



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

**Γεωμετρικές Διορθώσεις SAR και Υπερφασματικών  
Δορυφορικών Τηλεπισκοπικών Απεικονίσεων  
Έλεγχος Ακρίβειας της Συμπροσαρμογής τους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτρης Συκάς

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

Τριμελής Επιτροπή:

Β. Καραθανάση	Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Δ. Αργιαλάς	Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χ. Ιωαννίδης	Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων συμπροσαρμογής των Υπερφασματικών και των Συνθετικού Ανοίγματος RADAR απεικονίσεων με τη μέθοδο των ανεξάρτητων ορθοαναγωγών και ο προσδιορισμός της ακρίβειας με την οποία επιτυγχάνεται αυτή η συμπροσαρμογή.

Κατά τη διάρκεια της εργασίας προέκυψαν πολλά τεχνικά ζητήματα και επιστημονικοί προβληματισμοί. Για το λόγο αυτό θεωρώ αναγκαίο προτού αρχίσει η ανάλυση της προσέγγισης του θέματος να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες προς την επιβλέπουσα Καθηγήτρια κυρία Βασιλεία Καραθανάση, της οποίας οι συμβουλές και γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε ήταν απαραίτητες για τη διεκπεραίωση της εργασίας. Ακόμα η προτροπή της να ασχοληθώ με το ευρύτερο πρόβλημα των συμπροσαρμογών των τηλεπισκοπικών απεικονίσεων και η ενθάρρυνσή της να μάθω τους τρόπους με τους οποίους προσεγγίζεται το θέμα των ορθοαναγωγών και της συμπροσαρμογής, οδήγησαν στην ανάλυση και ανάπτυξη αυτής της προσέγγισης και παράλληλα έθεσα στέρεες βάσεις γνώσεων για τη συνέχιση της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωαννίδη για τις πολύτιμες συμβουλές του στο θέμα της ορθοαναγωγής των ηλεκτροοπτικών απεικονίσεων.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου για την επιστημονική και τεχνική βοήθεια που μου προσέφεραν. Θα ήθελα να δώσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Δόκτορα Μηχανικό Πολυχρόνη Κολοκούση, στον Χρήστο Ιωσηφίδη και την Υποψήφια Διδάκτορα Χαρά Ανδρέου, μέλη του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

---

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	10
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2.ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	16
2.1 Γενικά Στοιχεία Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης.....	16
2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και Ατμοσφαιρικά Παράθυρα.....	16
2.1.2 Διαδρομή του Φωτός.....	18
2.1.3 Φασματικές Υπογραφές.....	19
2.1.4 Υπερφασματικές Απεικονίσεις.....	20
2.1.5 Φασματική Ταξινόμηση Αντικειμένων.....	21
2.2 Γεωμετρία Λήψης Υπερφασματικών Απεικονίσεων.....	21
2.2.1 Τεχνολογικά Στοιχεία Δεκτών.....	22
2.3 Γεωμετρία pushbroom δέκτη.....	23
2.3.1 Μοντέλο Τροχιάς και Εξωτερικού Προσανατολισμού.....	23
2.3.2 Περιγραφή Μοντέλου Εσωτερικού Προσανατολισμού.....	25
2.3.3 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Hyperion.....	28
2.4 Γεωαναφορά και Ορθοαναγωγή Υπερφασματικών Απεικονίσεων.....	29
2.4.1 Παράμετροι Γεωαναφορών.....	30
2.4.2 Διαδικασία Γεωαναφοράς.....	30
2.4.3 Διαδικασία Ορθοαναγωγής Εικόνας με το Φυσικό Μοντέλο.....	37
2.5 Ανάλυση Σφαλμάτων των Γεωαναφερμένων Υπερφασματικών Δεδομένων.....	39
2.5.1 Παράμετροι Φυσικού Μοντέλου pushbroom.....	40
2.5.2 Μετάδοση Σφαλμάτων από Αλγόριθμους Γεωαναφοράς – Ορθοαναγωγής.....	47
2.5.3 Σφάλματα από Αναδόμηση Γεωαναφερμένης Εικόνας.....	50
3.RADAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ.....	53
3.1 Γενικά Στοιχεία Μικροκυματικής S.A.R. Τηλεπισκόπησης.....	53
3.1.1 Αρχή Λειτουργίας Συστήματος S.A.R.....	53
3.2 Γεωμετρία Λήψης Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.....	58
3.2.1 Γεωμετρικά Στοιχεία των Πλάγιων Απεικονίσεων.....	59
3.2.2 Λειτουργία Λήψης Stripmap (Συμβατική γεωμετρία λήψης).....	66
3.2.3 Λειτουργία Λήψης Υψηλής Διακριτικής Ικανότητας.....	67
3.2.4 Λειτουργία Λήψης ScanSar.....	68
3.2.5 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ENVISAT.....	69
3.2.6 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ALOS.....	70
3.3 Γεωαναφορά Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.....	70
3.3.1 Εξισώσεις Φυσικού Μοντέλου.....	71
3.3.2 Έμμεσος Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων.....	74
3.3.3 Άμεσος Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων.....	76
3.3.4 Πολυωνυμικός Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων.....	77
3.4 Ανάλυση Σφαλμάτων στην Διαδικασία Ορθοαναγωγής Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.....	77
3.4.1 Παράμετροι Φυσικού Μοντέλου Λήψης S.A.R.....	78
3.4.2 Συνολική Μετάδοση Σφαλμάτων από τις Εξισώσεις του Μοντέλου.....	87
3.4.3 Επίδραση Διαδικασίας Αναδόμησης.....	95
4.ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	97
4.1 Ορισμός του Προβλήματος.....	97
4.2 Τρόπος Προσέγγισης Προβλήματος.....	97

---

4.2.1 Απαιτούμενες Δεσμεύσεις.....	98
5.ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ.....	104
5.1 Περιγραφή των Διαθέσιμων Δεδομένων.....	104
5.2 Διαδικασίες Εφαρμογής και Αξιολόγησης Ορθοαναγωγών.....	109
5.2.1 Περιγραφή Μεθοδολογιών.....	109
5.2.2 Υπερφασματικά Δεδομένα Hyperion.....	110
5.2.3 Συνθετικού Ανοίγματος RADAR Δεδομένα ENVISAT και ALOS.....	111
5.2.4 Συμπροσαρμοσμένα Δεδομένα.....	115
6.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ.....	117
6.1 Ορθοαναγωγή με Αφινικό Μετασχηματισμό.....	117
6.2 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 1ου Βαθμού.....	120
6.3 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 2ου Βαθμού.....	125
6.4 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 3ου Βαθμού.....	129
6.5 Ορθοαναγωγή με Delaunay Triangulation.....	133
6.6 Συγκριτικό Μεταξύ των Αποτελεσμάτων των Ορθοαναγωγών των Υπερφασματικών Απεικονίσεων.....	136
7.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ.....	140
7.1 Έμμεση Ορθοαναγωγή ENVISAT Απεικονίσεων.....	140
7.2 Πολυωνυμική Ορθοαναγωγή ENVISAT Απεικονίσεων.....	154
7.3 Έμμεση Ορθοαναγωγή ALOS Απεικονίσεων.....	156
8.ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	161
9.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	166
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	169
ΠΑΡΑΤΗΜΑ Ι.....	172
ΠΑΡΑΤΗΜΑ ΙΙ.....	179

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι Εισαγωγής Σφαλμάτων.....	40
Πίνακας 2: Μεταβολές Αζιμουθιακών Τιμών.....	87
Πίνακας 3: Μεταβολή Πλάγιας Συντεταγμένης συναρτήσει Χρονικού Σφάλματος.....	92
Πίνακας 4: Βασικά Χαρακτηριστικά Δ.Ψ.Τ.Α.....	104
Πίνακας 5: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις του Hyperion.....	110
Πίνακας 6: Παράμετροι Ορθοαναγωγής SAR Απεικονίσεων.....	112
Πίνακας 7: Γεωαναφερμένες SAR Απεικονίσεις.....	114
Πίνακας 9: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων.....	119
Πίνακας 10: Σφάλματα Φωτοσταθερών για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 1ου Βαθμού.....	121
Πίνακας 11: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 1ου Βαθμού.....	123
Πίνακας 12: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων Σημείων Ελέγχου Ομάδας Α και Β.....	123
Πίνακας 13: Σφάλμα Προσαρμογής Φωτοσταθερών για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 2ου Βαθμού.....	126
Πίνακας 14: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 2ου Βαθμού.....	127
Πίνακας 15: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων.....	128
Πίνακας 16: RMS Φωτοσταθερών για κάθε Ομάδα.....	131
Πίνακας 17: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για τις Ομάδες Β, Γ και Δ.....	131
Πίνακας 18: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων στις Ομάδες Β, Γ και Δ.....	131
Πίνακας 19: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για τις Ομάδες Β και Δ.....	134
Πίνακας 20: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων στις Ομάδες Β και Δ.....	134
Πίνακας 21: Παράμετροι Εισαγωγής στο Πρόγραμμα Ορθοαναγωγών.....	144
Πίνακας 22: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου SAR Απεικονίσεων.....	145
Πίνακας 23: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου στις SAR Απεικονίσεις για τις Α, Β και Γ Περιπτώσεις.....	145
Πίνακας 24: Σφάλματα Παραμέτρων Ορθοαναγωγής.....	146
Πίνακας 25: Μέσο Σφάλμα Συνιστωσών Γεωκεντρικών Συντεταγμένων Σημείων Εδάφους.....	146
Πίνακας 26: Μεταδιδόμενο Σφάλμα στην Εξίσωση Doppler για τις Περιπτώσεις Α, Β και Γ.....	147
Πίνακας 27: Σφάλμα Αζιμουθιακού Χρόνου.....	147
Πίνακας 28: Σφάλματα Γεωαναφερμένων SAR Απεικονίσεων για τις Περιπτώσεις Α, Β και Γ.....	147
Πίνακας 29: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου στην Ορθο – SPOT και στη Γεωαναφερμένη SAR απεικόνιση.....	155
Πίνακας 30: Παράμετροι Εισαγωγής στο Πρόγραμμα Ορθοαναγωγών.....	158
Πίνακας 31: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου στην Ορθο – SPOT και στη Γεωαναφερμένη Απεικόνιση.....	158
Πίνακας 32: Σφάλματα Παραμέτρων Διαδικασίας Ορθοαναγωγής της ALOS Απεικόνισης.....	159
Πίνακας 33: Τελικά Θεωρητικά Σφάλματα Γεωαναφερμένης SAR Απεικόνισης.....	160
Πίνακας 34: Σφάλματα Εισαγωγής στο Στατιστικό Μοντέλο Ελέγχου Συμπροσαρμογών.....	161
Πίνακας 35: Σφάλματα Διαφορών Συντεταγμένων των Κέντρων των Εικονοστοιχείων.....	162
Πίνακας 36: Διαστήματα Διακύμανσης Διαφορών Συντεταγμένων.....	162

---

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.....	17
Εικόνα 2: Περιοχές Απορρόφησης Η/Μ ακτινοβολίας.....	17
Εικόνα 3: Ηλιακή Ακτινοβολία.....	18
Εικόνα 4: Διαδρομή του Φωτός.....	19
Εικόνα 5: Φασματικές Υπογραφές Αντικειμένων.....	20
Εικόνα 6: Υπερφασματικός Κύβος.....	20
Εικόνα 7: Γεωμετρία Τηλεπισκοπικών Δεκτών.....	23
Εικόνα 8: Σύστημα Συντεταγμένων Δέκτη και Εδάφους.....	24
Εικόνα 9: Προσδιορισμός Σταθεράς Δέκτη.....	25
Εικόνα 10: Σύστημα Συντεταγμένων pushbroom εικόνας.....	27
Εικόνα 11: Στροφή Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας.....	27
Εικόνα 12: Δέκτης Hyperion.....	28
Εικόνα 13: Συμπροσαρμοσμένες Εικόνες.....	29
Εικόνα 14: Αφινικός Μετασχηματισμός.....	31
Εικόνα 15: Δευτέρου Βαθμού Μετασχηματισμός.....	34
Εικόνα 16: Τριτοβάθμιος Μετασχηματισμός Εικόνας.....	34
Εικόνα 17: Ακανόνιστα Τρίγωνα και Μέθοδος Νογοποι.....	35
Εικόνα 18: Μη Επιπεδότητα Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας.....	43
Εικόνα 19: Μερικές Παράγωγοι της x εικονοσυντεταγμένης.....	45
Εικόνα 20: Μερικές Παράγωγοι της y εικονοσυντεταγμένης.....	45
Εικόνα 21: Μερικές Παράγωγοι της x εικονοσυντεταγμένης.....	46
Εικόνα 22: Μερικές Παράγωγοι της y εικονοσυντεταγμένης.....	46
Εικόνα 23 : Μερικές Παράγωγοι ως προς το υψόμετρο Z.....	47
Εικόνα 24: Έλλειψη Σφάλματος Γεωαναφερμένου Σημείου.....	50
Εικόνα 25: Δομή Συστήματος RADAR.....	54
Εικόνα 26: Αποτύπωμα Κεραίας RADAR.....	56
Εικόνα 27 Καλυπτόμενες Εκτάσεις των Τριών Διαφορετικών Τρόπων Λειτουργίας ενός Δέκτη.....	59
Εικόνα 28: Γεωμετρικά Στοιχεία Πλάγιας Απεικόνισης.....	60
Εικόνα 29: Χωρική Ανάλυση στην Διεύθυνση των Πλαγίων Αποστάσεων.....	61
Εικόνα 30: Μεταβολή Χωρικής Ανάλυσης στη Διεύθυνση των Αζιμουθίων.....	61
Εικόνα 31: Βελτιωμένη Ανάλυση Αζιμουθίων από SAR Επεξεργασία.....	62
Εικόνα 32: Διαφορές Γωνιών Πρόσπτωσης Μεταξύ Διαστημικών και Αερομεταφερόμενων Δεκτών.....	62
Εικόνα 33: Slant to Ground Range Geometry.....	63
Εικόνα 34: Παραμόρφωση Κλίμακας.....	64
Εικόνα 35: Σμίκρυνση λόγω Αναγλύφου.....	64
Εικόνα 36: Πτύχωση λόγω Αναγλύφου.....	65
Εικόνα 37: Σκίαση λόγω Αναγλύφου.....	65
Εικόνα 38: Αρχή Λειτουργίας Stripmap.....	66
Εικόνα 39: Αρχή Λειτουργίας Spotlight.....	68
Εικόνα 40: Αρχή Λειτουργίας ScanSar.....	69
Εικόνα 41: Μεταβολή Σφάλματος Λόγω Μεταβολής Διάρκειας Απεικόνισης.....	79
Εικόνα 42: Μεταβολή Σφάλματος Συντεταγμένης Πλάγιας Απόστασης Συναρτήσεως των Μικρών Χρόνων.....	81

Εικόνα 43: Μεταβολή Συντεταγμένης Πλάγιας Απόστασης συναρτήσει Τιμής Υψομέτρου.....	85
Εικόνα 44: Μεταβολή της Αζιμουθιακής Συντεταγμένης συναρτήσει του Υψομέτρου.....	86
Εικόνα 45: Μεταβολή Σφάλματος Αζιμουθιακής Συντεταγμένης συναρτήσει του Σφάλματος Doppler (Hz).....	90
Εικόνα 46: Τρισδιάστατη Έλλειψη Σφάλματος Τυχαίου Σημείου.....	95
Εικόνα 47: Χωρική Σχέση Υπερφασματικής και SAR Εδαφοψηφίδας.....	100
Εικόνα 48: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Μεταβλητής ΔΧ και Όρια Διαστημάτων.....	101
Εικόνα 49: Τμήμα Αρχικής Απεικόνισης του Hyperion.....	105
Εικόνα 50: Τμήμα ENVISAT-ASAR Απεικόνισης (H/H).....	106
Εικόνα 51: Τμήμα ALOS-PALSAR Απεικόνισης σε H/H, H/V, V/V, V/H.....	107
Εικόνα 52: Τμήμα Ορθοαναηγμένης Απεικόνισης SPOT σε Έγχρωμο Σύνθετο.....	108
Εικόνα 53: Διάγραμμα Ροής.....	109
Εικόνα 54: Κατανομή των Δύο Ομάδων Φωτοσταθερών στην Αρχική Απεικόνιση.....	117
Πίνακας 8: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου Ομάδων Α και Β.....	119
Εικόνα 55: Προοπτική Προβολή Γεωαναφερμένης Απεικόνισης Hyperion (GCPs: Ομάδα Β).....	120
Εικόνα 56: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Πεδινό Τμήμα της Απεικόνισης.....	124
Εικόνα 57: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Ορεινό Τμήμα της Απεικόνισης.....	125
Εικόνα 58: Σχετικές Μετατοπίσεις στα Πεδινά (αριστερά) και στα Ορεινά (δεξιά).....	128
Εικόνα 59: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Δεξί Άκρο της Απεικόνισης.....	129
Εικόνα 60: Αποτέλεσμα Γεωαναφοράς Τριτοβάθμιου Πολυωνύμου και Κατανομή των Σημείων Ομάδας Α.....	130
Εικόνα 61: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις με Φωτοσταθερά από τις Ομάδες Β, Γ και Δ.....	132
Εικόνα 62: Προοπτική Απεικόνιση των Σχετικών Μετατοπίσεων Μεταξύ Ομάδας Γ και Δ.....	133
Εικόνα 63: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις με τον Delaunay Triangulation.....	135
Εικόνα 65: Σχετικές Μετατοπίσεις των Γεωαναφερμένων Απεικονίσεων με βάση την Ομάδα Δ. .	136
Εικόνα 66: Τμήμα Ορθοδιορθωμένης ENVISAT Απεικόνισης με Γεωμετρικό Υψόμετρο.....	140
Εικόνα 67: Τμήμα Ορθοδιορθωμένης ENVISAT Απεικόνισης με Ορθομετρικό Υψόμετρο.....	141
Εικόνα 68: Τμήμα Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης Χωρίς Χρήση Υψομετρικής Πληροφορίας.....	143
Εικόνα 69: Τμήμα Προοπτικής SAR Απεικόνισης στο ΨΜΕ.....	149
Εικόνα 70: Τμήμα Ορθοαναηγμένης ENVISAT Απεικόνισης στην Περιοχή της Πεντέλης.....	150
Εικόνα 71: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης.....	153
Εικόνα 72: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης.....	154
Εικόνα 73: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης.....	155
Εικόνα 74: Προβαλλόμενη Ορθοαναηγμένη ALOS Απεικόνιση.....	156
Εικόνα 75: Σχετικές Θέσεις Γεωαναφερμένων Δ.Ψ.Τ.Α.....	164
Εικόνα 76: Τμήμα Συμπροσαρμοσμένων Απεικονίσεων.....	164

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογική ανάπτυξη έχει προσφέρει στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης πολλών διαφορετικών ειδών δέκτες. Η αυξανόμενη χρήση Τηλεπισκοπικών απεικονίσεων από διαφορετικών ειδών δέκτες επιβάλλει την ανάπτυξη μεθόδων συμπροσαρμογής των δεδομένων αυτών. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η συμπροσαρμογή Υπερφασματικών με Συνθετικού Ανοίγματος RADAR απεικονίσεις (SAR).

Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενής θεωρητική ανάλυση του τρόπου λήψης των υπερφασματικών απεικονίσεων και της γεωμετρίας που τις περιγράφει. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι κυριότεροι μέθοδοι γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής των απεικονίσεων αυτών. Για τις μεθόδους αυτές διερευνήθηκαν οι παράμετροι που μεταδίδουν αβεβαιότητες στις τελικές θέσεις των εικονοστοιχείων. Με την ολοκλήρωση της εξέτασης των υπερφασματικών απεικονίσεων αναλύθηκαν με αντίστοιχο τρόπο οι απεικονίσεις SAR. Ειδικότερα αναλύθηκε ο τρόπος λήψης τέτοιων απεικονίσεων και εξετάστηκαν ενδελεχώς τα γεωμετρικά στοιχεία που περιγράφουν το είδος αυτών των απεικονίσεων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην εξέταση του τρόπου μετάδοσης σφαλμάτων με βάση το τρόπο λειτουργίας του συστήματος και την αντίστοιχη γεωμετρία που διέπει τις απεικονίσεις. Στο τέλος της θεωρητικής ανάλυσης, αναπτύχθηκε ένα στατιστικό μοντέλο για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων.

Η εφαρμογή του θεωρητικού υποβάθρου πραγματοποιήθηκε σε τρία δορυφορικά συστήματα. Το πρώτο αναφέρεται στον Υπερφασματικό δέκτη Hyperion, ενώ τα υπόλοιπα δύο αναφέρονται στους συνθετικού ανοίγματος radar δέκτες ENVISAT και ALOS. Οι διαδικασίες γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής που περιγράφηκαν στο πρώτο τμήμα της εργασίας, εφαρμόζονται και αναλύεται διεξοδικά η ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Έτσι για τις γεωαναφερμένες απεικονίσεις προσδιορίζεται το σφάλμα με το οποίο έχουν ορθοαναχθεί στο χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς Universal Transverse Mercator (UTM). Οι διαδικασίες γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής των Υπερφασματικών απεικονίσεων έλαβαν χώρα στο λογισμικό πακέτο ENVI 4.5. Αντίθετα για την ορθοαναγωγή των SAR απεικονίσεων αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, σε γλώσσα προγραμματισμού IDL 7.0. Προσδιορίστηκε το σφάλμα ορθοαναγωγής τους και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα του προτεινόμενου στατιστικού μοντέλου συμπροσαρμογής.

Βασικό συμπέρασμα της έρευνας αυτής είναι η ακρίβεια συμπροσαρμογής Υπερφασματικών και SAR απεικονίσεων με τη μέθοδο των ανεξάρτητων ορθοαναγωγών. Ακόμα τα αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου αποτελούν ισχυρό εργαλείο για τη σωστότερη επιλογή τηλεπισκοπικών δεδομένων προς ανάλυση και επεξεργασία.



---

## ABSTRACT

In the recent years the technological development has brought to the science of Remote Sensing many different types of sensors. The increasing use of Remotely Sensed images from different types of sensors requires the development of coregistration methods for these data. The current study examines the co-egistration of Hyperspectral and Synthetic Aperture RADAR images.

Initially, an extensive theoretical analysis of the geometry of Hyperspectral and SAR images took place. Then the main methods of georeference and orthorectification for these images were described in detail. For these methods the parameters that mostly transfer errors to each pixel final position were investigated. Specifically for SAR sensors their operating modes were analyzed as well as their geometrical elements. Particular attention was given to examine the way that mathematical errors were transferred through the specific geometry. Also, a statistical model was developed in order to determine the level of reliability of the coregistered data.

The theoretical background was applied on 3 satellite systems. The first system refers to the hyperspectral sensor Hyperion, while the other two refer to the Synthetic Aperture Radar sensors ENVISAT and ALOS. The quality of the final results was analyzed in detail. So for these georeferenced images the misallocation error was calculated. ENVI 4.5 program was used for the georeference and orthorectification procedures of the hyperspectral images. Moreover the orthorectification algorithm of the SAR data was developed in the IDL 7.0 language. After the production of georeferenced images the proposed statistical model was implemented and evaluated.

The basic conclusion of this investigation is that it is possible to coregister hyperspectral and SAR images through independent orthorectification methods. Furthermore, the results of the statistical model are a powerful tool for the selection of the appropriate data.

---

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

---

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της συμπροσαρμογής απεικονίσεων από διαφορετικές πηγές δεδομένων έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της μεγάλης αύξησης διαφορετικού τύπου συλλεγόμενων δεδομένων. Σκοπός της συμπροσαρμογής είναι η εύρεση μιας σχέσης που συνδέει χωρικά δύο ή περισσότερες απεικονίσεις. Η ποιότητα της διαδικασίας αυτής απαιτείται να είναι πολύ καλή, καθώς με βάση αυτή εξαρτάται το αποτέλεσμα οποιασδήποτε μετέπειτα επεξεργασίας. Έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες προς την επίτευξη των παραπάνω. Για το λόγο αυτό αρχικά δίνεται έμφαση στην ανασκόπηση μεθοδολογιών που συμπροσαρμόζουν υπερφασματικά με RADAR δεδομένα.

Η συχνότερα απαντώμενη προσέγγιση είναι η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού που συνδέει τις γεωμετρικές των δύο απεικονίσεων. Ο μετασχηματισμός αυτός υλοποιείται συνήθως με εύρεση κοινών σημείων σύνδεσης μεταξύ των απεικονίσεων [Hsu et. al., 1999] αξιοποιώντας χαρακτηριστικά σημεία του εδάφους. Έτσι υπολογίζονται οι συντελεστές της συνάρτησης μετασχηματισμού (συνήθως αφινικός) και στη συνέχεια εφαρμόζεται αυτός σε ολόκληρη την απεικόνιση. Δηλαδή μετατρέπονται οι εικονοσυντεταγμένες της μιας εικόνας στις εικονοσυντεταγμένες της δεύτερης. Με παρόμοιο τρόπο εφαρμόζεται από τον Hsu (1999) αυτή η προσέγγιση με στόχευση κοινών σημείων γνωστών συντεταγμένων σε κάποιο σύστημα αναφοράς.

Στη φιλοσοφία της παραπάνω προσέγγισης στηρίζονται και άλλοι μέθοδοι συμπροσαρμογής. Η βασική διαφορά των μεθόδων αυτών έγκειται στο διαφορετικό τρόπο εύρεσης κοινών σημείων στις απεικονίσεις, παρά στην εύρεση διαφορετικής συνάρτησης μετασχηματισμού [Hsu et. al., 2003]. Έτσι με ξεχωριστές επεξεργασίες φασματικής (ή άλλης) ταξινόμησης στα δύο δεδομένα (Υπερφασματικά και Συνθετικού Ανοίγματος RADAR), παράγονται θεματικές ή/και φασματικές κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές ταυτοποιούνται στις δύο απεικονίσεις. Ουσιαστικά βρίσκονται σημεία σύνδεσης στις απεικονίσεις με ημιαυτόματο τρόπο, τα οποία αναφέρονται σε κοινούς φασματικά στόχους. Οι κατηγορίες μπορούν να αντιμετωπιστούν είτε ως μεμονωμένα σημεία ή ως σχήματα. Με βάση αυτά υπολογίζονται οι συντελεστές της συνάρτησης, οπότε και μπορεί η τελευταία να εφαρμοστεί στην απεικόνιση.

Μία άλλη μεθοδολογία εύρεσης σημείων σύνδεσης είναι η εξαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών από τις απεικονίσεις [Ruzouq, 2004]. Δηλαδή επιλέγονται περιοχές με έντονα γεωμετρικά στοιχεία (π.χ. ευθείες), εμφανή και στις δύο απεικονίσεις. Η εξαγωγή αυτή μπορεί να γίνει με πληθώρα τρόπων (χειροκίνητα, ημιαυτόματα, αυτόματα). Το βασικό στοιχείο σε αυτήν την προσέγγιση είναι η συμπροσαρμογή των γεωμετρικών στοιχείων (ευθείες) μεταξύ των δύο απεικονίσεων με γεωμετρικές δεσμεύσεις. Οι δεσμεύσεις αυτές πηγάζουν από τον τρόπο απεικόνισης μίας ευθείας στον αντίστοιχο δέκτη. Έτσι υπολογίζεται μία χωρική σχέση μεταξύ των γεωμετρικών στοιχείων και στη συνέχεια εφαρμόζεται στις απεικονίσεις.

Μία τελείως διαφορετική προσέγγιση του παρόντος προβλήματος είναι η επίλυση με νευρωνικά δίκτυα [Mostafa et. al., 2010]. Η φιλοσοφία της προσέγγισης αυτής είναι η εκμετάλλευση της ιδιότητας των νευρωνικών δικτύων [Haykin, 1999] να προσαρμόζονται με μεγάλη ακρίβεια σε πολύπλοκες επιφάνειες με μια διαδικασία εκμάθησης. Τα δεδομένα εκμάθησης που χρησιμοποιούνται είναι είτε φωτοσταθερά σημεία και στις δύο απεικονίσεις ή μία γεωαναφερμένη απεικόνιση από την οποία αντλούνται στοιχεία για τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων των δύο απεικονίσεων. Το αποτέλεσμα αυτής της εκμάθησης δίνει μία συνάρτηση μετασχηματισμού από τη μία απεικόνιση στην άλλη κατάλληλα προσαρμοσμένη στα δεδομένα.

Ακόμα έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος που βασίζεται σε λογικές αποφάσεις με βάση πιθανούς

κανόνες [Jouian et. al., 2007]. Ο τρόπος προσέγγισης στηρίζεται στην θεωρία των Demspter και Shafer (Evidence Theory) και ονομάζεται “Αποδεικτική Συνένωση” (Evidential Fusion). Ειδικότερα από το κάθε είδος δεδομένων εξάγονται ορισμένα χαρακτηριστικά (φασματικές κατηγορίες και γεωμετρικά στοιχεία). Με βάση αυτά οικοδομούνται γενικές υποθέσεις, που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο της Αποδεικτικής Συνένωσης. Οι τελευταίες είναι κανόνες, οι οποίοι καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των εξαχθέντων στοιχείων. Έτσι με λογικούς κανόνες και την προσέγγιση της Αποδεικτικής Θεωρίας συσχετίζονται τα εξαχθέντα στοιχεία των απεικονίσεων, οπότε επιτυγχάνεται συμπροσαρμογή των απεικονίσεων αυτών.

Τέλος το πρόβλημα της συμπροσαρμογής προσεγγίζεται και με τη συσχέτιση των απεικονίσεων με κάποιο χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς. Τέτοιου είδους μέθοδοι επιτυγχάνουν συμπροσαρμογές συνήθως με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις προαναφερθείσες μεθόδους. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι που στηρίζονται σε αυτή τη προσέγγιση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος των Bryant et. al. (2003). Εδώ η συμπροσαρμογή των δύο δεδομένων στηρίζεται σε μία τρίτη ορθοαναγμένη απεικόνιση (συνήθως LANSAT) και ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ). Ειδικότερα σε πρώτο στάδιο οι απεικονίσεις από τις δύο πηγές μετασχηματίζονται με βάση την ορθοαναγμένη απεικόνιση εφαρμόζοντας ένα πρώτου βαθμού πολυώνυμο. Αυτό γίνεται με στόχευση γνωστών σημείων μεταξύ της κάθε απεικόνισης και της ορθοαναγμένης. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή δύο προσεγγιστικών γεωαναφερμένων εικόνων. Στη συνέχεια το ΨΜΕ χρησιμοποιείται για να διορθωθούν σφάλματα λόγω υψομέτρου και γωνίας όρασης.

Ομοίως προσεγγίζεται το πρόβλημα της συμπροσαρμογής από τον Dobhal (2008) και τους Abdikana et. al. (2008). Σε αυτή την περίπτωση στοχεύονται φωτοσταθερά στα υπερφασματικά δεδομένα μέσω ενός χαρτογραφικού υποβάθρου (ορθοαναγμένη απεικόνιση ή χάρτης). Στη συνέχεια η απεικόνιση αυτή μετασχηματίζεται σε μια γεωαναφερμένη με εφαρμογή ενός πολυώνυμου πρώτου βαθμού. Σε επόμενο στάδιο η SAR απεικόνιση συμπροσαρμόζεται στην γεωαναφερμένη υπερφασματική απεικόνιση μέσω εφαρμογής ενός αφινικού μετασχηματισμού. Προφανώς ο μετασχηματισμός αυτός υλοποιείται στοχεύοντας σημεία στην γεωαναφερμένη υπερφασματική και στην SAR απεικόνιση. Το αποτέλεσμα είναι δύο διαφορετικές γεωαναφερμένες απεικονίσεις. Έτσι η συμπροσαρμογή μεταφράζεται στις κοινές χαρτογραφικές συντεταγμένες των εικονοστοιχείων των δύο απεικονίσεων. Βασικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτής της κατηγορίας είναι ότι η γνωστή γεωμετρία των SAR απεικονίσεων δεν αξιοποιείται καθόλου. Έτσι με αρχή τα οπτικά δεδομένα και στη συνέχεια συμπροσαρμογή των SAR απεικονίσεων, δημιουργούνται πολλαπλά σφάλματα στις τελικές συντεταγμένες της SAR απεικόνισης. Έτσι εκτός του ότι μεταδίδεται το σφάλμα της αρχικής ορθοαναγωγής στην SAR, η τελευταία ορθοανάγεται με προσεγγιστικές μεθόδους. Συνεπώς η αξιοπιστία των συντεταγμένων της SAR απεικόνισης είναι μειωμένη και δεν γίνεται να εκτιμηθεί. Άρα και η συμπροσαρμογή των δύο ειδών δεδομένων θα είναι μειωμένης ακριβείας και δεν θα είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ποιότητας των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων. Για το λόγο αυτό η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην τελείως ξεχωριστή ορθοαναγωγή των δύο ειδών δεδομένων. Έτσι τα σφάλματα που θα προκύψουν με την συμπροσαρμογή των δύο απεικονίσεων είναι ανεξάρτητα και προσδιορίσιμα, με αποτέλεσμα να μπορεί να αξιολογηθεί και η ποιότητα των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων.

Ειδικότερα η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση της ακρίβειας συμπροσαρμογής υπερφασματικών/πολυφασματικών δεδομένων και δεδομένων RADAR συνθετικού ανοίγματος χωρικής ανάλυσης της τάξεως των 20-30 μέτρων. Αρχικά διερευνάται η βέλτιστη διαδικασία γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής των απεικονίσεων και ο προσδιορισμός της ποιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Επιχειρείται η προ-επεξεργασία, η οποία αποσκοπεί στη δημιουργία ενός αξιόπιστου υπόβαθρου για την επεξεργασία και την ποιοτική ανάλυση των

τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Στη συνέχεια προτείνεται μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της ακρίβειας της συμπροσαρμοσμένων των δεδομένων. Προς την επίτευξη των παραπάνω, επιχειρείται μία ανάλυση των σφαλμάτων της κάθε μεθόδου και πως αυτά μεταδίδονται στο τελικό αποτέλεσμα. Σκοπός είναι ο καθορισμός μίας μεθοδολογίας ελέγχου ποιότητας συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων με την βοήθεια προσδιορισμού και ανάλυσης των σφαλμάτων των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων. Έτσι με γνώμονα τα παραπάνω παράγεται μία ολοκληρωμένη διαδικασία/τρόπος προσέγγισης, με σκοπό το συνδυασμό ηλεκτροοπτικών και μικροκυματικών τηλεπισκοπικών δεδομένων για περαιτέρω ποιοτική ανάλυση.

Για την επίτευξη του σκοπού, επιλέχθηκαν δύο δορυφορικά συστήματα υπερφασματικών και ραντάρ απεικονίσεων αντίστοιχα. Για τα υπερφασματικά δεδομένα επιλέχθηκε η δορυφορική πλατφόρμα EO-1 (Earth Observer-1) με το δέκτη Hyperion της NASA. Ο δέκτης αυτός διαθέτει 220 κανάλια και χωρική ανάλυση 30 μέτρα. Όσον αφορά τα S.A.R. επιλέχθηκαν οι δορυφόροι ENVISAT με τον δέκτη ASAR της ESA και ALOS με τον δέκτη PALSAR της JAXA. Οι χωρικές αναλύσεις των δεκτών είναι 20 και 15 μέτρα αντίστοιχα.

Αρχικά αναλύονται οι μεθοδολογίες εκείνες που απαιτούνται για την επίτευξη συμπροσαρμογής υπερφασματικών και SAR δεδομένων. Αυτό προϋποθέτει την ανάλυση της γεωμετρίας του τρόπου λήψης δεδομένων για κάθε δέκτη χωριστά. Η ανάλυση αυτή αρχικά έχει γενικό χαρακτήρα, δηλαδή επεξηγούνται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τύπων των δεκτών και στη συνέχεια γίνεται εξειδίκευση στις ιδιαιτερότητες των χρησιμοποιούμενων δορυφορικών συστημάτων.

Ακόμα δίνεται ιδιαίτερο βάρος στους αλγόριθμους γεωαναφορών και ορθοαναγωγής όπως αυτοί εφαρμόζονται με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και μετά-δεδομένα. Εδώ ακολουθείται ξανά η προαναφερθείσα προσέγγιση, δηλαδή με αρχή τη γενική μορφή του προβλήματος καταλήγουμε στην ειδική μέθοδο εφαρμογής στους δέκτες. Τέλος για την διερεύνηση της ποιότητας της συμπροσαρμογής, γίνεται έλεγχος στον τρόπο μετάδοσης σφαλμάτων από τα αρχικά δεδομένα μέχρι την παραγωγή των γεωαναφερμένων εικόνων. Έτσι καταλήγουμε σε ένα δείκτη ποιότητας της συμπροσαρμογής των δύο εικόνων, ο οποίος βασίζεται σε στατιστικούς όρους.

Στη συνέχεια οι μεθοδολογίες αυτές εφαρμόζονται σε τηλεπισκοπικές απεικονίσεις και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Ειδικότερα για κάθε γεωαναφερμένη εικόνα εκτιμάται το θεωρητικό σφάλμα και συγκρίνεται με αυτό που προέρχεται από την αξιολόγηση των εικόνων με στόχευση σημείων ελέγχου. Ελέγχονται διαφορετικές περιπτώσεις ορθοαναγωγών.

Οι μέθοδοι υλοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού πακέτου ENVI 4.5 και του ελεύθερου λογισμικού BEAM (της ESA) και προγραμμάτων που υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον IDL 7.0. Ειδικότερα οι αναλυτικοί-γεωμετρικοί αλγόριθμοι γεωαναφοράς – ορθοαναγωγής των SAR δεδομένων προγραμματίστηκαν εξολοκλήρου σε γλώσσα IDL. Ομοίως σε IDL έγιναν οι αλγόριθμοι ελέγχου του στατιστικού μοντέλου και οι αλγόριθμοι για την ανάλυση σφαλμάτων.

## **2. ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

## 2. ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

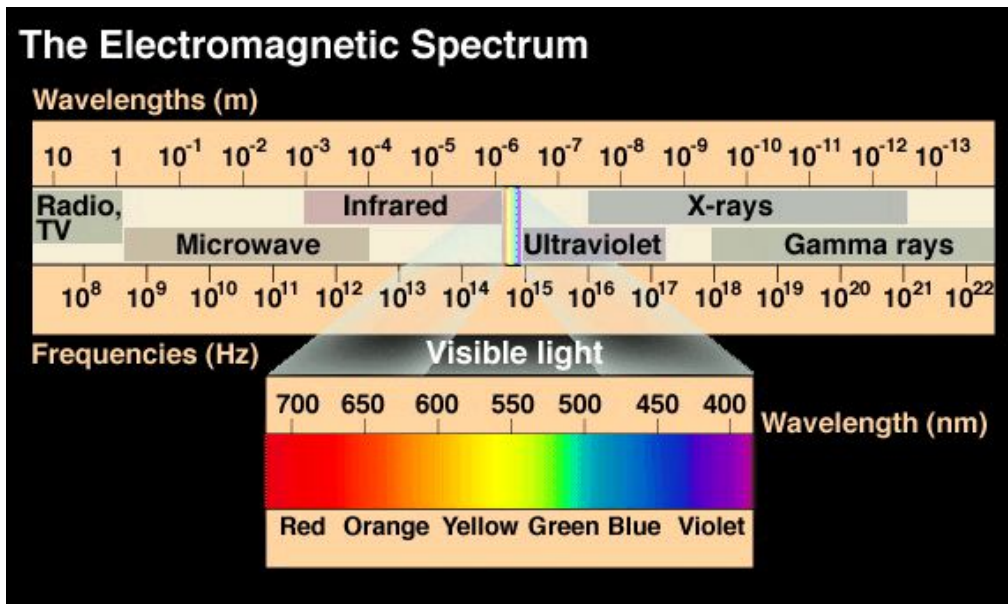
Σε αυτό το τμήμα αρχικά θα παρατεθούν ορισμένα βασικά στοιχεία της Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης. Στη συνέχεια θα γίνει μία θεωρητική ανάλυση των ειδών των δεκτών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή τέτοιων δεδομένων. Δηλαδή θα περιγραφούν ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας που είναι κοινά στους υπερφασματικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της γεωμετρίας λήψης και αναλύεται το φυσικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει τους δέκτες αυτούς. Ύστερα σχολιάζεται ιδιαίτερα ο υπερφασματικός δέκτης Hyperion και παρουσιάζονται οι κατάλληλες προσαρμογές στο μαθηματικό μοντέλο, για να περιγράψει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ο δέκτης.

Συνέχεια των παραπάνω, αποτελεί η διεξοδική ανάλυση και σχολιασμός των αλγορίθμων γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής, που είναι διαθέσιμοι στα λογισμικά της αγοράς. Στο τέλος αυτής της ενότητας αναλύονται τα σφάλματα που προκύπτουν από κάθε αλγόριθμο και πώς τα τελευταία έχουν επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, της γεωαναφερμένης υπερφασματικής εικόνας.

### 2.1 Γενικά Στοιχεία Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης

#### 2.1.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και Ατμοσφαιρικά Παράθυρα

Η Υπερφασματική Τηλεπισκόπηση αποτελείται από ένα σύνολο τρόπων και μεθοδολογιών απεικόνισης και επεξεργασίας χωρικών δεδομένων με μεγάλη φασματική διακριτική ικανότητα. Το είδος αυτών των δεδομένων θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως διεύρυνση των πολυφασματικών απεικονίσεων όσον αφορά την ποιότητα και την ποσότητα της συλλεγόμενης φασματικής πληροφορίας. Στις υπερφασματικές απεικονίσεις, όπως και στις πολυφασματικές, γίνεται διακριτή καταγραφή της ακτινοβολίας που ανακλάται ή/και εκπέμπεται από τα απεικονιζόμενα αντικείμενα. Στην εξεταζόμενη περίπτωση ο αριθμός αυτών των καταγραφών είναι ιδιαίτερα μεγάλος (100-500 καταγραφές ανά εικονοστοιχείο), γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή εξειδικευμένων μεθόδων και προσεγγίσεων για την ανάλυσή τους [Shaw et. al., 2003][Kerekes, 2003]. Οι καταγραφές αυτές ή αλλιώς κανάλια, είναι στενές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες έχει ευαισθησία ο εκάστοτε δέκτης.

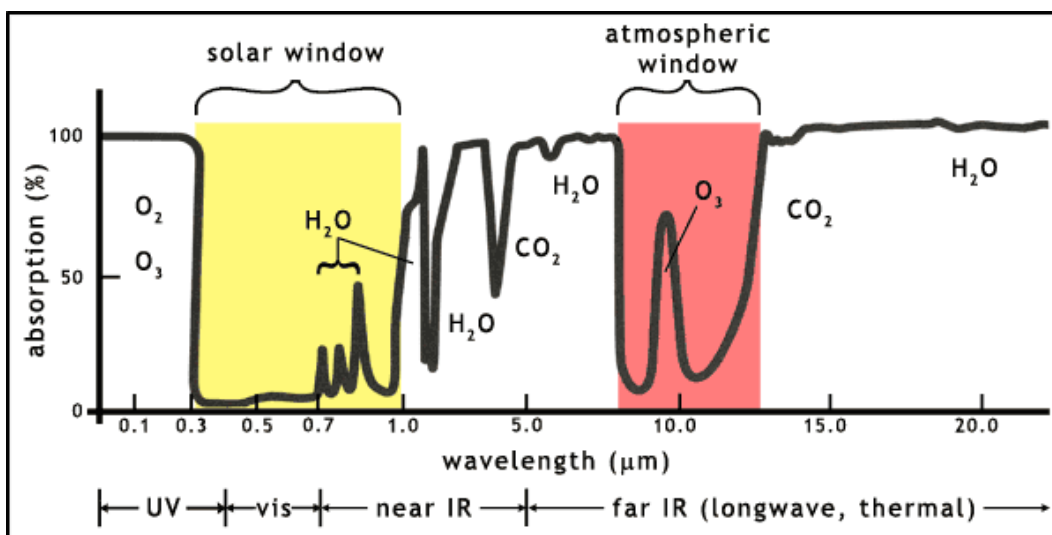


Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Πηγή: <http://www.gis.unbc.ca/courses/geog205/lectures/rsdata/spectrum.gif>

Η ηλεκτρο-οπτική Τηλεπισκόπηση κυρίως δραστηριοποιείται στην περιοχή από το οπτικό φάσμα μέχρι και το θερμικό υπέρυθρο. Η επιλογή της περιοχής καταγραφής του φάσματος δεν είναι τυχαία. Βασική τροχοπέδη στον σχεδιασμό των δεκτών, πέρα από τις τεχνικές δυσκολίες, είναι και η ατμόσφαιρα. Η σύνθεσή της επηρεάζει δραστικά την απορρόφηση και την διάχυση του φωτός σε διάφορες περιοχές. Το παραπάνω οφείλεται στην δομή των μορίων και των ενώσεων που συνθέτουν την ατμόσφαιρα [Shaw et. al., 2003].

Έτσι κάποιο κανάλι ενός δέκτη μπορεί πρακτικά να μην περιέχει πληροφορία, αλλά μόνο θόρυβο, αφού στην περιοχή ευαισθητοποίησης του δεν μπορεί να φτάσει η ανακλώμενη ή/και εκπεμπόμενη από το αντικείμενο ακτινοβολία. Οι περιοχές στις οποίες το φως είναι διαπερατό από την ατμόσφαιρα ονομάζονται “ατμοσφαιρικά παράθυρα”.



Εικόνα 2: Περιοχές Απορρόφησης Η/Μ ακτινοβολίας

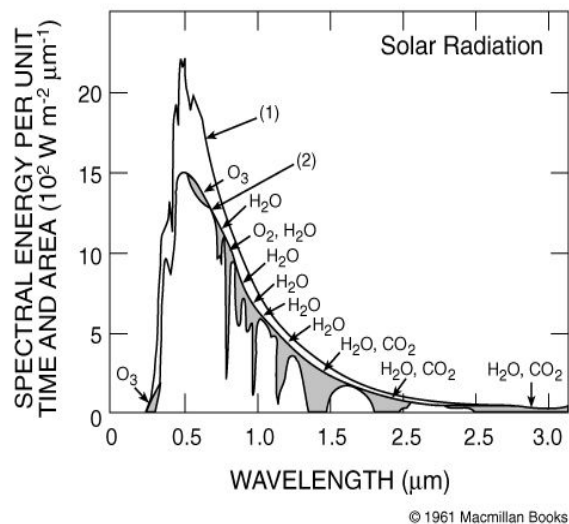
Πηγή: <http://www.helpsavetheclimate.com/atmoswindows1.gif>



## 2.1.2 Διαδρομή του Φωτός

Μέσα στα γενικά στοιχεία της Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης είναι σημαντικό να περιγραφεί και ολόκληρη πορεία που ακολουθεί η Η/Μ ακτινοβολία από την εκπομπή της μέχρι την καταγραφή της, έστω και επιγραμματικά. Προφανώς κάτι τέτοιο αποσκοπεί στην γενικότερη παρουσίαση του τρόπου προσέγγισης της ποιοτικής ανάλυσης των συλλεγόμενων δεδομένων. Έτσι με την παρουσίαση αυτή γίνονται κατανοητές οι επιδράσεις που υφίσταται η Η/Μ ακτινοβολία, οπότε οποιαδήποτε περαιτέρω ποιοτική ανάλυση μπορεί να αντιμετωπιστεί με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Αρχικά το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπέμπεται από τον Ήλιο και ταξιδεύει προς τη Γη. Η κατανομή αυτού του φάσματος δεν είναι ίδια σε όλα τα μήκη κύματος, αλλά παρουσιάζει συγκεκριμένες διαφοροποιήσεις, που προέρχονται καθαρά από τον τρόπο δημιουργίας της ακτινοβολίας αυτής (σύντηξη πυρήνων υδρογόνου κτλ) [Shaw et. al., 2003].

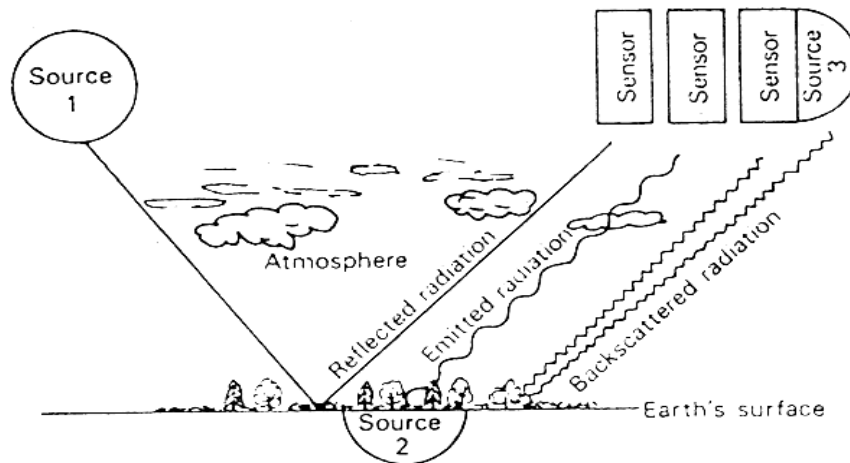


Εικόνα 3: Ηλιακή Ακτινοβολία

Πηγή: [http://paos.colorado.edu/~fasullo/pjw\\_class/images/spect.sw.jpg](http://paos.colorado.edu/~fasullo/pjw_class/images/spect.sw.jpg)

Στη συνέχεια το φάσμα αυτό, εισέρχεται στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Όπως είναι γνωστό από τους νόμους σκέδασης και διάχυσης του φωτός, τα διάφορα μήκη κύματος υφίστανται διάχυση, σκέδαση και απορρόφηση από τα στοιχεία και τις ενώσεις που είναι παρούσες στην ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αλλαγή στην κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος που προσπίπτουν στο έδαφος.

Ύστερα το φάσμα της Η/Α προσπίπτει στην επιφάνεια ή στο αντικείμενο προς εξέταση και ανακλάται. Κατά τη διάρκεια της ανάκλασης, ανάλογα με την μοριακή δομή του κάθε αντικειμένου, το κάθε μήκος κύματος ανακλά με διαφορετική ένταση. Οπότε και έχουμε άλλη μία μεταβολή στην κατανομή των εντάσεων του φάσματος της Η/Α. Έπειτα η Η/Α συνεχίζει την πορεία της μέσα στην ατμόσφαιρα, όπου και υφίσταται τις ίδιες επιδράσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, μέχρι να καταλήξει στον δέκτη.



Εικόνα 4: Διαδρομή του Φωτός

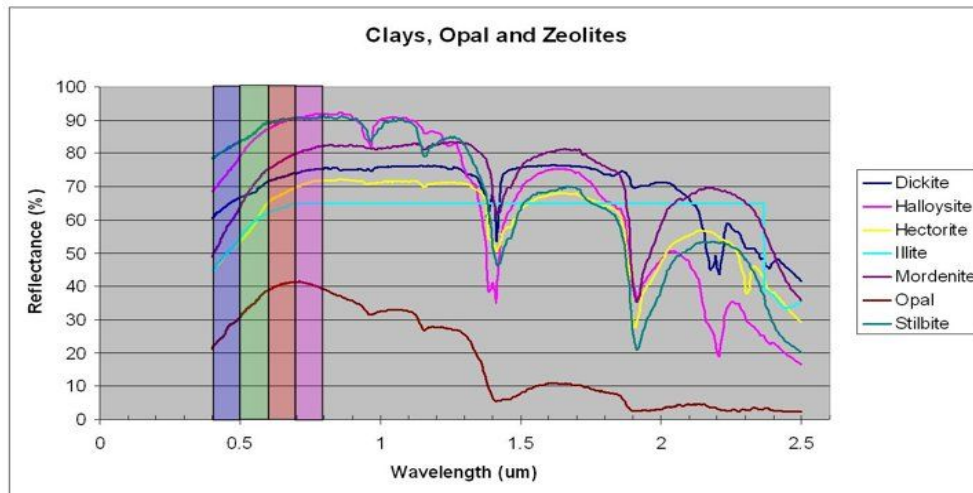
Πηγή: <http://www.fao.org/docrep/003/T0446E/T044615.gif>

Τέλος το φάσμα εισάγεται μέσα στον δέκτη όπου και καταγράφεται, δηλαδή η ένταση της  $H/A$  του κάθε καναλιού μετασχηματίζεται σε ηλεκτρικό σήμα. Έτσι κάθε εικονοστοιχείο περιέχει την φασματική πληροφορία του αντικείμενου το οποίο κατέγραψε [Shaw et. al., 2003].

### 2.1.3 Φασματικές Υπογραφές

Η καταγεγραμμένη από τον δέκτη πληροφορία, αποτελεί την φασματική υπογραφή του υπό εξέταση αντικείμενου. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα διάγραμμα, το οποίο δείχνει την καταγεγραμμένη ακτινοβολούμενη ισχύ της  $H/A$  (radiance) από ένα αντικείμενο πάνω στο έδαφος στα διάφορα μήκη κύματος. Αν υπάρχει διαθέσιμο και το φάσμα του Ήλιου τότε οι τιμές αυτές μπορούν να μετατραπούν σε ανακλαστικότητες. Στα υπερφασματικά δεδομένα η υπογραφή αυτή μοιάζει με μία συνεχόμενη καμπύλη, λόγω του πολύ μεγάλου πλήθους καναλιών. Όμως εξακολουθεί να παραμένει μία διακριτή καταγραφή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Οι ανακλαστικότητες είναι ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ένταση της ακτινοβολίας για κάθε κανάλι. Η έκφραση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς αποτελεί το ποσοστό της ανακλώμενης  $H/A$ . Αυτό παραμένει ανεπηρέαστο από τις συνθήκες φωτισμού (θεωρητικά) [Αργιαλάς, 1998], γεγονός που καθιστά τη φασματική ταξινόμηση των αντικείμενων ανεξάρτητη των συνθηκών φωτισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ύπαρξης θορύβου στις διατάξεις του δέκτη, δηλαδή ατέλειες στη μέθοδο καταγραφής, ο λόγος αυτός δεν είναι ακριβώς ίδιος για συγκεκριμένο αντικείμενο. Εμφανίζονται μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες μπορεί να είναι από ασήμαντες μέχρι προβληματικές. Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζονται φασματικές υπογραφές αντικειμένων με βάση την ανακλαστικότητά τους.

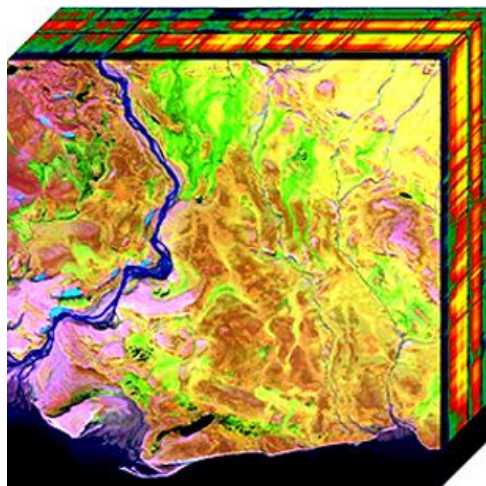


Εικόνα 5: Φασματικές Υπογραφές Αντικειμένων

Πηγή: [http://www.rsmas.miami.edu/personal/mbaker/images/qb\\_spectral\\_curve.jpg](http://www.rsmas.miami.edu/personal/mbaker/images/qb_spectral_curve.jpg)

### 2.1.4 Υπερφασματικές Απεικονίσεις

Η Υπερφασματική απεικόνιση είναι ουσιαστικά το σύνολο των φασματικών μετρήσεων ενός δέκτη με χωρική κατανομή. Η υπερφασματική εικόνα ή αλλιώς κύβος (hyperspectral image cube), έχει τρεις διαστάσεις. Οι δύο διαστάσεις είναι οι χωρικές και η τρίτη, η φασματική. Στην παρακάτω εικόνα διαφαίνεται σχηματικά η τρισδιάστατη μορφή των υπερφασματικών εικόνων [Short, 2005].



Εικόνα 6: Υπερφασματικός Κύβος

Πηγή: [http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect13/HyMap\\_Zack\\_3D\\_cube.jpg](http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect13/HyMap_Zack_3D_cube.jpg)

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που έχουν τέτοιες εικόνες, είναι ότι η λήψη όλου του φάσματος της Η/Α του κάθε εικονοστοιχείου ή μίας σειράς εικονοστοιχείων γίνεται ταυτόχρονα. Έτσι προκύπτει το κάθε ένα εικονοστοιχείο να είναι μία φασματική υπογραφή ενός ή περισσοτέρων αντικειμένων. Το πλεονέκτημα του μεγάλου πλήθους καναλιών είναι η αύξηση της φασματικής

διακριτικής ικανότητας. Δηλαδή καθίσταται εφικτός ο διαχωρισμός αντικειμένων με μικρές φασματικές διαφορές, ο οποίος με λιγότερα κανάλια δεν θα γινόταν.

Όπως γνωρίζουμε, το κάθε αντικείμενο ανακλά με διαφορετικό τρόπο τα μήκη κύματος της Η/Α. Έτσι αν θεωρητικά μπορούσαμε να έχουμε το συνεχές φάσμα ανακλαστικότητας για κάθε αντικείμενο, τότε θα ήταν εφικτό να διαχωρίσουμε όλα τα αντικείμενα που έχουν διαφορετική χημική σύσταση ή/και δεσμούς (η φασματική υπογραφή επηρεάζεται από την μικροδομή του αντικειμένου). Όμως πρακτικά η καταγραφή αυτή δεν είναι εφικτό να γίνει. Γνωρίζοντας λοιπόν τα παραπάνω, είναι φανερό ότι με την αύξηση του αριθμού των καναλιών, η φασματική υπογραφή περιγράφεται με καλύτερο τρόπο. Δηλαδή έχουμε αύξηση της φασματικής διαχωριστικής ικανότητας του δέκτη.

Να σημειωθεί όμως ότι με τη συνεχή αύξηση (από ένα σημείο και έπειτα) των καναλιών δεν βελτιώνεται απαραίτητα η φασματική διαχωριστική ικανότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη συσχέτιση που συνήθως παρουσιάζουν γειτονικά κανάλια. Το τελευταίο μεταφράζεται στο ότι τα κανάλια αυτά δεν παρέχουν περισσότερη πληροφορία για το αντικείμενο, αλλά ουσιαστικά αναπαράγουν την ίδια, με αποτέλεσμα την σύγχυση. Η αυξημένη συσχέτιση οφείλεται κυρίως στην τεχνολογία διαχωρισμού και καταγραφής του φωτός από τον δέκτη. Έτσι για παράδειγμα, ανάλογα με τα ειδικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ένας δέκτης με πολύ μεγαλύτερο αριθμό καναλιών μπορεί να παρουσιάζει μικρότερες συσχετίσεις από άλλον με τα ίδια ή λιγότερα.

### 2.1.5 Φασματική Ταξινόμηση Αντικειμένων

Βασικός σκοπός της Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης είναι η φασματική και θεματική ταξινόμηση αντικειμένων, δηλαδή η κατηγοριοποίησή τους με βάση τις φασματικές και θεματικές διαφορές που παρουσιάζουν [Chang, 2003]. Η φασματική ταξινόμηση πραγματοποιείται με την επεξεργασία των φασματικών υπογραφών που καταγράφονται ή/και υπάρχουν ήδη (φασματικές βιβλιοθήκες). Για το σκοπό αυτό θεωρούνται αρχικά κάποιες φασματικές κατηγορίες. Ως κατηγορίες ορίζουμε εκείνες οι οποίες έχουν διακριτή Φ.Υ.. Δηλαδή είναι μοναδικές και δεν γίνεται να προκύψουν από συνδυασμό με άλλους στόχους. Να σημειώσουμε ότι εκτός από τον όρο κατηγορία χρησιμοποιείται ευρέως και ο όρος στόχος [Chang, 2003][Αργιαλάς, 1998].

Ο τρόπος επιλογής των κατηγοριών, δηλαδή με επιβλεπόμενη ή μη μέθοδο, ορίζει δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων. Εκτός από τον τρόπο ορισμού των στόχων, κριτήριο για τον διαχωρισμό είναι το είδος της επεξεργασίας που θα λάβουν τα δεδομένα, τόσο σε επίπεδο γενικότερης προσέγγισης, όσο και σε καθαρά τεχνικό επίπεδο. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των φασματικών υπογραφών δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον τρόπο επιλογής/ορισμού των στόχων, είναι δύο τελείως διαφορετικές διαδικασίες.

Η φιλοσοφία του τρόπου θεώρησης, προσέγγισης και επεξεργασίας των δεδομένων ποικίλει. Ενδεικτικά αναφέρουμε την στοχαστική προσέγγιση, την ντετερμινιστική, την κυματιδιακή ανάλυση (wavelet) κ.α. . Η περαιτέρω ανάλυση των διαφόρων μεθοδολογιών, ξεφεύγει του σκοπού της εργασίας για αυτό και παραμένουμε στην απλή αναφορά αυτών.

## 2.2 Γεωμετρία Λήψης Υπερφασματικών Απεικονίσεων

### 2.2.1 Τεχνολογικά Στοιχεία Δεκτών

Η γεωμετρία λήψης των υπερφασματικών, όπως και άλλων ηλεκτο – οπτικών τηλεπισκοπικών δεδομένων, εξαρτάται από την τεχνολογία κατασκευής του κάθε δέκτη. Οι υπερφασματικοί δέκτες καταγράφουν το φάσμα, το οποίο εισέρχεται στις διατάξεις του δέκτη, μέσω ενός συστήματος φακών, φίλτρων και στοιχείων καταγραφής του φωτός. Το σύστημα φακών δεν είναι πανομοιότυπο, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με τους σκοπούς για τους οποίους έχει σχεδιαστεί εξ αρχής ο δέκτης. Φυσικά υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά στα συστήματα φακών που χρησιμοποιούνται. Ομοίως τα στοιχεία καταγραφής ή αλλιώς το συνολικό σύστημα μετατροπής της Η/Α σε ηλεκτρικό σήμα, διαφέρουν από δέκτη σε δέκτη. Όλα αυτά τα συστήματα καταγραφής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με ποικίλους τρόπους. Σχετικά με το πεδίο ενδιαφέροντος για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας λήψης, κατηγοριοποιούμε τους δέκτες με βάση το είδος και την διάταξη των φωτοευαίσθητων στοιχείων καταγραφής. Οι αναφερόμενοι δέκτες (οπτικοί) είναι παθητικοί, δηλαδή καταγράφουν ανακλώμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το αντικείμενο και δεν εκπέμπουν οι ίδιοι κανενός τύπου ακτινοβολία [Short, 2005].

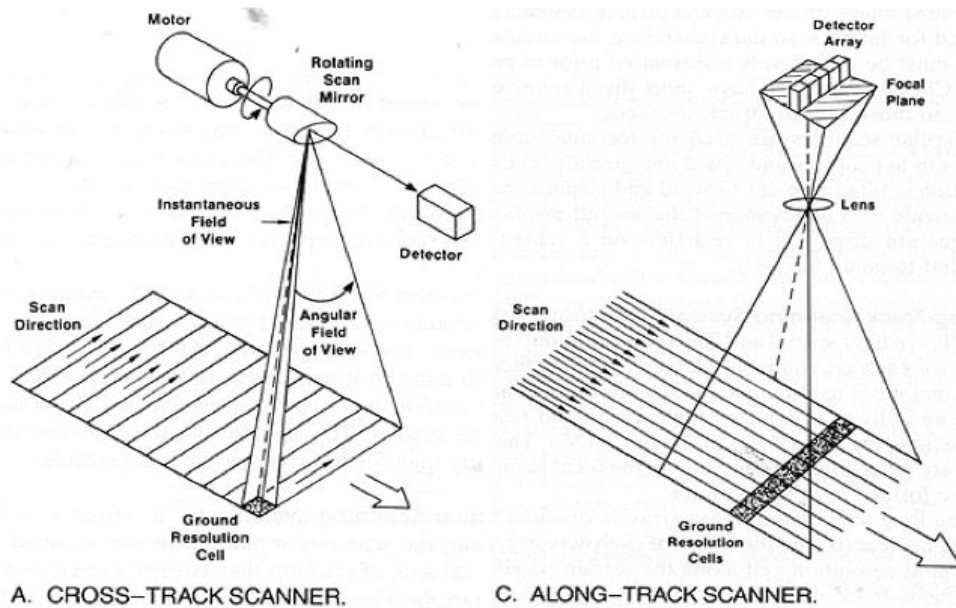
Ενδεικτικά παραθέτουμε τα βασικά στοιχεία, τα οποία απαρτίζουν έναν τηλεπισκοπικό δέκτη:

#### **Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρο-οπτικών Σαρωτών**

- Οπτικό Σύστημα: φακοί, καθρέφτες, ανοίγματα και μετατροπείς
- Δέκτες: παρέχουν ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της ακτινοβολίας πάνω στην ενεργή του επιφάνεια, γενικά κάποιου είδους ημιαγωγός
- Επεξεργαστής Σήματος: πραγματοποιεί συγκεκριμένες λειτουργίες στο ηλεκτρικό σήμα για να παρέχει την επιθυμητή έξοδο δεδομένων

Πηγή: [http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2\\_5a.html](http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_5a.html)

Γενικά υπάρχουν 2 βασικά είδη διατάξεων των φωτοευαίσθητων στοιχείων ή αλλιώς ανιχνευτών: η κατά μήκος (pushbroom) της τροχιάς διάταξη και η κάθετα στην τροχιά (whiskbroom). Η βασική τους διαφορά, η οποία μεταφράζεται σε διαφορετικής γεωμετρίας απεικόνιση, έγκειται στον τρόπο σάρωσης της επιφάνειας. Στην πρώτη περίπτωση, ο pushbroom δέκτης διαθέτει μία σειρά από ανιχνευτές, τα οποία σαρώνουν σε λωρίδες κάθετες στην τροχιά την απεικονιζόμενη επιφάνεια. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση ο whiskbroom δέκτης διαθέτει ένα μόνο ανιχνευτή. Μέσω ενός συνεχώς περιστρεφόμενου κατόπτρου εστιάζονται συνέχεια διαφορετικές περιοχές της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την συστηματική σάρωση του αντικειμένου. Παρακάτω παρατίθεται μία συγκριτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των παραπάνω:



Εικόνα 7: Γεωμετρία Τηλεπισκοπικών Δεκτών  
 Πηγή: [http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2\\_5a.html](http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_5a.html)

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχουν και άλλα είδη ηλεκτροοπτικών δεκτών, τα οποία είτε δεν απαντώνται συχνά είτε δεν έχουν εφαρμογή σε υπερφασματικά δεδομένα. Για τον παραπάνω λόγο, δεν γίνεται η αναφορά τους στο κείμενο καθώς δεν αποτελούν αντικείμενο εξέτασης της παρούσης εργασίας. Παρακάτω θα αναλυθεί η γεωμετρία μόνο των pushbroom δεκτών, επειδή τα δεδομένα στα οποία εφαρμόζονται όλες οι διαδικασίες συλλέγονται από τέτοιου είδους δέκτες.

## 2.3 Γεωμετρία pushbroom δέκτη

### 2.3.1 Μοντέλο Τροχιάς και Εξωτερικού Προσανατολισμού

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, οι δέκτες τύπου along-track αποτελούνται από μία σειρά εικονοστοιχείων, τα οποία σαρώνουν την επιφάνεια κατά λωρίδες κάθετα στην τροχιά του δορυφόρου/αεροπλάνου. Με τον τρόπο λήψης, δημιουργείται μία απεικόνιση, η οποία αποτελείται από μία σειρά κεντρικών προβολών. Η κάθε μία έχει δικό της εξωτερικό προσανατολισμό, δηλαδή θέση και στροφές. Ο εσωτερικός προσανατολισμός είναι κοινός για όλες τις κεντρικές προβολές, αφού η κάμερα δεν αλλάζει κατά την διάρκεια της πτήσης [Lee et. al., 2000][Poli, 2002].

Όπως είναι φανερό, υπάρχουν σε κάθε σειρά της απεικόνισης 6 άγνωστα στοιχεία (θεωρώντας τον εσωτερικό γνωστό). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι σε μία απεικόνιση που έχει μερικές χιλιάδες γραμμές, ο αριθμός των αγνώστων είναι τεράστιος. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την μοντελοποίηση των αγνώστων αυτών συναρτήσεως του χρόνου λήψης της κάθε γραμμής. Η προσέγγιση αυτή γίνεται συνηθέστερα με την εφαρμογή διαφόρων τάξεων πολωνύμων. Ο βαθμός

του πολυωνύμου εξαρτάται από την πλατφόρμα λήψης, αλλά γενικά ο πιο συνηθισμένος βαθμός είναι ο 2<sup>ος</sup> τόσο για την θέση όσο και τις στροφές, χωρίς όμως να είναι δεσμευτικό. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι δορυφορικές πλατφόρμες, για τις οποίες χρησιμοποιείται πολυώνυμο 1<sup>ου</sup> βαθμού για την περιγραφή των στροφών [Bethel et. al., 2000]. Προφανώς κάτι τέτοιο είναι εφικτό, αφού λόγω απουσίας ατμόσφαιρας δεν υπάρχουν σημαντικές διαταραχές στην τροχιά. Αντίθετα για την περιγραφή των γεωδαιτικών συντεταγμένων, στις δορυφορικές πλατφόρμες, εφαρμόζεται πολυώνυμο 3ου βαθμού. Η επιλογή αυτού του βαθμού πολυωνύμου γίνεται διότι για ένα πολύ μικρό τμήμα τροχιάς δορυφόρου (π.χ. στο πλαίσιο μίας σκηνής), η αντικατάσταση των φυσικών εξισώσεων που την περιγράφουν [Crespi, 2006] (νόμοι Kepler) προσεγγίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια από αυτά τα πολυώνυμα. Παρακάτω παρατίθενται τα πολυώνυμα που μοντελοποιούν τον εξωτερικό προσανατολισμό για δορυφορική πλατφόρμα.

$$X(t) = X_0^0 + X_1^0 * t + X_2^0 * t^2 + X_3^0 * t^3 \quad (1)$$

$$Y(t) = Y_0^0 + Y_1^0 * t + Y_2^0 * t^2 + Y_3^0 * t^3 \quad (2)$$

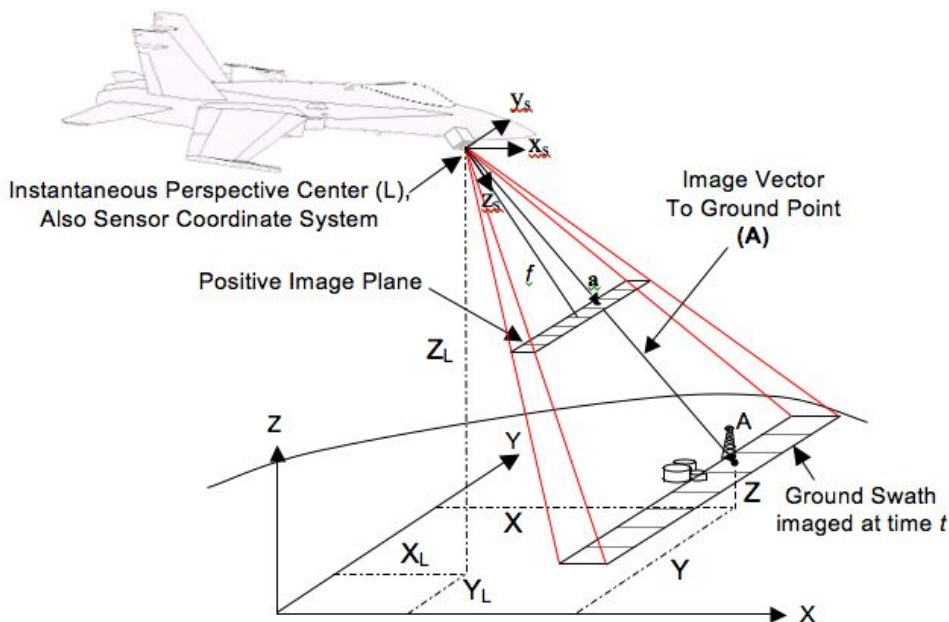
$$Z(t) = Z_0^0 + Z_1^0 * t + Z_2^0 * t^2 + Z_3^0 * t^3 \quad (3)$$

$$\omega(t) = \omega_0^0 + \omega_1^0 * t \quad (4)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0^0 + \varphi_1^0 * t \quad (5)$$

$$\kappa(t) = \kappa_0^0 + \kappa_1^0 * t \quad (6)$$

όπου t ο χρόνος λήψης της αντίστοιχης γραμμής στην οποία αναφέρονται τα X(t), Y(t), Z(t), ω(t), φ(t), κ(t). Ο χρόνος t ορίζεται στο χρονικό διάστημα  $[t_{start}, t_{stop}]$ , πέραν αυτού του διαστήματος οι εξισώσεις είναι μεν σωστές (η ορθότητά τους μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τα όρια), αλλά δεν έχουν φυσικό νόημα (δεν υπάρχει εικόνα για άλλες χρονικές στιγμές). Τέλος τα  $X_0^0, X_1^0, X_2^0, \dots, \kappa_0^0, \kappa_1^0$  είναι οι συντελεστές των πολυωνύμων.



Εικόνα 8: Σύστημα Συντεταγμένων Δέκτη και Εδάφους

Πηγή: Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning (2009-07-21)

### 2.3.2 Περιγραφή Μοντέλου Εσωτερικού Προσανατολισμού

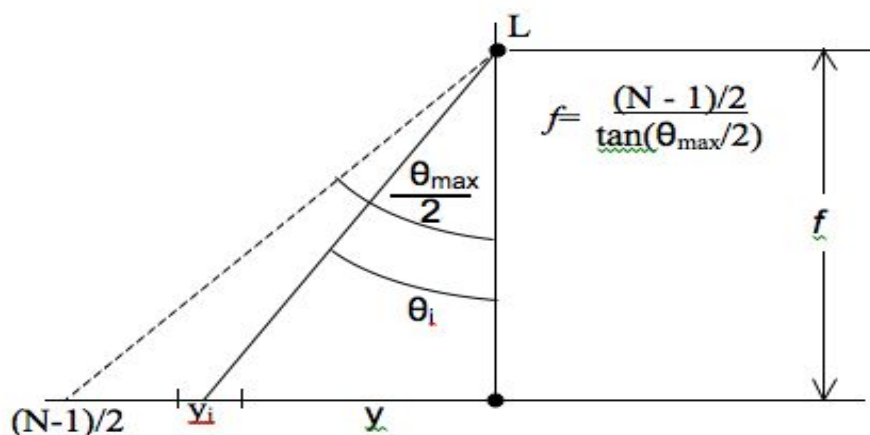
Το μοντέλο του εσωτερικού προσανατολισμού που πρόκειται να εφαρμοστεί είναι εξίσου σημαντικό με αυτό του εξωτερικού. Η περιγραφή του εσωτερικού γίνεται με ορισμένες παραμέτρους. Ειδικότερα χρειαζόμαστε τις μεταβλητές εκείνες που περιγράφουν με τον καλύτερο τρόπο την κεντρική προβολή που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο δέκτη. Έτσι είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της σταθεράς της μηχανής (calibrated focal length), οι διαστρεφές που προέρχονται από το σύστημα φακών, η θέση του πρωτεύοντος σημείου, η επιπεδότητα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας κ.α..

