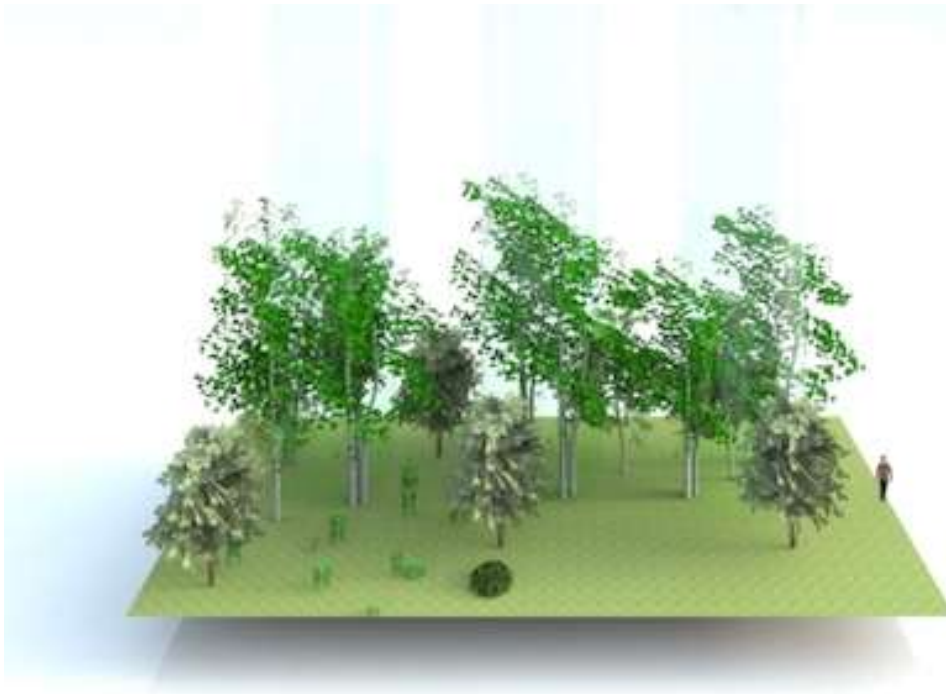




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Εκτίμηση του Ύψους Δασικής Κομοστέγης με τη Χρήση Συμβολομετρίας Διπλής Συχνότητας



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
Κλεάνθη Ε. Καραμβάση

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :
Βασιλεία Καραθανάση Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

**Εκτίμηση του Ύψους Δασικής Κομοστέγης με τη Χρήση
Συμβολομετρίας Διπλής Συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Κλεάνθη Ε. Καραμβάση

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Βασιλεία Καραθανάση
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 12 Μαΐου του 2014.

.....
Β. Καραθανάση
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Αργιαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Παραδείσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

.....
Κλεάνθης Ε. Καραμβάσης
Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Κλεάνθης Ε. Καραμβάσης, 2014
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει ως θέμα την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης με τη χρήση συμβολομετρίας διπλής συχνότητας δορυφορικών απεικονίσεων SAR. Στόχος ήταν η ολοκληρωμένη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος όσον αφορά το θεωρητικό του μέρος, δηλαδή η ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιούν δεδομένα SAR για την εκτίμηση δασικών παραμέτρων· όσο και το πρακτικό με την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας για την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως την κυρία Βασιλεία Καραθανάση, η οποία ήταν και η επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά της. Οι κατευθύνσεις της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας, η επιστημονική και ηθική υποστήριξη και το αμέριστο ενδιαφέρον της ήταν βασικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση και την επιτυχή έκβαση του συγκεκριμένου θέματος. Παράλληλα, υποστήριξε τις πρωτοβουλίες μου και έθεσε τις βάσεις για το ξεκίνημα της ερευνητικής μου πορείας.

Θερμές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω επίσης, στο σύνολο του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης για την τεχνική και επιστημονική βοήθεια που προσέφεραν, οποιαδήποτε στιγμή και αν χρειάστηκε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ειδικά τον Δόκτορα Μηχανικό κύριο Πολυχρόνη Κολοκούση, μέλος του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, για τη διαρκή βοήθεια του σε όλα τα τεχνικά ζητήματα που προέκυψαν και την Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και τους υποψήφιους διδάκτορες Αρλίντα Σακελλάρη και Χρήστο Χουσιάφη για την άριστη συνεργασία που είχαμε και τη βοήθεια που μου προσέφερε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη την Μαρουλιώ Χανιώτη για τη συνεχή προσπάθεια που κατέβαλε για την έγκαιρη προμήθεια των SAR απεικονίσεων. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. για τη δωρεάν παραχώρηση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου της περιοχής μελέτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου και συμφοιτητές μου για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί. Ειδικά θέλω να αναφέρω τον Παναγιώτη, την Ελένη, τον Σπύρο, τον Παύλο, την Ιωάννα, τη Βάσω, τη Νίκη και τον Αποστόλη για την υποστήριξη και την αγάπη τους. Τέλος την ευγνωμοσύνη μου θέλω να εκφράσω στην οικογένειά μου για την οικονομική στήριξη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Μάιος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος-Ευχαριστίες.....	i
Πίνακας Περιεχομένων.....	ii
Πίνακας Εικόνων.....	vi
Πίνακας Σχημάτων.....	vii
Λίστα Πινάκων.....	viii
Περίληψη.....	ix
Abstract.....	x
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1 Επισκόπηση της θεωρίας.....	2
1.1 Μικροκυματική τηλεπισκόπηση.....	3
1.2 Ιστορική αναδρομή στα συστήματα RADAR.....	5
1.3 Εισαγωγή στα Συστήματα SAR.....	6
1.4 Γεωμετρία Λήψης μιας Απεικόνισης SAR.....	10
1.5 Παράμετροι ενός συστήματος SAR.....	11
1.5.1 Κεραία.....	11
1.5.2 Το Συνθετικό Άνοιγμα.....	12
1.5.3 Η Χωρική Ανάλυση της SAR Απεικόνισης.....	14
1.5.3.1 Απεικόνιση SAR στη διεύθυνση πλάγιων αποστάσεων (slant-range).....	14
1.5.4.2 Ανάλυση Απεικόνισης στη Διεύθυνση του Αζιμουθίου.....	15
1.6 Χαρακτηριστικά στόχων.....	16
1.6.1 Ιδιότητες στόχων.....	16
1.6.1.1 Τραχύτητα.....	16
1.6.1.2 Σχήμα-Προσανατολισμός.....	17
1.6.1.3 Τοπική γωνία πρόσπτωσης (local incidence angle).....	17
1.6.1.4 Διηλεκτρικές ιδιότητες.....	17
1.6.1.5 Διαπεραστικότητα.....	18
1.6.2 Ενεργός διατομή RADAR.....	18
1.6.3 Η εξίσωση του RADAR.....	19
1.7 Επεξεργασία SAR (SAR processing).....	19
1.8 Γεωμετρικές Παραμορφώσεις Απεικονίσεων SAR.....	23
1.8.1 Σμίκρυνση.....	23
1.8.2 Πτύχωση.....	24

1.8.3 Σκίαση	24
1.9 Ιδιότητες των RADAR απεικονίσεων.....	24
1.9.1 Η Κηλίδωση.....	24
1.10 Τρόποι Λήψης Δεδομένων από RADAR Συνθετικού Ανοίγματος-Τεχνικές.....	26
1.11 Σύνοψη.....	28
Κεφάλαιο 2 Συμβολομετρία Απεικονίσεων SAR.....	29
2.1 Εισαγωγή.....	30
2.2 Μορφές συμβολομετρίας.....	31
2.2.1 Συμβολομετρία μιας Διέλευσης (Single Pass Interferometry)	31
2.2.2 Επαναληπτική Συμβολομετρία (Repeat Pass Interferometry)	32
2.2.3 Συμβολομετρία κατά Πλάτος (Across Track Interferometry)	32
2.2.4 Συμβολομετρία κατά Μήκος (Along Track Interferometry)	33
2.2.5 Διαφορική Συμβολομετρία (Differential Interferometry)	34
2.2.6 Συμβολομετρία Πολωμένων Απεικονίσεων (Polarimetric Interferometry SAR).....	35
2.3 Γεωμετρία λήψης.....	36
2.4 Βήματα συμβολομετρικής διαδικασίας	40
2.4.1. Υπολογισμός της γεωμετρικής βάσης (Baseline estimation)	41
2.4.2. Φασματική επεξεργασία	41
2.4.3. Συμπροσαρμογή απεικονίσεων (Coregistration)	42
2.4.4. Δημιουργία διαγράμματος κροσσών συμβολής (συμβολόγραμμα) (Interferogram Generation).....	44
2.4.5. Αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης (Flat earth removal)	48
2.4.6. Φιλτράρισμα του συμβολογράμματος (Adaptive filtering)	49
2.4.7. Δημιουργία εικόνας συνάφειας (Coherence generation).....	50
2.4.8. Αποκατάσταση της φάσης (Phase unwrapping).....	51
2.4.8.1. Μέθοδοι ολοκλήρωσης (Path-following methods)	52
2.4.8.2. Γενικευμένες μέθοδοι.....	53
2.4.8.3. Άλλες μέθοδοι.....	54
2.4.9. Επαναπροσδιορισμός της βάσης, με χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων (Baseline refinement)	55
2.4.10. Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο (Phase to height conversion)	56
2.4.11. Γεωκωδικοποίηση (Geocoding)	57
2.5 Περιοριστικοί παράγοντες της τεχνικής της συμβολομετρίας.....	61
2.5.1 Χρονική Αποσυσχέτιση	61

2.5.2 Γεωμετρική (Χωρική) Αποσυσχέτιση	62
2.5.3 Τροχιά	63
2.5.4 Ατμόσφαιρα	63
2.5.5 Παραμορφώσεις του εδάφους.....	68
2.5.6 Επεξεργασία.....	69
2.6 Μελλοντικές προοπτικές της τεχνικής της συμβολομετρίας	69
Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση Βιομάζας με τη χρήση δεδομένων SAR	73
3.1 Εισαγωγή.....	74
3.2 Ιδιότητες απεικονίσεων SAR για την εκτίμηση βιομάζας.....	74
3.3 Προσεγγίσεις με βάση το συντελεστή οπισθοσκέδασης	75
3.4 Ρόλος της συνάφειας στη διαδικασία εκτίμησης της βιομάζας από δεδομένα SAR.....	77
3.5 Προσεγγίσεις βασισμένες στην υφή μιας απεικόνισης SAR.	78
3.6 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR	78
3.7 Εκτίμηση της βιομάζας με τη τεχνική της συμβολομετρίας πλήρως πολωμένων απεικονίσεων SAR	80
3.8 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της Τομογραφίας απεικονίσεων SAR	81
3.9 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της ρανταργραμμετρίας	82
3.10 Περιοριστικοί παράγοντες των προσεγγίσεων εκτίμησης βιομάζας που χρησιμοποιούν δεδομένα SAR	82
3.10.1 Κορεσμός	82
3.10.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες.....	83
3.10.3 Τοπογραφία	84
3.10.4 Δασικός τύπος.....	84
3.10.5 Κλίμακα μελέτης	84
3.10.6 Μεταφερισμότητα μοντέλων	84
3.10.7 Γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας.....	84
3.10.8 Διαφορές των δεδομένων	85
3.11 Σύνοψη.....	85
Κεφάλαιο 4 Εφαρμογή.....	86
4.1 Ορισμός του προβλήματος	87
4.2 Τεχνικές παρατήρησης δασικών βιοφυσικών παραμέτρων	87
4.3 Λογισμικό	88
4.4 Περιοχή μελέτης	89
4.5 Περιγραφή δεδομένων	90

4.5.1 Απεικονίσεις ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)	91
4.5.2 Απεικονίσεις COSMO-SkyMed	92
4.5.3 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς	93
4.5.4 Επίγεια δεδομένα	94
4.6 Ανάπτυξη της μεθοδολογίας	95
4.6.1 Σήμα SAR και δασική κομοστέγη	95
4.6.2 Υπάρχουσες μεθοδολογίες	96
4.6.3 Διαμόρφωση της μεθοδολογίας	99
4.7 Περιγραφή της μεθοδολογίας	100
4.7.1 Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	100
4.7.1.1 Υπολογισμός βάσης	101
4.7.1.2 Συμπροσαρμογή απεικονίσεων	101
4.7.1.3 Δημιουργία και φιλτράρισμα του συμβολογράμματος	101
4.7.1.4 Αφαίρεση όρου της επίπεδης γης	103
4.7.1.5 Δημιουργία εικόνας συνάφειας	103
4.7.1.6 Αποκατάσταση της φάσης	104
4.7.1.7 Επαναπροσδιορισμό της βάσης με χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων	104
4.7.1.8 Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο και γεωκωδικοποίηση	104
4.7.2 Υπολογισμός συμβολομετρικού ύψους	105
4.8 Παρουσίαση παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	106
4.9 Εκτίμηση ακρίβειας παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	107
4.10 Αξιολόγηση εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης	113
4.10.1 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα	116
4.10.2 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης	117
4.10.3 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές	118
4.10.4 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης	120
Κεφάλαιο 5 Βασικές διαπιστώσεις της εφαρμογής	122
5.1 Συμπεράσματα	123
5.2 Περιορισμοί και πλεονεκτήματα της μεθόδου (προτεινόμενης μεθοδολογίας)	125
5.3 Προτάσεις	126
Βιβλιογραφία	128

Πίνακας Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα Πηγή: www.earth.esa.int</i>	3
Εικόνα 1.2 Τηλεπισκοπικοί δέκτες Α. Παθητικοί Β. Ενεργητικοί Πηγή: www.eijournal.com	4
Εικόνα 1.3 Εικόνα SEASAT (L-band HH) του ωκεανού Νοτιοανατολικά της νήσου Nantucket στις 27 Αυγούστου 1978.Πηγή Evans 1995	5
Εικόνα 1.4 Αρχή λειτουργίας συστήματος SAR Πηγή: www.dlr.de	8
Εικόνα 1.5 Κυματομορφή Chirp Πηγή: www.esa.int	14
Εικόνα 1.6 Διαπεραστικότητα μικροκυμαρικής ακτινοβολίας Πηγή: www.esa.int	18
Εικόνα 1.7 Πίνακας αρχικών δεδομένων (raw data) Πηγή:	20
<i>Εικόνα 1.8 Επεξεργασία SAR Πηγή: Moreira et al., 2013</i>	21
<i>Εικόνα 1.9 Γεωμετρικές παραμορφώσεις Πηγή: Jensen 2000</i>	23
Εικόνα 1.10 Φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: Moreira et al., 2013	24
Εικόνα 1.11 Μείωση της κηλίδωσης με την επεξεργασία πολλαπλών όψεων (multi-look) (α) Χωρίς multi-look (b) multi-look 2x2 (c) multi-look 4x4 (d) multi-look 8x8 Πηγή: Moreira et al., 2013	25
Εικόνα 1.12 Τρόποι λήψης δεδομένων από συστήματα SAR Πηγή: Moreira et al., 2013	26
<i>Εικόνα 2.1 Γεωμετρία κατά πλάτος συμβολομετρίας Πηγή: Ouchi, 2013</i>	32
<i>Εικόνα 2.2 Γεωμετρία κατά μήκος συμβολομετρίας Πηγή:Ouchi, 2013</i>	33
Εικόνα 2.3 Φασματική ανακλαστικότητα απεικονίσεων SAR στη διεύθυνση του αζιμουθίου Πηγή: Carasco, 1998	42
<i>Εικόνα 2.4 Σημεία σταθερών σκεδαστών πάνω σε ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο επιφανείας Πηγή:Gernhardt & Bamler, 2010</i>	71
Εικόνα 4.1 Πάνω: Περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας ως εικόνα αναφοράς μια απεικόνιση Landsat 8 στο σύστημα αναφοράς WGS 84 Δεξιά: Μεγέθυνση της περιοχής μελέτης	89
Εικόνα 4.2 Απεικόνιση slc από το σύστημα ALOS PALSAR	91
Εικόνα 4.3 Απεικόνιση slc από το σύστημα COSMO-Skymed	92
Εικόνα 4.4 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς απο τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.	93
Εικόνα 4.5 Επίγειες παρατηρήσεις στη περιοχή μελέτης	94
Εικόνα 4.6 Παραγόμενο συμβολόγραμμα απεικονίσεων ALOS PALSAR	102
Εικόνα 4.7 Παραγόμενο συμβολόγραμμα απο τις απεικονίσεις COSMO-Skymed	102
Εικόνα 4.8 Εικόνες συνάφειας με τα ιστογράμματα τους: Αριστερά :ALOS PALSAR Δεξιά: COSMO-Skymed	103
Εικόνα 4.9 Τρόπος προσδιορισμού του συμβολομετρικού ύψους	105
Εικόνα 4.10 Παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα με τη τεχνική της συμβολομετρίας	107
Εικόνα 4.11 Εικόνες ακρίβειας παραγόμενων συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	110
Εικόνα 4.12 Παραγωγή του χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος	111
Εικόνα 4.13 Εκτίμηση ύψους δασικής κομοστέγης	113
Εικόνα 4.14 Σχέση γωνία πρόσπτωσης και διαπεραστικότητας	114
Εικόνα 4.15 Χωρική κατανομή σημείων επίγειων μετρήσεων δασικού ύψους κομοστέγης	116
Εικόνα 4.16 Περιοχή βέλτιστων κλίσεων και σημεία επίγειων μετρήσεων	117
<i>Εικόνα 4.17 Προϊόντα καθορισμού χέρσων περιοχών</i>	118
Εικόνα 4.18 Καθορισμός χέρσων περιοχών (κίτρινες)	119
Εικόνα 4.19 Προϊόντα για τον καθορισμό του πολυγώνου πυκνής βλάστησης	120
Εικόνα 4.20 Ιστόγραμμα για το πολύγωνο πυκνής δασικής βλάστησης	120

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Τυπικό σύστημα RADAR Πηγή: Chan & Koo 2008.....	7
Σχήμα 1.2 Γεωμετρία απεικόνισης SAR Πηγή: Moreira et al., 2013.....	10
Σχήμα 1.3 Κεραία συστήματος SAR Πηγή: ocw.mit.edu	12
Σχήμα 1.4 Γεωμετρία σχηματισμού συνθετικού ανοίγματος Πηγή: www.esa.int.....	13
Σχήμα 1.5 Ιστορικό Doppler ενός σημειακού στόχου Πηγή: www.esa.int.....	13
Σχήμα 1.6 Τραχύτητα επιφάνειας Πηγή: www.esa.int.....	16
Σχήμα 1.7 Γωνιακή σκέδαση (double-bounce scattering) Πηγή: www.esa.int	17
Σχήμα 1.8 Σκέδαση όγκου (volume scattering) Πηγή: www.esa.int	17
Σχήμα 2. 1 Γεωμετρία συμβολομετρίας Πηγή: Catani et al., 2005.....	37
Σχήμα 2. 2 Γεωμετρία συμβολομετρίας (σημεία ίσου υψόμετρου)	39
Σχήμα 2. 3 Γεωμετρία Συμβολομετρία (σημεία ίδιας πλάγιας απόστασης)	40
Σχήμα 2. 4 Διάγραμμα ροής συμπροσαρμογής απεικονίσεων SAR Πηγή: Li & Bethel 2008.....	43
Σχήμα 2. 5 Γεωμετρική συνθήκη Πηγή: Catani et al., 2005.....	46
Σχήμα 2. 6 Επιλογή σημείων με διαφορετικό υψόμετρο για τον υπολογισμό της πολυωνυμικής σχέσης Πηγή: Carrasco, 1998.....	57
Σχήμα 2. 7 Γεωμετρική απεικόνιση της πλάγιας απόσταση σε σχέση με το ελλειψοειδές Πηγή: Καραθανάση, 2012	58
Σχήμα 2. 8 Γεωμετρία γεωμετρικής γραμμής βάσης Πηγή: www.esa.int.....	62
Σχήμα 2. 9 Σχέση πίεσης(πάνω αριστερά), θερμοκρασία(πάνω δεξιά), σχετικής υγρασίας(κάτω) με το σφάλμα της συμβολομετρικής φάσης. Πηγή:Al Jassar & Rao 2011.....	64
Σχήμα 3. 1 Προσεγγίσεις που βασίζονται στην οπισθοσκέδαση	75
Σχήμα 3. 2 Συμβολομετρία πλήρως πολωμένων απεικονίσεων SAR Πηγή: www.esa.int	80
Σχήμα 3. 3 Γεωμετρία τομογραφίας απεικονίσεων SAR Πηγή:www.esa.int	81
Σχήμα 3. 4 Γεωμετρία της Ρανταγραμμετρίας Πηγή: Vastaranta et al., 2012.....	81
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου.....	99
Σχήμα 4.2 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.....	111
Σχήμα 4.3 Σχέση των κλίσεων της περιοχής μελέτης με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων	112
Σχήμα 4.4 Σύγκριση εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης	116
Σχήμα 4.5 Αξιολόγηση του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα για τις βέλτιστες κλίσεις.....	117
Σχήμα 4.6 Ιστόγραμμα για τις χέρσες περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος	119

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Δορυφορικοί αισθητήρες SAR Πηγή: Moreira et al., 2013	6
Πίνακας 1.2 Μπάντες συχνοτήτων συστημάτων SAR Πηγή: Moreira et al., 2013	9
Πίνακας 1.3 Πεδία εφαρμογών των δεδομένων SAR.....	28
Πίνακας 2. 1 Λογισμικά πακέτα για την υλοποίηση της συμβολομετρικής διαδικασίας Πηγή: Zhou et al., 2009	31
Πίνακας 2. 2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των προϊόντων της συμβολομετρίας Πηγή: Gens & Genderen 1996.....	61
Πίνακας 3. 1 Ευαισθησία των καναλιών SAR στις συνιστώσες της βλάστησης Πηγή: Luckman et al., 1997, Ghasemi et al., 2010	73
Πίνακας 4. 1 Τηλεπισκοπικές τεχνικές για τη μελέτη δασικών εκτάσεων	87
Πίνακας 4. 2 Μελέτη ακρίβειας παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα μπάντας Χ από αερομεταφερόμενα συστήματα SAR	97
Πίνακας 4. 3 Ακρίβεια παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από δεδομένα Χ μπάντας σε σχέση με το είδος του δάσους, τα δεδομένα SAR και τα δεδομένα αναφοράς	98
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα αξιολόγησης.....	108
Πίνακας 4. 5 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.....	111
Πίνακας 4. 6 Σχέση των κλίσεων με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.....	112

Περίληψη

Η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων (SAR) πλέον είναι μια σημαντική και καλά εδραιωμένη τηλεπισκοπική τεχνική που επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό γεωφυσικών παραμέτρων. Η τεχνική της συμβολομετρίας αξιοποιώντας της διαφορά της φάσης δυο απεικονίσεων radar παρέχει ακριβείς υψομετρικές μετρήσεις. Η συνεχής βελτίωση της τεχνικής της συμβολομετρίας SAR και η ανάπτυξη νέων συστημάτων SAR αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τις πιθανές χρήσεις της τεχνικής. Τη τελευταία δεκαετία, η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR έχει προκαλέσει το επιστημονικό ενδιαφέρον και αποτελεί αξιόπιστη τεχνική εκτίμησης δασικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, το δασικό ύψος κομοστέγης που μπορεί να εκτιμηθεί με τη τεχνική της συμβολομετρίας αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την ποσοτικοποίηση του γήινου κύκλου του άνθρακα.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάει τη χρήση της επαναληπτικής συμβολομετρίας στη περιοχή του Ταξιάρχη στη Χαλκιδική, με τη χρήση δεδομένων μπάντας L με πόλωση HH (ALOS PALSAR) και μπάντας X με πόλωση HH (COSMO Skymed). Η συμβολομετρική επεξεργασία των δεδομένων SAR έχει σαν αποτέλεσμα τη παραγωγή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων και στη συνέχεια την εξαγωγή της πληροφορίας του δασικού ύψους κομοστέγης. Εξετάζεται το φαινόμενο της εξάρτησης του μήκους κύματος με τη διαπερατικότητα μέσα στη δασική κομοστέγη με στόχο την χαρτογράφηση του δασικού ύψους κομοστέγης χρησιμοποιώντας συμβολομετρίας διπλής συχνότητας (μπάντες L,X). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη γεωμετρική διαφορά των κέντρων φάσης σκέδασης στα διαφορετικά μήκη κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Περιλαμβάνει την παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους κάτω από τη δασική κομοστέγη με την χρήση επαναληπτικής συμβολομετρίας των δεδομένων SAR μπάντας L (ALOS PALSAR). Στη συνέχεια το συγκεκριμένο υψομετρικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί ο όρος του εδάφους από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που παράγεται με τη χρήση επαναληπτικής συμβολομετρίας των δεδομένων SAR μπάντας X (COSMO Skymed) με τελικό στόχο την εξαγωγή της πληροφορίας του δασικού ύψους. Συμπερασματικά, το εκτιμώμενο ύψος δασικής κομοστέγης είναι μικρότερο από το πραγματικό λόγω της διαπερατικότητας της μικροκυματικής ακτινοβολίας μπάντας X.

Τέλος, τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα αξιολογούνται χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο καλύτερης ακρίβειας και με επίγειες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης συγκρίνονται με τα επίγεια δεδομένα με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα να είναι 6.9 μέτρα. Η αξιολόγηση του χάρτη ύψους δασικής κομοστέγης υλοποιείται χρησιμοποιώντας ένα χάρτη κλίσεων και μια εικόνα Landsat 8. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία διασφαλίζει ότι η συγκεκριμένη προτεινόμενη μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του δασικού ύψους κομοστέγης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και για διάφορους δασικού τύπους, παρέχοντας μια εναλλακτική λύση με βάση τις υπάρχουσες τεχνικές.

Abstract

Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) is a powerful and well-established remote sensing technique that enables the highly accurate measurement of important geophysical parameters. SAR interferometry compares the phase of two complex radar images for highly accurate elevation measurements. The continuous improvement of InSAR technique and the development of new SAR systems increases the accuracy of the results and the potential uses of the technique. Synthetic aperture radar interferometry techniques have gained traction in last decade as a viable technology for vegetation parameter estimation. Forest canopy height can be estimated with InSAR which is critical parameter for quantifying the terrestrial carbon cycle.

This thesis discusses the use of repeat pass interferometry with ALOS PALSAR (L band) HH polarized and COSMO Skymed (X band) HH polarized acquisitions over Taksiarxis, Chalkidiki, Greece in order to produce accurate DEMs through the interferometric processing and additionally the outcome estimation of canopy height. The effect of wavelength-dependent penetration depth into the canopy is known to be strong, and could potentially lead to forest canopy height mapping using dual-wavelength SAR interferometry at X- and L-band. The method is based on scattering phase center separation at different wavelengths. It involves the generation of a terrain elevation model underneath the forest canopy from repeat-pass L-band InSAR data. The terrain model is then used to remove the terrain component from the repeat pass interferometric X-band elevation model to estimate forest canopy height. This height is known to be considerably lower than the tree height as a result of penetration of microwaves into the canopy that can be significant even at X-band.

The produced DEMs by interferometric processing have been evaluated using DEM with better accuracy and field measurements. The canopy height results are compared to a field survey with root mean square error (RMSE) 6.9m . The validation of the canopy height estimation map has been performed using slope map and Landsat 8 image. This thesis confirms that the proposed methodology is well suited to derive canopy height over large geographic areas and varied vegetation types, providing an alternative to existing techniques.

Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη εργασία είχε ως κίνητρο την αξιοποίηση και αξιολόγηση των εξελιγμένων συστημάτων SAR (COSMO-skymed, ALOS PALSAR) ως προς την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας της τεχνικής της συμβολομετρίας διπλής συχνότητας δορυφορικών απεικονίσεων SAR σχετικά με την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης στην περιοχή του Ταξιάρχη στη Χαλκιδική.

Ειδικότεροι στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι:

- Ο προσδιορισμός της υψομετρικής ακρίβειας του ύψους δασικής κομοστέγης χρησιμοποιώντας το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από τις απεικονίσεις COSMO-Skymed και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR.
- Η διερεύνηση της ορθότητας του συμβολομετρικού ύψους σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.
- Η αξιολόγηση του εκτιμώμενου δασικού ύψους σε σχέση με την εικόνα συνάφειας, τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης, και τη δασική κάλυψη (χέρσες περιοχές, πολύγωνο πυκνής βλάστησης).

Παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας που περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια με το ακόλουθο περιεχόμενο.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια επισκόπηση της θεωρία των συστημάτων SAR. Αρχικά γίνεται μια περιγραφή των συγκεκριμένων μικροκυματικών συστημάτων. Αναλύονται οι σημαντικότεροι παράμετροι ενός συστήματος SAR και εξετάζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά των στόχων. Τέλος, αναφέρονται οι σημαντικότερες ιδιότητες και παραμορφώσεις των απεικονίσεων SAR.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** πραγματεύεται το αντικείμενο της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική μελέτη που έγινε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και σχετίζεται με την εκτίμηση της βιομάζας από δεδομένα SAR.

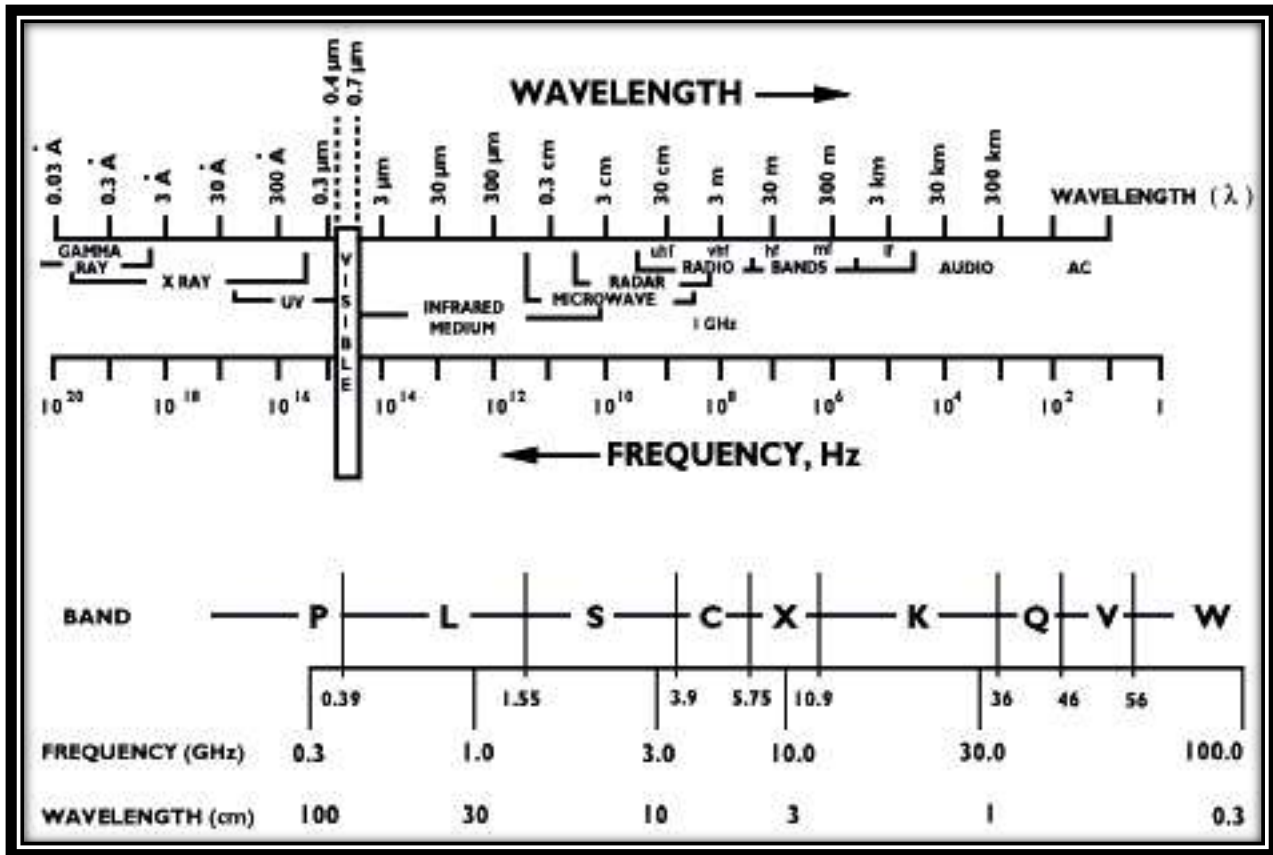
Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και το λογισμικό ενώ γίνεται λεπτομερής αναφορά στην επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης γίνεται εκτενής παρουσίαση και σχολιασμός της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν από την ενασχόληση με το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 1 Επισκόπηση της θεωρίας

1.1 Μικροκυματική τηλεπισκόπηση

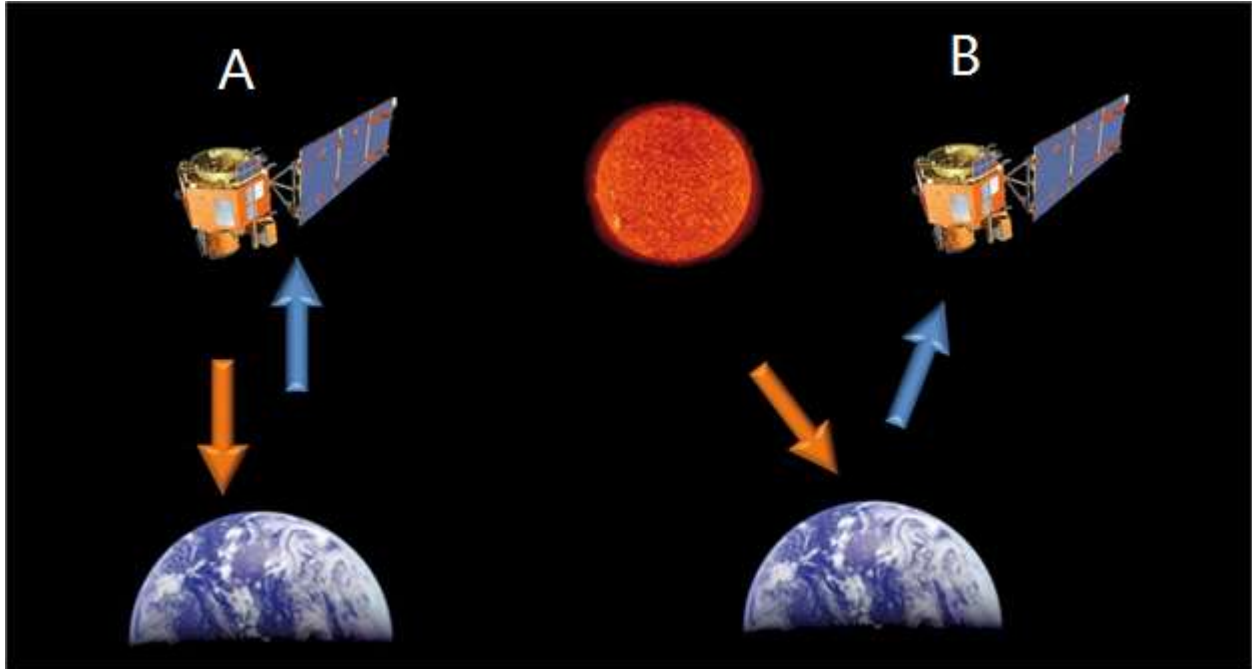
Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση είναι εκείνη η περιοχή της Τηλεπισκόπησης η οποία με τη χρήση παθητικών ή/και ενεργητικών δεκτών ανιχνεύει, αναγνωρίζει, διερευνά και επιτηρεί αντικείμενα στη γήινη επιφάνεια, βασιζόμενη στις χαρακτηριστικές οπτικές ιδιότητες τους στη μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα φαίνεται στην εικόνα 1.1 και όπως φαίνεται χωρίζεται σε επτά επιμέρους κύριες ζώνες. Οι ζώνες είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η υπεριώδης ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία, οι ακτίνες Χ, και οι ακτίνες γ. Σημειώνεται ότι τα όρια των ζωνών δεν είναι αυστηρά καθορισμένα.



Εικόνα 1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα Πηγή: www.earth.esa.int

Η μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αντιστοιχεί σε ακτινοβολία με μήκος κύματος μεταξύ 0.1 και 100 cm ή με συχνότητες 0.3 με 300 GHz. Η προσέλκυση του επιστημονικού ενδιαφέροντος οφείλεται στο γεγονός ότι οι καιρικές και οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη μικροκυματική ακτινοβολία συγκριτικά με την ακτινοβολία στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στη μικροκυματική τηλεπισκόπηση οι ιδιότητες του στόχου (διηλεκτρική σταθερά, ομαλότητα, γεωμετρία κ.α.) όπως επίσης και οι παράμετροι του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (μήκος κύματος, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης κ.α.) καθορίζουν τη ποσότητα σκεδαζόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας που απεικονίζεται στα παραγόμενα προϊόντα.

Οι τηλεπισκοπικοί δέκτες/αισθητήρες διακρίνονται σε παθητικούς και ενεργητικούς ανάλογα με τη πηγή της ενέργειας που καταγράφουν. Οι παθητικοί δέκτες μετρούν την ενέργεια (ένταση της ακτινοβολίας) των στόχων που προέρχεται από την απ' ευθείας ανάκλαση της ακτινοβολίας από τον ήλιο (ορατό) είτε από τη φυσική εκπομπή της ενέργειας των σωμάτων που έχουν αυτά απορροφήσει (θερμικό υπέρυθρο). Οι ενεργητικοί δέκτες έχουν αυτόνομη πηγή ενέργειας όπου εκπέμπουν ακτινοβολία προς ένα ορισμένο στόχο και καταγράφεται η επιστροφή της. Τα ενεργητικά συστήματα τηλεπισκόπησης μπορούν να παρέχουν μετρήσεις οποιαδήποτε στιγμή με κόστος τη μεγάλη απαίτηση της ενέργειας για τον επαρκή φωτισμό του στόχου.



Εικόνα 1.2 Τηλεπισκοπικοί δέκτες Α. Παθητικοί Β. Ενεργητικοί Πηγή: www.eijournal.com

- Παθητικοί μικροκυματικοί δέκτες

Όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν μια ορισμένη ποσότητα μικροκυματικής ενέργειας. Ένας παθητικός μικροκυματικός δέκτης καταγράφει την εκπεμπόμενη μικροκυματική ενέργεια ή/και την ανακλώμενη από τα σώματα ηλιακή μικροκυματική ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη ενέργεια σχετίζεται με τη θερμοκρασία και την υγρασία του εξεταζόμενου αντικειμένου ή της επιφάνειας. Οι παθητικοί μικροκυματικοί δέκτες διακρίνονται σε ραδιόμετρα και σε όργανα σάρωσης επιφανειών.

- Ενεργοί μικροκυματικοί δέκτες

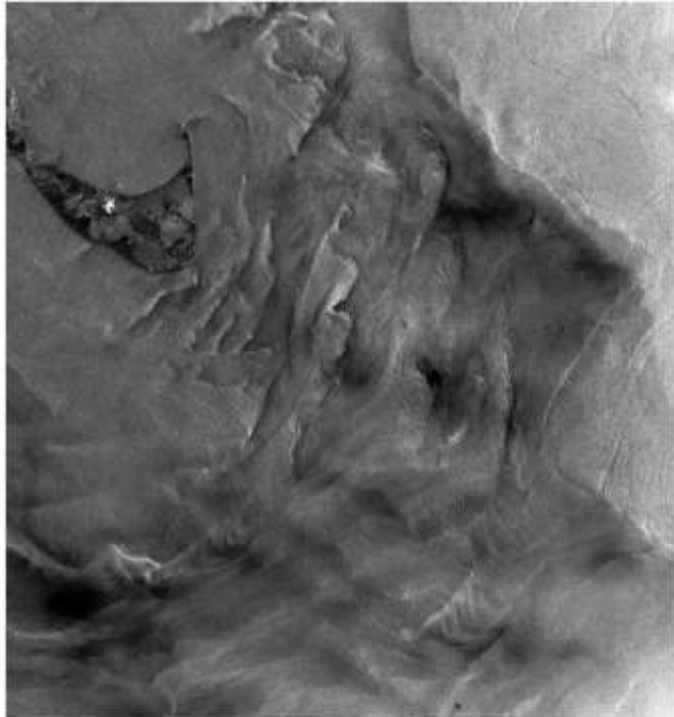
Οι ενεργοί μικροκυματικοί δέκτες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Σε αυτούς που το παραγόμενο προϊόν είναι εικόνα και σε αυτούς που δεν παράγουν εικόνα. Ο πιο γνωστός και συνηθής ενεργός μικροκυματικός δέκτης εικονοληπτικών δεδομένων είναι το RADAR (Radio Detection And Ranging). Ο δέκτης RADAR εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα (παλμό) στη περιοχή των μικροκυμάτων προς ένα στόχο και εν συνέχεια καταγράφει το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Η ένταση του οπισθοσκεδαζόμενου παλμού επιτρέπει τη διάκριση διαφορετικών στόχων και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου παλμού επιτρέπει τον υπολογισμό της απόστασης δέκτη στόχου.

Άλλοι ενεργοί μικροκυματικοί δέκτες είναι τα αλτίμετρα RADAR και τα σκεδασόμετρα. Τα αλτίμετρα RADAR συστήματα υπολογίζουν την απόσταση του στόχου από το δέκτη με βάση το χρονικό διάστημα από την εκπομπή μέχρι τη λήψη του μικροκυματικού παλμού. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν κατακόρυφη διεύθυνση σκόπευσης και υπολογίζεται το υψόμετρο του στόχου όταν είναι γνωστό το ύψος πτήσης της πλατφόρμας. Οι πλατφόρμες αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι αερομεταφερόμενες ή δορυφορικές. Τα σκεδασόμετρα χρησιμοποιούνται για το ακριβή προσδιορισμό της οπισθοσκεδαζόμενης ενέργειας από διάφορους στόχους. Το ποσό της οπισθοσκεδαζόμενης ενέργειας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τραχύτητα) και τη γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις πάνω από θαλάσσιες επιφάνειες παρέχουν εκτιμήσεις σχετικά με τη ταχύτητα των ανέμων ενώ πάνω από χερσαίες επιφάνειες παρέχουν πληροφορίες σχετικά τα υλικά και τα χαρακτηριστικά τους. Συμπερασματικά, οι ενεργοί μικροκυματικοί δέκτες εκτός από τα συστήματα RADAR παρέχουν μετρήσεις σε μία διάσταση.

1.2 Ιστορική αναδρομή στα συστήματα RADAR

Τα συστήματα RADAR αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1920 σαν εργαλείο αναγνώρισης πλοίων και αεροσκαφών. Το 1922, παρουσιάστηκε το πρώτο σύστημα RADAR με συνεχής κυματομορφή από τον Taylor. Το 1934 αναπτύχθηκε το πρώτο παλμικό σύστημα RADAR με συχνότητα λειτουργίας 60 MHz από το Naval Research Laboratory (NRL) στις Η.Π.Α. Την ίδια χρονική περίοδο (δεκαετία του 1930) αναπτύχθηκαν συστήματα RADAR για τη παρακολούθηση και τον εντοπισμό αεροσκαφών από τη

Μεγάλη Βρετανία και τη Γερμανία. Η μικρή διακριτική ικανότητα των απεικονίσεων RADAR στη διεύθυνση του αζιμουθίου ήταν η βασική αιτία για την ανάπτυξη των συστημάτων SAR. Τα συστήματα SAR αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1950 ως εργαλείο αναγνώρισης για στρατιωτικούς σκοπούς λόγω της ανεξαρτησίας τους από τις καιρικές/ατμοσφαιρικές συνθήκες και το φως του ήλιου. Τα συστήματα SAR αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α. το 1951 από τον Carl Wiley στην εταιρεία Goodyear Aircraft όπου παρατήρησε ότι κάθε αντικείμενο που βρίσκεται σε μια σκηνή έχει διαφορετική σχετική ταχύτητα με τη κεραία, άρα και διαφορετική σχετική μετατόπιση Doppler του επιστρεφόμενου κύματος. Τέλος συμπέρανε ότι αναλύοντας τις συχνότητες των επιστροφών είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εικόνες με καλή διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Το 1952, ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Illinois χρησιμοποιώντας μια αερομεταφερόμενη πλατφόρμα με παλμικό σύστημα RADAR μπάντας Χ παρήγαγαν την πρώτη απεικόνιση strip-map και ανέπτυξαν τη τεχνολογία του beam sharpening. Το 1953 το πανεπιστήμιο του Michigan καθόρισε τη χρησιμότητα ενός συστήματος SAR χρησιμοποιώντας όλο το ιστορικό των μετατοπίσεων Doppler και όχι ένα μικρό μέρος του. Το υπολογιστικό κόστος ήταν πολύ μεγάλο εκείνη την εποχή και η πρώτη απεικόνιση SAR δημιουργήθηκε από την ομάδα το 1957. Η



Εικόνα 1.3 Εικόνα SEASAT (L-band HH) του ωκεανού Νοτιοανατολικά της νήσου Nantucket στις 27 Αυγούστου 1978. Πηγή Evans 1995

σημαντικότερη συνεργασία έγινε το 1974 από μηχανικούς από το Jet Propulsion Laboratory (JPL) της National Aeronautics and Space Administration (NASA) με επιστήμονες από τη National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) για τη μελέτη των ωκεανών με ένα δορυφορικό σύστημα SAR. Από τη παραπάνω συνεργασία, τον Ιούνιο του 1978 εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος SEASAT όπου αποτελεί το πρώτο δορυφορικό σύστημα SAR. Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις δορυφορικές αποστολές που έχουν συστήματα SAR μέχρι σήμερα.

Αισθητήρας	Λειτουργία	Συχνότητα (Πόλωση)	Ινστιτούτο, Χώρα
Seasat	1978	L(HH)	NASA/JPL, ΗΠΑ
ERS-1/2	1991-2000/ 1995-2011	C(VV)	ESA, Ευρώπη
J-ERS-1	1992-1998	L(HH)	JAXA, Ιαπωνία
SIR-C/X-SAR	Απρίλιος και Οκτώβριος του 1994	L & C (quad) X(VV)	NASA/JPL, ΗΠΑ DLR, Γερμανία ASI, Ιταλία
Radarsat-1	1995-σήμερα	C(HH)	CSA, Καναδάς
SRTM	Φεβρουάριος του 2000	C(HH+VV) και X(VV)	NASA/JPL, ΗΠΑ DLR, Γερμανία ASI, Ιταλία
ENVISAT-ASAR	2002-2012	C(dual)	ESA, Ευρώπη
ALOS PALSAR	2006-2011	L(quad)	JAXA, Ιαπωνία
TerraSAR-X/ TanDEM-X	2007-σήμερα 2010-σήμερα	X(quad)	DLR/Astrium, Γερμανία
Radarsat-2	2007-σήμερα	C(quad)	CSA, Καναδάς
COSMO-skymed- 1/4	2007..2010- σήμερα	X(quad)	ASI/MiD, Ιταλία
RISAT-1	2012-σήμερα	C(quad)	IRSO, Ινδία
H1-1C	2012-σήμερα	S(VV)	CRESDA/CAST/NRSCC, Κίνα
Kompsat-5	2013-σήμερα	X(dual)	KARI, Κορέα
PAZ	2014	X(quad)	CDTI, Ισπανία
ALOS-2	2014	L(quad)	JAXA, Ιαπωνία
Sentinel-1a/1b	2014/2015	C(dual)	ESA, Ευρώπη, EC, Ευρώπη
Radarsat Constellation-1/2/3	2018	C(quad)	CSA, Καναδάς
SAOCOM-1/2	2015/2016	L(quad)	CONAE, Αργεντινή/ASI, Ιταλία

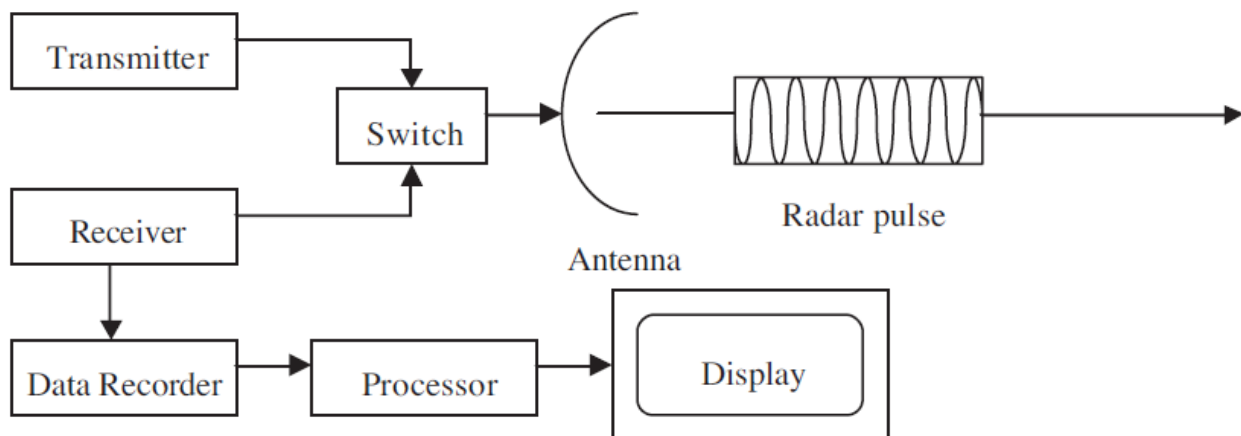
Πίνακας 1.1 Δορυφορικοί αισθητήρες SAR Πηγή: Moreira et al., 2013

1.3 Εισαγωγή στα Συστήματα SAR

Chapter 2 Σήμερα υπάρχουν περισσότεροι από 15 αισθητήρες SAR σε δορυφορικές πλατφόρμες σε λειτουργία και έχουν προγραμματιστεί 10 νέες δορυφορικές αποστολές με συστήματα SAR στα επόμενα

5 χρόνια. Η δυνατότητα λειτουργίας των συστημάτων όλο το 24ωρο αλλά και ότι δεν επηρεάζεται ο τρόπος απεικόνισης από τη νεφοκάλυψη και τις καιρικές συνθήκες είναι τα βασικότερα πλεονεκτήματα των συστημάτων SAR. Η παρακολούθηση δυναμικών διεργασιών με συνεχή τρόπο και σε παγκόσμιο επίπεδο είναι ακόμα ένα θετικό στοιχείο για την ανάπτυξη των συστημάτων SAR. Δύο βασικά στοιχεία για την κατανόηση λειτουργίας των SAR συστημάτων είναι πρώτον ότι η γεωμετρία απεικόνισης των SAR συστημάτων είναι πλευρική και ότι ένα τέτοιο σύστημα βασίζεται στο μοντέλο ενός παλμικού ραντάρ που είναι εγκατεστημένο σε μια πλατφόρμα που κινείται. Το σύστημα SAR εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς υψηλής ισχύος και λαμβάνει την ηχώ των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων με διαδοχικό τρόπο. Τυπικές τιμές για το εύρος του δείκτη PRF είναι από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες Hertz για αερομεταφερόμενα και διαστημικά συστήματα αντίστοιχα. Το πλάτος λωρίδας (swath width) κυμαίνεται από μερικά χιλιόμετρα μέχρι 20 km για αερομεταφερόμενα συστήματα και από 30 έως 500 km για διαστημικά συστήματα. Ο μεταδιδόμενος παλμός αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της γης και μόνο ένα μέρος αυτού οπισθος κεδάζεται και λαμβάνεται από την κεραία που μπορεί να είναι ίδια με την κεραία εκπομπής (μονοστατικό σύστημα) ή διαφορετική (διστατικό σύστημα). Το πλάτος και η φάση του οπισθοσκεδαζόμενου κύματος εξαρτάται από τις φυσικές (γεωμετρία, τραχύτητα, κ.α.) και τις διηλεκτρικές ιδιότητες του απεικονιζόμενου αντικειμένου. Ανάλογα με την ζώνη συχνοτήτων μπορεί να παρουσιαστεί το φαινόμενο της διείσδυσης με αποτέλεσμα τα απεικονιζόμενα αντικείμενα και μέσα να πρέπει να απεικονιστούν σαν να έχουν όγκο (volume) (βλάστηση, πάγος και χιόνι, ξηρό χώμα). Μεγαλύτερη διείσδυση των ηλεκτρομαγνητικών παλμών στα μέσα παρουσιάζεται σε συστήματα SAR που χρησιμοποιούν μεγάλα μήκη κύματος γεγονός που κάνει έντονη τη επίδραση της συμπεριφοράς του όγκου στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα.

Τα συστήματα RADAR που μπορούν να παρέχουν εικονοληπτικά δεδομένα διακρίνονται στα συστήματα συστήματα RADAR πραγματικού ανοίγματος (Real Aperture Radar RAR) και συστήματα RADAR συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar SAR) και είναι συστήματα πλευρικής όρασης (διεύθυνση όρασης σχεδόν κάθετη στη γραμμή πτήσης).



Σχήμα 1.1 Τυπικό σύστημα RADAR Πηγή: Chan & Koo 2008

Ένα τυπικό σύστημα RADAR αποτελείται από μια γεννήτρια δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικών παλμών, ένα πομπό εκπομπής (transmitter), ένα δέκτη (receiver), ένα διακόπτη (switch/duplexer) μια κεραία (antenna) και ένα ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας (processor) και καταγραφής των δεδομένων (data recorder). Η γεννήτρια δημιουργεί παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και στη συνέχεια ο πομπός

εκπέμπει τους παλμούς σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και εντός καθορισμένου εύρους της κεραίας. Η δέσμη του συστήματος RADAR "φωτίζει" την επιφάνεια υπό μια γωνία θέασης κατά τη δεξιά πλευρά της διεύθυνσης κίνησης του. Μετά την ανάκλαση ή οπισθοσκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ο δέκτης της κεραίας καταγράφει τα επιστρεφόμενα σήματα. Στη συνέχεια μετά τη καταγραφή γίνεται η επεξεργασία των επιστρεφόμενων σημάτων και η προβολή της σχηματιζόμενης απεικόνισης.



Εικόνα 1.4 Αρχή λειτουργίας συστήματος SAR Πηγή:www.dlr.de

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος RADAR (RAR-SAR) είναι η μετάδοση και η λήψη ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Το επιστρεφόμενο σήμα περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη χρονική διάρκεια μεταξύ εκπομπής και λήψης του παλμού, την ισχύς και τη φάση του επιστρεφόμενου σήματος αλλά και τη διεύθυνση λήψης. Τα καταγεγραμμένα σήματα επεξεργάζονται και δημιουργείται μια εικόνα δυο διαστάσεων που ονομάζεται πίνακας αρχικών δεδομένων (raw data). Στη συνέχεια γίνεται επιπλέον επεξεργασία της εικόνας αρχικών δεδομένων για τη σύνθεση της εικόνας single look complex (slc). Η συγκεκριμένη απεικόνιση περιέχει μιγαδικούς αριθμούς όπου το μέτρο του μιγαδικού αριθμού εκφράζει το πλάτος (amplitude) και το τόξο της εφαπτομένης του λόγου του φανταστικού προς το πραγματικό μέρος τη φάση (phase).

$$Amplitude = \sqrt{Im^2 + Re^2}$$

Το πλάτος εκφράζει το μέτρο της ανακλαστικότητας και εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του στόχου (τραχύτητα, διηλεκτρικές ιδιότητες) όσο και από τα χαρακτηριστικά του συστήματος SAR (φέρουσα συχνότητα, πόλωση ακτινοβολίας, γωνία πρόσπτωσης). Τέλος, σημειώνεται ότι το μέγεθος του πλάτους περιέχει γεωμετρική πληροφορία.

$$phase = \tan^{-1} \left(\frac{Im}{Re} \right)$$

Η φάση που προκύπτει για κάθε επιφάνεια του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο (resolution cell) είναι ένα άθροισμα όλων των φάσεων των στοιχειωδών σκεδαστών που περιέχονται σε αυτή. Η τελική τιμή της φάσης είναι ένα τυχαίο αποτέλεσμα. Παρόλ' αυτά η πληροφορία της φάσης είναι πολύτιμη και χρησιμοποιείται σε τεχνικές όπως η συμβολομετρία.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός συστήματος SAR είναι η συχνότητα και η πόλωση της.

- Συχνότητα

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος ενός συστήματος SAR μπορεί να έχει τιμές στο διάστημα [0.3cm, 2m] σύμφωνα με την Εικόνα 1.1. Οι μπάντες που χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό είναι οι L,C και X. Ανάλογα τη φύση των εφαρμογών προτείνεται χρήση απεικονίσεων διαφορετικής συχνότητας. Για δασικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται οι μπάντες P, L όπου η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να αποκτάται πληροφορία σχετικά με τις δασικές μεταβλητές. Για εφαρμογές μικρομετακινήσεων και παρακολούθησης πάγων και ωκεανών, χρησιμοποιούνται κυρίως οι μπάντες C, S, X. Για εφαρμογές παρακολούθησης χιονισμένων περιοχών χρησιμοποιούνται κυρίως οι μπάντες X και Ku. Τέλος για εφαρμογές απεικόνισης υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιούνται οι μπάντες X και Ka.

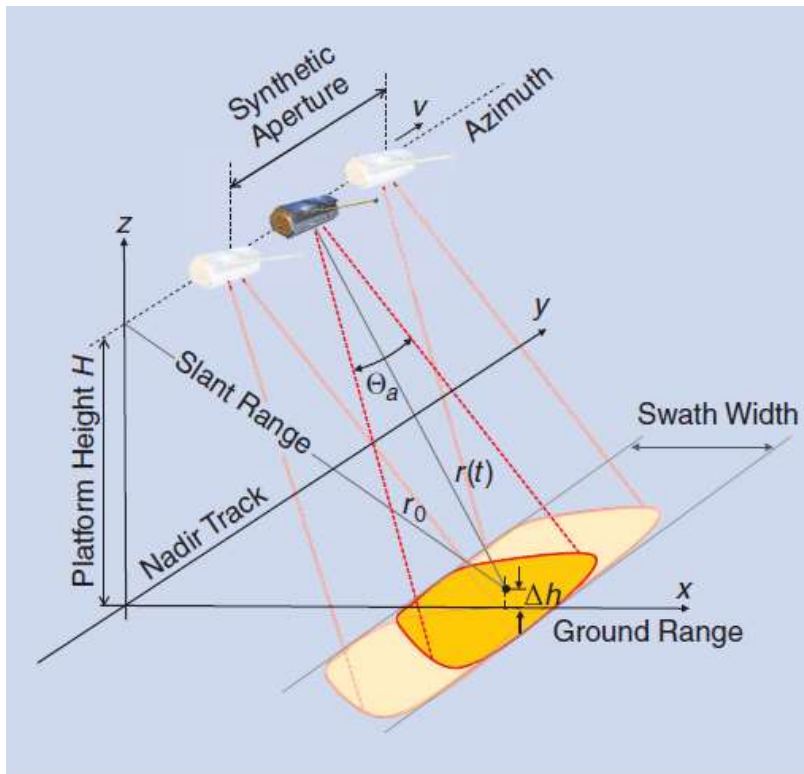
Μπάντα	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Συχνότητα (GHz)	40-24	17.6-12	12-7.5	7.5-3.75	3.75-2	2-1	0.5-0.25
Μήκος κύματος (cm)	0.75-1.2	1.7-2.5	2.5-4	4-8	8-15	15-30	60-120

Πίνακας 1.2 Μπάντες συχνότητας συστημάτων SAR Πηγή: Moreira et al., 2013

- Πόλωση

Η πόλωση ενός συστήματος SAR αναφέρεται στο προσανατολισμό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οι κύριες διευθύνσεις πόλωσης είναι η οριζόντια (H) και η κατακόρυφη (V). Οι απεικονίσεις ενός συστήματος SAR μπορούν να έχουν HH, HV, VH, VV πολώσεις. Το πρώτο γράμμα αναφέρεται στη διεύθυνση πόλωσης του εκπεμπόμενου σήματος και το δεύτερο στη διεύθυνση πόλωσης του λαμβανόμενου σήματος. Σημειώνεται ότι για διαφορετική διεύθυνση πόλωση η οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια από την ίδια επιφάνεια είναι διαφορετική.

1.4 Γεωμετρία Λήψης μιας Απεικόνισης SAR



Σχήμα 1.2 Γεωμετρία απεικόνισης SAR Πηγή: Moreira et al., 2013

Στο διπλανό σχήμα παρουσιάζεται η τυπική γεωμετρία ενός συστήματος SAR όπου η πλατφόρμα κινείται κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου και η πλάγια απόσταση είναι κάθετη την διεύθυνση της τροχιάς. Το πλάτος της λωρίδας (swath width) εκφράζει την έκταση της σκηνής ραντάρ στο έδαφος και το μήκος της λωρίδας εξαρτάται από την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ραντάρ. Η πλάγια απόσταση (slant-range) είναι το μήκος μεταξύ της κεραίας και της προβολής του εικονοστοιχείου στο έδαφος και η απόσταση ground-range το μήκος από τη προβολή της τροχιάς της πλατφόρμας στο έδαφος και της προβολής του εικονοστοιχείου στο έδαφος. Η θέση ενός στόχου είναι μια

συνάρτηση του χρόνου διέλευσης του παλμού μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου στη γήινη επιφάνεια. Επιπλέον είναι ανάλογη με την απόσταση του αισθητήρα και του στόχου. Το επίπεδο της ραντάρ απεικόνισης θεωρείται ως ένα επίπεδο όπου περιέχει τη τροχιά πτήσης της πλατφόρμας. Η προβολή ξεχωριστών σημειακών στόχων πάνω σε αυτό το επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο slant-range είναι ανάλογη με την απόσταση του αισθητήρα και η συγκεκριμένη διαδικασία προκαλεί μια μη-γραμμική συμπίεση της πληροφορίας της απεικονιζόμενης περιοχής. Το τμήμα της λωρίδας που βρίσκεται εγγύτερα στο ίχνος της τροχιάς (nadir track) ονομάζεται εγγύς πλάγια απόσταση (near range), ενώ αυτό που βρίσκεται μακρύτερα ονομάζεται απώτερη πλάγια απόσταση (far range). Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι η γωνία μεταξύ της μικροκυματικής δέσμης και της καθέτου στην επιφάνεια της γης που αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το ίχνος της τροχιάς. Η γωνία θέασης (look angle) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την εκπεμπόμενη μικροκυματική δέσμη και τη κατακόρυφο της περιοχής.

Σε μια τυχαία χρονική στιγμή t η απόσταση μεταξύ του ραντάρ που κινείται με σταθερή ταχύτητα v και ενός σημείου στο έδαφος που περιγράφεται από τις συντεταγμένες $(x,y,z)=(x_0,0,\Delta h)$ εκφράζεται με βάση το πυθαγόρειο θεώρημα από τη σχέση:

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (ut)^2} \approx r_0 + \frac{(ut)^2}{2r_0} \text{ για } ut/r_0 \ll 1$$

Κατά γενικό κανόνα η απόσταση r_0 είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την απόσταση ut κατά την διάρκεια που "φωτίζεται" ένας στόχος T_{ill} . Αυτό επιτρέπει την επέκταση της συνάρτησης της πλάγιας απόστασης $r(t)$ με την χρήση σειρών Taylor διατηρώντας μόνο τους δύο πρώτους όρους καταλήγουμε στο δεξιό μέρος της σχέσης. Η έκφραση του χρόνου (t) σχετίζεται με την κίνηση της πλατφόρμας και αναφέρεται και σαν "αργός" χρόνος. Η μεταβολή της πλάγιας απόστασης ενός στόχου συναρτήσει του χρόνου σχετίζεται με την αζιμουθιακή φάση με βάση την σχέση:

$$\varphi(t) = -4\pi r(t)/\lambda$$

Χωρίς την απώλεια της γενικότητας αν θεωρήσουμε $t=t_0=0$ τον χρόνο της πλησιέστερης προσέγγισης όπου η πλάγια απόσταση (slant-range) είναι ελάχιστη έχουμε:

$$r(t_0) = r_0 = \sqrt{(H - \Delta h)^2 + x_0^2}$$

Όπου H το ύψος της πλατφόρμας

Τέλος, η ακριβής επεξεργασία δεδομένων των συστημάτων SAR λαμβάνει υπόψη όλο το ιστορικό φάσης χωρίς τις παραπάνω προσεγγίσεις.

