανάλι C και γ) κανάλι L (Τροποποιημένη από ESA)	58
Εικόνα 32: Επίδραση της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών επί του εδάφους στην ανακλαστικότητα του οπισθοσκεδαζόμενου κύματος, α) ξηρό έδαφος: μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διαπερνά το έδαφος και έτσι η οπισθοσκέδαση είναι μικρή, β) υγρό έδαφος: η παρουσία υγρασίας αυξάνει την διηλεκτρική σταθερά του στόχου και η ανάκλαση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη, γ) πλημμυρισμένο έδαφος: το έδαφος είναι πλήρως καλυμμένο με νερό και η ανακλαστικότητα παίρνει την μέγιστη τιμή της (Τροποποιημένη από Humboldt State University)	58
Εικόνα 33: α) Κατακόρυφη και β) Οριζόντια πόλωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Τροποποιημένη από Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών)	59
Εικόνα 34: Το πείραμα του Young (αριστερά) και η εικόνα συμβολής (δεξιά) (Τροποποιημένη από Φίλοι του Ιδρύματος Κέντρο Διάδοσης Επιστημών και Μουσείο Τεχνολογίας πρώην Τεχνικό Μουσείο Θεσσαλονίκης)	61
Εικόνα 35: Συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης και κάθετο διάνυσμα βάσης (Geospatial Information Authority of Japan)	63
Εικόνα 36: α) Συμβολομετρία απλής υπερπτήσης και β) συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης (Τροποποιημένη από Veronica Mitchell)	63
Εικόνα 37: Σμίκρυνση (Kangwon National University)	65
Εικόνα 38: Πτύχωση (Natural Resources Canada)	65
Εικόνα 39: Σκιά (Τροποποιημένη από Natural Resources Canada)	66
Εικόνα 40: α) Ανεπεξέργαστη εικόνα SAR, β) Εικόνα SAR συμπιεσμένη στην πλάγια διεύθυνση, γ) SLC εικόνα SAR (Τροποποιημένη από J.A. Johannessen et al., 2013)	68
Εικόνα 41: Συμπροσαρμογή (Coregistration) (SNAP)	69
Εικόνα 42: α) Συμβολόγραμμα με την επίδραση της καμπυλότητας της γης (Unflattened interferogram) β) Συμβολόγραμμα διορθωμένο από την επίδραση της καμπυλότητας της γης	

(Flattened interferogram) (Τροποποιημένη από Salvatore Stramondo και Antonio Montuori, 2015)	73
Εικόνα 43: α) Τυλιγμένο (Wrapped) και β) ξετυλιγμένο (Unwrapped) συμβολόγραμμα που απεικονίζει τις μετατοπίσεις λόγω του σεισμού της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου του 1999 (Τροποποιημένη από Ιωάννης Κώτσης κ.ά., 2008)	74
Εικόνα 44: Χάρτης κατακόρυφων μετατοπίσεων της περιοχής Jharia στην Ινδία που προέκυψε από δύο εικόνες SAR (13/10/2007 και 22/12/2007). Θετική τιμή της μετατόπισης υποδηλώνει καθίζηση, ενώ αρνητική τιμή υποδηλώνει ανύψωση του εδάφους. (Nishant Gupta et al., 2013)	75
Εικόνα 45: Γεωαναφορά εικόνας SAR (Τροποποιημένη από Rudiger Gens)	76
Εικόνα 46: Χάρτης της πόλης του Μεξικού όπου απεικονίζεται το μέγεθος και η ταχύτητα των παραμορφώσεων, υπολογισμένα με χρήση 12 εικόνων SAR από τον δορυφόρο Sentinel-1 (Michele Crosetto et al., 2016)	77
Εικόνα 47: Δίκτυο συμβολογραμμάτων με τη μέθοδο PS και τη μέθοδο SBAS (Ι. Παπουτσής, 2014)	78
Εικόνα 48: Περιοχή απεικόνισης λήψεων καθοδικής τροχιάς δορυφόρου (πράσινο πλαίσιο) και ανοδικής τροχιάς δορυφόρου (κίτρινο πλαίσιο)	80
Εικόνα 49: Κάθετα διανύσματα βάσης (κατακόρυφος άξονας) και χρονικές βάσεις (οριζόντιος άξονας) λήψεων για την καθοδική τροχιά (No 7) του δορυφόρου	83
Εικόνα 50: Γεωμετρία δικτύου ζευγών εικόνων καθοδικής τροχιάς (No 7) δορυφόρου, όπου απεικονίζονται τα κάθετα διανύσματα βάσης και η χρονική βάση (StaMPS)	83
Εικόνα 51: Κάθετα διανύσματα βάσης (κατακόρυφος άξονας) και χρονικές βάσεις (οριζόντιος άξονας) λήψεων για την ανοδική τροχιά (No 102) του δορυφόρου	84
Εικόνα 52: Γεωμετρία δικτύου ζευγών εικόνων ανοδικής τροχιάς (No 102) δορυφόρου, όπου απεικονίζονται τα κάθετα διανύσματα βάσης και η χρονική βάση (StaMPS)	84
Εικόνα 53: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας στο SNAP (Τροποποιημένη από SNAP)	85
Εικόνα 54: Ο μόνιμος σταθμός GPS KITH στα Κύθηρα	92
Εικόνα 55: α) Ακτίνα 50 μέτρων γύρω από τον μόνιμο σταθμό GPS KITH στον Κρατικό Αερολιμένα Κυθήρων, β) Χάρτης Κυθήρων όπου απεικονίζεται η θέση του Κρατικού Αερολιμένα Κυθήρων (Τροποποιημένη από Google Earth)	92
Εικόνα 56: Ταχύτητες μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS)	96
Εικόνα 57: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων των σκεδαστών από την μέση τιμή της ταχύτητας τους για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. (QGIS)	97

Εικόνα 58: Εκτίμηση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης (spatially-correlated look angle error) για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι τιμές παρουσιάζονται σε φάση ανά μέτρο του κάθετου διανύσματος βάσης (QGIS) 98

Εικόνα 59: Ταχύτητες μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS) 99

Εικόνα 60: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων των σκεδαστών από την μέση τιμή της ταχύτητας τους για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. (QGIS) 100

Εικόνα 61: Εκτίμηση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης (spatially-correlated look angle error) για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι τιμές παρουσιάζονται σε φάση ανά μέτρο του κάθετου διανύσματος βάσης (QGIS) 101

Εικόνα 62: α) Χάρτης ταχυτήτων μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου, β) Χάρτης ταχυτήτων μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS) 103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κανάλια συχνότητων λειτουργίας συστημάτων ραντάρ και οι τυπικές χρήσεις τους (American Institute of Aeronautics and Astronautics και Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)	34
Πίνακας 2: Ιστορική αναδρομή και βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων SAR	42
Πίνακας 3: Στοιχεία δεδομένων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς	79
Πίνακας 4: Εικόνες SAR καθοδικής τροχιάς δορυφόρου	80
Πίνακας 5: Εικόνες SAR ανοδικής τροχιάς δορυφόρου	81
Πίνακας 6: Ενδεικτικές παράμετροι επεξεργασίας του λογισμικού StaMPS και οι επιλεγμένες τιμές τους	89

Κατάλογος συντομογραφιών

I.Γ.Μ.Ε. : Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

ΨΜΕ : Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

ALOS : Advanced Land Observing Satellite

AOE: Atmosphere and Orbit Error

ASAR : Advanced Synthetic Aperture Radar

ASI : Agenzia Spaziale Italiana

ASV : Air to Surface Vessel

BWB : Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung

CAST : China Association for Science and Technology

chirp : compressed high intensity radar pulse

CONAE : COMisión Nacional de Actividades Espaciales

COSMO : CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation

CRESDA : Centre for RESources Satellite Data and Application

CSA : Canadian Space Agency

DEM : Digital Elevation Model

DInSAR : Differential Interferometric SAR

DLR : Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt

DTAR : Distributed Target Ambiguity Ratio

ENVISAT : ENVIronment SATellite

ERS : European Remote Sensing

ESA : European Space Agency

GPS : Global Positioning System

InSAR : Interferometric SAR

ISRO : Indian Space Research Organisation

JAXA : Japan Aerospace eXploration Agency

JPL : Jet Propulsion Laboratory

KARI : Korea Aerospace Research Institute

KOMPSAT : KOrea Multi-Purpose SATellite

MATLAB : MATrix LABoratory

MDA : MacDonald, Dettwiler and Associates

MERIS : MEdium-Resolution Imaging Specrometer

MODIS : MODerate-resolution Imagine Spectrometer

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NRSCC : National Remote Sensing Center of China

PALSAR : Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar

PRF : Pulse Repetition Frequency

PS : Permanent Scatterer

PSInSAR : Persistent Scatterer Interferometric SAR

QGIS : Quantum Geographic Information System

RADAR : RAdio Detection And Ranging

RADARSAT : RADAR SATellite

RAR : Real Aperture Radar

RISAT : Radar Imaging SATellite

SAOCOM : Satélite Argentino de Observación CO n Microondas

SAR : Synthetic Aperture Radar

SBAS : Small BASeline

ScanSAR : Scanning Synthetic Aperture Radar

SeaSat : Seafaring Satellite

SENSAGRI : SENTinels Synergy for AGRiculture

SIR : Side-looking Imagine Radars

SIR-C : Spaceborne Imaging Radar-C

SLAR : Side Looking Airborne Radar

SLC : Single Look Complex

SNAP : SentiNel Application Platform

SNR : Signal-to-Noise Ratio

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

StaMPS : Stanford Method for Persistent Scatterers

TOPEX : TOPography Experiment

TOPSAR : Terrain Observation with Progressive scans SAR

USGS : United States Geological Survey

UTC : Universal Time Coordinated

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε για την μελέτη των παραμορφώσεων του εδάφους στο νησί των Κυθήρων με αφορμή τον σεισμό της 8ης Ιανουαρίου του 2006. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος της διαχρονικής συμβολομετρίας με την αξιοποίηση πολλών εικόνων SAR.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στα όρια σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, όπως το ελληνικό νησιωτικό τόξο. Ακόμη, γίνεται αναφορά στα γεωλογικά χαρακτηριστικά (π.χ. ρήγματα) και στην σεισμικότητα των Κυθήρων και ιδιαίτερα στον σεισμό της 8ης Ιανουαρίου 2006.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται το σύστημα ραντάρ και ειδικότερα το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή SAR. Γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και στη γεωμετρία λήψης του συστήματος SAR. Γίνεται περιγραφή δορυφόρων οι οποίοι έχουν χρησιμοποιήσει κατά καιρούς ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους δορυφόρους του προγράμματος SENTINEL. Περιγράφεται η εικόνα SAR και ο τρόπος που αυτή δημιουργείται. Γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της κηλίδωσης και παρατίθενται οι διάφοροι παράμετροι που επιδρούν στο ανακλώμενο σήμα που επιστρέφει στην κεραία του ραντάρ. Τέλος, γίνεται αναφορά στην πολικότητα του σήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η τεχνική της συμβολομετρίας SAR. Εξηγείται το πείραμα του Young, ενώ αναφέρονται τα σφάλματα της συμβολομετρικής φάσης και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις που παρατηρούνται σε μια εικόνα SAR. Περιγράφονται τα βήματα της επεξεργασίας των εικόνων SAR. Επίσης, αναπτύσσεται η μέθοδος των χρονοσειρών στη διαφορική συμβολομετρία και περιγράφονται δύο από τις πιο γνωστές μεθόδους, η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry) και η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset).

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα δεδομένα και εξηγούνται τα βήματα επεξεργασίας των εικόνων SAR στα λογισμικά SNAP και StaMPS.

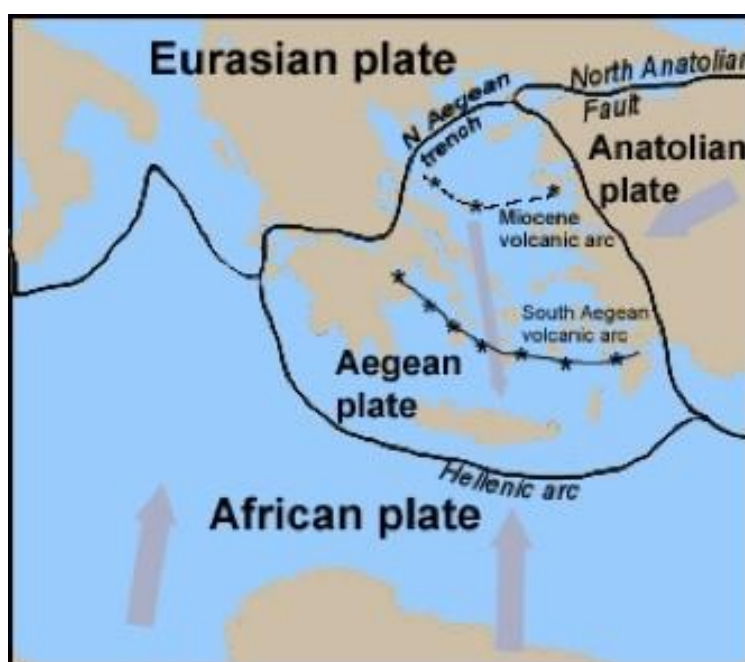
Στο έκτο κεφάλαιο προβάλλονται τα αποτελέσματα των επεξεργασιών που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων και για τις δύο τροχιές του δορυφόρου. Για την προβολή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό QGIS. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται οι χάρτες μετατόπισης του εδάφους, της τυπικής απόκλισης από την μέση τιμή της μετατόπισης του εδάφους και του σφάλματος του ΨΜΕ για το χρονικό διάστημα στο οποίο λήφθηκαν δεδομένα της περιοχής μελέτης.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των χαρτών μετατόπισης του εδάφους και για τις δύο τροχιές του δορυφόρου. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για τις δύο τροχιές του δορυφόρου.

2. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

2.1. Σεισμικότητα Ελλαδικού χώρου

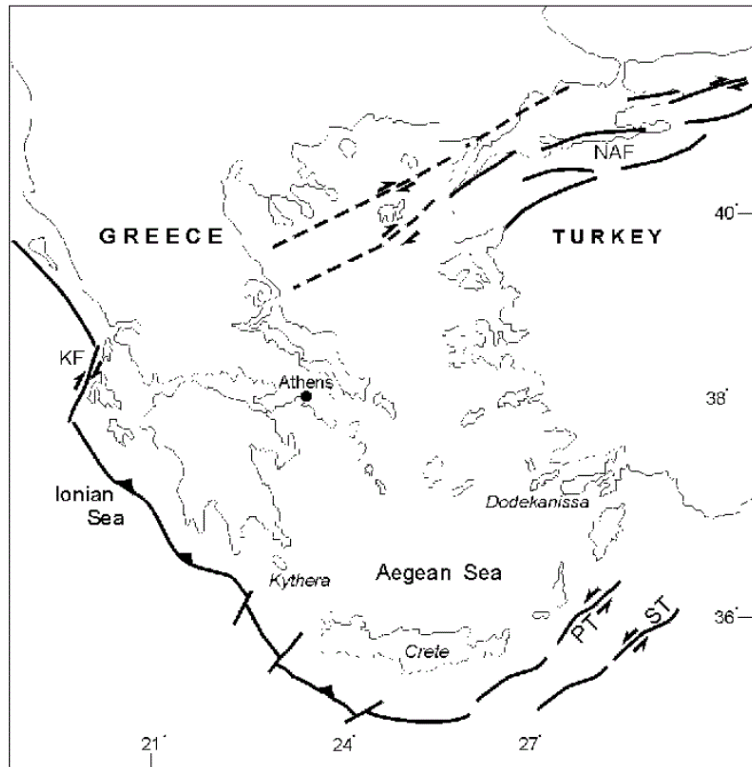
Ο ευρύτερος Ελλαδικός χώρος είναι περιοχή συνάντησης της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Η Αιγαιακή μικροπλάκα και η μικροπλάκα της Ανατολίας αποτελούν τμήματα της Ευρασιατικής πλάκας (Εικόνα 1). Οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί (ελληνικό νησιωτικό τόξο), τα ρήγματα και η αλληλεπίδραση στα όρια αυτών των πλακών προκαλεί την έντονη σεισμική δραστηριότητα, που παρατηρείται στον χώρο.



Εικόνα 1: Η Ευρασιατική πλάκα, η Αφρικανική πλάκα, η Αιγαιακή μικροπλάκα και η μικροπλάκα της Ανατολίας (<http://francisco191.blogspot.com/2017/08/tectonic-boundaries-surrounding-greece.html>)

Το ελληνικό νησιωτικό τόξο είναι ένα γεωλογικό τόξο που διασχίζει την νότια νησιωτική Ελλάδα, την νότια και δυτική Πελοπόννησο και φτάνει μέχρι τα νότια Επτάνησα και αναλύεται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 2.2.

Το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας είναι ένα ηπειρωτικό δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης μήκους 1500 χιλιομέτρων και αποτελεί το τεκτονικό όριο μεταξύ της μικροπλάκας της Ανατολίας και της Ευρασιατικής πλάκας. Εκτείνεται από την περιοχή Καρλιόβα της Ανατολικής Τουρκίας και φτάνει μέχρι την ηπειρωτική Ελλάδα διασχίζοντας το βόρειο Αιγαίο. Η έντονη σεισμική δραστηριότητα στο βόρειο Αιγαίο οφείλεται στην ύπαρξη του ρήγματος αυτού (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Το ελληνικό νησιωτικό τόξο, το ρήγμα της Κεφαλονιάς (KF), το ρήγμα της βόρειας Ανατολίας (NAF) και οι τάφροι Plini (PT) και Strabo (ST) (Χαράλαμπος Κράνης, 2001)

2.2. Τεκτονικότητα Νοτίου Αιγαίου

Στην περιοχή του νοτίου Αιγαίου παρατηρείται σύγκλιση της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας με ταχύτητα μικρότερη του 1 cm/έτος και της Ευρασιατικής με ταχύτητα 3.5 cm/έτος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πολλών γεωλογικών σχηματισμών. Το ελληνικό νησιωτικό τόξο δημιουργήθηκε λόγω της βύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζει την περιοχή του ελληνικού τόξου ως την πιο ενεργά σεισμική στην Ευρώπη. Στην περιοχή του νησιωτικού τόξου κυριαρχούν ισχυρές δυνάμεις συμπίεσης με αποτέλεσμα την διόγκωση του γήινου φλοιού ο οποίος σχηματίζει μια τριγωνική μορφή γνωστή ως πρίσμα επαύξησης.

Τα Κύθηρα αποτελούν τμήμα του ελληνικού νησιωτικού τόξου, όπως και τα νότια Δωδεκάνησα, η Κρήτη, τμήματα της νότιας και δυτικής Πελοποννήσου και τα νότια Επτάνησα (Ζάκυνθος, Κεφαλονιά, Λευκάδα).

Νότια του ελληνικού νησιωτικού τόξου, εκεί όπου η ωκεάνια λιθόσφαιρα της Μεσογείου (μετωπικό τμήμα της Αφρικανικής πλάκας) καταβυθίζεται κάτω από την Αιγαιακή πλάκα, βρίσκεται η πρόταφος ή ελληνική τάφος. Εκεί το βάθος της θάλασσας είναι μεγάλο και συναντάται το χαμηλότερο σημείο του θαλάσσιου πυθμένα της Μεσογείου νοτιοδυτικά της Πύλου, στο Φρέαρ των Οινουσσών (5267 μέτρα).

Βόρεια του ελληνικού νησιωτικού τόξου βρίσκεται η οπισθόταφος, η οποία περιλαμβάνει την αβαθή θάλασσα του Κρητικού και του Καρπάθιου πελάγους. Ακόμη βορειότερα παρατηρείται το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου το οποίο ξεκινά από το Σουσάκι Κορινθίας και συνεχίζει προς τα Μέθανα, τον Πόρο, την Αίγινα, την Μήλο, την Κίμωλο, την Σαντορίνη και καταλήγει στην Νίσυρο και την Κω (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Χάρτης της Ελλάδας όπου απεικονίζονται το ελληνικό νησιωτικό τόξο, το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου, η πρόταφρος και η οπισθόταφρος (Αναστασία Κυρατζή, 2005)

Κάτω από το ελληνικό νησιωτικό τόξο βρίσκεται η ζώνη Wadati–Benioff (Εικόνα 4), η οποία είναι υπεύθυνη για την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Όσο πιο μακριά βρίσκεται μια περιοχή από το νησιωτικό τόξο τόσο αυξάνεται και το εστιακό βάθος των σεισμών. Έτσι οι σεισμοί με επίκεντρο κατά μήκος του ελληνικού νησιωτικού τόξου είναι επιφανειακοί με εστιακό βάθος 0 έως 60 χιλιόμετρα και χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ένταση.

Ο μεγαλύτερος καταγεγραμμένος σεισμός στην περιοχή της Μεσογείου σημειώθηκε το 365 μ.Χ. με επίκεντρο κοντά στις ακτές της δυτικής Κρήτης και ήταν μεγέθους 8.3 Ρίχτερ. Άλλοι μεγάλοι σεισμοί άνω των 7 Ρίχτερ που σημειώθηκαν τον 20ο αιώνα κατά μήκος του ελληνικού νησιωτικού τόξου είναι στις 11/8/1903 στα Κύθηρα μεγέθους 7.9 Ρίχτερ, στις 26/6/1926 στη Ρόδο μεγέθους 8 Ρίχτερ, στις 12/8/1953 στην Κεφαλλονιά μεγέθους 7.2 Ρίχτερ, στις 9/7/1956 στην Αμοργό μεγέθους 7.5 Ρίχτερ και στις 25/4/1957 στην Ρόδο μεγέθους 7.2 Ρίχτερ.

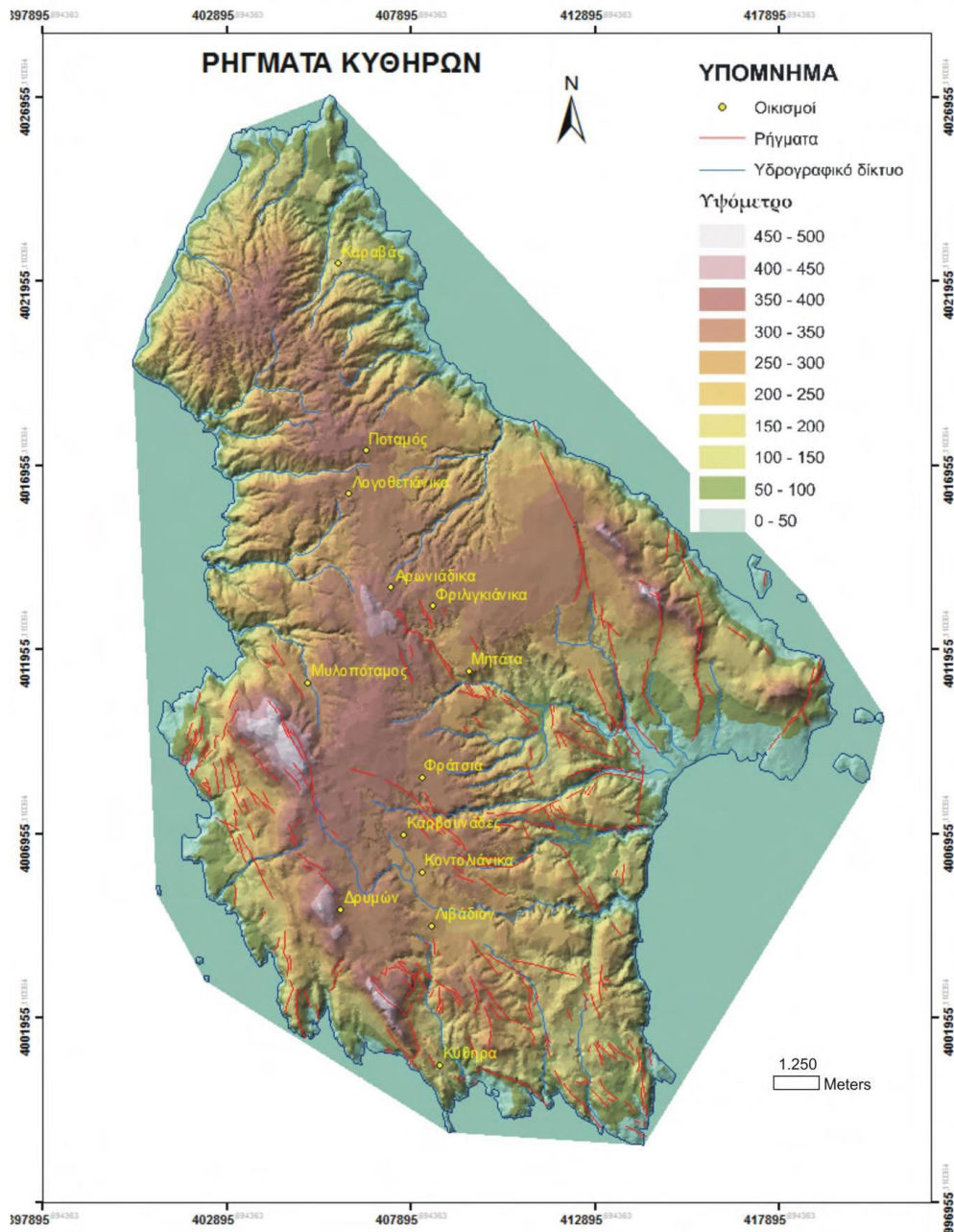


Εικόνα 4: Γεωλογικοί σχηματισμοί νοτίου Αιγαίου (Αναστασία Κυρατζή, 2005)

2.3. Τεκτονικό υπόβαθρο περιοχής μελέτης

Η ανατολική Μεσόγειος χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονικότητα, όπως φαίνεται από το μεγάλο πλήθος και την ένταση των καταγεγραμμένων σεισμικών γεγονότων. Ακόμη, υπάρχει έντονη ρηγμάτωση, όπως πιστοποιείται από την παρουσία 963 ενεργών ρηγμάτων στο ανώτερο τμήμα της Αιγαιακής και Ευρασιατικής πλάκας και σε περιοχές γύρω από το ελληνικό τόξο (Γκανάς Α. κ.ά., 2017).

Τα Κύθηρα αποτελούν μέρος μιας τεκτονικά ενεργής κορυφογραμμής, η οποία υφίσταται ανύψωση και ισχυρή ρηγμάτωση, όπως πιστοποιείται από την εκδήλωση σεισμών (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 2003). Η ανύψωση είναι εντονότερη στις ανατολικές ακτές. Τα ρήγματα που παρατηρούνται στα Κύθηρα έχουν ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση (Εικόνα 5) και πιθανότατα έχουν διαμορφώσει την σημερινή μορφολογία και ακτογραφία του νησιού.



Εικόνα 5: Χάρτης όπου απεικονίζονται τα ενεργά ρήγματα στο κεντρικό και νότιο τμήμα των Κυθήρων. Επίσης φαίνονται οι μεγάλοι οικισμοί του νησιού, το υδρογραφικό δίκτυο καθώς και η τοπογραφία της περιοχής (Ευαγγελία Ζωβοΐλη, 2016)

Σύμφωνα με το Ι.Γ.Μ.Ε. το γεωλογικό υπόβαθρο των Κυθήρων αποτελούν σχηματισμοί οι οποίοι ανήκουν στις ακόλουθες γεωτεκτονικές ενότητες (Εικόνα 6):

- Την ενότητα Άρνας

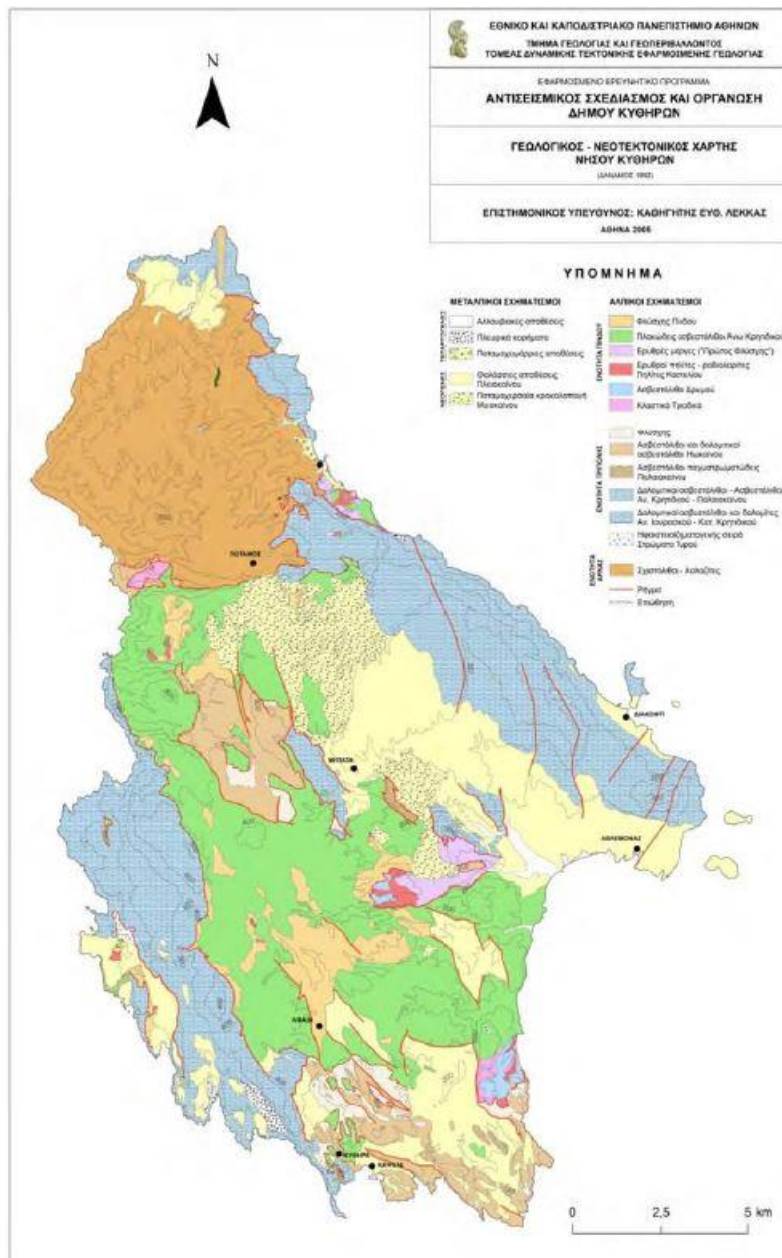
Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται μεταμορφωσιγενή κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα τα οποία συναντώνται στο βόρειο τμήμα του νησιού.

- Την ενότητα Τρίτολης

Οι σχηματισμοί αυτής της ενότητας καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις στο ανατολικό και δυτικό τμήμα του νησιού, ενώ σημαντική επιφανειακή εμφάνιση των σχηματισμών της ζώνης παρατηρείται στο βόρειο και κεντρικό τμήμα του νησιού, στις δυο οροσειρές.

- Την ενότητα Πίνδου

Οι σχηματισμοί της ζώνης αυτής καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση του νησιού, κυρίως στο κεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα του.



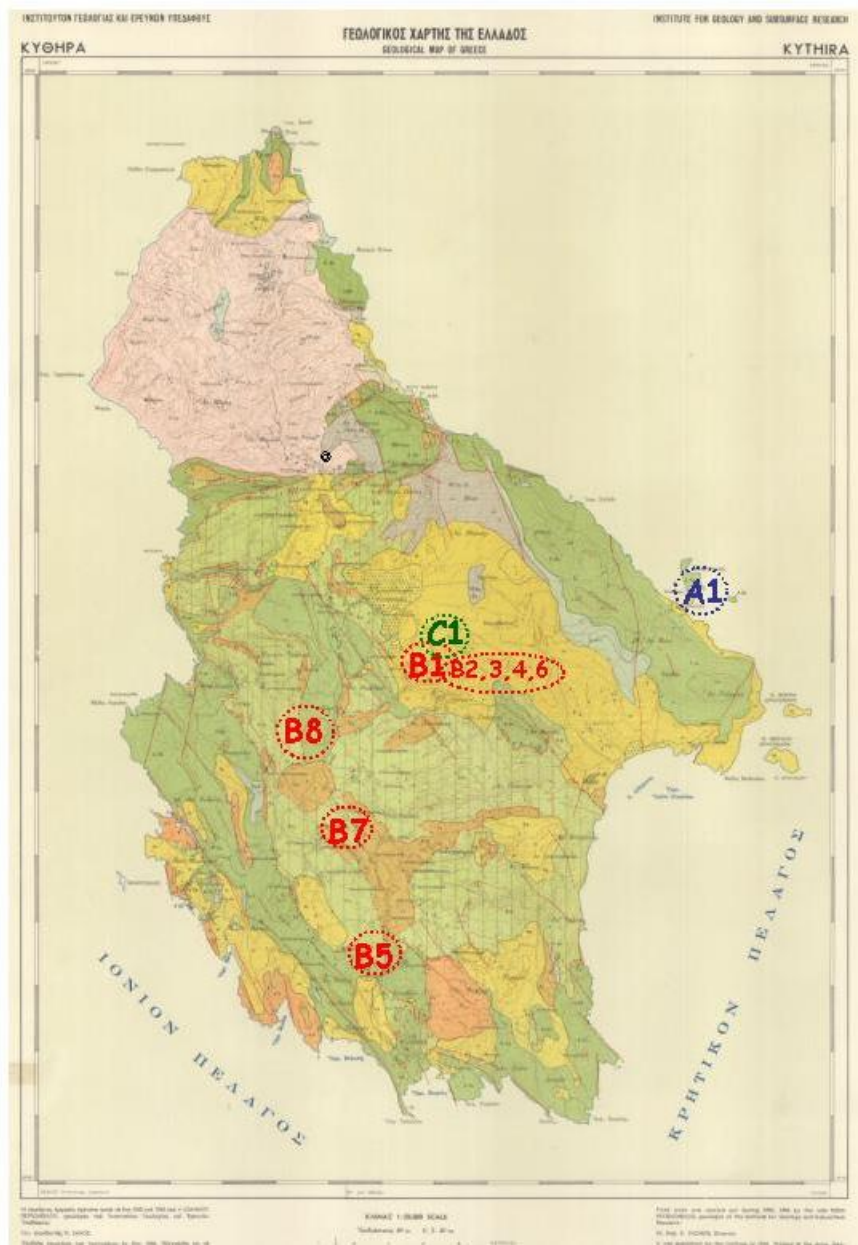
Εικόνα 6: Γεωλογικός – Νεοτεκτονικός χάρτης Κυθήρων (Δάναμος, 1992, Λέκκας, 2005)

2.3.1. Σεισμικότητα Κυθήρων

Τα Κύθηρα είναι μια ιδιαίτερα σεισμογενής περιοχή και έχει δώσει κατά καιρούς σεισμούς μεγάλης έντασης, σύμφωνα με ιστορικές αναφορές και καταγεγραμμένα γεγονότα. Ο Γρηγόριος Λογοθέτης αναφέρει στο χρονικό του ότι ισχυρή σεισμική δόνηση έπληξε το νησί τον Ιούνιο του 1798, ενώ ο ιερέας Δανιήλ Βαρυπάτης-Χρυσέας κάνει λόγο για δύο σεισμούς, έναν στις 30 Σεπτεμβρίου του 1856 (Παλαιό Ημερολόγιο) και έναν στις 5 Οκτωβρίου του 1889 (Παλαιό Ημερολόγιο). Η πρώτη καταγραφή ισχυρού σεισμού στα Κύθηρα ήταν στις 11/8/1903 μεγέθους 7.9 Ρίχτερ με επίκεντρο το χωριό Μητάτα, το οποίο καταστράφηκε ολοσχερώς.

Η πιο πρόσφατη ισχυρή σεισμική δόνηση συνέβη στις 8 Ιανουαρίου του 2006, 13:34 ώρα Ελλάδος, μεγέθους 6.7 στην κλίμακα Ρίχτερ. Ήταν ενδιάμεσου εστιακού βάθους με επίκεντρο στη θαλάσσια περιοχή ανατολικά των Κυθήρων (36.208° N , 23.445° E). Η εστία του σεισμού εντοπίστηκε στο κατώτερο τμήμα ενός δεξιόστροφου ρήγματος διεύθυνσης σε βάθος 70 χιλιομέτρων (USGS), μέσα στην καταδυόμενη πλάκα.

Όσον αφορά τον ελλαδικό χώρο, η δόνηση έγινε αισθητή μέχρι τη Ρόδο και τη Δυτική Μακεδονία. Σύμφωνα με αναφορές, έγινε αισθητή μέχρι και το Κάιρο της Αιγύπτου, το Ισραήλ και την Ιταλία. Ο απολογισμός του σεισμού ήταν ένας θάνατος, καταστροφές σε παλαιά και ακατοίκητα σπίτια, σε δρόμους, στην εκκλησία του χωριού Μητάτα και μια κατολίσθηση (Εικόνες 7 και 8).



Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης Κυθήρων όπου απεικονίζονται περιοχές οι οποίες υπέστησαν καταστροφές έπειτα από τον σεισμό στις 8/1/2006. Ο μπλε κύκλος (A1) υποδηλώνει ζημιές σε λιμενικές και παράκτιες κατασκευές. Οι κόκκινοι κύκλοι (B1-B8) αντιπροσωπεύουν περιοχές όπου παρατηρήθηκαν κατολισθήσεις, πτώσεις βράχων και καταστροφές κατά μήκος του οδικού δικτύου. Ο πράσινος κύκλος (C1) υποδηλώνει προβλήματα υδροδότησης στο χωριό Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006)



α



β



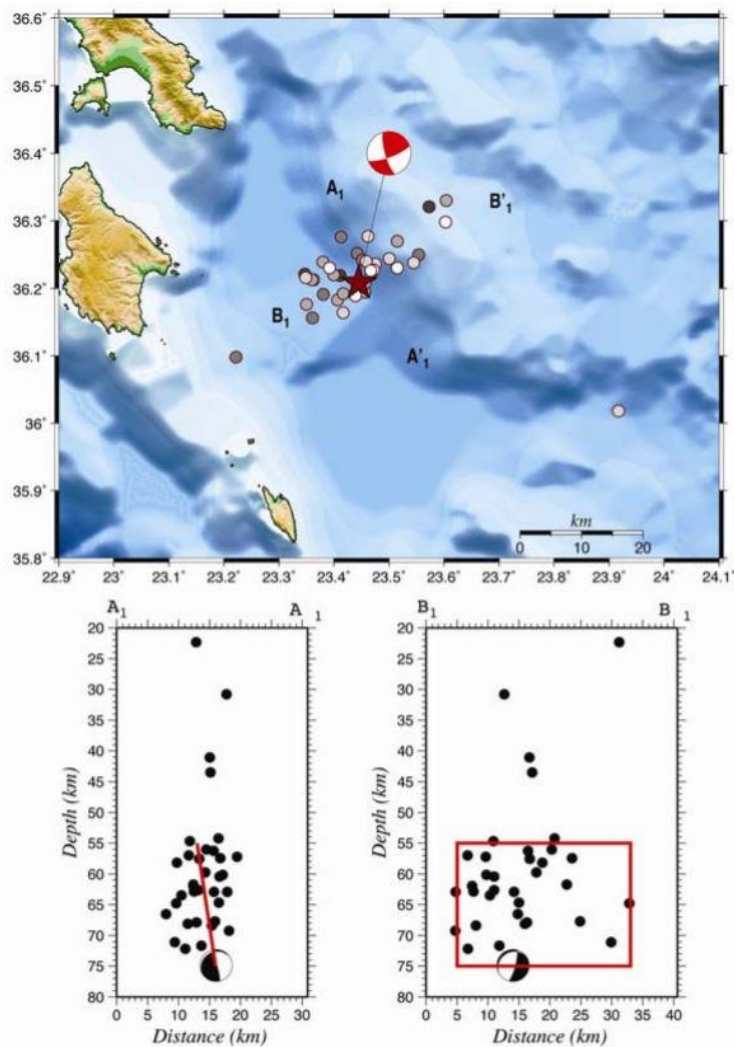
γ



δ

Εικόνα 8: Καταστροφές σε κτήρια και υποδομές των Κυθήρων έπειτα από τον σεισμό στις 8/1/2006. α) Κατολίσθηση στο χωριό Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006) β) Κατάρρευση κτηρίου στα Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006), γ) Βλάβες στον Ιερό ναό Αγίας Τριάδος στα Μητάτα (Ευαγγελία Ζωβοΐλη, 2016) και δ) Πτώσεις βράχων (B2-Εικόνα7) κοντά στα Μητάτα (Χρήστος Καρακώστας κ.ά., 2006)

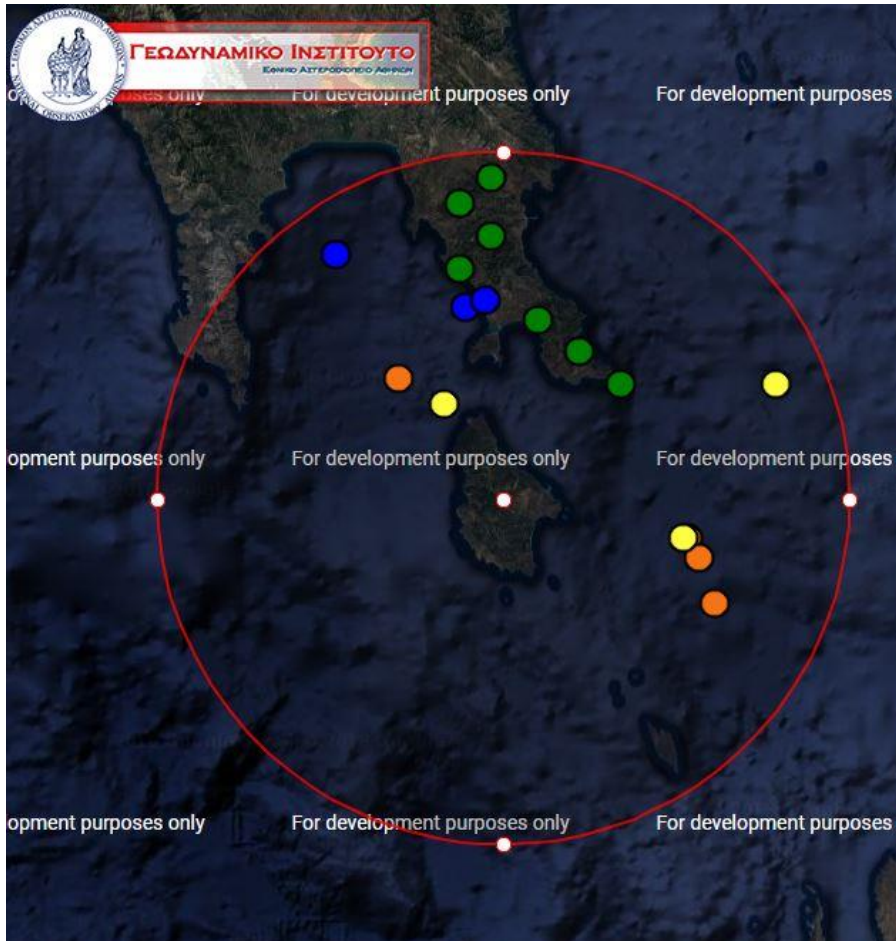
Επίσης καταστροφές και ζημιές υπήρξαν στα Χανιά αλλά και στην Κάρπαθο. Στην περιοχή παρατηρήθηκαν μετασεισμοί διάρκειας 20 ημερών, των οποίων οι εστίες βρίσκονταν ως επί το πλείστον σε βάθη από 55 έως 75 χιλιόμετρα (σεισμοί ενδιάμεσου βάρους), σχηματίζοντας έτσι ένα σχεδόν κατακόρυφο επίπεδο διάρρηξης ορθογωνίου σχήματος με διαστάσεις 28 χλμ x 20 χλμ (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Χάρτης του επικέντρου του κύριου σεισμού ανατολικά των Κυθήρων στις 8/1/2006 (άστρο) και των μετασεισμών που ακολούθησαν. Η μετασεισμική ζώνη έχει μήκος 28 χιλιομέτρα. Σχεδόν όλες οι εστίες των μετασεισμών βρίσκονται σε βάθη μεταξύ 55 και 75 χιλιομέτρων, σχηματίζοντας έτσι ένα σχεδόν κατακόρυφο επίπεδο διάρρηξης ορθογωνίου σχήματος με διαστάσεις 28 χλμ x 20 χλμ. (Μαρία Ειρήνη Νικολήνταγα κ.ά., 2008)

Έπειτα από τον σεισμό της 8ης Ιανουαρίου του 2006 η περιοχή των Κυθήρων δεν επηρεάστηκε από έντονα σεισμικά γεγονότα. Στην Εικόνα 10 φαίνεται η κατανομή των σεισμών οι οποίοι καταγράφηκαν ύστερα από τον μεγάλο σεισμό του 2006 σε μια ακτίνα 60 χιλιομέτρων από το νησί των Κυθήρων και εντάσεως μεγαλύτερης των 4 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ.

Η κατανομή της σεισμικότητας στην περιοχή των Κυθήρων δείχνει ότι η πιθανότητα εκδήλωσης ισχυρού σεισμού στο μέλλον είναι υψηλή.



Εικόνα 10: Καταγεγραμμένα σεισμικά γεγονότα σε ακτίνα 60 χιλιομέτρων από το νησί των Κυθήρων μεγέθους 4 Ρίχτερ και άνω στην χρονική περίοδο από 31/1/2006 έως 10/1/2019. Με μπλε απεικονίζονται οι σεισμοί εστιακού βάθους έως 15 χιλιομέτρων, με πράσινο οι σεισμοί εστιακού βάθους 15 έως 30 χιλιομέτρων, με κίτρινο οι σεισμοί εστιακού βάθους 30 έως 60 χιλιομέτρων και με πορτοκαλί οι σεισμοί εστιακού βάθους 60 έως 100 χιλιομέτρων (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

3. Θεωρία SAR

3.1. Εισαγωγή στο RADAR

Το αρκτικόλεξο RADAR σημαίνει RAdio Detection And Ranging, δηλαδή ανίχνευση με ραδιοκύματα και μέτρηση απόστασης. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα RADAR είναι ένα σύστημα ανίχνευσης αντικειμένων με χρήση μικροκυμάτων.

Η ιστορία του ραντάρ ξεκίνησε έπειτα από πειράματα που διεξήγαγε ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz το 1887 με τα οποία απέδειξε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ύπαρξη είχε προβλεφθεί λίγα χρόνια νωρίτερα από τον Σκωτσέζο φυσικό James Clerk Maxwell. Με τα πειράματά του, ο Hertz διαπίστωσε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να μεταδίδονται μέσα από υλικά διαφορετικού τύπου και να ανακλώνται από μεταλλικές επιφάνειες.

Το 1904 ο Γερμανός Christian Hülsmeier μελετώντας τις ανακαλύψεις του Hertz κατασκεύασε ένα πρώιμο σύστημα ραντάρ το οποίο ονόμασε Telemobiloscope. Αυτό είχε τη δυνατότητα να ανιχνεύει πλοία για την αποφυγή της σύγκρουσής τους, εκμεταλλευόμενο την ανακλώμενη ακτινοβολία (ηχώ). Το Telemobiloscope όμως, δεν μπορούσε να μετρήσει την απόσταση με την μέτρηση του χρόνου της διπλής διαδρομής. Αυτό επιτεύχθηκε το 1935 από τον Σκωτσέζο φυσικό Robert Watson-Watt, ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο ολοκληρωμένο επίγειο σύστημα ραντάρ το οποίο είχε πρακτική εφαρμογή.

Στις 17 Αυγούστου του 1937 τέθηκε σε λειτουργία το ραντάρ ASV, το οποίο ήταν το πρώτο αερομεταφερόμενο σύστημα ραντάρ. Στα τέλη του 1939 κατασκευάστηκαν τα πρώτα ραντάρ που λειτουργούσαν στο φάσμα των μικροκυμάτων. Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου η τεχνολογία και οι εφαρμογές του ραντάρ αναπτύχθηκαν σημαντικά για σκοπούς όπως ο έγκαιρος εντοπισμός και η πλοήγηση αεροσκαφών και πλοίων σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας κ.ά.

Την δεκαετία του 1950 αναπτύχθηκαν τα αερομεταφερόμενα ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (SLAR), τα οποία με την κίνησή τους και την πλευρική εκπομπή παλμών σάρωναν την επιφάνεια του εδάφους. Αρχικά, τα SLAR χρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτική χρήση. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1960, τα δεδομένα που παράγονταν από τα SLAR ήταν διαθέσιμα και για επιστημονική χρήση.

Οι αισθητήρες ραντάρ είναι αερομεταφερόμενοι ή μεταφέρονται μαζί με την κίνηση του δορυφόρου ή βρίσκονται σε επίγειες πλατφόρμες και χρησιμεύουν σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης. Ένα σύστημα ραντάρ αποτελείται από έναν πομπό ο οποίος παράγει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, μια κεραία μετάδοσης των κυμάτων αυτών, μια κεραία λήψης των κυμάτων (συχνά χρησιμοποιείται η ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη) και έναν δέκτη και επεξεργαστή ο οποίος καθορίζει τις ιδιότητες των αντικειμένων. Η συχνότητα των εκπεμπόμενων και λαμβανόμενων κυμάτων κυμαίνεται από 50 MHz έως 40 GHz (Πίνακας 1). Σε πειραματικό στάδιο χρησιμοποιούνται και μεγαλύτερες συχνότητες έως και πάνω από 100 GHz.

Τα συστήματα ραντάρ υπερτερούν έναντι άλλων συστημάτων εντοπισμού, γιατί υπολογίζουν απευθείας την απόσταση των αντικειμένων – στόχων με την μέτρηση του χρόνου που

μεσολαβεί από την εκπομπή του κύματος μέχρι την επιστροφή του στην κεραία του ραντάρ, ενώ η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

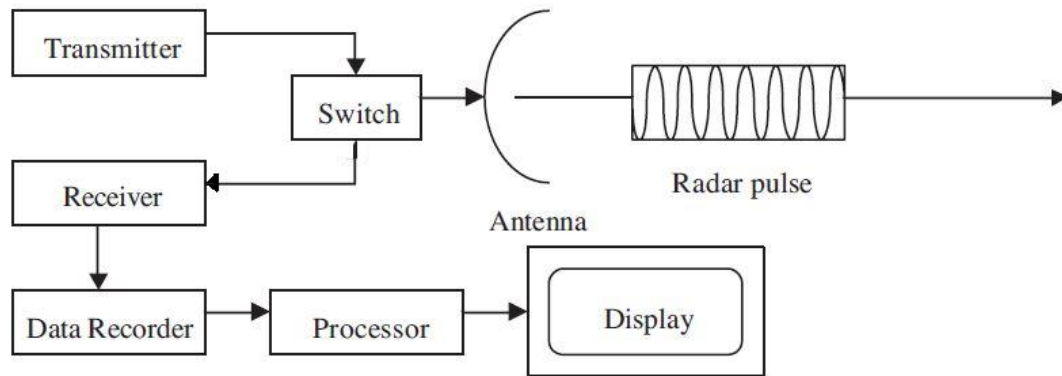
Όνομα καναλιού	Εύρος συχνοτήτων (GHz)	Τυπική χρήση
VHF	0.05-0.33	παρακολούθηση περιοχών από πολύ μεγάλη απόσταση
UHF	0.3-1	παρακολούθηση περιοχών από πολύ μεγάλη απόσταση
L	1-2	παρακολούθηση περιοχών από μεγάλη απόσταση, έλεγχος της κυκλοφορίας οχημάτων, SAR
S	2-4	παρακολούθηση περιοχών από μέση απόσταση, έλεγχος της κυκλοφορίας οχημάτων, πρόγνωση καιρού σε περιοχές μεγάλης απόστασης
C	4-8	εντοπισμός από μεγάλη απόσταση, πρόγνωση καιρού από αερομεταφερόμενα συστήματα, SAR
X	8-12	εντοπισμός από μικρή απόσταση, οδήγηση πυραύλων, χαρτογράφηση, ναυτικά ραντάρ, ραντάρ αναχαίτισης αέρος, μετεωρολογία, ωκεανογραφία, SAR
Ku	12-18	χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης, δορυφορική αλτιμετρία
K	18-27	ελάχιστα χρησιμοποιημένο (απορροφάται από την υγρασία)
Ka	27-40	χαρτογράφηση πολύ υψηλής ανάλυσης, έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας
mm	40-100+	σε πειραματικό στάδιο

Πίνακας 1: Κανάλια συχνοτήτων λειτουργίας συστημάτων ραντάρ και οι τυπικές χρήσεις τους (American Institute of Aeronautics and Astronautics και Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος radar είναι η ακόλουθη:

Αρχικά παράγεται το σήμα από έναν αρμονικό ταλαντωτή, το οποίο εκπέμπεται από τον πομπό. Στη συνέχεια, το σήμα διέρχεται από τον διακόπτη (switch) και μετατρέπεται από την κεραία σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το κύμα αυτό κινούμενο με την ταχύτητα του φωτός προσπίπτει πάνω σε έναν στόχο του εδάφους και ανακλάται από αυτόν. Μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας επιστρέφει στην κεραία όπου μετατρέπεται σε σήμα λήψης. Το

λαμβανόμενο σήμα διέρχεται από τον διακόπτη και μετατρέπεται σε ψηφιακό αριθμό από τον δέκτη. Τα δεδομένα που παράγονται από τον δέκτη καταγράφονται και με κατάλληλη επεξεργασία στον επεξεργαστή παρέχονται πληροφορίες για το στόχο. (Εικόνα 11)



Εικόνα 11: Αρχή λειτουργίας συστήματος radar (Δημήτριος Ιακωβίδης, 2016)

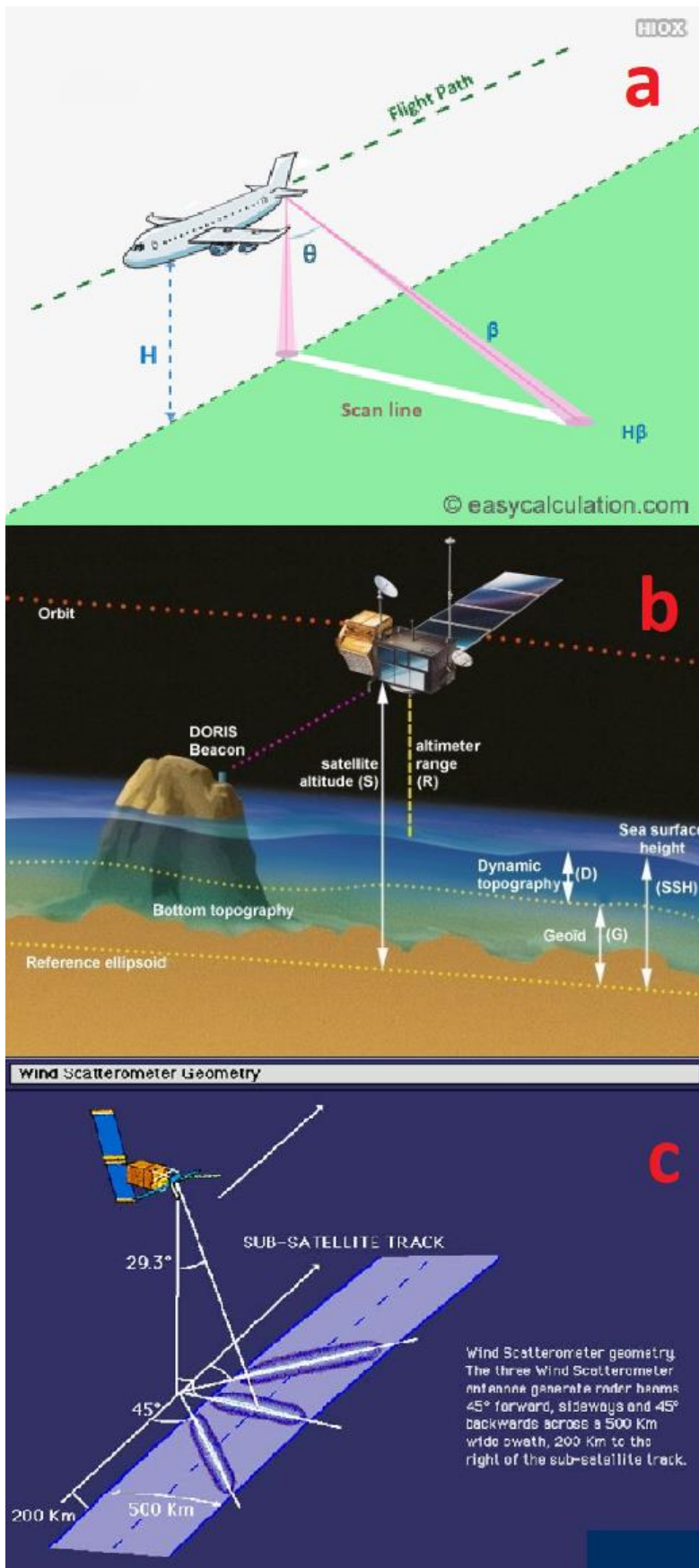
Συστήματα ραντάρ που χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικούς σκοπούς ανήκουν στους ακόλουθους κύριους τύπους:

- Ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (Side-looking Imagine Radars, SIR)
- Υψομετρητές ή αλτιμετρικά ραντάρ (Nadir-looking Radars)
- Ραντάρ διασκορπισμού (Scatterometers)

Το ραντάρ πλευρικής απεικόνισης είναι είτε αερομεταφερόμενο ή μεταφέρεται με την κίνηση του δορυφόρου. Η κεραία του εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πλευρικά και κάθετα στην διεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας. Στη συνέχεια, η ακτινοβολία αυτή ανακλάται στον στόχο, επιστρέφει στην κεραία λήψης και μετά από επεξεργασία στον δέκτη παράγεται μια ψηφιακή εικόνα της σαρωμένης περιοχής (Εικόνα 12α).

Ο υψομετρητής ή αλτιμετρικό ραντάρ χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των υψομετρικών μεταβολών σε επιφάνειες που βρίσκονται κάτω από την τροχιά της κινούμενης πλατφόρμας (αεροσκάφος ή δορυφόρος). Αυτό επιτυγχάνεται με τη μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί από τη στιγμή της ανάκλασης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους ή της θάλασσας μέχρι τη λήψη της στην κεραία (Εικόνα 12b).

Το ραντάρ διασκορπισμού εκπέμπει ακτινοβολία και καταγράφει το ποσό της ανακλώμενης ενέργειας που επιστρέφει στην κεραία λήψης. Τα δορυφορικά ραντάρ διασκορπισμού χρησιμοποιούνται κυρίως για την μέτρηση της διεύθυνσης και της ταχύτητας των ανέμων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (wind scatterometers) (Δ. Δεληκαράογλου) με σκοπό την ερμηνεία της αλληλεπίδρασης του αέρα και της θάλασσας, την μελέτη του κλίματος, την παρακολούθηση τυφώνων κ.ά. (Εικόνα 12c).



Εικόνα 12: α) Ραντάρ πλευρικής απεικόνισης (Τροποποιημένη από www.easycalculation.com), β) Αλτιμετρικό ραντάρ (δορυφόρος TOPEX/Poseidon) (www.aviso.altimetry.fr), γ) Ραντάρ διασκορπισμού (δορυφόρος της αποστολής ERS) (Τροποποιημένη από Anna Maria Sempreviva et al., 2008)

3.2. Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος ή SAR

Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή SAR (Synthetic Aperture Radar) είναι ένα σύστημα ραντάρ, το οποίο καθώς κινείται κατά μήκος της τροχιάς του παράγει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ανακλώνται στην επιφάνεια του εδάφους ή σε αντικείμενα – στόχους. Ο ανακλώμενος παλμός επιστρέφει στην κεραία του ραντάρ για να παραχθεί στην συνέχεια από τον δέκτη μια “εικόνα” SAR, η οποία περιέχει πληροφορία για το πλάτος και την φάση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Οι εικόνες SAR δεν θεωρούνται εικόνες με την αυστηρή έννοια του όρου αφού δίνουν πληροφορία για την φάση του κύματος.

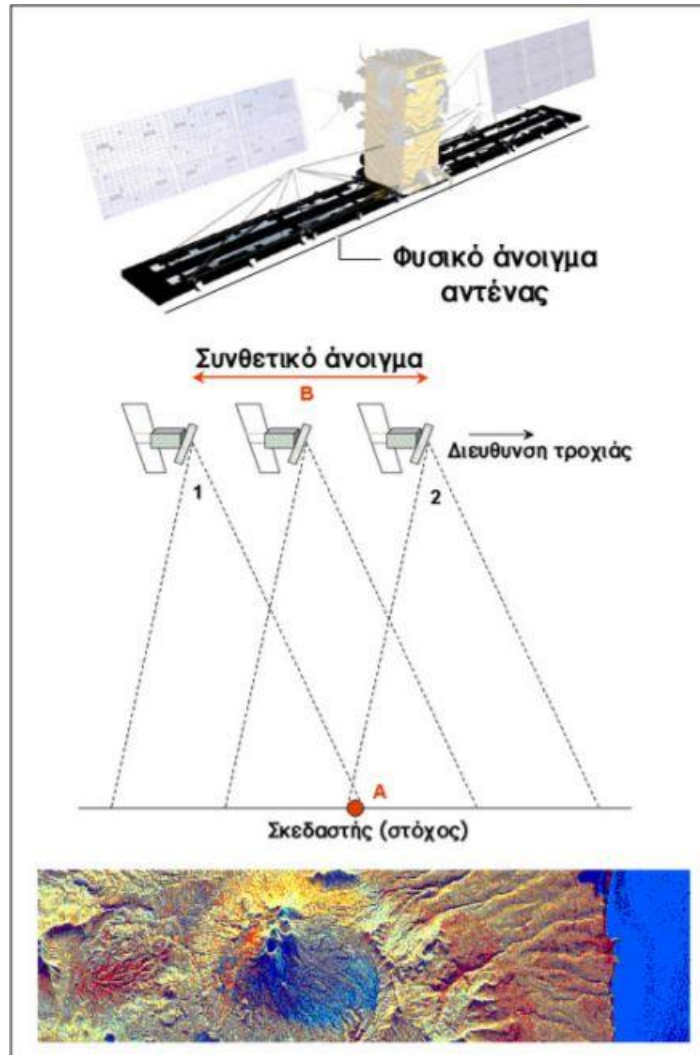
Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 για στρατιωτική χρήση. Αρχικά λειτουργούσε σε αεροπλάνα και στη συνέχεια και σε δορυφόρους. Η πρώτη πτήση αεροσκάφους το οποίο μετέφερε ραντάρ συνθετικού ανοίγματος πραγματοποιήθηκε το 1953. Το συγκεκριμένο σύστημα ραντάρ εξέπεμπε παλμούς συχνότητας 930 MHz. Το 1978 εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος SeaSat, ο οποίος ήταν ο πρώτος δορυφόρος που μετέφερε σύστημα SAR και προοριζόταν για πολιτική χρήση.

Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή σύστημα SAR χαρακτηρίζεται από τις εξής ιδιότητες:

- είναι *ενεργό*, που σημαίνει ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται από το ίδιο το σύστημα SAR, γεγονός που το καθιστά λειτουργικό και την νύχτα.
- είναι *μονοστατικό*, δηλαδή η εκπομπή και η λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται από την ίδια κεραία
- η κεραία στέλνει παλμούς *πλευρικά*

Καθώς ο δορυφόρος κινείται, η κεραία του συστήματος SAR “κοιτάει” προς τα δεξιά και μεταδίδει ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των μικροκυμάτων γεγονός που επιτρέπει στις εκπεμπόμενες ακτινοβολίες να διαδοθούν μέσα από τα σύννεφα.

Το φυσικό άνοιγμα της κεραίας ενός ραντάρ πραγματοποιείται για τη συλλογή της ανακλώμενης ενέργειας του παλμού του ραντάρ. Ραντάρ το οποίο λαμβάνει απεικονίσεις με το φυσικό άνοιγμα της κεραίας του ονομάζεται ραντάρ πραγματικού ανοίγματος (RAR). Το συνθετικό άνοιγμα προκύπτει από τον συνδυασμό της κίνησης του δορυφόρου και του φαινομένου Doppler. Το φαινόμενο Doppler είναι η αλλαγή στην παρατηρούμενη συχνότητα ενός κύματος, λόγω της σχετικής κίνησης παρατηρητή (δορυφόρου) και πηγής (σκεδαστή). Κατά την διάρκεια της κίνησης του δορυφόρου πάνω από έναν στόχο εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με σταθερή συχνότητα. Η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) είναι 10-50 μsec . Οι εκπεμπόμενοι παλμοί έχουν συγκεκριμένο εύρος σάρωσης της επιφάνειας του εδάφους. Ο χρόνος μεταξύ της εκπομπής ενός παλμού και της λήψης της οπισθοσκεδασής του από την κεραία είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον χρόνο που χρειάζεται ο δορυφόρος για να καλύψει το διάστημα κατά το οποίο ο στόχος περιέχεται πάντα στο εύρος σάρωσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Έτσι η κεραία λαμβάνει ανακλώμενη ενέργεια από τον ίδιο στόχο σε διάφορες θέσεις του δορυφόρου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια (συνθετική) κεραία μεγάλου μήκους η οποία δίνει εικόνες υψηλής ανάλυσης κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Φυσικό και συνθετικό άνοιγμα κεραίας συστήματος SAR (Δημήτρης Δεληκαράογλου)

3.3. Δορυφόροι SAR

Οι δορυφόροι οι οποίοι μεταφέρουν ένα σύστημα SAR τίθενται σε ηλιοσύγχρονη, πολική τροχιά σε υψόμετρο 500 έως 800 χιλιομέτρων και έχουν τροχιακή περίοδο μικρότερη των δύο ωρών. Η κεραία του συστήματος SAR εκπέμπει μικροκύματα σε καθορισμένες συχνότητες που ανήκουν κυρίως στα κανάλια L (1.2 GHz), C (5.3 GHz) και X (10 GHz). Στον Πίνακα 2, γίνεται αναφορά στις πλατφόρμες SAR απεικονίσεων, που χρησιμοποιούνται από το 1978 έως σήμερα, καθώς και σε μελλοντικές αποστολές. Ενδεικτικά παρατίθεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και περιγραφή των πιο διαδεδομένων δορυφόρων στις εφαρμογές της συμβολομετρίας.

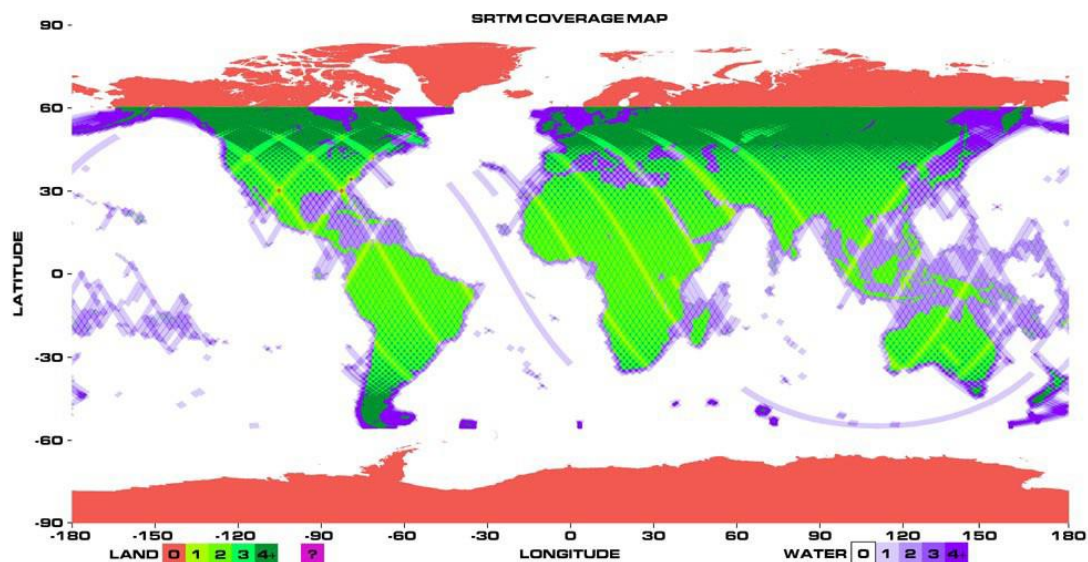
Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency-ESA) εκτόξευσε τον δορυφόρο ERS-1 τον Ιούλιο του 1991. Έτσι ξεκίνησε η πρώτη αποστολή της ESA για την παρακολούθηση της γης. Ο ERS-1 είχε ενσωματωμένο σύστημα SAR και ήταν σε τροχιά γύρω από τη γη έως και τον Μάρτιο του 2000 παρέχοντας μεγάλο πλήθος δεδομένων.

Η επόμενη διαστημική αποστολή της ESA πραγματοποιήθηκε με την εκτόξευση του δορυφόρου ENVISAT τον Φεβρουάριο του 2002. Με 10 όργανα και 8 τόνους βάρους αποτελεί την μεγαλύτερη αποστολή για την παρατήρηση της γης. Ήταν σε λειτουργία μέχρι τον Απρίλιο του 2012.

Ο RADARSAT-1 ήταν ο πρώτος εμπορικής χρήσης δορυφόρος για την παρατήρηση της γης που αναπτύχθηκε από τον Καναδικό Οργανισμό Διαστήματος (CSA) σε συνεργασία με τοπικές Καναδικές κυβερνήσεις και τον ιδιωτικό τομέα. Ήταν σε λειτουργία από τον Νοέμβριο του 1995 μέχρι και τον Μάρτιο του 2013 ξεπερνώντας κατά πολύ το προσδόκιμο ζωής του.

Η Shuttle Radar Topography Mission ήταν η πρώτη διαστημική αποστολή στην οποία επιτεύχθηκε η δημιουργία ΨΜΕ σε σχεδόν παγκόσμια κλίμακα (καλύπτει το 80% της επιφάνειας της γης). Ο δορυφόρος Shuttle Radar Topography Mission μετέφερε δύο ζευγάρια κεραιών που λειτουργούσαν ταυτόχρονα με μικροκύματα στα κανάλια C και X. Το παραγόμενο ΨΜΕ SRTM προέκυψε από συμβολομετρία μονής υπερπήσης.

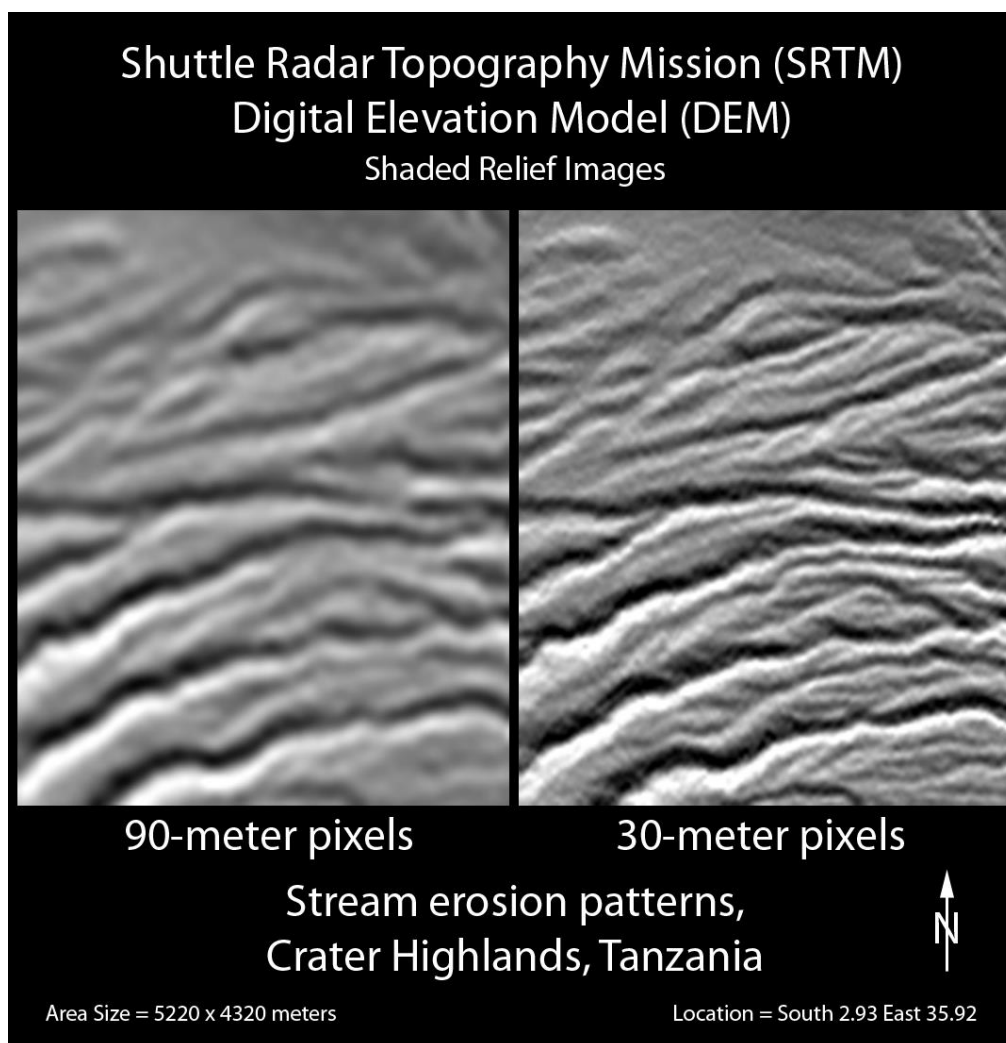
Το SRTM παρέχει πληροφορία για το υψόμετρο του εδάφους σε περιοχές που εκτείνονται από νότιο γεωγραφικό πλάτος 56° έως βόρειο γεωγραφικό πλάτος 60° (Εικόνα 14). Το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε ο δορυφόρος Shuttle Radar Topography Mission για να λάβει δεδομένα της επιφάνειας της γης ήταν 11 ημέρες και συγκεκριμένα από την 11/2/2000 έως την 22/2/2000.



Εικόνα 14: Περιοχή κάλυψης ΨΜΕ SRTM (Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)

Αρχικά, το SRTM παρεχόταν με χωρική ανάλυση ενός δευτερολέπτου του τόξου (1'') ή 30 μέτρων για εδάφη εντός των Η.Π.Α και τριών δευτερολέπτων του τόξου (3'') ή 90 μέτρων για εδάφη εκτός των Η.Π.Α. Σήμερα, το SRTM παρέχεται με ανάλυση 30 μέτρων για όλα τα εδάφη (Εικόνα 15). Σκοπός της αποστολής Shuttle Radar Topography ήταν η επίτευξη απόλυτης υψομετρικής ακρίβειας μικρότερης των 16 μέτρων και σχετικής υψομετρικής ακρίβειας μικρότερης των 10 μέτρων για το 90% των δεδομένων. Η εφαρμογή μεθόδων

κινηματικού εντοπισμού βελτίωσε την απόλυτη υψομετρική ακρίβεια του SRTM στα 9 μέτρα (Rodriguez et al., 2005; 2006).



Εικόνα 15: Σύγκριση ΨΜΕ SRTM χωρικής ανάλυσης 30 μέτρων και 90 μέτρων σε περιοχή της Τανζανίας (NASA/JPL-Caltech/National Geospatial Intelligence Agency, 2014)

Ο TerraSAR-X είναι ένας δορυφόρος ο οποίος κατασκευάστηκε από την εταιρεία Astrium και τέθηκε σε λειτουργία από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής (German Aerospace Center ή DLR) τον Ιούνιο του 2007. Είναι σε λειτουργία μέχρι σήμερα. Παράγει εικόνες SAR με ανάλυση έως και 1 μέτρο και έχει πολύ καλή ραδιομετρική ακρίβεια. Η γεωμετρική ακρίβεια που δίνει ο αισθητήρας SAR του TerraSAR-X είναι καλύτερη σε σχέση με αυτή που δίνουν οι αισθητήρες δορυφόρων εμπορικής χρήσης οι οποίοι σχεδιάστηκαν πριν από αυτόν. Επανέρχεται πάνω από οποιαδήποτε τοποθεσία της επιφάνειας της γης σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 2.5 ημερών, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο πυκνή πληροφορία σε παγκόσμιο επίπεδο. Τέλος, προσφέρει ταχείες εναλλαγές μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας του και της πολικότητας του σήματος.

Το COSMO-SkyMed είναι ένα σύστημα τεσσάρων ίδιων δορυφόρων μεσαίου μεγέθους οι οποίοι μεταφέρουν αισθητήρες SAR. Ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύθηκε τον Ιούνιο του 2007 και σταδιακά τέθηκαν σε τροχιά και οι υπόλοιποι δορυφόροι έως τον Νοέμβριο του 2010. Η αποστολή, η οποία χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Έρευνας και το Υπουργείο Άμυνας της Ιταλίας και διευθύνετε από τον Ιταλικό Οργανισμό Διαστήματος (Italian Space Agency), προορίζεται τόσο για στρατιωτική όσο και για εμπορική χρήση.

Ο δορυφόρος ALOS ήταν ένας από τους μεγαλύτερους δορυφόρους, αποστολή του οποίου ήταν η συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης της επιφάνειας της γης. Κατασκευάστηκε από τον Ιαπωνικό Οργανισμό για την Εξερεύνηση του Διαστήματος (Japan Aerospace Exploration Agency) και ήταν σε τροχιά γύρω από τη γη από τον Ιανουάριο του 2006 έως και τον Μάιο του 2011. Μετέφερε τρία τηλεπισκοπικά όργανα μεταξύ των οποίων και μια κεραία SAR.