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω μεταβλητές αναφέρονται κυρίως για τις κλασικές κεντρικές προβολές που απαντώνται σε αεροφωτογραφίες κτλ. Ως είδη παραμέτρων που απαιτούνται για την μοντελοποίηση του εσωτερικού προσανατολισμού είναι τα ίδια, απλά χρειάζονται ορισμένες τροποποιήσεις για την ειδική περίπτωση του παρόντος είδους δέκτη. Όπως είναι γνωστό, κάθε σειρά της εικόνας αντιστοιχεί σε μία ξεχωριστή κεντρική προβολή. Η κάθε μία από αυτές αποτελείται από μία γραμμή.

#### 2.3.2.i Σταθερά του Δέκτη

Ο προσδιορισμός της σταθεράς της μηχανής μπορεί να ακολουθήσει βασικά τρεις τρόπους. Αρχικά, η πρώτη περίπτωση είναι να παρέχεται από τον κατασκευαστή η καλιμπραρισμένη τιμή της σταθεράς της μηχανής (πρόκειται και για τον πιο ενδεδειγμένο και αξιόπιστο τρόπο). Η δεύτερη περίπτωση είναι να προσδιοριστεί ταυτόχρονα με τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού η τιμή της (η ακρίβεια της μεθόδου επηρεάζεται από παραμέτρους). Προφανώς εκτός από την σταθερά της μηχανής και οι λοιποί άγνωστοι του εσωτερικού προσανατολισμού μπορούν να υπολογιστούν σε μία ενιαία συνόρθωση μαζί με τον εξωτερικό σε μία κοινή επίλυση.

Τέλος μπορεί να προσδιοριστεί η σταθερά και με τον ακόλουθο τρόπο [NATIONAL CENTER FOR GEOSPATIAL INTELLIGENCE STANDARDS (NGA), 2009]. Αν είναι γνωστή η γωνία όρασης του δέκτη (field of view) και ο αριθμός των εικονοστοιχείων της γραμμής της κεντρικής προβολής τότε μπορούμε με απλή γεωμετρία να προσδιορίσουμε την τιμή της σταθεράς του δέκτη σε μονάδες εικονοστοιχείων (pixel). Η γεωμετρική επίλυση του παραπάνω φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9: Προσδιορισμός Σταθεράς Δέκτη

Πηγή: Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning (2009-07-21)



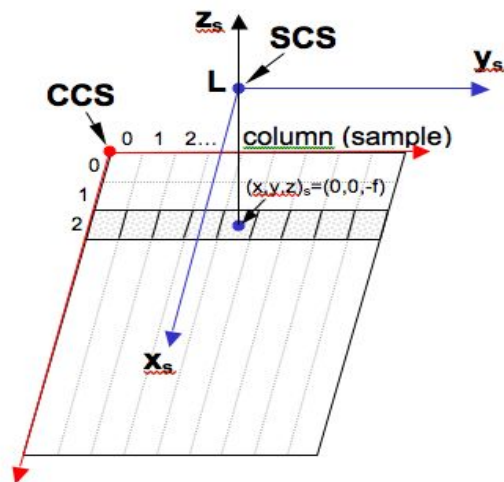
με  $\theta_{max}$  την μέγιστη γωνία όρασης (field of view),  $N$  ο αριθμός των εικονοστοιχείων που συνθέτουν την γραμμή της κεντρικής προβολής και  $f$  η προσδιοριζόμενη σταθερά του δέκτη. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία μετρείται η γωνία όρασης του δέκτη. Όμως η γωνία αυτή γενικά δεν δίνεται με τόσο υψηλή ακρίβεια και για τον λόγο αυτό αποφεύγεται η χρήση του τρόπου αυτού.

### **2.3.2.ii Ακτινική Διαστροφή Συστήματος Φακών**

Αφού κάθε σειρά είναι μία διαφορετική κεντρική προβολή, τότε για την μοναδική γραμμή μίας τυχαίας κεντρικής προβολής, η κατά την τροχιά (along-track) διαστροφή ορίζεται με μηδέν (έχουμε  $x=0$  σε αυτή την διάσταση στο μοντέλο συγγραμμικότητας). Αντίθετα στην κάθετη στην τροχιά διεύθυνση (cross-track) υπάρχει ακτινική διαστροφή. Η διαστροφή αυτή εξαρτάται από τον φακό – σύστημα φακών που χρησιμοποιεί ο δέκτης. Ο προσδιορισμός αυτής, αν δεν παρέχονται δεδομένα από τον κατασκευαστή, μπορεί να γίνει με την ταυτόχρονη επίλυση των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού της απεικόνισης, όπως ακριβώς γίνεται και με την σταθερά της μηχανής. Όμως στην περίπτωση του Hyperion, ο οποίος έχει πολύ μικρό πλάτος σκηνης (7.5 Km) και πολύ μεγάλη εδαφοψηφίδα (30 m), η ακτινική διαστροφή μπορεί να παραληφθεί στην διαδικασία της αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού.

### **2.3.2.iii Σύστημα Συντεταγμένων και Θέση Πρωτεύοντος Σημείου**

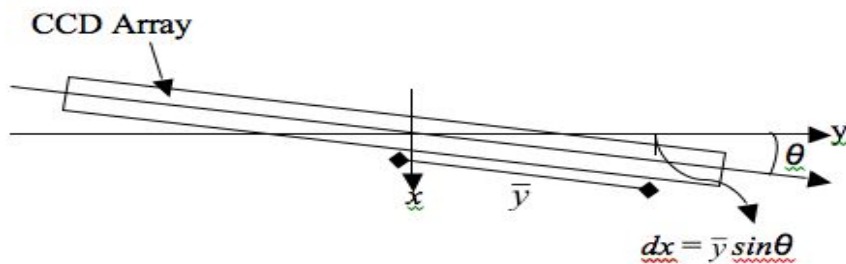
Οι pushbroom εικόνες, όπως και κάθε αμιγώς ψηφιακή απεικόνιση, δεν διαθέτει εικονοσήματα. Επιπρόσθετα κάθε γραμμή είναι μία κεντρική προβολή, γεγονός που σημαίνει ότι για κάθε γραμμή υπάρχει για την συνθήκη συγγραμμικότητας ένα διαφορετικό σύστημα αναφοράς. Οπότε για κάθε γραμμή ορίζεται η αρχή του συστήματος συντεταγμένων (για την Σ.Σ.) το μεσαίο εικονοστοιχείο. Φυσικά δεν είναι πρακτικό να υπάρχουν στην ίδια εικόνα τόσο πολλά συστήματα συντεταγμένων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται το Κοινό Σύστημα Συντεταγμένων (Common Coordinate System) [NGA, 2009], το οποίο ουσιαστικά είναι η περιγραφή των σημείων της εικόνας (pixel) σε γραμμή και στήλη. Από το ζευγάρι γραμμή/στήλη είναι εύκολο να περάσουμε στο κλασικό σύστημα συντεταγμένων, αφού γνωρίζουμε ότι το  $x$  της Σ.Σ. είναι 0 και το  $y$  είναι η στήλη (μετρώντας από την μέση και δεξιά τα θετικά). Η τιμή της γραμμής μας δίνει απλώς την αντίστοιχη κεντρική προβολή και κατ' επέκταση τον αντίστοιχο εξωτερικό προσανατολισμό.



Εικόνα 10: Σύστημα Συντεταγμένων pushbroom εικόνας

Πηγή: Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning (2009-07-21)

Βέβαια για τον βέλτιστο ορισμό του συστήματος συντεταγμένων της συνθήκης συγγραμμικότητας, δεν θα πρέπει να θεωρείται δεδομένο ότι το πρωτεύον σημείο συμπίπτει με το μέσο της κάθε γραμμής. Ακόμα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η σειρά με την φωτοευαίσθητη επιφάνεια έχει στροφή μέσα στο δέκτη [NGA, 2009], όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 11: Στροφή Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας

Πηγή: Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning (2009-07-21)

Δηλαδή εισάγοντας περισσότερες παραμέτρους στο μοντέλο του εσωτερικού προσανατολισμού, γίνεται πιστότερη αναπαράσταση του μοντέλου της κεντρικής προβολής. Τα παραπάνω εισάγονται στην διαδικασία επίλυσης, επεκτείνοντας την συνθήκη συγγραμμικότητας με τον ακόλουθο τρόπο [Lee et. al., 2000]:

$$F_x = x_i + f \frac{U}{W} + \Delta x \quad (7)$$

$$F_y = y_i + f \frac{V}{W} + \Delta y \quad (8)$$

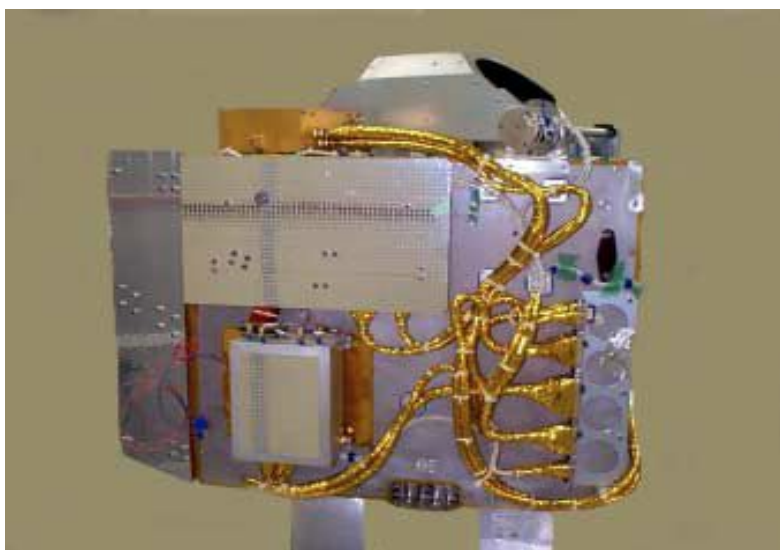
όπου τα  $\Delta x$  και  $\Delta y$  περιέχουν τις παραπάνω παραμέτρους μοντελοποίησης του εσωτερικού προσανατολισμού.

### 2.3.3 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Hyperion

Εδώ παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δέκτη που έχουν να κάνουν με τον τρόπο λήψης των δεδομένων και επηρεάζουν την γεωμετρία των απεικονίσεων. Φυσικά ένας τόσο εξελιγμένος δέκτης δεν είναι δυνατόν να αναλυθεί με πληρότητα σε όλο το φάσμα των χαρακτηριστικών του στο πλαίσιο της εργασίας. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί σκοπό της παρούσης και για αυτό επιλέγεται η παρουσίαση μόνο των απαραίτητων για την εργασία χαρακτηριστικών. Τα γενικά του χαρακτηριστικά έχουν αναλυθεί παραπάνω, αφού ο Hyperion παράγει εικόνες τύπου pushbroom [Pearlman et. al., 2001].

Ο ψηφιακός δέκτης Hyperion είναι ένα ραδιόμετρο που παράγει εικόνες (imaging spectrometer) και κατασκευάστηκε από την NASA με σκοπό την εξέταση των δυνατοτήτων της διαστημικής υπερφασματικής τηλεπισκόπησης και παράλληλη μείωση του κόστους των δορυφόρων παρατήρησης της Γης με χρήση νέων τεχνολογιών. Ο δέκτης αυτός είναι τύπου pushbroom, έχει χωρική ανάλυση 30 μέτρα και διαθέτει 220 κανάλια, τα οποία καλύπτουν ένα φάσμα 400-2500 nm. Στην πραγματικότητα δεν είναι ένας δέκτης, αλλά δύο ραδιόμετρα που μοιράζονται κοινό σύστημα φακών. Το ένα (VNIR) καλύπτει το οπτικό και το κοντινό υπέρυθρο φάσμα με 70 κανάλια, ενώ το άλλο το εγγύς υπέρυθρο (SWIR) με 172 κανάλια. Παρατηρούμε ότι το άθροισμα των καναλιών είναι 242 αντί 220, που προαναφέρθηκε. Τα 220 είναι τα μοναδικά κανάλια των δεκτών, ενώ τα 242 είναι αυτά που στην πραγματικότητα συλλέγονται και έχουν φασματική επικάλυψη μεταξύ τους. Η επικάλυψη αυτή χρησιμεύει στο καλιμπράρισμα των δεδομένων. Να σημειωθεί ότι το καλιμπράρισμα των δεδομένων γίνεται με συνδυασμένες μεθόδους από διάφορες πηγές (Ηλιος, Σελήνη, εσωτερικά), αλλά δεν εμβαθύνεται εδώ καθώς δεν αποτελεί αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας [Folkman et. al., 2001][Pearlman et. al., 2001][EO-1 User Guide, 2003].

Η ύπαρξη των δύο ραδιομέτρων αντί ενός είναι καθαρά για τεχνικούς λόγους, καθώς τα φωτοευαίσθητα στοιχεία που χρησιμοποιούνται από τον ένα ή τον άλλο δέκτη, δεν μπορούν να καλύψουν ταυτόχρονα όλο το επιθυμητό φάσμα. Έτσι ο VNIR δέκτης διαθέτει 9 εικονοστοιχεία CCD των 20μm που συνθέτουν 1 των 60 και είναι φωτοευαίσθητα στην περιοχή 400-1000 nm. Ο SWIR από την άλλη αποτελείται από εικονοστοιχεία τύπου HgCdTe και καταγράφουν στην φασματική περιοχή των 900-2500 nm.

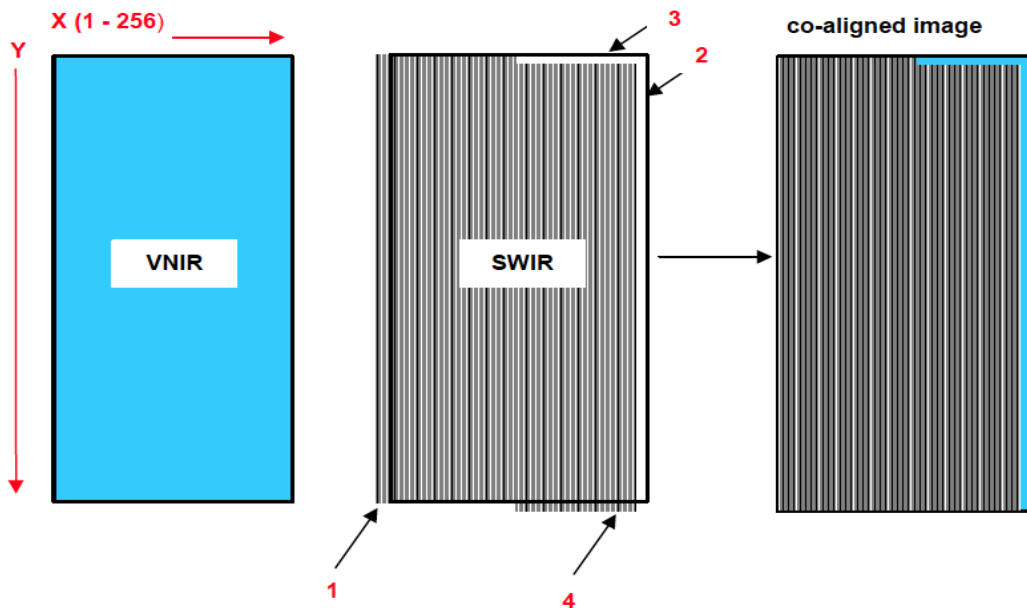


Εικόνα 12: Δέκτης Hyperion

Πηγή: IEEE Aerospace Conference, The EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer

Παρόλο που τα δύο ραδιόμετρα χρησιμοποιούν κοινό τηλεσκόπιο, παρουσιάζουν μία ασυμφωνία συμπροσαρμογής στις δύο παραγόμενες εικόνες. Αυτή η μη συμπροσαρμογή παρουσιάζεται κυρίως στην κατά μήκος της τροχιάς διεύθυνση, ενώ παράλληλα στην κάθετη στην τροχιά η ασυμφωνία είναι μόνο ένα pixel. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι κατά την διάρκεια της αναλυτικής γεωαναφοράς να στοχευτούν τα ίδια φωτοσταθερά χρησιμοποιώντας κανάλια και από το ένα ραδιόμετρο, αλλά και από το άλλο. Με αυτόν τον τρόπο γεωαναφέρεται σαν δύο ξεχωριστές εικόνες. Στην επίλυση του παραπάνω, λόγω της σχετικά γνωστής γεωμετρίας μη συμπροσαρμογής, μπορεί να τεθούν περιορισμοί στην επίλυση. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι στην διεύθυνση κάθετα στην τροχιά η ασυμφωνία είναι ένα pixel, δέσμευση η οποία μπορεί να προστεθεί στην επίλυση με σκοπό την διευκόλυνση του συστήματος.

Η δεύτερη περίπτωση είναι να ακολουθηθεί ο τρόπος που εφαρμόζει η NASA στα αντίστοιχα προϊόντα της με την μετακίνηση του SWIR κατά -1 pixel στην cross track διεύθυνση. Στην along track διεύθυνση τα pixels των στηλών 129-256 του SWIR μετακινούνται κατά -1 pixel. Έτσι παράγεται η τελική συμπροσαρμοσμένη εικόνα του Hyperion. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η απόφαση για το ποια από της δύο μεθόδους είναι ορθότερη εξαρτάται από τις παρεχόμενες για την περιοχή πληροφορίες καθώς και η ποιότητα περιγραφής και το είδος του αναγλύφου. Για παράδειγμα σε μία περιοχή με πολύ έντονες διακυμάνσεις του αναγλύφου ενώ, παράλληλα, διατίθεται πολύ ακριβές Ψ.Μ.Ε., η πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη, αφού δεν αντιμετωπίζει προσεγγιστικά τον τρόπο λήψης των δεδομένων. Παρακάτω παραθέτουμε μία σχηματική μορφή του τρόπου συμπροσαρμογής των δύο ραδιομέτρων, όπως την εφαρμόζει η NASA [EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide, 2001].



Εικόνα 13: Συμπροσαρμοσμένες Εικόνες  
 Πηγή: NASA, EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide, Level 1\_B

## 2.4 Γεωαναφορά και Ορθοαναγωγή Υπερφασματικών Απεικονίσεων

### 2.4.1 Παράμετροι Γεωαναφορών

Με τον όρο “γεωαναφορά και ορθοαναγωγή εικόνων” εννοούμε τις διαδικασίες εκείνες κατά τις οποίες μετασχηματίζουμε τις εικονοσυντεταγμένες των εικονοστοιχείων σε συντεταγμένες σημείων στο έδαφος ή σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Με την διαδικασία της γεωαναφοράς προσδιορίζουμε τους συντελεστές εκείνους, που περιγράφουν την μετάβαση από το σύστημα της εικόνας στο σύστημα του εδάφους. Η ορθοαναγωγή είναι η υλοποίηση των υπολογισμένων συντελεστών της γεωαναφοράς στην εικόνα μαζί με τη συμμετοχή του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι είτε ευθεία (άμεση ορθοαναγωγή) είτε αντίστροφη (έμμεση ορθοαναγωγή). Στην πρώτη περίπτωση μετατρέπουμε τα ζεύγη γραμμή/στήλη σε γεωδαιτικές συντεταγμένες. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, αρχή είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες και ζητούμενα οι θέσεις αυτών στην εικόνα [Γεωργόπουλος, 1998].

Ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων ανάλογα τα διαθέσιμα δεδομένα και το μοντέλο προσέγγισης διαφοροποιείται. Γενικά υπάρχουν δύο ειδών βασικές κατηγορίες μετασχηματισμών. Η πρώτη κατηγορία μετατρέπει τις συντεταγμένες από το ένα σύστημα στο άλλο μέσω πολυωνυμικών και άλλων μετασχηματισμών. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα προσεγγιστικό τρόπο περιγραφής του φυσικού μοντέλου του δέκτη. Χρησιμοποιούνται ευρέως, κυρίως λόγω της απλότητας που παρουσιάζουν στην εφαρμογή τους. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται ποικίλουν και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, τους οποίους θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Η δεύτερη κατηγορία “μετασχηματισμών” είναι η παραμετροποίηση του φυσικού-γεωμετρικού μοντέλου που περιγράφει τον τρόπο λήψης του δέκτη. Στην προκειμένη περίπτωση, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο “Γεωμετρία pushbroom Δέκτη”, χρησιμοποιούμε την συνθήκη συγγραμμικότητας προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες του δέκτη και στο επίπεδο ακρίβειας που χρειαζόμαστε.

Εκτός από το κομμάτι του προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των εικονοστοιχείων στην απεικόνιση, οι διαδικασίες της γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής ακολουθούνται από την διαδικασία της αναδόμησης, για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Στην διαδικασία αυτή τοποθετούνται τα δεδομένα της εικόνας (ψηφιακές τιμές) σε κατάλληλες θέσεις στην τελική απεικόνιση, όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις προηγούμενες διαδικασίες. Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι αναδόμησης (resampling): εγγύτερου γείτονα (nearest neighborhood), διγραμμική παρεμβολή (bilinear transformation), δικυβική παρεμβολή (cubic transformation). Στην πρώτη περίπτωση οι ψηφιακές τιμές ενός εικονοστοιχείου τοποθετούνται στην πλησιέστερη ακέραια θέση της γεωαναφερμένης εικόνας. Στην δεύτερη και τρίτη περίπτωση η τιμή που τοποθετείται προκύπτει ως μέσος όρος του κοντινότερου και 3 ή 8 εικονοστοιχείων που βρίσκονται περίξ του κεντρικού [Αργιαλάς, 1998]. Συμπερασματικά παρατηρούμε ότι μόνο η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα αφήνει ανέπαφα τα αρχικά δεδομένα. Έτσι στην παρούσα εργασία η μέθοδος αναδόμησης όλων των γεωαναφορών θα είναι με αυτή την μέθοδο, αφού τα τελευταία προορίζονται για ποιοτική ανάλυση. Η επίδραση του εγγύτερου γείτονα στην ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο “Ανάλυση Σφαλμάτων των Γεωαναφερμένων Υπερφασματικών Δεδομένων”.

## 2.4.2 Διαδικασία Γεωαναφοράς

### 2.4.2.i Αλγόριθμος Γεωαναφοράς RST

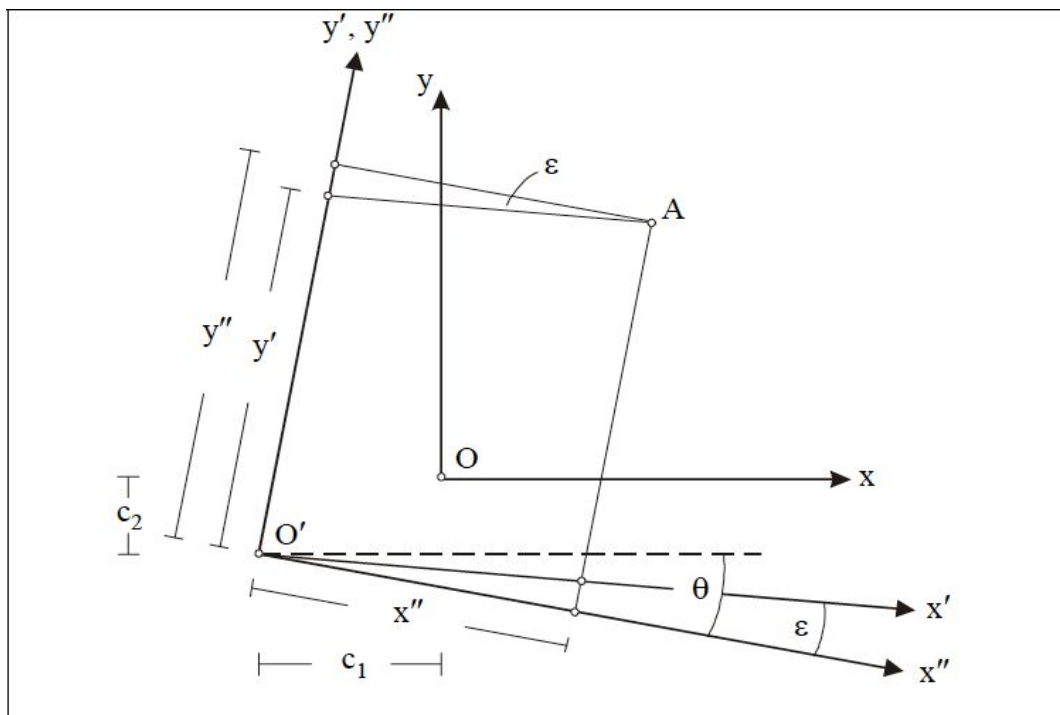
Ο αλγόριθμος RST ονομάζεται από τα αρχικά Rotation Scaling Translation και πρόκειται ουσιαστικά για τον δισδιάστατο αφινικό μετασχηματισμό. Αυτός αποτελεί τον απλοϊκότερο μετασχηματισμό που χρησιμοποιείται για γεωαναφορά εικόνων [Καρράς, 1998]. Ειδικότερα από το σύστημα γραμμή/στήλη της εικόνας περνάει στο γεωδαιτικό  $X,Y$  (μόνο οριζοντιογραφία) εφαρμόζοντας μετάθεση, στροφή και αλλαγή κλίμακας. Η μαθηματική έκφραση του αλγορίθμου είναι η ακόλουθη:

$$x = a_1 * x' + b_1 * y' + c_1 \quad (9)$$

$$y = a_2 * x' + b_2 * y' + c_2 \quad (10)$$

με  $x,y$  οι τελικές συντεταγμένες,  $x',y'$  οι αρχικές και  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  οι συντελεστές των στροφών, μετάθεσης και αλλαγής κλίμακας.

Ο αφινικός μετασχηματισμός επιτρέπει την μετάβαση από ένα αριστερόστροφο σύστημα, όπως αυτό της εικόνας, σε ένα δεξιόστροφο, δηλαδή το γεωδαιτικό. Σε αντίθεση με το μετασχηματισμό ομοιότητας που δεν διαθέτει αυτήν την ιδιότητα και για αυτό δεν χρησιμοποιείται σε αυτές τις εικόνες. Ακόμα επιτρέπεται η μη καθετότητα των αξόνων και η διαφορετική κλίμακα σε κάθε άξονα, γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία στον μετασχηματισμό να προσαρμόζεται με καλύτερο τρόπο στην κάθε απεικόνιση. Σχηματικά ο μετασχηματισμός αυτός παρατίθεται στην συνέχεια με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας του αλγορίθμου:



Εικόνα 14: Αφινικός Μετασχηματισμός  
Πηγή: Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο αφινικός μετασχηματισμός είναι μετασχηματισμός 2 διαστάσεων. Ειδικότερα από ένα σύστημα συντεταγμένων 2 διαστάσεων πηγαίνουμε σε ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων 2 διαστάσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι η υψομετρική πληροφορία που υπάρχει στο δεύτερο σύστημα, δεν είναι εκμεταλλεύσιμη και χάνεται. Για τον λόγο αυτό ο παρόν αλγόριθμος είναι γενικά μειωμένης ακριβείας, όπως και θα τεκμηριωθεί στο κεφάλαιο “Ανάλυση Σφαλμάτων Γεωαναφορών Υπερφασματικών Απεικονίσεων”.

Για να υλοποιηθεί ο αφινικός μετασχηματισμός στην απεικόνιση θα πρέπει να συλλεχθούν και να στοχευτούν στην εικόνα σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες ή αλλιώς Φωτοσταθερά (Ground Control Points GCPs). Εδώ τα σημεία αρκεί να έχουν μόνο τις οριζοντιογραφικές τους συντεταγμένες, αφού ο μετασχηματισμός είναι δύο διαστάσεων. Με την στόχευση αυτών των σημείων δημιουργούνται αυτόματα  $2n$  εξισώσεις, με  $n$  ο αριθμός των στοχευθέντων φωτοσταθερών. Από τις εξισώσεις 9 και 10 παρατηρούμε ότι έχουμε συνολικά 6 αγνώστους. Κάθε φωτοσταθερό παρέχει 2 εξισώσεις, άρα χρειαζόμαστε τουλάχιστον 3 σημεία για να μπορεί να λυθεί το σύστημα και να υπολογιστούν οι άγνωστοι συντελεστές. Η επίλυση γίνεται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (M.E.T.). Οι άγνωστοι είναι σε γραμμική σχέση με τις εξισώσεις παρατήρησης, οπότε δεν χρειάζεται ο υπολογισμός των μερικών παραγώγων.

Με το πέρας του υπολογισμού των συντελεστών του αφινικού, εφαρμόζονται οι σχέσεις 9 και 10 για κάθε εικονοστοιχείο της απεικόνισης, οπότε και προκύπτει η τελική γεωαναφερμένη εικόνα. Αφού η επίλυση έγινε με την μέθοδο MET, αν έχουν στοχευτεί παραπάνω από τα ελάχιστα σημεία υπολογίζεται αμέσως ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error) των εναπομείναντων σφαλμάτων των GCPs. Το σφάλμα αυτό αναφέρεται στην διαφορά συντεταγμένων των σημείων, όπως αυτή προκύπτει από την δεδομένη και παραγόμενη τιμή. Το τελευταίο είναι ενδεικτικό και μόνο για τα συγκεκριμένα σημεία. Η διεξοδική ανάλυση των σφαλμάτων των εικόνων θα γίνει στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

#### 2.4.2.ii Αλγόριθμος Γεωαναφοράς Πολυωνύμου 1<sup>ου</sup> βαθμού

Στην συνέχεια εφαρμόζουμε μία σειρά από πολυωνυμικούς μετασχηματισμούς διαφόρων βαθμών με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά αυτής της οικογένειας αλγορίθμων. Αρχικά έχουμε το πολώνυμο 1<sup>ου</sup> βαθμού, το οποίο ουσιαστικά είναι μία επέκταση του αφινικού μετασχηματισμού. Ειδικότερα προστίθεται ο όρος της αλληλεπίδρασης-συσχέτισης των δύο διαστάσεων (γραμμή/στήλη) στην εξίσωση του μετασχηματισμού. Έτσι η μαθηματική έκφραση διαμορφώνεται ως εξής:

$$x = a_1 * x' + b_1 * y' + d_1 * x' * y' + c_1 \quad (11)$$

$$y = a_2 * x' + b_2 * y' + d_2 * x' * y' + c_2 \quad (12)$$

με  $x, y$  οι μετασχηματισμένες συντεταγμένες,  $x', y'$  οι αρχικές και  $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$  οι συντελεστές του πολυωνυμικού μετασχηματισμού.

Οι συντελεστές των πολυωνύμων αυτών υπολογίζονται με στόχευση φωτοσταθερών σημείων στην απεικόνιση. Έτσι για κάθε σημείο που στοχεύεται παράγονται δύο εξισώσεις παρατήρησης. Η επίλυση του συστήματος που προκύπτει γίνεται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι υπολογίζονται τόσο οι συντελεστές που μετατρέπουν τις συντεταγμένες της εικόνας στο γεωδαιτικό σύστημα, όσο και τα εναπομείναντα σφάλματά τους. Στην συνέχεια με την

εφαρμογή αυτών παράγεται η γεωαναφερμένη εικόνα. Να σημειώσουμε ότι με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι συντελεστές στα υπόλοιπα πολυώνυμα, απλώς κάθε φορά αλλάζει ο αριθμός των αγνώστων συντελεστών, άρα και ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός φωτοσταθερών [Tourtin, 2003].

Η κλίμακα της απεικόνισης ή διαφορετικά η εδαφοψηφίδα, διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην προαναφερθείσα διόρθωση. Σε μία εικόνα όπου η εδαφοψηφίδα είναι πολύ μικρή, παραδείγματος χάριν 1 μέτρο, τότε απεικονίζονται πολύ περισσότερες λεπτομέρειες του αναγλύφου σε σχέση με την προκείμενη περίπτωση (30 μέτρα pixel). Έτσι με την μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην περιγραφή του αναγλύφου, δημιουργούνται (στις περισσότερες των περιπτώσεων) πολλά υψομετρικά σκαλοπάτια (απότομες αλλαγές υψομέτρων). Αντίθετα με την μεγαλύτερη εδαφοψηφίδα, το ίδιο ανάγλυφο απεικονίζεται περισσότερο εξομαλυσμένο σε σχέση με την παραπάνω περίπτωση.

Όπως γνωρίζουμε η θέση ενός σημείου στην εικόνα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υψόμετρο αυτού, δηλαδή οι  $x',y'$  συντεταγμένες παρουσιάζουν συσχέτιση. Η αναλυτική έκφραση αυτής της συσχέτισης περιγράφεται μαθηματικά από τον τρόπο λήψης της εικόνας. Όμως ο όρος  $x'*y'$  μπορεί να θεωρηθεί μία απλή προσέγγιση της υπάρχουσας συσχέτισης. Έτσι αυτός ο δισδιάστατος μετασχηματισμός περιλαμβάνει σε μικρό βαθμό τις εκτροπές του αναγλύφου.

Η διαδικασία εφαρμογής του παρόντος αλγορίθμου είναι παρόμοια με αυτή του αφινικού. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύονται γνωστά σημεία με σκοπό να παραχθούν οι κατάλληλες εξισώσεις παρατηρήσεις για επίλυση με MET. Εδώ χρειάζονται τουλάχιστον 4 σημεία, αφού υπάρχουν 8 άγνωστοι. Έτσι με το πέρας των υπολογισμών, εφαρμόζονται στην εικόνα οι εξισώσεις 11 και 12, με αποτέλεσμα να προβάλλουμε την απεικόνιση στο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται.

#### 2.4.2.iii Αλγόριθμος Γεωαναφοράς Πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού

Συνέχεια της οικογένειας των πολυωνυμικών μετασχηματισμών είναι ο αλγόριθμος 2<sup>ου</sup> βαθμού. Εδώ εφαρμόζεται για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων της εικόνας σε γεωδαιτικές ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού. Ουσιαστικά πρόκειται για μία προσέγγιση της 3D επιφάνειας που γεωαναφέρεται σε ένα δισδιάστατο επίπεδο. Μαθηματικά η σχέση αυτή αποτυπώνεται ως εξής:

$$x = a_1 + a_2 * x'^2 + a_3 * y'^2 + a_4 * x' * y' + a_5 * x' + a_6 * y' + a_7 * x' * y' \quad (13)$$

$$y = b_1 + b_2 * x'^2 + b_3 * y'^2 + b_4 * x' * y' + b_5 * x' + b_6 * y' + b_7 * x' * y' \quad (14)$$

Η ποιότητα της γεωαναφερμένης εικόνας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της επιφάνειας που απεικονίζεται και κατά πόσον μπορεί αυτή να προσαρμοστεί σε μία δευτεροβάθμια επιφάνεια. Να σημειωθεί ότι ο τρόπος λήψης της εικόνας διαδραματίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική εικόνα. Διεθνώς έχει πάντως παρατηρηθεί ότι οι pushbroom δέκτες μπορούν υπό συνθήκες να γεωαναφερθούν με τις πολυωνυμικές μεθόδους με ικανοποιητικές ακρίβειες [Tourtin, 2003].

Η εφαρμογή του αλγορίθμου σε μία απεικόνιση ακολουθεί ακριβώς την ίδια διαδικασία με τους παραπάνω, με την διαφορά ότι τα ελάχιστα γνωστά σημεία που απαιτούνται είναι 7. Προφανώς κατά την διάρκεια της εφαρμογής του εφαρμόζονται οι εξισώσεις 13 και 14. Γεωμετρικά η μεταβολή του σχήματος της μετασχηματισμένης εικόνας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:





Εικόνα 15: Δευτέρου Βαθμού Μετασχηματισμός  
 Πηγή: ESRI, ArcGIS

**2.4.2.iv Αλγόριθμος Γεωαναφοράς Πολυωνύμου 3<sup>ου</sup> βαθμού**

Στην προκείμενη περίπτωση εφαρμόζεται ο πολυωνυμικός αλγόριθμος 3ου βαθμού, ο οποίος είναι επέκταση των παραπάνω αλγορίθμων σε μεγαλύτερη τάξη πολυωνύμου. Ισχύουν και εδώ τα ίδια πράγματα τόσο για τον τρόπο εφαρμογής του στην εικόνα όσο και στον προσδιορισμό των σφαλμάτων των GCPs. Το μόνο που διαφοροποιείται είναι η μαθηματική εξίσωση που εφαρμόζεται στην συγκεκριμένη περίπτωση [Tourtin, 2003].

Όπως γίνεται αντιληπτό ο ελάχιστος αριθμός φωτοσταθερών είναι 16, αφού έχουμε 32 αγνώστους συντελεστές να υπολογιστούν για την υλοποίηση του μετασχηματισμού. Ενδεικτικά παραθέτουμε την μορφή που θα έχει η μετασχηματισμένη εικόνα με 3ου βαθμού πολυώνυμο:



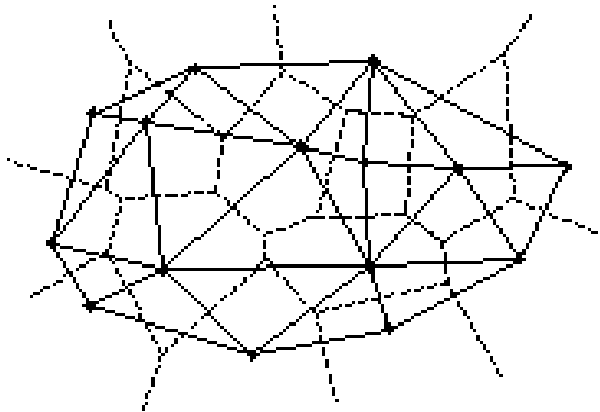
Εικόνα 16: Τριτοβάθμιος Μετασχηματισμός Εικόνας  
 Πηγή: ESRI, ArcGIS

**2.4.2.v Αλγόριθμος Γεωαναφοράς Delaunay triangulation**

Ο παρόν αλγόριθμος εφαρμόζει παρεμβολές μεταξύ ακανόνιστων τριγώνων, τα οποία ορίζονται από τα GCPs. Δεν έχει καμία σχέση με την οικογένεια των πολυωνυμικών μετασχηματισμών, η προσέγγισή του είναι τελείως διαφορετική. Αρχικά ορίζονται τα σημεία τα οποία θα αποτελέσουν κορυφές τριγώνων. Αυτά είναι σημεία με γνωστές συντεταγμένες τόσο στην εικόνα όσο και στον χάρτη (γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες).

Ο αλγόριθμος ξεκινάει και φτιάχνει τρίγωνα με κορυφές τα GCPs, με κριτήριο την εγγύτητα των σημείων. Ειδικότερα με αρχή ένα σημείο ελέγχονται οι αποστάσεις που έχει με τα υπόλοιπα σημεία. Επιλέγονται τα δύο κοντινότερα, οπότε και δημιουργείται ένα ακανόνιστο τρίγωνο (σκαληνό). Η διαδικασία αυτή σταματάει όταν όλα τα σημεία αποτελέσουν κορυφές τριγώνων. Στην συνέχεια υπολογίζονται για όλα τα σημεία της εικόνας οι συντεταγμένες που θα έχουν στον γεωγραφικό κάρναβο [Envi Assistant Manual].

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με παρεμβολές μεταξύ των γνωστών σημείων και των υπό εξέταση εικονοστοιχείων. Έτσι για ένα τυχαίο εικονοστοιχείο εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή, όπως αυτή ορίζεται από την μέθοδο Voronoi για τα ακανόνιστα τρίγωνα [Τσούλος, 2004]. Σχηματικά αυτή η διαδικασία μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής:



Εικόνα 17: Ακανόνιστα Τρίγωνα και Μέθοδος Voronoi

Πηγή: [http://goanna.cs.rmit.edu.au/~gl/research/comp\\_geom/delaunay/delaunay.html](http://goanna.cs.rmit.edu.au/~gl/research/comp_geom/delaunay/delaunay.html)

Με την παρεμβολή που εφαρμόζεται, δίνονται γεωδαιτικές συντεταγμένες σε κάθε ένα εικονοστοιχείο της προς γεωαναφοράς εικόνας. Η ακρίβεια που θα πετύχει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ποικίλει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό αφενός από την οριζοντιογραφική κατανομή των GCPs στην εικόνα και αφετέρου από το υψομετρικό εύρος που καλύπτουν αυτά. Ακόμα να σημειωθεί ότι σε μία περιοχή με πολύ έντονες της μεταβολές του αναγλύφου, η ακρίβεια όλων των προαναφερθέντων αλγορίθμων μειώνεται σημαντικά, αν δεν υπάρχει ικανός αριθμός γνωστών σημείων για να προσαρμόζονται οι μέθοδοι καλύτερα.

#### **2.4.2.vi Αλγόριθμος Φυσικού Μοντέλου Γεωαναφοράς**

Το μοντέλο αυτό, όπως προαναφέρθηκε, παραμετροποιεί το φυσικό-γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη (κεφάλαιο: Γεωμετρία pushbroom Δέκτη). Για την επίτευξη της γεωαναφοράς με το παρόν μοντέλο στοχεύονται γνωστά σημεία και υπολογίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των δεσμών.

Αρχικά θα πρέπει να τονίσουμε ότι για τον δορυφόρο Hyperion δεν είναι πλήρως γνωστοί όλες οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού. Πιο συγκεκριμένα είναι δεδομένη η σταθερά του δέκτη, ενώ η ακτινική διαστρόφη και η θέση του πρωτεύοντος σημείου δεν δίνονται

[EO-1 User Guide, 2003]. Οι δύο τελευταίες παράμετροι μπορούν σε πρώτο στάδιο να μην συμπεριληφθούν στην ανάλυση, αφού το πολύ μικρό πλάτος σκηνης εξαιτίας του φακού δεν δημιουργεί πολύ μεγάλες διαστροφές. Βέβαια αν χρειάζεται καλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της γεωαναφοράς, τότε οι παράμετροι αυτοί ορίζονται ως άγνωστοι και υπολογίζονται στην συνόρθωση του συστήματος. Έτσι θα χρειάζοντουσαν περισσότερα ελάχιστα φωτοσταθερά για την επίλυση. Όμως επειδή το μέγεθος της εδαφοψηφίδας (Hyperion) είναι αρκετά μεγάλο (30 μέτρα), δίνει μεγάλες χωρικές αβεβαιότητες στόχευσης φωτοσταθερών. Κατ' επέκταση το σφάλμα υπολογισμού τους θα ήταν αρκετά μεγάλο και θα δυσχέραινε την επίλυση του συστήματος.

Όταν δεν διατίθενται στοιχεία για την τροχιά, όπως στην περίπτωση του Hyperion, δηλαδή θέσεις σε διάφορες χρονικές στιγμές λήψης, τότε όλες οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού υπολογίζονται με στόχευση φωτοσταθερών στην εικόνα [Lee, 2000]. Ειδικότερα έχουμε ως αγνώστους τους συντελεστές των πολυωνύμων (εξ. 1-6) και εξισώσεις παρατήρησης την συνθήκη συγγραμμικότητας (εξ. 17,18).

$$f(x)=x=-c \frac{r_{11}*(X-X_o)+r_{12}*(Y-Y_o)+r_{13}*(Z-Z_o)}{r_{31}*(X-X_o)+r_{32}*(Y-Y_o)+r_{33}*(Z-Z_o)} \quad (17)$$

$$f(y)=y=-c \frac{r_{21}*(X-X_o)+r_{22}*(Y-Y_o)+r_{23}*(Z-Z_o)}{r_{31}*(X-X_o)+r_{32}*(Y-Y_o)+r_{33}*(Z-Z_o)} \quad (18)$$

Να τονιστεί ότι οι άγνωστοι βρίσκονται μέσα στα στοιχεία του εξωτερικού  $X_o, Y_o, Z_o, r_{11}, \dots, r_{33}$ , δηλαδή οι συντελεστές των αντίστοιχων πολυωνύμων ως προς τον χρόνο. Όπως είναι φανερό το σύστημα που δημιουργείται είναι μη γραμμικό, οπότε και απαιτείται η γραμμικοποίηση του για επίλυση με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (M.E.T.). Η γραμμικοποίηση γίνεται ως προς τους αγνώστους που επιζητούμε ή αλλιώς ως προς τους συντελεστές των πολυωνύμων. Από τα M.E.T. είναι γνωστό ότι με ανάπτυγμα Taylor γραμμικοποιούμε οποιαδήποτε συνάρτηση (θα πρέπει να είναι συνεχής και παραγωγίσιμη) και η

τιμή αυτής σε τυχαία θέση ισούται με:

$$y_i = y_i^o + \frac{dy_i}{dx_1} \Big|_{x^o} * \delta x_1 + \frac{dy_i}{dx_2} \Big|_{x^o} * \delta x_2 + \dots + y_i^o + \frac{dy_i}{dx_n} \Big|_{x^o} * \delta x_n,$$

όπου  $y_i^o$  η τιμή της συνάρτησης  $y_i$  στο εξεταζόμενο σημείο και  $\frac{dy_i}{dx_n} \Big|_{x^o}$  η τιμή της μερικής παραγώγου της συνάρτησης  $y_i$  ως προς τον άγνωστο  $n$  [Αγάτζα και Μπαλοδήμου, 2007].

Έτσι στην παρούσα περίπτωση δομείται ένα σύστημα διαστάσεων  $m \times 18$ , όπου  $m$  ο αριθμός των εξισώσεων παρατήρησης (διπλάσιος από τον αριθμό των φωτοσταθερών) και 18 ο αριθμός των αγνώστων (3 πολυώνυμα 3<sup>ου</sup> βαθμού για θέση και 3 πολυώνυμα 1<sup>ου</sup> βαθμού για στροφές). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την συνόρθωση είναι αυτή των έμμεσων παρατηρήσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα ελάχιστα φωτοσταθερά που απαιτούνται για να λυθεί το σύστημα, υπό τις δεδομένες συνθήκες, είναι 9.

Τα φωτοσταθερά στοχεύονται στην εικόνα και στην συνέχεια οι συντεταγμένες αυτές μετατρέπονται σε εικονοσυντεταγμένες του μοντέλου της συνθήκης συγγραμμικότητας. Από την τιμή της στήλης υπολογίζεται το  $y$  από την εξίσωση  $y = \text{column} - (N-1)/2$ , με  $\text{column}$  η τιμή της στήλης στην εικόνα. Η τιμή της γραμμής υποδεικνύει την κεντρική προβολή στην οποία εμφανίζεται το σημείο, άρα και του αντίστοιχου εξωτερικού προσανατολισμού. Το  $x$  θα είναι πάντα 0, αφού έχουμε μονοδιάστατο CCD array.

Γνωρίζουμε ότι ο δέκτης Hyperion αποτελείται ουσιαστικά από δύο ξεχωριστά συστήματα καταγραφής τα οποία μοιράζονται ένα κοινό τηλεσκόπιο. Το παραπάνω προκαλεί μία μικρή διαφορική μετατόπιση στις “δύο” αυτές εικόνες. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την στόχευση των φωτοσταθερών, παρατηρώντας αρχικά από τα κανάλια του ενός δέκτη και ύστερα από το κανάλια του άλλου. Δηλαδή εκτελούμε πρακτικά την διαδικασία της γεωαναφοράς δύο φορές, την μία για τον ένα δέκτη και την άλλη για τον άλλον. Βέβαια μπορούμε να εφαρμόσουμε και την μέθοδο συμπροσαρμογής που προτείνεται από τον κατασκευαστή, όπως έχει είδη περιγραφεί [EO-1 User Guide, 2003][EO-1/ Hyperion Science Data User’s Guide, 2001].

Με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές των πολυωνύμων τροχιάς και στροφών. Οπότε για κάθε χρονική στιγμή έχουμε τον εξωτερικό προσανατολισμό της εκάστοτε γραμμής. Το βήμα του χρόνου που χρησιμοποιείται είναι η χρονική διάρκεια που απαιτείται για την λήψη μίας γραμμής. Αυτό υπολογίζεται από την σχέση:  $dt = (t_{stop} - t_{start}) / rows$ , με dt το χρονικό βήμα και  $t_{stop}$ ,  $t_{start}$  ο χρόνος λήψης της τελευταίας γραμμής και της πρώτης αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι αν στην επίλυση συμπεριλάβουμε και τις δύο παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού, τότε η επίλυση του συστήματος δίνει ως αποτέλεσμα και τις τιμές αυτών [Kraus, 2003]. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε πιστότερη αναπαράσταση της δέσμης, οπότε και μπορεί να γίνει η διαδικασία της ορθοαναγωγής με μεγαλύτερη ακρίβεια. Προφανώς αν οι τιμές αυτές είναι μικρές δεν θα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την επόμενη διαδικασία.

### 2.4.3 Διαδικασία Ορθοαναγωγής Εικόνας με το Φυσικό Μοντέλο

Η διαδικασία της ορθοαναγωγής μίας απεικόνισης είναι ουσιαστικά η εφαρμογή των υπολογισμένων παραμέτρων από την γεωαναφορά, μαζί με την περιγραφή της επιφάνειας του εδάφους. Έτσι συνδέουμε τα εικονοστοιχεία από την αρχική εικόνα με σημεία στο έδαφος. Η φορά αυτής της σύνδεσης ορίζει δύο διαφορετικές μεθόδους ορθοαναγωγής, την άμεση (direct) και την έμμεση (indirect).

#### 2.4.3.i Άμεση

Η παρούσα μεθοδολογία έχει αφετηρία τις συντεταγμένες της εικόνας (γραμμή/στήλη). Με βάση αυτές υπολογίζονται οι θέσεις τους στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων. Ειδικότερα για ένα τυχαίο εικονοστοιχείο της εικόνας με γραμμή  $i$  και στήλη  $j$  γνωρίζουμε την  $y$  εικονοσυντεταγμένη στο σύστημα της συνθήκης συγγραμμικότητας και την αντίστοιχη κεντρική προβολή (αναλυτικότερα: “Σύστημα Συντεταγμένων και Θέση Πρωτεύοντος Σημείου”). Με δεδομένα τα παραπάνω και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του εξωτερικού προσανατολισμού (εξ. 1-6), υπολογίζονται τα  $X_0, Y_0, Z_0$  και  $\omega, \phi, \kappa$ . Οι εξισώσεις της συγγραμμικότητας λύνονται ως προς  $X$  και  $Y$  (γεωδαιτικές συντεταγμένες). Με την τακτική αυτή ουσιαστικά, βρίσκουμε τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που ανήκουν στις δοθείσες εικονοσυντεταγμένες και έχουν οριζοντιογραφικές συντεταγμένες που εξαρτώνται από το υψόμετρο  $Z$ . Αν δεν υπάρχει υψομετρική πληροφορία από κάποιο DEM – DSM τότε βάζουμε ένα προσεγγιστικό υψόμετρο (π.χ. από χάρτη), οπότε υπολογίζονται τα  $X, Y$ . Προφανώς αν διατίθεται υψομετρική πληροφορία τότε αντικαθιστούμε το κατάλληλο υψόμετρο στις  $X, Y$  συντεταγμένες.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά για όλα τα εικονοστοιχεία, οπότε και

προσδίδονται σε αυτά οριζοντιογραφικές συντεταγμένες. Η ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας είναι η διαφορά που εμφανίζουν γνωστά σημεία με τις απεικονιζόμενες συντεταγμένες, δηλαδή έχουμε σφάλμα σε μέτρα, αντίθετα με την έμμεση διαδικασία. Έτσι τοποθετούνται δεδομένα σε έναν κανονικό κάρναβο. Το χωρικό του βήμα ορίζεται από το μέγεθος των εδαφοψηφίδων της αρχική εικόνας, όπου για τον Hypertion είναι 30 μέτρα. Φυσικά εκτός από αυτήν την υπολογίσιμη ακρίβεια, γίνεται να προσδιοριστεί και η θεωρητική ακρίβεια, σύμφωνα με τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων. Η τελευταία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς δεν παρεμβαίνει ο ανθρώπινος υποκειμενικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της.

### 2.4.3.ii Έμμεση

Εδώ ζητάμε να βρούμε για δεδομένες συντεταγμένες του χώρου  $(X,Y,Z)$  τις τιμές των εικονοσυντεταγμένων που θα έχουν στην απεικόνιση. Έτσι σε πρώτο στάδιο επιλέγεται γεωγραφικά η περιοχή προς ορθοαναγωγή, ορίζονται δηλαδή τα όρια της περιοχής. Ύστερα ορίζουμε το βήμα του κάρναβου στο οποίο θα εφαρμόσουμε την διαδικασία. Το βέλτιστο μέγεθος για τα οπτικά δεδομένα είναι η ονομαστική εδαφοψηφίδα του δέκτη (εδώ 30 μέτρα). Στην συνέχεια σε περίπτωση που υπάρχει Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Ψ.Μ.Ε.) παρεμβάλλουμε τα υψόμετρα, οπότε και έχουμε για κάθε σημείο μία τριάδα συντεταγμένων  $(X,Y,Z)$ . Αν δεν υπάρχει υψομετρική πληροφορία τότε ορίζουμε όπου  $Z$  το μέσο υψόμετρο της περιοχής. Γενικά αν υπάρχει από πριν γνώση των υψομέτρων π.χ. ένα χάρτη, τότε παρεμβάλλουμε αυτά τα υψόμετρα. Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι οι τριάδες  $X,Y,Z$  είναι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες προβολής  $(X,Y)$  και υψομετρική πληροφορία ( $Z$ ), αν από την ενότητα “Διαδικασία Γεωαναφοράς” οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών είναι στην ίδια μορφή. Γενικά ότι είδος συντεταγμένων έχουν τα φωτοσταθερά από τα οποία προκύπτουν οι συντελεστές των πολωνύμων, αντίστοιχες θα είναι και οι συντεταγμένες του κάρναβου, εκτός βέβαια αν παρεμβάλλεται κάποιος μετασχηματισμός. Δηλαδή αν τα φωτοσταθερά είναι στην ορθή μερκατορική προβολή, τότε οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες  $(X,Y)$  θα είναι στο ίδιο σύστημα [Γεωργόπουλος, 1998].

Στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα τροχιάς (όχι στην προκείμενη) και αυτά δίνονται σε καρτεσιανές γεωκεντρικές συντεταγμένες, τότε το υψόμετρο που απαιτείται είναι το γεωμετρικό και όχι το ορθομετρικό που έχουν συνήθως τα Ψ.Μ.Ε.. Έτσι ενδεχομένως να χρειαστεί μετατροπή των τιμών του Ψ.Μ.Ε. από ορθομετρικά υψόμετρα σε γεωμετρικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός μοντέλου που περιγράφει την αποχή του γεωειδούς και τις αποκλίσεις των δύο υψομέτρων στη περιοχή. Εννοείται ότι και εδώ εφαρμόζονται και οι υπόλοιπες μετατροπές συστημάτων, όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω. Απλώς αν έχουμε μία τέτοια περίπτωση τροχιακών δεδομένων τότε θα πρέπει να προστεθεί ο μετασχηματισμός αυτός. Αυτού του είδους το μοντέλο θα αναλυθεί και θα εφαρμοστεί στα συνθετικού ανοίγματος RADAR δεδομένα, καθώς δεν υπάρχει εναλλακτική λύση [Καραθανάση, 2003].

Με την υλοποίηση των παραπάνω, ακολουθεί η εύρεση των εικονοσυντεταγμένων. Ειδικότερα με γνωστά τα  $X,Y,Z$  αντικαθιστούμε στις εξισώσεις συγγραμμικότητας 17 και 18. Κατ' επέκταση υπάρχουν δύο εξισώσεις συναρτήσεως του χρόνου  $t$ . Επιπρόσθετα για κάθε κεντρική προβολή γνωρίζουμε ότι  $x(t)=0$ , λόγω του μονοδιάστατου CCD array. Η εξίσωση αυτή λύνεται ως προς τον χρόνο  $t$ , οπότε και υπολογίζουμε την χρονική στιγμή στην οποία ανήκει το υπό εξέταση σημείο. Αντικαθιστώντας τον χρόνο αυτό και τις συντεταγμένες του σημείου, βρίσκουμε την τιμή της μεταβλητής  $y$ . Στην συνέχεια εφαρμόζοντας αντίστροφα τους τύπους που μετατρέπουν τις συντεταγμένες από το κοινό σύστημα σε αυτό της συγγραμμικότητας, υπολογίζεται το

εικονοστοιχείο στο οποίο ανήκει το υπό εξέταση σημείο.

Με τον υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων ενός σημείου στην εικόνα θα πρέπει να γίνει αναδόμηση, ώστε να τοποθετηθούν οι ψηφιακές της απεικόνισης. Στην πραγματικότητα δεν έχουμε σημείο αλλά επιφάνεια, το σημείο στο οποίο γίνονται όλοι οι υπολογισμοί είναι το μέσο αυτής της επιφάνειας. Η εικόνα, ως γνωστόν αποτελείται από εικονοστοιχεία, πρόκειται ουσιαστικά για ένα πίνακα με γραμμές και στήλες. Για το υπό εξέταση σημείο, υπολογίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω ένα ζευγάρι συντεταγμένων γραμμών και στηλών. Προφανώς αυτές δεν είναι ακέραιες, αλλά είναι πραγματικοί δεκαδικοί αριθμοί. Κατά συνέπεια για να αποδοθούν δεδομένα από την εικόνα θα πρέπει να στρογγυλοποιηθούν οι αριθμοί αυτοί. Η διαδικασία αυτή λέγεται αναδόμηση (resampling) και συγκεκριμένα εφαρμόζεται η μεθοδολογία του εγγύτερου γείτονα. Υπάρχουν και άλλες μεθοδολογίες, αλλά επειδή τα δεδομένα προορίζονται για ποιοτική ανάλυση και η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα είναι η μόνη που κρατάει ανέπαφα τα αρχικά δεδομένα, επιλέγεται τελικά μόνο αυτή.

Η ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας με την έμμεση ορθοαναγωγή, μετριέται αρχικά στις εικονοσυντεταγμένες. Δηλαδή επειδή με δεδομένο σημείο στο έδαφος ζητάμε την θέση του στην εικόνα, άρα έχουμε αβεβαιότητα προσδιορισμού στην εικόνα. Έτσι όποια ασυμφωνία μεταξύ συντεταγμένων γεωαναφερμένης εικόνας και γνωστών στο έδαφος σημεία υπολογίζεται αρχικά σε pixels. Ύστερα μέσω του μεγέθους του αρχικού pixel στο έδαφος μετατρέπεται το σφάλμα σε μονάδες μέτρου. Μάλιστα τα σφάλματα στους δύο άξονες δεν είναι στην ίδια διεύθυνση με αυτή του τελικού καννάβου, αλλά ακολουθούν την διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου.

## **2.5 Ανάλυση Σφαλμάτων των Γεωαναφερμένων Υπερφασματικών Δεδομένων**

Το παρόν τμήμα της διπλωματικής εργασίας αφιερώνεται στην διερεύνηση των σφαλμάτων και της μετάδοσης αυτών στις τηλεπισκοπικές απεικονίσεις αναφορικά με τις διαδικασίες της γεωαναφοράς και της ορθοαναγωγής. Αρχικά θα αναλυθούν οι παράμετροι και η μέθοδος εφαρμογής τους στο φυσικό μοντέλο των pushbroom δεκτών. Ειδικότερα εξετάζονται τα στοιχεία εκείνα που παραμετροποιούν την γεωμετρία της εικόνας και συμβάλουν στην μετάδοση σφαλμάτων στο τελικό αποτέλεσμα της γεωαναφερμένης εικόνας. Έτσι η προσέγγιση σε πρώτο στάδιο θα επικεντρωθεί στην ξεχωριστή ανάλυση του κάθε παράγοντα που παράγει σφάλμα, με σκοπό την διερεύνηση της σημαντικότητάς τους. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε το σφάλμα που προκύπτει θεωρητικά με την θεώρηση ότι όλοι οι παράμετροι έχουν σφάλμα. Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται μία εμβάθυνση στην μετάδοση των υπαρχόντων σφαλμάτων (δεδομένα και παράμετροι) στην γεωαναφερμένη εικόνα με την εφαρμογή των προαναφερθεισών αλγορίθμων. Τέλος με την εξέταση όλων των παραπάνω, εισάγουμε και το σφάλμα που προκύπτει από την αναδόμηση της εικόνας, το οποίο όπως θα φανεί προστίθεται στις υπάρχουσες αβεβαιότητες.

Όπως γίνεται φανερό, η ανάλυση των σφαλμάτων αυτών αφορά μόνο το φυσικό μοντέλο του δέκτη και πως αυτό εφαρμόζεται για την γεωαναφορά και ορθοαναγωγή της εικόνας. Οι υπόλοιπες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γεωαναφερμένης εικόνας, δεν γίνεται να αναλυθούν σε τέτοιο βαθμό. Ο λόγος είναι ότι πρόκειται για προσεγγιστικά μοντέλα, τα οποία δεν μαθηματικοποιούν την γεωμετρία της εικόνας. Άρα δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε για τα συγκεκριμένα μοντέλα, την κατανομή των σφαλμάτων στο χώρο, αλλά μόνο τα σφάλματα που υπολογίζονται στα σημεία ελέγχου.

### 2.5.1 Παράμετροι Φυσικού Μοντέλου pushbroom

Η γεωμετρία που περιγράφει την λήψη υπερφασματικών δορυφορικών δεδομένων (π.χ. τύπου Hyperion) παραμετροποιείται μαθηματικά με μοντέλο την κεντρική προβολή. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο “Γεωμετρία pushbroom Δέκτη” εισάγουμε ορισμένες μεταβλητές για την μαθηματική περιγραφή του τρόπου λήψης της εικόνας. Οι μεταβλητές αυτές προσεγγίζουν την πραγματική κατάσταση του δέκτη. Επιπρόσθετα οι μεταβλητές αυτές δεν είναι οι μοναδικοί παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα, αλλά υπάρχουν και εξωγενείς. Ακόμα ο αριθμητικός προσδιορισμός όλων των παραπάνω σε πολλές περιπτώσεις είτε δεν είναι εφικτός για κάποιες παραμέτρους είτε δεν είναι αρκετά αξιόπιστος. Συμπερασματικά στις διαδικασίες της γεωαναφοράς και της ορθοαναγωγής εισάγονται σφάλματα που προέρχονται i. από τον τρόπο παραμετροποίησης της πραγματικής κατάστασης δέκτη-περιβάλλοντος και ii. από τις ακρίβειες των υπαρχόντων δεδομένων, καθώς φυσικά και τον τρόπο μετάδοσής τους στο παραμετροποιημένο μοντέλο.

Οι μεταβλητές που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας χωρίζονται σε 3 κατηγορίες, όπως φαίνεται παρακάτω:

Κατηγορία	Όνομα Μεταβλητής	Συμβολισμός
A1	Σταθερά Δέκτη	c
A2	Ακτινική Διαστροφή	$\Delta r$
A3	Θέση Πρωτεύοντος Σημείου	$x_o, y_o$
A4	Επιπεδότητα Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας	$\epsilon$
A5	Στροφή Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας	$\theta$
A6	Ατμοσφαιρική Διάθλαση	$\delta_{atm}$
A7	Καμπυλότητα της Γης	$\delta_{cur}$
B1	Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού	$X_o, Y_o, Z_o,$ $\omega, \phi, \kappa$
Γ1	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	DEM

Πίνακας 1: Παράμετροι Εισαγωγής Σφαλμάτων

Για τις παραπάνω μεταβλητές θα εξεταστεί ο τρόπος μετάδοσης σφάλματος που παρατηρείται, λόγω της ακρίβειας προσδιορισμού τους. Ο υπολογισμός της μετάδοσης σφαλμάτων βασίζεται στον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων και εφαρμόζεται στην εξίσωση συγγραμμικότητας. Οι παράμετροι και τα σφάλματα αυτών αφορούν μόνο την μέθοδο γεωαναφοράς – ορθοαναγωγής με την προσέγγιση του φυσικού μοντέλου του δέκτη, αφού στους υπόλοιπους αλγορίθμους δεν τίθεται καν θέμα ύπαρξης αυτών. Έτσι παρακάτω αναλύονται οι παράμετροι αυτοί και συγκεντρώνονται στο τελευταίο τμήμα που γίνεται η ανάλυση σφαλμάτων στον αλγόριθμο του φυσικού μοντέλου.

**2.5.1.i Σταθερά του Δέκτη**

Όπως έχουμε είδη αναλύσει (“Γεωμετρία pushbroom Δέκτη”), ο προσδιορισμός της σταθεράς του δέκτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους. Εδώ θα γίνει η υπόθεση ότι γνωρίζουμε το σφάλμα της σταθεράς του δέκτη. Στην συνέχεια το σφάλμα αυτό μεταδίδεται μέσω των εξισώσεων συγγραμμικότητας (εξ. 17 και 18) στις τελικές εικονοσυντεταγμένες της εικόνας. Έτσι με τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε το σφάλμα που προκαλεί η αβεβαιότητα του  $c$ . Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι το τελικό σφάλμα που θα έχουν οι εικονοσυντεταγμένες υπολογίζεται από την ίδια μέθοδο, αλλά θεωρώντας την κάθε μία μεταβλητή με αντίστοιχο σφάλμα. Όμως η διερεύνηση γίνεται ξεχωριστά σε κάθε μεταβλητή με σκοπό να διακριθεί η σημαντικότητα της εκάστοτε παραμέτρου στο μοντέλο. Έτσι θα είναι εφικτή η σωστή απαλοιφή ορισμένων μεταβλητών, αν προκύπτει ότι η επίδρασή τους είναι πολύ ασθενής.

Έχουμε λοιπόν τα ακόλουθα:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2 \rightarrow \sigma_x = \pm \frac{r_{11}*(X - X_o) + r_{12}*(Y - Y_o) + r_{13}*(Z - Z_o)}{r_{31}*(X - X_o) + r_{32}*(Y - Y_o) + r_{33}*(Z - Z_o)} \sigma_c$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2 \rightarrow \sigma_y = \pm \frac{r_{21}*(X - X_o) + r_{22}*(Y - Y_o) + r_{23}*(Z - Z_o)}{r_{31}*(X - X_o) + r_{32}*(Y - Y_o) + r_{33}*(Z - Z_o)} \sigma_c$$

**2.5.1.ii Θέση Πρωτεύοντος Σημείου**

Η θέση του σημείου αυτού ουσιαστικά είναι η διαφορά της αρχής του συστήματος συντεταγμένων από τις άκρες της γραμμής (αντίστοιχο με τα εικονοσήματα) με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της συνθήκης συγγραμμικότητας. Αυτό μεταφράζεται στις εξισώσεις 17 και 18 ως εξής:

$$f(x) = x = -c \frac{r_{11}*(X - X_o) + r_{12}*(Y - Y_o) + r_{13}*(Z - Z_o)}{r_{31}*(X - X_o) + r_{32}*(Y - Y_o) + r_{33}*(Z - Z_o)} + x_o \quad (19)$$

$$f(y) = y = -c \frac{r_{21}*(X - X_o) + r_{22}*(Y - Y_o) + r_{23}*(Z - Z_o)}{r_{31}*(X - X_o) + r_{32}*(Y - Y_o) + r_{33}*(Z - Z_o)} + y_o \quad (20)$$

Έτσι με βάση τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων το σφάλμα των συντεταγμένων στο σύστημα της κεντρική προβολής είναι:

$$\sigma_x = \pm \sigma_{x_o}$$

$$\sigma_y = \pm \sigma_{y_o}$$

Εδώ παρατηρείται ότι σε περίπτωση που παραληφθεί τελείως η ύπαρξη του πρωτεύοντος σημείου στην εικόνα, τότε δημιουργείται ένα συστηματικό σφάλμα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων ίσο με το μέγεθος της διαφοράς της κάθε συντεταγμένης.



### 2.5.1.iii **Ακτινική Διαστρόφη**

Η ακτινική διαστρόφη προκαλείται από το σύστημα των φακών του δέκτη και οφείλεται κυρίως σε κατασκευαστικές ατέλειες. Η διαστρόφη αυτή περιγράφεται ως η μετατόπιση των σημείων της εικόνας ακτινικά, όπως ορίζεται από το πρωτεύον σημείο και το αντίστοιχο σημείο που εξετάζεται. Στην προκειμένη περίπτωση η ακτινική μετατόπιση υποβαθμίζεται σε διαστρόφη κατά μήκος της γραμμής, λόγω του μονοδιάστατου CCD array. Η σχέση που περιγράφει την ακτινική διαστρόφη είναι η ακόλουθη:

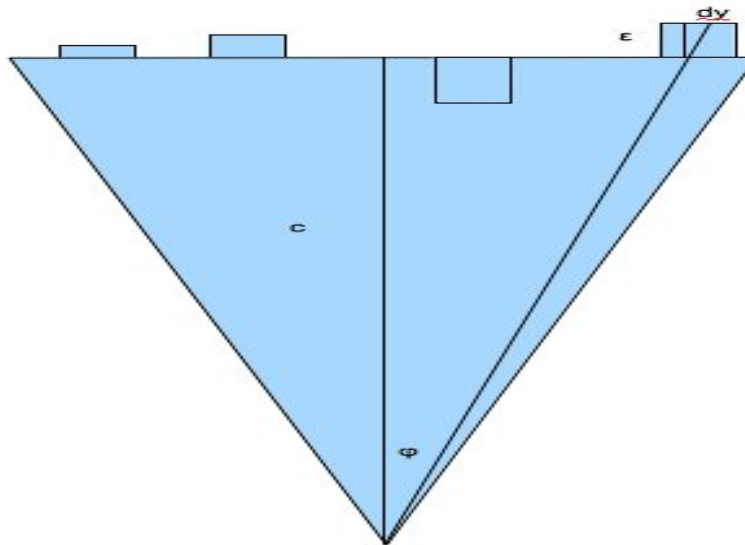
$$x_{\text{διορθωμένο}} = x - x \frac{dr}{r} \quad (21)$$

$$y_{\text{διορθωμένο}} = y - y \frac{dr}{r} \quad (22)$$

με  $x, y$  οι εικονοσυντεταγμένες (συμπεριλαμβανομένου και του πρωτεύοντος) του σημείου,  $r$  η απόσταση του σημείου από το κέντρο και  $dr$  η διαστρόφη του φακού. Έτσι με την παράληψη του όρου  $x \frac{dr}{r}$  και  $y \frac{dr}{r}$  μεταδίδεται ένα συστηματικό σφάλμα στις συντεταγμένες των σημείων. Αναφορικά με την  $x$  διάσταση, επειδή αυτή είναι μόνιμα 0 φαίνεται ότι δεν υπάρχει καθόλου διαστρόφη (με την προϋπόθεση ότι η τετμημένη του πρωτεύοντος σημείου είναι 0).

### 2.5.1.iv **Επιπεδότητα Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας**

Η κεντρική προβολή που ζητείται να προσδιοριστεί για να περιγραφεί η γεωμετρία του δέκτη, θεωρεί ότι το σύνολο της φωτοευαίσθητης επιφάνειας είναι επίπεδο. Έτσι στην περίπτωση του pushbroom δέκτη τα εικονοστοιχεία θεωρούνται ότι βρίσκονται ακριβώς πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια. Οι μικρό-ανωμαλίες στην επιφάνεια αυτή προξενούν σφάλματα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων. Η εικόνα καταγράφεται και παρουσιάζεται σύμφωνα με την παραπάνω ανωμαλία. Όμως κατά την μοντελοποίηση της γεωμετρίας της θεωρείται ότι όλα τα εικονοστοιχεία είναι στο ίδιο επίπεδο. Έτσι υπάρχει μία διαφορά  $dy$  μεταξύ πραγματικών και υπολογιζόμενων συντεταγμένων συναρτήσει της αποχής ( $\epsilon$ ) από την θεωρούμενη επίπεδη επιφάνεια. Λόγω του μονοδιάστατου CCD array θα υπολογίσουμε μόνο την μετατόπιση στις τεταγμένες. Με απλή Ευκλείδεια γεωμετρία υπολογίζεται η διαφορά αυτή σε συνάρτηση με την αποχή  $\epsilon$ , την τεταγμένη  $y$  και τη σταθερά του δέκτη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 18: Μη Επιπεδότητα Φωτοευαίσθητης Επιφάνειας

Έτσι για τυχαίο σημείο στην κεντρική προβολή με  $y$  τετγμένη, έχει καταγραφεί ένα σημείο  $y'=y+dy$ . Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα έχουμε:

$$\tan(\varphi) = \frac{dy}{\varepsilon} \quad \text{και} \quad \tan(\varphi) = \frac{y}{c} \rightarrow dy = \varepsilon \frac{y}{c} \quad (23)$$

Είναι φανερό ότι για δεδομένη θέση το σφάλμα που δημιουργείται είναι ευθέως ανάλογο με το μέγεθος της αποχής και μάλιστα μεγιστοποιείται στα άκρα της εικόνας. Συνήθως η αποχή αυτή δεν προσδιορίζεται εύκολα, ειδικά στην περίπτωση των δορυφορικών δεκτών, εκτός αν παρέχονται στοιχεία από τον κατασκευαστή του συστήματος. Γενικά οι αποχές είναι τόσο μικρές που συνήθως το σφάλμα που προκαλείται από αυτές αγνοείται.

### 2.5.1.v Ατμοσφαιρική Διάθλαση

Η σύνθεση της ατμόσφαιρα προκαλεί την στρέβλωση του φωτός τόσο ποιοτικά όσο και γεωμετρικά. Από την γεωμετρική πλευρά υπάρχει αλλοίωση της κατεύθυνσης και της διαδρομής που ακολουθεί το φως. Όμως στο φυσικό μοντέλο οι ακτίνες θεωρούνται ως ευθείες γραμμές, θεώρηση η οποία ισχύει μόνο κατά προσέγγιση. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει μία διόρθωση  $\delta y$  στις εικονοστυντεγμένες [Γεωργόπουλος, 2005]:

$$\delta y = K * y \left(1 + \frac{y^2}{c^2}\right)$$

με  $K$  την σταθερά της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την σύνθεσή της. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η διόρθωση αυτή είναι πολύ μικρή συνήθως και για τον λόγο αυτό παραλείπεται.

### 2.5.1.vi Καμπυλότητα της Γης

Όπως είναι γνωστό η Γη δεν είναι επίπεδη, αλλά έχει σχήμα που προσεγγίζει ένα

ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Στο φυσικό μοντέλο γίνεται σιωπηρά η υπόθεση ότι η περιοχή που γεωαναφέρεται αν και με ανάγλυφο ακολουθεί μία επίπεδη επιφάνεια. Προφανώς κάτι τέτοιο δεν ισχύει, οπότε και θα πρέπει να διορθωθεί η απόκλιση αυτή από την επιπεδότητα. Αυτό πραγματοποιείται με μία διόρθωση  $\delta y$  στις εικονοσυντεταγμένες με τον ακόλουθο τύπο [Γεωργόπουλος, 2005]:

$$\delta y = \frac{y^3 * H}{2 * c^2 * R}$$

με  $H$  και  $R$  το ύψος πτήσης και η μέση ακτίνα της Γης στην περιοχή αντίστοιχα. Μία τέτοια διόρθωση έχει νόημα μόνο όταν η περιοχή που απεικονίζεται είναι αρκετά μεγάλη στην διεύθυνση του πλάτους. Αφού εξετάζεται ο δέκτης τύπου σάρωσης, η διάσταση που θα επηρεάζεται από την καμπυλότητα είναι μόνο το πλάτος αφού το μήκος έχει πολύ μικρή διάσταση. Στην περίπτωση του Hyperion που έχει πλάτος μόλις 7.5 km, η διόρθωση θα είναι ιδιαίτερα μικρή.