1.5 Παράμετροι ενός συστήματος SAR

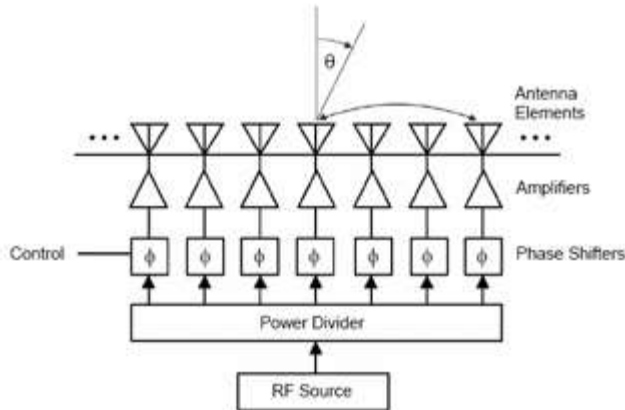
1.5.1 Κεραία

Η κεραία ενός συστήματος SAR είναι μια συστοιχία επιμέρους απλών κεραιών (phased array antenna) με στόχο την ενίσχυση του σήματος που λαμβάνεται από ένα στόχο. Κατά γενικό κανόνα όσο περισσότερα είναι τα στοιχεία μιας κεραίας δηλαδή μεγαλύτερο μήκος τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος SNR του συστήματος. Για τεχνικούς λόγους οι διαστάσεις των κεραιών των συστημάτων SAR περιορίζονται σε μερικά μέτρα.

Όπως διακρίνεται στην εικόνα 1.4 η κεραία ενός συστήματος SAR αποτελείται από :

- Γεννήτρια ηλεκτρομαγνητικών παλμών όπου παράγεται ο αρχικός παλμός.
- Διαχωριστής ενέργειας όπου διαιρείται ο αρχικός παλμός.
- Μετατροπέας φάσης
- Ενισχυτής
- Στοιχεία κεραίας

Η μετατόπιση της φάσης που υλοποιείται από το μετατροπέα της φάσης έχει στόχο την καθοδήγηση του κύριου λοβού της κεραίας ανάλογα την ενισχυτική ή αναιρετική συμβολή των επιμέρους εκπεμπόμενων σημάτων. Με το παραπάνω τρόπο ο προσανατολισμός της δέσμης μπορεί να μεταβάλλεται χωρίς να μεταβληθεί ο προσανατολισμός της κεραίας.



Σχήμα 1.3 Κεραία συστήματος SAR Πηγή: ocw.mit.edu

Στις απεικονίσεις SAR η κεραία εκπέμπει περισσότερη ισχύ στη μέση πλάγια απόσταση της λωρίδας συγκριτικά με τις κοντινότερες και τις μακρινότερες αποστάσεις. Κατά γενικό κανόνα ισχύει ότι όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της λωρίδας τόσο μειώνεται και η επιστρεφόμενη ενέργεια. Αυτό το φαινόμενο αντιμετωπίζεται διορθώνοντας το πρότυπο ακτινοβολίας της κεραίας.

Το κέδρος της κεραίας SAR είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την ικανότητα της κεραίας να κατευθύνει την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Η συνάρτηση κέδρους της κεραίας

$G(\theta, \varphi)$ περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi}{P_{in}} \cdot \frac{dP}{d\Omega}$$

Όπου P_{in} είναι η συνολική ισχύς της κεραίας και dP η στοιχειώδης αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος της κεραίας ανά στερεά γωνία $d\Omega$. Το μέγιστο κέδρος της κεραίας είναι στη διεύθυνση του κύριου λοβού και εκφράζεται από τη παρακάτω σχέση :

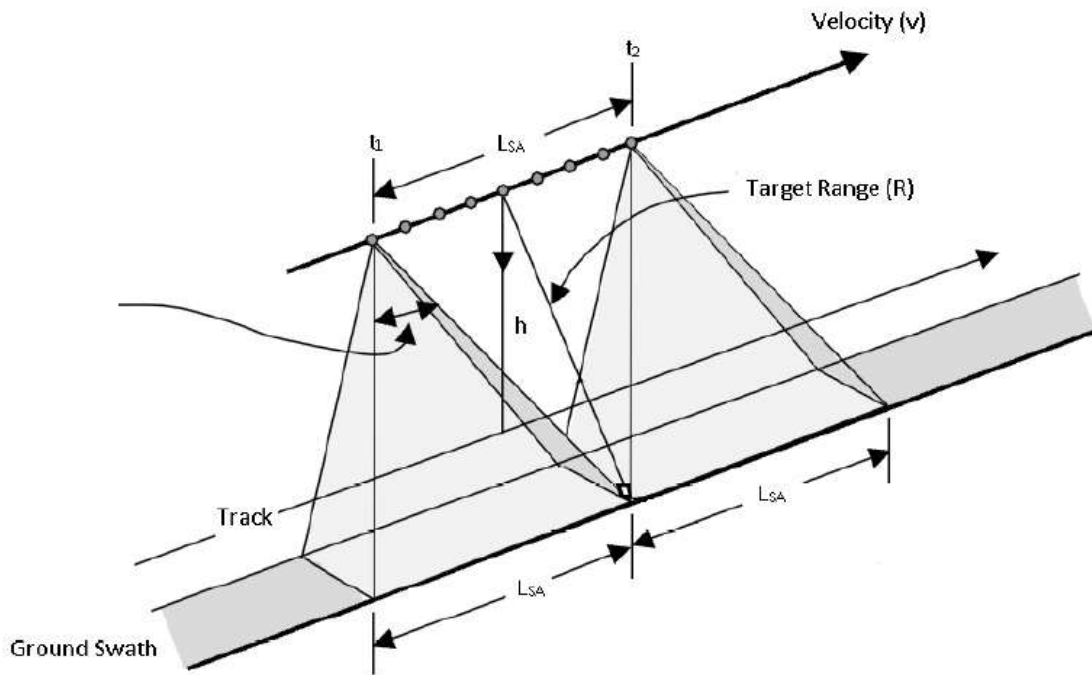
$$G = A \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

Όπου A η ενεργή επιφάνεια της κεραίας και λ το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας.

1.5.2 Το Συνθετικό Άνοιγμα

Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) είναι ένα ραντάρ απεικόνισης που έχει τοποθετηθεί πάνω σε μια κινούμενη πλατφόρμα. Όπως και στο συμβατικό ραντάρ τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται διαδοχικά και οι οπισθοσκεδαζόμενες επιστροφές καταγράφονται. Στην περίπτωση του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) οι διαδοχικοί χρόνοι μεταξύ της εκπομπής και της λήψης μεταφράζονται σε διαφορετικές θέσεις της κινούμενης πλατφόρμας. Ένας "συνεκτικός" συνδυασμός των σημάτων που έχουν ληφθεί επιτρέπουν την δημιουργία μια φανταστικής κεραίας με μήκος πολύ μεγαλύτερο απλό το μήκος της φυσικής κεραίας. Το συνθετικό άνοιγμα είναι ο λόγος που το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) είναι ραντάρ απεικόνισης. Τέλος, τα αποτελέσματα της εικόνας ραντάρ που προκύπτουν από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων εκφράζουν μια μέτρηση της ανακλαστικότητας της σκηνής που απεικονίζεται.

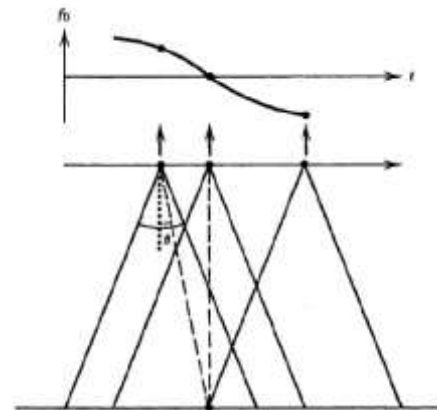
Η δημιουργία του συνθετικού ανοίγματος είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί βελτίωση της ανάλυσης της RADAR απεικόνισης στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Ο στόχος παραμένει στο πεδίο φωτισμού της κεραίας για σημαντικό χρονικό διάστημα και παρατηρείται από πολλές διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της τροχιά του δορυφόρου. Σε ένα σύστημα SAR σχηματίζεται μια συνθετική κεραία μεγάλου μήκους σαν μια στοιχειοκεραία με συμφασικά στοιχεία (phased array antenna) μιας διάστασης. Σημειώνεται ότι η βασική διαφορά ενός συστήματος SAR και μιας στοιχειοκεραίας με συμφασικά στοιχεία είναι ότι στο σύστημα SAR έχει μία κεραία που καταγράφει τα επιστρεφόμενα σήματα σε διαφορετικούς χρόνους υποθέτοντας ότι ο στόχος είναι σταθερός όλη τη διάρκεια της λήψης ενώ η στοιχειοκεραία καταγράφει πληροφορία την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 1.4 Γεωμετρία σχηματισμού συνθετικού ανοίγματος Πηγή: www.esa.int

Όπου L_{SA} είναι η απόσταση στη διεύθυνση του αζιμουθίου όπου φωτίζεται ένας σκεδαστής και λέγεται μήκος του συνθετικού ανοίγματος.

Όπως έχει προαναφερθεί ένα σύστημα SAR είναι συνεκτικό και το κάθε επιστρεφόμενο σήμα περιέχει μια μετατόπιση στη συχνότητα του λόγω του φαινομένου Doppler. Αυτή η μετατόπιση της συχνότητας είναι θετική όταν ο στόχος πλησιάζει τη δέσμη, στη συνέχεια μηδενίζεται και έπειτα δέχεται αρνητικές τιμές όσο ο στόχος απομακρύνεται. Το φάσμα του επιστρεφόμενου σήματος (ηχούς) καλύπτει τη περιοχή $f_o \pm f_D$ όπου f_o είναι η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος και f_D η μετατόπιση (ολίσθηση) της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler.



Σχήμα 1.5 Ιστορικό Doppler ενός σημειακού στόχου Πηγή: www.esa.int

Το εύρος της συχνότητας δυο λαμβανόμενων κυμάτων μπορεί να διαφέρει και αυτό ονομάζεται το φάσμα Doppler του συστήματος με εύρος ζώνης $B_D = 2f_D$. Η μετατόπιση της συχνότητας Doppler εκφράζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{v\theta}{\lambda}$$

Όπου v είναι η σχετική ταχύτητα στη διεύθυνση της γραμμής θέασης (LOS-Line of Sight), λ το μήκος κύματος του συστήματος, θ η γωνιακή θέση του στόχου (μέσα στη εκπεμόμενη δέσμη) σχετικά με το επίπεδο μηδενικού-Doppler. Το επίπεδο μηδενικού-Doppler ορίζεται σαν ένα επίπεδο που είναι ορθογώνιο στο διάνυσμα της ταχύτητας της πλατφόρμας του συστήματος. Τέλος, σημειώνεται ότι η μετατόπιση της συχνότητας (ολίσθηση) Doppler παρατηρείται μόνο στη διεύθυνση του αζιμουθίου γιατί η προβολή του διανύσματος της ταχύτητας της πλατφόρμας του συστήματος SAR ως προς ένα στόχο είναι μηδενική στη πλάγια διεύθυνση (slant-range).

1.5.3 Η Χωρική Ανάλυση της SAR Απεικόνισης

Η χωρική ανάλυση των απεικονίσεων από συστήματα RADAR και SAR σχετίζεται με τις ιδιότητες του κάθε συστήματος και είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την διακριτική ικανότητα του συστήματος. Η χωρική ανάλυση μελετάται σε δύο διευθύνσεις:

- Χωρική ανάλυση στη πλάγια διεύθυνση (slant-range)
- Χωρική ανάλυση στη διεύθυνση του αζιμουθίου

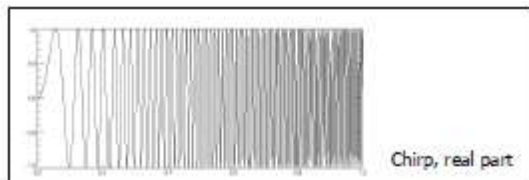
1.5.3.1 Απεικόνιση SAR στη διεύθυνση πλάγιων αποστάσεων (slant-range)

Δυο στόχοι για να είναι διαχωρίσιμοι πρέπει η απόστασή τους να είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκος. Η διακριτική ικανότητα ενός συστήματος RADAR στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων (slant-range) δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$res_{slant-range} = \frac{c\tau}{2}$$

Όπου τ ο χρόνος του παλμού και c η ταχύτητα του φωτός

Σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση ένα σύστημα για να έχει καλή διακριτική ικανότητα στη πλάγια διεύθυνση πρέπει να έχει πολύ μικρό χρόνο παλμού. Όσο μικρότερος είναι ένας εκπεμπόμενος παλμός τόσο λιγότερη ενέργεια μπορεί να περιέχει με αποτέλεσμα την μικρή ραδιομετρική ανάλυση. Για τον



Εικόνα 1.5 Κυματομορφή Chirp Πηγή: www.esa.int

παραπάνω λόγο οι αισθητήρες SAR συνήθως εκπέμπουν παλμικές κυματομορφές διαμορφωμένες κατά συχνότητα (chirp signals). Ο παλμός chirp είναι ένας κατά συχνότητα διαμορφωμένος (frequency modulated – FM) παλμός του οποίου η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται με το χρόνο με το πλάτος της εκπεμπόμενης κυματομορφής να παραμένει σταθερό στην διάρκεια του χρόνου του παλμού τ . Αφού το ληφθέν σήμα

συμπιεστεί η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση της πλάγια απόστασης βελτιστοποιείται χωρίς της απώλεια της ραδιομετρικής πληροφορίας.

Μερικές χρήσιμες μεταβλητές για την εκπεμπόμενη μικροκυματική ακτινοβολία αναφέρονται παρακάτω:

Η στιγμιαία συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την σχέση

$$f_i = kr \cdot t$$

όπου kr είναι γνωστό ως ρυθμός chirp

Το εύρος ζώνης (Bandwidth) εκφράζεται από τη σχέση

$$Br = kr \cdot \tau$$

Στις δυο παραπάνω σχέσεις το τ όπως και το t είναι χρόνοι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός συστήματος SAR. Ο χρόνος t είναι κατά την πλάγια διεύθυνση (range) και καλείται "γρήγορος" χρόνος επειδή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα "ταξιδεύουν" με την ταχύτητα του φωτός. Ο χρόνος τ είναι κατά την διεύθυνση του αζιμουθίου και καλείται "αργός χρόνος". Σημειώνουμε ότι υπάρχει και ο χρόνος "echo window" όπου το σύστημα SAR λαμβάνει τα επιστρεφόμενα σήματα. Τέλος, η διαδικασία της μετάδοσης του σήματος και της εγγραφής της επιστροφής επαναλαμβάνεται κάθε PRI (Pulse Repetition Interval) χρονικό διάστημα όπου το PRI είναι αντίστροφη ποσότητα της PRF (συχνότητα επανάληψης παλμών).

Συμπερασματικά, ενώ σε μια απεικόνιση SAR η διακριτική ικανότητα στη πλάγια διεύθυνση slant-range είναι ίδια η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του ground-range εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης θ και δίνεται από τη παρακάτω σχέση.

$$res_{ground-range} = \frac{res_{slant-range}}{\sin \theta}$$

1.5.4.2 Ανάλυση Απεικόνισης στη Διεύθυνση του Αζιμουθίου

Τα συστήματα RADAR δεν χρησιμοποιούν την αρχή του συνθετικού ανοίγματος με αποτέλεσμα την μέτρια διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου όσο αυξάνεται η πλάγια απόσταση (slant-range). Η χωρική ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος είναι ανάλογη με την πλάγια απόσταση (slant-range). Η βελτίωση της διακριτικής ικανότητας στη διεύθυνση του αζιμουθίου χρησιμοποιείται η αρχή του συνθετικού ανοίγματος.

- Πραγματικό εύρος δέσμης $\beta = \frac{\lambda}{D}$
- Πραγματική διακριτική ικανότητα $res_{azimuth} = \beta \cdot R = L_s$

Όπου L_s είναι το συνθετικό άνοιγμα της κεραίας

- Συνθετικό εύρος δέσμης $\beta_s = \frac{\lambda}{2} \cdot L_s = \frac{D}{2 \cdot R}$
- Συνθετική διακριτική ικανότητα $res_{azimuth} = \beta_s \cdot R = \frac{D}{2}$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος, D το μήκος της κεραίας, R η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του στόχου και της κεραίας.

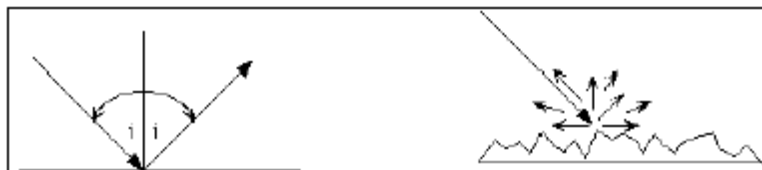
1.6 Χαρακτηριστικά στόχων

1.6.1 Ιδιότητες στόχων

Μια απεικόνιση SAR περιέχει μια εκτίμηση της οπισθοσκέδασης της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας των στόχων στην επιφάνεια του εδάφους. Οι στόχοι εμφανίζονται σε μια απεικόνιση SAR με τόνους του γκρι ανάλογα την επιστρεφόμενη ενέργεια από τους στόχους. Το πλάτος (amplitude) του επιστρεφόμενου σήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος SAR (συχνότητα, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης μικροκυματικής ακτινοβολίας) και από τα χαρακτηριστικά του στόχου (φυσικά χαρακτηριστικά, τραχύτητα, διηλεκτρικές ιδιότητες, προσανατολισμός). Μια μεταβολή σε μία από τις παραπάνω παραμέτρους θα επηρεάσει τη συμπεριφορά της μικροκυματικής ακτινοβολίας άρα και το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα.

1.6.1.1 Τραχύτητα

Αναλυτικότερα, η τραχύτητα ενός στόχου ανάλογα με το μήκος κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης μπορεί να θεωρηθεί τραχεία ή ομαλή. Όταν το μέγεθος των υψομετρικών μεταβολών της επιφάνειας είναι μικρότερο από το μήκος κύματος τότε η επιφάνεια θεωρείται λεία και όταν ίσο ή μεγαλύτερο τότε η επιφάνεια θεωρείται τραχεία. Η τραχύτητα μιας επιφάνειας εξαρτάται και από τη γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Όσο αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης μια επιφάνεια εμφανίζεται ομαλότερη. Λόγω της πλευρικής γεωμετρίας της απεικόνισης SAR στις μικρότερες αποστάσεις παρατηρούνται λευκότεροι τόνοι του γκρι. Μια επιφάνεια που είναι λεία (π.χ. υδάτινες επιφάνειες) ανακλάει μεγάλο μέρος της μικροκυματικής ακτινοβολίας κατοπτρικά σε αντίθεση με μια επιφάνεια που είναι τραχεία και σκεδάζει την ακτινοβολία σχεδόν ισοτροπικά. Στη πρώτη περίπτωση το επιστρεφόμενο

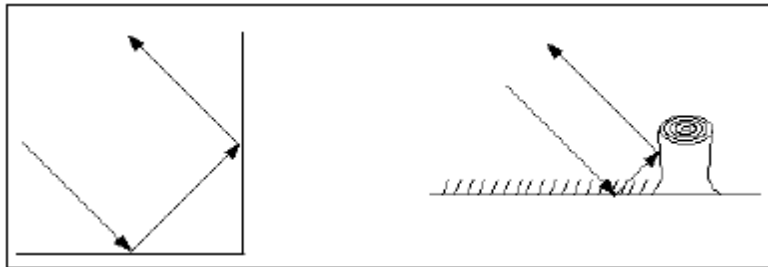


Σχήμα 1.6 Τραχύτητα επιφάνειας Πηγή: www.esa.int

σήμα έχει μικρή ένταση με αποτέλεσμα να έχουμε σκούρους τόνους ενώ στη δεύτερη περίπτωση το επιστρεφόμενο σήμα έχει μεγάλη ένταση με αποτέλεσμα να έχουν φωτεινούς τόνους.

1.6.1.2 Σχήμα-Προσανατολισμός

Το σχήμα και ο προσανατολισμός ενός στόχου του καθορίζει την ποσότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας που θα καταγράψει ένα σύστημα SAR. Οι επιφάνειες των στόχων που σχηματίζουν κατάλληλες γωνίες προκαλούν την γωνιακή σκέδαση (double-bounce scattering). Ο προσανατολισμός των συγκεκριμένων στόχων σε συνδυασμό τις γωνίες των επιφανειών έχει σαν αποτέλεσμα την



Σχήμα 1.7 Γωνιακή σκέδαση (double-bounce scattering) Πηγή: www.esa.int

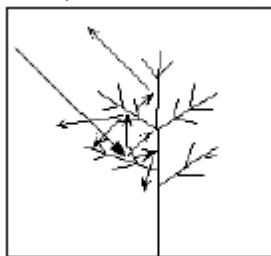
επιστροφή μεγάλου μέρους της εκπεμπόμενης ενέργειας. Τέτοιοι στόχοι συνήθως εμφανίζονται σε ανθρωπογενή περιβάλλοντα (κτίρια, δρόμους) και σε φυσικά περιβάλλοντα (βράχοι, κορμιά δέντρων) και απεικονίζονται με ανοιχτούς τόνους.

1.6.1.3 Τοπική γωνία πρόσπτωσης (local incidence angle)

Η τοπική γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ της εκπεμπόμενης μικροκυματικής δέσμης και της κάθετης στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης. Οι επιφάνειες που έχουν μικρές τοπικές γωνίες πρόσπτωσης (προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR) έχουν ισχυρά επιστρεφόμενα σήματα και εμφανίζονται με φωτεινούς τόνους στην απεικόνιση SAR. Μια μεταβολή στη γεωμετρία της απεικόνισης σημαίνει μια μεταβολή στο τρόπο απεικόνισης της τοπογραφίας της περιοχής. Ειδικά σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο (ορεινές περιοχές) πρέπει να επιλέγεται με προσοχή η γωνία θέασης του αισθητήρα SAR για την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων λόγω φαινομένων σκίασης, πτύχωσης και σμίκρυνσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι η γεωμετρία της λήψης επιδράει σε μεγάλο βαθμό στις τιμές οπισθοσκέδασης.

1.6.1.4 Διηλεκτρικές ιδιότητες

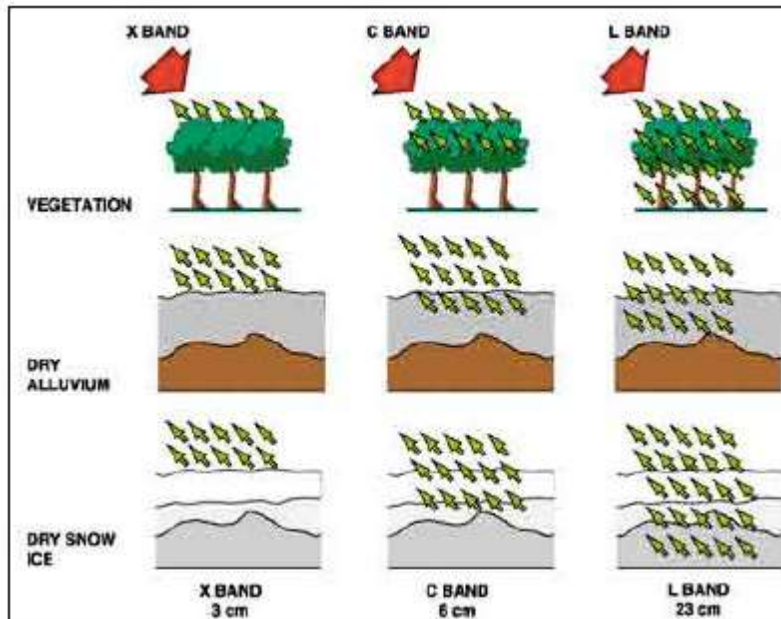
Οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός στόχου επηρεάζουν τη συμπεριφορά της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Κατά γενικό κανόνα η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς (υγρασία) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της



Σχήμα 1.8 Σκέδαση όγκου (volume scattering) Πηγή: www.esa.int

ανακλαστικότητας. Ένας στόχος έχει ισχυρότερες επιστροφές όταν έχει μεγάλη υγρασία συγκριτικά με τη ξηρή κατάσταση του.. Για μεταλλικά και υγρά αντικείμενα η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι υψηλή (80) ενώ για τα υπόλοιπα υλικά είναι σχετικά χαμηλή (3-8 για ξηρές συνθήκες). Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία του εδάφους και της βλάστησης μπορεί να προκαλέσει μια αισθητή αύξηση της ανακλαστικότητας του ραντάρ. Με αυτή τη λογική τα συστήματα ραντάρ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της πληροφορίας σχετικά με την υγρασία του εδάφους (soil moisture). Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς ενός ξηρού εδάφους είναι περίπου 2.5 σε αντίθεση με ένα βρεγμένο έδαφος όπου είναι περίπου 25 με 30. Η αύξηση της επιστρεφόμενης ενέργειας από το υγρό έδαφος μεταφράζεται σε μια αύξηση του συντελεστή οπισθοσκέδασης (backscattering coefficient) όπου εξάγονται συμπεράσματα για την υγρασία του εδάφους. Μια δασική περιοχή εμφανίζεται πιο φωτεινή σε περίοδο βροχής παρά σε περίοδο ξηρασίας. Αν η δασική περιοχή έχει χαμηλή υγρασία τότε η μικροκυματική ακτινοβολία έχει μεγαλύτερη διαπερατικότητα με αποτέλεσμα να υπάρχει σκέδαση όγκου/πολλαπλή σκέδαση (volume scattering).

1.6.1.5 Διαπερασιμότητα



Εικόνα 1.6 Διαπερασιμότητα μικροκυμαρικής ακτινοβολίας Πηγή: www.esa.int

Ανάλογα το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας παρατηρείται διαφορετική διαπερασιμότητα. Για παράδειγμα σε ένα δάσος το επιστρεφόμενο σήμα μπορεί να προέρχεται από τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης (φύλλα), από τα κλαδιά, από το κορμό ή/και από το έδαφος ανάλογα με το μήκος κύματος. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η διαπερασιμότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Σχετικά με τη πόλωση τα όμοια-πολωμένα κύματα (HH,VV) έχουν πολύ μεγαλύτερη διαπερασιμότητα σχετικά με τα κάθετα-πολωμένα (HV,VH) κύματα.

1.6.2 Ενεργός διατομή RADAR

Η ενεργός διατομή του RADAR (σ) εκφράζει τη ικανότητα ενός στόχου να ανακλάσει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία προς τον αισθητήρα SAR. Σχετίζεται με το πόσο εύκολα μπορεί να εντοπιστεί ένας στόχος από ένα σύστημα RADAR και εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου, το υλικό του, το σχετικό μέγεθος του αντικειμένου ανάλογα με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, την γωνία πρόσπτωσης, τη γωνία ανάκλασης και τη πόλωση της ακτινοβολίας ανάλογα με το προσανατολισμό του στόχου. Εκφράζεται δε από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = \log_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|W_s|}{|W_i|}$$

Όπου R είναι η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου, W_i η πυκνότητα της ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο στόχο και W_s η πυκνότητα της ισχύος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας στον αισθητήρα.

Στην ειδική περίπτωση της επιφάνειας του εδάφους η ενεργός διατομή του ραντάρ μπορεί να προσδιοριστεί από το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας με το συντελεστή οπισθοσκέδασης σ^o . Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εκφράζει τη ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ένταση) του επιστρεφόμενου σήματος από το στόχο στον αισθητήρα SAR. Είναι αδιάστατο μέγεθος και επειδή λαμβάνει μεγάλες τιμές εκφράζεται σε dBs από τη παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{dB}^o = 10 \log \sigma^o$$

1.6.3 Η εξίσωση του RADAR

Η “εξίσωση του ραντάρ” (Radar Range Equation) είναι μια μαθηματική σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της ισχύος του παλμού από την εκπομπή μέχρι τη λήψη. Η συγκεκριμένη εξίσωση χρησιμοποιείται για τη πρόβλεψη της μέγιστης πλάγιας απόστασης (slant range) που το σύστημα μπορεί να ανιχνεύσει ένα στόχο.

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_E (4\pi)^3 L}}$$

Όπου, R η απόσταση slant-range, P_s η ισχύς του εκπεμπόμενου παλμού, P_E η ισχύς του λαμβανόμενου παλμού, G το κέδρος της κεραίας, σ η ενεργός διατομή του ραντάρ, λ το μήκος κύματος του παλμού και L οι απώλειες του συστήματος.

Ένα σημαντικό μέγεθος των συστημάτων SAR είναι ο λόγος σήματος προς το θόρυβο (**SNR- Signal to Noise Ratio**). Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος λόγος είναι αδιάστατο μέγεθος και συνήθως υπολογίζεται σε dBs. Η ισχύς του θορύβου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_N = kT_o F_n W$$

Όπου k η σταθερά του Boltzman, T_o η θερμοκρασία αναφοράς, F_n ο δείκτης θορύβου του συστήματος, W το εύρος δέσμης συχνοτήτων του συστήματος (bandwidth).

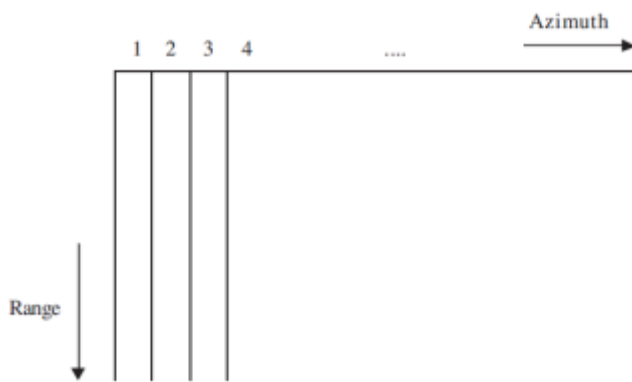
Στη συνέχεια, ο λόγος SNR δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$SNR = \frac{P_E}{P_N} = \frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 T_o W F_n L}$$

1.7 Επεξεργασία SAR (SAR processing)

Η επεξεργασία SAR είναι ένα πρόβλημα δυο διαστάσεων και ο βασικός στόχος είναι η δημιουργία της απεικόνισης slc και ο καθορισμός των συντεταγμένων (range, azimuth). Η εστίαση για το σχηματισμό της απεικόνισης SAR είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη δειγματοληψία και τον κβαντισμό των επιστροφών των σημάτων SAR και αντιπροσωπεύει την αριθμητική αξιολόγηση της διαδικασίας της διαμόρφωσης του συνθετικού ανοίγματος. Για το σχηματισμό μιας απεικόνισης SAR απαιτούνται πολλά στάδια της επεξεργασίας που περιγράφονται παρακάτω.

- Πρωτογενή δεδομένα: Η ενέργεια του σήματος από ένα σημειακό σκεδαστή διαδίδεται στη διεύθυνση του αζιμουθίου και της πλάγιας απόστασης (slant-range). Όλοι οι σημειακοί στόχοι που υπάρχουν σε κάθε δέσμη σε κάθε παλμό υπερθέτονται για τη δημιουργία του επιστρεφόμενου σήματος. Τα δεδομένα από τις επιστροφές των σημάτων δημιουργούν ένα δισδιάστατο πίνακα με σύνθετα δείγματα. Η επεξεργασία SAR γίνεται στις δυο διευθύνσεις (range, azimuth). Στη πλάγια διεύθυνση το σήμα “απλώνεται” στη διάρκεια του εκπεμπόμενου (LFM-Linear Frequency Modulation) γραμμικά διαμορφωμένο κατά συχνότητα παλμού. Στη διεύθυνση του αζιμουθίου το σήμα “απλώνεται” στη διάρκεια της χρονικής περιόδου που φωτίζει η κεραία το στόχο (συνθετικό άνοιγμα). Σημειώνεται ότι σε όλη αυτή τη διάρκεια η πλάγια απόσταση μεταβάλλεται. Αυτή η μεταβολή της πλάγιας απόστασης προκαλεί μια μεταβολή στη φάση των λαμβανόμενων σημάτων συναρτήσει του αζιμουθίου. Αυτή η μεταβολή της φάσης στο συνθετικό άνοιγμα αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης Doppler του σήματος στη



Εικόνα 1.7 Πίνακας αρχικών δεδομένων (raw data) Πηγή:

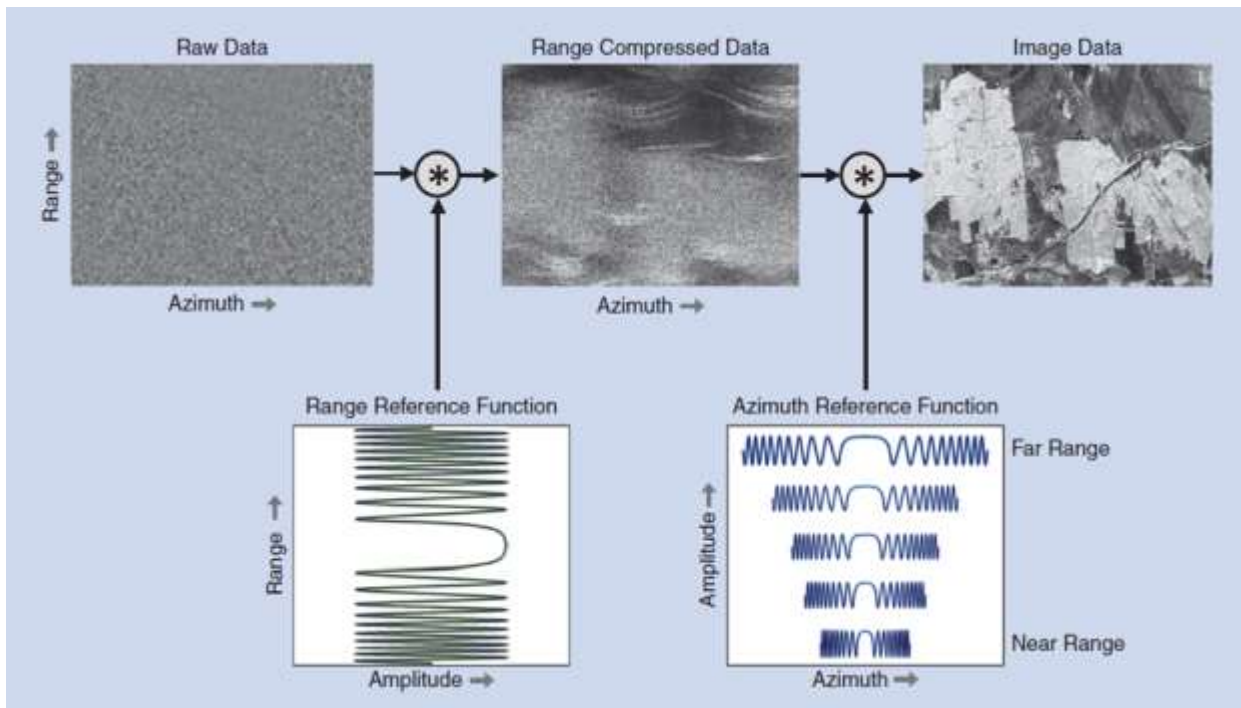
διεύθυνση του αζιμουθίου και επιτρέπει το σήμα να συμπιεστεί σε αυτή τη διεύθυνση. Η μεταβολή της πλάγιας απόστασης έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της χρονική καθυστέρησης του σήματος άρα την ασυμφωνία με το σύνολο τιμών της πλάγιας απόστασης. Αυτό το φαινόμενο καλείται “range migration” και αναφέρεται στη λανθασμένη αντιστοιχία των επιστρεφόμενων σημάτων με τις θέσεις μνήμης στην πλάγια απόσταση. Ο βασικότερος αλγόριθμος διόρθωσης είναι ο αλγόριθμος Range—Doppler που

περιγράφεται παρακάτω.

Ο πίνακας αρχικών δεδομένων έχει δυο διαστάσεις. Η πρώτη διάσταση αναφέρεται στη πλάγια διεύθυνση του (slant-range) (γρήγορος χρόνος) και μια νέα γραμμή δημιουργείται όταν η πλατφόρμα SAR μετακινηθεί κατά $u \cdot PRI$ διαμορφώνοντας τη δεύτερη διάσταση που ονομάζεται αζιμούθιο (αργός χρόνος)

- Εκτίμηση του κεντροειδούς Doppler

Η συχνότητα κεντροειδούς Doppler σχετίζεται με τη θέση του κέντρου της δέσμης στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Το κεντροειδές Doppler καθορίζει την ενέργεια του σήματος στο χώρο των συχνοτήτων του αζιμουθίου και είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ώστε η ενέργεια των σημάτων στο φάσμα Doppler να εξαχθεί με σωστό τρόπο χρησιμοποιώντας το προσαρμοσμένο φίλτρο αζιμουθίου παρέχοντας τη καλύτερη διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου και τον μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Οι λανθασμένες εκτιμήσεις του κεντροειδούς Doppler οδηγούν σε περιοχές με χαμηλή τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο, δύσκολα διακριτοί στόχοι και ραδιομετρικές ανωμαλίες. Σημειώνεται ότι ακόμα και στη περίπτωση που τα τροχιακά στοιχεία είναι ακριβή, η γωνία θέασης (pointing-look angle) θα πρέπει να υπολογιστεί από τα δεδομένα SAR για τη καλύτερη ραδιομετρική διόρθωση.



Εικόνα 1.8 Επεξεργασία SAR Πηγή: Moreira et al., 2013

- Συμπύεση στη πλάγια διεύθυνση (Range compression)

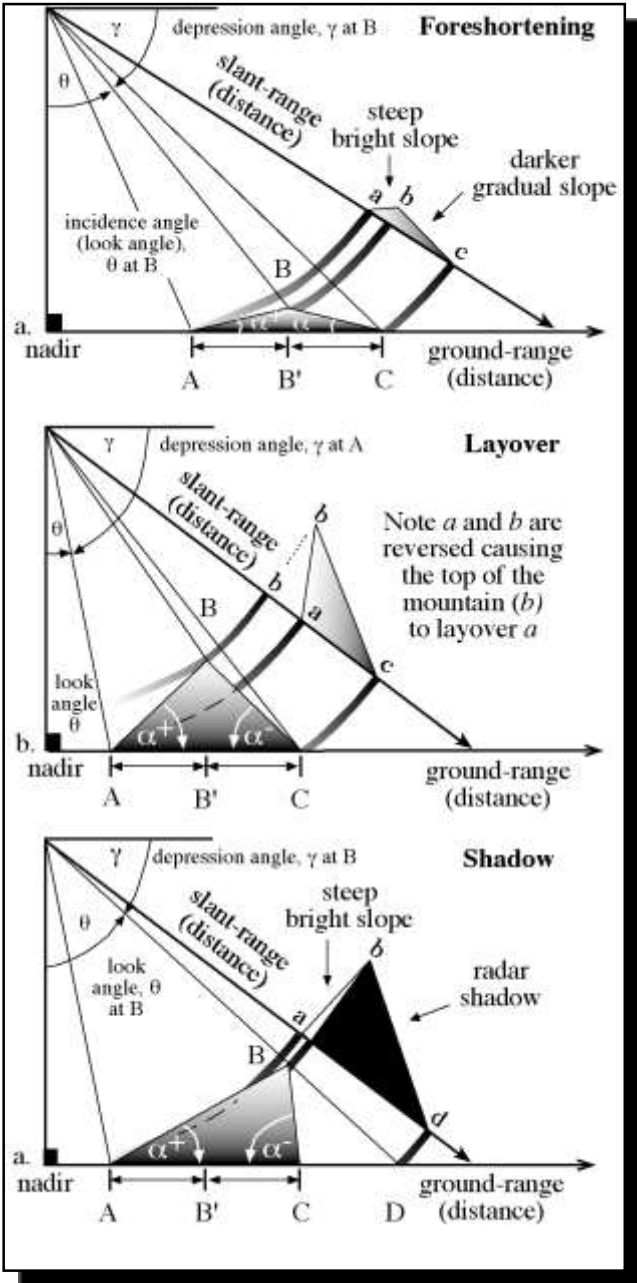
Αρχικά από το σύστημα SAR εκπέμπεται μια μεγάλης διάρκειας παλμός που είναι γραμμικά διαμορφωμένος κατά τη συχνότητα. Αυτό επιτρέπει τη εκπομπή της ενέργειας με χαμηλότερη ισχύ. Σημειώνεται ότι ένα παλμός που είναι γραμμικά διαμορφωμένος κατά τη συχνότητα το αποτέλεσμα μετά από την εφαρμογή του προσαρμοσμένου φίλτρου είναι ένας στενός παλμός όπου όλη η ενέργεια του έχει συγκεντρωθεί στη τιμή κορυφής (peak value). Στη συνέχεια εφαρμόζεται το προσαρμοσμένο φίλτρο στο λαμβανόμενο σήμα (echo) και το αποτέλεσμα είναι ένας στενός παλμός (όπως και στη περίπτωση του εκπεμπόμενου παλμού) με αντίστοιχη διακριτική ικανότητα στη πλάγια διεύθυνση και λόγο σήματος προς θορύβου. Η εφαρμογή του προσαρμοσμένου φίλτρου στο επιστρεφόμενο σήμα καλείται συμπύεση στη πλάγια διεύθυνση (range compression) και γίνεται σε κάθε γραμμή range των πρωτογενών δεδομένων SAR με τη χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Το προσαρμοσμένο φίλτρο στη πλάγια διεύθυνση πρέπει να μετασχηματιστεί στο πεδίο των συχνοτήτων από ένα αντίγραφο του

εκπεμπόμενου παλμού (replica) και στη συνέχεια να εφαρμοστεί για κάθε γραμμή range. Τέλος, σημειώνεται ότι η απόκριση της συχνότητας του προσαρμοσμένου φίλτρου περιλαμβάνει τη διόρθωση λόγω των πλευρικών λοβών στη παλμική απόκριση (impulse response) στη πλάγια διεύθυνση.

- Συμπίεση στη διεύθυνση του αζιμουθίου (Azimuth compression)
Για την εκπόνηση του συγκεκριμένου σταδίου είναι απαραίτητη η γνώση των στοιχείων του εκπεμπόμενου παλμού όπως επίσης και της γεωμετρίας απεικόνισης για τη κατασκευή του προσαρμοσμένου φίλτρου στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Η συμπίεση στη διεύθυνση του αζιμουθίου είναι η εφαρμογή ενός προσαρμοσμένου φίλτρου στο σήμα χρησιμοποιώντας τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT). Σημειώνεται ότι πριν την εφαρμογή του προσαρμοσμένου φίλτρου η απόκριση της συχνότητας του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα τροχιακά δεδομένα. Το φίλτρο εξαρτάται επίσης από τη πλάγια διεύθυνση. Τα δεδομένα χωρίζονται σε περιοχές όπου η πλάγια απόσταση είναι “αναλλοίωτη”. Μια τέτοια περιοχή καλείται Frequency Modulation rate invariance region και χρησιμοποιείται το ίδιο προσαρμοσμένο φίλτρο. Σημειώνεται ότι υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το μέγεθος της “αμετάβλητης” (invariance) περιοχής για την αποφυγή φαινομένων broadening στην εικόνα μετά τη συμπίεση. Στη διαδικασία συμπεριλαμβάνεται μια ομαλοποίηση του πλάτους για τη διόρθωση των πλευρικών λοβών στη παλμική απόκριση στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Υπογραμμίζεται ότι η θέση του διορθωτικού συντελεστή του πλάτους στο πίνακα της συχνότητας στη διεύθυνση του αζιμουθίου εξαρτάται από το κεντροειδές Doppler το οποίο εξαρτάται από την πλάγια απόσταση. Ο εξαγόμενος πίνακας συχνότητων για κάθε look πολλαπλασιάζεται με τη απόκριση της συχνότητας του προσαρμοσμένου φίλτρου και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (inverse FFT) για τη δημιουργία της εικόνας complex look. Υπογραμμίζεται ότι η απόκριση της συχνότητας του προσαρμοσμένου φίλτρου ρυθμίζεται από μια μεταβλητή για κάθε look.
- Απεικόνιση slc
Τέλος όλα τα στάδια επεξεργασίας που πραγματοποιούνται σε όλη την εικόνα έχουν στόχο το σχηματισμό της απεικόνισης slc (single look complex) όπου το πλάτος σχετίζεται με την ανακλαστικότητα radar και η φάση με τη γεωμετρία λήψης και τη τοπογραφία της περιοχής.
- Σφάλματα
Στα πρωτογενή δεδομένα έρχονται να προστεθούν οι ανεπιθύμητες παραμορφώσεις λόγω των υφιστάμενων συνθηκών μέτρησης του συστήματος. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η καμπυλότητα της πλάγιας απόστασης, περιστροφή της γης στο διάστημα της ενοποίησης των επιστρεφόμενων σημάτων (integration), η εκκεντρότητα της τροχιάς, ο θόρυβος της δορυφορικής πλατφόρμας. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω σφαλμάτων, θα πρέπει να υλοποιηθούν πολλές διαδικασίες πριν τη διαμόρφωση της εικόνας όπως οι διορθώσεις λόγω των μετατοπίσεων (roll pitch yaw) της δορυφορικής πλατφόρμας και λόγω της μετακίνησης του στόχου στο διάστημα dwell. Οι παραπάνω παραμορφώσεις/διαταράξεις διορθώνονται μέσα από μια σειρά επαναληπτικών διαδικασιών που περιλαμβάνουν διορθώσεις τροχιακών δεδομένων, αλγόριθμους διόρθωσης της καμπυλότητας της πλάγιας απόστασης και την επιλογή για την εφαρμογή ποικίλων τεχνικών αυτόματης εστίασης. Τέλος, πολλά σύγχρονα συστήματα SAR κανονικοποιούν τα φαινόμενα της στροφής της γης χρησιμοποιώντας μια στροφή μερικών μοιρών ανάλογα τη θέση της δορυφορικής πλατφόρμας με στόχο τη στροφή της κεραίας ώστε η

δέσμη της κεραίας να είναι κάθετη με το ίχνος της τροχιάς της δορυφορικής πλατφόρμας στο έδαφος.

1.8 Γεωμετρικές Παραμορφώσεις Απεικονίσεων SAR



Η γεωμετρία της απεικόνισης SAR έχει σαν αποτέλεσμα γεωμετρικές παραμορφώσεις. Όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι επίπεδη τότε είναι εύκολη η μετατροπή της εικόνας από τη γεωμετρία slant-range στη γεωμετρία ground-range. Σε ρεαλιστικά σενάρια εντοπίζονται δέντρα, βουνά, ψηλά κτήρια όπου λόγω της πλευρικής γεωμετρίας και της προβολής όλων των στόχων στη πλάγια διεύθυνση (slant range) εντοπίζονται οι παραμορφώσεις: σμίκρυνση (foreshortening), πτύχωση (layover), σκίαση (shadow).

1.8.1 Σμίκρυνση

Η λανθασμένη οριζοντιογραφική θέση ενός αντικειμένου εξαρτάται από το υψόμετρο του αντικειμένου που απεικονίζεται. Λόγω της πλευρικής γεωμετρίας όσο πιο ψηλό είναι ένα αντικείμενο τόσο πιο μικρή είναι η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του στόχου και του αισθητήρα με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο της σμίκρυνσης. Για μια επιφάνεια όπου είναι προσανατολισμένη προς τον αισθητήρα SAR το φαινόμενο της σμίκρυνσης περιγράφεται από το δείκτη F_f .

$$F_f = \sin \theta - \alpha$$

Όπου θ η γωνία πρόσπτωσης και α η γωνία κλίσης της επιφάνειας

Το φαινόμενο της σμίκρυνσης είναι εντονότερο όταν η εκπεμπόμενη δέσμη είναι κάθετη στη

Εικόνα 1.9 Γεωμετρικές παραμορφώσεις Πηγή: Jensen 2000

επιφάνεια. Αντικείμενα με μεγάλο ύψος παρουσιάζουν εντονότερες γεωμετρικές παραμορφώσεις. Οι επιφάνειες που είναι παραμορφωμένες από το φαινόμενο τις σμίκρυνσης παρουσιάζονται με λευκούς τόνους.

1.8.2 Πτύχωση

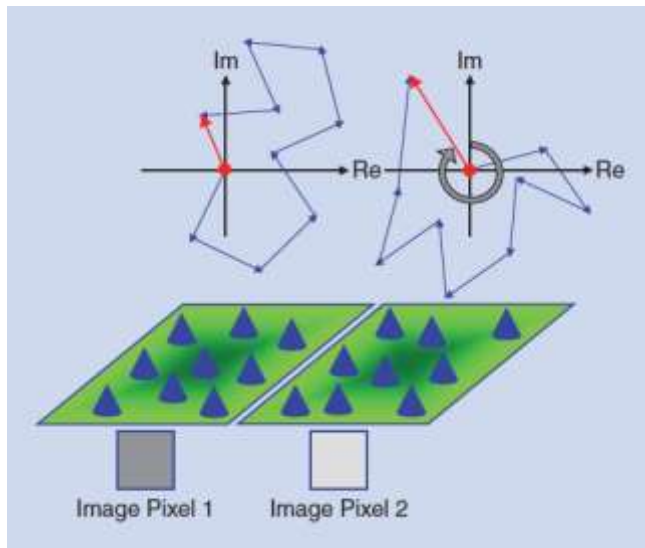
Το φαινόμενο της πτύχωσης είναι η ακραία περίπτωση του φαινομένου της σμίκρυνσης. Όταν η μικροκυματική δέσμη φθάνει γρηγορότερα στη κορυφή του αντικειμένου από ότι στη βάση του τότε η κορυφή του αντικειμένου έχει τη μικρότερη πλευρική απόσταση με αποτέλεσμα το αντικείμενο να απεικονίζεται ανεστραμμένο. Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης το φαινόμενο της πτύχωσης είναι εντονότερο. Τέλος για την διόρθωση των φαινομένων της σμίκρυνσης και της πτύχωσης προτείνεται η χρήση ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου κατά τη γεωκωδικοποίηση.

1.8.3 Σκίαση

Όταν η μικροκυματική ακτινοβολία δεν φωτίζει μερικές περιοχές τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της σκίασης. Από τις συγκεκριμένες περιοχές δεν υπάρχει οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια προς τον αισθητήρα με αποτέλεσμα να απεικονίζονται μαύρες. Το φαινόμενο της σκίασης είναι εντονότερο όσο αυξάνεται η γωνία θέασης του αισθητήρα SAR.

1.9 Ιδιότητες των RADAR απεικονίσεων

1.9.1 Η Κηλίδωση



Εικόνα 1.10 Φαινόμενο της κηλίδωσης Πηγή: Moreira et al., 2013

Η κηλίδωση είναι ένα χαρακτηριστικό των συνεκτικών συστημάτων (coherent systems) όπως είναι τα συστήματα SAR και τα συστήματα Laser. Το φαινόμενο της κηλίδωσης οφείλεται στη πολλαπλή σκέδαση των στοιχειωδών σκεδαστών που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους που αντιστοιχεί ένα εικονοστοιχείο (resolution cell). Όταν μια σκηνή “φωτίζεται” από ένα σύστημα SAR τότε σε κάθε εικονοστοιχείο που περιέχει πολλούς σημειακούς σκεδαστές η οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια που καταγράφεται είναι το συνεκτικό άθροισμα των συνεισφορών όλων των σκεδαστών. Αυτό το άθροισμα μπορεί να είναι μεγάλο ή μικρό ανάλογα το είδος της συμβολής (εποικοδομητική-παραγωγική-constructive, αναιρετική-καταστροφική-destructive). Αυτή η στατιστική μεταβολή (διακύμανση) σχετίζεται με

τη φωτεινότητα του κάθε εικονοστοιχείου σε μια απεικόνιση SAR.

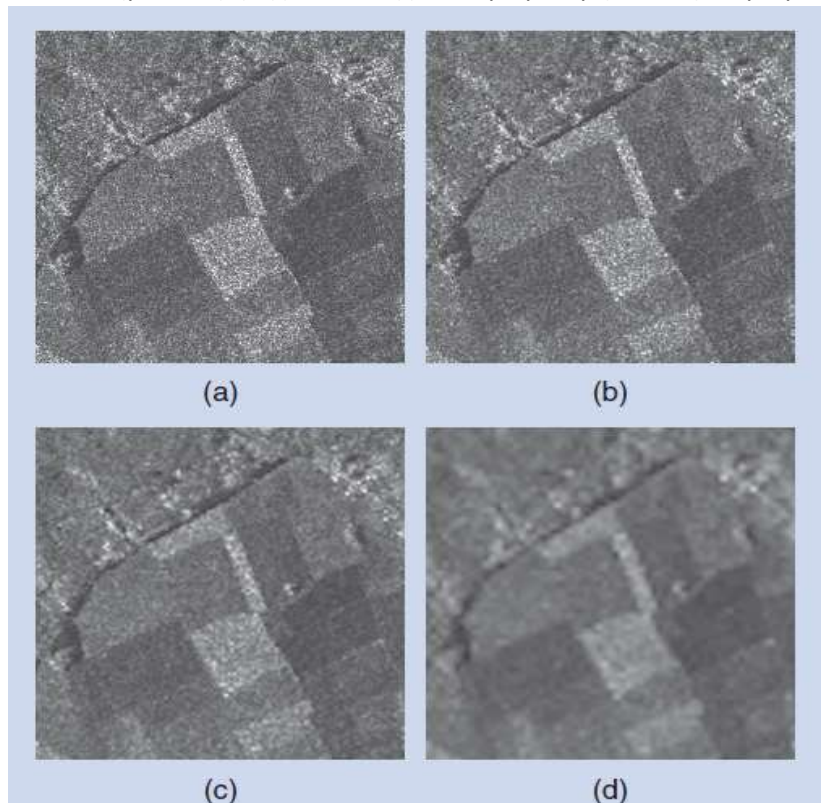
Η συνολική ανακλαστικότητα Φ της επιφάνειας του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\Phi = \sum_i \sqrt{\sigma_i} \exp(i\varphi_i^{scatt}) \cdot \exp(-i\frac{4\pi}{\lambda} r_{o,i})$$

Όπου i ο αριθμός των στοιχειωδών σκεδαστών που βρίσκονται μέσα στην επιφάνεια του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο, σ_i η ενεργός διατομή ραντάρ του κάθε στοιχειώδους σκεδαστή, φ_i^{scatt} η φάση του κάθε στοιχειώδους σκεδαστή, λ το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας και $r_{0,i}$ η πλάγια απόσταση (slant-range) της εγγύτερης προσέγγισης.

Η κηλίδωση εκφράζει την δομή της επιφάνειας του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα στοιχεία μέσα από το αντίστοιχο resolution cell. Αν και σε πολλές έρευνες αναφέρεται ως θόρυβος, η κηλίδωση δεν μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την ισχύ του εκπεμπόμενου κύματος αφού παρουσιάζει έναν πολλαπλασιαστικό χαρακτήρα (Η διακύμανση του αυξάνεται αναλογικά με την ένταση). Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με το θόρυβο του συστήματος SAR η κηλίδωση είναι μια πραγματική ηλεκτρομαγνητική μέτρηση

Σε μια μεγάλη επιφάνεια του εδάφους οι σκεδαστές είναι περισσότεροι με αποτέλεσμα το φαινόμενο της κηλίδωσης να είναι εντονότερο. Σύμφωνα με το παραπάνω συλλογισμό, η επίδραση της κηλίδωσης στα συστήματα υψηλής ανάλυσης είναι μικρότερη επειδή ο αριθμός των στοιχειωδών σκεδαστών μέσα



Εικόνα 1.11 Μείωση της κηλίδωσης με την επεξεργασία πολλαπλών όψεων (multi-look) (α) Χωρίς multi-look (b) multi-look 2x2 (c) multi-look 4x4 (d) multi-look 8x8
Πηγή: Moreira et al., 2013

στην επιφάνεια του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο (resolution cell) είναι μικρότερος συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα.

Η μείωση της κηλίδωσης επιτυγχάνεται με το φιλτράρισμα στο πεδίο του χώρου και στο πεδίο των συχνοτήτων. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας του φιλτραρίσματος είναι ο έλεγχος αν γύρω από το επιλεγμένο εικονοστοιχείο υπάρχουν φαινόμενα κηλίδωσης. Στη περίπτωση αυτή, γίνεται μια εκτίμηση της ανακλαστικότητας του ραντάρ ανάλογα με τη παρατηρούμενη ένταση, βάση μερικών τοπικών στατιστικών δεικτών και μια επιπρόσθετης (a priori) γνώσης σχετικά με τη περιοχή. Για την αποτελεσματική αφαίρεση της

κηλίδωσης ενδείκνυται η χρήση μεγάλου μεγέθους παραθύρων.

Σε εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης η κηλίδωση μπορεί να εμφανίζεται όταν υπάρχουν λίγοι ισχυροί σκεδαστές μέσα στο εικονοστοιχείο. Στην ακραία περίπτωση ενός μεμονωμένου σημειακού στόχου, οι μεταβλητότητες της έντασης του προσδιορίζονται με ένα ντετερμινιστικό τρόπο χωρίς να επηρεάζεται από τη διαδικασία του φιλτραρίσματος της κηλίδωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι καλύτερο να

επιλέγονται παράθυρα μικρότερου μεγέθους. Συμπερασματικά το φιλτράρισμα της κηλίδωσης αποτελεί μια συμβιβαστική λύση μεταξύ της χωρική και ραδιομετρικής ανάλυσης των δεδομένων SAR.

- Φιλτράρισμα στο πεδίο του χώρου

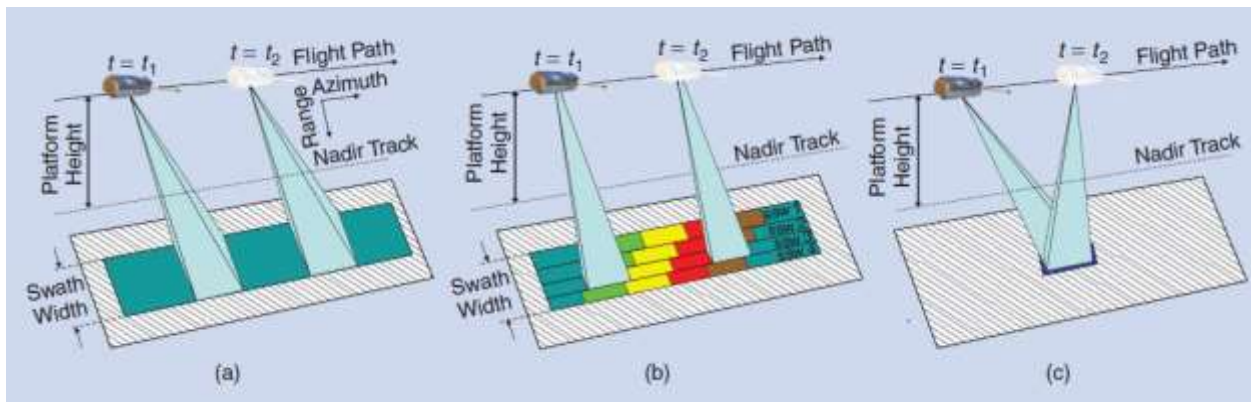
Τα βασικότερα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του φαινομένου της κηλίδωσης είναι: Lee, Lee-Sigma, Frost, Gamma. Τα χωρικά φίλτρα εφαρμόζονται στην απεικόνιση SAR που έχει την καλύτερη δυνατή διακριτική ικανότητα και το αποτέλεσμα είναι μια απεικόνιση με μειωμένο το φαινόμενο της κηλίδωσης με κόστος την μειωμένη διακριτική ικανότητα. Στα ενισχυμένα φίλτρα κηλίδωσης (Enhanced Lee, Enhanced Frost) οι βελτιώσεις που παρατηρούνται είναι ότι ο συντελεστής της μεταβολής καθορίζεται και με βάση τη γεωμετρική πληροφορία (γραμμικά χαρακτηριστικά, μεμονωμένοι σκεδαστές) από γεωμετρικούς ανιχνευτές (geometrical detectors).

- Φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων

Το εύρος της δέσμης (bandwidth) χωρίζεται σε πολλά κομμάτια με στόχο τη δημιουργία πολλών ανεξάρτητων όψεων της φωτισμένης περιοχής. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των επιμέρους όψεων αποτελεί την τελική απεικόνιση με μειωμένο το φαινόμενο της κηλίδωσης αλλά και με μειωμένη διακριτική ικανότητα. Η εφαρμογή κατάλληλων φίλτρων μείωσης της κηλίδωσης ανάλογα τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής είναι κρίσιμος παράγοντας για την βέλτιστη αξιοποίηση των απεικονίσεων SAR.

1.10 Τρόποι Λήψης Δεδομένων από RADAR Συνθετικού Ανοίγματος-Τεχνικές

Ένα μονοστατικό σύστημα SAR μπορεί να συλλέξει δεδομένα με διάφορους τρόπους (modes). Οι κυριότεροι είναι οι παρακάτω και κατηγοριοποιούνται με βάση το τρόπο φωτισμού της επιφάνειας του εδάφους.



Εικόνα 1.12 Τρόποι λήψης δεδομένων από συστήματα SAR Πηγή: Moreira et al., 2013

Stripmap mode όπου η περιοχή ενδιαφέροντος απεικονίζεται σε μια μεγάλη λωρίδα (strip) με σταθερό πλάτος (a). Είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος λήψης δεδομένων. Η κεραία έχει σταθερή γωνία θέασης (look angle) με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια λωρίδα ίσου πλάτους. Σημειώνεται ότι το πλάτος τη λωρίδας μπορεί να μεταβάλλεται όταν αλλάζει η γωνία θέασης της δέσμης. Η λωρίδα του εδάφους φωτίζεται με συνεχή και σταθερό ρυθμό δηλαδή η συχνότητα επανάληψης εκπομπής παλμών (PRF Pulse Repetition Frequency) είναι σταθερή. Ένας περιοριστικός παράγοντας της γεωμετρίας του stripmap mode είναι το μήκος του συνθετικού ανοίγματος είναι περιορισμένο λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που φωτίζει η δέσμη ένα στόχο.

ScanSAR mode όπου η κεραία δεν έχει σταθερή γωνία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υπολωρίδες (sub-swaths) όπου επεξεργάζονται και συνδυάζονται για το σχηματισμό μια απεικόνισης με μεγάλο πλάτος λωρίδας (wide-swath). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος λειτουργίας μοιράζεται για την κάλυψη μεγάλου πλάτους της λωρίδας με αποτέλεσμα τα επιστρεφόμενα σήματα που περιέχουν τη πληροφορία ενός στόχου να είναι λιγότερα. Σαν αποτέλεσμα, τα λιγότερα επιστρεφόμενα σήματα που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό του συνθετικού ανοίγματος οδηγούν στη χειροτέρευση της διακριτικής ικανότητας του συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Δεδομένου ότι ο στόχος του συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας είναι η εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη, μειώνεται και η διακριτική ικανότητα του συστήματος στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων (slant-range) αυξάνοντας τη διάρκεια του παλμού βελτιώνοντας τις επιδόσεις του συστήματος.