Δορυφόρος	Εταιρία κατασκευής	Διάστημα λειτουργίας	Κανάλι λειτουργίας
SeaSat	NASA (USA)	1978	L
ERS-1	ESA (Europe)	1991-2000	C
J-ERS-1	JAXA (Japan)	1992-1998	L
SIR-C/X-SAR	NASA (USA), DLR (Germany), ASI (Italy)	1994	L(NASA), C(NASA) και X (DLR,ASI)
RADARSAT-1	CSA (Canada)	1995-2013	C
Shuttle Radar Topography Mission	NASA (USA),DLR (Germany)	2000	C(NASA), X(DLR)
ENVISAT / ASAR	ESA (Europe)	2002-2012	C(dual)
ALOS / PALSAR	JAXA (Japan)	Jan. 2006-2011	L(quad)
SAR-Lupe (5 satellites)	BWB (Germany)	2006/2008	X
RADARSAT-II	CSA (Canada)	2007	C(quad)
TerraSAR-X/TanDEM-X	DLR (Germany), Astrium	2007/2010	X(quad)
COSMO-SkyMed (4 Satellites)	ASI (Italy)	2007/2010	X(dual)
KOMPSAT-5	KARI (Korea)	2013	X(dual)
HJ-1C -SAR	CRESDA/CAST/NRSCC (China)	2013	S(HH or VV),
RISAT-1	ISRO (India)	2012	C(quad)
SENTINEL-1A/B	ESA (Europe)	2014/2016	C(dual)
PAZ	Ministry of Defence (Spain)	2014	X(quad)

ALOS-2	JAXA (Japan)	2014	L(quad)
SAOCOM-1/2	CONAE/ASI (Argentina)	2016/2018	L(quad)
RADARSAT Constellation 1-3	CSA/MDA (Canada)	2016/2017	C(dual)
BIOMASS	ESA (Europe)	2022-2027 (προσδοκώμενο)	P(quad)

Πίνακας 2: Ιστορική αναδρομή και βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων SAR

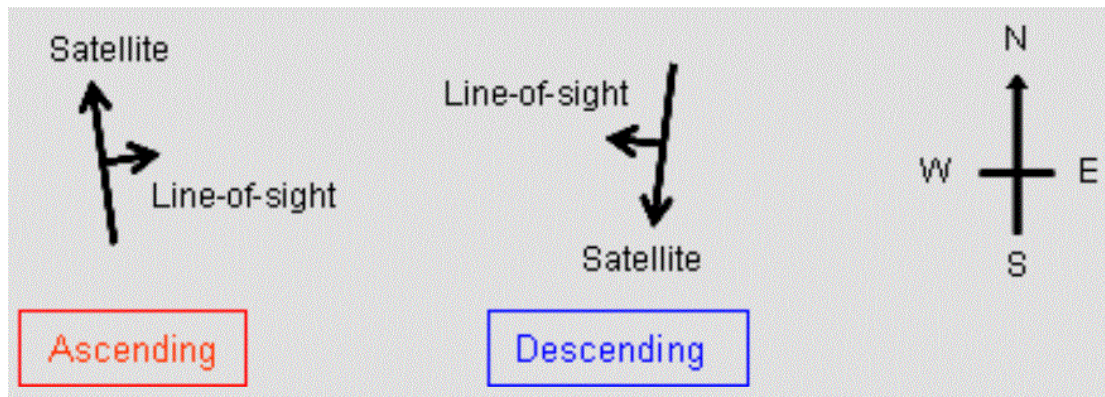
3.3.1. Ο δορυφόρος Sentinel

Το πρόγραμμα SENTINEL το οποίο αναπτύχθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος έχει ως στόχο μέσα από διάφορες δορυφορικές αποστολές την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, της θάλασσας, της γης, του κλίματος και της ασφάλειας σε παγκόσμια κλίμακα. Κάθε αποστολή αποτελείται από δύο δορυφόρους. Οι δορυφόροι του προγράμματος SENTINEL ξαναεπισκέπτονται έναν τόπο σε συντομότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις προηγούμενες δορυφορικές αποστολές της ESA (ERS-1/2 και ENVISAT) και παράγουν εικόνες υψηλότερης ανάλυσης.

Πρώτη χρονικά αποστολή είναι η Sentinel-1 της οποίας στόχος είναι η παρακολούθηση της γης και της θάλασσας καθώς και η αντίδραση σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, όπως πλημμύρες, σεισμοί, κατολισθήσεις κ.ά. Ξεκίνησε με την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-1A τον Απρίλιο του 2014 και συνεχίστηκε με την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-1B τον Απρίλιο του 2016.

Οι δύο δορυφόροι της αποστολής Sentinel-1 μοιράζονται το ίδιο τροχιακό επίπεδο. Κάθε δορυφόρος SENTINEL πραγματοποιεί έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο κάθε 12 ημέρες και κάθε κύκλος αποτελείται από 175 τροχιές. Οι δορυφόροι της αποστολής Sentinel-1 παρέχουν εικόνες ίδιας τροχιάς (ανοδικής ή καθοδικής) του ίδιου τόπου κάθε 6 ημέρες. Ανεξαρτήτως του είδους της τροχιάς, οι δορυφόροι της αποστολής Sentinel-1 βρίσκονται πάνω από τον ίδιο τόπο κάθε 3 ημέρες στον ισημερινό. Όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος του τόπου η συχνότητα επίσκεψής τους αυξάνεται έως και λιγότερο από 1 ημέρα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

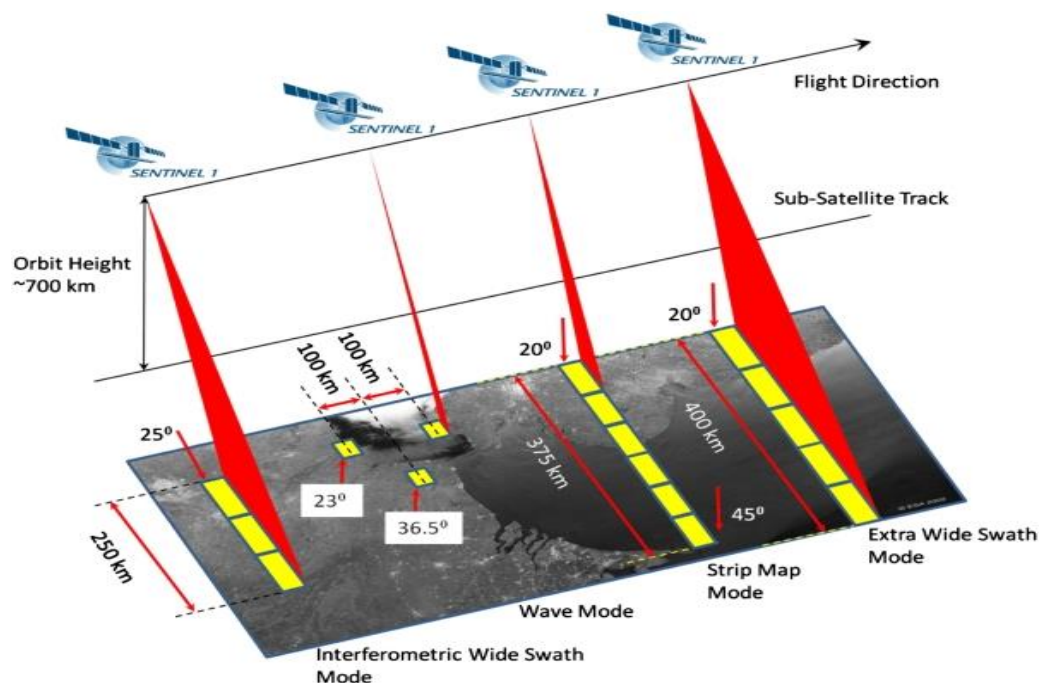
Η κεραία SAR των δορυφόρων Sentinel-1 διαδίδει μικροκύματα σε δεξιά διεύθυνση (Εικόνα 16) τα οποία έχουν ενιαία πολικότητα (single polarisation) HH ή VV και διπλή πολικότητα (dual polarisation) HH+HV or VV+VH. Εκπέμπει μικροκύματα με συχνότητα που ανήκει στο κανάλι C.



Εικόνα 16: Διεύθυνση διάδοσης ακτινοβολίας κεραίας SAR του δορυφόρου Sentinel-1. Στην ανοδική τροχιά η ακτινοβολία έχει ανατολική διεύθυνση, ενώ στην καθοδική τροχιά κατευθύνεται δυτικά. (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda-e.html#q2-9>)

Το σύστημα SAR των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-1 μπορεί να αποκτήσει δεδομένα σε τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες. Αυτές είναι οι (Εικόνα 17):

- Stripmap (SM)
- Interferometric Wide swath (IW)
- Extra Wide swath (EW)
- Wave (WV)

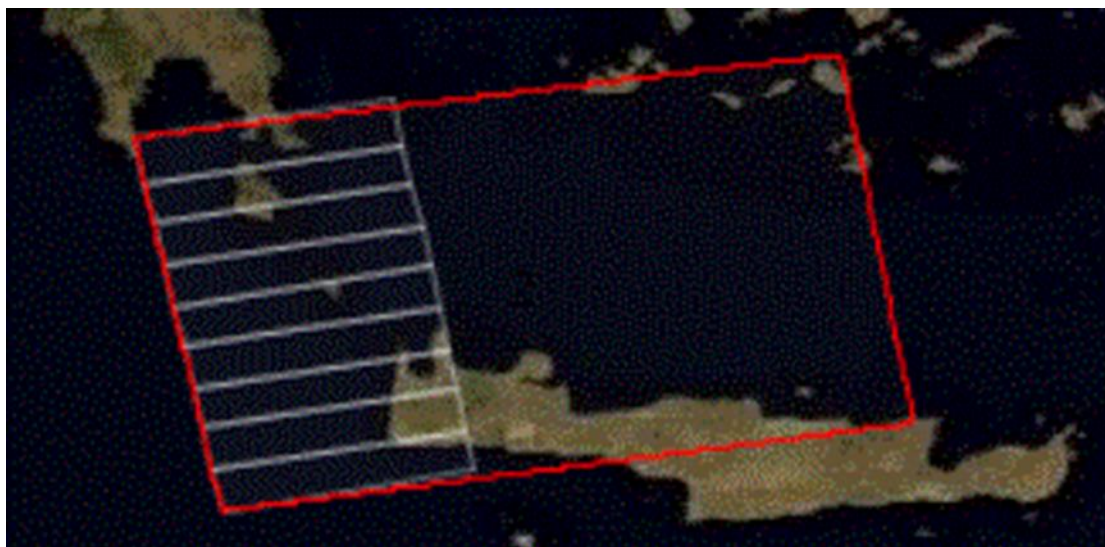


Εικόνα 17: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος SAR της δορυφορικής αποστολής Sentinel-1 (ESA)

Η κύρια χρήση της λειτουργίας Stripmap είναι η απεικόνιση μικρών νησιών. Με την λειτουργία αυτή αποκτούνται δεδομένα σε 6 επικαλυπτόμενες λωρίδες πλάτους 80 χιλιομέτρων. Το συνολικό εύρος των 6 επικαλυπτόμενων λωρίδων είναι 375 χιλιόμετρα. Η χωρική ανάλυση των παραγόμενων εικόνων είναι λίγο καλύτερη από 5 μέτρα και στις δύο διευθύνσεις της εικόνας. Κάθε λωρίδα σαρώνεται από μια συνεχή αλληλουχία παλμών με

σχεδόν σταθερή γωνία πρόσπτωσης. Η εκπεμπόμενη δέσμη των ακτινοβολιών σχηματίζει σταθερή γωνία με την διεύθυνση του αζιμουθίου και γωνία θέασης η οποία μεταβάλλεται ελαφρώς εξαιτίας της περιστροφής της πλατφόρμας (roll-steering). Η περιστροφή αυτή πραγματοποιείται κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης για να εξαλειφθεί η επίδραση των μεταβολών του υψομέτρου της επιφάνειας του εδάφους. Με την λειτουργία Stripmap παράγονται εικόνες οι οποίες έχουν ίδια ποιότητα κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου.

Η κύρια κατάσταση λειτουργίας των δορυφόρων Sentinel-1 για εφαρμογές επί της ξηράς είναι η Interferometric Wide swath. Με την λειτουργία IW σαρώνονται περιοχές του εδάφους πλάτους 250 χιλιομέτρων και λαμβάνονται εικόνες με την τεχνική TOPSAR σε 3 λωρίδες (swaths). Κάθε λωρίδα χωρίζεται σε 9 υπολωρίδες (bursts) (Εικόνα 18) οι οποίες επεξεργάζονται σαν ξεχωριστές εικόνες SLC. Οι τιμές των εικονοστοιχείων των εικόνων SLC είναι μιγαδικοί αριθμοί. Στα SLC προϊόντα περιέχεται μια εικόνα ανά λωρίδα και μια ανά κανάλι πολικότητας. Έτσι ένα προϊόν τύπου SLC περιέχει 3 εικόνες (single polarisation) ή 6 εικόνες (dual polarisation). Οι εικόνες έχουν χωρική ανάλυση 5 μέτρα στην πλάγια (range) διεύθυνση και 20 μέτρα στην διεύθυνση του αζιμουθίου (azimuth). Η χαμηλότερη ανάλυση των εικόνων IW στην διεύθυνση του αζιμουθίου συγκριτικά με τις εικόνες που παράγονται με την λειτουργία Stripmap οφείλεται στην μικρότερη χρονική διάρκεια κατά την οποία σαρώνονται οι στόχοι μιας υπολωρίδας. Οι στόχοι μιας υπολωρίδας σαρώνονται από τον ίδιο παλμό ανεξαρτήτως της θέσης τους στην διεύθυνση του αζιμουθίου.

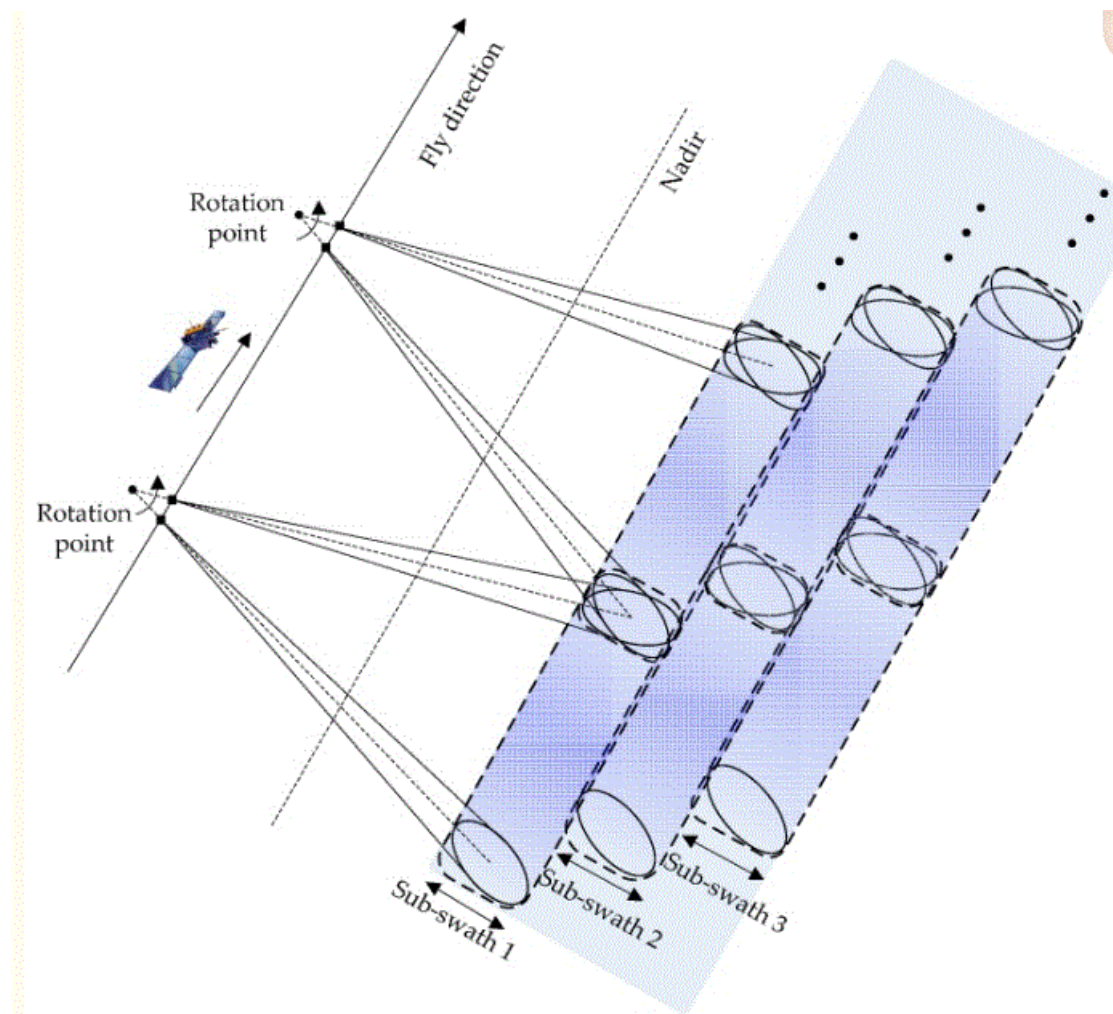


Εικόνα 18: Η αριστερή λωρίδα (IW1) και οι υπολωρίδες της εικόνας ανοδικής τροχιάς που λήφθηκε στις 6/4/2018 και χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση, όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα SNAP κατά το στάδιο επεξεργασίας S-1 TOPS Split

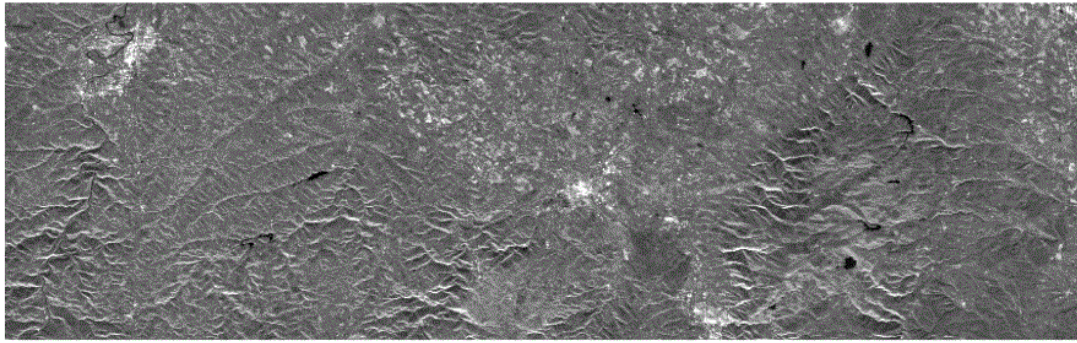
Η τεχνική TOPSAR υλοποιείται με την περιστροφική κίνηση της κεραίας του δορυφόρου η οποία οδηγεί την ακτινοβολία όχι μόνο κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης, όπως συμβαίνει στην τεχνική ScanSAR, αλλά και κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου μπρος και πίσω για κάθε υπολωρίδα (Εικόνα 19). Έτσι αποκτούνται υπολωρίδες πολύ μεγάλου μήκους και παράγονται εικόνες με ομοιογενή ποιότητα. Η κάλυψη επί του εδάφους και η ανάλυση των εικόνων που προκύπτουν με την τεχνική TOPSAR είναι ίδιες με αυτές της τεχνικής ScanSAR.

Η τεχνική TOPSAR πλεονεκτεί έναντι της τεχνικής ScanSAR για τους εξής λόγους:

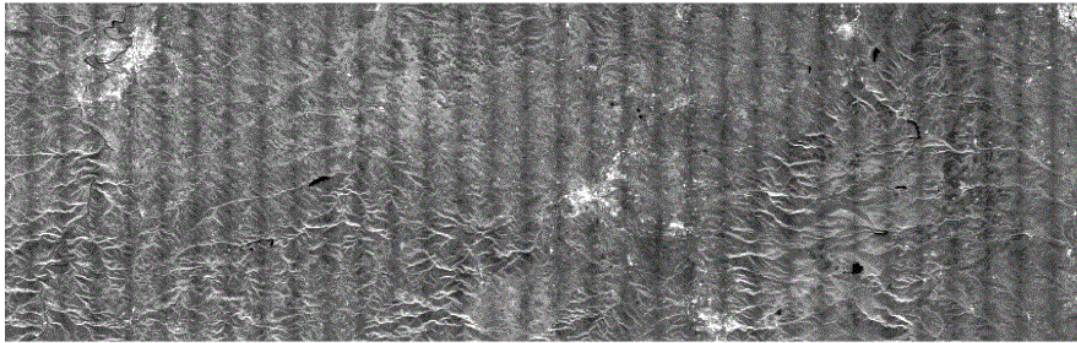
- Δίνει περίπου ενιαίο λόγο ανακλώμενου σήματος προς τον θόρυβο του (Signal To Noise ratio - SNR) και ενιαία μέση τιμή λόγου μεταξύ της ισχύος του σήματος και της ασάφειας της ισχύος του σήματος η οποία προκαλείται από ασάφειες κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης και της διεύθυνσης του αζιμουθίου για ένα εικονοστοιχείο (DTAR).
- Ελαττώνει τις διαφοροποιήσεις των εντάσεων φωτεινότητας της εικόνας οι οποίες προκαλούνται όταν στόχοι μιας λωρίδας απεικονίζονται σε διαφορετικές θέσεις κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από την μη ακριβή εκτίμηση της μέσης συχνότητας της μετακίνησης Doppler (doppler centroid mean frequency) και ονομάζεται Scalloping (Εικόνα 20).



Εικόνα 19: Γεωμετρία λήψης εικόνων με την τεχνική TOPSAR (Wei Yang et al., 2016)



a)



b)

Εικόνα 20: Η πρώτη λωρίδα εικόνας SAR που λήφθηκε πάνω από την Toulouse a) με την τεχνική TOPSAR και b) με την τεχνική ScanSAR. Δεν έχει εφαρμοστεί διόρθωση Scalloping. Με την τεχνική ScanSAR χρειάστηκαν 33 υπολωρίδες, ενώ με την τεχνική TOPSAR μόνο 9. Είναι εμφανής η επίδραση του Scalloping στην εικόνα ScanSAR η οποία συμβάλλει σε χαμηλή τιμή του SNR (Adriano Meta et al., 2008)

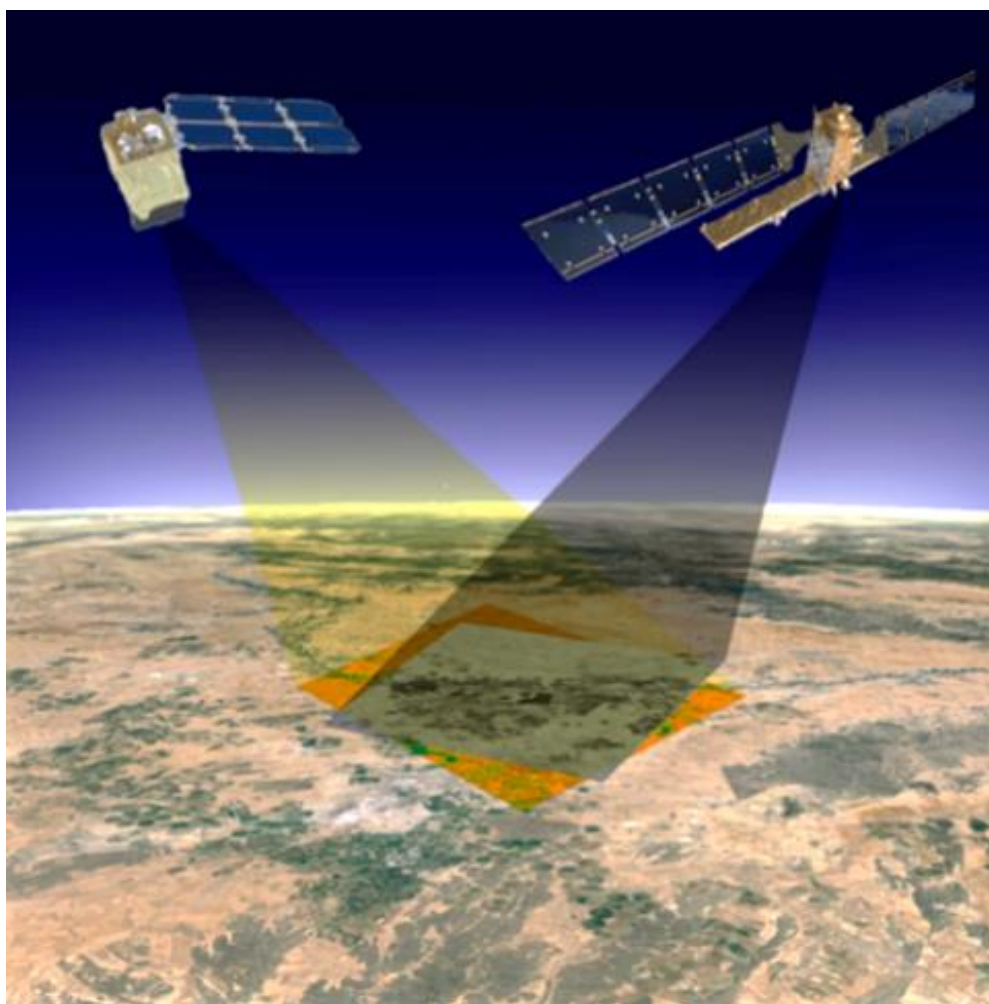
Η λειτουργία Extra Wide swath εξυπηρετεί εφαρμογές σχετικές με την θάλασσα, τους πάγους, τις πολικές περιοχές, την παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων και την ασφάλεια. Με την λειτουργία αυτή σαρώνονται επιφάνειες του εδάφους πλάτους 400 χιλιομέτρων και παράγονται εικόνες χωρικής ανάλυσης 20x40 μέτρα σε 5 λωρίδες με την τεχνική TOPSAR. Τα προϊόντα SLC της λειτουργίας αυτής περιέχουν μια εικόνα ανά λωρίδα και μια εικόνα ανά κανάλι πολικότητας. Δηλαδή συνολικά 5 εικόνες (single polarisation) ή 10 εικόνες (dual polarisation).

Η λειτουργία Wave χρησιμοποιείται για την παρατήρηση των ωκεανών και συγκεκριμένα για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικών με την κατεύθυνση των κυματισμών τους. Με την λειτουργία αυτή απεικονίζονται μικρές περιοχές της επιφάνειας της θάλασσας (vignettes) με διαστάσεις 20x20 χιλιόμετρα. Κάθε απεικονιζόμενη περιοχή επεξεργάζεται σαν ξεχωριστή εικόνα με χωρική ανάλυση 5x5 μέτρα. Η λειτουργία Wave συλλέγει δεδομένα ανά 100 χιλιόμετρα σε δύο παράλληλες ως προς το ίχνος της τροχιάς διευθύνσεις. Σε κάθε διεύθυνση τα δεδομένα συλλέγονται ανά 200 χιλιόμετρα. Στην διεύθυνση η οποία βρίσκεται πιο κοντά (near range) στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες προσπίπτουν στην επιφάνεια της θάλασσας με γωνίες που κυμαίνονται από 21.6° έως 25.1° ως προς την κατακόρυφο, ενώ στην πιο απομακρυσμένη διεύθυνση (far range) από το ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου οι ακτινοβολίες προσπίπτουν με γωνιακό εύρος 34.8° έως 38.0° ως προς την κατακόρυφο. Η λειτουργία Wave της δορυφορικής αποστολής Sentinel-1 πλεονεκτεί έναντι της λειτουργίας Wave των προηγούμενων δορυφορικών αποστολών της ESA (ERS και ENVISAT) γιατί σαρώνει μεγαλύτερης έκτασης επιφάνειες και παρέχει εικόνες υψηλότερης χωρικής ανάλυσης. Η πολικότητα του σήματος της λειτουργίας Wave είναι VV ή

ΗΗ, δηλαδή ενιαία. Το πλήθος των εικόνων που προκύπτουν από ένα προϊόν της λειτουργίας Wave είναι απεριόριστο.

Έπειτα από την αποστολή Sentinel-1, ακολούθησε η αποστολή Sentinel-2 με την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-2A τον Ιούνιο του 2015 και του δορυφόρου Sentinel-2B τον Μάρτιο του 2017. Η αποστολή αυτή θα εξυπηρετήσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως παρακολούθηση της μεταβολής της επιφάνειας των εδαφών για περιβαλλοντικούς σκοπούς, παρακολούθηση και διαχείριση καλλιεργειών με σκοπό την ασφάλεια των τροφίμων, λεπτομερή παρακολούθηση της βλάστησης και των δασών, παρατήρηση παράκτιων περιοχών, παρακολούθηση εσωτερικών υδάτων, παρακολούθηση παγετώνων και χιονοκάλυψης, χαρτογράφηση και διαχείριση πλημμυρών κ.ά. (Εικόνα 21)

Η τελευταία χρονικά αποστολή του προγράμματος SENTINEL είναι η Sentinel-3. Ξεκίνησε με την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-3A τον Φεβρουάριο του 2016 και συνεχίστηκε με την εκτόξευση του δορυφόρου Sentinel-3B τον Απρίλιο του 2018. Ο σκοπός αυτής της αποστολής είναι η παρακολούθηση του κλίματος και του περιβάλλοντος, η μέτρηση της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας, της θερμοκρασίας της επιφάνειας της στεριάς και της θάλασσας, του χρώματος της επιφάνειας της στεριάς και των ωκεανών.



Εικόνα 21: Οι δορυφόροι Sentinel-1 και Sentinel-2 (SENSAGRI)

3.4. Χαρακτηριστικά εικόνας SAR

Μια ψηφιακή εικόνα SAR μπορεί να περιγραφεί σαν ένα μωσαϊκό αποτελούμενο από εικονοστοιχεία, τα οποία απεικονίζονται με αποχρώσεις του γκρι. Κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχίζεται με μια μικρή περιοχή της επιφάνειας του εδάφους (resolution cell). Η περιοχή του εδάφους που απεικονίζεται σε κάθε εικονοστοιχείο ονομάζεται ground resolution cell. Για κάθε εικονοστοιχείο μιας SAR απεικόνισης αντιστοιχεί ένας μιγαδικός αριθμός. Η διανυσματική απεικόνιση (phasor) αυτού του μιγαδικού αριθμού φαίνεται στην Εικόνα 22. Εικόνες με μιγαδικές τιμές εικονοστοιχείων ονομάζονται SLC. Σε κάθε μιγαδικό αριθμό των εικονοστοιχείων μιας εικόνας SAR περιέχεται πληροφορία για την ανακλαστικότητα ή ένταση (Intensity) και για τη φάση (Phase) του κύματος που επιστρέφει στον δέκτη του συστήματος SAR. Η ένταση του κύματος προκύπτει από το τετράγωνο του πλάτους (Amplitude) του κύματος (Σχέση 1)

$$I(x, y) = A^2(x, y) \quad (1)$$

όπου:

(x, y) : συντεταγμένες εικονοστοιχείου για το απεικονιζόμενο σημείο του εδάφους

$A(x, y)$ = πλάτος κύματος εικονοστοιχείου (x, y) που εκφράζεται από την φωτεινότητα του εικονοστοιχείου

$I(x, y)$ = ένταση κύματος εικονοστοιχείου (x, y)

Η φάση των εικονοστοιχείων μιας εικόνας SAR δίνεται σε μιγαδική μορφή μέσω της Σχέσης 2

$$e^{i\varphi(x,y)} = \cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi) \quad (2)$$

όπου:

$\varphi(x, y)$: φάση οπισθοσκεδαζόμενου κύματος εικονοστοιχείου (x, y)

i : φανταστική μονάδα με την ιδιότητα $i^2 = -1$

$\cos(\varphi)$: πραγματικό μέρος μιγαδικής φάσης

$\sin(\varphi)$: φανταστικό μέρος μιγαδικής φάσης

Το αποδιαμορφωμένο (demodulated) σήμα που επιστρέφει στην κεραία του συστήματος SAR εκφράζεται από τον ακόλουθο μιγαδικό αριθμό μέσω της Σχέσης 3

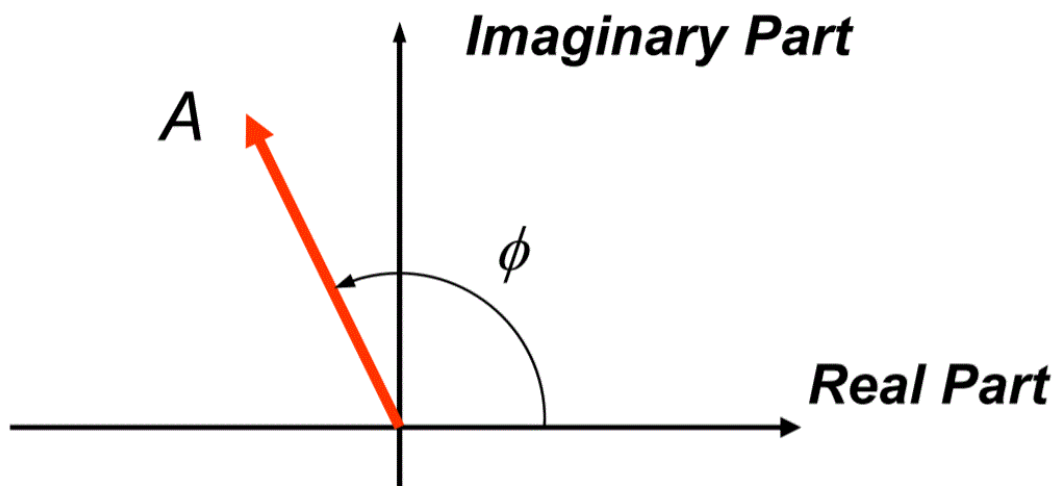
$$\begin{aligned}
 z(x, y) &= A(x, y) \cdot e^{i \cdot \varphi(x, y)} \\
 \Rightarrow z(x, y) &= A(x, y) \cdot [\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)] \\
 \Rightarrow z(x, y) &= A(x, y) \cdot \cos(\varphi) + i \cdot A(x, y) \cdot \sin(\varphi) \quad (3)
 \end{aligned}$$

Το πραγματικό (Real) μέρος του μιγαδικού αριθμού εκφράζεται από την Σχέση 4:

$$Q = A(x, y) \cdot \cos(\varphi) \quad (4)$$

ενώ το φανταστικό (Imaginary) μέρος του μιγαδικού αριθμού εκφράζεται από την Σχέση 5:

$$\text{Im} = A(x, y) \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$



Εικόνα 22: Διανυσματική απεικόνιση μιγαδικού αριθμού εικόνας SAR στο μιγαδικό επίπεδο όπου φαίνεται ο φανταστικός (imaginary) και ο πραγματικός (real) άξονας. Ακόμη, φαίνεται το πλάτος (A) και η φάση (φ) του κύματος (Alberto Moreira, 2013)

Η χωρική ανάλυση των SAR απεικονίσεων είναι ανεξάρτητη του υψομέτρου πτήσης της πλατφόρμας. Οι οπισθοσκεδαζόμενες ακτινοβολίες δεν επιστρέφουν ταυτόχρονα στην κεραία του δορυφόρου, λόγω της διαφορετικής απόστασης που έχει ο κάθε σκεδαστής από την κεραία εκπομπής. Όταν η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σκεδαστών είναι

μεγαλύτερη από $\frac{l}{2}$ (όπου l είναι το μήκος του παλμού), τότε οι σκεδαστές θα απεικονίζονται

σε διαφορετικά εικονοστοιχεία (Εικόνα 23). Η χωρική ανάλυση της εικόνας SAR στην πλάγια διεύθυνση είναι:

$$X_R = \frac{l}{2 \cdot \sin \theta} \quad (6)$$

, όπου:

l: μήκος παλμού (Εικόνα 24)

θ: γωνία πρόσπτωσης

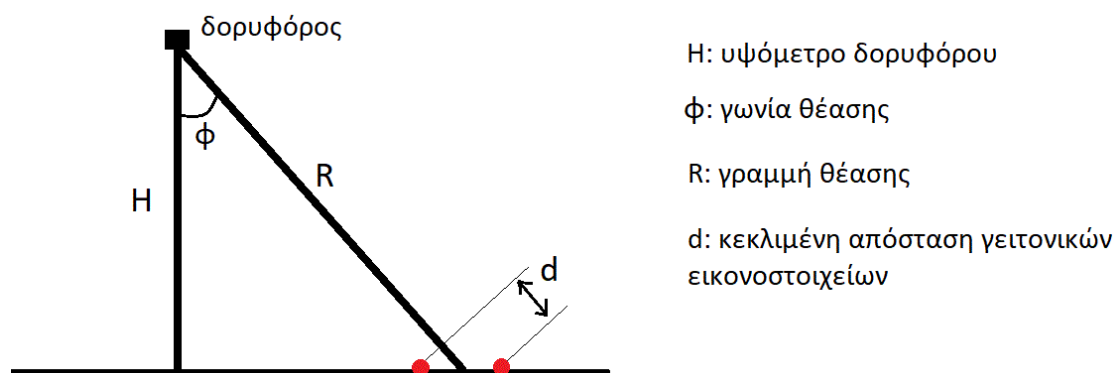
Το μήκος του παλμού δίνεται από την Σχέση 7:

$$l = c \cdot \tau \quad (7)$$

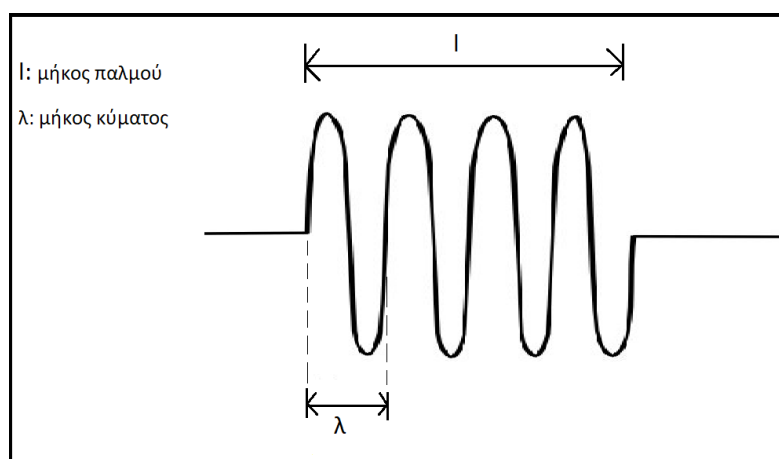
όπου:

c: ταχύτητα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

τ: μήκος του παλμού (σε χρονική διάρκεια)



Εικόνα 23: Κεκλιμένη απόσταση γειτονικών εικονοστοιχείων



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση μήκους παλμού και μήκους κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Από την Σχέση 6 διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της γωνίας θέασης, άρα και της γωνίας πρόσπτωσης, βελτιώνεται η χωρική ανάλυση στην πλάγια διεύθυνση. Ακόμη, μικρό μήκος παλμού συνεπάγεται και αυξημένη χωρική ανάλυση στην πλάγια διεύθυνση.