### 2.5.1.vii Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ )

Οι ακρίβειες των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της κάθε γραμμής λήψης είναι πολύ σημαντικές για τις διαδικασίες της γεωαναφοράς και της ορθοαναγωγής. Αρχικά θα εξεταστεί η μετάδοση του σφάλματος της θέσης του προβολικού κέντρου στις εικονοσυντεταγμένες, με την υπόθεση ότι μόνο τα  $X_0, Y_0, Z_0$  έχουν σφάλμα. Έστω  $\sigma_{X_0}, \sigma_{Y_0}, \sigma_{Z_0}$  οι μεταβλητότητες των συντεταγμένων των προβολικών κέντρων και  $\sigma_x, \sigma_y$  η τυπική απόκλιση των εικονοσυντεταγμένων της εικόνας (για μονοδιάστατο CCD array). Με την εφαρμογή του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων στις εξισώσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας (εξ. 17,18) προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial X_0}\right)^2 \sigma_{X_0}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right)^2 \sigma_{Y_0}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_0}\right)^2 \sigma_{Z_0}^2 \quad (24)$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial X_0}\right)^2 \sigma_{X_0}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_0}\right)^2 \sigma_{Y_0}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Z_0}\right)^2 \sigma_{Z_0}^2 \quad (25)$$

Φυσικά για να έχει την παραπάνω μορφή ο νόμος μετάδοσης, οι συμμετέχουσες μεταβλητές δεν θα είναι συσχετισμένες. Συνήθως είναι ασυσχέτιστες, λόγω κυρίως των μεθόδων υπολογισμού τους. Για πρακτικούς λόγους παρουσιάζεται στην συνέχεια η κάθε μερική παράγωγος ξεχωριστά, οπότε με αντικατάσταση αυτών στους παραπάνω τύπους προκύπτουν οι τελικές εξισώσεις (εξ. 24, 25).

$$\frac{\partial x}{\partial X_o} = c \frac{r_{11}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{13}[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{21} \cdot (Y - Y_o) + r_{31} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_o} = c \frac{r_{21}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{23}[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{21} \cdot (Y - Y_o) + r_{31} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_o} = c \frac{r_{31}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{33}[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{21} \cdot (Y - Y_o) + r_{31} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

Εικόνα 19: Μερικές Παράγωγοι της x εικονοσυντεταγμένης

Πηγή: [http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM\\_PartialsofCollinearity\\_2008.pdf](http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM_PartialsofCollinearity_2008.pdf)

$$\frac{\partial y}{\partial X_o} = c \frac{r_{12}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{13}[r_{12} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{32} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y_o} = c \frac{r_{22}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{23}[r_{12} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{32} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z_o} = c \frac{r_{32}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{33}[r_{12} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{32} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

Εικόνα 20: Μερικές Παράγωγοι της y εικονοσυντεταγμένης

Πηγή: [http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM\\_PartialsofCollinearity\\_2008.pdf](http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM_PartialsofCollinearity_2008.pdf)

Στην συνέχεια αναλύονται τα σφάλματα που προέρχονται από τις στροφές της κάθε γραμμής της απεικόνισης. Οι στροφές των γραμμών προκύπτουν είτε από μετρήσεις με ειδικά συστήματα (π.χ. INS), είτε προσδιορίζονται από επιλύσεις με φωτοσταθερά. Και από τις δύο περιπτώσεις προκύπτει για κάθε στροφή μία τυπική απόκλιση, η οποία μεταδίδει σφάλμα στις εικονοσυντεταγμένες. Οπότε με δεδομένη τυπική απόκλιση  $\sigma_\omega, \sigma_\varphi, \sigma_\kappa$  για κάθε γωνία στροφής, υπολογίζεται από τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων οι μεταβλητότητες  $\sigma_x, \sigma_y$  των εικονοσυντεταγμένων μέσω των εξ. 17 και 18.

Έχουμε λοιπόν τα ακόλουθα:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial \omega}\right)^2 \sigma_\omega^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)^2 \sigma_\varphi^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \kappa}\right)^2 \sigma_\kappa^2 \quad (26)$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial \omega}\right)^2 \sigma_\omega^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)^2 \sigma_\varphi^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \kappa}\right)^2 \sigma_\kappa^2 \quad (27)$$

Ομοίως με την περίπτωση των θέσεων των προβολικών κέντρων, παρουσιάζονται ξεχωριστά οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων συγγραμμικότητας.

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = -c \frac{D[-r_{31} \cdot (Y - Y_o) + r_{21} \cdot (Z - Z_o)] + N_x[r_{33} \cdot (Y - Y_o) - r_{23} \cdot (Z - Z_o)]}{D^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \phi} = -c \frac{-D^2 \cos \kappa + N_x[-N_x \cdot \cos \kappa + N_y \sin \kappa]}{D^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa} = -c \frac{N_y}{D}$$

Εικόνα 21: Μερικές Παράγωγοι της x εικονοσυντεταγμένης

Πηγή: [http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM\\_PartialsofCollinearity\\_2008.pdf](http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM_PartialsofCollinearity_2008.pdf)

$$\frac{\partial y}{\partial \omega} = -c \frac{D[-r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{22} \cdot (Z - Z_o)] + N_y[r_{33} \cdot (Y - Y_o) - r_{23} \cdot (Z - Z_o)]}{D^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \phi} = -c \frac{D^2 \sin \kappa + N_y[N_x \cos \kappa + N_y \sin \kappa]}{D^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \kappa} = c \frac{N_x}{D}$$

Εικόνα 22: Μερικές Παράγωγοι της y εικονοσυντεταγμένης

Πηγή: [http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM\\_PartialsofCollinearity\\_2008.pdf](http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM_PartialsofCollinearity_2008.pdf)

### 2.5.1.viii Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Η περιγραφή της επιφάνειας της υπό εξέταση περιοχής αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη ορθοαναγωγής. Ανάλογα το μέθοδος της εδαφοψηφίδας η ποιότητα και η πυκνότητα περιγραφής της επιφάνειας είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντική για την επίτευξη της ορθοαναγωγής. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η εδαφοψηφίδα τόσο λιγότερη επιρροή έχει στον προσδιορισμό των εικονοστοντεταγμένων, άρα και στην τελική ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας.

Το παραπάνω μπορεί αρχικά να εξηγηθεί περιγραφικά ως εξής. Κάθε μοναδιαία επιφάνεια που καταγράφεται, απεικονίζει εκτός από το ποιοτικό κομμάτι (φασματική υπογραφή) και την γεωμετρία της περιοχής που καταγράφει. Όμως όντας μοναδιαία επιφάνεια περιγράφει την “μέση” γεωμετρία (υψόμετρο) αυτής της περιοχής, δηλαδή η κάθε εδαφοψηφίδα που καταγράφεται από τον δέκτη βρίσκεται στην συγκεκριμένη θέση όπως έχει γίνει η καταγραφή του σήματος από το σύνολο της επιφάνειας. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια που καταγράφεται από τα εικονοστοιχεία,

τόσο πιο γενικευμένη είναι και η γεωμετρία στην οποία αντιστοιχεί η εδαφοψηφίδα (μικρότερες εκτροπές λόγω αναγλύφου γίνονται ορατές στην εικόνα). Κατά συνέπεια με την αύξηση του μεγέθους της εδαφοψηφίδας μπορούμε να μειώσουμε τόσο την πυκνότητα περιγραφής του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, όσο και την απόλυτη υψομετρική ακρίβεια των σημείων.

Από την συνθήκη συγραμμικότητας μπορούμε να υπολογίσουμε το μεταδιδόμενο σφάλμα που θα έχουν οι εικονοσυντεταγμένες λόγω του σφάλματος του υψομέτρου. Το σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων θεωρείται ότι είναι X,Y οριζοντιγραφικές συντεταγμένες κάποιας προβολής (π.χ. ΕΓΣΑ'87 ή UTM 34°). Το Z είναι το ορθομετρικό υψόμετρο, το οποίο θεωρείται ότι έχει κάποιο σφάλμα.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω υπολογίζουμε το σφάλμα που θα έχουν οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων μέσω των εξισώσεων 17 και 18.

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial Z}\right)^2 \sigma_Z^2$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial Z}\right)^2 \sigma_Z^2$$

για λόγους εξοικονόμησης χώρου παρουσιάζονται ξεχωριστά οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων 17 και 18 ως προς το υψόμετρο Z, οπότε και προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = -\frac{\partial x}{\partial Z_o} = -c \frac{r_{31}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{33}[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{21} \cdot (Y - Y_o) + r_{31} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z} = -\frac{\partial y}{\partial Z_o} = -c \frac{r_{32}[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)] - r_{33}[r_{12} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{32} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{13} \cdot (X - X_o) + r_{23} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]^2}$$

Εικόνα 23 : Μερικές Παράγωγοι ως προς το υψόμετρο Z

Πηγή: [http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM\\_PartialsofCollinearity\\_2008.pdf](http://dprg.geomatics.ucalgary.ca/system/files/AKAM_PartialsofCollinearity_2008.pdf)

## 2.5.2 Μετάδοση Σφαλμάτων από Αλγορίθμους Γεωαναφοράς – Ορθοαναγωγής

### 2.5.2.i Μετάδοση Σφαλμάτων στους Πολυωνυμικούς Μετασχηματισμούς

Η οικογένεια αυτή των αλγορίθμων, όπως έχει ήδη αναλυθεί, μετασχηματίζει τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων από το σύστημα αναφοράς της εικόνας στο γεωδαιτικό σύστημα. Το μόνο που αλλάζει είναι η συνάρτηση που μετασχηματίζει τις συντεταγμένες. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές των αντίστοιχων πολυωνύμων. Το τελευταίο πραγματοποιείται με την στόχευση φωτοσταθερών στην εικόνα. Να σημειωθεί ότι ο αριθμός των φωτοσταθερών που στοχεύονται είναι πάντα μεγαλύτερος από τον ελάχιστο απαιτούμενο, οπότε η επίλυση γίνεται με την Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (Μ.Ε.Τ.). Έτσι εκτός από τους συντελεστές των πολυωνύμων προσδιορίζεται ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας τους και τα

εναπομείναντα σφάλματα των συντεταγμένων των φωτοσταθερών. Εφαρμόζοντας τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων υπολογίζουμε το σφάλμα που θα έχουν οι παραγόμενες συντεταγμένες.

$$\begin{aligned}\sigma_X &= V_X = J_{y1X}^o V_y J_{y1X}^{oT} \\ \sigma_Y &= V_Y = J_{y2X}^o V_y J_{y2X}^{oT}\end{aligned}$$

με  $J_{yX}^o$ ,  $V_y$  ο Ιακωβιανός και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων των συντελεστών του πολυωνύμου. Το σφάλμα που υπολογίζεται είναι θεωρητικά το σφάλμα που μεταδίδει η συνάρτηση στις τελικές συντεταγμένες. Όμως η συνάρτηση που μετασχηματίζει τις συντεταγμένες είναι προσεγγιστική. Έτσι το εκτιμώμενο σφάλμα δεν θα είναι απαραίτητα το σωστό.

Για τον λόγο αυτό σκοπεύονται τα σημεία ελέγχου (check points) για να υπολογιστεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που θα έχουν οι συντεταγμένες των σημείων αυτών. Δηλαδή υπολογίζεται η διαφορά των αληθών με τις προκύπτουσες συντεταγμένες στα συγκεκριμένα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται έλεγχος της ποιότητας της γεωαναφερμένης εικόνας δειγματοληπτικά. Ειδικότερα το σφάλμα που υπολογίζεται αφορά τα συγκεκριμένα σημεία και δεν είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται στην εικόνα. Το σφάλμα αυτό γίνεται περισσότερο αντιπροσωπευτικό είτε στις περιοχές γύρω από τα σημεία ελέγχου, είτε σε σημεία με παρόμοιο υψόμετρο με αυτό των σημείων ελέγχου.

Τέτοιος τύπος προσδιορισμού της ακριβείας της γεωαναφερμένης εικόνας εκτός ότι δεν είναι καθολικός αλλά δειγματοληπτικός και ενδεικτικός περιέχει τον υποκειμενικό παράγοντα “στόχευση σημείων από χρήστη”. Δηλαδή το υπολογιζόμενο σφάλμα περιέχει και το σφάλμα στόχευσης του χρήστη, όπως αυτό προκύπτει από την ερμηνεία της εικόνας. Όμως σε αυτές τις περιπτώσεις δεν γίνεται να προσδιοριστούν με διαφορετικό τρόπο τα σφάλματα των γεωαναφερμένων εικόνων.

### 2.5.2.ii Μετάδοση Σφαλμάτων στον Αλγόριθμο *Delaunay triangulation*

Στον προκείμενο αλγόριθμο υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις αναφορικά με τον τρόπο μετάδοσης των σφαλμάτων. Αυτό έγκειται στον τρόπο υπολογισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των εικονοστοιχείων της απεικόνισης. Όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, οι συντεταγμένες των σημείων προσδιορίζονται από παρεμβολές μεταξύ των GCP με βάση την μέθοδο Voronoi. Δηλαδή ο υπολογισμός των συντεταγμένων ενός σημείου προσδιορίζεται με γραμμική παρεμβολή, από τα GCP στα οποία υπάγεται. Έτσι το σφάλμα της γεωαναφερμένης εικόνας υπολογίζεται μόνο από τα σημεία ελέγχου. Το σφάλμα που προκύπτει από τα σημεία αυτά, αφορά μόνο αυτά και δεν γίνεται να γενικευτεί στην υπόλοιπη εικόνα.

Η παρεμβολή που εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων, παράγει σφάλματα λόγω της μη αντιπροσωπευτικότητας της γεωμετρίας της εικόνας με το ανάγλυφο και την γραμμικότητα της παρεμβολής. Δηλαδή η γεωμετρία του δέκτη σε συνδυασμό με το ανάγλυφο της περιοχής συνήθως δεν γίνεται να περιγραφούν με γραμμικές παρεμβολές μεταξύ γνωστών σημείων. Η ποιότητα λοιπόν του μετασχηματισμού αυτού επηρεάζεται εκτός από τον συνδυασμό δέκτης-ανάγλυφο και από την κατανομή των GCPs στην εικόνα. Γενικά όσο πιο ομαλό είναι το έδαφος και όσο πιο πυκνά και ομοιόμορφα κατανομημένα είναι τα γνωστά σημεία τόσο πιο καλά προσαρμόζει η γραμμική παρεμβολή στην πραγματική κατάσταση. Όμως επειδή κατά βάση δεν είναι γνωστό το ανάγλυφο ή/και δεν γίνεται να έχουμε πάρα πολλά GCPs, δεν μπορούμε να προβλέψουμε με ακρίβεια την κατανομή των σφαλμάτων σε μία τέτοια εικόνα.

**2.5.2.iii Μετάδοση Σφαλμάτων στο Φυσικό Μοντέλο**

Ο αλγόριθμος του φυσικού μοντέλου γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής, όπως έχει ήδη αναλυθεί γεωαναφέρει τα εικονοστοιχεία της εικόνας βάσει του μαθηματικοποιημένου φυσικού μοντέλου του δέκτη. Για τον λόγο αυτό, ο παρών είναι πιο ακριβής από όλους τους παραπάνω και τα σφάλματα που παράγει είναι εκτιμήσιμα. Στην περίπτωση του έμμεσου τύπου ορθοαναγωγής (indirect geocoding) ζητάμε να προσδιοριστούν οι εικονοσυντεταγμένες που θα έχει ένα δεδομένο σημείο του εδάφους. Αυτό γίνεται μέσω της συνθήκης συγγραμμικότητας, όπως περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Η ακρίβεια της γεωαναφοράς στην προκειμένη περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με στόχευση σημείων ελέγχου, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτός πρακτικά χρησιμοποιείται συχνότερα, αφού είναι απλός και γρήγορος. Όμως έχει ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα, η υπολογιζόμενη ακρίβεια εξαρτάται από την ικανότητα στόχευση του δέκτη και της διαχωριστικής ικανότητας του δέκτη.

Ο δεύτερος τρόπος για τον υπολογισμό της ακρίβειας της γεωαναφερμένης εικόνας πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της μετάδοσης που έχουν τα σφάλματα βάσει των θεωρούμενων παραμέτρων που περιγράφουν την γεωμετρία του δέκτη-περιβάλλον. Με το παρόντα τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ακρίβεια του κάθε εικονοστοιχείου της γεωαναφερμένης εικόνας. Βέβαια σε αντίθεση με τον προηγούμενο τρόπο, αυτός είναι αρκετά πιο δύσχρηστος κυρίως λόγω της πολυπλοκότητάς του και το κατά πόσον είναι προσδιορίσιμα τα γεωμετρικά μεγέθη που μοντελοποιούν τον δέκτη.

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο “Παράμετροι Φυσικού Μοντέλου pushbroom” η συνθήκη συγγραμμικότητας προσαρμόζεται κατάλληλα για να περιγραφεί η γεωμετρία του δέκτη. Έτσι παρουσιάζεται παρακάτω η τελική της μορφή:

$$x_{\text{τελικό}}^i = (-c \frac{A_1^i}{\Pi^i} + x_0) = 0 \tag{24}$$

$$y_{\text{τελικό}}^i = (-c \frac{A_2^i}{\Pi^i} + \varepsilon \frac{y^i}{c} + y_0) - \frac{-c \frac{A_2^i}{\Pi^i} + \varepsilon \frac{y^i}{c} + y_0}{y^i} dy + dy_{\text{atm}} + dy_{\text{cur}} \tag{25}$$

με  $A_1, A_2$  και  $\Pi$  οι αριθμητές και ο παρανομαστής του κλάσματος της συνθήκης συγγραμμικότητας αντίστοιχα και  $i$  η αντίστοιχη κεντρική προβολή.

Για να υπολογιστεί το σφάλμα που θα έχει το κάθε τελικό εικονοστοιχείο της γεωαναφερμένης εικόνας, γίνεται ανασκόπηση στον τρόπο εφαρμογής του αλγορίθμου και στις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους. Με αρχή ένα οριζοντιογραφικά γνωστό σημείο ζητάμε να βρούμε την εικονοσυντεταγμένη στην οποία ανήκει. Αφού οριστεί το σημείο για το οποίο θα βρεθεί η θέση του στην εικόνα, τότε ισχύει:  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ . Σε αυτό το σημείο τοποθετείται ή παρεμβάλλεται υψόμετρο  $Z$  με σφάλμα  $\sigma_z$ . Στην συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος λήψης του σημείου από την εξίσωση  $x_{\text{τελικό}}^i = 0$ , καθώς έχει μόνο ένα άγνωστο, τον χρόνο  $t$ . Λύνεται η παραπάνω εξίσωση ως προς  $t$  και προκύπτει η ακόλουθη μορφή:  $t = f(c, X, Y, Z, X_0^0, X_1^0, X_2^0, \dots, \kappa_0^0, \kappa_1^0, x_0)$ . Από τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων και τις παραδοχές που έχουν γίνει βρίσκεται το σφάλμα υπολογισμού του χρόνου λήψης.

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{\partial t}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial Z}\right)^2 \sigma_z^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial X_0^0}\right)^2 \sigma_{X_0^0}^2 + \dots + \left(\frac{\partial t}{\partial \kappa_0^0}\right)^2 \sigma_{\kappa_0^0}^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \kappa_1^0}\right)^2 \sigma_{\kappa_1^0}^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial x_0}\right)^2 \sigma_{x_0}^2$$

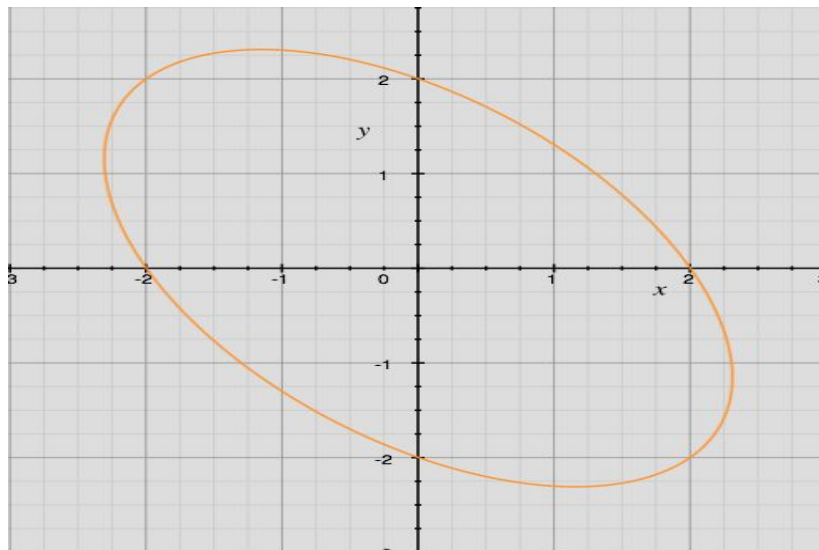


Βέβαια ο παραπάνω τύπος είναι η απλούστευση του γενικευμένου νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική αφού οι συμμεταβλητότητες μεταξύ σχεδόν όλων των μεταβλητών είναι είτε μηδενική είτε μικρή.

Έχοντας λοιπόν υπολογιστεί ο χρόνος λήψης και το αντίστοιχο σφάλμα, προσδιορίζεται για το δεδομένο σημείο στο έδαφος η  $y$  συντεταγμένη στην κεντρική προβολή. Έτσι με απλή αντικατάσταση στην εξίσωση 25 υπολογίζεται η  $y$ . Το σφάλμα αυτής, όπως και στην περίπτωση του χρόνου λήψης, προσδιορίζεται από τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων, μέσω της εξίσωσης 25.

$$\sigma_{y'}^2 = \left(\frac{\partial y_{\text{τελικό}}^i}{c}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial y_{\text{τελικό}}^i}{Z}\right)^2 \sigma_Z^2 + \left(\frac{\partial y_{\text{τελικό}}^i}{X_0^0}\right)^2 \sigma_{X_0^0}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y_{\text{τελικό}}^i}{\kappa_1^0}\right)^2 \sigma_{\kappa_1^0}^2 + \left(\frac{\partial y_{\text{τελικό}}^i}{y_0}\right)^2 \sigma_{y_0}^2$$

Με το πέρας των υπολογισμών των εικονοσυντεταγμένων και των σφαλμάτων τους, έχουμε για κάθε γεωαναφερμένο σημείο το σφάλμα αντιστοιχισής του στην εικόνα. Οι μονάδες που υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες, είναι σε pixel, οπότε και τα σφάλματα αυτών θα είναι σε pixel. Το σφάλμα αυτό μετατρέπεται σε μέτρα στο έδαφος μέσω του ονομαστικού μεγέθους της εδαφοψηφίδας. Η διεύθυνση του ζεύγους σφάλματος ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) ή αλλιώς η έλλειψη σφάλματος ακολουθεί τον προσανατολισμό που έχει η αρχική εικόνα ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Τελικά για κάθε σημείο της γεωαναφερμένης εικόνας εκτός από την θέση του υπολογίζεται και το σφάλμα του.



Εικόνα 24: Έλλειψη Σφάλματος Γεωαναφερμένου Σημείου

### 2.5.3 Σφάλματα από Αναδόμηση Γεωαναφερμένης Εικόνας

Η διαδικασία της ορθοαναγωγής δεν τελειώνει στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων. Όντας ψηφιακές απεικονίσεις θα πρέπει να αναδομηθούν για παραχθεί εικόνα. Ο όρος αναδόμηση είναι ουσιαστικά η τοποθέτηση των ψηφιακών τιμών που έχουν καταγραφεί στις αντίστοιχες θέσεις που υπαγορεύει η ορθοαναγωγή. Επειδή οι ψηφιακές εικόνες είναι διακριτές και πινακοποιημένες, δηλαδή έχουν συντεταγμένες (γραμμή/στήλη) με ακέραιες τιμές, η θέση στην οποία τελικώς θα αντιστοιχιστούν ψηφιακές τιμές θα πρέπει να είναι ακέραια. Να σημειώσουμε ότι εκτός από την στρογγυλοποίηση (μέθοδος του εγγύτερου γείτονα) υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, οι

οποίοι όμως αλλοιώνουν τις αρχικές τιμές, οπότε και δεν αναλύουμε περαιτέρω.

Παρατηρώντας την παραπάνω διαδικασία είναι φανερό ότι μεταδίδεται ένα επιπλέον σφάλμα στην γεωαναφερμένη εικόνα. Το σφάλμα αυτό πρακτικά είναι η στρογγυλοποίηση της τιμής που έχει υπολογιστεί. Κατ' επέκταση ορίζεται η μέγιστη ακρίβεια με την οποία είναι εφικτή η ορθοαναγωγή ανεξάρτητα της ποιότητας των αρχικών δεδομένων. Το όριο αυτό είναι 0.5 του εικονοστοιχείου, το οποίο στην συνέχεια μετατρέπεται σε μέτρα μέσω της εδαφοψηφίδας.

Θεωρητικά το σφάλμα που προκαλεί η αναδόμηση στις εικονοσυντεταγμένες προστίθεται στο σφάλμα της ορθοαναγωγής με τον ακόλουθο τρόπο:

Έστω  $\hat{x}$  το προσδιορισμένο ζεύγος εικονοσυντεταγμένων από την ορθοαναγωγή και  $x$  η στρογγυλοποιημένη τιμή του ζεύγους. Το σφάλμα που θα έχει το σημείο είναι  $\sigma = \hat{x} - x$ . Παρατηρείται ότι το σφάλμα που έχει κάθε σημείο είναι διαφορετικό και εξαρτάται από το πόσο κοντά είναι η προσδιορισμένη τιμή στον αντίστοιχο ακέραιο αριθμό.

Ως αποτέλεσμα το τελικό σφάλμα του σημείου είναι το σφάλμα της ορθοαναγωγής συν το σφάλμα της αναδόμησης. Πρακτικά είναι πολύ δύσκολο τεχνικά να κρατηθεί το σφάλμα της αναδόμησης για κάθε σημείο, οπότε χωρίς βλάβη της γενικότητας ανάλογα με την σχέση που έχουν τα δύο σφάλματα παίρνουμε ως τελικό το μεγαλύτερο. Αν βέβαια ο αλγόριθμος καταγράφει και το σφάλμα της αναδόμησης τότε μπορεί εύκολα υπολογιστεί το τελικό και πιο ρεαλιστικό σφάλμα στην γεωαναφερμένη εικόνα.

### **3. RADAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ**

### **3. RADAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ**

Στο παρόν το τμήμα αυτής της εργασίας αρχικά θα παρατεθούν ορισμένα βασικά στοιχεία της Μικροκυματικής Τηλεπισκόπησης. Στη συνέχεια θα γίνει μία θεωρητική ανάλυση των ειδών των καταγραφών που υπάρχουν για την σύνθεση των μικροκυματικών εικόνων. Ειδικότερα θα περιγραφούν οι τρόποι λειτουργίας των συστημάτων SAR που παράγουν απεικονίσεις. Με την παρουσίαση αυτών, εμβαθύνουμε στη συνέχεια στην αντίστοιχη γεωμετρία και αναλύουμε το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει τις SAR απεικονίσεις. Σε επόμενο στάδιο αναλύουμε τους αλγορίθμους ορθοαναγωγής για την συγκεκριμένη γεωμετρία. Στην συνέχεια μελετάται η θεωρητική ακρίβεια στις γεωαναφερμένες SAR απεικονίσεις, όπως αυτή προκύπτει από τον τρόπο λήψης των δεδομένων.

#### **3.1 Γενικά Στοιχεία Μικροκυματικής S.A.R. Τηλεπισκόπησης**

Η μικροκυματική τηλεπισκόπηση δραστηριοποιείται στην περιοχή των μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ή αλλιώς εξετάζει τα μήκη κύματος της Η/Μ ακτινοβολίας από 3mm έως 1m περίπου. Το σύστημα καταγραφής της ακτινοβολίας αυτής μπορεί να είναι είτε ενεργό είτε παθητικό. Στην πρώτη περίπτωση εκπέμπεται από το σύστημα συγκεκριμένου τύπου ακτινοβολία και καταγράφεται η οπισθοσκέδασή της. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση ο δέκτης απλώς καταγράφει την εκπεμπόμενη ή ανακλώμενη ακτινοβολία του αντικειμένου [Short, 2005].

Τα ενεργητικά συστήματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: RADAR πραγματικού ανοίγματος κεραίας και RADAR συνθετικού ανοίγματος κεραίας. Η βασική διαφορά των δύο ειδών συστημάτων είναι η παραγωγή εικόνων με πολύ διαφορετικές χωρικές διακριτικές ικανότητες. Ειδικότερα τα SAR έχουν πολύ μεγαλύτερη Δ.Ι. από τα SLAR και στις δύο διευθύνσεις, δηλαδή πολύ μικρότερη εδαφοψηφίδα [Καραθανάση, 2003]. Αυτό επιτυγχάνεται όχι με την τεχνική διαφοροποίηση του συστήματος (π.χ. τροποποιήσεις στην δομή του), αλλά σε μία επεξεργασία που λαμβάνει χώρα πριν την δημιουργία της δορυφορικής ψηφιακής τηλεπισκοπηκής απεικόνισης (Δ.Ψ.Τ.Α.)

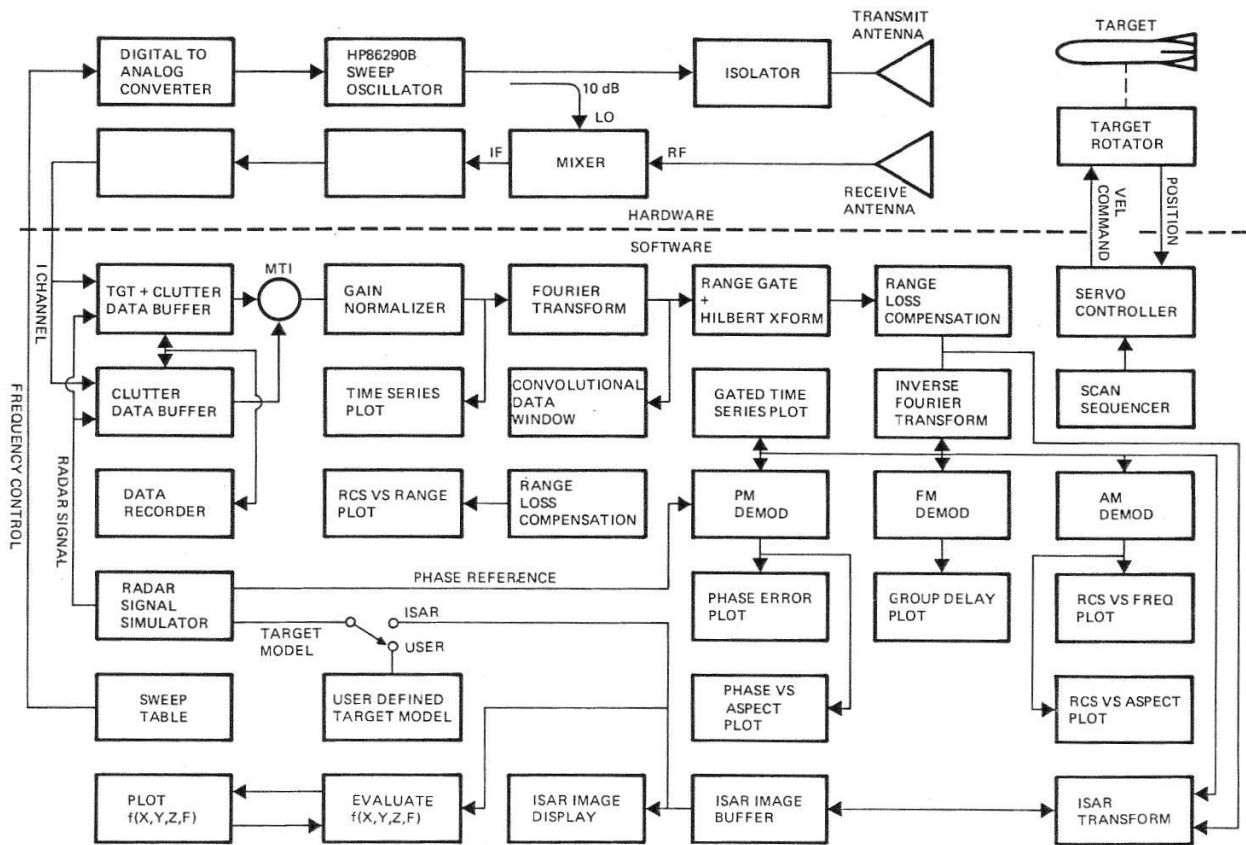
Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στην εμβάθυνση των SAR απεικονίσεων, οπότε και σε πρώτο στάδιο αναλύουμε την προσέγγιση της μικροκυματικής τηλεπισκόπησης ως προς την φυσική πραγματικότητα του αντικειμένου και στην συνέχεια αναφέρουμε τα βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος.

#### **3.1.1 Αρχή Λειτουργίας Συστήματος S.A.R.**

##### **3.1.1.i Επισκόπηση Λειτουργίας Συστήματος SLAR-SAR**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το SLAR και τα SAR είναι το ίδιο σύστημα με τη διαφορά της μετέπειτα επεξεργασίας των καταγεγραμμένων μικροκυματικών δεδομένων. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος στηρίζεται στην εκπομπή και λήψη παλμών. Ο κάθε παλμός που εκπέμπεται και οπισθοσκεδάζεται και καταγράφεται, περιγράφεται αφενός από τα ποιοτικά

χαρακτηριστικά της δέσμης και αφετέρου από τους χρόνους εκπομπής/λήψης και το χρόνο διάρκειας του παλμού. Οι δέσμες που εκπέμπονται είναι εστιασμένη ακτινοβολία και εκπέμπονται από μία κατάλληλη κεραία. Συνήθως η κεραία αυτή χρησιμοποιείται και για την καταγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος [Short, 2005][Καραθανάση, 2003]. Διαγραμματικά μπορούμε να δούμε παρακάτω την δομή ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 25: Δομή Συστήματος RADAR

Πηγή: <http://www.nearfield.com/amta/IMAGES/Frequency%20Control.jpg>

Μερικά βασικά υποσυστήματα που ξεχωρίζουν στην δομή αυτή και αποτελούν την βάση λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος είναι: η γεννήτρια και διαμορφώτρια παλμών (pulse generation and modulation), ο αναλογικός σε ψηφιακός μετατροπέας (analog to digital conversion), κεραία (antenna), ο χαμηλού θορύβου ενισχυτής (amplifier), και το ρολόι (timing and frequency control).

Η γεννήτρια και διαμορφώτρια παλμών παράγει και διαμορφώνει το προς εκπομπή σήμα. Η διαμόρφωση είναι απαραίτητη για να μπορεί το σήμα να διανύει μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες. Η γεννήτρια αυτή καθορίζει την ένταση και την διάρκεια που θα έχουν οι εκπεμπόμενοι παλμοί και φυσικά τη συχνότητα με την οποία εκπέμπονται. Τέλος από το υποσύστημα αυτό καθορίζεται και η συχνότητα – μήκος κύματος που θα έχει η ακτινοβολία.

Το σήμα που δημιουργείται από το προηγούμενο υποσύστημα είναι ψηφιακό. Έτσι για να μπορεί να εκπεμφθεί από την κεραία θα πρέπει να μετατραπεί σε αναλογικό. Τη στιγμή της λήψης του αναλογικού σήματος θα πρέπει να γίνει η αντίθετη μετατροπή για να μπορέσει να ενισχυθεί και στη συνέχεια να καταγραφεί από τα υπόλοιπα υποσυστήματα.

Όταν το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα φτάνει στην κεραία είναι πολύ εξασθενημένο. Για τον

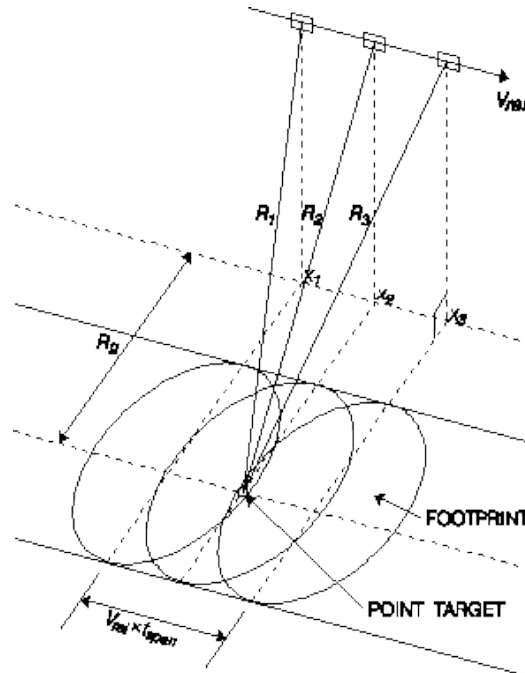
λόγο αυτό η πρώτη διαδικασία που λαμβάνει χώρα είναι η ενίσχυσή του. Ο τρόπος ενίσχυσης του σήματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός, διότι κατά αυτή τη διαδικασία πολλαπλασιάζεται ο θόρυβος. Για τον λόγο αυτό το υποσύστημα του ενισχυτή, δυναμώνει το σήμα με ειδικές μεθοδολογίες που προσδίδουν το ελάχιστο δυνατό θόρυβο στο λαμβανόμενο σήμα [Καραθανάση, 2003].

Το ρολόι του συστήματος αποτελεί από τα βασικότερα υποσυστήματα του οργάνου, καθώς συντονίζει όλα τα υπάρχοντα υποσυστήματα με σκοπό την εύρυθμή τους λειτουργία.

Τέλος παρουσιάζουμε συνοπτικά την διαδικασία που λαμβάνει χώρα για την παραγωγή της SAR απεικόνισης, όπως αυτή γίνεται στα υποσυστήματα του οργάνου. Αρχικά το ρολόι ορίζει το χρόνο και την διάρκεια λειτουργίας όλων των εμπλεκόμενων συστημάτων. Μόλις δοθεί εντολή, η γεννήτρια παλμών παράγει και διαμορφώνει το προς εκπομπή σήμα. Αυτή παράγει μία παλμοσειρά  $i$  την χρονική στιγμή  $t$  με συγκεκριμένη φάση αναφοράς  $\phi_i$ . Ο παλμός αυτός παράγεται με συχνότητα παραγωγής παλμών  $prf$ , η οποία καθορίζεται από το σύστημα. Το σήμα αυτό διεγείρει τον διαμορφωτή και παράγει παλμούς υψηλής ισχύος με κατάλληλα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια αυτό ενισχύεται σε ένταση και συμπιέζεται σε διάρκεια ( $chirp$ ) από τα κατάλληλα κυκλώματα. Ύστερα οδηγείται στον αναλογικό μετατροπέα από όπου στέλνεται στην κεραία για εκπομπή, μέσω του κυκλοφορητή ( $circ$ ). Το σήμα ταξιδεύει μέχρι το στόχο, οπισθοσκεδάζεται και επιστρέφει στην κεραία. Πρώτη διαδικασία που λαμβάνει χώρα εκεί είναι η ενίσχυση του σήματος μέσω του χαμηλού θορύβου ενισχυτή. Να σημειωθεί ότι το σήμα που επιστρέφει είναι όμοιο με το αρχικό αλλά είναι μετατοπισμένο χρονικά κατά  $\tau=2R/c$ . Στη συνέχεια γίνεται η αποδιαμόρφωση του σήματος με ένα ημιτονικό και ένα συνημιτονικό φίλτρο. Αυτό παράγει τις δύο συνιστώσες που θα έχει το εικονοστοιχείο της εικόνας. Συχνά στη βιβλιογραφία απαντώνται η σε φάση και η τετραγωνική συνιστώσα αντίστοιχα. Τα δύο αυτά σήματα ξανά ενισχύονται και μετατρέπονται σε ψηφιακά. Η μέθοδος της ψηφιοποίησης ακολουθεί το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon. Τέλος αποθηκεύονται οι ψηφιακές πλέον πληροφορίες του σήματος (ένταση, φάση, πόλωση, ιστορικό φάσης).

### 3.1.1.ii Σύνθεση Συνθετικής Κεραίας

Για να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση του αζιμουθίου (κατά την πτήση), όπως είναι γνωστό από την γεωμετρία των SLAR, χρειάζεται αύξηση του μήκους της χρησιμοποιούμενης κεραίας. Οι δορυφορικές πλατφόρμες για να έχουν με αυτόν τον τύπο RADAR 1 km διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων, θα πρέπει να έχουν μήκος κεραίας 160 μέτρα (με 20cm μήκος κύματος). Αυτό πρακτικά είναι αδύνατο να επιτευχθεί και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τα RADAR συνθετικού ανοίγματος. Η φιλοσοφία αυτών είναι η σύνθεση μίας τεχνητής κεραίας στον χώρο με πολύ μεγάλο μήκος από την τροχιά που διαγράφει ο δέκτης. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τη συνεχή για κάποιο χρονικό διάστημα παρατήρηση του κάθε στόχου λόγω του μεγέθους του αποτυπώματος της κεραίας (antenna footprint) και του φαινομένου doppler [Ουζούνου, 2000][Καραθανάση, 2003].



Εικόνα 26: Αποτύπωμα Κεραίας RADAR

Πηγή: [http://www.geo.unizh.ch/~fpaul/sar\\_theory/theory\\_fig7a.gif](http://www.geo.unizh.ch/~fpaul/sar_theory/theory_fig7a.gif)

Όπως γίνεται φανερό και από το παραπάνω σχήμα λόγω της μεγάλης έκτασης του αποτυπώματος, κάθε σημείο καταγράφεται πολλές φορές. Έτσι για ένα συγκεκριμένο σημείο, γίνεται καταγραφή από το σύστημα στις θέσεις 1,2,...,N. Για το σήμα αυτό υπάρχει καταγεγραμμένη η φάση που έχει σε κάθε θέση της πλατφόρμας, η οποία λέγεται ιστορικό φάσης (phase history). Λόγω της σχετικής μετάθεσης δορυφόρου – στόχου η φάση αυτή αλλάζει με βάση το φαινόμενο Doppler. Αρχικά είναι θετική, αφού η απόσταση δορυφόρου – στόχου μειώνεται, στην συνέχεια μηδενίζεται και τελικά γίνεται αρνητική.

Κάθε μία από αυτές τις θέσεις του συστήματος radar αποτελεί μέρος της συνθετικής κεραίας που θα γίνει με την SAR επεξεργασία των δεδομένων. Η συνθετική κεραία μπορεί να “κατασκευαστεί” με διάφορες μεθοδολογίες. Στην προκειμένη θα αναλύσουμε ενδεικτικά την μέθοδο όξυνσης της δέσμης Doppler (Doppler beam sharpening) [Παράσχος, 2000].

Για κάθε μία θέση που έχει παρατηρηθεί ένα σημείο, είναι καταγεγραμμένη η φάση, το πλάτος και η συχνότητα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Η συχνότητα αυτή, λόγω της σχετικής ταχύτητας δέκτη – στόχου μεταβάλλεται από κάθε θέση λήψης. Έτσι για ένα σημείο με γωνία παρατήρησης  $\beta$ , ταχύτητα δορυφόρου  $V$  και χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος  $\lambda$  η μετατόπιση Doppler δίνεται από τον τύπο:

$$f_d = \frac{2 * V}{\lambda} \sin(\beta)$$

Χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο εύρους ζώνης  $\Delta f_d$  (ολίσθηση συχνότητας Doppler) αποκτούμε ένα σήμα το οποίο αντιστοιχεί σε γωνία όρασης  $\Delta\beta$ . Η γωνία αυτή είναι παράλληλη στην τροχιά πτήσης του δορυφόρου και μετατρέπεται μέσω της πλευρικής απόστασης σε  $\Delta x = R * \Delta\beta$ . Προφανώς ο τύπος αυτός ισχύει, αφού η γωνία  $\Delta\beta$  είναι πολύ μικρή. Οπότε η αξιμουθιακή διαχωριστική ικανότητα θα δίδεται από τον τύπο:

$$\Delta x = \frac{\lambda * R}{2 * V} \Delta f_d$$

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η διαχωριστική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων πλέον είναι ανεξάρτητη του πραγματικού μήκους της κεραίας. Οι συχνότητες που θα χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το εαν έχουν διορθωθεί ή όχι πριν την άθροισή τους προκύπτουν τα εστιασμένα ή μη εστιασμένα SAR αντίστοιχα. Τα εστιασμένα SAR διορθώνουν την καταγραφόμενη φάση για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι θέσεις παρατήρησης, ενώ τα μη εστιασμένα SAR δεν την διορθώνουν, για αυτό μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλες τις τιμές επιστρεφόμενου σήματος, αλλά περιορίζονται σε αυτές των οποίων οι διαφορές φάσης είναι μέχρι 45°. Κατά συνέπεια τα εστιασμένα δεδομένα έχουν ακόμα καλύτερη διαχωριστική ικανότητα, η

οποία δίνεται από τον τύπο:  $\Delta x_{min} = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\lambda\right)}$ .

### 3.1.1.iii Η Εξίσωση του RADAR

Όπως είδαμε στα παραπάνω, το σήμα που εκπέμπεται από το radar και καταγράφεται είναι πλήρως γνωστή. Ειδικότερα και για τις δύο τιμές σήματος γνωρίζουμε την ένταση, τη φάση και την πόλωσή του. Για το λόγο αυτό καθίσταται δυνατή η διατύπωση μίας εξίσωσης περιγραφής της ισχύς του καταγραφόμενου σήματος συναρτήσει της ανακλαστικότητας του στόχου.

Η Η/Α όταν προσπίπτει σε μία επιφάνεια ανακλάται με ίση γωνία με αυτή την πρόσπτωσης. Ομοίως και στην ενεργητική μικροκυματική τηλεπισκόπηση η γωνία με την οποία προσπίπτει η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι ίση με αυτή της ανακλώμενης. Έτσι μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον συντελεστή ανακλαστικότητας  $\rho$  με το συντελεστή ανακλαστικότητας δύο διευθύνσεων, ο οποίος αναφέρεται στην στερεογωνία που δημιουργείται στην περίπτωση των μετρήσεων με ραδιομέτρα [Καραθανάση, 2003]. Οπότε έχουμε την ακόλουθη μαθηματική έκφραση του νέου συντελεστή:

$$R_b(\theta_{\text{ανάκλασης}} \varphi_{\text{ανάκλασης}}, \theta_{\text{πρόπτωσης}} \varphi_{\text{πρόπτωσης}}) = \frac{L_{\text{ανάκλασης}}(\theta_{\text{ανάκλασης}} \varphi_{\text{ανάκλασης}})}{E}$$

Με  $E$  ο φωτισμός του στόχου. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο συντελεστής αυτός αντικαθίσταται με την έννοια “ενεργός διατομή (cross section)” στην περίπτωση των RADAR απεικονίσεων. Έχει υπολογιστεί ότι η ενεργός διατομή σχετίζεται με τον συντελεστή ανακλαστικότητας δύο διευθύνσεων σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{d\sigma(\theta_{\text{ανάκλαση}} \varphi_{\text{ανάκλαση}}, \theta_{\text{πρόπτωση}} \varphi_{\text{πρόπτωση}})}{d\Omega} = R_b(\theta_{\text{ανάκλασης}} \varphi_{\text{ανάκλασης}}, \theta_{\text{πρόπτωσης}} \varphi_{\text{πρόπτωσης}}) * \cos^2(\theta) * d\Sigma$$

όπου  $d\Sigma$  η μοναδιαία επιφάνεια του στόχου και  $\theta$  η διεύθυνση της γραμμής φωτισμού στόχου – συστήματος. Στη συνέχεια εισάγεται ο όρος του συντελεστή οπισθοσκέδασης ενός στόχου. Ο τελευταίος ορίζεται ως το κλάσμα της ενεργού διατομής του δέκτη προς την μοναδιαία επιφάνεια του στόχου.

$$\sigma_o = \frac{\sigma_r(\theta, \varphi)}{d\Sigma} = 4\pi R_b(\theta_{\text{ανάκλασης}} \varphi_{\text{ανάκλασης}}, \theta_{\text{πρόπτωσης}} \varphi_{\text{πρόπτωσης}}) * \cos^2(\theta)$$



Από τον ορισμό της έννοιας φαίνεται ότι πρόκειται για καθαρό αριθμό, αλλά επειδή τις περισσότερες φορές παρουσιάζει πολύ μεγάλες τιμές, τον εκφράζουμε σε dBs διαμέσου μίας λογαριθμική έκφρασης:

$$\sigma_{o, dB} = 10 * \log(\sigma_o)$$

Ακόμα ορίζεται και ο συντελεστής  $\gamma(\theta, \varphi)$ , ο οποίος είναι πρακτικά ο συντελεστής οπισθοσκέδασης πολλαπλασιασμένος με το συνημίτονο της γωνίας  $\theta$ .

$$\gamma(\theta, \varphi) = \frac{\sigma_r(\theta, \varphi)}{d\Sigma} \cos(\theta)$$

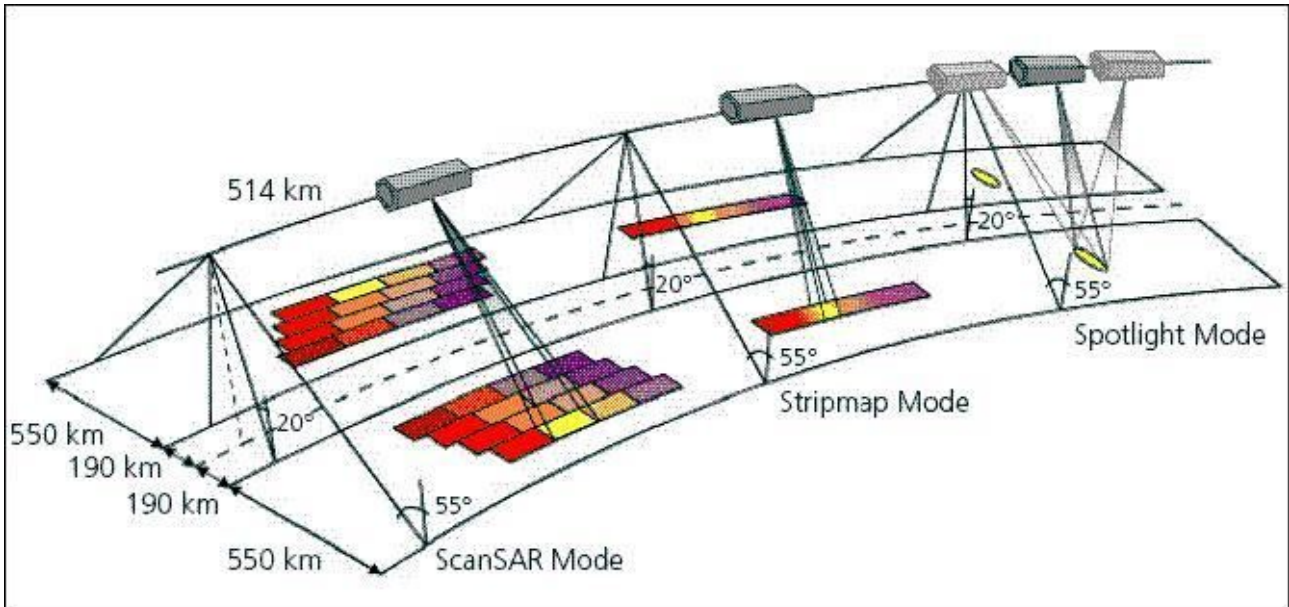
Με βάση λοιπόν τους παραπάνω ορισμούς συντελεστών η εξίσωση των RADAR έχει ως εξής:

$$P_r = \frac{P_t * G_o^2 * \lambda^2 * \sigma_r}{(4\pi)^3 * R^4 * L}$$

όπου  $P_r$  και  $P_t$  η ένταση της καταγραφόμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αντίστοιχα,  $G_o$  το κέρδος της κεραίας,  $L$  οι απώλειες του σήματος,  $\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και  $R$  η πλευρική απόσταση σημείου – δέκτη.

### 3.2 Γεωμετρία Λήψης Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.

Οι SAR δορυφόροι έχουν διαφορετική γεωμετρία λήψης, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του δέκτη. Οι κύριες διαφορές που έχουν οι παραγόμενες απεικονίσεις είναι η διακριτική ικανότητα στις δύο διευθύνσεις και η καταγραφόμενη πόλωση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Έτσι χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, όσο αναφορά τη διαχωριστική ικανότητα, χωρίς όμως αυτό να είναι δεσμευτικό για όλους τους υπάρχοντες και μεταγενέστερους δορυφόρους. Υπάρχει η κλασσική λειτουργία λήψης, για παραγωγή απεικονίσεων μεσαίων διαχωριστικών ικανοτήτων, με την κεραία να “βλέπει” πλάγια και κάθετα στην διεύθυνση της τροχιάς [Καραθανάση, 2003][Díaz, 1998]. Η υψηλή διακριτικής ικανότητας απεικονίσεις παράγονται με διαρκή στροφή της κεραίας. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται διαχωριστικές ικανότητες που αγγίζουν το μέτρο. Βέβαια αυτές καλύπτουν αρκετά μικρότερες εκτάσεις σε σχέση με την μεσαίων διαχωριστικών ικανοτήτων απεικονίσεις. Τέλος υπάρχει και η λειτουργία ScanSar, στην οποία οι εδαφοψηφίδες είναι πολύ μεγάλες, αλλά καλύπτεται πολύ μεγάλη έκταση. Παραθέτουμε ενδεικτικά τις επιφάνειες κάλυψης των τριών λειτουργιών, όπως τα καταγράφει η δορυφορική πλατφόρμα Terrasar-X [TerraSAR-X Ground Segment :Basic Product Specification Document, 2009]. Όμοιες εκτάσεις καταγράφουν και οι υπόλοιποι δορυφόροι.

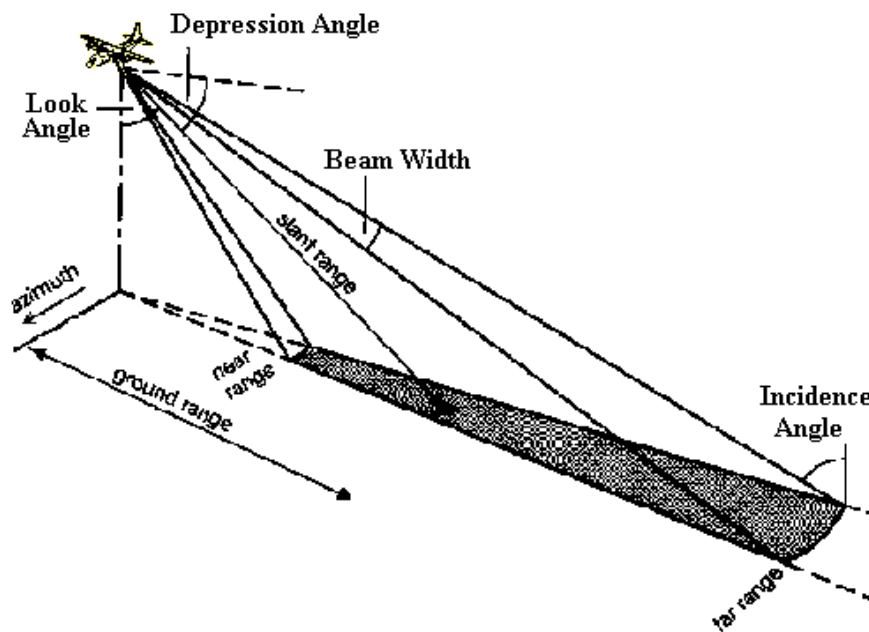


Εικόνα 27 Καλυπτόμενες Εκτάσεις των Τριών Διαφορετικών Τρόπων Λειτουργίας ενός Δέκτη  
 Πηγή: [http://directory.eoportal.org/presentations/6099/TerraSARX\\_Auto12.jpeg](http://directory.eoportal.org/presentations/6099/TerraSARX_Auto12.jpeg)

### 3.2.1 Γεωμετρικά Στοιχεία των Πλάγιων Απεικονίσεων

#### 3.2.1.i Ορισμός Γεωμετρικών Στοιχείων

Το είδος της γεωμετρίας που περιγράφει τις SAR απεικονίσεις, είναι η λεγόμενη πλάγια γεωμετρία (side-looking geometry). Δηλαδή σε αντίθεση με τους παθητικούς δέκτες των υπερφασματικών, ο δέκτης δεν εστιάζει στο nadir, αλλά “βλέπει – φωτίζει” την προς απεικόνιση επιφάνεια πλευρικά. Αρχικά παραθέτουμε τη γεωμετρία που περιγράφει τον τρόπο λήψης των RADAR απεικονίσεων.



Εικόνα 28: Γεωμετρικά Στοιχεία Πλάγιας Απεικόνισης  
 Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

Με τον όρο *slant range* (πλάγια απόσταση)  $R$  εννοούμε την απόσταση σημείου – κεραίας. Αυτή όπως είναι φανερό μεταβάλλεται από την μία άκρη της εικόνας στην άλλη, οπότε και εισάγονται οι όροι *near range* και *far range* αντίστοιχα για την εγγύτερη  $R_{near}$  και μεγαλύτερη  $R_{far}$  απόσταση στο πλάτος μιας απεικόνισης. Ύστερα έχουμε τη γωνία διόπτρευσης (*depression angle*), δηλαδή τη γωνία που σχηματίζεται από την κάθετη στο nadir μέχρι την εκάστοτε πλάγια απόσταση. Η γωνία πρόσπτωσης (*incidence angle*) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της πλάγιας απόστασης και της καθέτου στο σημείο αυτό. Το εύρος των δύο προαναφερθεισών γωνιών για μικρού πλάτους εικόνες μπορεί να θεωρηθεί μηδέν, αφού η καμπυλότητα της γης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα [Short, 2005][Καραθανάση, 2003].

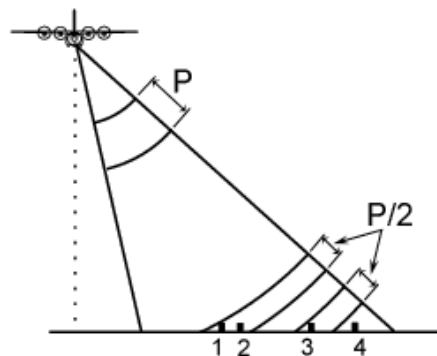
Στη συνέχεια έχουμε και τη γωνία όρασης (*look angle*), η οποία σχηματίζεται από το nadir και την εκάστοτε πλάγια απόσταση. Δύο βασικές διευθύνσεις συνθέτουν την εικόνα: η διεύθυνση αζιμουθίου και η διεύθυνση πλαγίων αποστάσεων. Η αζιμουθιακή διεύθυνση είναι η διεύθυνση που έχουν τα εικονοστοιχεία κατά την τροχιά του δορυφόρου, ενώ η διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων είναι η κάθετη της προηγούμενης. Τέλος έχουμε και την γωνία ανοίγματος της δέσμης (*beam width*), που είναι ουσιαστικά η γωνία που σχηματίζεται από τις δύο πλευρικές άκρες του παλμού.

### 3.2.1.ii Χωρική Ανάλυση Απεικονίσεων

Στις SLAR – SAR απεικονίσεις η χωρική ανάλυση είναι διαφορετική στις δύο διευθύνσεις που τις ορίζουν. Ακόμα η ανάλυση (*resolution*) του δέκτη διαφέρει από το μέγεθος του pixel της εικόνας (*pixel spacing*) και μάλιστα η ανάλυση είναι διπλάσια του μεγέθους των εικονοστοιχείων (προκύπτει από το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon). Ως διακριτική ικανότητα της απεικόνισης ορίζεται η ελάχιστη απόσταση δύο σημείων, ώστε αυτά να είναι διακριτά.

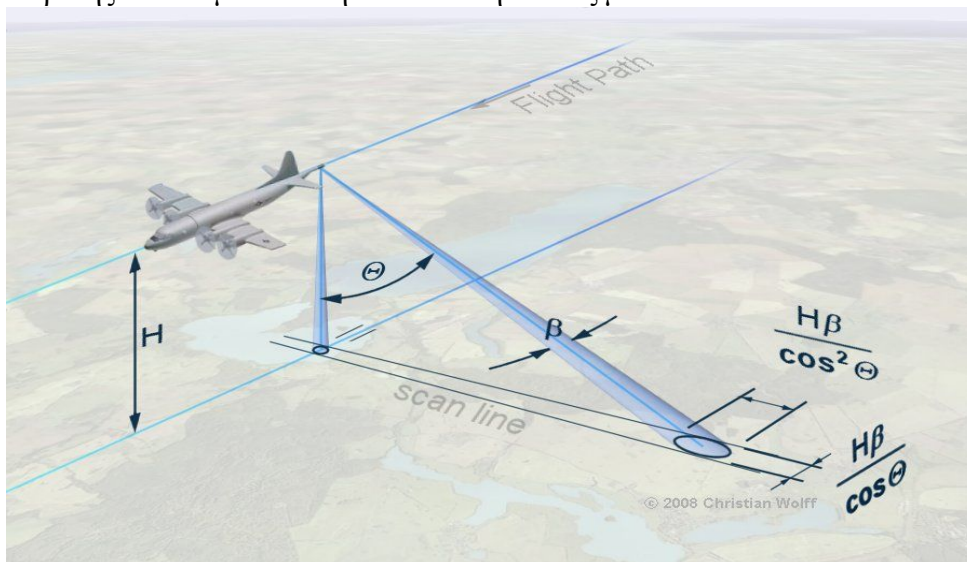
Στην περίπτωση των πλευρικών αποστάσεων η διακριτική ικανότητα υλοποιείται με την λήψη των ηχών ενός παλμού. Ειδικότερα το σύστημα εκπέμπει ένα παλμό, ο οποίος στη συνέχεια

προσεγγίζει την επιφάνεια του εδάφους και οπισθοσκεδάζεται. Η οπισθοσκέδαση αυτή γίνεται με διαδοχικές επιστρεφόμενες ηχούς. Πιο συγκεκριμένα επιστρέφει πρώτα η ηχώ του κοντινότερου στον δέκτη αντικείμενο και έπονται οι υπόλοιπες. Ο δέκτης για να “δει” τα αντικείμενα αυτά θα πρέπει να ανήκουν σε διαφορετικές ηχούς, δηλαδή να καταγραφούν ως ξεχωριστά. Συνεπώς η χωρική ανάλυση στη διεύθυνση των πλευρικών αποστάσεων εξαρτάται από τη διάρκεια του αρχικού παλμού. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια τόσο καλύτερη ανάλυση επιτυγχάνουμε. Βέβαια υπάρχουν τεχνικές δυσκολίες στην παραγωγή του παλμού, που περιορίζουν τη διάρκεια σε σχέση με την ένταση του εξερχόμενου σήματος. Σχηματικά μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα παραπάνω με το ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 29: Χωρική Ανάλυση στην Διεύθυνση των Πλαγίων Αποστάσεων  
 Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

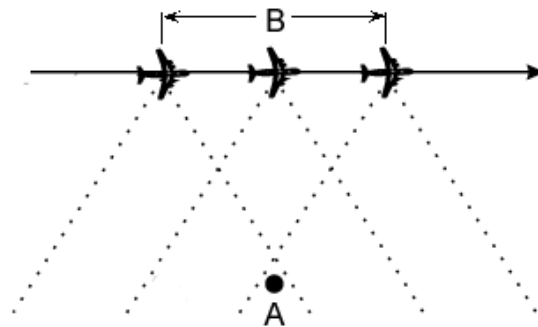
Η περίπτωση της χωρικής ανάλυσης στη διεύθυνση των αζιμουθίων διαφέρει με την παραπάνω. Πιο ειδικά, για να διαχωριστούν δύο σημεία στην διεύθυνση των αζιμουθίων θα πρέπει να ανήκουν σε δύο διαφορετικούς παλμούς [Short, 2005][Καραθανάση, 2003]. Έτσι ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής παλμών και το γωνιακό άνοιγμα του παλμού καθορίζεται η ελάχιστη απόσταση διάκρισης αντικειμένων στην διεύθυνση των αζιμουθίων.



Εικόνα 30: Μεταβολή Χωρικής Ανάλυσης στη Διεύθυνση των Αζιμουθίων  
 Πηγή: <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/pic/SLAR-resolution.print.jpg>

Παρατηρούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από το nadir της εικόνας το μέγεθος του pixel

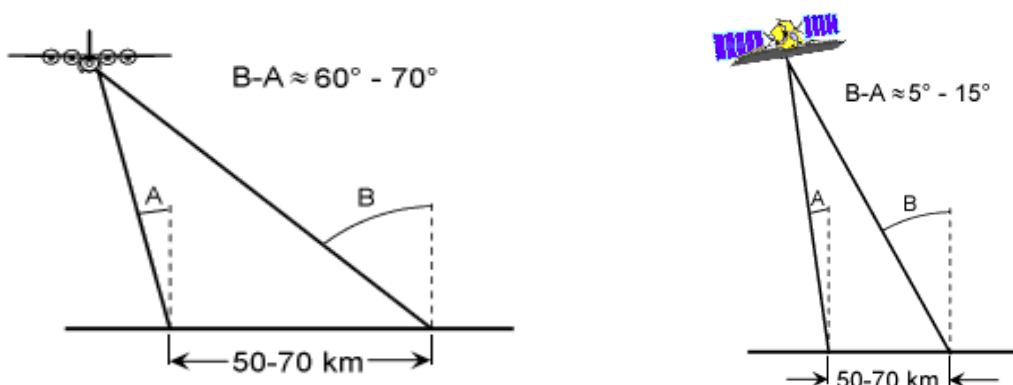
μεγαλώνει. Η ανάλυση αυτή αναφέρεται για εικόνες τύπου SLAR και όχι για τις επεξεργασμένες SAR απεικονίσεις. Στην περίπτωση των SAR απεικονίσεων η διακριτική ικανότητα σημαντικά μικρότερη από το SLAR. Η μείωση αυτή εξαρτάται βασικά από το μήκος της συνθετικής κεραίας που υπολογίζεται ή αλλιώς το χρόνο παρατήρησης του σημείου (αναλυτικότερα κεφάλαιο “Σύνθεση Συνθετικής Κεραίας”).



Εικόνα 31: Βελτιωμένη Ανάλυση Αζιμουθίων από SAR Επεξεργασία

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι ο κάρναβος που συνθέτει την εικόνα δεν είναι κανονικός. Ο όρος κανονικός αναφέρεται στον σταθερό βηματισμό του καννάβου και στις δύο διευθύνσεις. Έτσι σε μία SAR απεικόνιση που έχει τη γεωμετρία των πλαγίων αποστάσεων, ο κάρναβος ή αλλιώς το σχήμα των εικονοστοιχείων έχει την ακόλουθη μορφή. Το μέγεθος των εικονοστοιχείων μικραίνει όσο “προχωράμε” στην περιοχή των εγγύτερων αποστάσεων. Η σμίκρυνση αυτή συμβαίνει και στις δύο διευθύνσεις της εικόνας, με διαφορετικό βέβαια βαθμό. Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των δορυφορικών πλατφορμών, οι μεταβολές αυτές είναι πολύ μικρότερες από ότι στην περίπτωση ενός αερομεταφερόμενου SAR δέκτη. Οι μικρότερες μεταβολές στις δορυφορικές πλατφόρμες οφείλονται στο πολύ μεγάλο ύψος πτήσης/αιώρησης που έχουν. Πιο συγκεκριμένα, για να καλυφθεί το ίδιο πλάτος περιοχής με τους αερομεταφερόμενους δέκτες, οι γωνίες πρόσπτωσης είναι πολύ μικρότερου εύρους. Παράλληλα οι διαφορές στις πλάγιες αποστάσεις είναι επίσης μικρότερες σε σχέση με τις διαφορές που υπάρχουν στην περίπτωση αερομεταφερόμενων δεκτών [Short, 2005][Καραθανάση, 2003].

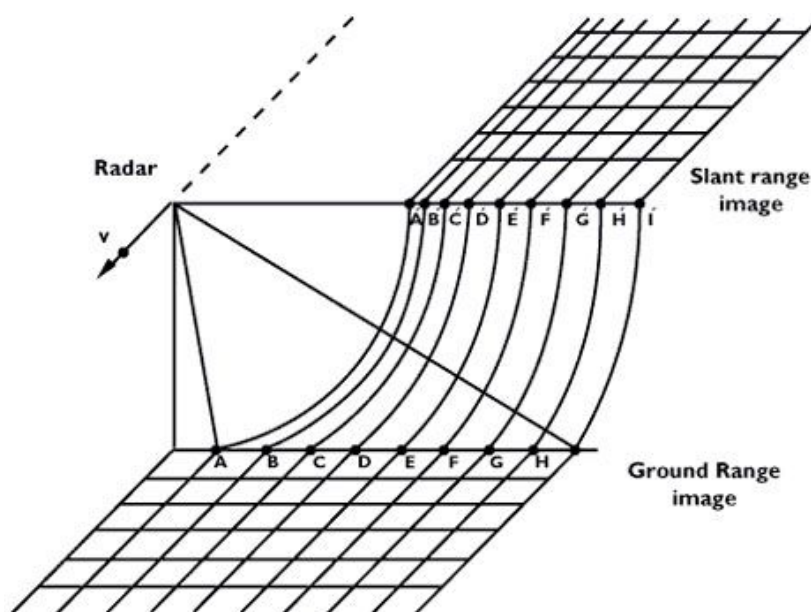


Εικόνα 32: Διαφορές Γωνιών Πρόσπτωσης Μεταξύ Διαστημικών και Αερομεταφερόμενων Δεκτών

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

Η γεωμετρία των πλαγίων αποστάσεων, που περιγράφηκε παραπάνω και στην οποία

βρίσκονται συνήθως οι περισσότερες απεικονίσεις μπορεί να μετατραπεί στη γεωμετρία του εδάφους (ground range geometry). Δηλαδή να προβληθούν οι εδαφοψηφίδες στο έδαφος με σκοπό την δημιουργία ενός κανονικού καννάβου. Η διαδικασία αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με την διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης, καθώς δεν έχει καμία σχέση. Στην πρώτη, δίνονται συντεταγμένες σε ένα σύστημα αναφοράς και η γεωμετρία της εικόνας προσαρμόζεται στην προβολή. Στη δεύτερη περίπτωση, διορθώνονται οι γεωμετρικές παραμορφώσεις της εικόνας, λόγω της πλάγιας λήψης της. Η αλλαγή από τη γεωμετρία των πλάγιων αποστάσεων στο έδαφος, ούτε γεωαναφέρει την εικόνα ούτε διορθώνει τις γεωμετρικές παραμορφώσεις (διεξοδική ανάλυση στο παρακάτω κεφάλαιο), απλώς κανονικοποιεί το σχήμα των εικονοστοιχείων της απεικόνισης. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 33: Slant to Ground Range Geometry

Πηγή: [http://earth.esa.int/applications/data\\_util/SARDOCS/\\_icons/c2\\_slange\\_range.jpg](http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/_icons/c2_slange_range.jpg)

### 3.2.1.iii Γεωμετρικές Παραμορφώσεις στις SAR Απεικονίσεις

Είναι φανερό ότι, τα αντικείμενα που απεικονίζονται στις SLAR – SAR απεικονίσεις υφίστανται σοβαρές γεωμετρικές παραμορφώσεις. Για παράδειγμα γεωμετρικά στοιχεία, όπως ευθύγραμμα τμήματα, απεικονίζονται ως καμπύλες ή ακόμα το ανάγλυφο του εδάφους υπόκειται σε παραμορφώσεις. Ένα άλλο χαρακτηριστικό στις παρούσες απεικονίσεις είναι ότι η ίδια περιοχή απεικονίζεται με τελείως διαφορετικό τρόπο ανάλογα την διεύθυνση πτήσης του δέκτη. Πιο συγκεκριμένα, όχι μόνο είναι ραδιομετρικά διαφορετική (διαφορετικές οπισθοσκεδάσεις), αλλά τα ίδια τα αντικείμενα παραμορφώνονται με διαφορετικό τρόπο.

Για την απλούστευση της γεωμετρίας, οργανώνουμε και διακρίνουμε τις εξής δύο μεγάλες κατηγορίες παραμορφώσεων: παραμόρφωση κλίμακας (scale distortions) και παραμορφώσεις λόγω αναγλύφου (relief distortions).

Στην πρώτη περίπτωση παραμορφώσεων έχουμε μία διαφορά κλίμακας κατά πλάτος της απεικόνισης (across track). Δηλαδή ζεύγη σημείων που ισαπέχουν μεταξύ τους, ανάλογα με την θέση τους στην εικόνα απεικονίζονται κοντύτερα ή μακρύτερα. Στην περιοχή των εγγύτερων πλάγιων αποστάσεων τα ζεύγη αυτά απεικονίζονται πιο κοντά, ενώ προχωρώντας προς τις μακρινές πλάγιες αποστάσεις η απόσταση αυτή μεγαλώνει. Συνεπώς ένα ευθύγραμμο τμήμα το οποίο δεν

έχει διεύθυνση ακριβώς κάθετη στην τροχιά του δορυφόρου, μετατρέπεται σε καμπύλη. Μάλιστα ανάλογα με την θέση της στην εικόνα έχουμε μεγαλύτερη ή μικρότερη παραμόρφωση. Ακόμα μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι ο προσανατολισμός των στοιχείων αυτών σε σχέση με την διεύθυνση τροχιάς του δέκτη, αλλάζει και τον βαθμό παραμόρφωσης. Με παρόμοιο τρόπο μεταβάλλονται επιφανειακά χαρακτηριστικά, αν αναλογιστούμε ότι αποτελούνται από απλούστερα γεωμετρικά στοιχεία, λόγω χάρη ευθύγραμμα τμήματα. Να σημειώσουμε ότι τα παραδείγματα αυτά αναφέρονται σε μία επίπεδη, κατά το δυνατό, απεικονιζόμενη επιφάνεια, ενώ το σκέλος του αναγλύφου αναλύεται στην επόμενη κατηγορία.



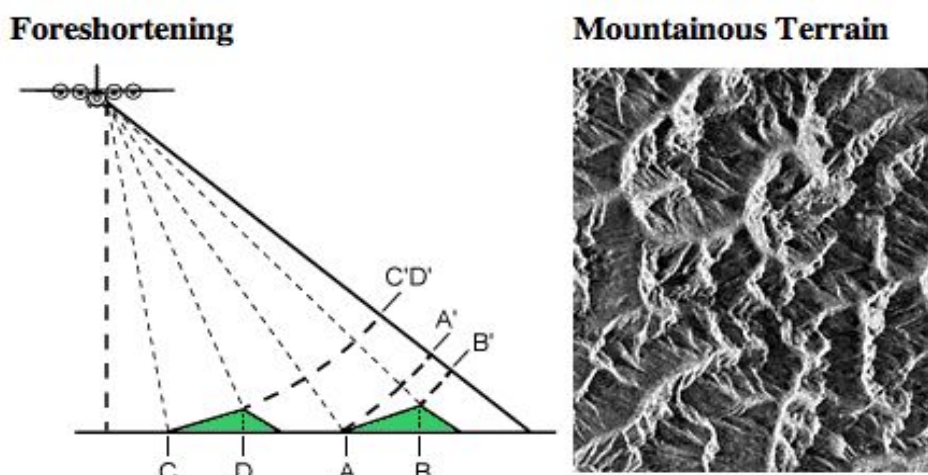
Εικόνα 34: Παραμόρφωση Κλίμακας

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

Από την Εικόνα 36 βλέπουμε στα αριστερά την παραμορφωμένη SAR απεικόνιση και δεξιά τη διορθωμένη. Παρατηρούμε ότι τα αντικείμενα που βρίσκονται στις κοντινές πλάγιες αποστάσεις στην αριστερή απεικονίζονται πολύ μικρά σε αντίθεση με τη δεξιά που έχουν διευρυνθεί. Το φαινόμενο αυτό πηγαίνοντας προς τις μακρινές πλάγιες αποστάσεις γίνεται λιγότερο έντονο.