Spotlight mode όπου αλλάζει η γωνία διεύθυνσης της κεραίας κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου για να φωτίζεται μια συγκεκριμένη περιοχή περισσότερο χρόνο με στόχο τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου (c). Ο παραπάνω χρόνος φωτισμού της κεραίας σε ένα στόχο σημαίνει τον σχηματισμό ενός μεγαλύτερου συνθετικού ανοίγματος που είναι και ο λόγος που ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου από το τρόπο λειτουργίας stripmap. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι η περιοχή ενδιαφέροντος απεικονίζεται από πολλές γωνίες στη διάρκεια ενός περάσματος. Τέλος, ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας είναι ότι οι απεικονίσεις με το συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας είναι πολύ μικρής έκτασης σε αντίθεση με τους δυο παραπάνω τρόπους λειτουργίας.

1.11 Σύνοψη

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι μια ανασκόπηση της βασικής θεωρίας, των τεχνικών απεικόνισης, διάφορων εφαρμογών και μελλοντικών τεχνολογιών. Στη σημερινή εποχή, οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν δεδομένα SAR ανήκουν σε διάφορα επιστημονικά πεδία (παρακάτω πίνακας).

Όνομα κατηγορίας	Πεδία εφαρμογών
Έδαφος	Απεικονίσεις εδάφους για πολλαπλές χρήσεις, τοπογραφία εδάφους(υψομετρικά μοντέλα), εύρεση τύπου εδάφους, υγρασία εδάφους, παραμορφώσεις εδάφους (κατολισθήσεις, καθιζήσεις, διαβρώσεις) σεισμοί, ηφαίστεια, παρακολούθηση καταστροφών, παρακολούθηση επιπέδου λιμνών, παρακολούθηση υγρότοπων, χωροταξικός και πολεοδομικός σχεδιασμός,
Βλάστηση	Τύποι βλάστησης, εκτίμηση βιομάζας, δασικό προφίλ, ύψος δέντρων, παρακολούθηση καταστροφών από ανέμους και πυρκαγιές, ταξινόμηση καλλιεργείων, αποψίλωση δασών
Ωκεανοί	Απεικονίσεις ωκεανών για πολλαπλές χρήσεις, παρακολούθηση των ρευμάτων της θάλασσας, ταχύτητα του ανέμου και της κατεύθυνσης του πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας, ύψος και κατεύθυνση κυμάτων, παρακολούθηση πλοίων, παρακολούθηση πετρελαιοκηλίδων, βαθυμετρία στις παραλιακές περιοχές,
Πάγοι θάλασσας	Κάλυψη των θαλάσσιων πάγων, την έκτασή τους, το πάχος τους, είδος πάγων, παρακολούθηση των παγόβουνων και της κίνησης τους, βελτιστοποίηση πορείας πλοίων με βάση την θέση των πάγων και την κίνηση τους
Χιόνι και πάγοι ξηράς	Τοπογραφία, κίνηση και δομή παγετώνων, κάλυψη του χιονιού του πάγου και του παγετώνα, παρακολούθηση της κατάστασης του χιονιού και υπολογισμός του ισοδύναμου νερού

Πίνακας 1.3 Πεδία εφαρμογών των δεδομένων SAR

Κεφάλαιο 2 Συμβολομετρία
Απεικονίσεων SAR

2.1 Εισαγωγή

Η συμβολομετρία απεικονίσεων SAR είναι μια τεχνική της τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιείται για τη εξαγωγή της τρισδιάστατης πληροφορίας της γήινης επιφάνειας. Η βασική ιδέα της συμβολομετρίας είναι η σύγκριση της φάσης δυο ή περισσότερων απεικονίσεων SAR που έχουν προκύψει από σχετικά διαφορετικές θέσεις ή από διαφορετικούς χρόνους για την ίδια σκηνή. Η πληροφορία της φάσης για κάθε εικονοστοιχείο της SAR απεικόνισης περιέχει πληροφορία της πλάγιας απόστασης (slant-range) που μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ενός μικρού κλάσματος του μήκους κύματος (ακρίβεια μέχρι μερικά χιλιοστά). Αυτή η ακρίβεια είναι ανεξάρτητη από την πλάγια απόσταση (απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της σκηνής) με αντάλλαγμα το υπολογιστικό κόστος που με την σημερινή τεχνολογία είναι μικρό. Η διαφορά των μετρημένων πλάγιων αποστάσεων είναι ασαφής με βάση το μήκος κύματος με αποτέλεσμα να χρειάζεται η εφαρμογή μιας διαδικασίας που καλείται αποκατάσταση φάσης. Η χρήση επιπρόσθετων πληροφοριών για την σκηνή των SAR απεικονίσεων και οι υποθέσεις που γίνονται αποτελούν παράγοντες που καθιστούν δυνατή τη διαδικασία της αποκατάστασης φάσης.

Η πρώτη θεωρητική μελέτη σχετικά με τις δυνατότητες της συμβολομετρίας για τη τοπογραφική απεικόνιση έγινε από τον Graham το 1974. Στη συνέχεια, η πρώτη πρακτική εφαρμογή έλαβε χώρα το 1986 από το JPL (Jet Propulsion Laboratory) με τη χρήση αερομεταφερόμενου συστήματος SAR με δυο κεραίες. Τα εκπεμπόμενα σήματα προέρχονταν από τη μια κεραία και τα επιστρεφόμενα σήματα καταγράφονταν από τις δυο την ίδια χρονική στιγμή. Το 1988 ο Goldstein χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR από τη δορυφορική πλατφόρμα SEASAT εξήγαγε τοπογραφικούς χάρτες που συμφωνούσαν σε μεγάλο βαθμό με τους ήδη διαθέσιμους τοπογραφικούς χάρτες. Επίσης το 1988, ο Gabriel και ο Goldstein υλοποίησαν τη πρώτη εφαρμογή επαναληπτικής συμβολομετρίας με δεδομένα του δορυφόρου SIR-B. Η συγκεκριμένη μέθοδος σημειώθηκε ότι έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και απαιτεί τη γνώση τροχιακών στοιχείων. Αυτές οι βασικές μελέτες ήταν η αρχή της εξέλιξης της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR δείχνοντας τις δυνατότητες και τις προοπτικές της συγκεκριμένης τεχνικής. Σήμερα, το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων που είναι κατάλληλα για συμβολομετρική επεξεργασία είναι μεγάλο και τα προϊόντα της συμβολομετρικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Οι βασικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη τεχνική της συμβολομετρίας σχετίζονται με τοπογραφικές απεικονίσεις, εξαγωγή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, μέτρηση κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος, εντοπισμός μετακινήσεων/αλλαγών στην επιφάνεια του εδάφους (σεισμούς, ηφαίστεια), ταξινομήσεις, παρατηρήσεις ωκεανών και παγετώνων.

Για την εκπόνηση των βημάτων συμβολομετρικής διαδικασίας υπάρχουν τα παρακάτω λογισμικά που είναι ελεύθερα (open source) για ακαδημαϊκούς και επιστημονικούς σκοπούς και τα εμπορικά (commercial) για όλες τις χρήσεις.

Free software packages	Commercial software packages
Repeat Orbit Interferometry Package (ROI_PAC) developed at the Jet Propulsion Laboratory and the California Institute of Technology (JPL/Caltech) available at http://www.openchannelfoundation.com/projects/ROI_PAC/index.html	DIAPASON originally developed by the French Space Agency (CNES), now maintained by Altamira. Information for both UNIX and Windows platforms (http://www.altamirainformation.com/html/index.php)
Doris (Delft object-oriented radar interferometric software developed by the Delft Institute of Earth Observation and Space Systems of Delft University of Technology downloadable from http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/	GAMMA SAR developed by Gamma Remote Sensing for Solaris, Linux, OSX, and Windows platforms (http://www.gamma-rs.ch/software/)
Interferometric Processing System (IPS) developed by the Alaska Satellite Facility (ASF)	IMAGINE InSAR embedded in ERDAS IMAGINE remote sensing software suite developed by Leica Geosystems Geospatial Imaging (http://gi.leica-geosystems.com/default.aspx)
	Pulsar , developed by Phoenix Systems for UNIX based platforms. (http://www.phoenixsystems.co.uk/)
	SARscape , that was developed by sarmap s.a. a Swiss company (http://www.sarmap.ch/) SARscape is interfaced with ENVI and can be run on Windows or Linux based personal computers

Πίνακας 2. 1 Λογισμικά πακέτα για την υλοποίηση της συμβολομετρικής διαδικασίας Πηγή: Zhou et al., 2009

2.2 Μορφές συμβολομετρίας

Οι απεικονίσεις SAR που χρησιμοποιούνται για την συμβολομετρία μπορεί να έχουν διαφορετική χωρική γραμμή βάσης και διαφορετική χρονική γραμμή βάσης. Τα κριτήρια ταξινόμησης των μορφών συμβολομετρίας σχετίζονται με τη χρονική γραμμή βάσης των απεικονίσεων SAR, τη γεωμετρική/χωρική γραμμή βάσης των απεικονίσεων SAR, με τη φύση των δεδομένων SAR και της εξαγόμενης πληροφορίας της συμβολομετρικής διαδικασίας.

- Συμβολομετρία μιας διέλευσης (Single pass interferometry)
- Επαναληπτική συμβολομετρία (Repeat pass interferometry)
- Συμβολομετρία κατά πλάτος (Along track interferometry)
- Συμβολομετρία κατά μήκος (Across track interferometry)
- Κλασική συμβολομετρία (Conventional interferometry)
- Διαφορική συμβολομετρία (Differential interferometry)
- Συμβολομετρία πολωμένων απεικονίσεων (Polarimetric interferometry SAR)

2.2.1 Συμβολομετρία μιας Διέλευσης (Single Pass Interferometry)

Η συμβολομετρία μιας διέλευσης ή όπως συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία “single pass interferometry” σχετίζεται με τη ταυτόχρονη λήψη και καταγραφή του επιστρεφόμενου σήματος από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διάρκεια που διέρχεται η πλατφόρμα/ες πάνω από τη περιοχή

ενδιαφέροντος εκπέμπεται η μικροκυματική ακτινοβολία από τη μία κεραία και τα επιστρεφόμενα σήματα καταγράφονται και από τις δύο κεραίες. Οι κεραίες μπορεί να βρίσκονται στην ίδια πλατφόρμα ή σε διαφορετικές πλατφόρμες με συγκεκριμένη γεωμετρική γραμμή βάσης. Η τεχνική της συμβολομετρίας μιας διέλευσης χρησιμοποιείται κυρίως συνήθως για τον περιορισμό των σφαλμάτων λόγω της ατμόσφαιρας και το περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης. Τα συστήματα που έχουν τη δυνατότητα παραγωγής συμβολομετρικών προϊόντων μιας διέλευσης ήταν/είναι η αποστολή ERS-1/2, η αποστολή SRTM, οι δορυφόροι COSMO-skymed και οι TerraSAR-X/TanDEM-X.

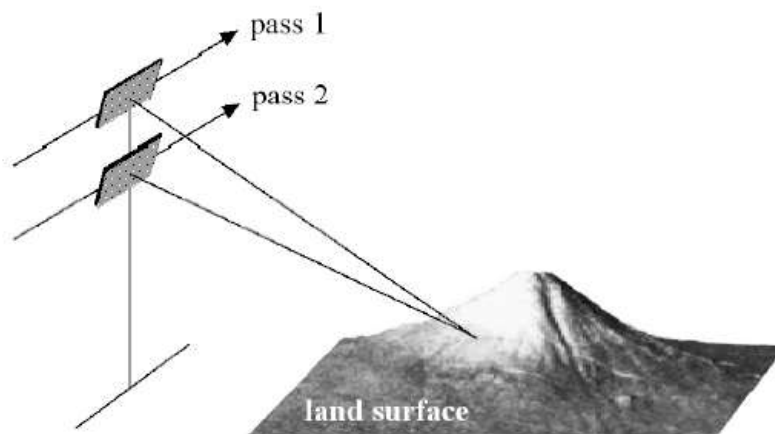
2.2.2 Επαναληπτική Συμβολομετρία (Repeat Pass Interferometry)

Η επαναληπτική συμβολομετρία είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί απεικονίσεις SAR με διαφορετικούς χρόνους λήψης από σχεδόν παράλληλες τροχιές. Στις περισσότερες εφαρμογές, η τεχνική της επαναληπτικής συμβολομετρίας υλοποιείται σε απεικονίσεις δορυφορικών συστημάτων SAR. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους

- ✚ Τα τροχιακά δεδομένα των δορυφόρων είναι ακριβέστερα αν και η ενσωμάτωση αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (INS- Inertial Navigation System) και GPS στις αερομεταφερόμενες πλατφόρμες παρέχει συγκρίσιμες ακρίβειες.
- ✚ Οι γραμμές πτήσης των αερομεταφερόμενων συστημάτων παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές συγκριτικά με τις δορυφορικές τροχιές.
- ✚ Κόστος απόκτησης κατάλληλων απεικονίσεων από αερομεταφερόμενα συστήματα SAR για της εφαρμογής της συμβολομετρικής διαδικασίας.
- ✚ Περιορισμένη διαθεσιμότητα των απεικονίσεων αφού τα αερομεταφερόμενα συστήματα SAR έχουν προγραμματισμένες λήψεις για ένα συγκεκριμένο σκοπό.

Η γεωμετρία της επαναληπτικής συμβολομετρίας εξετάζεται στη παράγραφο 2.3. Σημειώνεται ότι οι βασικές υποθέσεις για την εφαρμογή της επαναληπτικής συμβολομετρίας είναι η απουσία μεταβολής της οπισθοσκέδασης μεταξύ των λήψεων και η ίδια γεωμετρία απεικόνισης SAR.

2.2.3 Συμβολομετρία κατά Πλάτος (Across Track Interferometry)



Η συμβολομετρία κατά πλάτος ή συμβατική συμβολομετρία έχει τη γεωμετρία της παρακάτω εικόνας με τις δυο κεραίες να είναι τοποθετημένες στο πλατφόρμα του συστήματος SAR με διεύθυνση κάθετη στη τροχιά πτήσης (Bamler & Hartl, 1998). Η γεωμετρική γραμμή βάσης που ορίζεται σαν το διάνυσμα με αρχή τη θέση της μίας κεραίας και πέρας τη θέση της άλλης κεραίας είναι κάθετη στη τροχιά/γραμμή πτήσης. Στις

Εικόνα 2.1 Γεωμετρία κατά πλάτος συμβολομετρίας Πηγή: Ouchi, 2013

περισσότερες περιπτώσεις, η μια κεραία αποτελεί πομπό και δέκτη ηλεκτρομαγνητικού παλμού και η άλλη κεραία είναι μόνο δέκτης. Οι βασικές εφαρμογές που χρησιμοποιείται η συμβολομετρία κατά

πλάτος είναι οι τοπογραφικές απεικονίσεις. Οι απεικονίσεις μπορούν να προέρχονται από δυο περάσματα της ίδιας δορυφορικής ή αερομεταφερόμενης πλατφόρμας ή από ένα διστατικό σύστημα SAR ή από ένα μονοστατικό σύστημα SAR με δυο κεραίες πάνω στη πλατφόρμα. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι στις επόμενες παραγράφους η ανάλυση γίνεται για αυτό το είδος της συμβολομετρίας.

2.2.4 Συμβολομετρία κατά Μήκος (Along Track Interferometry)

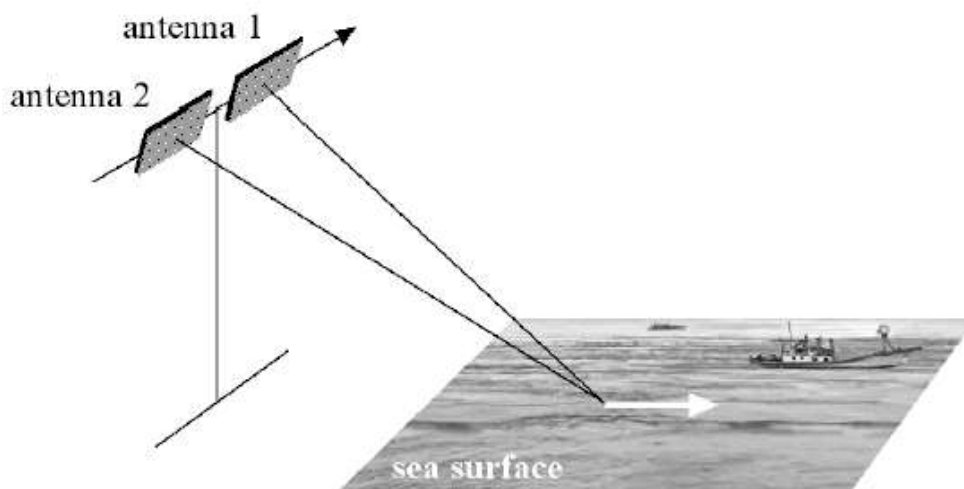
Στη συμβολομετρία κατά μήκος τουλάχιστον δυο κεραίες τοποθετούνται πάνω στη δορυφορική πλατφόρμα κατά μήκος της τροχιάς πτήσης. Η γραμμή βάσης είναι παράλληλη στη διεύθυνση της πτήσης/τροχιάς της πλατφόρμας του συστήματος SAR. Συνήθως η κεραία που βρίσκεται μπροστά εκπέμπει τη μικροκυματική ακτινοβολία και στη συνέχεια και οι δυο λαμβάνουν τα επιστρεφόμενα σήματα.

Η διαφορά φάσης προκαλείται από τη μετακίνηση του στόχου και δίνεται από τη σχέση (Ouchi, 2013):

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{u}{V} B_{AT}$$

Όπου u η ταχύτητα του στόχου, V η ταχύτητα της πλατφόρμας, λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και B_{AT} η συνιστώσα της γραμμής βάσης στη διεύθυνση πτήσης.

Η συμβολομετρική συνάφεια της κατά μήκος συμβολομετρίας σχετίζεται την ακρίβεια προσδιορισμού της συμβολομετρικής φάσης. Σημειώνεται ότι η συμβολομετρική φάση δεν ξεπερνάει τη τιμή 2π με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται η υλοποίηση της διαδικασίας της αποκατάστασης φάσης. Μια ενδεικτική τάξη μεγέθους ακρίβειας προσδιορισμού της τεχνικής της κατά μήκος συμβολομετρίας είναι μερικά εκατοστά το δευτερόλεπτο. Η συγκεκριμένη ακρίβεια εξαρτάται από το μήκος κύματος και



τη γεωμετρική απόσταση των 2 κεραιών όπως και στη κατά πλάτος συμβολομετρία. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ο χρόνος που οι σκεδαστές παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά (Ouchi, 2013).

Εικόνα 2.2 Γεωμετρία κατά μήκος συμβολομετρίας Πηγή: Ouchi, 2013

Σημειώνεται ότι στα συγκεκριμένα συστήματα οι γωνίες στροφής (yaw, pitch) των δορυφορικών πλατφορμών δημιουργούν συνιστώσες της βάσης στους άξονες y και z με αποτέλεσμα τη παρουσία

επιπρόσθετων διαφορών φάσης. Τέλος, η τεχνική της συμβολομετρίας κατά μήκος χρησιμοποιείται κυρίως για ωκεανογραφία (Goldstein & Zebker 1987), για ανίχνευση κινούμενων στόχων (Breit et al., 2003, Budillon et al., 2008, Suchandt et al., 2010) για μελέτη υδάτινων επιφανειών (Romeiser et al., 2007). Η τεχνική της συμβολομετρίας κατά μήκος χρησιμοποιείται κυρίως από αερομεταφερόμενα συστήματα SAR ενώ τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται και στους δορυφόρους TanDEM-X/ TerraSAR-X.

2.2.5 Διαφορική Συμβολομετρία (Differential Interferometry)

Ο στόχος της διαφορικής συμβολομετρίας είναι ο εντοπισμός μετακινήσεων της γήινης επιφάνειας με στόχο τη παρακολούθηση γεωδυναμικών φαινομένων (ηφαίστεια, σεισμοί, κατολισθήσεις, παγετώνες, κατασκευές). Η μέτρηση των μικρομετακινήσεων γίνεται στη πλάγια διεύθυνση (slant-range) (LOS-Line Of Sight).

Η βασική αρχή της διαφορικής συμβολομετρίας είναι η αφαίρεση της φάσης που σχετίζεται με τη τοπογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος από ένα συμβολόγραμμα που έχει σχηματιστεί από δυο απεικονίσεις SAR. Η φάση που απομένει περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\varphi_{disp} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp}$$

Όπου Δr_{disp} είναι η πλάγια απόσταση.

Σύμφωνα με τη παραπάνω σχέση η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί έχει τάξη μεγέθους ένα μέρος του μήκους κύματος στη πλάγια διεύθυνση (slant-range). Για την υλοποίηση της τεχνικής της διαφορικής συμβολομετρίας είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της φάσης λόγω της τοπογραφίας της περιοχής από διαθέσιμα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα ή από επιπρόσθετες απεικονίσεις SAR ή με τη χρήση τεχνικών όπως η τεχνική σταθερών σκεδαστών (Permanent Scatterers technique) ή τη μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset-SBAS). Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητη η αφαίρεση του θορύβου λόγω της χρονικής αποσυσχέτισης και των μεταβολών των χαρακτηριστικών της μικροκυματικής ακτινοβολίας (ταχύτητα) από τη διάδοση της στην ατμόσφαιρα. Η χρονική καθυστέρηση λόγω της ατμόσφαιρας οφείλεται κυρίως στη περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς. Η τάξη μεγέθους της καθυστέρησης είναι 2-4 μέτρα που λόγω της κλίσης του εδάφους μεταφράζεται σε περίπου 1cm/km περιορίζοντας την ακρίβεια της συμβατικής διαφορικής συμβολομετρίας (Moreira et al., 2013). Στα μεγάλα μήκη κύματος (μπάντες L,P) η καθυστέρηση λόγω του συνολικής περιεκτικότητας ηλεκτρονίων (TEC- Total Electron Content) της ιονόσφαιρας δεν είναι αμελητέα και θα πρέπει να καθορίζεται (Belcher, 2008). Η χρήση πολλών απεικονίσεων SAR από διαφορετικούς χρόνους αποτελεί ένα τρόπο εντοπισμού των παραπάνω φαινομένων που περιγράφονται από τη παρακάτω σχέση.

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{atm} + \varphi_n$$

Όπου φ_{topo} είναι η εναπομείναντα συνιστώσα της φάσης λόγω τοπογραφίας μετά την αφαίρεση από το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, φ_{atm} η συνιστώσα της φάσης λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας, φ_n η συνιστώσα της φάσης λόγω θορύβου και i, j οι δείκτες των απεικονίσεων SAR.

Για την εξαγωγή της απόλυτης πληροφορίας των μετακινήσεων στο έδαφος όπως και στη συμβατική γεωμετρία είναι απαραίτητη η αποκατάσταση φάσης. Τέλος, ανάλογα την εφαρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές προσεγγίσεις για την αφαίρεση των συνιστωσών της φάσης για την απόκτηση της πληροφορίας της αλλαγής της επιφάνειας του εδάφους.

2.2.6 Συμβολομετρία Πολωμένων Απεικονίσεων (Polarimetric Interferometry SAR)

Η συμβολομετρία πολωμένων απεικονίσεων (PolInSAR) βασίζεται στην αξιοποίηση πολλών συμβολογραμμάτων που έχουν προκύψει από απεικονίσεις με διάφορες πολώσεις (Moreira et al., 2013). Η τεχνική της συμβολομετρίας πολωμένων απεικονίσεων συνδυάζει τη τεχνική της πολωσιμετρίας και της συμβατικής συμβολομετρίας. Χρησιμοποιώντας τη τεχνική της πολωσιμετρίας εξάγεται ο πίνακας σκέδασης όπου περιγράφει τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά των στόχων στις SAR απεικονίσεις. Παρόλο αυτά η τεχνική της πολωσιμετρίας δεν παρέχει κανενός είδους υψομετρική πληροφορία σε αντίθεση με τη τεχνική της συμβατικής συμβολομετρίας. Η τεχνική της συμβολομετρίας πολωμένων απεικονίσεων αξιοποιεί την εξαγόμενη πληροφορία της πολωσιμετρίας και της συμβολομετρίας και εφαρμόζεται σε πολλές εφαρμογές (Cloude & Parathanassiou 1998).

Οι σημαντικότερες μεταβλητές της τεχνικής PolInSAR είναι η συμβολομετρική φάση και η συμβολομετρική συνάφεια που έχουν παρατηρηθεί για τις διάφορες πολώσεις. Η συμβολομετρική συνάφεια γ εξαρτάται από το όργανο παρατήρησης, από τις παραμέτρους λήψης και από τις γεωμετρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες που στόχου (Zebker et al., 1992, Bamler & Hartl 1998, Krieger et al., 2010). Ο όρος της συμβολομετρικής συνάφειας που αντιστοιχεί στη χωρική αποσυσχέτιση λόγω της γεωμετρικής γραμμής βάσης γ_{Geo} περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\gamma_{Geo} = \gamma_{Az} \cdot \gamma_{Rg} \cdot \gamma_{Vol}$$

Όπου οι όροι γ_{Rg} και γ_{Az} σχετίζονται με τη λανθασμένη προβολή των φασμάτων ανακλαστικότητας των δυο απεικονίσεων SAR στο συμβολόγραμμα. Η διαφορά στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων (slant-range) προκαλείται από τις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης των απεικονίσεων SAR και η διαφορά στη διεύθυνση του αζιμουθίου λόγω των διαφορετικών κεντροειδών Doppler. Το φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων στις δύο διευθύνσεις (αζιμούθιο, slant-range) έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές γ_{Rg} και γ_{Az} να πλησιάζουν το ένα (Bamler & Hartl 1998).

Ο όρος γ_{Vol} σχετίζεται με τη σκέδαση όγκου (volume scattering) μερικών στόχων (distributed targets/scatterers) που ευθύνεται για ένα μέρος της αποσυσχέτισης που παρατηρείται κατά τη κατασκευή του συμβολογραμματος. Η αποσυσχέτιση όγκου προκαλείται από τη διαφορετική προβολή των φασμάτων ανακλαστικότητας των σκεδαστών για τη κατακόρυφη διεύθυνση στη κάθε εικόνα που χρησιμοποιείται στη συμβολομετρία (Moreira et al., 2013).

Στα χέρσα εδάφη που η κατακόρυφη σκέδαση μπορεί να περιγραφεί από μια συνάρτηση Dirac μετά το φασματικό φιλτράρισμα η συνάφεια περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\gamma = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_{Vol} = \gamma_{SNR} \cdot e^{ik_z z_0}$$

Η τιμή της συνάφειας γ μειώνεται σε δασικές περιοχές και στις υδάτινες επιφάνειες πλησιάζει το μηδέν λόγω της αποσυσχέτισης που υπάρχει για την μικρή τιμή SNR.

Τέλος, ο όρος γ_{vol} είναι η κύρια μεταβλητή όπου περιέχει τη πληροφορία σχετικά με τη κατακόρυφη δομή του στόχου και χρησιμοποιείται για τη ποσοτική εκτίμηση των παραμέτρων όγκου από μετρήσεις PolInSAR και περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση (Moreira et al., 2013) :

$$\gamma_{vol} = e^{ik_z z_0} \cdot \frac{\int_0^{h_v} F(z') e^{ik_z z'} dz'}{\int_0^{h_v} F(z') dz'}$$

Όπου το μέγεθος h_v εκφράζει το ύψος λόγω σκέδασης όγκου, το $F(z')$ ο μετασχηματισμός Fourier της κατακόρυφης διάρθρωσης των σκεδαστών, το z τη κατακόρυφη διεύθυνση, z_0 το ύψος αναφοράς και το k_z περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση

$$k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta_i} = \frac{2\pi}{h_a}$$

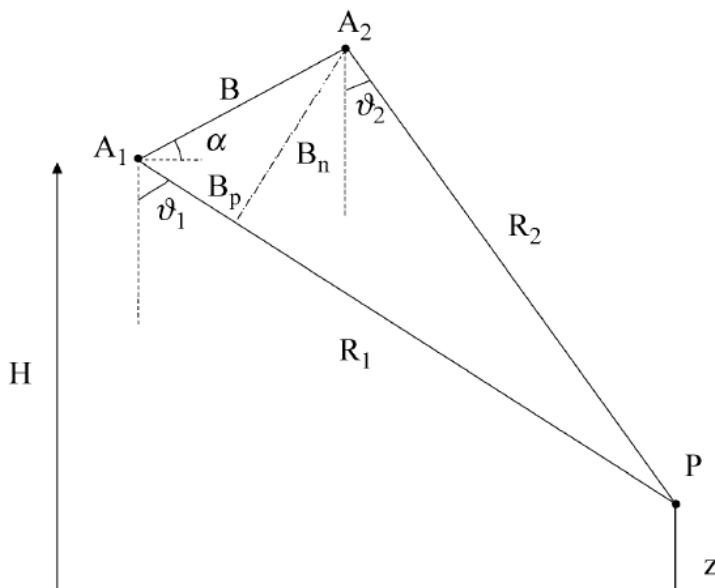
Όπου το $\Delta\theta$ είναι η διαφορά των γωνιών πρόσπτωσης μεταξύ των δυο απεικονίσεων SAR, λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας μικροκυματικής ακτινοβολίας, h_a το ύψος ασάφειας και θ_i η τοπική γωνία πρόσπτωσης.

Από τις διάφορες πολώσεις και τις διάφορες γραμμές βάσης εξάγονται πολλές τιμές γ_{vol} και εκτιμάται η συνάρτηση $F(z')$ και στη συνέχεια αντιστρέφεται για την εξαγωγή της κατακόρυφης διάρθρωσης των σκεδαστών.

Οι εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνικής σχετίζονται κυρίως με τη εξαγωγή των δασικών παραμέτρων όπως το ύψος των δέντρων και τη παρακολούθηση μεταβολών/καταστροφών σε δασικές περιοχές. Η τεχνική της συμβολομετρίας πολωμένων απεικονίσεων εφαρμόζεται και σε επιστημονικά πεδία όπως η παρακολούθηση παγετώνων/πάγων και γεωργικές καλλιέργειες.

2.3 Γεωμετρία λήψης

Τα βασικά στοιχεία της γεωμετρίας ενός στόχου και των διαφορετικών θέσεων του αισθητήρα SAR



φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Αναλυτικότερα, οι θέσεις των κεραιών είναι A_1 και A_2 ενώ οι αποστάσεις είναι R_1 και R_2 αντίστοιχα. Η γεωμετρική διαφορά των δυο κεραιών καλείται γεωμετρική γραμμή βάσης και συμβολίζεται με B . B_n και B_p είναι η κάθετη και η παράλληλη συνιστώσα της γεωμετρικής γραμμής βάσης αντίστοιχα, στη πλάγια διεύθυνση (slant-range). Κάθε εικονοστοιχείο των δυο απεικονίσεων SAR αντιστοιχεί

Σχήμα 2. 1 Γεωμετρία συμβολομετρίας Πηγή: Catani et al., 2005

σε μια περιοχή στο έδαφος όπου οι διαστάσεις της είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με το μέγεθος του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας από το σύστημα SAR. Η συγκεκριμένη περιοχή περιέχει ένα μεγάλο αριθμό στοιχειωδών σκεδαστών. Το επιστρεφόμενο σήμα είναι ένα συνεκτικό άθροισμα όλων των επιστροφών από τους στοιχειώδεις σκεδαστές. Η ενέργεια του επιστρεφόμενου σήματος εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών, από τη χωρική κατανομή τους και από το προσανατολισμό τους σχετικά με τη θέση του αισθητήρα SAR. Αν μια περιοχή παρατηρείται από δυο διαφορετικές θέσεις τότε το επιστρεφόμενο σήμα διαφέρει λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας. Η φάση του επιστρεφόμενου σήματος διαμορφώνεται με τυχαίο τρόπο. Η διαφορά των φάσεων των δύο απεικονίσεων που αποτελούν το συμβολομετρικό ζευγάρι περιορίζει τη τυχαία συμπεριφορά της και προσδιορίζει τη επίδραση της τοπογραφίας και της μεταβολής της στη φάση. Η σχέση που περιγράφει τη συμβολομετρική φάση είναι:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1)$$

Όπου λ το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας του συστήματος SAR.

Σύμφωνα με το νόμο των συνημιτόνων εξάγεται η παρακάτω σχέση:

$$R_2^2 = R_1^2 + B^2 - 2R_1B \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha\right)$$

Όπου για λόγους συμφωνίας με τη βιβλιογραφία $\theta = \theta_1$.

Στη παραπάνω σχέση η διαφορά μεταξύ των αποστάσεων $\Delta R = R_2 - R_1$ είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μέγεθος της πλάγιας απόστασης (slant-range) (για τον δορυφόρο ALOS $R_{1,2} \approx 865 \text{ km}$ και $\Delta R \approx 7 \text{ km}$).

$$R_2 - R_1 \ll R_i \text{ Όπου } i = 1,$$

Έτσι σύμφωνα με τον Richards et al., 2007 η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί με τη παρακάτω μορφή:

$$R_2 - R_1 = \frac{B^2}{2R_1} + B \sin(\theta - \alpha)$$

Σύμφωνα με το σχήμα της γεωμετρίας της συμβολομετρίας οι συνιστώσες της βάσης περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις των συνιστωσών της βάσης η συμβολομετρική φάση περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση.

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{B^2}{2R} + B_{\parallel}^2 \right)$$

Σε πολλές εφαρμογές για λόγους απλοποίησης ο όρος $\frac{B^2}{2R_1}$ παραλείπεται και η σχέση που εκφράζει τη διαφορά των πλάγιων αποστάσεων είναι

$$R_2 - R_1 = B \sin(\theta - \alpha)$$

Συμπληρωματικά, το υψόμετρο z του στόχου P δίνεται από τη σχέση:

$$z = H - R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right) = H - R \cos \theta_1$$

Μια στοιχειώδη μεταβολή στην πλάγια απόσταση έχει τη παρακάτω επίδραση στη διεύθυνση του υψομέτρου:

$$\frac{\partial h}{\partial(R_2 - R_1)} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial(R_2 - R_1)}$$

Αντικαθιστώντας $\frac{\partial h}{\partial \theta} = R \sin \theta$, $\frac{\partial \Delta R}{\partial \theta} = B \cos(\theta - \alpha) = B_{\perp}$ και $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1)$ έχουμε:

$$\frac{\partial h}{\partial(R_2 - R_1)} = \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \Rightarrow \partial h = \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \cdot \partial(R_2 - R_1) = \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \varphi$$

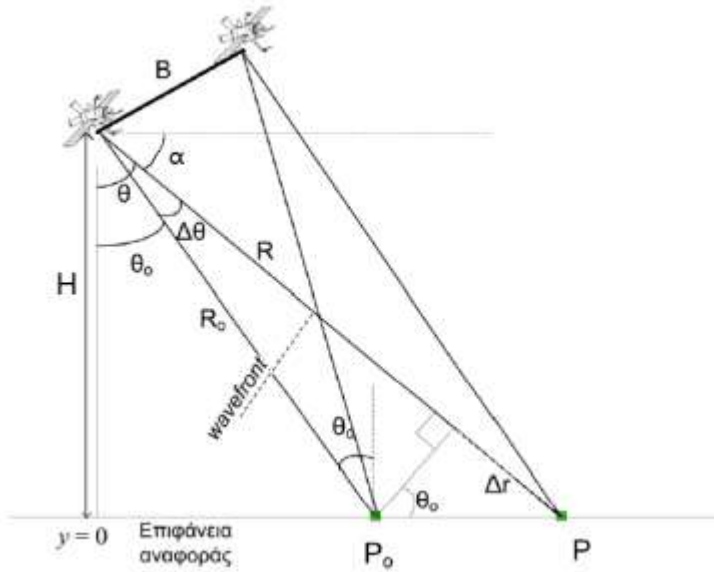
Για διαφορά φάσης 2π (κροσσός συμβολής) η υψομετρική διαφορά που αντιστοιχεί ονομάζεται ύψος ασάφειας και εκφράζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\Delta h = \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Τέλος σημειώνεται ότι βάση την επίδραση της επίπεδης γης και την επίδραση της υψομετρικής διαφοράς η φάση μπορεί να ξεχωριστά:

$$\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo}$$

Συγκεκριμένα, έστω ότι υπάρχουν δυο σημεία (P_0, P) με ίδιο υψόμετρο ($h=0$) και διαφορετικές πλάγιες αποστάσεις (R_0, R). Η διαφορά της φάσης των συγκεκριμένων σημείων εκφράζει την επίδραση της επίπεδης γης στη συμβολομετρική φάση.



$$\varphi_{flat} = \varphi - \varphi_0$$

Όπου η φάση φ περιγράφεται από τη σχέση

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{B^2}{2R} + B_{\parallel}^2 \right)$$

Σχήμα 2. 2 Γεωμετρία συμβολομετρίας (σημεία ίσου υψόμετρου)

Με αντικατάσταση και απλοποίηση του παράγοντα $\frac{B^2}{2R}$ προκύπτει:

$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} (B_{\parallel} - B_{\parallel 0}) = \frac{4\pi}{\lambda} B (\sin(\Delta\theta + \theta_0 - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha))$$

Θεωρώντας ότι $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ και $\cos \Delta\theta \approx 1$ και μετά την ανάπτυξη της τριγωνομετρικής ταυτότητας καταλήγουμε:

$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \alpha) \cdot \Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \Delta\theta$$

Λόγω της επίπεδης γης η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία όρασης του συστήματος SAR άρα βάση της γεωμετρίας και σύμφωνα με τη σχέση $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ έχουμε:

$$R\Delta\theta \approx R \sin \Delta\theta \approx \frac{\Delta r}{\tan \theta_0}$$

Τελικά, η σχέση που προκύπτει είναι:

$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \Delta r}{R \tan \theta_o}$$

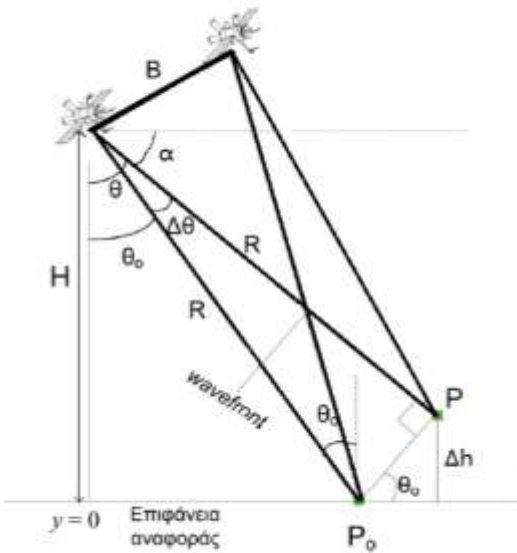
Έστω ότι υπάρχουν δυο σημεία (P_o, P) με ίδια πλάγια απόσταση και διαφορετικό υψόμετρο (Δh). Η διαφορά της φάσης των συγκεκριμένων σημείων εκφράζει την επίδραση της υψομετρικής διαφοράς (τοπογραφίας) δυο σημείων στη φάση και συμβολίζεται με φ_{topo}

Με τη ίδια λογική η σχέση που προκύπτει είναι :

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_o - \alpha) \cdot \Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \Delta\theta$$

Υποθέτουμε ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία όρασης του συστήματος SAR άρα βάσει της γεωμετρίας και σύμφωνα με τη σχέση $\sin \Delta\theta \simeq \Delta\theta$ έχουμε:

$$R \Delta\theta \simeq R \sin \Delta\theta \simeq \frac{\Delta h}{\sin \theta_o}$$



Σχήμα 2. 3 Γεωμετρία Συμβολομετρία (σημεία ίδιας πλάγιας απόστασης)

Έτσι η τελική σχέση που προκύπτει είναι

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \Delta h}{R \sin \theta_o}$$

2.4 Βήματα συμβολομετρικής διαδικασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Υπογραμμίζεται ότι η επιλογή ενός κατάλληλου συμβολομετρικού ζευγαριού έχει μεγάλη σημασία για την επιτυχία της συμβολομετρίας. Επίσης η επιτυχία της τεχνικής της επαναληπτικής συμβολομετρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υψηλή συσχέτιση και συνάφεια των δυο σετ των σημάτων που έχουν καταγραφεί για τις δυο λήψεις αν οι ιδιότητες σκέδασης της επιφάνειας του εδάφους παραμένουν σταθερές. Κατά γενικό κανόνα η επιλογή ενός συμβολομετρικού ζευγαριού βασίζεται στην ευαισθησία του

συμβολογράμματος στη τοπογραφία που εκφράζεται από το ύψος ασάφειας h_a και τη συμβολομετρική συνάφεια γ .

2.4.1. Υπολογισμός της γεωμετρικής βάσης (Baseline estimation)

Όπως έχει αναφερθεί η γεωμετρική γραμμή βάσης είναι η απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων του αισθητήρα SAR. Ο ακριβής προσδιορισμός του διανύσματος της βάσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό στην εκτέλεση της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Η γεωμετρική γραμμή βάσης ορίζεται συνήθως σαν κάθετη (B_{\perp}) και παράλληλη (B_{\parallel}) συνιστώσα και μπορεί να υπολογιστεί με τρεις τρόπους.

- Από τα τροχιακά δεδομένα των συστημάτων SAR
- Από την αναλογία των κροσσών συμβολής από το παραγόμενο συμβολόγραμμα
- Με τη χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων (GCP- Ground Control Point) όπου η αποκαταστημένη φάση μετατρέπεται σε υψόμετρο με στόχο τον επαναπροσδιορισμό της βάσης

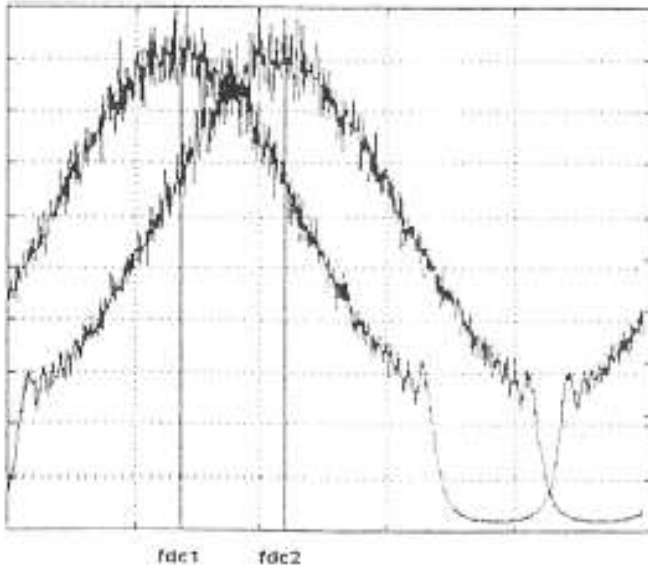
Η κρίσιμη βάση ορίζεται ως η μέγιστη βάση για την οποία είναι δυνατή η δημιουργία του συμβολογράμματος. Σύμφωνα με τους Werner et al., 2003 η γραμμή βάσης πρέπει να είναι μικρότερη του 25 % της κρίσιμης βάσης.

2.4.2. Φασματική επεξεργασία

Η φασματική επεξεργασία των απεικονίσεων SAR είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του συμβολογράμματος και εφαρμόζεται και στις δυο διευθύνσεις (αζιμούθιο, πλάγια διεύθυνση). Η διαφορετική θέση του αισθητήρα SAR τη στιγμή της λήψης έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας που προκαλεί τη "σμίκρυνση" της φασματικής ανακλαστικότητας της μιας απεικόνισης ως προς την άλλη. Στην οριακή περίπτωση όπου οι γωνίες πρόσπτωσης είναι ίσες σημαίνει ότι η γεωμετρική γραμμή βάσης είναι μηδενική με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εφαρμογή της συμβολομετρίας. Στο χώρο των συχνοτήτων χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier η διαφορετική σμίκρυνση των απεικονίσεων μεταφράζεται σε μετατόπιση του φάσματος ανακλαστικότητας. Αυτή η μετατόπιση του φάσματος ανακλαστικότητας Δf περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση (Carrasco, 1998) :

$$\Delta f = \frac{f B_{\perp}}{R \tan(\theta - \alpha)}$$

Όπου f η φέρουσα συχνότητα, R η πλάγια απόσταση, B_{\perp} η κάθετη συνιστώσα της γεωμετρικής γραμμής βάσης, θ η γωνία πρόσπτωσης και α η τοπική γωνία κλίσης του εδάφους.



Εικόνα 2.3 Φασματική ανακλαστικότητα απεικονίσεων SAR στη διεύθυνση του αζιμουθίου Πηγή: Carasco, 1998

Για τη δημιουργία του συμβολογράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η πληροφορία που είναι κοινή στα δυο διαγράμματα φασματικής ανακλαστικότητας. Το υπόλοιπο τμήμα θα πρέπει να αφαιρεθεί (Gattelli et al., 1994). Στην οριακή περίπτωση όπου η γραμμή βάσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή της βάσης δεν υπάρχει κοινό τμήμα μεταξύ των φασμάτων ανακλαστικότητας με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εφαρμογή της συμβολομετρίας.

Τέλος, σημειώνεται ότι είναι απαραίτητο το φιλτράρισμα της συχνότητας Doppler στις δυο απεικονίσεις SAR με στόχο τον ακριβή προσδιορισμό της συχνότητας του κεντροειδούς Doppler f_{DC} . Το σφάλμα στο υπολογισμό της συχνότητας του κεντροειδούς Doppler έχει ως αποτέλεσμα την εσφαλμένη αντιστοίχιση του εικονοστοιχείου στην απεικόνιση στη διεύθυνση του αζιμουθίου.

2.4.3. Συμπροσαρμογή απεικονίσεων (Coregistration)

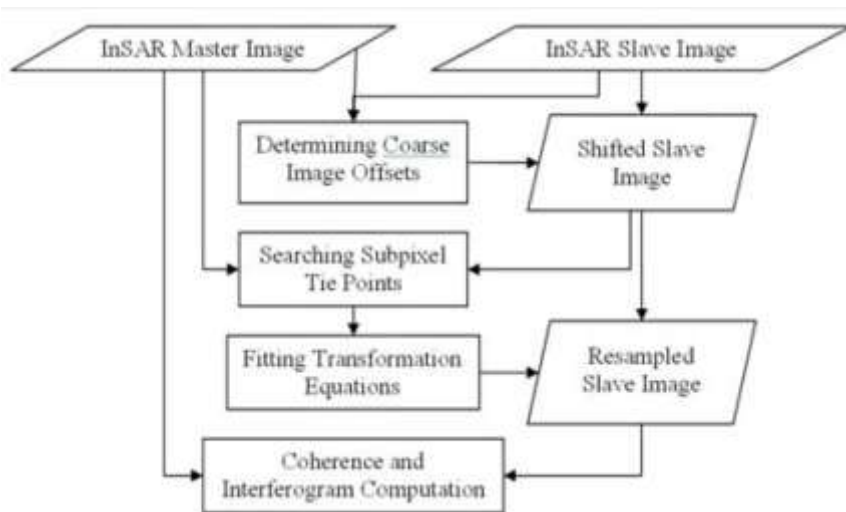
Η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων SAR αποτελεί ένα βήμα της συμβολομετρικής διαδικασίας όπου οι δευτερεύουσες απεικονίσεις (slave) αποκτούν την ίδια γεωμετρία με την κύρια απεικόνιση (master). Η ίδια γεωμετρία των απεικονίσεων SAR διασφαλίζει το γεγονός ότι κάθε στόχος της γήινης επιφάνειας αντιστοιχεί στο ίδιο εικονοστοιχείο των συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων. Η συμπροσαρμογή είναι ένα βασικό βήμα για τον ακριβή προσδιορισμό της διαφοράς φάσης και της μείωσης του θορύβου. Οι δορυφορικές απεικονίσεις SAR αντιστοιχούν σε πλάγια απόσταση περίπου 850 χιλιόμετρα με γεωμετρική γραμμή βάσης περίπου 200 μέτρα με αποτέλεσμα την απουσία της παράλλαξης μεταξύ των απεικονίσεων (Li & Bethel, 2008). Η επιδιωκόμενη ακρίβεια συμπροσαρμογής των απεικονίσεων SAR θα πρέπει να είναι καλύτερη από 1/10 του εικονοστοιχείου για την αποφυγή εισαγωγής επιπλέον ασαφειών στη συμβολομετρική διαδικασία (Hanssen, 1998, Li & Bethel 2008, Zhou et al., 2009). Συμπερασματικά, η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων SAR είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της συμβολομετρικής διαδικασίας (Scheiber & Moreira 2000).

Η διαδικασία της συμπροσαρμογής των απεικονίσεων SAR περιλαμβάνει δυο βήματα επεξεργασίας τη μικρή και τη μεγάλη ακρίβεια συμπροσαρμογής.

Αρχικά, εφαρμόζεται η διαδικασία της συμπροσαρμογής μικρής ακρίβειας (coarse) όπως και στις οπτικές απεικονίσεις και η ακρίβεια της διαδικασίας είναι περίπου ένα με δυο εικονοστοιχεία. Η διαδικασία συμπροσαρμογής μικρής ακρίβειας εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας της τρεις εξισώσεις

γεωκωδικοποίησης που εκφράζουν τη γεωμετρία της δορυφορικής πλατφόρμας του συστήματος SAR του στόχου στο έδαφος και του στόχου στην απεικόνιση SAR. Ο πιο συνήθης τρόπος προσέγγισης για τη συμπροσαρμογή μικρής ακρίβειας είναι αυτός της ετεροσυσχέτισης (cross-correlation) (Li and Goldstein, 1990; Liao et al., 2004). Ο αλγόριθμος της ετεροσυσχέτισης εφαρμόζεται στις τιμές του πλάτους της απεικόνισης, είναι απλός στην εφαρμογή του, αρκετά σύντομος και με αποδεκτή ακρίβεια.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαδικασία της συμπροσαρμογής μεγάλης ακρίβειας που περιλαμβάνει τη επιλογή σημείων σύνδεση (tiepoints), την αντιστοίχιση των σημείων, τη εφαρμογή μοντέλων μετασχηματισμού και τέλος τον επαναπροσδιορισμό των τιμών του πλάτους και της φάσης των δευτερευουσών απεικονίσεων SAR. Για την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας της συμπροσαρμογής μεγάλης ακρίβειας έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αρκετοί αλγόριθμοι (Li and Goldstein, 1990; Kwoh et al., 1994 Rufino et al., 1998; Selva & Lopez-Sanchez, 2007) οι οποίοι εφαρμόζονται είτε στις τιμές του πλάτους και της φάσης ταυτόχρονα είτε μόνο στις τιμές της φάσης και προσδιορίζουν τα σημεία σύνδεσης.



Σχήμα 2. 4 Διάγραμμα ροής συμπροσαρμογής απεικονίσεων SAR Πηγή: Li & Bethel 2008

Οι παραμετρικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη συμπροσαρμογή των απεικονίσεων περιγράφουν τις μετατοπίσεις στις δυο βασικές διευθύνσεις (αζιμουθιο, πλάγια διεύθυνση) και είναι συνήθως πολυωνυμικές. Αφού προσδιοριστούν οι παράμετροι των εξισώσεων μετασχηματισμού το αποτέλεσμα είναι η μεταβολή στο ιστορικό φάσης του εικονοστοιχείου,

εξαιτίας της μεταβολής των περιεχόμενων σκεδαστών στην αντίστοιχη έκταση του εικονοστοιχείου στην επιφάνεια του εδάφους. Είναι επόμενο πως οι τιμές του πλάτους και της φάσης θα πρέπει να επαναπροσδιοριστούν. Ο επαναπροσδιορισμός της πληροφορίας του πλάτους και της φάσης και κάθε εικονοστοιχείου των δευτερευουσών απεικονίσεων μέσω διαδικασίας παρεμβολής. Αρκετοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί (nearest neighbor, bilinear, cubic convolution), αλλά τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν από την εφαρμογή της διδιάστατης sinc παρεμβολής (Li and Bethel, 2008). Πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει βέλτιστη επιλογή μεθόδου επαναδειγματοληψίας. Η γεωμετρία λήψης, τα χαρακτηριστικά και η ποιότητα των SAR απεικονίσεων καθώς και η μορφολογία του αναγλύφου θα καθορίσουν τη συμπεριφορά του αλγορίθμου επαναδειγματοληψίας κατά τη συμπροσαρμογή.

Οι βασικοί παράμετροι της διαδικασίας συμπροσαρμογής που καθορίζουν τη επιτυχία εφαρμογής της είναι:

- Ο αριθμός των σημείων σύνδεσης
- Η χωρική κατανομή των σημείων σύνδεσης
- Η μέθοδος και το μέγεθος του παραθύρου της μεθόδου αντιστοίχισης των σημείων σύνδεσης
Το παράθυρο συσχέτισης που ορίζεται για την συμπροσαρμογή των απεικονίσεων SAR οριοθετεί τη περιοχή που εντοπίζονται οι μετατοπίσεις στις δυο διευθύνσεις (azimuth, slant-range) και είναι μια κρίσιμη παράμετρος για τη επιτυχία της διαδικασίας της συμπροσαρμογής
- Μαθηματικά μοντέλα για τη διαδικασία μετασχηματισμού
- Μέθοδος επαναπροσδιορισμού

Συμπερασματικά, η μέση τιμή της εικόνας συνάφειας όπως και η ακρίβεια του παραγόμενου ΨΜΕ αποτελούν τρόποι συνολικής αξιολόγησης της συμπροσαρμογής (μικρής και μεγάλης ακρίβειας), όπως και της συμβολομετρικής διαδικασίας (Li and Bethel, 2008)., Σημειώνεται ότι η εφαρμογή πολυωνυμικών μεθόδων για τη υλοποίηση της διαδικασίας της συμπροσαρμογής δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης (TerraSAR-X, COSMO-skymed) δεν έχει αποδεκτά αποτελέσματα (Yague-Martinez et al., 2010). Η ανάπτυξη αλγορίθμου για την καλύτερη συμπροσαρμογή απεικονίσεων SAR υψηλής ανάλυση προτείνεται από τη συγκεκριμένη μελέτη (Yague-Martinez et al., 2010).

2.4.4. Δημιουργία διαγράμματος κροσσών συμβολής (συμβολόγραμμα) (Interferogram Generation)

Η συμβολομετρία απεικονίσεων SAR απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον δυο εικόνων φάσης SAR που έχουν ληφθεί σε διαφορετικούς χρόνους για τη δημιουργία χαρτών που απεικονίζουν τις διαφορές στις διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους ή τις χωρικές διαφορές του χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης των εικόνων. Όταν μια σειρά από εικόνες φάσης SAR είναι διαθέσιμες για μια συγκεκριμένη περιοχή είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις/μικρομετακινήσεις του εδάφους χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα διαφορικά συμβολογράμματα.

Δυο είναι οι βασικές μέθοδοι για τη παραγωγή του συμβολογράμματος.

1. Να χρησιμοποιηθούν οι εικόνες ανά δυο χρησιμοποιώντας τη πληροφορία από ένα διαθέσιμο DEM ώστε οι κροσσοί συμβολής να αντιστοιχούν σε γραμμές ίσης αλλαγής της πλάγιας απόστασης.
2. Η χρήση τριών εικόνων χωρίς τη χρήση εξωτερικής τοπογραφικής πληροφορίας.

Για μια πιο λεπτομερή περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του συμβολογράμματος ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη παρακάτω βιβλιογραφία (Balzter 2001, Zhou et al., 2009).

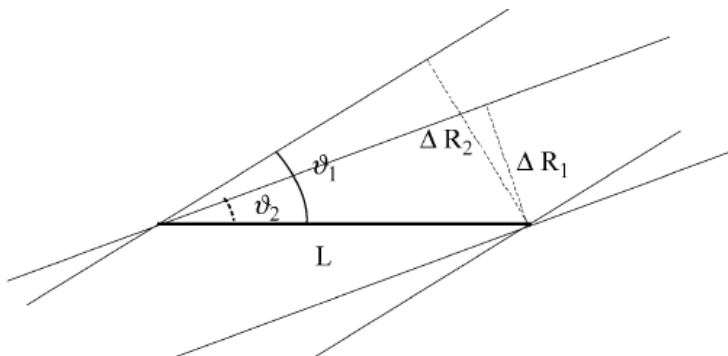
Το συμβολόγραμμα είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της κύριας (master) μιγαδικής SAR απεικόνισης με τη συζυγή δευτερεύουσα (slave) μιγαδική της άλλης SAR απεικόνισης. Εναλλακτικά, ένα συμβολόγραμμα ή διάγραμμα κροσσών συμβολής είναι μια εικόνα που σχηματίζεται από τη διαφορά δυο συμπροσαρμοσμένων εικόνων φάσης SAR της ίδιας περιοχής. Η διαδικασία της δημιουργίας του συμβολογράμματος έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της χωρικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα το μέγεθος του εικονοστοιχείου του συμβολογράμματος επιλέγεται να είναι ίδιο με το μέγεθος της προβολής στο

έδαφος του εικονοστοιχείου της απεικόνισης SAR. Ένας κροσσός συμβολής είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στη εικόνα που έχουν ίδια τιμή φάσης. Ο αριθμός των κροσσών συμβολής σε ένα συμβολόγραμμα υπολογίζεται από ένα σημείο αναφοράς όπου η παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους είναι μηδενική. Για τη μέτρηση των κροσσών συμβολής σε περιοχές όπου οι κροσσοί συμβολής είναι λεπτοί, το συμβολόγραμμα πρέπει να ξανά-παραχθεί με καλύτερη χωρική ανάλυση χρησιμοποιώντας εικόνες με μικρότερη χρονική διαφορά λήψεων (χρονική αποσυσχέτιση). Η πλάγια απόσταση επηρεάζει τη φάση. Ένα συμβολόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με τη τοπογραφία της περιοχής και τις παραμορφώσεις/μικρομετακινήσεις αν οι διαφορές στις πλάγιες αποστάσεις επηρεάζουν τη διαφορά φάσης μεταξύ των δυο συμπροσαρμοσμένων εικόνων φάσης SAR. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο λήψεων των εικόνων μπορεί να είναι από 0.1 δευτερόλεπτα (single-pass interferometry) μέχρι μερικά χρόνια (repeat-pass interferometry) ανάλογα με την εφαρμογή και τις αλλαγές στους στόχους. Για την επαναληπτική συμβολομετρία οι δυο εικόνες της φάσης πρέπει να συμπροσαρμοστούν με ακρίβεια τουλάχιστον 0.1 pixels ώστε από το παραγόμενο συμβολόγραμμα να μπορεί να εξαχθεί η πληροφορία. Αυτό είναι προφανές γιατί η διαφορά φάσης σε 2 ground pixels δεν έχει νόημα. Παράγοντες που επηρεάζουν τη παραγωγή του συμβολογράμματος είναι η ποιότητα της συμπροσαρμογής (σταθερό ground pixel), η τοπική κλίση της επιφάνειας του εδάφους (μικρή), η διεύθυνση της παρατήρησης (ascending, descending), τα στοιχεία τροχιάς, η συχνότητα των δυο εικόνων, η διαδικασία επεξεργασίας της εικόνας και η τοπογραφική διαφορά της περιοχής ενδιαφέροντος από τις δυο διαφορετικές θέσεις της κεραίας του συστήματος SAR.

Μια μετατόπιση του εδάφους που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο της εικόνας στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων (χωρίς τη παραμόρφωση (distortion) του εικονοστοιχείου) μεταφράζεται σε μετατόπιση φάσης σχετικά με την υπόλοιπη εικόνα. Στη πλάγια διεύθυνση το μισό του μήκους κύματος για ένα εικονοστοιχείο και ένα ολόκληρο μήκος κύματος για μια ολόκληρη διαδρομή (round trip) του σήματος δημιουργούν ένα κροσσό συμβολής (2π διαφορά φάσης). Ως εκ τούτου, ένας κροσσός συμβολής στο συμβολόγραμμα αντιστοιχεί σε μια παραμόρφωση του εδάφους με μέγεθος το ήμισυ του μήκους κύματος στη πλάγια διεύθυνση. Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων με τη τεχνική της συμβολομετρίας βασίζονται στη παραπάνω πρόταση (Zhou et al., 2009).

Για την παρατήρηση του συμβολογράμματος πρέπει να τηρούνται δυο συνθήκες

- Η χωρική κατανομή και οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των στοιχειωδών σκεδαστών να παραμείνουν αμετάβλητες. Για δεδομένα όπου έχουν την ίδια χρονική στιγμή λήψης αυτή η συνθήκη ικανοποιείται σε αντίθεση με δεδομένα που έχουν μεγάλη χρονική διαφορά λήψεων ειδικά σε περιοχές με υψηλή υγρασία και σε περιοχές με βλάστηση.
- Η διαφορά των πλάγιων αποστάσεων θα πρέπει να είναι μικρότερη σε μέγεθος από το μήκος κύματος λ για τον σχηματισμό κροσσών συμβολής. Έστω L η προβολή της διαφοράς των πλάγιων αποστάσεων στο έδαφος που περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:



Σχήμα 2. 5 Γεωμετρική συνθήκη Πηγή: Catani et al., 2005

$$L = \frac{\Delta R}{2 \sin \varphi_\theta}$$

Όπου φ_θ η γωνία θέασης (look angle) του αισθητήρα SAR που είναι διαφορετική για κάθε θέση θέασης. Η συνθήκη που θα πρέπει να ικανοποιείται περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$2L(\sin \varphi_{\theta_1} - \sin \varphi_{\theta_2}) < \lambda$$

Συμβολομετρική φάση

Αφού το συμβολόγραμμα απεικονίζει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο εικόνων που απαρτίζουν το συμβολομετρικό ζευγάρι κάθε παράγοντας που επηρεάζει τη φάση του σήματος SAR επηρεάζει και το συμβολόγραμμα. Για παράδειγμα, όταν το σήμα διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα οι διαφορές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (ατμοσφαιρικοί υδρατμοί, σύννεφα, κ.λπ.) μεταξύ των δυο εικόνων μεταφράζονται σε διαφορετικά μήκη διαδρομής. Οι επιπτώσεις λόγω της ατμόσφαιρας δεν απαλείφονται με την αφαίρεση των επιμέρους εικόνων φάσης. Οι ανομοιογένειες στη τροπόσφαιρα και στην ιονόσφαιρα επηρεάζουν τη συμβολομετρική φάση. Για την επαναληπτική συμβολομετρία, οι διαφορετικές γεωμετρικές λήψεις επηρεάζουν το συμβολόγραμμα. Για τις εικόνες που έχουν ληφθεί σε διαφορετικούς χρόνους από διαφορετικές τροχιές η χωρική διαφορά των δυο θέσεων της κεραίας καλείται γραμμή βάσης (baseline). Η επίδραση των διαφορετικών τροχιών λήψης στη συμβολομετρική φάση περιγράφονται από τον όρο τροχιακοί κροσσοί συμβολής (orbital fringes). Η τοπογραφία της περιοχής επηρεάζει το συμβολόγραμμα και η επίδραση της δίνεται από τον όρο τοπογραφικοί κροσσοί συμβολής (topographic fringes). Συμπερασματικά, οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμβολομετρική φάση είναι

1. Η απόσταση μεταξύ της κεραίας και του στόχου στο έδαφος.
2. Η τοπογραφία της περιοχής
3. Τα τροχιακά στοιχεία του συμβολομετρικού ζευγαριού
4. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους και της ατμόσφαιρας
5. Ο θόρυβος του συστήματος

Στη περίπτωση της επαναληπτικής συμβολομετρίας (repeat-pass interferometry) χρησιμοποιούνται δύο εικόνες από 2 διαδοχικά περάσματα με γραμμή βάσης B για τη παραγωγή του συμβολογράμματος. Η πρώτη εικόνα λέγεται απεικόνιση master και η δεύτερη εικόνα απεικόνιση slave. Η μορφή της συμβολομετρικής φάσης είναι:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_o + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{HB_\perp}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} B_\parallel + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{dielectric} + \Delta\varphi_{pn} + 2\pi n$$

Όπου ΔD_o είναι η παραμόρφωση στη πλάγια διεύθυνση (Line of Sight LOS), λ το μήκος κύματος του συστήματος SAR, B_\perp και B_\parallel η κάθετη και η παράλληλη συνιστώσα της γραμμής βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού αντίστοιχα. H το ύψος του εικονοστοιχείου πάνω από μια επιφάνεια αναφοράς, R η πλάγια απόσταση μεταξύ της προβολής του εικονοστοιχείου στο έδαφος και της κεραίας της master απεικόνισης. Τέλος θ η τοπική γωνία πρόσπτωσης (local incidence angle) όπου είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη δέσμη του σήματος με την κάθετη ευθεία στην επιφάνεια του εδάφους στο σημείο της πρόσπτωσης.