Η ενέργεια E του εκπεμπόμενου παλμού σχετίζεται με την ισχύ P του παλμού μέσω της Σχέσης 8:

$$E = \int_0^{\tau} P(t)dt \quad (8)$$

Από την Σχέση 8 διαπιστώνεται ότι μικρό χρονικό μήκος παλμού οδηγεί σε χαμηλή ενέργεια παλμού η οποία δυσκολεύει την επιστροφή των ανακλώμενων παλμών στην κεραία του δορυφόρου. Για αυτό τον λόγο, τα συστήματα SAR συνήθως εκπέμπουν παλμούς γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας (chirps) με τους οποίους επιτυγχάνονται μικρά μήκη παλμών και υψηλή ενέργεια (Εικόνα 25). Το σχήμα του κύματος των παλμών γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας περιγράφεται από την Σχέση 9

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi(f_c \cdot t + 0.5 \cdot k \cdot t^2) + \varphi_c) \quad (9)$$

όπου:

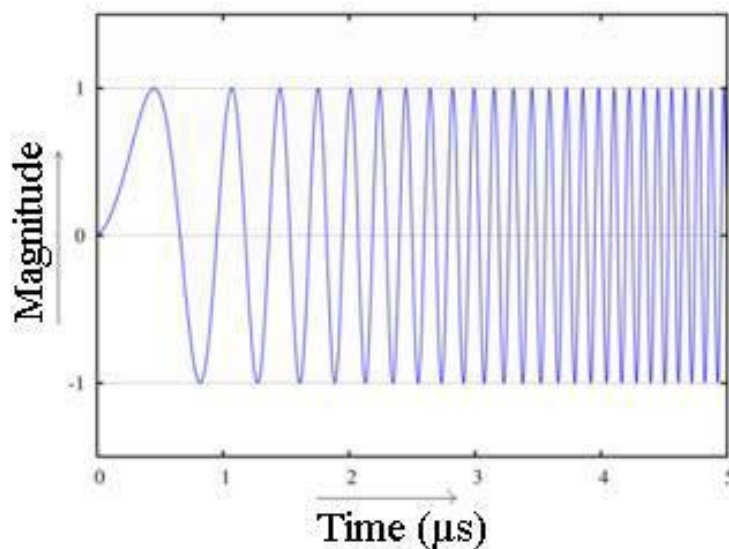
t : χρόνος ($0 \leq t \leq \tau$)

A : πλάτος κύματος

f_c : αρχική συχνότητα

k : ρυθμός μεταβολής της γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας

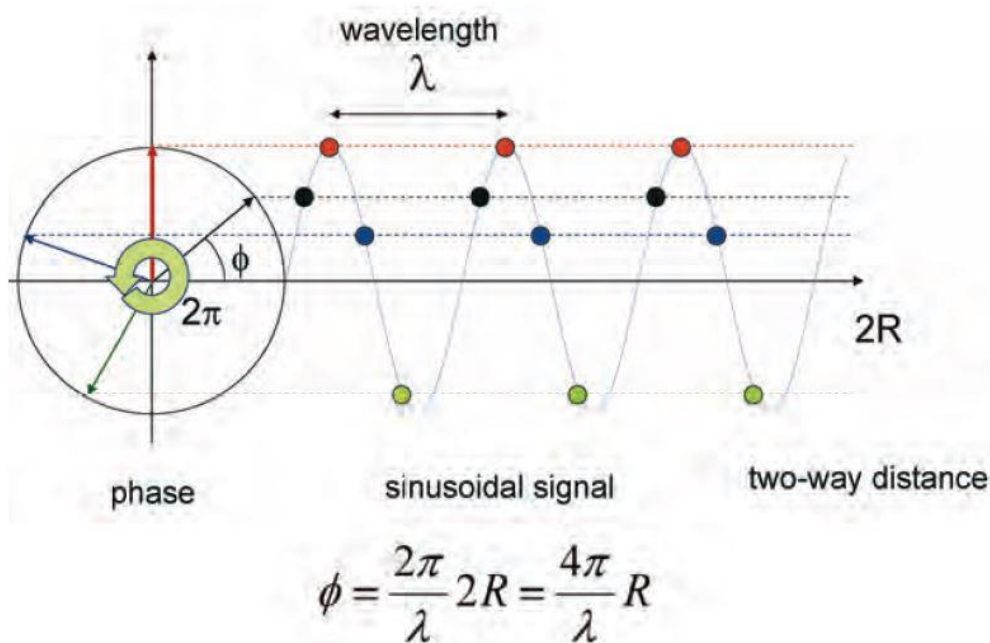
φ_c : αρχική φάση



Εικόνα 25: Παλμός γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας (Samiur Rahman, 2010)

Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος παράγουν εικόνες οι οποίες έχουν σημαντικά καλύτερη ανάλυση στην διεύθυνση του αζιμουθίου σε σχέση με τις εικόνες που παράγουν τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο Doppler. Η ανάλυση μιας εικόνας SAR στην διεύθυνση του αζιμουθίου είναι $\frac{L}{2}$, όπου L είναι το μήκος της κεραίας. Αυτό δείχνει ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος της κεραίας τόσο αυξάνεται και η ανάλυση κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου. Το μήκος της κεραίας, όμως, μπορεί να μειωθεί μέχρι μιας ελάχιστης τιμής για να μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της συμβολομετρίας για την επιθυμητή εξάπλωση της ακτινοβολίας συγκεκριμένης συχνότητας. Η ανάλυση μιας απεικόνισης ραντάρ κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου μπορεί να αυξηθεί και με μείωση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Στα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος η ανάλυση κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου είναι ανάλογη της κεκλιμένης απόστασης μεταξύ κεραίας και στόχου και του πλάτους του παλμού στην διεύθυνση του αζιμουθίου.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την κεραία έχει ημιτονοειδή μορφή. Έτσι, η καθυστέρηση της λαμβανόμενης ακτινοβολίας εκφράζεται ως διαφορά φάσης. Η διαφορά φάσης ακτινοβολιών, η οποία είναι πολλαπλάσια του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, δεν γίνεται αντιληπτή, λόγω της ημιτονοειδούς φύσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. (Εικόνα 26)

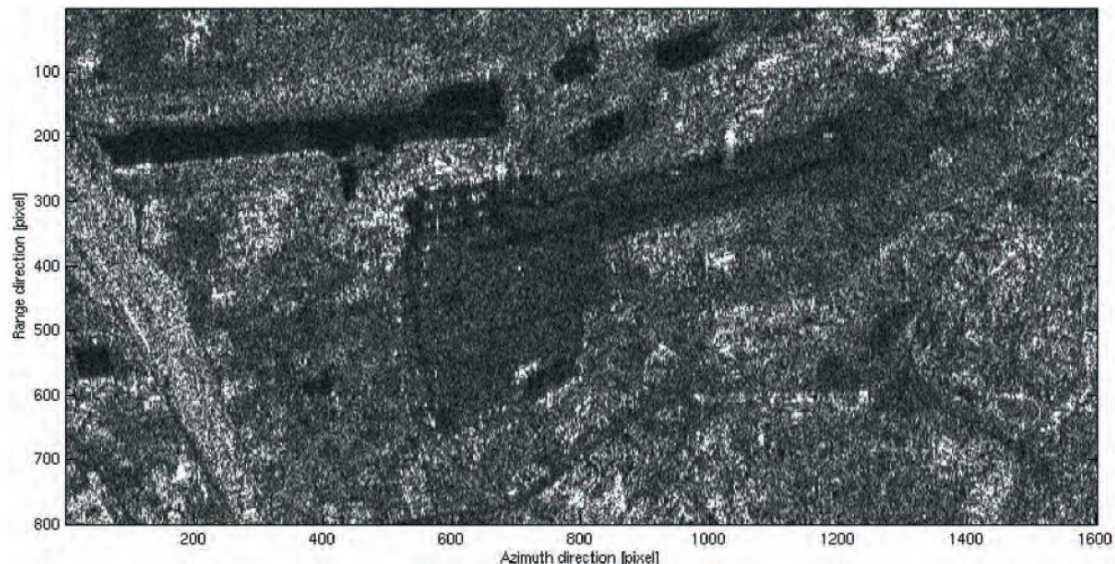


Εικόνα 26: Η ημιτονοειδής μορφή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας της κεραίας του συστήματος SAR (ESA)

3.4.1. Το φαινόμενο της κηλίδωσης (Speckle)

Σε μια εικόνα SAR είναι σύνηθες γειτονικά εικονοστοιχεία τα οποία απεικονίζουν μια ομοιόμορφη περιοχή (π.χ. μια συγκεκριμένου τύπου καλλιέργεια) να έχουν σημαντικές διαφορές εντάσεων φωτεινότητας (Εικόνα 27). Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο άθροισμα των εντάσεων φωτεινότητας όλων των στοιχειωδών σκεδαστών, με μέγεθος συγκρίσιμο με

το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας. Έτσι οι εικόνες SAR παρουσιάζουν στίγματα (speckles), τα οποία ελαττώνουν την ποιότητα και την χρησιμότητα τους. Τα στίγματα μπορούν να μειωθούν σημαντικά εάν γίνει λήψη πολλών εικόνων της περιοχής ενδιαφέροντος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες παρατήρησης και έπειτα υπολογιστεί ο μέσος όρος τους. Επίσης, η επεξεργασία του σήματος με προσαρμοζόμενα (adaptive) και μη-προσαρμοζόμενα (non-adaptive) φίλτρα ελαττώνει την επίδραση του φαινομένου της κηλίδωσης. Τα μη-προσαρμοζόμενα φίλτρα έχουν απλούστερη εφαρμογή και απαιτούν λιγότερη υπολογιστική ισχύ, ενώ τα προσαρμοζόμενα φίλτρα είναι προτιμότερα για την διατήρηση των λεπτομερειών σε περιοχές έντονης υφής, όπως είναι τα δάση. Για να είναι δυνατή η καλή ερμηνεία μιας απεικόνισης SAR είναι απαραίτητη η μείωση ή η εξάλειψη του θορύβου που προκύπτει από το φαινόμενο της κηλίδωσης.

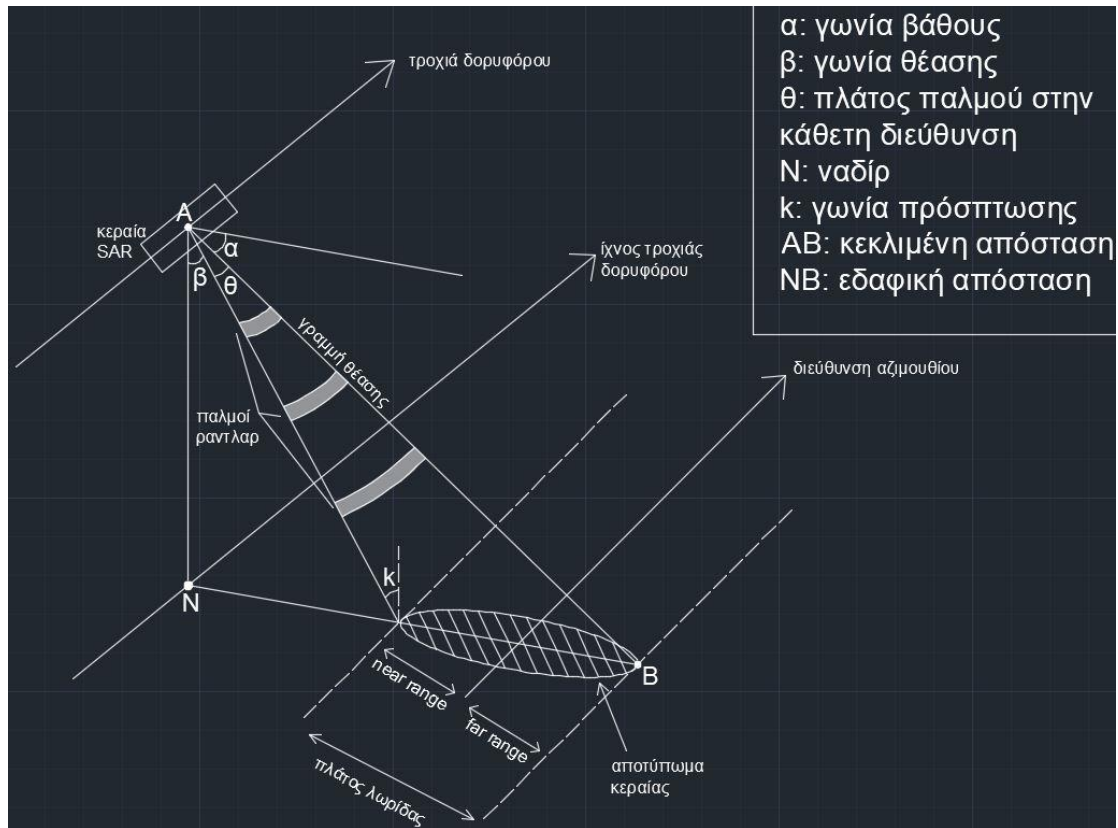


Εικόνα 27: Εικόνα SAR από τον δορυφόρο ERS-2, όπου απεικονίζεται το αεροδρόμιο Linate στο Μιλάνο της Ιταλίας. Είναι εμφανή τα στίγματα (speckles) στις ομογενείς περιοχές που περιβάλλουν το αεροδρόμιο. (Alessandro Ferretti et al., 2007)

3.4.2. Γεωμετρία λήψης

Η λήψη των εικόνων SAR γίνεται είτε κατά την ανοδική (Ascending) τροχιά του δορυφόρου, η οποία πραγματοποιείται από νότο προς βορρά είτε κατά την καθοδική (Descending) τροχιά του δορυφόρου η οποία πραγματοποιείται από βορρά προς νότο. Στην Εικόνα 28 απεικονίζεται η βασική γεωμετρία λήψης εικόνων ενός συστήματος SAR. Η προβολή της τροχιάς του δορυφόρου στο έδαφος ονομάζεται ίχνος τροχιάς (ground track). Η διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την κεραία του δορυφόρου ονομάζεται γραμμή θέασης (Line of Sight) και είναι κάθετη και πλάγια προς την κατεύθυνση της πτήσης. Οι μετρήσεις γίνονται κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η απόσταση μεταξύ της κεραίας και του στόχου στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται κεκλιμένη απόσταση (Slant Range Distance) και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του στόχου. Η απόσταση μεταξύ του ίχνους της τροχιάς και του στόχου στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται εδαφική απόσταση (Ground Range Distance) και είναι κάθετη στην κατεύθυνση πτήσης. Είναι απαραίτητη η μετατροπή από την κεκλιμένη στην οριζόντια διεύθυνση η οποία επιτυγχάνεται με τοπικές

διορθώσεις της κλίσης του εδάφους και του υψομέτρου. Η γωνία που σχηματίζει η γραμμή θέασης με το ναδύρ ονομάζεται γωνία παρατήρησης (off-nadir angle) ή γωνία θέασης (look angle), η οποία κυμαίνεται μεταξύ 20° και 50° για τα σύγχρονα συστήματα (21° για τον δορυφόρο ERS), ενώ η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από την κεραία του δορυφόρου ονομάζεται γωνία βάθους (depression angle).



Εικόνα 28: Γεωμετρία λήψης εικόνων SAR

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφης στην επιφάνεια του εδάφους και του προσπίπτοντος κύματος στην επιφάνεια αυτή ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) και είναι μεγαλύτερη από την γωνία παρατήρησης εξαιτίας της καμπυλότητας της γης. Η δέσμη της ακτινοβολίας (παλμοί) σαρώνει στην επιφάνεια του εδάφους μια λωρίδα (swath) συγκεκριμένου πλάτους η οποία χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα κοντινότερο στο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου (near range) και ένα πιο μακριά από αυτό (far range). Το μέγεθος της περιοχής η οποία καλύπτεται από τη δέσμη της ακτινοβολίας καλείται αποτύπωμα της κεραίας (antenna's footprint). Το μέγεθος του αποτυπώματος της κεραίας εξαρτάται από το πραγματικό μέγεθος της κεραίας και από το υψόμετρο πτήσης της πλατφόρμας. Το πλάτος του παλμού στην κάθετη διεύθυνση αντιπροσωπεύεται από την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κεκλιμένης απόστασης του κοντινότερου στο ίχνος της τροχιάς σκεδαστή και της κεκλιμένης απόστασης του μακρύτερου από το ίχνος της τροχιάς σκεδαστή.

Η εικόνα SAR έχει δύο διευθύνσεις. Η μια είναι παράλληλη με την διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου και καλείται διεύθυνση αζιμουθίου (azimuth direction), ενώ η άλλη είναι κάθετη σε αυτή και ονομάζεται πλάγια διεύθυνση (range direction).

3.4.3. Παράμετροι που επηρεάζουν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα

Το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα ενός συστήματος SAR επηρεάζεται από τις φυσικές (π.χ. γεωμετρία, τραχύτητα) και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των απεικονιζόμενων αντικειμένων.

Σε πόλεις όπου υπάρχουν υψηλά κτίρια και κατασκευές είναι συχνό το φαινόμενο της διπλής ανάκλασης (double bounce) του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος (Εικόνα 29α). Αυτό συμβαίνει όταν ακτινοβολίες δέχονται μια αρχική ανάκλαση κοντά στη βάση ενός υψηλού κτιρίου και έπειτα μια δεύτερη στον τοίχο του. Η διπλή ανάκλαση οφείλεται στην γεωμετρία των συστημάτων SAR, τα οποία εκπέμπουν παλμούς πλευρικά. Η επίδραση του φαινομένου της διπλής ανάκλασης εξαρτάται από το ύψος των κτιρίων (όσο υψηλότερα είναι τα κτίρια τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της διπλής ανάκλασης και το αντίστροφο) και από την γωνία που σχηματίζει ο τοίχος του κτιρίου με την διεύθυνση του αζιμουθίου (Εικόνα 29β).

Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας επηρεάζει την οπισθοσκέδαση των απεικονιζόμενων σκεδαστών – εικονοστοιχείων, άρα και την φωτεινότητά τους. Όταν αυτή είναι μικρή, η φωτεινότητα είναι εντονότερη. Όσο η γωνία πρόσπτωσης μεγαλώνει, ελαττώνεται και η φωτεινότητα.

Η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας που επιστρέφει στην κεραία του συστήματος SAR. Για να εξεταστεί ο βαθμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας του εδάφους λαμβάνεται υπόψιν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και η γωνία πρόσπτωσης. Το κριτήριο του Rayleigh ορίζει μια επιφάνεια ως λεία όταν:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

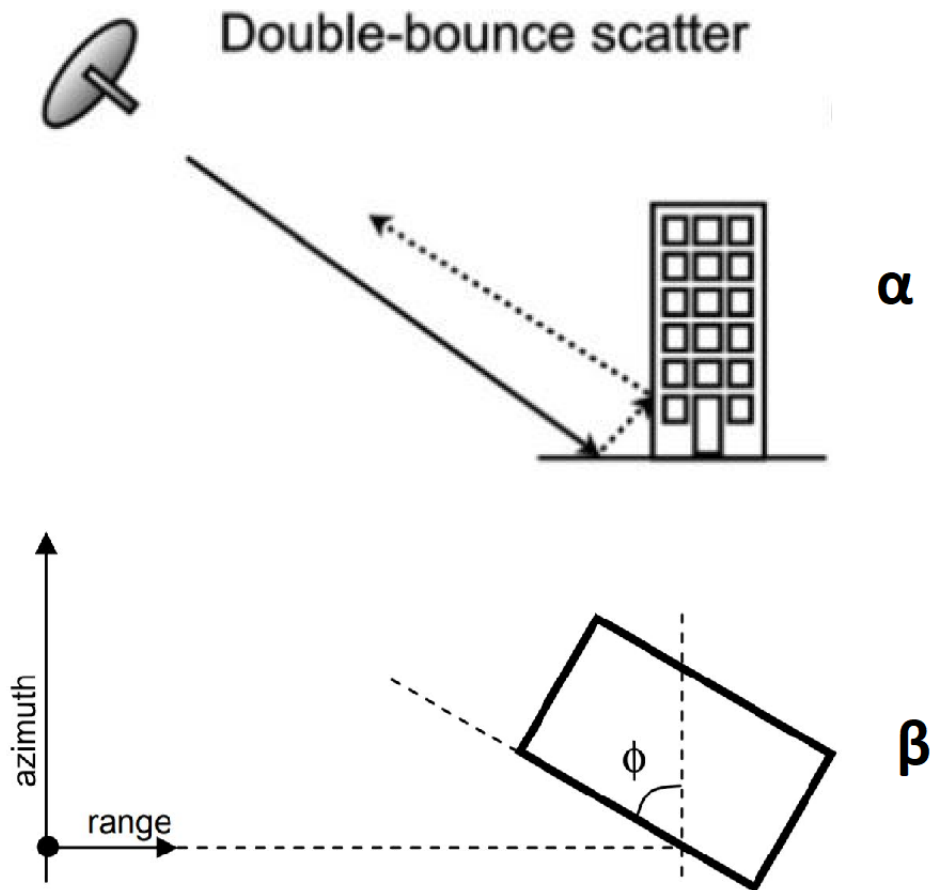
και τραχεία όταν:

$$h > \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

όπου: h: μέσο ύψος των αποκλίσεων της επιφάνειας του εδάφους

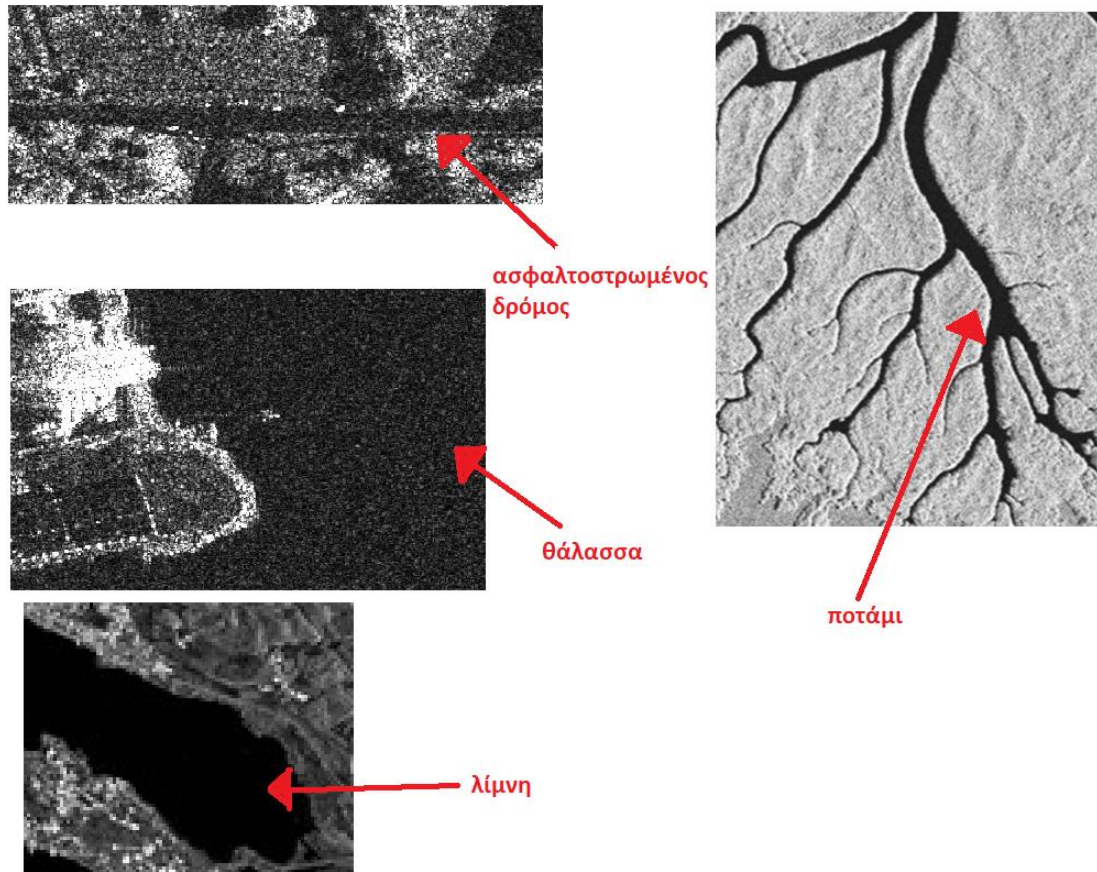
λ: μήκος κύματος της ακτινοβολίας

θ: γωνία πρόσπτωσης



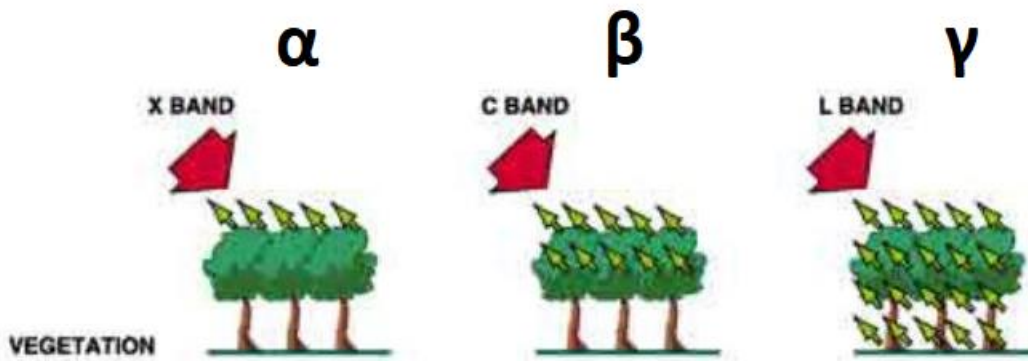
Εικόνα 29: α) Το φαινόμενο της διπλής ανάκλασης (*double bounce*) (Τροποποιημένη από Sybrand van Beijma et al., 2014), β) Γωνία μεταξύ του τοίχου του κτιρίου και της διεύθυνσης αζιμουθίου

Το φαινόμενο της τραχύτητας μπορεί να γίνει αντιληπτό στις περιοχές όπου το έδαφος συνορεύει με υδάτινες μάζες. Το έδαφος είναι επιφάνεια η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη τραχύτητα. Η ένταση της τραχύτητας είναι εμφανέστερη σε πετρώδη εδάφη. Ακόμη, οι αστικές περιοχές είναι επιφάνειες ιδιαίτερα τραχιές. Η ανακλαστικότητα αυτών των περιοχών είναι υψηλή με αποτέλεσμα την απεικόνισή τους με πιο ανοιχτούς τόνους του γκρι. Αντίθετα, οι υδάτινες μάζες έχουν συνήθως λεία επιφάνεια (π.χ. στάσιμα νερά) από την οποία επιστρέφει μικρό ποσοστό ακτινοβολίας στην κεραία του δορυφόρου. Έτσι η ανακλαστικότητά τους είναι χαμηλή και απεικονίζονται με πιο σκούρους τόνους του γκρι (Εικόνα 30). Εξάιρεση αποτελούν περιπτώσεις όπως η παρουσία ανέμων υψηλής εντάσεως ή θαλάσσιου ρεύματος, κατά τις οποίες οι υδάτινες μάζες απεικονίζονται με πιο ανοιχτούς τόνους του γκρι.



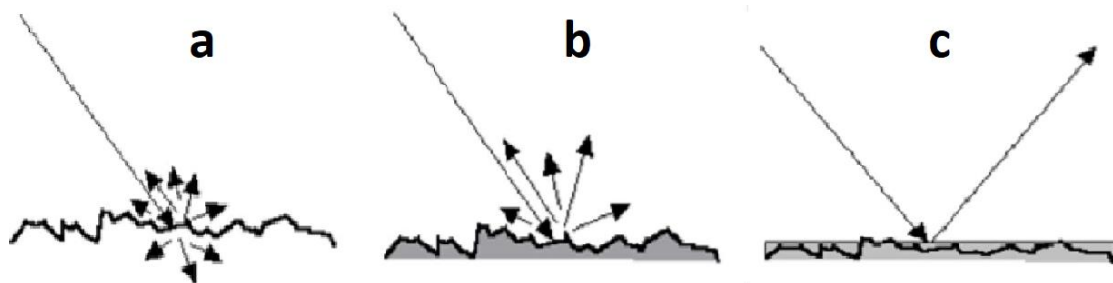
Εικόνα 30: Εικόνες εύρους (εντάσεως φωτεινότητας) από λήψεις του δορυφόρου TerraSAR-X. Φαίνεται η υψηλή ανακλαστικότητα λείων επιφανειών (ασφαλτοστρωμένος δρόμος, θάλασσα, ποτάμι, λίμνη) (Τροποποιημένη από Δ. Βασιλάκη και Α. Γεωργόπουλος, 2013)

Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθορίζει και το βαθμό στον οποίο αυτή διαπερνάει τους στόχους επί του εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα της. Όταν η εξεταζόμενη περιοχή είναι δασική έκταση και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει μήκος κύματος 3 cm (κανάλι X) διαπερνάει μόνο τα πρώτα φύλλα ενός δέντρου. Ακτινοβολίες με μήκος κύματος 5.6 cm (κανάλι C) μπορούν να διαπεράσουν, εκτός από τα πρώτα φύλλα, και μικρά κλαδάκια εισχωρώντας κάτω από την κομοστέγη. Ακόμη μεγαλύτερη διαπερατότητα παρουσιάζουν οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος 23 cm (κανάλι L), οι οποίες διαπερνούν το φύλλωμα των δέντρων και έτσι η πληροφορία που δίνει μια εικόνα SAR στην περίπτωση αυτή σχετίζεται με τα κλαδιά και τον κορμό των δέντρων (Εικόνα 31). Η διαπερατότητα ενός στόχου εξαρτάται και από την υγρασία του. Μεγάλα ποσοστά υγρασίας δυσκολεύουν την διείσδυση της ακτινοβολίας, ειδικότερα όταν αυτή έχει μεγάλη συχνότητα εκπομπής (π.χ. κανάλι X). Ο βαθμός διείσδυσης μιας ακτινοβολίας εξαρτάται και από την πολικότητα του σήματος.



Εικόνα 31: Βαθμός διείσδυσης ακτινοβολίας στα δέντρα για διάφορες περιπτώσεις μήκους κύματος. α) κανάλι X, β) κανάλι C και γ) κανάλι L (Τροποποιημένη από ESA)

Η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα μέτρο της ανακλασιμότητας και αγωγιμότητας ενός υλικού. Υλικά τα οποία έχουν μεγάλη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα. Στην περιοχή των μικροκυμάτων, τα περισσότερα υλικά της επιφάνειας της γης έχουν διηλεκτρική σταθερά η οποία έχει τιμές από 1 έως 8. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού είναι περίπου 80. Η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται σημαντικά με την ύπαρξη υγρασίας. Έτσι υγρές επιφάνειες παρουσιάζουν μεγάλη οπισθοσκέδαση. (Εικόνα 32)



Εικόνα 32: Επίδραση της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών επί του εδάφους στην ανακλαστικότητα του οπισθοσκεδαζόμενου κύματος, α) ξηρό έδαφος: μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διαπερνά το έδαφος και έτσι η οπισθοσκέδαση είναι μικρή, β) υγρό έδαφος: η παρουσία υγρασίας αυξάνει την διηλεκτρική σταθερά του στόχου και η ανάκλαση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη, γ) πλημμυρισμένο έδαφος: το έδαφος είναι πλήρως καλυμμένο με νερό και η ανακλαστικότητα παίρνει την μέγιστη τιμή της (Τροποποιημένη από Humboldt State University)

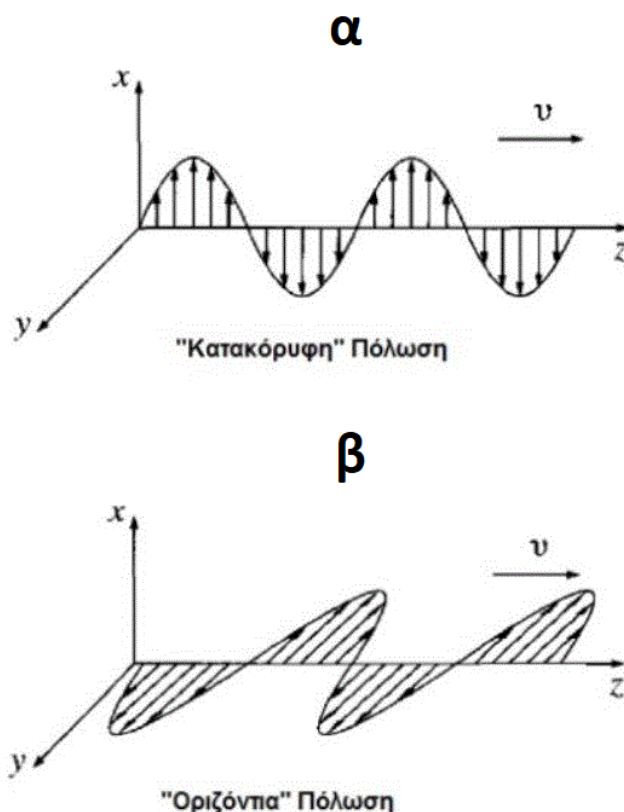
3.4.4. Πολικότητα σήματος

Η πολικότητα του σήματος αναφέρεται στον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου. Τα πρώτα συστήματα SAR εξέπεμπαν και ελάμβαναν μικροκύματα σε μια μόνο κατάσταση πολικότητας (single polarized SAR systems). Για παράδειγμα, η κεραία SAR του δορυφόρου SeaSat, ο οποίος ήταν ο πρώτος δορυφόρος που μετέφερε ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, εξέπεμπε και ελάμβανε κύματα σε οριζόντια πόλωση. Τα τελευταία χρόνια, οι κεραίες SAR μπορούν να λαμβάνουν κύματα διαφορετικής πολικότητας σε σχέση με αυτά που εκπέμπουν (polarimetric SAR). Η κεραία ενός συστήματος SAR μεταδίδει μικροκύματα με κατακόρυφη (V) (Εικόνα 33α) ή οριζόντια (H) πόλωση (Εικόνα 33β). Κάθε σκεδαστής επί του εδάφους έχει

τη δική του υπογραφή πόλωσης (polarisation signature) που σημαίνει ότι έχει την ιδιότητα να αλλάζει την πόλωση του κύματος που επιστρέφει στην κεραία του δορυφόρου. Προσανατολισμένα αντικείμενα (π.χ. κτήρια) έχουν την τάση να διατηρούν την πολικότητα του κύματος, ενώ αντικείμενα τα οποία έχουν τυχαίο προσανατολισμό (π.χ. δέντρα) προκαλούν συχνά αλλαγή στην πολικότητα του οπισθοσκεδαζόμενου κύματος. Έτσι οι πιθανοί συνδυασμοί εκπεμπόμενης και λαμβανόμενης ακτινοβολίας είναι:

- HH (οριζόντια μετάδοση και οριζόντια λήψη)
- VV (κατακόρυφη μετάδοση και κατακόρυφη λήψη)
- HV (οριζόντια μετάδοση και κατακόρυφη λήψη)
- VH (κατακόρυφη μετάδοση και οριζόντια λήψη)

Οι δύο πρώτοι συνδυασμοί ονομάζονται όμοια πολωμένοι, γιατί ο προσανατολισμός της εκπεμπόμενης και της λαμβανόμενης ακτινοβολίας είναι ίδιος. Οι δύο τελευταίοι συνδυασμοί ονομάζονται αντίθετα πολωμένοι, γιατί οι κατευθύνσεις της εκπεμπόμενης και της λαμβανόμενης ακτινοβολίας είναι κάθετες μεταξύ τους.

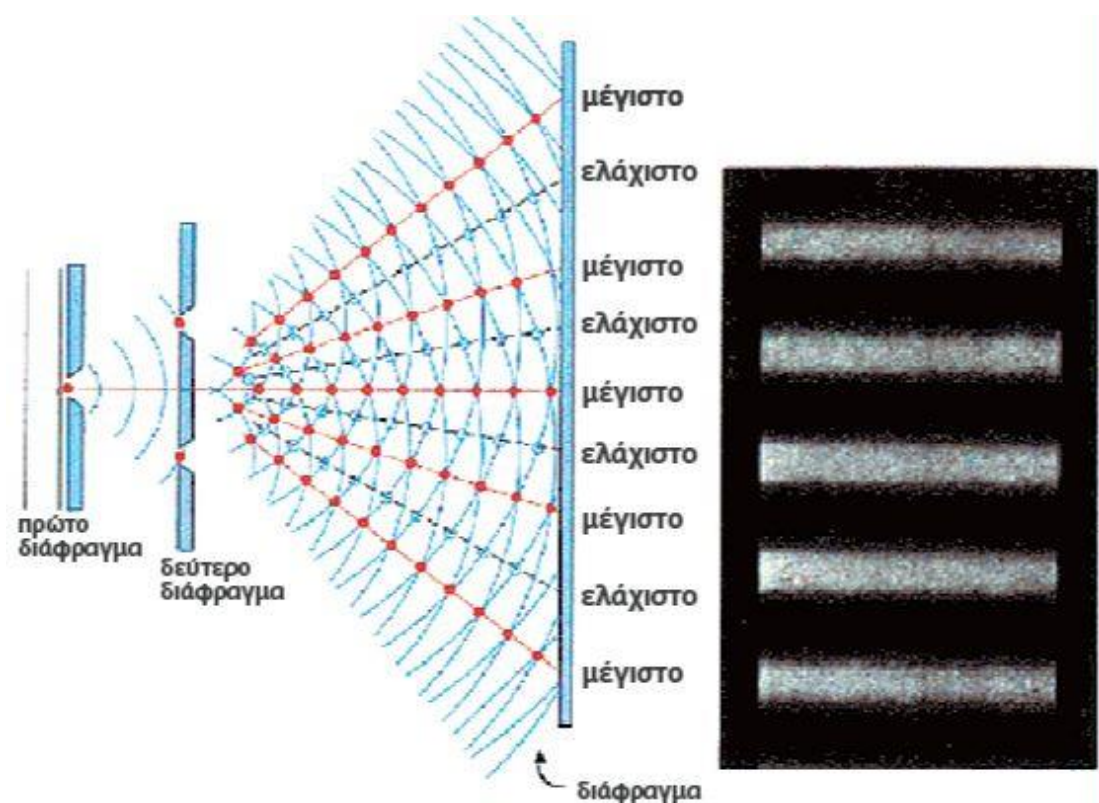


Εικόνα 33: α) Κατακόρυφη και β) Οριζόντια πόλωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Τροποποιημένη από Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών)

4. Συμβολομετρία SAR (InSAR)

4.1. Το πείραμα του Young

Η αρχή της συμβολομετρίας μπορεί να περιγραφεί με το πείραμα των διπλών οπών του Young. Στο πείραμα αυτό εκπέμπεται από μια πηγή μονοχρωματική ακτινοβολία μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένο ένα διάφραγμα με δύο παράλληλες οπές των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου ίδια με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και οι θέσεις τους είναι συμμετρικές ως προς την ακτίνα φωτός που είναι κάθετη στην οθόνη. Μπροστά από αυτό το διάφραγμα είναι τοποθετημένο ένα άλλο διάφραγμα, χωρίς οπές, το οποίο λειτουργεί σαν οθόνη. Καθώς η ακτινοβολία διέρχεται μέσα από τις δύο οπές “δημιουργούνται” δύο νέες συμφασικές ακτινοβολίες και οι οπές λειτουργούν ως “πηγές” νέων ακτινοβολιών. Αυτές οι ακτινοβολίες συμβάλλουν πάνω στο διάφραγμα-οθόνη. Στα σημεία της οθόνης όπου και τα δύο συμβαλλόμενα κύματα έχουν το μέγιστο ύψος τους παρατηρείται η μέγιστη φωτεινότητα, ενώ στα σημεία όπου το ένα κύμα έχει το μέγιστο ύψος του και το άλλο έχει το ελάχιστο δεν υπάρχει φωτεινότητα. Κατά αυτόν τον τρόπο στην οθόνη παρατηρείται μια διαδοχή εντάσεων φωτεινότητας. Καθώς απομακρυνόμαστε από ένα σημείο μέγιστης φωτεινότητας, η ένταση της φωτεινότητας ελαττώνεται έως ότου γίνει μηδενική και στη συνέχεια αυξάνεται εκ νέου μέχρι να φτάσουμε στο επόμενο σημείο μέγιστης φωτεινότητας κ.ο.κ. (Εικόνα 34)



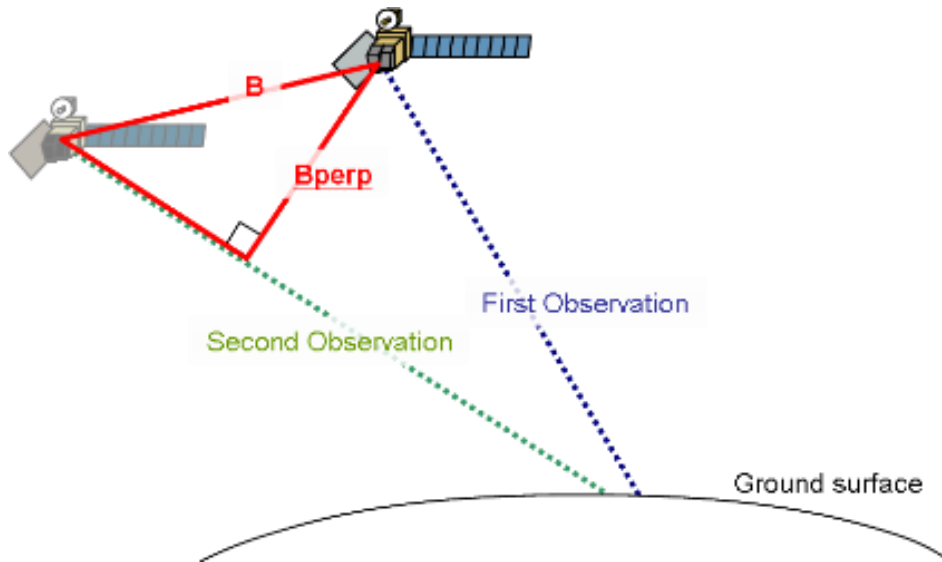
Εικόνα 34: Το πείραμα του Young (αριστερά) και η εικόνα συμβολής (δεξιά) (Τροποποιημένη από Φίλοι του Ιδρύματος Κέντρο Διάδοσης Επιστημών και Μουσείο Τεχνολογίας πρώην Τεχνικό Μουσείο Θεσσαλονίκης)

4.2. Αρχή της συμβολομετρίας

Η συμβολομετρία SAR (InSAR) είναι μια τεχνική που αξιοποιεί την διαφορά φάσης τουλάχιστον δύο εικόνων SAR, οι οποίες λαμβάνονται από σχετικά κοντινές θέσεις δορυφόρων, με σκοπό την διάκριση και την μελέτη των προτύπων παρεμβολής μεταξύ των δύο εικόνων. Η πρώτη εικόνα ονομάζεται κύρια (master), ενώ οι υπόλοιπες εικόνες που λαμβάνονται από επαναληπτικά περάσματα του δορυφόρου ονομάζονται δευτερεύουσες (slave). Το αποτέλεσμα της συμβολομετρίας είναι το συμβολόγραμμα, το οποίο απεικονίζει μια αλληλουχία ζωνών χρωμάτων (π.χ. από το μπλε έως το κόκκινο), οι οποίες αντιπροσωπεύουν την κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους. Η μετατόπιση αντιπροσωπεύει καθίζηση ή ανύψωση του εδάφους ανάλογα με την κατεύθυνση προς την οποία “κοιτάει” η κεραία του δορυφόρου. Οι αλληλουχίες των ζωνών χρωμάτων καλούνται κροσσοί συμβολής (fringes). Κάθε κροσσός συμβολής αντιστοιχεί σε μετακίνηση ίση με το μισό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Δηλαδή, στην περίπτωση του δορυφόρου Sentinel, όπου η κεραία του συστήματος SAR μεταδίδει κύματα μήκους 5.6 εκατοστών, κάθε κροσσός συμβολής αντιστοιχεί σε μετακίνηση 2.8 εκατοστών ως προς το δορυφόρο.