Στη δεύτερη περίπτωση παραμορφώσεων, δηλαδή αυτές λόγω του αναγλύφου, έχουμε τρεις υποκατηγορίες: σμίκρυνση (foreshortening), πτύχωση (layover), σκίαση (shadowing) [Short, 2005] [Καραθανάση, 2003].

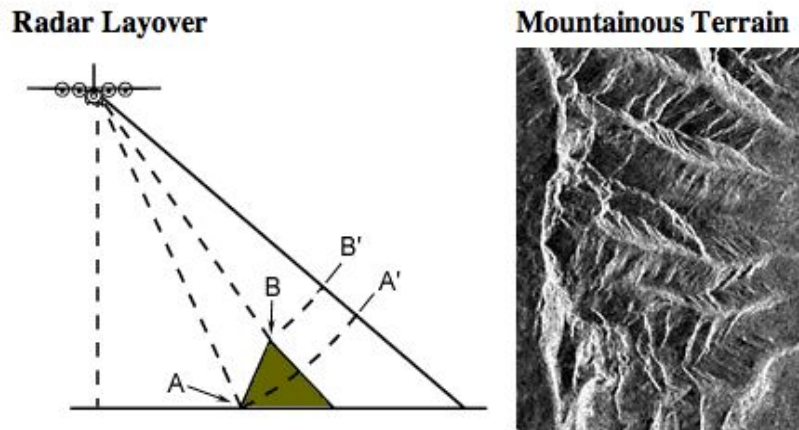
Ο καθορισμός για το ποια παραμόρφωση θα λάβει χώρα, εξαρτάται από το υψόμετρο των σημείων, τη γωνία διόπτρευσης που σχηματίζουν με το δέκτη και τη σχετική κλίση των επιφανειών. Για παράδειγμα δύο ίδιοι ορεινοί όγκοι παρουσιάζουν διαφορετική σμίκρυνση στην “φωτιζόμενη” πλευρά τους, ανάλογα με το που βρίσκονται στην εικόνα (μεταβολή της γωνίας διόπτρευσης). Το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 35: Σμίκρυνση λόγω Αναγλύφου

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

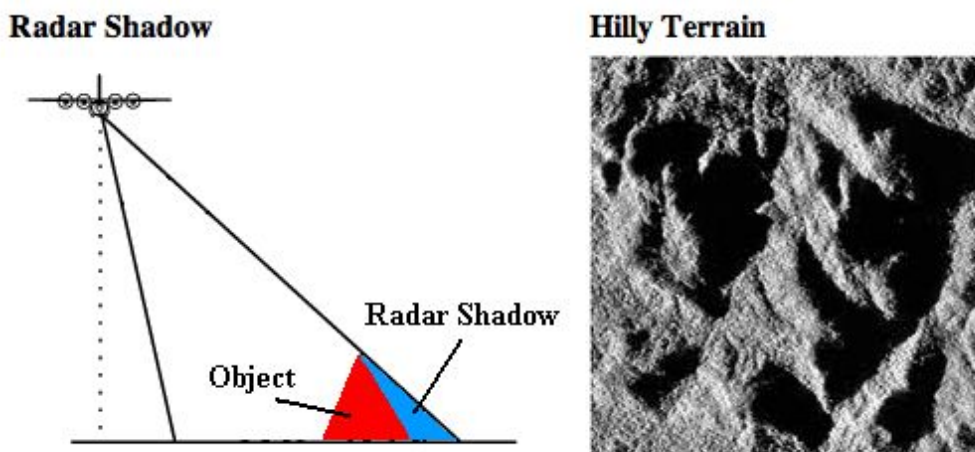
Αντίστοιχα η πτύχωση συμβαίνει όταν η κλίση της φωτισμένης πλευράς είναι μεγαλύτερη της παραπληρωματικής της γωνίας διόπτεισης. Έτσι χαμηλότερα υψόμετρα δείχνουν να είναι πιο μακριά στο δέκτη από υψόμετρα με μεγαλύτερες τιμές. Το φαινόμενο αυτό δυσχεραίνει πολύ την ερμηνεία των radar απεικονίσεων και συμβαίνει σε περιοχές με έντονες αλλαγές κλίσεων.



Εικόνα 36: Πτύχωση λόγω Αναγλύφου

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

Τέλος υπάρχει και η τρίτη περίπτωση γεωμετρικής παραμόρφωσης, η σκίαση. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω του ύψους και της κλίσης του αντικειμένου, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία δεν φωτίζει ορισμένες περιοχές. Δηλαδή για τις περιοχές αυτές δεν έχουμε σήμα επιστροφής και γίνεται φανερό όταν προβάλλεται η εικόνα σε ένα χάρτη. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν η αντίθετη από την φωτιζόμενη πλευρά έχει κλίση, η οποία είναι μεγαλύτερη από την παραπληρωματική της γωνίας διόπτεισης. Έτσι για τα σημεία που βρίσκονται “πίσω” από την πλευρά αυτή δεν υπάρχει πληροφορία (μηδενικές ψηφιακές τιμές). Το τελευταίο φαίνεται ως εξής:



Εικόνα 37: Σκίαση λόγω Αναγλύφου

Πηγή: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>



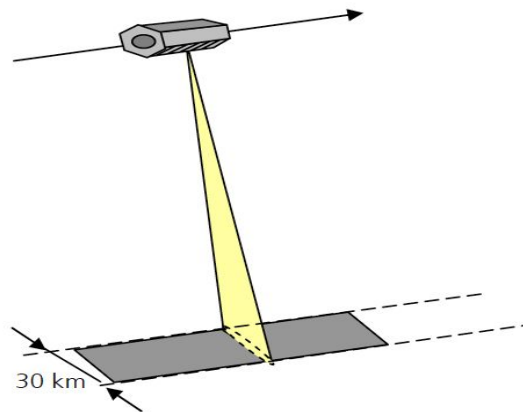
### 3.2.2 Λειτουργία Λήψης Stripmap (Συμβατική γεωμετρία λήψης)

Κατά αυτή την λειτουργία λήψης απεικονίσεων, η κεραία του συστήματος φωτίζει συνεχώς πλάγια και κάθετα στην διεύθυνση της τροχιάς (τουλάχιστον θεωρητικά). Ο τρόπος που λειτουργεί το σύστημα, όπως έχουμε περιγράψει, είναι με την εκπομπή και λήψη παλμών με συνεχή και σταθερό ρυθμό, τους οποίους ύστερα επεξεργάζεται για να παράγει εικόνες συνθετικού ανοίγματος. Κατά συνέπεια η παραγόμενη απεικόνιση έχει σταθερή αξιμοθιακή ποιότητα. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι υπάρχουν ορισμένοι τεχνικοί περιορισμοί στην λειτουργία του συστήματος αναφορικά με τη διάρκεια λήψης και την ποιότητα της εικόνας. Ειδικότερα το μέγεθος της παραγόμενης εικόνας ενδέχεται να επηρεαστεί από τους περιορισμούς που έχει φυσικά το σύστημα (hardware limits) [ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK, 2007][ALOS PALSAR REFERENCE GUIEDE]. Η ανάλυση όμως των χαρακτηριστικών αυτών ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η συγκεκριμένη λειτουργία παρέχεται συνήθως από όλους τους RADAR δορυφόρους, παραδείγματος χάριν ERS 1 και 2, ENVISAT, ALOS, TERRASAR-X κτλ.

Με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, όπως γίνεται φανερό, καθορίζεται και η γεωμετρία της εικόνας. Έτσι γνωρίζοντας ότι έχουμε σταθερή συχνότητα εκπομπής παλμών (constant prf) και η κεραία είναι πάντα κάθετη στην διεύθυνση της τροχιάς καταλήγουμε στα ακόλουθα:

- i. Τα απεικονιζόμενα στοιχεία αναφέρονται σε συχνότητα Doppler μηδενική
- ii. Η χωρική ανάλυση στη διεύθυνση των αξιμοθιών είναι σταθερή και εξαρτάται από το prf
- iii. Η ευρύτερη γεωμετρία που περιγράφει την εικόνα είναι ακριβώς αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο “Γεωμετρικά Στοιχεία Πλάγιων Απεικονίσεων”

Ενδεικτικά παραθέτουμε τη γεωμετρία του τρόπου λειτουργίας του συστήματος SAR:



Εικόνα 38: Αρχή Λειτουργίας Stripmap  
Πηγή: TerraSar-X handbook

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να σημειωθεί ότι η λειτουργία που περιγράφηκε είναι η θεωρητική, όπως αυτή έχει προγραμματιστεί να γίνει. Όμως για διάφορους λόγους, όπως κατασκευαστικές ατέλειες συστήματος ή ακατάλληλες διαστημικές συνθήκες για την εύρυθμη λειτουργία του δέκτη, τα χαρακτηριστικά αυτά μεταβάλλονται. Η μεταβολή αυτή καταγράφεται και δίνεται σε μορφή μετά – δεδομένων, τα οποία και υποχρεούμεθα να συμπεριλάβουμε σε όποια ανάλυση /επεξεργασία (εδώ ορθοαναγωγή), για την ορθή και αξιόπιστη παραγωγή αποτελεσμάτων

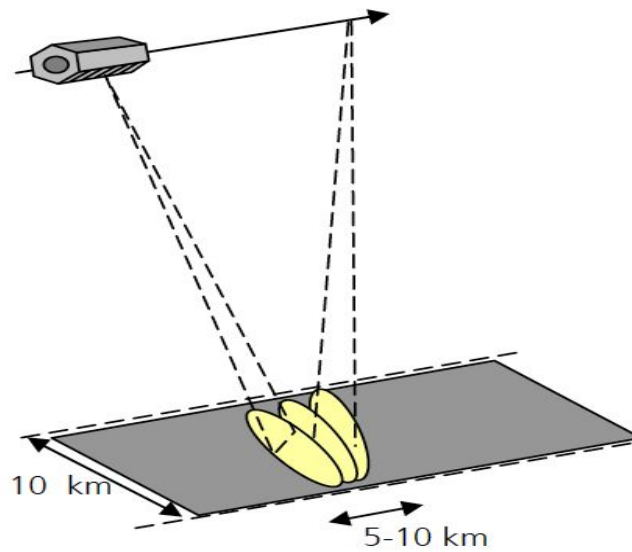
[ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK, 2007][ALOS PALSAR REFERENCE GUIEDE, 2009].

### 3.2.3 Λειτουργία Λήψης Υψηλής Διακριτικής Ικανότητας

Η συγκεκριμένη λειτουργία του συστήματος έχει σκοπό να παράγει πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας απεικονίσεις, όχι με βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δέκτη, αλλά με διαφοροποίηση στον τρόπο παρατήρησης. Τη λειτουργία αυτή δεν την παρέχουν όλοι οι δορυφόροι, διότι συμπεριλαμβάνει ένα πολύ ιδιαίτερο κατασκευαστικό τεχνικό χαρακτηριστικό το οποίο δύσκολα απαντάται σε άλλα συστήματα. Ενδεικτικά να αναφερθεί ότι τη συγκεκριμένη λειτουργία παρέχεται από τον δορυφόρο TerraSar-X [TerraSAR-X Ground Segment :Basic Product Specification Document , 2009].

Ειδικότερα η κεραία, σε αντίθεση με την παραπάνω περίπτωση, δεν παραμένει συνεχώς κάθετη στην τροχιά, αλλά λαμβάνει συνεχώς διαφορετικές γωνίες (steering angles). Η μεταβολή της γωνίας αυτής γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να στοχεύεται μία μικρή περιοχή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με την περίπτωση την μόνιμης καθετότητας. Ως συνέπεια της μετακίνησης αυτής, τα στοχευμένα σημεία παρατηρούνται από περισσότερες θέσεις, δηλαδή μεγαλώνει η συνθετική κεραία που θα κατασκευαστεί στην επεξεργασία SAR (κεφάλαιο “Σύνθεση Συνθετικής Κεραίας”). Με άλλα λόγια μικραίνει ακόμα περισσότερο το pixel spacing στην διεύθυνση των αζιμουθίων. Να προστεθεί ότι για να καταστεί δυνατή η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει η μέτρηση της γωνίας να γίνεται με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια.

Η μέθοδος αυτή έχει όμως το ακόλουθο μειονέκτημα: πολύ μικρή έκταση απεικόνισης. Για να μπορέσει ο δέκτης να παράγει μεγαλύτερες εικόνες με αυτή την λειτουργία, χωρίς να αφήνει κενά, θα πρέπει σε ορισμένα διαστήματα να κάνει “άλμα” και μία περιοχή να μην έχει τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων με τις υπόλοιπες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαφορετική αζιμουθιακή ανάλυση σε τμήματα της απεικόνισης. Κάτι τέτοιο δεν γίνεται να υπάρχει σε μία τηλεπισκοπική απεικόνιση, οπότε το μέγεθος της απεικονιζόμενης επιφάνειας μικραίνει. Φτάνει μάλιστα στην ακραία περίπτωση να έχει το μέγεθος του αποτυπώματος της κεραίας, όπου τότε αντιστοιχεί η μέγιστη διακριτική ικανότητα, καθώς παρακολουθούνται συνεχώς μόνο τα σημεία μίας περιοχής αντίστοιχης του αποτυπώματος [TerraSAR-X Ground Segment :Basic Product Specification Document , 2009]. Η γεωμετρική ερμηνεία παρατίθεται στη συνέχεια για την διευκόλυνση στην κατανόηση αυτού του ειδικού τρόπου λειτουργίας.

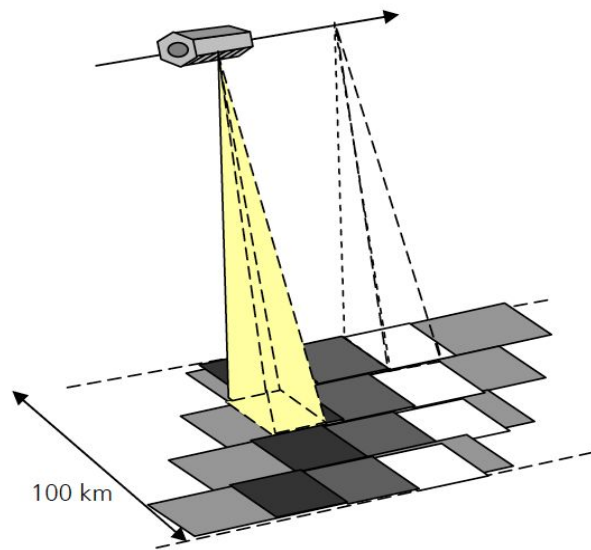


Εικόνα 39: Αρχή Λειτουργίας Spotlight  
Πηγή: TerraSar-X handbook

### 3.2.4 Λειτουργία Λήψης ScanSar

Γενικά η λειτουργία αυτή αποσκοπεί στην κάλυψη πολύ μεγάλου εύρους επιφανειών. Η φιλοσοφία υλοποίησης είναι η μετακίνηση της κεραίας κατά τη γωνία διόπτρευσης, με αποτέλεσμα την σάρωση – στόχευση μεγαλύτερου τμήματος επιφάνειας. Η μετακίνηση αυτή γίνεται μεταξύ της εκπομπής των παλμών. Ως αποτέλεσμα το λαμβανόμενο σήμα προέρχεται μόνο από ορισμένα κύματα επιστροφής. Η έλλειψη παρατηρήσεων στα σημεία της επιφάνειας συνεπάγεται μικρότερο εύρος ζώνης συχνοτήτων, δηλαδή λιγότερα σημεία για την σύνθεση της συνθετικής κεραίας. Έτσι το μέγεθος του pixel στην διεύθυνση του αζιμουθίου είναι πολύ μεγάλο. Παράλληλα η διάρκεια του παλμού δεν χρειάζεται να είναι πολύ μικρή, λόγω της πολύ μικρής ανάλυσης στα αζιμούθια, οπότε μεγαλώνοντας τη διάρκεια του παλμού χειροτερεύει η χωρική ανάλυση στις πλάγιες αποστάσεις.

Κάτι τέτοιο φυσικά δεν αποτελεί τροχοπέδη, καθώς έμφαση δίνεται στην εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη με καλιμπραρισμένα ραδιομετρικά δεδομένα και όχι στην βέλτιστη γεωμετρική περιγραφή της επιφάνειας. Η γεωμετρία αυτού του τύπου λειτουργίας φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Εικόνα 40: Αρχή Λειτουργίας ScanSar  
 Πηγή: TerraSar-X handbook

### 3.2.5 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ENVISAT

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται δέκτης SAR ENVISAT, του οποίου οι απεικονίσεις θα χρησιμοποιηθούν. Η προκείμενη ανάλυση εστιάζεται περισσότερο στις παραμέτρους εκείνες, που επηρεάζουν την γεωμετρία της απεικόνισης. Και αυτό διότι, ένα σύστημα SAR περιέχει εκατοντάδες παραμέτρους για να οριστεί πλήρως, οι οποίες όμως δεν επηρεάζουν τη γεωμετρία της εικόνας και κατ' επέκταση βρίσκονται εκτός του πλαισίου της παρούσης εργασίας [ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK, 2007].

Το σύστημα του SAR του ENVISAT, λέγεται ASAR (Advanced Synthetic Aperture RADAR) και εκπέμπει στο κανάλι C των RADAR (4 – 8 cm) με δυνατότητα καταγραφής πόλωσης HH ή VV. Διαθέτει πολλές λειτουργίες λήψης απεικονίσεων με την βασικότερη από πλευράς χωρικής ανάλυσης την stripmap mode. Η τελευταία αποτελεί και την υπό εξέταση λειτουργία του δέκτη. Ακολουθεί την γεωμετρία που περιγράφηκε στα ανωτέρω κεφάλαια, είναι δηλαδή παρόμοια με αυτή των ERS – 1, 2. Πιο συγκεκριμένα, ο δορυφόρος είναι προσανατολισμένος με τέτοιο τρόπο, ώστε το αποτύπωμα της κεραίας να μην έχει γωνία στροφής (squint angle). Ως συνέπεια, στα απεικονιζόμενα σημεία αντιστοιχεί ο μηδενισμός της συχνότητας doppler [ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK, 2007][Καραθανάση, 2003]. Το μεγαλύτερο μέρος στην εξέλιξη που δέχτηκε ο δέκτης είναι περισσότερο στη βελτίωση καθαρά τεχνικών χαρακτηριστικών στο ίδιο το σύστημα, συγκριτικά με την προκάτοχο αποστολή των ERS 1 και 2.

Ο ENVISAT διαθέτει ένα επιπλέον χαρακτηριστικό, το οποίο όπως θα δούμε μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή γεωαναφερμένων απεικονίσεων με πολωνυμικούς μετασχηματισμούς. Στα μετά – δεδομένα των απεικονίσεων υπάρχουν διαθέσιμα σημεία σύνδεσης (tie points) με γεωγραφικές συντεταγμένες  $\phi$ ,  $\lambda$ . Επιπλέον για τα δεδομένα αυτά είναι γνωστές οι θέσεις τους στις απεικονίσεις (γραμμή/στήλη), η γωνία πρόσπτωσης και ο χρόνος που χρειάζεται το αντίστοιχο σήμα για να πάει και να γυρίσει. Υπάρχουν διαθέσιμες 11 εγγραφές η κάθε μία εκ των οποίων αποτελείται από 22 σημεία σύνδεσης και για κάθε μία είναι καταγεγραμμένος και ο χρόνος μηδενισμού doppler. Αν και για τα σημεία αυτά δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες, αναφορικά με τον τρόπο μέτρησης – προσδιορισμού τους, χρησιμοποιούνται από το λογισμικό πρόγραμμα

BEAM για παραγωγή γεωαναφερμένων απεικονίσεων.

### 3.2.6 Ειδικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ALOS

Ομοίως και εδώ περιγράφεται και ο δεύτερος SAR δέκτης που θα χρησιμοποιηθεί. Πρόκειται για ένα δορυφόρο που κατασκευάστηκε από την Διαστημική Υπηρεσία της Ιαπωνίας (JAXA) και λειτουργεί στο κανάλι L (15 – 30cm) με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής όλων των πολώσεων (HH – VV – HV – VH). Έτσι διατίθεται ένα πλήρες σύνολο πολωμένων απεικονίσεων, ιδιότητα την οποία δεν έχει ο προηγούμενος δέκτης [ALOS PALSAR REFERENCE GUIDE, 2009].

Η γεωμετρία που περιγράφει τις απεικονίσεις αυτές δεν διαφέρει ιδιαίτερα με το δορυφόρο ENVISAT. Δηλαδή η κεραία του είναι συνεχώς κάθετη στην τροχιά και έχει σταθερή εκπομπή παλμών. Υπάρχει όμως μία ιδιαιτερότητα στην τροχιά του δέκτη που αλλάζει ελαφρώς το μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, ο δορυφόρος είναι ευθυγραμμισμένος με το κέντρο μάζας της γης, γεγονός που δημιουργεί μία μη καθετότητα στο σύστημα αναφοράς, δηλαδή δημιουργείται εκτροπή στην διεύθυνση του αποτυπώματος της κεραίας (yaw steering). Έτσι το αποτύπωμα της κεραίας στο έδαφος παρουσιάζει μία μικρή στροφή, με αποτέλεσμα να έχουμε μία μετατόπιση φάσης στην συχνότητα μηδενισμού Doppler [ALOS PALSAR REFERENCE GUIDE, 2009]. Η φάση αυτή παρέχεται από τις επικεφαλίδες και προστίθεται ως  $F_{DC}$  στον τύπο του φαινομένου Doppler. Οπότε και έχουμε πλέον τα απεικονιζόμενα σημεία σε μηδενική συχνότητα doppler.

### 3.3 Γεωαναφορά Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.

Ο όρος ορθοαναγωγή στα SAR δεδομένα έχει την ίδια έννοια με τα υπερφασματικά δεδομένα, δηλαδή την απόδοση γεωδαιτικών συντεταγμένων σε κάθε εικονοστοιχείο. Το διαφορετικό, σε σχέση με τα υπερφασματικά, στην παρούσα διαδικασία είναι η γεωμετρία και ο τρόπος λήψης των απεικονίσεων SAR. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι συνθετικού ανοίγματος RADAR απεικονίσεις υπόκεινται γεωμετρικά στην πλάγια προβολή και τα σημεία τους αντιστοιχούν στην ελάχιστη πλευρική απόσταση σημείου – δέκτη ή αλλιώς η συχνότητα Doppler είναι μηδέν. Με αρχή αυτά τα στοιχεία, αναπτύσσονται αρχικά οι δύο αναλυτικοί αλγόριθμοι ορθοαναγωγής: έμμεσος (indirect geocoding) και άμεσος (direct geocoding). Η διαφορά των δύο έγκειται στην φορά αντιστοίχισης συντεταγμένων, δηλαδή με ευθύ (εικονοστοιχεία σε γεωγραφικές συντεταγμένες) ή αντίστροφο (γεωγραφικές συντεταγμένες σε εικονοστοιχεία) τρόπο. Στην συνέχεια αναπτύσσεται και ένας πολυωνυμικού τύπου αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το λογισμικό πρόγραμμα BEAM.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ανάλογα τον τύπο λειτουργίας του συστήματος, υπάρχουν ορισμένες διαφορές στο μοντέλο γεωαναφοράς που χρησιμοποιείται. Οι διαφοροποιήσεις αυτές ουσιαστικά είναι για να αναχθούν τα καταγραφόμενα δεδομένα στην γεωμετρία του μηδενισμού της συχνότητας Doppler. Για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται ξεχωριστοί αλγόριθμοι για κάθε λειτουργία, αλλά όπου χρειάζεται παρατίθενται οι τροποποιήσεις που υφίστανται.

Αρχικά προσεγγίζουμε τα πρωταρχικά βήματα που είναι απαραίτητα για την επίτευξη ορθοαναγωγής. Ειδικότερα παρουσιάζουμε τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να αποδωθεί το γεωμετρικό μοντέλο λήψης, στη συνέχεια διερευνούμε την τροχιά του δορυφόρου και πώς η τελευταία χρησιμοποιείται στην διαδικασία. Τελικά εξειδικεύουμε την μεθοδολογία βάσει του τρόπου ορθοαναγωγής (έμμεση ή άμεση).

### 3.3.1 Εξισώσεις Φυσικού Μοντέλου

#### 3.3.1.i Εξίσωση Doppler

Το γεωμετρικό μοντέλο στα SAR στηρίζεται στον τρόπο λήψης των απεικονίσεων αυτών. Ειδικότερα το σήμα που καταγράφεται αντιστοιχεί στη στιγμή κατά την οποία υπάρχει μηδενισμός της συχνότητας Doppler. Όπως είναι γνωστό από τη Φυσική, η συχνότητα ενός σήματος/κύματος (ηλεκτρομαγνητικού ή μηχανικού) που εκπέμπεται από πηγή και κατευθύνεται προς ένα σημείο, εξαρτάται από τη σχετική θέση και ταχύτητα της πηγής και σημείου. Αντίστοιχα στη περίπτωση των SAR, η εκπομπή ενός παλμού ορισμένης συχνότητας είναι διαφορετική με τη συχνότητα λήψης της ηχού του παλμού, γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο Doppler. Ανάλογα με τη σχετική θέση του δορυφόρου οι τιμές της συχνότητας doppler μεταβάλλονται από θετικές τιμές μέχρι αρνητικές. Τη στιγμή που μηδενίζεται η τιμή αυτή, έχουμε την στιγμή μηδενισμού του doppler, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση σημείου δέκτη. Η απόσταση αυτή είναι προφανώς κάθετη στην τροχιά [Short, 2005][Καραθανάση, 2003][Diaz, 1998]. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω για την παρούσα διαδικασία χρησιμοποιούμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{(\vec{V}_S - \vec{V}_P) \cdot (\vec{P} - \vec{S})}{|\vec{P} - \vec{S}|} \quad (26)$$

με  $f_d$  η συχνότητα doppler,  $\lambda$  το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου κύματος, P και S τα διανύσματα θέσης του εξεταζόμενου σημείου και του δορυφόρου για την δεδομένη στιγμή και  $V_P$ ,  $V_S$  τα αντίστοιχα διανύσματα ταχύτητας. Να σημειώσουμε ότι το αποτέλεσμα της εξίσωσης είναι πραγματικός βαθμωτός αριθμός, αφού τα διανύσματα που συμμετέχουν πολλαπλασιάζονται με εσωτερικό γινόμενο.

Η εξίσωση (26) ισχύει όταν η κεραία του δέκτη είναι κάθετη στην τροχιά, δηλαδή το υπό εξέταση σημείο βρίσκεται πάνω στον άξονα του λοβού του αποτυπώματος της κεραίας. Σε περίπτωση που η κεραία δεν είναι κάθετη και υπάρχει απόκλιση από τον άξονα (squint angle) αυτόν, τότε η συχνότητα μηδενισμού  $f_d$  δεν συμπίπτει με την  $F_{DC}$ , οπότε και έχουμε τα ακόλουθα:

$$f_d = F_{DC} - \frac{2}{\lambda} \frac{(\vec{V}_S - \vec{V}_P) \cdot (\vec{P} - \vec{S})}{|\vec{P} - \vec{S}|} \quad (27)$$

όπου  $F_{DC}$  είναι η συχνότητα του doppler στον άξονα του λοβού (doppler centroid) και παρέχεται από τις επικεφαλίδες των απεικονίσεων. Η προσθήκη του όρου αυτού είναι λογική, αφού ζητείται να υπολογιστεί η θέση κατά την οποία τα σημεία μηδενίζουν τη συχνότητα Doppler, δηλαδή να έχουν την ελάχιστη απόσταση. Όταν υπάρχει μία σχετική γωνία τότε τα σημεία αυτά δεν έχουν την ελάχιστη απόσταση, οπότε και πρέπει να αναχτούν σε αυτή.

#### 3.3.1.ii Εξίσωση Αποστάσεων

Η επόμενη εξίσωση που χρησιμοποιείται στη διαδικασία ορθοαναγωγής είναι η γνωστή εξίσωση υπολογισμού αποστάσεων δύο σημείων. Στην προκειμένη υπολογίζουμε την απόσταση

που έχουν η θέση του δορυφόρου σε δεδομένη χρονική στιγμή με το εξεταζόμενο σημείο. Έτσι έχουμε την ακόλουθη εξίσωση [Short, 2005][Καραθανάση, 2003][Diaz, 1998]:

$$|S - P|^2 = (S_X - P_X)^2 + (S_Y - P_Y)^2 + (S_Z - P_Z)^2 \quad (28)$$

με  $S_X$ ,  $S_Y$ ,  $S_Z$ ,  $P_X$ ,  $P_Y$ ,  $P_Z$  οι συντεταγμένες του δορυφόρου και του σημείου αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες αυτές αναφέρονται σε παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, π.χ. GRS 80.

### 3.3.1.iii Μοντέλο Περιγραφής Γης

Τέλος χρησιμοποιείται ως εξίσωση (μόνο στην άμεσου τύπου ορθοαναγωγή) η περιγραφή της επιφάνειας της γης. Αν και γίνεται να χρησιμοποιηθούν διάφορα μοντέλα για να την περιγράψουν (σφαίρα, ελλειψοειδές, γεωειδές κτλ), κατά βάση χρησιμοποιείται μόνο η εξίσωση του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής [Short, 2005][Καραθανάση, 2003][Diaz, 1998][Βέης et. al., 2007].

$$\frac{P_X^2}{(a+h)^2} + \frac{P_Y^2}{(a+h)^2} + \frac{P_Z^2}{(b+h)^2} = 1 \quad (29)$$

με  $a, b$  ο μεγάλος και μικρός ημιάξονας του ελλειψοειδούς που χρησιμοποιείται και  $h$  το γεωμετρικό υψόμετρο του σημείου.

### Δορυφορική Τροχιά

Η τροχιά που ακολουθεί ένας δορυφόρος εξαρτάται από τις δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτόν (Γη, Σελήνη, Ήλιος κ.α.). Γενικά ο τρόπος κίνησης ενός δορυφόρου επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η μεταβολή στο μαγνητικό και βαρυτικό πεδίο της γης, της σχετική θέση της σελήνης, την φάση στην οποία βρίσκεται ο Ήλιος (ηλιακές εξάρσεις, κηλίδες κτλ) και πλήθος άλλων παραμέτρων. Αυτές περιγράφονται από τους νόμους του Kepler και διατυπώνονται ως κεπλέρια στοιχεία τροχιάς. Τα στοιχεία αυτά ουσιαστικά παραμετροποιούν την τροχιά με αποτέλεσμα να υπολογίζεται η θέση του δορυφόρου ανά πάσα χρονική στιγμή. Στην παρούσα εργασία δεν αναλύονται τα κεπλέρια στοιχεία, αλλά υπολογίζουμε τις θέσεις του δορυφόρου μέσω παρεμβολών σε μετρημένες θέσεις με χρήση ενός πολυωνύμου. Φυσικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις του Kepler για τον υπολογισμό θέσεων με θεωρητικά την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Όμως όπως θα δούμε και παρακάτω η ακρίβεια της παρούσας προσέγγισης υπερκαλύπτει τις ανάγκες για γεωαναφορά [Diaz, 1998]. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η παραμετροποίηση αυτή ισχύει μόνο όταν ο δορυφόρος είναι στο στάδιο της λήψης απεικονίσεων, καθώς τότε δεν πραγματοποιείται κανένας ελιγμός από τα κέντρα ελέγχου.

Ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της τροχιάς είναι ο τρίτος. Έχει αποδειχτεί ότι το 3<sup>ο</sup> βαθμού πολυώνυμο προσεγγίζει με βέλτιστο τρόπο την πραγματική τροχιά που διαγράφεται. Οπότε η μορφή που έχουν οι συντεταγμένες και οι ταχύτητες τις τροχιάς συναρτήσει του χρόνου είναι:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{y3} \\ a_{z3} \end{bmatrix} * t^3 + \begin{bmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \\ a_{z2} \end{bmatrix} * t^2 + \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ a_{z1} \end{bmatrix} * t + \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Vx(t) \\ Vy(t) \\ Vz(t) \end{bmatrix} = 3 * \begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{y3} \\ a_{z3} \end{bmatrix} * t^2 + 2 * \begin{bmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \\ a_{z2} \end{bmatrix} * t + \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ a_{z1} \end{bmatrix}$$

με  $a_{xi}$ ,  $a_{yi}$ ,  $a_{zi}$  οι συντελεστές των πολυωνύμων τροχιάς. Ο χρόνος που τοποθετείται στις εξισώσεις μπορεί να είναι όποιας μορφής, αρκεί να είναι όλοι σε ένα κοινό σύστημα [Diaz, 1998]. Όμως για καλύτερη υπολογιστική ακρίβεια, λόγω των περιορισμών που τίθενται από τους υπολογιστές, η βέλτιστη μορφή που θα είναι ο χρόνος είναι μόνο τα δευτερόλεπτα της εικόνας και όχι ολόκληρη η ημερομηνία λήψης.

Ο προσδιορισμός αυτών των συντελεστών γίνεται μέσω μετρημένων σημείων σε τακτές χρονικές στιγμές. Τα σημεία αυτά είτε δίνονται στα μετά – δεδομένα του αρχείου της απεικόνισης είτε παρέχονται από αντίστοιχες υπηρεσίες με χρονικό βήμα 30 ή 60 δευτερόλεπτα (ανάλογα τον δορυφόρο). Εκτός από τις θέσεις παρέχεται για την ίδια στιγμή και οι αντίστοιχες ταχύτητες [Καραθανάση, 2003][Diaz, 1998][ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK, 2007].

Για να γίνει ο υπολογισμός αυτός χρειάζονται τουλάχιστον 2 σημεία με τις αντίστοιχες θέσεις και ταχύτητες. Έτσι για κάθε διάσταση ο υπολογισμός των συντελεστών με τα μετρημένα σημεία γίνεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ Vx_0 \\ Vx_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{x2} \\ a_{x1} \\ a_{x0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ Vy_0 \\ Vy_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{y3} \\ a_{y2} \\ a_{y1} \\ a_{y0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ Vz_0 \\ Vz_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{z3} \\ a_{z2} \\ a_{z1} \\ a_{z0} \end{bmatrix}$$

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε όλα τα υπάρχοντα σημεία είτε μόνο τα απαραίτητα. Έτσι στην πρώτη περίπτωση έχουμε παρεμβολή σε ολόκληρη την τροχιά, ενώ στην δεύτερη μόνο σε ένα τμήμα [Diaz, 1998]. Και στις δύο περιπτώσεις προκύπτουν οι συντελεστές των πολυωνύμων, οπότε και κατά συνέπεια μπορούμε να



παρεμβάλλουμε σε όποια χρονική στιγμή και να υπολογίσουμε τις θέσεις/ταχύτητες του δορυφόρου. Η συμπεριφορά και η ακρίβεια της παρούσας προσέγγισης αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο “Ανάλυση Σφαλμάτων στην Διαδικασία Γεωαναφοράς Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.”.

### 3.3.2 Έμμεσος Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων

Ο παρόν αλγόριθμος ορθοανάγει την απεικόνιση αντίστροφα, δηλαδή με αρχή συντεταγμένες στο έδαφος εντοπίζει τη θέση τους στην εικόνα. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται η περιοχή που ζητείται να ορθοαναχθεί, καθώς και το βήμα του καννάβου. Το βήμα αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε μέγεθος. Όμως ο σωστός καθορισμός του επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Συνήθως ορίζεται ίσο με την διακριτική ικανότητα του δέκτη ή την μισή αυτής (pixel spacing). Αν τεθεί μικρότερο από την τελευταία τότε ούτε βελτιώνεται η ποιότητα ούτε προφανώς παράγεται νέα πληροφορία, απλώς αναπαράγεται πολλές φορές το ίδιο πράγμα. Αντίθετα αν οριστεί αρκετά μεγαλύτερη εδαφοψηφίδα τότε χάνονται σημαντικά χωρικά στοιχεία, καθώς παραλείπονται ψηφιακές τιμές. Να σημειώσουμε ότι έχει προηγηθεί η επιλογή της χαρτογραφικής προβολής στην οποία και θα γίνει η ορθοαναγωγή.

#### 3.3.2.i Παρεμβολή και Μετατροπή Υψομέτρων

Με τον ορισμό του βήματος είναι διαθέσιμες για κάθε εδαφοψηφίδα οι οριζοντιογραφικές της συντεταγμένες. Εάν υπάρχει ψηφιακό μοντέλο εδάφους – επιφάνειας, εισάγονται και υψομετρικές τιμές στις συντεταγμένες. Ανάλογα την πυκνότητα του DEM – DTM και το μέγεθος της τελικής εδαφοψηφίδας, καθορίζεται και ο τρόπος παρεμβολής των υπαρχόντων υψομέτρων. Εάν για παράδειγμα υπάρχει μία πολύ πυκνή περιγραφή του εδάφους και η τελική εδαφοψηφίδα είναι αρκετά μεγαλύτερη, τότε το υψόμετρο που θα τοποθετηθεί θα είναι ο μέσος όρος των περιεχομένων τιμών. Αντίθετα εάν το DEM – DTM είναι πολύ αραιό σε σχέση με την εδαφοψηφίδα τότε, μπορούν να γίνουν παρεμβολές μεταξύ των υπαρχόντων υψομέτρων. Οι τρόποι παρεμβολής που μπορούν να εφαρμοστούν ποικίλουν, παραδείγματος χάριν μπορεί να ακολουθηθεί η μέθοδος TIN ή geo krigging [Τσούλος, 2004]. Στην πρώτη γίνεται μία γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τριγώνων που δημιουργούνται από τα υπάρχοντα σημεία, ενώ στην δεύτερη η παρεμβολή γίνεται μέσω στατιστικών δεικτών. Φυσικά υπάρχει πλήθος άλλων μεθόδων παρεμβολής που μπορούν να εφαρμοστούν. Τέλος στην περίπτωση που η εδαφοψηφίδα είναι όμοια σε μέγεθος με την πυκνότητα του DEM – DTM, όπως στην προκειμένη, μπορούμε απλώς να τοποθετήσουμε την κοντινότερη γεωγραφικά τιμή υψομέτρου σε κάθε φατνίο.

Οι περιγραφές αυτές των επιφανειών συνήθως αναφέρονται στο ορθομετρικό υψόμετρο  $H^o$ , δηλαδή αφετηρία των υψομέτρων είναι η μέση στάθμη της θάλασσας. Όμως για τη διαδικασία της έμμεσης ορθοαναγωγής SAR, χρησιμοποιείται το γεωμετρικό υψόμετρο των σημείων [Καραθανάση, 2003][Díaz, 1998]. Κατά συνέπεια θα πρέπει να υπάρξει μία μετατροπή από το ένα υψόμετρο στο άλλο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα μοντέλο μετατροπής αυτών. Πιο συγκεκριμένα, η σχέση που συνδέει τα δύο υψόμετρα είναι η ακόλουθη:

$$h = H^o + N$$

με  $N$  το υψόμετρο του γεωειδούς. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, μετατρέπονται τα ορθομετρικά σε γεωμετρικά μέσω του  $N$  [Βέης et. al., 2007]. Θεωρητικά το  $N$  μεταβάλλεται

συνεχώς από σημείο σε σημείο, όμως για μία έκταση της τάξεως ενός Νομού, δεν έχει μεταβληθεί τόσο ώστε να μεταβάλλει το γεωμετρικό υψόμετρο σημαντικά, οπότε και γίνεται να θεωρηθεί υπό συνθήκες σταθερό. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι στην περιοχή της Αττικής, το N μεταβάλλεται κατά δύο μέτρα σε μία διαδρομή 73 km. Φυσικά εάν υπάρχει κατάλληλο χαρτογραφικό υπόβαθρο τότε μπορεί να γίνει για κάθε φατνίο της γεωαναφερμένης απεικόνισης η κατάλληλη μετατροπή.

### 3.3.2.ii Επίλυση Συστήματος Εξισώσεων

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία τοποθέτησης των τελικών γεωμετρικών υψομέτρων στις ορισθείσες θέσεις, ακολουθεί η μετατροπή αυτών των τριάδων συντεταγμένων ( $X_{map}$ ,  $Y_{map}$ ,  $h$ ). Αρχικά μετατρέπονται σε ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) μέσω των κατάλληλων μετασχηματισμών [Νάκος, 2006], που αντιστοιχούν στην εκάστοτε προβολή. Στη συνέχεια μετατρέπονται σε γεωκεντρικές ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), οι οποίες είναι στο ίδιο σύστημα αναφοράς με αυτό που έχουν γίνει οι μετρήσεις των θέσεων του δορυφόρου.

Έτσι στο παρόν στάδιο διαθέτουμε τα προς ορθοαναγωγή γεωκεντρικά σημεία και τις θέσεις – ταχύτητες του δορυφόρου. Αφού είμαστε στην περίπτωση της έμμεσης ορθοαναγωγής, ζητάμε για ένα σημείο του εδάφους, έστω ( $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$ ), τη στιγμή μηδενισμού της συχνότητας doppler ή αλλιώς την θέση του δορυφόρου ( $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ ). Από το κεφάλαιο “Εξισώσεις Φυσικού Μοντέλου” είναι φανερό ότι έχουμε 3 εξισώσεις με 3 αγνώστους, οπότε και λύνεται το σύστημα. Όμως παρατηρώντας με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις εξισώσεις, βλέπουμε ότι το σύστημα αυτό μπορεί να λυθεί μόνο με επαναληπτικές μεθόδους, αφού εκτός ότι είναι μη γραμμικό το σύστημα δεν γίνεται οι άγνωστοι να λυθούν απλώς αντικαθιστώντας στις εξισώσεις. Η βασική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίλυση είναι η Newton – Raphson. Η τελευταία όμως έχει πολύ υπολογιστική πολυπλοκότητα και σε ένα είδη επιβαρυνόμενο υπολογιστικά σύστημα αργεί να δώσει επίλυση [Καραθανάση, 2003].

Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι δύο πρώτες εξισώσεις και η λύση θα προκύψει από διαδοχικές επαναλήψεις. Ειδικότερα αντί να ζητείται να βρεθούν οι θέσεις του δορυφόρου, υπολογίζεται για συγκεκριμένες θέσεις αυτού η τιμή της συχνότητας doppler. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο αζιμουθιακός χρόνος μηδενισμού της συχνότητας doppler άρα και η γραμμή στην οποία ανήκει το σημείο. Η λύση σε πρώτο στάδιο εντοπίζεται από την αλλαγή προσήμου της τιμής της συχνότητας. Έτσι μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα γνωρίζουμε ότι έχει επέλθει μηδενισμός συχνότητας. Ο τελικός αζιμουθιακός χρόνος υπολογίζεται με την μέθοδο διχοτόμησης σε αυτό το διάστημα, μέχρι τον προσδιορισμό ενός εύρους χρόνων τόσο μικρό ώστε να μπορεί να θεωρηθεί χρονική στιγμή. Το διάστημα αυτό εξαρτάται από την τελική ακρίβεια που ζητείται να έχει η γεωαναφερμένη απεικόνιση [Καραθανάση, 2003].

Με το πέρας του παραπάνω υπολογισμού, υπολογίζεται από τα πολυώνυμα της τροχιάς η θέση του δορυφόρου για τη δεδομένη στιγμή. Στην συνέχεια υπολογίζεται η πλευρική απόσταση δέκτη – σημείου από την εξίσωση (28). Η επικεφαλίδα της εικόνας διαθέτει την πλευρική απόσταση που έχει η απεικόνιση με το πρώτο κοντινότερο σημείο (near range). Εύκολα λοιπόν υπολογίζεται και η θέση του σημείου στην διεύθυνση των αποστάσεων από τον τύπο:

$$j = \frac{R_s - R_{near}}{\text{range pixel spacing}}$$

Έχοντας υπολογίσει την γραμμή και την στήλη, στις οποίες ανήκει το σημείο, παρεμβάλλουμε τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Η μέθοδος αναδόμησης που χρησιμοποιείται στον παρόν αλγόριθμο, όπως έχει εξηγηθεί και στα υπερφασματικά, είναι η μέθοδος του εγγύτερου

γείτονα.

Τέλος σκόπιμο είναι να σημειωθεί ότι η εξίσωση Doppler δεν λύνεται ως προς τον χρόνο, διότι σε τέτοια περίπτωση το πολώνυμο που θα προκύψει 5<sup>ου</sup> βαθμού. Για το τελευταίο δεν έχει βρεθεί κάποιος τύπος που να περιγραφεί την λύση του. Εκτός αυτού, η εξίσωση αυτή θα έχει μέχρι 5 πραγματικές λύσεις, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χονδροειδή σφάλματα. Για αυτούς τους λόγους η εξίσωση αυτή λύνεται με την προαναφερθείσα επαναληπτική διαδικασία.

### 3.3.3 Άμεσος Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων

Εδώ, σε αντίθεση με τον παραπάνω αλγόριθμο, έχουμε ως αρχή τα εικονοστοιχεία της απεικόνισης, για τα οποία ζητάμε να βρούμε τις γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Για την διαδικασία αυτή είναι απαραίτητες και οι τρεις εξισώσεις που περιγράφηκαν. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά από τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου, προσδιορίζεται το πολώνυμο περιγραφής της. Έτσι γνωρίζουμε για κάθε γραμμή της εικόνας τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου [Καραθανάση, 2003].

Με αρχή λοιπόν τα εικονοστοιχεία, έχουμε ως δεδομένα το χρόνο μηδενισμού της συχνότητας doppler και την απόσταση σημείου – δέκτη. Όπως είναι φανερό διαθέτοντας 3 εξισώσεις με 3 αγνώστους, το σύστημα μπορεί να λυθεί. Δηλαδή να υπολογιστεί για κάθε pixel οι γεωκεντρικές του συντεταγμένες. Όμως για το σημείο που θα προσδιοριστεί θα πρέπει να είναι γνωστό και γεωμετρικό του υψόμετρο.

Το σύστημα αυτό είναι μη γραμμικό και για την επίλυσή του χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson. Η συγκεκριμένη μέθοδος, όντας επαναληπτική θα πρέπει να έχει προσεγγιστικές τιμές για τα στοιχεία που καλείται να προσδιορίσει ή αλλιώς χρειάζονται προσεγγιστικές τιμές των γεωκεντρικών συντεταγμένων των σημείων που θα προσδιοριστούν. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι, θα πρέπει να υπάρχουν είδη γνωστά σημεία στην εικόνα, τα οποία μάλιστα θα πρέπει να είναι ευδιάκριτα, π.χ. ανακλαστικές. Έτσι η άμεση ορθοαναγωγή είναι εφικτή μόνο για σημεία καννάβου, τα οποία έχουν εκτός από γνωστές συντεταγμένες και υψόμετρο και να είναι ευδιάκριτα στην απεικόνιση. Αν υπάρχουν τέτοια σημεία, τότε πραγματοποιείται παρεμβολή μεταξύ αυτών για τον προσδιορισμό των προσεγγιστικών τιμών, οι οποίες στην συνέχεια εισάγονται στο μη γραμμικό σύστημα για επίλυση [Καραθανάση, 2003].

Με την τεχνική αυτή υπάρχει εξάρτηση από τα επίγεια στοιχεία και την κρίση του χρήστη που θα κάνει ακριβή ή όχι στόχευση των σημείων αυτών. Ακόμα αν οι προσεγγιστικές τιμές που προσδιορίζονται δεν είναι πολύ κοντά στις πραγματικές, τότε υπάρχει σοβαρή πιθανότητα να μην συγκλίνει το σύστημα, οπότε και μην γίνεται να ορθοαναχθούν ορισμένα τμήματα της εικόνας. Έτσι η μέθοδος αυτή, όντας δύσχρηστη, πολύπλοκη και χρονοβόρα, αποφεύγεται να εφαρμοστεί. Μάλιστα στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν είναι εφικτή.

### 3.3.4 Πολυωνυμικός Αλγόριθμος Ορθοαναγωγής Απεικονίσεων

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι περισσότερο μία οικογένεια αλγορίθμων, η οποία ουσιαστικά εφαρμόζει στη γεωμετρία της εικόνας κάποιου είδους πολυωνυμικούς μετασχηματισμούς. Στην προκειμένη περίπτωση έχει χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα BEAM της ESA για τον δορυφόρο ENVISAT, το οποίο εφαρμόζει έναν μεταβλητό πολυωνυμικό μετασχηματισμό. Να σημειώσουμε ότι οι πολυωνυμικοί μετασχηματισμοί μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους δορυφόρους SAR, απλώς το λογισμικό BEAM, τους εφαρμόζει μόνο για ENVISAT εικόνες.

Ειδικότερα από τα σημεία σύνδεσης που παρέχονται από τις επικεφαλίδες των εικόνων υπολογίζονται οι συντελεστές ενός δευτεροβάθμιου πολυωνύμου, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Το RMS υπολογίζεται από την διαφορά των προκυπτουσών συντεταγμένων με τις δεδομένες. Με τον υπολογισμό των συντελεστών, εφαρμόζουμε στην απεικόνιση το πολυώνυμο. Έτσι με τον ακόλουθο τύπο παράγεται η γεωαναφερμένη εικόνα:

$$x = a_1 + a_2 * x'^2 + a_3 * y'^2 + a_4 * x' * y' + a_5 * x' + a_6 * y' + a_7 * x' * y' \quad (30)$$

$$y = b_1 + b_2 * x'^2 + b_3 * y'^2 + b_4 * x' * y' + b_5 * x' + b_6 * y' + b_7 * x' * y' \quad (31)$$

Ωστόσο η παραπάνω περιγραφή δεν δίνεται από το εγχειρίδιο του λογισμικού, αλλά έχει προκύψει από τον τρόπο λειτουργίας του.

### **3.4 Ανάλυση Σφαλμάτων στην Διαδικασία Ορθοαναγωγής Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.**

Το συγκεκριμένο τμήμα της διπλωματικής εργασίας έχει αφιερωθεί στην εξέταση των σφαλμάτων και της μετάδοσης αυτών στις συνθετικού ανοίγματος RADAR απεικονίσεις αναφορικά με την διαδικασία της ορθοαναγωγής. Σε πρώτο στάδιο θα αναλυθούν οι παράμετροι και η μέθοδος εφαρμογής τους στο φυσικό μοντέλο λήψης S.A.R. . Ειδικότερα εξετάζονται τα στοιχεία εκείνα που παραμετροποιούν τη γεωμετρία της απεικόνισης και συμβάλουν στη μετάδοση σφαλμάτων στο τελικό αποτέλεσμα της γεωαναφερμένης εικόνας. Έτσι η προσέγγιση σε πρώτο στάδιο θα επικεντρωθεί στην ξεχωριστή ανάλυση του κάθε παράγοντα που παράγει σφάλμα, με σκοπό την εξέταση της σημαντικότητάς τους. Έτσι με την ανάλυση των παραπάνω παρουσιάζουμε το σφάλμα που προκύπτει θεωρητικά με το δεδομένο ότι όλοι οι παράμετροι, που εξετάστηκαν, έχουν σφάλμα. Ο όρος θεωρητικά εισάγεται, καθώς σε μία πραγματική εφαρμογή ενδεχομένως να υπάρχουν παράμετροι που είτε δεν τις λαμβάνουμε υπόψιν ή δεν υπάρχουν επαρκή καταγεγραμμένα στοιχεία για τον αριθμητικό τους προσδιορισμό. Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται μία εμβάθυνση στη μετάδοση των υπαρχόντων σφαλμάτων (δεδομένα και παράμετροι) στη γεωαναφερμένη εικόνα με την εφαρμογή των προαναφερθέντων αλγορίθμων.

Στο παρόν τμήμα της εργασίας θα παρουσιαστούν οι τρόποι με τους οποίους μεταδίδονται τα σφάλματα. Παράλληλα αναλύονται ορισμένα παραδείγματα, τα οποία βοηθούν στην καλύτερη αποσαφήνιση της επιρροής των παραμέτρων αυτών και έχουν ως σκοπό την ανάδειξη της σημαντικότητάς τους, ενώ δεν συνιστούν μέρος ή τμήμα της αξιολόγησης των γεωαναφερμένων απεικονίσεων.

#### **3.4.1 Παράμετροι Φυσικού Μοντέλου Λήψης S.A.R.**

Η λήψη συνθετικού ανοίγματος RADAR δεδομένων έχει μία ξεχωριστή γεωμετρία, λόγω του τρόπου λήψης της. Με βάση τον τρόπο εκπομπής – καταγραφής του σήματος ορίζονται κάποιες παράμετροι, οι οποίες περιγράφουν μαθηματικά την γεωμετρία της απεικόνισης. Οι παράμετροι αυτοί, όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο “Γεωμετρία Λήψης Δ.Ψ.Τ.Α. S.A.R.”, εξετάζονται πλέον από τη σκοπιά της επίδρασής τους στην διαδικασία της ορθοαναγωγής.

### 3.4.1.i Ακρίβεια Καταγραφής Χρόνου

Ο χρόνος είναι από τις βασικότερες παραμέτρους που συνθέτουν τα συστήματα RADAR. Ολόκληρη η λειτουργία των συστημάτων αυτών στηρίζεται στον συγχρονισμό των υπό – συστημάτων και στην καταγραφή αυτού σχετικά με τη λήψη και εκπομπή κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος εισάγεται στον προσδιορισμό της ακριβούς ώρας της πρώτης και τελευταίας γραμμής λήψης, στη μέτρηση των πλαγίων αποστάσεων και στον χρονικό προσδιορισμό των θέσεων και ταχυτήτων της πλατφόρμας.

Όσο αναφορά την χρονική ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης, σχετίζεται με την ποιότητα προσδιορισμού του μοντέλου παρεμβολής και κατ' επέκταση με την ακρίβεια των τελικών συντεταγμένων της εικόνας. Για τον λόγο αυτό ο συγκεκριμένος παράγοντας αναλύεται στο τμήμα “Ακρίβεια Πολυωνύμου Παρεμβολής Θέσεων”

### 3.4.1.ii Χρονικός Προσδιορισμός Θέσεων Αρχής – Τέλους Απεικόνισης

Η ακρίβεια με την οποία δίνεται ο χρόνος της πρώτης και της τελευταίας γραμμής της απεικόνισης, έχει ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία της ορθοαναγωγής. Ειδικότερα από τον χρόνο αυτό εξαρτώνται πρώτον : ο υπολογισμός του χρονικού βήματος στα αζιμούθια και δεύτερον : ο προσδιορισμός οποιαδήποτε γραμμής στην απεικόνιση. Όπως γνωρίζουμε ο υπολογισμός της θέσης ενός σημείου της επιφάνειας της γης στην απεικόνιση με γνωστή την χρονική στιγμή μηδενισμού

της συχνότητας Doppler δίνεται από τον τύπο:  $row_{azimuth} = \frac{t_{σημείου} - t_{πρώτης\ γραμμής}}{\betaήμα_{azimuth}}$ , με βήμα<sub>azimuth</sub> το χρονικό βήμα στα αζιμούθια ( $\betaήμα_{azimuth} = \frac{t_{τελευταίας\ γραμμής} - t_{πρώτης\ γραμμής}}{n}$ , με n ο αριθμός των γραμμών). Αν υποθέσουμε ότι ο χρόνος στον οποίο ανήκει το σημείο είναι χωρίς σφάλμα (μόνο για τους λόγους διαχωρισμού που εξηγήθηκαν παραπάνω) και το σφάλμα προσδιορισμού θέσης πρώτης και τελευταίας γραμμής είναι ισότιμο με  $\sigma_{t_{azimuth}}$ , έχουμε τα ακόλουθα.

Με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων για την παραπάνω εξίσωση έχουμε το ακόλουθο σφάλμα προσδιορισμού γραμμής στο αζιμούθιο:

$$\sigma_{azimuth}^2 = \left[ \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}}, \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}} \right] * \begin{bmatrix} \sigma_{t_{azimuth}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{t_{azimuth}}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}} \\ \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}} \end{bmatrix}$$

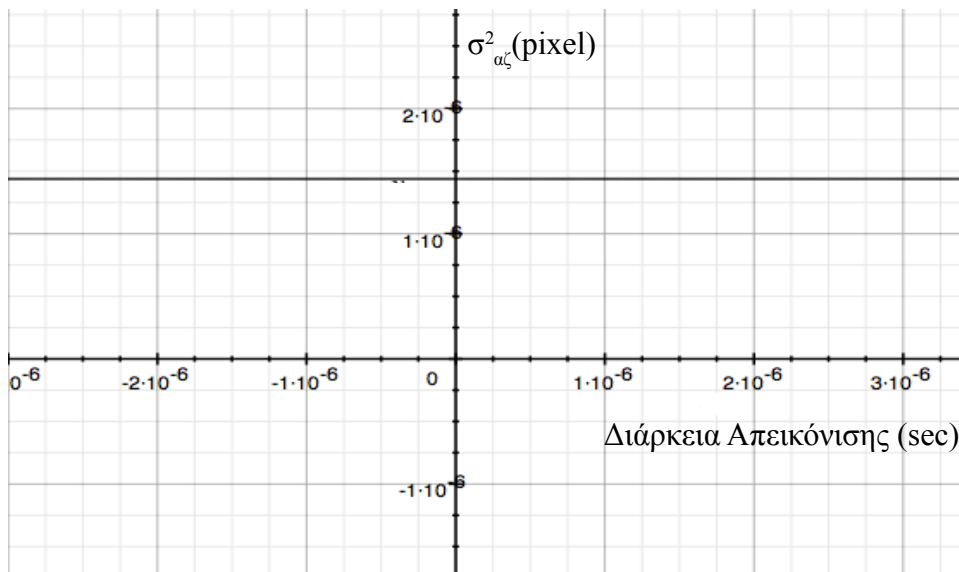
όπου  $\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}}$  και  $\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}}$  οι μερικές παράγωγοι της συνάρτησης προς τις αντίστοιχες μεταβλητές. Όπως οι μερικές παράγωγοι υπολογίστηκαν και διατυπώνονται ως εξής:

$$\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}} = n \frac{t_{σημείου} - t_{stop}}{(t_{stop} - t_{start})^2}$$

$$\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}} = n \frac{t_{σημείου} - t_{start}}{(t_{stop} - t_{start})^2}$$

Να σημειωθεί ότι σκοπίμως ορίστηκε το σφάλμα του χρόνου του σημείου μηδέν, καθώς το σφάλμα αυτό περιλαμβάνεται στο σφάλμα από την εξίσωση Doppler. Εδώ όπως έχει ειδη δηλωθεί, εξετάζονται τα σφάλματα μεμονωμένα, με σκοπό να αναδειχθεί η σημαντικότητά τους. Στο τέλος άλλωστε θα υπάρξει συνένωση όλων το σφαλμάτων που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Για παράδειγμα ένα σφάλμα χρόνου της τάξεως του εκατοστού του δευτερολέπτου (sec<sup>-2</sup>) μεταδίδει σφάλμα στο αζιμούθιο της τάξεως των 70 – 80 αζιμουθιακών pixel!

Ενδεικτικά θα παραθέτεται ένα ρεαλιστικό παράδειγμα για να δειχθεί η επίδραση που θα έχει σε πραγματικά δεδομένα. Έστω μία απεικόνιση με 18000 περίπου γραμμές λήψης, οι χρόνοι μετράνε από 0 έως x sec, το υπό εξέταση σημείο βρίσκεται στα 7.5 sec και η ακρίβεια μέτρησης της πρώτης και τελευταίας γραμμής είναι 10<sup>-6</sup> sec. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω παράγεται ένα διάγραμμα για να φανεί η τιμή και η μεταβολή του σφάλματος αυτού συναρτήσει της διάρκειας της απεικόνισης.



Εικόνα 41: Μεταβολή Σφάλματος Λόγω Μεταβολής Διάρκειας Απεικόνισης

Αρχικά παρατηρείται ότι το τετράγωνο του σφάλματος που δημιουργείται εξαιτίας της ακρίβειας του χρόνου στον αζιμουθιακό χρόνο είναι τάξεως των 1.5·10<sup>-6</sup> pixel<sup>2</sup>, ή αλλιώς 0.0012 pixel. Η μονάδα pixel μεταφράζεται άμεσα σε μέτρα μέσω της απόστασης των εικονοστοιχείων στην αζιμουθιακή διεύθυνση. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει σταθερή και μηδενική κλίση συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της απεικόνισης με σταθερό τον αριθμό των γραμμών της.

### 3.4.1.iii **Ακρίβεια Μέτρησης Πλαγίων Αποστάσεων**

Η ακρίβεια μέτρησης του χρόνου εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους επηρεάζει και την μέτρηση της εγγύτερης πλάγιας απόστασης, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της range

συντεταγμένης (στήλη). Όπως γνωρίζουμε από την Φυσική υπολογίζουμε την απόσταση δύο σημείων που μετράται από την εκπομπή και λήψη ενός παλμού ως εξής:

$$R_{near} = \frac{t_{\text{διαδρομής}} * c}{2}$$

με  $t_{\text{διαδρομής}}$  ο χρόνος που έκανε το σήμα για την διπλή διαδρομή μεταξύ των δύο σημείων και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Θεωρώντας λοιπόν ένα σφάλμα στην καταγραφή του χρόνου  $\sigma_t$  και ένα σφάλμα στην τιμή της ταχύτητας  $\sigma_c$  (μπορεί και να παραληφθεί) έχουμε τα ακόλουθα:

$$\sigma_{R_{near}}^2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{near}}{\partial t_{\text{διαδρομής}}} & \frac{\partial R_{near}}{\partial c} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_t^2 & 0 \\ 0 & \sigma_c^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{near}}{\partial t_{\text{διαδρομής}}} \\ \frac{\partial R_{near}}{\partial c} \end{bmatrix}$$

Και για τις μερικές παραγώγους έχουμε τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial R_{near}}{\partial t_{\text{διαδρομής}}} = \frac{c}{2}$$

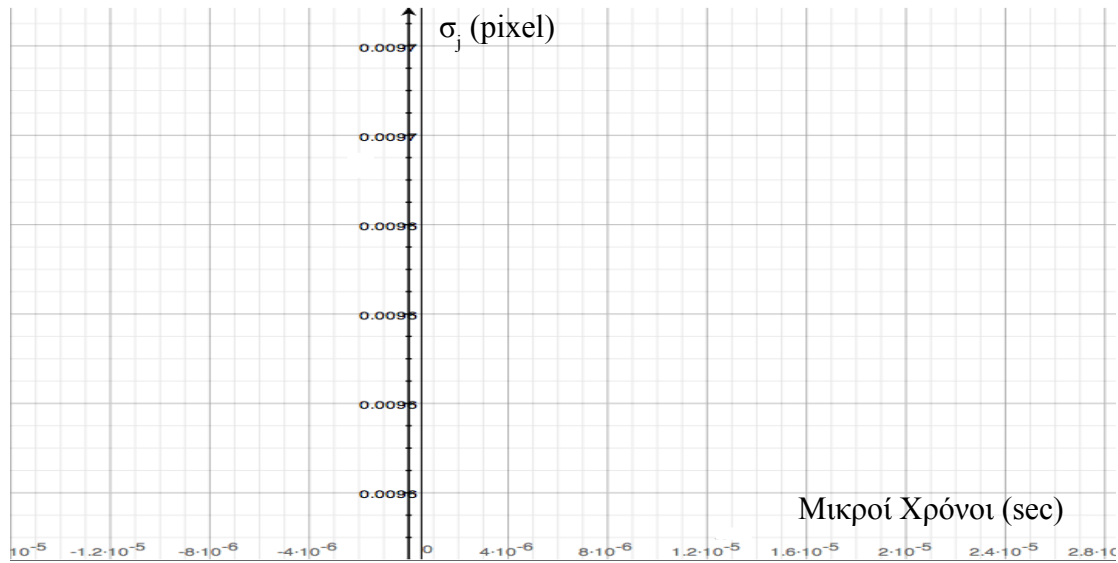
$$\frac{\partial R_{near}}{\partial c} = \frac{t_{\text{διαδρομής}}}{2}$$

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με σφάλμα καταγραφής του χρόνου της τάξεως του εκατοστού του δευτερολέπτου ( $\text{sec}^{-2}$ ) και σφάλμα στην ταχύτητα του φωτός 1 μέτρο/δευτερόλεπτο μεταδίδεται σφάλμα στον υπολογισμό της απόστασης περίπου 15 μέτρα. Παρατηρείται για άλλη μία φορά η ισχυρή επίδραση της ακρίβειας καταγραφής του χρόνου. Αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει σφάλμα στην τιμή της ταχύτητας του φωτός τότε το σφάλμα της απόστασης μεταβάλλεται μόνο κατά  $10^{-6}$  μέτρα, για αυτό και είναι δυνατόν να παραλειφθεί.

Το σφάλμα που τοποθετείται στην ταχύτητα του φωτός είναι κυρίως λόγω του ότι μεταξύ δορυφόρου και σημείου υπάρχει η ατμόσφαιρα. Η τελευταία μεταβάλλει την ταχύτητα αυτή ανάλογα τη σύστασή της, έτσι δεν γίνεται να γνωρίζουμε ακριβώς τη μέση ταχύτητα διαδρομής. Γενικά όπως φάνηκε μπορεί και να παραληφθεί εξαιτίας της μικρής επίδρασης στο τελικό σφάλμα.

Το σφάλμα αυτό μεταδίδεται στον προσδιορισμό της πλάγιας συντεταγμένης από τον τύπο προσδιορισμού της:  $j = \frac{R_S - R_{near}}{\text{range pixel spacing}}$ . Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ότι το  $\sigma_{RS}$  είναι μηδέν, καθώς θα συμπεριληφθεί στην τελική ανάλυση. Έτσι από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων έχουμε  $\sigma_j^2 = \left(\frac{\partial j}{\partial R_{near}}\right)^2 \sigma_{R_{near}}^2 \rightarrow \sigma_j^2 = \left(-\frac{1}{\text{range pixel spacing}}\right)^2 \sigma_{R_{near}}^2$ .

Θα παραθέσουμε ένα παράδειγμα για να φανεί η μεταβολή της ακρίβειας καταγραφής του χρόνου των πλαγίων αποστάσεων στον υπολογισμό της ακρίβειας της πλάγιας συντεταγμένης. Έτσι ενδεικτικά με ένα μέγεθος εικονοστοιχείων της τάξης των 8 μέτρων και ακρίβεια στην μέτρηση του χρόνου που κυμαίνεται μεταξύ μερικών  $\mu\text{sec}$  και  $\text{nsec}$  έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 42: Μεταβολή Σφάλματος Συντεταγμένης Πλάγιας Απόστασης Συναρτήσεως των Μικρών Χρόνων

Φαίνεται ότι για ακρίβεια καταγραφής του χρόνου διαδρομής τους σήματος μέχρι μερικά μικρόμετρα επαρκεί για πολύ καλό προσδιορισμό των πλαγίων συντεταγμένων.

### 3.4.1.iv Ακρίβεια Πολυωνύμου Παρεμβολής των Θέσεων του Δέκτη

Για την παρεμβολή θέσεων του δέκτη στην κάθε αζιμουθιακή γραμμή, όπως είναι γνωστό υπολογίζονται οι συντελεστές ενός τριτοβάθμιου πολυωνύμου, με αρχικά δεδομένα τις θέσεις και τις ταχύτητες σε τουλάχιστον δύο χρονικές στιγμές. Τα δεδομένα αυτά έχουν σφάλμα τόσο στις καθαντές τιμές θέσης όσο και στην χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται. Έτσι από το σύστημα που δομείται για επίλυση έχουμε  $\sigma_{t0}$  και  $\sigma_{t1}$  τα σφάλματα στις χρονικές στιγμές,  $\sigma_{x0}$ ,  $\sigma_{y0}$ ,  $\sigma_{z0}$ ,  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{y1}$ ,  $\sigma_{z1}$  τα σφάλματα των συντεταγμένων των θέσεων και τέλος  $\sigma_{vx0}$ ,  $\sigma_{vy0}$ ,  $\sigma_{vz0}$ ,  $\sigma_{vx1}$ ,  $\sigma_{vy1}$ ,  $\sigma_{vz1}$  τα σφάλματα των αντίστοιχων ταχυτήτων. Οι τιμές των σφαλμάτων αυτών παρέχονται είτε από τις επικεφαλίδες εάν πρόκειται για μέσης ακρίβειας τροχιές ή από τις αντίστοιχες υπηρεσίες που διαθέτουν περισσότερο ακριβή δεδομένα.

Αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα που θα έχουν οι υπολογιζόμενοι συντελεστές μέσω του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων. Αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για συσχέτιση σφαλμάτων των συμμετεχόντων μεταβλητών, ορίζονται ως μηδενικές. Έτσι έχουμε τα ακόλουθα:

Για την X συντεταγμένη έχουμε το παρακάτω σύστημα:



$$\begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{x2} \\ a_{x1} \\ a_{x0} \end{bmatrix} = (A * P * A^T)^{-1} * A^T * P * \delta l, \quad A = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{X_0}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{X_1}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{V_{x_0}}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{V_{x_1}}^2} \end{bmatrix}, \quad \delta l = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ V_{X_0} \\ V_{X_1} \end{bmatrix}$$

Προφανώς το σύστημα δεν λύνεται με περισσότερες από τις απαραίτητες εξισώσεις, οπότε και δεν γίνεται να υπολογιστεί σφάλμα συντελεστών από την επίλυση αυτή, αλλά μόνο λόγω των αρχικών σφαλμάτων. Έτσι με βάση τα παραπάνω τα σφάλματα έχουμε τον ακόλουθο πίνακα μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ax3}^2 & \sigma_{ax3 ax2} & \sigma_{ax3 ax1} & \sigma_{ax3 ax0} \\ \sigma_{ax2 ax3} & \sigma_{ax2}^2 & \sigma_{ax2 ax1} & \sigma_{ax2 ax0} \\ \sigma_{ax1 ax3} & \sigma_{ax1 ax2} & \sigma_{ax1}^2 & \sigma_{ax1 ax0} \\ \sigma_{ax0 ax3} & \sigma_{ax0 ax2} & \sigma_{ax0 ax1} & \sigma_{ax0}^2 \end{bmatrix} = V_{\hat{x}} = \sigma_0^2 * (A * P * A^T)^{-1}, \quad \mu\epsilon \quad \sigma_0 = 1$$

Εφαρμόζεται στο πολυώνυμο ο νόμος μετάδοσης μεταβλητοτήτων και υπολογίζονται τα εξής:

$$\sigma_{X_i}^2 = J * V_{\hat{x}} * J^T, \quad J = [t_i^3, t_i^2, t_i, 1]$$

Ομοίως υπολογίζεται το σφάλμα που θα έχουν και οι άλλες δύο συντεταγμένες και στη συνέχεια βρίσκεται αντιστοίχως το σφάλμα της ταχύτητας στις ίδιες χρονικές στιγμές.

$$\sigma_{Y_i}^2 = J * V_{\hat{x}} * J^T, \quad J = [t_i^3, t_i^2, t_i, 1]$$

$$\sigma_{Z_i}^2 = J * V_{\hat{x}} * J^T, \quad J = [t_i^3, t_i^2, t_i, 1]$$

Και για τις ταχύτητες:

$$\sigma_{V_{X_i}}^2 = A' * V_{\hat{x}}' * A'^T, \quad A' = [3 * t_i^2, 2 * t_i, 1], \quad V_{\hat{x}}' = \begin{bmatrix} \sigma_{ax3}^2 & \sigma_{ax3 ax2} & \sigma_{ax3 ax1} \\ \sigma_{ax2 ax3} & \sigma_{ax2}^2 & \sigma_{ax2 ax1} \\ \sigma_{ax1 ax3} & \sigma_{ax1 ax2} & \sigma_{ax1}^2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{V_{Y_i}}^2 = A' * V_{\hat{y}}' * A'^T, \quad A' = [3 * t_i^2, 2 * t_i, 1], \quad V_{\hat{y}}' = \begin{bmatrix} \sigma_{ay3}^2 & \sigma_{ay3 ay2} & \sigma_{ay3 ay1} \\ \sigma_{ay2 ay3} & \sigma_{ay2}^2 & \sigma_{ay2 ay1} \\ \sigma_{ay1 ay3} & \sigma_{ay1 ay2} & \sigma_{ay1}^2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{VZ_i}^2 = A' * V_{\hat{z}}' * A'^T, \quad A' = [3 * t_i^2, 2 * t_i, 1], \quad V_{\hat{z}}' = \begin{bmatrix} \sigma_{az3}^2 & \sigma_{az3 \ az2} & \sigma_{az3 \ az1} \\ \sigma_{az2 \ az3} & \sigma_{az2}^2 & \sigma_{az2 \ az1} \\ \sigma_{az1 \ az3} & \sigma_{az1 \ az2} & \sigma_{az1}^2 \end{bmatrix}$$

### 3.4.1.v Επιρροή της Γωνίας Στροφής (Squint Angle)

Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του κεντρικού λοβού του αποτυπώματος της κεραίας με την κάθετη στην προβεβλημένη τροχιά ευθεία επιφέρει μία αλλαγή στη συχνότητα Doppler. Έτσι θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην αντίστοιχη εξίσωση ως  $F_{DC}$  ή αλλιώς ως Doppler Centroid. Αν δεν συμπεριληφθεί στην εξίσωση τότε προκύπτει ένα συστηματικό σφάλμα στην επίλυση της εξίσωσης, για τη ρίζα μηδέν. Δηλαδή ενώ θα λύνεται η εξίσωση για  $f_d=0$ , στην πραγματικότητα θα είναι  $f_d=F_{DC}$ . Το οποίο, όπως θα φανεί στη συνέχεια προσδίδει σφάλμα στον υπολογισμό του χρόνου για τον οποίο φαινομενικά το σημείο έχει μηδενική συχνότητα Doppler. Η γωνία αυτή ανάλογα την λειτουργία και τον προσανατολισμό του δέκτη μπορεί να είναι μηδέν, σταθερή ή και χρονικά μεταβαλλόμενη.