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αναπαριστά τη συνιστώσα της συμβολομετρικής φάσης λόγω της διαφοράς της πλάγιας απόστασης. Οι εικόνες SAR περιέχουν το πλάτος και τη φάση (amplitude and phase) που έχουν προκύψει από παρατηρήσεις σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι η διαφορά στην πλάγια απόσταση μπορεί να οφείλεται και στις παραμορφώσεις του εδάφους στο συγκεκριμένο

χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι για να μετρηθούν οι παραμορφώσεις του εδάφους θα πρέπει να έχουν καθοριστεί όλοι οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης της συμβολομετρικής φάσης.

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης εκφράζει την επίδραση της τοπογραφίας της περιοχής. Για την αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης είναι απαραίτητη η γνώση της υψομετρικής πληροφορίας της περιοχής. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι διαθέσιμο ένα DEM υψηλής ακρίβειας όπου παράγεται ένα συνθετικό συμβολόγραμμα και αφαιρείται από το συμβολόγραμμα που έχει παραχθεί από τις εικόνες SAR. Τέλος, σημειώνεται ότι αν οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης της συμβολομετρικής φάσης είναι γνωστοί μπορεί να παραχθεί ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους από το συμβολόγραμμα.

Ο τρίτος όρος της εξίσωσης περιγράφει τη μετατόπιση της φάσης της απεικόνισης slave συγκριτικά με την απεικόνιση master, λόγω της προβολής της απόστασης των τροχιών λήψης των δύο απεικονίσεων $B_{||}$ στη πλάγια διεύθυνση. Η μετατόπιση της φάσης λόγω της παράλληλης συνιστώσας της βάσης μπορεί να εκτιμηθεί αν είναι διαθέσιμα τα ακριβή τροχιακά στοιχεία. Για την αφαίρεση των τροχιακών επιδράσεων στη συμβολομετρική φάση μπορούν να προσαρμοστούν οι κροσσοί συμβολής στο συμβολόγραμμα όταν είναι γνωστές οι παραμορφώσεις από μετρήσεις GPS σε τουλάχιστον 7 σημεία (Zhou et al., 2009).

Ο όρος $\Delta\varphi_{atm}$ εκφράζει τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη συμβολομετρική φάση. Για παράδειγμα σε μια ηφαιστειακή περιοχή όπου η καθυστέρηση του σήματος είναι μεγάλη δημιουργούνται κροσσοί συμβολής (ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα) που είναι πιθανόν να ερμηνευτούν λανθασμένα σαν παραμορφώσεις λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας (deflation/inflation). Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις είναι δύσκολο να υπολογιστούν και οι μέθοδοι διόρθωσης των σφαλμάτων είναι η χρήση πολλών συμβολογραμμάτων (stacking) και ο εντοπισμός σταθερών σκεδαστών που έχουν μηδενική συμβολομετρική φάση στο συμβολόγραμμα με στόχο τον καθορισμό της ατμοσφαιρικής επίδρασης.

Ο όρος $\Delta\varphi_{dielectric}$ εκφράζει την επίδραση των μεταβολών των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των σκεδαστών στο έδαφος. Για παράδειγμα η αλλαγή στην υγρασία του εδάφους (soil moisture) συνεπάγεται και την αλλαγή των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους. Τέλος, σημειώνεται ότι αν οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης είναι γνωστοί μπορεί να εξαχθούν πληροφορίες για τις διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο όρος $\Delta\varphi_{pn}$ σχετίζεται με το θόρυβο της φάσης. Για τη μείωση του θορύβου της φάσης σε ένα συμβολόγραμμα χρησιμοποιούνται κυρίως τεχνικές προσαρμοσμένου φιλτραρίσματος (adaptive filtering) και πολλαπλών-απεικονίσεων (multi-look). Σημειώνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το φίλτρο (weighted power spectral density filter) (Goldstein & Werner, 1998).

Ο τελευταίος όρος αναπαριστά την ασάφεια των κύκλων που σχετίζεται με το βήμα της αποκατάστασης της φάσης. Το βήμα της αποκατάστασης της φάσης σε δυο διαστάσεις που εκτιμάται η πραγματική φάση γνωρίζοντας τη “τυλιγμένη” τιμή της φάσης θεωρείται το δυσκολότερο βήμα της συμβολομετρικής επεξεργασίας. Αν και είναι αδύνατη η αποκατάσταση της φάσης σε όλες τις περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εκτίμηση της πραγματικής φάσης (Balzter 2001, Zhou et al., 2009). Πρόσφατες μέθοδοι έχουν αποδείξει ότι η εξαγωγή των παραμορφώσεων της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να γίνει χωρίς τη χρήση της δισδιάστατης αποκατάστασης της φάσης (Li et al., 2008).

Η σχέση μεταξύ συμβολομετρικής φάσης και υψομέτρου είναι:

$$h = \frac{\lambda r \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \varphi$$

όπου h το υψόμετρο της περιοχής, λ το μήκος κύματος, r η πλάγια απόσταση από τον αισθητήρα μέχρι το εικονοστοιχείο στο έδαφος, θ η γωνία πρόσπτωσης και φ η συμβολομετρική φάση. Το ύψος ανακροσσο συμβολής ή ύψος ασάφειας h_a δίνεται από τη σχέση:

$$h_a = \frac{\lambda r \sin \theta}{2B_{\perp}}$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω σχέση όσο αυξάνεται η κάθετη συνιστώσα της γραμμής βάσης B_{\perp} τόσο μειώνεται το ύψος ασάφειας h_a , δηλαδή τα παραγόμενα προϊόντα έχουν καλύτερη υψομετρική ακρίβεια. Οι μεγάλες τιμές της κάθετης συνιστώσας της γραμμής βάσης B_{\perp} χρησιμοποιούνται περισσότερο για την παραγωγή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Παρόλο αυτά όσο αυξάνεται η τιμή της B_{\perp} τόσο δυσκολότερη είναι η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης (unwrapping phase) λόγω της αύξησης της αποσυσχέτισης των σημάτων. Όταν η τιμή της B_{\perp} μειώνεται τα συμβολομετρικά ζευγάρια είναι καταλληλότερα για εφαρμογές σχετικά με τις παραμορφώσεις του εδάφους (Al Jassar & Rao, 2011).

Για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων/μικρομετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους από το συμβολόγραμμα θα πρέπει να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν όλες οι επιδράσεις όλων των προαναφερθέντων παραγόντων. Στη πραγματικότητα θα υπάρχουν εναπομείναντα σφάλματα που μειώνουν την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα του συμβολογράμματος θα οφείλεται στις αλλαγές στη πλάγια απόσταση των στόχων στο έδαφος. Η απόσταση μεταξύ δυο κροσσών συμβολής αντιστοιχεί σε φάση 2π (ένα κύκλο). Ο συνολικός αριθμός των κροσσών συμβολής μπορεί να μετασχηματιστεί σε τιμή παραμόρφωσης/μετακίνησης όταν πολλαπλασιαστεί με το ήμισυ του μήκους κύματος του συστήματος SAR. Με αυτή τη λογική, τα συστήματα SAR έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν μετατοπίσεις της τάξης των εκατοστών ή και λιγότερο με χωρική ανάλυση μερικών μέτρων για μια εκτενής περιοχή. Η σχέση που περιγράφει τη μετατόπιση ΔD_o μετατρέπεται σε οριζόντια μετατόπιση ΔD στη διεύθυνση της μετατόπισης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta D = \Delta D_o / \sin \theta \cos \varphi$$

Όπου φ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της οριζόντιας μετατόπισης και της προβολής της διεύθυνσης θέασης του συστήματος ραντάρ στο έδαφος. Όταν μετρηθεί η μετατόπιση μπορεί να προσδιοριστεί και ο ρυθμός μέσης παραμόρφωσης σαν το λόγο της μετατόπισης με το χρονικό διάστημα των δυο απεικονίσεων από τις οποίες σχηματίστηκε το συμβολόγραμμα.

2.4.5. Αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης (Flat earth removal)

Η φάση λόγω της επίπεδης γης θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν την αποκατάσταση της φάσης ή στο στάδιο της γεωκωδικοποίησης. Στις περισσότερες εφαρμογές συνίσταται η αφαίρεση της φάσης λόγω της

επίπεδης γης πριν το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης για τη διευκόλυνση της υλοποίησης του συγκεκριμένου βήματος.

Όπως έχει αναφερθεί η συμβολομετρική φάση περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda r_0} \cdot B_n \cdot \left(\frac{\Delta r}{\tan a} + \frac{\Delta h}{\sin a} \right)$$

Όπου ο όρος φ_{flat} είναι η φάση λόγω της επίπεδης γης και ο όρος φ_{topo} σχετίζεται με την υψομετρική πληροφορία και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Οι βασικότερες μέθοδοι υπολογισμού και αφαίρεσης της φάσης λόγω της επίπεδης γης βασίζονται στα τροχιακά στοιχεία και στα φασματικά χαρακτηριστικά του συμβολογράμματος.

- ✓ Υπάρχουν αλγόριθμοι που στηρίζονται στην άμεση γεωκωδικοποίηση υπολογίζοντας τη φάση λόγω της επίπεδης γης. Η ακρίβεια του υπολογισμού της φάσης λόγω της επίπεδης γης που αντιστοιχεί στην επιφάνεια αναφοράς (WGS 84) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των τροχιακών δεδομένων (Xiang et al., 2008).
- ✓ Υπάρχουν προσεγγίσεις που στηρίζονται στην έμμεση ή αντίστροφη γεωκωδικοποίηση (Carrasco, 1998). Η φάση λόγω της επίπεδης γης προκύπτει από την επιφάνεια αναφοράς (WGS 84) είτε από το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς που μετασχηματίζονται στη πλάγια γεωμετρία της κύριας (master) απεικόνισης SAR. Συμπληρωματικά, συνήθως χρησιμοποιείται ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων για τον περιορισμό των σφαλμάτων που προκύπτουν. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην έμμεση γεωκωδικοποίηση παρουσιάζουν αξιόπιστα αποτελέσματα και χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερη κλίμακα.
- ✓ Δεν θα πρέπει να παραλείψουμε τις προσεγγίσεις που βασίζονται στα φασματικά χαρακτηριστικά του συμβολογράμματος για την αφαίρεση της φάσης λόγω της επίπεδης γης. Αρχικά, εκτιμάται η μέση ή η μέγιστη συχνότητα των κροσσών συμβολής και στη συνέχεια η τιμή της φ_{flat} μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών είναι χρήσιμα κυρίως για γρήγορες και προσεγγιστικές λύσεις (Xiang et al., 2008).

Τέλος, έχουν γίνει προσπάθειες για την δημιουργία νέων υβριδικών αλγορίθμων που παρουσιάζουν βελτιωμένα αποτελέσματα (Xiang et al., 2008).

Υπογραμμίζεται ότι τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς που χρησιμοποιείται για τη συμβολομετρική διαδικασία έχουν μεγάλη επίδραση στο παραγόμενο συμβολομετρικό προϊόν. Συγκεκριμένα, για την αφαίρεση της φάσης λόγω της τοπογραφίας της περιοχής οι τιμές του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου θα πρέπει να αναφέρονται στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς (WGS 84) επειδή τα τροχιακά δεδομένα των δορυφορικών συστημάτων αναφέρονται στο ελλειψοειδές WGS 84.

2.4.6. Φιλτράρισμα του συμβολογράμματος (Adaptive filtering)

Το φιλτράρισμα στο συμβολόγραμμα έχει στόχο την απομάκρυνση του θορύβου που εμφανίζεται λόγω της αποσυσχέτισης των απεικονίσεων, λόγω της κηλίδωσης και λόγω του θορύβου του συστήματος SAR

και εφαρμόζεται συνήθως στο χώρο των συχνοτήτων (μετασχηματισμό Fourier). Η μέθοδος ονομάζεται προσαρμοσμένο φιλτράρισμα (adaptive filtering) και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό STF (Short Time Fourier) με τη χρήση παραθύρων (Carrasco, 1998) που περιγράφεται στη συνέχεια.

1. Το συμβολόγραμμα χωρίζεται σε επικαλυπτόμενα παράθυρα και γίνεται η μετατροπή τους από το πεδίο του χώρου στο πεδίο των συχνοτήτων υπολογίζοντας τη συχνότητα του μέγιστου πλάτους.
2. Σχεδιάζεται το φίλτρο που είναι ένα ζωνοδιαβατό (bandpass) δισδιάστατο ψηφιακό φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR) που υπολογίζεται με τη χρήση της μεθόδου των παραθύρων.
3. Εφαρμόζεται το φίλτρο στο πεδίο των συχνοτήτων στη συχνότητα του μέγιστου πλάτους που έχει υπολογιστεί για κάθε παράθυρο. Η μετατόπιση του φίλτρου γίνεται προσθέτοντας μια τιμή φάσης στις δυο διευθύνσεις με στόχο την δημιουργία προσαρμοσμένων φίλτρων για κάθε ένα επικαλυπτόμενο παράθυρο ξεχωριστά.
4. Πολλαπλασιασμός του φίλτρου με το παράθυρο στο πεδίο των συχνοτήτων και η μετατροπή του αποτελέσματος στο πεδίο του χώρου με τη χρήση αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Το μέγεθος του παραθύρου του φίλτρου καθορίζει το βαθμό εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα του φίλτρου. Σε περιοχές με μικρή συνάφεια (δασικές περιοχές) όπου υπάρχει πολύ θόρυβος δημιουργούνται τεχνητοί κροσσοί συμβολής μειώνοντας την ορθότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Ο καθορισμός ενός κατωφλιού στη τιμή του θορύβου (SNR) ή στη τιμή της συνάφειας περιορίζει το φαινόμενο των τεχνητών κροσσών συμβολής.

2.4.7. Δημιουργία εικόνας συνάφειας (Coherence generation)

Ο βαθμός ομοιότητας μεταξύ των απεικονίσεων SAR του συμβολομετρικού ζευγαριού εκφράζεται από τη συμβολομετρική συνάφεια. Η συμβολομετρική συνάφεια είναι ένα στατιστικό μέγεθος που ποσοτικοποιεί τις διαφορές του συμβολομετρικού ζευγαριού και τον τυχαίο θόρυβο. Η σχέση που εκφράζει τη συμβολομετρική συνάφεια είναι:

$$\gamma = \frac{|\sum_{i=1}^N f_i g_i^*|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |f_i|^2 \sum_{i=1}^N |g_i|^2}}$$

Η συμβολομετρική συνάφεια είναι ο παράγοντας της συσχέτισης (cross correlation) που εκφράζει τη μέση συσχέτιση μεταξύ των απεικονίσεων f και g σε μια υποπεριοχή με N εικονοστοιχεία της συνολικής σκηνής με τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$.

Στη πράξη η εικόνας της συνάφειας που προκύπτει εξαρτάται από το μέγεθος της υποπεριοχής (παράθυρο) που επιλέγεται. Όσο μεγαλύτερο είναι το παράθυρο τόσο μεγαλύτερη είναι η στατιστική εμπιστοσύνη με το κόστος της ανομοιογένειας της περιοχής. Η συνάφεια συνδέεται άμεσα με το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR-Signal to Noise Ratio) σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση.

$$|\gamma| = \frac{SNR}{SNR + 1}$$

Οι τιμές της συνάφειας ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί σε εντελώς ασυσχέτιστα δεδομένα (π.χ. γεωμετρική γραμμή βάσης μεγαλύτερη της κρίσιμης τιμής) και οι τιμές κοντά στη μονάδα υψηλή συσχέτιση δεδομένων (ευδιάκριτοι κροσσοί συμβολής).

Οι συνιστώσες της συνάφειας είναι:

$$\gamma = \gamma_{SNR} \gamma_{base} \gamma_{scene} \gamma_{vol} \gamma_{proc}$$

Η συνιστώσα γ_{SNR} προσδιορίζεται από το λόγο της σχετικής οπισθοσκέδαση του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης σε ένα σύστημα SAR προς το θόρυβο σε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι.

Η συνιστώσα γ_{base} ποσοτικοποιεί την αποσυσχέτιση λόγω των διαφορετικών γεωμετριών λήψης των απεικονίσεων SAR.

Η συνιστώσα γ_{vol} ποσοτικοποιεί την αποσυσχέτιση λόγω της σκέδασης όγκου (volume scattering) όπως συμβαίνει συνήθως στις δασικές περιοχές. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που περιγράφουν την αποσυσχέτιση λόγω σκέδασης όγκου είναι ο συντελεστής απόσβεσης (extinction coefficient), η συμβολομετρική γραμμή βάσης και η πόλωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η συγκεκριμένη συνιστώσα μπορεί να περιοριστεί (να πλησιάσει στη μονάδα) στη περίπτωση που η “κανονική” γραμμή βάσης είναι μηδενική κάτι που είναι αδύνατο στα δορυφορικά συστήματα SAR.

Η συνιστώσα γ_{proc} σχετίζεται με την αποσυσχέτιση στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας SAR και για σχηματισμό της τελικής εικόνας.

Η συνιστώσα γ_{scene} ποσοτικοποιεί την αποσυσχέτιση της σκηνής με βάση τη χρονική διαφορά των επαναλαμβανόμενων λήψεων (repeat-pass) που χρησιμοποιούνται για την ανάλογη εφαρμογή.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Preiss et al., 2003 με τον κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας επαναλαμβανόμενων λήψεων και τη κατάλληλη συμβολομετρική επεξεργασία είναι εφικτό να ισχύει $\gamma_{SNR} \gamma_{base} \gamma_{proc} \approx 1$. Στη περίπτωση αυτή η συνολική συνάφεια γ αναφέρεται στη συνοχή της σκηνής.

2.4.8. Αποκατάσταση της φάσης (Phase unwrapping)

Το συμβολόγραμμα περιέχει την πληροφορία της φάσης που σχετίζεται άμεσα με την τοπογραφία. Κατά γενικό κανόνα όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα όπου παράγεται το συμβολόγραμμα τόσο δυσκολότερο είναι το στάδιο αποκατάστασης της φάσης (Zhou et al., 2009). Οι τιμές της φάσης περιορίζονται στο διάστημα $[-\pi, \pi]$, χωρίς όμως να γνωρίζουμε τον αριθμό ακέραιων κύκλων (2π) που προηγούνται. Η αποκατάσταση της φάσης (phase unwrapping) είναι η διαδικασία εύρεσης του αριθμού ακέραιων κύκλων n όπως φαίνεται και στη παρακάτω σχέση.

$$\varphi_{unw} = \varphi_{int} + n \cdot 2\pi$$

Η αποκατάσταση της φάσης αποτελεί ένα δύσκολο και πολλές φορές αδύνατο στόχο σε περιοχές χαμηλής συνάφειας και σε περιοχές με μεγάλες υψομετρικές ανωμαλίες. Με στόχο την επιτυχία της αποκατάστασης της φάσης γίνονται διάφορες υποθέσεις. Η βασικότερη υπόθεση σχετίζεται με την διαφορά της φάσης μεταξύ δυο γειτονικών εικονοστοιχείων. Συγκεκριμένα με την υπόθεση ότι η διαφορά φάσης μεταξύ δυο γειτονικών εικονοστοιχείων είναι μικρότερη από π υπολογίζεται ο αριθμός

των ακέραιων κύκλων. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη υπόθεση στα σημεία όπου παρατηρούνται μεγάλες διαφορές της φάσης (μεγαλύτερες του μισού κύκλου) το αποτέλεσμα του εκάστοτε αλγορίθμου δεν θα ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Στη ιδανική περίπτωση όπου δεν υπήρχαν τέτοια σημεία το αποτέλεσμα θα ήταν σωστό. Επίσης, το πεδίο θα ήταν συντηρητικό δηλαδή η υλοποίηση της ολοκλήρωσης που απαιτείται για την εύρεση του αριθμού των ακέραιων κύκλων δεν θα άλλαζε λόγω της διαφορετικής διαδρομής.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης της φάσης μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες (Καραθανάση, 2003, Zhang et al., 2012)

2.4.8.1. Μέθοδοι ολοκλήρωσης (Path-following methods)

Στη συγκεκριμένη κατηγορία οι προσεγγίσεις χωρίζονται σε μέθοδοι ένωσης υπολειμμάτων (Branch cut) και σε μέθοδοι τοπικής ανάπτυξης (Region Growing). Στις πρώτες, αρχικά εντοπίζονται τα σημεία όπου υπάρχουν υπολείμματα τα οποία είναι τα σημεία αλμάτων φάσης και στη συνέχεια έχουν στόχο την αποφυγή λανθασμένων εκτιμήσεων φάσης σε αυτά. Στις δεύτερες, η διαδικασία της αποκατάστασης φάσης ξεκινάει από τις περιοχές που είναι ευκολότερες και στη συνέχεια αντιμετωπίζονται οι δυσκολότερες περιοχές.

- Μέθοδοι ένωσης υπολειμμάτων (Branch cut methods)

Η βασικότερη μελέτη σχετικά με τη αποκατάσταση της φάσης με το μέθοδο της ένωσης υπολειμμάτων έγινε από τον Goldstein το 1988. Λόγω της ύπαρξης σημείων που η διαφορά φάσης είναι μεγαλύτερη από π το πεδίο δεν είναι συντηρητικό με αποτέλεσμα την εξάρτηση του αποτελέσματος από της διαδρομή της ολοκλήρωσης. Τα σφάλματα που υπάρχουν λόγω των συγκεκριμένων σημείων οφείλονται κυρίως στο θόρυβο της φάσης συνήθως στις τοπογραφικές ασυνέχειες της περιοχής και διαδίδονται σε όλη τη περιοχή ολοκλήρωσης. Ο τρόπος που εντοπίζονται και απομονώνονται τα σημεία άλματος φάσης είναι ο εξής. Αρχικά υπολογίζονται τα ελάχιστα κρίσιμα σημεία του πεδίου (τέσσερα εικονοστοιχεία). Στις περισσότερες θέσεις το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι μηδενικό. Στην περίπτωση που το αποτέλεσμα είναι μη μηδενικό τότε θεωρείται ότι υπάρχει "υπόλειμμα". Αν το αποτέλεσμα είναι 2π τότε το υπόλειμμα είναι θετικό ενώ αν το αποτέλεσμα είναι -2π τότε είναι αρνητικό. Στη συνέχεια με βάση τις τιμές των σημείων στην εικόνα συνάφειας και το λόγο σήμα προς θόρυβο (SNR- Signal to Ratio) επιλέγονται τα σημεία που σχετίζονται με τις τοπογραφικές ασυνέχειες, δεδομένου ότι τα σημεία άλματος φάσης λόγω θορύβου έχουν χαμηλές τιμές συνάφειας και χαμηλές τιμές λόγου σήμα προς θόρυβο. Αυτά τα σημεία ενώνονται για να ορίσουν τις γραμμές φαντάσματα (ghost lines ή branch cuts) με στόχο την αντιστοίχιση του κάθε θετικού υπολείμματος με το αντίστοιχο αρνητικό. Με αυτό το τρόπο τα σφάλματα που προκύπτουν δεν διαδίδονται σε όλο το πεδίο μελέτης. Βοηθητικές πληροφορίες σχετικά με την ορθή ένωση των αντίστοιχων υπολειμμάτων προκύπτουν από την εικόνα συνάφειας και την εικόνα μέτρου. Τέλος σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των υπολειμμάτων είναι μεγάλος ο αλγόριθμος δεν παρουσιάζει καλά αποτελέσματα λόγω της στρατηγικής των γειτονικών σημείων. Μερικές παραλλαγές της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι παρακάτω: Wang & Li, 1999, Nan & Dazheng, 2004, Zheng & Da, 2011.

- Μέθοδοι τοπικής ανάπτυξης (Region Growing Methods)
 Η πρώτη μελέτη που αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος της τοπικής ανάπτυξης έγινε από του Xu & Cumming το 1996. Η τοπική ανάπτυξη είναι περισσότερο μια φιλοσοφία παρά αυστηρές μαθηματικές διεργασίες (Καραθανάση, 2012). Ο αλγόριθμος της τοπικής ανάπτυξης ξεκινάει από τις εύκολες περιοχές και στη συνέχεια προχωράει στις δυσκολότερες περιοχές. Με αυτό το τρόπο δεν διαδίδονται τα σφάλματα σε όλο το πεδίο μελέτης. Η εικόνα της συνάφειας χρησιμοποιείται για την επιλογή των καταλληλότερων μονοπατιών ολοκλήρωσης. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα επεξεργασίας του αλγορίθμου.
 1. Συλλογή γόνων (seeds) όπου αποτελούν σημεία υψηλής συσχέτισης και από εκεί ξεκινάει η αποκατάσταση της φάσης που εκτελείται ταυτόχρονα και ανεξάρτητα αφού γίνουν μερικοί έλεγχοι ποιότητας όπως η τιμή συνάφειας και η μεταβλητότητα της φάσης. Μια ομοιόμορφη τοποθέτηση των γόνων σε μια σεβαστή απόσταση μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου (Καραθανάση, 2012).
 2. Διαμορφώνεται το κατώφλι ποιότητας που σχετίζεται με το κατώφλι συνάφειας, τη μεταβλητότητα της φάσης και της μέσης διαφοράς μεταξύ της αποκαταστημένης φάσης και της μέσης πρόβλεψης. Με αρχή ένα γόνο (seed) γίνεται η αποκατάσταση της φάσης στα γειτονικά εικονοστοιχεία και δημιουργούνται οι περιοχές ανάπτυξης (Regions)
 3. Οι περιοχές που έχουν αναπτυχθεί ελέγχεται αν είναι εφαιπτόμενες. Αν το κοινό όριο τους περάσει από τους ελέγχους ποιότητας σχετικά με τον αριθμό κοινών εικονοστοιχείων και την διασπορά της διαφοράς της φάσης των κοινών εικονοστοιχείων τότε γίνονται μία περιοχή.
 4. Μειώνεται το κατώφλι συνάφειας με στόχο της αποκατάσταση της φάσης στις δυσκολότερες περιοχές και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία.

2.4.8.2. Γενικευμένες μέθοδοι

Στις συγκεκριμένες μεθόδους η αποκατάσταση της φάσης γίνεται σε όλη της εικόνα (globally) με τον ίδιο τρόπο. Η προτεινόμενη λύση ακολουθεί κάποια έννοια ελαχιστοποίησης του σφάλματος ή διάφορα άλλα κριτήρια ανάλογα τον αλγόριθμο. Οι προσεγγίσεις αυτές ακολουθούν τη θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων (LMS-Least Minimum Squares). Σε μερικές προσεγγίσεις γίνεται χρήση των βαρών (WLMS-Weighted LMS) ή εφαρμόζεται η ισοζυγισμένη έκδοση της θεωρία ελαχίστων τετραγώνων (BLMS-Balanced LMS). Τέλος, υπάρχουν προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν τη θεωρία Green formulation (Fornaro et al., 1996) η οποία είναι ανάλογο της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Πλατάκος και Λουποί., 2002).

- Αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων
 Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δίνει λύση σε κάθε περίπτωση αν και μερικές φορές δεν είναι επιθυμητή. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι ότι ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας συχνότητας του μη αποκαταστημένου σήματος με τη προτεινόμενη “ξετυλιγμένη” λύση, με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων (Καραθανάση, 2003). Όπως και στις προηγούμενους αλγορίθμους αν δεν υπάρχουν άλματα φάσης τότε το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Σε ρεαλιστικά σενάρια όπου υπάρχουν άλματα φάσης ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ομαλοποιεί τα σφάλματα της αποκατάστασης φάσης που προκύπτουν. Με άλλα λόγια, το σφάλμα που προκύπτει στη προσπάθεια αποκατάστασης της φάσης είναι μέγιστο στα σημεία άλματος της φάσης και ελαττώνεται όσο απομακρύνεται από αυτά.

- **Αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων με τη χρήση βαρών**
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιώντας βάρη αποκλείει περιοχές που έχουν μεγάλα σφάλματα αποκατάστασης της φάσης. Οι τιμές του πίνακα βαρών υπολογίζονται από τη εικόνα την συνάφεια και από άλλες πληροφορίες όπως η μεταβλητότητα της φάσης. Η υλοποίηση του αλγορίθμου περιλαμβάνει μια επαναληπτική διαδικασία χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο συζευκτικού τελεστή υπό συνθήκη (preconditioned conjugated gradient algorithm) (Καραθανάση, 2012). Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο επιλέγεται μια κατάλληλη μάσκα βαρών όπου προσδιορίζεται ο κατάλληλος αριθμός επαναλήψεων σύγκλισης των λύσεων. Η μάσκα σχεδιάζεται με βάση του παρακάτω παράγοντες. Από την εικόνα του μέτρου (amplitude image) εντοπίζονται οι περιοχές έντονης συμπύκνωσης (foreshortening) που είναι περιοχές με μεγάλα σφάλματα αποκατάστασης της φάσης. Από την εικόνα της συνάφειας εντοπίζονται οι περιοχές με μικρές τιμές συνάφειας και υπολογίζονται οι τιμές με μεγάλη μεταβλητότητα της φάσης που παρουσιάζουν μεγάλα σφάλματα στα αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου. Τέλος, στο στάδιο σχηματισμού της μάσκας χρησιμοποιούνται τεχνικές μαθηματικής μορφολογίας όπου εντοπίζονται τα υπολείμματα λόγω θορύβου και λόγω ασυνεχειών.
- **Ισοζυγισμένος αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων**
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αξιοποιεί τη πληροφορία σχετικά με το λόγο του μέγεθος του εικονοστοιχείου στην διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων και στο αζιμούθιο. Επειδή το μέγεθος του εικονοστοιχείου στην διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων είναι μεγαλύτερο από στο μέγεθος του εικονοστοιχείου στο αζιμούθιο το σφάλμα της φάσης είναι πιθανότερο να βρίσκεται στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Προσδίδοντας διαφορετικό βάρος σε κάθε διεύθυνση τα αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου είναι βελτιωμένα συγκριτικά με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων.

2.4.8.3. Άλλες μέθοδοι

- **Αποκατάσταση της φάσης βασισμένη σε προγραμματισμό δικτύου**
Η βασική ιδέα των συγκεκριμένων αλγορίθμων είναι ότι το πιθανό σφάλμα της αποκαταστημένης φάσης είναι ακέραιο πολλαπλάσιο ενός κύκλου 2π . Το συγκεκριμένο πρόβλημα ανάγεται στην ελαχιστοποίηση των διαφορών της υπολογισμένης και της άγνωστης αποκαταστημένης φάσης των γειτονικών εικονοστοιχείων. Με αυτό το τρόπο εμποδίζεται η διάδοση των σφαλμάτων χωρίς να είναι υποχρεωτική η χρήση βαρών. Λόγω του μεγάλου κόστους σε χρόνο της παραπάνω διαδικασίας το πρόβλημα έχει αναχθεί σε πρόβλημα εύρεσης της ελάχιστης ροής κόστους (minimum cost flow) σε ένα δίκτυο (network).
- **Μορφολογική αποκατάσταση φάσης**
Η πρώτη μελέτη σχετικά με τη μορφολογική αποκατάσταση της φάσης έγινε από τον Soille το 2000. Γενικά σύμφωνα με τη θεωρία της μαθηματικής μορφολογίας ο κάθε τόνος του γκρι της απεικόνισης συσχετίζεται με μια τιμή υψομέτρου ανάλογη της έντασης του. Σε αυτή τη τοπογραφική αναπαράσταση της εικόνας δημιουργούνται δομικά στοιχεία που έχουν διάφορα σχήματα. Οι βασικότερες μορφολογικές πράξεις είναι οι erosion και dilation όπου σύμφωνα με αυτές υλοποιούνται οι λειτουργίες των συγκεκριμένων αλγορίθμων αποκατάστασης της φάσης.
- **Αυτόματα κύτταρα (Automata Cellular) και αυτόματα κύτταρα Tapestry**

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στα Αυτόματα Κύτταρα πραγματοποιούν την αποκατάσταση της φάσης για όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας ανεξάρτητα από τη διαδρομή ολοκλήρωσης. Η υλοποίηση του αλγορίθμου περιλαμβάνει μια επαναληπτική διαδικασία σε τοπική κλίμακα (local) και σε γενική (global) κλίμακα. Σύμφωνα με τον Chang et al. 1998 η συγκεκριμένη κατηγορία των αλγορίθμων παρουσιάζει βελτιωμένα αποτελέσματα όταν διαμελιστεί η εικόνα μειώνοντας το χρονικό και επεξεργαστικό κόστος (TCA-Tapestry Cellular Automata).

- Φίλτρα Kalman σε συνδυασμό με εκτίμηση τοπικής κλίσης
Ο αλγόριθμος με τη χρήση φίλτρων Kalman αξιοποιεί και εφαρμόζει ένα μοντέλο βασικής κλίσης (basic slope model) με ενσωμάτωση πληροφορίας που προέρχεται από έναν εκτιμητή τοπικής κλίσης (local slope estimator) (Καραθανάση, 2012). Το φίλτρο Kalman υπολογίζει μια εκτίμηση της μεταβλητότητας του ελάχιστου γραμμικού σφάλματος ενός προβλήματος που ορίζεται με κατάλληλο μοντέλο. Στη περίπτωση της συμβολομετρίας το μοντέλο διαμορφώνεται από τον εκτιμητή τοπικής κλίσης που υπολογίζει της τοπικές κλίσεις της φάσης και τις μεταβλητότητες των σφαλμάτων τους και από τη μεταβλητότητα του θορύβου που υπολογίζεται από το συμβολογράμμα και της εικόνας της συνάφειας. Στη συνέχεια σύμφωνα με τη φιλοσοφία των φίλτρων Kalman προσδίδεται ένας βαθμός εμπιστοσύνης στο μοντέλο και ένας βαθμός αβεβαιότητας στις παρατηρήσεις και τελικά εξάγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.
- Αποκατάσταση φάσης κατά τμήματα
Η βασική ιδέα των αλγορίθμων αυτής της κατηγορίας είναι η δημιουργία τμημάτων της φάσης (blocks) και η αποκατάσταση της φάσης σε κάθε τμήμα ξεχωριστά (Wang et al., 1999). Ο βασικότερος τρόπος διαχωρισμού είναι η δημιουργία τμημάτων ανάλογα τις θέσεις και τα μεγέθη των υπολειμμάτων, των σημείων αλμάτων φάσης και των ορίων με πολύπλοκα σχήματα (complex-shaped borders). Ο διαχωρισμός του συμβολογράμματος σε τμήματα έδωσε τη δυνατότητα της επιλογής και εφαρμογής του κατάλληλου αλγορίθμου σε κάθε τμήμα ξεχωριστά. Στη συνέχεια ενώνονται τα τμήματα με κριτήριο τη συμφωνία των τιμών της αποκαταστημένης φάσης στα γειτονικά σημεία τους.
- Συνεργασία τοπικής ανάπτυξης και ελαχίστων τετραγώνων με βάρη
Ο αλγόριθμος της τοπικής ανάπτυξης δεν καταφέρνει να αποκαταστήσει τη φάση σε περιοχές με πολύ μικρή συνάφεια κυρίως λόγω της ασυνέχειας των ορίων των συγκεκριμένων περιοχών και της μεγάλης μεταβλητότητας στις τιμές της φάσης. Ο Reigber & Moreira (1997) χρησιμοποίησε συνδυαστικά τον αλγόριθμο των ελαχίστων τετραγώνων με τη χρήση βαρών όπου ομαλοποιήθηκαν τα όρια των περιοχών (regions) και παρουσιάστηκαν βελτιωμένα αποτελέσματα.

2.4.9. Επαναπροσδιορισμός της βάσης, με χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων (Baseline refinement)

Πριν τη μετατροπή της φάσης σε τιμές υψομέτρου είναι απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός της βάσης και των τροχιακών δεδομένων. Υπολογίζεται η μετατόπιση στη διεύθυνση του αξιμουθίου, η μετατόπιση στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων, η σύγκλιση των τροχιών στις διευθύνσεις του αξιμουθίου και

της πλάγιας απόστασης και τέλος η απόλυτη φάση. Για τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιούνται σημεία γνωστών συντεταγμένων που προβάλλονται στη πλάγια γεωμετρία (slant-range) της απεικόνισης.

Σημεία γνωστών συντεταγμένων

Για τις οπτικές απεικονίσεις, τα σημεία γνωστών συντεταγμένων είναι σημεία που μπορούν να εντοπιστούν εύκολα όπως διασταυρώσεις δρόμων, γωνίες κτιρίων και κατασκευασμένοι στόχοι. Ένας επαρκής αριθμός σημείων γνωστών συντεταγμένων είναι απαραίτητος για την καλή γεωαναφορά μιας εικόνας. Τα σημεία γνωστών συντεταγμένων στις οπτικές απεικονίσεις τις περισσότερες φορές δεν μπορούν να εντοπιστούν στις απεικονίσεις SAR. Τα σημεία που επιλέγονται στις απεικονίσεις SAR ώστε να είναι εύκολα ανιχνεύσιμα είναι κυρίως διασταυρώσεις δρόμων, γωνίες υδάτινων επιφανειών, σημεία κορυφογραμμών και τεχνητοί στόχοι. Τα καλύτερα σημεία γνωστών συντεταγμένων είναι οι τεχνητοί τριγωνικοί ανακλαστήρες. Λόγω του κόστους της κατασκευής και της τοποθέτησης των ανακλαστήρων στη περιοχή ενδιαφέροντος τα σημεία γνωστών συντεταγμένων μπορούν να προέρχονται και από άλλες πηγές όπως τοπογραφικοί χάρτες, ορθοφωτογραφίες, φωτογραμμετρικές μελέτες.

2.4.10. Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο (Phase to height conversion)

Η εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας από τη μέτρηση της φάσης είναι ο τελικός στόχος της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι απαιτούν τη γνώση ενός ή περισσότερων σημείων γνωστών συντεταγμένων για την μετατροπή των σχετικών τιμών υψομέτρων που υπολογίζονται σε απόλυτες τιμές υψομέτρου. Υπογραμμίζεται ότι στο λογισμικό πακέτο SARscape υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής απόλυτων τιμών υψομέτρων χρησιμοποιώντας βοηθητικά δεδομένα όπως το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς.

Παρακάτω φαίνεται η σχέση όπου η φάση μετατρέπεται σε υψόμετρο.

$$\Delta h = \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \delta\varphi$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση επειδή έχει προκύψει από το απλοποιημένο μοντέλο της γεωμετρίας της συμβολομετρίας δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η θεώρηση της επιφάνειας της γης σαν επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς σύμφωνα με τον Geudtner et al., 1996 αποτελεί μια βελτίωση της διαδικασίας της μετατροπής της φάσης σε υψόμετρο.

Μια ακόμα βελτίωση στους αλγόριθμους μετατροπής φάσης σε υψόμετρο ήταν ο επαναπροσδιορισμός της γεωμετρικής γραμμής βάσης και της γεωμετρίας της δευτερεύουσας απεικόνισης χρησιμοποιώντας ένα καλά κατανομημένο πλήθος σημείων γνωστών συντεταγμένων

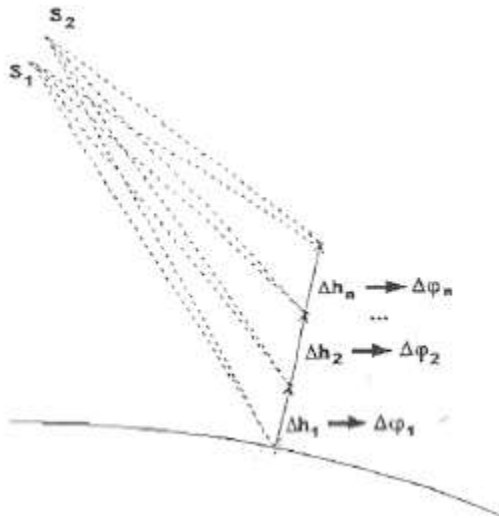
Στη μελέτη των Schwäbisch et al., 1998 αναπτύχθηκε η μέθοδος που ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων είναι αρκετό για την εξαγωγή απόλυτων τιμών υψομέτρου. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης σε ένα κανονικό κάρναβο και στην επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων με ελάχιστα τετράγωνα για τη μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο.

Στη μελέτη των Geudtner et al., 1996 θεωρήθηκε ότι η σχέση φάσης και υψομέτρου είναι ο πρώτος όρος ενός αναπτύγματος Taylor με αποτέλεσμα της εξαγωγή της παρακάτω πολυωνυμικής σχέσης. Βασικός

στόχος είναι ο υπολογισμός των συντελεστών k_i μιας γενική πολυωνμικής έκφρασης που συνδέει τη μεταβολή φάσης $\Delta\varphi$ του διαγράμματος των κροσσών συμβολής και της τοπογραφικής μεταβολής Δh .

$$\Delta h = k_1 + k_2\Delta\varphi + k_3\Delta\varphi^2 + \dots + k_n\Delta\varphi^{n-1}$$

Οι συντελεστές της παραπάνω σχέσεις υπολογίζονται με προσαρμογή δεδομένων (data fitting) σε σύνολο προσομοιωμένων τιμών (simulated values). Με βάση τα τροχιακά δεδομένα η θέση ενός σημείου στο συμβολόγραμμα μπορεί να προσδιοριστεί στην επιφάνεια του εδάφους με άμεση γεωκωδικοποίηση. Έτσι υπολογίζεται η απόλυτη τιμή της συμβολομετρικής βάσης.



Σχήμα 2. 6 Επιλογή σημείων με διαφορετικό υψόμετρο για τον υπολογισμό της πολυωνμικής σχέσης Πηγή: Carrasco, 1998

Μια αλλαγή του υψομέτρου έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της τιμής της συμβολομετρικής φάσης άρα και την αντίστοιχη διαφορά φάσης. Με αυτή τη λογική δημιουργείται μια καμπύλη συσχέτισης του υψομέτρου και της απόλυτης συμβολομετρικής φάσης. Με βάση τη συγκεκριμένη καμπύλη από το σημείο αναφοράς υπολογίζονται οι απόλυτες τιμές των υψομέτρων για όλα τα σημεία. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη φάση είναι απαλλαγμένη από την επίδραση της επίπεδης γης επειδή η μετατόπιση είναι στη κατακόρυφη διεύθυνση. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός του πολυωνύμου τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια των παραγόμενων απόλυτων τιμών υψομέτρου. Σύμφωνα με τον Carrasco, 1998 η

χρήση πολυωνύμου τρίτου βαθμού οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

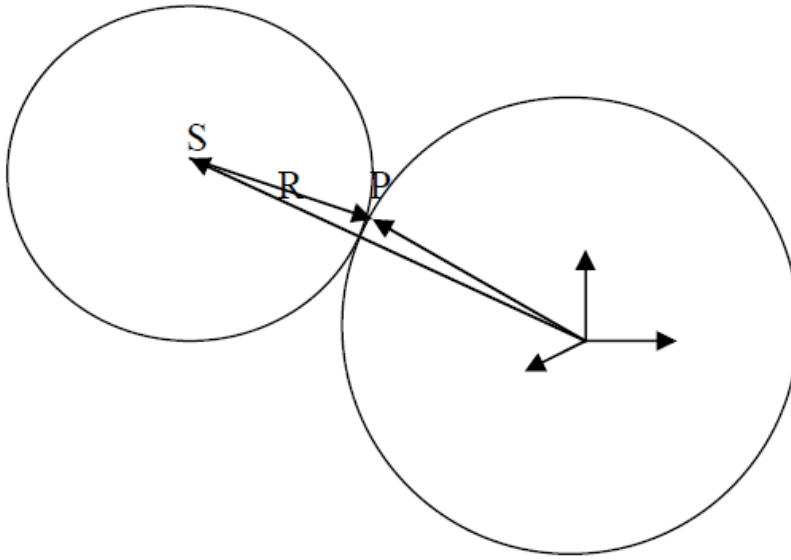
2.4.11. Γεωκωδικοποίηση (Geocoding)

Οι κύριες εξισώσεις γεωαναφοράς των απεικονίσεων SAR που συσχετίζουν τις εικονοσυντεταγμένες ενός σημείου της εικόνας SAR με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες της γήινης επιφάνειας παρουσιάζονται παρακάτω.

✚ Εξίσωση πλάγιας απόστασης (slant-range)

$$|\vec{S} - \vec{P}|^2 = (S_x - P_x)^2 + (S_y - P_y)^2 + (S_z - P_z)^2 = R^2$$

Όπου \vec{R} η πλάγια απόσταση (slant-range) και \vec{S}, \vec{P} τα διανύσματα θέσης της δορυφορικής πλατφόρμας και του στόχου αντίστοιχα.



Σχήμα 2. 7 Γεωμετρική απεικόνιση της πλάγιας απόσταση σε σχέση με το ελλειψοειδές
Πηγή: Καραθανάση, 2012

✚ Η εξίσωση της συχνότητας Doppler

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{(\vec{V}_s - \vec{V}_p) \cdot (\vec{P} - \vec{S})}{|P - S|}$$

Όπου f_D η συχνότητα Doppler και \vec{V}_s, \vec{V}_p τα διανύσματα ταχύτητας της δορυφορικής πλατφόρμας και του στόχου, αντίστοιχα.

Θεωρητικά, η στιγμή της λήψης της τιμής της έντασης της οπισθοσκέδασης του σημείου P γίνεται όταν η συχνότητα Doppler είναι μηδενική δηλαδή όταν το σημείο βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση από τον αισθητήρα SAR. Σημειώνεται ότι όταν η συχνότητα Doppler μηδενίζεται το σημείο P δεν βρίσκεται απαραίτητα στον κεντρικό άξονα του αποτυπώματος της κεραίας εκτός και αν η απόκλιση της κεραίας (squint angle) είναι μηδενική.

✚ Η εξίσωση της γήινης επιφάνειας

Ορίζεται το σχήμα της γήινης επιφάνειας ως ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής με ημιάξονες a, b και το γεωμετρικό υψόμετρο του κάθε σημείου h .

$$\frac{P_x^2}{(a+h)^2} + \frac{P_y^2}{(a+h)^2} + \frac{P_z^2}{(b+h)^2} = 1$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν για την άμεση ή την έμμεση γεωαναφορά των απεικονίσεων SAR.

Στην άμεση γεωαναφορά θεωρούνται γνωστές οι εικονοσυντεταγμένες (i,j) (αζιμούθιο, πλάγια απόσταση) και προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου P . Αρχικά προσδιορίζονται

τα τοπικά τροχιακά δεδομένα στη περιοχή της απεικόνισης με τη μορφή διανυσμάτων θέσης και ταχύτητας της δορυφορικής πλατφόρμας. Συνήθως, η μέθοδος προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου στηρίζεται στη παρεμβολή μεταξύ δυο γνωστών σημείων της τροχιάς. Για την υλοποίηση της άμεσης γεωκωδικοποίησης χρησιμοποιούνται και οι τρεις παραπάνω σχέσεις και απαιτείται η γνώση του υψομέτρου κάθε σημείου που προέρχεται από το ελλειψοειδές ή από το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιέχει γεωμετρικά υψόμετρα. Το σύστημα των τριών παραπάνω εξισώσεων επειδή δεν είναι γραμμικό επιλύεται χρησιμοποιώντας την αριθμητική επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson με αρχικές τιμές τη διαθέσιμη γεωμετρική υψομετρική πληροφορία. Μετά τον τελικό προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων αναδομείται η απεικόνιση SAR. Η διαδικασία της άμεσης γεωαναφοράς έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και είναι πολύπλοκη. Η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου εξαρτάται από τις αρχικές προσεγγιστικές τιμές. Η χρήση κανάβου από σημεία όπου οι προσεγγιστικές τιμές είναι ακριβείς (σημεία γνωστών συντεταγμένων) έχει σαν αποτέλεσμα την απλοποίηση της διαδικασίας. Η σωστή επιλογή του μεγέθους του κανάβου είναι ένας κρίσιμος παράγοντας σχετικά με την ταχύτητα εφαρμογής της μεθόδου και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Σημειώνεται ότι η γνώση της επιφάνειας του γεωειδούς στην περιοχή μελέτης είναι σημαντικός παράγοντας στην περίπτωση που το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς περιέχει ορθομετρικά υψόμετρα. Συνήθως, το γεωειδές προσεγγίζεται από παρεμβολή σε σημεία όπου το γεωμετρικό και το ορθομετρικό υψόμετρο είναι γνωστό ή με την εφαρμογή αρμονικών συναρτήσεων όπως έχουν προκύψει από μετρήσεις βαρυτικού πεδίου.

Στην έμμεση γεωαναφορά ως αρχικά δεδομένα λαμβάνονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου και προσδιορίζονται οι εικονοσυντεταγμένες του. Για τον υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων είναι απαραίτητη η γνώση των διανυσμάτων θέσης και ταχύτητας της δορυφορικής πλατφόρμας και του κάθε σημείου της γήινης επιφάνειας, η συχνότητα Doppler του κάθε σημείου και η συχνότητα επανάληψης των παλμών του ραντάρ. Για τη μείωση του χρόνου υπολογισμού με μικρή απώλεια ακρίβειας χρησιμοποιείται ένας ορθοκανονικός κανάβος με σημεία γνωστού υψομέτρου και στα υπόλοιπα σημεία εφαρμόζεται απλή γραμμική παρεμβολή δευτέρας τάξης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται μόνο οι δυο πρώτες εξισώσεις χωρίς να επιλυθεί σύστημα με αποτέλεσμα την μείωση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας.

Αρχικά με επαναληπτικές διαδικασίες προσδιορίζεται η θέση του δορυφόρου σε σχέση με την τιμή της συχνότητας Doppler του σημείου. Στην περίπτωση που η γωνία απόκλισης της κεραίας (squint angle) είναι μηδενική η συχνότητα f_{DC} που εκφράζει την συχνότητα ενός σημείου στον κύριο άξονα του αποτυπώματος της κεραίας συμπίπτει με τη συχνότητα Doppler του σημείου f_D της ελάχιστης απόστασης του δέκτη και του σημείου. Η τιμή f_{DC} μπορεί να προσδιοριστεί από τα αρχεία επικεφαλίδας της κάθε απεικόνισης SAR. Στη περίπτωση ύπαρξης μη μηδενικής γωνίας απόκλισης της κεραίας η συχνότητα f_D συγκρίνεται με τη τιμή της συχνότητας f_{DC} και υπολογίζεται ο χρόνος και η θέση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης του σημείου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συντεταγμένη του αζιμουθίου του σημείου (i) και η πλάγια απόσταση δέκτη και σημείου. Με βάση την παρακάτω σχέση υπολογίζεται η συντεταγμένη της πλάγιας απόστασης (slant-range) (j).

$$j = \frac{(R_s - R_o)}{\Delta P_R}$$

Όπου R_s , R_o η πλάγια απόσταση του σημείου P και η απόσταση του πρώτου σημείου της γραμμής του αζιμουθίου. Η ποσότητα ΔP_R εκφράζει τη διάσταση του εικονοστοιχείου στη πλάγια διεύθυνση και είναι διαθέσιμη από το αρχείο επικεφαλίδας της απεικόνισης SAR.

Η γεωαναφορά των απεικονίσεων SAR είναι πολύ σημαντική για της εφαρμογές της συμβολομετρίας. Σε πολλές περιπτώσεις τα αρχικά δεδομένα (raw data) SAR δεν έχουν καλή γεωαναφορά λόγω των σφαλμάτων των τροχιακών δεδομένων με αποτέλεσμα να απαιτείται η εφαρμογή χειροκίνητης γεωαναφοράς. Η καλή ποιότητα της γεωαναφοράς μιας απεικόνισης SAR έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση των τελικών προϊόντων της συμβολομετρίας. Η σωστή γεωαναφορά των απεικονίσεων SAR διασφαλίζει τη ακριβής συμπροσαρμογή των απεικονίσεων και των εξωτερικών δεδομένων (ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, σημεία γνωστών συντεταγμένων) με αποτέλεσμα την εξαγωγή ακριβέστερης υψομετρικής πληροφορίας.

2.5 Περιοριστικοί παράγοντες της τεχνικής της συμβολομετρίας

Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των προϊόντων της συμβολομετρίας συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα.

Σύστημα SAR	<ul style="list-style-type: none"> • Γωνία πρόσπτωσης • Διακριτική ικανότητα • Σφάλμα χρονομέτρου • Εστίαση/επεξεργασίας σήματος SAR • Λανθασμένη καταχώρηση απεικόνισης (misregistration) • Θόρυβος συστήματος
Τροχιά	<ul style="list-style-type: none"> • Ακρίβεια τροχιακών δεδομένων • Γεωμετρική γραμμή βάσης (γεωμετρική αποσυσχέτισης) • Αλλαγή της φάσης (χρονική αποσυσχέτιση) • Μη-παράλληλες τροχιές (range migrations)
Σήμα	<ul style="list-style-type: none"> • Συχνότητα • Πόλωση • Εύρος ζώνης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Bandwidth) • Κηλίδωση/θόρυβος
Τοπογραφία	<ul style="list-style-type: none"> • Διαφορά φάσης (σκέδαση όγκου) • Διεύθυνση της κλίσης (προσανατολισμός) • Χαρακτηριστικά επιφάνειας
Καιρικές συνθήκες	<ul style="list-style-type: none"> • Άνεμος • Χιονόπτωση
Ατμόσφαιρα	<ul style="list-style-type: none"> • Υγρασία

Πίνακας 2. 2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των προϊόντων της συμβολομετρίας Πηγή: Gens & Genderen 1996

Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότεροι περιοριστικοί παράγοντες της συμβολομετρικής διαδικασίας.

2.5.1 Χρονική Αποσυσχέτιση

Ένας από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες της τεχνικής της συμβολομετρίας είναι η χρονική αποσυσχέτιση που οφείλεται στις αλλαγές της σκέδασης των στόχων. Σε μια δασική περιοχή με υψηλή σχετική υγρασία η χρονική αποσυσχέτιση είναι υπαρκτή ακόμα και όταν η χρονική διαφορά των λήψεων είναι μερικές ώρες. Σε περιοχές όπου οι μεταβολές της υγρασίας είναι μικρές και οι στόχοι είναι σταθεροί (χέρσες περιοχές) η χρονική αποσυσχέτιση δεν έχει σημαντική επίδραση στη συμβολομετρική διαδικασία ακόμα και όταν οι απεικονίσεις έχουν χρονική διαφορά μερικά χρόνια. Σε χιονισμένες περιοχές δεν παρατηρείται σημαντική χρονική αποσυσχέτιση σε μικρό χρονικό διάστημα (ημέρες) αλλά σε βάθος χρόνου (μήνες) είναι εμφανής οι επιπτώσεις της λόγω μετακινήσεων των πάγων και της τήξης. Επειδή κάθε εικονοστοιχείο μιας απεικόνισης SAR σχηματίζεται από τις συνεισφορές πολλών σκεδαστών η σχετική κίνηση του εδάφους ακόμα και σε κλίμακα μικρότερη της διακριτικής ικανότητας ενός συστήματος αποτελεί μια αιτία της χρονικής αποσυσχέτισης.

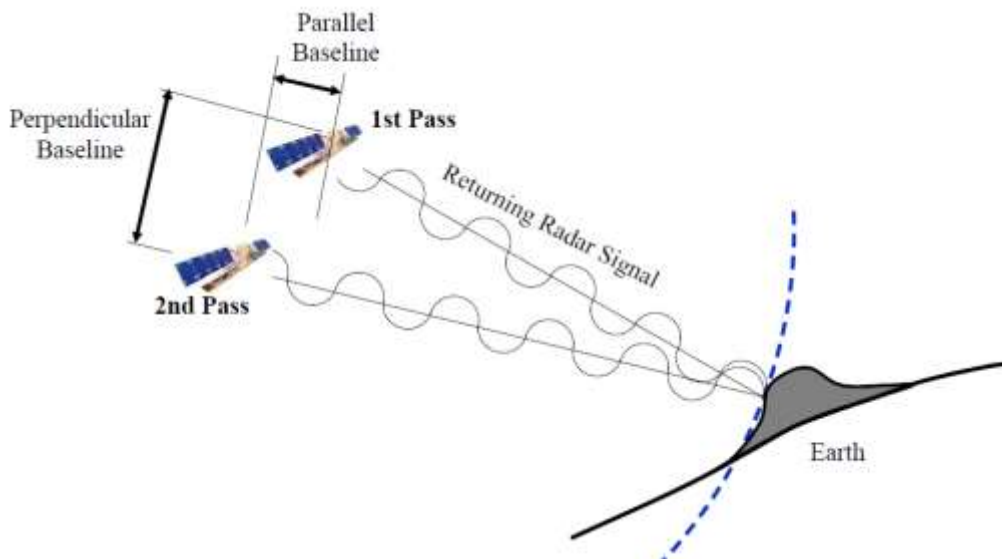
Σχετικά με τις δασικές περιοχές είναι καλύτερο οι απεικονίσεις που χρησιμοποιούνται για συμβολομετρική επεξεργασία να αναφέρονται σε ίδιες εποχές ώστε η περιοχή ενδιαφέροντος να εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά. Η χρήση δεδομένων μεγάλου μήκους κύματος (μπάντες L, X) έχει ως

αποτέλεσμα την καταγραφή της οπισθοσκέδασης από σκεδαστές που δεν μεταβάλλονται με έντονο ρυθμό (κορμοί, κλαδιά δέντρων) κάτι που περιορίζει τα φαινόμενα της χρονικής αποσυσχέτισης.

Για τον περιορισμό των φαινομένων της χρονικής αποσυσχέτισης προτείνεται η χρήση δεδομένων μίας διέλευσης (SRTM, ERS-1 & 2, TanDEM-X) ή εφαρμογή της τεχνικής των σταθερών σκεδαστών (Ferretti et al., 2001). Τέλος, ανάλογα την εφαρμογή καθορίζεται και η μέγιστη χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων. Για εφαρμογές όπου εξάγεται η υψομετρική πληροφορία από ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα επιδιώκεται τα δεδομένα να έχουν πολύ μικρές χρονικές διαφορές για τον περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης. Σε εφαρμογές διαφορικής συμβολομετρίας τα φαινόμενα της χρονικής αποσυσχέτισης είναι έντονα λόγω των μεγάλων χρονικών διαφορών των δεδομένων (χρόνια).

2.5.2 Γεωμετρική (Χωρική) Αποσυσχέτιση

Η χωρική αποσυσχέτιση σχετίζεται με τη διαφορετική διαφορετική γεωμετρία των απεικονίσεων SAR. Οι διαφορετικές γεωμετρίες των απεικονίσεων σχετίζονται με τη γεωμετρική γραμμή βάσης σύμφωνα με τη παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2. 8 Γεωμετρία γεωμετρικής γραμμής βάσης Πηγή: www.esa.int

Μια γεωμετρική γραμμή βάσης όσο μεγαλώνει τόσο διαφορετικές είναι οι γεωμετρίες λήψης. Το γεωμετρικό όριο των δυο απεικονίσεων όπου μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας σε θεωρητικά πλαίσια ονομάζεται κρίσιμη βάση και εξαρτάται από το μήκος κύματος του συστήματος SAR, από την πλάγια απόσταση, από τη διακριτική ικανότητα στη πλάγια διεύθυνση και από τη γωνία πρόσπτωσης. Επιπρόσθετα, η εικόνα της συνάφειας που αποτελεί ένα δείκτη ποιότητας της υλοποίησης της συμβολομετρικής διαδικασίας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την φασματική συσχέτιση των δυο απεικονίσεων λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας λήψης.

Μετά τη συμπροσαρμογή των απεικονίσεων η επιφάνεια του εδάφους που προβάλλεται σε ένα εικονοστοιχείο της κύριας (master) απεικόνισης θα πρέπει να αντιστοιχεί στο αντίστοιχο εικονοστοιχείο της δευτερεύουσας (slave) απεικόνισης. Το εναπομένον σφάλμα μετά τη εφαρμογή της διαδικασίας της

συμπροσαρμογής είναι περίπου ανάλογο της ομοιότητας της γεωμετρίας των δυο απεικονίσεων. Η λανθασμένη συμπροσαρμογή έχει ως αποτέλεσμα την αναντιστοιχία των εικονοστοιχείων των δυο απεικονίσεων με αποτέλεσμα τις χαμηλές τιμές της συνάφειας και την ανακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Τέλος σημειώνεται ότι αν σε μία περιοχή του εδάφους που αντιστοιχεί στο μέγεθος του εικονοστοιχείου η επιστροφή από ένα σημειακό σκεδαστή είναι πολύ ισχυρή τότε δεν υπάρχει αποσυσχέτιση λόγω της γεωμετρικής γραμμής βάσης. Σύμφωνα με τον παραπάνω συλλογισμό η χρήση σταθερών σκεδαστών βελτιώνει τη εφαρμογή της συμβολομετρικής διαδικασίας αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα με μεγαλύτερες γεωμετρικές γραμμές βάσης.