Η απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης των εικόνων SAR ονομάζεται συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης (interferometer baseline). Η κάθετη προβολή του συμβολομετρικού διανύσματος βάσης στην γραμμή θέασης ονομάζεται κάθετο διάνυσμα βάσης (perpendicular baseline) (Εικόνα 35). Η χρονική περίοδος μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων του δορυφόρου από την ίδια τοποθεσία ονομάζεται χρονική βάση (temporal baseline), η οποία εξαρτάται από την τροχιά του δορυφόρου και κυμαίνεται από μερικές μέρες έως περίπου ένα μήνα.

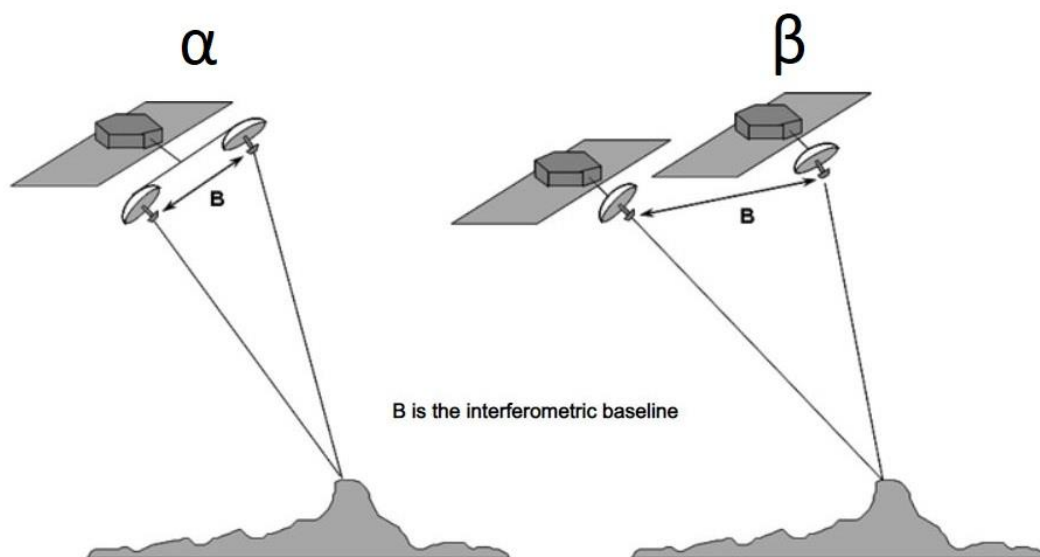
Η διαφορική συμβολομετρία SAR (DInSAR) προκύπτει αν από την συμβολομετρική φάση αφαιρεθεί και η επίδραση της επιφάνειας του εδάφους με χρήση ενός ακριβούς ΨΜΕ. Έτσι, ανιχνεύονται πολύ μικρές μεταβολές του υψομέτρου της επιφάνειας του εδάφους (της τάξης του 1 cm ή λιγότερο). Η διαφορική συμβολομετρία βρίσκει εφαρμογή σε μελέτες τεκτονικών μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων, ηφαιστειών, καθιζήσεων, παγετώνων, υδρολογίας, ανίχνευσης πετρελαιοκηλίδων, πολεοδομικού σχεδιασμού κ.ά.



Εικόνα 35: Συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης και κάθετο διάνυσμα βάσης (Geospatial Information Authority of Japan)

Οι μέθοδοι εφαρμογής της συμβολομετρίας SAR είναι οι ακόλουθοι:

1. Η συμβολομετρία στην κάθετη διεύθυνση της τροχιάς (across-track Interferometry), η οποία εφαρμόζεται με δύο τρόπους:
 - a) Συμβολομετρία απλής ή μονής υπερπτήσης (single pass Interferometry), όταν οι εικόνες λαμβάνονται ταυτόχρονα με σταθερό συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης (Εικόνα 36α)
 - b) Συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης (two pass Interferometry), όταν οι εικόνες λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Εικόνα 36β)
2. Η συμβολομετρία κατά μήκος της τροχιάς (along-track Interferometry)



Εικόνα 36: α) Συμβολομετρία απλής υπερπτήσης και β) συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης (Τροποποιημένη από Veronica Mitchell)

4.3. Σφάλματα στην συμβολομετρική φάση

Στην συμβολομετρική φάση ενυπάρχουν διάφορα σφάλματα που προκύπτουν εξαιτίας της καμπυλότητας της γης, της τοπογραφίας του εδάφους, των τροχιακών σφάλματων, της διάδοσης των ακτινοβολιών δια μέσου της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, θορύβων των μετρήσεων και μικρομετακινήσεων του εδάφους κατά την χρονική περίοδο μεταξύ των δύο περασμάτων του δορυφόρου.

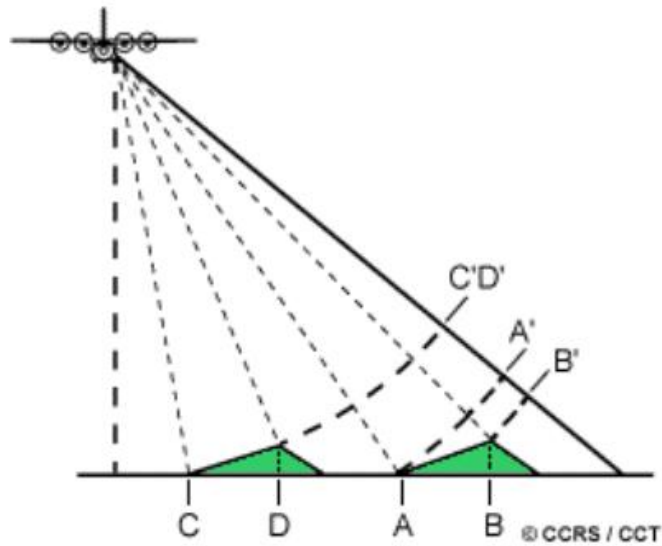
Η επίδραση των τροχιακών σφαλμάτων, της ατμόσφαιρας και της καμπυλότητας της γης στην συμβολομετρική φάση μπορεί να εξαλειφθεί με κατάλληλη επεξεργασία. Έτσι, αν δεν υπάρχει μετατόπιση του εδάφους μεταξύ των χρονικών στιγμών λήψης των εικόνων, είναι δυνατή η εξαγωγή ενός ΨΜΕ (DEM) της περιοχής.

4.3.1. Γεωμετρικές παραμορφώσεις των SAR λήψεων

Οι γεωμετρικές παραμορφώσεις σε μια εικόνα SAR προκύπτουν γιατί το ραντάρ μετράει αποστάσεις από τους σκεδαστές - στόχους στην διεύθυνση της γραμμής θέασης και όχι στην οριζόντια διεύθυνση.

4.3.1.1. Σμίκρυνση (Foreshortening)

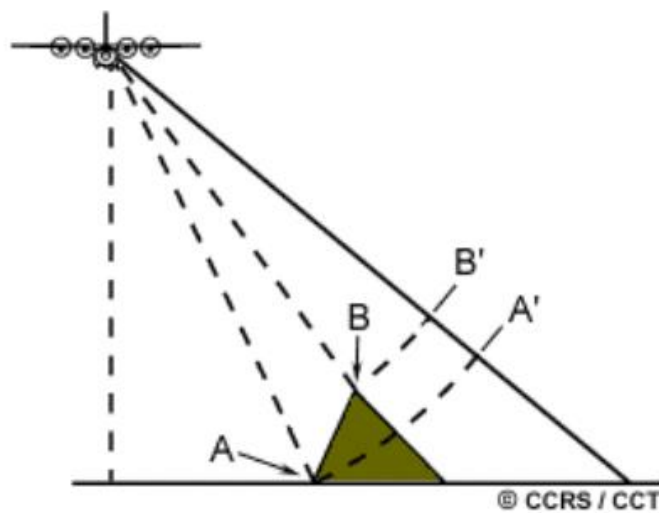
Όταν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία φτάνει πρώτα στη βάση της πλαγιάς ενός υψώματος της επιφάνειας του εδάφους η οποία έχει κλίση παράλληλη με αυτή του ραντάρ και έπειτα φτάνει στην κορυφή της, τότε η πλαγιά θα απεικονίζεται "συμπιεσμένη" στην παραγόμενη εικόνα SAR. Αυτή η παραμόρφωση ονομάζεται σμίκρυνση (foreshortening) (Εικόνα 37). Αν η ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στην πλαγιά, τότε η πλαγιά δεν θα απεικονίζεται καθόλου στην παραγόμενη εικόνα, το οποίο αποτελεί και την πιο ακραία περίπτωση σμίκρυνσης. Εδάφη που έχουν υποστεί σμίκρυνση εμφανίζονται φωτεινότερα σε σχέση με τα γειτονικά τους, γιατί η ανακλώμενη ενέργεια "συμπιέζεται" σε μικρότερο αριθμό εικονοστοιχείων για την απεικόνιση αυτών των εδαφών.



Εικόνα 37: Σμίκρυνση (Kangwon National University)

4.3.1.2. Πτύχωση (Layover)

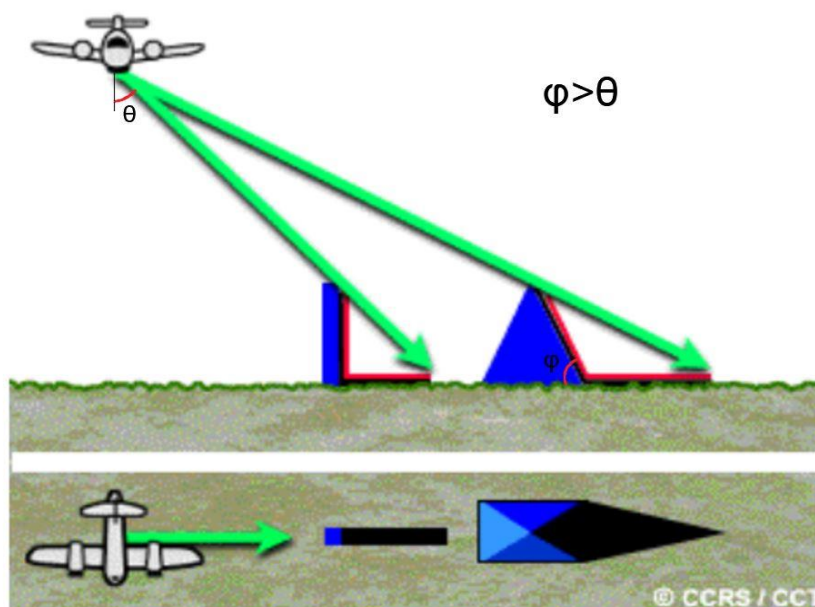
Όταν η κλίση της πλαγιάς είναι μεγαλύτερη από την γωνία όρασης του ραντάρ, τότε η ακτινοβολία φτάνει πρώτα στην κορυφή της πλαγιάς και έπειτα στη βάση της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από την σμίκρυνση της εικόνας της πλαγιάς, και την “αναδίπλωση” της. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 38, η κορυφή της πλαγιάς (B) εμφανίζεται αριστερά στην εικόνα (B') και η βάση της πλαγιάς (A) εμφανίζεται δεξιά στην εικόνα (A'). Αυτού του είδους η παραμόρφωση ονομάζεται πτύχωση (layover).



Εικόνα 38: Πτύχωση (Natural Resources Canada)

4.3.1.3. Σκιά (Shadowing)

Η σμίκρυνση και η πτύχωση προκαλούν ένα ακόμη είδος παραμόρφωσης που καλείται σκιά (shadowing) (Εικόνα 39). Η σκιά εμφανίζεται όταν η εκπεμπόμενη από το ραντάρ ακτινοβολία δεν μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους γιατί εμποδίζεται από εδάφη με απότομες κλίσεις. Για την σκίαση μιας πλαγιάς πρέπει η κλίση της να είναι μεγαλύτερη από την γωνία θέασης. Εδάφη υπό σκιά εμφανίζονται σκούρα στην εικόνα SAR. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο της σκιάς.



Εικόνα 39: Σκιά (Τροποποιημένη από Natural Resources Canada)

4.4. Στάδια επεξεργασίας InSAR

Η επεξεργασία της συμβολομετρίας SAR ξεκινάει με την επιλογή των κατάλληλων εικόνων, η οποία γίνεται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- την γωνία παρατήρησης
- το κάθετο διάνυσμα βάσης
- την χρονική βάση
- την χρονική στιγμή λήψης των εικόνων
- την συνοχή
- τις μετεωρολογικές συνθήκες
- και άλλα

Αυτές οι παράμετροι έχουν σημαντική επίδραση στην ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

Η διαφορά φάσης δύο εικόνων SAR δίνεται από την Σχέση 10

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{flat}} + \Delta\phi_{\text{elevation}} + \Delta\phi_{\text{displacement}} + \Delta\phi_{\text{atmosphere}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad (10)$$

Ο όρος $\Delta\Phi_{\text{flat}}$ αναφέρεται στην επίδραση της καμπυλότητας της γης και ισούται με

$$-\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B \cdot s}{R \cdot \tan \theta}$$

όπου λ : μήκος κύματος ακτινοβολίας
 B : κάθετο διάνυσμα βάσης
 s : διαφορά μεταξύ των κεκλιμένων αποστάσεων των στόχων
 R : απόσταση μεταξύ της κεραίας του ραντάρ και του στόχου
 θ : γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας

Ο όρος $\Delta\Phi_{\text{elevation}}$ αναφέρεται στην επίδραση της τοπογραφίας του εδάφους και ισούται με

$$-\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B \cdot q}{R \cdot \sin \theta}$$

όπου λ : μήκος κύματος ακτινοβολίας
 B : κάθετο διάνυσμα βάσης
 q : η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στόχων ως προς ένα οριζόντιο επίπεδο αναφοράς
 R : απόσταση μεταξύ της κεραίας του ραντάρ και του στόχου
 θ : γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας

Ο όρος $\Delta\Phi_{\text{displacement}}$ αναφέρεται στην μετατόπιση του εδάφους μεταξύ των χρονικών στιγμών

λήψης των εικόνων και ισούται με $\frac{4\pi}{\lambda} \cdot d$

όπου λ : μήκος κύματος ακτινοβολίας
 d : η μετατόπιση του στόχου κατά μήκος της γραμμής θέασης

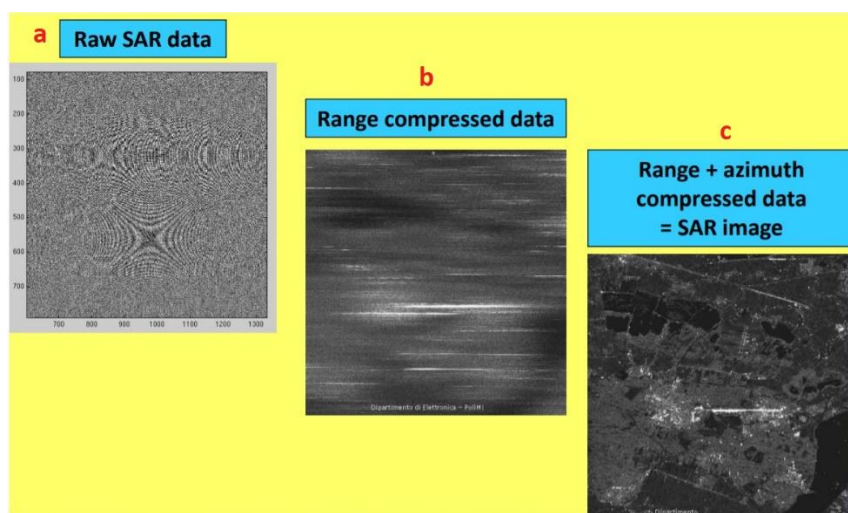
Ο όρος $\Delta\Phi_{\text{atmosphere}}$ αναφέρεται στην επίδραση της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα και ιονόσφαιρα). Τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης ο οποίος επηρεάζει την διάδοση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που διαδίδεται μέσω της ιονόσφαιρας έχει την τάση να επιταχύνεται, ενώ η τροπόσφαιρα επιβραδύνει την ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Το σφάλμα στη μέτρηση της φάσης που προκύπτει λόγω της ατμόσφαιρας μπορεί να περιοριστεί με χρήση διάφορων μεθόδων, όπως επίγειες μετεωρολογικές παρατηρήσεις, χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων, δεδομένων GPS, πληροφορίας για την ατμοσφαιρική υγρασία διατιθέμενη από όργανα δορυφόρων (π.χ MODIS/Terra ή MERIS/ENVISAT), με την τεχνική της συμβολομετρίας SAR σταθερών σκεδαστών (PSInSAR) κ.ά.

Ο όρος $\Delta\Phi_{\text{noise}}$ αναφέρεται σε διάφορους θορύβους των μετρήσεων. Η κυριότερη αιτία αυτών των θορύβων είναι η αλλαγή του τύπου των εδαφών. Μη συνεκτικά εδάφη (π.χ. δασώδεις εκτάσεις) επιδρούν σημαντικά στην συμβολομετρική φάση. Η μεγάλη συμβολομετρική βάση είναι μια ακόμη πηγή θορύβου. Αυτοί οι θόρυβοι δυσκολεύουν ή μπορούν να καταστήσουν αδύνατο το ξετύλιγμα της φάσης. Για τον λόγο αυτό γίνεται φιλτράρισμα του συμβολογράμματος προτού γίνει το ξετύλιγμα της φάσης.

4.4.1. Εστίαση (Focusing)

Για να έχει η εικόνα SAR υψηλή ανάλυση πρέπει να γίνει σύνθεση μιας κεραίας μεγάλου μήκους στον επεξεργαστή του σήματος. Τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data) που αποκτούνται από τον αισθητήρα της κεραίας του ραντάρ είναι απαραίτητο να επεξεργαστούν για να παραχθεί η τελική εικόνα SLC. Κάθε υπολωρίδα επεξεργάζεται σαν ξεχωριστή εικόνα SLC. Από κάθε σημείο του εδάφους υπάρχουν διαφορετικές γραμμές θέασης προς κάθε στοιχείο της συνθετικής κεραίας, οι οποίες έχουν και διαφορετικές αποστάσεις. Αυτές οι διαφορετικές γραμμές θέασης επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας. Έτσι εφαρμόζεται διόρθωση της φάσης του σήματος που επιστρέφει στην κεραία για κάθε στοιχείο της συνθετικής κεραίας. Αυτή η διαδικασία καλείται εστίαση (focusing). Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια στάδια επεξεργασίας για την εστίαση μιας ανεπεξεργαστης (raw) εικόνας SAR είναι τα ακόλουθα:

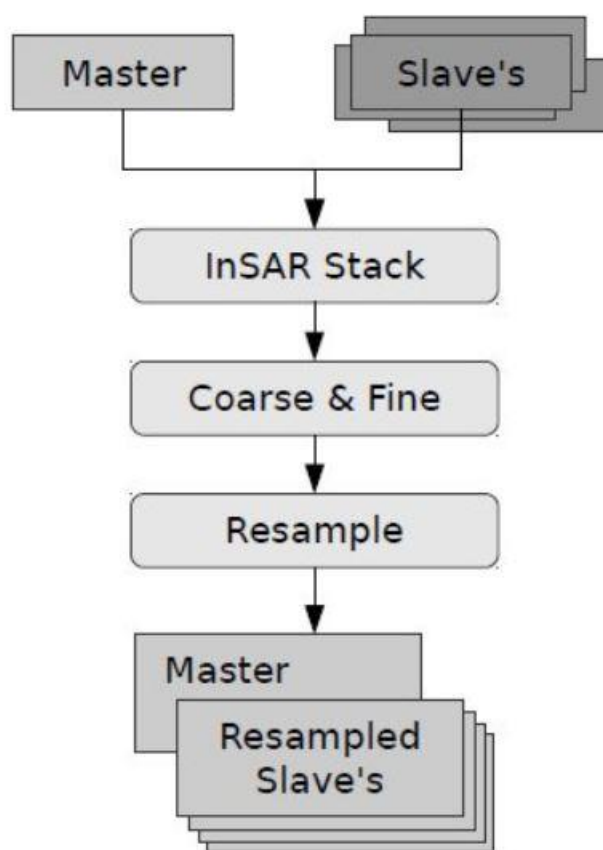
1. Συμπίεση (εστίαση) στην πλάγια διεύθυνση (Range Compression). Εφαρμόζεται αποσυνέλιξη (deconvolution) του παλμού γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας σε κάθε ανακλώμενο σήμα που επιστρέφει στην κεραία κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης.
2. “Μετανάστευση” στην πλάγια διεύθυνση (Range Migration). Έπειτα από την συμπίεση τους κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης, τα εικονοστοιχεία μετατοπίζονται στην πλάγια διεύθυνση, αφού πρώτα εφαρμοστεί σε αυτά μετασχηματισμός Fourier.
3. Συμπίεση (εστίαση) στην διεύθυνση του αζιμουθίου (Azimuth Compression). Εφαρμόζεται αποσυνέλιξη του παλμού γραμμικά διαμορφωμένης συχνότητας σε κάθε σειρά κάθε εικονοστοιχείων κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου. (Εικόνα 40)



Εικόνα 40: a) Ανεπεξεργαστη εικόνα SAR, b) Εικόνα SAR συμπιεσμένη στην πλάγια διεύθυνση, c) SLC εικόνα SAR (Τροποποιημένη από J.A. Johannessen et al., 2013)

4.4.2. Συμπροσαρμογή (Coregistration)

Οι εικόνες SAR συσχετίζονται με την παρεμβολή μιας εικόνας (slave image) ή περισσότερων στην εικόνα αναφοράς (master image). Η παρεμβολή αυτή (Εικόνα 41) πραγματοποιείται μεταξύ των εικονοστοιχείων τα οποία απεικονίζουν την ίδια τοποθεσία τόσο στην δευτερεύουσα εικόνα όσο και στην εικόνα αναφοράς. Αρχικά, όλες οι εικόνες (αναφοράς και δευτερεύουσες) αποκτούν την ίδια γεωχωρική πληροφορία και παρόμοιες διαστάσεις (InSAR Stack). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ευθυγράμμιση μεταξύ των δευτερευουσών εικόνων και της εικόνας αναφοράς με δύο τεχνικές συσχέτισης (Coarse & Fine). Τέλος, γίνεται επαναδειγματοληψία εικονοστοιχείων των δευτερευουσών εικόνων σε εικονοστοιχεία της εικόνας αναφοράς (Resample). Μετά την συσχέτιση των εικόνων, γίνεται πολλαπλασιασμός όλων των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των εικόνων και παράγεται η συμβολομετρική φάση.



Εικόνα 41: Συμπροσαρμογή (Coregistration) (SNAP)

4.4.3. Συμβολόγραμμα (Interferogram)

Το συμβολόγραμμα είναι ένας χάρτης όπου απεικονίζονται οι διαφορές φάσης των εικονοστοιχείων της εικόνας αναφοράς και της δευτερεύουσας εικόνας. Δημιουργείται με τον πολλαπλασιασμό των μιγαδικών τιμών των εικονοστοιχείων της εικόνας αναφοράς με τους συζυγείς μιγαδικούς των αντίστοιχων εικονοστοιχείων της δευτερεύουσας εικόνας. Πιο

συγκεκριμένα, γίνεται πολλαπλασιασμός των εντάσεων (amplitudes) και αφαίρεση των φάσεων των δύο εικόνων.

$z_m(x, y) = I_m(x, y) \cdot e^{i\varphi_m(x, y)}$ είναι ο μιγαδικός αριθμός που αντιστοιχεί στο εικονοστοιχείο (x, y) της εικόνας αναφοράς και $z_s(x, y) = I_s(x, y) \cdot e^{i\varphi_s(x, y)}$ ο μιγαδικός αριθμός που αντιστοιχεί στο εικονοστοιχείο (x, y) της δευτερεύουσας εικόνας.

$$\varphi(x, y) = \frac{4 \cdot \pi \cdot R(x, y)}{\lambda} \text{ είναι η φάση του στόχου}$$

όπου $R(x, y)$: απόσταση του σημείου (x, y) της εικόνας από την κεραία του δορυφόρου

Ο πολλαπλασιασμός του μιγαδικού της εικόνας αναφοράς με τον μιγαδικό της δευτερεύουσας εικόνας δίνει την ακόλουθη τιμή:

$$\left| I_m(x, y) \cdot I_s(x, y) \right|^2 \cdot e^{i \frac{4 \cdot \pi \cdot [R_m(x, y) - R_s(x, y)]}{\lambda}} = \left| I_m(x, y) \cdot I_s(x, y) \right|^2 \cdot e^{i \Delta\Phi(x, y)}$$

Το συμβολόγραμμα αποτελεί μια "εικόνα" στην οποία απεικονίζεται με τιμές από 0 έως 255 η τιμή του ορίσματος του παραπάνω μιγαδικού αριθμού:

$$ifm(x, y) = \text{mod}_{2\pi} \cdot \Delta\Phi(x, y) = \text{mod}_{2\pi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{[R_m(x, y) - R_s(x, y)]}{\lambda} \quad (\text{I. Κώσης κ.ά. , 2008})$$

4.4.4. Συνοχή φάσης (Phase coherence)

Η συνοχή αναφέρεται στην ένταση του μιγαδικού συντελεστή συσχέτισης μεταξύ δύο εικόνων SAR. Πιο συγκεκριμένα, είναι ένα μέγεθος το οποίο εκφράζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ δύο εικόνων SAR και δίνεται από την Σχέση 11

$$g = \frac{E(s1 \cdot s2^*)}{\sqrt{E(|s1|^2) \cdot E(|s2|^2)}} \quad (11)$$

, όπου $E(\)$: αναμενόμενη τιμή

$s1$: το μιγαδικό σήμα (τιμή) του εικονοστοιχείου της εικόνας αναφοράς (master)

s_2 : το μιγαδικό σήμα (τιμή) του εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας (slave)

s_2^* : το συζυγές μιγαδικό σήμα (τιμή) του εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας

Η συνοχή μεταξύ των δεδομένων που συμβάλλουν στην παραγωγή του συμβολογράμματος είναι ένα μέτρο ποιότητας του συμβολογράμματος. Μπορεί να πάρει τιμές από 0 (καμία συσχέτιση μεταξύ των εικονοστοιχείων των δύο εικόνων) έως 1 (πλήρης συσχέτιση μεταξύ των εικονοστοιχείων των δύο εικόνων). Η πλήρης συσχέτιση είναι σπάνια στην συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης.

Μικρό κάθετο διάνυσμα βάσης συνεπάγεται και υψηλή συνοχή. Όσο το κάθετο διάνυσμα βάσης μεγαλώνει, η συνοχή των εικόνων SAR ελαττώνεται.

Η συνοχή επηρεάζεται από τις ακόλουθες τρεις συνιστώσες:

1. την θερμική (thermal) αποσυσχέτιση
2. την χωρική (spatial) αποσυσχέτιση
3. την χρονική (temporal) αποσυσχέτιση

Η θερμική αποσυσχέτιση καθορίζεται από τον θερμικό θόρυβο, ο οποίος πηγάζει από μικροσκοπικές κινήσεις ηλεκτρονίων στο εσωτερικό ηλεκτρονικό κύκλωμα του δορυφόρου και εκφράζεται μέσω της Σχέσης 12

$$\gamma_{thermal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (12)$$

Η χωρική αποσυσχέτιση προκαλείται λόγω της μη μηδενικής τιμής του κάθετου διανύσματος βάσης και έχει δύο συνιστώσες: 1) την ογκομετρική (volumetric) αποσυσχέτιση, η οποία κυριαρχεί σε περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή διείσδυση μικροκυματικής ακτινοβολίας (π.χ. παγετώνες) και 2) την γεωμετρική αποσυσχέτιση, η οποία παρατηρείται σε περιοχές όπου περιέχονται σκεδαστές, η ανακλαστικότητα των οποίων μεταβάλλεται με την μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης των ακτινοβολιών. Στις περιοχές αυτές ο αριθμός των ζευγών εικόνων που είναι κατάλληλος για εφαρμογές συμβολομετρίας είναι περιορισμένος.

Χρονική αποσυσχέτιση παρατηρείται σε εικονοστοιχεία εικόνων SAR όταν η χρονική βάση είναι μεγάλη και αυτό διότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ένα αντικείμενο ενός εικονοστοιχείου το οποίο συνεισφέρει στην ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να έχει παραμορφωθεί κατά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των λήψεων των εικόνων. Οι περιοχές με βλάστηση συνεισφέρουν σημαντικά στην χρονική αποσυσχέτιση των εικόνων SAR και είναι ακατάλληλες για συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης.

4.4.5. Αφαίρεση του όρου της επίπεδης Γης (Flat earth removal)

Η εξάλειψη της επίδρασης της καμπυλότητας της γης από την συμβολομετρική φάση είναι απαραίτητη. Αυτό επιτυγχάνεται με μια διαδικασία η οποία καλείται αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης (Subtract flat-earth phase) (Εικόνα 42). Για αυτό το σκοπό γίνεται χρήση δεδομένων ακριβούς τροχιάς των δορυφόρων. Έτσι οι κροσσοί συμβολής του συμβολογράμματος απεικονίζουν διαφορές φάσης οι οποίες είναι ανάλογες με το σχετικό υψόμετρο του εδάφους (αν υποτεθεί ότι οι υπόλοιποι παράμετροι της συμβολομετρικής φάσης δεν έχουν καμία επιρροή). Το υψόμετρο ασάφειας (altitude of ambiguity) είναι μια ποσότητα που δείχνει το βαθμό στον οποίο οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ σημείων του συμβολογράμματος επηρεάζουν την τιμή της διαφοράς φάσης μεταξύ αυτών των σημείων. Πιο συγκεκριμένα, η ασάφεια φάσης ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά για την οποία η φάση του συμβολογράμματος στο οποίο έχει αφαιρεθεί η επίδραση της καμπυλότητας της γης αλλάζει κατά ένα κύκλο (δηλαδή 2π) και είναι χαρακτηριστική για κάθε συμβολόγραμμα. Συνήθως, για ένα ζεύγος εικόνων δίνεται η τιμή του υψομέτρου ασάφειας για το μέσο των εικόνων από την Σχέση 13:

$$H_A = \frac{R_s \cdot \lambda \cdot \tan \theta_m}{2 \cdot B_p \cdot \cos a} \quad (13)$$

όπου R_s : κεκλιμένη απόσταση επαναληπτικού περάσματος δορυφόρου στη μεσαία στήλη της εικόνας

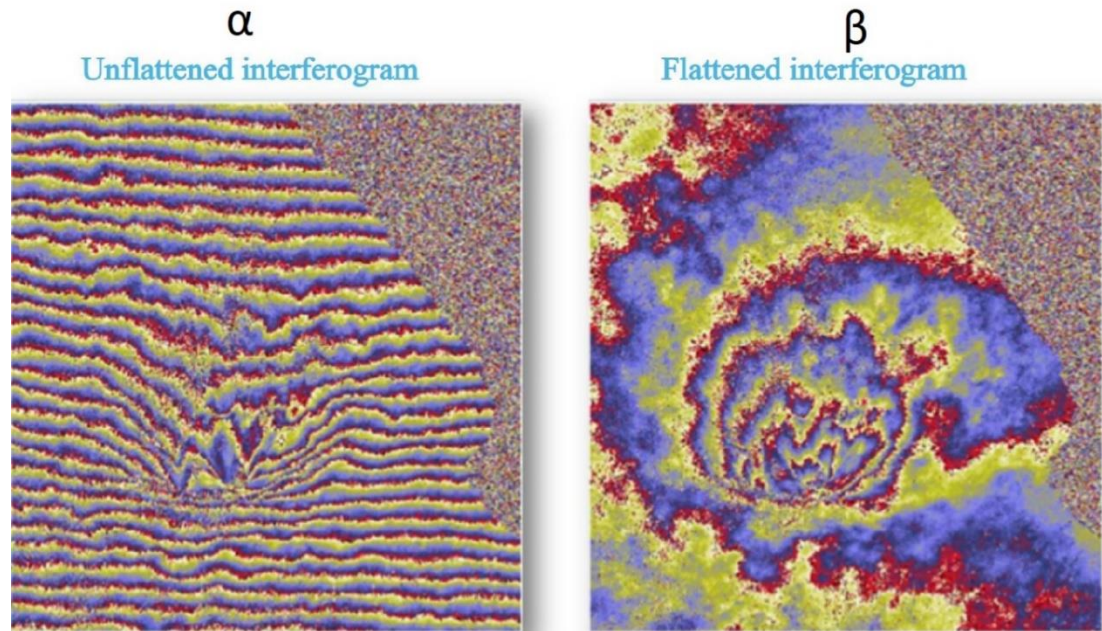
λ : μήκος κύματος ακτινοβολίας

θ_m : γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας στη μεσαία στήλη της εικόνας

B_p : μήκος κάθετου διανύσματος βάσης

a : γωνία ανύψωσης διανύσματος βάσης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από την θέση αναφοράς

Το πεδίο τιμών του υψομέτρου ασάφειας κυμαίνεται από μηδέν έως άπειρο. Όταν η θέση του στόχου και οι θέσεις του δορυφόρου στα δύο περάσματα είναι σημεία συνευθειακά, τότε το μήκος του κάθετου διανύσματος βάσης είναι μηδέν. Άρα στην περίπτωση αυτή, το υψόμετρο ασάφειας έχει μηδενική τιμή. Όταν το μήκος του κάθετου διανύσματος βάσης τείνει στο άπειρο, τότε και η τιμή του υψομέτρου ασάφειας τείνει στο άπειρο. Ζεύγη εικόνων τα οποία έχουν μεγάλες τιμές υψομέτρων ασάφειας είναι κατάλληλα για ανίχνευση και καταγραφή τεκτονικών παραμορφώσεων.