Από τον τρόπο επίλυσης της συχνότητας Doppler, είναι φανερό ότι ο αζιμουθιακός χρόνος υπολογίζεται με δοκιμές μέχρι την αλλαγή προσήμου, οπότε και διχοτομείται το χρονικό διάστημα μέχρι το επιθυμητό όριο. Αυτό σημαίνει ότι δεν γίνεται εφαρμοστεί ο γνωστός νόμος μετάδοσης σφαλμάτων για να υπολογιστεί η ακρίβεια του αζιμουθιακού χρόνου με σφάλμα  $F_{DC}$ . Για να υπολογιστεί το σφάλμα αυτό ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά βρίσκεται η λύση της εξίσωσης για ένα δεδομένο σημείο χωρίς γωνία στροφής με πολύ μεγάλη ακρίβεια στην διχοτόμηση, ώστε από πλευράς επίλυσης να είναι αμελητέο το σφάλμα. Σε επόμενο στάδιο, λύνεται για το ίδιο σημείο την εξίσωση, αλλά αυτή την φορά με την γωνία στροφής. Η ακρίβεια επίλυσης θα είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Με αυτόν το τρόπο γίνεται φανερή η επίδραση της γωνίας αυτής, υπολογίζοντας τη διαφορά των δύο προκυπτουσών χρονικών στιγμών. Αντιστοίχως αν είναι γνωστό το σφάλμα που έχει η συχνότητα Doppler Centroid, υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο το σφάλμα που θα έχει ο χρόνος στο αζιμούθιο. Έτσι οι εξισώσεις θα λυθούν για  $f_d^1 = F_{DC} + \sigma_{F_{DC}}$  και  $f_d^2 = F_{DC} - \sigma_{F_{DC}}$ , οπότε και προκύπτουν δύο αζιμουθιακές τιμές  $t_1$  και  $t_2$ , των οποίων η διαφορά είναι το επιζητούμενο σφάλμα.

### 3.4.1.vi Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Η περιγραφή της επιφάνειας της Γης, όπως είναι αναμενόμενο επηρεάζει την ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας. Η επιρροή αυτή αναφέρεται και στις δύο διευθύνσεις, αζιμούθιο και πλευρικές αποστάσεις, όμως περισσότερο μεταβάλλεται η τιμή στις πλάγιες αποστάσεις. Ανάλογα την ποιότητα (του DEM), την πυκνότητα (του DEM) και το μέγεθος των εικονοστοιχείων έχουμε αλληλεπιδράσεις στη σωστή “τοποθέτηση” των σημείων της επιφάνειας της γης στην απεικόνιση.

Η ποιότητα και η πυκνότητα του Ψ.Μ.Ε. προσδίδει ένα σφάλμα στον προσδιορισμό του ορθομετρικού υψομέτρου, ανάλογα με το αν προέρχεται από παρεμβολή μετρημένων σημείων ή ακόμα και τα μετρημένα σημεία πόσο ακριβή είναι. Στη συνέχεια μετατρέπουμε αυτό το υψόμετρο σε γεωμετρικό μέσω της αποχής του ελλειψοειδούς. Η μετατροπή αυτή προφανώς και προσδίδει ένα σφάλμα, λόγω της ασάφειας που θα υπάρχει στην αποχή  $N$ . Θεωρώντας ένα σφάλμα γεωμετρικού υψομέτρου  $\sigma_h$ , για τις διάφορες θέσεις που θα γεωαναφερθούν, μετατρέπουμε τις τελευταίες από συντεταγμένες χάρτου σε γεωκεντρικές διαμέσου των κατάλληλων

μετασηματισμών. Έτσι μεταδίδεται το σφάλμα του υψομέτρου στις καρτεσιανές συντεταγμένες X, Y, Z.

Από τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για γεωαναφορά, τα σφάλματα  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$  επηρεάζουν τόσο τον αζιμουθιακό χρόνο όσο και την απόσταση στις πλάγιες αποστάσεις. Αυτά στη συνέχεια μεταφράζονται σε αβεβαιότητες κατά τις διευθύνσεις του αζιμουθίου και των πλαγίων αποστάσεων. Εμβαθύνουμε ξεχωριστά στις δύο αυτές διευθύνσεις με σκοπό τον προσδιορισμό του σφάλματος που έχει η γεωαναφερμένη εικόνα εξαιτίας του αναγλύφου.

Για τα σφάλματα των καρτεσιανών συντεταγμένων με δεδομένη ακρίβεια γεωμετρικού υψομέτρου έχουμε τα ακόλουθα. Εφαρμόζουμε τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων από την τριάδα ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) στις υπολογιζόμενες καρτεσιανές συντεταγμένες. Έτσι προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\begin{aligned}\sigma_{X_i} &= \frac{\partial X}{\partial h} \sigma_h \\ \sigma_{Y_i} &= \frac{\partial Y}{\partial h} \sigma_h \\ \sigma_{Z_i} &= \frac{\partial Z}{\partial h} \sigma_h\end{aligned}$$

όπου  $\frac{\partial X}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial Y}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial Z}{\partial h}$ , οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων που μετατρέπουν τα  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  ως προς το γεωμετρικό υψόμετρο.

### 3.4.1.vii Σφάλμα Αναγλύφου στις Πλάγιες Αποστάσεις

Όπως είδαμε παραπάνω οι καρτεσιανές συντεταγμένες έχουν τυπική απόκλιση, που οφείλεται στο ανάγλυφο. Για να υπολογιστεί η συντεταγμένη στην διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων που θα έχει το σημείο στην απεικόνιση, εκτός του ότι αρχικά εντοπίζεται η γραμμή στην οποία βρίσκεται, εφαρμόζεται ύστερα ο τύπος των αποστάσεων. Στη συνέχεια με βάση το τύπο  $j = \frac{R_S - R_{near}}{range\ pixel\ spacing}$ , υπολογίζεται την συντεταγμένη. Έτσι όπως φαίνεται αρχικά υπάρχει ένα σφάλμα υπολογισμού της απόστασης σημείου (P) – δέκτη (S) (χωρίς σφάλμα θέσης του δέκτη). Σύμφωνα με τον νόμο μετάδοσης, το σφάλμα της απόστασης δύο σημείων δίνεται από τα ακόλουθα:

$$\sigma_{R_s}^2 = \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial X}\right)^2 * \sigma_X^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Y}\right)^2 * \sigma_Y^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Z}\right)^2 * \sigma_Z^2$$

Με τις μερικές παραγώγους ως:

$$\frac{\partial R_S}{\partial X} = - \frac{X_S - X_P}{R_{S-P}}$$

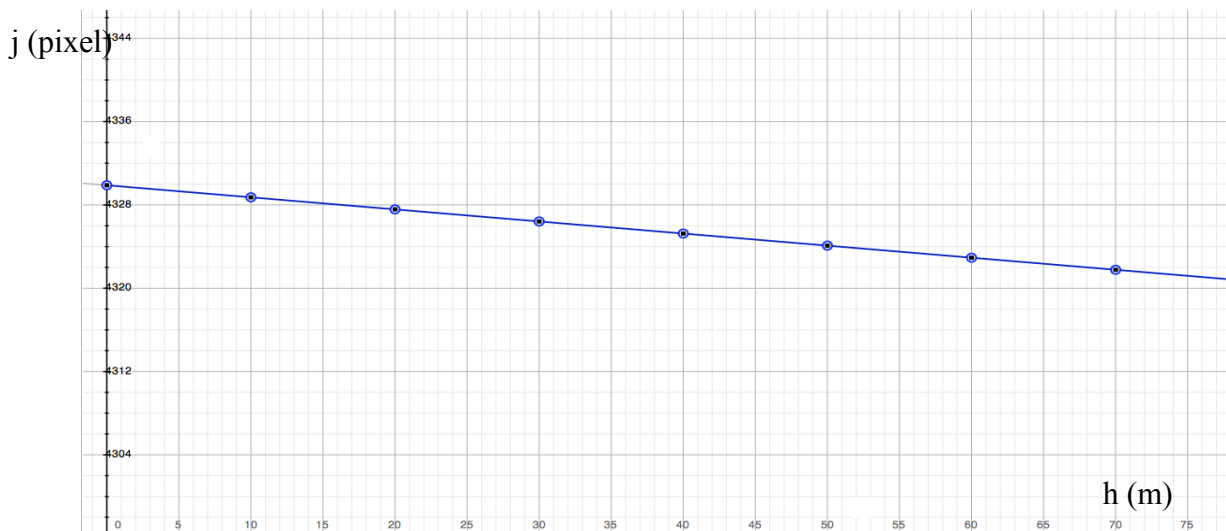
$$\frac{\partial R_S}{\partial Y} = - \frac{Y_S - Y_P}{R_{S-P}}$$

$$\frac{\partial R_S}{\partial Z} = - \frac{Z_S - Z_P}{R_{S-P}}$$

Έτσι με βάση το υπολογισθέν σφάλμα προχωράμε στον υπολογισμό του σφάλματος της συντεταγμένης στην διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων. Εδώ εφαρμόζεται πάλι ο νόμος μετάδοσης και προκύπτει το ακόλουθο σφάλμα:

$$\sigma_j^2 = \left( \frac{\partial j}{\partial R_{S-P}} \right)^2 \sigma_{R_{S-P}}^2 \rightarrow \sigma_j^2 = \left( \frac{1}{\text{range pixel spacing}} \right)^2 \sigma_{R_{near}}^2$$

Παρατηρούμε ότι το σφάλμα της συντεταγμένης είναι ανάλογο του σφάλματος της υπολογισμένης απόστασης. Έτσι για παράδειγμα με ακρίβεια υπολογισμού πλάγιας απόστασης της τάξεως των 10 μέτρων και απόσταση εικονοστοιχείων στην διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων περίπου 8 μέτρα, το σφάλμα που δημιουργείται στα εικονοστοιχεία των πλαγίων αποστάσεων είναι 1.25 pixel. Με σκοπό να γίνει περισσότερο εμφανή η έντονη επίδραση του σφάλματος της υπολογισμένης απόστασης, παραθέτουμε το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω ένα σημείο της επιφάνειας της γης με οριζοντιογραφικές συντεταγμένες  $X_{map}$ ,  $Y_{map}$  δεδομένες και γεωμετρικό υψόμετρο  $h$ . Μεταβάλλοντας την τιμή  $h$  του υψόμετρου υπολογίζεται η τιμή της πλάγιας συντεταγμένης.



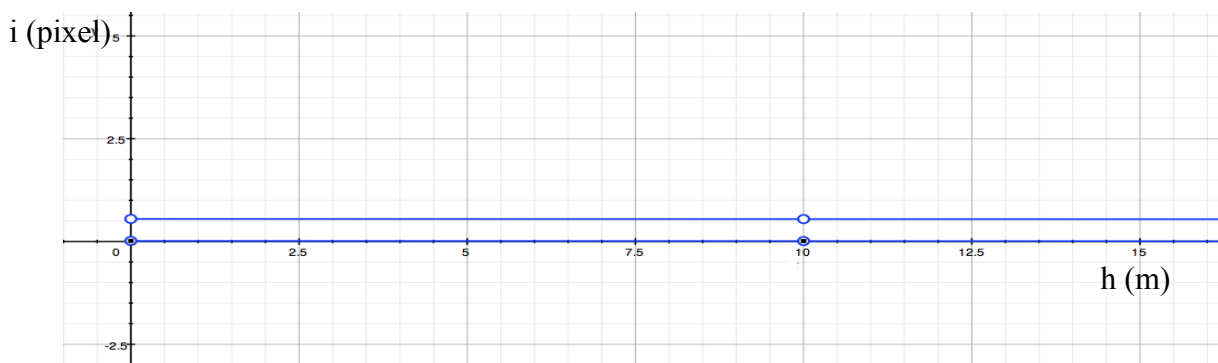
Εικόνα 43: Μεταβολή Συντεταγμένης Πλάγιας Απόστασης Συναρτήσεως Τιμής Υψόμετρου

Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι για μία μεταβολή – αβεβαιότητα γεωμετρικού υψόμετρου της τάξεως των 10 μέτρων η συντεταγμένη μεταβάλλεται κατά 1 εικονοστοιχείο. Έτσι εάν δεν υπάρχει ψηφιακό μοντέλο εδάφους και επιχειρηθεί γεωαναφορά, τότε θα υπάρχουν τεράστια σφάλματα, τα οποία όσο μεγαλώνει το υψόμετρο αυξάνονται.

**3.4.1.viii Σφάλμα Αναγλύφου στα Αζιμούθια**

Η επίδραση του αναγλύφου στον αζιμουθιακό χρόνο δεν είναι τόσο έντονη σε σχέση με την διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Για να υπολογιστεί ο αζιμουθιακός χρόνος, όπως είναι είδη γνωστό, βρίσκουμε την ρίζα της συνάρτησης Doppler. Η εξίσωση αυτή μεταξύ άλλων περιέχει και τις συντεταγμένες των σημείων, οπότε και μεταδίδεται το σφάλμα αυτών στον υπολογισμό του αζιμουθιακού χρόνου.

Λόγω της μορφής της εξίσωσης, δεν γίνεται να εφαρμόσουμε νόμο μετάδοσης σφαλμάτων για να υπολογιστεί το σφάλμα που θα έχει ο χρόνος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να πραγματοποιηθούν δοκιμές με τις ακραίες τιμές των τυπικών αποκλίσεων των μεταβλητών X , Y , Z. Για να αντιληφθούμε την επίδραση που θα έχει η μεταβολή της τιμής των υψομέτρων παραθέτουμε ένα παράδειγμα αντίστοιχο με την παραπάνω περίπτωση. Ειδικότερα για τρία δεδομένα σημεία στην επιφάνεια της γης, τα οποία είναι κατανομημένα στην εγγύτερη, μέση και μακρινή πλάγια απόσταση, υπολογίζουμε τη μεταβολή που θα έχει η τιμή της αζιμουθιακής συντεταγμένης, με την μεταβολή του γεωμετρικού υψομέτρου. Έτσι μπορεί να φανεί η μεταβολή που θα έχει η αζιμουθιακή συντεταγμένη με δεδομένο σφάλμα υψομέτρου. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζουμε τις αζιμουθιακές τιμές που λαμβάνουν τα σημεία αυτά συναρτήσει του γεωμετρικού τους υψομέτρου.



Εικόνα 44: Μεταβολή της Αζιμουθιακής Συντεταγμένης Συναρτήσει του Υψομέτρου

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η αζιμουθιακή τιμή, πρακτικά παραμένει αμετάβλητη, με τη μεταβολή του γεωμετρικού υψομέτρου. Μάλιστα εξετάζοντας τα δεδομένα με μεγαλύτερη προσοχή παρατηρούμε ότι, με μεταβολή 500 μέτρων υψόμετρο, η αζιμουθιακή τιμή μεταβλήθηκε μόλις κατά 0.21!

Έτσι παρουσιάζουμε τον ακόλουθο πίνακα:

Τιμή Αζιμουθίου	Γεωμετρικό Υψόμετρο	Θέση στη Διεύθυνση των Πλαγίων Αποστάσεων	Απόλυτη Διαφορά
0.013867188	0.00	Far	0.21192
-0.19804687	500.00	Far	
7402.3076	0.00	Middle	0.20990
7402.0977	500.00	Middle	
0.54882813	0.00	Near	0.20996
0.33886719	500.00	Near	

## Πίνακας 2: Μεταβολές Αζιμουθιακών Τιμών

Είναι λοιπόν φανερό ότι το αζιμούθιο δεν επηρεάζεται ούτε από το ανάγλυφο της περιοχής ούτε από το που βρίσκεται το σημείο στην απεικόνιση.

### 3.4.2 Συνολική Μετάδοση Σφαλμάτων από τις Εξισώσεις του Μοντέλου

Εδώ παρουσιάζουμε συνολικά τα σφάλματα που υπάρχουν και μεταδίδονται μέσω των εξισώσεων στην γεωαναφερμένη εικόνα. Κάθε μία πηγή ασάφειας συμβάλει στο τελικό αποτέλεσμα, όπως αναλύθηκε στα παραπάνω κεφάλαια. Για το λόγο ότι γενικά χρησιμοποιείται μόνο η έμμεση ορθοαναγωγή, θα αναλυθούν μόνο οι δύο αντίστοιχες εξισώσεις. Αναφορικά να προσθέσουμε ότι στην περίπτωση της άμεσης, όπου χρησιμοποιούνται και οι τρεις τύποι, τα σφάλματα που μεταδίδονται, εκτός από τις ίδιες τις εξισώσεις, οφείλονται και στον τρόπο επίλυσης. Ειδικότερα το τελικό σφάλμα στο αποτέλεσμα προέρχεται και από την επαναληπτική διαδικασία που εφαρμόζεται (Newton – Raphson).

Τα σφάλματα στις τελικές συντεταγμένες που θα αποδοθούν (μέχρι πριν την αναδόμηση), με την έμμεση μέθοδο, εξαρτάται από το πως έχει λυθεί το σύστημα των δύο εξισώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση από την εξίσωση Doppler υπολογίζεται ο χρόνος κατά τον οποίο έχουμε μηδενισμό συχνότητας. Έπειτα με γνωστό το χρόνο, εκτός από τον προσδιορισμό της γραμμής της απεικόνισης, έχουμε την θέση της πλατφόρμας. Με τα δεδομένα αυτά, υπολογίζεται η απόσταση των σημείων με το δέκτη και στη συνέχεια με βάση την αρχική  $R_0$  απόσταση εντοπίζεται η στήλη στην οποία ανήκει το σημείο. Παρατηρούμε λοιπόν ότι, υπάρχει μία αλληλεξάρτηση μεταξύ των εξισώσεων. Έτσι θα αναλυθεί αρχικώς η εξίσωση Doppler, μέχρι τον υπολογισμό του σφάλματος στα αζιμούθια και στη συνέχεια η εξίσωση των αποστάσεων.

#### 3.4.2.i Εξίσωση Συχνότητας Doppler

Η εξίσωση αυτή έχει ως παραμέτρους εισαγωγής τα ακόλουθα δεδομένα: i. μήκος κύματος  $\lambda$ , ii. θέση δορυφόρου, iii. ταχύτητα δορυφόρου, iv. θέση σημείου στην επιφάνεια της γης και v. Doppler centroid. Θεωρητικά υπάρχει και η ταχύτητα του σημείου στην εξίσωση, η οποία όμως αφού εξετάζουμε σταθερή επιφάνεια, είναι μηδέν. Όλες αυτές οι παράμετροι έχουν ασάφεια, εκτός του  $\lambda$ , οπότε και μεταδίδουν σφάλμα στον υπολογισμό Doppler και κατ' επέκταση στον αζιμουθιακό χρόνο.

Το ζητούμενο είναι να υπολογιστεί το συνολικό σφάλμα που θα έχει η αζιμουθιακή συντεταγμένη του υπό εξέταση σημείου. Δηλαδή θα πρέπει να βρούμε το σφάλμα στον αζιμουθιακό χρόνο. Γνωρίζουμε ότι ο χρόνος αυτός, υπολογίζεται από την εξίσωση Doppler γεγονός που θα παρέπεμπε στο να εφαρμόσουμε το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην εξίσωση. Όμως για λόγους που έχουμε είδη αναλύσει, το παρόν δεν γίνεται. Ακόμα στην προκειμένη περίπτωση δεν έχουμε μόνο μία παράμετρο με ασάφεια, οπότε και ο αντίστοιχος τρόπος αντιμετώπισης δεν γίνεται να εφαρμοστεί. Έτσι το παρόν ζήτημα, προσεγγίζεται με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά με βάση τις θεωρημένες παραμέτρους με ασάφεια, εφαρμόζουμε τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων στην εξίσωση Doppler, με σκοπό τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης που θα έχει η συχνότητα μηδενισμού. Έτσι έχουμε τα ακόλουθα:

$$\sigma_{f_d}^2 = J^T * V_{\dot{x}} * J$$

$$J = \left[ \frac{\partial f_d}{\partial X_s}, \frac{\partial f_d}{\partial Y_s}, \frac{\partial f_d}{\partial Z_s}, \frac{\partial f_d}{\partial V_{x_s}}, \frac{\partial f_d}{\partial V_{y_s}}, \frac{\partial f_d}{\partial V_{z_s}}, \frac{\partial f_d}{\partial X_p}, \frac{\partial f_d}{\partial Y_p}, \frac{\partial f_d}{\partial Z_p}, \frac{\partial f_d}{\partial F_{DC}} \right]$$

$$V_{\dot{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_s}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y_s}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z_s}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_{x_s}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_{y_s}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_{z_s}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_p}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_p}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_p}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{F_{DC}}^2 \end{bmatrix}$$

Με το πέρας του υπολογισμού της τυπικής απόκλισης της συχνότητας Doppler, προχωράμε στον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης του αζιμουθιακού χρόνου. Αυτό πραγματοποιείται με την επίλυση της εξίσωσης με ρίζες την άνω και την κάτω τιμή της τυπικής απόκλισης, που υπολογίστηκε παραπάνω. Ως δεδομένα εισαγωγής χρησιμοποιούνται οι καλύτερες τιμές μεταβλητών που έχουν υπολογιστεί. Για την βελτιστοποίηση της παραπάνω μεθόδου και την διερεύνηση της συμπεριφοράς της μεταβολής του σφάλματος πραγματοποιούμε τα εξής.

Έχοντας σταθερές τις ρίζες της εξίσωσης, υπολογίζουμε αζιμουθιακούς χρόνους με τη μεταβολή των τιμών των παραμέτρων εισαγωγής στο πλαίσιο των ορίων των τυπικών αποκλίσεων τους. Έτσι είμαστε σε θέση να δούμε κατά πόσον το αρχικό σφάλμα που υπολογίσαμε αρχικώς, υπερβαίνεται από τους διάφορους συνδυασμούς και τις αλληλεπιδράσεις που έχουν οι μεταβλητές. Όπως διαφαίνεται από την παραπάνω ανάλυση, το προκύπτον σφάλμα δεν είναι υπολογισμένο με χρήση αυστηρής μαθηματικής μεθόδου, λόγω της φύσης της εξίσωσης, αλλά με μία εμπειρική μεθοδολογία.

Με το πέρας των παραπάνω υπολογισμών, μπορούμε να συνεχίσουμε στον τελικό υπολογισμό για τον προσδιορισμό της ασάφειας της αζιμουθιακής συντεταγμένης. Η γραμμή στην

οποία ανήκει το σημείο δίνεται από τον γνωστό τύπο:  $row_{azimuth} = n \frac{t_{σημείου} - t_{πρώτης\ γραμμής}}{t_{τελευταίας\ γραμμής} - t_{πρώτης\ γραμμής}}$ .

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ασάφεια και στους τρεις συμμετέχοντες χρόνους και ως συνέπεια εφαρμόζουμε πλήρως τον νόμο μετάδοσης. Έχουμε λοιπόν τα ακόλουθα:

$$\sigma_{row_{azimuth}}^2 = \left[ \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}}, \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}}, \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{σημείου}}} \right] * \begin{bmatrix} \sigma_{t_{azimuth}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{t_{azimuth}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{t_{σημείου}}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}} \\ \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}} \\ \frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{σημείου}}} \end{bmatrix}$$

Με τις μερικές παραγώγους ίσες με:

$$\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{start}}} = n \frac{t_{σημείου} - t_{stop}}{(t_{stop} - t_{start})^2}$$

$$\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{stop}}} = n \frac{t_{σημείου} - t_{start}}{(t_{stop} - t_{start})^2}$$

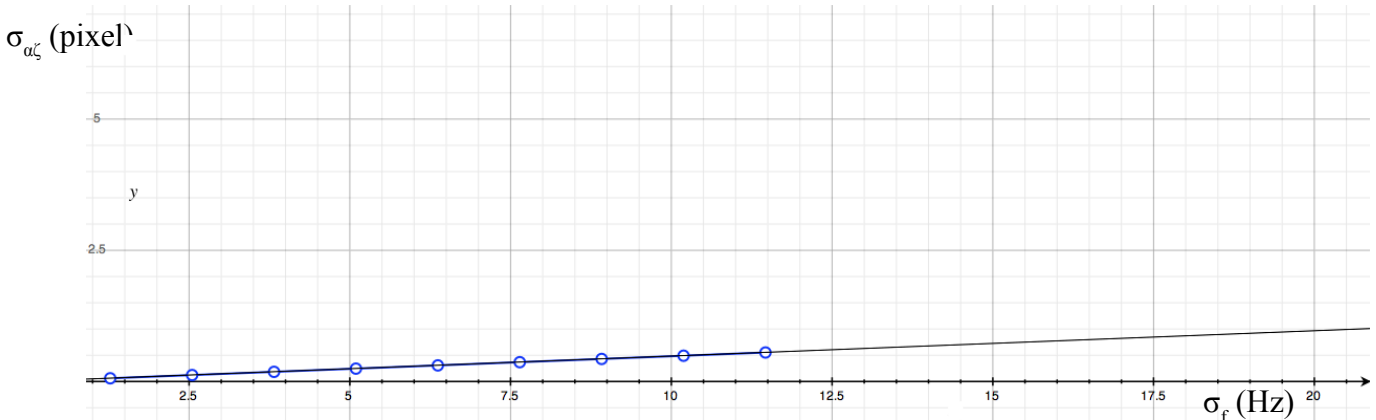
$$\frac{\partial row_{azimuth}}{\partial t_{azimuth_{σημείου}}} = \frac{n}{(t_{stop} - t_{start})^2}$$

Η υπολογιζόμενη τυπική απόκλιση είναι αυτή του εκάστοτε υπό εξέταση σημείου της επιφανείας της γης, με βάση όλες τις παραπάνω παραδοχές. Όμως το τελικό σφάλμα που θα έχει το σημείο δεν είναι το παρόν, αλλά υπάρχει επίδραση και από την αναδόμηση της απεικόνισης. Το τμήμα αυτό αναλύεται παρακάτω, καθώς αποτελεί το τελικό βήμα για την σύνθεση μίας γεωαναφερμένης απεικόνισης.

Τέλος θα αναπτύξουμε ενδεικτικά ένα παράδειγμα, το οποίο αποσκοπεί στην κατανόηση του βαθμού που επηρεάζει η ακρίβεια της επίλυσης της εξίσωσης Doppler. Έτσι θεωρώντας ένα σφάλμα στην επίλυση αυτής της τάξης του  $\pm 1.27\text{Hz}$ , λόγω των αρχικών δεδομένων και ακρίβεια στην καταγραφή του χρόνου πρώτης και τελευταίας γραμμής  $10^{-6}\text{ sec}$  και αριθμό γραμμών 26902, βρίσκουμε το σφάλμα του αζιμουθιακού χρόνου στον οποίο ανήκει το σημείο. Να σημειώσουμε ότι οι χρόνοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι  $t_{start}=9.861731\text{sec}$ ,  $t_{stop}=26.141536\text{sec}$ ,  $t_{σημείου}=11.205169\text{sec}$ . Ειδικότερα βρίσκουμε τους χρόνους που αντιστοιχούν για συχνότητες Doppler:

$f_{d1}=-88.590097$  και  $f_{d2}=-88.590097+1.27$  και στη συνέχεια αφαιρώντας τους δύο προκύπτοντες χρόνους έχουμε το σφάλμα επίλυσης. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε  $t_1=11.205169\text{ sec}$  και  $t_2=11.205774\text{ sec}$ , δηλαδή  $\sigma_{t_{σημείου}}=t_2-t_1 \rightarrow \sigma_{t_{σημείου}}=0.00060515226\text{ sec}$ . Έχοντας υπολογίσει το σφάλμα του σημείου που αντιστοιχεί στο ορισθέν σφάλμα επίλυσης, αντικαθιστούμε και τα υπόλοιπα δεδομένα στην παραπάνω εξίσωση και υπολογίζουμε το σφάλμα που θα έχει η αζιμουθιακή συντεταγμένη. Οπότε έχουμε  $\sigma_{row_{azimuth}}=\pm 0.0614\text{ pixel}$ . Παρατηρούμε ότι για πολύ μικρό σφάλμα επίλυσης έχουμε αρκετό μεταδιδόμενο σφάλμα στην τιμή της αζιμουθιακής συντεταγμένης. Ολοκληρώνοντας το παράδειγμα, παραθέτουμε ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει την μεταβολή στην ακρίβεια των αζιμουθιακών συντεταγμένων συναρτήσει του σφάλματος επίλυσης ή σφάλματος λόγω των αρχικών δεδομένων.





Εικόνα 45: Μεταβολή Σφάλματος Αζιμουθιακής Συντεταγμένης Συναρτήσεως του Σφάλματος Doppler (Hz)

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα σφάλματα αυτά που υπολογίζονται είναι για το επιλεγθέν σημείο. Οι ασάφειες μεταβάλλονται ανάλογα με τη γεωγραφική και εικονική θέση των σημείων. Σκοπός ήταν να δείξουμε το πώς μεταβάλλεται το σφάλμα στις συντεταγμένες ενός τυχαίου σημείου και πώς το υπολογίζουμε. Στην εφαρμογή έχουμε υπολογίσει για κάθε σημείο που γεωαναφέρεται το σφάλμα του, με στόχο να έχουμε το δυνατόν πιο αξιόπιστα δεδομένα εισαγωγής στο πιθανοφανικό μοντέλο.

### 3.4.2.ii Εξίσωση Αποστάσεων Σημείων – Δέκτη

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η εξίσωση είναι πολύ πιο απλή σε σχέση με την παραπάνω. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων – συμμεταβλητοτήτων για τον προσδιορισμό του σφάλματος που θα έχει η πλάγια συντεταγμένη, με βάση τις ασάφειες που προκύπτουν τόσο από την εξίσωση Doppler όσο και από τα υπόλοιπα δεδομένα.

Ως δεδομένα εισαγωγής στον υπολογισμό της απόστασης ενός σημείου (στο οποίο έχει λυθεί το Doppler) με το δέκτη στην κατάλληλη χρονική στιγμή, έχουμε τις συντεταγμένες του σημείου στο έδαφος και τις συντεταγμένες θέσεις του δορυφόρου. Έτσι με νόμο μετάδοσης έχουμε τα ακόλουθα:

$$\sigma_{R_{S-P}}^2 = J^T * V_{\hat{x}} * J$$

$$J = \left[ \frac{\partial R_{S-P}}{\partial X_S}, \frac{\partial R_{S-P}}{\partial Y_S}, \frac{\partial R_{S-P}}{\partial Z_S}, \frac{\partial R_{S-P}}{\partial X_P}, \frac{\partial R_{S-P}}{\partial Y_P}, \frac{\partial R_{S-P}}{\partial Z_P} \right]$$

$$V_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_S}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y_S}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z_S}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_P}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_P}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_P}^2 \end{bmatrix}$$

Με το πέρας αυτών των υπολογισμών υπολογίζουμε το σφάλμα που θα έχει η πλάγια

συντεταγμένη, με όλες πλέον τις παραμέτρους της εξίσωσης να έχουν ασάφεια. Οπότε έχουμε τα εξής:

$$\sigma_{R_s}^2 = \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial X_s}\right)^2 * \sigma_{X_s}^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Y_s}\right)^2 * \sigma_{Y_s}^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Z_s}\right)^2 * \sigma_{Z_s}^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial X_p}\right)^2 * \sigma_{X_p}^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Y_p}\right)^2 * \sigma_{Y_p}^2 + \left(\frac{\partial R_{S-P}}{\partial Z_p}\right)^2 * \sigma_{Z_p}^2$$

Και το σφάλμα που θα έχει η πλάγια συντεταγμένη τελικά θα είναι:

$$\sigma_j^2 = \left(\frac{\partial j}{\partial R_{S-P}}\right)^2 \sigma_{R_{S-P}}^2 + \left(\frac{\partial j}{\partial R_0}\right)^2 \sigma_{R_0}^2 \rightarrow \sigma_j^2 = \left(\frac{1}{range\ pixel\ spacing}\right)^2 \sigma_{R_{S-P}}^2 + \left(-\frac{1}{range\ pixel\ spacing}\right)^2 \sigma_{R_0}^2$$

Η ακρίβεια της επίλυσης της εξίσωσης Doppler δεν είναι άμεσα ορατή, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει. Η ασάφεια του Doppler, όπως έχουμε είδη αναλύσει, μεταδίδει μία ασάφεια στο χρόνο στον οποίο αντιστοιχεί το σημείο. Ο χρόνος αυτός από τα πολυώνυμα παρεμβολής μεταδίδει με την σειρά του ασάφεια στις συντεταγμένες του δορυφόρου, οπότε και η τελευταία μεταδίδεται μέχρι το σφάλμα στις αποστάσεις.

Για τον υπολογισμό της ασάφειας των συντεταγμένων του δορυφόρου χρησιμοποιούμε τα πολυώνυμα παρεμβολής, στα οποία εφαρμόζουμε τον νόμο μετάδοσης. Οι θεωρούμενες παράμετροι που έχουν ασάφειες είναι τόσο οι συντελεστές αυτών όσο και ο χρόνος. Έτσι σχηματίζονται τα ακόλουθα:

$$\sigma_{X_i}^2 = J * V_{\hat{x}} * J^T$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_t}{\partial a_{x3}} & \frac{\partial X_t}{\partial a_{x2}} & \frac{\partial X_t}{\partial a_{x1}} & \frac{\partial X_t}{\partial a_{x0}} & \frac{\partial X_t}{\partial t_{σημείου}} \end{bmatrix}$$

$$V_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{a_{x3}}^2 & \sigma_{ax3,ax2} & \sigma_{ax3,ax1} & \sigma_{ax3,ax0} & 0 \\ \sigma_{ax2,ax3} & \sigma_{a_{x2}}^2 & \sigma_{ax2,ax1} & \sigma_{ax2,ax0} & 0 \\ \sigma_{ax1,ax3} & \sigma_{ax1,ax2} & \sigma_{a_{x1}}^2 & \sigma_{ax1,ax0} & 0 \\ \sigma_{ax0,ax3} & \sigma_{ax0,ax2} & \sigma_{ax0,ax1} & \sigma_{a_{x0}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{t_{σημείου}}^2 \end{bmatrix}$$

Ομοίως σχηματίζονται τα αντίστοιχα συστήματα και για τις υπόλοιπες διαστάσεις. Έχοντας πλέον υπολογίσει τα σφάλματα αυτά, αντικαθιστούμε στα αρχικά συστήματα και υπολογίζουμε την ασάφεια στις αποστάσεις. Να σημειώσουμε ότι αν δεν υπάρχουν πολλά μετρημένα σημεία για τον υπολογισμό της τροχιάς, τότε οι συντελεστές που θα υπολογιστούν από τις ασάφειες των αρχικών μεγεθών, ενδέχεται να μην είναι ιδιαίτερα ακριβείς. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται, όταν δεν επιχειρείται παρεμβολή από δεδομένα για ολόκληρη την τροχιά. Έτσι αγνοώντας την ασάφεια των συντελεστών, υπολογίζουμε το σφάλμα που θα έχει η συντεταγμένη, μόνο με βάση τη χρονική ακρίβεια που έχουμε.

Διερευνώντας περαιτέρω, παραθέτουμε ένα παράδειγμα για την εξέταση της επιρροής των σφαλμάτων της θέσης του δορυφόρου με την ακρίβεια στην εξίσωση Doppler. Έτσι για τα ίδια σφάλματα στη συχνότητα υπολογισμού, με το προηγούμενο παράδειγμα και αρχικές ακρίβειες:  $\sigma_h = \pm 10 \text{ m}$ ,  $\sigma_{x_s} = \pm 1 \text{ m}$ ,  $\sigma_{y_s} = \pm 1 \text{ m}$ ,  $\sigma_{z_s} = \pm 1 \text{ m}$  και  $\sigma_t = 10^{-6} \text{ sec}$ , έχουμε τα ακόλουθα:

Αρχικά υπολογίζονται τα σφάλματα θέσης του δορυφόρου για τη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρεται το σημείο, συναρτήσει διαφόρων χρονικών ακριβειών (από εξίσωση Doppler). Στη συνέχεια με βάση τα σφάλματα στην θέση του δορυφόρου και τις ασάφειες θέσης του σημείου, υπολογίζεται το σφάλμα της μεταξύ τους απόσταση και κατ' επέκταση το σφάλμα που δημιουργείται στην πλάγια συντεταγμένη. Προκύπτει λοιπόν τον ακόλουθο πίνακα σφαλμάτων:

$\sigma_t \text{ sec}$	$\sigma_{fd} \text{ Hz}$	$\sigma_{x_s} \text{ m}$	$\sigma_{y_s} \text{ m}$	$\sigma_{z_s} \text{ m}$	$\sigma_{range} \text{ pixel}$
0.000605	1. /ς2738	2.8946035	0.069457920	3.5250397	1.6621267
0.00121	2.547601	5.7892069	0.27783168	7.0500794	4.1660825
0.001815	3.821401	8.6838101	0.62512124	10.575119	8.9774759
0.00242	5.095202	11.578414	1.1113267	14.100159	15.838355
0.003025	6.369002	14.473017	1.7364479	17.625198	24.695251
0.003631	7.642803	17.372405	2.5018629	21.156064	35.553689
0.004236	8.916603	20.267009	3.4050458	24.681105	48.372954
0.004841	10.190404	23.161611	4.4471436	28.206143	63.167264
0.005446	11.464204	26.056216	5.6281583	31.731184	79.935672

Πίνακας 3: Μεταβολή Πλάγιας Συντεταγμένης συναρτήσει Χρονικού Σφάλματος

Από τον πίνακα είναι φανερό ότι με την γραμμική αύξηση στο σφάλμα της επίλυσης της συχνότητας έχουμε δυσανάλογη αύξηση στο σφάλμα της πλάγιας συντεταγμένης, σε αντίθεση με την διεύθυνση του αζιμουθίου. Από όλα τα παραπάνω φαίνεται ότι η ακρίβεια στην διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων επηρεάζεται πολύ με την μεταβολή διαφόρων παραμέτρων. Αντίθετα η διεύθυνση των αζιμουθίων είναι αρκετά πιο σταθερή στις μεταβολές των σφαλμάτων αυτών, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια γεωαναφοράς κατά μήκος της τροχιάς.

### 3.4.2.iii Μετάδοση Σφαλμάτων από Αλγορίθμους Ορθοαναγωγής

Τα μεταδιδόμενα σφάλματα στις S.A.R. γεωαναφερμένες απεικονίσεις έχουν να κάνουν, όπως και στα υπερφασματικά από το είδος της ορθοαναγωγής που εφαρμόζεται. Έτσι στις δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων (πολυώνυμα, τρόπος λήψης) διακρίνουμε την ίδια ειδοποιό διαφορά με τα υπερφασματικά δεδομένα. Στο φυσικό μοντέλο (τρόπος λήψης η γεωμετρία λήψης) οι ακρίβειες (ή σφάλματα) που υπολογίζονται ταυτίζονται με την ορθότητα του παραγόμενου αποτελέσματος. Αντίθετα στις περίπτωση των πολυωνυμικών μετασχηματισμών, η ακρίβεια που ενδεχομένως υπολογίζεται δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ορθότητα, αφού το αποτέλεσμα που προκύπτει δεν ακολουθεί κάποιο αυστηρό μαθηματικό μοντέλο. Να σημειώσουμε ότι με τον όρο ακρίβεια εννοούμε την σχετική εγγύτητα των μετρήσεων/παρατηρήσεων, ενώ με τον όρο ορθότητα τη σχέση που έχουν οι μετρήσεις σε σχέση με την αληθή τιμή. Για την αποφυγή παρερμηνειών,

απλώς διευκρινίζεται η διαφορά των δύο όρων.

Έτσι τα σφάλματα που προκύπτουν με βάση το φυσικό μοντέλο είναι άμεσα συσχετισμένα με την ορθότητα του αποτελέσματος που παράγεται και ελέγχεται με σημεία ελέγχου (check points). Αντιθέτως τα σφάλματα που υπολογίζονται από αλγορίθμους ορθοαναγωγής με πολυωνυμικούς μετασχηματισμούς και ελέγχονται από σημεία ελέγχου, σχετίζονται περισσότερο με την προσαρμοστικότητα του πολυωνυμικού μετασχηματισμού, στην εκάστοτε επιφάνεια, που χρησιμοποιήθηκε παρά με την καθολική ορθότητα της γεωαναφερμένης εικόνας. Με άλλα λόγια, στο φυσικό μοντέλο υπολογίζουμε το σφάλμα του κάθε σημείου σε ολόκληρη την εικόνα, ενώ στους μετασχηματισμούς έχουμε απλώς μία ένδειξη αυτού από τα σημεία ελέγχου και δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τον τρόπο κατανομής του.

Τα σφάλματα που αναλύθηκαν παραπάνω είναι τα σφάλματα που προκαλούν οι παράμετροι που έχουν εισαχθεί για τη μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας λήψης. Ο κάθε αλγόριθμος, ανάλογα με το εάν προσεγγίζει το αυστηρό μαθηματικό μοντέλο ή όχι, αξιοποιεί τη μετάδοση των σφαλμάτων αυτών για τον τελικό προσδιορισμό της ακρίβειας. Έτσι στους πολυωνυμικούς μετασχηματισμούς δεν τίθεται θέμα μετάδοσης σφάλματος από τις παραμέτρους αυτές, καθώς δεν έχουν υπόσταση στον αλγόριθμο ορθοαναγωγής. Αυτό προφανώς, δεν συνεπάγεται ότι εξαλείφονται τα σφάλματα αυτά, απλώς δεν τα λαμβάνουν υπόψιν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και παρακάμπτον φυσικό μοντέλο του δέκτη. Δηλαδή διαχειρίζονται με άλλον τρόπο το ίδιο το πρόβλημα. Κατά συνέπεια, ο έλεγχος αυτών των αλγορίθμων μπορεί να γίνει μόνο δειγματοληπτικά, σε ορισμένα σημεία.

#### **3.4.2.iv Σφάλματα από τη Πολυωνυμική Μέθοδο Ορθοαναγωγής**

Εδώ εξετάζεται ο δευτέρου βαθμού πολυωνυμικός μετασχηματισμός. Τα σφάλματα που μεταδίδει η μέθοδος αυτή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: i. τα σφάλματα των φωτοσταθερών (GCPs) και των σημείων ελέγχου (CPs) και ii. τα σφάλματα τυχαίων σημείων. Με τον όρο τυχαία σημεία εννοούμε σημεία στην επιφάνεια για τα οποία δεν γνωρίζουμε της συντεταγμένες. Στην πρώτη κατηγορία εάν τα γνωστά σημεία που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν οι συντελεστές του πολυωνύμου είναι περισσότερα από τα ελάχιστα απαιτούμενα, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα συντεταγμένων. Το σφάλμα αυτό αναφέρεται τόσο στην ακρίβεια όσο και στην ορθότητα των συντεταγμένων των συγκεκριμένων σημείων. Παράλληλα με αυτό το κριτήριο φαίνεται και η ποιότητα προσαρμογής της πολυωνυμικής επιφάνειας, όπως αυτή ορίζεται από τα GCPs. Τα σημεία ελέγχου, δεν είναι τίποτε άλλο από γνωστά σημεία, τα οποία όμως δεν συμμετείχαν στον προσδιορισμό των συντελεστών. Το σφάλμα της ορθοαναγωγής που υπολογίζεται από αυτά, είναι δειγματοληπτικό. Δηλαδή η ακρίβεια της διαδικασίας ελέγχεται σε συγκεκριμένα σημεία και προφανώς υπάρχει και ο παράγων χρήστης, ο οποίος εισάγει δικά του συστηματικά και τυχαία σφάλματα από την στόχευση των σημείων. Όπως παρατηρήσαμε και από τα παραδείγματα των παραπάνω κεφαλαίων η διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές. Κατά συνέπεια σε μία πολυωνυμική ορθοαναγωγή είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί η ακρίβεια αυτής της διεύθυνσης, καθώς θα πρέπει να στοχευτούν γνωστά σημεία σε ένα μεγάλο εύρος υψομέτρων.

Τέλος τα ορθά σφάλματα των τυχαίων σημείων δεν γίνεται να προσδιοριστούν, αφού το σφάλμα που υπολογίζεται από τον νόμο μετάδοσης αναφέρεται στην ασάφεια που μεταδίδει η συνάρτηση του πολυωνύμου. Η ακρίβεια αυτή ανάλογα την μορφή του εδάφους μπορεί να μην σχετίζεται καθόλου με τις αληθείς συντεταγμένες, αλλά να είναι απλώς ένα μαθηματικό σφάλμα, προερχόμενο από την πολυωνυμική συνάρτηση.

Ενδεικτικό παράδειγμα μη ορθότητας είναι τα σημεία σε πολύ διαφορετικά υψόμετρα από

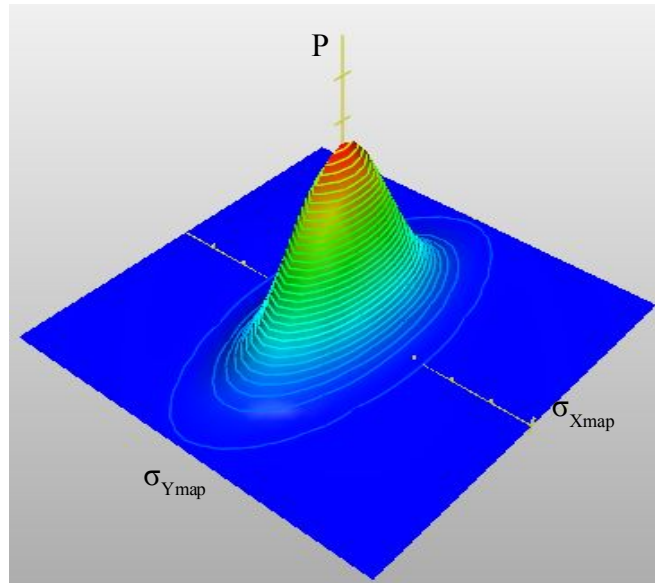
αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών. Συνήθως τα σημεία που στοχεύονται είναι σημεία χαμηλού υψομέτρου, λόγω των μικρότερων παραμορφώσεων της εικόνας. Έτσι σημεία σε βουνά, τα οποία διακρίνονται από αρκετά μεγαλύτερο υψόμετρο, θα έχουν πολύ μεγάλα σφάλματα (ορθότητας), καθώς το πολυώνυμο έχει προσαρμοστεί στο να μετασχηματίζει μία επιφάνεια σε μικρότερα και μικρότερου εύρους υψόμετρα. Όμως εάν δούμε το σφάλμα που μεταδίδεται από την πολυωνυμική συνάρτηση, θα φανεί ότι το ίδιο σημείο έχει πολύ μικρότερο σφάλμα. Η διαφορά αυτή θα φανεί παράκατω, στην αξιολόγηση, όπου σημεία βουνών απέχουν δεκάδες μέτρα την πραγματική τους θέση, ενώ παράλληλα των σφάλμα της γεωαναφοράς φαίνεται μικρό.

### **3.4.2.ν Σφάλματα από Έμμεση Διαδικασία Ορθοαναγωγής**

Η παρούσα γεωαναφορά είναι η μαθηματικοποίηση της γεωμετρίας που διέπει την απεικόνιση. Ως αποτέλεσμα τα σφάλματα που υπολογίζονται από το νόμο μετάδοσης, αποτελούν σφάλματα ορθότητας και ακρίβεια ταυτόχρονα. Αυτό συμβαίνει επειδή λαμβάνονται υπόψιν, όλοι εκείνοι (ή όσοι είναι εφικτοί) οι παράγοντες που συμμετέχουν στη διαδικασία ορθοαναγωγής από ένα σημείο του εδάφους στο αντίστοιχο πάνω στην απεικόνιση. Φυσικά εάν δεν ληφθεί κάποιος παράγοντας υπόψιν, μεταδίδονται συστηματικά σφάλματα στην γεωαναφερμένη εικόνα. Η ακρίβεια της απεικόνισης σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, στην οποία δεν ήταν εφικτό. Έτσι η ποιότητα της γεωαναφερμένης εικόνας ελέγχεται και μαθηματικά, όπως έχουμε αναλύσει εκτενώς, αλλά και με στόχευση γνωστών σημείων.

Το σφάλμα που υπολογίζεται από τη μετάδοση των αρχικών ασαφειών, εάν έχουν ληφθεί όλοι οι παράγοντες, είναι η αντικειμενικότερη προσέγγιση για τον υπολογισμό της κατανομής των σφαλμάτων στην έκταση της απεικόνισης. Η στόχευση σημείων ελέγχου αποτελεί μία επικουρική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να βεβαιώσει αν υπάρχει κάποιος παράγοντας που δεν έχει ληφθεί υπόψιν. Να σημειώσουμε ότι, στοχεύοντας σημεία ενδέχεται να υπάρχουν σφάλματα από τον χρήστη τα οποία δεν γίνεται να προσδιορίσουμε. Για το λόγο αυτό, η επικουρική αυτή μέθοδος θα πρέπει να χρησιμοποιείται υπό συνθήκες και με φιδό.

Τελικά το σφάλμα που προκύπτει είναι στις δύο διευθύνσεις αξιμούθιου, πλάγιας απόστασης και έχει την μορφή έλλειψης. Η έλλειψη αυτή είναι έντονη, εξαιτίας του σχήματος των εικονοστοιχείων και της διαφοράς σε ακρίβεια των δύο διευθύνσεων. Για ένα τυχαίο σημείο με γεωδαιτικές συντεταγμένες  $X_{map}$ ,  $Y_{map}$  μπορούμε να έχουμε βάση των σφαλμάτων την κατανομή της πιθανότητας το εξεταζόμενο σημείο να έχει ένα εύρος συντεταγμένων. Η θεωρούμενη κατανομή είναι η κανονική, οπότε και σχηματίζεται το ακόλουθο τρισδιάστατο γράφημα:



Εικόνα 46: Τρισδιάστατη Έλλειψη Σφάλματος Τυχαίου Σημείου

Το διάγραμμα αυτό έχει στους δύο οριζόντιους άξονες τις τιμές των συντεταγμένων του υπό εξέταση σημείου και κάθετος άξονας είναι η πιθανότητα το σημείο να έχει το αντίστοιχο ζεύγος γεωδαιτικών συντεταγμένων. Η θεώρηση των υπολογιζόμενων συντεταγμένων ως στατιστικό μέγεθος, όπως θα φανεί παρακάτω είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό της ακρίβειας συνταύτισης των δύο πηγών δεδομένων.

### 3.4.3 Επίδραση Διαδικασίας Αναδόμησης

Εκτός από τα σφάλματα που εισάγονται κατά τη διαδικασία της ορθοαναγωγής, είτε στην περίπτωση της πολυωνυμικής ή στην περίπτωση του φυσικού μοντέλου, υπάρχει και το σφάλμα της αναδόμησης της εικόνας. Πρόκειται για το ίδιο σφάλμα που περιγράφηκε στην περίπτωση των υπερφασματικών δεδομένων. Η διαφορά στην περίπτωση των συνθετικού ανοίγματος RADAR δεδομένων είναι στην διεύθυνση και στο μέτρο των σφαλμάτων αυτών. Ως γνωστόν, η βέλτιστη ακρίβεια που μπορεί να έχει οποιαδήποτε γεωαναφερμένη εικόνα, για αναδόμηση εγγύτερου γείτονα, είναι αυτή του μισού εικονοστοιχείου. Στην περίπτωση των S.A.R. έχουμε διαφορετικό μέγεθος εικονοστοιχείων στις δύο διευθύνσεις. Έτσι το όριο της ακρίβειας που θα έχει η απεικόνιση, είναι στη διεύθυνση των αζιμουθίων το μισό του μεγέθους του εικονοστοιχείου στη διεύθυνση αυτή. Αντίστοιχα στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων το όριο αυτό θα είναι το μισό του μεγέθους των εικονοστοιχείων στη διεύθυνση αυτή.

Η αναδόμηση της εικόνας προσδίδει στο υπάρχον σφάλμα, τόση ασάφεια όση είναι η στρογγυλοποίηση (αναλυτικότερη τεκμηρίωση στο κεφάλαιο “Σφάλματα από Αναδόμηση Γεωαναφερμένης Εικόνας”) που πραγματοποιείται στο κάθε σημείο. Λόγω της φύσης της αναδόμησης, άλλα σημεία του εδάφους ορθοανάγονται με μεγαλύτερη και άλλα με μικρότερη ακρίβεια. Ειδικότερα, υπάρχει το ενδεχόμενο ένα σημείο να υπολογιστεί ότι έχει συντεταγμένες στην εικόνα ακέραιες, οπότε η αναδόμηση δεν θα έχει επίδραση για το παρόν. Βέβαια κάτι τέτοιο είναι σχεδόν απίθανο συμβαίνει ακόμα και για ένα σημείο, οπότε και δεν λαμβάνουμε υπόψιν ένα τέτοιο ενδεχόμενο.

## **4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

## 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 4.1 Ορισμός του Προβλήματος

Όπως έχει ήδη καταστεί σαφές από την εισαγωγή της εργασίας, η συμπροσαρμογή των δύο ειδών δεδομένων δεν αρκεί. Θα πρέπει να βρεθεί μία μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία τα συνδυασμένα δεδομένα που θα επιλέγονται για περαιτέρω επεξεργασία, να έχουν τη βέλτιστη ακρίβεια. Έτσι αντίστοιχοι στόχοι που έχουν ανιχνευθεί με αντίστοιχους αλγορίθμους επεξεργασίας υπερφασματικών απεικονίσεων, θα αντιστοιχιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια σε συγκεκριμένες SAR εδαφοψηφίδες, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα διάνυσμα δεδομένων με μεγάλη χωρική ακρίβεια. Με άλλα λόγια, για το τελικό διάνυσμα δεδομένων που συντίθεται, θα πρέπει να είναι γνωστή η πιθανότητα σύνθεσής του ως ενιαίο διάνυσμα. Δηλαδή ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης την πιθανότητα του τελικού διανύσματος να αναφέρεται στην ίδια επιφάνεια του εδάφους.

Τα δύο είδη απεικονίσεων έχουν συνήθως αρκετά μεγάλες διαφορές στα μεγέθη των εδαφοψηφίδων. Για να μην χαθεί πληροφορία από τις μικρότερες εδαφοψηφίδες, ζητείται να βρεθεί για δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, η πιθανότητα που έχουν οι μικρές εδαφοψηφίδες να ανήκουν εξ ολοκλήρου στην αντίστοιχη μεγαλύτερη. Ο όρος “εξ ολοκλήρου” είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την συνέχιση της μεθοδολογίας. Ολόκληρη η επιφάνεια της μικρής εδαφοψηφίδας θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια της μεγάλης εδαφοψηφίδας.

### 4.2 Τρόπος Προσέγγισης Προβλήματος

Το παραπάνω πρόβλημα προσεγγίζεται με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης σφαλμάτων [Αγάτζα και Μπαλοδήμου, 2007][Αγάτζα και Μπαλοδήμου, 2009]. Από τις ορθοαναγωγές των δύο ειδών δεδομένων, εκτός από τις θέσεις των σημείων των απεικονίσεων στο γεωδαιτικό σύστημα, υπολογίζεται και η αβεβαιότητα που έχουν στις δύο διαστάσεις. Οι ορθοαναγμένες εδαφοψηφίδες όντας τετράγωνες επιφάνειες μπορούν να περιγραφούν από την θέση του κέντρου βάρους τους και την μία διάστασή τους. Προφανώς είναι προσανατολισμένες παράλληλα στο χαρτογραφικό σύστημα στο οποίο αναφέρονται, άρα δεν τίθεται θέμα διεύθυνσης. Το κέντρο βάρους της τετράγωνης αυτής επιφάνειας, είναι η μέση του τετραγώνου.

Έτσι οι εδαφοψηφίδες μίας ορθοαναγμένης απεικόνισης περιγράφονται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες ( $X_{map}$ ,  $Y_{map}$ ) του κέντρου τους, το μέγεθός τους και τις τυπικές τους αποκλίσεις ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ). Στη συνέχεια ορίζουμε τις μεταβλητές που συνθέτουν το πρόβλημα. Έστω ότι η μεγαλύτερη εδαφοψηφίδα (μικρότερη ανάλυση) είναι αυτή των υπερφασματικών δεδομένων. Από τις ορθοαναγωγές των δύο απεικονίσεων και για δύο τυχαία εικονοστοιχεία, ένα από τα υπερφασματικά δεδομένα και ένα από τα SAR, έχουμε τα ακόλουθα:

Το εικονοστοιχείο της Ορθοαναγμένης Υπερφασματικής Απεικόνισης περιγράφεται ως εξής:



$$\sigma_{X_{map}^{HSI}}, \hat{X}_{map}^{HSI}, d_x^{HSI}$$

$$\sigma_{Y_{map}^{HSI}}, \hat{Y}_{map}^{HSI}, d_y^{HSI}$$

με  $\sigma_{X_{map}^{HSI}}, \sigma_{Y_{map}^{HSI}}, X_{map}^{HSI}, Y_{map}^{HSI}, d_x^{HSI}, d_y^{HSI}$  οι τυπικές αποκλίσεις των συντεταγμένων του κέντρου, οι συντεταγμένες του κέντρου και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στις δύο διευθύνσεις αντίστοιχα.

Ομοίως το εικονοστοιχείο της Ορθοανηγμένης SAR Απεικόνισης περιγράφεται ως εξής:

$$\sigma_{X_{map}^{SAR}}, \hat{X}_{map}^{SAR}, d_x^{SAR}$$

$$\sigma_{Y_{map}^{SAR}}, \hat{Y}_{map}^{SAR}, d_y^{SAR}$$

με  $\sigma_{X_{map}^{SAR}}, \sigma_{Y_{map}^{SAR}}, X_{map}^{SAR}, Y_{map}^{SAR}, d_x^{SAR}, d_y^{SAR}$  οι τυπικές αποκλίσεις, οι συντεταγμένες του κέντρου και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στις δύο διευθύνσεις αντίστοιχα.

Τα σφάλματα που εισάγονται στο στατιστικό μοντέλο, μπορεί να προέρχονται είτε από τα φυσικά μοντέλα ορθοαναγωγών ή από τα σημεία ελέγχου. Στην πρώτη περίπτωση τα σφάλματα  $\sigma_x, \sigma_y$  έχουν την διεύθυνση των γραμμών και των στηλών της αρχικής εικόνας (λόγω έμμεσης ορθοαναγωγής). Κατά συνέπεια υπάρχει μία στροφή της έλλειψης σφάλματος ως προς το χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς. Έτσι θα πρέπει να γίνει αλλαγή των αξόνων της έλλειψης, ώστε οι βασικοί άξονες που περιγράφουν την έλλειψη να είναι παράλληλοι στο χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς. Αφού διορθωθούν οι άξονες της έλλειψης σφάλματος, τα σφάλματα αυτά εισάγονται στην υπόλοιπη διαδικασία.

Αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση δεν χρειάζεται καμία μετατροπή. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν υπολογίζεται το σφάλμα θέσης ενός σημείου ελέγχου, οι διαφορές συντεταγμένων που υπολογίζονται είναι στην γεωαναφερμένη απεικόνιση. Άρα σφάλμα που θα υπολογιστούν είναι εξ ορισμού παράλληλα στο χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς.

#### 4.2.1 Απαιτούμενες Δεσμεύσεις

Η απαίτηση από τον ορισμό του προβλήματος είναι να υπολογιστεί για δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης η πιθανότητα η μικρή εδαφοψηφίδα να ανήκει εξ ολοκλήρου στη μεγαλύτερη. Έτσι στην προκειμένη περίπτωση ζητείται να βρεθεί η πιθανότητα μία εδαφοψηφίδα των SAR απεικονίσεων να βρίσκεται μέσα στην εδαφοψηφίδα των υπαρφασματικών δεδομένων. Αρχικά ορίζονται οι ακμές των εδαφοψηφίδων των δύο απεικονίσεων (Εικόνα 47):

Ακμές Υπερφασματικής Εδαφοψηφίδας:  $(X_1^{HSI}, Y_1^{HSI}), (X_2^{HSI}, Y_2^{HSI}), (X_3^{HSI}, Y_3^{HSI}), (X_4^{HSI}, Y_4^{HSI})$   
 Ακμές SAR Εδαφοψηφίδας:  $(X_1^{SAR}, Y_1^{SAR}), (X_2^{SAR}, Y_2^{SAR}), (X_3^{SAR}, Y_3^{SAR}), (X_4^{SAR}, Y_4^{SAR})$

Για να ισχύει η προαναφερθείσα απαίτηση θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη γεωμετρική δέσμευση στις συντεταγμένες των εδαφοψηφίδων:

Οι τιμές των συντεταγμένων των ακμών της εδαφοψηφίδας της SAR απεικόνισης θα πρέπει να βρίσκονται ενδιάμεσα των τιμών των συντεταγμένων των ακμών της εδαφοψηφίδας της

Υπερφασματικής απεικόνισης, για την οποία εξετάζεται η χωρική σχέση. Η δέσμευση αυτή με μαθηματικούς όρους γίνεται ως εξής:

Για τις X συντεταγμένες:

$$\begin{aligned}
 & X_1^{HSI} \text{ ή } X_4^{HSI} \leq X_1^{SAR} \leq X_2^{HSI} \text{ ή } X_3^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & X_1^{HSI} \text{ ή } X_4^{HSI} \leq X_2^{SAR} \leq X_2^{HSI} \text{ ή } X_3^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & X_1^{HSI} \text{ ή } X_4^{HSI} \leq X_3^{SAR} \leq X_2^{HSI} \text{ ή } X_3^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & X_1^{HSI} \text{ ή } X_4^{HSI} \leq X_4^{SAR} \leq X_2^{HSI} \text{ ή } X_3^{HSI}
 \end{aligned}$$

Για τις Y συντεταγμένες:

$$\begin{aligned}
 & Y_3^{HSI} \text{ ή } Y_4^{HSI} \leq Y_1^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \text{ ή } Y_2^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & Y_3^{HSI} \text{ ή } Y_4^{HSI} \leq Y_2^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \text{ ή } Y_2^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & Y_3^{HSI} \text{ ή } Y_4^{HSI} \leq Y_3^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \text{ ή } Y_2^{HSI} \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{και} \\
 & Y_3^{HSI} \text{ ή } Y_4^{HSI} \leq Y_4^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \text{ ή } Y_2^{HSI}
 \end{aligned}$$

Οι σχέσεις αυτές θα πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα και για τις δύο διαστάσεις. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 47 οι σχέσεις αυτές μειώνονται στις ακόλουθες 4:

$$X_1^{HSI} \leq X_1^{SAR} \leq X_2^{HSI} \quad (32)$$

και

$$X_1^{HSI} \leq X_3^{SAR} \leq X_2^{HSI} \quad (33)$$

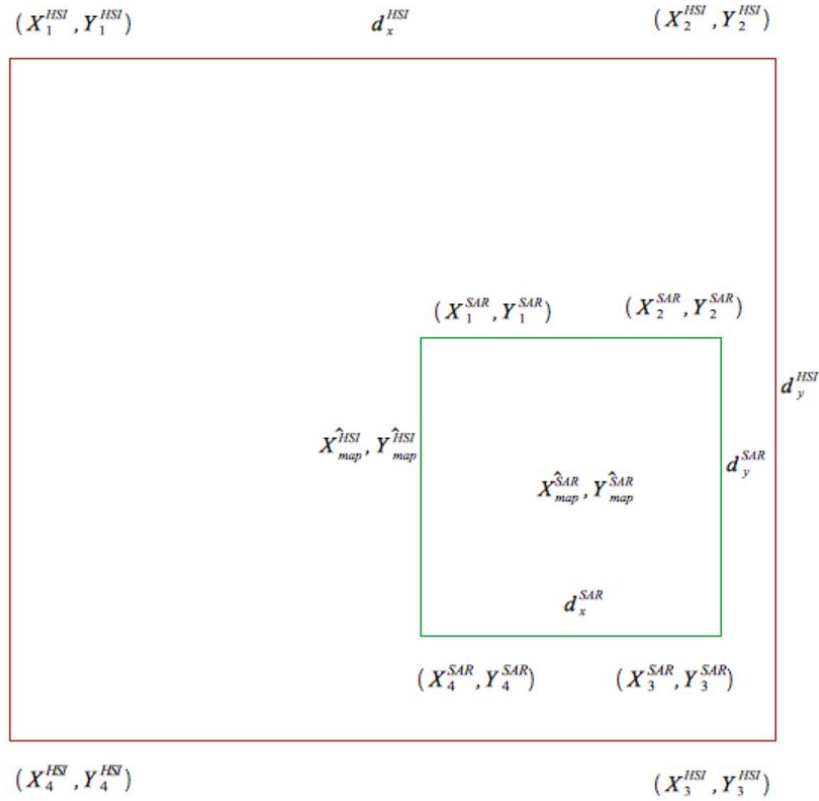
και

$$Y_4^{HSI} \leq Y_1^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \quad (34)$$

και

$$Y_4^{HSI} \leq Y_3^{SAR} \leq Y_1^{HSI} \quad (35)$$

αφού  $X_1^{HSI} = X_4^{HSI}$  ,  $X_2^{HSI} = X_3^{HSI}$  ,  $Y_1^{HSI} = Y_2^{HSI}$  ,  $Y_3^{HSI} = Y_4^{HSI}$  και αντιστοίχως τα ίδια για την SAR απεικόνιση.



Εικόνα 47: Χωρική Σχέση Υπερφασματικής και SAR Εδαφοψηφίδας

Στις σχέσεις 32-35 γίνεται αντικατάσταση των συντεταγμένων των μέσων των εδαφοψηφίδων και του μεγέθους τους, οπότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 -\frac{d_x^{HSI}}{2} + \frac{d_x^{SAR}}{2} &\leq X_{map}^{\hat{SAR}} - X_{map}^{\hat{HSI}} \leq \frac{d_x^{HSI}}{2} + \frac{d_x^{SAR}}{2} \\
 -\frac{d_x^{HSI}}{2} - \frac{d_x^{SAR}}{2} &\leq X_{map}^{\hat{SAR}} - X_{map}^{\hat{HSI}} \leq \frac{d_x^{HSI}}{2} - \frac{d_x^{SAR}}{2} \\
 -\frac{d_y^{HSI}}{2} - \frac{d_y^{SAR}}{2} &\leq Y_{map}^{\hat{SAR}} - Y_{map}^{\hat{HSI}} \leq \frac{d_y^{HSI}}{2} - \frac{d_y^{SAR}}{2} \\
 -\frac{d_y^{HSI}}{2} + \frac{d_y^{SAR}}{2} &\leq Y_{map}^{\hat{SAR}} - Y_{map}^{\hat{HSI}} \leq \frac{d_y^{HSI}}{2} + \frac{d_y^{SAR}}{2}
 \end{aligned} \tag{36}$$

Ορίζονται  $\hat{\Delta X} = X_{map}^{\hat{SAR}} - X_{map}^{\hat{HSI}}$  και  $\hat{\Delta Y} = Y_{map}^{\hat{SAR}} - Y_{map}^{\hat{HSI}}$  οι διαφορές των συντεταγμένων των κέντρων των δύο εδαφοψηφίδων. Από τις διαδικασίες της ορθοαναγωγής για κάθε μία απεικόνιση, υπολογίζεται το σφάλμα των συντεταγμένων των κέντρων των εδαφοψηφίδων  $\sigma_{X_{map}}^{SAR}$ ,  $\sigma_{Y_{map}}^{SAR}$  και  $\sigma_{X_{map}}^{HSI}$ ,  $\sigma_{Y_{map}}^{HSI}$ . Με βάση το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των διαφορών των συντεταγμένων.

$$\sigma_{\hat{\Delta}X} = \sqrt{(\sigma_{X_{map}^{SAR}}^2 + \sigma_{X_{map}^{HSI}}^2)}$$

$$\sigma_{\hat{\Delta}Y} = \sqrt{(\sigma_{Y_{map}^{SAR}}^2 + \sigma_{Y_{map}^{HSI}}^2)}$$

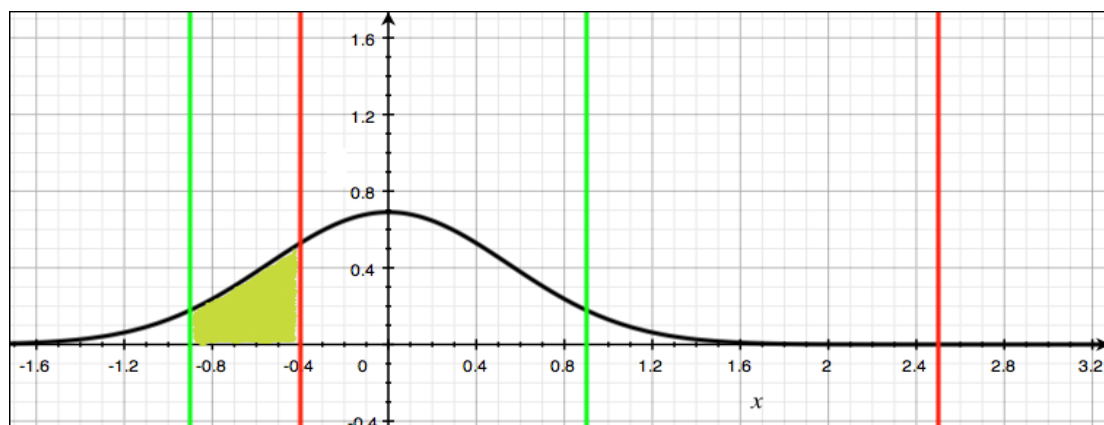
Για τις προσδιορισμένες συντεταγμένες γίνεται η υπόθεση ότι είναι μεταβλητές οι οποίες ακολουθούν την κανονική κατανομή [Αγάτζα και Μπαλοδήμου, 2007] [Κούτρας, 2002]. Έτσι με βάση τις ιδιότητες της στατιστικής [Παπαϊωάννου, 1997] οι διαφορές αυτών των μεταβλητών θα περιγράφονται και αυτές από την κανονική κατανομή. Με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης οι διαφορές αυτές θα κυμαίνονται στο διάστημα:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}X - \kappa * \sigma_{\hat{\Delta}X} \leq \Delta X \leq \hat{\Delta}X + \kappa * \sigma_{\hat{\Delta}X} \\ \hat{\Delta}Y - \kappa * \sigma_{\hat{\Delta}Y} \leq \Delta Y \leq \hat{\Delta}Y + \kappa * \sigma_{\hat{\Delta}Y} \end{aligned} \quad (37)$$

με  $\kappa$  η κατάλληλη σταθερά που εξαρτάται από το επίπεδο εμπιστοσύνης που έχει οριστεί. Έτσι έχουμε το διάστημα στο οποίο θα πρέπει να βρίσκονται οι διαφορές, ώστε να ανήκει η SAR εδαφοψηφίδα στην Υπερφασματική (εξ. 36) και το διάστημα στο οποίο κυμαίνονται οι διαφορές λόγω των υπάρχοντων σφαλμάτων (εξ. 37). Διακρίνονται τρεις βασικές περιπτώσεις:

1. το διάστημα διακύμανσης των μεταβλητών  $\Delta X$  και  $\Delta Y$  δεν τέμνει τα όρια του διαστήματος των δεσμεύσεων και βρίσκεται εντός αυτού,
2. το διάστημα διακύμανσης των μεταβλητών  $\Delta X$  και  $\Delta Y$  τέμνει τουλάχιστον ένα από τα όρια του διαστήματος των δεσμεύσεων στην μία ή/και την άλλη διάσταση,
3. το διάστημα διακύμανσης των διαφορών δεν τέμνει τα όρια των δεσμεύσεων και βρίσκεται εκτός αυτών.

Άμεσα γίνεται αντιληπτό ότι στην πρώτη περίπτωση η SAR εδαφοψηφίδα ανήκει εξ ολοκλήρου στην Υπερφασματική με πιθανότητα 100% για το συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Αντίθετα στη τρίτη η SAR εδαφοψηφίδα έχει 0% πιθανότητα. Τέλος στη δεύτερη περίπτωση η πιθανότητα αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με την σχέση που έχουν τα όρια των διαστημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω. Για να γίνει περισσότερο αντιληπτό αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι το κάτω όριο της διακύμανσης της  $\Delta X$  μεταβλητής είναι μικρότερο από το κάτω επιτρεπτό όριο των δεσμεύσεων.



Εικόνα 48: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Μεταβλητής  $\Delta X$  και Όρια Διαστημάτων

Στην εικόνα 48 απεικονίζονται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διαφοράς  $\Delta X$  (μαύρη γραμμή), τα όρια της διακύμανσης της μεταβλητής με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης

(πράσινη γραμμή) και τα επιτρεπτά όρια από τις δεσμεύσεις (κόκκινη γραμμή). Το σκιασμένο τμήμα του διαγράμματος δείχνει την πιθανότητα που έχει η μεταβλητή  $\Delta X$  να μην είναι μέσα στο επιτρεπτό διάστημα [Αγάτζα και Μπαλοδήμου, 2007].

Έτσι υπάρχουν 4 δυνατοί συνδυασμοί, αναφορικά με τη σχέση των ορίων των διαστημάτων. με βάση αυτούς τους συνδυασμούς υπολογίζεται κάθε φορά η πιθανότητα η μεταβλητή  $\Delta X$  ή  $\Delta Y$  να ανήκει στο επιτρεπτό όριο. Δηλαδή υπολογίζεται η πιθανότητα η SAR εδαφοψηφίδα να ανήκει εξ ολοκλήρου σε αυτή της Υπερφασματικής.

- Αν  $-\frac{d_x^{HSI}}{2} - \frac{d_x^{SAR}}{2} \geq \hat{\Delta X} - \kappa * \sigma_{\Delta X}$ , η πιθανότητα (P) η SAR εδαφοψηφίδα να ανήκει στην Υπερφασματική είναι  $P = 1 - \Phi_z$ , με  $z = [(-\frac{d_x^{HSI}}{2} - \frac{d_x^{SAR}}{2}) - \hat{\Delta X}] / \sigma_{\Delta X}$
- Αν  $\frac{d_x^{HSI}}{2} + \frac{d_x^{SAR}}{2} \geq \hat{\Delta X} + \kappa * \sigma_{\Delta X}$ , η πιθανότητα (P) η SAR εδαφοψηφίδα να ανήκει στην Υπερφασματική είναι  $P = 1 - \Phi_z$ , με  $z = [(\frac{d_x^{HSI}}{2} + \frac{d_x^{SAR}}{2}) - \hat{\Delta X}] / \sigma_{\Delta X}$
- Αν  $-\frac{d_y^{HSI}}{2} - \frac{d_y^{SAR}}{2} \geq \hat{\Delta Y} - \kappa * \sigma_{\Delta Y}$ , η πιθανότητα (P) η SAR εδαφοψηφίδα να ανήκει στην Υπερφασματική είναι  $P = 1 - \Phi_z$ , με  $z = [(-\frac{d_y^{HSI}}{2} - \frac{d_y^{SAR}}{2}) - \hat{\Delta Y}] / \sigma_{\Delta Y}$
- Αν  $\frac{d_y^{HSI}}{2} + \frac{d_y^{SAR}}{2} \geq \hat{\Delta Y} + \kappa * \sigma_{\Delta Y}$ , η πιθανότητα (P) η SAR εδαφοψηφίδα να ανήκει στην Υπερφασματική είναι  $P = 1 - \Phi_z$ , με  $z = [(\frac{d_y^{HSI}}{2} + \frac{d_y^{SAR}}{2}) - \hat{\Delta Y}] / \sigma_{\Delta Y}$

με  $z$  η τυποποιημένη μεταβλητή και  $\Phi_z$  η τιμή της πιθανότητας η μεταβλητή  $x$  να είναι μικρότερη ή ίση της  $z$ . Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που και οι δύο διαφορές ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ) ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, τότε ως ζητούμενη πιθανότητα λαμβάνεται η μικρότερη από τις δύο, για λόγους ασφαλείας. Έτσι με το πέρας αυτής της διαδικασίας μπορούν να επιλεγθούν τα βέλτιστα δεδομένα για περαιτέρω ανάλυση.