2.5.3 Τροχιά

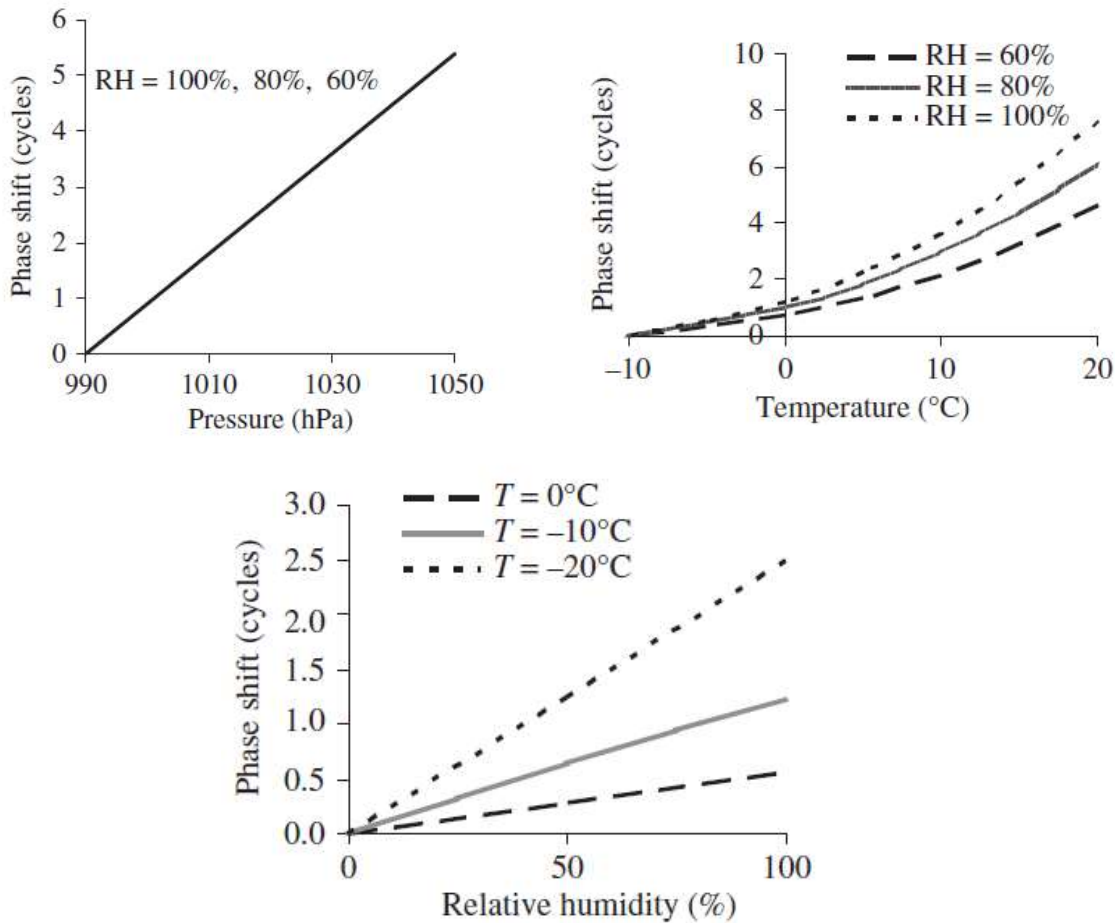
Για τα δορυφορικά συστήματα η κίνηση του δορυφόρου κατά μήκος της γραμμής πτήσης περιγράφεται από την τροχιά του. Η ακριβής θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου μια δεδομένη χρονική στιγμή προσδιορίζεται από τα διανύσματα τροχιάς. Ο χρήστης SAR δεδομένων εκτός από το αρχείο της απεικόνισης συνήθως λαμβάνει και το αρχείο leader μέσα στο οποίο περιέχεται ένας αριθμός με διανύσματα τροχιάς. Το πλήθος των διανυσμάτων που διατίθεται καθώς και η ακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου που μας παρέχεται εξαρτάται από την εκάστοτε αποστολή. Η τιμή της γεωμετρικής γραμμής βάσης κάθε εικονοστοιχείου προέρχεται από τα τροχιακά δεδομένα. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται λόγω της ανακρίβειας του προσδιορισμού της θέσης της δορυφορικής πλατφόρμας. Στη διεύθυνση που είναι παράλληλη με τη γραμμή πτήσης, οι τιμές της γεωμετρικής γραμμής βάσης μεταβάλλονται γραμμικά με το χρόνο λήψης των απεικονίσεων λόγω της σύγκλισης των τροχιών (Boncori, 2006). Τα συγκεκριμένα σφάλματα επιδράνε στη φάση λόγω της επίδρασης της επίπεδης γης και της υψομετρίας της επιφάνειας της γης. Σημειώνεται ότι για μια συγκεκριμένη (fixed) θέση αζιμουθίου το σφάλμα της φάσης λόγω της επίπεδης γης προσεγγίζεται από μια παραβολική συνάρτηση της πλάγιας απόστασης (Hanssen, 2001).

2.5.4 Ατμόσφαιρα

Η ατμοσφαιρική επίδραση θεωρείται από τους πιο περιοριστικούς παράγοντες της συμβολομετρίας (Li et al., 2004, Liao et al., 2013). Μια απεικόνιση SAR περιέχει πληροφορία για το οπισθοσκεδαζόμενο πλάτος και το χρόνο που διανύει το σήμα από την κεραία μέχρι το έδαφος και πίσω. Η ταχύτητα του σήματος όπως επίσης και η διαδρομή που διανύει το σήμα επηρεάζεται λόγω των διαφορετικών συστατικών της ατμόσφαιρας όπως υδρατμοί, σύννεφα, θερμοκρασία, πίεση (Hanssen, 1998). Τα στρώματα της ατμόσφαιρας που επιδράνε περισσότερο στη μικροκυματική ακτινοβολία είναι η ιονόσφαιρα και η τροπόσφαιρα. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον Meyer 2008, οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας σε μεγάλες συχνότητες (X μπάντα) μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Ο σημαντικότερος παράγοντας που σχετίζεται με τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις είναι οι υδρατμοί που εντοπίζονται στο κατώτερο επίπεδο της τροπόσφαιρας (Zebker et al., 1997). Συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Zebker et al. 1997 μια αλλαγή της τάξης του 20 % στη σχετική υγρασία στη τροπόσφαιρα μεταξύ των δύο συμβολομετρικών απεικονίσεων μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα της τάξης των 100 μέτρων. Επίσης, σε περιοχές που έχουν υψηλούς δείκτες υγρασίας τα σφάλματα λόγω ατμόσφαιρας μπορεί να είναι

εντονότερα (Li et al., 2004). Τέλος, σημειώνεται ότι δεν έχει εντοπιστεί κάποια χωρική ή χρονική ομοιογένεια των σφαλμάτων λόγω της ατμόσφαιρας στα συμβολομετρικά δεδομένα.

Η χρονική καθυστέρηση της φάσης σχετικά με τη πίεση τη σχετική υγρασία και την ατμόσφαιρα φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Al Jassar & Rao 2011)



Σχήμα 2. 9 Σχέση πίεσης(πάνω αριστερά), θερμοκρασία(πάνω δεξιά), σχετικής υγρασίας(κάτω) με το σφάλμα της συμβολομετρικής φάσης. Πηγή:Al Jassar & Rao 2011

Η συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας, της πίεσης και των PWV σε όρους ζενίθιας χρονικής καθυστέρησης λόγω των υδρατμών δίνεται σύμφωνα με τους Al Jassar & Rao 2011 από τη σχέση:

$$PWV = \Pi(ZWD)$$

Όπου

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v \left[\left(\frac{k_3}{T_m} \right) + k'_2 \right]}$$

Όπου k_3 και k'_2 είναι οι συντελεστές διαθλαστικότητας (Bevis et al., 1994), ρ η πυκνότητα του νερού 106 gm^{-3} , R_V η ειδική σταθερά αερίου $461,524 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ και T_m η μέση ατμοσφαιρική θερμοκρασία που σχετίζεται με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους T (Al Jassar & Rao 2011):

$$T_m = 70.2 + 0.72T$$

Η τιμή του Π κυμαίνεται από 0.17 μέχρι 0.154. Η προτεινόμενη τιμή σύμφωνα με τον Bevis et al., 1992 είναι 0.161.

Η σχέση που περιγράφει την χρονική καθυστέρηση της φάσης λόγω των υδρατμών είναι:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{ZWD}{\cos\theta}$$

Όπου ZWD (Zenith wet delay) η ζενίθια χρονική καθυστέρηση λόγω των υδρατμών

Σύμφωνα με το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων το σφάλμα εκτίμησης της διαφοράς φάσης ενός συμβολογράμματος είναι:

$$\sigma_\varphi = \frac{4\sqrt{2}\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{\cos\theta} \cdot \sigma_{ZWD}$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση βασίζεται στην υπόθεση ότι οι τιμές της ζενίθιας χρονικής καθυστέρησης των υδρατμών δεν παρουσιάζουν συσχέτιση όταν η χρονική διαφορά των λήψεων είναι μεγαλύτερη από μία μέρα (Emardson et al., 2003). Σύμφωνα με τη παραπάνω σχέση μια τιμή ενός χιλιοστού του PWV (Percipitable Water Vapor) ισοδυναμεί με περίπου 6.2 χιλιοστά χρονική καθυστέρηση λόγω των υδρατμών στη ζενίθια διεύθυνση που σημαίνει μια ασάφεια 0.3 κροσσών συμβολής στο παραγόμενο συμβολόγραμμα.

Στη περίπτωση της επαναληπτικής γεωμετρίας το υψομετρικό σφάλμα εξάγεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\sigma_h = \frac{h_a}{2\pi} \cdot \sigma_\varphi = \frac{2\sqrt{2}}{\lambda} \cdot \frac{h_a}{\cos\theta} \cdot \sigma_{ZWD}$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω σχέση μια υψομετρική ακρίβεια των 20 μέτρων αντιστοιχεί σε χρονική καθυστέρηση λόγω των υδρατμών στη ζενίθια απόσταση (ZWD) μικρότερη των 8.2 χιλιοστών (περίπου 1.3 χιλιοστά PWV) με ύψος ασάφειας περίπου 45 και κάθετη συνιστώσα της βάσης περίπου 200 μέτρα. Είναι προφανές ότι για μεγαλύτερη κάθετη συνιστώσα της βάσης (400 μέτρα) με ύψος ασάφειας 22 μέτρα είναι δυνατόν να έχουν υψομετρική ακρίβεια των 20 μέτρων για χρονική καθυστέρηση λόγω υδρατμών στη ζενίθια απόσταση (ZWD) 16.7 χιλιοστά (περίπου 2.7 χιλιοστά PWV).

Η μεταβλητότητα των υδρατμών στο χρόνο και στο χώρο σε συνδυασμό με την θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα επηρεάζουν τη φάση μιας εστιασμένης εικόνας ή ενός συμβολογράμματος με ένα μη συγκεκριμένο τρόπο. Η βασική μεθοδολογία για τον περιορισμό των επιδράσεων της ατμόσφαιρας στη ποιότητα των συμβολογραμμάτων και κατ' επέκταση των τελικών αποτελεσμάτων είναι ο καθορισμός της συνιστώσας της φάσης λόγω της ατμόσφαιρας.

Για το περιορισμό των σφαλμάτων λόγω της ατμόσφαιρας στην επαναληπτική γεωμετρία υπάρχουν οι παρακάτω προσεγγίσεις.

- Ατμοσφαιρική διόρθωση χρησιμοποιώντας εξωτερικά δεδομένα

A. Επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα

Τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα κυρίως χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την επαλήθευση των τροποσφαιρικών χρονικών καθυστερήσεων της φάσης που έχουν προκύψει από διάφορα μοντέλα όπως το μοντέλο Saastamoinen (Zebker et al., 1997). Ο Li et al., 2004 συνδυάζοντας επίγειες μετεωρολογικές παρατηρήσεις και μετρήσεις GPS παράγαγε καλύτερα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας έδειξαν ότι η συνδυασμένη χρήση των μετεωρολογικών μετρήσεων και δεδομένων GPS μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια του συμβολογράμματος από 15-39% ανάλογα το μοντέλο TZD (Total Zenith Delay) που θα χρησιμοποιηθεί. Η δυσκολία της χρήσης μετεωρολογικών δεδομένων για την διόρθωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας οφείλεται στη χαμηλή ακρίβεια των χρονικών καθυστερήσεων της φάσης λόγω της ατμόσφαιρας από εμπειρικά τροποσφαιρικά μοντέλα και τη μικρή χωρική συχνότητα των μετεωρολογικών σταθμών (Ding et al., 2008).

B. Δεδομένα GPS

Οι παρατηρήσεις GPS επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση των τροποσφαιρικών χρονικών καθυστερήσεων της φάσης με στόχο τον έλεγχο, την αξιολόγηση και τη βαθμονόμηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στα συμβολομετρικά δεδομένα (Ding et al., 2008). Σύμφωνα με τον Li et al., 2006a δημιουργείται ένας χάρτης ατμοσφαιρικής χρονικής καθυστέρησης της φάσης για κάθε απεικόνισης SAR σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα παράγεται ο χάρτης μέσω ατμοσφαιρικών χρονικών καθυστερήσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που έχει υιοθετηθεί από τον Delacourt et al., 1998. Στο δεύτερο βήμα υπολογίζονται οι ζενίθιες χρονικές καθυστερήσεις από το δίκτυο GPS με στόχο τη βαθμονόμηση του χάρτη μέσω ατμοσφαιρικών χρονικών καθυστερήσεων. Τέλος τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας της συγκεκριμένης προσέγγισης ήταν βελτιωμένα κατά 27.2 %. Επίσης ο Li et al., 2006b ανέπτυξε ένα μοντέλο για ατμοσφαιρική διόρθωση βασισμένο στις επιδράσεις της τοπογραφίας που προκύπτει από μετρήσεις GPS. Συμπερασματικά, η ακρίβεια των ατμοσφαιρικών διορθώσεων με τη χρήση παρατηρήσεων GPS εξαρτάται από τη χωρική και χρονική πυκνότητα των ατμοσφαιρικών χρονικών καθυστερήσεων που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις GPS. Με τη σταδιακή πύκνωση των δικτύων GPS οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις γίνονται όλο και πιο ακριβέστερες.

Γ. Δεδομένα MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) & MERIS

Η χρήση των προϊόντων MODIS με χωρική ανάλυση 1km x 1km και ακρίβεια 5-10 % (Gao et al., 2003). Ο Li, 2005 συνδυάζοντας μετρήσεις GPS και δεδομένα MODIS ανέπτυξε έναν αλγόριθμο ατμοσφαιρικής διόρθωσης των συμβολομετρικών δεδομένων. Ο συνδυασμός των δεδομένων από τους αισθητήρες ASAR και MERIS της δορυφορικής πλατφόρμας ENVISAT όπου μετρούνται και οι υδρατμοί της τροπόσφαιρας με μεγάλη χωρική ανάλυση και υψηλή ακρίβεια και μετρήσεων GPS παρέχουν ακριβέστερα αποτελέσματα (Li, 2005, Meyer et al., 2005). Η διόρθωση της φάσης λόγω της ατμόσφαιρας από τα δεδομένα MERIS και MODIS λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο σε καιρικές συνθήκες με χαμηλή συννεφοκάλυψη.

Δ. Μετεωρολογικά μοντέλα

Λόγω της χρονικής διαφοράς μεταξύ των δεδομένων SAR και των τριτογενών δεδομένων χρησιμοποιούνται αριθμητικά μοντέλα καιρού NWM (Numerical Weather Models) όπου εκτιμούνται οι τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας για το χρονική στιγμή της λήψης της απεικόνισης SAR (Gong et al., 2010).

Ε. Άλλα δεδομένα

Η συνδυασμένη χρήση βοηθητικών δεδομένων όπως οι εκτιμώμενες τιμές της υγρασίας από πολυφασματικές απεικονίσεις βελτιώνει την ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από συμβολομετρικά δεδομένα κατά 20-40% (Ding et al., 2008). Σημειώνεται ότι η διαθεσιμότητα τέτοιων δεδομένων είναι δύσκολη λόγω της ανεξάρτητης λειτουργίας των πολυφασματικών δεκτών σε σχέση με τους αισθητήρες SAR αλλά και λόγω των καιρικών συνθηκών (συννεφοκάλυψη). Στη περίπτωση όπου τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ένα υψηλής ποιότητας συμβολόγραμμα και ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο μέτριας χωρικής ανάλυσης στη μελέτη (Liao et al., 2013) παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την αφαίρεση/μείωση των ατμοσφαιρικών σφαλμάτων.

- Επιλογή κατάλληλων δεδομένων SAR

Επειδή οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταβάλλονται μεταξύ δυο διαφορετικών απεικονίσεων SAR με διαφορετικούς χρόνους λήψης επιλέγονται δεδομένα μικρής χρονικής διαφοράς. Όταν τα δεδομένα προέρχονται από συστήματα SAR μίας διέλευσης (TerraSAR-X/TanDEM-X, COSMO-skymed (tandem-like), SRTM, ERS-1/2) τότε μειώνεται σημαντικά η γεωμετρική και η χρονική αποσυσχέτιση όπως επίσης μειώνεται και η επίδραση της ατμόσφαιρας στα συμβολομετρικά προϊόντα. Τα ατμοσφαιρικά τεχνουργήματα αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα ειδικά όταν η συμβολομετρική επεξεργασία αποτελείται από πολλές χρονικά διαφορετικές απεικονίσεις SAR (repeat-pass InSAR) (Ferretti et al., 1999).

- Ομαλοποίηση συμβολογραμμάτων (Stacking)

Η μέθοδος "stacking" είναι μια μέθοδος όπου μειώνονται οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις ομαλοποιώντας στατιστικά ανεξάρτητα συμβολογράμματα. Αν η ομαλοποίηση εφαρμοστεί σε N συμβολογράμματα τότε η επίδραση λόγω της ατμόσφαιρας θα μειωθεί $1/\sqrt{N}$ φορές. Με το φιλτράρισμα και την ομαλοποίηση του συμβολογραμμάτων μειώνεται η ατμοσφαιρική επίδραση με κόστος τη μειωμένη χωρική ανάλυση του τελικού προϊόντος (Zebker et al., 1997).

- Τεχνική σταθερών σκεδαστών PS (Permanent Scatterers)

Η χρήση της τεχνικής των σταθερών σκεδαστών προτείνεται για τη αφαίρεση της φάσης λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας τη τεχνική Kriging (Meyer et al., 2005).

- Με χρήση πολλών συμβολομετρικών ζευγαριών και επίλυση γραμμικού συστήματος ελλειπούς τάξης

Με τη μέθοδο αυτή εκτιμάται η συνιστώσα της φάσης η οποία αντιστοιχεί στην επίδραση της ατμόσφαιρας σε περιοχές όπου δεν έχουμε παραμορφώσεις και στις οποίες η διαφορά της φάσης οφείλεται μόνο στην τοπογραφία, στην ατμόσφαιρα και στο θόρυβο (Saquellari-Likoka A. & Karathanassi B., 2008, Karathanassi B. & Saquellari-Likoka A., 2014)

Οι παραπάνω μέθοδοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης μειώνουν την επίδραση της ατμόσφαιρας στη συμβολομετρική φάση περίπου 20-40 %. Για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το ποσοστό της συννεφοκάλυψης τη χρονική στιγμή της λήψης των απεικονίσεων SAR, τα διαθέσιμα εξωτερικά δεδομένα (επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο κ.λπ.), η μέθοδος της συμβολομετρικής επεξεργασίας (τεχνική σταθερών σκεδαστών) και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τέλος σημειώνεται ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων για μείωση των ασαφειών της φάσης λόγω της ατμόσφαιρας.

2.5.5 Παραμορφώσεις του εδάφους

Οι παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους τη χρονική διαφορά των λήψεων αποτελεί άλλον έναν περιοριστικό παράγοντα της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Η απόλυτη παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να αποκτηθεί είτε εντοπίζοντας ένα σταθερό στόχο στις εικόνες είτε όταν υπάρχει διαθέσιμο το διάνυσμα της ταχύτητας. Επειδή οι κροσσοί συμβολής αποτελούν ένα πρότυπο, ο εντοπισμός της παραμόρφωσης δεν μπορεί να προέρχεται από μια μικρή περιοχή του συμβολογράμματος που περιέχει ένα μικρό αριθμό εικονοστοιχείων. Προτείνεται η μέτρηση του αριθμού των κροσσών συμβολής ενός συμβολογράμματος σε μεγάλη περιοχή που περιλαμβάνει περιοχές με μεγάλη αποσυσχέτιση (δασικές περιοχές) και περιοχές με μικρή αποσυσχέτιση όπου οι τιμές της φάσης είναι μηδενικές. Αυτό απαιτεί ένα μεγάλο εύρος απεικόνισης και στις δυο διευθύνσεις (cross-track, along-track). Για ένα συγκεκριμένο σύστημα SAR, ο σωστός προσανατολισμός και το απαραίτητο μέγεθος της οπισθοσκέδασης στο το πεδίο παραμόρφωσης είναι προϋποθέσεις για την ανίχνευση του απο το συμβολόγραμμα.

Η μέγιστη ανιχνεύσιμη παραμόρφωση είναι η απόσταση που αντιστοιχεί σε ένα κροσσό συμβολής ανά εικονοστοιχείο αφού η τιμή της διαφοράς φάσης είναι “τυλιγμένη” στο διάστημα $[0, 2\pi)$. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ δυο γειτονικών εικονοστοιχείων είναι 2π που αντιστοιχεί σε ένα κροσσό συμβολής (μήκος κύματος/2). Για ένα συμβολόγραμμα που παράγεται από δυο εικόνες από διαφορετικούς χρόνους λήψης, αυτό μεταφράζεται ότι ο μέγιστος ανιχνεύσιμος βαθμός παραμόρφωσης του ενός κροσσού συμβολής εξαρτάται από τη χρονική διαφορά των δύο απεικονίσεων. Για παράδειγμα, αν η δεύτερη εικόνα (slave) έχει ληφθεί N μέρες μετά τη πρώτη (master) τότε ο μέσος ρυθμός παραμόρφωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει την ακρίβεια του μήκους κύματος προς το διπλάσιο της χρονικής διαφοράς των απεικονίσεων σε μέρες. Αν ο μέσος ρυθμός παραμόρφωσης ξεπεράσει τη συγκεκριμένη τιμή τα δύο εικονοστοιχεία από τις δυο εικόνες θα είναι ασυσχέτιστα, δηλαδή δε θα δημιουργηθεί κροσσός συμβολής. Για τις δορυφορικές πλατφόρμες, ο τροχιακός κύκλος ορίζεται ως η χρονική περίοδο όπου η “ταυτόσημη” τροχιά (identical orbit) επαναλαμβάνεται. Αν ο τροχιακός κύκλος για ένα συγκεκριμένο δορυφορικό σύστημα είναι M μέρες τότε ο μέγιστος μέσος ρυθμός παραμόρφωσης είναι το μήκος κύματος του συστήματος SAR προς το διπλάσιο του τροχιακού κύκλου. Για παράδειγμα, το δορυφορικό

σύστημα SAR ERS-1/2 όπου το μήκος κύματος είναι 5,67 cm και ο τροχιακός κύκλος είναι 35 μέρες ο μέσος μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης είναι 1.62 mm/day. Αν οι εικόνες προέρχονται από την αποστολή tandem των ERS-1/2 όπου ο τροχιακός κύκλος είναι μια μέρα, τότε ο μέσος μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνεται στα 56.7 mm/day. Οι τεχνικές αποκατάστασης της φάσης μπορούν να εφαρμοστούν στα “τυλιγμένα” συμβολογράμματα για την εξαγωγή των πραγματικών φάσεων επιλύοντας την ασάφεια λόγω των χωρικών μεταβολών και των παραμορφώσεων της επιφάνειας του εδάφους.

2.5.6 Επεξεργασία

Η εκτέλεση της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι ένας ακόμη ουσιαστικός παράγοντας που θα επηρεάσει την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Τα στάδια της συμβολομετρικής διαδικασίας είναι πλήρως καθορισμένα (όχι όμως η σειρά υλοποίησής τους) και τα περισσότερα πακέτα προγραμμάτων που είναι κατάλληλα για συμβολομετρία έχουν ενσωματώσει διάφορους αλγορίθμους στην επεξεργασία των επιμέρους σταδίων. Εξαιτίας του περιορισμού της ταχύτητας επεξεργασίας, πολλές φορές γίνεται ένας συμψηφισμός μεταξύ ακρίβειας και επεξεργαστικού χρόνου.

Λόγω της επεξεργασίας των δεδομένων προκύπτει επιπλέον θόρυβος στη συμβολομετρική φάση (Just & Bamler, 1994). Για τη μείωση του θορύβου της φάσης θα πρέπει:

- Να αφαιρεθεί ο θερμικός θόρυβος του συστήματος SAR ειδικά σε περιοχές με χαμηλές τιμές του συντελεστή οπισθοσκέδασης (Boncori, 2006).
- Μείωση των σφαλμάτων λόγω αποκατάστασης της φάσης που προκαλούνται από την παρουσία διαφορών φάσης (phase gradients) μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων μεγαλύτερων από π. Προκαλούνται λόγω του θορύβου της φάσης, της σκίασης, της πτύχωσης, της υποδειγματολειψίας λόγω απότομων κλίσεων της περιοχής και λόγω του θορύβου της φάσης λόγω ασυνεχειών της προσπίπτουσας επιφάνειας (δασικές περιοχές). Συμπερασματικά, τα σφάλματα λόγω της ολοκλήρωσης μπορούν να οδηγήσουν σε μη αποδεκτά τελικά αποτελέσματα λόγω της διάδοσης των σφαλμάτων.
- Περιορισμός σφαλμάτων λόγω της ασυμφωνίας των απεικονίσεων/κακής ποιότητας συμπροσαρμογής (misregistration).
- Μετρίαση του σφάλματος λόγω κηλίδωσης (speckle) λόγω της σύνθετης φύσης της απεικόνισης εφαρμόζοντας ένα συνεκτικό φίλτρο ομαλοποίησης (coherent average filter).
- Αφαίρεση του σφάλματος λόγω των τοπογραφικών κλίσεων χρησιμοποιώντας φίλτρα παλμικής απόκρισης (pulse response filters).
- Περιορισμός των σφαλμάτων λόγω της τοπογραφίας αφαιρώντας το μοτίβο των κροσσών συμβολής που έχει παραχθεί από το διαθέσιμο υψηλής ακρίβειας DEM αναφοράς.

2.6 Μελλοντικές προοπτικές της τεχνικής της συμβολομετρίας

Η τεχνική της συμβολομετρίας έχει επωφεληθεί από το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχουν δορυφορικά συστήματα SAR υψηλής χωρικής ανάλυσης όπως τα TerraSAR-X και COSMO-Skymed. Επιπρόσθετα τον Ιούνιο του 2010 εκτοξεύτηκε η δορυφορική αποστολή TanDEM-X δημιουργώντας ένα

δι-στατικό σύστημα SAR. Το προϊόν της συμβολομετρικής επεξεργασίας των δεδομένων του δορυφορικού συστήματος TanDEM-X είναι ένα παγκόσμιο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο υψηλής ακρίβειας.

Τα δεδομένα που παρέχει το σύστημα TanDEM-X είναι μιας διέλευσης (single-pass) όπως η δορυφορική αποστολή SRTM με βελτιωμένη χωρική και υψομετρική ακρίβεια. Επίσης ο χρόνος λειτουργίας της δορυφορικής αποστολής TanDEM-X είναι τρία χρόνια συγκριτικά με το χρόνο λειτουργίας της αποστολής SRTM που ήταν έντεκα μέρες. Σε αντίθεση με την αποστολή SRTM όπου η γεωμετρική γραμμή βάσης είχε σταθερό (fixed) μήκος 60 μέτρων στο σύστημα TanDEM-X οι 2 δορυφόροι ακολουθούν ανεξάρτητες τροχιές. Κατά συνέπεια, η γεωμετρική γραμμή βάσης μεταβάλλεται σταθερά όσο οι δυο δορυφόροι κινούνται σε μια ελικοειδής τροχιά. Όπως έχει προαναφερθεί ο ρόλος της γεωμετρικής γραμμής βάσης για τον υπολογισμό της υψομετρικής πληροφορίας είναι πολύ σημαντικός. Ο ακριβής προσδιορισμός της γεωμετρικής γραμμής βάσης του συστήματος TanDEM-X έχει σαν αποτέλεσμα τη διασφάλιση της επιθυμητής ποιότητας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Οι Gonzalez et al. 2010, περιγράφουν μια στρατηγική βαθμονόμησης του δι-στατικού συστήματος με στόχο τη ανάλυση των σφαλμάτων. Ο Rossi et al., (2012) εξετάζουν τους συμβολομετρικούς αλγόριθμους που εφαρμόζονται για τη “επιχειρησιακή/λειτουργική” δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, εστιάζοντας στην αξιολόγηση της ποιότητάς τους και στη βαθμονόμηση. Επίσης προτείνεται μια στερεο-ρανταγραμμετρική μέτρηση για την εκτίμηση της μετατόπισης της φάσης. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση είναι η συμβολομετρική συνάφεια. Μια ακόμη μελέτη γίνεται από τους Martone et al. (2012) όπου αναλύονται τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής διαδικασίας του πρώτου χρόνου λειτουργίας του συστήματος TanDEM-X εξετάζοντας παράγοντες που επηρεάζουν τη συμβολομετρική συνάφεια. Οι παράγοντες που εξετάζονται είναι η μεταβολή του λόγου σήματος προς θορύβου, η αποσυσχέτιση λόγω σκέδασης όγκου, η ασάφειες στη διεύθυνση του αζιμουθίου, η πόλωση της μικροκυματικής ακτινοβολίας και η ποσοτικοποίηση της πληροφορίας (quantization). Τα πρώτα αποτελέσματα της ανάλυσης του σχετικού υψομετρικού σφάλματος των δεδομένων TanDEM-X παρουσιάζονται από τον Rizzoli et al. 2012. Περιγράφονται τα συστηματικά σφάλματα λόγω της θέσης μιας περιοχής σε μια παραγόμενη λωρίδα ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Ο συνδυασμός πολλών λωρίδων είναι απαραίτητο για τον μετριασμό των συστηματικών σφαλμάτων ειδικά σε δασικές και ορεινές περιοχές. Ο Gruber et al., 2012 χρησιμοποίησε ένα πρόγραμμα προσαρμογής παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων όπου αφαιρούνται τα συστηματικά σφάλματα και χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου και δεδομένα GPS επικύρωσε την ακρίβεια των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.

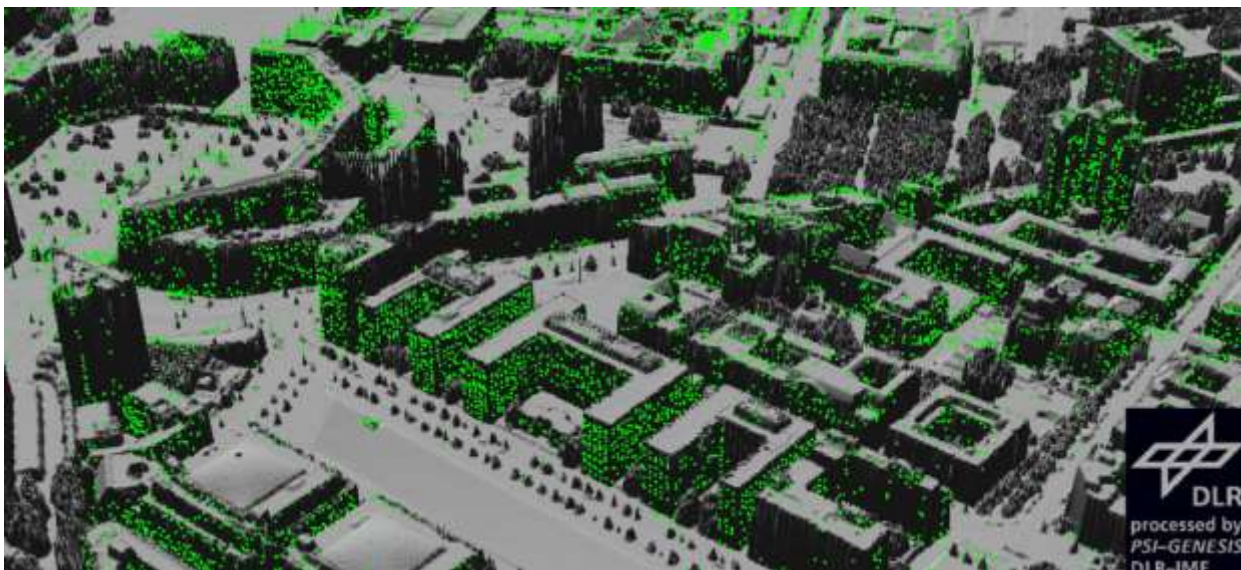
Στη τεχνική των σταθερών σκεδαστών (Persistent/Permanent Scatterer PS) πολλών απεικονίσεων αντιμετωπίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό τα προβλήματα της συμβατικής συμβολομετρίας (Ferretti et al., 2001). Η τεχνική των σταθερών σκεδαστών αποτελεί ένα συστηματικό τρόπο επεξεργασίας δεδομένων SAR για μια συγκεκριμένη περιοχή από πολλές τροχιές, δημιουργώντας ένα πλήθος διαφορικών συμβολογραμμάτων με μια master απεικόνιση. Η σημαντική διαφορά με τη τεχνική της συμβατικής συμβολομετρίας είναι ότι η ανάλυση της φάσης δεν γίνεται σε ένα συνεχές χωρικό πλαίσιο αλλά σε μεμονωμένα σημεία (σταθεροί σκεδαστές) που έχουν ισχυρές και σταθερές επιστροφές και αναλύονται συναρτήσει του χρόνου, του χρόνου και της γραμμής βάσης. Οι διαφορετικές (χωρικές, χρονικές, λόγω της γραμμής βάσης) σχέσεις των συνιστωσών της φάσης των σταθερών σκεδαστών με τη τοπογραφία, τις παραμορφώσεις και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της εκτίμησης της πραγματικής φάσης (phase unwrapping). Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί

μια σημαντική βελτίωση χρήσης και αξιοποίησης των δεδομένων SAR για τη παρατήρηση παραμορφώσεων/μικρομετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους με την ακρίβεια μερικών χιλιοστών από το διάστημα.

Πιο συγκεκριμένα, οι Riddick et al., 2012 εξέτασαν την πυκνότητα των σταθερών σκεδαστών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας συγκεκριμένων γεωλογικών στοιχείων. Χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό StaMPS σε μια χρονοσειρά εικόνων ERS βρέθηκε ότι σε περιοχές έχουν καλυφθεί από λάβα η πυκνότητα των σταθερών σκεδαστών είναι μεγάλη.

Ο αριθμός εφαρμογών που χρησιμοποιείται η τεχνική της συμβολομετρίας σταθερών σκεδαστών σε αστικές περιοχές μεγαλώνει με γρήγορους ρυθμούς αφού ένα ανθρωπογενές περιβάλλον παρέχει ένα μεγάλο πλήθος σταθερών σκεδαστών. Η διαθεσιμότητα δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης (TerraSAR-X, COSMO-Skymed) έχει οδηγήσει στην αύξηση της πυκνότητας των σταθερών σκεδαστών. Αυτό είναι προφανές σύμφωνα και με τη μελέτη (Perissin & Wang, 2011) όπου χρησιμοποιήθηκαν 40 ERS εικόνες και 33 COSMO-Skymed με το λογισμικό SARPROZ και η πυκνότητα των σταθερών σκεδαστών στη χρονοσειρά των απεικονίσεων COSMO-Skymed ήταν είκοσι φορές υψηλότερη. Η τόσο μεγάλη συχνότητα των σταθερών σκεδαστών επέτρεψε τον εντοπισμό μικρομετακινήσεων στη περιοχή της Σαγκάης λόγω κατασκευής γραμμής μετρό. Οι μελετητές Gernhardt & Bamler, 2010 μελέτησαν τη δυνατότητα της συμβολομετρικής τεχνικής σταθερών σκεδαστών για τη παρακολούθηση μεμονωμένων κτηρίων. Το εξαγόμενο πλήθος σημείων που περιγράφει τους σταθερούς σκεδαστές χρησιμοποιήθηκε για τη προβολή της τρισδιάστατης μετατόπισης τους στη διεύθυνση της θέασης (Line of sight). Αναπτύχθηκε τεχνική χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για την ευθυγράμμιση στοιχείων κτηρίων. Όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα τα σημεία σταθερών σκεδαστών απεικονίζουν τη διάρθρωση των παραθύρων στις προσόψεις των κτιρίων.

Σύμφωνα με τους Schunert & Soergel, 2012 η ομαδοποίηση των σταθερών σκεδαστών μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης του ύψους.



Εικόνα 2.4 Σημεία σταθερών σκεδαστών πάνω σε ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο επιφάνειας Πηγή: Gernhardt & Bamler, 2010

Δεν πρέπει να παραλείψουμε ότι τα κριτήρια επιλογής των σημείων σταθερών σκεδαστών είναι η διασπορά του πλάτους τους και ο λόγος του σήματος προς το σωρό (clutter). Σύμφωνα με τη παραπάνω

λογική, πολλοί σκεδαστές αγνοούνται επειδή δεν έχουν ισχυρές επιστροφές παρόλο που το επιστρεφόμενο σήμα τους είναι σχεδόν αμετάβλητο σε μικρά κομμάτια της χρονικής γραμμής βάσης. Ο Wang et al., 2011 ανέπτυξε μια τεχνική (SqueeSAR) χρησιμοποιώντας τον στατιστικό έλεγχο Anderson-Darling όπου αυξάνεται το πλήθος και η πυκνότητα των σταθερών σκεδαστών. Μια παρόμοια προσέγγιση έγινε από τους Goel & Adam, 2012 εστιάζοντας σε μη-αστικές περιοχές.

Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση Βιομάζας με τη χρήση
δεδομένων SAR

3.1 Εισαγωγή

Τα ενεργητικά τηλεπισκοπικά συστήματα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για μελέτες βιομάζας λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών λειτουργίας τους. Η ικανότητα των συστημάτων να λειτουργούν όλο το 24ωρο, η μικρή επίδραση των καιρικών συνθηκών στα δεδομένα, η μεγάλη χωρική κάλυψη και η μεγάλη χρονική συχνότητα των δεδομένων αποτελούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους. Ένα σύστημα SAR ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του (πόλωση, μήκος κύματος, γωνία πρόσπτωσης) αλλά και σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της δασικής περιοχής μελέτης, μπορεί να παρέχει δεδομένα για τα διάφορα θεματικά επίπεδα πληροφορίας ενός δάσους. Στις πιο ολοκληρωμένες μελέτες οι τηλεπισκοπικές μέθοδοι SAR ποσοτικοποιούν τη βιομάζα και οδηγούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής της.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη που έγινε, οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό/εκτίμηση της δασικής υπέργειας βιομάζας (AGB Above Ground Biomass) χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τις άμεσες και τις έμμεσες. Στις άμεσες μεθόδους χρησιμοποιούνται οι υπογραφές του ραντάρ όπως ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, με στόχο τη δημιουργία σχέσεων με τη δασική βιομάζα ή τη δασική διάρθρωση (Tsui, 2013). Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκτίμησης της δασικής υπέργειας βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα χαρακτηριστικά των δεδομένων SAR όπως η συνάφεια, το πλάτος, η χρονική και χωρική αποσυσχέτιση, η υφή, η μεταβλητότητα των τιμών της οπισθοσκέδασης. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορίζουν δασικές μεταβλητές όπου στη συνέχεια εισάγονται σε μοντέλα εκτίμησης της βιομάζας. Η μεταβλητή που εντοπίζεται πιο συχνά είναι το ύψος των δέντρων με μεθόδους που βασίζονται στην επεξεργασία της φάσης των εικόνων SAR (InSAR, PolInSAR, SAR Tomography). Συμπερασματικά, οι άμεσες και οι έμμεσες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους που βασίζονται σε άλλου τύπου δεδομένα (οπτικά, Lidar, δεδομένα πεδίου).

3.2 Ιδιότητες απεικονίσεων SAR για την εκτίμηση βιομάζας

Τα δεδομένα ραντάρ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να συσχετιστούν με διάφορες δασικές παραμέτρους (Dobson et al., 1992). Η διαπερατότητα του σήματος SAR που σχετίζεται με το μήκος κύματος και τη πόλωσή του καθορίζει την ευαισθησία των σημάτων SAR σχετικά με τις συνιστώσες της βλάστησης.

Μπάντες(bands)	Δασικές συνιστώσες οπισθοσκέδασης (Scattering vegetation components)
X	Φύλλα και επιφάνεια κομοστέγης
C	Μικρά κλαδιά
L	Κορμός και βασικά κλαδιά
P	Κορμός και έδαφος

Πίνακας 3. 1 Ευαισθησία των καναλιών SAR στις συνιστώσες της βλάστησης Πηγή: Luckman et al., 1997, Ghasemi et al., 2010

Τα σύγχρονα συστήματα SAR λειτουργούν σε διάφορες συχνότητες (κυρίως X,C,L και P μπάντες). Τα συστήματα όπου οι μπάντες έχουν μεγάλο μήκος κύματος (P και L) έχουν μεγαλύτερη διαπερατικότητα συγκριτικά με τα συστήματα με μπάντες μικρού μήκους κύματος (X και C). Επίσης η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της βιομάζας και της οπισθοσκέδασης όπως επίσης και τα επίπεδα του κορεσμού είναι υψηλότερα για τα συστήματα με μεγάλες συχνότητες λειτουργίας.

Η οπισθοσκέδαση στις μπάντες P και L έχει μεγαλύτερη συσχέτιση με τις βιοφυσικές παραμέτρους των δέντρων (Ghasemi et al., 2010). Η ακτινοβολία μπάντας P γενικά διαπερνάει σε μεγαλύτερο βαθμό τη κομοστέγη (canopy) των δέντρων συγκριτικά με την ακτινοβολία μπάντας L με αποτέλεσμα ένας μεγάλος αριθμός εικονοστοιχείων να περιέχουν τιμές από τις επιστροφές από την επιφάνεια του εδάφους (Balzter et al., 2007a). Τα δεδομένα L μπάντας χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των επιπέδων δασικής βιομάζας μέχρι το όριο των 40 t/ha (Luckman et al., 1997). Σύμφωνα με τις έρευνες Sun et al. (2002) και Lu et al. (2006) τα δεδομένα μπάντας L είναι πολύ σημαντικά για την εκτίμηση της βιομάζας ενώ ο Foody et al. (1997) συμπέρανε ότι τα δεδομένα μπάντας L είναι κατάλληλα για την εκτίμηση της βιομάζας ενός νέου τροπικού δάσους. Η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (μπάντα X) σκεδάζεται κατά κύριο λόγο από τις συνιστώσες των δέντρων όπως το φύλλωμα και τα μικρά κλαδιά του άνω μέρους της κομοστέγης (Ranson et al., 1997). Πολύ μικρότερες συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ των τιμών οπισθοσκέδασης δεδομένων μπάντας C και της βιομάζας (Le Toan et al., 1992, Rauste et al., 1994). Η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συχνοτήτων (μπάντες P,L,C) έδειξε ότι η μεγαλύτερη συσχέτιση που μπορεί να επιτευχθεί είναι με δεδομένα μπάντας P (Le Toan et al 1992, Beaudoin et al., 1994).

Η πόλωση των σημάτων είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος των δεδομένων SAR. Η δυνατότητα των συστημάτων SAR να λειτουργούν με πολλαπλές πολώσεις παρέχει επιπρόσθετη πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά μια δασικής περιοχής. Οι πολωσιμετρικοί δείκτες μηχανισμού σκέδασης σχετίζονται περισσότερο για δεδομένα μπάντας P (Neumann et al., 2012). Τα δεδομένα κυρίως μεγάλου μήκους κύματος όμοια πολωμένα (HH, VV) είναι ευαίσθητα όταν αλλάζουν οι συνθήκες τις επιφάνειας του εδάφους ενώ τα δεδομένα που είναι ανόμοια πολωμένα (HV,VH) περιέχουν τιμές οπισθοσκέδασης που συσχετίζονται με την πληροφορία της κομοστέγης (Le Toan et al., 1992, Dobson et al., 1992, Ranson and Sun, 1994, Beaudoin et al., 1994, Morel et al., 2011). Σύμφωνα με τον Beaudoin et al. (1994) τα δεδομένα πόλωσης HH σχετίζονται με τη βιομάζα του κορμού και της κομοστέγης σε σύγκριση με τα δεδομένα πόλωσης VV και HV όπου σχετίζονται μόνο με τη βιομάζα της κομοστέγης.

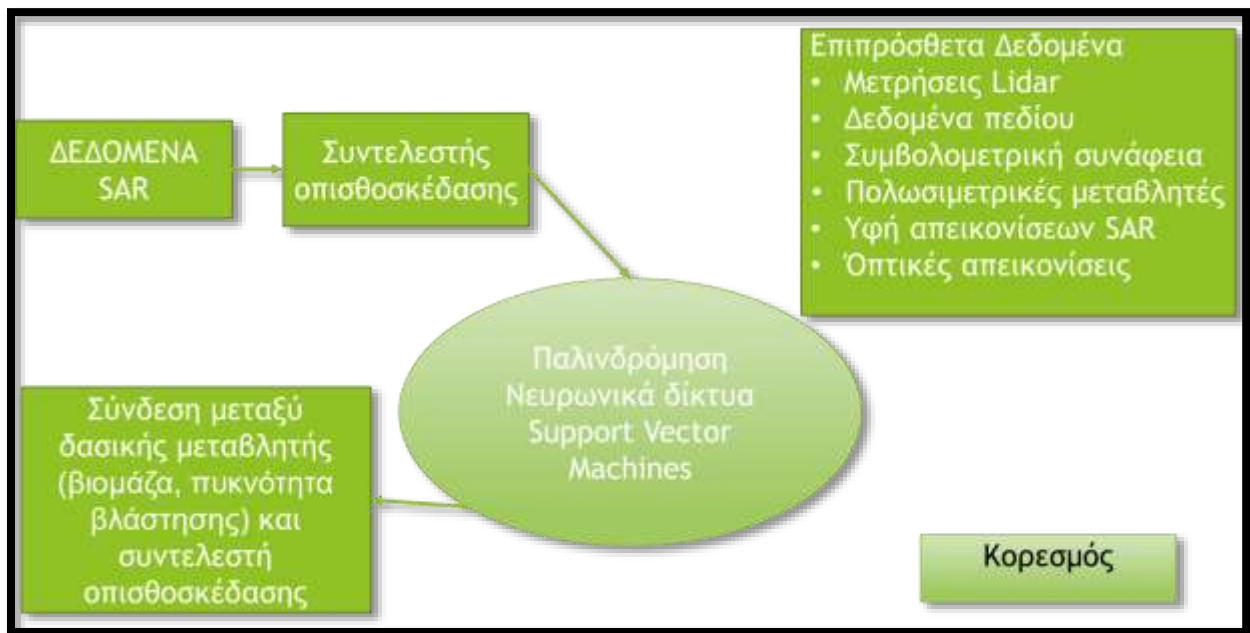
Σημειώνεται ότι οι λόγοι των τιμών οπισθοσκέδασης σε δυο διαφορετικές πολώσεις έχουν βελτιώσει τα αποτελέσματα της εκτίμησης της βιομάζας χρησιμοποιώντας δεδομένα SAR (Ranson and Sun 1994). Για παράδειγμα, ο Harrell et al., (1997) χρησιμοποιώντας ως επιπρόσθετες μεταβλητές στη ανάλυση παλινδρόμησης τις τιμές οπισθοσκέδασης δεδομένων μπάντας C με πολώσεις HH και HV, καθώς και το λόγο τους, βελτίωσε τα αποτελέσματα της βιομάζας που προέκυψαν. Σύμφωνα με την έρευνα των Ranson and Sun (1994) οι καλύτερες μπάντες για την εκτίμηση της βιομάζας κωνοφόρων δασών είναι η C και η L με πόλωση HV, ενώ για τα φυλλοβόλα δάση είναι καταλληλότερος ο συνδυασμός δεδομένων με μπάντες C και L με πολώσεις HH και HV.

Τέλος, για προσεγγίσεις που βασίζονται στις τιμές οπισθοσκέδασης, ένα πλήθος ερευνητών θεωρεί ότι τα δεδομένα που είναι πιο ευαίσθητα στη μεταβολή της βιομάζας είναι μεγάλου μήκους κύματος (μπάντες P, L) και με πόλωση HV (Rauste et al., 1994, Sun 2002, Luckman et al., 1997, Ranson and Sun, 1994, Harrell et al., 1997, Goh et al., 2011, Morel et al., 2011, Saatchi et al., 2011, Robinson et al., 2013).

3.3 Προσεγγίσεις με βάση το συντελεστή οπισθοσκέδασης

Η ένταση της οπισθοσκέδασης είναι η ενέργεια που λαμβάνεται από τον αισθητήρα SAR μετά την εκπομπή του σήματος SAR στο στόχο (Balzter et al., 2007a). Η συνολική οπισθοσκέδαση είναι ένα άθροισμα των συνεισφορών/επιδράσεων των μηχανισμών σκέδασης όπως η σκέδαση όγκου (volume

scattering) από τη κομοστέγη, τη σκέδαση επιφανείας (surface scattering) από το έδαφος και τη γωνιακή σκέδαση (double-bounce scattering). Η οπισθοσκέδαση εξαρτάται από τη συχνότητα και την πόλωση της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας από ένα σύστημα SAR και από το σχήμα, τη τραχύτητα και τις διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου στο έδαφος (Le Toan 1992, Dobson et al., 1992). Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στο συντελεστή οπισθοσκέδασης δημιουργούν μια σχέση που συνδέει το συντελεστή οπισθοσκέδασης με τη βιομάζα χρησιμοποιώντας τεχνικές παλινδρόμησης, νευρωνικά δίκτυα κ.λπ. Οι μελέτες που βασίζονται στο συντελεστή οπισθοσκέδασης έχουν λάβει χώρα σε πολλούς δασικούς τύπους. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες μελέτες έχουν γίνει σε κωνοφόρα δάση (Dobson et al., 1992, Le Toan 1992), σε τροπικά δάση (Luckman et al., 1997, Luckman et al., 1998) σε σαβάνες (Santos et al., 2002), σε πευκοδάση (Beaudoin et al., 1994, Castel et al., 2001), σε αρκτικά δάση (Rauste, 2005), σε δασικές περιοχές που είναι στο στάδιο αναγέννησης (regenerating forests) (Kuplich et al., 2000) και σε ορεινές δασικές περιοχές (Sun et al., 2002).



Σχήμα 3. 1 Προσεγγίσεις που βασίζονται στην οπισθοσκέδαση

Η πιο διαδεδομένη και πιο απλή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των σχέσεων μεταξύ των δασικών παραμέτρων και του συντελεστή οπισθοσκέδασης είναι η μέθοδος της παλινδρόμησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο της παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται τα δεδομένα αναφοράς που συνήθως είναι επίγεια δεδομένα ή μετρήσεις Lidar και υπολογίζονται οι συντελεστές της τελικής επιθυμητής σχέσης. Σύμφωνα με τις μελέτες Beaudoin et al., 1994 και Luckman et al., 1997 οι εκτιμώμενοι παράμετροι (π.χ. δασικό ύψος) μπορούν να εισαχθούν σε αλλομετρικές εξισώσεις με στόχο την εκτίμηση της βιομάζας. Ανάλογα με τις αλλομετρικές εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν μπορούν να προκύψουν εκτιμήσεις ξεχωριστά για τη βιομάζα της κομοστέγης ή την ξυλώδη βιομάζα. Εκτός από τη χρήση αλλομετρικών εξισώσεων εκτιμήσεις της βιομάζας μπορούν να προκύψουν με (σταδιακή) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (SMLR- Stepwise multiple-linear regression) χρησιμοποιώντας κυρίως επίγεια δεδομένα βιομάζας (Harrell et al., 1997, Rauste, 2005, Hyde et al., 2007). Τέλος σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα από τη χρήση της παλινδρόμησης όταν αλλάζει ο δασικός τύπος δεν είναι ικανοποιητικά (Rauste et al., 1994).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις πιο πρόσφατες μελέτες που χρησιμοποιούν το συντελεστή οπισθοσκέδασης. Ο Sandberg et al. (2011) συμπέρανε ότι, τα δεδομένα P μπάντας παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα (RMSE=18-27% και $R^2=0.7-0.8$) σε σχέση με τα δεδομένα L μπάντας (RMSE=31-46% και $R^2=0.4-0.6$) για δασικές περιοχές όπου οι τιμές βιομάζας είναι μεταξύ 10 με 290 t/ha. Ο Robinson et al. (2013) χρησιμοποιώντας δεδομένα L μπάντας από σύστημα SAR σε πλατφόρμα UAV συμπέρανε ότι η τεχνική της παλινδρόμησης πολλών μεταβλητών (multivariate) παρουσιάζει υποτιμημένα αποτελέσματα βιομάζας σε όλες τις χωρικές κλίμακες που μπορεί να μελετηθεί μια δασική περιοχή (περιοχή, συστάδα, δέντρο). Η χρήση πολλών καναλιών (π.χ. L-HV, LHH μπάντες) στη διαδικασία της παλινδρόμησης έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένα αποτελέσματα βιομάζας (Harrell et al., 1997). Οι Foody et al. (1997) συμπέρανε ότι η χρήση των λόγων των συντελεστών οπισθοσκέδασης βελτιώνει την ακρίβεια της εξαγόμενης σχέσης μεταξύ της βιομάζας και του συντελεστή οπισθοσκέδασης και μειώνει το επίπεδο του κορεσμού. Μια ολοκληρωμένη μελέτη έγινε από τους Chen et al. (2009) όπου υλοποιήθηκε η τεχνική της παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας επίγεια δεδομένα βιομάζας, τον συντελεστή οπισθοσκέδασης από δεδομένα JERS και τον λόγο TM4/TM5 από δεδομένα Landsat με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων να κρίνεται ικανοποιητική (RMSE=21%). Επίσης, σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον Luckman et al. (1998) αν προηγηθεί μια ταξινόμηση των δασικών τύπων τα αποτελέσματα της βιομάζας είναι καλύτερα. Όπως έχει αναφερθεί, εκτός από την τεχνική της σταδιακής γραμμικής παλινδρόμησης πολλών παραμέτρων μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές όπως Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN- Artificial Neural Network) και SVR (Support Vector Regression) για την εκτίμηση της βιομάζας. Σε μια μελέτη αξιολόγησης (Englhart et al., 2012) τα αποτελέσματα της σταδιακής γραμμικής παλινδρόμησης με τη χρήση πολλών παραμέτρων είχαν τη χειρότερη ακρίβεια. Τέλος, σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη που διεξάχθηκε και σύμφωνα με τους Le Toan et al. (2011) τα σφάλματα RMS των συγκεκριμένων μεθόδων κυμαίνονται από 15% έως 35 % με τα μεγαλύτερα σφάλματα να εντοπίζονται σε περιοχές υψηλής βιομάζας.

3.4 Ρόλος της συνάφειας στη διαδικασία εκτίμησης της βιομάζας από δεδομένα SAR

Η συμβολομετρική συνάφεια σχετίζεται κυρίως με τη χρονική αποσυσχέτιση λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας, της πίεσης, των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του σκευαστή και της αλλαγής του προσανατολισμού του ανάλογα και με το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας (Balzter et al., 2007a, Lee et al., 2009, Zhou et al., 2009). Σε πολλές μελέτες (Gaveau et al., 2003, Thiel et al., 2009, Tsui et al., 2012) εξετάστηκε η χρήση της πληροφορίας που εξάγεται από την εικόνα της συνάφειας για την εκτίμηση της βιομάζας. Συγκεκριμένα οι Gaveau et al. (2003), και Thiel et al. (2009), συνδύασαν την πληροφορία της συνάφειας με τη πληροφορία της οπισθοσκέδασης για την ταξινόμηση της δασικής περιοχής μελέτης εξάγοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μια ολοκληρωμένη μελέτη έγινε από τους Tsui et al. (2012) όπου χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης, οι τιμές της συμβολομετρικής συνάφειας, μετρήσεις ύψους από δεδομένα Lidar και πολωσιμετρικές μεταβλητές για την υλοποίηση μια πολυπαραμετρικής γραμμικής παλινδρόμησης με στόχο την εκτίμηση της βιομάζας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης ήταν ικανοποιητικά ($R^2=0.89$) έδειξαν ότι η προσθήκη της συνάφειας στη διαδικασία της παλινδρόμησης βελτίωσε τα τελικά αποτελέσματα κατά 2.4%. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αφορούν μια εύκρατη δασική περιοχή ενώ σύμφωνα με τον Koch, 2010 τα αποτελέσματα είναι σαφώς βελτιωμένα σε αρκτικές περιοχές.

3.5 Προσεγγίσεις βασισμένες στην υφή μιας απεικόνισης SAR.

Η υφή είναι μια συνάρτηση της τοπικής διασποράς των τιμών της εικόνας που σχετίζεται με τη χωρική ανάλυση και το μέγεθος των κυρίαρχων αντικειμένων της απεικονιζόμενης σκηνής (Haralick et al., 1973). Η εξαγωγή της πληροφορίας της υφής γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους ή μεθόδους επεξεργασίας σήματος (Cutler et al., 2012). Η υφή μιας απεικόνισης SAR μπορεί να μεγιστοποιήσει τον διαχωρισμό της χωρικής πληροφορίας ανεξάρτητα με την ένταση της οπισθοσκέδασης και έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το επίπεδο κορεσμού της βιομάζας. (Kuplich et al., 2005). Η υφή μιας απεικόνισης SAR είναι μια ποσότητα που μπορεί να συσχετιστεί με τη βιομάζα σε μεγαλύτερα επίπεδα βιομάζας συγκριτικά με τις προσεγγίσεις που βασίζονται στον συντελεστή οπισθοσκέδασης. Η συνδυαστική χρήση της πληροφορίας της υφής μιας απεικόνισης SAR με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης αυξάνει την ακρίβεια των εκτιμήσεων της βιομάζας (Kuplich et al., 2005). Η μεταβλητή της υφής μιας απεικόνισης SAR έχει συνδυαστεί με οπτικά δεδομένα και τον συντελεστή οπισθοσκέδασης απεικονίσεων SAR για την εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Amini et al., 2011, Cutler et al., 2012) και σε σταδιακές πολυπαραμετρικές παλινδρομήσεις για την ενίσχυση της εξαγόμενης σχέσης συσχέτισης (Kuplich et al., 2005, Sarker et al., 2013).

Μια ολοκληρωμένη μελέτη έγινε από τους Amini et al. (2011) όπου υπολογίστηκε η πληροφορία της υφής από δεδομένα JERS-1 με τη μέθοδο GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) μετά από την αφαίρεση της κηλίδωσης με κατάλληλο φίλτρο το οποίο έχει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα συμβατικά φίλτρα στις δασικές περιοχές. Ο συνδυασμός των φασματικών αποκρίσεων των οπτικών εικόνων και της υφής που προέρχεται από δεδομένα SAR βελτίωσε τα αποτελέσματα της εκτίμησης της βιομάζας. Συγκεκριμένα, οι τιμές έντασης από τις οπτικές εικόνες ALOS-AVNIR-2 και PRISM και τα χαρακτηριστικά της υφής από δεδομένα JERS-1 χρησιμοποιήθηκαν σε ένα MLPNN (Multi-layer Perceptron Neural Network) νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση δασικών μεταβλητών, όπως το μέσο ύψος, το εμβαδόν της δασικής περιοχής τη μέσο ύψος στηθιαίας διαμέτρου (DBH). Το σφάλμα (RMSE) του νευρωνικού δικτύου ήταν 2.18 τόνους σε μια περιοχή των δυο χιλιάδων εκταρίων συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους που έχουν σφάλμα (RMSE) 5.34 τόνους.

Κάποιοι ακόμα μελετητές, οι Sarker et al. (2013), χρησιμοποιώντας την πληροφορία της υφής από δεδομένα SAR μπάντας C με πολώσεις HV και HH και από τον λόγο των απεικονίσεων C-HV/C-HH, όπως επίσης και τους συντελεστές οπισθοσκέδασης, παρουσίασε βελτιωμένα αποτελέσματα. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η σταδιακή γραμμική παλινδρόμηση (stepwise regression analysis) και το επίπεδο κορεσμού αυξήθηκε σε 360 t/ha όταν χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της πληροφορίας της υφής ξεχωριστά από κάθε απεικόνιση, ενώ όταν χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της πληροφορίας της υφής από το λόγο των καναλιών C-HV/C-HH το επίπεδο κορεσμού αυξήθηκε σε 532 t/ha.

3.6 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR

Η εκτίμηση της βιομάζας χρησιμοποιώντας την τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR υλοποιείται αξιοποιώντας την πληροφορία της συμβολομετρικής φάσης. Συγκριτικά με τις προηγούμενες προσεγγίσεις που έχουν αναφερθεί, η ακρίβεια των εκτιμώμενων τιμών βιομάζας με τις συμβολομετρικές προσεγγίσεις είναι καλύτερη (Theuhaft et al., 2004). Συγκεκριμένα ο Santos et al. (2004) χρησιμοποιώντας την τεχνική της συμβολομετρίας σε δεδομένα δύο συχνοτήτων (X και P μπάντες) κατάφερε να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης της βιομάζας συγκριτικά με τις προσεγγίσεις που βασίζονται στο συντελεστή οπισθοσκέδασης. Η συμβολομετρική φάση μπορεί να συσχετιστεί με το

κέντρο φάσης (scattering phase center) των σκεδαστών. Σύμφωνα με τον παραπάνω συλλογισμό με κατάλληλη επεξεργασία δεδομένων κατάλληλης συχνότητας και πόλωσης μπορεί να προκύψουν εκτιμήσεις σχετικά με το ύψος της δασικής κομοστέγης (Balzter, 2001). Τέλος σημειώνεται ότι η θέση του κέντρου φάσης ενός σκεδαστή εκτός από τα χαρακτηριστικά του δέκτη εξαρτάται από τη δομή της βλάστησης και από τους μηχανικούς σκέδασης.

Στο επιστημονικό πεδίο της Τηλεπισκόπησης των δασών η τεχνική της συμβολομετρίας χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση του δασικού ύψους κομοστέγης. Η υψομετρική πληροφορία που εξάγεται με την τεχνική της συμβολομετρίας σχετίζεται με το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους και το ύψος της βλάστησης (Solberg et al., 2013). Σύμφωνα με τους Balzter et al. 2007a τα υψόμετρα που προκύπτουν από την συμβολομετρία είναι υποτιμημένα συγκριτικά με τις αντίστοιχες επίγειες μετρήσεις. Η τεχνική της συμβολομετρίας έχει χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας με δεδομένα X και P μπάντας αερομεταφερόμενου συστήματος SAR από τους μελετητές Gama et al. (2010) και Dos Santos et al. (2009). Με την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας στα δεδομένα X μπάντας μπορεί να εξαχθεί ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης. Αντίστοιχα με την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας στα δεδομένα P μπάντας εξάγεται το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους. Η διαφορά των δυο ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων ονομάζεται συμβολομετρικό ύψος h_{int} και αποτελεί μια εκτίμηση του δασικού ύψους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την εκτίμηση της βιομάζας. Η μετατροπή της πληροφορίας του συμβολομετρικού ύψους σε πληροφορία της βιομάζας γίνεται συνήθως με τη χρήση αλλομετρικών εξισώσεων ή με τη χρήση μοντέλων που απαιτούν γνώση του συντελεστή οπισθοσκέδασης και του συμβολομετρικού ύψους (Williams et al., 2009). Οι Saatchi et al. (2011), χρησιμοποιώντας το εξαγόμενο συμβολομετρικό ύψος στην τεχνική της παλινδρόμησης βελτίωσε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αξιοποίηση μόνο της πληροφορίας του συντελεστή οπισθοσκέδασης. Τέλος, σημειώνεται ότι για την περιγραφή της επιφάνειας του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν δεδομένα C μπάντας με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Viergever et al., 2009).