Εικόνα 42: α) Συμβολόγραμμα με την επίδραση της καμπυλότητας της γης (Unflattened interferogram) β) Συμβολόγραμμα διορθωμένο από την επίδραση της καμπυλότητας της γης (Flattened interferogram) (Τροποποιημένη από Salvatore Stramondo και Antonio Montuori, 2015)

4.4.6. Ξετύλιγμα της φάσης (Phase unwrapping)

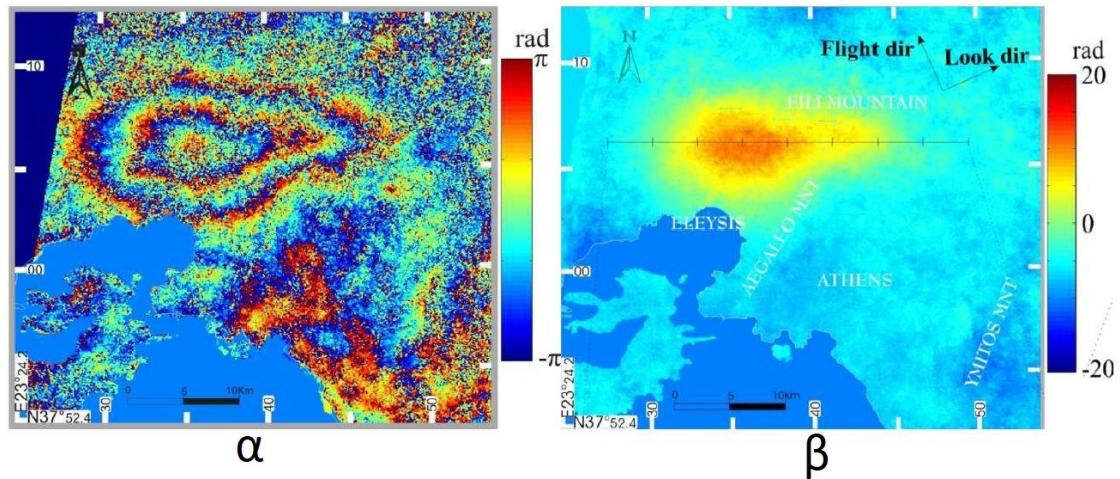
Η συμβολομετρική φάση στο συμβολόγραμμα παίρνει τιμές από $-\pi$ έως π . Για να απεικονιστούν οι πραγματικές διαφορές των υψομέτρων στο συμβολόγραμμα είναι απαραίτητο το ξετύλιγμα της φάσης (Εικόνα 43). Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό και την πρόσθεση του σωστού ακεραίου πολλαπλάσιου 2π στην συμβολομετρική φάση. Σε κάθε εικονοστοιχείο (χ, ψ) του συμβολογράμματος εφαρμόζεται η Σχέση 14

$$\Phi(\chi, \psi) = \Psi(\chi, \psi) + \kappa(\chi, \psi) \cdot 2\pi \quad (14)$$

, όπου $\Phi(\chi, \psi)$: ξετυλιγμένη φάση

$\Psi(\chi, \psi)$: τυλιγμένη φάση

$\kappa(\chi, \psi)$: άγνωστος αριθμός ακεραίων κύκλων μεταξύ κάθε σημείου του συμβολογράμματος και ενός σημείου – αφετηρία, το οποίο θεωρείται ότι δεν υφίσταται κατακόρυφες μετατοπίσεις



Εικόνα 43: α) Τυλιγμένο (Wrapped) και β) ξετυλιγμένο (Unwrapped) συμβολόγραμμα που απεικονίζει τις μετατοπίσεις λόγω του σεισμού της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου του 1999 (Τροποποιημένη από Ιωάννης Κώτσης κ.ά. , 2008)

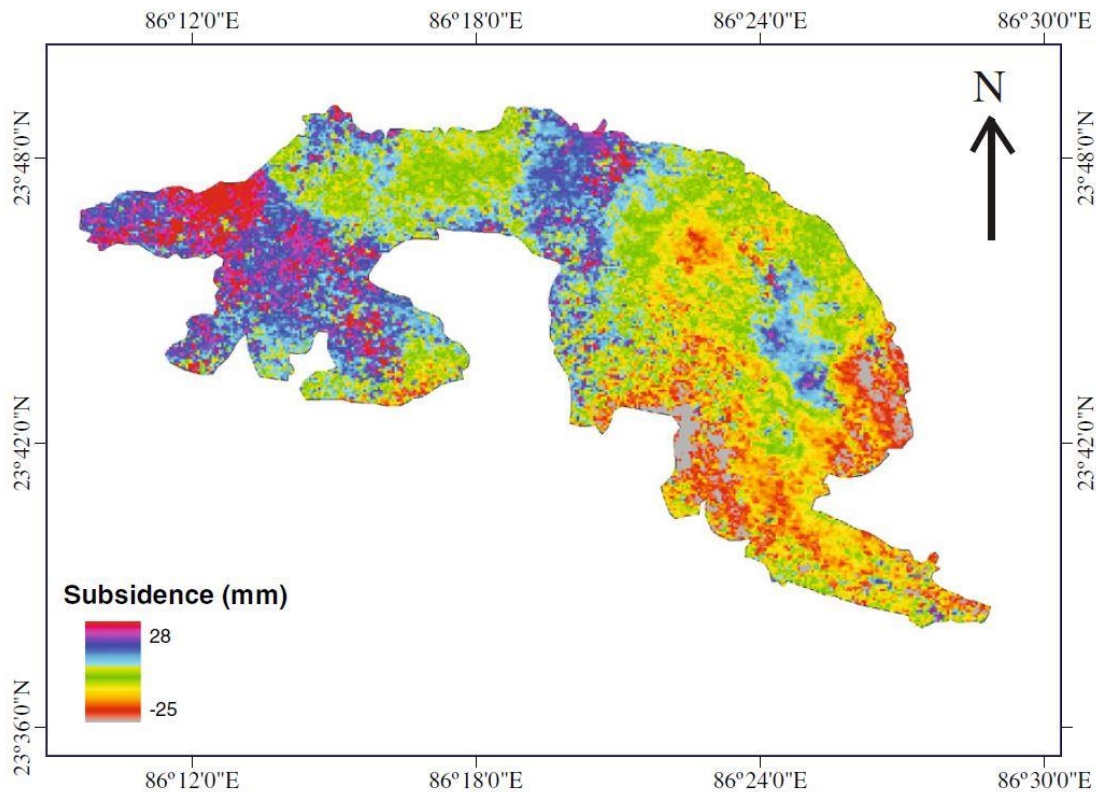
4.4.7. Μετατροπή συμβολογράμματος σε χάρτη κατακόρυφων παραμορφώσεων (Phase to displacement)

Με την αφαίρεση της επίδρασης της καμπυλότητας της γης από την συμβολομετρική φάση, το συμβολόγραμμα απεικονίζει πληροφορία για την τοπογραφία του εδάφους και για τις μετατοπίσεις που έχουν γίνει κατά την χρονική περίοδο μεταξύ των λήψεων των εικόνων. Δηλαδή η συμβολομετρική φάση δίνεται από την Σχέση 15

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B \cdot q}{R \cdot \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d \quad (15)$$

Αν είναι διαθέσιμο ένα ΨΜΕ, τότε η επίδραση της τοπογραφίας του εδάφους μπορεί να αφαιρεθεί. Έτσι το συμβολόγραμμα απεικονίζει διαφορές φάσεων οι οποίες προκύπτουν μόνο από τις σχετικές μετατοπίσεις της επιφάνειας του εδάφους. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως διαφορική συμβολομετρία. Αυτό το συμβολόγραμμα μπορεί να μετατραπεί σε χάρτη κατακόρυφων μετατοπίσεων (Εικόνα 44) μέσω της Σχέσης 16

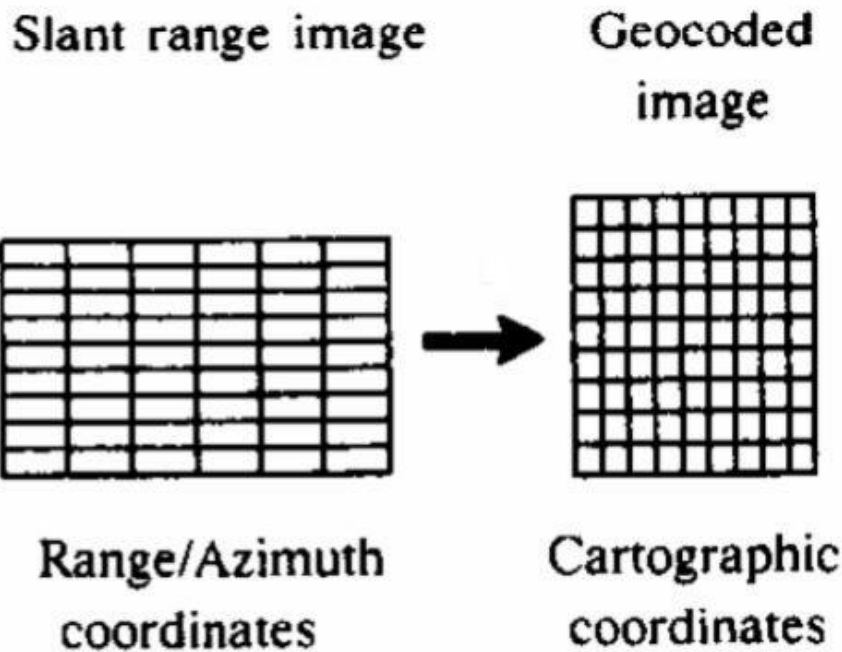
$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi \quad (16)$$



Εικόνα 44: Χάρτης κατακόρυφων μετατοπίσεων της περιοχής Jharia στην Ινδία που προέκυψε από δύο εικόνες SAR (13/10/2007 και 22/12/2007). Θετική τιμή της μετατόπισης υποδηλώνει καθίζηση, ενώ αρνητική τιμή υποδηλώνει ανύψωση του εδάφους. (Nishant Gupta et al., 2013)

4.4.8. Γεωαναφορά - γεωκωδικοποίηση (Geocoding)

Η γεωαναφορά – γεωκωδικοποίηση (Εικόνα 45) αφορά την γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση μιας εικόνας SAR για τη σύγκρισή της με άλλου τύπου δεδομένα ή την ενσωμάτωσή της σε αυτά. Η εικόνα υφίσταται χωρικές μετατοπίσεις έτσι ώστε κάθε εικονοστοιχείο της να συνδέεται με την αντίστοιχη τοποθεσία σε μια χαρτογραφική προβολή. Το πιο δύσκολο και χρονοβόρο βήμα αυτής της διαδικασίας είναι η εύρεση των επίγειων σημείων ελέγχου εξαιτίας της δυσκολίας αναγνώρισης των αντίστοιχων σημείων στην εικόνα SAR και στον χάρτη. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο απεικόνισης της εικόνας SAR και του χάρτη αλλά και λόγω του φαινομένου της κηλίδωσης στην εικόνα SAR. Ακόμη πολλοί στόχοι που είναι δυνατόν να ανιχνευθούν, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου λόγω του ύψους τους (π.χ. δέντρα, κτίρια κ.τ.λ.). Για την γεωαναφορά μιας εικόνας SAR που απεικονίζει λοφώδεις περιοχές απαιτείται η χρήση ΨΜΕ το οποίο έχει χωρική ανάλυση παρόμοια με αυτή της εικόνας SAR.



Εικόνα 45: Γεωαναφορά εικόνας SAR (Τροποποιημένη από Rudiger Gens)

4.5. Διαχρονική Συμβολομετρία SAR

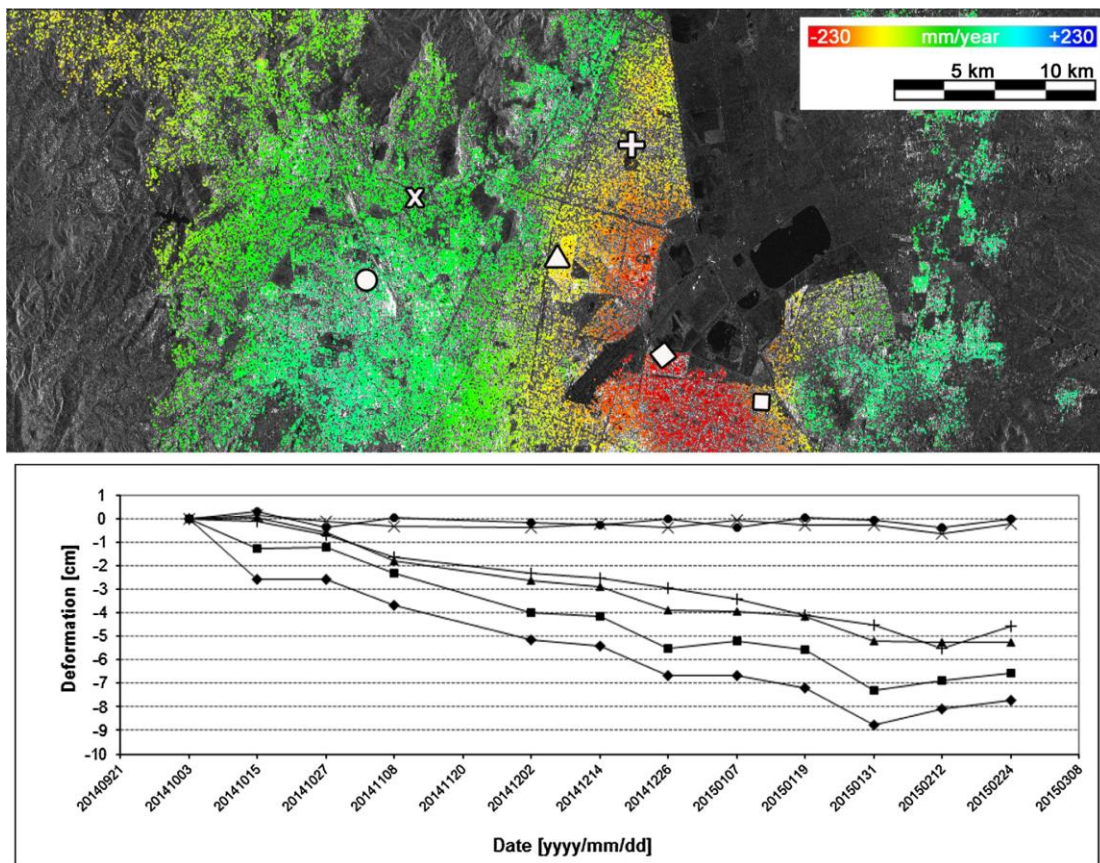
Χρονοσειρά (time series) καλείται μια ακολουθία δεδομένων ίδιου τύπου τα οποία παρουσιάζουν διαχρονική μεταβολή. Ανάλυση των χρονοσειρών (time series analysis) πραγματοποιείται με την επεξεργασία της ακολουθίας των δεδομένων στοχεύοντας στην εξαγωγή πληροφοριών σχετικών με τη διαχρονική συμπεριφορά τους.

Στην περίπτωση των χρονοσειρών εικόνων SAR επεξεργάζεται ένα μεγάλο πλήθος δορυφορικών δεδομένων τα οποία παρέχουν πληροφορία για τις χωρικές μεταβολές μιας περιοχής του εδάφους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών και η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων είναι δύο από τις δημοφιλέστερες μεθόδους για εφαρμογή της διαφορικής συμβολομετρίας με αξιοποίηση χρονοσειρών εικόνων SAR.

4.5.1. Μέθοδος σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry)

Η μέτρηση της παραμόρφωσης του εδάφους με την μέθοδο της διαφορικής συμβολομετρίας επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η χωρική και χρονική αποσυσχέτιση, η καθυστέρηση του σήματος λόγω της διάδοσής του μέσω της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας, τα σφάλματα των τροχιών καθώς και σφάλματα λόγω του ΨΜΕ. Για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων, έχει αναπτυχθεί η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (PS) (Ferretti et al., 2001), η οποία εφευρέθηκε από μια ομάδα ερευνητών στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου.

Με την μέθοδο των σταθερών σκεδαστών αξιοποιούνται πολλές δευτερεύουσες εικόνες οι οποίες έχουν την ίδια εικόνα αναφοράς και λαμβάνονται πάνω από την ίδια περιοχή. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αναγνώριση στόχων (κυρίως ανθρωπογενών κατασκευών) επί του εδάφους οι οποίοι έχουν διαστάσεις μικρότερες από το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας SAR στο έδαφος και έχουν υψηλή και σταθερή ανακλαστικότητα για χρονικό διάστημα πολλών ετών. Ακόμη υπολογίζεται και αφαιρείται μέρος του θορύβου καθιστώντας τους συγκεκριμένους σκεδαστές αξιόπιστα αντικείμενα για μετρήσεις. Στα εικονοστοιχεία που περιέχουν σταθερούς σκεδαστές, η ακρίβεια του ΨΜΕ μπορεί να είναι μικρότερη του ενός μέτρου, ενώ μπορεί να ανιχνευθεί μετατόπιση του εδάφους της τάξης του χιλιοστού. Τα κύρια εξαγόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των σταθερών σκεδαστών είναι το μέγεθος και η ταχύτητα των παραμορφώσεων μιας περιοχής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Εικόνα 46).

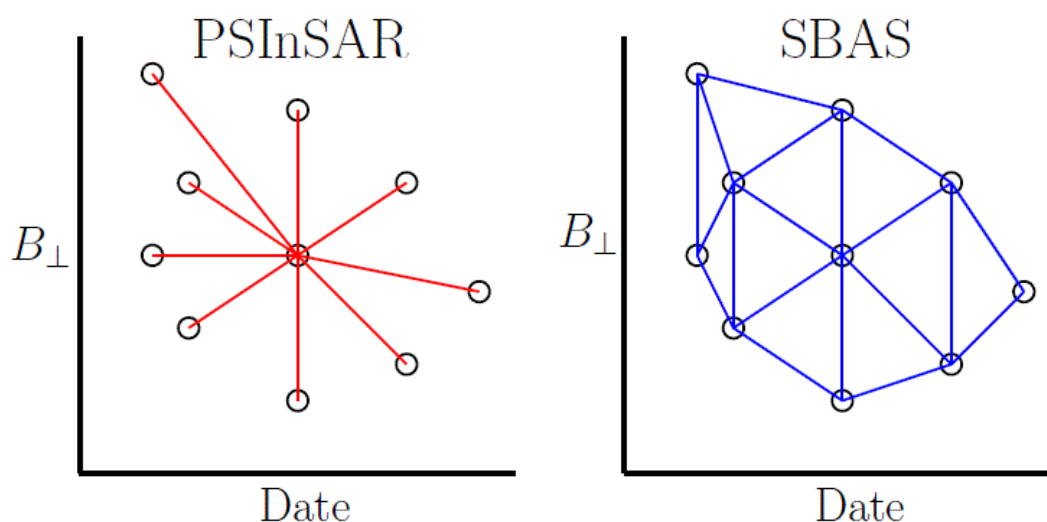


Εικόνα 46: Χάρτης της πόλης του Μεξικού όπου απεικονίζεται το μέγεθος και η ταχύτητα των παραμορφώσεων, υπολογισμένα με χρήση 12 εικόνων SAR από τον δορυφόρο Sentinel-1 (Michele Crosetto et al., 2016)

4.5.2. Μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset)

Σε αντίθεση με τη μέθοδο PS, η μέθοδος υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) (Berardino et al., 2002) είναι μια μέθοδος η οποία βασίζεται στην εξέταση των παραμορφώσεων σκεδαστών οι οποίοι είναι διάσπαρτα κατανομημένοι στο χώρο και δεν λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές και η ένταση της ανακλαστικότητάς τους. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα των σκεδαστών ειδικά σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Με τη μέθοδο SBAS χρησιμοποιούνται ζεύγη εικόνων τα οποία σχηματίζουν μικρά μήκη βάσεων τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και είναι υποσύνολα μεγαλύτερων βάσεων. Ακόμη, η χρονική βάση των εικόνων είναι μικρή. Έτσι περιορίζεται η χωρική και χρονική αποσυσχέτιση και παράγονται συμβολογράμματα υψηλά συσχετισμένα.

Στην Εικόνα 47 φαίνονται τα κάθετα διανύσματα βάσης που δημιουργούνται με τη μέθοδο PS και τη μέθοδο SBAS.



Εικόνα 47: Δίκτυο συμβολογραμμάτων με τη μέθοδο PS και τη μέθοδο SBAS (Ι. Παπουτσής, 2014)

5. Επεξεργασία εικόνων SAR

5.1. Δεδομένα

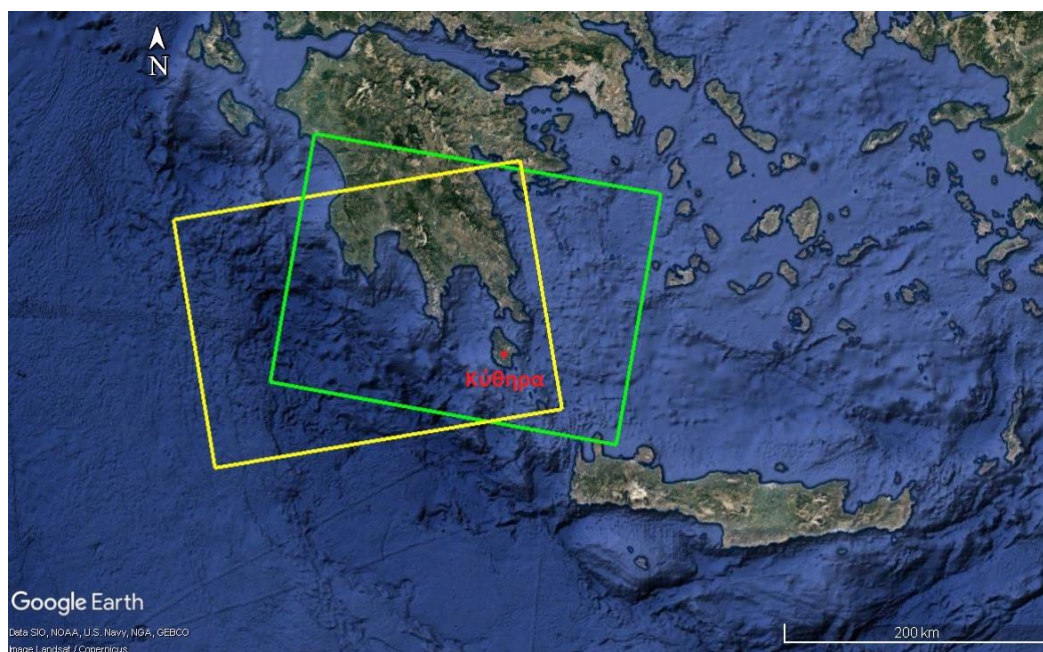
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποκτήθηκαν από τις ακόλουθες διαδικτυακές πηγές:

- <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Copernicus Open Access Hub)
- <https://vertex.daac.asf.alaska.edu> (Alaska Satellite Facility)
- <https://sentinels.space.noa.gr/dhus/#/home> (Hellenic National Sentinel Data Mirror Site)

Έγινε λήψη δεδομένων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς της δορυφορικής αποστολής Sentinel-1 τα οποία είναι της μορφής SLC, δηλαδή επιπέδου (Level) 1 (Πίνακας 3). Η Εικόνα 48 απεικονίζει την έκταση της περιοχής που καλύπτει το ίχνος του δορυφόρου, για ανοδική και καθοδική τροχιά.

	Ανοδική τροχιά	Καθοδική τροχιά
αριθμός σχετικής τροχιάς	102	7
πολικότητα σήματος	VV	VV
αριθμός εικόνων	24	28
χρονικό διάστημα μετρήσεων	8/8/2015 έως 21/9/2018	23/3/2015 έως 8/12/2018
κατάσταση λειτουργίας αισθητήρα	IW	IW

Πίνακας 3: Στοιχεία δεδομένων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς



Εικόνα 48: Περιοχή απεικόνισης λήψεων καθοδικής τροχιάς δορυφόρου (πράσινο πλαίσιο) και ανοδικής τροχιάς δορυφόρου (κίτρινο πλαίσιο)

Με την εντολή InSAR Stack Overview του προγράμματος SNAP επιλέγεται η εικόνα αναφοράς (master) για την καθοδική και την ανοδική τροχιά του δορυφόρου, ενώ υπολογίζεται και η εκτιμώμενη συνοχή των εικόνων. Για την καθοδική τροχιά του δορυφόρου, η εικόνα αναφοράς είναι αυτή που λήφθηκε στις 6/12/2016. Για την ανοδική τροχιά του δορυφόρου, η εικόνα αναφοράς είναι αυτή που λήφθηκε στις 11/5/2017. Η επιλογή της βέλτιστης εικόνας αναφοράς γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της διασποράς των κάθετων διανυσμάτων βάσης και την μεγιστοποίηση της συνοχής μεταξύ των εικόνων. Η εικόνα αναφοράς συνεπάγεται καλύτερη οπτική ερμηνεία των συμβολογραμμάτων και βοηθάει στην εκτίμηση της ποιότητας τους. Στον Πίνακα 4 συνοψίζονται οι πληροφορίες που αφορούν τις εικόνες καθοδικής τροχιάς δορυφόρου και στον Πίνακα 5 τις εικόνες ανοδικής τροχιάς δορυφόρου.

α/α εικόνας	ημερομηνία λήψης	ώρα λήψης (UTC)	δορυφορική αποστολή
1	23/3/2015	4:31:38	Sentinel-1A
2	16/4/2015	4:31:38	Sentinel-1A
3	22/5/2015	4:31:40	Sentinel-1A
4	27/6/2015	4:31:43	Sentinel-1A
5	25/10/2015	4:31:47	Sentinel-1A
6	12/12/2015	4:31:56	Sentinel-1A
7	24/12/2015	4:31:56	Sentinel-1A
8	10/2/2016	4:31:54	Sentinel-1A

9	25/9/2016	4:32:04	Sentinel-1A
10	12/11/2016	4:32:04	Sentinel-1A
11	24/11/2016	4:32:04	Sentinel-1A
12	6/12/2016	4:32:03	Sentinel-1A
13	18/12/2016	4:32:03	Sentinel-1A
14	11/5/2017	4:32:02	Sentinel-1A
15	23/5/2017	4:31:51	Sentinel-1A
16	21/8/2017	4:31:27	Sentinel-1B
17	20/10/2017	4:31:29	Sentinel-1B
18	25/11/2017	4:31:28	Sentinel-1B
19	7/12/2017	4:31:28	Sentinel-1B
20	19/12/2017	4:31:27	Sentinel-1B
21	31/12/2017	4:31:27	Sentinel-1B
22	17/2/2018	4:31:26	Sentinel-1B
23	1/3/2018	4:31:26	Sentinel-1B
24	25/3/2018	4:31:26	Sentinel-1B
25	29/7/2018	4:32:12	Sentinel-1A
26	22/8/2018	4:32:14	Sentinel-1A
27	27/9/2018	4:32:15	Sentinel-1A
28	8/12/2018	4:32:14	Sentinel-1A

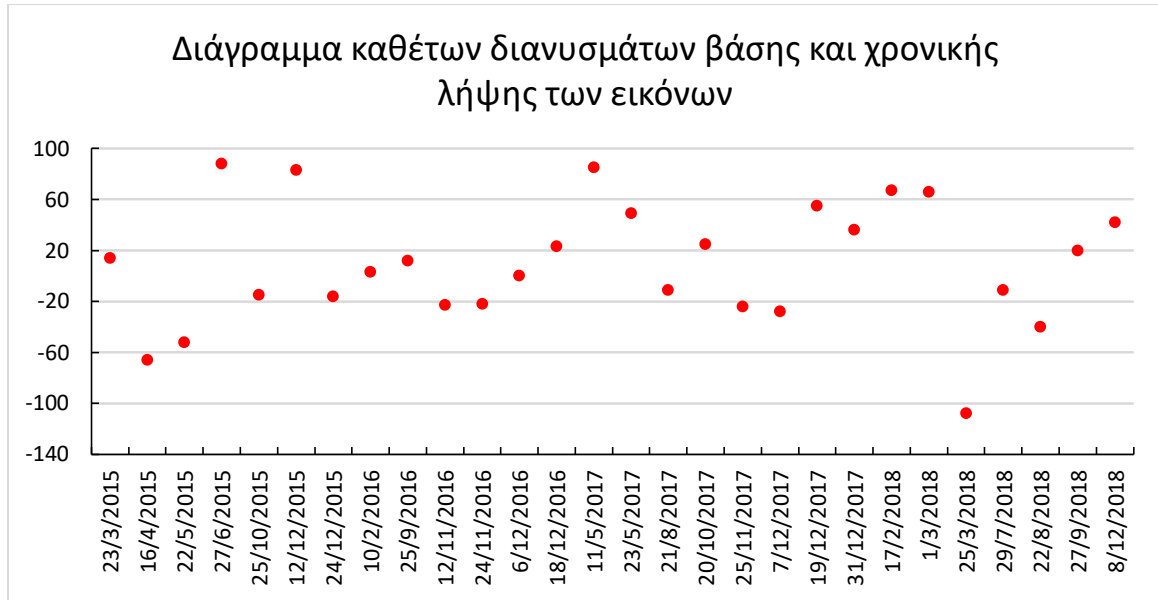
Πίνακας 4: Εικόνες SAR καθοδικής τροχιάς δορυφόρου

α/α εικόνας	ημερομηνία λήψης	ώρα λήψης (UTC)	δορυφορική αποστολή
1	8/8/2015	16:22:40	Sentinel-1A
2	12/11/2015	16:22:46	Sentinel-1A
3	24/11/2015	16:22:51	Sentinel-1A
4	6/12/2015	16:22:50	Sentinel-1A
5	30/12/2015	16:22:49	Sentinel-1A
6	23/1/2016	16:22:44	Sentinel-1A

7	16/2/2016	16:22:34	Sentinel-1A
8	11/3/2016	16:22:44	Sentinel-1A
9	16/4/2016	16:22:40	Sentinel-1A
10	15/6/2016	16:22:43	Sentinel-1A
11	9/7/2016	16:22:44	Sentinel-1A
12	31/10/2016	16:22:04	Sentinel-1B
13	30/12/2016	16:22:02	Sentinel-1B
14	11/5/2017	16:22:02	Sentinel-1B
15	22/7/2017	16:22:01	Sentinel-1B
16	14/9/2017	16:22:45	Sentinel-1A
17	7/11/2017	16:22:04	Sentinel-1B
18	6/1/2018	16:22:02	Sentinel-1B
19	23/2/2018	16:22:01	Sentinel-1B
20	6/4/2018	16:22:43	Sentinel-1A
21	6/5/2018	16:22:03	Sentinel-1B
22	11/6/2018	16:22:05	Sentinel-1B
23	4/8/2018	16:22:49	Sentinel-1A
24	21/9/2018	16:22:52	Sentinel-1A

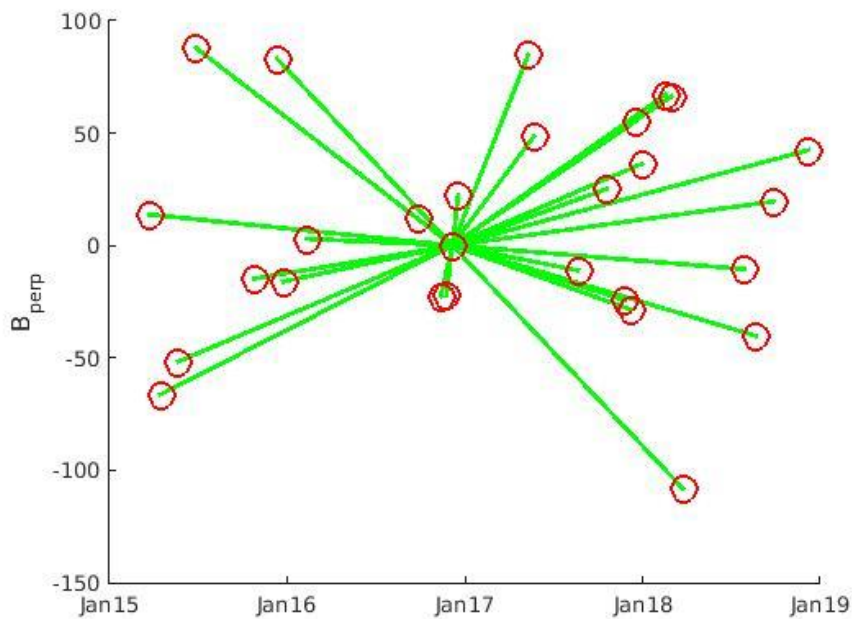
Πίνακας 5: Εικόνες SAR ανοδικής τροχιάς δορυφόρου

Το γράφημα της Εικόνας 49 απεικονίζει τα κάθετα διανύσματα βάσης και τη χρονική βάση των λήψεων καθοδικής τροχιάς.



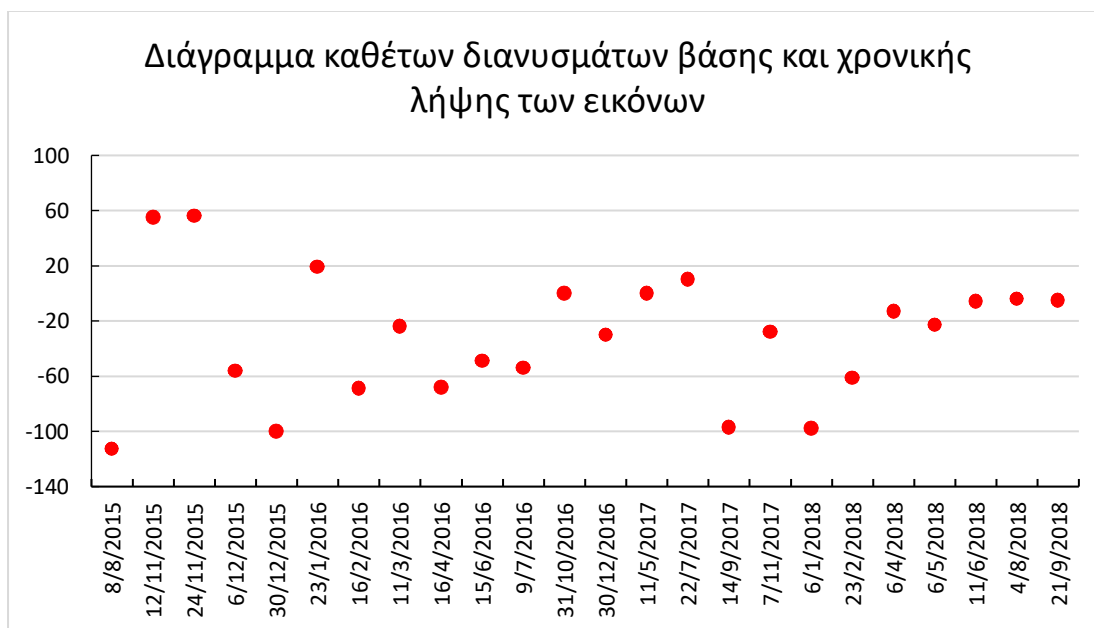
Εικόνα 49: Κάθετα διανύσματα βάσης (κατακόρυφος άξονας) και χρονικές βάσεις (οριζόντιος άξονας) λήψεων για την καθοδική τροχιά (No 7) του δορυφόρου

Στην Εικόνα 50 φαίνεται η γεωμετρία του δικτύου και τα ζεύγη εικόνων που σχηματίστηκαν για την καθοδική τροχιά δορυφόρου. Στα δίκτυα που σχηματίζονται με την μέθοδο της συμβολομετρίας των σταθερών σκεδαστών η εικόνα αναφοράς είναι συνήθως τοποθετημένη κοντά στο κεντροειδές που σχηματίζεται από τους άξονες της χρονοσειράς των εικόνων και του κάθετου διανύσματος βάσης.



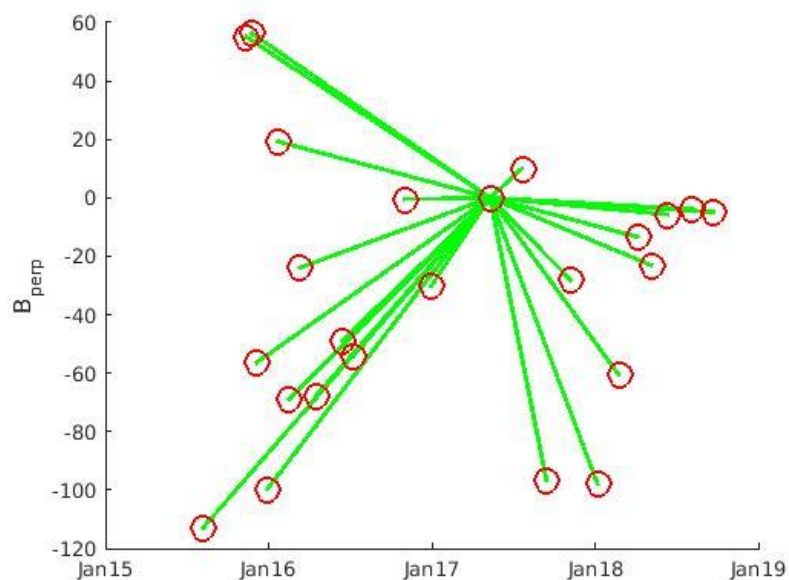
Εικόνα 50: Γεωμετρία δικτύου ζευγών εικόνων καθοδικής τροχιάς (No 7) δορυφόρου, όπου απεικονίζονται τα κάθετα διανύσματα βάσης και η χρονική βάση (StaMPS)

Το γράφημα της Εικόνας 51 απεικονίζει τα κάθετα διανύσματα βάσης και τη χρονική βάση των λήψεων ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου.



Εικόνα 51: Κάθετα διανύσματα βάσης (κατακόρυφος άξονας) και χρονικές βάσεις (οριζόντιος άξονας) λήψεων για την ανοδική τροχιά (No 102) του δορυφόρου

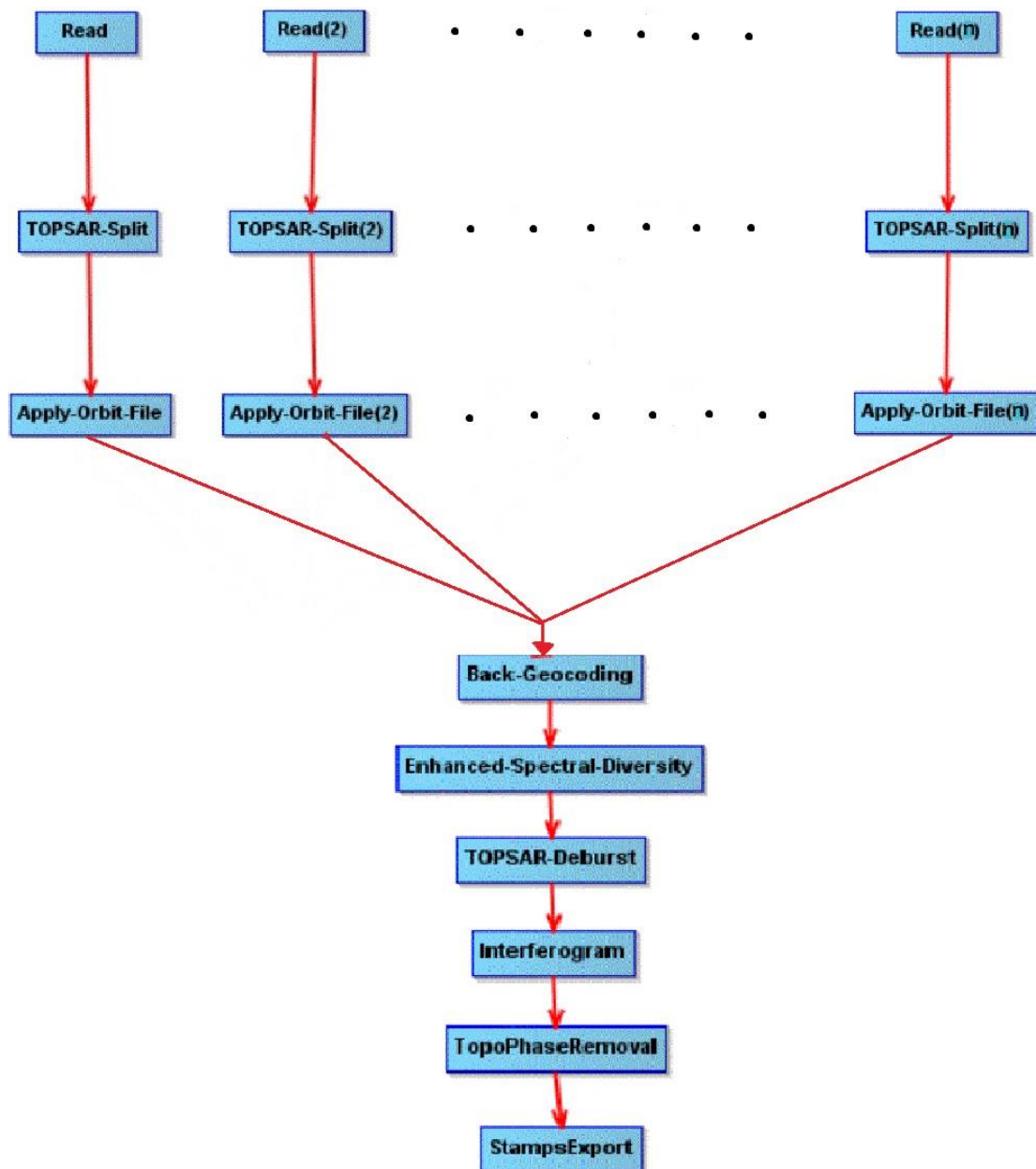
Στην Εικόνα 52 απεικονίζεται η γεωμετρία του δικτύου και τα ζεύγη εικόνων που σχηματίστηκαν για την ανοδική τροχιά δορυφόρου.