## **5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ**

## 5. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

### 5.1 Περιγραφή των Διαθέσιμων Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα δεδομένα προς συμπροσαρμογή (τηλεπισκοπικές απεικονίσεις) και τα βοηθητικά δεδομένα.

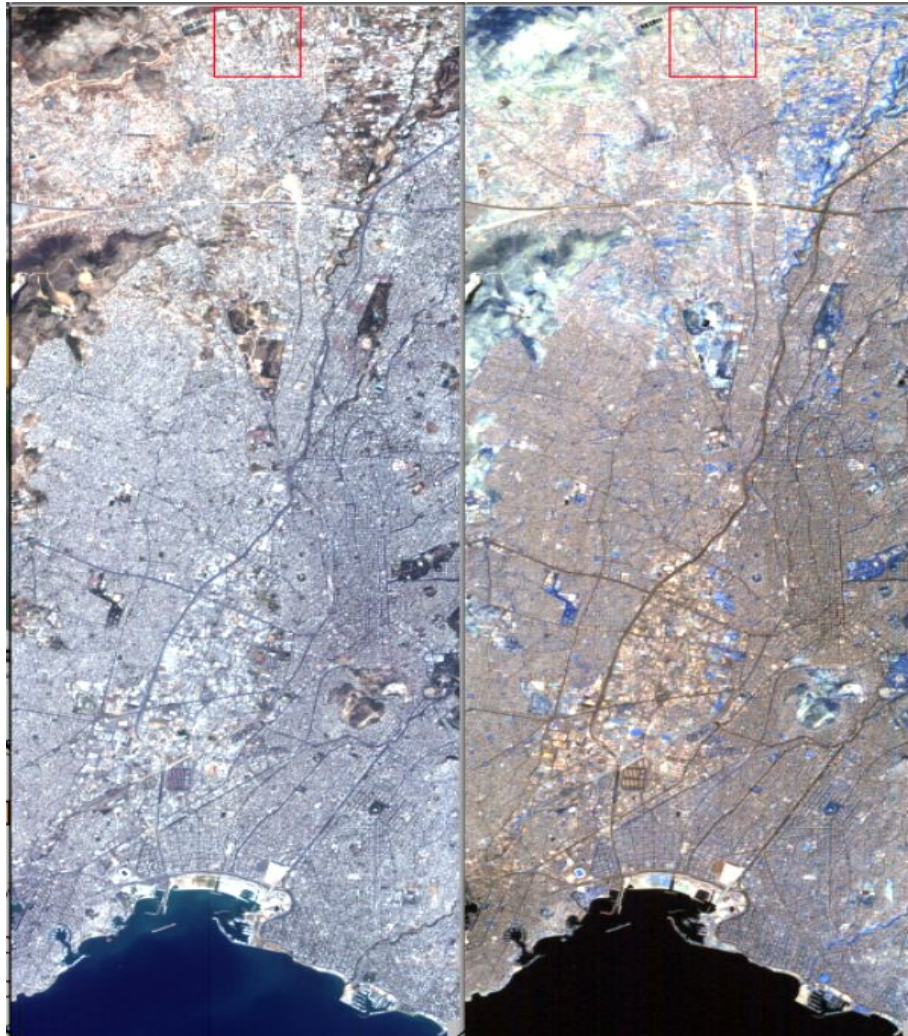
Η πρώτη κατηγορία δεδομένων απαρτίζεται από τις απεικονίσεις των τριών δορυφόρων: EO-1 (Hyperion), ENVISAT (ASAR) και ALOS (PALSAR). Η περιοχή μελέτης είναι ο Νομός Αττικής. Οι απεικονίσεις έχουν ημερομηνία λήψης: 21/08/2004, 15/05/2004 και 10/05/2007 αντίστοιχα.

Δορυφόρος/Δέκτης	Τύπος Προϊόντος	Χωρική Δειγματοληψία (GSD) (m)	Αριθμός Καναλιών	Πόλωση
EO-1/Hyperion	Level 1_A	30X30	242	-
ENVISAT/ASAR	ASA_IMS_1P	7.8X4.0	1	H/H
ALOS/PALSAR	Level 1.1	9.4X3.6	4	H/H, V/V, H/V, V/H

Πίνακας 4: Βασικά Χαρακτηριστικά Δ.Ψ.Τ.Α.

Η απεικόνιση του Hyperion, όπως φαίνεται από τον τύπο προϊόντος, έχει δεχτεί μόνο ραδιομετρική διόρθωση [EO-1 User Guide, 2003]. Αυτό συνεπάγεται ότι οι απεικονίσεις των δύο δεκτών δεν έχουν συμπροσαρμοστεί. Αντιστοίχως, οι απεικονίσεις των ENVISAT και ALOS έχουν διορθωθεί μόνο ραδιομετρικά και δεν έχουν υποστεί καμία γεωμετρική διόρθωση.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται τμήμα της αρχικής απεικόνισης του Hyperion στα πραγματικά χρώματα του οπτικού και του υπερύθρου:

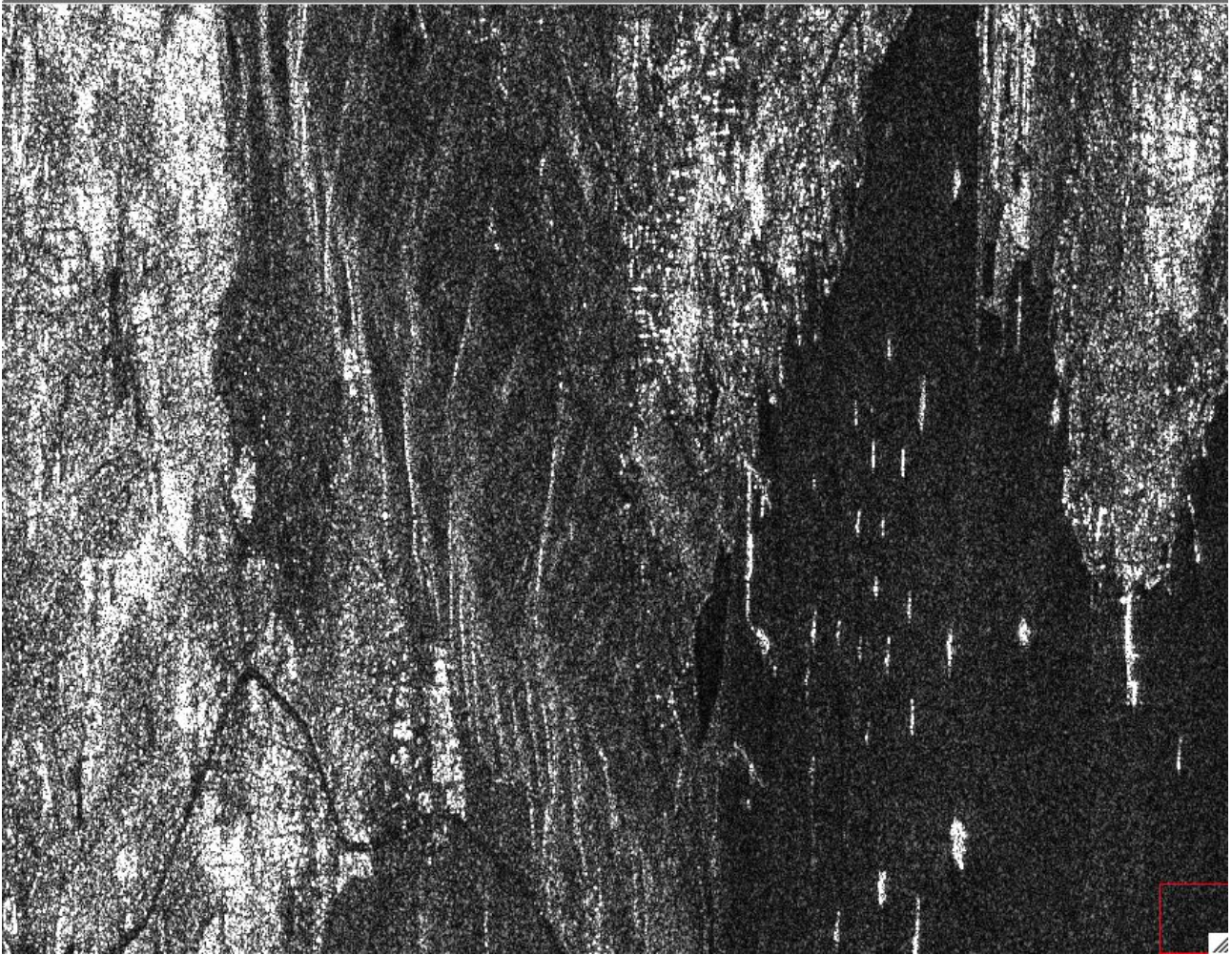


Εικόνα 49: Τμήμα Αρχικής Απεικόνισης του Hyperion  
R: 641 G:580 B:509 nm                      R:2194 G:1649 B:1074 nm

Τα κανάλια με οποία απεικονίζονται τα δεδομένα είναι: στην αριστερή με τον συνδυασμό Κόκκινο: 641 nm, Πράσινο: 580 nm, Μπλε: 509 nm και στη δεξιά με τον συνδυασμό: Κόκκινο: 2194 nm, Πράσινο: 1649 nm, Μπλε: 1074 nm. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι οι βέλτιστοι για φωτοερμηνευτικούς σκοπούς [EO-1 User Guide, 2003]. Οι απεικονίσεις του Hyperion δίνονται σε μορφή HDF (Hierarchic Data Format) αρχείων. Η μορφή αυτή είναι άμεσα αναγνώσιμη από το ENVI 4.5, οπότε και δεν χρειάζεται κάποια προ-επεξεργασία στα δεδομένα. Ενδεικτικά να αναφερθεί ότι όλες οι απεικονίσεις ανεξαρτήτου τυποποίησης, αποθηκεύονται τελικά σε μορφή tiff/geotiff, καθώς αποτελούν την πλέον αναγνώσιμη τυποποίηση από όλα τα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας.

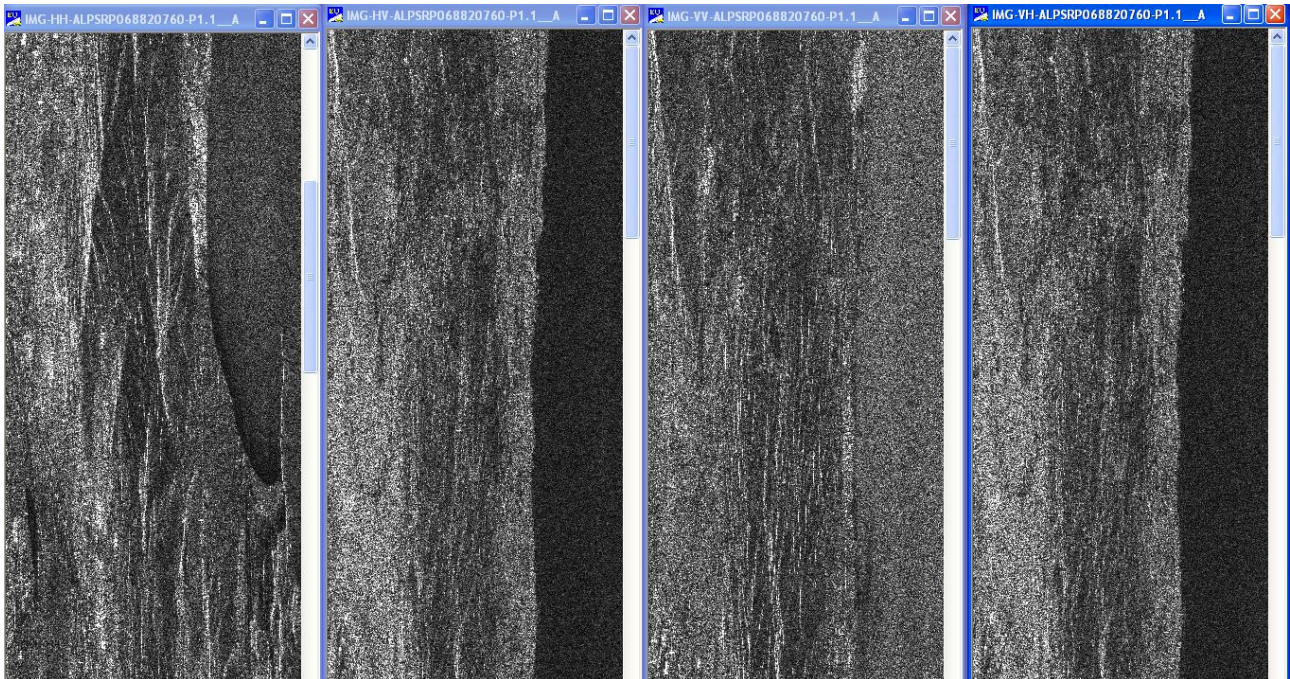
Ακολούθως παρουσιάζονται και τμήματα των απεικονίσεων των δορυφόρων ENVISAT και ALOS, χωρίς καμία γεωμετρική διόρθωση. Οι απεικονίσεις θα απεικονιστούν με το μέτρο της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας, διότι με αυτό μπορούν να διακριθούν τα αντικείμενα του εδάφους.





Εικόνα 50: Τμήμα ENVISAT-ASAR Απεικόνισης (H/H)

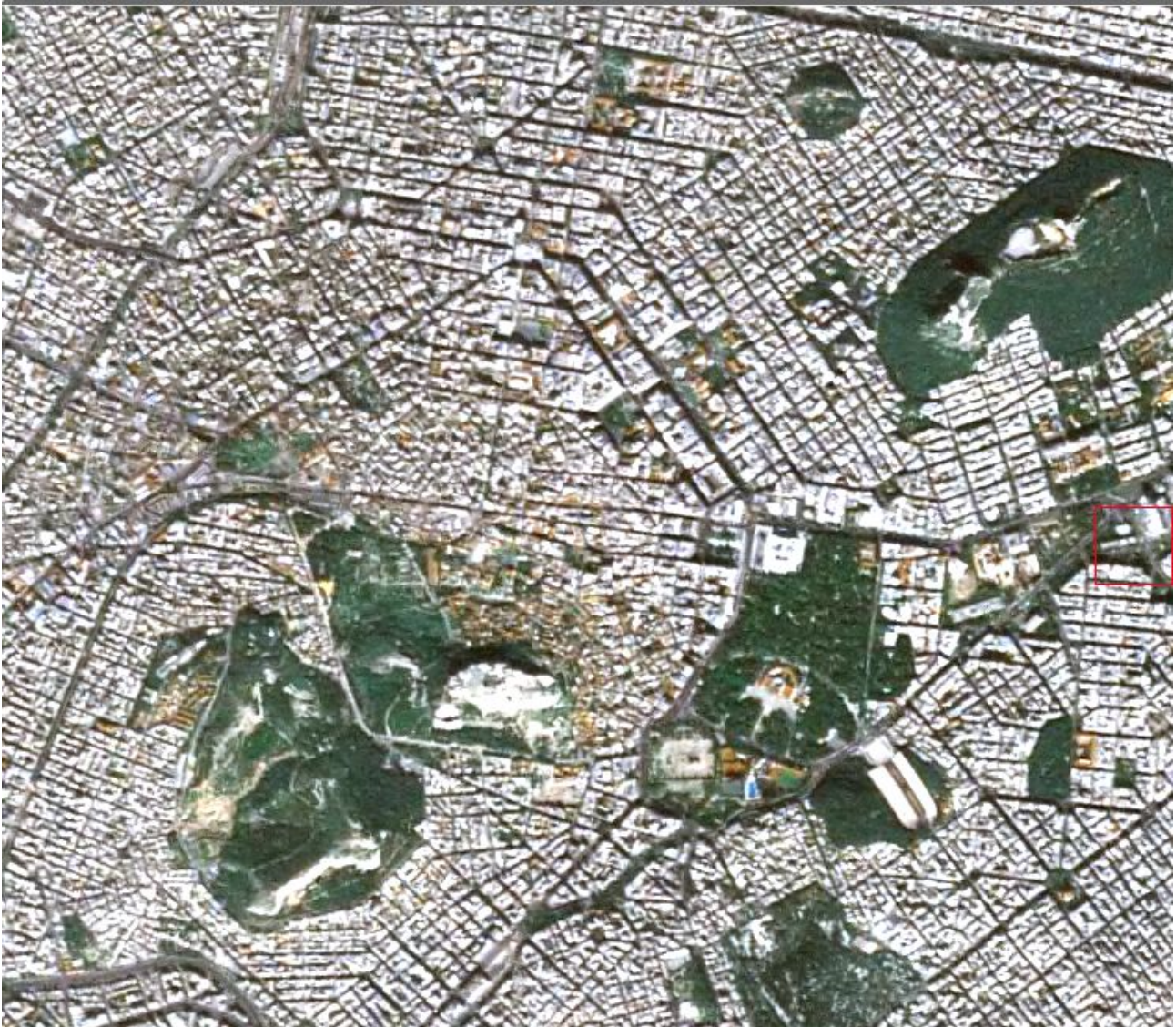
Οι απεικονίσεις του δορυφόρου ENVISAT βρίσκονται σε format .N1. Αυτό το format είναι η επίσημη τυποποίηση με την οποία παραδίδονται οι απεικονίσεις από την ESA. Η τυποποίηση αυτή, αν και θεωρητικά υποστηρίζεται από το ENVI 4.5, το τελευταίο δεν αναπαράγει σωστά τα δεδομένα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα BEAM και EnviView. Πρόκειται για ελεύθερα λογισμικά, τα οποία παρέχονται από την ESA για επεξεργασία των δεδομένων του ENVISAT. Από το EnviView γίνεται να αναπαραχθούν όλες οι επικεφαλίδες της απεικόνισης. Το BEAM εκτός του ότι διαβάζει τις επικεφαλίδες αυτές αναπαράγει και τα ίδια τα δεδομένα. Έτσι από το τελευταίο μετατρέπεται η τυποποίηση της απεικόνισης σε tiff, για να μπορεί στη συνέχεια να εισαχθεί στο ENVI 4.5.



Εικόνα 51: Τμήμα ALOS-PALSAR Απεικόνισης σε H/H, H/V, V/V, V/H

Όπως και για τον δέκτη ENVISAT, έτσι και εδώ, τα δεδομένα δεν υποστηρίζονται από το λογισμικό ENVI 4.5. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ALOSViewer για την αναπαραγωγή των δεδομένων και στη συνέχεια για εξαγωγή τους σε tiff τυποποίηση. Στην εικόνα 51 φαίνεται το ίδιο τμήμα της απεικόνισης και για τις 4 μορφές πόλωσης που διαθέτει ο δορυφόρος.

Η δεύτερη κατηγορία δεδομένων απαρτίζεται από όλα εκείνα τα δεδομένα που συμβάλουν στις διαδικασίες των γεωαναφορών και ορθοαναγωγών. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μία ορθοανηγμένη SPOT απεικόνιση με χωρική ανάλυση 5 μέτρα του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης. Η απεικόνιση αυτή χρησιμοποιήθηκε για συλλογή φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου. Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν δύο Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους, το ένα απεικονίζει το σύνολο του Νομού Αττικής και το δεύτερο ένα τμήμα του βουνού της Πεντέλης. Το πρώτο ΨΜΕ είναι από τον δορυφόρο ASTER, έχει απόλυτη υψομετρική ακρίβεια 7 μέτρα και χωρική ανάλυση 30 μέτρα. Αυτό το ASTER GDEM διατίθεται ελεύθερο από κατάλληλη ιστοσελίδα στο διαδίκτυο από το METI της NASA. Το δεύτερο ΨΜΕ προέρχεται από ψηφιοποιημένους χάρτες 1/5.000, του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης. Η απόλυτη υψομετρική ακρίβεια του δεύτερου θεωρείται ότι είναι αυτή που προέρχεται από ψηφιοποίηση χάρτου κλίμακας 1/5.000, δηλαδή ένα μέτρο. Τα συγκεκριμένα ΨΜΕ είναι μοντέλα κανονικού κανάβου, δηλαδή έχουν σταθερό βήμα ίσο με 30 και 5 μέτρα αντίστοιχα. Προφανώς είναι αναμενόμενο να υπάρχουν σφάλματα, τα οποία προέρχονται από πολλούς παράγοντες (π.χ. σφάλματα ισοϋψών).



Εικόνα 52: Τμήμα Ορθοαναηγμένης Απεικόνισης SPOT σε Έγχρωμο Σύνθετο

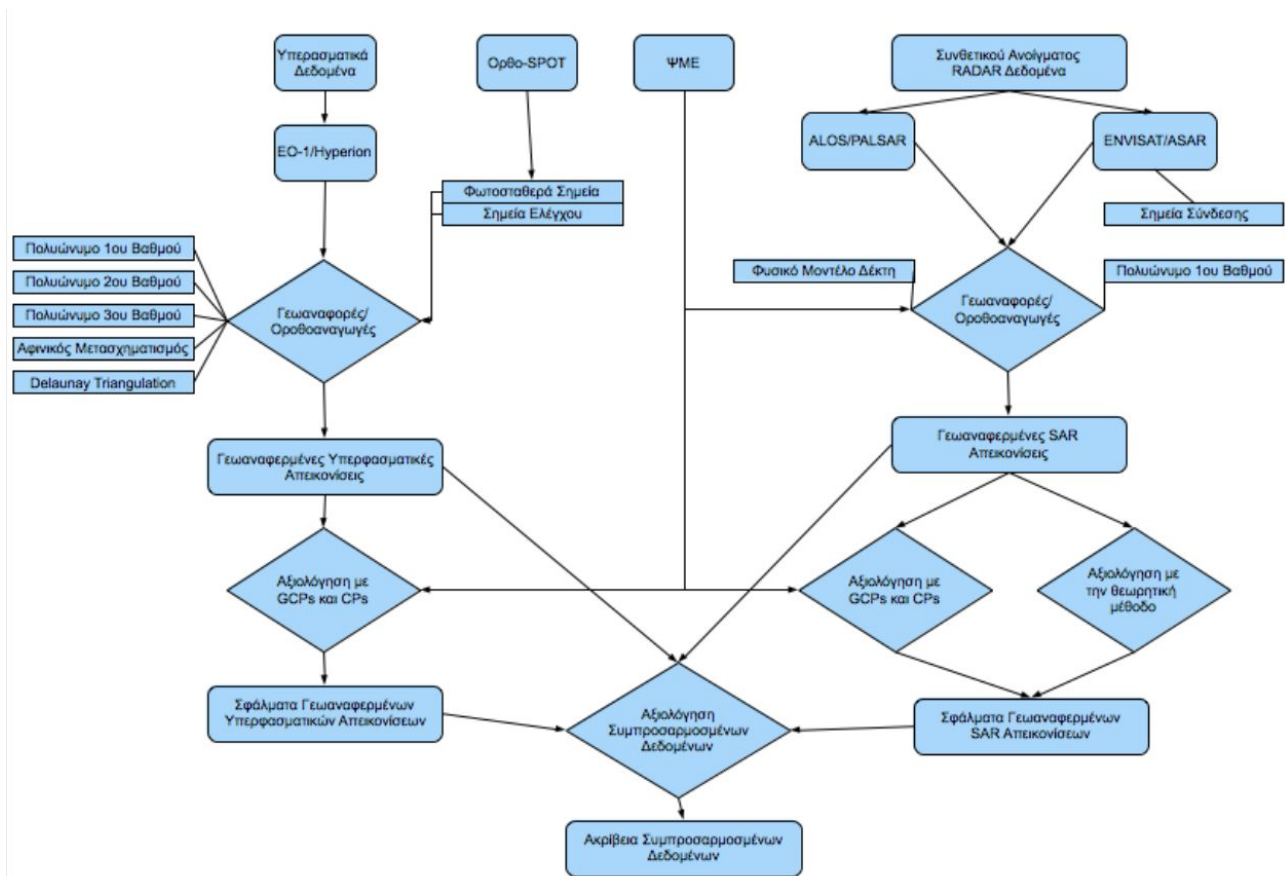
Για την επίτευξη ορθοαναγωγής στο δέκτη ENVISAT χρησιμοποιήθηκαν μεταξύ άλλων δύο σύνολα δεδομένων τροχιάς. Η διαφορά τους έγκειται στην ποιότητα μέτρησης των θέσεων και ταχυτήτων του δορυφόρου. Το πρώτο είναι τα παρεχόμενα στοιχεία τροχιάς από τα μετά-δεδομένα του αρχείου και έχουν ακρίβεια που κυμαίνεται από 2 έως 10 μέτρα. Το δεύτερο σύνολο στοιχείων τροχιάς λήφθηκε ξεχωριστά από την απεικόνιση. Πρόκειται για δεδομένα ακριβούς τροχιάς (<1 μέτρο) από την εταιρία DEOS, τα οποία είναι διαθέσιμα 3 μήνες μετά την λήψη της απεικόνισης. Ο δορυφόρος ALOS έχει στις επικεφαλίδες των αρχείων του τα ακριβέστερα στοιχεία τροχιάς. Τα δεδομένα αυτά έχουν ακρίβεια προσδιορισμού θέσης του δορυφόρου 1 μέτρο και ταχύτητας 0.02 μέτρα/δευτερόλεπτο.

Τέλος το υψόμετρο του γεωειδούς λήφθηκε από κατάλληλο χάρτη [Γ. Βέης et. al., 2007], για την επίτευξη ορθοαναγωγής των SAR απεικονίσεων. Από το συγκεκριμένο χαρτογραφικό υπόβαθρο παρατηρήθηκε ότι για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής, το υψόμετρο του γεωειδούς δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μία μέση τιμή υψομέτρου της περιοχής ( $N=39.0$  m).

## 5.2 Διαδικασίες Εφαρμογής και Αξιολόγησης Ορθοαναγωγών

### 5.2.1 Περιγραφή Μεθοδολογιών

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας περιγράφονται αρχικά οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για την παραγωγή γεωαναφερμένων απεικονίσεων, καθώς και της αξιολόγησης τους. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος ελέγχου της ποιότητας των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων, με χρήση του κατάλληλου στατιστικού μοντέλου. Η περιγραφή χωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα. Το πρώτο είναι η περιγραφή των διαδικασιών που εφαρμόζονται στα υπερφασματικά δεδομένα (γεωαναφορές, ορθοαναγωγές και αξιολογήσεις). Στο δεύτερο τμήμα περιγράφεται η προσέγγιση για την ορθοαναγωγή και αξιολόγηση των SAR απεικονίσεων. Τέλος στο τρίτο τμήμα περιγράφεται η διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων, όπως αυτή υπαγορεύεται από το στατιστικό μοντέλο. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των διαδικασιών που έλαβαν χώρα.



Εικόνα 53: Διάγραμμα Ροής

### 5.2.2 Υπερφασματικά Δεδομένα Hyperion

### 5.2.2.i Διαδικασίες Γεωαναφορών και Ορθοαναγωγών

Η παραγωγή της ορθοαναηγμένης απεικόνισης του δέκτη Hyperion, έγινε με εφαρμογή των προσεγγιστικών μεθόδων (πολύωνυμα). Ειδικότερα αξιοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι που διαθέτει το πρόγραμμα ENVI 4.5, δηλαδή πολύωνυμα 1<sup>ου</sup>, 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> βαθμού, αφινικό μετασχηματισμό και τον Delaunay Triangulation. Όλες αυτές οι μέθοδοι χρειάζονται φωτοσταθερά σημεία, με σκοπό των υπολογισμό των αντίστοιχων σε κάθε περίπτωση συντελεστών. Η συλλογή των σημείων αυτών έγινε από το χαρτογραφικό υπόβαθρο της ορθο-SPOT σε Ορθή Μερκατορική Προβολή (Universal Transverse Mercator ή UTM) στην ζώνη 34 του Βόρειου ημισφαιρίου. Τα φωτοσταθερά που συλλέχθηκαν χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, μία των 18 και μία των 30 σημείων. Έτσι εφαρμόστηκαν για κάθε αλγόριθμο δύο διαδικασίες γεωαναφοράς – ορθοαναγωγής, μία με την πρώτη ομάδα και μία με την δεύτερη. Η δεύτερη ομάδα είναι ουσιαστικά τα σημεία της πρώτης μαζί με 12 νέα. Αυτή η διπλή διαδικασία αποσκοπεί στην εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού κατανομής φωτοσταθερών πάνω στην εικόνα, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης. Με αυτό το τρόπο εξετάζουμε το πως προσαρμόζεται ο κάθε αλγόριθμος με την πύκνωση σημείων. Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να σημειωθεί ότι το επίπεδο επεξεργασίας που έχει η απεικόνιση από την Υπηρεσία NASA απαιτεί τη συμπροσαρμογή των καναλιών των δύο επιμέρους δεκτών. Επιλέχθηκε μέθοδος που προτείνει η κατασκευάστρια υπηρεσία. Η επιλογή αυτής της μεθοδολογίας έγινε διότι η συμπροσαρμογή των δύο τύπων δεδομένων επιτυγχάνεται με ακρίβεια 0.2 του pixel. Αντίθετα εάν γεωαναφέρονταν ο κάθε δέκτης χωριστά, τότε το σφάλμα στη συμπροσαρμογή θα ήταν αισθητά μεγαλύτερο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην ιδανική περίπτωση που ορθοαναχθούν οι απεικονίσεις και των δύο δεκτών με ακρίβεια 0.5 pixel (γεγονός εξαιρετικά σπάνιο), η ακρίβεια συμπροσαρμογής θα είναι προφανώς μεγαλύτερη από 0.2 pixel.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι εφαρμοσμένες διαδικασίες γεωαναφοράς και ορθοαναγωγής μαζί με τις παραγόμενες απεικονίσεις:

Αριθμός Γεωαναφερμένης Απεικόνισης	Εφαρμοσμένος Αλγόριθμος	Ομάδα Φωτοσταθερών Σημείων
1AH	Αφινικός Μετασχηματισμός	A
2AH	Πολύωνυμο 1 <sup>ου</sup> βαθμού	A
3AH	Πολύωνυμο 2 <sup>ου</sup> βαθμού	A
4AH	Πολύωνυμο 3 <sup>ου</sup> βαθμού	A
5AH	Delaunay Triangulation	A
1BH	Αφινικός Μετασχηματισμός	B
2BH	Πολύωνυμο 1 <sup>ου</sup> βαθμού	B
3BH	Πολύωνυμο 2 <sup>ου</sup> βαθμού	B
4BH	Πολύωνυμο 3 <sup>ου</sup> βαθμού	B
5BH	Delaunay Triangulation	B

Πίνακας 5: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις του Hyperion

### 5.2.2.ii Διαδικασίες Αξιολόγησης Υπερφασματικών Γεωαναφερμένων Απεικονίσεων

Στη συνέχεια οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις αξιολογούνται ως προς την χωρικής τους ακρίβεια. Δηλαδή ελέγχεται η ακρίβεια με την οποία τα εικονοστοιχεία των γεωαναφερμένων απεικονίσεων, τοποθετούνται στο χαρτογραφικό σύστημα αναφοράς. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για το σκοπό αυτό, στηρίζεται στα φωτοσταθερά σημεία και στα σημεία ελέγχου. Να σημειωθεί ότι τα σημεία ελέγχου, όπως και τα φωτοσταθερά, συλλέχθηκαν από την ορθο-SPOT. Πιο συγκεκριμένα για κάθε μία γεωαναφερμένη απεικόνιση εφαρμόζουμε δύο αξιολογήσεις. Η πρώτη αξιολόγηση που λαμβάνει χώρα είναι ο υπολογισμός των διαφορών συντεταγμένων των GCPs με βάση τις τιμές από την ορθο-SPOT και την αντίστοιχη γεωαναφερμένη απεικόνιση. Αρχικά υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) λαμβάνοντας υπόψη όλα τα GCPs. Σε δεύτερο στάδιο τα φωτοσταθερά αυτά χωρίζονται σε δύο επιμέρους ομάδες με κριτήριο το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται. Ειδικότερα οι ομάδες αυτές είναι από 0 έως 150 μέτρα υψόμετρο και από 151 μέτρα και άνω. Ο σκοπός αυτού του διαχωρισμού είναι να διερευνηθεί κατά πόσον μεταβάλλεται το σφάλμα των συντεταγμένων με την μεταβολή των υψομέτρων.

Η δεύτερη αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με στόχευση σημείων ελέγχου (CPs) στην γεωαναφερμένη απεικόνιση. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με την παραπάνω. Δηλαδή υπολογίζεται σε πρώτο στάδιο το RMS όλων των σημείων ελέγχου και στη συνέχεια γίνεται ομαδοποίηση αυτών με βάση τα υψόμετρα στα οποία βρίσκονται. Όλα τα υψόμετρα των σημείων λαμβάνονται από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ολόκληρης της Αττικής (ASTER GDEM). Λόγω του σχετικά πολύ μικρού οριζοντιογραφικού βήματος του ΨΜΕ, δεν χρειάζεται να γίνει παρεμβολή υψομέτρων στις θέσεις των σημείων, αλλά αρκεί η τοποθέτηση της πλησιέστερης τιμής. Θα πρέπει να τονιστεί επειδή ο Hyperion έχει χωρική ανάλυση 30 μέτρα, θα ήταν περιττό να γίνεται παρεμβολή υψομέτρων, αφού υπάρχουν υψόμετρα ανά 30 μέτρα.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή δεν κατέστη εφικτό η απεικόνιση να ορθοαναχθεί με το φυσικό μοντέλο του δέκτη, η θεωρητική ανάλυση των σφαλμάτων δεν γίνεται να εφαρμοστεί. Για το λόγο αυτό οι ακρίβειες στις γεωαναφερμένες υπερφασματικές απεικονίσεις θα είναι μόνο από τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου.

### 5.2.3 Συνθετικού Ανοίγματος RADAR Δεδομένα ENVISAT και ALOS

#### 5.2.3.i Διαδικασίες Γεωαναφορών και Ορθοαναγωγών

Στην περίπτωση των SAR δεδομένων η παραγωγή γεωαναφερμένων απεικονίσεων επικεντρώθηκε στην μέθοδο του φυσικού μοντέλου του δέκτη. Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου ο έμμεσος τρόπος ορθοαναγωγής SAR απεικονίσεων σε γλώσσα προγραμματισμού IDL 7.0. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της πολυπλοκότητας και του ιδιαίτερα μεγάλου υπολογιστικού φόρτου αυτής της διαδικασίας, ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μία ολόκληρη σκηνή είναι περίπου 6-7 ημέρες! Βέβαια μία ολόκληρη σκηνή του δορυφόρου αποτελείται περίπου από 135 εκατομμύρια εικονοστοιχεία, σε αντίθεση με μία ολόκληρη σκηνή του Hyperion, η οποία μόλις που υπερβαίνει τα 800.000 εικονοστοιχεία. Για μία έκταση όσο η Αττική απαιτείται περίπου 0.5 με 1 ημέρα.

Αυτός ο αλγόριθμος ουσιαστικά είναι ίδιος από πλευράς προσέγγισης και για τους δύο SAR δέκτες (εξαιτίας της κοινής τους γεωμετρίας). Η μόνη διαφορά που έχουν βρίσκεται στην επίλυση της εξίσωσης Doppler. Ο ALOS όντας ευθυγραμμισμένος με το κέντρο μάζας της Γης, δημιουργεί μία στροφή στο αποτόπωμα της κεραίας σε σχέση με την κάθετη στην τροχιά διεύθυνση. Αυτό δημιουργεί μία μετατόπιση στην συχνότητα Doppler κατά  $F_{DC}$ , της οποίας η τιμή λαμβάνεται από

τις επικεφαλίδες της απεικόνισης. Κατά συνέπεια η εξίσωση Doppler δεν λύνεται στην ρίζα 0, όπως γίνεται με τον ENVISAT, αλλά στην τιμή  $F_{DC}$ .

Οι παράμετροι που απαιτούνται για την ορθοαναγωγή των SAR δεδομένων με το φυσικό μοντέλο του δέκτη, είναι πολυάριθμοι. Για το λόγο αυτό θα παρατεθούν σε ένα πίνακα συγκεντρωτικά.

Αριθμός Παραμέτρου	Όνομα Παραμέτρου	Σύμβολο/Μονάδες
1	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	-/-
2	Βήμα Κανάβου ΨΜΕ	$b_1$ /meters
3	Όρια Περιοχής Ορθοαναγωγής	ULc, LRc/metes
4	Πρώτη Θέση Δορυφόρου ( $t_1$ )	$X_1, Y_1, Z_1$ /meters
5	Ταχύτητα Δορυφόρου στην $t_1$	$V_{X_1}, V_{Y_1}, V_{Z_1}$ / meters/sec
6	Δεύτερη Θέση Δορυφόρου ( $t_2$ )	$X_2, Y_2, Z_2$ /meters
7	Ταχύτητα Δορυφόρου στην $t_2$	$V_{X_2}, V_{Y_2}, V_{Z_2}$ / meters/sec
8	Πρώτη Χρονική Στιγμή Μέτρησης Θέσης και Ταχύτητας	$t_1$ /sec
9	Δεύτερη Χρονική Στιγμή Μέτρησης Θέσης και Ταχύτητας	$t_2$ /sec
10	Χρονική Στιγμή Πρώτης Γραμμής Δεδομένων	$t_{start}$ /sec
11	Χρονική Στιγμή Τελευταίας Γραμμής Δεδομένων	$t_{stop}$ /sec
12	Μήκος Κύματος Εκπομπής Δέκτη	$\lambda$ / meters
13	Βήμα Κανάβου Ορθοανηγμένης Απεικόνισης	$b_2$ /meters
14	GSD στην διεύθυνση του αζιμουθίου	$\Delta x$ /meters
15	GSD στην διεύθυνση των πλαγιών αποστάσεων	$\Delta y$ /meters
16	Απόσταση Δορυφόρου - Εδάφους Πρώτου Σημείου Απεικόνισης	$R_0$ /meters
17	Μετατόπιση Συχνότητας Doppler	$F_{DC}$ /Hz
18	Χαρτογραφικό Σύστημα Προβολής	-/-
19	Γεωκεντρικό Σύστημα Αναφοράς	-/-
20	Παράμετροι Ελλειψοειδούς εκ Περιστροφής	a,b/meters
21	Υψόμετρο του Γεωεισοειδούς	N/meters

Πίνακας 6: Παράμετροι Ορθοαναγωγής SAR Απεικονίσεων

Όπως γίνεται φανερό θα πρέπει να προσδιοριστούν όλοι αυτοί οι παράμετροι για να μπορέσει να γίνει η ορθοαναγωγή μίας SAR απεικόνισης. Να σημειωθεί ότι οι παράμετροι αυτοί ισχύουν μόνο όταν η κεραία του συστήματος “φωτίζει” πλάγια και κάθετα στην τροχιά. Σε άλλη περίπτωση ο αλγόριθμος θα πρέπει να προσαρμοστεί στην εκάστοτε γεωμετρία που δημιουργείται.

Ο δορυφόρος ENVISAT ορθοανήχθη με τον αλγόριθμο του φυσικού μοντέλου 4 φορές.

Κάθε φορά μεταβάλλουμε δύο πολύ σημαντικές παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η ορθοαναγωγή έγινε κρατώντας την τιμή του υψομέτρου του γεωειδούς στα 39 μέτρα, ενώ τα στοιχεία τροχιάς ήταν μέσης ή υψηλής ακρίβειας. Στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε η ορθοαναγωγή με την τιμή του υψομέτρου του γεωειδούς στα 0 μέτρα, ενώ τα στοιχεία τροχιάς ήταν μέσης ή υψηλής ακρίβειας. Σκοπός αυτών των συνδυασμών είναι να διερευνηθεί αρχικά η επιρροή που έχουν οι ακρίβειες των στοιχείων της τροχιάς στο τελικό αποτέλεσμα. Με την προσθήκη ή όχι του N, ουσιαστικά εισάγουμε στον αλγόριθμο τα γεωμετρικά ή τα ορθομετρικά υψόμετρα της περιοχής αντίστοιχα. Θεωρητικά τα υψόμετρα που είναι απαραίτητα για την σωστή ορθοαναγωγή είναι τα γεωμετρικά. Έτσι με του παραπάνω συνδυασμούς διερευνάται η μεταβολή της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης.

Η απεικόνιση ENVISAT ορθοανήχθηκε, εκτός από το φυσικό μοντέλο, και με ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας έγινε στο πρόγραμμα BEAM της ESA. Οι ακριβείς διαδικασίες που έλαβαν χώρα δεν είναι πλήρως γνωστές. Το μόνο που γνωστοποιείται από το εγχειρίδιο του προγράμματος είναι ότι εφαρμόζεται αυτού του είδους ο αλγόριθμος. Οι ENVISAT απεικονίσεις διαθέτουν στις επικεφαλίδες των αρχείων μία βάση δεδομένων με συντεταγμένες σημείων σύνδεσης και τις αντίστοιχες αποστάσεις. Με βάση αυτά το πρόγραμμα BEAM ορθοανάγει την απεικόνιση. Η προέλευση των σημείων σύνδεσης δεν διευκρινίζεται από κάποιο εγχειρίδιο της ESA. Έγινε προσπάθεια να βρεθεί η προέλευση των σημείων αυτών, δηλαδή αν είναι μετρημένα από το σύστημα του δέκτη ή είναι a posteriori υπολογισμένα από τα στοιχεία τροχιάς.

Εάν οι αποστάσεις των σημείων είναι μετρημένες, τότε αυτές αναφέρονται σε αποστάσεις Επιφανείας Αναγλύφου – Θέση Δορυφόρου. Δηλαδή εάν έχει καταγραφεί ο πραγματικός χρόνος διαδρομής τους σήματος από το δορυφόρο στην επιφάνεια, τότε θα είναι αναμενόμενο το εξής: οι αντίστοιχες συντεταγμένες των σημείων ελέγχου (που δίνονται στις επικεφαλίδες) με την προσθήκη των υψομέτρων και τα ακριβή στοιχεία τροχιάς δίνουν πολύ κοντινές τιμές αποστάσεων με αυτές των επικεφαλίδων. Επιλέχθηκαν 11 σημεία ελέγχου που ανήκουν στην ίδια γραμμή δεδομένων και οι συντεταγμένες τους αντιστοιχούν σε σημεία στην επιφάνεια της Αττικής. Κατ' επέκταση έχουν ίδιο σημείο λήψης. Από τις φ,λ συντεταγμένες των σημείων αυτών υπολογίζεται το γεωμετρικό υψόμετρο που τους αντιστοιχεί. Οι συντεταγμένες αυτές μετατρέπονται σε γεωκεντρικές στο ίδιο σύστημα αναφοράς με τις μετρημένες θέσεις του δορυφόρου (WGS'84). Με γνωστές τις συντεταγμένες του δορυφόρου (από την γραμμή δεδομένων) και τις γεωκεντρικές συντεταγμένες των σημείων, υπολογίζονται οι πλάγιες αποστάσεις Σημεία στο Έδαφος – Δορυφόρος.

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας προέκυψε ότι οι αποστάσεις που υπολογίζονται με αυτές που παρέχονται ως δεδομένες, έχουν μέσο σφάλμα διαφορών τα 137 μέτρα. Τόσο μεγάλο σφάλμα δεν είναι δυνατόν να προέρχεται από σφάλμα σε ΨΜΕ. Αντίθετα όταν τοποθετούμε 0 γεωμετρικό υψόμετρο τότε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μόλις 0.8 μέτρα. Έτσι συμπεραίνουμε ότι τα σημεία σύνδεσης δεν είναι μετρημένα σημεία, αλλά σημεία προσδιορισμένα εκ των υστέρων. Ειδικότερα λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού σφάλματος που παρουσιάζουν όταν το γεωμετρικό υψόμετρο είναι 0, συμπεραίνουμε ότι οι συντεταγμένες των σημείων αυτών όπως αναφέρονται στα αρχεία των απεικονίσεων είναι σημεία του ελλειψοειδούς αναφοράς.

Η απεικόνιση του ALOS ορθοανήχθηκε μόνο με τον αλγόριθμο του φυσικού μοντέλου, καθώς δεν διαθέτει σημεία σύνδεσης, όπως ο ENVISAT. Ακόμα ο ALOS έχει μόνο πολύ ακριβή δεδομένα τροχιάς ενσωματωμένα στις επικεφαλίδες των αρχείων του. Έτσι οι ορθοαναγωγές περιορίστηκαν μόνο στην συμμετοχή ή όχι του υψομέτρου του γεωειδούς. Τέλος να αναφερθεί ότι πραγματοποιήθηκε και μία δοκιμή για επίλυση της εξίσωσης Doppler στην ρίζα 0. Το αποτέλεσμα ήταν να γεωαναφερθεί πρακτικά μία άλλη περιοχή λόγω της τεράστιας μετατόπισης που υπήρξε. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται σε διαφορά στην συχνότητα Doppler μόλις 84 Hz. Είναι λοιπόν φανερό



ότι θα πρέπει να λαμβάνονται όλοι οι παράμετροι υπόψη, για να ορθοαναχθεί με ακρίβεια μία SAR απεικόνιση.

Τέλος παρουσιάζεται σε πινακοποιημένη μορφή ο αριθμός και τα είδη των ορθοαναγωγών που εφαρμόστηκαν:

Αριθμός Ορθοαναγωγής	Δορυφόρος	Αλγόριθμος	Χαρακτηριστικές Παράμετροι	
1	ENISAT	Φυσικό Μοντέλο	N=39.0 m	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \pm 1m$
2	ENISAT	Φυσικό Μοντέλο	N=39.0 m	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \pm 8m$
3ΓΕ	ENISAT	Φυσικό Μοντέλο	N=0.0 m	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \pm 1m$
4	ENISAT	Φυσικό Μοντέλο	N=0.0 m	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \pm 8m$
5	ENISAT	Πολυώνυμο 1 <sup>ου</sup> βαθμού	-	
6	ALOS	Φυσικό Μοντέλο	N=39.0 m	F <sub>DC</sub> =83.76 Hz
7	ALOS	Φυσικό Μοντέλο	N=0.0 m	F <sub>DC</sub> =83.76 Hz
8	ALOS	Φυσικό Μοντέλο	N=39.0 m	F <sub>DC</sub> =0.0 Hz

Πίνακας 7: Γεωαναφερμένες SAR Απεικονίσεις

### 5.2.3.ii Διαδικασίες Αξιολόγησης SAR Γεωαναφερμένων Απεικονίσεων

Οι απεικονίσεις SAR που ορθοανάχθηκαν με τον αλγόριθμο του φυσικού μοντέλου, αξιολογούνται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με στόχευση σημείων ελέγχου όπως και στα υπερφασματικά δεδομένα. Το μόνο μειονέκτημα σε αυτή τη περίπτωση είναι η δυσκολία ερμηνείας των απεικονίσεων αυτών. Έτσι τα σημεία που στοχεύονται δεν γίνεται να είναι πολλά και έχουν πολύ μεγαλύτερη ασάφεια. Η απεικόνιση που γεωαναφέρθηκε από το πρόγραμμα BEAM, προφανώς αξιολογείται μόνο με αυτή την μέθοδο.

Ο δεύτερος τρόπος είναι η εφαρμογή του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων, όπως περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Έτσι έχοντας ως στοιχεία εισαγωγής τις αβεβαιότητες των παραμέτρων της ορθοαναγωγής υπολογίζεται το σφάλμα στις τελικές συντεταγμένες της απεικόνισης. Με αυτή τη μέθοδο υπάρχει αντικειμενική εποπτεία του σφάλματος για κάθε εικονοστοιχείο, σε αντίθεση με τον πρώτο τρόπο, όπου έχουμε υποκειμενικότητα και δειγματοληπτικό έλεγχο.

Σε αυτόν το τρόπο υπολογισμού του σφάλματος θα πρέπει να γίνουν οι δυνατόν ακριβέστερες υποθέσεις για τις αρχικές αβεβαιότητες, ώστε το υπολογιζόμενο σφάλμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Όπως είναι γνωστό οι θέσεις του δορυφόρου ENVISAT είναι ανά 30 sec, ενώ του ALOS ανά 60 sec. Το σφάλμα που δίνεται για τα στοιχεία τροχιάς είναι το σφάλμα των μετρήσεων. Όμως μεταξύ αυτών των σημείων γίνεται παρεμβολή για να βρεθούν οι υπόλοιπες θέσεις. Έτσι θα προσδιορίσουμε το σφάλμα που προέρχεται από την παρεμβολή του πολυώνυμου. Ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία: υπολογίζεται το πολυώνυμο με βάση δύο χρονικές στιγμές για τις οποίες υπάρχει μέτρηση. Μεταξύ αυτών των χρονικών στιγμών υπάρχει και μία τρίτη μετρημένη. Από το πολυώνυμο υπολογίζονται οι θέσεις και οι ταχύτητες στη τρίτη χρονική στιγμή. Η διαφορά της μετρημένης τιμής από την υπολογισμένη δίνει το σφάλμα της παρεμβολής. Μάλιστα είναι το μέγιστο γιατί βρίσκεται στην ενδιάμεση θέση μεταξύ των άλλων δύο στιγμών.

## 5.2.4 Συμπροσαρμοσμένα Δεδομένα

Με το πέρας των διαδικασιών ορθοαναγωγής, τα εικονοστοιχεία των απεικονίσεων έχουν συντεταγμένες στην UTM προβολή. Συνεπώς τα δεδομένα θεωρούνται συμπροσαρμοσμένα σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να τονιστεί, ότι σκοπός δεν είναι η παραγωγή μίας τελικής ενιαίας απεικόνισης. Δηλαδή μία απεικόνιση με ένα διάνυσμα δεδομένων σε κάθε εικονοστοιχείο, το οποίο θα αποτελείται από τα Υπερφασματικά και SAR δεδομένα και μέγεθος εδαφοψηφίδας ίσο με το μέγεθος της μεγαλύτερης. Οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις των υπερφασματικών έχουν 30 μέτρα μέγεθος εδαφοψηφίδας και τα SAR 5 μέτρα. Εάν συγχωνεύονταν θα χάνονταν πολλές πληροφορίες από τα SAR. Για το λόγο αυτό παραμένουν ξεχωριστές απεικονίσεις. Το βασικότερο στάδιο με την ολοκλήρωση των ορθοαναγωγών είναι ο έλεγχος της ποιότητας με την οποία έχουν συμπροσαρμοστεί και η επιλογή των καταλληλότερων εδαφοψηφίδων για τη σύσταση ενός διανύσματος δεδομένων.

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο ελέγχεται οπτικά η ποιότητα της συμπροσαρμογής για τον εντοπισμό τυχόν χονδροειδών σφαλμάτων. Οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις επιθέτονται 1<sup>ο</sup> στην όρθο-SPOT και 2<sup>ο</sup> μεταξύ τους και στη συνέχεια εξετάζεται κατά πόσον υπάρχουν ασυμφωνίες μεταξύ αυτών. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την διαπίστωση ότι δεν υπάρχουν συστηματικές σχετικές μετατοπίσεις στις απεικονίσεις. Εάν υπάρχουν, τότε το η εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου δεν έχει νόημα. Στο μοντέλο αυτό εισάγονται αποκλειστικά οι συντεταγμένες των κέντρων των εικονοστοιχείων και οι αντίστοιχες τυπικές τους αποκλίσεις. Έτσι εάν για παράδειγμα φαίνεται ότι υπάρχει μία σχετική μετατόπιση της τάξεως των 40 – 50 μέτρων, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη ως σφάλμα, τότε θα υπολογιστούν κανονικά οι ζητούμενες πιθανότητες, αλλά ποιοτικά δεν θα υπάρχει πραγματική αντιστοίχιση στα δεδομένα.

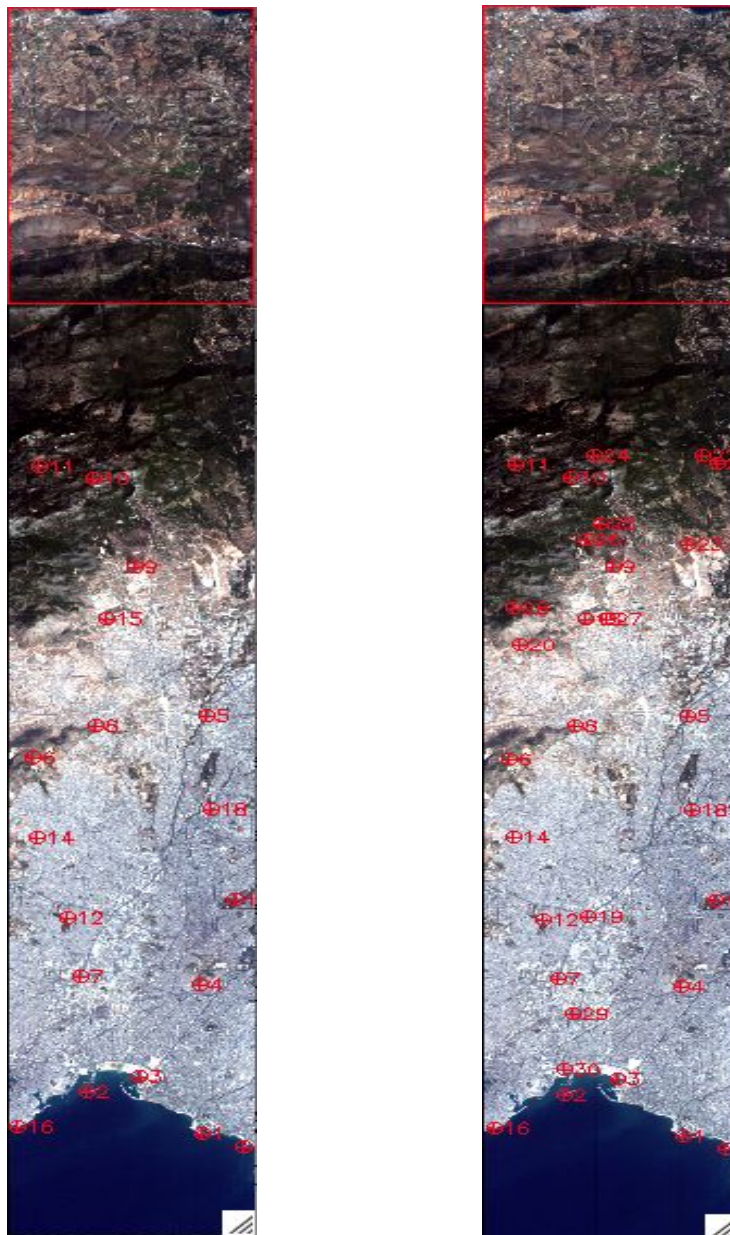
Στο δεύτερο στάδιο της αξιολόγησης των συμπροσαρμοσμένων εικόνων είναι η εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου. Με αυτόν το τρόπο λαμβάνονται τα πιθανότερα δεδομένα για συνδυασμό και ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος λήψης εσφαλμένων δεδομένων. Γνωρίζοντας τα σφάλματα από τις προηγούμενες διαδικασίες και τις συντεταγμένες του κάθε εικονοστοιχείου, εφαρμόζουμε το μοντέλο για κάθε pixel των SAR απεικονίσεων σε κάθε pixel των υπερφασματικών. Έτσι έχουμε για κάθε εικονοστοιχείο του Hyperion τον αριθμό των εικονοστοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους ENVISAT και ALOS με επίπεδο εμπιστοσύνης 99.7%. Εάν ήταν και ο Hyperion ορθοαναγμένος με βάση το φυσικό του μοντέλο, τότε θα ήταν διαθέσιμο για όλα τα εικονοστοιχεία ο πραγματικός αριθμός των SAR pixel που τους αντιστοιχούν. Όμως επειδή ο Hyperion έχει ορθοαναχθεί με προσεγγιστικές μεθόδους, δεν υπάρχει το πραγματικό σφάλμα για κάθε εικονοστοιχείο, αλλά το μέσο σφάλμα από τα σημεία ελέγχου. Έτσι ο αριθμός που υπολογίζεται αναφέρεται στο μέσο σφάλμα της γεωαναφερμένης υπερφασματικής απεικόνισης.

**6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ**

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

### 6.1 Ορθοαναγωγή με Αφινικό Μετασχηματισμό

Ο πρώτος αλγόριθμος που εφαρμόστηκε ήταν ο αφινικός μετασχηματισμός. Εφαρμόστηκε σε δύο ομάδες φωτοσταθερών, των οποίων η κατανομή στην αρχική απεικόνιση φαίνεται



παρακάτω:

Εικόνα 54: Κατανομή των Δύο Ομάδων Φωτοσταθερών στην Αρχική Απεικόνιση  
Ομάδα Α Ομάδα Β

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ**

Η ομάδα Α έχει τα 18 σημεία κατανεμημένα όσο γίνεται πιο ομοιόμορφα στην έκταση της σκηνής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το χαρτογραφικό υπόβαθρο (ορθο-SPOT), από το οποίο έγινε η συλλογή των φωτοσταθερών φτάνει μέχρι την Πεντέλη. Για αυτό, όπως φαίνεται και στην εικόνα 55 και στις δύο ομάδες τα σημεία είναι μέχρι την μέση της αρχικής απεικόνισης. Στην ομάδα Β έγινε πύκνωση των σημείων με σκοπό να παρατηρηθεί η μεταβολή των σφαλμάτων τόσο γενικά σε ολόκληρη την απεικόνιση, όσο και ειδικότερα σε υψομετρικές ζώνες.

Με την εφαρμογή του αφινικού μετασχηματισμού παράγονται οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις και υπολογίζονται τα σφάλματά τους. Στο παρόντα αλγόριθμο στοχεύτηκαν σημεία ελέγχου και υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό τους σφάλμα. Ο αριθμός των σημείων ελέγχου ήταν 22 και είναι όλα διαφορετικά από τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ορθοαναγωγή. Τα σημεία αυτά είναι κοινά για τον έλεγχο και των δύο περιπτώσεων ορθοαναγωγών. Ο υπολογισμός των σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε σε πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας σε γλώσσα IDL 7.0. Έτσι για τα σφάλματα στις δύο περιπτώσεις είναι τα ακόλουθα:

Αριθμός Σημείων Ελέγχου	ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β	
	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)
1	2.375	9.000	-1.188	-7.500
2	12.375	-6.000	8.813	7.500
3	-52.625	54.000	-26.188	37.500
4	-7.625	14.000	-11.188	-32.500
5	-27.625	9.000	-31.188	-7.500
6	12.375	-11.000	8.813	2.500
7	-22.625	4.000	3.813	17.500
8	-22.625	9.000	3.813	-7.500
9	-17.625	4.000	8.813	17.500
10	-2.625	14.000	1.000	1.000
11	12.375	-1.000	8.813	12.500
12	2.375	-21.000	2.000	5.000
13	-22.625	24.000	3.813	7.500
14	0.000	0.000	-6.188	2.500
15	0.000	0.000	0.000	0.000
16	-32.625	-36.000	-36.188	-22.500
17	2.375	24.000	-2.188	7.500
18	27.375	-11.000	53.813	2.500
19	12.375	19.000	-21.188	2.500
20	37.375	-1.000	33.813	-17.500
21	17.375	24.000	13.813	7.500
22	0.000	0.000	3.813	7.500

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

<b>R.M.S. (m)</b>	<b>21.3652</b>	<b>19.1349</b>	<b>19.7486</b>	<b>14.7111</b>
<b>R.M.S. (%)</b>	<b>0.712174</b>	<b>0.637829</b>	<b>0.658287</b>	<b>0.490370</b>

Πίνακας 8: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου Ομάδων Α και Β

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών, βελτιώνεται η μέση ακρίβεια της γεωαναφερμένης απεικόνισης. Το RMS (%) είναι ο λόγος του σφάλματος σε μέτρα προς το μέγεθος της εδαφοψηφίδας σε μέτρα (στον Hyperegion 30 μέτρα). Έτσι με αύξηση αριθμού φωτοσταθερών κατά 67% περίπου, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μειώθηκε κατά 5.4% και 14.8% στους άξονες X και Y αντίστοιχα. Το σφάλμα μερικών σημείων ελέγχου, δεν μεταβλήθηκε καθόλου. Αυτό οφείλεται στη διαδικασία της αναδόμησης, όπου εδώ είναι ο εγγύτερος γείτονας. Επειδή σε ορισμένα σημεία (κυρίως τα πεδινά) δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στις τελικές τους συντεταγμένες, η στρογγυλοποίηση που επιφέρει η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα σε αυτές, είχε ως αποτέλεσμα να μην μεταβληθούν τα εικονοστοιχεία αυτά.

Στη συνέχεια τα σημεία ελέγχου και στις δύο περιπτώσεις, χωρίζονται σε δύο υπό-ομάδες με κριτήριο την τιμή του υψομέτρου τους. Για αυτές τις υπό-ομάδες υπολογίστηκαν τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα κατά τους άξονες X και Y.

	<b>ΟΜΑΔΑ Α</b>		<b>ΟΜΑΔΑ Β</b>	
	<b>RMS X</b>	<b>RMS Y</b>	<b>RMS X</b>	<b>RMS Y</b>
<b>Υψομετρική Ζώνη έως 150 m</b>	24.612	22.568	24.492	14.227
	0.820	0.752	0.816	0.474
<b>Υψομετρική Ζώνη πάνω από 150 m</b>	15.636	12.352	7.485	16.534
	0.521	0.412	0.250	0.551

Πίνακας 9: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων

Εξετάζοντας το Πίνακα 9 παρατηρούνται μερικά αντιφατικά στοιχεία. Το πρώτο είναι η μεγάλη διαφορά που έχουν τα σφάλματα στις δύο υψομετρικές ζώνες. Το φαινόμενο αυτό ισχύει και στις δύο περιπτώσεις. Το δεύτερο είναι η σχεδόν αμετάβλητη συμπεριφορά των σφαλμάτων στην πρώτη υψομετρική ζώνη κατά τον άξονα X και η δραστική μείωση του σφάλματος κατά Y. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ερμηνευτεί εξετάζοντας τη συνάρτηση που υπολογίζει της συντεταγμένες (αφινικός) και τον τρόπο υπολογισμό των συντελεστών της. Ο αφινικός μετασχηματισμός είναι ουσιαστικά μία μετάθεση, στροφή και μεταβολή κλίμακας ενός επίπεδου σε έναν άλλο επίπεδο χώρο. Η επιφάνεια που ζητείται να μετασχηματιστεί στην πραγματικότητα είναι τρισδιάστατη και όχι επίπεδη. Ακόμα ο αφινικός διαθέτει 6 συντελεστές για να μετασχηματίσει τα σημεία του ενός χώρου στο δεύτερο. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια που δημιουργείται έχει μία ορισμένη προσαρμοστικότητα στα δεδομένα. Δηλαδή με την εισαγωγή περισσότερων φωτοσταθερών, απλώς ξανά υπολογίζονται οι βέλτιστοι συντελεστές που “ταιριάζουν” στα δεδομένα με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού αθροίσματος των σφαλμάτων (ελάχιστες απαιτούμενες δεσμεύσεις στην MET), γεγονός το οποίο δεν διασφαλίζει την καλύτερη προσαρμοστικότητα στο ανάγλυφο. Έτσι εάν με τον αριθμό των φωτοσταθερών υπερβούμε το όριο κατά το οποίο μία επιφάνεια προσαρμόζεται στο ανάγλυφο, τότε η αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών δεν επιφέρει απαραίτητα το επιθυμητό αποτέλεσμα. Πυκνώνοντας τον αριθμό των φωτοσταθερών υπολογίζονται νέοι περισσότεροι ενδιάμεσοι συντελεστές με αποτέλεσμα τελικά κατά τόπους να υπάρχουν μεγαλύτερα σφάλματα από πριν. Βέβαια με τους νέους συντελεστές στα μεγάλα υψόμετρα το σφάλμα μειώνεται, γεγονός που σημαίνει ότι εκεί ο αφινικός έχει

προσαρμοστεί καλύτερα από ότι με τα λιγότερα φωτοσταθερά. Εκτός από τον αφινικό μετασχηματισμό, σφάλμα προστίθεται και από την αναδόμηση της απεικόνισης (εγγύτερος γείτονας). Με την παρούσα αναδόμηση είναι αναμενόμενο να υπάρχουν αυξημένα σφάλματα, αφού οι συντεταγμένες που υπολογίζονται στρογγυλοποιούνται. Κατά συνέπεια το σφάλμα που θα προστεθεί θα είναι μέχρι 0.5 pixels ή αλλιώς 15 μέτρα.



Εικόνα 55: Προοπτική Προβολή Γεωαναφερμένης Απεικόνισης Hyperion (GCPs: Ομάδα Β)

Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί μόνο η γεωαναφερμένη απεικόνιση με τα φωτοσταθερά της ομάδας Β, καθώς οι δύο απεικονίσεις δεν διέθεταν αισθητές διαφορές. Ακόμα η γεωαναφερμένη αυτή απεικόνιση παρουσιάζεται προοπτικά με επίθεση πάνω στο διαθέσιμο ΨΜΕ της Αττικής (ASTER GDEM), για την καλύτερή της αναπαράσταση. Έτσι γίνονται πιο εμφανή τυχόν χονδροειδή σφάλματα της γεωαναφοράς.

## **6.2 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 1<sup>ου</sup> Βαθμού**

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού για την παραγωγή γεωαναφερμένης απεικόνισης. Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ εφαρμόστηκαν

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ**

οι ομάδες φωτοσταθερών Α και Β. Τα σημεία με τα οποία έγινε έλεγχος του αποτελέσματος είναι τα ίδια με πριν. Ο έλεγχος της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με τον έλεγχο των RMS των φωτοσταθερών.

Αριθμός Φωτοσταθερού	ΟΜΑΔΑ Α			ΟΜΑΔΑ Β		
	Σφάλμα στον Χ (%)	Σφάλμα στον Υ (%)	RMS (%)	Σφάλμα στον Χ (%)	Σφάλμα στον Υ (%)	RMS (%)
1	-0.22	0.07	0.23	-0.24	0.05	0.25
2	-0.10	0.02	0.10	-0.19	-0.03	0.19
3	0.03	-0.39	0.39	-0.02	-0.41	0.41
4	-0.68	0.53	0.86	-0.71	0.54	0.89
5	0.64	-0.21	0.68	0.41	-0.22	0.47
6	-0.18	0.26	0.32	-0.08	0.39	0.40
7	-0.58	0.31	0.65	-0.59	0.33	0.67
8	0.46	-0.46	0.65	0.43	-0.38	0.58
9	-0.55	-0.18	0.58	-0.82	-0.17	0.83
10	-0.49	0.37	0.61	-0.74	0.41	0.84
11	-0.70	0.40	0.80	-0.77	0.52	0.93
12	0.38	-0.25	0.46	0.40	-0.20	0.45
13	0.54	0.12	0.56	0.47	0.14	0.49
14	0.75	-0.30	0.80	0.83	-0.20	0.85
15	0.43	-0.48	0.64	0.30	-0.42	0.52
16	0.28	0.14	0.31	0.11	0.04	0.12
17	-0.76	-0.03	0.76	-0.74	-0.04	0.74
18	0.75	0.09	0.75	0.62	0.10	0.62
19	-	-	-	0.27	0.16	0.31
20	-	-	-	0.96	-0.60	1.13
21	-	-	-	0.54	0.23	0.59
22	-	-	-	0.08	-0.23	0.24
23	-	-	-	0.05	0.01	0.05
24	-	-	-	-1.01	0.23	1.04
25	-	-	-	0.57	0.15	0.59
26	-	-	-	0.20	-0.37	0.42
27	-	-	-	-0.09	-0.32	0.34
28	-	-	-	-0.32	0.25	0.41
29	-	-	-	0.04	0.01	0.04
30	-	-	-	0.05	0.05	0.07



Πίνακας 10: Σφάλματα Φωτοσταθερών για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 1<sup>ο</sup> Βαθμού

Από τον πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα και στις δύο ομάδες είναι σχεδόν ίδιο. Πιο συγκεκριμένα η ομάδα Β έχει RMS 0.59, ενώ η ομάδα Α έχει 0.60. Εξετάζοντας αναλυτικότερα τα στοιχεία φαίνεται ότι με την προσθήκη νέων σημείων, το σφάλμα των ήδη υπαρχόντων μεταβάλλεται ελαφρώς. Η μεταβολή αυτή δεν είναι συγκεκριμένη, σε άλλα σημεία είναι μικρότερα τα σφάλματα και σε άλλα μεγαλύτερα. Τα σφάλματα αυτά δεν αντιπροσωπεύουν τη συνολική ακρίβεια της γεωαναφερμένης απεικόνισης, αλλά το πόσο καλά έχει προσαρμοστεί η πρώτου βαθμού πολυωνυμική επιφάνεια στα συγκεκριμένα σημεία. Βέβαια αυτό το RMS στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί ένα κριτήριο για τη ποιότητα της γεωαναφερμένης απεικόνισης (κάτι τέτοιο δεν ισχύει στις μεγαλύτερου βαθμού συναρτήσεις). Ο αντιπροσωπευτικότερος τρόπος για να προσδιοριστεί η ακρίβεια της γεωαναφερμένης απεικόνισης είναι με τη στόχευση σημείων ελέγχου. Τα σημεία ελέγχου χωρίστηκαν στις ίδιες υψομετρικές ζώνες με την προηγούμενη περίπτωση για να ελεγχθεί η μεταβολή των σφαλμάτων. Έτσι τα σφάλματα των σημείων ελέγχου στις δύο επιλύσεις είναι τα ακόλουθα:

Αριθμός Σημείων Ελέγχου	ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β	
	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)
1	2.375	9.000	-1.188	-7.500
2	12.375	-6.000	8.813	7.500
3	-52.625	54.000	-26.188	37.500
4	-7.625	-16.000	-41.188	-32.500
5	-27.625	9.000	-31.188	-7.500
6	12.375	-11.000	8.813	2.500
7	-22.625	4.000	3.813	17.500
8	7.375	9.000	3.813	22.500
9	-17.625	4.000	-21.188	17.500
10	-32.625	14.000	1.000	-1.000
11	12.375	29.000	8.813	12.500
12	2.375	-21.000	2.000	5.000
13	7.375	24.000	2.813	6.500
14	-17.625	-11.000	-21.188	2.500
15	-7.625	-1.000	0.000	0.000
16	-32.625	-6.000	-36.188	7.500
17	-27.625	24.000	-0.188	9.500
18	27.375	-11.000	23.813	2.500
19	12.375	19.000	-21.188	2.500
20	37.375	-1.000	33.813	-17.500
21	17.375	24.000	13.813	7.500

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

22	-22.625	-6.000	-26.188	7.500
<b>R.M.S. (m)</b>	<b>23.265</b>	<b>18.882</b>	<b>20.557</b>	<b>14.743</b>
<b>R.M.S. (%)</b>	<b>0.776</b>	<b>0.629</b>	<b>0.685</b>	<b>0.491</b>

Πίνακας 11: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 1<sup>ου</sup> Βαθμού

Από τον αναλυτικό πίνακα με τα σφάλματα των σημείων ελέγχου είναι φανερό με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών η ακρίβεια της γεωαναφερμένης απεικόνισης αυξάνεται. Το πολυώνυμο πρώτου βαθμού έχει συνολικά 8 συντελεστές για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων, δηλαδή δύο συντελεστές περισσότερους από τον αφινικό. Αυτό σημαίνει ότι το πολυώνυμο μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα στην ίδια επιφάνεια σε σχέση με τον αφινικό. Όμως με την αύξηση αυτής της ελευθερίας απαιτούνται περισσότερα φωτοσταθερά, τόσο για να υπολογιστούν οι συντελεστές, όσο και για την εύρεση των βέλτιστων. Η ανάγκη για περισσότερα φωτοσταθερά, με σκοπό τον υπολογισμό καλύτερων συντελεστών, γίνεται αντιληπτή σε μεγαλύτερο βαθμό στα επόμενα πολυώνυμα. Δηλαδή δεν αρκούν μόνο τα ελάχιστα απαραίτητα σημεία για την επίλυση του συστήματος, αλλά αρκετά περισσότερα.

Συνέχεια στην ανάλυση σφαλμάτων είναι ο διαχωρισμός των σημείων ελέγχου με βάση το υψόμετρο. Έτσι με την γνωστή υψομετρική διάκριση, συντάσσεται ο ακόλουθος πίνακας:

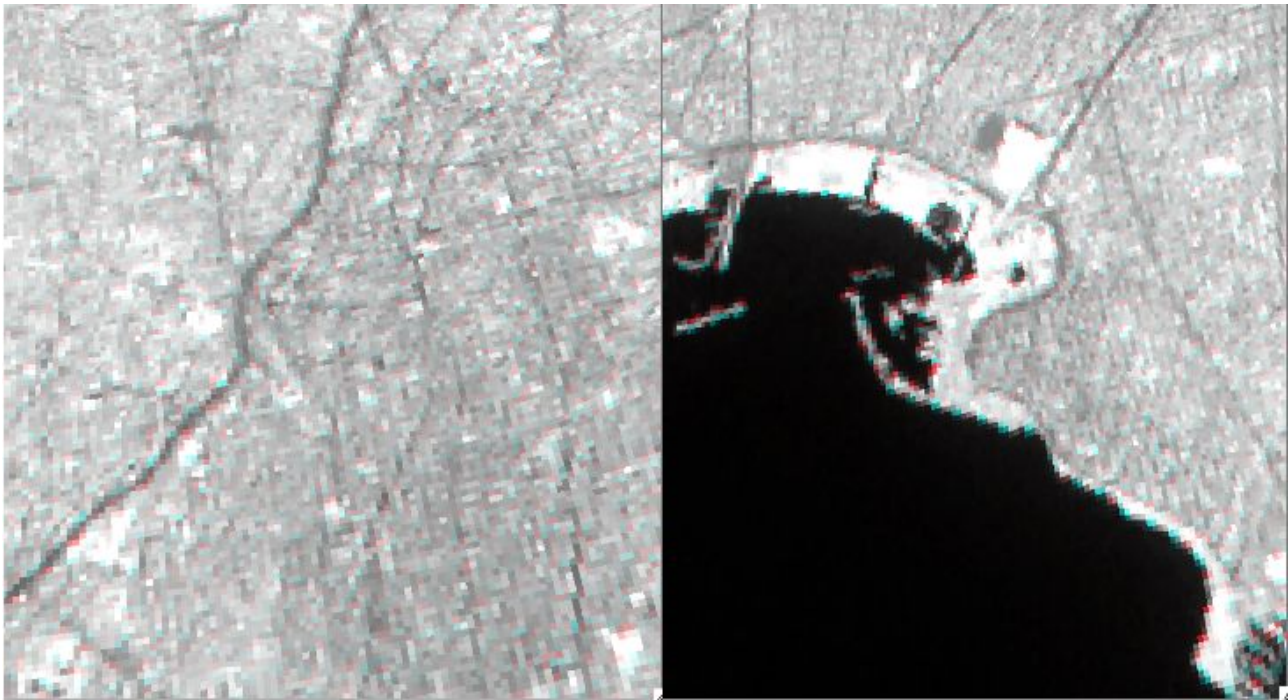
	ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β	
	RMS X	RMS Y	RMS X	RMS Y
<b>Υψομετρική Ζώνη έως 150 m</b>	26.392	20.604	22.429	13.013
	0.880	0.687	0.748	0.434
<b>Υψομετρική Ζώνη πάνω από 150 m</b>	18.171	16.767	18.263	18.375
	0.606	0.559	0.609	0.613

Πίνακας 12: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων Σημείων Ελέγχου Ομάδας Α και Β

Από την κατανομή των σφαλμάτων στις υψομετρικές ζώνες παρατηρείται μείωση του σφάλματος στα πεδινά, σε αντίθεση με την πρακτικά σταθερή συμπεριφορά των σφαλμάτων στα ορεινά. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα που διαθέτει το πρωτοβάθμιο πολυώνυμο σε σχέση με τον αφινικό. Είναι φανερό ότι με αύξηση από τα 18 στα 30 φωτοσταθερά, το πολυώνυμο είχε περιθώρια καλύτερης προσαρμογής στο ανάγλυφο της περιοχής.