Για τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της συμβολομετρικής διαδικασίας προτείνεται η χρήση ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων εδάφους από δεδομένα Lidar συγκριτικά με τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους από τοπογραφικούς χάρτες (Solberg et al., 2010, Praks et al., 2012). Επίσης, η χρήση δεδομένων μιας διέλευσης (single-pass) παρουσιάζει βελτιωμένα αποτελέσματα λόγω της μικρής χρονικής αποσυσχέτισης. Σύμφωνα με πολλές μελέτες (Santos et al., 2004, Balzter et al., 2007a, Williams et al., 2009 Hajnsek et al., 2009, Praks et al., 2012) με τη χρήση μόνο δεδομένων αερομεταφερόμενων συστημάτων SAR είναι δυνατή η εξαγωγή της πληροφορίας της βιομάζας. Συγκεκριμένα, οι Santos et al. (2004) εξήγαγαν την πληροφορία της βιομάζας με σφάλμα (RMSE) 46.1 Mg/ha σε τροπικό δάσος χρησιμοποιώντας δεδομένα X και P μπάντας αερομεταφερόμενου συστήματος SAR.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε ένα μέσο σφάλμα (RMSE) των πιο πρόσφατων μεθόδων που βασίζονται στην τεχνική της συμβολομετρίας είναι περίπου 16%. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί αν είναι διαθέσιμη η γνώση σχετικά με τους υπάρχοντες δασικούς τύπους της περιοχής μελέτης (Solberg et al., 2010) και αν η χρονική διαφορά μεταξύ των συμβολομετρικών μετρήσεων και των δεδομένων αναφοράς είναι μικρή (Askne et al., 2013). Συμπερασματικά, προτείνεται η συνδυασμένη χρήση δεδομένων αερομεταφερόμενων και δορυφορικών συστημάτων SAR με στόχο την ολοκληρωμένη και ευρύτερη εκτίμηση της βιομάζας.

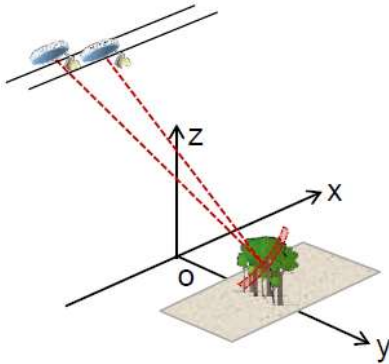
Οι βασικότερες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την αξιοποίηση των δορυφορικών απεικονίσεων SAR περιγράφονται παρακάτω. Οι Askne et al. (2013) χρησιμοποιώντας συμβολομετρικά δεδομένα TanDEM-X από πολλές χρονικές περιόδους εξήγαγαν την πληροφορία της βιομάζας. Οι Sambatti et al. (2012), χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις ως πειραματικά δεδομένα εξήγαγαν μια σχέση που συσχετίζει παραμέτρους απεικονίσεων SAR (π.χ. συμβολομετρικό ύψος) με ένα γραμμικό μοντέλο. Τέλος οι Solberg et al. (2010), ανέπτυξαν μια γραμμική σχέση χωρίς να εμφανίζονται φαινόμενα κορεσμού μεταξύ του συμβολομετρικού ύψους από δεδομένα SRTM X μπάντας και δασικής υπέργειας βιομάζας (AGM- Above Ground Biomass) με ικανοποιητική ακρίβεια (RMSE=19%).

Συνοψίζοντας, η τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η συνδυαστική χρήση συμβολομετρικών δεδομένων και άλλων τύπων δεδομένων (π.χ. υπερφασματικά δεδομένα) αναμένεται να προσφέρει καλύτερες ακρίβειες των τελικών αποτελεσμάτων (Treuhaft et al., 2002). Οι βιοφυσικές παράμετροι που μπορούν να προκύψουν από την επεξεργασία υπερφασματικών δεδομένων ενισχύουν τη διαδικασία εκτίμησης της βιομάζας από δεδομένα SAR με την τεχνική της συμβολομετρίας (Treuhaft et al., 2003).

3.7 Εκτίμηση της βιομάζας με τη τεχνική της συμβολομετρίας πλήρως πολωμένων απεικονίσεων SAR

Η συμβολομετρία των πολωμένων απεικονίσεων (PolInSAR-Polarimetric Interferometry Synthetic Aperture Radar) αποτελεί ένα συνδυασμό της τεχνικής της πολωσιμετρίας και της συμβολομετρίας. Η συγκεκριμένη τεχνική αξιοποιεί τις δυνατότητες της πολωσιμετρίας για την αναγνώριση των μηχανισμών σκέδασης και τη δυνατότητα της συμβολομετρίας σχετικά με τη χωρική κατανομή των σκεδαστών. Η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας των πολωμένων απεικονίσεων SAR παρουσιάζει μεγάλες βελτιώσεις στη διαδικασία εκτίμησης της βιομάζας και γενικά των δασικών παραμέτρων (Neuman et al., 2012). Σημειώνεται ότι μέσα από τα συμβολογράμματα που χρησιμοποιούνται μπορεί να εξαχθεί εκτός από τη πληροφορία του δασικού ύψους και την πληροφορία σχετικά με τη τοπογραφία του εδάφους που βρίσκεται κάτω από τη βλάστηση και η κατακόρυφη διάρθρωση/κατανομή των σκεδαστών (Moreira et al., 2013). Με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας πολωμένων απεικονίσεων SAR οι μηχανισμοί σκέδασης μπορούν να διαχωριστούν και να εξεταστούν ξεχωριστά. Όπως έχει αναφερθεί η κύρια μεταβλητή παρατήρησης είναι η συμβολομετρική συνάφεια γ_{vol} που προκύπτει από τη σκέδαση όγκου (volume scattering) (Moreira et al., 2013). Στις περισσότερες εφαρμογές (Cloude et al., 2003, Parathanassiou 2005, Pascale et al., 2007, Chen et al., 2011) χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι αντιστροφής (inversion algorithms) για την εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι βασίζονται στο μοντέλο RVoG (Random Volume over Ground) (Saatchi et al., 2000) όπου απαιτείται η γνώση της φάσης του εδάφους και της συνάφειας.

Η χρήση του εξαγόμενου δασικού ύψους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αλλομετρικές εξισώσεις που συνδέουν μια ποσοτική εκτίμηση της βιομάζας και του δασικού ύψους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που έχει γίνει ένα μέσο σφάλμα εκτίμησης (RMSE) του δασικού ύψους είναι 10%. Επίσης το μέσο σφάλμα (RMSE) μιας αλλομετρικής εξίσωσης είναι περίπου 15%. Τελικά προκύπτει ότι η ακρίβεια υπολογισμού της βιομάζας με τη χρήση αλλομετρικών εξισώσεων και του εξαγόμενου δασικού ύψους είναι 25-30% (Mette et al., 2003).



Σχήμα 3. 2 Συμβολομετρία πλήρως πολωμένων απεικονίσεων SAR Πηγή: www.esa.int

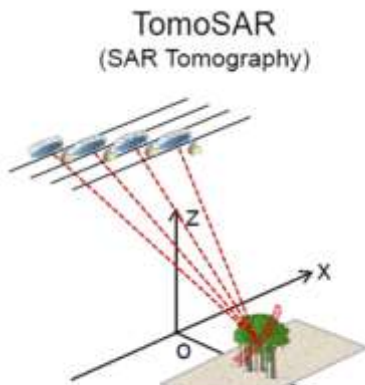
Οι αλγόριθμοι αντιστροφής του μοντέλου RVoG από δεδομένα μίας ή πολλών βάσεων που χρησιμοποιούνται, μπορούν να προσφέρουν εκτός από την πληροφορία του δασικού ύψους, το λόγο σκέδασης εδάφους προς όγκο (ground-volume) όπως επίσης και πολωσιμετρικούς πίνακες συμμεταβλητότητας λόγω της σκέδασης από το έδαφος και της σκέδασης λόγω όγκου. Η κατάλληλη επιλογή και επεξεργασία των παραμέτρων που προκύπτουν, μπορούν να συσχετιστούν με τη βιομάζα, όπως και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης. Οι Pascale et al. (2007), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διάσπασης/αποσύνθεσης (decomposition) κατά Cloude εξήγαγε την παράμετρο της ανισοτροπίας όπου χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας. Σημειώνεται ότι σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων αναφοράς που συνήθως προκύπτουν από επίγειες ή Lidar παρατηρήσεις. Μέθοδοι όπως η πολυπαραμετρική γραμμική

παλινδρόμηση, η μέθοδος SVM (Support Vector Machine) και η μέθοδος RF (Random Forest) μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση της βιομάζας (Neumann et al., 2012). Σύμφωνα με τη μελέτη των Neumann et al. (2012), οι δυο μη παραμετρικές μέθοδοι SVM και RF δεν είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα κυρίως λόγω της θορυβώδους φύσης των παρατηρήσεων SAR και του μικρού αριθμού των δεδομένων εκπαίδευσης και αξιολόγησης.

Τέλος δεν πρέπει να παραλείψουμε το ρόλο της κηλίδωσης στην εξαγωγή του δασικού ύψους. Σύμφωνα με τη μελέτη των López-Martínez et al. (2011), προτείνεται η χρήση του μοντέλου multiplicative-additive speckle noise για το φιλτράρισμα των δεδομένων SAR που θα χρησιμοποιηθούν για να εφαρμοστεί η τεχνική PolInSAR. Συμπεραίνεται ότι η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου μειώνει σε μεγάλο βαθμό την κηλίδωση χωρίς την απώλεια χρήσιμης πληροφορίας και βοηθάει στην υλοποίηση της διαδικασίας εκτίμησης του δασικού ύψους.

3.8 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της Τομογραφίας απεικονίσεων SAR

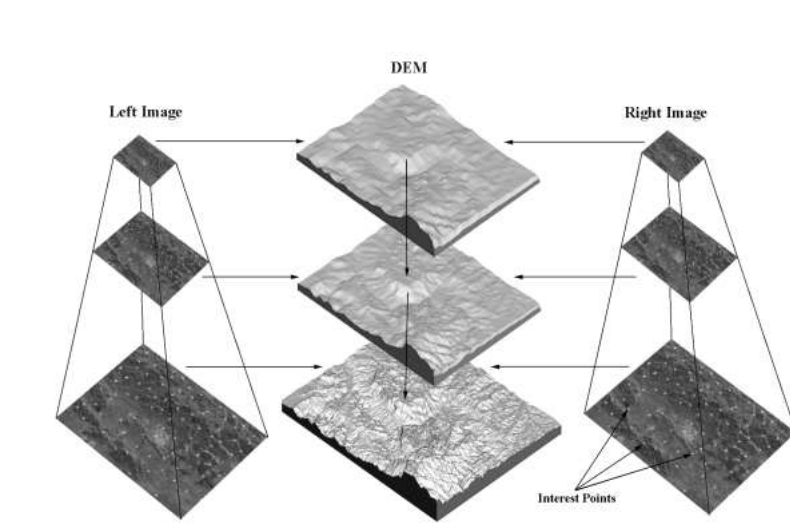
Η τεχνική της Τομογραφίας των απεικονίσεων SAR είναι μια σύγχρονη τεχνική τρισδιάστατης απεικόνισης που επεκτείνει την αρχή του συνθετικού ανοίγματος στη διάσταση του ύψους χρησιμοποιώντας εικόνες από παράλληλες τροχιές (Guillaso and Reigber, 2005). Για την υλοποίηση της τεχνικής της τομογραφίας απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός από βάσεις. Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί η τεχνική PCT (Polarization Coherence Tomography) από τους Cloude & Papathanasiou (2008) όπου περιορίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων βάσεων. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην τεχνική της τομογραφίας των απεικονίσεων SAR βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο και τα αποτελέσματά τους είναι πολλά υποσχόμενα (Renaudin et al., 2012). Για περισσότερες πληροφορίες, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην παρακάτω



Σχήμα 3. 3 Γεωμετρία τομογραφίας απεικονίσεων SAR Πηγή: www.esa.int

βιβλιογραφία: Frey et al., 2011, Renaudin et al., 2012, Tebaldini & Rocca 2012, Huang et al., 2011, Lombardini et al., 2012, Minh et al., 2014.

3.9 Εκτίμηση της βιομάζας με την τεχνική της ρανταργραμμετρίας



Σχήμα 3. 4 Γεωμετρία της Ρανταργραμμετρίας Πηγή: Vastaranta et al., 2012

Η τεχνική της ρανταργραμμετρίας (Radargrammetry) στηρίζεται στην στερεοπαρατήρηση των απεικονίσεων SAR. Η στερεοπαρατήρηση των απεικονίσεων SAR είναι μια τεχνική που ανακαλύφθηκε την δεκαετία του 1960. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των συστημάτων SAR ήταν ο βασικός λόγος εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής (Raggam et al., 2010). Η βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων SAR μέχρι και 1 μέτρο ήταν ο βασικός παράγοντας για την εξαγωγή ακριβέστερων ψηφιακών μοντέλων εδάφους. (TerraSAR-X,

COSMO-SkyMed, Radarsat-2, and TanDEM-X). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της μεθόδου είναι εικόνες της ίδιας περιοχής από διαφορετικές γωνίες παρατήρησης για την εξαγωγή της τρισδιάστατης πληροφορίας. Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η χρήση απεικονίσεων SAR μπάντας X για την εξαγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης. Η τρισδιάστατη πληροφορία που προκύπτει μπορεί να συσχετιστεί με δασικές παραμέτρους (δασικό ύψος) αν χρησιμοποιηθεί ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους με την ίδια στρατηγική που αναφέρθηκε στις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν τη τεχνική της συμβολομετρίας (παράγραφος 3.6). Οι πιο πρόσφατες και ολοκληρωμένες μελέτες έγιναν από τους Vastaranta et al. (2012) και Persson & Fransson (2014).

3.10 Περιοριστικοί παράγοντες των προσεγγίσεων εκτίμησης βιομάζας που χρησιμοποιούν δεδομένα SAR

3.10.1 Κορεσμός

Ένας από τους μεγαλύτερους περιοριστικούς παράγοντες είναι ο κορεσμός. Το επίπεδο κορεσμού ορίζεται από το μηδενισμό της κλίσης της ενέργειας σε σχέση με την αύξηση της βιομάζας (Treuhaf and Siqueira 2004) και εξαρτάται από την ευαισθησία των τιμών της οπισθοσκέδασης σε σχέση με τη βιομάζα. Η οπισθοσκέδαση SAR εξαρτάται από το μήκος κύματος, την πόλωση και τα χαρακτηριστικά της δομής της βλάστησης, όπως επίσης και των εδαφικών συνθηκών (Lu 2006, Mitchard et al., 2009, Ghasemi et al., 2010). Κατά γενικό κανόνα, το σημείο κορεσμού είναι υψηλότερο για μεγαλύτερα μήκη κύματος

και για την πόλωση HV (Balzter, 2001). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι κατά μέσο όρο τα επίπεδα κορεσμού για τις διάφορες μπάντες είναι τα ακόλουθα:

Band	Saturation level(t/ha)
C	20-50
L	60-150
P	100-300

Πίνακας 3.2 Επίπεδα κορεσμού ανάλογα με την συχνότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας Πηγή Koch, 2010

Σημειώνεται, ότι υπάρχουν πολλές μελέτες όπου περιορίζεται ο παράγοντας του κορεσμού. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στη φάση των δεδομένων SAR αποτελούν μια πιθανή λύση του προβλήματος του κορεσμού. Για παράδειγμα, οι Solberg et al. (2010), χρησιμοποίησαν συμβολομετρικά δεδομένα (single pass) μπάντας X για τη μέτρηση βιομάζας αρκτικού δάσους και υπολόγισαν τη γραμμική σχέση μεταξύ της βιομάζας και του συμβολομετρικού ύψους χωρίς το φαινόμενο του κορεσμού.

3.10.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Η σημαντικότερη μεταβλητή που επηρεάζει τα δεδομένα SAR είναι η υγρασία ενός στόχου. Η μεταβλητότητα της υγρασίας στην κομοστέγη και στο έδαφος είναι ένα δύσκολο μετρήσιμο μέγεθος. Από την ίδια συστάδα των δέντρων μπορεί να προέρχονται σημαντικά διαφορετικές τιμές οπισθοσκέδασης ανάλογα τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επηρεάζουν την υγρασία του εδάφους ή της κομοστέγης. Η επαναληπτική συμβολομετρία είναι μια τεχνική που περιορίζεται από τη χρονική αποσυσχέτιση λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία, την αλλαγή προσανατολισμού του σκεδαστή, τις αλλαγές στην υγρασία όπως επίσης και το μήκος κύματος του συστήματος SAR (Balzter et al., 2007a, Lee et al., 2009, Zhou et al., 2009). Η χρονική αποσυσχέτιση είναι μια δυναμική μεταβλητή που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το ύψος των δέντρων και τον άνεμο. Σε μακροχρόνια βάση οι μικρομετακινήσεις/παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους και οι αλλαγές της υγρασίας αποτελούν επιπρόσθετους παράγοντες που αυξάνουν την αποσυσχέτιση (Koch, 2010). Οι Lee et al. (2009) ανέφεραν ότι ακόμα και όταν η χρονική αποσυσχέτιση είναι περίπου μία μέρα το εκτιμώμενο ύψος των δέντρων είναι σημαντικά υπερεκτιμημένο. Για τον περιορισμό των σφαλμάτων λόγω της αλλαγής των περιβαλλοντικών συνθηκών σύγχρονες μελέτες χρησιμοποιούν συμβολομετρικά δεδομένα μίας διέλευσης. Οι Solberg et al. (2010) χρησιμοποιώντας συμβολομετρικά δεδομένα μίας διέλευσης μπάντας X κατάφεραν να εξάγουν μια γραμμική σχέση μεταξύ βιομάζας και συμβολομετρικού ύψους χωρίς το φαινόμενο του κορεσμού. Τέλος, σημειώνεται ότι ακριβείς μετρήσεις υψομέτρου μπορούν να εξαχθούν με τη χρήση πολλών γραμμών βάσεων ή/και χρησιμοποιώντας ακριβές DEM (TanDEM-X) για τον περιορισμό της υφιστάμενης χρονικής αποσυσχέτισης (Askne et al., 2013).

Ένας αλγόριθμος εκτίμησης βιομάζας θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν του τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη μεταβολή της υγρασίας (Saatchi et al., 2000). Η ακρίβεια και η ορθότητα των τελικών σχέσεων που συνδέουν τη βιομάζα με μεταβλητές που έχουν εξαχθεί από δεδομένα SAR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διάφορες περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η χρονική καθυστέρηση του σήματος λόγω της ατμόσφαιρας, ο άνεμος, η

υγρασία, η θερμοκρασία, η πίεση, αποτελούν μεταβλητές που δεν πρέπει να αγνοούνται σε μια μέθοδο εκτίμησης της βιομάζας από δεδομένα SAR.

3.10.3 Τοπογραφία

Σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις, οι επιστροφές των εκπεμπόμενων σημάτων περιέχουν σφάλματα, με αποτέλεσμα ο συντελεστής οπισθοσκέδασης που προκύπτει να είναι δυσκολότερο να συσχετιστεί με την πληροφορία της βιομάζας (Sun et al., 2002, Soja et al., 2010). Οι Sun et al. (2002) συμπέραναν ότι η χρήση πλήρως πολωμένων δεδομένων SAR L μπάντας είναι κατάλληλα για την εκτίμηση της βιομάζας σε ορεινές περιοχές. Οι Soja et al. (2010), εξέτασαν διάφορα μοντέλα τοπογραφικής διόρθωσης και βελτίωσαν τη διαδικασία εκτίμησης της βιομάζας (RMSE=50 t/ha και 66 t/ha για πολώσεις HV και HH, αντίστοιχα). Τέλος, οι Williams et al. (2009), έδειξαν ότι εάν η κλίση της επιφάνειας του εδάφους είναι έντονη, τότε οι επιστροφές των σκεδαστών στο έδαφος είναι ισχυρότερες, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη υποτίμηση του δασικού ύψους.

3.10.4 Δασικός τύπος

Οι παραπάνω προσεγγίσεις που έχουν περιγραφεί έχουν υλοποιηθεί κυρίως σε τροπικά δάση, σε αρκτικά δάση, σε πευκοδάση, σε αειθαλή δάση, σε φυλλοβόλα δάση, σε παραθαλάσσια δάση, σε δάση από ευκάλυπτους και σε δάση από φοίνικες. Τα χειρότερα αποτελέσματα εντοπίζονται στις τροπικές δασικές περιοχές κυρίως λόγω της πολύπλοκης και σύνθετης δομής τους και της υψηλής υγρασίας τους. Σύμφωνα με τον Imhoff (1995), το επίπεδο κορεσμού ενός τροπικού δάσους είναι χαμηλότερο συγκριτικά με κωνοφόρες δασικές περιοχές και πλατύφυλλων δασών. Επιπρόσθετα, οι δασικοί τύποι που έχουν μικρή δασική πυκνότητα παρουσιάζουν ασυνέχειες/κενά (gaps) που είναι δύσκολο να περιγραφούν από τα μοντέλα διεύθυνσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται από διάφορες προσεγγίσεις για την εκτίμηση της βιομάζας (Askne et al., 2013).

3.10.5 Κλίμακα μελέτης

Η κλίμακα μελέτης μπορεί να είναι σε επίπεδο συστάδας (stand level), σε επίπεδο δασικού τμήματος (plot level) και σε επίπεδο δέντρου (tree level) και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Μεγάλη σημασία έχει δοθεί στο μέγεθος της δειγματοληπτικής περιοχής (sample size) που χρησιμοποιείται στις διάφορες μελέτες. Για τη μείωση της χωρικής μεταβλητότητας της βιομάζας προτείνεται η χρήση δασικών τμημάτων τουλάχιστον 0.25 εκτάρια (Saatchi et al., 2011). Σύμφωνα με τους μελετητές Saatchi et al. (2011) και Robinson et al. (2013) το καταλληλότερο μέγεθος του δασικού τμήματος είναι περίπου ένα εκτάριο.

3.10.6 Μεταφερσιμότητα μοντέλων

Σε πολλές εφαρμογές αναπτύσσεται ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της βιομάζας. Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου θα πρέπει να γίνεται με προσοχή αφού έχει αναπτυχθεί για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (τοπογραφία, κλίμα), για συγκεκριμένους δασικούς τύπους, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο και για συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες (Amini et al., 2011). Για την εφαρμογή ενός μοντέλου θα πρέπει να δίνεται σημασία και στα τηλεπισκοπικά ή επίγεια δεδομένα από τα οποία προέκυψε το συγκεκριμένο μοντέλο. Τέλος, για την επιτυχή εφαρμογή ενός μοντέλου απαιτείται μια μεγάλη διαδικασία διορθώσεων (Amini et al., 2011).

3.10.7 Γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας

Η μεταβλητότητα της γωνίας πρόσπτωσης στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων σε μια απεικόνιση SAR έχει ως αποτέλεσμα περιοχές με ίδια χαρακτηριστικά να έχουν διαφορετικούς συντελεστές

οπισθοσκέδασης. Σε πολλές περιπτώσεις, η διόρθωση λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης είναι απαραίτητη αλλά αρκετά δύσκολη διαδικασία. Οι Saatchi et al., χρησιμοποιώντας την τεχνική της μη-γραμμικής παλινδρόμησης σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο ομαλοποίησης με τη χρήση κυβικού spline των μεταβολών της γωνίας πρόσπτωσης, μετέτρεψε τις τιμές της οπισθοσκέδασης μια απεικόνισης SAR έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν την ίδια γωνία πρόσπτωσης.

3.10.8 Διαφορές των δεδομένων

Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται δεδομένα από διαφορετικού χρόνου λήψης με αποτέλεσμα τις επιπλέον ασάφειες στα τελικά αποτελέσματα. Είναι απαραίτητη η διόρθωση των δεδομένων ώστε να περιοριστεί η χρονική αποσυσχέτιση. Επιπρόσθετα η διαφορετική χωρική ανάλυση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται συνήθως έχει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο τελικό προϊόν. Είναι απαραίτητη η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων έτσι ώστε να αποφευχθούν σφάλματα που οφείλονται στη διαφορετική γεωμετρία καθώς και η γεωαναφορά κάθε απεικόνισης.

3.11 Σύνοψη

Συμπερασματικά, για την εκτίμηση της βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα SAR με διάφορα μήκη κύματος και πολώσεις. Η συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μοντελοποίηση με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης δεδομένων πεδίου και τιμών οπισθοσκέδασης δεδομένων SAR μιας ή πολλών συχνοτήτων και πολώσεων. Ο βασικός περιορισμός της παραπάνω μεθόδου είναι ότι σε πυκνές δασικές περιοχές εντοπίζονται φαινόμενα κορεσμού. Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις που βασίζονται στην επεξεργασία της φάσης των δεδομένων SAR (InSAR, PolInSAR, Tomography). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα παρατηρείται ότι ο συνδυασμός δεδομένων υφής με δεδομένα SAR έχει οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με την εκτίμηση της βιομάζας. Τέλος, οι τεχνικές που χρησιμοποιούν διαφορετικά τηλεπισκοπικά δεδομένα έχουν περιθώρια βελτίωσης για την ακριβέστερη εκτίμηση της βιομάζας.

Κεφάλαιο 4 Εφαρμογή

4.1 Ορισμός του προβλήματος

Το 70% της γήινης χερσαίας γης καλύπτεται από βλάστηση (NOAA, 2011). Η βλάστηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραμέτρους στις διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες της βιόσφαιρας για τη συνέχιση της ζωής στο πλανήτη μας (Kleidon, 2012). Η κατανομή και η δομή της βλάστησης μεταβάλλεται γρήγορα λόγω ανθρωπογενών (πυρκαγιές, επέκταση αστικού ιστού, δασοκομία, γεωργία, κατασκευή έργων υποδομής για ενεργειακούς σκοπούς, υπαίθρια ορυχεία κ.λπ.) και φυσικών (εκρήξεις ηφαιστειών, πλημμύρες) παραγόντων. Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στο ιστό βλάστησης απαιτείται η δημιουργία των σχετικών χαρτών. Οι χάρτες που απεικονίζουν την κάλυψη της βλάστησης και του δασικού ύψους είναι απαραίτητοι για πολλές εφαρμογές που σχετίζονται με το πεδίο όπως η μοντελοποίηση πλημμύρας, η τοπογραφική και γεωλογική απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος, η βιομάζα, οι δασικές πυρκαγιές και πολλά άλλα. Σχετικά με τη διαχείριση των πόρων ξυλείας, το δασικό ύψος είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες δασικούς παραμέτρους (στηθιαία διάμετρος, πλάτος δασικής στεφάνης κ.α.) σε αλλομετρικές εξισώσεις για την εκτίμηση του όγκου ξυλείας (West, 2009). Το δασικό ύψος αποτελεί μια μεταβλητή που είναι απαραίτητη και για τον ακριβή προσδιορισμό των επιπέδων της βιομάζας AGB (Above Ground Biomass) (Balzter et al., 2007a). Τα επίπεδα της βιομάζας εκτός των άλλων χρησιμοποιούνται και για την εκτίμηση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας.

4.2 Τεχνικές παρατήρησης δασικών βιοφυσικών παραμέτρων

Η μέτρηση των δασικών βιοφυσικών παραμέτρων όπως το ύψος κομοστέγης χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές πεδίου έχει μεγάλο κόστος σε χρόνο και χρήμα και τις περιπτώσεις είναι αδύνατο να εφαρμοστεί σε γεωγραφικά εκτεταμένες περιοχές λόγω της μικρής χωρικής συχνότητας (undersampling) των επίγειων δεδομένων με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων (Fisher et al., 2008). Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα λόγω της μεγάλης χωρικής κάλυψης, της χρονικής συχνότητας αλλά και του μικρού οικονομικού κόστους είναι μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα υπολογισμού των δασικών μεταβλητών (Næsset et al., 2002, Drake et al., 2002). Ο συνδυασμός τηλεπισκοπικών δεδομένων και δεδομένων πεδίου προσφέρει δυνατότητες για την βελτίωση της ακρίβειας του υπολογισμού των δασικών παραμέτρων.

Οι σημαντικότερες τηλεπισκοπικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των δασικών παραμέτρων περιγράφονται από τις βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τηλεπισκοπικές τεχνικές	Κυριότερες μελέτες
Επεξεργασία Αεροφωτογραφιών	Mikhail et al., 2001, Jensen, 2005, Lillesand et al., 2008
Lidar	Means et al. 2000, Lefsky et al., 2002, Andersen et al., 2005
InSAR	Madsen et al., 1993, Hensley et al., 2000, Hensley et al., 2001, Rabus et al., 2003
PolInSAR	Cloude and Papathanassiou 1997, 1998, 2003 Mercer et al., 2007

Πίνακας 4. 1 Τηλεπισκοπικές τεχνικές για τη μελέτη δασικών εκτάσεων

Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας υψομετρικών ψηφιακών μοντέλων, χαρτών κάλυψης βλάστησης, και την παροχή μετρήσεων σχετικά με δασικές μεταβλητές όπως το ύψος της βλάστησης (Balzter et al., 2001, Williams et al., 2010).

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότερες προσεγγίσεις σχετικά με την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης

1. Παραδοσιακές επίγειες μέθοδοι
Άμεσος υπολογισμός δασικού ύψους κομοστέγης με τη χρήση υψομετρικών στηλεών (Schreuder et al., 1993)
Έμμεσος υπολογισμός δασικού ύψους χρησιμοποιώντας την τριγωνική γεωμετρία μεταξύ των παρατηρήσεων στη βάση και στην κορυφή ενός δέντρου (Wing et al., 2004).
2. Στερεοφωτογραμμετρικές μέθοδοι σε οπτικές εικόνες (Fensham et al., 2002; Paine and Kiser, 2003).
3. Χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων σε οπτικές απεικονίσεις με σύγχρονη αξιοποίηση της ανακλαστικότητας για την εκτίμηση του δασικού ύψους κομοστέγης (Miller et al., 2000, Franklin et al., 2003, Riccehetti, 2005).
4. Παρατηρήσεις Lidar που έχουν τα ακριβέστερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες τηλεπισκοπικές μεθόδους (Means et al., 2000, Lefsky et al., 2002, Andersen et al., 2005).
5. Χρήση δεδομένων SAR (όπως αναφέρονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3).

Η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία ως μια τεχνική υπολογισμού και εκτίμησης των δασικών παραμέτρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε, οι περισσότερες έρευνες διεξάγονται σε μικρές χωρικές κλίμακες λόγω της έλλειψης μεθόδων και μοντέλων για την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας σε ευρύτερες περιοχές. Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί δορυφορικές απεικονίσεις SAR δυο διαφορετικών συχνοτήτων (μπάντα L και ,X) για την εκτίμηση του δασικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη παραγωγή ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας και τον υπολογισμό του δασικού ύψους από την αφαίρεσή τους.

4.3 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη συμβολομετρική επεξεργασία είναι το SARscape v.-5.0. Το SARscape είναι ένα επιπρόσθετο λογισμικό (add-on module) που λειτουργεί κάτω από την ομπρέλα του λογισμικού ENVI. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων αλλά και για την αξιολόγησή τους. Τέλος για την παραγωγή και την επεξεργασία των χαρτών χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό QGIS (Quantum GIS).

4.4 Περιοχή μελέτης



Εικόνα 4.1 Πάνω: Περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας ως εικόνα αναφοράς μια απεικόνιση Landsat 8 στο σύστημα αναφοράς WGS 84 Δεξιά: Μεγέθυνση της περιοχής μελέτης

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω χάρτη η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην περιοχή του Ταξιάρχη στην Χαλκιδική. Τα όρια των γεωγραφικών συντεταγμένων της περιοχής ενδιαφέροντος στην προβολή UTM 34N WGS 84 είναι $(xMin, yMin) = (711393.90, 4474420.82)$ και $(xMax, yMax) = (717182.73, 4483957.40)$. Η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης είναι ένα κομμάτι του πανεπιστημιακού δάσους Ταξιάρχη στη Χαλκιδική.

Το πανεπιστημιακό δάσος Ταξιάρχη Χαλκιδικής βρίσκεται στις Νότιες και Νοτιοδυτικές πλαγιές του όρους Χολομών σε μια απόσταση 70 χιλιομέτρων από τη Θεσσαλονίκη. Η συνολική έκταση του δάσους είναι 5835 ha από τα οποία 3895 ha είναι δασοσκεπής έκταση (από τα οποία 107 ha είναι Κοινοτικό δάσος), 264 ha είναι μερικώς δασοσκεπής έκταση, 1592 είναι καλλιεργούμενη έκταση και 85 ha είναι άγνη έκταση. Το κλίμα είναι Μεσογειακό-Ηπειρωτικό. Η μέση θερμοκρασία αέρος είναι $10.7^{\circ} C$, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι ψυχρότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία αέρος $1.7^{\circ} C$ και οι Ιούλιος και Αύγουστος οι θερμότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία $20.2^{\circ} C$. Η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα που έχει καταγραφεί είναι $35.5^{\circ} C$ και η χαμηλότερη $-15^{\circ} C$. Η μέση ετήσια υγρασία είναι 73.1%. Στο δάσος παρατηρείται μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 748mm. Από φυτοκοινωνικής άποψης το δάσος ανήκει στη ζώνη *Quercetalia* (δρύες). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμφανίζεται η ένωση *Quercetum confertae*, ενώ λείψανα της ένωσης *Querceo fagetum* εμφανίζονται τοπικά καθώς επίσης η ένωση *Quercetum ilicis* στα ρεύματα.

Σημειώνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που σχετίζονται με τη μεταβλητή του δασικού ύψους.

- Το δασικό ύψος εξαρτάται από το δασικό τύπο μια περιοχής. Συγκεκριμένα, η δασική περιοχή του Ταξιάρχη αποτελείται κυρίως από δρύες και οξιές που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 25,27 μέτρα αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περιοχή συναντάται επίσης μαύρη πεύκη, τραχεία πεύκη και έλατα που είναι φυτεμένα από το δασαρχείο ή από ιδιώτες και έχουν μέγιστο ύψος περίπου 6 μέτρα.

- Επιπρόσθετα, το δασικό ύψος εξαρτάται από την ηλικία των δέντρων. Αρχικά σημειώνεται ότι ο τρόπος διαχείρισης του δάσους είναι πρεμνοφυής. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο υλοτομείται ένα κομμάτι του δάσους, στη συγκεκριμένη περίπτωση 40 εκτάρια το χρόνο, με στόχο της ανανέωσή του. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο της διαχείρισης θεωρείται ότι κάθε 25 χρόνια το δάσος ανανεώνεται πλήρως. Παρόλ' αυτά στο συγκεκριμένο δάσος συναντιούνται δέντρα ηλικίας 10 έως 70 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές ομάδες ηλικιών στη συγκεκριμένη δασική περιοχή ενδιαφέροντος και μια μέση προσέγγιση αύξησης του δασικού ύψους στα 10 χρόνια είναι περίπου 6 μέτρα. Το δασικό ύψος εξετάζεται συνήθως όταν ένα δέντρο έχει ηλικία 40 ετών (ύψος αναφοράς) γιατί τότε θεωρείται ότι οι μεταβολές στο ύψος του είναι πολύ μικρές.
- Ένας άλλος παράγοντας που σχετίζεται με το δασικό ύψος είναι η ποιότητα του τόπου. Για την περιοχή μελέτης η χειρότερη ποιότητα του τόπου είναι η Πέμπτη όπου συναντάται συνήθως σε βραχώδεις περιοχές με το μέγιστο δασικό ύψος να φτάνει περίπου τα 8 μέτρα. Οι καλύτερες ποιότητες του τόπου στην περιοχή είναι η Πρώτη σε ελάχιστα σημεία και η Δεύτερη (περίπου 20% της συνολικής περιοχής) με το μέγιστο δασικό ύψος να είναι 27 και 23 μέτρα αντίστοιχα.

4.5 Περιγραφή δεδομένων

Τα δεδομένα της συμβολομετρικής διαδικασίας προήλθαν από τα δορυφορικά συστήματα SAR : ALOS PALSAR και Cosmo-Skymed. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM-Digital Elevation Model) που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν επίγεια δεδομένα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των απεικονίσεων SAR, του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς και των επίγειων παρατηρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, την αξιολόγησή τους, την εκτίμηση του ύψους δασική κομοστέγης και του καθορισμού της ακρίβειας του.

4.5.1 Απεικονίσεις ALOS PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)



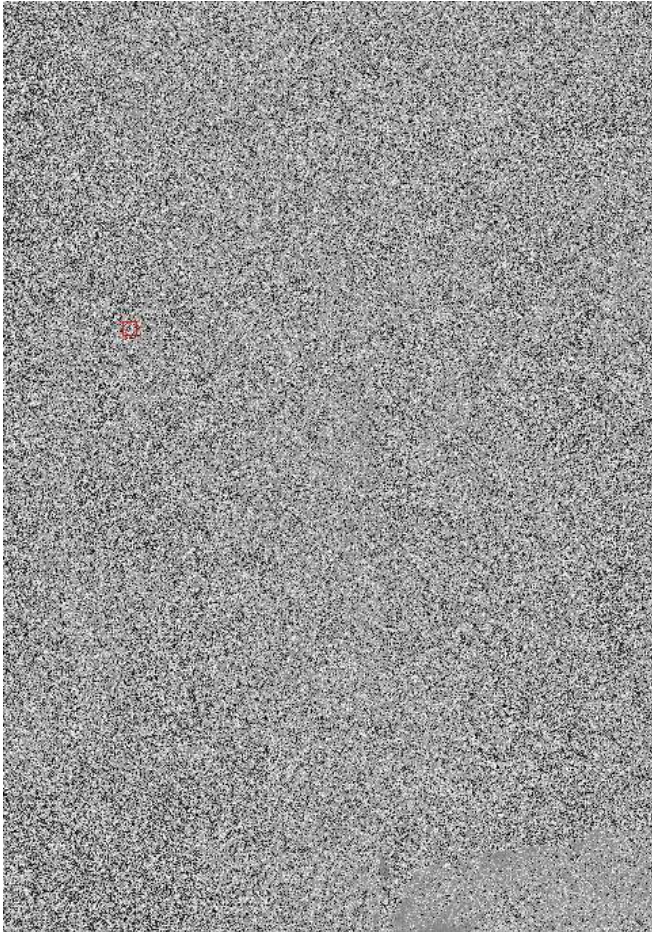
Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων απεικονίσεων συνοψίζονται παρακάτω:

- Η συχνότητα των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι 1270 MHz (L μπάντα) και η πόλωση τους είναι μονή HH.
- Το μέγεθος εικονοστοιχείου των απεικονίσεων είναι 7.5 και 3.2 μέτρα στις διευθύνσεις των πλαγίων αποστάσεων και του αζιμουθίου αντίστοιχα.
- Η μέση τιμή γωνίας πρόσπτωσης των δυο απεικονίσεων είναι περίπου 38.7 μοίρες
- Η χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης περίπου 612 μέτρα που αποτελεί περίπου το 5% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμής βάσης που είναι 12404.708 μέτρα.
- Η χρονική γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι 46 ημέρες, με την ημερομηνία λήψης της κύριας απεικόνισης (master) να είναι 22/01/2010 20:51:56 και την ημερομηνία λήψης της δευτερεύουσας απεικόνισης να είναι 9/3/2010 20:51:41
- Από τη χρήση ατμοσφαιρικών επίγειων στοιχείων του σταθμού του ΠΟΛΥΓΥΡΟΥ εκτιμάται ότι η διαφορά σχετικής υγρασίας είναι περίπου 5 %. Επιπρόσθετα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο λήψεων η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι περίπου 45 μοίρες και η διαφορά της ταχύτητας του είναι περίπου 11 κόμβοι.
- Το ύψος ασάφειας των συγκεκριμένων απεικονίσεων είναι περίπου 100 μέτρα

Εικόνα 4.2 Απεικόνιση slc από το σύστημα ALOS PALSAR

4.5.2 Απεικονίσεις COSMO-Skymed



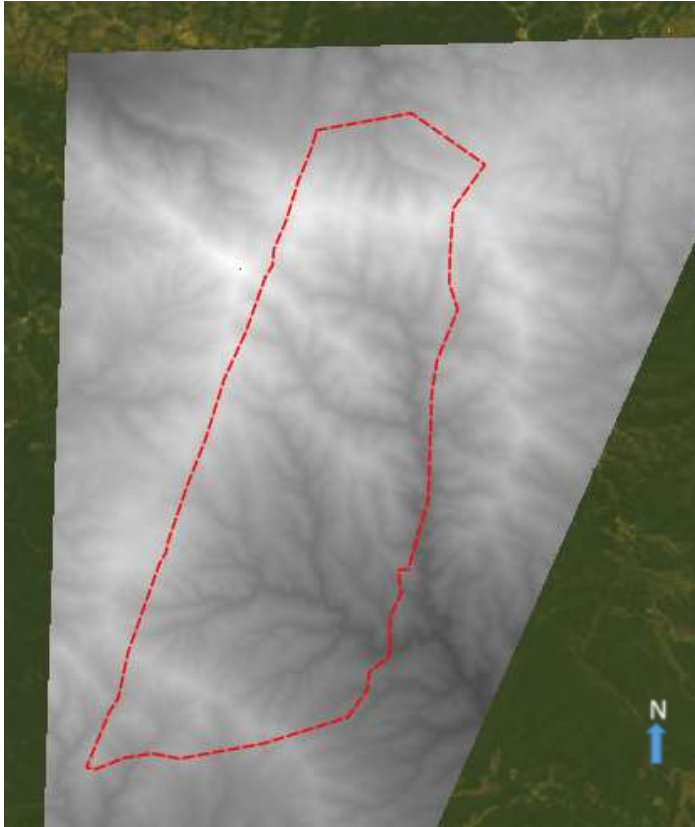
Εικόνα 4.3 Απεικόνιση slc από το σύστημα COSMO-Skymed

- Η συχνότητα των απεικονίσεων COSMO-Skymed είναι 9600 MHz (X μπάντα) και η πόλωσή τους είναι μονή HH.
- Το μέγεθος εικονοστοιχείου των απεικονίσεων είναι 2.4 και 1.8 μέτρα στις διευθύνσεις των πλαγίων αποστάσεων και του αζιμουθίου αντίστοιχα.
- Η μέση τιμή της γωνίας πρόσπτωσης των δυο απεικονίσεων είναι περίπου 24 μοίρες.
- Η χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης περίπου 568 μέτρα που αποτελεί περίπου το 15% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που είναι 3349,230 μέτρα.
- Η χρονική γραμμή βάσης του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι 1 ημέρα με την ημερομηνία λήψης της κύριας απεικόνισης (master) να είναι 30/05/2013 16:32:29 και την ημερομηνία λήψης της δευτερεύουσας απεικόνισης να είναι 31/5/2013 16:32:30.
- Από την χρήση ατμοσφαιρικών επίγειων στοιχείων του σταθμού του ΠΟΛΥΓΥΡΟΥ εκτιμάται ότι η διαφορά σχετικής υγρασίας είναι περίπου 4 %. Επιπρόσθετα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο λήψεων η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι περίπου 60 μοίρες και η διαφορά της ταχύτητας του είναι

περίπου 3 κόμβοι.

- Το ύψος ασάφειας των συγκεκριμένων απεικονίσεων είναι περίπου 7,4 μέτρα.
- Ένα άλλο χαρακτηριστικό σημαντικό για την επεξεργασία των απεικονίσεων είναι ότι περιέχουν δυο κανάλια όπου το πρώτο περιέχει το πραγματικό μέρος της επιστροφής και το δεύτερο το φανταστικό μέρος της επιστροφής του σήματος.

4.5.3 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 4.4 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς από τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση της συμβολομετρικής διαδικασίας φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Το συγκεκριμένο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο δημιουργήθηκε από τοπογραφικούς χάρτες και παραχωρήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Η χωρική ανάλυση είναι στα 5 μέτρα και η εκτιμώμενη υψομετρική ακρίβεια είναι περίπου 5 μέτρα. Τέλος σημειώνεται ότι για την εισαγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου στη συμβολομετρική διαδικασία έγινε η μετατροπή των τιμών των ορθομετρικών (από τη μ.σ.θ) υψομέτρων σε γεωμετρικά υψόμετρα (από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς WGS 84). Για τη συγκεκριμένη μετατροπή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο EGM 2008 όπου περιγράφει με ακρίβεια τις αποχές του γεωειδούς. Συγκεκριμένα, το μοντέλο EGM 2008 έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 2.5X2.5 μίρες ή 4035,72 X 4035,72 m. Σύμφωνα με τους Sjöberg et al. (2011) η ακρίβεια των τιμών της αποχής του γεωειδούς σε παγκόσμιο επίπεδο είναι περίπου 11 εκατοστά.

4.5.4 Επίγεια δεδομένα



Εικόνα 4.5 Επίγειες παρατηρήσεις στη περιοχή μελέτης

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν επίγειες παρατηρήσεις για την αξιολόγηση της εκτίμησης του δασικού ύψους κομοστέγης. Οι επίγειες μετρήσεις έγιναν σε 172 σημεία το διάστημα 2010-2011. Τα επίγεια δεδομένα αφορούν μια δασική περιοχή εμβαδού 0.03 ha και η υψομετρική ακρίβειά τους είναι 1-1,5 μέτρα. Οι μετρήσεις του δασικού ύψους έγιναν με αλτίμετρο HAGA.

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια του διαστήματος 2010-2013 που είναι χρονική διαφορά αποκτήσεων των δεδομένων SAR στη δασική περιοχή δεν παρατηρήθηκαν καταστροφικά φαινόμενα όπως φωτιές ή καταστροφές από ανέμους ή από υλοτόμηση δέντρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρονική διαφορά των λήψεων των δεδομένων SAR και των επίγειων μετρήσεων δεν θεωρείται μεγάλη. Παρόλο αυτά ένα μέρος του σφάλματος της εκτίμησης του δασικού ύψους που προκύπτει μπορεί να οφείλεται στη συγκεκριμένη διαφορά. Σύμφωνα με τις τάσεις που επικρατούν στην περιοχή αναμένεται μια αύξηση του δασικού ύψους από μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί (Matis et al., 1996). Τέλος

υπογραμμίζεται ότι το ιδανικό είναι η ύπαρξη επίγειων δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή με τα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

4.6 Ανάπτυξη της μεθοδολογίας

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας αποτελεί ένα τρόπο εξαγωγής της υψομετρικής πληροφορίας από δεδομένα SAR. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας έγινε βιβλιογραφική μελέτη όπου συνοψίζονται οι βασικότερες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν την τεχνική της συμβολομετρίας για την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης.

4.6.1 Σήμα SAR και δασική κομοστέγη

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η επίδραση της δασικής κομοστέγης στην επιστρεφόμενη μικροκυματική ακτινοβολία που καταγράφει ένα σύστημα SAR.

Αρχικά είναι απαραίτητο να καθοριστεί η έννοια της διαπεραστικότητας του σήματος SAR μέσα στη δασική κομοστέγη. Για την εξαγωγή του ύψους δασικής κομοστέγης χρησιμοποιούνται δεδομένα SAR μικρού μήκους κύματος (X μπάντα) με στόχο την περιγραφή της επιφάνειας του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης. Η επιλογή μικρού μήκους κύματος μικροκυματικής ακτινοβολίας γίνεται λόγω της μικρής διαπεραστικότητας της συγκεκριμένης ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι η διαπεραστικότητα του σήματος SAR σε μια δασική περιοχή εξαρτάται από το μήκος κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης, την κλίση του εδάφους της περιοχής μελέτης, τον δασικό τύπο, τις συνθήκες υγρασίας και τις κλιματικές συνθήκες (Izzawati et al., 2006, Andersen et al., 2006, Woodhouse et al., 2006, Sarabandi and Lin 2000, Kellndorfer et al., 2004). Ανάλογα τη διαπεραστικότητα του σήματος υπολογίζεται ένα ύψος κέντρου φάσης σκέδασης h_{spc} . Το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης h_{spc} ορίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος της θέσης και της ισχύος των επιστρεφόμενων σημάτων SAR μέσα σε ένα διάστημα στη διεύθυνση των πλαγιών αποστάσεων (range bin) (Andersen et al., 2006, Kellndorfer et al., 2004). Το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης ομαλοποιείται και στην οριζόντια διεύθυνση με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο μέγεθος να περιγράφει ένα μέσο ύψος και όχι το μέγιστο ύψος (Woodhouse et al., 2003, Balzter et al., 2007a). Τέλος, σύμφωνα με τους Woodhouse et al. (2006) και Andersen et al. (2008) το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης που προέρχεται από τη μικροκυματική ακτινοβολία X μπάντας μπορεί βρίσκεται μεταξύ 50% με 80% της μέγιστης υψομετρικής επιφάνειας της δασικής κομοστέγης. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται η υποτίμηση των υψομετρικών τιμών με τη χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ύψος κέντρου σκέδασης είναι:

- Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης είναι η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης. Σε μια πυκνή δασική κομοστέγη η οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια της μικροκυματικής ακτινοβολίας X μπάντας είναι μικρή λόγω των πολλαπλών σκεδάσεων μέσα σε αυτή με αποτέλεσμα το εκτιμώμενο ύψος να αναφέρεται στον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης (Andersen et al., 2006, Izzawati et al., 2006, Balzter et al., 2007a). Σε μια αραιή δασική κομοστέγη ή σε αραιές δασικές περιοχές το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης είναι ακόμα χαμηλότερο λόγω της αλληλεπίδρασης της μικροκυματικής ακτινοβολίας από το έδαφος (Woodhouse et al., 2006, Balzter et al., 2007b).
- Σημειώνεται ότι οι υψομετρικές ασυνέχειες σε μια δασική περιοχή μπορούν να προκαλέσουν την αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος με σκεδαστές από το έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το προϊόν μετά την αφαίρεση της υψομετρικής πληροφορίας του εδάφους να περιέχει τιμές κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές τιμές. Επίσης για δασικούς τύπους όπου η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης είναι μικρή, χρησιμοποιώντας το ύψος του κέντρου φάσης σκέδασης, το εκτιμώμενο ύψος δασικής κομοστέγης είναι

υποτιμημένο σε βαθμό που δεν μπορεί να συσχετιστεί με το πραγματικό δασικό ύψος κομοστέγης (Izzawati et al., 2006, Balzter et al., 2007a, Sexton et al., 2009).

4.6.2 Υπάρχουσες μεθοδολογίες

Μέχρι σήμερα οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν την τεχνική της συμβατικής συμβολομετρίας για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης συνοψίζονται παρακάτω:

- ✚ Παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης από δεδομένα SAR μικρού μήκους κύματος (π.χ. Χ μπάντα) με την τεχνική της συμβολομετρίας. Αφαίρεση του παραγόμενου συμβολομετρικού ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους και προέρχεται άλλες πηγές εκτός της συμβολομετρίας. Οι εφαρμογές που βασίζονται στη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι οι παρακάτω: Kellndorfer et al., 2004, Wallington, 2004, Balzter et al., 2007a, Walker et al., 2007, Andersen et al., 2008. Τέλος, σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους.
- ✚ Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί μια τροποποίηση της προηγούμενης τεχνικής. Η μόνη αλλαγή είναι η χρήση δεδομένων SAR μεγάλου μήκους κύματος (L,P μπάντες) για την παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους. Οι κύριες μελέτες που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνική είναι (Andersen et al., 2004, Balzter et al., 2001, 2007b, Neeff et al., 2005). Αναλυτικότερα, ο Balzter et al. (2007b) χρησιμοποιώντας δεδομένα Χ και L μπάντας αερομεταφερόμενου συστήματος SAR εκτίμησε την ακρίβεια του ύψους της δασικής κομοστέγης με σφάλμα (RMSE) περίπου 3 μέτρα.
- ✚ Η τελευταία τεχνική σχετίζεται με τις υψομετρικές ασυνέχειες που υπάρχουν σε μια εκτεταμένη δασική περιοχή. Οι ασυνέχειες εντοπίζονται στα όρια των δασικών περιοχών που συνήθως υπάρχουν γειτονικές περιοχές με χέρσο έδαφος ή χαμηλή βλάστηση και στα κενά που υπάρχουν μέσα στις δασικές εκτάσεις. Οι μελέτες που έχουν αναπτυχθεί με βάση τη συγκεκριμένη παρατήρηση είναι οι εξής: Hagberg et al., 1995, Woodhouse et al., 2006, Williams et al., 2010. Τα συμπεράσματα των συγκεκριμένων μελετών ήταν πρώτον ότι σε δασικές περιοχές με αραιή δασική κομοστέγη τα αποτελέσματα είναι σαφώς υποτιμημένα λόγω της μεγαλύτερης διαπεραστικότητας της μικροκυματικής ακτινοβολίας συγκριτικά με την πυκνή δασική κομοστέγη και δεύτερον ότι σε σχετικές μελέτες θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι μεταβολές της συμπεριφοράς της μικροκυματικής ακτινοβολίας στις υφιστάμενες υψομετρικές ασυνέχειες.

Σύμφωνα με ανασκόπηση των μεθοδολογιών για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης ο ρόλος του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης είναι πολύ σημαντικός. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακρίβειες του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας από διάφορα αερομεταφερόμενα συστήματα SAR σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς που έχουν χρησιμοποιηθεί, τις κλίσεις της περιοχής μελέτης και το είδος της βλάστησης.

Μελέτη	Δεδομένα Αναφοράς	Κλίσεις	Είδος βλάστησης	Υψομετρική ακρίβεια (RMSE)(μέτρα)
Wang et al. (2001)	Παρατηρήσεις Lidar	<10°	Χέρσες περιοχές	0.68
		>10°	Χέρσες περιοχές	1.33
		>10°	Δασικές περιοχές	3.16
Downman & Fisher (2003)	Φωτογραμμετρικά σημεία και Μετρήσεις Lidar	<10°	Χέρσες περιοχές	0.83
Downman et al. (2003)	Φωτογραμμετρικά σημεία	<10°	Χέρσες περιοχές	0.17
Mercer (2004)	Φωτογραμμετρικά σημεία και μετρήσεις Lidar και μετρήσεις GPS	<10°	Χέρσες περιοχές	0.5-1.1
Mercer (2007)	Σημεία γνωστών συντεταγμένων από επίγειες μετρήσεις	<10°	Χέρσες περιοχές	1.00
Hodgson et al. (2003)	Παρατηρήσεις Lidar και σημεία γνωστών συντεταγμένων από επίγειες μετρήσεις	<14°	Θαμνώδεις περιοχές	4.36
		<14°	Φυλλοβόλες δασικές περιοχές	7.95
		<14°	Πευκοδάσος	5.28
		<14°	Μικτές περιοχές	10.05
Wallington et al. (2004)	Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από επίγειες μετρήσεις OSDEM (Ordnance Survey DEM)	<20°	Χέρσες περιοχές	1.01
		<20°	Πούδεις περιοχές	1.58
		<10°	Δασικές περιοχές	11.84-14.26

Πίνακας 4. 2 Μελέτη ακρίβειας παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα μπάντας Χ από αερομεταφερόμενα συστήματα SAR

Με βάση τη βιβλιογραφική αναφορά και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παρατηρούνται τα ακόλουθα τα οποία συμβάλουν στον προσδιορισμό της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία:

- Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η αύξηση της κλίσης της περιοχής μελέτης είναι ένας παράγοντας μείωσης της υψομετρικής ακρίβειας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.
- Σε όλες τις μελέτες, η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου στις χέρσες περιοχές είναι πολύ καλύτερη συγκριτικά με τις περιοχές με βλάστηση.
- Από τη παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορεί να εντοπιστεί ότι εάν τα δεδομένα αναφοράς προέρχονται από διαφορετικούς τύπους δεδομένων τότε επηρεάζουν την ακρίβεια του παραγόμενου υψομετρικού μοντέλου.
- Τέλος, η χρονική διαφορά των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες από τους Hodgson et al. (2003) και Wallington et al. (2004) δεν είχε σημαντική επίδραση στην ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εδάφους στις χέρσες περιοχές συγκριτικά με τις δασικές.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις υπογραμμίζεται ότι αφορούν τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από δεδομένα Χ μπάντας από αερομεταφερόμενα συστήματα. Παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και στα παραγόμενα αποτελέσματα από δεδομένα Χ μπάντας από δορυφορικά συστήματα.

Με στόχο την ανάπτυξη της βέλτιστης μεθοδολογίας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε και βιβλιογραφική έρευνα που παρουσιάζεται η ακρίβεια του παραγόμενου υψομετρικού μοντέλου από δεδομένα Χ μπάντας σχετικά με το δασικό τύπο το είδος της βλάστησης και τα δεδομένα αναφοράς.

Μελέτη	Δασικός τύπος	Δεδομένα SAR	Δεδομένα αναφοράς	Υψομετρική Ακρίβεια (RMSE) (μέτρα)
Wallington et al., 2004	Πευκοδάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	5.8-7.4
Izzawati et al., 2006	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	Δεν καταγράφηκε
Dutra et al., 2006	Τροπικά δάση	X-HH GeoSAR	Δεδομένα πεδίου	Δεν καταγράφηκε
Hyde et al., 2006	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	Δεδομένα πεδίου	8.7-11.9
Balzter et al., 2007a	Φυλλοβόλα δάση	X-VV ESAR	LiDAR CHM	2.9-4.1
Balzter et al., 2007b	Πευκοδάση	X-VV ESAR	LiDAR DSM	3.5
Andersen et al., 2008	Κωνοφόρα δάση	X-HH NEXTMap	LiDAR CHM	3
Sexton et al., 2009	Κωνοφόρα δάση	X-HH GeoSAR	Δεδομένα πεδίου	4.6
Kellndorfer et al., 2004	Πευκοδάση	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	1.0-1.8
Walker et al., 2004	Πευκοδάση	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	4.62-4.90
Sexton et al., 2009	Πευκοδάσος/Φυλλοβόλο δάσος	C-HH SRTM	Δεδομένα πεδίου	4.67/3.87
Zhang et al., 2008	Μικτό δάσος	L-PolInSAR	Δεδομένα πεδίου	8.5

Πίνακας 4. 3 Ακρίβεια παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από δεδομένα Χ μπάντας σε σχέση με το είδος του δάσους, τα δεδομένα SAR και τα δεδομένα αναφοράς

Σύμφωνα με την παραπάνω βιβλιογραφική μελέτη εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα.

- Όπως παρατηρείται η χρήση της πόλωσης HH σε δορυφορικά δεδομένα Χ μπάντας παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το γεγονός ότι τα διαθέσιμα δεδομένα έχουν πόλωση HH είναι

θετικό για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα SAR είναι Χ μπάντας (COSMO-SkyMed) έχουν μικρότερη διαπεραστικότητα σε σχέση με τα δεδομένα C μπάντας με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να περιγράφει καλύτερα την επιφάνεια του άνω ορόφου της δασικής κομοστέγης και να αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα.

- Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3 τα αποτελέσματα ανάλογα με το δασικό τύπο παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην εξαγωγή κάποιου συγκεκριμένου συμπεράσματος. Παρόλ' αυτά σύμφωνα με τους Izzawati et al., 2006 στις κωνοφόρες δασικές περιοχές όπου το σχήμα της δασικής κομοστέγης είναι κωνικό, η απόσβεση του σήματος SAR είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις πλατύφυλλες δασικές περιοχές με αποτέλεσμα το εκτιμώμενο δασικό ύψος να είναι περισσότερο υποτιμημένο. Τέλος, κατά γενικό κανόνα ισχύει ότι στα μικτά δάση τα αποτελέσματα είναι χειρότερα συγκριτικά με τις υπόλοιπες δασικές περιοχές. Επειδή η περιοχή ενδιαφέροντος είναι μια μικτή δασική περιοχή τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους κομοστέγης αναμένονται να έχουν μεγάλο σφάλμα.

4.6.3 Διαμόρφωση της μεθοδολογίας

Με βάση τα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική μελέτη που έγινε διαμορφώθηκε το παρακάτω διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής σημειώνεται ότι το DEM_TOPO αναφέρεται στο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους και έχει προμηθευτεί από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου

4.7 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφεται αρχικά η συμβολομετρική διαδικασία για την παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων και στη συνέχεια η πράξη της αφαίρεσής τους για την εξαγωγή του συμβολομετρικού ύψους.

4.7.1 Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Οι βασικότερες τεχνικές για τη δημιουργία ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι :

1. Ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών
2. Στερεοαπόδοση και χρήση σύγχρονων φωτογραμμετρικών μεθόδων
3. Χρήση GPS και δεδομένων Total Station
4. Κινηματικό GPS και αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (INS-inertial Navigation Systems)
5. Συστήματα Laser (Lidar)
6. Συμβολομετρία απεικονίσεων SAR (InSAR)

Η συμβολομετρία απεικονίσεων SAR (InSAR) είναι μια από τις καλύτερες μεθόδους για την παραγωγή ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με μεγάλη ακρίβεια και καλή χωρική ανάλυση (Zebker & Goldstein 1986). Η τρισδιάστατη πληροφορία της επιφάνειας της γης εξάγεται με τη μέθοδο της συμβολομετρίας χρησιμοποιώντας τη φάση του σήματος του ραντάρ και τα τροχιακά δεδομένα από δυο η περισσότερες εικόνες SAR συνήθως του ίδιου αισθητήρα.

Τα διαφορετικά είδη των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEMs) που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία είναι:

1. DSM (Digital Surface Models) είναι τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που περιλαμβάνουν την υψομετρική πληροφορία του εδάφους και της βλάστησης.
2. DTM (Digital Terrain Models) είναι τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που περιέχουν την υψομετρική πληροφορία του γυμνού εδάφους (χωρίς τον όρο της βλάστησης)
3. CHM (Canopy Height Models) είναι ψηφιακό μοντέλο που περιέχει την υψομετρική πληροφορία των θόλων των δέντρων.

Σημειώνεται ότι DEM (Digital Elevation Model) είναι ένα ψηφιακό μοντέλο που περιέχει υψομετρική πληροφορία και περιγράφεται από έναν πίνακα όπου κάθε στοιχείο του συσχετίζεται με την υψομετρική πληροφορία. Σημειώνεται ότι ο όρος ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM-Digital Elevation Model) είναι γενικότερος όρος από τον όρο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM-Digital Terrain Model) ή τον όρο ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM-Digital Surface Model).

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας για τη παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για τα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια. Για την υλοποίηση της συμβολομετρικής διαδικασίας οι απεικονίσεις SAR που χρησιμοποιήθηκαν για τη παραγωγή των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων είχαν την ίδια διεύθυνση πόλωσης. Σε απεικονίσεις με διαφορετική διεύθυνση πόλωσης μεταβάλλεται η αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας με τους σκεδαστές με αποτέλεσμα το επιστρεφόμενο σήμα που καταγράφεται να έχει διαφορετικό πλάτος λόγω

της διαφοράς της πόλωσης. Τέλος, για την αναλυτικότερη περιγραφή των συμβολομετρικών βημάτων επεξεργασίας ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις αντίστοιχες παραγράφους στο κεφάλαιο 2.

4.7.1.1 Υπολογισμός βάσης

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η βάση ενός συμβολομετρικού ζευγαριού διακρίνεται σε χωρική (γεωμετρική) γραμμή βάσης και σε χρονική γραμμή βάσης.