Εικόνα 52: Γεωμετρία δικτύου ζευγών εικόνων ανοδικής τροχιάς (No 102) δορυφόρου, όπου απεικονίζονται τα κάθετα διανύσματα βάσης και η χρονική βάση (StaMPS)

5.2. Επεξεργασία με το λογισμικό SNAP

Με το λογισμικό SentiNel Application Platform (SNAP) της ESA πραγματοποιήθηκε η προεπεξεργασία των δεδομένων SAR, για τη δημιουργία συμβολογραμμάτων. Στην Εικόνα 53 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της επεξεργασίας στο SNAP. Τα ίδια βήματα επεξεργασίας ακολουθήθηκαν για τα δεδομένα της ανοδικής αλλά και καθοδικής τροχιάς.



Εικόνα 53: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας στο SNAP (Τροποποιημένη από SNAP)

5.2.1. Split-Orbit

Δεδομένης της τεχνικής TOPSAR, που χρησιμοποιείται από την κεραία του δορυφόρου Sentinel, αρχικά απαιτείται η επιλογή της επιθυμητής λωρίδας (swath) και των υπολωρίδων (bursts), που καλύπτουν την περιοχή ενδιαφέροντος για κάθε εικόνα, με την εντολή S-1 TOPS Split. Για τα δεδομένα καθοδικής τροχιάς επιλέχθηκε η λωρίδα IW2, ενώ για τα δεδομένα ανοδικής τροχιάς επιλέχθηκε η λωρίδα IW1. Σε αυτό το στάδιο επιλέγεται η πολικότητα του σήματος. Δεδομένης της χρήσης των δεδομένων για παρακολούθηση εδαφικών μετατοπίσεων, επιλέγεται η πολικότητα VV.

Με την εντολή Apply Orbit File πραγματοποιείται προσδιορισμός των τροχιών ακριβείας των δορυφόρων για κάθε εικόνα. Τα διανύσματα θέσης των τροχιών των δορυφόρων που παρέχονται στα μεταδεδομένα μιας εικόνας SAR δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια. Αυτά βελτιώνονται με χρήση των δεδομένων ακριβούς τροχιάς, τα οποία διατίθενται ηλεκτρονικά με την παρέλευση κάποιων ημερών ή εβδομάδων από την παραγωγή των προϊόντων SAR. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν με ικανοποιητική ακρίβεια την θέση και την ταχύτητα των δορυφόρων. Για την συγκεκριμένη επίλυση επιλέχθηκαν τα τροχιακά δεδομένα ακριβείας για τον δορυφόρο Sentinel.

5.2.2. Backgeocoding

Στο στάδιο αυτό συμπροσαρμόζονται όλες οι εικόνες με χρήση των τροχιών των δορυφόρων και του ΨΜΕ SRTM των 3". Γίνεται επιλογή της επιθυμητής μεθόδου επαναδειγματοληψίας στο ΨΜΕ και της επιθυμητής μεθόδου παρεμβολής για την απόκτηση των τιμών από τα εικονοστοιχεία της εικόνας αναφοράς. Για να γίνει επαναδειγματοληψία των εικονοστοιχείων των δευτερευουσών εικόνων σε εικονοστοιχεία της εικόνας αναφοράς, αρχικά πραγματοποιείται καθαρισμός και αποδιαμόρφωση του σήματος των δευτερευουσών εικόνων. Έπειτα εφαρμόζεται μια μέθοδος παρεμβολής (truncated-sinc interpolation) σε όλες τις δευτερεύουσες εικόνες. Τέλος, εφαρμόζεται εκ νέου διαμόρφωση του σήματος στις δευτερεύουσες εικόνες.

5.2.3. Enhanced spectral diversity

Στην αρχή της συγκεκριμένης επεξεργασίας εκτιμάται μια σταθερή μετακίνηση κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης για ολόκληρη την επιλεγμένη λωρίδα της εικόνας SAR με χρήση μη συνεκτικής διασταυρούμενης συσχέτισης. Η εκτίμηση αυτή γίνεται για κάθε υπολωρίδα χρησιμοποιώντας ένα μικρό πλήθος δεδομένων στο κέντρο κάθε υπολωρίδας. Έπειτα, υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετακινήσεων των υπολωρίδων και εξάγεται η τελική σταθερή μετακίνηση για όλη την εικόνα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται μια σταθερή μετακίνηση κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου για ολόκληρη την λωρίδα της εικόνας SAR με χρήση της μεθόδου Enhanced Spectral Diversity. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται δεδομένα από την επικαλυπτόμενη περιοχή παρακείμενων υπολωρίδων. Υπολογίζονται οι μετατοπίσεις για κάθε επικαλυπτόμενη περιοχή και εξάγεται η τελική μετατόπιση κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου από τον μέσο όρο όλων των μετατοπίσεων. Στο τέλος της

επεξεργασίας μετατοπίζονται όλες οι υπολωρίδες κατά μήκος των δύο διευθύνσεων της εικόνας χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες μετατοπίσεις.

5.2.4. Deburst

Κάθε προϊόν του δορυφόρου Sentinel αποτελείται από τις υπολωρίδες (bursts) που επιλέχθηκαν σε προηγούμενο βήμα της επεξεργασίας. Κάθε υπολωρίδα περιέχει μια ξεχωριστή εικόνα τύπου SLC. Μεταξύ των υπολωρίδων υπάρχει μια μαύρη γραμμή που είναι το αποτέλεσμα της λήψης των εικόνων με την τεχνική TOPSAR. Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας εξαλείφονται οι μαύρες γραμμές που υπάρχουν μεταξύ των υπολωρίδων για κάθε εικόνα. Έτσι δημιουργούνται “ενιαίες” εικόνες, οι οποίες αποτελούνται από τις επιμέρους υπολωρίδες, και έχουν κοινό πλέγμα εικονοστοιχείων στις δύο διευθύνσεις τους (Range και Azimuth).

5.2.5. Subset

Για τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη διαδικασία του “ξετυλίγματος” της φάσης που έπεται στη συνέχεια είναι απαραίτητη η μείωση του όγκου των επεξεργαζόμενων δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την περικοπή της εικόνας ώστε να απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος στις μικρότερες δυνατές διαστάσεις. Η περικοπή γίνεται φορτώνοντας το κανάλι της φάσης και επιλέγοντας την εντολή Spatial Subset from View.

5.2.6. Interferogram

Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας δημιουργούνται τα συμβολογράμματα που προκύπτουν από τα ζεύγη των εικόνων (27 ζεύγη για τις λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου και 23 ζεύγη για τις λήψεις ανοδικής τροχιάς). Ακόμη, αφαιρείται από τη φάση των ακτινοβολιών που προσπίπτουν στην επιφάνεια του εδάφους η επίδραση της καμπυλότητας της γης με χρήση των τροχιών και των μεταδεδομένων των προϊόντων (flat earth removal). Επίσης, υπολογίζεται η συνοχή φάσης (coherence) μεταξύ τις εικόνας αναφοράς και των δευτερευουσών εικόνων.

5.2.7. Topographic phase removal

Με την εντολή αυτή υπολογίζεται και αφαιρείται από τη συμβολομετρική φάση το σφάλμα λόγω αναγλύφου με χρήση του ΨΜΕ SRTM των 3". Το σφάλμα αυτό προκύπτει επειδή η επιφάνεια του εδάφους δεν είναι επίπεδη και παρουσιάζει υψομετρικές διαφορές με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η μέτρηση της συμβολομετρικής φάσης.

5.2.8. Export to StaMPS

Στο στάδιο αυτό γίνεται κατάλληλη προσαρμογή των δεδομένων για να συνεχιστεί η επεξεργασία με το λογισμικό StaMPS με τη μέθοδο της συμβολομετρίας των σταθερών σκεδαστών. Αρχικά προστίθεται ένα κανάλι υψομέτρων (elevation band) στο αποτέλεσμα της αφαίρεσης της επίδρασης του αναγλύφου από τα συμβολογράμματα. Κατά την επεξεργασία εισάγονται όλα τα συμβολογράμματα που προέκυψαν από τα ζεύγη των εικόνων και το αποτέλεσμα του Deburst. Έπειτα, για να αποκτήσουν γεωγραφικές συντεταγμένες τα εικονοστοιχεία (και κατ' επέκταση οι σταθεροί σκεδαστές) των επεξεργαζόμενων εικόνων προστίθενται δύο κανάλια στο αποτέλεσμα του Deburst. Το ένα περιέχει το γεωγραφικό μήκος και το άλλο το γεωγραφικό πλάτος όλων των εικονοστοιχείων. Γίνεται εξαγωγή του προϊόντος σε μορφή αρχείου SAR (συγκεκριμένα σε μορφή Gamma). Τέλος, διαγράφονται τα περιττά αρχεία από τον φάκελο στον οποίο αποθηκεύτηκαν τα προϊόντα της εξαγωγής.

Οι προαναφερθείσες επεξεργασίες μπορούν να γίνουν ημιαυτόματα με λογισμικό snap2stamps (Foumelis et al., 2018)

Τα στάδια επεξεργασίας συνοψίζονται ως εξής:

1. `slaves_prep.py` : Πραγματοποιείται ταξινόμηση των δευτερευουσών εικόνων με βάση την ημερομηνία απόκτησής τους και δημιουργούνται οι φάκελοι των δευτερευουσών εικόνων
2. `splitting_slaves_logging.py` : Πραγματοποιείται επιλογή των επιθυμητών υπολωρίδων στις δευτερεύουσες εικόνες, διόρθωση των τροχιακών σφαλμάτων και επιλέγεται η πολικότητα VV
3. `coreg_ifg_topsar.py` : Πραγματοποιείται η συμπροσαρμογή της εικόνας αναφοράς με τις δευτερεύουσες εικόνες και η δημιουργία των συμβολογραμμάτων
4. `stamps_export.py` : Πραγματοποιείται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας σε μορφή συμβατή με το πρόγραμμα StaMPS για την εφαρμογή της μεθόδου των σταθερών σκεδαστών

Επιγραμματικά τα βήματα της επεξεργασίας είναι τα ακόλουθα:

1. InSAR stack overview για επιλογή της εικόνας αναφοράς
2. Split και apply orbit file στην εικόνα αναφοράς
3. `slaves_prep.py` (δημιουργία φακέλων για κάθε δευτερεύουσα εικόνα)
4. `splitting_slaves.py` (επιλογή της λωρίδας και των υπολωρίδων για κάθε δευτερεύουσα εικόνα και διόρθωση των τροχιακών σφαλμάτων)
5. `coreg_ifg_topsar.py` (συμπροσαρμογή των εικόνων, δημιουργία συμβολογραμμάτων και αφαίρεση της τοπογραφίας του εδάφους)
6. `stamps_export.py` (εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε format συμβατό με το λογισμικό StaMPS)

5.3. Επεξεργασία με το λογισμικό StaMPS

Το StaMPS (Hooper et al., 2012) είναι ένα λογισμικό το οποίο εφαρμόζει μια μέθοδο συμβολομετρίας σταθερών σκεδαστών, η οποία λειτουργεί και σε εδάφη τα οποία δεν έχουν ανθρωπογενείς κατασκευές ή υφιστάμενες ασταθείς παραμορφώσεις. Αρχικά, το StaMPS αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Stanford και μεταγενέστερα στο πανεπιστήμιο της Ισλανδίας, στο τεχνολογικό πανεπιστήμιο του Ντελφτ και στο πανεπιστήμιο του Ληντς. Στην ανάπτυξη του συνέβαλαν, επίσης, και χρήστες από άλλα ιδρύματα.

Προτού ξεκινήσει η επεξεργασία γίνεται προετοιμασία των δεδομένων και αναγνωρίζονται οι υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές.

Επιλέγεται η τιμή της διασποράς της εντάσεως φωτεινότητας των εικονοστοιχείων που θα είναι υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές να είναι μικρότερη του 0.4. Η διασπορά της εντάσεως φωτεινότητας ορίζεται ως η τιμή της τυπικής απόκλισης των εντάσεων φωτεινότητας των υποψήφιων σταθερών σκεδαστών προς τη μέση τιμή της εντάσεως φωτεινότητας τους. Στην προκειμένη επίλυση επιλέχθηκε η επεξεργαζόμενη εικόνα να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους τμήματα κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου και σε δύο επιμέρους τμήματα κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης για αποτελεσματικότερη επίλυση. Το πλήθος των τμημάτων αυτών εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής που απεικονίζεται και την διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή. Τα επιμέρους τμήματα της εικόνας επεξεργάζονται ανεξάρτητα στα πέντε πρώτα βήματα της επεξεργασίας του StaMPS. Ακόμη, επιλέγεται ο αριθμός των επικαλυπτόμενων εικονοστοιχείων ανάμεσα στα επιμέρους τμήματα κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης να είναι 50 και κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου να είναι 200. Στον Πίνακα 6 απεικονίζονται οι επιλεγμένες τιμές μερικών ενδεικτικών παραμέτρων που έχουν σημαντική επίδραση στην τελική επίλυση.

Παράμετρος	Τιμή
weed_max_noise	2
weed_standard_dev	1
plot_scatterer_size	60
max_topo_err	20

Πίνακας 6: Ενδεικτικές παράμετροι επεξεργασίας του λογισμικού StaMPS και οι επιλεγμένες τιμές τους

Οι παράμετροι weed_max_noise και weed_standard_dev επηρεάζουν το μέγεθος του θορύβου στα δεδομένα.

Με την παράμετρο weed_max_noise ορίζεται το κατώφλι της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του θορύβου για κάθε εικονοστοιχείο. Εικονοστοιχεία των οποίων η μέγιστη τιμή του θορύβου της συμβολομετρικής φάσης είναι μεγαλύτερη του 2 αποκλείονται ως σταθεροί σκεδαστές.

Με την παράμετρο `weed_standard_dev` ορίζεται το κατώφλι της τυπικής απόκλισης του θορύβου της φάσης για κάθε εικονοστοιχείο και για όλα τα ζευγάρια εικονοστοιχείων. Δηλαδή, εικονοστοιχεία που έχουν τυπική απόκλιση θορύβου φάσης μεγαλύτερη του 1 απορρίπτονται ως σταθεροί σκεδαστές.

Με την παράμετρο `plot_scatterer_size` ορίζεται το μέγεθος των εικονοστοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν ως σταθεροί σκεδαστές να είναι 60 μέτρα.

Με την παράμετρο `max_toro_err` ορίζεται η μέγιστη τιμή του σφάλματος του μη συσχετισμένου ΨΜΕ. Εικονοστοιχεία τα οποία έχουν σφάλμα μη συσχετισμένου ΨΜΕ μεγαλύτερο των 20 μέτρων απορρίπτονται ως σταθεροί σκεδαστές.

Τα βήματα της επεξεργασίας με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών συνοψίζονται στα εξής:

- `stamps(1,1)`

Στο πρώτο βήμα της επεξεργασίας μετατρέπονται τα δεδομένα για τα εικονοστοιχεία που έχουν επιλεγεί ως υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές σε κατάλληλη μορφή για την επεξεργασία τους στο StaMPS και αποθηκεύονται σε περιβάλλον εργασίας MATLAB.

- `stamps(2,2)`

Το δεύτερο βήμα της επεξεργασίας είναι επαναλαμβανόμενο. Υπολογίζεται η τιμή του θορύβου της φάσης για κάθε υποψήφιο σταθερό σκεδαστή σε όλα τα συμβολογράμματα. Μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν αυτό το στάδιο της επεξεργασίας είναι και η παράμετρος `max_toro_err`.

- `stamps(3,3)`

Στο τρίτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται η επιλογή των σταθερών σκεδαστών με βάση τα χαρακτηριστικά του θορύβου των εικονοστοιχείων. Ακόμη, υπολογίζεται το ποσοστό των εικονοστοιχείων τα οποία δεν θα χρησιμοποιηθούν ως σταθεροί σκεδαστές σε μια περιοχή και η πυκνότητα των εικονοστοιχείων αυτών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

- `stamps(4,4)`

Στο τέταρτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται περαιτέρω διαλογή των σταθερών σκεδαστών. Απορρίπτονται αυτοί που είχαν επιλεχθεί λόγω της συνεισφοράς του σήματος γειτονικών εικονοστοιχείων και αυτοί που θεωρείται πως έχουν υψηλή τιμή θορύβου. Μεταξύ των παραμέτρων που επιδρούν σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας είναι και οι παράμετροι `weed_max_noise` και `weed_standard_dev`.

- stamps(5,5)

Στο πέμπτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται διόρθωση της φάσης των επιλεγμένων σταθερών σκεδαστών για το χωρικά μη συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης (spatially uncorrelated look angle error). Στο τέλος της επεξεργασίας τα επιμέρους τμήματα της επεξεργαζόμενης εικόνας συγχωνεύονται.

- stamps(6,6)

Στο έκτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται το ξετύλιγμα της συμβολομετρικής φάσης. Επιλέγεται η προτιμότερη μέθοδος ξετυλίγματος. Η φάση φιλτράρεται πριν ξετυλιχθεί για μείωση του θορύβου. Καταλληλότερο φίλτρο θεωρείται το Goldstein. Κατά τη διάρκεια του ξετυλίγματος της φάσης γίνεται προσωρινή επαναδειγματοληψία των δεδομένων σε ένα πλέγμα το μέγεθος του οποίου μπορεί να καθοριστεί. Ακόμη, επιλέγεται το μέγεθος του παραθύρου του εφαρμοζόμενου φίλτρου.

Τα συμβολογράμματα που έχουν υψηλά επίπεδα θορύβου αφαιρούνται.

Από τις εικόνες καθοδικής τροχιάς αφαιρέθηκαν αυτές που λήφθηκαν στις 20/10/2017 και στις 29/7/2018 (drop_ifg_index=17 25) και από τις εικόνες ανοδικής τροχιάς αφαιρέθηκαν αυτές που λήφθηκαν στις 12/11/2015, 15/6/2016, 9/7/2016 και 23/2/2018 (drop_ifg_index=2 10 11 19).

Στο στάδιο αυτό, ορίζονται ως γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθερού σημείου αναφοράς, οι συντεταγμένες του μόνιμου σταθμού GPS του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου που βρίσκεται στα Κύθηρα (ΚΙΤΗ).

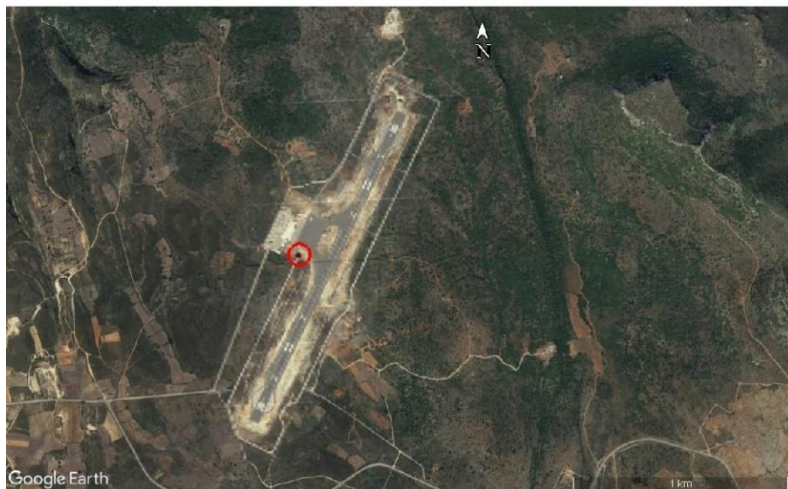
Ο σταθμός ΚΙΤΗ (Εικόνα 54) ανήκει στο δίκτυο NTUA/Oxford και είναι τοποθετημένος σε βάθος σε υψόμετρο 337.3 μέτρων. Είναι εξοπλισμένος με κεραία τύπου TRM41249.00 και δέκτη Trimble 5700. Η εγκατάστασή του έγινε στις 13/3/2004. Από το 2004 έως το 2010 ήταν σε συνεχή λειτουργία, ενώ από το 2010 και μετά η λειτουργία του γινόταν κατά διαστήματα.

Στη συνέχεια, ορίζεται ακτίνα 50 μέτρων γύρω από το σταθερό σημείο αναφοράς (Εικόνα 55) μέσα στην οποία θεωρείται ότι όλοι οι σταθεροί σκεδαστές έχουν την ίδια παραμόρφωση.



Εικόνα 54: Ο μόνιμος σταθμός GPS KITH στα Κύθηρα

α



β



Εικόνα 55: α) Ακτίνα 50 μέτρων γύρω από τον μόνιμο σταθμό GPS KITH στον Κρατικό Αερολιμένα Κυθήρων, β) Χάρτης Κυθήρων όπου απεικονίζεται η θέση του Κρατικού Αερολιμένα Κυθήρων (Τροποποιημένη από Google Earth)

- stamps(7,7)

Στο έβδομο βήμα της επεξεργασίας υπολογίζεται το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης (d) το οποίο προκύπτει σχεδόν αποκλειστικά από το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα του ΨΜΕ το οποίο πηγάζει από το εσφαλμένο ΨΜΕ και από λανθασμένη αντιστοίχιση των συντεταγμένων του ΨΜΕ με τις συντεταγμένες των εικόνων SAR. Ταυτόχρονα, υπολογίζεται το ατμοσφαιρικό και τροχιακό σφάλμα (AOE) φάσης της εικόνας αναφοράς (m) και η αναπήδηση της φάσης (phase ramp) (o). Επιλέγεται αν θα ενισχυθεί ή όχι η φάση για κάθε συμβολόγραμμα. Απορρίφθηκαν οι εικόνες των οποίων τα συμβολογράμματα είχαν υψηλό θόρυβο με την εντολή drop_ifg_index.

Έπειτα έγινε επανάληψη των βημάτων 6 και 7.

6. Αποτελέσματα

6.1. Αποτελέσματα PS

Με την ολοκλήρωση της μελέτης χρονοσειρών με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών, με το λογισμικό StaMPS, προέκυψαν αποτελέσματα (ανύψωση-καθίζηση), αναφερόμενα ως προς την διεύθυνση της γραμμής θέασης του δορυφόρου (Line Of Sight). Συγκεκριμένα έγινε εξαγωγή των εξής αποτελεσμάτων:

- των ταχυτήτων μετακίνησης της επιφάνειας του εδάφους, σε χιλιοστά ανά χρόνο, απαλλαγμένες από την επίδραση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης και την επίδραση της αναπήδησης της φάσης (v-do). Οι ταχύτητες μετακίνησης των σκεδαστών δίνονται ως προς την σταθερή επιφάνεια αναφοράς που ορίστηκε με το πέρας του έκτου βήματος της επεξεργασίας.
- της τυπικής απόκλισης των ταχυτήτων μετακίνησης της επιφάνειας του εδάφους από την μέση τιμή της ταχύτητας, σε χιλιοστά ανά χρόνο, απαλλαγμένες από την επίδραση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης και την επίδραση της αναπήδησης της φάσης (vs-do).
- του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης σε ακτίνια ανά μέτρο του κάθετου διανύσματος βάσης (d).

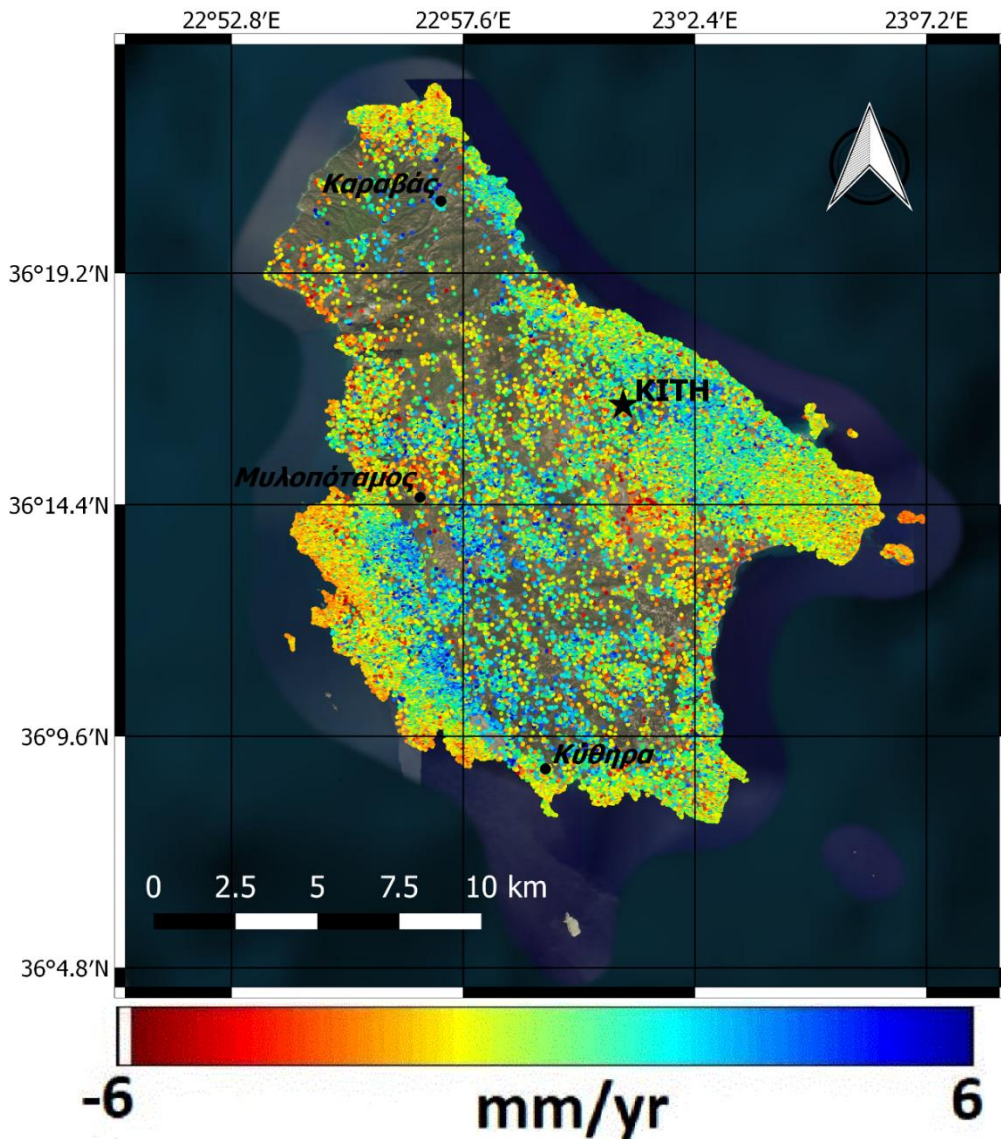
Το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης μπορεί να ταυτιστεί με το σφάλμα του ΨΜΕ.

Οι χάρτες που εξήχθησαν από το StaMPS επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον QGIS και απεικονίζονται στα κεφάλαια 6.1.1. και 6.1.2.

6.1.1. Αποτελέσματα ανοδικής τροχιάς

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίλυσης με την μέθοδο των σταθερών σκεδαστών για την ανοδική τροχιά. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε χάρτης με τις παραμορφώσεις του εδάφους για την περιοχή των Κυθήρων. Επίσης, δημιουργήθηκαν χάρτες της τυπικής απόκλισης των ταχυτήτων των σταθερών σκεδαστών από τη μέση τιμή της ταχύτητας και των σφαλμάτων του ΨΜΕ.

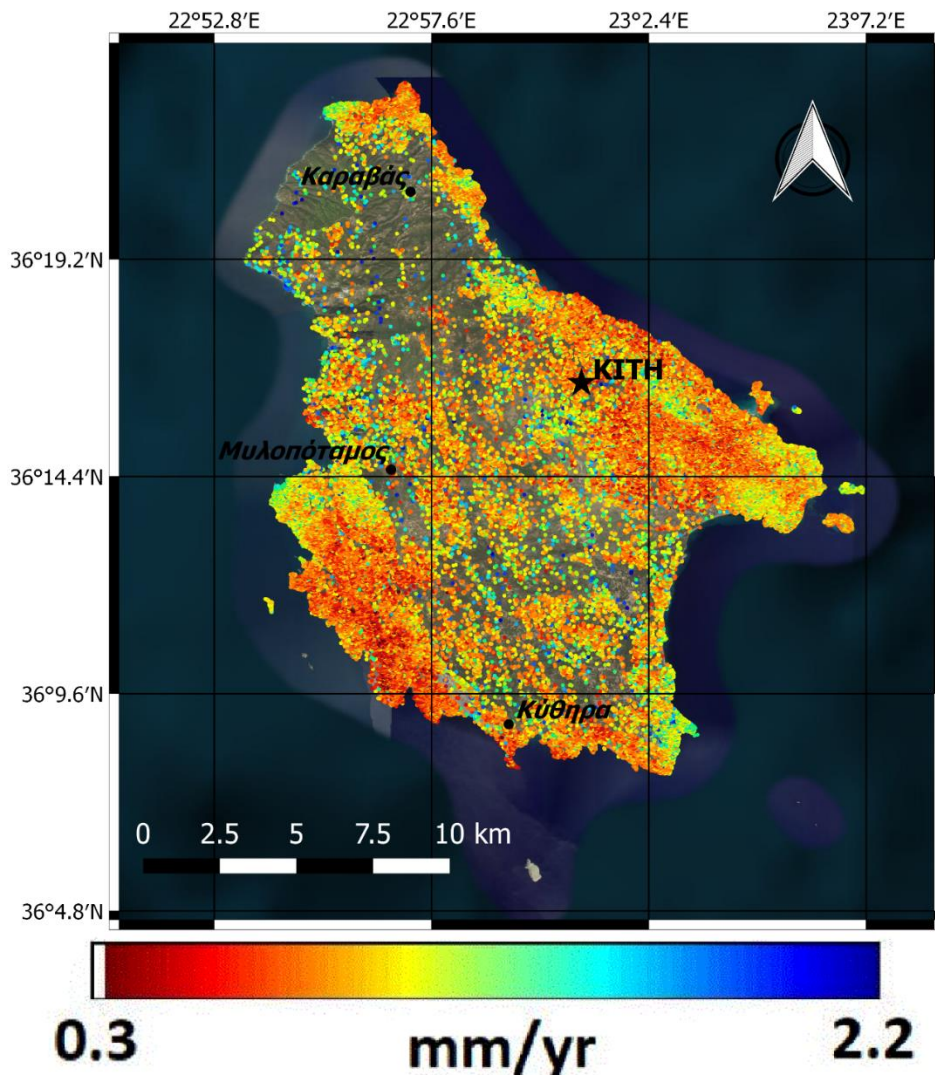
Στην Εικόνα 56 απεικονίζονται οι μετατοπίσεις των σταθερών σκεδαστών για την ανοδική τροχιά. Με μπλε χρώμα αντιπροσωπεύεται η μέγιστη ανύψωση η οποία ανέρχεται στα 6 mm/yr, ενώ με κόκκινο η μέγιστη καθίζηση η οποία κατέρχεται στα -6 mm/yr.



Εικόνα 56: Ταχύτητες μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS)

Στην Εικόνα 57 απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των ταχυτήτων των σκεδαστών από την μέση τιμή της ταχύτητας τους. Η μέση τιμή της μετακίνησής τους για την επίλυση ανοδικής τροχιάς κυμαίνεται από 0.3 mm/yr (η οποία απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα) έως 2.2 mm/yr (η οποία απεικονίζεται με μπλε χρώμα). Γενικότερα παρατηρούνται χαμηλές τιμές τυπικών αποκλίσεων στο μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας των Κυθήρων. Μικρή τυπική απόκλιση παρατηρείται κυρίως στα νοτιοδυτικά του νησιού, στις νότιες παραλιακές περιοχές, στα ανατολικά (νοτιοανατολικά, βόρεια, ανατολικά του αεροδρομίου και στην περιοχή του αεροδρομίου), στα βορειοανατολικά παράλια (2 χιλιόμετρα βορειοανατολικά και 1.5 χιλιόμετρο ανατολικά του οικισμού Καραβάς) και στο βόρειο άκρο του νησιού. Οι μέσες τιμές τυπικής απόκλισης απεικονίζονται με κίτρινο και πράσινο χρώμα και παρατηρούνται στα νοτιοανατολικά του νησιού (5 με 6 χιλιόμετρα ανατολικά του οικισμού Κύθηρα), στα ανατολικά (6.5 έως 9 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά του αεροδρομίου), δυτικά-νοτιοδυτικά του

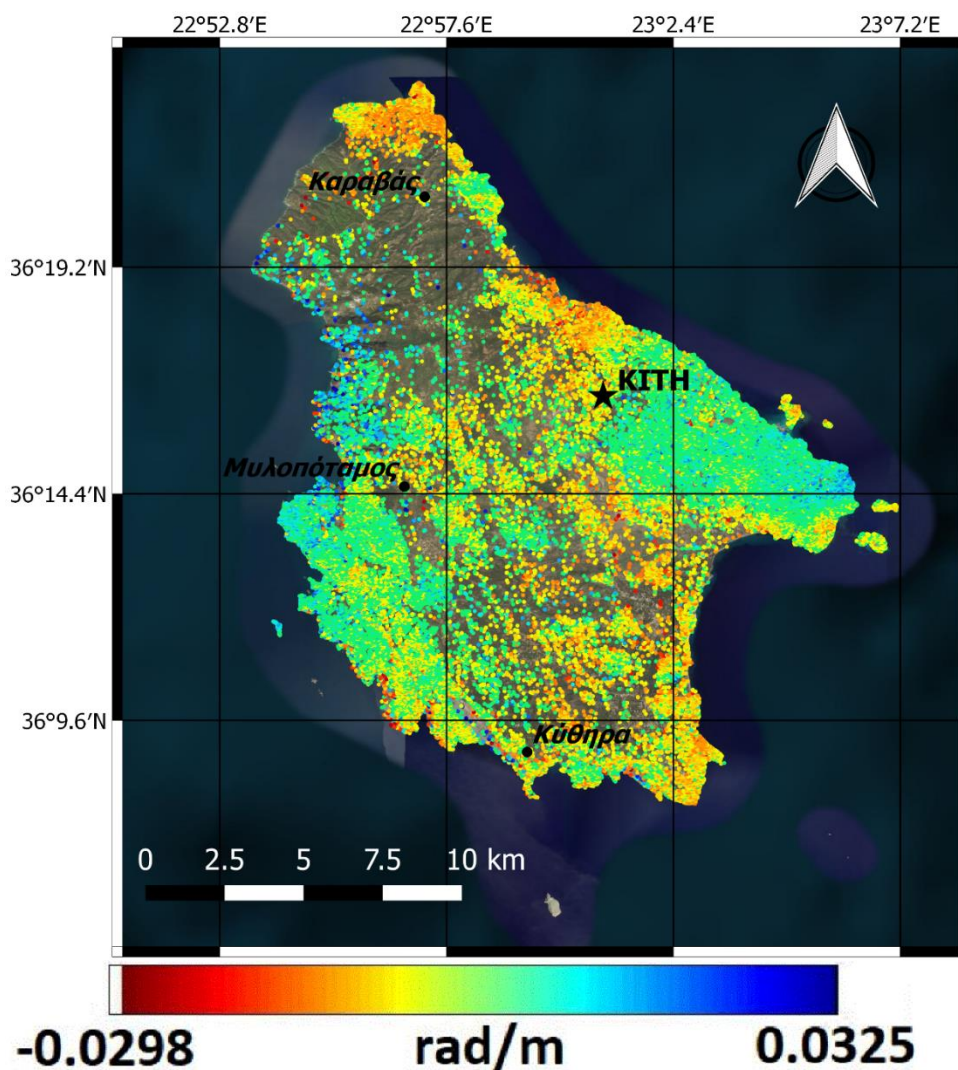
οικισμού του Μυλοποτάμου και στα βορειοδυτικά παράλια (4 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του οικισμού Καραβάς). Μεγάλες τιμές τυπικής απόκλισης παρατηρούνται σε λίγους μεμονωμένους σκεδαστές οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε όλη την έκταση του νησιού.



Εικόνα 57: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων των σκεδαστών από την μέση τιμή της ταχύτητας τους για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. (QGIS)

Η Εικόνα 58 απεικονίζει το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης ή σφάλμα του ΨΜΕ. Κυμαίνεται από -0.0298 rad/m (το οποίο απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα) έως 0.0325 rad/m (το οποίο απεικονίζεται με μπλε χρώμα). Γενικότερα δεν παρατηρούνται πολλές ακραίες τιμές σφάλματος του ΨΜΕ. Αρνητικές τιμές σφάλματος ΨΜΕ παρατηρούνται κυρίως στα νότια, νοτιοανατολικά, βορειοανατολικά και βόρεια τμήματα του νησιού. Οι υψηλότερες αρνητικές τιμές παρατηρούνται στα νοτιοδυτικά του νησιού σε παραλιακές περιοχές που βρίσκονται δυτικά του οικισμού των Κυθήρων σε αποστάσεις 3.5 και 5.5 χιλιομέτρων, στα νότια του νησιού σε παραλιακές περιοχές που απέχουν 2.5 έως 3.5 χιλιόμετρα από τον οικισμό των Κυθήρων, σε μεμονωμένους σκεδαστές που βρίσκονται διάσπαρτοι στην περιοχή μεταξύ του αεροδρομίου και του οικισμού των Κυθήρων, σε μεμονωμένους σκεδαστές βόρεια του αεροδρομίου και στο βόρειο τμήμα του νησιού. Θετικές τιμές

σφάλματος ΨΜΕ παρατηρούνται κυρίως στα δυτικά, βορειοδυτικά και ανατολικά του νησιού. Πολύ μικρό έως ανύπαρκτο σφάλμα ΨΜΕ παρατηρείται σε μεγάλο τμήμα της επιφάνειας του νησιού κυρίως στα δυτικά, νοτιοδυτικά και ανατολικά.