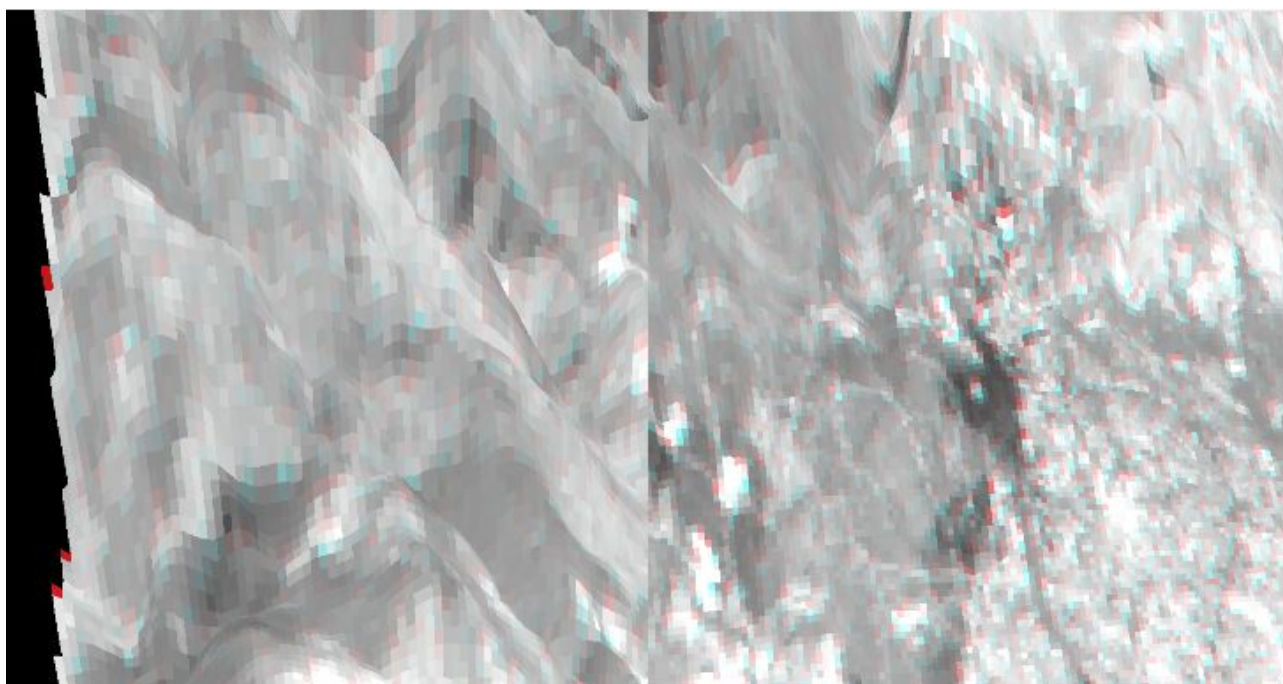
Για την καλύτερη κατανόηση των διαφορών που έχουν οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις με διαφορετικά φωτοσταθερά, πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία. Από τις δύο απεικονίσεις επιλέχθηκε το κανάλι 40 το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 753 nm για αναπαράσταση αυτών. Με το κανάλι αυτό γίνονται οι απεικονίσεις των δεδομένων σε γκριζούς τόνους, καθώς είναι το ευκρινέστερο [EO-1 User Guide, 2003]. Οι απεικονίσεις όντας ορθοανηγμένες θα πρέπει εάν επιτεθούν η μία στην άλλη, τα εικονοστοιχεία τους να συμπίπτουν. Όμως λόγω των μεταβολών των σφαλμάτων στις δύο περιπτώσεις γεωαναφορών θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις. Αυτές αναμένεται να είναι μεγαλύτερες στα πεδινά, καθώς εκεί παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες διαφορές σφαλμάτων. Για να γίνουν ορατές αυτές οι διαφορές προβάλλουμε το κανάλι της μιας απεικόνισης με κόκκινο κόκκινο χρώμα και το κανάλι της άλλης στο πράσινο και στο μπλε χρώμα. Με αυτόν το τρόπο όσα pixel είναι ίδια και βρίσκονται στην ίδια θέση, θα απεικονίζονται σε τόνους του γκριζού. Αυτό είναι προφανές, αφού εάν ένα εικονοστοιχείο έχει τις ίδιες τιμές και στα τρία χρώματα θα φαίνεται γκριζό. Τα εικονοστοιχεία στα οποία δεν έχουν τοποθετηθεί ίδια δεδομένα (υπάρχει

δηλαδή σχετική μετατόπιση) θα απεικονίζονται με οποιοδήποτε χρώμα. Η σύνθεση αυτή στη συνέχεια επιτέθηκε στο ΨΜΕ για να γίνεται περισσότερο αντιληπτή η επίδραση του υψομέτρου.



Εικόνα 56: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Πεδινό Τμήμα της Απεικόνισης

Παρατηρώντας την εικόνα 57 προσεκτικά, είναι ξεκάθαρο ότι υπάρχουν μετατοπίσεις που αγγίζουν τα μερικά pixel. Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο έντονο στην ακτογραμμή, όπου το υψόμετρο είναι το ελάχιστο. Έτσι φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση της μεταβολής του σφάλματος στις δύο περιπτώσεις ορθοαναγωγών. Ακολούθως παρουσιάζονται δύο αντίστοιχα τμήματα της ορεινής περιοχής.



Εικόνα 57: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Ορεινό Τμήμα της Απεικόνισης

Το ορεινό τμήμα, όπως είναι φανερό, έχει αρκετά λιγότερες σχετικές μετατοπίσεις. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού τα σφάλματα από τις δύο ομάδες φωτοσταθερών είναι πρακτικά ίδια. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι σημασία για τις σχετικές μετατοπίσεις έχει μόνο η ύπαρξη οποιουδήποτε χρώματος. Το έντονο χρώμα απλώς δηλώνει την μεγάλη ραδιομετρική διαφορά στα αντίστοιχα εικονοστοιχεία και δεν σχετίζεται με μεγαλύτερη μετατόπιση.

### 6.3 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> Βαθμού

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε στην αρχική απεικόνιση ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού δύο φορές. Στη πρώτη περίπτωση οι συντελεστές του υπολογίστηκαν με βάση τα φωτοσταθερά της ομάδας Α και στη δεύτερη περίπτωση με βάση τα φωτοσταθερά της ομάδας Β. Αρχικά οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις εξετάστηκαν με τους γνωστούς τρόπους ελέγχου (φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου). Έτσι πραγματοποιώντας έλεγχο στα σφάλματα προσαρμογής των φωτοσταθερών στη δεύτερου βαθμού συνάρτηση συντάχθηκε ο παρακάτω πίνακας:

Αριθμός Φωτοσταθερού	ΟΜΑΔΑ Α			ΟΜΑΔΑ Β		
	Σφάλμα στον X (%)	Σφάλμα στον Y (%)	RMS (%)	Σφάλμα στον X (%)	Σφάλμα στον Y (%)	RMS (%)
1	0.32	0.04	0.32	0.30	-0.01	0.30
2	-0.11	0.13	0.17	-0.11	0.07	0.13
3	0.21	-0.22	0.31	0.14	-0.27	0.31
4	-0.62	0.58	0.85	-0.74	0.60	0.95
5	-0.02	-0.11	0.11	-0.06	-0.13	0.15

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

6	-0.29	0.28	0.40	-0.48	0.32	0.57
7	-0.72	0.41	0.83	-0.67	0.33	0.75
8	0.30	-0.30	0.42	0.12	-0.19	0.22
9	-0.32	-0.10	0.33	-0.72	-0.10	0.73
10	0.24	0.25	0.34	-0.11	0.27	0.29
11	-0.30	0.12	0.32	-0.22	0.32	0.39
12	0.19	-0.18	0.26	0.22	-0.24	0.32
13	0.07	0.04	0.08	0.18	0.09	0.20
14	0.53	-0.30	0.61	0.51	-0.34	0.62
15	0.35	-0.39	0.52	0.21	-0.28	0.35
16	0.06	-0.05	0.08	0.02	-0.06	0.06
17	0.04	-0.35	0.35	0.05	-0.40	0.40
18	0.09	0.15	0.17	0.16	0.19	0.25
19	-	-	-	0.06	0.31	0.31
20	-	-	-	0.70	-0.55	0.89
21	-	-	-	0.16	0.22	0.27
22	-	-	-	-0.09	-0.24	0.25
23	-	-	-	-0.16	-0.01	0.16
24	-	-	-	-0.26	0.07	0.27
25	-	-	-	0.90	0.14	0.91
26	-	-	-	0.46	-0.36	0.59
27	-	-	-	-0.19	-0.18	0.26
28	-	-	-	-0.51	0.26	0.57
29	-	-	-	0.02	0.07	0.07
30	-	-	-	0.11	0.11	0.15

Πίνακας 13: Σφάλμα Προσαρμογής Φωτοσταθερών για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 2<sup>ου</sup> Βαθμού

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 13, παρατηρείται μία αύξηση 4% του μέσου τετραγωνικού σφάλματος από την ομάδα Α στην ομάδα Β. Πιο αναλυτικά η ομάδα Α παρουσιάζει RMS 0.421321 (του pixel), ενώ η ομάδα Β 0.462918 (του pixel). Με βάση τα συμπαιράσματα των παραπάνω γεωαναφορών η αύξηση αυτή θα έπρεπε να συνεπάγεται μείωση της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης, που υπολογίζεται με τα φωτοσταθερά της ομάδας Β. Κάτι τέτοιο είναι τελείως εσφαλμένο. Στοχεύοντας τα ίδια σημεία ελέγχου με πριν, συντάσσεται ο ακόλουθος πίνακας σφαλμάτων για κάθε ένα σημείο, όπως φυσικά και το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Αριθμός Σημείων Ελέγχου	ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β	
	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

1	2.375	9.000	-1.188	-7.500
2	12.375	-6.000	8.813	7.500
3	-52.625	54.000	-26.188	67.500
4	22.375	14.000	-11.188	-32.500
5	-27.625	9.000	0.000	0.000
6	-17.625	-11.000	8.813	2.500
7	-22.625	4.000	3.813	17.500
8	7.375	9.000	3.813	22.500
9	-17.625	34.000	8.813	-12.500
10	-182.625	74.000	-1.000	-1.000
11	-227.625	89.000	8.813	12.500
12	-27.625	9.000	2.000	5.000
13	7.375	24.000	5.813	10.500
14	7.375	-11.000	8.813	2.500
15	-7.625	-1.000	0.000	0.000
16	-2.625	-36.000	-36.188	7.500
17	-27.625	24.000	-1.188	7.500
18	0.000	0.000	-6.188	2.500
19	-47.625	-11.000	8.813	2.500
20	7.375	-1.000	3.813	-17.500
21	17.375	24.000	13.813	7.500
22	0.000	0.000	-26.188	7.500
<b>R.M.S. (m)</b>	<b>67.248</b>	<b>31.945</b>	<b>13.069</b>	<b>18.952</b>
<b>R.M.S. (%)</b>	<b>2.242</b>	<b>1.065</b>	<b>0.436</b>	<b>0.632</b>

Πίνακας 14: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για Πολυωνυμικό Μετασχηματισμό 2<sup>ου</sup> Βαθμού

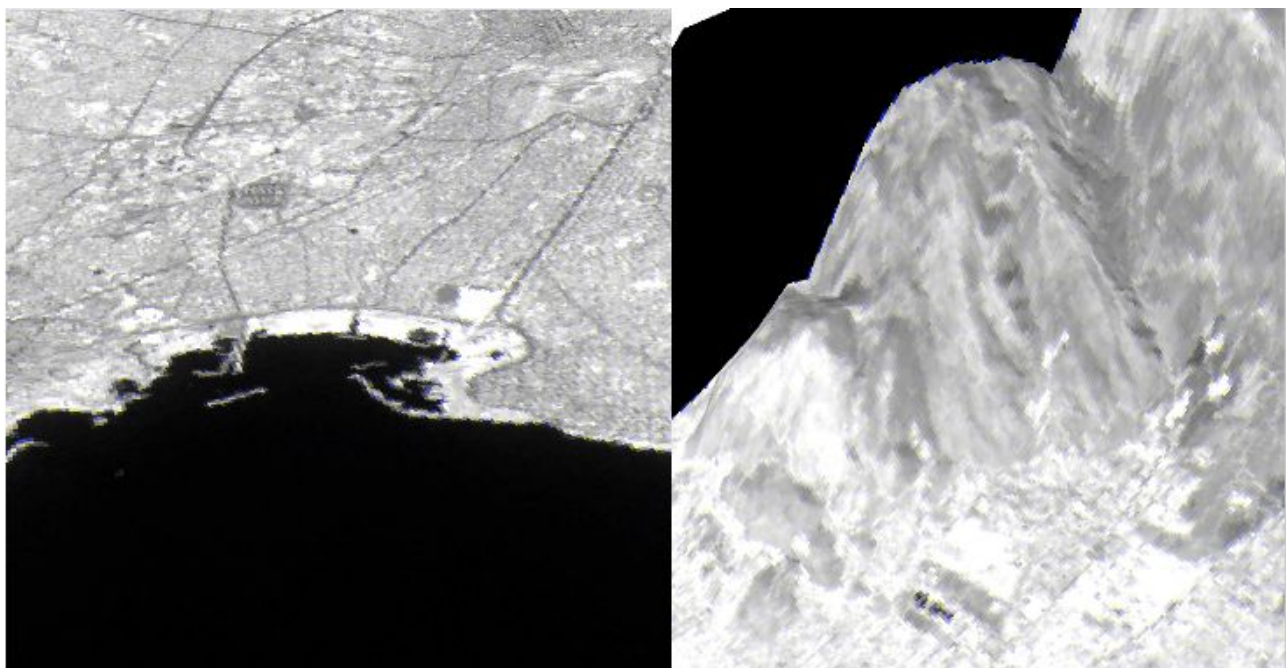
Το σφάλμα των σημείων ελέγχου στην ομάδα Β είναι μειωμένο έως και 5 φορές σε σχέση με το αντίστοιχο σφάλμα στην ομάδα Α (κατά τον άξονα Χ). Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που υπολογίζεται από τα φωτοσταθερά δεν είναι καθόλου αντιπροσωπευτικό της συνολικής ακρίβειας της γεωναφερμένης απεικόνισης. Στη συνέχεια υπολογίζουμε και πάλι την υψομετρική κατανομή των σφαλμάτων στα σημεία ελέγχου για τις δύο ομάδες.

	ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β	
	RMS X	RMS Y	RMS X	RMS Y
Υψομετρική Ζώνη έως 150 m	23.780	22.157	15.675	20.247
	0.793	0.739	0.523	0.675
	111.878	46.365	7.485	17.782

<b>Υψομετρική Ζώνη πάνω από 150 m</b>	3.729	1.546	0.250	0.593
---	-------	-------	-------	-------

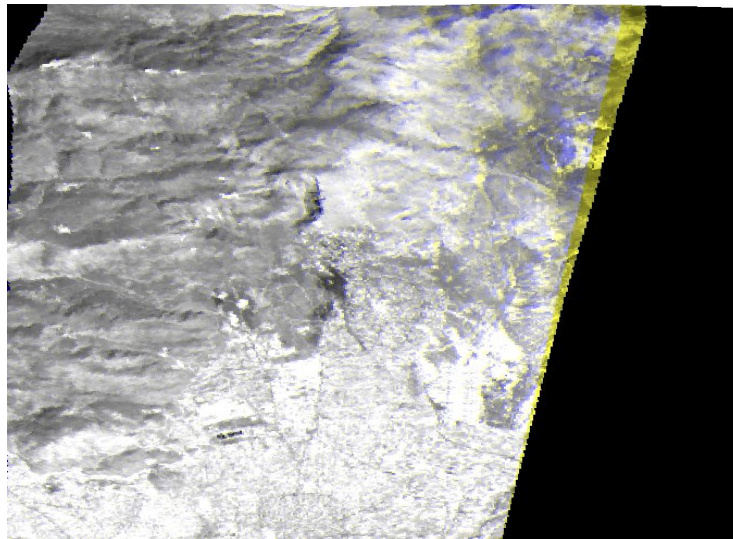
Πίνακας 15: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων

Από τον πίνακα 15 φαίνεται ότι η επιφάνεια δευτέρου βαθμού δεν προσαρμόζεται επαρκώς στα μεγάλα υψόμετρα και για αυτό παρατηρούνται πολύ μεγάλες αποκλίσεις. Έτσι γίνεται φανερό ότι με την αύξηση του βαθμού του πολυώνυμου θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερα φωτοσταθερά. Για τη μεγαλύτερη κατανόηση αυτής της ανάγκης φωτοσταθερών, παρουσιάζονται οι δύο γεωαναφερμένες απεικονίσεις με την ίδια μέθοδο που αναπτύχθηκε στον προηγούμενο αλγόριθμο. Έτσι έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα από τις γεωαναφερμένες απεικονίσεις:



Εικόνα 58: Σχετικές Μετατοπίσεις στα Πεδινά (αριστερά) και στα Ορεινά (δεξιά)

Σε αυτά τα τμήματα παρατηρείται ότι οι δύο απεικονίσεις έχουν πολύ λίγες σχετικές μετατοπίσεις. Μάλιστα εάν γίνει σύγκριση αυτών των σχετικών μετακινήσεων με αυτές που προκύπτουν από το πρωτοβάθμιο πολυώνυμο σε αυτά τα τμήματα, θα φανεί ότι το δευτέρου βαθμού πολυώνυμο παράγει ακριβέστερες γεωαναφερμένες απεικονίσεις. Αυτό γίνεται αντιληπτό στον έλεγχο των check points, όπου στις περισσότερες των περιπτώσεων τα σφάλματα είναι μικρότερα (μεταξύ πολυωνύμων 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> βαθμού). Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο προσδιορισμός της ακρίβειας με τα σημεία ελέγχου είναι σημειακός και δεν αναφέρεται σε ολόκληρη την επιφάνεια της απεικόνισης. Αυτό γίνεται φανερό στην παρακάτω απεικόνιση, όπου το δευτέρου βαθμού πολυώνυμο της ομάδας A, έχει παραμορφώσει τόσο την απεικόνιση, ώστε να μην γίνεται να θεωρηθεί η ορθοαναγωγή αυτή έγγυρη.



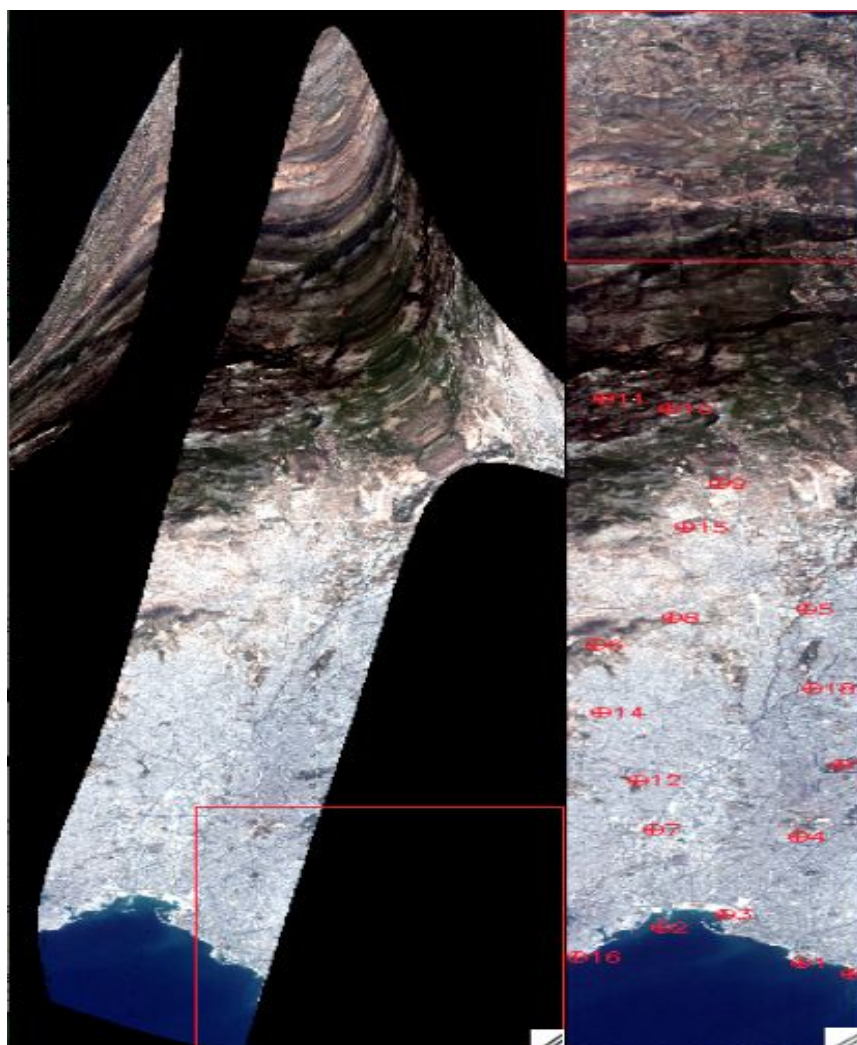
Εικόνα 59: Σχετικές Μετατοπίσεις στο Δεξί Άκρο της Απεικόνισης

Δηλαδή το πολυώνυμο με τα λιγότερα φωτοσταθερά σημεία απέτυχε να ορθοανάγει την απεικόνιση σε στην άκρη της απεικόνισης. Σε αυτή την περιοχή η πυκνότητα των φωτοσταθερών είναι μικρή. Έτσι παρατηρούμε ότι με την αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου είναι απαραίτητη η μεγαλύτερη αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών σε ολόκληρη την έκταση της απεικόνισης, ώστε να μη παρατηρούνται τέτοια φαινόμενα. Αυτό γίνεται ακόμα πιο έντονο στο τριτοβάθμιο πολυώνυμο.

#### **6.4 Ορθοαναγωγή με Πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> Βαθμού**

Σε αυτόν τον αλγόριθμο πραγματοποιήθηκαν 4 γεωαναφερμένες απεικονίσεις, από 4 ομάδες φωτοσταθερών. Ζητούμενο πλέον έκτος από την επίτευξη ορθοανηγμένης απεικόνισης και έλεγχο της ακρίβειά της, είναι η μελέτη της επίδρασης του αριθμού και της κατανομής των φωτοσταθερών στην διαδικασία. Οι δύο πρώτες ομάδες φωτοσταθερών είναι ίδιες με τις προηγούμενες. Με βάση την ομάδα Β στοχεύτηκαν περισσότερα φωτοσταθερά και παρήχθησαν οι ομάδες Γ και Δ, με 50 και 63 σημεία αντίστοιχα. Αρχικά παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ορθοαναγωγής με την ομάδα Α:





Εικόνα 60: Αποτέλεσμα Γεωαναφοράς Τριτοβάθμιου Πολυώνυμου και Κατανομή των Σημείων Ομάδας Α

Είναι προφανές ότι το πολυώνυμο που υπολογίστηκε από 18 σημεία απέτυχε πλήρως στην παραγωγή ορθοανηγμένης απεικόνισης. Με αυτό το παράδειγμα γίνεται φανερή η ανάγκη για πολύ περισσότερα φωτοσταθερά στον υπολογισμό των συντελεστών του πολυώνυμου. Εξαιτίας του αποτελέσματος δεν έχει νόημα η στόχευση σημείων ελέγχου. Όμως αξίζει να σημειωθεί ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των φωτοσταθερών είναι μόλις 0.042088 του pixel. Κατά συνέπεια δεν έχει νόημα να λαμβάνεται υπόψη αυτό το σφάλμα για τον υπολογισμό της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης. Εδώ γίνεται πλήρως αντιληπτό ότι το σφάλμα αυτό αφορά αποκλειστικά στο βαθμό προσαρμογής των συγκεκριμένων σημείων στο πολυώνυμο.

Για κάθε απεικόνιση από τις ομάδες Β, Γ και Δ υπολογίστηκε αρχικά το σφάλμα που έχουν τα φωτοσταθερά. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

	Αριθμός Φωτοσταθερών	RMS Φωτοσταθερών (%)
<b>Ομάδα Β</b>	30	0.385
<b>Ομάδα Γ</b>	50	0.431

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

<b>Ομάδα Δ</b>	63	0.463
----------------	----	-------

Πίνακας 16: RMS Φωτοσταθερών για κάθε Ομάδα

Από τον πίνακα 16 φαίνεται ότι το RMS αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών. Αν και φαίνεται αντιφατικό, στην πραγματικότητα δεν είναι. Το πολυώνυμο έχει συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας, οπότε και όρια προσαρμογής στα δεδομένα είναι πεπερασμένα. Η αύξηση του αριθμού των σημείων δεν συνεπάγεται ότι το πολυώνυμο μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα σε αυτά, αφού ενδεχομένως το όριο αυτό μπορεί να έχει ξεπεραστεί. Είναι αντίστοιχη περίπτωση με τον αφινικό μετασχηματισμό, με τη διαφορά ότι η επιφάνεια στην οποία αναφερόμαστε είναι τρίτου βαθμού οπότε μπορεί να προσαρμοστεί σε περισσότερα σημεία από τον αφινικό.

Στη συνέχεια στοχεύτηκαν τα σημεία ελέγχου και υπολογίστηκε το σφάλμα αυτών κατά τον άξονα X και Y για τις τρεις ομάδες.

<b>ΟΜΑΔΑ Β</b>		<b>ΟΜΑΔΑ Γ</b>		<b>ΟΜΑΔΑ Δ</b>	
<b>Σφάλμα στον X (m)</b>	<b>Σφάλμα στον Y (m)</b>	<b>Σφάλμα στον X (m)</b>	<b>Σφάλμα στον Y (m)</b>	<b>Σφάλμα στον X (m)</b>	<b>Σφάλμα στον Y (m)</b>
21.333	21.322	12.698	14.796	11.755	11.686
71.109%	71.073%	42.320%	49.300%	39.180%	38.954%

Πίνακας 17: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για τις Ομάδες Β, Γ και Δ

Από τον πίνακα 17 γίνεται φανερό ότι με την αύξηση του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών, υπάρχει σαφής μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και στους δύο άξονες, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Ακολούθως τα σημεία ελέγχου χωρίζονται στις δύο υψομετρικές ζώνες για να εξεταστεί η υψομετρική κατανομή των σφαλμάτων.

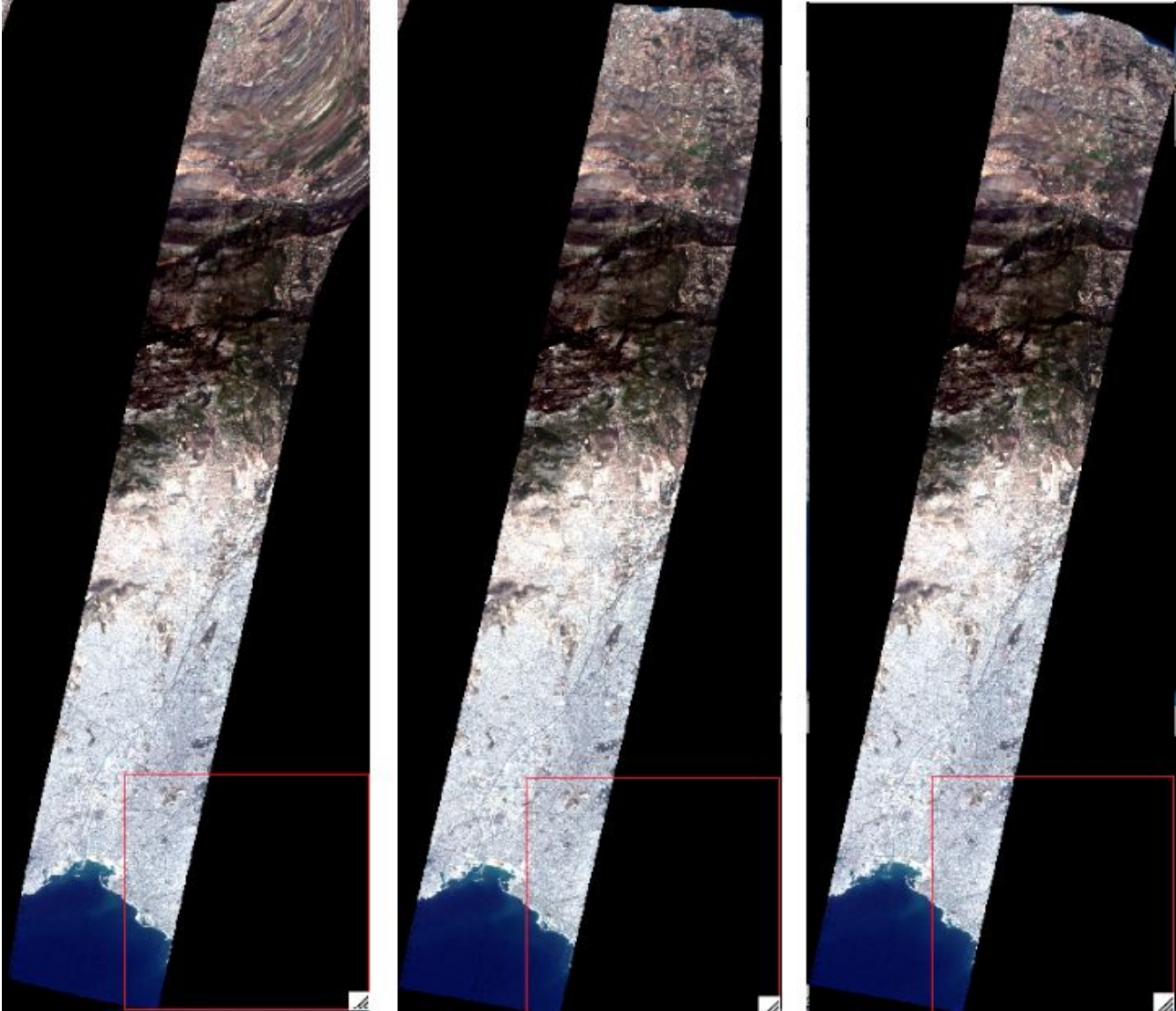
	<b>ΟΜΑΔΑ Β</b>		<b>ΟΜΑΔΑ Γ</b>		<b>ΟΜΑΔΑ Δ</b>	
	<b>RMS X</b>	<b>RMS Y</b>	<b>RMS X</b>	<b>RMS Y</b>	<b>RMS X</b>	<b>RMS Y</b>
<b>Υψομετρική Ζώνη έως 150 m</b>	17.379	20.573	13.471	16.728	11.470	12.335
	0.579	0.686	0.449	0.558	0.382	0.411
<b>Υψομετρική Ζώνη πάνω από 150 m</b>	28.361	24.038	12.113	11.709	13.047	11.276
	0.945	0.801	0.404	0.390	0.435	0.379

Πίνακας 18: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων στις Ομάδες Β, Γ και Δ

Παρατηρείται ότι με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών έχουμε αύξηση της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης. Δηλαδή έχουν προσδιοριστεί καλύτεροι συντελεστές για το πολυώνυμο, οπότε και προσαρμόζεται καλύτερα στην επιφάνεια της απεικόνισης. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού με την αύξηση του αριθμού των σημείων δεσμεύεται ο αλγόριθμος να "περάσει" το δυνατόν πλησιέστερα (αρχή της MET) από τα στοχευθέντα σημεία. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μη γίνεται να παραμορφωθεί η απεικόνιση, όπως γινόταν στα λιγότερα σημεία, με

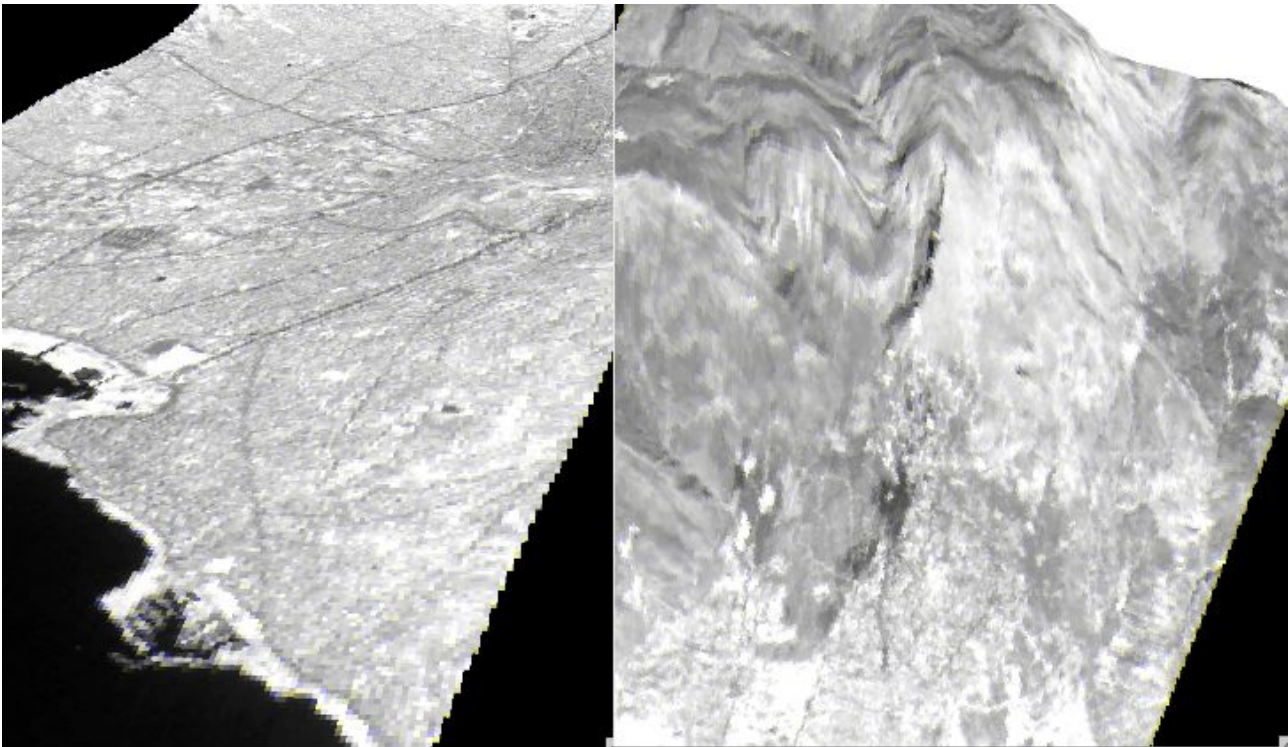
αποκορύφωμα την απεικόνιση με τα 18 φωτοσταθερά.

Με την ανάλυση των σφαλμάτων παρουσιάζονται οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις, όπως αυτές υλοποιήθηκαν πάνω στο προβολικό σύστημα UTM.



Εικόνα 61: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις με Φωτοσταθερά από τις Ομάδες Β, Γ και Δ  
Ομάδα Β (αριστερά) Ομάδα Γ (μέση) Ομάδα Δ (δεξιά)

Από το αποτέλεσμα παρατηρείται ότι η περιοχή εκτός των φωτοσταθερών στην περίπτωση της ομάδας Β παραμορφώνεται. Αυξάνοντας τον αριθμό των σημείων βελτιώνεται η ακρίβεια της γεωαναφερμένης απεικόνισης στην περιοχή εκτός του χαρτογραφικού υποβάθρου. Επειδή σε εκείνη την περιοχή δε διατίθεται χαρτογραφική πληροφορία, δε γίνεται να εξακριβωθεί η ακρίβεια με την οποία επιτεύχθηκε η ορθοαναγωγή. Στη συνέχεια για τις απεικονίσεις των ομάδων Γ και Δ, πραγματοποιείται η μεταξύ τους επίθεση. Σκοπός είναι να εξακριβωθεί κατά πόσον η ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών, επιφέρει αισθητή μεταβολή των θέσεων των εικονοστοιχείων.



Εικόνα 62: Προοπτική Απεικόνιση των Σχετικών Μετατοπίσεων Μεταξύ Ομάδας Γ και Δ

Από την εξέταση της προοπτικής απεικόνισης, παρατηρείται πολύ μικρή διαφοροποίηση στις γεωαναφερμένες απεικονίσεις. Πρακτικά όποιες διαφορές εντοπίζονται, δηλαδή μεμονωμένα σημεία ομοιόμορφα στην έκταση της σκηνής, οφείλονται στο μεγαλύτερο βαθμό από την αναδόμηση του εγγύτερου γείτονα. Έτσι η αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών πέρα από τον αριθμό 50 δεν έχει αισθητή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

### 6.5 Ορθοαναγωγή με *Delaunay Triangulation*

Ο τελευταίος αλγόριθμος που εφαρμόστηκε για την ορθοαναγωγή της Υπερφασματικής απεικόνισης είναι ο *Delaunay Triangulation*. Αυτός λειτουργεί σωστά μόνο με πολλά φωτοσταθερά, καθώς πραγματοποιεί παρεμβολές μεταξύ των αυτών. Αρχικά εφαρμόστηκε σε όλες τις ομάδες φωτοσταθερών. Όμως επειδή στις Β και Γ είχε αποκοπεί μεγάλο τμήμα της απεικόνισης, δεν ήταν δυνατόν να γίνει στόχευση σημείων ελέγχου για τον προσδιορισμό της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης. Η αποκοπή τμήματος της εικόνας έχει να κάνει με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου και δεν γνωστοποιείται από τους κατασκευαστές η μέθοδος με την οποία γίνεται αυτή.

Έτσι ο έλεγχος περιορίστηκε στις ομάδες Β και Δ. Στοχεύτηκαν τα σημεία ελέγχου σε αυτές τις γεωαναφερμένες απεικονίσεις και συντάχθηκε ο παρακάτω πίνακας.

ΟΜΑΔΑ Β		ΟΜΑΔΑ Δ	
Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)	Σφάλμα στον X (m)	Σφάλμα στον Y (m)
12.749	13.285	12.878	11.854

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

0.425	0.443	0.429	0.395
-------	-------	-------	-------

Πίνακας 19: Σφάλματα Σημείων Ελέγχου για τις Ομάδες Β και Δ

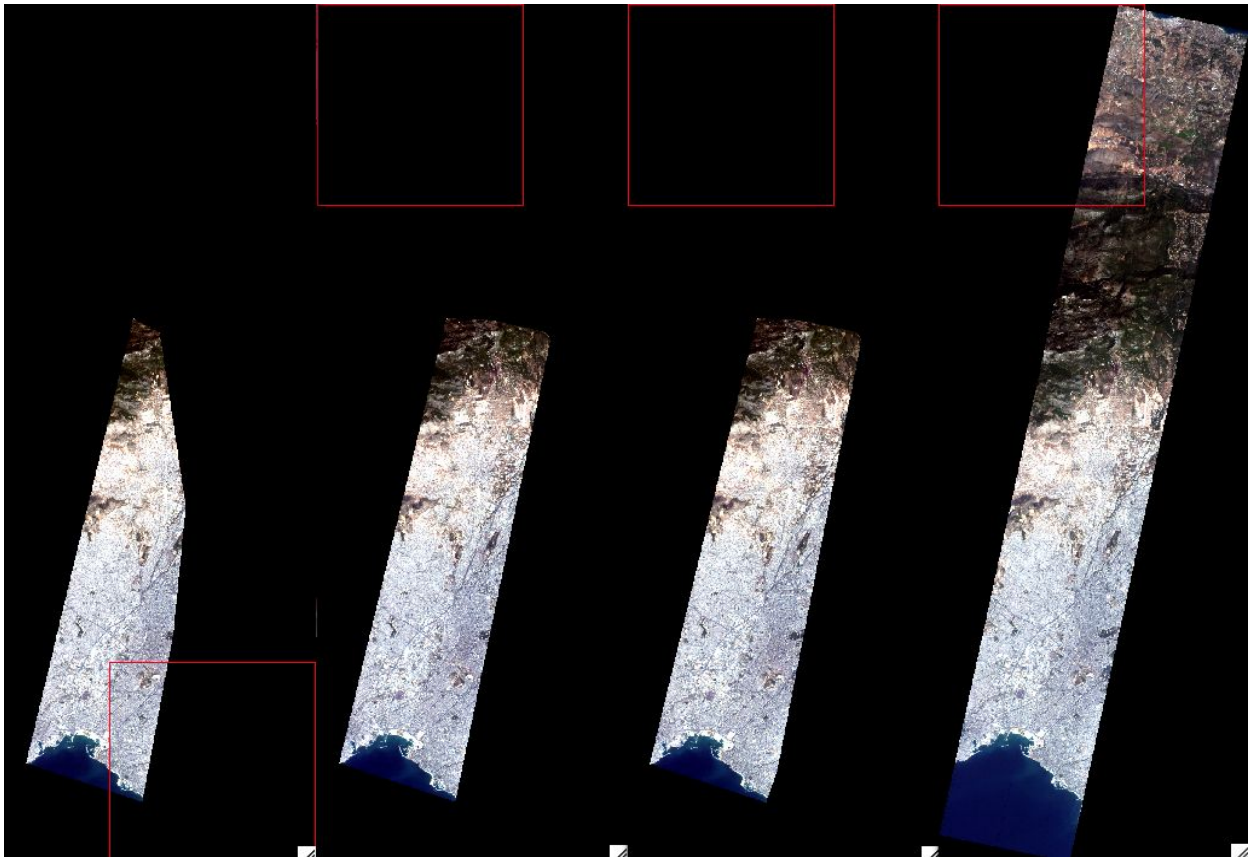
Από τον πίνακα 19 φαίνεται ότι παρόλο τη μεγάλη διαφορά στον αριθμό των φωτοσταθερών, η συνολική ακρίβεια παραμένει πρακτικά σταθερή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της σχέσης που έχουν ο τύπος της παρεμβολής που γίνεται μεταξύ των σημείων, η πυκνότητα και η κατανομή αυτών στην απεικόνιση και η μορφή του αναγλύφου. Έτσι φαίνεται ότι με το συγκεκριμένο ανάγλυφο, το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής και τη συγκεκριμένη κατανομή φωτοσταθερών, δεν υπάρχει πρακτική επίδραση στα σημεία ελέγχου. Όμως αυτό δεν είναι απαραίτητο ότι θα συμβαίνει και σε μία άλλη απεικόνιση.

Συνέχεια στην ανάλυση των σφαλμάτων ακολουθεί η διερεύνηση της υψομετρικής κατανομής αυτών. Έτσι συντάχθηκε ο κατάλληλος πίνακας.

	ΟΜΑΔΑ Β		ΟΜΑΔΑ Δ	
	RMS X	RMS Y	RMS X	RMS Y
<b>Υψομετρική Ζώνη έως 150 m</b>	15.569	13.658	15.335	13.156
	0.519	0.455	0.511	0.439
<b>Υψομετρική Ζώνη πάνω από 150 m</b>	6.118	13.529	7.796	10.007
	0.204	0.451	0.260	0.334

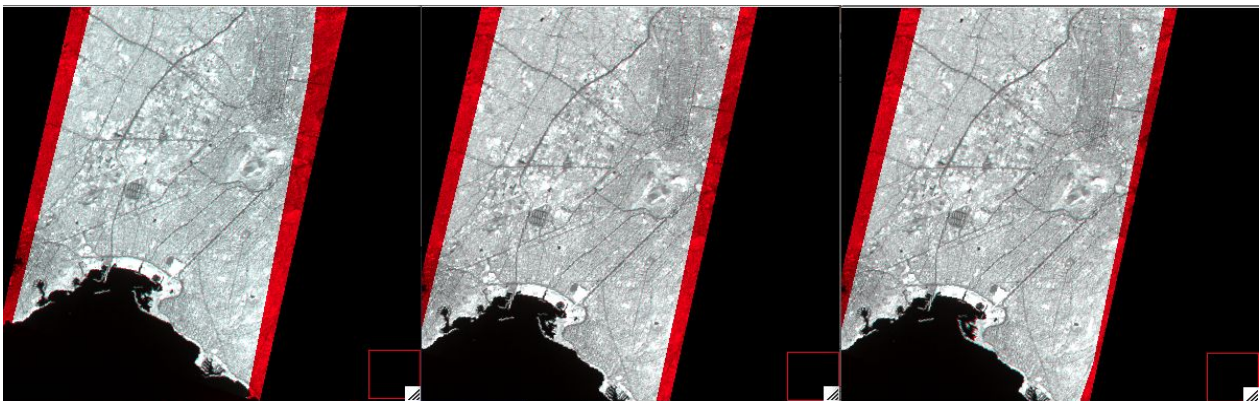
Πίνακας 20: Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων στις Ομάδες Β και Δ

Όπως ήταν αναμενόμενο, ούτε εδώ υπάρχει ουσιαστική μεταβολή των σφαλμάτων στις υψομετρικές ζώνες. Στη συνέχεια παρατίθενται όλες οι γεωαναφερόμενες απεικονίσεις με τον παρόντα αλγόριθμο για όλες τις ομάδες φωτοσταθερών.



Εικόνα 63: Γεωαναφερμένες Απεικονίσεις με τον Delauany Triangulation  
Ομάδα Α Ομάδα Β Ομάδα Γ Ομάδα Δ

Από την εικόνα 64 φαίνεται ότι δεν έχουν παραμορφωθεί οι απεικονίσεις, απλώς τους έχει αφαιρεθεί τμήμα τους. Προφανώς κάτι τέτοιο είναι σημαντικό μειονέκτημα του αλγορίθμου και για αυτό αποφεύγεται η χρήση του. Όμως αξίζει να εξεταστεί κατά πόσο τα κοινά τμήματα έχουν σχετικές μετατοπίσεις, αφού δεν υπάρχει παραμόρφωση στα κοινά τμήματα και η ακρίβεια με την οποία ορθοανάγονται είναι κατά φαινόμενο ίδια. Έτσι με βάση την γεωαναφερμένη απεικόνιση της ομάδας Δ, γίνεται η σύγκριση των υπολοίπων για σχετικές μετατοπίσεις.

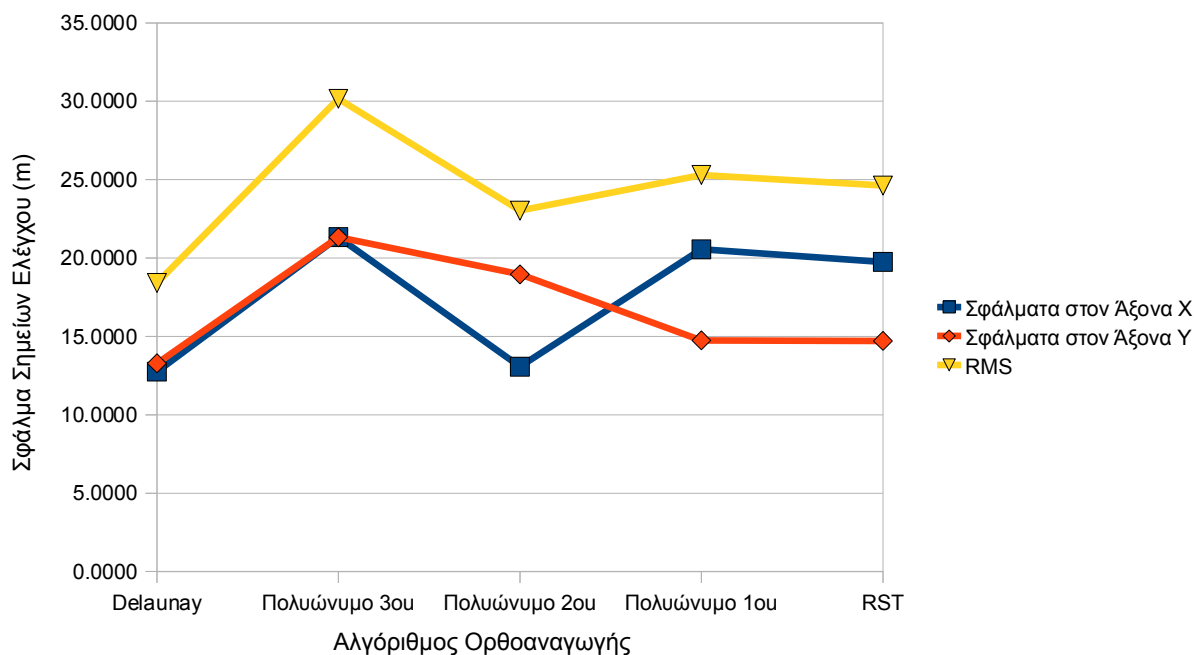


Εικόνα 65: Σχετικές Μετατοπίσεις των Γεωαναφερμένων Απεικονίσεων με βάση την Ομάδα Δ  
Ομάδα Α με Δ Ομάδα Β με Δ Ομάδα Γ με Δ

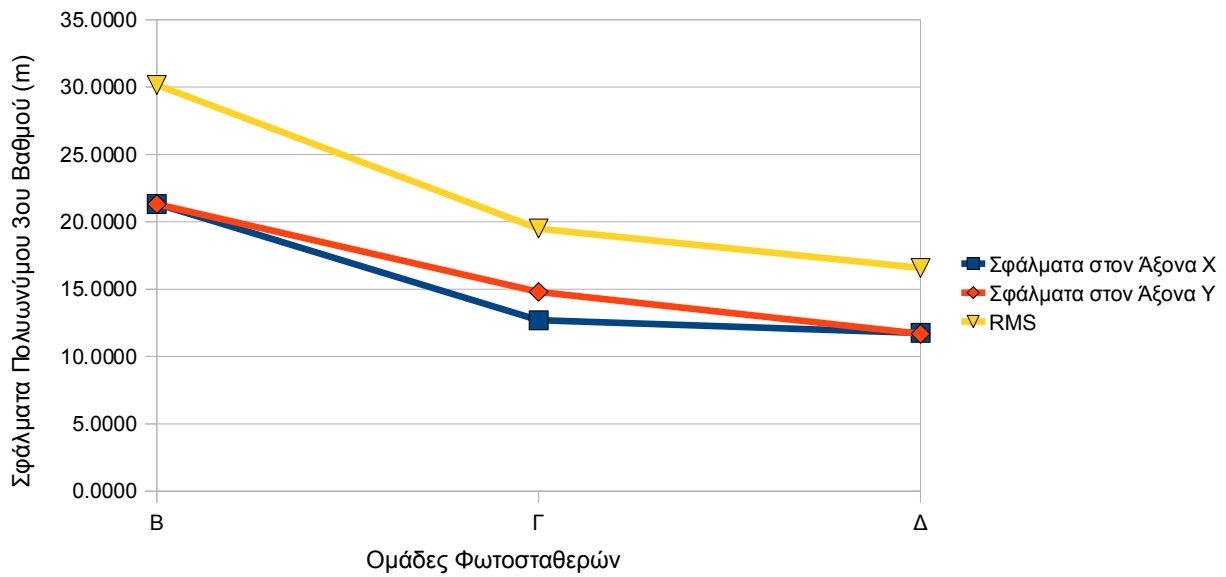
Παρατηρείται πολύ μικρή διαφοροποίηση στο κοινό τμήμα των απεικονίσεων. Οι περισσότερες μεταβολές σε αυτό το τμήμα οφείλονται στην αναδόμηση του εγγύτερου γείτονα. Είναι λοιπόν φανερό ότι η ακρίβεια σε αυτό το κομμάτι μεταβάλλεται ελάχιστα με την μεταβολή του αριθμού των φωτοσταθερών. Όμως λόγω των αποκοπών και της απρόβλεπτης τους συμπεριφοράς (σχετικά με ποιο κριτήριο γίνεται η αποκοπή) καθίσταται δύσχρηστος, οπότε η σταθερά καλή ακρίβεια του αποτελέσματος παραμένει αναξιοποίητη.

## 6.6 Συγκριτικό Μεταξύ των Αποτελεσμάτων των Ορθοαναγωγών των Υπερφασματικών Απεικονίσεων

Με το πέρας της εφαρμογής όλων των αλγορίθμων πραγματοποιείται μία συνολική σύγκριση μεταξύ αυτών, σχετικά με τις ακρίβειές τους. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων να επιλεγεί μία για την αξιολόγηση της συμπροσαρμογής της με τα SAR. Με γνώμονα αυτό σε πρώτο στάδιο γίνεται σύγκριση των ακριβειών από τα σημεία ελέγχου για την ομάδα Β. Σε αυτή την ομάδα έχουν πραγματοποιηθεί έλεγχοι για όλους αλγορίθμους.

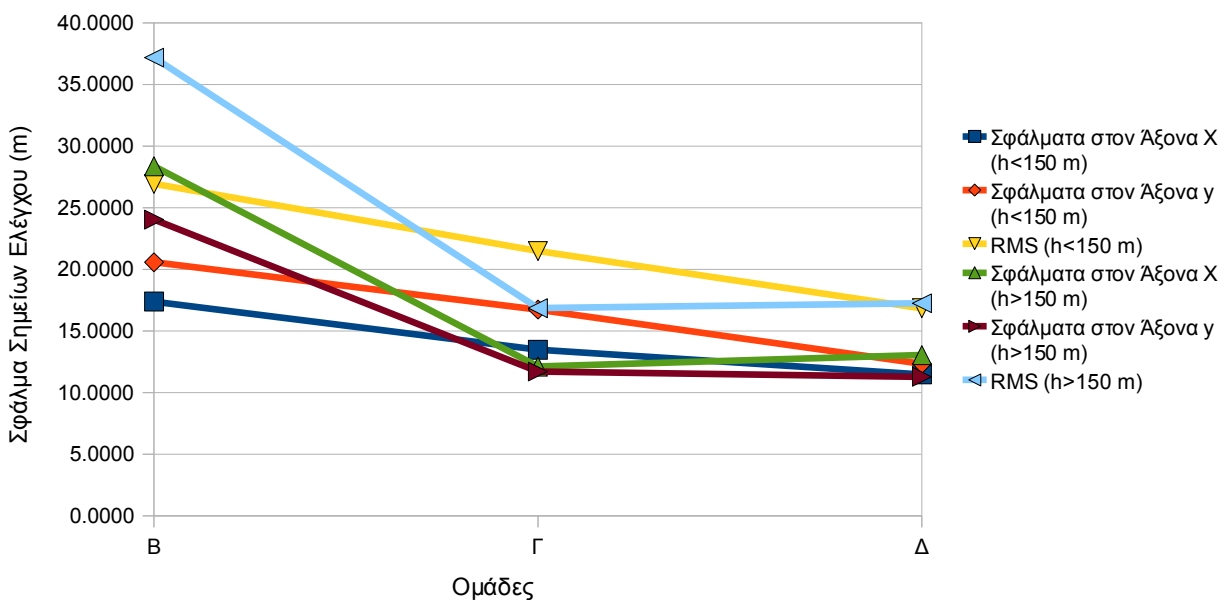


Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι με τα 30 φωτοσταθερά, ο αλγόριθμος Delaunay Triangulation παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα, τόσο στον κάθε άξονα ξεχωριστά, όσο και στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα και των δύο αξόνων. Όμως επειδή είναι ασταθής αλγόριθμός, δεν επιλέγεται για τη συμπροσαρμογή με τα SAR. Στη συνέχεια έχοντας στοχεύσει 4 ομάδες φωτοσταθερών, γίνεται έλεγχος της μεταβολής της ακρίβειας των γεωαναφερμένων απεικονίσεων για τις ομάδες αυτές. Έτσι για το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Γίνεται φανερό ότι με την αύξηση των χρησιμοποιούμενων φωτοσταθερών, η ακρίβεια του αλγορίθμου αυξάνεται, αγγίζοντας την βέλτιστη στην ομάδα Δ. Βέβαια το μειονέκτημα στη προκειμένη περίπτωση είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών (63). Συνέχεια στην ανάλυση των σφαλμάτων είναι η υψομετρική κατανομή των σφαλμάτων στο πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού. Η επικέντρωση σε αυτόν τον αλγόριθμο έγκειται στο γεγονός ότι τελικά έχει την καλύτερη μέση ακρίβεια (στην ομάδα Δ) μεταξύ όλων των εφαρμοσμένων αλγορίθμων.

### Υψομετρική Κατανομή Σφαλμάτων 3ου Βαθμού Πολυώνυμο



Στο παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της ομάδας Δ στις δύο υψομετρικές κατηγορίες είναι το ελάχιστο. Έτσι με βάση όλη την παραπάνω σύγκριση θα



## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

---

χρησιμοποιηθεί το πολυώνυμο 3<sup>ο</sup> βαθμού με την ομάδα  $\Delta$  για την αξιολόγηση της συμπροσαρμογής των δεδομένων.

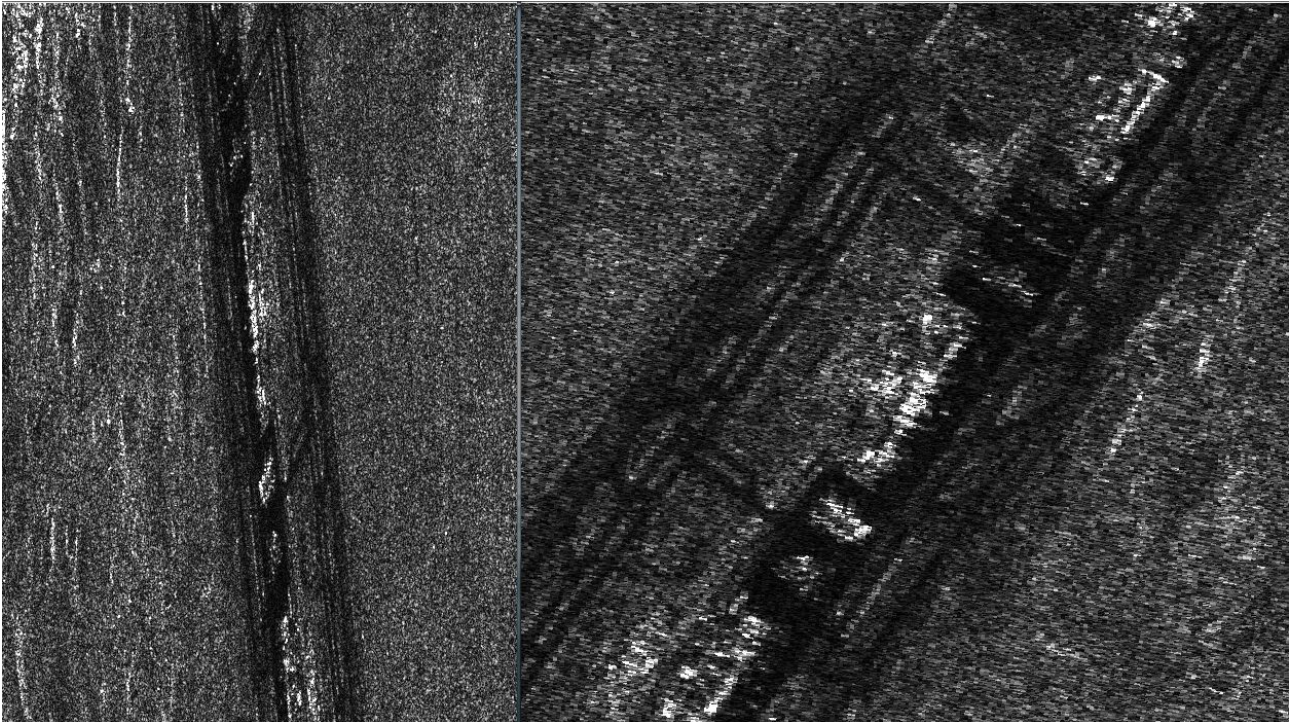
## **7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ**

## **7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ**

### ***7.1 Έμμεση Ορθοαναγωγή ENVISAT Απεικονίσεων***

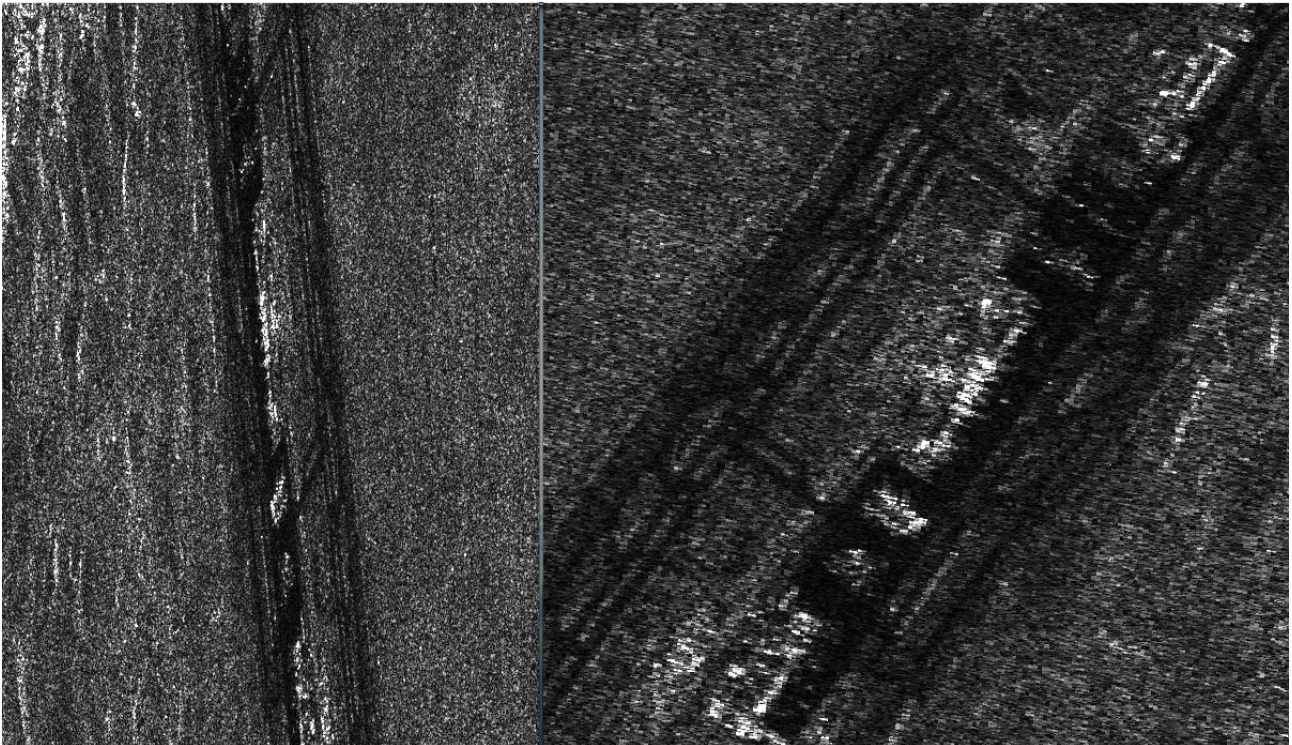
Οι απεικονίσεις ENVISAT ορθοανάχθηκαν με το φυσικό μοντέλο του δέκτη με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Παρήχθησαν τέσσερις διαφορετικές γεωαναφερμένες απεικονίσεις. Σκοπός είναι εκτός από την ορθοαναγωγή της απεικόνισης και η διερεύνηση της μεταβολής της ακρίβειας με την αλλαγή ορισμένων βασικών παραμέτρων. Έτσι οι τρεις από τις τέσσερις έγιναν για το σύνολο της Αττικής, ενώ η τελευταία περιορίστηκε στη περιοχή της Πεντέλης. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το ΨΜΕ από τον ASTER, με τιμές γεωμετρικού υψομέτρου. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ΨΜΕ, αλλά με τιμές ορθομετρικού υψομέτρου. Η απόλυτη διαφορά των δύο υψομέτρων είναι κατά μέσο όρο 39 μέτρα στην περιοχή της Αττικής. Τέλος στην ίδια έκταση εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος, χωρίς υψομετρική πληροφορία. Ειδικότερα ορίστηκε για ολόκληρη την επιφάνεια γεωμετρικό υψόμετρο ίσο με το μηδέν.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριών αυτών περιπτώσεων και στη συνέχεια γίνεται η αξιολόγησή τους.



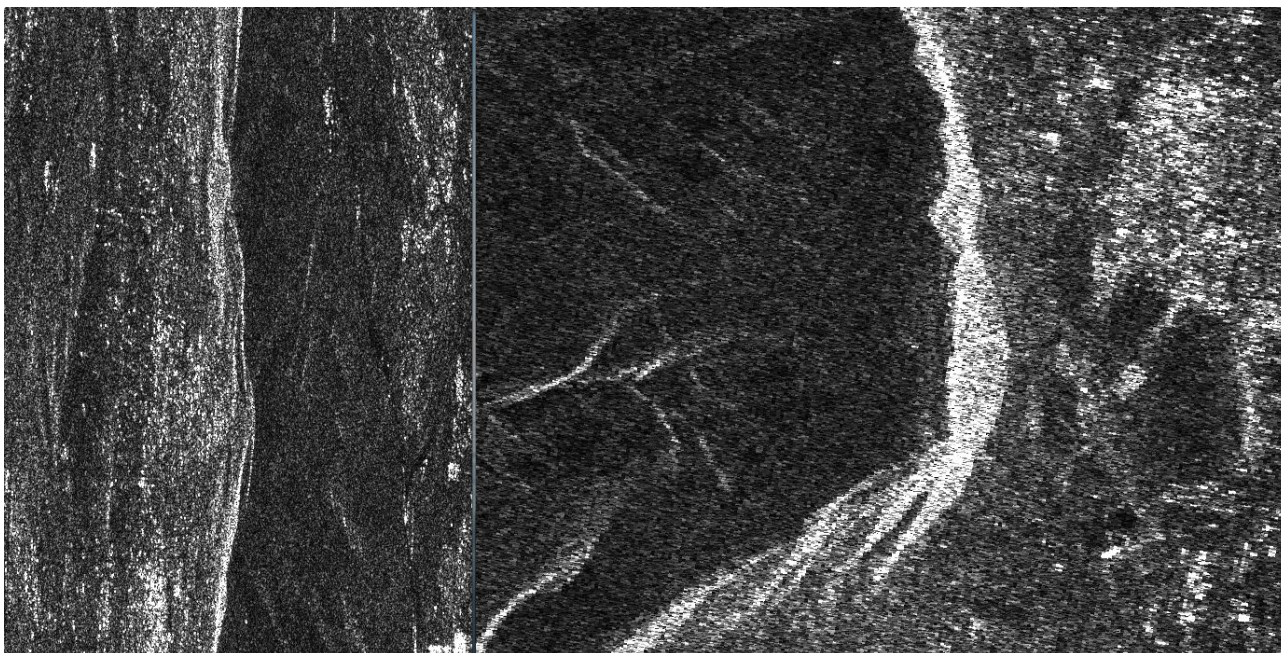
Εικόνα 66: Τμήμα Ορθοδιορθωμένης ENVISAT Απεικόνισης με Γεωμετρικό Υψόμετρο

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται τμήμα της γεωαναφερμένης απεικόνισης σε αντιπαράθεση με την αρχική μη γεωμετρικά διορθωμένη απεικόνιση (αριστερά). Εδώ γίνεται φανερή η διόρθωση της πλάγιας γεωμετρίας λήψης σε ορθή προβολή. Το απεικονιζόμενο τμήμα είναι περιοχή του αεροδρομίου Ελ. Βενιζέλος.



Εικόνα 67: Τμήμα Ορθοδιορθωμένης ENVISAT Απεικόνισης με Ορθομετρικό Υψόμετρο

Στην παραπάνω εικόνα παρατίθεται τμήμα της ορθοαναγμένης ENVISAT απεικόνισης με χρήση του ορθομετρικού υψόμετρου σε αντιπαράθεση με την αρχική μη γεωμετρικά διορθωμένη απεικόνιση (αριστερά). Το τμήμα που απεικονίζεται είναι το αεροδρόμιο Ελ. Βενιζέλος. Γεωμετρικά φαίνεται ότι έχει διορθωθεί σωστά, αν και χρησιμοποιήθηκε το ορθομετρικό υψόμετρο. Η διαφορά που έχει αυτή η απεικόνιση με την προηγούμενη είναι στις χαρτογραφικές συντεταγμένες. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του ορθομετρικού υψόμετρου υπάρχει ένα συστηματικό σφάλμα στις συντεταγμένες σε σχέση με την απεικόνιση που παρήχθη με βάση το γεωμετρικό υψόμετρο. Η διεξοδικότερη ανάλυση πραγματοποιείται παρακάτω.



Εικόνα 68: Τμήμα Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης Χωρίς Χρήση Υψομετρικής Πληροφορίας

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται τμήμα της γεωαναφερμένης ENVISAT απεικόνισης (χωρίς υψομετρική πληροφορία) στην περιοχή του Υμηττού σε αντιπαράθεση με την αρχική μη γεωμετρικά διορθωμένη απεικόνιση (αριστερά). Σε αυτή την περίπτωση η απεικόνιση έχει διορθωθεί εν μέρει γεωμετρικά. Εξαιτίας της έλλειψης υψομετρικής πληροφορίας, η απεικόνιση διορθώνεται από τη γεωμετρία της πλάγιας λήψης, αλλά με υψομετρικό επίπεδο αναφοράς το μηδέν. Έτσι τα σφάλματα στην απεικόνιση κυμαίνονται, ανάλογα με την τιμή του γεωμετρικού υψόμετρου σε κάθε θέση. Οι ίδιες διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο είδη τροχιάς. Όμως επειδή δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερες διαφορές στις τελικές απεικονίσεις παρουσιάστηκαν μόνο τα αποτελέσματα που προέρχονται από τα στοιχεία ακριβούς τροχιάς.

Συνοπτικά παρουσιάζεται ο πίνακας των δεδομένων εισαγωγής στο πρόγραμμα που ορθοαναγεί SAR απεικονίσεις για τις τρεις περιπτώσεις Α (με γεωμετρικό υψόμετρο), Β (με ορθομετρικό υψόμετρο) και Γ (χωρίς υψομετρική πληροφορία):

Όνομα Παραμέτρου	Τιμή	Μονάδες
------------------	------	---------

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	
Βήμα Καννάβου ΨΜΕ	30	30	N/A	Μέτρα
Άνω Αριστερό Όριο ΨΜΕ (X)	749450.30	749450.30	N/A	Μέτρα
Άνω Αριστερό Όριο ΨΜΕ (Y)	4217991.20	4217991.20	N/A	Μέτρα
Μήκος Κύματος SAR	0.056235642			Μέτρα
Χρονική Στιγμή 1 <sup>η</sup> Θέσης Δορυφόρου (t <sub>1</sub> )	9.861731			Δευτερόλεπτα
Χρονική Στιγμή 2 <sup>η</sup> Θέσης Δορυφόρου (t <sub>2</sub> )	26.141533			Δευτερόλεπτα
X Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	5052923.48			Μέτρα
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	2614570.49			Μέτρα
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	4345624.55			Μέτρα
V <sub>X</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	4791.72231			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
V <sub>Y</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	440.35096			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
V <sub>Z</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>1</sub>	-5820.17144			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
X Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	5130213.14			Μέτρα
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	2621272.80			Μέτρα
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	4250251.35			Μέτρα
V <sub>X</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	4703.187			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
V <sub>Y</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	383.05297			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
V <sub>Z</sub> Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την t <sub>2</sub>	-5896.29912			Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
Βήμα Ορθο – διορθωμένης Απεικόνισης	5			Μέτρα
Απόσταση Πρώτου Σημείου με Δορυφόρο	827355.4787			Μέτρα
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στις Πλάγιες Αποστάσεις	7.080397			Μέτρα
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στην Αζιμουθιακή διεύθυνση	4.046786			Μέτρα
Μεγάλος Ημιάξονας Ελλειψοειδούς	6378137.0			Μέτρα
Μικρός Ημιάξονας Ελλειψοειδούς	6356752.31414			Μέτρα

Πίνακας 21: Παράμετροι Εισαγωγής στο Πρόγραμμα Ορθοαναγωγών

Στη συνέχεια πραγματοποιείται έλεγχος της ακρίβειας των γεωαναφερμένων απεικονίσεων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο αυτό είναι δύο. Οι πρώτος είναι με στόχευση

σημείων ελέγχου, όπως και στην περίπτωση των Υπερφασματικών απεικονίσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της φύσης των SAR απεικονίσεων, ο αριθμός των σημείων ελέγχου είναι περιορισμένος. Στοχεύτηκαν χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία ήταν ξεκάθαρα τόσο στην ορθο – SPOT όσο και στις γεωαναφερόμενες SAR απεικονίσεις. Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της ακρίβειας των γεωαναφερόμενων απεικονίσεων είναι με τον θεωρητικό υπολογισμό του σφάλματος, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο “Ανάλυση Σφαλμάτων στη Διαδικασία Ορθοαναγωγής Δ.Ψ.Τ.Α.”.

Στην πρώτη περίπτωση ελέγχων στοχεύτηκαν 7 σημεία ελέγχου με τις ακόλουθες συντεταγμένες στην UTM 34°:

Αριθμός Σημείου Ελέγχου	X Χαρτογραφική Συντεταγμένη	Y Χαρτογραφική Συντεταγμένη
1	758533.7693	4203485.4060
2	735463.7692	4201925.4060
3	737623.7692	4199370.4060
4	761663.7692	4219865.4060
5	742973.7692	4220870.4060
6	740398.7692	4208355.4060
7	745273.7692	4216610.4060

Πίνακας 22: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου SAR Απεικονίσεων

Με το πέρας της στόχευσης των σημείων αυτών και στις τρεις γεωαναφερόμενες SAR απεικονίσεις, υπολογίστηκαν τα σφάλματα στον άξονα X, Y και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS (από το αντίστοιχο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε). Έτσι για τις τρεις περιπτώσεις Α, Β και Γ προκύπτουν τα ακόλουθα:

Περιπτώσεις	Σφάλμα στον Άξονα X (m)	Σφάλμα στον Άξονα Y (m)	RMS (m)
<b>A</b>	14.3274	16.7680	22.0554
<b>B</b>	93.4237	31.3502	98.5435
<b>Γ</b>	390.9910	68.8622	397.0090

Πίνακας 23: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου στις SAR Απεικονίσεις για τις Α, Β και Γ Περιπτώσεις

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι η ποιότητα των γεωαναφερόμενων SAR απεικονίσεων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την διατιθέμενη υψομετρική πληροφορία. Στην περίπτωση Γ ήταν αναμενόμενο να υπάρχουν τόσο μεγάλα σφάλματα, αφού τα υψόμετρα που τοποθετήθηκαν απήχαν πολύ από τα πραγματικά. Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις Α και Β φαίνεται ότι το είδος του υψομέτρου που χρησιμοποιείται είναι μεγάλης σημασίας. Ειδικότερα για διαφορά τιμών 39 μέτρα (υψόμετρο γεωειδούς) το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αυξάνεται κατά 76.5 μέτρα. Δηλαδή το σφάλμα που προκύπτει στις χαρτογραφικές συντεταγμένες είναι σχεδόν διπλάσιο του σφάλματος του γεωμετρικού υψομέτρου. Η κατανομή των σφαλμάτων σε ζώνες υψομέτρου δεν πραγματοποιήθηκε λόγω του πολύ μικρού αριθμού σημείων ελέγχου.