- Για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR η χρονική γραμμή βάσης είναι 46 ημέρες που είναι και η ελάχιστη χρονική διαφορά για το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR. Για τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed η χρονική γραμμή βάσης είναι μία ημέρα. Υπενθυμίζεται ότι η χρονική αποσυσχέτιση αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την εξαγωγή ενός ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Σημειώνεται ότι μια μεγάλη χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων συνεπάγεται τη μεταβολή των στόχων στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, αν και η χρονική βάση των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τη χρονική βάση των απεικονίσεων COSMO-SkyMed, οι σκεδαστές που αλληλεπιδρούν με τη μικροκυματική ακτινοβολία L μάλιστα μεταβάλλονται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τους σκεδαστές που αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία X μάλιστα όπως θα δούμε και στη συνέχεια.
- Όπως έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές, οι καταλληλότερες χωρικές βάσεις για εφαρμογές παραγωγής ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων κυμαίνονται στο 15-50% της κρίσιμης βάσης, ενώ για εφαρμογές διαφορικής συμβολομετρίας στο 6-8% της κρίσιμης βάσης. Επίσης, σύμφωνα με τους Werner et al. (2003) η γραμμή βάσης πρέπει να μικρότερη του 25 % της κρίσιμης βάσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεωμετρική γραμμή βάσης των απεικονίσεων ALOS PALSAR είναι περίπου 612 μέτρα που αποτελεί περίπου το 5% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που είναι περίπου 12404 μέτρα. Επίσης η γεωμετρική γραμμή βάσης των απεικονίσεων COSMO-SkyMed είναι περίπου 568 μέτρα που αποτελεί περίπου το 15% της κρίσιμης γεωμετρικής γραμμή βάσης που είναι περίπου 3349 μέτρα. Τέλος, σημειώνεται ότι ο υπολογισμός της χωρικής βάσης των συμβολομετρικών ζευγαριών από το λογισμικό SARscape έγινε χρησιμοποιώντας τα τροχιακά δεδομένα των συστημάτων SAR από τα αρχεία που συνόδευαν τις απεικονίσεις.

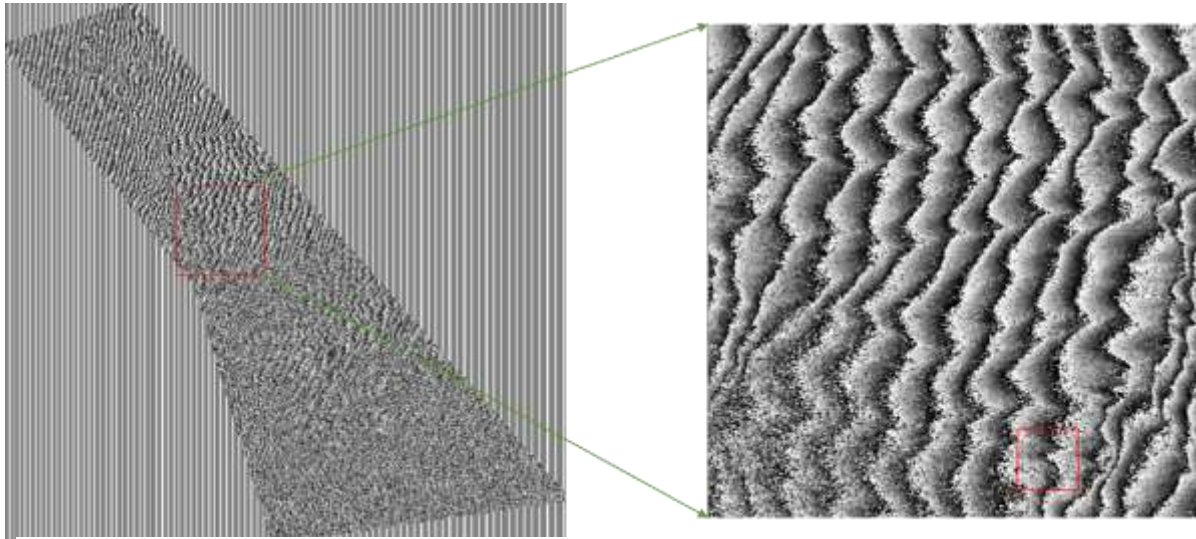
4.7.1.2 Συμπροσαρμογή απεικονίσεων

Σε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι είναι απαραίτητο να γίνει η επιλογή της κύριας (master) και δευτερεύουσας (slave) απεικόνισης. Ο άτυπος κανόνας σχετικά με τη συγκεκριμένη επιλογή είναι ότι η απεικόνιση που είναι χρονικά προγενέστερη θεωρείται ως κύρια και η χρονικά μεταγενέστερη θεωρείται ως δευτερεύουσα. Η συμπροσαρμογή των απεικονίσεων SAR αποτελεί ένα βήμα της συμβολομετρικής επεξεργασίας όπου οι δευτερεύουσες απεικονίσεις αποκτάνε την ίδια γεωμετρία με αυτή της κύριας απεικόνισης. Η διαδικασία συμπροσαρμογής των απεικονίσεων ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed υλοποιήθηκε από τον αλγόριθμο συμπροσαρμογής του λογισμικού πακέτου SARscape με ακρίβεια καλύτερη του 1/10 του εικονοστοιχείου και στα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια.

4.7.1.3 Δημιουργία και φιλτράρισμα του συμβολογράμματος

Όπως έχει προαναφερθεί, το συμβολόγραμμα είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της κύριας (master) μιγαδικής SAR απεικόνισης με τη συζυγή μιγαδική δευτερεύουσα (slave) SAR απεικόνιση. Εφαρμόστηκε φιλτράρισμα στα παραγόμενα συμβολογράμματα στο χώρο των συχνοτήτων με στόχο την

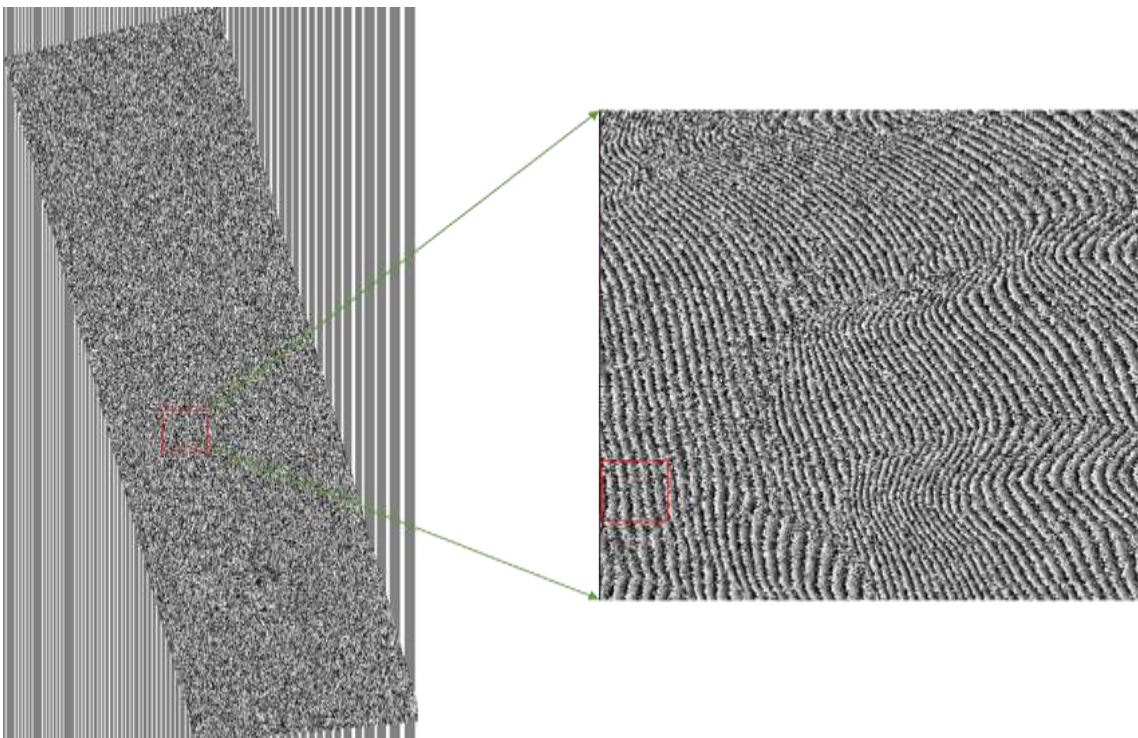
απομάκρυνση του θορύβου που εμφανίζεται λόγω της αποσυσχέτισης των απεικονίσεων, λόγω της κηλίδωσης και λόγω του θορύβου του συστήματος SAR. Μετά από δοκιμές η μέθοδος που παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν από την εφαρμογή του φίλτρου Goldstein (Baran et al., 2003) συγκριτικά με τη μέθοδο του προσαρμοσμένου φιλτραρίσματος και του φιλτραρίσματος με τη χρήση του



Εικόνα 4.6 Παραγόμενο συμβολόγραμμα απεικονίσεων ALOS PALSAR

αλγορίθμου *Boxcar*.

Όπως παρατηρείται από το παραγόμενο συμβολόγραμμα οι κροσσοί συμβολής είναι ευδιάκριτοι για ορισμένες περιοχές. Στις δασικές περιοχές αναμένεται οι κροσσοί συμβολής να μην είναι ευκρινώς διαχωρίσιμοι.



Εικόνα 4.7 Παραγόμενο συμβολόγραμμα από τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed

4.7.1.4 Αφαίρεση όρου της επίπεδης γης

Όπως έχει προαναφερθεί η συμβολομετρική φάση μπορεί να χωριστεί σε δυο συνιστώσες σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

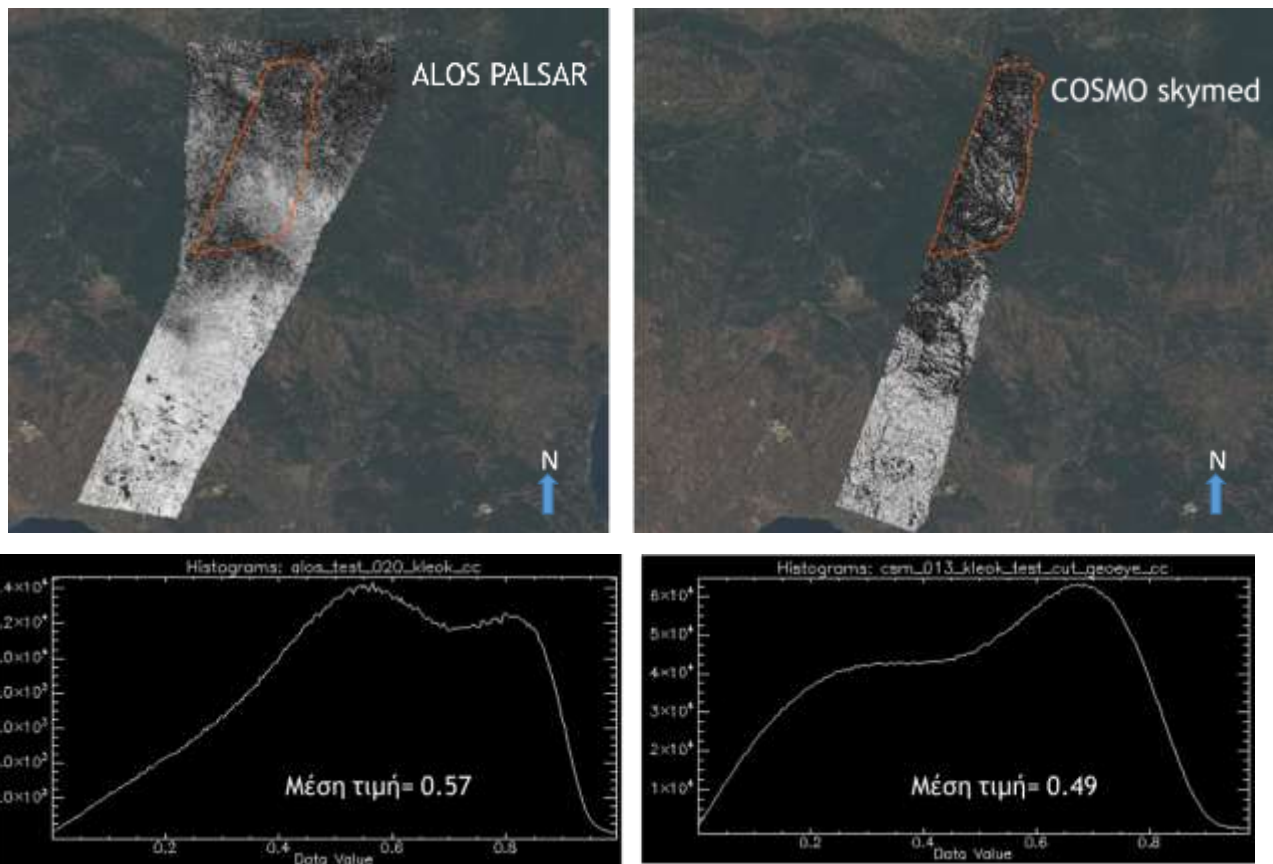
$$\varphi = \varphi_{topo} + \varphi_{flat}$$

Όπου ο όρος φ_{flat} είναι η φάση λόγω της επίπεδης γης και ο όρος φ_{topo} σχετίζεται με την υψομετρική πληροφορία και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Σημειώνεται ότι για τη καλύτερη αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο έναντι μια ελλειψοειδούς επιφάνειας αναφοράς. Για την αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε (DEM_TOPO). Τέλος, η αφαίρεση του όρου της επίπεδης γης γίνεται σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας για την απλοποίηση των επόμενων σταδίων της συμβολομετρικής διαδικασίας.

4.7.1.5 Δημιουργία εικόνας συνάφειας

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι εικόνες της συνάφειας για κάθε συμβολομετρικό ζευγάρι. Όπως έχει αναφερθεί η συμβολομετρική συνάφεια εκφράζει το βαθμό ομοιότητας των απεικονίσεων SAR ενός συμβολομετρικού ζευγαριού και είναι ένας δείκτης ακρίβειας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.



Εικόνα 4.8 Εικόνες συνάφειας με τα ιστογράμματα τους: Αριστερά :ALOS PALSAR Δεξιά: COSMO-SkyMed

Στις εικόνες της συνάφειας που έχουν παραχθεί οι άσπροι τόνοι εκφράζουν τις μεγάλες τιμές της συνάφειας (κοντά στο ένα) και οι σκούροι τόνοι τις μικρές τιμές της (κοντά στο μηδέν). Όπως αναμενόταν στη δασική περιοχή μελέτης οι τιμές της συνάφειας είναι αρκετά χαμηλές. Από τη σχετική σύγκριση των ιστογραμμάτων της συνάφειας από τα συμβολομετρικά ζευγάρια ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed παρατηρείται η μέση τιμή της συνάφειας των απεικονίσεων COSMO-SkyMed να είναι χαμηλότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονική αποσυσχέτιση των σκεδαστών (φύλλα, μικρά κλαδιά) είναι μεγαλύτερη αν και η χρονική γραμμή βάσης είναι μόλις μία ημέρα συγκριτικά με τη χρονική αποσυσχέτιση των αντίστοιχων σκεδαστών (μεγάλα κλαδιά, κορμοί δέντρων) στις απεικονίσεις ALOS PALSAR για τις οποίες η χρονική γραμμή βάσης είναι 46 ημέρες.

4.7.1.6 Αποκατάσταση της φάσης

Ο αλγόριθμος που είχε τα καλύτερα αποτελέσματα και χρησιμοποιήθηκε είναι ο αλγόριθμος τοπικής ανάπτυξης (Region Growing). Η τοπική ανάπτυξη είναι περισσότερο μια φιλοσοφία παρά αυστηρές μαθηματικές διεργασίες (Καραθανάση, 2003). Ο αλγόριθμος της τοπικής ανάπτυξης ξεκινάει από τις εύκολες περιοχές και στη συνέχεια προχωράει στις δυσκολότερες περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο δεν διαδίδονται τα σφάλματα σε όλο το πεδίο μελέτης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνεται στην περίπτωση της επιλογής μικρών τιμών στο κατώφλι της συνάφειας περιορίζοντας την πιθανότητα εισαγωγής σφαλμάτων φάσης στην τελική εικόνα της αποκαταστημένης φάσης. Μετά από πολλές δοκιμές τα κατώφλια που επιλέχθηκαν για τα δυο συμβολομετρικά ζευγάρια με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των κενών περιοχών και της υψομετρικής ακρίβειας ήταν 0.20 για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και 0.13 για τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed.

4.7.1.7 Επαναπροσδιορισμό της βάσης με χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων

Ο προσδιορισμός του διανύσματος της βάσης γίνεται με στόχο μια αρχική εκτίμηση του μέτρου και της διεύθυνσης του διανύσματος με απώτερο σκοπό τον έλεγχο δυνατότητας εκπόνησης της συμβολομετρικής διαδικασίας. Σε αυτό το στάδιο διαδικασίας γίνεται ένα ακριβέστερος προσδιορισμός της γραμμής βάσης όπου προσδιορίζονται οι παράμετροι διόρθωσης των τροχιακών δεδομένων, ο υπολογισμός της μετατόπισης της φάσης που οφείλεται στα σφάλματα της τροχιάς και επαναπροσδιορίζεται το διάνυσμα της βάσης από τα σημεία επίγειου ελέγχου. Επίσης υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προέρχεται από τη διαφορά των τιμών υψομέτρου των σημείων επίγειου ελέγχου από τις αντίστοιχες τιμές φάσης οι οποίες προηγούμενα έχουν μετατραπεί σε τιμές υψομέτρου. Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων διόρθωσης της τροχιάς και των νέων στοιχείων βάσης από τα σημεία επίγειου ελέγχου στο επόμενο στάδιο της επεξεργασία πραγματοποιείται η επαναπροσδιορισμός της τιμής φάσης της επίπεδης γης και της τιμής της αποκατεστημένης φάσης που οφείλεται στη τοπογραφία.

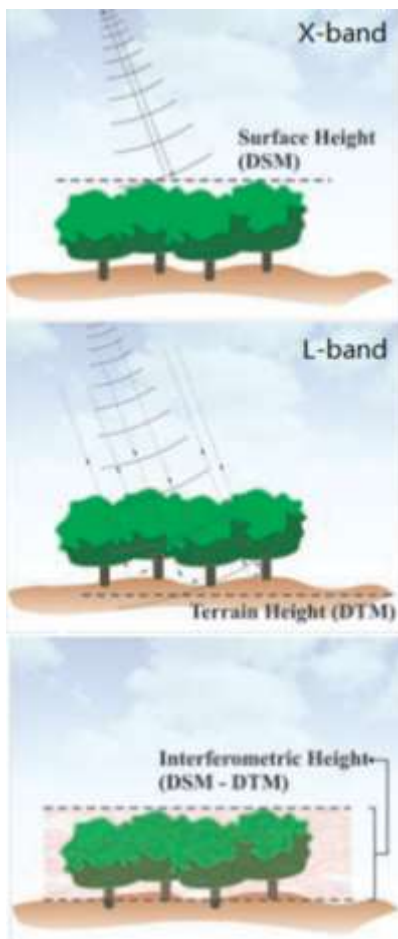
Στη συγκεκριμένη εργασία, λόγω της απουσίας σημείων γνωστών συντεταγμένων επιλέχθηκαν σημεία υψηλής συνάφειας από την εικόνα της συνάφειας και αξιοποιώντας το διαθέσιμο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς (DEM_TOPO) τα συγκεκριμένα σημεία απέκτησαν απόλυτες υψομετρικές τιμές. Σημειώνεται ότι για τα σημεία υψηλής συνάφειας που επιλέχθηκαν, έγινε η υπόθεση ότι είναι σημεία πάνω στο έδαφος. Με αυτή τη λογική το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την επιφάνεια του εδάφους.

4.7.1.8 Μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο και γεωκωδικοποίηση

Αρχικά σημειώνεται ότι για την αποφυγή των σφαλμάτων της γεωαναφοράς εφαρμόστηκε η διαδικασία multilooking όπου χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικά οι λόγοι 1-3 και 1-2 ανάμεσα στη διεύθυνση των

πλάγιων αποστάσεων (slant range) και στη διεύθυνση του αζιμουθίου για τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed, αντίστοιχα. Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας, η πλήρως αποκατεστημένη φάση συνδυάζεται με τη φάση της επίπεδης γης για τη μετατροπή της συνολικής φάσης σε υψομετρική πληροφορία και στη συνέχεια η γεωκωδικοποίηση της, στη προβολή UTM 34N WGS 84. Αρχικά εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος μετατροπής της φάσης σε υψομετρική πληροφορία. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι απαιτούν τη γνώση ενός ή περισσότερων σημείων γνωστών συντεταγμένων για τη μετατροπή των σχετικών τιμών υψομέτρων που υπολογίζονται σε απόλυτες τιμές υψομέτρου. Υπογραμμίζεται ότι στο λογισμικό πακέτο SARscape υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής απόλυτων τιμών υψομέτρων χρησιμοποιώντας βοηθητικά δεδομένα όπως το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς. Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία της γεωκωδικοποίησης.

4.7.2 Υπολογισμός συμβολομετρικού ύψους



Η εκτίμηση του δασικού ύψους έγινε αφαιρώντας το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο το οποίο προέκυψε από τα δεδομένα COSMO-SkyMed X μπάντας από το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους από τα δεδομένα ALOS PALSAR.. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε επειδή η μικροκυματική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (X μπάντα) και πόλωσης ΗΗ αλληλεπιδρά με σκεδαστές που προέρχονται από τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης με αποτέλεσμα να περιγράφουν ικανοποιητικά τη συγκεκριμένη επιφάνεια (Izzawati et al., 2006, Kellndorfer et al., 2004, Balzter et al., 2007a, Walker et al., 2007, Andersen et al., 2008). Για την καλύτερη αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από τα δεδομένα ALOS PALSAR. Σημειώνεται ότι στη διαδικασία εκπόνησης της συμβολομετρικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. για ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς.

Εικόνα 4.9 Τρόπος προσδιορισμού του συμβολομετρικού ύψους

4.8 Παρουσίαση παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής διαδικασίας που είναι το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους (DTM) που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της κομοστέγης των δέντρων που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις COSMO-Skymed.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συμβολομετρική διαδικασία της παραγωγής DEM από δεδομένα SAR σε περιοχές ορεινές και με βλάστηση δεν είναι η κατάλληλη για τις περισσότερες εφαρμογές. Για την καλύτερη ακρίβεια του DEM προτείνεται η χρήση συμβολομετρικού ζευγαριού με μικρή χρονική διαφορά για τον περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης. Επίσης, προτείνεται η χρήση εικόνων από την ίδια εποχή για τη μείωση της χωρικής αποσυσχέτισης (ειδικά σε φυλλοβόλα δάση) και τη μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Τέλος, σημειώνεται ότι το παραγόμενο DEM από ένα συμβολομετρικό ζευγάρι αποτελεί μια σχετική τιμή και είναι πιθανόν να εντοπιστεί μετατόπιση οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.

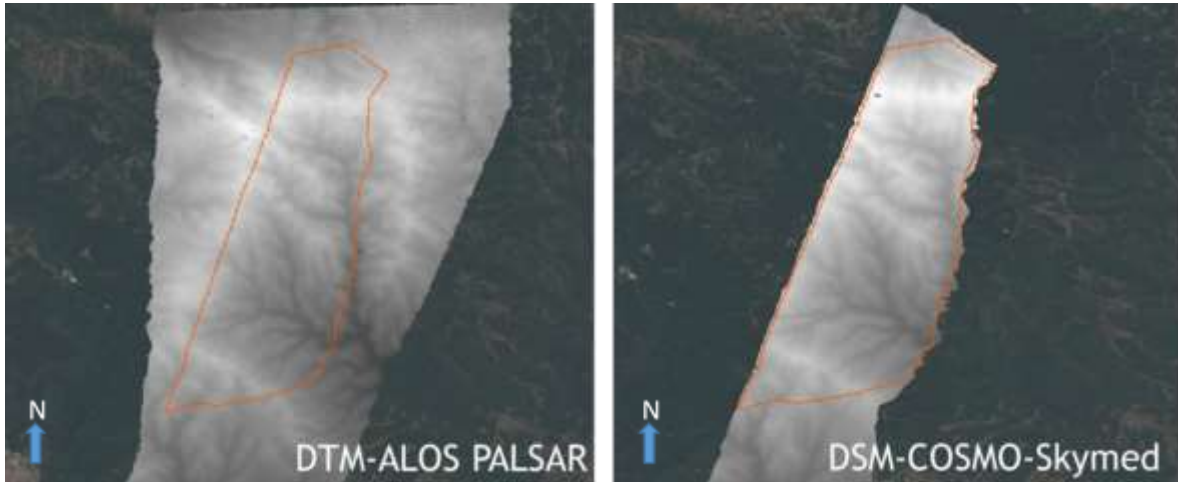
Όπως έχει προαναφερθεί η ποιότητα του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες (Κεφάλαιο 2)

- Χρονική αποσυσχέτιση
- Γεωμετρική αποσυσχέτιση
- Ακρίβεια τροχιακών δεδομένων
- Ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Παραμορφώσεις του εδάφους
- Επεξεργασία των δεδομένων

Οι σημαντικότεροι δείκτες της ακρίβειας του παραγόμενου συμβολομετρικού ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς είναι

- Συμβολομετρική συνάφεια
Όσο μεγαλύτερη είναι η συμβολομετρική συνάφεια τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα της συμβολομετρίας
- Το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel spacing)
Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του εικονοστοιχείου τόσο καλύτερος είναι ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός των προϊόντων της συμβολομετρίας
- Ύψος ασάφειας
Όσο μικρότερο είναι το ύψος ασάφειας τόσο καλύτερη είναι η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Εμπειρικά, ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα στην παραγωγή ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι να έχουμε ακρίβεια μεταξύ 1/10 με 1/20 του ύψους ασάφειας. Υπενθυμίζουμε ότι ύψος ασάφειας είναι το μέγεθος της υψομετρικής διαφοράς που αντιστοιχεί σε ένα κύκλο φάσης, δηλαδή σε 2π .

Τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από τα δεδομένα ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed φαίνονται στη παρακάτω εικόνα. Η χωρική ανάλυση τους είναι 5 μέτρα και το σύστημα αναφοράς τους είναι το WGS 84 στη προβολή UTM 34N. Σημειώνεται ότι τιμές που περιέχουν είναι απόλυτα γεωμετρικά ύψη αφού το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε έχει απόλυτες υψομετρικές τιμές που αναφέρονται στο ελλειψοειδές WGS 84.



Εικόνα 4.10 Παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα με τη τεχνική της συμβολομετρίας

Παρατηρείται ότι τα παραγόμενα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα περιέχουν “τρύπες” λόγω της αποτυχίας της αποκατάστασης της φάσης. Αυτές οι τρύπες αφαιρούνται χρησιμοποιώντας τις γειτονικές μη-μηδενικές τιμές και χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο μετατόπισης σε όλη την απεικόνιση. Για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω της κατεύθυνσης της μετατόπισης του παραθύρου η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες κατευθύνσεις. Οι κορυφές υψηλής συχνότητας που δημιουργούνται αφαιρούνται χρησιμοποιώντας το φίλτρο Butterworth στο χώρο των συχνοτήτων.

4.9 Εκτίμηση ακρίβειας παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο αξιολογούνται τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Γίνεται η εκτίμηση της κατακόρυφης ακρίβειας του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους (DTM) που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις ALOS PALSAR και του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που περιγράφει την επιφάνεια του άνω ορόφου της κομοστέγης των δέντρων που έχει προκύψει από τις απεικονίσεις COSMO-SkyMed. Ο έλεγχος ποιότητας ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου επικεντρώνεται στην αξιολόγηση του παραγόμενου προϊόντος και όχι στη διαδικασία της παραγωγής του. Επίσης, ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της εφαρμογής μια διαδικασίας ή ενός αλγορίθμου είναι ένα δύσκολο πρόβλημα και γι αυτό η αξιολόγηση γίνεται σε τμήματα του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου και σε σπάνιες περιπτώσεις σε όλο το μοντέλο. Σημειώνεται ότι τα μορφολογικά και τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε τμήματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη τελική εκτιμώμενη ακρίβεια κάθε τμήματος.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της ποιότητας ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι η χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων. Για την αξιολόγηση ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου απαιτούνται τουλάχιστον 28 σημεία (20 εσωτερικά 8 περιφερειακά) για τον υπολογισμό του μέσου

τετραγωνικού σφάλματος. Η ακρίβεια υπολογίζεται με τη σύγκριση των υψομέτρων που προκύπτουν από τα αντίστοιχα σημεία στο εξαγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο και των υψομέτρων των σημείων γνωστών συντεταγμένων. Τέλος, η υψομετρική ακρίβεια των σημείων γνωστών συντεταγμένων πρέπει να είναι καλύτερη από την ακρίβεια του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εργασία η απουσία σημείων γνωστών συντεταγμένων οδήγησε στην απόρριψη της συγκεκριμένης μεθόδου για τον έλεγχο της ποιότητας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου.

Η χρήση ενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς για την αξιολόγηση άλλων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων είναι μια εναλλακτική προσέγγιση ελέγχου ποιότητας ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Σημειώνεται ότι από στατιστική άποψη το ψηφιακό μοντέλο αναφοράς πρέπει να είναι τουλάχιστον μια τάξη καλύτερης ακρίβειας από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που αξιολογείται. Το παραπάνω κριτήριο περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων αναφοράς. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό προέρχονται από Lidar δεδομένα (Joughin et al., 1999; Yu and Ge, 2010), από στερεοπαράτηρηση αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων, από αυτοματοποιημένες μεθόδους ψηφιακής φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης και από ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών. Ένα πρόβλημα σχετικά με το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς είναι η διαφορετική χωρική ανάλυση του συγκριτικά με αυτή του παραγόμενου μοντέλου από την συμβολομετρική διαδικασία. Σύμφωνα με τους Das et al. (2014) σε πολλές περιπτώσεις δεν ήταν επιτυχής η συμπροσαρμογή των υψομετρικών δεδομένων και των SAR δεδομένων. Σύμφωνα με τη μελέτη του Shimada (2010) η μικρή χωρική ανάλυση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρικής ανάλυσης στις εικόνες SAR και τη λάθος εκτίμηση των τιμών οπισθοσκέδασης.

Για την αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από τη συμβολομετρική επεξεργασία των απεικονίσεων από τα δορυφορικά συστήματα ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed χρησιμοποιήθηκαν τα υψομετρικά μοντέλα αναφοράς DEM_TOPO. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο SARscape για τη διαδικασία της αξιολόγησης των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (DEM validation) χρησιμοποιήθηκε ένας κλίμακα σημείων με υψόμετρα αναφοράς από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς και υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου αξιολόγησης, θα πρέπει το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο και το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση. Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση της διγραμμικής (bilinear) παρεμβολής για να ισχύει η παραπάνω συνθήκη.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου της αξιολόγησης στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μεγέθη αξιολόγησης	Παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο	
	ALOS PALSAR	COSMO-SkyMed
Μέση τιμή (m)	-5.9	5.3
Τυπική απόκλιση (m)	11.7	14.5
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) (m)	10.5	10.0
Εκτιμώμενο ύψος ασάφειας	100.3	7.4

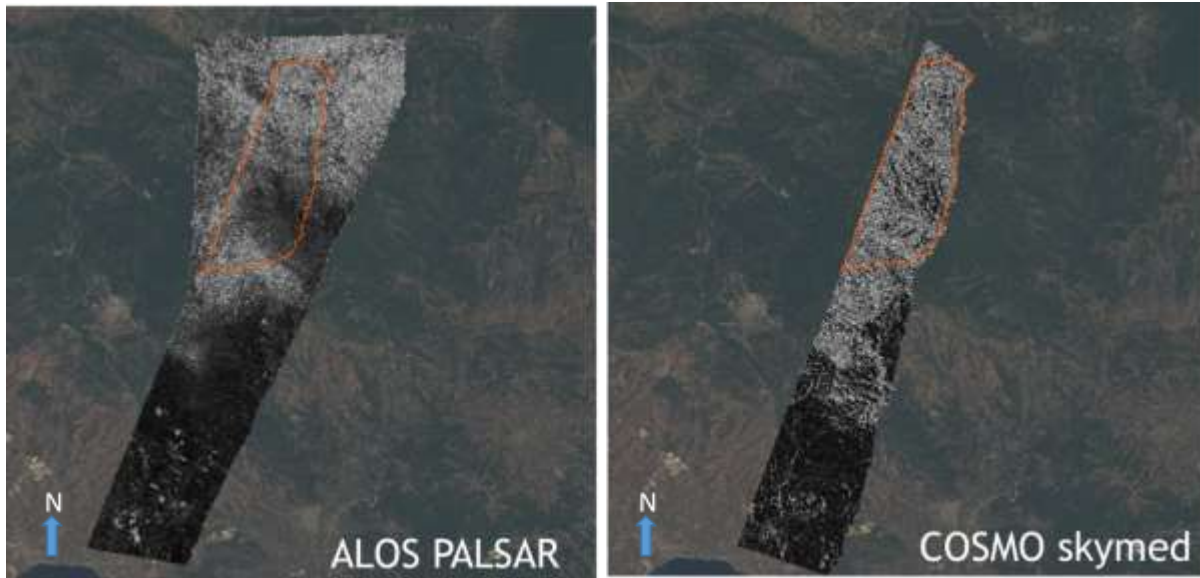
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα αξιολόγησης

Όπως έχει αναφερθεί, ένα σχετικά καλό αποτέλεσμα στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου είναι μεταξύ $1/10$ με $1/20$ του ύψους ασάφειας. Με βάση το παραπάνω η ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα ALOS PALSAR κρίνεται ικανοποιητική. Η ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed έχει την ίδια τάξη μεγέθους με το ύψος ασάφειας. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα οφείλεται κυρίως στην αδυναμία της αποκατάστασης της φάσης και στην χρήση του ίδιου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως το στάδιο της αποκατάστασης της φάσης αποσκοπεί στο να αποκαλύψει το πλήθος των ακεραίων κύκλων που είναι “τυλιγμένοι” στη φάση. Με βάση το προηγούμενο συμπεραίνουμε ότι για να ξεπερνά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα την ασάφεια προσδιορισμού του υψομέτρου ενός συμβολομετρικού ζευγαριού, αυτό σημαίνει ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης σε πολλά σημεία της περιοχής μελέτης. Δηλαδή, κατά την αποκατάσταση της φάσης έχουμε «χάσει» έναν ή περισσότερους ακεραίους κύκλους σε αυτά τα σημεία, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός του υψομέτρου να αποκλίνει αρκετά από το πραγματικό υψόμετρο και όπως είναι προφανές να αυξάνεται σημαντικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE). Αυτά τα σημεία είναι συνήθως τα σημεία όπου υπάρχουν υψομετρικές ανωμαλίες όπως στα όρια των δασικών περιοχών ή στα κενά της δασικής κομοστέγης.

Η χρήση του ίδιου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς επιδράει διττά στην ακρίβεια των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων. Η χρήση του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς από τη ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. που περιγράφει την επιφάνεια του εδάφους λειτουργεί θετικά στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με τα δεδομένα ALOS PALSAR ενώ λειτουργεί αρνητικά στην παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed. Τέλος, τα αποτελέσματα του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου από τα δεδομένα COSMO-SkyMed θα ήταν ακριβέστερα εάν το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς αναφερόταν στην επιφάνεια της δασικής κομοστέγης.

Στη διαδικασία παραγωγής των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων το λογισμικό πακέτο SARscape υπολογίζει μια σχετική ενδεικτική τιμή του τυπικού σφάλματος όπου αποθηκεύεται σε ένα αρχείο που ονομάζεται αρχείο της ακρίβειας (precision file). Για την καλύτερη εκτίμηση της εικόνας της υψομετρικής ακρίβειας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων παραθέτονται οι εικόνες ακρίβειας (precision images).



Εικόνα 4.11 Εικόνες ακρίβειας παραγόμενων συμβολομετρικών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Οι χάρτες ακρίβειας αποτελούν ένα δείκτη ακρίβειας των μετρήσεων όπου οι μικρότερες τιμές απεικονίζονται με σκούρους τόνους ενώ οι μεγαλύτερες με λευκούς τόνους. Όσο μεγαλύτερη είναι μια τιμή τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια της μέτρησης. Ο τύπος υπολογισμού είναι:

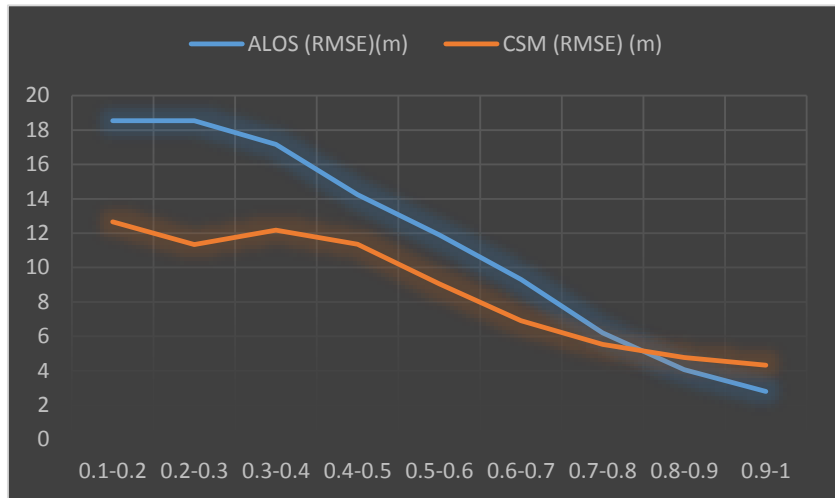
$$\sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2\gamma^2} \cdot \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B}}$$

Όπου, γ η συμβολομετρική συνάφεια, λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας, θ η γωνία πρόσπτωσης, R η πλάγια απόσταση (slant-range) μεταξύ του σκεδαστή και του αισθητήρα SAR και B η γεωμετρική γραμμή βάσης.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σχετικά με τις τιμές της συνάφειας.

Συνάφεια	ALOS (RMSE) (m)	CSM (RMSE) (m)
0-0.1	-	-
0.1-0.2	18.5	12.7
0.2-0.3	18.5	11.3
0.3-0.4	17.2	12.2
0.4-0.5	14.2	11.4
0.5-0.6	11.9	9.1
0.6-0.7	9.3	6.9
0.7-0.8	6.2	5.5
0.8-0.9	4.1	4.8
0.9-1	2.8	4.3

Πίνακας 4. 5 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

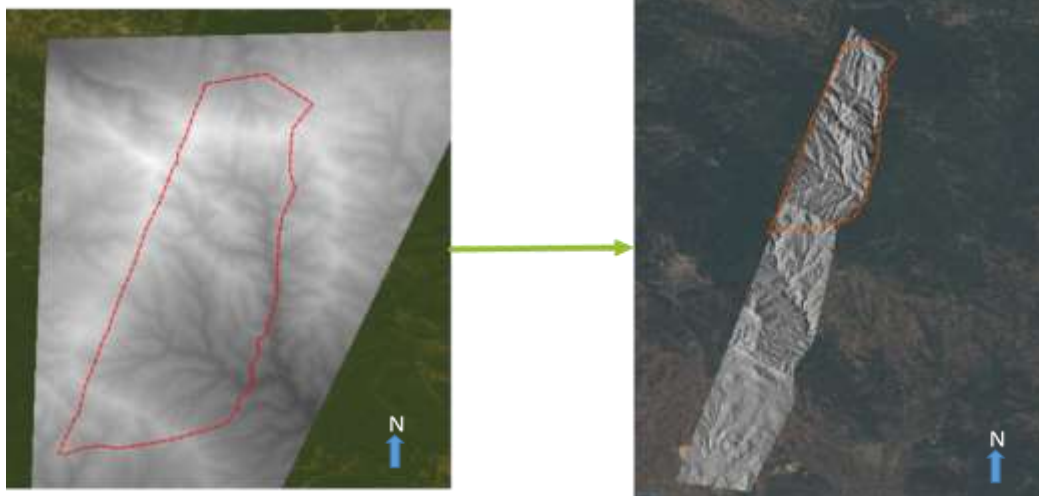


Σχήμα 4.2 Σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

Παρατηρώντας τη σχέση της συνάφειας με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα όσο αυξάνεται η συνάφεια η υψομετρική ακρίβεια των παραγόμενων βελτιώνεται.

Τέλος, γίνεται η αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για τις διάφορες κλίσεις της περιοχής ενδιαφέροντος.

Αρχικά χρησιμοποιώντας το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο αναφοράς (DEM_TOPO) που περιγράφει το έδαφος έγινε η παραγωγή του χάρτη κλίσεων. Οι κλίσεις αναφέρονται στη διεύθυνση Ανατολή-Δύση που είναι σχεδόν κάθετη στις τροχιές των δορυφορικών συστημάτων ALOS PALSAR και COSMO-SkyMed.

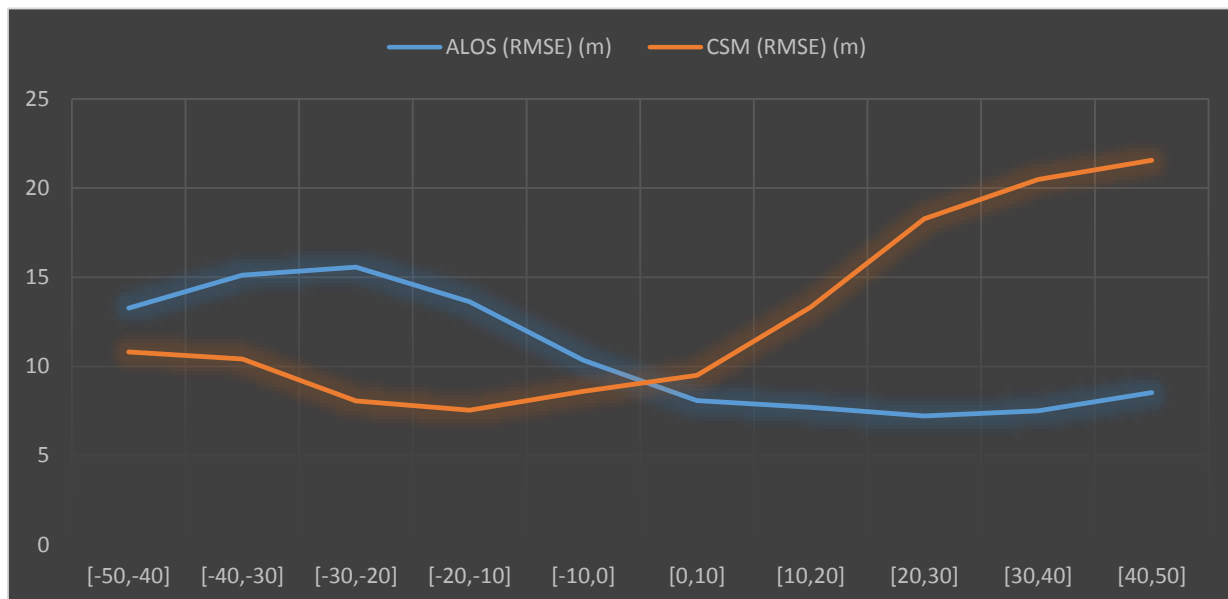


Εικόνα 4.12 Παραγωγή του χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος

Με βάση τον χάρτη κλίσεων της περιοχής ενδιαφέροντος εξετάστηκε η συμπεριφορά του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σχετικός πίνακας και το αντίστοιχο διάγραμμα.

Εύρος τιμών κλίσεων	ALOS (RMSE) (m)	Ποσοστό περιοχής (%)	CSM (RMSE) (m)	Ποσοστό περιοχής (%)
[-50,-40]	13.3	0.1	10.8	0.3
[-40,-30]	15.1	1.4	10.4	1.6
[-30,-20]	15.6	7.5	8.1	5.8
[-20,-10]	13.6	16.9	7.5	15.6
[-10,0]	10.3	26.5	8.6	29.1
[0,10]	8.1	28.3	9.5	30.8
[10,20]	7.7	14.2	13.3	12.4
[20,30]	7.2	4.3	18.3	3.7
[30,40]	7.5	0.7	20.5	0.7
[40,50]	8.5	0.1	21.6	0.1

Πίνακας 4. 6 Σχέση των κλίσεων με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

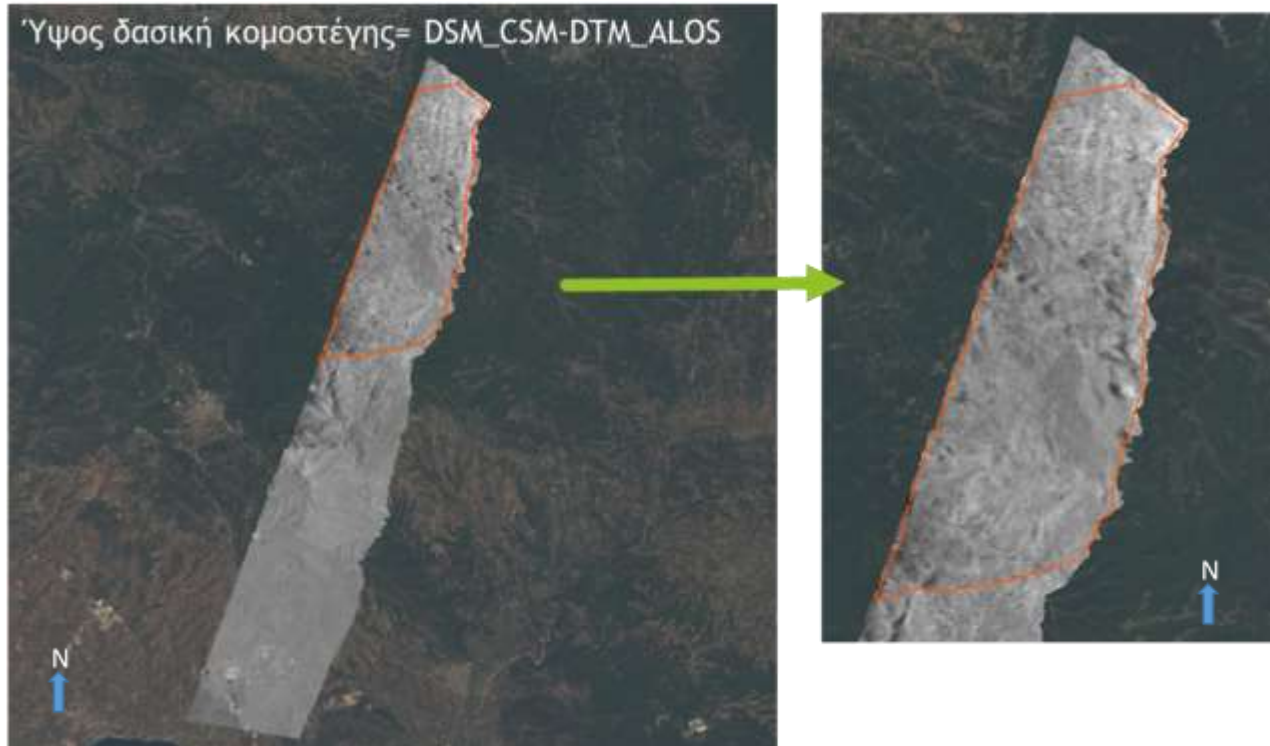


Σχήμα 4.3 Σχέση των κλίσεων της περιοχής μελέτης με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω διάγραμμα η υψομετρική ακρίβεια είναι καλύτερη στις περιοχές που δεν υπάρχουν έντονες κλίσεις. Η παρουσία έντονων κλίσεων έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία γεωμετρικών παραμορφώσεων (πτύχωση, σμίκρυνση, σκίαση) με αποτέλεσμα να μειώνεται η υψομετρική ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Επίσης, λόγω της ανιούσας (ascending) τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ALOS PALSAR οι θετικές κλίσεις παρουσιάζουν χαμηλές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος γιατί οι συγκεκριμένες επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς τον δέκτη. Αντίστοιχα, λόγω κατιούσας (descending) τροχιάς του δορυφορικού συστήματος COSMO-SkyMed οι αρνητικές κλίσεις παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος γιατί οι συγκεκριμένες επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς το δέκτη.

4.10 Αξιολόγηση εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται η αξιολόγηση της μεθοδολογίας και του αποτελέσματος του ύψους δασικής κομοστέγης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα της διαφοράς των δυο παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.



Εικόνα 4.13 Εκτίμηση ύψους δασικής κομοστέγης

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια οι παράμετροι ενός συστήματος SAR (μήκος κύματος, πόλωση, γεωμετρία απεικόνισης, γωνία πρόσπτωσης) και οι παράμετροι (φυσικές και διηλεκτρικές ιδιότητες) της περιοχής μελέτης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη συγκεκριμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης αναφέρονται παρακάτω:

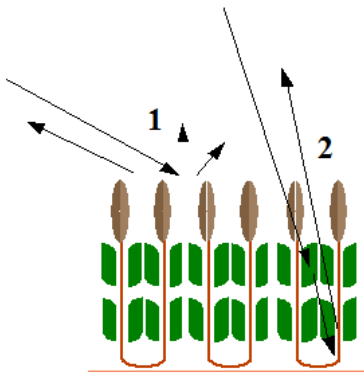
1. Μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η μικροκυματική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (X,C μπάντα) αλληλεπιδρά με σκεδαστές όπως τα φύλλα, βελόνες, μικρά κλαδιά με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να περιγράφει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης. Αντίστοιχα η μικροκυματική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (L,P μπάντα) αλληλεπιδρά με σκεδαστές όπως τα μεγάλα κλαδιά, κορμούς δέντρων έδαφος με αποτέλεσμα το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο να προσεγγίζει την επιφάνεια του εδάφους.

2. Γεωμετρία των απεικονίσεων SAR

Η πλάγια γεωμετρία των απεικονίσεων SAR έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία παραμορφώσεων. Τα φαινόμενα της πτύχωσης της σμίκρυνσης και της σκίασης μειώνουν την ακρίβεια του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης.

3. Γωνία πρόσπτωσης



Εικόνα 4.14 Σχέση γωνία πρόσπτωσης και διαπεραστικότητα

Μια απεικόνιση SAR συνήθως χωρίζεται στις περιοχές των εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων (near-range), των μέσων (mid-range) και των απώτερων πλάγιων αποστάσεων (far-range) λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης. Σύμφωνα με τους Izzawati et al. (2006) σε μια απεικόνιση SAR στην περιοχή των εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη, η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη, αντίθετα με την περιοχή των απώτερων πλάγιων αποστάσεων όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη. Η αυξημένη διαπεραστικότητα μπορεί να συνδεθεί με το ύψος των σκεδαστών που περιγράφει το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο. Με απλά λόγια, στην περιοχή εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων επειδή η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη, το εκτιμώμενο ύψος της δασικής κομοστέγης θα είναι περισσότερο υποτιμημένο συγκριτικά με την

περιοχή των απώτερων πλάγιων αποστάσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν έγινε κάποια διόρθωση λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης λόγω της μικρής μεταβολής των τιμών της στα δορυφορικά δεδομένα SAR που χρησιμοποιήθηκαν.

4. Χρονική διαφορά των απεικονίσεων SAR

Η χρήση απεικονίσεων που έχουν μεγάλη χρονική διαφορά έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλης χρονικής αποσυσχέτισης που αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα της συμβολομετρικής διαδικασίας. Η χρήση δεδομένων μιας διέλευσης παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα λόγω της μηδενικής χρονικής αποσυσχέτισης και λόγω της απουσία της μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών.

5. Τραχύτητα της επιφάνειας

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διαμόρφωσης του επιστρεφόμενου σήματος είναι η τραχύτητα της επιφάνειας. Σύμφωνα με τον Rayleigh (Bamler & Hartl 1998) μια επιφάνεια είναι ομαλή όταν ισχύει:

$$h = \frac{\lambda}{8 \sin \theta}$$

Όπου h η τραχύτητα της επιφάνειας (σε όρους υψομετρικής πληροφορίας), λ το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και θ η γωνία πρόσπτωσης

Η τραχύτητα μια δασικής έκτασης έχει ως αποτέλεσμα τη σκέδαση όγκου (volume scattering) που είναι αποτέλεσμα πολλαπλών σκεδάσεων μέσα στη δασική κομοστέγη. Η μεταβολή της τραχύτητας μια δασικής κομοστέγης λόγω διάφορων μεταβαλλόμενων παραγόντων όπως ο άνεμος ή η υγρασία έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των χαρακτηριστικών των επιστρεφόμενων σημάτων με αποτέλεσμα την εισαγωγή σφαλμάτων στην εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης.

6. Προσανατολισμός και κλίσεις της περιοχής μελέτης

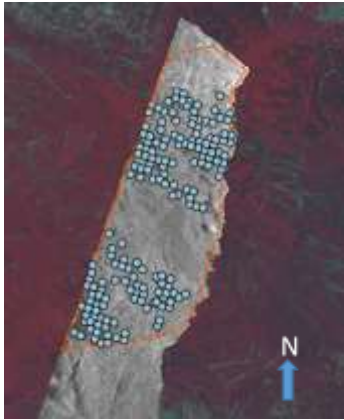
Οι αλλαγές των τοπογραφικών κλίσεων έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας απεικόνισης και της ορατότητας από τον αισθητήρα SAR (Balzter et al., 2007a). Σημειώνεται ότι στις περιοχές που είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR η επίδραση του εδάφους είναι σημαντικότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Στις περιοχές που δεν είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους αναμένονται καλύτερα λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης της δασικής κομοστέγης.

7. Υψομετρικές ασυνέχειες λόγω της βλάστησης.

Όπως έχει αναφερθεί οι υψομετρικές ασυνέχειες λόγω της βλάστησης εντοπίζονται στα όρια των δασικών περιοχών που συνήθως υπάρχουν γειτονικές περιοχές με χέρσο έδαφος ή χαμηλή βλάστηση και στα κενά που υπάρχουν μέσα στις δασικές εκτάσεις. Σύμφωνα με τις μελέτες των Hagberg et al. (1995), Woodhouse et al. (2006), Williams et al. (2010) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μεταβολές της συμπεριφοράς της μικροκυματικής ακτινοβολίας στις υφιστάμενες υψομετρικές ασυνέχειες λόγω των σφαλμάτων εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης που παρατηρούνται στις συγκεκριμένες περιοχές χρησιμοποιώντας την τεχνική της συμβολομετρίας.

Στη συνέχεια αξιολογείται το παραγόμενο προϊόν εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης σχετικά με διάφορους παράγοντες όπως η συνάφεια, τα επίγεια δεδομένα, τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης όπως επίσης και σε δασικές (πολύγωνο πυκνής βλάστησης) και μη-δασικές/χέρσες περιοχές.

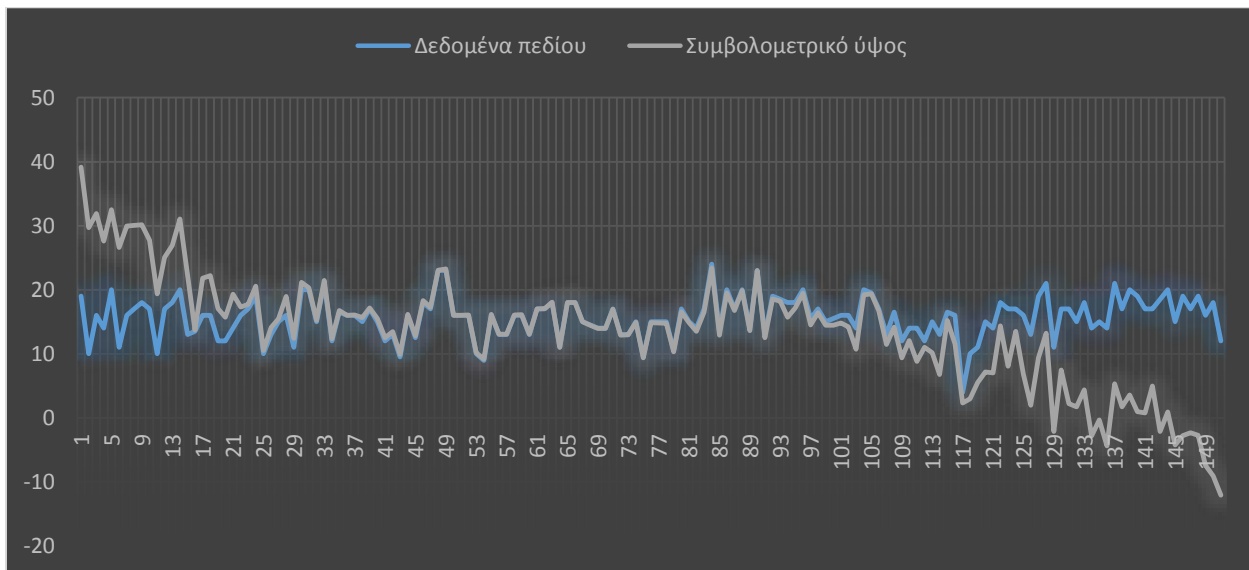
4.10.1 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα



Εικόνα 4.15 Χωρική κατανομή σημείων επίγειων μετρήσεων δασικού ύψους κομοστέγης

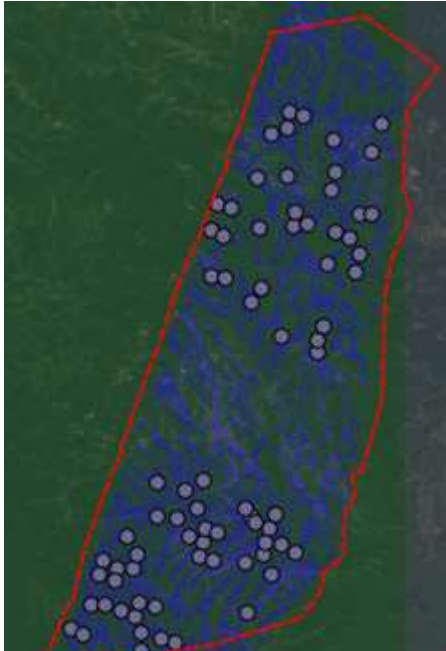
Όπως έχουν περιγραφεί και προηγουμένως τα διαθέσιμα επίγεια δεδομένα του δασικού ύψους κομοστέγης χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Οι επίγειες μετρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης εργασίας οι επίγειες μετρήσεις ήταν 172. Για τη διαδικασία της αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 159. Τα 13 σημεία αφαιρέθηκαν λόγω της πολύ μεγάλης διαφοράς του εκτιμώμενου και του μετρημένου ύψους δασικής κομοστέγης. Ο κύριος λόγος ύπαρξης τόσο μεγάλων διαφορών είναι η αποτυχία αποκατάστασης της φάσης στα συγκεκριμένα σημεία. Τέλος, αναφέρονται μερικά βασικά στατιστικά στοιχεία. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις επίγειες μετρήσεις είναι 6.9 μέτρα. Ο μέσος όρος του ύψους της δασικής κομοστέγης από τα επίγεια δεδομένα είναι 15.7 μέτρα ενώ από τα εκτιμώμενα ύψη δασική κομοστέγης είναι 13.7 μέτρα. Όπως έχει προαναφερθεί και έχει παρατηρηθεί σε ανάλογες εφαρμογές τα αποτελέσματα του ύψους δασικής κομοστέγης είναι υποτιμημένα.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συμφωνία εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης.



Σχήμα 4.4 Σύγκριση εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης

4.10.2 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης

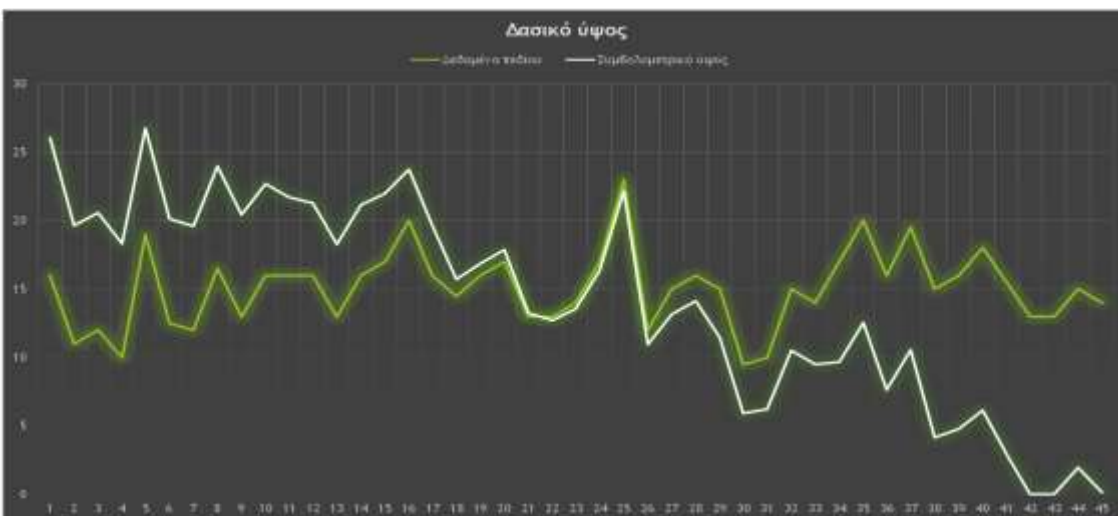


Εικόνα 4.16 Περιοχή βέλτιστων κλίσεων και σημεία επίγειων μετρήσεων

Με βάση τη προηγούμενη ανάλυση σχετικά με τις κλίσεις και τον προσανατολισμό των επιφανειών της περιοχής μελέτης έγινε η επιλογή των επιφανειών με προσανατολισμό προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR. Αναλυτικότερα έγινε η επιλογή των προσανατολισμένων επιφανειών προς τον αισθητήρα ALOS PALSAR και προς τον αισθητήρα COSMO-SkyMed και στη συνέχεια προέκυψε η τομή των επιφανειών όπου φαίνονται με μπλε χρώμα στη διπλανή εικόνα. Στις συγκεκριμένες επιφάνειες ήταν διαθέσιμες 45 επίγειες μετρήσεις όπου και χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση την εμπειρική μέθοδο σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα ήταν 5.4 μέτρα. Η βελτίωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος οφείλεται στον προσανατολισμό των επιφανειών προς τους αισθητήρες των συστημάτων SAR. Ο μέσος όρος του ύψους της δασικής κομοστέγης από τα επίγεια δεδομένα είναι 15 μέτρα ενώ από τα εκτιμώμενα ύψη δασικής κομοστέγης είναι 2 μέτρα. Η μεγάλη

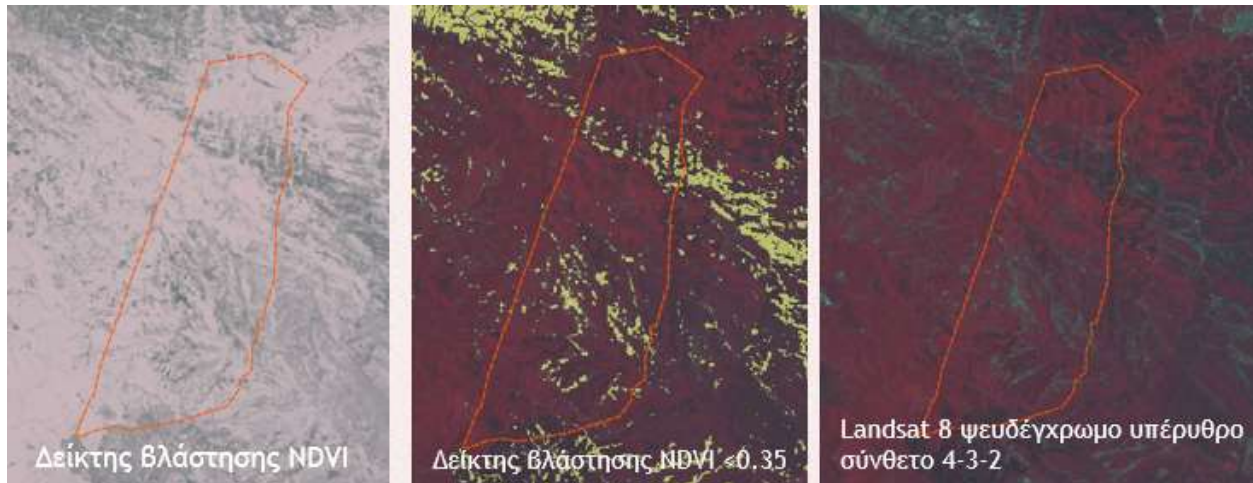
διαφορά στις μέσες τιμές είναι λογική αφού στις περιοχές που είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη με αποτέλεσμα την αυξημένη διαπεραστικότητα του σήματος SAR. Η μεγάλη διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη επίδραση του εδάφους σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Στις περιοχές που δεν είναι προσανατολισμένες προς τον αισθητήρα SAR τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δασικού ύψους είναι καλύτερα (4.10.1) λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης της δασικής κομοστέγης.

Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συμφωνία εκτιμώμενου και μετρούμενου ύψους δασικής κομοστέγης στις επιφάνειες που είναι προσανατολισμένες προς τους δέκτες SAR.



Σχήμα 4.5 Αξιολόγηση του ύψους δασικής κομοστέγης με βάση τα επίγεια δεδομένα για τις βέλτιστες κλίσεις

4.10.3 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές
 Στο σημείο αυτό περιγράφεται ο τρόπος καθορισμού των χέρσων περιοχών μέσα στη περιοχή ενδιαφέροντος και στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης.



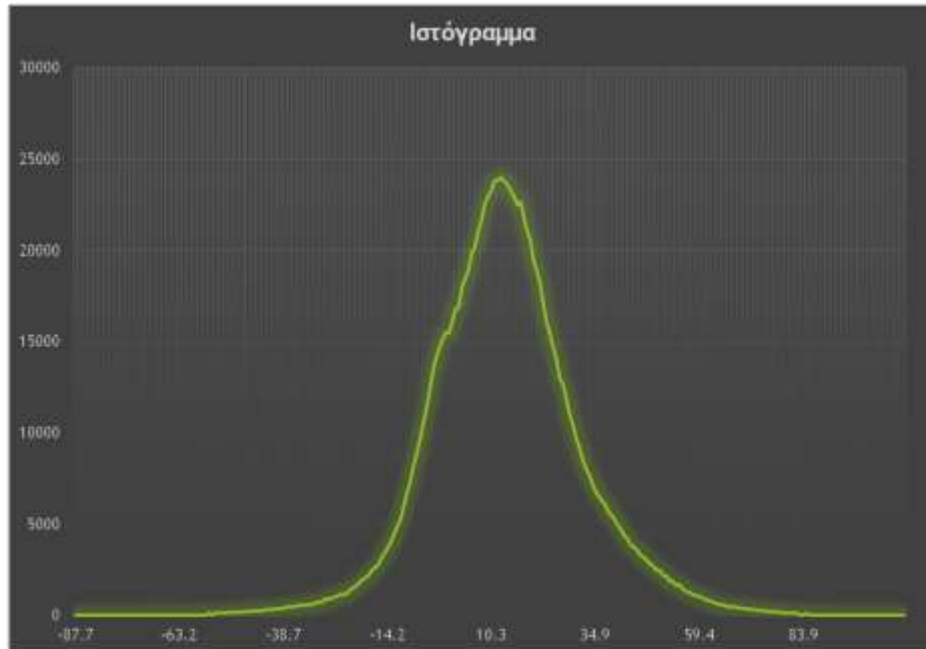
Εικόνα 4.17 Προϊόντα καθορισμού χέρσων περιοχών

Για τον καθορισμό των χέρσων περιοχών χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ο συντελεστής βλάστησης DNVl κυμαίνεται από -1 μέχρι 1 και περιγράφεται από τη σχέση

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

Όπου *NIR* οι μετρήσεις της φασματικής ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι και *VIS* οι μετρήσεις της φασματικής ανακλαστικότητας στο κόκκινο (ορατό) κανάλι.

Φωτογραμμετρικά, επιλέχθηκε το κατώφλι 0.35 όπου με κίτρινο χρώμα διακρίνονται οι χέρσες περιοχές στη περιοχή ενδιαφέροντος. Για την ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε και το ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο 4-3-2. Παρακάτω παρουσιάζεται το ιστόγραμμα και τα στατιστικά μεγέθη του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης στις χέρσες περιοχές.



Σχήμα 4.6 Ιστογράμμο για τις χέρσες περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος

Η μέση τιμή του εκτιμώμενου δασικού ύψους είναι 14.1 μέτρα με τυπική απόκλιση 15.4 μέτρα. Με μια πρώτη ματιά το αποτέλεσμα δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αφού η αναμενόμενη τιμή θα έπρεπε να είναι κοντά στο μηδέν. Παρόλ' αυτά το αποτέλεσμα κρίνεται αποδεκτό για τους παρακάτω λόγους.

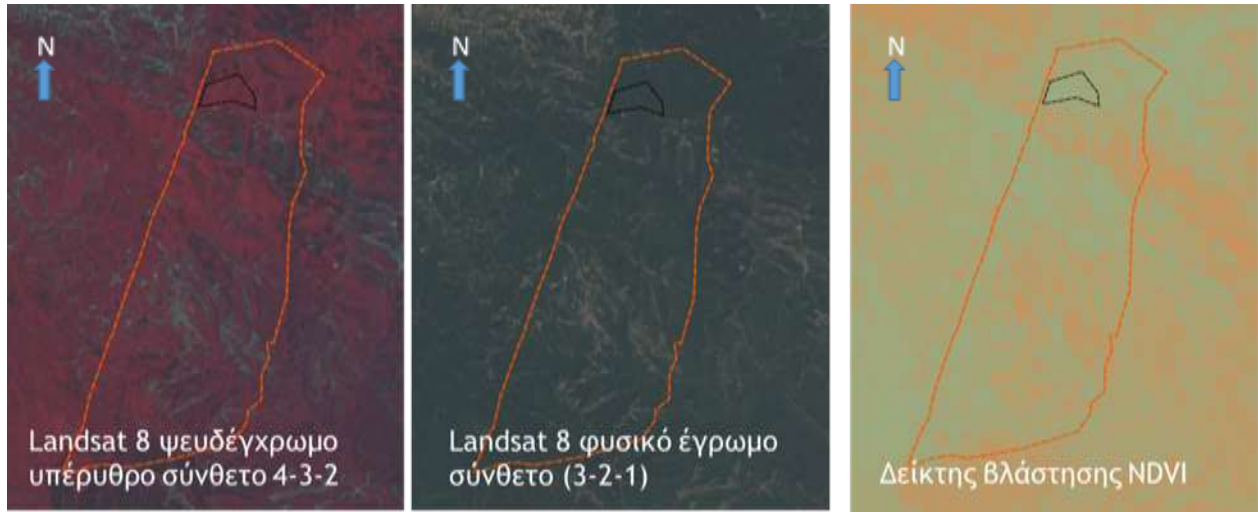


Εικόνα 4.18 Καθορισμός χέρσων περιοχών (κίτρινες)

Οι χέρσες περιοχές που οριοθετήθηκαν με τη χρήση του συντελεστή βλάστησης NDVI περιλαμβάνουν δρόμους, αστικές εκτάσεις, βραχώδεις περιοχές και χέρσο έδαφος. Όπως φαίνεται και στη διπλανή εικόνα ένα μέρος των χέρσων περιοχών (κίτρινες) βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις και ένα άλλο μέρος τους μέσα σε δασικές περιοχές. Τα σφάλματα της μεθοδολογίας στις περιοχές με έντονες κλίσεις όπως έχει προαναφερθεί αναμένονται μεγάλα. Επίσης, οι χέρσες περιοχές μέσα στις δασικές εκτάσεις αναμένεται να παρουσιάσουν μεγάλο σφάλμα λόγω των υψομετρικών ανωμαλιών όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως.

4.10.4 Αξιολόγηση της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης δημιουργήθηκε ένα πολύγωνο πυκνής βλάστησης για την εξέταση της συμπεριφοράς της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.



Τα βασικά οπτικά κριτήρια δημιουργίας του πολυγώνου της πυκνής βλάστησης ήταν:

Εικόνα 4.19 Προϊόντα για τον καθορισμό του πολυγώνου πυκνής βλάστησης

- Έντονο κόκκινο χρώμα από το ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο (4-3-2) που δημιουργήθηκε από απεικόνιση Landsat 8 με ημερομηνία λήψης 1/6/2013.
- Σκούρο πράσινο χρώμα από το φυσικό έγχρωμο σύνθετο (3-2-1) της απεικόνισης Landsat 8.
- Υψηλό δείκτη βλάστησης NDVI (πράσινο χρώμα) από την διαθέσιμη απεικόνιση Landsat 8.

Για το συγκεκριμένο πολύγωνο της δασικής βλάστησης υπολογίστηκε το ιστόγραμμα και βασικά στατιστικά μεγέθη που φαίνονται στη συνέχεια.



Εικόνα 4.20 Ιστόγραμμα για το πολύγωνο πυκνής δασικής βλάστησης

Η μέση τιμή του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης για το πολύγωνο της δασικής βλάστησης ήταν περίπου 25 μέτρα με τυπική απόκλιση περίπου 17.3 μέτρα. Σύμφωνα με τις επίγειες μετρήσεις το μέσο ύψος δασικής κομοστέγης όλης της περιοχής ενδιαφέροντος είναι 15,7 μέτρα με απόκλιση περίπου 1.5 μέτρα

Σημειώνεται ότι στην περιοχή του πολυγώνου, οι πιθανότητες η βλάστηση να έχει μεγάλο ύψος δασικής κομοστέγης είναι μεγάλες λόγω της μεγάλης πυκνότητας της βλάστησης σύμφωνα με το δείκτη NDVI και την απεικόνιση Landsat 8. Με βάση το παραπάνω συλλογισμό η υψηλή εκτιμώμενη μέση τιμή του ύψους δασικής κομοστέγης ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Τέλος, η μεγάλη τυπική απόκλιση του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης σχετίζεται με τα σφάλματα της συμβολομετρικής διαδικασίας αλλά και τα σφάλματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας που έχουν περιγραφεί προηγουμένως.

Κεφάλαιο 5 Βασικές διαπιστώσεις της
εφαρμογής

5.1 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως η μεθοδολογία βασίζεται στην αξιοποίηση των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με την τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR. Η συνεχής εξέλιξη των συστημάτων SAR έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας των διαθέσιμων προϊόντων και τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων με τη χρήση της συμβολομετρίας. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις της μεθόδου είναι η διαθεσιμότητα ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου αναφοράς, η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την επεξεργασία των απεικονίσεων SAR που καταλαμβάνουν μεγάλο αποθηκευτικό χώρο, η χρήση κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας και η θεωρητική γνώση του χρήστη για την επιτυχημένη παρέμβασή του στην ημί-αυτοματοποιημένη διαδικασία της συμβολομετρίας. Τέλος, για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας είναι απαραίτητο να γίνεται η κατάλληλη επιλογή αλγορίθμων και η υλοποίησή τους στο κάθε στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας ή/και η δημιουργία νέων καταλληλότερων αλγορίθμων για την επιτυχία της μεθόδου.

Παρατίθενται τα παρακάτω συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής και της βιβλιογραφικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

1. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα όπως προέκυψε από το εργαλείο της αξιολόγησης των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων από το λογισμικό SARscape κυμαίνεται στα 10.5 μέτρα για τις απεικονίσεις ALOS και στα 10.0 μέτρα για τις απεικονίσεις Cosmo-skymed. Το σχετικά μεγάλο σφάλμα των παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων περιορίζει τις δυνατότητες της συμβατικής συμβολομετρίας για διάφορες εφαρμογές. Παρόλ' αυτά εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία, η εκτίμηση του ύψους δασικής κομοστέγης δίνει υποσχόμενα αποτελέσματα αφού υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.
2. Σύμφωνα με την αξιολόγηση του εκτιμώμενου δασικού ύψους με βάση τα επίγεια δεδομένα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της μεθόδου είναι 6.9 μέτρα. Η χρήση δεδομένων SAR δορυφορικών συστημάτων και η εφαρμογή της μεθόδου σε μικτή δασική περιοχή είναι τα δυο βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε σύγκριση με σχετικές μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό.
3. Ένας σημαντικός περιορισμός της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι η ανιούσα (ascending) και η κατιούσα (descending) τροχιά των δορυφόρων ALOS PALSAR και COSMO skymed αντίστοιχα. Οι διαφορετικές κατευθύνσεις των τροχιών των δορυφόρων είχε ως αποτέλεσμα τη διαφορετική γεωμετρία των απεικονίσεων SAR. Σύμφωνα με τους Carrasco et al. (1997), η διαφορετική προοπτική που έχει ο αισθητήρας του κάθε δορυφορικού συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία γεωμετρικών παραμορφώσεων σε διαφορετικές περιοχές της περιοχής μελέτης. Η αφαίρεση των δυο παραγόμενων ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων για την παραγωγή του συμβολομετρικού ύψους έχει ως αποτελέσματα την παρουσία των γεωμετρικών παραμορφώσεων σε πολλές περιοχές της περιοχής ενδιαφέροντος και κατ' επέκταση την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης. Συμπερασματικά προτείνεται ο συνδυασμός δεδομένων από ανιούσες και κατιούσες τροχιές για την παραγωγή του καθενός ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου με στόχο την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων του.

4. Ένας άλλος βασικός περιορισμός της συγκεκριμένης πρακτικής εφαρμογής είναι η απουσία διαθέσιμων συμβολομετρικών ζευγαριών. Όπως έχει περιγραφεί η επιλογή του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι ένας σημαντικός καθοριστικός παράγοντας της ποιότητας του παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου. Για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία προτείνονται συμβολομετρικά ζευγάρια με μικρή χρονική αποσυσχέτιση. Επίσης, το συμβολομετρικό ζευγάρι που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που εκφράζει τον άνω όροφο της δασικής κομοστέγης προτείνεται να έχει μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αντίστοιχα, το συμβολομετρικό ζευγάρι που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου που εκφράζει την επιφάνεια του εδάφους προτείνεται να έχει μικρές γωνίες πρόσπτωσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του συμβολομετρικού ζευγαριού είναι η γεωμετρική βάση του συμβολομετρικού ζευγαριού. Προτείνεται η επιλογή σχετικά μεγάλης κάθετης συνιστώσας της γεωμετρικής βάσης για τη μείωση του ύψους ασάφειας. Σημειώνεται όμως, ότι όσο μεγαλώνει η κάθετη συνιστώσα της βάσης τόσο δυσκολότερη είναι η διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης. Για την εύρεση του κατάλληλου συμβολομετρικού ζευγαριού είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν οι επιδράσεις που έχει η κάθετη συνιστώσα της βάσης στο ύψος ασάφειας και στη διαδικασία αποκατάστασης της φάσης.
5. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες, τα βασικά προβλήματα της επαναληπτικής συμβολομετρίας (repeat-pass) είναι η χρονική αποσυσχέτιση και το υπολειπόμενο τροχιακό σφάλμα (Wegmuller and Werner, 1995, Lee et al., 1994, Zebker and Villasenor, 1992). Η χρονική αποσυσχέτιση προκαλεί τη μείωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό των ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων ενώ το υπολειπόμενο τροχιακό σφάλμα εμφανίζεται ως συστηματικό σφάλμα στη διεύθυνση του αζιμουθίου. Τα δεδομένα SAR που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάζουν μεγάλες χρονικές διαφορές συγκεκριμένα 46 μέρες για τα δεδομένα ALOS PALSAR και 1 μέρα για τα δεδομένα COSMO-skymed. Σημειώνεται ότι η χρονική αποσυσχέτιση επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απεικονίσεις Cosmo-skymed συγκριτικά με τις απεικονίσεις ALOS. Αυτό συμβαίνει επειδή το επιστρεφόμενο σήμα της μπάντας X επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό λόγω των μεγάλων μεταβολών της κατάστασης του πάνω μέρους της κομοστέγης σε σχέση με τις επιστροφές της μπάντας L που επηρεάζεται λιγότερο από τις μικρότερες μεταβολές του κάτω μέρους της κομοστέγης. Τέλος, αν και με μία μέρα διαφορά λήψης, η μέση τιμή της συνάφειας των απεικονίσεων COSMO-skymed είναι μικρότερη από αυτή των απεικονίσεων ALOS PALSAR.
6. Στις δασικές περιοχές όπου η κομοστέγη έχει μεγαλύτερο πάχος και η δασική δομή είναι πυκνή αναμένεται η μείωση του σχετικού υψομετρικού σφάλματος λόγω της ακριβέστερης αναπαράστασης του άνω ορόφου της κομοστέγης από το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο που έχει προκύψει από τη συμβολομετρία των απεικονίσεων Cosmo-skymed. Ο παραπάνω συλλογισμός μπορεί να επαληθευτεί από τους μελετητές Izzawati et al. (2006) και Woodhouse et al. (2006) όπου συμπέραναν ότι τα σφάλματα του συμβολομετρικού ύψους από δεδομένα SAR μπάντας X και πόλωσης HH μειώνονται όταν μεγαλώνει η πυκνότητα της δασικής κομοστέγης.
7. Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης συμπεραίνεται ότι η αύξηση της κλίσης της περιοχής έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία μεγαλύτερων σφαλμάτων στη μεταβλητή του ύψους δασική κομοστέγης κυρίως λόγω της “ασυνήθιστης” γεωμετρίας των απεικονίσεων SAR.

8. Στις περιοχές όπου η συνάφεια έχει υψηλές τιμές η ακρίβεια της εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης βελτιώνεται σημαντικά.
9. Σύμφωνα με τους Izzawati et al. (2006) και Woodhouse et al. (2006) σε περιοχές με πυκνή δασική κομοστέγη τα αποτελέσματα του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης αναμένονται βελτιωμένα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το παραπάνω δεν ισχύει. Σύμφωνα με την αξιολόγηση που έγινε στο πολύγωνο πυκνής βλάστησης, τα αποτελέσματα είχαν χειρότερη ακρίβεια συγκριτικά με τα συνολικά αποτελέσματα της περιοχής μελέτης. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί για τους παρακάτω λόγους. Η διαδικασία επιλογής του πολυγώνου που υιοθετήθηκε δεν είναι επιστημονικά ορθή. Η οπτική επιλογή μέσα από τα κανάλια (ψευδέγχρωμο υπέρυθρο σύνθετο & φυσικό έγχρωμο σύνθετο) και με βάση το κατώφλι στο δείκτη βλάστησης NDVI περιέχει ασάφειες και ανακρίβειες. Για παράδειγμα στο συγκεκριμένο πολύγωνο μπορεί να περιέχονται και χέρσες περιοχές ή περιοχές με χαμηλή θαμνώδης βλάστηση με αποτέλεσμα την εισαγωγή μεγάλων σφαλμάτων στην εκτίμηση του ύψους της δασικής κομοστέγης.
10. Η δημιουργία χαρτών δασικού ύψους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των δασικών περιοχών. Η γνώση της υψομετρικής πληροφορίας μια δασικής περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση και άλλων δασικών βιοφυσικών παραμέτρων όπως η βιομάζα.

5.2 Περιορισμοί και πλεονεκτήματα της μεθόδου (προτεινόμενης μεθοδολογίας)

Πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας:

- Χαμηλό κόστος απαιτούμενων δεδομένων SAR
- Μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις με τη δυνατότητα εξαγωγή χάρτη ύψους δασικής κομοστέγης
- Μεγάλη κάλυψη γεωγραφικής περιοχής των δεδομένων συγκριτικά με τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους
- Ικανοποιητική ακρίβεια για μεγάλο εύρος δασικών εφαρμογών
- Δυνατότητες βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας όπως περιγράφεται στη επόμενη παράγραφο (5.3)

Μειονεκτήματα της μεθοδολογίας:

- Απαιτούμενη γνώση ακριβούς ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου εδάφους
- Εφαρμογή της τεχνικής της επαναληπτικής συμβολομετρίας. Σύμφωνα με τον Bamler et al. (2009) η χρήση της τεχνικής της συμβολομετρίας απεικονίσεων Χ μπάντας δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις δασικές περιοχές λόγω της μεγάλης χρονικής αποσυσχέτισης των σκεδαστών
- Υποτίμηση του πραγματικού ύψους δασικής κομοστέγης.
- Μεγάλα σφάλματα των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις
- Μεγάλα σφάλματα των εκτιμώμενων αποτελεσμάτων στα όρια των δασικών περιοχών και στα κενά τους (υψομετρικές ασυνέχειες).
- Μεγάλα σφάλματα του εκτιμώμενου δασικού ύψους κομοστέγης σε δασικές περιοχές με μικρή πυκνότητα της δασικής κομοστέγης.

5.3 Προτάσεις

Μετά τη μελέτη της θεωρίας της συμβολομετρικής διαδικασίας για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας και του τελικού αποτελέσματος προτείνονται τα παρακάτω:

1. Χρήση δεδομένων SAR με μικρή χρονική διαφορά λήψεων με στόχο τον περιορισμό της χρονικής αποσυσχέτισης και των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Προτείνεται η χρήση δεδομένων SAR μιας διέλευσης (TanDEM-X) όπου το παραγόμενο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο έχει καλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με αυτό που παράγεται με την τεχνική της επαναληπτικής συμβολομετρίας.
2. Υλοποίηση της μεθόδου με πολλά συμβολομετρικά ζευγάρια έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια του κάθε παραγόμενου ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου και κατ' επέκταση της τελικής ακρίβειας του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης.
3. Χρήση δεδομένων SAR P μπάντας με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους.
4. Τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα που έχουν προκύψει με την τεχνική PolInSAR χρησιμοποιώντας το μοντέλο RVoG (Random Volume over Ground) είναι ακριβή και σε πολλές μελέτες χρησιμοποιούνται έναντι αυτών που έχουν προκύψει με την τεχνική της συμβολομετρίας (Hajnsek et al., 2009). Χρήση πλήρως πολωμένων εικόνων για την εφαρμογή της τεχνικής PolInSAR με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.
5. Η χρήση ακριβέστερων δεδομένων αναφοράς ενισχύει την εκτίμηση του δασικού ύψους και την αξιολόγηση των παραγόμενης υψομετρικής πληροφορίας. Ως δεδομένα αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα πεδίου ή/και μετρήσεις Lidar (π.χ. δεδομένα ICESat GLAS) όπου παρουσιάζουν μεγάλη απόλυτη ακρίβεια (Lee et al., 2011).
6. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη η γνώση του δασικού τύπου αποτελεί έναν παράγοντα που βελτιώνει τη διαδικασία μοντελοποίησης μιας βιοφυσικής δασικής παραμέτρου (Dobson et al., 1992, Ranson et al., 1994, Andersen et al., 2008). Η ταξινόμηση χρησιμοποιώντας απεικονίσεις SAR για το διαχωρισμό των δασικών και μη-δασικών περιοχών είχε καλά αποτελέσματα (Askne et al., 1997, Dobson et al., 1992, Balzter et al., 2001). Η αλληλεπίδραση της μικροκυματικής ακτινοβολίας είναι διαφορετική σε δασικούς τύπους που αλλάζει η δομή τους και οι διηλεκτρικές ιδιότητες τους (Izzawati et al., 2006, Andersen et al., 2006). Προτείνεται η ανάπτυξη μια μεθοδολογίας όπου θα διορθώνονται οι τιμές του συμβολομετρικού ύψους στα όρια των δασικών περιοχών, στα κενά που υπάρχουν μέσα στη δασική κομοστέγη και στους διάφορους δασικούς τύπους χρησιμοποιώντας χάρτες βλάστησης όπου όπως έχει αναφερθεί είναι δυνατόν να παραχθούν και από τις ίδιες απεικονίσεις SAR. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η αφαίρεση εκτιμήσεων με μεγάλα σφάλματα για τη βελτίωση των τελικών αποτελεσμάτων του εκτιμώμενου ύψους δασικής κομοστέγης. Η εξαγωγή μια εικόνας ταξινόμησης μόνο από δεδομένα SAR για τη χρήση της στη διαδικασία εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης είναι ένας δύσκολος στόχος. Σημειώνεται ότι η χρήση της συμβολομετρικής συνάφειας βελτιώνει τα αποτελέσματα της ταξινόμησης (Blaes et al., 2003). Σε περιπτώσεις όπου είναι αδύνατος ο διαχωρισμός των κατηγοριών κάλυψης εδάφους από εικόνες SAR είναι δυνατή η χρήση οπτικών εικόνων και αντίστροφα (Amarsaikhan & Douglas, 2004). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί υπάρχει ένα πλήθος ερευνών όπου συνδυάζονται δεδομένα από οπτικά συστήματα και συστήματα SAR για τη βελτίωση της διαδικασίας της ταξινόμησης

συγκριτικά με τη χρήση δεδομένων από ένα μόνο τηλεπισκοπικό σύστημα παρατήρησης (Blaes et al., 2005, Li and Chen , 2005, Shupe and Marsh, 2004).

7. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα όπου αφαιρέθηκαν και οι τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν χωρίς τη χρήση διορθωτικών παραμέτρων σχετικά με την κλίση του εδάφους και τη γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για τη διόρθωση των τιμών του συμβολομετρικού ύψους λόγω της αλλαγής των κλίσεων της επιφάνειας του εδάφους αλλά και λόγω των διάφορων γωνιών πρόσπτωσης (incidence angle) της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα στη μέλετη (Izzawati et al., 2006) δημιουργήθηκε μοντέλο διόρθωσης για τη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης σε μια απεικόνιση SAR. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην περιοχή των εγγύτερων πλαγίων αποστάσεων (near-range) η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη με αποτέλεσμα η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολία να είναι μεγαλύτερη, σε αντίθεση με την περιοχή των απώτερων πλαγίων αποστάσεων (far-range) όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα η διαπεραστικότητα της μικροκυματικής ακτινοβολίας να είναι μικρότερη. Εναλλακτικά, σύμφωνα με τους μελετητές Kellndorfer et al. (2004) και Sexton et al. (2009) το συμβολομετρικό ύψος διορθώθηκε προσδιορίζοντας ένα πλήθος διορθωτικών συντελεστών με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής με δεδομένα πεδίου.

Βιβλιογραφία

- Πλατάκος, Α., Παράσχου, Χ., Β., Κ., 2002. Μέθοδοι Αποκατάστασης Φάσης στη Συμβολομετρία. Εφαρμογή και Αξιολόγηση δύο μεθόδων. Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ 1, 57–65.
- Ackermann, N., Thiel, C., Borgeaud, M., Schmullius, C., 2010. Potential of fusion of SAR and optical satellite imagery for biomass estimation in temperate forested areas, in: Proceedings of the ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway.
- Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., Ting, K.C., 2011. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and Bioenergy* 35, 2455–2469.
- Ahmed, R.U., 2012. Accuracy of biomass and structure estimates from radar and lidar. University of Massachusetts - Amherst.
- Al Jassar, H.K., Rao, K.S., 2011. Observation of atmospheric effects on repeat-pass interferometric synthetic aperture radar over the Kuwait desert. *Int. J. Remote Sens.* 32, 7613–7629.
- Amarsaikhan, D., Douglas, T., 2004. Data fusion and multisource image classification. *Int. J. Remote Sens.* 25, 3529–3539.
- Amini, J., Sumantyo, J., 2011. SAR and Optical Images for Forest Biomass Estimation, in: Darko, M. (Ed.), *Biomass—Detection, Production and Usage*. InTech.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Carson, W.W., Reutebuch, S.E., Mercer, B., Allan, J., 2003. A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and INSAR data in a Pacific Northwest conifer forest. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 34, 211–217.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Reutebuch, S.E., 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sens. Environ.* 441–449.
- Andersen, H., Mcgaughey, R.J., Reutebuch, S.E., 2008. Assessing the influence of flight parameters, interferometric processing, slope and canopy density on the accuracy of X band IFSAR-derived forest canopy height. *Int. J. Remote Sens.* 29, 1495–1510.
- Andersen, H., Reutebuch, S.E., Mcgaughey, R.J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Can. J. Remote Sens.* 32, 355–366.
- Askne, J., Dammert, P.B.G., Ulander, L.M.H., Smith, G., 1997. C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 35, 25–35.
- Askne, J., Fransson, J., Santoro, M., Soja, M., Ulander, L., 2013. Model-Based Biomass Estimation of a Hemi-Boreal Forest from Multitemporal TanDEM-X Acquisitions. *Remote Sens.* 5, 5574–5597.
- Austin, J.M., Mackey, B.G., Van Niel, K.P., 2003. Estimating forest biomass using satellite radar: an exploratory study in a temperate Australian Eucalyptus forest. *For. Ecol. Manage.* 176, 575–583.
- Balzter, H., 2001. Forest mapping and monitoring with interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Prog. Phys. Geogr.* 25, 159–177.

- Balzter, H., Luckman, A., Skinner, L., Rowland, C., Dawson, T., n.d. Observations of forest stand top height and mean height from interferometric SAR and LiDAR over a conifer plantation at Thetford Forest, UK. *Int. J. Remote Sens.* 28, 1173–1197.
- Balzter, H., Rowland, C., Saich, P., n.d. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. *Remote Sens. Environ.* 108, 224–239.
- Bamler, R., Eineder, M., Adam, N., Zhu, X., Gernhardt, S., 2009. Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR. *Photogramm. - Fernerkundung - Geoinf.* 2009, 407–419.
- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 14, R1–R54.
- Baran, I., Stewart, M.P., Kampes, B.M., Perski, Z., Lilly, P., 2003. A modification to the Goldstein radar interferogram filter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41, 2114–2118.
- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lopes, A., Mougin, E., Hsu, C.C., Han, H.C., Kong, J.A., Shin, R.T., 1994. Retrieval of forest biomass from SAR data. *Int. J. Remote Sens.* 15, 2777–2796.
- Belcher, D.P., 2008. Theoretical limits on SAR imposed by the ionosphere. *Radar, Sonar Navig. IET* 2, 435–448.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T.A., Anthes, R.A., Rocken, C., Ware, R.H., 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteorol.* 33, 379–386.
- Blaes, X., Defourny, P., 2003. Retrieving crop parameters based on tandem ERS 1/2 interferometric coherence images. *Remote Sens. Environ.* 88, 374–385.
- Blaes, X., Vanhalle, L., Defourny, P., 2005. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. *Remote Sens. Environ.* 96, 352–365.
- Boncori, J., 2006. Error modelling for SAR interferometry and signal processing issues related to the use of an encoding SAR transponder. University of Rome Tor Vergata'.
- Breit, H., Eineder, M., Holzner, J., Runge, H., Bamler, R., 2003. Traffic Monitoring using SRTM Along-Track Interferometry. *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2, 1187–1189.
- Budillon, A., Pascazio, V., Schirinzi, G., 2008. Multichannel Along-Track Interferometric SAR Systems: Moving Targets Detection and Velocity Estimation. *Int. J. Navig. Obs.* 2008, 16.
- Carrasco, D., 1998. SAR Interferometry for digital elevation model generation and differential applications. Polytechnic University of Catalonia.
- Carrasco, D., Diaz, J., Broquetas, A., Arbiol, R., Castillo, M., Pala, V., 1997. Ascending-descending orbit combination SAR interferometry assessment (DEM). *Third ERS Symp. Sp. Serv. our Environ.* 414, 1789.
- Castel, T., Guerra, F., Caraglio, Y., Houllier, F., 2002. Retrieval biomass of a large Venezuelan pine plantation using JERS-1 SAR data. Analysis of forest structure impact on radar signature. *Remote Sens. Environ.* 79, 30–41.

- Catani, F., Farina, P., Moretti, S., Nico, G., Strozzi, T., 2005. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: Estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology* 66, 119–131.
- Chang, H.Y., Chen, C.W., Lee, C.K., Hu, C.P., 1998. The Tapestry Cellular Automata phase unwrapping algorithm for interferogram analysis. *Opt. Lasers Eng.* 30, 487–502.
- Chen, J., Zhang, H., Wang, C., Tang, Y., 2011. Forest Model for Height Estimation Using POLinSAR Data, in: *Microwave Remote Sensing and Polarimetry, SAR*. pp. 1391–1394.
- Chen, W., Blain, D., Li, J., Keohler, K., Fraser, R., Zhang, Y., Leblanc, S., Olthof, I., Wang, J., McGovern, M., 2009. Biomass measurements and relationships with Landsat-7/ETM+ and JERS1/SAR data over Canada's western sub-arctic and low arctic. *Int. J. Remote Sens.* 30, 2355–2376.
- Cloude, S., Papathanassiou, K., 1997. Polarimetric optimisation in radar interferometry. *Electron. Lett.* 33, 1176–1178.
- Cloude, S., Papathanassiou, K.P., 2003. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.* 150, 125–134.
- Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1551–1565.
- Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., 2008. Forest Vertical Structure Estimation using Coherence Tomography. *Geosci. Remote Sens. Symp. IGARSS 2008* 5, V–275 – V–278.
- Cutler, M.E.J., Boyd, D.S., Foody, G.M., Vetrivel, a., 2012. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An assessment of predictions between regions. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 70, 66–77.
- Das, A., Agrawal, R., Mohan, S., 2014. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto Int.* 1–9.
- Delacourt, C., Briole, P., Achache, J., 1998. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2849–2852.
- Ding, X., Li, Z., Zhu, J., Feng, G., Long, J., 2008. Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. *Sensors* 8, 5426–5448.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S., Christensen, N., 1992. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 412–415.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Pierce, L.E., Sharik, T.L., Bergen, K.M., Kellndorfer, J., Kendra, J.R., Li, E., Lin, Y.C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., Siqueira, P., 1995. Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33, 877–895.
- Dowman, I., Balan, P., Renner, K., Fischer, P., 2003. An evaluation of NEXTMap Terrain Data in the context of UK national datasets, A report from GetMapping, University

- Dowman, I., Fischer, P., 2003. Evaluation of IFSAR and LIDAR data for flood risk assessment, in: Proceedings of ISPRS Joint Workshop of ISPRS WG I/3 and II/2, Three Dimensional Mapping from InSAR and LIDAR. Portland Oregon.
- Drake, J.B., Dubayah, R.O., Clark, D.B., Knox, R.G., Blair, J.B., Hofton, M. a, Chazdon, R.L., Weishampel, J.F., Prince, S., 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sens. Environ.* 79, 305–319.
- Dubois-Fernandez, P., 2007. Forest parameter retrieval from P band data: Pol-and PolIn-SAR. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 13*, 1647–1655.
- Dutra, L. V, Santos, J.R., Freitas, C.C., Mura, J.C., Neeff, T., Elmiro, M.A.T., Moura, P., 2006. Digital Height Modeling (DHM) of Tropical Forests using multi-frequency InSAR methodology, in: IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium IGRASS. pp. 2190–2192.
- Emardson, T.R., Simons, M., Webb, F.H., 2003. Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *J. Geophys. Res.* 108, 2231.
- Englhart, S., Keuck, V., Siegert, F., 2012. Modeling Aboveground Biomass in Tropical Forests Using Multi-Frequency SAR Data — A Comparison of Methods. *Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing, IEEE J.* 5, 298–306.
- Fensham, R.J., Fairfax, R.J., Holman, J.E., Whitehead, P.J., 2002. Quantitative assessment of vegetation structural attributes from aerial photography. *Int. J. Remote Sens.* 23, 2293–2317.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37, 705–715.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 8–20.
- Fisher, J.I., Hurtt, G.C., Thomas, R.Q., Chambers, J.Q., 2008. Clustered disturbances lead to bias in large-scale estimates based on forest sample plots. *Ecol. Lett.* 11, 554–63.
- Foody, G.M., Green, R.M., Lucas, R.M., Curran, P.J., Honzak, M., Do Amaral, I., 1997. Observations on the relationship between SIR-C radar backscatter and the biomass of regenerating tropical forests. *Int. J. Remote Sens.* 18, 687–694.
- Fornaro, G., Franceschetti, G., Lanari, R., 1996. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 34, 720–727.
- Franklin, S.E., Hall, R.J., Smith, L., Gerylo, G.R., 2003. Discrimination of conifer height, age and crown closure classes using Landsat-5 TM imagery in the Canadian Northwest Territories. *Int. J. Remote Sens.* 24, 1823–1834.
- Frey, O., Morsdorf, F., Meier, E., 2008. Tomographic Imaging of a Forested Area By Airborne Multi-Baseline P-Band SAR. *Sensors* 8, 5884–5896.
- Gama, F.F., Dos Santos, J.R., Mura, J.C., 2010. Eucalyptus Biomass and Volume Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR Data. *Remote Sens.* 2, 939–956.

- Gao, B.-C., Kaufman, Y.J., 2003. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *J. Geophys. Res. Atmos.* 108, 10.
- Gatelli, F., Guamieri, A.M., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F., 1994. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32, 855–865.
- Gaveau, D.L.A., Balzter, H., Plummer, S., 2003. Forest woody biomass classification with satellite-based radar coherence over 900 000 km² in Central Siberia. *For. Ecol. Manage.* 174, 65–75.
- Gens, R., Genderen, J. L., 1996. Review Article SAR interferometry — issues , techniques , applications. *Int. J. Remote Sens.* 17, 1803–1835.
- Gernhardt, S., Bamler, R., 2010. Towards Deformation Monitoring of Single Buildings - Persistent Scatterer Interferometry using TerraSAR-X Very High Resolution Spotlight Data, in: *In Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on. VDE*, pp. 1138–1141.
- Geudtner, D., Winter, R., Vachon, P.W., 1996. Flood monitoring using ERS-1 SAR interferometry coherence maps. *Geosci. Remote Sens. Symp. 1996. IGARSS'96. Remote Sens. a Sustain. Futur. Int. IEEE 2*, 966–968.
- Ghasemi, N., Sahebi, M.R., Mohammadzadeh, A., 2010. A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data. *Int. J. Geomatics Geosci.* 1, 776–788.
- Goel, K., Adam, N., 2012. An advanced algorithm for deformation estimation in non-urban areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 100–110.
- Goh, Y.J., Miettinen, J., Chia, S.C., Liew, S.C., Kwoh, L.K., 2011. Integrating ALOS PALSAR and SPOT satellite imagery for tropical forest biomass estimation, in: *32nd Asian Conference on Remote Sensing. Taipei*, pp. 1–33.
- Goldstein, R.M., Werner, Charles, L., 1998. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications. *Geophys. Res. Lett.* 25, 4035–4038.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., 1987. Interferometric radar measurements of ocean surface currents. *Nature* 328, 707–709.
- Gong, W., Meyer, F., Webley, P.W., Morton, D., Liu, S., 2010. Performance analysis of atmospheric correction in InSAR data based on the Weather Research and Forecasting Model (WRF), in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International. IEEE. Ieee*, pp. 2900–2903.
- González, J.H., Bachmann, M., Krieger, G., Fiedler, H., 2010. Development of the TanDEM-X Calibration Concept : Analysis of Systematic Errors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 48, 716–726.
- Gruber, A., Wessel, B., Huber, M., Roth, A., 2012. Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 39–49.
- Guillaso, S., Reigber, A., 2005. Scatterer characterisation using polarimetric SAR tomography. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 4, 2685–2688.
- Hagberg, J.O., Ulander, L.M.H., Askne, J., 1995. Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 33, 331–340.

- Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S., Papathanassiou, K.P., 2009. Tropical-Forest-Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR : The INDREX-II Campaign. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 47, 481–493.
- Hanssen, R., 1998. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. The NetherlandsQ Delft University Press.
- Hanssen, R.F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer, Dordrecht.
- Haralick, R., Shanmugan, K., Dinstein, I.H., 1973. Textural features for image classification. *Syst. Man Cybern. IEEE Trans.* 610–621.
- Harrell, P.A., Kasischke, E.S., Bourgeau-Chavez, L.L., Haney, E.M., Christensen Jr, N.L., 1997. Evaluation of approaches to estimating aboveground biomass in southern pine forests using SIR-C data. *Remote Sens. Environ.* 59, 223–233.
- Hensley, S., Munjy, R., Rosen, P., 2001. Interferometric synthetic aperture radar (IFSAR), Digital elevation model technologies and applications: The DEM users manual, in: American Society for Photogrammetry, and R.S. (Ed.), ASPRS, pp. 174–176.
- Hensley, S., Rosen, P.A., Gurrola, E., 2000. Topographic map generation from the Shuttle Radar Topography Mission C-band SCANSAR interferometry, in: Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics.
- Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B., 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sens. Environ.* 84, 295–308.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J.B., Hofton, M., Hunsaker, C., 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sens. Environ.* 102, 63–73.
- Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D., Levine, E., 2007. Exploring LiDAR–RaDAR synergy—predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR. *Remote Sens. Environ.* 106, 28–38.
- Imhoff, M.L., 1995. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 33, 511–518.
- Izzawati, Wallington, E.D., Woodhouse, I.H., 2006. Forest Height Retrieval From Commercial X-Band Products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 863–870.
- Jensen, J.R., 2005. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice Hall series in geographic information science.
- Joughin, I., Gray, L., Bindschadler, R., Price, S., Morse, D., Hulbe, C., Mattar, K., Werner, C., 1999. Tributaries of West Antarctic Ice Streams Revealed by RADARSAT Interferometry. *Science (80-)*. 286, 283–286.
- Just, D., Bamler, R., 1994. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics* 33, 4361–4368.

- Karathanasi, B., 2012. Microwave Remote Sensing. National Technical University of Athens.
- Karathanasi, B., Saqellari-Likoka, A., 2014. Solving rank-deficient linear systems for the estimation of the atmospheric phase delay parameter. *Universal Journal of Geoscience*. 2, 35–42.
- Kasischke, E.S., Melack, J.M., Craig Dobson, M., 1997. The use of imaging radars for ecological applications—A review. *Remote Sens. Environ.* 59, 141–156.
- Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J.A., Hunsaker, C., Vona, J., Clutter, M., 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sens. Environ.* 93, 339–358.
- Kleidon, A., 2012. How does the Earth system generate and maintain thermodynamic disequilibrium and what does it imply for the future of the planet? *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 370, 1012–40.
- Koch, B., 2010. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 581–590.
- Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P., Younis, M., Moreira, A., 2010. Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying. *Proc. IEEE* 98, 816–843.
- Kuplich, T.M., Curran, P.J., Atkinson, P.M., 2005. Relating SAR image texture to the biomass of regenerating tropical forests. *Int. J. Remote Sens.* 26, 4829–4854.
- Kuplich, T.M., Salvatori, V., Curran, P.J., 2000. JERS-1/SAR backscatter and its relationship with biomass of regenerating forests. *Int. J. Remote Sens.* 21, 2513–2518.
- Kwoh, L.K., Chang, E.C., Heng, W.C.A., Lim, H., 1994. DTM generation from 35-day repeat pass ERS-1 interferometry, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation.*, International. IEEE. pp. 2288–2290.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., Guyon, D., 1992. Relating forest biomass to SAR data. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 30, 403–411.
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M.W.J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K.P., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., Shugart, H., Ulander, L.M.H., 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sens. Environ.* 115, 2850–2860.
- Lee, J.-S., Hoppel, K.W., Mango, S.A., Miller, A.R., 1994. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 32, 1017–1028.
- Lee, S., Ni-Meister, W., Yang, W., Chen, Q., 2011. Physically based vertical vegetation structure retrieval from ICESat data: Validation using LVIS in White Mountain National Forest, New Hampshire, USA. *Remote Sens. Environ.* 115, 2776–2785.
- Lee, S.-K., Kugler, F., Papathanassiou, K.P., Hajnsek, I., 2009. Polarimetric sar interferometry for forest application at P-band: potentials and challenges. *Geosci. Remote Sens. Symp. 2009 IEEE Int. IGARSS 2009* 4, 13–16.

- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J., 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *Bioscience* 52, 19–30.
- Li, F., Goldstein, R.M., 1990. Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Geosci. Remote Sens.* 28, 88–97.
- Li, J., Chen, W., 2005. A rule-based method for mapping Canada's wetlands using optical, radar and DEM data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 5051–5069.
- Li, S., Benson, C., Gens, R., Lingle, C., 2008. Motion patterns of Nabesna Glacier (Alaska) revealed by interferometric SAR techniques. *Remote Sens. Environ.* 112, 3628–3638.
- Li, Z., 2005. Correction of Atmospheric Water Vapour Effects on Repeat-Pass SAR Interferometry Using GPS, MODIS and MERIS Data. University College London.
- Li, Z., Bethel, J., 2008. Image coregistration in sar interferometry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 37, 433–438.
- Li, Z., Fielding, E.J., Cross, P., Muller, J.-P., 2006. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. *J. Geophys. Res.* 111, B02404.
- Li, Z., Ding, X., Liu, G., 2004. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 66, 907–917.
- Li, Z.W., Ding, X.L., Huang, C., Wadge, G., Zheng, D.W., 2006. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 68, 1189–1194.
- Liao, M., Jiang, H., Wang, Y., Wang, T., Zhang, L., 2013. Improved topographic mapping through high-resolution SAR interferometry with atmospheric effect removal. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 80, 72–79.
- Liao, M., Lin, H., Zhang, Z., 2004. Automatic Registration of InSAR Data Based on Least-Square Matching and Multi-Step Strategy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 70, 1139–1144.
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J., 2008. Remote sensing and image interpretation, 6th ed. John Wiley & Sons, New York.
- López-Martínez, C., Fàbregas, X., Pipia, L., 2011. Forest parameter estimation in the Pol-InSAR context employing the multiplicative–additive speckle noise model. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 66, 597–607.
- Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *Int. J. Remote Sens.* 27, 1297–1328.
- Luckman, A., Baker, J., Honzák, M., Lucas, R., 1998. Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR : Seasonal Variation, Confidence Limits, and Application to Image Mosaics. *Remote Sens. Environ.* 63, 126–139.

- Luckman, A., Baker, J., Kuplich, T.M., Yanasse, C. da C.F., Frery, A.C., 1997. A Study of the Relationship between Radar Backscatter and Regenerating Tropical Forest Biomass for Spaceborne SAR Instruments. *Remote Sens. Environ.* 60, 1–13.
- Madsen, S.N., Zebker, H.A., Martin, J.A.N.M., 1993. Topographic mapping using radar interferometry: Processing techniques. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 31, 246–256.
- Martone, M., Bräutigam, B., Rizzoli, P., Gonzalez, C., Bachmann, M., Krieger, G., 2012. Coherence evaluation of TanDEM-X interferometric data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 21–29.
- Matis, K.G., Tsankov, G., Alexandrov, A., Raev, I., Yossifov, N., Dimitrov, E., Palamarev, E., 1996. Aboveground biomass of *Quercus frainetto* in the University forest at Taxiarchis, Greece, in: *Study, Conservation and Utilisation of Forest Resources. Proceedings of the Second Balkan Scientific Conference. Sofia*, pp. 201–206.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C.J., 2000. Predicting Forest Stand Characteristics with Airborne Scanning Lidar. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 66, 1367–1372.
- Mercer, B., 2004. DEMs Created from Airborne IFSAR – An Update, in: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of XXth ISPRS Congress. Istanbul, Turkey*.
- Mercer, B., Zhang, Q., Lumsdon, P., 2007. L-And P-Band Polarimetric InSAR for DEM Extraction Beneath Tropical Canopy Using INDREX-II Data Sets, in: *Proceedings of Advanced SAR Workshop 2007*. pp. 11–13.
- Mette, T., Papathanassiou, K., Hajnsek, I., Zimmermann, R., 2003. Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry. *Appl. SAR Polarim. Polarim. Interferom.* 529, 23–29.
- Meyer, F., Kampes, B., Bamler, R., Fischer, J., 2005. Methods for Atmospheric Correction in INSAR Data, in: *International Workshop on ERS SAR Interferometry: Fringe'05*.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*, 1st ed. John Wiley & Sons, New York.
- Miller, D.R., Quine, C.P., Hadley, W., 2000. An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage. *For. Ecol. Manage.* 135, 279–288.
- Mitchard, E.T. a., Saatchi, S.S., Woodhouse, I.H., Nangendo, G., Ribeiro, N.S., Williams, M., Ryan, C.M., Lewis, S.L., Feldpausch, T.R., Meir, P., 2009. Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. *Geophys. Res. Lett.* 36.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P., 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geosci. Remote Sens.* 1, 6–43.
- Næsset, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80, 88–99.
- Næsset, E., Gobakken, T., Solberg, S., Gregoire, T.G., Nelson, R., Ståhl, G., Weydahl, D., 2011. Model-assisted regional forest biomass estimation using LiDAR and InSAR as auxiliary data: A case study from a boreal forest area. *Remote Sens. Environ.* 115, 3599–3614.

- Nan, W., Dazheng, F., 2004. InSAR Phase Unwrapping Algorithm Using the Branch-Cut and Finite Element Method, in: *Signal Processing, 2004. Proceedings. ICSP'04. 2004 7th International Conference On.* IEEE. pp. 1942–1945.
- Neeff, T., Dutra, L. V., Santos, J. dos, Freitas, C.C., Araujo, L.S., 2005. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. *For. Sci.* 51, 585–594.
- Neumann, M., Saatchi, S.S., Ulander, L.M.H., Fransson, J.J.E., 2012. Assessing Performance of L- and P-Band Polarimetric Interferometric SAR Data in Estimating. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 50, 714–726.
- NOAA, 2011. Global Land Cover [WWW Document]. URL <http://sos.noaa.gov/datasets/Land/landcover.html>
- Ouchi, K., 2013. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sens.* 5, 716–807.
- Paine, D.P., Kiser, J.D., 2003. *Aerial photography and image interpretation.* John Wiley & Sons.
- Perissin, D., Wang, T., 2011. Time-Series InSAR Applications Over Urban Areas in China. *Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing, IEEE J.* 4, 92–100.
- Praks, J., Antropov, O., Hallikainen, M.T., 2012. LIDAR-Aided SAR Interferometry Studies in Boreal Forest : Scattering Phase Center and Extinction Coefficient at X- and L-Band. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 50, 3831–3843.
- Preiss, M., Gray, D., Stacy, N., 2003. A change detection statistic for repeat pass interferometric SAR, in: *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings.(ICASSP'03).* 2003 IEEE International Conference on. pp. 241–244.
- Pulliainen, J., Engdahl, M., Hallikainen, M., 2003. Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume. *Remote Sens. Environ.* 85, 397–409.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R., 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 57, 241–262.
- Ranson, K.J., Sun, G., 1994. Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 32, 388–396.
- Ranson, K.L., Sun, G., Weishampel, J.F., Knox, R.G., 1997. Forest Radar Biomass from Combined Ecosystem and Backscatter Modeling. *Remote Sens. Environ.* 59, 118–133.
- Rauste, Y., 2005. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. *Remote Sens. Environ.* 97, 263–275.
- Rauste, Y., Hame, T., Pulliainen, J., Heiska, K., Hallikainen, M., 1994. Radar-based forest biomass estimation. *Int. J. Remote Sens.* 15, 2797–2808.
- Reigberl, A., Moreira, J.R., 1997. Phase Unwrapping by Fusion of Local and Global Methods, in: *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS'97. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International.* IEEE. pp. 869–871.

- Renaudin, E., Mercer, B., Zhang, Q., Collins, M.J., 2012. Biomass estimation using vertical forest structure from SAR tomography: a case study in canadian boreal forest, in: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B8, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. pp. 431–435.
- Ricchetti, E., 2005. Comparison of Satellite Imagery DEMs Produced Using Photogrammetry and Radargrammetry Techniques, in: *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Ieee*, pp. 2903–2906.
- Riddick, S.N., Schmidt, D.A., Deligne, N.I., 2012. An analysis of terrain properties and the location of surface scatterers from persistent scatterer interferometry. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 50–57.
- Rizzoli, P., Bräutigam, B., Kraus, T., Martone, M., Krieger, G., 2012. Relative height error analysis of TanDEM-X elevation data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 30–38.
- Robinson, C., Saatchi, S., Neumann, M., Gillespie, T., 2013. Impacts of Spatial Variability on Aboveground Biomass Estimation from L-Band Radar in a Temperate Forest. *Remote Sens.* 5, 1001–1023.
- Romeiser, R., Runge, H., Suchandt, S., Sprenger, J., Weilbeer, H., Sohrmann, A., Stammer, D., 2007. Current Measurements in Rivers by Spaceborne Along-track InSAR. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 45, 4019–4031.
- Rossi, C., Rodriguez Gonzalez, F., Fritz, T., Yague-Martinez, N., Eineder, M., 2012. TanDEM-X calibrated Raw DEM generation. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 12–20.
- Rufino, G., Moccia, A., Esposito, S., 1998. DEM generation by means of ERS tandem data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1905–1912.
- Saatchi, S., Marlier, M., Chazdon, R.L., Clark, D.B., Russell, A.E., 2011. Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass. *Remote Sens. Environ.* 115, 2836–2849.
- Saatchi, S.S., Moghaddam, M., 2000. Estimation of crown and stem water content and biomass of boreal forest using Polarimetric SAR imagery. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 38, 697–709.
- Sambatti, J.B.M., Leduc, R., Lübeck, D., Moreira, J.R., Dos Santos, J.R., 2012. Assessing Forest Biomass and Exploration in the Brazilian Amazon with Airborne InSAR : an Alternative for REDD. *Open Remote Sens. J.* 5, 21–36.
- Sandberg, G., 2013. Estimation of Forest Biomass and Faraday Rotation using Ultra High Frequency Synthetic Aperture Radar. Chalmers University of Technology.
- Sandberg, G., Ulander, L.M.H., Fransson, J.E.S., Holmgren, J., Le Toan, T., 2011. L- and P-band backscatter intensity for biomass retrieval in hemiboreal forest. *Remote Sens. Environ.* 115, 2874–2886.
- Santos, J.R., Freitas, C. da C., Araujo, L.S., Dutra, L.V., Mura, J.C., Gama, F.F., Soler, L.S., Sant'Anna, S.J.S., 2003. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sens. Environ.* 87, 482–493.

- Santos, J.R., Gama, F.F., Narvaes, I.S., Mura, J.C., 2012. Forest Biomass Modelling by Polarimetric and Interferometric SAR Data : the Brazilian Scientific Missions, in: 32nd EARSeL Symposium: Advances in Geosciences. pp. 244–250.
- Santos, J.R., Neeff, T., Dutra, L. V., Araujo, L.S., Gama, F.F., Elmiro, M.A.T., 2004. Tropical forest biomass mapping from dual frequency SAR interferometry (X-and P-bands). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 35.
- Santos, J.R., Pardi Lacruz, M.S., Araujo, L.S., Keil, M., 2002. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1217–1229.
- Sarabandi, K., Lin, Y.-C., 2000. Simulation of interferometric SAR response for characterizing the scattering phase center statistics of forest canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 115–125.
- Sarker, L.R., Nichol, J., Iz, H.B., Ahmad, B. Bin, Rahman, A.A., 2013. Forest Biomass Estimation Using Texture Measurements of High-Resolution Dual-Polarization C-Band SAR Data. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 51, 3371–3384.
- Saqellari-Likoka, A., Karathanasi, B., 2008. An approach for solving rank-deficient systems that enable atmospheric path delay and water vapour content estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 3187–3195.
- Scheiber, R., Moreira, A., 2000. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 2179–2191.
- Schreuder, H.T., 1993. Sampling methods for multiresource forest inventory. John Wiley & Sons.
- Schunert, A., Soergel, U., 2012. Grouping of Persistent Scatterers in high-resolution SAR data of urban scenes. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 73, 80–88.
- Schwäbisch, M., 1998. A Fast and Efficient Technique for SAR Interferogram Geocoding, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS'98. 1998 IEEE International. pp. 1100–1102.
- Selva, J., Lopez-Sanchez, J.M., 2007. Efficient Interpolation of SAR Images for Coregistration in SAR Interferometry. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 4, 411–415.
- Sexton, J.O., Bax, T., Siqueira, P., Swenson, J.J., Hensley, S., 2009. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. *For. Ecol. Manage.* 257, 1136–1147.
- Shimada, M., 2010. Ortho-Rectification and Slope Correction of SAR Data Using DEM and Its Accuracy Evaluation. *Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing, IEEE J.* 3, 657–671.
- Shupe, S.M., Marsh, S.E., 2004. Cover- and density-based vegetation classifications of the Sonoran Desert using Landsat TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sens. Environ.* 93, 131–149.
- Sjöberg, L., 2011. Quality Estimates in Geoid Computation by EGM08. *J. Geod. Sci.* 1, 361–366.
- Soja, M.J., Sandberg, G., Ulander, L.M.H., 2010. Topographic correction for biomass retrieval from P-band SAR data in boreal forests, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International. *IEEE*, pp. 4776–4779.

- Solberg, S., Astrup, R., Breidenbach, J., Nilsen, B., Weydahl, D., 2013. Detection of Forest Clear-Cuts with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Tandem-X InSAR Data. *Remote Sens.* 5, 5449–5462.
- Solberg, S., Astrup, R., Gobakken, T., Næsset, E., Weydahl, D.J., 2010. Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR. *Remote Sens. Environ.* 114, 2353–2360.
- Suchandt, S., Runge, H., Steinbrecher, U., 2010. Ship detection and measurement using the TerraSAR-X dual-receive antenna mode, in: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2010*. Ieee, pp. 2860–2863.
- Sun, G., Ranson, K.J., Kharuk, V.I., 2002. Radiometric slope correction for forest biomass estimation from SAR data in the Western Sayani Mountains, Siberia. *Remote Sens. Environ.* 79, 279–287.
- Thiel, C.J., Thiel, C., Schmullius, C.C., 2009. Operational Large-Area Forest Monitoring in Siberia Using ALOS PALSAR Summer Intensities and Winter Coherence. *Geosci. Remote Sensing, IEEE Trans.* 47, 3993–4000.
- Treuhaft, R.N., Asner, G.P., Law, B.E., 2003. Structure-based forest biomass from fusion of radar and hyperspectral observations. *Geophys. Res. Lett.* 30, 25.1–25.4.
- Treuhaft, R.N., Asner, G.P., Law, B.E., Van Tuyl, S., 2002. Forest leaf area density profiles from the quantitative fusion of radar and hyperspectral data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, ACL 7–1–ACL 7–13.
- Treuhaft, R.N., Siqueira, P.R., 2004. The calculated performance of forest structure and biomass estimates from interferometric radar. *Waves in Random Media* 14, S345–S358.
- Tsui, O.W., Coops, N.C., Wulder, M. a., Marshall, P.L., McCardle, A., 2012. Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate above-ground biomass and biomass components in a coastal temperate forest. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 69, 121–133.
- Tsui W. L. Olivier, 2013. Integrating discrete return scanning Lidar and spaceborne radar to support Aboveground Biomass assessments. The University of British Columbia.
- Viergever, K.M., Woodhouse, I.H., Marino, A., Brolley, M., Stuart, N., 2008. Sar Interferometry For Estimating Above-Ground Biomass Of Savanna Woodlands In Belize, in: *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE International*. Vol. 5. pp. V–290–V293.
- Viergever, K.M., Woodhouse, I.H., Marino, A., Brolly, M., Stuart, N., 2009. Backscatter and Interferometry for estimating above-ground biomass of sparse woodland: a case study in Belize, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*. pp. 1047–1050.
- Walker, W.S., Kelldorfer, J.M., Pierce, L.E., 2007. Quality assessment of SRTM C- and X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height. *Remote Sens. Environ.* 106, 428–448.
- Wallington, E.D., Izzawati, Woodhouse, I.H., 2004. Forest Height Estimation from X-band SAR, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International*. Vol. 4. pp. 2393–2396.
- Wang, B., Shi, Y., Pfeifer, T., Mischo, H., 1999. Phase unwrapping by blocks. *Measurement* 25, 285–290.

- Wang, Y., Mercer, B., Tao, V.C., Sharma, J., Crawford, S., 2001. Automatic generation of bald earth digital elevation models from digital surface models created using airborne IFSAR, in: Proceedings of 2001 ASPRS Annual Conference. pp. 23–27.
- Wang, Y., Zhu, X.X., Bamler, R., 2011. Advanced coherence stacking technique using high resolution TerraSAR-X spotlight data, in: Urban Remote Sensing Event (JURSE) 2011 Joint IEEE. Ieee, pp. 233–236.
- Wang, Z., Li, S., 1999. Phase unwrapping through a branch-cut-based cut-bridging and window-patching method. *Applied Optics* 38, 805–814.
- Wegmuller, U.R.S., Werner, Charles, L., 1995. SAR interferometric signatures of forest. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 33, 1153–1161.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A., 2003. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International. Vol. 7.* pp. 3–5.
- West, P.W., 2009. *Tree and Forest Measurement*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Williams, M.L., Milne, T., Tapley, I., Reis, J.J., Sanford, M., Kofman, B., Hensley, S., 2009. Tropical forest biomass recovery using GeoSAR observations, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. Vol. 4.* pp. 173–176.
- Williams, M.L., Silman, M., Saatchi, S.S., Hensley, S., Sanford, M., Yohannan, A., Kofman, B., Reis, J.J., Kampes, B.M., 2010. Analysis of geosar dual-band InSAR data for peruvian forest, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International. IEEE.* pp. 1398–1401.
- Wing, M. g., Solmie, D., Kellogg, L., 2004. Comparing digital range finders for forestry applications. *J. For.* 102, 16–20.
- Woodhouse, I.H., Izzawati, Wallington, E.D., Turner, D., 2006. Edge Effects on Tree Height Retrieval Using X-Band Interferometry. *Geosci. Remote Sens. Lett.* 3, 344–348.
- Xiang, Z., Wang, K., Liu, X., 2008. A new DEM reconstruction method based on an accurate flattening algorithm in interferometric SAR, in: *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference On. IEEE.* pp. 1093–1096.
- Xu, W., Cumming, I., 1996. Unwrapping the difficult Sardegna interferogram. *ESA Work. Appl. ERS SAR Interferom. Fringe. Vol. 96.*
- Yague-Martinez, N., Eineder, M., Brcic, R., Breit, H., Fritz, T., 2010. TanDEM-X Mission : SAR Image Coregistration Aspects, in: *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on.* pp. 576–579.
- Yavasli, D.D., 2013. Recent approaches in above ground biomass estimation methods. *Aegean Geogr. J.* 21, 39–49.
- Yu, J.H., Ge, L., 2010. Digital Elevation Model generation using ascending and Descending multi-baseline ALOS / PALSAR radar images, in: *FIG Congress.* pp. 11–16.

- Zebker, H.A., Goldstein, R.M., 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91, 4993–4999.
- Zebker, H.A., Rosen, P.A., Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 102, 7547–7563.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 30, 950–959.
- Zhang, Q., Mercer, J.B., Cloude, S.R., 2008. Forest height estimation from indrex-II L-Band Polarimetric InSAR data, in: *Proceedings of the ISPRS XXIth Congress*. pp. 3–11.
- Zhang, S., Zhong, H., Tang, J., 2012. Dendriform Branch Cut Algorithm Based on Minimum Spanning Tree for Phase Unwrapping. *Procedia Eng.* 29, 1154–1159.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 111, G04017.
- Zheng, D., Da, F., 2011. A novel algorithm for branch cut phase unwrapping. *Opt. Lasers Eng.* 49, 609–617.
- Zhou, X., Chang, N.-B., Li, S., 2009. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors* 9, 1876–1912.
- Zhou, Y., Hong, W., Cao, F., 2009. An Improvement of Vegetation Height Estimation Using Multi-baseline Polarimetric Interferometric SAR Data, in: *Progress In Electromagnetics Research Symposium*. pp. 691–695.