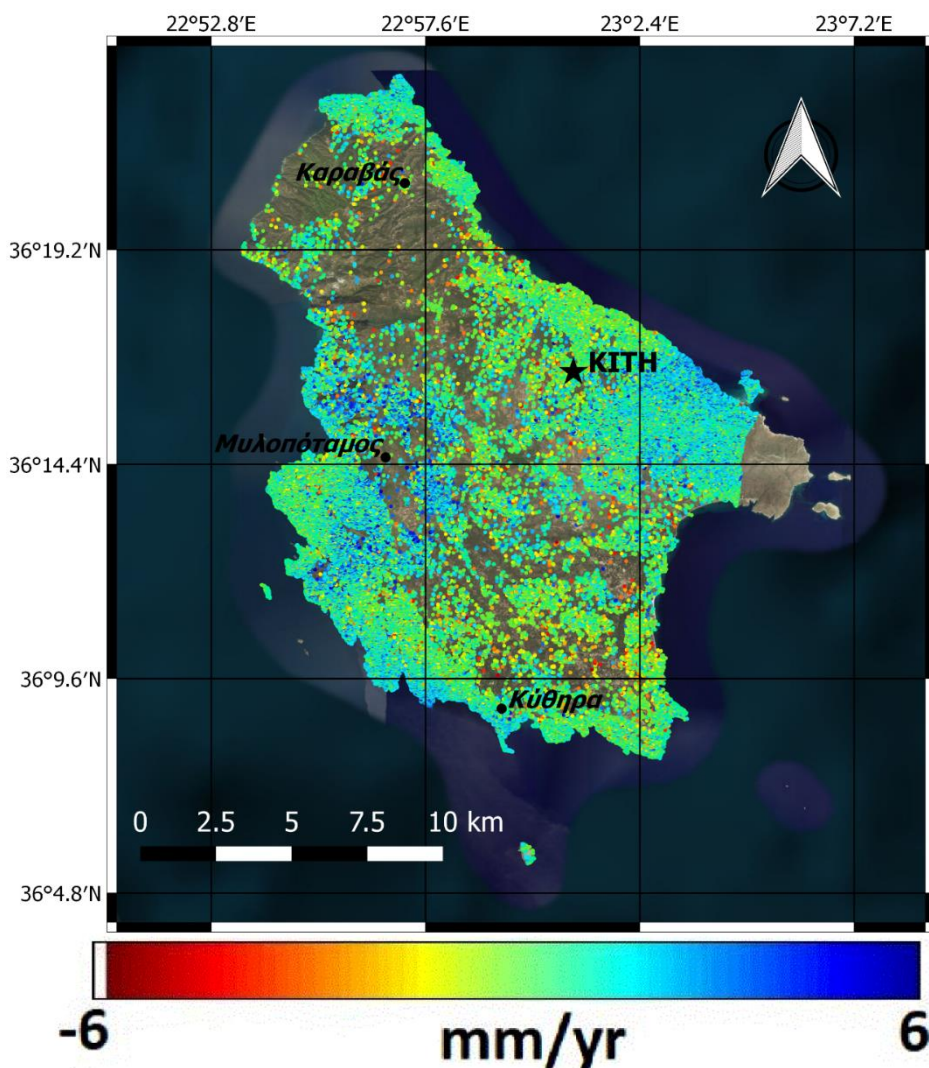
Εικόνα 58: Εκτίμηση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης (*spatially-correlated look angle error*) για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι τιμές παρουσιάζονται σε φάση ανά μέτρο του κάθετου διανύσματος βάσης (QGIS)

6.1.2. Αποτελέσματα καθοδικής τροχιάς

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίλυσης με την μέθοδο των σταθερών σκεδαστών για την καθοδική τροχιά. Δημιουργήθηκαν οι ίδιοι χάρτες όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (6.1.1).

Όπως και στην επίλυση ανοδικής τροχιάς, έτσι και στην επίλυση καθοδικής τροχιάς, με μπλε χρώμα αντιπροσωπεύεται η μέγιστη ανύψωση η οποία ανέρχεται στα 6 mm/yr, ενώ με κόκκινο η μέγιστη καθίζηση η οποία κατέρχεται στα -6 mm/yr. Γενικά δεν παρατηρούνται

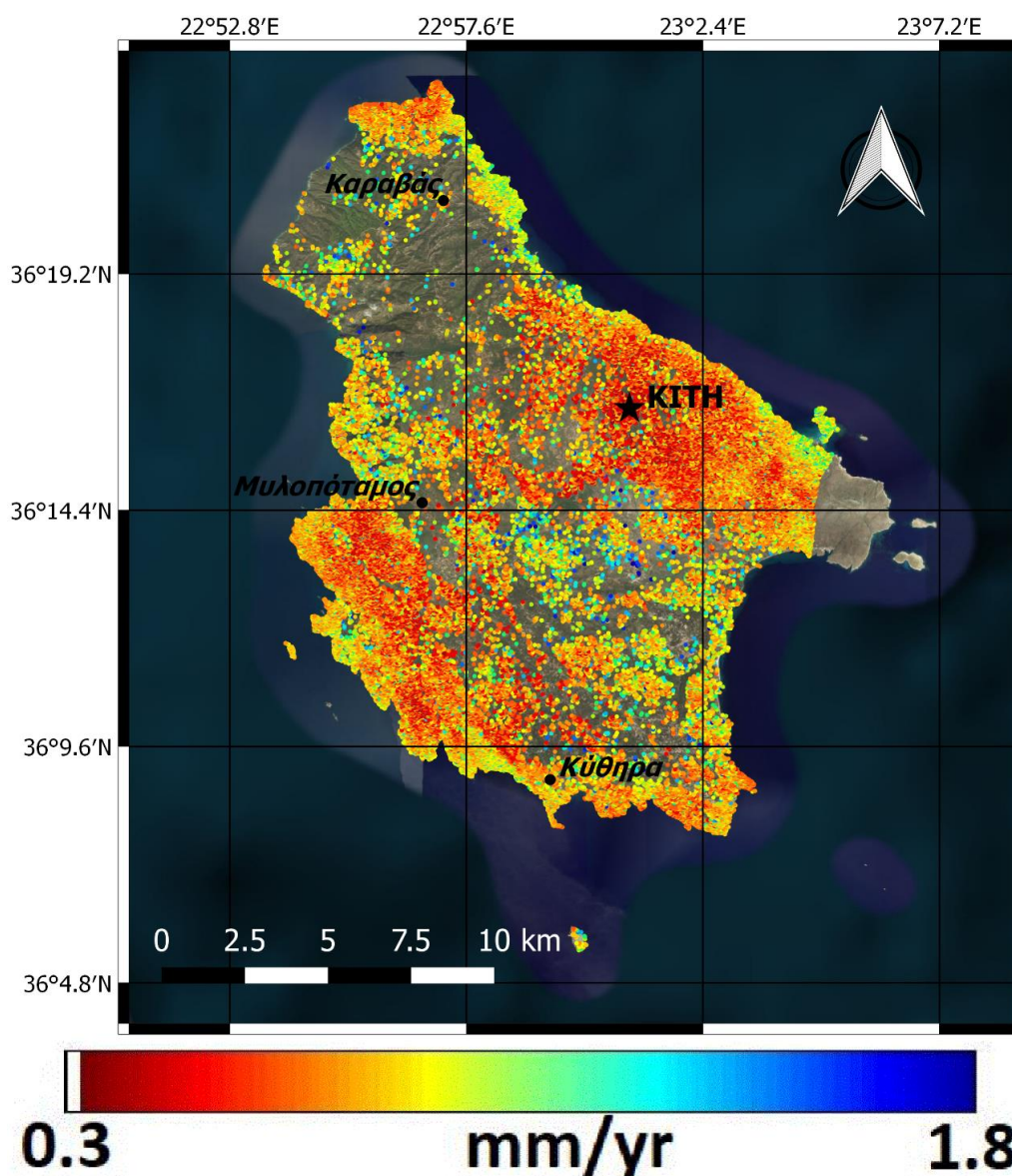
έντονες μεταβολές στις μετατοπίσεις του εδάφους. Στην Εικόνα 59 απεικονίζονται οι ταχύτητες των σταθερών σκεδαστών για την καθοδική τροχιά, όπου παρατηρείται ανύψωση μικρής όμως κλίμακας (μέγιστη τιμή 6 mm/yr), στα παράλια ανατολικά του GNSS σταθμού ΚΙΤΗ και στα βόρεια, ανατολικά και νότια του οικισμού του Μυλοπόταμου.



Εικόνα 59: Ταχύτητες μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS)

Στην Εικόνα 60 απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους από την μέση τιμή της μετακίνησής τους για την επίλυση καθοδικής τροχιάς. Κυμαίνεται από 0.3 mm/yr η οποία απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα έως 1.8 mm/yr η οποία απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Γενικότερα παρατηρούνται χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στα δυτικά, νοτιοδυτικά, στα κεντρικά, στα ανατολικά (περιοχή αεροδρομίου) και στο βόρειο άκρο του νησιού. Οι μέσες τιμές τυπικής απόκλισης απεικονίζονται με κίτρινο και πράσινο χρώμα και παρατηρούνται στα νοτιοδυτικά του νησιού σε απόσταση 5.5 χιλιομέτρων νοτιοδυτικά του οικισμού του Μυλοποτάμου, στα νότια του

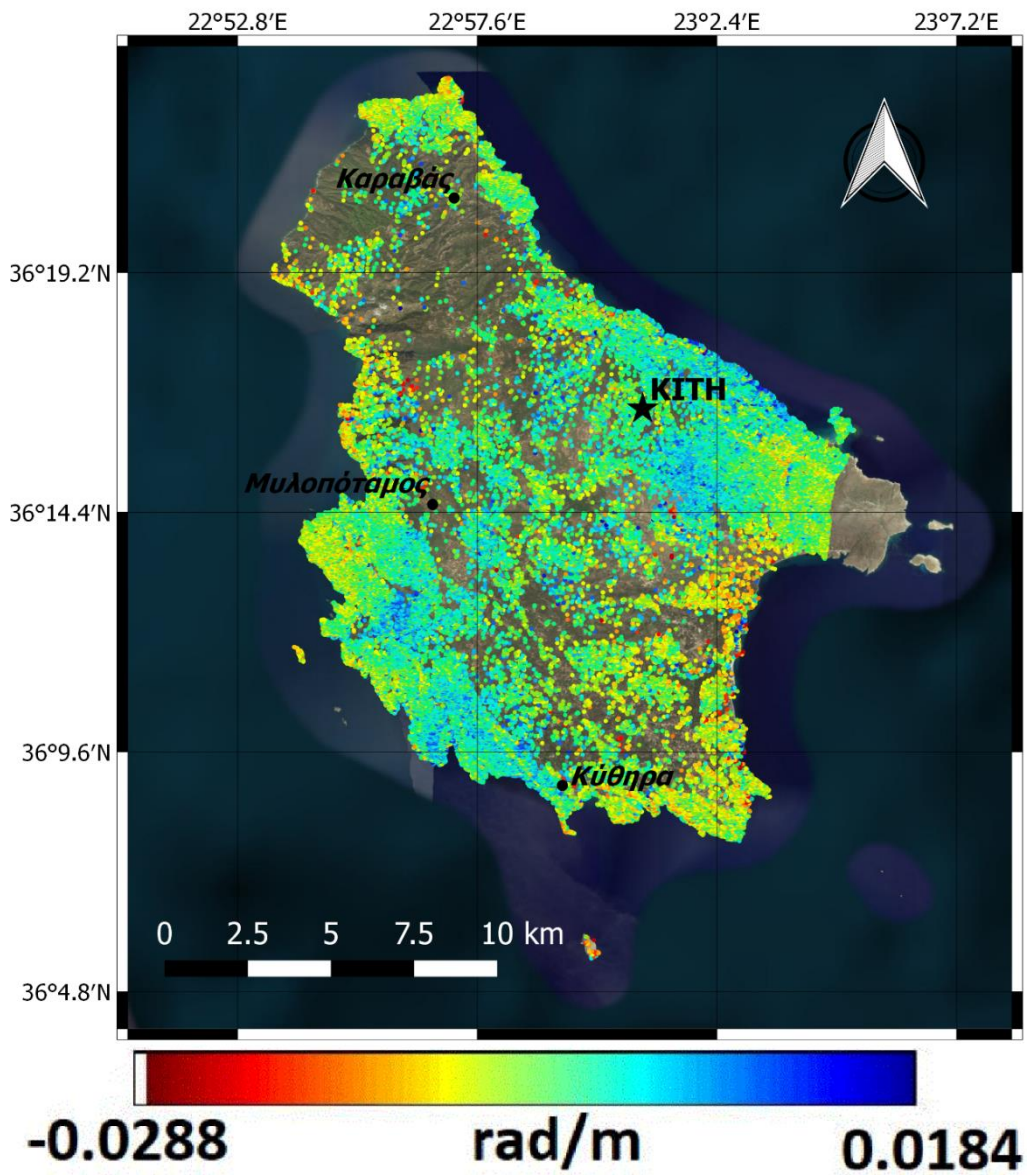
νησιού κοντά στον οικισμό των Κυθήρων και σε απόσταση 1.5 με 2 χιλιόμετρα δυτικά του οικισμού των Κυθήρων, στα ανατολικά παράλια (νοτιοανατολικά του αεροδρομίου) και στα βορειοανατολικά παράλια (ανατολικά του οικισμού Καραβάς). Μεγάλες τιμές τυπικής απόκλισης παρατηρούνται σε πολύ λίγους μεμονωμένους σκεδαστές κυρίως κεντρικά και βόρεια του νησιού.



Εικόνα 60: Τυπική απόκλιση ταχυτήτων των σκεδαστών από την μέση τιμή της ταχύτητας τους για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. (QGIS)

Στην Εικόνα 61 απεικονίζεται το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης ή σφάλμα του ΨΜΕ για την επίλυση καθοδικής τροχιάς. Κυμαίνεται από -0.0288 rad/m το οποίο απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα έως 0.0184 rad/m το οποίο απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Αρνητικές τιμές σφάλματος ΨΜΕ παρατηρούνται στα δυτικά και νοτιοδυτικά παράλια, στα νότια, στα νοτιοανατολικά και στο βόρειο τμήμα του νησιού. Θετικές τιμές σφάλματος ΨΜΕ

παρατηρούνται στα νοτιοδυτικά και ανατολικά (νοτιοανατολικά και ανατολικά του αεροδρομίου) των Κυθήρων.



Εικόνα 61: Εκτίμηση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης (*spatially-correlated look angle error*) για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι τιμές παρουσιάζονται σε φάση ανά μέτρο του κάθετου διανύσματος βάσης (QGIS)

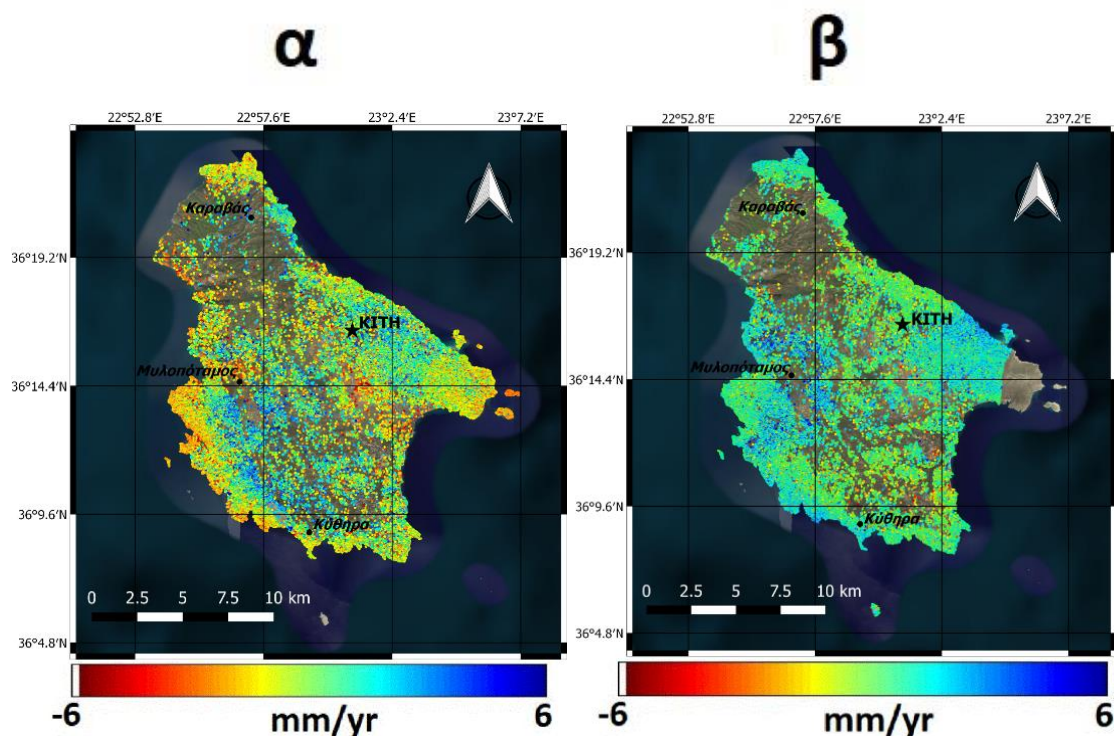
7. Συμπεράσματα

Από τους χάρτες μετακίνησης του εδάφους των Κυθήρων και για τις δύο τροχιές του δορυφόρου διαπιστώνεται ότι στο σύνολο παρατηρούνται μετατοπίσεις μικρής κλίμακας. Οι μετατοπίσεις που απεικονίζονται στους χάρτες είναι ως προς τη γραμμή θέασης (LOS) της κεραίας του δορυφόρου.

Συγκρίνοντας τους χάρτες μετακίνησης (Εικόνα 62) με τον χάρτη όπου απεικονίζονται τα ενεργά ρήγματα στο νησί των Κυθήρων (Εικόνα 5) διαπιστώνεται ότι οι περιοχές οι οποίες έχουν ενεργά ρήγματα, έχουν υποστεί ανύψωση.

Οι χάρτες της τυπικής απόκλισης των μετακινήσεων των σκεδαστών από την μέση τιμή της μετακίνησής τους είναι παρόμοιοι και για τις δύο τροχιές. Σχεδόν σε όλη την επικράτεια των Κυθήρων, η τυπική απόκλιση των μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους είναι μικρή και κυμαίνεται από 0.3 mm/yr έως 1 mm/yr.

Εξετάζοντας και τους δύο χάρτες του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης διαπιστώνεται ότι το σφάλμα της γωνίας θέασης είναι μικρό τόσο για την επίλυση με δεδομένα ανοδικής τροχιάς δορυφόρου όσο και για την επίλυση με δεδομένα καθοδικής τροχιάς δορυφόρου. Συνεπώς η ακρίβεια του ΨΜΕ είναι ικανοποιητική.



Εικόνα 62: α) Χάρτης ταχύτητων μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις ανοδικής τροχιάς του δορυφόρου, β) Χάρτης ταχύτητων μετακίνησης σκεδαστών κατά μήκος της γραμμής θέασης για την επίλυση με λήψεις καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν κίνηση προς την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή ανύψωση του εδάφους, ενώ οι αρνητικές απομάκρυνση από την κεραία του δορυφόρου, δηλαδή καθίζηση του εδάφους. (QGIS)

Συγκεκριμένα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων κάθε τροχιάς μεμονωμένα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

◆ *Συμπεράσματα ανοδικής τροχιάς*

Για την ανοδική τροχιά, ανύψωση παρατηρείται στις ακόλουθες περιοχές:

1. Βόρεια και βορειοδυτικά του οικισμού των Κυθήρων.
2. Στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον οικισμό του Μυλοποτάμου.
3. Ανατολικά και νοτιοανατολικά του αεροδρομίου των Κυθήρων.

Καθίζηση παρατηρείται στις εξής περιοχές:

1. Στην περιοχή του οικισμού του Μυλοποτάμου καθώς και δυτικά και νοτιοδυτικά αυτού.
2. Στην περιοχή του οικισμού των Κυθήρων και στις παραλιακές περιοχές δυτικά και ανατολικά του οικισμού των Κυθήρων.
3. Νότια και νοτιοανατολικά του σταθμού GPS ΚΙΤΗ.

◆ *Συμπεράσματα καθοδικής τροχιάς*

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της καθοδικής τροχιάς, ανύψωση παρατηρείται στα εξής τμήματα του νησιού:

1. Βόρεια του οικισμού του Μυλοποτάμου.
2. Στο νοτιοδυτικό τμήμα του μεταξύ των οικισμών του Μυλοποτάμου και των Κυθήρων, με μέγιστη τιμή 6mm/yr και στο κεντρικό τμήμα του νησιού.
3. Ανατολικά και νοτιοανατολικά του αεροδρομίου, επίσης με μέγιστη τιμή 6mm/yr και στο βόρειο άκρο του νησιού.

Για την καθοδική τροχιά, καθίζηση μικρής κλίμακας, εντοπίζεται στα νοτιοδυτικά, νοτιοανατολικά και νότια του νησιού καθώς και νότια του σταθμού ΚΙΤΗ, με μέγιστη τιμή παραμόρφωσης -6mm/yr.

Οι κυριότερες παρατηρήσεις από τη σύγκριση των ταχυτήτων που προέκυψαν για την ανοδική και την καθοδική τροχιά (Εικόνα 62), συνοψίζονται στις ακόλουθες:

1. Ίδια θετική τιμή μετατόπισης, στο κεντρικό τμήμα του νησιού έως 6 mm/yr.
2. Στα βόρεια, στα νοτιοδυτικά παράλια του νησιού και νοτιοανατολικά του σταθμού ΚΙΤΗ παρατηρείται διαφοροποίηση στη διεύθυνση της μετατόπισης.
3. Η διαφορά στην διεύθυνση της παραμόρφωσης, υποδηλώνει την ύπαρξη οριζόντιων μετατοπίσεων στις προαναφερθείσες περιοχές.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική βιβλιογραφία

Αγγελίδης, Χ., Γεωργιάδης, Ν., Κορδοπάτης, Π., Πορτόλου, Δ., Τσιόπελας, Ν. (2016) Καταγραφή και Αξιολόγηση του Φυσικού Περιβάλλοντος Κυθήρων και Αντικυθήρων. Αθήνα: Μεσογειακό Ινστιτούτο για τη Φύση και τον Άνθρωπο – Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία.

Αλεξούδη – Λειβαδίτη, Αλίκη. “ Το γεωδυναμικό καθεστώς στον ελληνικό χώρο και την ανατολική μεσόγειο.” Στο ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ, Ε.Μ.Π., 2008.

Βασιλάκη, Δ. και Α. Γεωργόπουλος. “Φωτογραμμετρία II: SAR.” Διάλεξη, Φωτογραμμετρία II, ΕΜΠ, Ζωγράφου, Απρίλιος, 2013

Δεληκαράογλου, Δημήτρης. «ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ» Κεφάλαιο 7. ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ SAR

Ζωβοΐλη. Ευαγγελία. “Η ενεργός τεκτονική – νεοτεκτονική του ΝΔ Αιγαίου τόξου με χρήση μεθόδων ποσοτικής τεκτονικής και GIS” Διδακτορική Διατριβή. , Πανεπιστήμιο Πατρών, 2016

Ηλίας Παναγιώτης, Χ. Κοντοές, Ι. Παπουτσής και Ι. Κώτσης. 2007. “Ανίχνευση γραμμικών παραμορφώσεων μικρής κλίμακας στον Κορινθιακό κόλπο με χρήση της τεχνικής των σταθερών σκεδαστών. ” Πρακτικά του 8ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Αθήνα 4-7 Οκτωβρίου 2007. Τόμος II. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Τηλεπισκόπηση, Χαρτογραφία.

Ηλίας, Παναγιώτης (2013). Παρατηρούμενες εδαφικές παραμορφώσεις στο Δυτικό Κορινθιακό Κόλπο με χρήση συμβολομετρίας SAR

Ιωσηφίδης, Χρήστος. 2011. Η υφή σε εικόνες παρατήρησης της γης: Επεξεργασίες υφής σε ψηφιακές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις.
http://users.ntua.gr/chiossif/Free_As_Freedom_Software/Texture.pdf

Κασκαρά, Μαρία. “Διαχρονική Συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης για την χρονική περίοδο 1992-2001. Σύγκριση με δεδομένα GPS. “, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2015.

Κυρατζή, Αναστασία. “Γεωδυναμική της Ελλάδας”. Διάλεξη, Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2 Μαρτίου 2005

ΚΩΤΣΗΣ, Ι. και Β. ΜΑΣΣΙΝΑΣ και Δ. ΠΑΡΑΔΕΙΣΗΣ (2008). ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ

Λαζαρίδου, Μάρθα. “ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.” Διάλεξη, Δασική Εδαφολογία, ΤΕΙ ΔΑΣΟΠΟΝΙΑΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Δράμα

Λέκκας, Σπυρίδων κ.ά. 2006. “Ρήγματα Μετασχηματισμού και Οριζόντιας Ολίσθησης.” Στο Εισαγωγή στη ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ, 117-138. Αθήνα: Έκδοση του Τομέα Δυναμικής, Τεκτονικής και

Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Λιαπέρδος, Γιάννης. 2015. "Ταλαντωτές." Στο ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ, επιμελημένο από Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα - Κάλλιπος

Μαλάμου, Άννα (2017). Μαθηματικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι για Συστήματα Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (SAR)

Μουντράκης Δ. "Θέση της Ελλάδας στο Παγκόσμιο γεωτεκτονικό σύστημα" Στο Συνοπτική Γεωτεκτονική Εξέλιξη Του Ευρύτερου Ελληνικού Χώρου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μπαράκου, Θεοδώρα. 2000. "ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ." ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, <https://phdtheses.ekt.gr/eadd/handle/10442/22681>.

Μπίθαρης, Στυλιανός. "Επεξεργασία δεδομένων μόνιμων σταθμών GPS και προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων στον Ελλαδικό χώρο." Μεταπτυχιακή διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.

Μπικουβαράκη, Μαρία (2011). Συμβολομετρία RADAR στην παρακολούθηση υψομετρικών παραμορφώσεων του εδάφους

Νικολήνταγα Μαρία Ειρήνη, Βασίλειος Καρακώστας, Ελευθερία Παπαδημητρίου, Φίλιππος Βαλλιανάτος, "Ο σεισμός των Κυθήρων στις 8 Ιανουαρίου 2008 και η μετασεισμική του ακολουθία", 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5–7 Νοεμβρίου 2008, Άρθρο 1899

Παπαδόπουλος, Γεράσιμος. "Κύθηρα – Οι Σεισμοί και τα Τσουνάμι από την Αρχαιότητα μέχρι Σήμερα", ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ .1 . Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ οσελότος, Νοέμβριος 2012.

Παρχαρίδης, Ι. 2015. Η τηλεπισκόπηση με την χρήση της μικροκυματικής ακτινοβολίας. [Κεφάλαιο Συγγράμματος]. Στο Παρχαρίδης, Ι. 2015. *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 7. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3967>

Στεργιόπουλος, Βύρωνας (2012). «Διαφορική Συμβολομετρία Ραντάρ για εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης εδάφους στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου και συσχέτιση με τις χρήσεις- κάλυψη γης στην ευρύτερη περιοχή»

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

AKLIOUAT, Hacene et al. "SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGE FORMATON PROCESS: APPLICATION TO A REGION OF NORTH ALGERIA." In Proceedings of the 2007 ESA ENVISAT Symposium, Montreux (Switzerland), April 23-27, 2007

Albright, Wade. "Thermal Noise in SAR." Lecture, University of Alaska Fairbanks, May 8, 2002.

- Bouraoui, Seyfallah. Time series analysis of SAR images using persistent scatterer (PS), small baseline (SB) and merged approaches in regions with small surface deformation. Earth Sciences. Université de Strasbourg, 2013. English. <NNT : 2013STRAH023>. <tel-01019429>
- Brunner Dominik, L. Bruzzone, A. Ferro, J. Fortuny, and G. Lemoine. Analysis of the double bounce scattering mechanism of buildings in VHR SAR data
- Calabrese, D. (2014). High-resolution stripmap sar imaging. PCT/IB2014/058872.
- Canaslan  omut, Fatma &  st n, Aydın. (2012). Impact of Perpendicular and Temporal Baseline Characteristics on InSAR Coherence Maps.
- Chan, Y. K., and V. C. Koo. "AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR)." Progress In Electromagnetics Research B 2 (2008): 27–60.
- Chapron, Bertrand. "Introduction to satellite radars: Synthetic Aperture Radars (SAR)." Lecture, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, March 28, 2012.
- Chelbi Salim, A.Khireddine, J.P Charles (2011). Interferometry process for satellite images SAR, ELECO 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-4 December, Bursa, TURKEY
- Crosetto Michele, Oriol Monserrat, María Cuevas-González, N ria Devanthery and Bruno Crippa. 2015. "Persistent Scatterer Interferometry: A review." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 115, May 2016, Pages 78-89.
- Damoah-Afari, Peter & Ding, Xiaoli & Lu, Zhong &  志伟, Zhiwei & Omura, Makoto. (2010). Magnitude and Extent of Six Years of Land Subsidence in Shanghai Revealed by JERS-1 SAR Data. 10.5772/9092.
- Ding, X.-L.; Li, Z.-W.; Zhu, J.-J.; Feng, G.-C.; Long, J.-P. Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. Sensors 2008, 8, 5426-5448.
- Eineder M. and T. Fritz et al. 2010. TerraSAR-X Ground Segment, Basic Product Specification Document. CAF - Cluster Applied Remote Sensing (DLR). https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/TX-GS-DD-3302_Basic-Product-Specification-Document_1_7.pdf
- Elizavetin, Igor. 2010. "Radiometric artifacts on SAR images." Presentation at the Xth International Scientific and Technical Conference "From imagery to map: digital photogrammetric technologies", Gaeta, Italy, September 20–23, 2010.
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183
- Fattahi, H & Valadan Zoej, Mohammad Javad & Mobasheri, Mohammadreza & Deghani, Maryam. (2019). SAR Interferometric Phase Noise Reduction in Wavelet Domain.
- Ferretti Alessandro, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca, Didier Massonnet (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation
- Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L. Lu, J. and Wong, C. "SNAP - StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer

Interferometry". In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2018 IEEE International, IEEE

Foumelis, Michael & Delgado Blasco, Jose Manuel & Desnos, Yves-Louis & Engdahl, Marcus & Fernández, Diego & Veci, Luis & Lu, Jun & Wong, Cecilia. (2018). ESA SNAP – StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. 10.13140/RG.2.2.25803.90405.

Ganas, A & Oikonomou, Athanassia & Tsimi, Christina. (2017). NOAfaults: a digital database for active faults in Greece. Bulletin of the Geological Society of Greece. 47. 518. 10.12681/bgsg.11079.

Giudici D., L. Maggi, A. M. Guarnieri, J. Medina and M. Völker, "Roll-steering for improving SAOCOM-SAR performances," 2010 IEEE Radar Conference, Washington, DC, 2010, pp. 752-755. doi: 10.1109/RADAR.2010.5494522

Guaragnella, Cataldo and Tiziana D’Orazio. "A Data Driven Approach to SAR Data Focusing." Preprints (2018), 2018070120 (doi: 10.20944/preprints201807.0120.v1).

Hooper, Andy. "StaMPS Persistent Scatterer Practical." Training Course, University of Leeds, Gödöllő, September 4-9, 2017

Hooper A; Bekaert D; Spaans K; Arian M (2012) Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013

Johannessen, J.A. and F. Collard et al. "SAR Instrument Principles and Processing." 3rd ESA ADVANCED TRAINING ON OCEAN REMOTE SENSING, NMCI, Cork, September 23-27, 2013

Jung, Jungkyo & Kim, Duk-jin & Lavallo, Marco & Yun, Sang-Ho. (2016). Coherent Change Detection Using InSAR Temporal Decorrelation Model: A Case Study for Volcanic Ash Detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 54. 1-11. 10.1109/TGRS.2016.2572166.

Karakostas, Ch. et al. THE KYTHIRA (GREECE) EARTHQUAKE OF JANUARY 8, 2006: PRELIMINARY REPORT ON STRONG MOTION DATA, GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL DAMAGE

Konca A. O., Seda Cetin, Hayrullah Karabulut, Robert Reilinger, Ugur Dogan, Semih Ergintav, Ziyadin Cakir, Ergin Tari. The 2014, MW6.9 North Aegean earthquake: seismic and geodetic evidence for coseismic slip on persistent asperities, Geophysical Journal International, Volume 213, Issue 2, May 2018, Pages 1113–1120, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy049>

Konstantinou K.I., S.-J. Lee, C.P. Evangelidis, N.S. Melis, Source process and tectonic implications of the 8 January 2006 (Mw 6.7) Kythira earthquake, southern Greece, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 175, Issues 3–4, 2009, Pages 167-182, ISSN 0031-9201

Lau, Sin Wai. "Comparison and Fusion of space borne L-, C- and X- Band SAR Images for Damage Identification in the 2008 Sichuan Earthquake." Master's thesis, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, 2011.

Lauknes, Inge and Eirik Malnes. "Automatic Geocoding of SAR Products." Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572). 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.

- Li, Xiao-Ming. "Ocean Surface Wave Measurement Using SAR Wave Mode Data." Dissertation, University of Hamburg, 2010.
- Lu, Chih-Heng; Ni, Chuen-Fa; Chang, Chung-Pai; Yen, Jiun-Yee; Chuang, Ray Y. 2018. "Coherence Difference Analysis of Sentinel-1 SAR Interferogram to Identify Earthquake-Induced Disasters in Urban Areas." *Remote Sens.* 10, no. 8: 1318.
- Madsen, S. N. (1989). Estimating the Doppler centroid of SAR data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 25(2), 134-140. <https://doi.org/10.1109/7.18675>
- MAKROPOULOS, KOSTAS, and PAUL BURTON. "GREEK TECTONICS AND SEISMICITY." *Tectonophysics* 106 (1984): 275-304
- Mashaly, Ahmed & AbdElkawy Ezz Eldin, F & Mahmoud, Tarek. (2010). Speckle noise reduction in SAR images using adaptive morphological filter. *Proceedings of the 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA'10.* 260-265. [10.1109/ISDA.2010.5687254](https://doi.org/10.1109/ISDA.2010.5687254).
- McNeill, L.C. & Mille, A & Minshull, Timothy & Bull, Jonathan & Kenyon, Neil & Ivanov, M. (2004). Extension of the North Anatolian Fault into the North Aegean Trough: Evidence for transtension, strain partitioning, and analogues for Sea of Marmara basin models. *Tectonics*. 23. [10.1029/2002TC001490](https://doi.org/10.1029/2002TC001490).
- Meta, Adriano & Prats-Iraola, Pau & Steinbrecher, Ulrich & Mittermayer, Josef & Scheiber, Rolf. (2008). TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 1 - 4.
- Moreira, Alberto. "Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications." 4th ADVANCED TRAINING COURSE IN LAND REMOTE SENSING, Harokopio University, Athens, July 1-5, 2013
- Moreira Alberto, Pau Prats-Iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek, Konstantinos P. Papathanassiou (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar
- MOURATIDIS, A. , P. BRIOLE and K. KATSAMBALOS. 2010. "SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece." *International Journal of Remote Sensing* 31, No. 23 (December): 6205–6222.
- Papoutsis, Ioannis (2014). Radar Interferometry for Monitoring Crustal Deformation
- Prats-Iraola, Pau & Nannini, Matteo & Yague-Martinez, Nestor & Scheiber, Rolf & Costantini, Mario & Siniscalchi, V & Nikkhoo, Mehdi & Fomelis, Michael & Desnos, Yves-Louis. (2016). Sentinel-1 Assessment of the Interferometric Wide-Swath Mode.
- Rahman, Samiur. "Focusing Moving Targets Using Range Migration Algorithm in Ultra Wideband Low Frequency Synthetic Aperture Radar." Master's thesis, Blekinge Institute of Technology, 2010.
- Solberg Svein, Dan Johan Weydahl, Erik Næsset. SAR forest canopy penetration depth as an indicator for forest health monitoring based on leaf area index (LAI)
- Saqellari, Arlinda. 2016. Developing new multi-image InSAR methods for atmospheric delay estimation. Doctoral Thesis, NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

Sorrentino A., D. Schiavulli and M. Migliaccio, "A post-processing technique for scalloping suppression over ScanSAR images." 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, 2012, pp. 2078-2081. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206451

Stramondo, Salvatore and Antonio Montuori. "SAR Interferometry (InSAR): principles." Corso presso Università della Calabria, April 10, 2017

Wegmuller, U. "Automated terrain corrected SAR geocoding," *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*, Hamburg, Germany, 1999, pp. 1712-1714 vol.3. doi: 10.1109/IGARSS.1999.772070

Wei M. and D. T. Sandwell, "Decorrelation of L-Band and C-Band Interferometry Over Vegetated Areas in California," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 7, pp. 2942-2952, July 2010. doi: 10.1109/TGRS.2010.2043442

Wollstadt, Steffen & Prats-Iraola, Pau & Bachmann, Markus & Mittermayer, Josef & Scheiber, Rolf. (2012). Scalloping correction in TOPS imaging mode SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 9. 10.1109/LGRS.2011.2176716.

Wright, Tim. "SAR Interferometry (InSAR)." Lecture, School of Earth and Environment, University of Leeds, UK

Xu, Xiaohua and David Sandwell. "SAR Image Formation." Presentation at the InSAR Processing and Theory with GMTSAR: Sentinel-1A Time Series, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA, August 8-10, 2018.

Yang Jian, Yoshio Yamaguchi, Jong-Sen Lee, Ridha Touzi, and Wolfgang-Martin Boerner, "Applications of Polarimetric SAR," *Journal of Sensors*, vol. 2015, Article ID 316391, 2 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/316391>.

Yang, Wei et al. "A Wide-Swath Spaceborne TOPS SAR Image Formation Algorithm Based on Chirp Scaling and Chirp-Z Transform." *Sensors (Basel, Switzerland)* vol. 16,12 2095. 9 Dec. 2016, doi:10.3390/s16122095

Yanjie, Zhang and Véronique Prinnet. "InSAR Coherence Estimation", 2004

Younis, Marwan. "Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications." 6th ESA ADVANCED TRAINING COURSE ON LAND REMOTE SENSING, University of Agronomic Science and Veterinary Medicine Bucharest, Bucharest, September 14-18, 2015

Zhao, Qing & Pepe, A & Gao, Wei & Lu, Zhong & Bonano, Manuela & L. He, Man & Wang, Jun & Tang, Xi. (2015). A DInSAR Investigation of the Ground Settlement Time Evolution of Ocean-Reclaimed Lands in Shanghai. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 8. 1-19. 10.1109/JSTARS.2015.2402168.

GAMMA REMOTE SENSING, Documentation - Theory, Interferometric SAR Processing, Version 1.0 – November 2007

Slideplayer.com. Interferometric Synthetic-Aperture Radar (InSAR) Basics - ppt download. [online] Available at: <https://slideplayer.com/slide/8654127>.

StaMPS/MTI Manual, Version 3.3b1, University of Leeds, Leeds, United Kingdom, Sept. 13, 2013.

StaMPS/MTI Manual, Version 4.1b, University of Leeds, Leeds, United Kingdom, Aug. 15, 2018.

Synthetic-Aperture Radar (SAR) Basics, The University of Kansas

Διαδικτυακές πηγές

<http://www.aewa.org>

<https://www.britannica.com>

<http://www.cresda.com>

<https://www.eorc.jaxa.jp>

<https://www.explainthatstuff.com>

<http://www.geo.uzh.ch>

<https://www.gim-international.com>

<https://www.harrisgeospatial.com>

<https://www.jpl.nasa.gov>

<https://www.nrcan.gc.ca>

<http://www.ob-ultrasound.net>

<http://www.radar-room.co.uk>

<http://www.radartutorial.eu>

<https://www.satimagingcorp.com>

<https://www.schorsch.com>

<https://www.sciencedirect.com>

<https://www.unavco.org>

<http://coolcosmos.ipac.caltech.edu>

<https://directory.eoportal.org>

<https://earth.esa.int>

<https://earthdata.nasa.gov>

<http://envisat.esa.int>

<https://ethw.org>

<http://gsp.humboldt.edu>

<https://nisar.jpl.nasa.gov>

<http://oceanwavesremotesensing.ifremer.fr>

<https://plus.maths.org>

<http://rammb.cira.colostate.edu>

<http://science-gym.mysch.gr>

<https://sentinel.esa.int>

<https://uboat.net>

<https://vldb.gsi.go.jp>

“Μιγαδικοί Αριθμοί” ανακτήθηκε από <https://www.mathimatikos.com>

Άλλες πηγές

SNAP - ESA Sentinel Application Platform v5.0.8, <http://step.esa.int>