Ακολούθως υπολογίζονται τα σφάλματα των γεωαναφερόμενων απεικονίσεων, όπως

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

προκύπτουν από την θεωρητική ανάλυση. Πρώτο στάδιο αυτής της διαδικασίας είναι ο ορισμός των σφαλμάτων των παραμέτρων της ορθοαναγωγής. Έτσι για κάθε παράμετρο ορίστηκε το σφάλμα, που έχουν στις περιπτώσεις Α, Β και Γ.

Όνομα Παραμέτρου	Περιπτώσεις Ορθοηγημένων SAR Απεικονίσεων Σφάλματα Παραμέτρων		
	A	B	Γ
Χρόνος Πρώτης Γραμμής Δεδομένων	0.000001 sec	0.000001 sec	0.000001 sec
Χρόνος Τελευταίας Γραμμής Δεδομένων	0.000001 sec	0.000001 sec	0.000001 sec
X Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m	1 m	1 m
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m	1 m	1 m
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m	1 m	1 m
X Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.1 m/sec	0.1 m/sec	0.1 m/sec
Y Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.1 m/sec	0.1 m/sec	0.1 m/sec
Z Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.1 m/sec	0.1 m/sec	0.1 m/sec
Γεωμετρικό Υψόμετρο	7 m	46 m	150 m
Συχνότητα $F_{DC}$	0 Hz	0 Hz	0 Hz

Πίνακας 24: Σφάλματα Παραμέτρων Ορθοαναγωγής

Αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα που προκύπτει από την παρεμβολή των θέσεων και των ταχυτήτων του δορυφόρου για κάθε γραμμή δεδομένων. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο διεξοδικά. Έτσι με βάση αυτή τη μέθοδο προκύπτει ότι το μέγιστο σφάλμα που θα έχουν οι παρεμβληθείσες θέσεις θα είναι 5.1 μέτρα. Αντίστοιχα για τις συνιστώσες της ταχύτητας προκύπτει ότι θα έχουν μέγιστο σφάλμα 0.51 m/sec. Το σφάλμα των γεωκεντρικών θέσεων των σημείων του εδάφους, λόγω του σφάλματος στο γεωμετρικό υψόμετρο, υπολογίζεται από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις εξισώσεις υπολογισμού των συντεταγμένων. Έτσι για κάθε συνιστώσα στις περιπτώσεις Α, Β και Γ τα μέσα σφάλματα είναι τα ακόλουθα:

Περιπτώσεις Ορθοαναγωγών	Σφάλμα X Συνιστώσας (m)	Σφάλμα Y Συνιστώσας (m)	Σφάλμα Z Συνιστώσας (m)
A	5.038	2.231	3.635
B	33.108	14.659	23.884
Γ	107.961	47.803	77.882



Πίνακας 25: Μέσο Σφάλμα Συνιστώσών Γεωκεντρικών Συντεταγμένων Σημείων Εδάφους

Αφού προσδιορίστηκαν τα μέσα σφάλματα στις συνιστώσες των συντεταγμένων των σημείων του εδάφους σε κάθε περίπτωση ορθοαναγωγής, υπολογίζεται στη συνέχεια το σφάλμα που θα έχει η επίλυση της εξίσωσης Doppler σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Το σφάλμα που θα έχει η συχνότητα Doppler υπολογίζεται μέσω του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων για τις δεδομένες μεταβλητότητες. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Περιπτώσεις Ορθοαναγωγών	Σφάλμα Εξίσωσης Doppler (Hz)
<b>A</b>	24.3850
<b>B</b>	159.3690
<b>Γ</b>	519.6220

Πίνακας 26: Μεταδιδόμενο Σφάλμα στην Εξίσωση Doppler για τις Περιπτώσεις A, B και Γ

Έχοντας υπολογίσει το μέσο σφάλμα με το οποίο λύνεται η εξίσωση Doppler για κάθε περίπτωση, υπολογίζονται στη συνέχεια οι αντίστοιχες διαφορές χρόνων. Έτσι για κάθε περίπτωση τα μέσα σφάλματα στον υπολογισμό του αζιμουθιακού χρόνου είναι τα ακόλουθα:

Περιπτώσεις Ορθοαναγωγών	Σφάλμα Αζιμουθιακού Χρόνου (msec)
<b>A</b>	11.6192890
<b>B</b>	75.9391940
<b>Γ</b>	247.5985880

Πίνακας 27: Σφάλμα Αζιμουθιακού Χρόνου

Το σφάλμα στον υπολογισμό του αζιμουθιακού χρόνου συνδυάζεται με το σφάλμα χρονικό καταγραφής των ακριανών γραμμών δεδομένων. Κατά συνέπεια προσδιορίζεται το σφάλμα που θα έχει η αζιμουθιακή συντεταγμένη πάνω στην απεικόνιση. Ύστερα μετατρέπεται αυτό το μέγεθος σε μέτρα στο έδαφος μέσω του μεγέθους του εικονοστοιχείου στην αζιμουθιακή διεύθυνση. Το σφάλμα που θα έχουν οι συντεταγμένες στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης των αποστάσεων, όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Με βάση τα παραπάνω συντάσσεται ο τελικός πίνακας των σφαλμάτων των συντεταγμένων των σημείων στις αντίστοιχες διευθύνσεις.

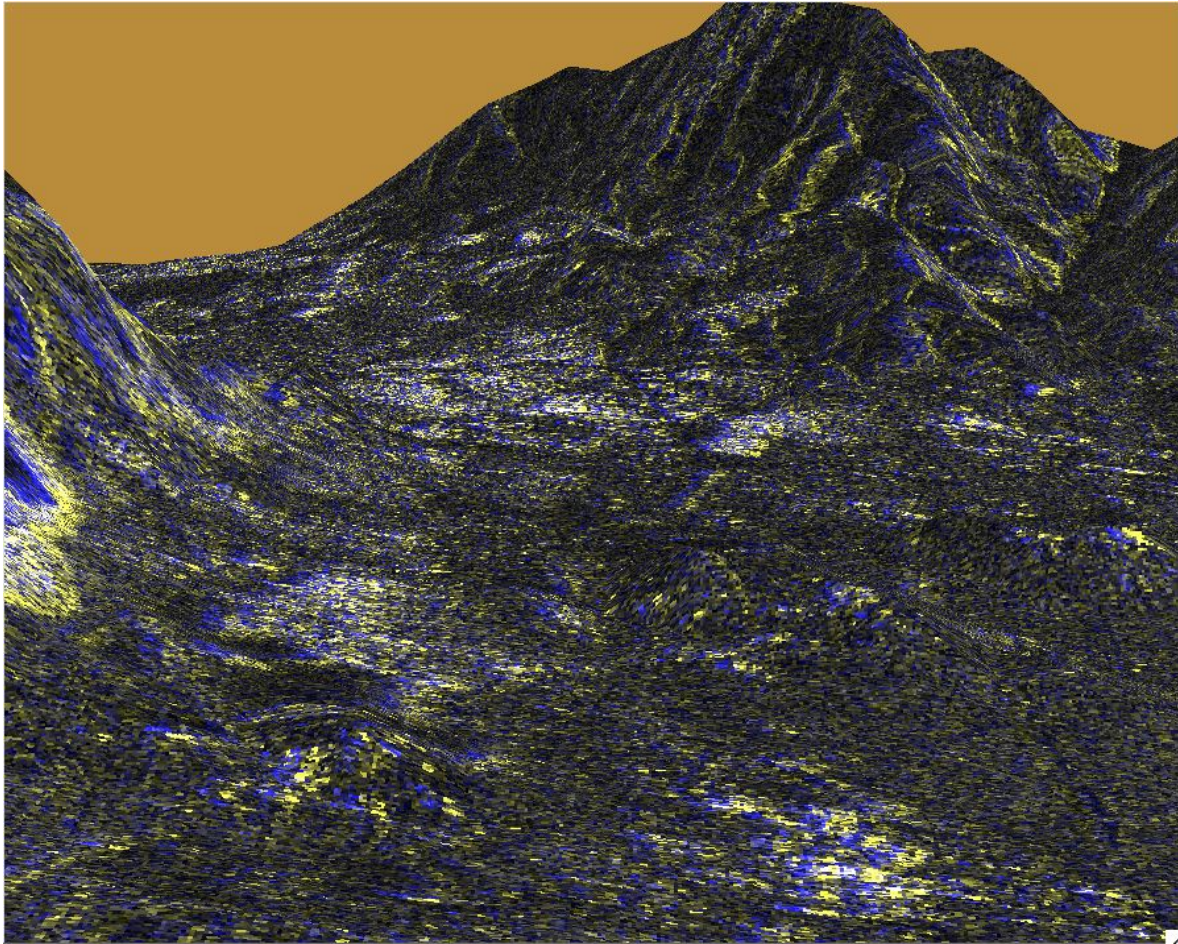
Περιπτώσεις Ορθοαναγωγών	Σφάλματα στη Διεύθυνση των Αζιμουθίων		Σφάλματα στη Διεύθυνση των Πλαγίων Αποστάσεων	
	Στην Απεικόνιση (pixel)	Στο Έδαφος (m)	Στην Απεικόνιση (pixel)	Στο Έδαφος (m)
<b>A</b>	1.081600	4.377004	1.909950	14.905200
<b>B</b>	7.068914	28.606386	6.610789	51.590426
<b>Γ</b>	23.068914	93.270679	19.254932	150.265000

Πίνακας 28: Σφάλματα Γεωαναφερμένων SAR Απεικονίσεων για τις Περιπτώσεις Α, Β και Γ

Τα σφάλματα αυτά αναφέρονται στις διευθύνσεις των αζιμουθίων και των πλαγίων αποστάσεων της απεικόνισης. Τα σφάλματα που έχουν υπολογιστεί από τα σημεία ελέγχου βρίσκονται στη διεύθυνση του χαρτογραφικού συστήματος. Έτσι για να συγκριθούν μεταξύ τους θα πρέπει είτε να μετασχηματιστούν τα πρώτα στις διευθύνσεις του χαρτογραφικού συστήματος ή να υπολογιστεί για αυτά το διάνυσμα που ορίζεται από τις διευθύνσεις των αζιμουθίων και των πλαγίων αποστάσεων. Επιλέχθηκε να υπολογιστεί το διάνυσμα αυτό, οπότε για κάθε περίπτωση προκύπτει: 15.534579 m (Α), 58.990655 m (Β), 176.85867 m (Γ).

Παρατηρώντας τα σφάλματα που έχουν υπολογιστεί με τη θεωρητική μέθοδο και με τη στόχευση σημείων ελέγχου, φαίνεται ότι τα πρώτα είναι συστηματικά μικρότερα. Η διαφορά αυτή οφείλεται σε έναν συνδυασμό παραγόντων. Αρχικά τα θεωρητικά σφάλματα ενδέχεται να είναι μικρότερα από τα πραγματικά. Αυτό αναφέρεται κυρίως στο ΨΜΕ, όπου η ακρίβεια που ορίζεται ότι έχουν τα υψόμετρα είναι θεωρητική. Δεν υπάρχει δέσμευση ότι η ακρίβεια των 7 μέτρων που ισχυρίζονται ότι έχει το ΨΜΕ από τον ASTER, είναι σταθερή σε ολόκληρη την έκταση. Σε ορισμένες περιοχές η υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ είναι μικρότερη. Ακόμα η υπολογισμένη ακρίβεια βρίσκεται ένα στάδιο πριν την αναδόμηση. Το σφάλμα που μεταδίδει η αναδόμηση δε συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της φύσης των SAR απεικονίσεων, ακόμα και τα πιο “ξεκάθαρα” σημεία είναι δύσκολο να ερμηνευτούν σωστά. Έτσι η στόχευση σημείων ελέγχου ενέχει μεγάλα σφάλματα στόχευσης. Να σημειωθεί ότι τα τελευταία μειώνονται δραστικά εάν το σημείο που στοχεύεται είναι ανακλαστήρας. Όμως στις συγκεκριμένες απεικονίσεις δεν υπάρχει τέτοιο σημείο. Ως τελική ακρίβεια γεωαναφερμένων απεικονίσεων θα ληφθεί αυτή των σημείων ελέγχων. Το τελευταίο γίνεται έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι το σφάλμα με το οποίο θα υπολογιστεί η συμπροσαρμογή θα είναι το χειρότερο, οπότε να υπάρχουν μεγαλύτερα επίπεδα αξιοπιστίας.

Ολοκληρώνοντας με αυτές τις περιπτώσεις, πραγματοποιείται μία σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων Α και Β, με σκοπό να φανούν καλύτερα οι διαφορές που έχουν οι γεωαναφερμένες απεικονίσεις. Έτσι παρουσιάζεται μία προοπτική απεικόνιση των επιθετημένων γεωαναφερμένων απεικονίσεων στο ΨΜΕ. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται ευκολότερα αντιληπτές οι σχετικές μετατοπίσεις που έχουν οι απεικονίσεις συναρτήσει της τιμής των υψομέτρων.



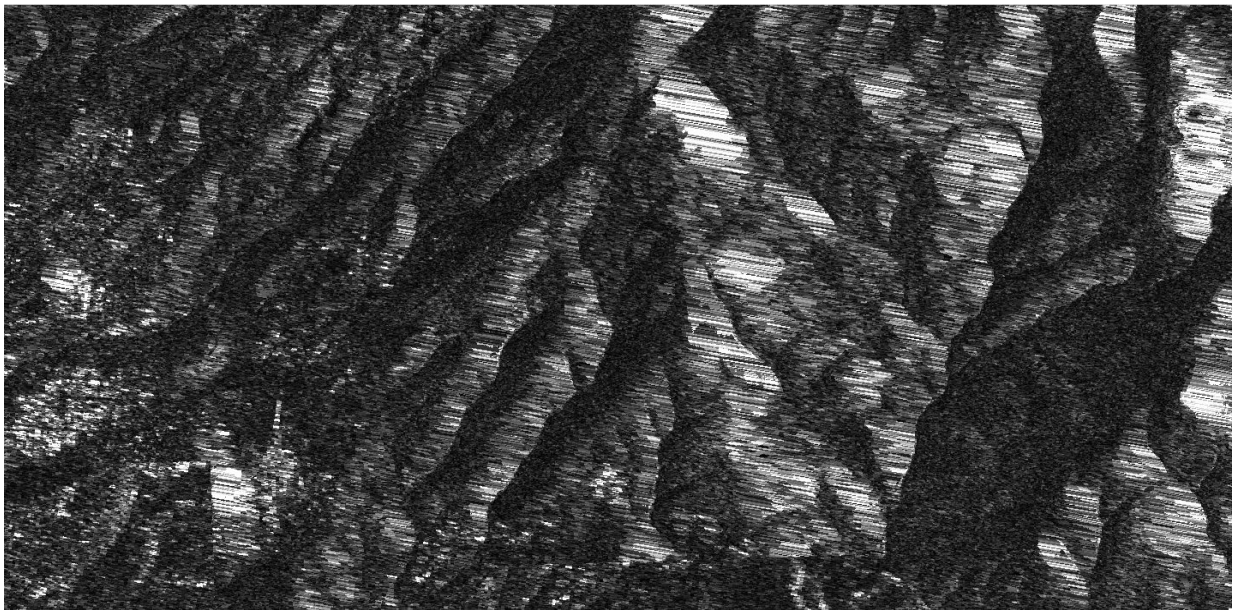
Εικόνα 69: Τμήμα Προοπτικής SAR Απεικόνισης στο ΨΜΕ

Εξετάζοντας την προοπτική απεικόνιση, φαίνεται ότι οι σχετικές μετατοπίσεις είναι ανεπηρέαστες των τιμών των υψομέτρων. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα υψόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την ορθοαναγωγή έχουν μία συστηματική διαφορά 39 μέτρα.

Η τέταρτη γεωαναφερμένη απεικόνιση έγινε στην περιοχή του βουνού της Πεντέλης. Για την περιοχή αυτή χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο ΨΜΕ. Το τελευταίο θεωρείται ότι έχει καλύτερη οριζοντιγραφική και υψομετρική ακρίβεια (5 και 1 μέτρο αντίστοιχα). Έχοντας αποσαφηνιστεί οι επιδράσεις των διαφορετικών υψομέτρων στο τελικό αποτέλεσμα, ορθο – διορθώνεται το τμήμα της απεικόνισης που βρίσκεται στην περιοχή του ΨΜΕ με χρήση των γεωμετρικών υψομέτρων.

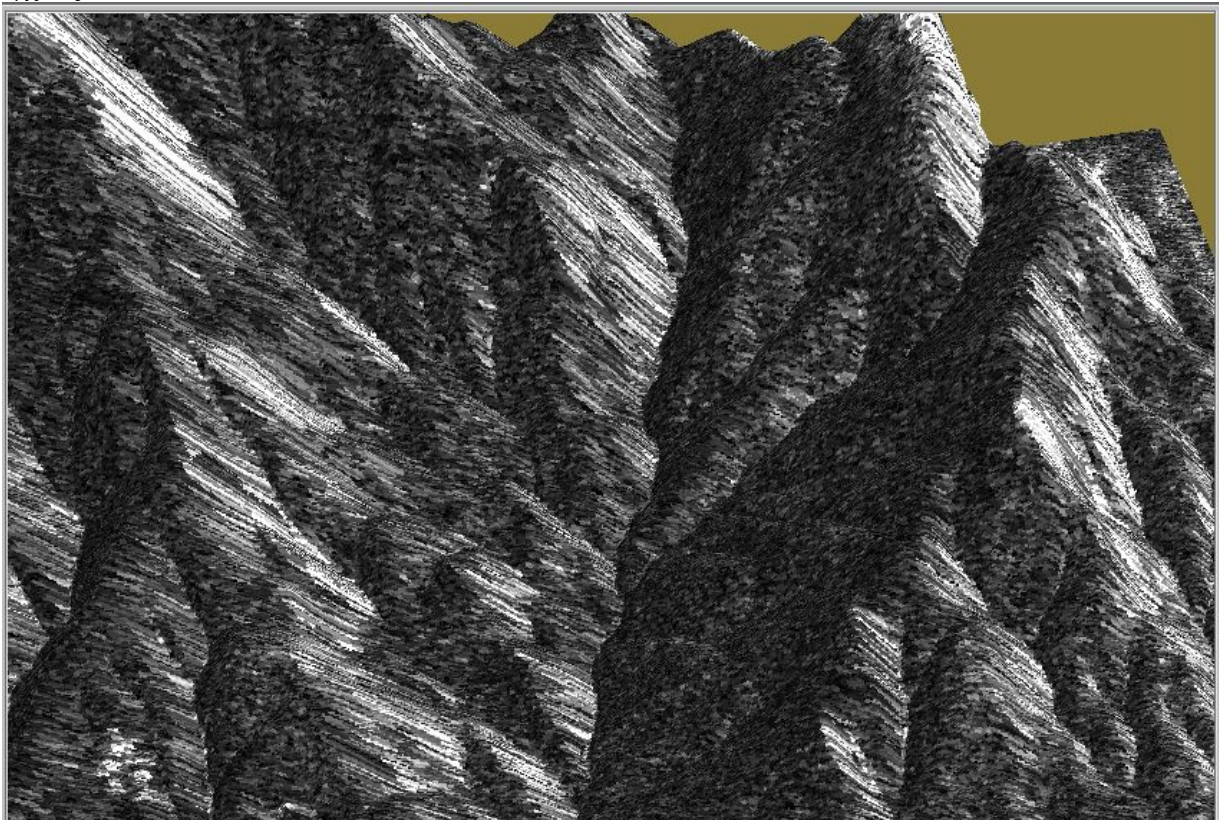
Ο προσδιορισμός της ακρίβειας της συγκεκριμένης απεικόνισης δεν γίνεται να πραγματοποιηθεί με σημεία ελέγχου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μορφολογίας της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή αυτή τυχαίνει να μην υπάρχουν αντικείμενα σαφή, τόσο στη SAR όσο και στην ορθο – SPOT απεικόνιση, με σκοπό να στοχευτούν σημεία ελέγχου. Για το λόγο αυτό ο έλεγχος της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης γίνεται με οπτικά μέσα. Δηλαδή εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο η ορθο – διορθωμένη SAR απεικόνιση προσαρμόζεται στο ΨΜΕ. Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να σημειωθεί ότι η θεωρητική ακρίβεια που προκύπτει είναι προφανώς καλύτερη από τις παραπάνω περιπτώσεις, αφού το ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκε έχει 7 φορές μικρότερο σφάλμα από το αντίστοιχο το ΨΜΕ του ASTER. Στην εικόνα 70 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της γεωαναφερμένης απεικόνισης.





Εικόνα 70: Τμήμα Ορθοανηγμένης ENVISAT Απεικόνισης στην Περιοχή της Πεντέλης

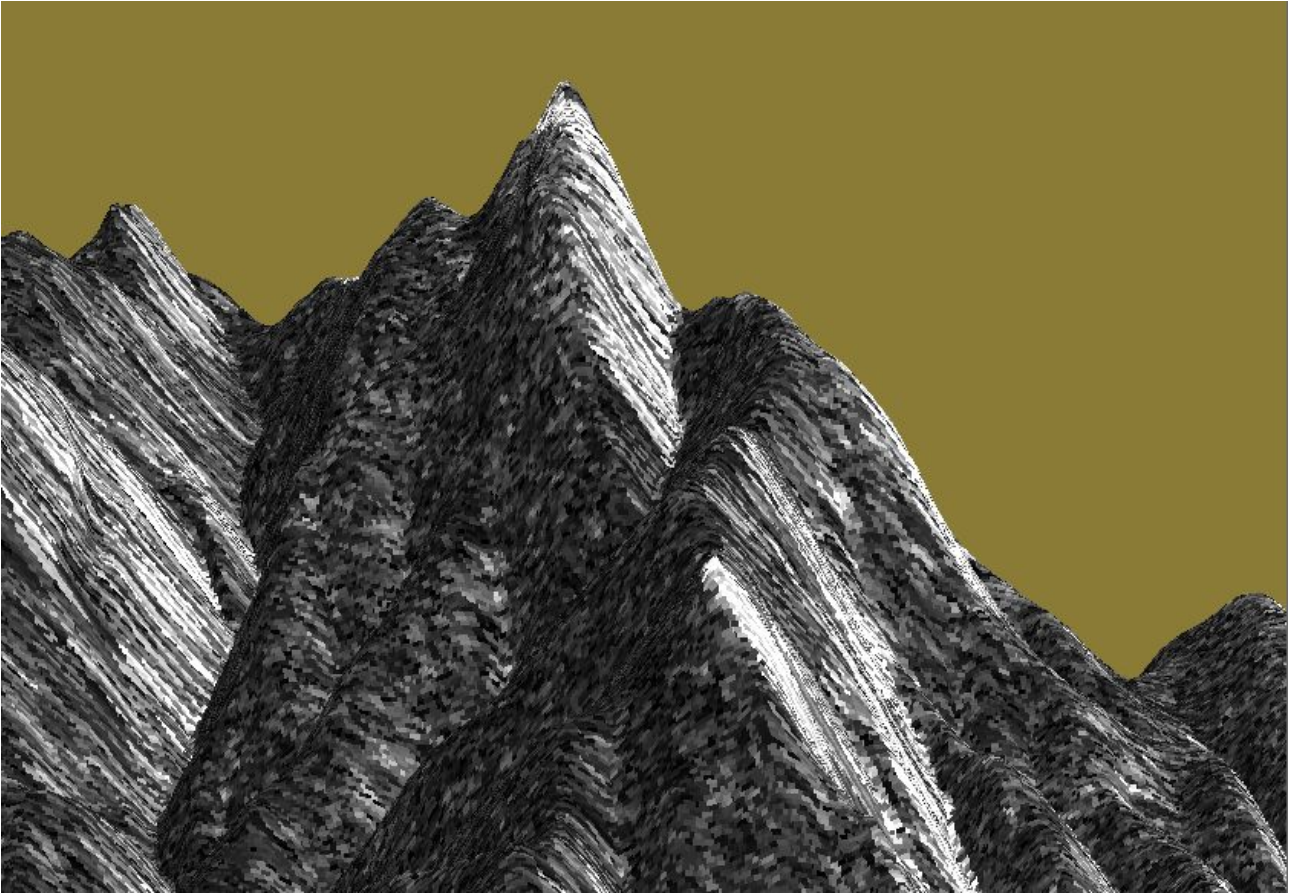
Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο οπτικός έλεγχος της γεωαναφερμένης απεικόνισης με επίθεση αυτής στο ΨΜΕ της Πεντέλης. Έτσι θα παρατεθούν ορισμένα τμήματα από τους οπτικούς ελέγχους.



Εικόνα 71: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης

Από την παραπάνω απεικόνιση γίνεται φανερό οι “φωτισμένες” από το SAR περιοχές

βρίσκονται στη σωστή θέση, σε σχέση με το ΨΜΕ. Δηλαδή εκτείνονται από το ίχνος της κάθε κορυφογραμμής μέχρι τις γραμμές αλλαγής κλίσης του εδάφους. Αντιστοίχως οι περιοχές που έχουν αντίθετο προσανατολισμό παραμένουν μέχρι τις κορυφογραμμές. Επιπλέον γίνεται φανερό με την επιμήκυνση των φωτεινών και σκοτεινών στοιχείων η παραμόρφωση της σμίκρυνσης και της σκίασης αντίστοιχα.



Εικόνα 72: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης

Η οπτική γωνία της παραπάνω απεικόνισης είναι τέτοια ώστε να γίνεται αντιληπτή η αλλαγή κλίσης του εδάφους. Φαίνεται λοιπόν ότι τόσο οι φωτιζόμενες από το SAR απεικονίσεις όσο και οι σκιασμένες τοποθετούνται με σωστό τρόπο στο ΨΜΕ. Η αυξημένη ακρίβεια στην προκειμένη περίπτωση οφείλεται στο πολύ πυκνό και ακριβές ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αφού οι υπόλοιπες παράμετροι που εισάγονται στη διαδικασία, παραμένουν σταθερές.

## **7.2 Πολυωνυμική Ορθοαναγωγή ENVISAT Απεικονίσεων**

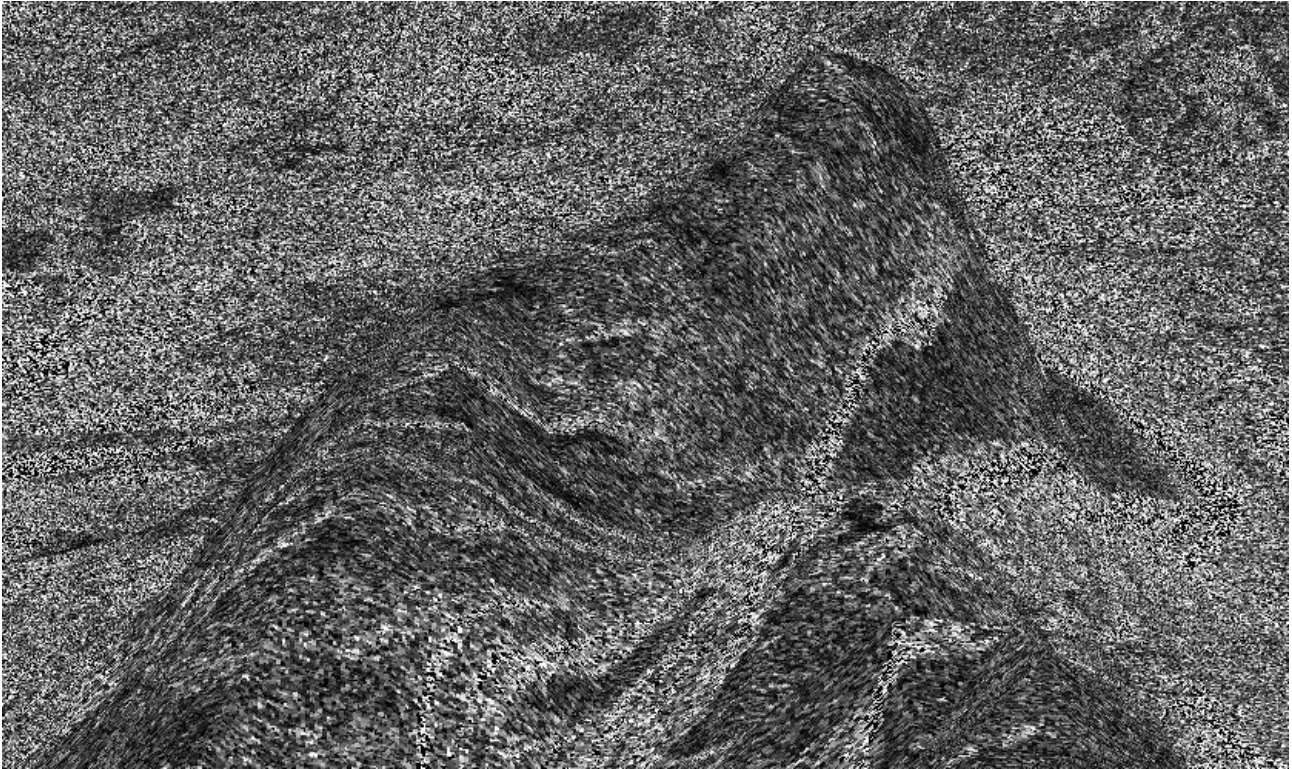
Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι μία προσεγγιστική μέθοδος γεωμετρικής διόρθωσης SAR απεικονίσεων. Όπως έχει ήδη αναλυθεί, στηρίζεται στα σημεία σύνδεσης που παρέχονται από τις επικεφαλίδες της απεικόνισης. Είναι αναμενόμενο η μέθοδος αυτή να είναι μειωμένης ακριβείας, αλλά εξετάζεται εξαιτίας της πολύ μεγάλης ταχύτητας με την οποία εφαρμόζεται. Τα σφάλματα αυτής της γεωαναφερμένης απεικόνισης αναμένεται να είναι αντίστοιχα με αυτά της γεωαναφερμένης απεικόνισης χωρίς υψομετρική πληροφορία.

Ο προσδιορισμός της ακρίβειας αυτής της γεωαναφερμένης απεικόνισης γίνεται μόνο με στόχευση των σημείων ελέγχου. Τα σημεία που στοχεύτηκαν είναι ίδια με αυτά των προηγούμενων περιπτώσεων.

Αριθμός Σημείου Ελέγχου	Ορθο – SPOT		Γεωαναφερμένη Απεικόνιση	
	Χαρτογραφική Συντεταγμένη X	Χαρτογραφική Συντεταγμένη Y	Χαρτογραφική Συντεταγμένη X	Χαρτογραφική Συντεταγμένη Y
1	758533.77	4203485.41	758696.69	4203443.71
2	735463.77	4201925.40	735492.21	4201898.30
3	737623.77	4199370.41	7376607.23	4199349.07
4	761663.77	4219865.41	761656.78	4219840.92
5	742973.77	4220870.40	743471.38	4220742.02
6	740398.77	4208355.40	740576.65	4208294.71
7	745273.77	4216610.40	745791.83	4216497.98

Πίνακας 29: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου στην Ορθο – SPOT και στη Γεωαναφερμένη SAR απεικόνιση

Με βάση τον παραπάνω πίνακα και το αντίστοιχο πρόγραμμα υπολογίστηκαν τα σφάλματα στους άξονες X και Y, καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αυτών. Έτσι προκύπτει ότι αυτά τα σημεία ελέγχου έχουν 309.660 μέτρα σφάλμα στον άξονα X, 77.9369 μέτρα στον άξονα Y και 319.318 μέτρα RMS. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι αρκετά μειωμένη και προφανώς δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί για συμπροσαρμογή με τα Υπερφασματικά δεδομένα. Για να γίνουν περισσότερο αντιληπτά τα σφάλματα τις συγκεκριμένης μεθόδου, τοποθετείται η γεωαναφερμένη απεικόνιση στο ΨΜΕ του ASTER. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη προοπτική απεικόνιση (Εικόνα 73).



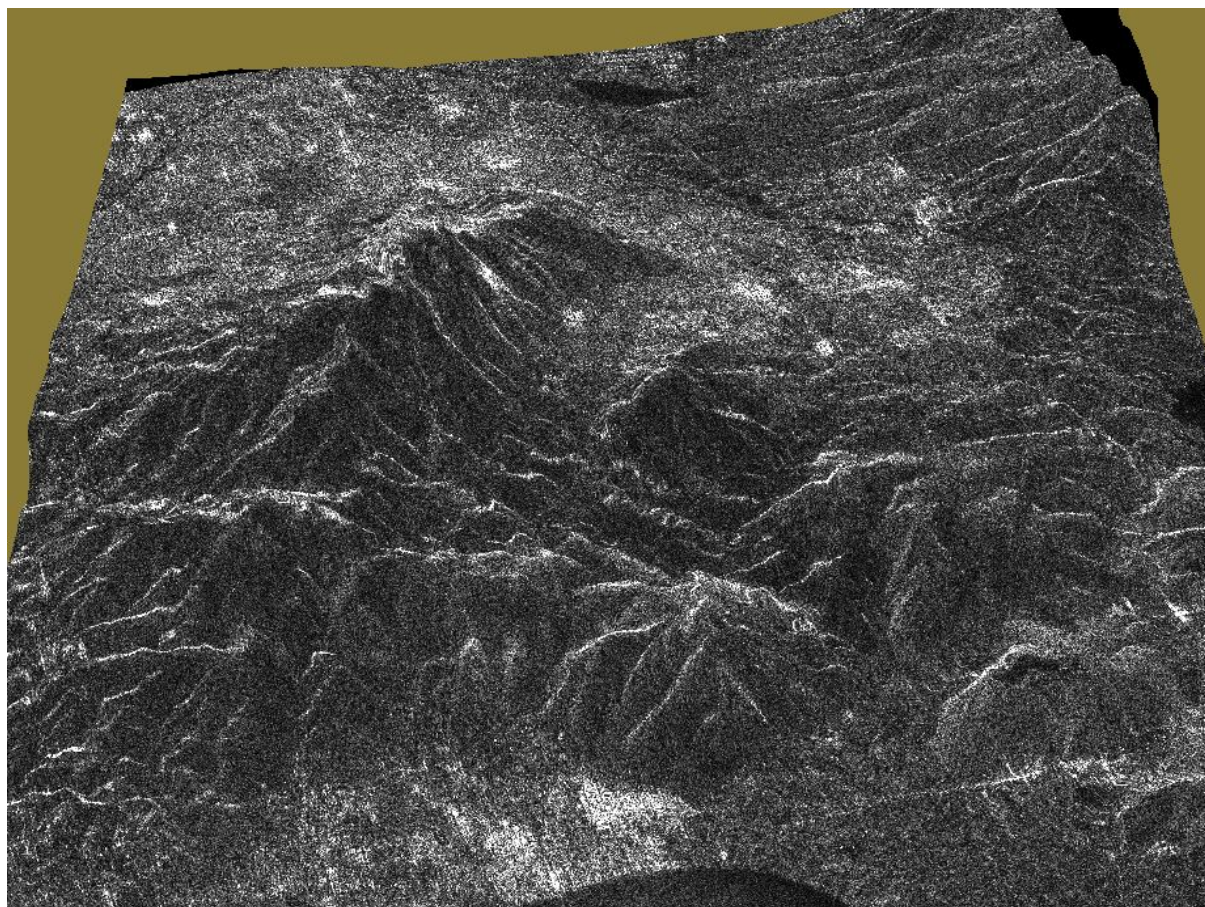
Εικόνα 73: Τμήμα Προοπτικής Γεωαναφερμένης ENVISAT Απεικόνισης

Στο παρόν τμήμα της γεωαναφερμένης απεικόνισης φαίνεται το βουνό Υμηττός. Είναι φανερό ότι τα εικονοστοιχεία της SAR απεικόνισης δεν έχουν τοποθετηθεί σωστά, αφού η “φωτισμένη” από το SAR περιοχή του βουνού φαίνεται σαν σκιασμένη. Ολόκληρη η “φωτισμένη” πλευρά του βουνού είναι συρρικνωμένη σε λωρίδες. Όπως καθίσταται σαφές, η απεικόνιση αυτή δε διορθώνεται σωστά γεωμετρικά. Οι μόνες περιοχές στις οποίες η συγκεκριμένη απεικόνιση είναι σωστά γεωμετρικά διορθωμένη, είναι αυτές με μηδενικό γεωμετρικό υψόμετρο.

### **7.3 Έμμεση Ορθοαναγωγή ALOS Απεικονίσεων**

Η διαδικασία της έμμεσης ορθοαναγωγής των απεικονίσεων του δορυφόρου ALOS πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο που έγινε στο δορυφόρο ENVISAT. Η μόνο διαφορά είναι η προσθήκη της συχνότητας  $F_{DC}$  στην επίλυση της εξίσωσης Doppler. Η παρούσα διαδικασία έγινε με χρήση του γεωμετρικού υψόμετρου του ΨΜΕ του ASTER. Τα στοιχεία τροχιάς που χρησιμοποιήθηκαν είναι ακρίβειας 1 μέτρου για τις συνιστώσες της θέσης και 2 εκατοστά για τις συνιστώσες της ταχύτητας. Το βήμα της ορθο – διορθωμένης απεικόνισης ορίστηκε στα 5 μέτρα, με σκοπό να είναι άμεσα συγκρίσιμη η απεικόνιση αυτή με την απεικόνιση του ENVISAT. Αρχικά παρουσιάζεται τμήμα της ορθοαναηγμένης απεικόνισης, όπως παράχθηκε από το πρόγραμμα ορθοαναγωγών.





Εικόνα 74: Προβαλλόμενη Ορθοαναηγμένη ALOS Απεικόνιση

Παρατηρώντας την προοπτική εικόνα, φαίνεται ότι γεωμετρικά η δορυφορική απεικόνιση έχει διορθωθεί σε μεγάλο βαθμό γεωμετρικά από τις παραμορφώσεις της πλάγιας προβολής και του υψομέτρου. Διεξοδικότερα τα σφάλματα θα αναλυθούν παρακάτω. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα εισαγωγής στο αντίστοιχο πρόγραμμα ορθοαναγωγών σε πινακοποιημένη μορφή.

Όνομα Παραμέτρου	Τιμή	Μονάδες
Βήμα Καννάβου ΨΜΕ	30	Μέτρα
Άνω Αριστερό Όριο ΨΜΕ (X)	749450.30	Μέτρα
Άνω Αριστερό Όριο ΨΜΕ (Y)	4217991.20	Μέτρα
Μήκος Κύματος SAR	0.2360571	Μέτρα
Χρονική Στιγμή 1 <sup>ης</sup> Θέσης Δορυφόρου ( $t_1$ )	0.0000	Δευτερόλεπτα
Χρονική Στιγμή 2 <sup>ης</sup> Θέσης Δορυφόρου ( $t_2$ )	60.0000	Δευτερόλεπτα
X Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_1$	5305428.964577	Μέτρα
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_1$	2051131.779516	Μέτρα
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_1$	4198272.498294	Μέτρα
$V_x$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_1$	-3474.251180	Μέτρα/

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ SAR ΟΡΘΟΑΝΗΓΜΕΝΩΝ  
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

		Δευτερόλεπτα
$V_Y$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_1$	-3210.604859	Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
$V_Z$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_1$	5941.207935	Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
X Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_2$	5085555.206663	Μέτρα
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_2$	1855430.560911	Μέτρα
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου την $t_2$	4545967.895221	Μέτρα
$V_X$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_2$	-3852.545226	Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
$V_Y$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_2$	-3310.019436	Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
$V_Z$ Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου την $t_2$	5644.716251	Μέτρα/ Δευτερόλεπτα
Βήμα Ορθο – διορθωμένης Απεικόνισης	5	Μέτρα
Απόσταση Πρώτου Σημείου με Δορυφόρο	754382.3127	Μέτρα
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στις Πλάγιες Αποστάσεις	9.3685143	Μέτρα
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στην Αζιμουθιακή διεύθυνση	3.5720376	Μέτρα
Συχνότητα $F_{DC}$	83.7630373	Hz
Μεγάλος Ημιάξονας Ελειψοειδούς	6378137.0	Μέτρα
Μικρός Ημιάξονας Ελειψοειδούς	6356752.31414	Μέτρα

Πίνακας 30: Παράμετροι Εισαγωγής στο Πρόγραμμα Ορθοαναγωγών

Η αξιολόγηση της ακρίβειας της συγκεκριμένης απεικόνισης πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν στις απεικονίσεις ENVISAT. Έτσι σε πρώτο στάδιο στοχεύτηκαν σημεία ελέγχου και στη συνέχεια υπολογίστηκε η θεωρητική ακρίβεια. Τα σημεία ελέγχου σε αυτή την περίπτωση είναι μόλις 3. Αυτό συνέβη, επειδή το κοινό τμήμα της απεικόνισης με το χαρτογραφικό υπόβαθρο είναι μικρό. Έτσι τα ευδιάκριτα σημεία και στις δύο απεικονίσεις ήταν πολύ περιορισμένα. με βάση αυτά τα σημεία υπολογίστηκε η ακρίβεια της γεωαναφερμένης SAR απεικόνισης. Οπότε προκύπτει ο πίνακας 31.

Αριθμός Σημείου Ελέγχου	Γεωαναφερμένη Απεικόνιση		Ορθο – SPOT	
	Χαρτογραφική Συντεταγμένη X	Χαρτογραφική Συντεταγμένη Y	Χαρτογραφική Συντεταγμένη X	Χαρτογραφική Συντεταγμένη Y
1	762096.27	44222962.91	762218.77	4222945.41
2	763751.27	4227882.91	763873.77	4227875.41
3	763106.27	4215307.91	763228.77	4215295.41

Πίνακας 31: Συντεταγμένες Σημείων Ελέγχου στην Ορθο – SPOT και στη Γεωαναφερμένη Απεικόνιση

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται σαφές ότι τα σφάλματα που υπολογίζονται από τα συγκεκριμένα σημεία ελέγχου είναι αυξημένα. Πιο συγκεκριμένα, το μέσο σφάλμα στον άξονα X είναι 150.031 μέτρα. Το αντίστοιχο σφάλμα στον άξονα Y είναι μόλις 16.1051 μέτρα. Κατά συνέπεια το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS της απεικόνισης υπολογίζεται ίσο με 150.893 μέτρα. Η διαφορά αυτή των σφαλμάτων στους δύο άξονες έγκειται στη διεύθυνση της τροχιάς ως προς το χαρτογραφικό σύστημα και τη μεταβολή της συχνότητας  $F_{DC}$  στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων. Ειδικότερα η διεύθυνση της τροχιάς του ALOS στη συγκεκριμένη απεικόνιση είναι σχεδόν παράλληλη με τον Y άξονα του χαρτογραφικού συστήματος αναφοράς. Αυτό συνεπάγεται ότι τα σφάλματα που υπάρχουν στις πλάγιες αποστάσεις μεταδίδονται ουσιαστικά ολόκληρα στον άξονα X. Επιπρόσθετα ο προσανατολισμός του δορυφόρου είναι προς το κέντρο μάζας της Γης, γεγονός που δημιουργεί μία στροφή στο αποτύπωμα της κεραίας. Δηλαδή υπάρχει μία μετατόπιση στις συχνότητες κατά  $F_{DC}$ . Όσον αφορά τη διεύθυνση των αζιμουθίων η τιμή της συχνότητας αυτής είναι σταθερή. Αντίθετα στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων υπάρχει μία μικρή μεταβολή της τάξεως του 0.09%. Έτσι οι μακρινές αποστάσεις έχουν αρκετά διαφορετική τιμή συχνότητας  $F_{DC}$  σε σχέση με τις κοντινές. Το τμήμα της απεικόνισης που γεωαναφέρθηκε βρίσκεται στην περιοχή των μακρινών αποστάσεων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τεχνικούς λόγους η μεταβολή αυτή στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων δεν έχει προστεθεί στην επίλυση του συστήματος. Άρα το σφάλμα που δημιουργείται στον άξονα X είναι ιδιαίτερα αυξημένο.

Η επόμενη μέθοδος προσδιορισμού της ακρίβειας της γεωαναφερμένης απεικόνισης είναι η θεωρητική. Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζονται τα σφάλματα είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν των απεικονίσεων ENVISAT. Η μόνο διαφορά είναι ότι προστίθεται στην ανάλυση το σφάλμα της συχνότητας  $F_{DC}$ . Το σφάλμα της συχνότητας αυτής (για τις πλάγιες αποστάσεις) είναι πρακτικά η τιμή της για τις πλάγιες αποστάσεις που λαμβάνει χώρα η διαδικασία, το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψη.

Σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι μεταβλητότητες των παραμέτρων που συμμετέχουν στην διαδικασία. Έτσι παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Όνομα Παραμέτρου	Περίπτώσεις Ορθοαναηγμένων SAR Απεικονίσεων Σφάλματα Παραμέτρων
Χρόνος Πρώτης Γραμμής Δεδομένων	0.000001 sec
Χρόνος Τελευταίας Γραμμής Δεδομένων	0.000001 sec
X Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m
Y Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m
Z Συντεταγμένη Δορυφόρου	1 m
X Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.02 m/sec
Y Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.02 m/sec
Z Συνιστώσα Ταχύτητας Δορυφόρου	0.02 m/sec
Γεωμετρικό Υψόμετρο	7 m
Συχνότητα $F_{DC}$	1.2 Hz

Πίνακας 32: Σφάλματα Παραμέτρων Διαδικασίας Ορθοαναγωγής της ALOS Απεικόνισης

Αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα που προκύπτει από την παρεμβολή των θέσεων και των ταχυτήτων του δορυφόρου για κάθε γραμμή δεδομένων, όπως και στο δορυφόρο ENVISAT. Έτσι προκύπτει ότι το μέγιστο σφάλμα που θα έχουν οι παρεμβληθείσες θέσεις θα είναι 5.1 μέτρα. Αντίστοιχα για τις συνιστώσες της ταχύτητας προκύπτει ότι θα έχουν μέγιστο σφάλμα 0.1 m/sec. Το σφάλμα των γεωκεντρικών θέσεων των σημείων του εδάφους, λόγω του σφάλματος στο γεωμετρικό υψόμετρο, υπολογίζεται από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις εξισώσεις υπολογισμού των συντεταγμένων. Έτσι θα υπάρχει σφάλμα στις γεωκεντρικές συντεταγμένες των σημείων του εδάφους: 5.038 , 2.231 , 2.231 μέτρα για τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα.

Με τον προσδιορισμό των μέσων σφαλμάτων στις συνιστώσες των συντεταγμένων των σημείων του εδάφους, υπολογίζεται στη συνέχεια το σφάλμα που θα έχει η επίλυση της εξίσωσης Doppler σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Το σφάλμα που θα έχει η συχνότητα Doppler υπολογίζεται μέσω του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων για τις δεδομένες μεταβλητότητες. Η προσθήκη της συχνότητας  $F_{DC}$ , προσδίδει αβεβαιότητα στην επίλυση της εξίσωσης Doppler. Όμως το σφάλμα αυτό αφορά μόνο τη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων. Το τελευταίο μπορεί να εξηγηθεί με τον ακόλουθο τρόπο. Ο μηδενισμός της συχνότητας Doppler, που υπολογίζεται στην περίπτωση που δεν υπάρχει μεταβολή αυτής κατά τις πλάγιες αποστάσεις, είναι ο ίδιος και για τις δύο διευθύνσεις. Δηλαδή υπολογίζοντας το χρόνο μηδενισμού της συχνότητας Doppler στα αζιμούθια, βρίσκεται παράλληλα ο χρόνος μηδενισμού της συχνότητας Doppler στη κάθετη διεύθυνση. Έτσι στη περίπτωση που οι δύο αυτές συχνότητες διαφέρουν, θα πρέπει να υπολογίζεται ο χρόνος μηδενισμού για κάθε σημείου του εδάφους στις δύο διευθύνσεις ξεχωριστά. Με αυτόν το τρόπο η αζιμουθιακή ακρίβεια παραμένει σταθερή, ενώ η ακρίβεια των πλαγίων αποστάσεων μειώνεται.

Ουσιαστικά με την προσθήκη αβεβαιότητας στην επίλυση της εξίσωσης Doppler για τη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων, αυξάνεται η αβεβαιότητα στη θέση του δορυφόρου. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η θέση του δορυφόρου υπολογίζεται συναρτήσει του χρόνου, ο οποίος στη προκειμένη περίπτωση έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίζονται τα ακόλουθα σφάλματα:

Σφάλματα στη Διεύθυνση των Αζιμουθίων		Σφάλματα στη Διεύθυνση των Πλαγίων Αποστάσεων	
Στην Απεικόνιση (pixel)	Στο Έδαφος (m)	Στην Απεικόνιση (pixel)	Στο Έδαφος (m)
0.953425	3.405670	10.023810	93.909058

Πίνακας 33: Τελικά Θεωρητικά Σφάλματα Γεωαναφερμένης SAR Απεικόνισης

## **8. ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

## 8. ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΜΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Με το πέρας των διαδικασιών των γεωαναφορών και ορθοαναγωγών, παράγονται γεωαναφερμένες ψηφιακές δορυφορικές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις. Δηλαδή κάθε εικονοστοιχείο των απεικονίσεων αυτών έχει συντεταγμένες χάρτου και ειδικότερα στην προβολή UTM. Συνεπώς οι απεικονίσεις θεωρούνται συμπροσαρμοσμένες.

Τα σφάλματα που υπολογίστηκαν από τις προαναφερθείσες διαδικασίες, αξιοποιούνται στον υπολογισμό της ακρίβειας με την οποία έχουν συμπροσαρμοστεί τα δεδομένα. Βασικό ζητούμενο στην παρούσα διαδικασία είναι η εύρεση με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, του μέγιστου αριθμού SAR εικονοστοιχείων, που αντιστοιχούν εξ ολοκλήρου σε ένα εικονοστοιχείο του Hyperion, με 100% πιθανότητα. Ο υπολογισμός αυτού του αριθμού γίνεται με το στατιστικό μοντέλο ελέγχου συμπροσαρμογών. Ως τυπικές αποκλίσεις λαμβάνονται οι ακόλουθες:

Πηγή Σφαλμάτων	Hyperion		ENVISAT		ALOS	
	$\sigma_X$ (m)	$\sigma_Y$ (m)	$\sigma_X$ (m)	$\sigma_Y$ (m)	$\sigma_X$ (m)	$\sigma_Y$ (m)
Σημεία Ελέγχου	12.878	11.854	14.3274	16.7680	150.031	16.1051
Θεωρητική Ακρίβεια	-	-	4.3770	14.9052	93.909	3.4057

Πίνακας 34: Σφάλματα Εισαγωγής στο Στατιστικό Μοντέλο Ελέγχου Συμπροσαρμογών

Στη συνέχεια υπολογίζεται το σφάλμα που θα έχει η διαφορά των συνιστωσών των συντεταγμένων των δύο απεικονίσεων. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες διαφορές:

Σφάλματα Διαφορών Συντεταγμένων	Hyperion – ENVISAT		Hyperion – ALOS	
	Σημεία Ελέγχου	Θεωρητική Ακρίβεια	Σημεία Ελέγχου	Θεωρητική Ακρίβεια
$\sigma_{\Delta X}$ (m)	19.26440	13.60151	150.58268	94.78789
$\sigma_{\Delta Y}$ (m)	20.53493	19.04422	19.99729	12.33353

Πίνακας 35: Σφάλματα Διαφορών Συντεταγμένων των Κέντρων των Εικονοστοιχείων

Ορίζεται το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης ίσο με 66.7%. Οπότε από τους πίνακες της κανονικής κατανομής υπολογίζεται το  $\kappa=1$ . Άρα η διαφορά των συντεταγμένων των κέντρων των εικονοστοιχείων θα κυμαίνεται στο διάστημα:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta X} - \kappa * \sigma_{\Delta X} &\leq \Delta X \leq \hat{\Delta X} + \kappa * \sigma_{\Delta X} \\ \hat{\Delta Y} - \kappa * \sigma_{\Delta Y} &\leq \Delta Y \leq \hat{\Delta Y} + \kappa * \sigma_{\Delta Y} \end{aligned}$$

Οπότε για τις διάφορες ακρίβειες και συνδυασμούς δορυφόρων προκύπτουν τα ακόλουθα διαστήματα διαφορών:

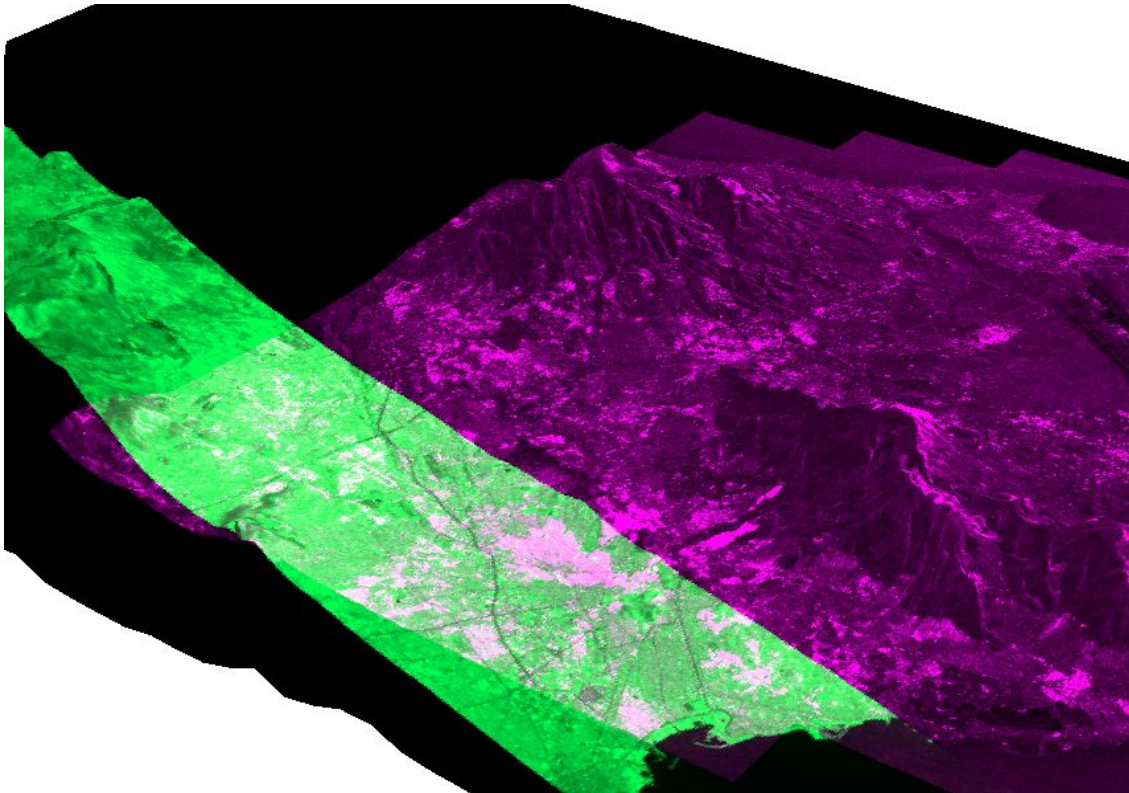
Όρια Διακύμανσης	Hyperion – ENVISAT		Hyperion – ALOS	
	Σημεία Ελέγχου	Θεωρητική Ακρίβεια	Σημεία Ελέγχου	Θεωρητική Ακρίβεια
$\Delta X$ (m)	[-19.26, +19.26]	[-13.60, +13.60]	[-150.58, +150.58]	[-94.79, +94.79]
$\Delta Y$ (m)	[-20.53, +20.53]	[-19.04, +19.04]	[-20.00, +20.00]	[-12.33, +12.33]

Πίνακας 36: Διαστήματα Διακύμανσης Διαφορών Συντεταγμένων

Παράλληλα για να βρίσκεται ένα SAR εικονοστοιχείο εξ ολοκλήρου στο εικονοστοιχείο του Hyperion, θα πρέπει οι διαφορές των συνιστωσών των συντεταγμένων των κέντρων να βρίσκονται στο διάστημα από -17.5 έως +17.5 μέτρα. Από τη σύγκριση αυτών των διαστημάτων γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δε γίνεται να θεωρηθεί ότι έστω και για ένα εικονοστοιχείο από τα SAR, ότι ανήκει εξ ολοκλήρου με πιθανότητα 100% σε ένα εικονοστοιχείο του Hyperion στο δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

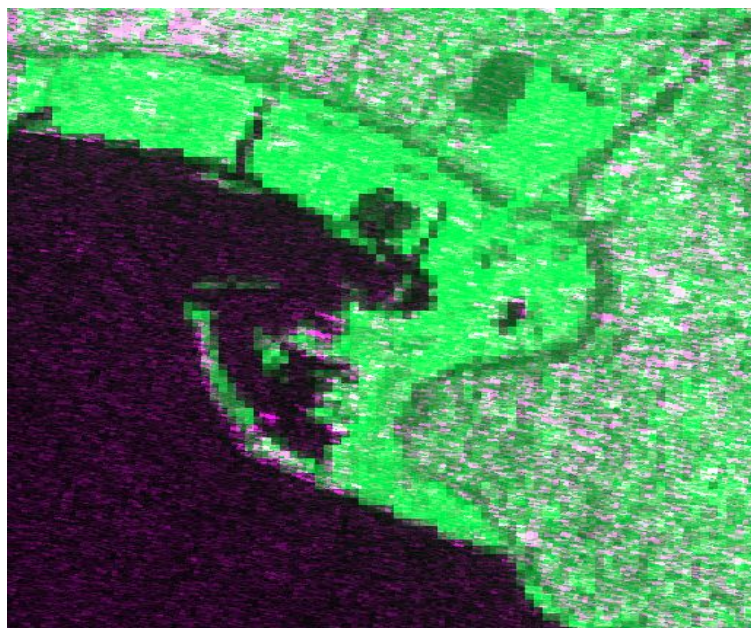
Το τελευταίο δεν σημαίνει ότι δεν είναι εφικτή η συμπροσαρμογή των δύο ειδών δεδομένων. Τα δεδομένα έχουν συμπροσαρμοστεί από τη στιγμή που οι δύο απεικονίσεις έχουν χαρτογραφικές συντεταγμένες στα εικονοστοιχεία τους. Το παρόν στατιστικό μοντέλο, απλώς δίνει ένα μέτρο αξιοπιστίας της συμπροσαρμογής. Δεν έχει βασικό σκοπό να επιλέξει μέσω αυτών των διαστημάτων τα πιθανότερα δεδομένα για μία ανάλυση, αλλά σκοπεύει περισσότερο στην υποβοήθηση του χρήστη να επιλέξει ο ίδιος τα καταλληλότερα δεδομένα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στην περίπτωση, όπου απαιτείται να γίνει μία συνδυαστική εφαρμογή υπερφασματικών και SAR δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει το μέτρο των υπάρχοντων σχετικών ασαφειών, ώστε να λάβει καλύτερη απόφαση για τις πηγές των συνδυασμένων δεδομένων.

Εξετάζοντας σε μεγαλύτερο βάθος τα διαστήματα αυτά, παρατηρείται ότι πρακτικά είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπάρχουν εικονοστοιχεία τα οποία θα ανήκουν εξ ολοκλήρου με πιθανότητα 100% σε ένα εικονοστοιχείο του Hyperion. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο είδος της αναδόμησης που επιτακτικά χρησιμοποιείται. Με αυτό τον τρόπο, μεγάλο ποσοστό των εικονοστοιχείων μίας απεικόνισης θα έχει παραπάνω σφάλμα μέχρι και μισό εικονοστοιχείο. Έτσι το στατιστικό αυτό μοντέλο επικεντρώνεται στην υπόδειξη των σχετικών μετατοπίσεων των συμπροσαρμοσμένων δεδομένων, με σκοπό τη βέλτιστη επιλογή κάποιων εικονοστοιχείων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συμπροσαρμοσμένες απεικονίσεις των Hyperion και ENVISAT.



Εικόνα 75: Σχετικές Θέσεις Γεωαναφερμένων Δ.Ψ.Τ.Α.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται η γεωαναφερμένη υπερφασματική (Πολύωνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού) απεικόνιση του Hyperion και η αντίστοιχη γεωαναφερμένη (Φυσικό Μοντέλο Δέκτη) του ENVISAT. Τα δεδομένα, όπως είναι φανερό έχουν συμπροσαρμοστεί πολύ καλά μεταξύ τους. Στη συνέχεια μεγεθύνθηκε ένα τμήμα της εικόνας 75, με σκοπό να φανεί καλύτερα η ποιότητα των συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων.



Εικόνα 76: Τμήμα Συμπροσαρμοσμένων Απεικονίσεων





## **9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αρχικά επιχειρείται η συμπροσαρμογή υπερφασματικών και SAR απεικονίσεων ύστερα από την ορθοαναγωγή της κάθε μιας χωριστά και στη συνέχεια παράγεται ένα μέτρο αξιοπιστίας αυτής της συμπροσαρμογής σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Οι βασικοί λόγοι επιλογής αυτής της προσέγγισης είναι οι ακόλουθοι:

- Η συμπροσαρμογή στηρίζεται σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, το χαρτογραφικό. Έτσι υπάρχει ανεξαρτησία από τα επιμέρους συστήματα αναφοράς των δεκτών στο τελικό αποτέλεσμα και γίνεται δυνατή η επίθεση και άλλης θεματικής χαρτογραφικής πληροφορίας στο περιβάλλον ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών.
- Η κάθε απεικόνιση ορθοανάγεται ανεξάρτητα από την άλλη. Αυτό συνεπάγεται ότι τα σφάλματα που προέρχονται από τη μία απεικόνιση δε μεταδίδονται στην άλλη, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται η ποιότητα της συμπροσαρμογής.
- Επειδή είναι ανεξάρτητες οι επιμέρους ορθοαναγωγές μπορεί να γίνει βελτίωση της συμπροσαρμογής, βελτιώνοντας τις παραμέτρους εισαγωγής στο κάθε μοντέλο ορθοαναγωγής. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει καλύτερος έλεγχος της μεταβολής των σφαλμάτων.
- Παρέχεται η δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης των απεικονίσεων με τη μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, αφού διατηρείται έως ένα βαθμό η ανάλυση των εικονοστοιχείων σε κάθε ορθοανηγμένη απεικόνιση.
- Δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του μέτρου αξιοπιστίας των συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων για κάθε εικονοστοιχείο, συμβάλλοντας έτσι στη βέλτιστη επιλογή εκείνων των εικονοστοιχείων τα οποία θα συνθέσουν το διάνυσμα πληροφορίας, απαραίτητο για την από κοινού επεξεργασία υπερφασματικών και SAR δεδομένων.

Αναλυτικότερα από τους αλγορίθμους που εφαρμόστηκαν στις υπερφασματικές απεικονίσεις συμπεραίνεται ότι:

- Η εφαρμογή των προσεγγιστικών μεθόδων ορθοαναγωγής μπορεί υπό συνθήκες να παράγει ορθοανηγμένες απεικονίσεις με ακρίβεια μικρότερη του ενός εικονοστοιχείου για το δέκτη Hyperion.
- Ο αφινικός μετασχηματισμός παράγει αρκετά ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με το μικρό αριθμό φωτοσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν. Για το λόγο αυτό καθίσταται ένας ιδιαίτερα εύχρηστος αλγόριθμος, ειδικά στην περίπτωση που η χαρτογραφική πληροφορία είναι περιορισμένη.
- Το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού είναι η ακριβέστερη προσεγγιστική μέθοδος που εφαρμόστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα. Όμως ο αριθμός φωτοσταθερών που απαιτούνται για να φτάσει την ακρίβεια αυτή είναι πολύ μεγάλος (63 φωτοσταθερά).
- Τα RMS σφάλματα που προέρχονται από τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου δεν συμφωνούν μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού, όπου στην περίπτωση με τα λιγότερα σημεία υπολογιζόταν σφάλμα φωτοσταθερών μόλις 0.04 του pixels, ενώ η απεικόνιση παραμορφωνόταν πλήρως.
- Η αύξηση της ακρίβειας του πολυωνύμου 3<sup>ου</sup> βαθμού με την αύξηση των φωτοσταθερών σημείων, οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος δεσμεύεται να “περάσει” το δυνατόν

πλησιέστερα από περισσότερα σημεία. Έτσι τα σφάλματα των ενδιάμεσων σημείων γίνονται μικρότερα.

- Το τρίτοβάθμιο πολυώνυμο μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα στην απεικόνιση σε σχέση με τα μικρότερου βαθμού πολυώνυμα, επειδή διαθέτει περισσότερους συντελεστές. Οι περισσότεροι συντελεστές προσδίδουν στον αλγόριθμο αυτό μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα, οπότε αυξάνοντας τα φωτοσταθερά προσαρμόζεται αυτός με καλύτερο τρόπο στην απεικόνιση.
- Ο αλγόριθμος Delaunay Triangulation παρατηρήθηκε ότι είναι πρακτικά ανεξάρτητος από τον αριθμό των φωτοσταθερών. Παράγει ορθοαναηγμένες απεικονίσεις με σταθερά υψηλή ακρίβεια. Όμως η αστάθεια που παρουσιάζει τον καθιστά μη αξιόπιστο και για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στον έλεγχο της ποιότητας των συμπροσαρμοσμένων απεικονίσεων. Ο όρος αστάθεια αναφέρεται στο “τυχαίο” τεμάχισμα της απεικόνισης, χαρακτηριστικό το οποίο δεν επεξηγείται από το λογισμικό ENVI 4.5.

Με την εφαρμογή των αλγορίθμων ορθοαναγωγής στις SAR απεικονίσεις και την επεξεργασία των σφαλμάτων που παράγονται εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Σε αυτού του είδους τις απεικονίσεις, η προσεγγιστική ορθοαναγωγή με πρωτοβάθμιο αλλά και με δευτεροβάθμιο πολυώνυμο, παράγει πολύ χαμηλής ακρίβειας ορθοαναηγμένες απεικονίσεις. Έτσι αυτές δεν γίνεται να χρησιμοποιηθούν για συμπροσαρμογή με άλλου είδους δεδομένα.
- Η ορθοαναγωγή με το φυσικό μοντέλο του δέκτη παράγει τις περισσότερο ακριβείς ορθοαναηγμένες απεικονίσεις, αλλά τα δεδομένα εισαγωγής στον αλγόριθμο θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβή.
- Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την ακρίβεια της ορθοαναηγμένης απεικόνισης είναι το ΨΜΕ. Πιο συγκεκριμένα για απόλυτο σφάλμα στις τιμές των υψομέτρων μόλις 10 μέτρα, το σφάλμα που μεταδίδεται είναι ένα εικονοστοιχείο. Από αυτό φαίνεται και η σημασία της επιλογής του κατάλληλου είδους υψομέτρου, δηλαδή του γεωμετρικού.
- Αντίστοιχα η συχνότητα  $F_{DC}$  μπορεί ενδεχομένως να επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Αυτό έγινε φανερό από την απεικόνιση του δορυφόρου ALOS. Επειδή δεν κατέστη δυνατό να συμπεριληφθεί η μεταβολή αυτής της συχνότητας στη διεύθυνση των πλαγίων αποστάσεων, το σφάλμα που μεταδόθηκε στις τελικές συντεταγμένες των εικονοστοιχείων είναι της τάξης των 100 μέτρων.
- Παρατηρήθηκε ότι τα στοιχεία ακριβούς τροχιάς του ENVISAT (σφάλμα θέσης 1m) δεν δίνουν ορθοαναηγμένες απεικονίσεις σημαντικά πιο ακριβείς από αυτά που έχουν σφάλμα θέσης 7-8m. Η βελτίωση είναι της τάξης του μισού εικονοστοιχείου στις τελικές συντεταγμένες της απεικόνισης.
- Η υψηλή διακριτική ικανότητα των SAR απεικονίσεων (ENVISAT και ALOS) σε συνδυασμό με τα αρκετά μικρά σφάλματα που έχουν οι αντίστοιχες ορθοαναηγμένες απεικονίσεις, καθιστούν εφικτή την συμπροσαρμογή τους με τον μέσης διακριτικής ικανότητας δέκτη Hyperion.

Ο χρόνος που χρειάζεται για να ορθοαναχθεί μία ολόκληρη σκηνή SAR απεικόνισης με τον αλγόριθμο του φυσικού μοντέλου είναι περίπου 6-7 μέρες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της πολυπλοκότητας της ίδιας της μεθόδου και του τρόπου με τον οποίο λύνεται η εξίσωση Doppler. Αν στην επίλυση της εξίσωσης Doppler της ALOS απεικόνισης συμπεριλαμβανόταν η μεταβολή της συχνότητας  $F_{DC}$ , τότε ο χρόνος που θα χρειαζόταν για να ορθοαναχθεί η ίδια απεικόνιση σχεδόν θα διπλασιαζόταν. Για τους λόγους αυτούς έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η βελτιστοποίηση του

αλγορίθμου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για την ορθοαναγωγή. Έτσι επιτυγχάνοντας πολύ μικρότερους χρόνους χωρίς την μείωση της ακρίβειας, το πρόγραμμα αυτό μπορεί να γίνει επιχειρησιακό.

Η εφαρμογή του προτεινόμενου στατιστικού μοντέλου οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το στατιστικό μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά ένα εργαλείο για την βέλτιστη επιλογή εικονοστοιχείων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε επεξεργασίες προσδιορισμού των “καθαρότερων” φασματικά εικονοστοιχείων (endmembers) και στη συνέχεια ταξινομήσεων.
- Πρακτικά παρατηρήθηκε ότι δεν γίνεται να βρεθούν SAR εικονοστοιχεία τα οποία να ανήκουν με πιθανότητα 100% εξ ολοκλήρου σε ένα Υπερφασματικό εικονοστοιχείο, εξαιτίας των αυξημένων σφαλμάτων των ορθοαυγμένων SAR απεικονίσεων. Τα διαστήματα διακύμανσης των διαφορών που υπολογίζονται είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερα από το επιτρεπτό διάστημα.
- Για να μπορούν να βρεθούν εικονοστοιχεία με 100% πιθανότητα θα πρέπει και οι δύο απεικονίσεις να ορθοαναχθούν με ακόμα μεγαλύτερες ακρίβειες, είτε βελτιστοποιώντας τους αντίστοιχους αλγορίθμους ή εισάγοντας περισσότερο ακριβή δεδομένα.
- Η πιθανότητα που υπολογίζεται αποσκοπεί ουσιαστικά στον προσδιορισμό ενός χωρικού μέτρου αξιοπιστίας και έχει άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα του διανύσματος φασματικών δεδομένων στο ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό φάσμα της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- S Abdikana et. al., "Fusion of SAR images (PALSAR AND RADARSAT-1) with multispectral SPOT image: A comparative analysis of resulting images", 2008
- A.M. Αγάτζα και Μπαλοδήμου, "Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις Ι", 2007, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- A.M. Αγάτζα και Μπαλοδήμου, "Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις ΙΙ", 2009, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- Rami Al-Ruzouq, "Semi-Automatic Registration of Multi-Source Satellite Imagery with Varying Geometric Resolutions", 2004, University of Calgary, Alberta
- Δημήτρης Π. Αργιαλάς, "Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση", 1998, Εκδόσεις Πολυτεχνείου
- "ALOS PALSAR REFERENCE GUIDE", 2006
- Γ. Βέης, Χ. Μπιλλήρης και Κ. Παπαζήση, "Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας", 2007, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- J S Bethel et. al., "Geometric registration and classification of hyperspectral airborne pushbroom data", 2000, IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam
- N Bryant et. al., "Precision Automatic Co-Registration Procedures for NASA Sensors", 2003
- A. Burini et. al., "Fusion of high resolution polarimetric SAR and multi-spectral optical data for precision viticulture", 2008, IGARSS
- Chen-I Chang, "Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification", 2003, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York
- Ανδρέας Γεωργόπουλος, "Ψηφιακή Φωτογραμμετρία", 1998, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- M. Crespi, "Analysis of rigorous orientation models for pushbroom sensors. applications with QUICKBIRD", 2006
- Daniel E. Carrasco Diaz, "Sar Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential Applications", 1998, University Politecnica of Catalunya, Barcelona
- Shashi Dobhal, "Performance analysis of high-resolution and hyperspectral data fusion for classification and linear feature extraction", 2008
- Andrew Dyk et. al., "Geometric Correction and Validation of Hyperion and ALI Data for EVEOSD", 2002, IEEE
- "EO-1 User Guide", 2003
- "EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide", 2001
- "Envi Assistant Manual", 2007
- "ENVISAT ASAR PRODUCT HANDBOOK", 2007
- Mark Folkman et. al., "EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration", 2001
- Micheal K Griffin et. al. , "Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis", 2005, Lincoln Laboratory Journal
- Tian Han, "Investigation of Nonlinearity in Hyperspectral Remotely Sensed Imagery", 2009, University of Victoria

- S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation" 1999, Prentice Hall
- SM Hsu et. al., "SAR and HSI data fusion for counter CCD", 1999, IEEE
- Su May Hsu et. al., "Multisensor Fusion with Hyperspectral Imaging Data: Detection and Classification", 2003, Lincoln Laboratorty Journal
- Alexandre Jouan et. al., "Land Use Mapping with Evidential Fusion of Polarimetric Synthetic Aperture Radar and Hyperspectral Imagery", 2007
- Βασιλεία Καραθανάση, "Ραδιομετρία και Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση", 2003, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- Γιώργος Καρράς, "Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία", 1998
- John P Kerekes and Jerrold E Baum, "Hyperspectral Imaging System Modeling", 2003, Lincoln Laboratorty Journal
- Μάρκου Β. Κούτρα, "Εισαγωγή στις Πιθανότητες: Θεωρία και Εφαρμογές", 2002, Εκδόσεις ΑΘ. Σταμούλης, Αθήνα
- Karl Kraus, "Φωτογραμμετρία: Τόμος 1: Βασικές Έννοιες και Μεθοδοι", 2003, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα
- Changno Lee, et. al. , "Rigorous Mathematical Modeling of Airborne Pushbroom Imaging Systems", 2000
- G Mostafa et. al., "Multimodality Image Registration And Fusion Using Neural Network", 2010
- Βύρωνας Νάκος, "Αναλυτική Χαρτογραφία", 2006, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα
- NATIONAL CENTER FOR GEOSPATIAL INTELLIGENCE STANDARDS, "Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning", 2009
- J Pearlman et. al., "Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1 Mission", 2001
- Daniela Poli, "General model for airborne and spaceborne linear array sensors", 2002, ISPRS
- A Roth et. al., "Geocoding of TerraSAR-X Data", 2007 Proc. of 20'th International Congress of the ISPRS
- Gary A Shaw et. al., "Spectral Imaging for Remote Sensing", 2003, Lincoln Laboratorty Journal
- Nicholas M. Short, "Remote Sensing Tutorial", 2005
- "TerraSAR-X Ground Segment :Basic Product Specification Document", 2009

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**



## ΠΑΡΑΤΗΜΑ Ι

## Πρόγραμμα Ορθοαναγωγής ENVISAT και ALOS Απεικονίσεων

Copyright (C) 2010 Dimitris Sykas

This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.

**PRO envisat\_geocod\_teliko2**

;Εισαγωγή αρχείου με τα απαραίτητα στοιχεία

;Το αρχείο είναι ένα txt που περιέχει όλα τα στοιχεία

;Από τα fields του structure αυτού λαβάνουμε τα δεδομένα και ονομάζουμε τις μεταβλητές

```
input={ file_path: 'Δ.Ψ.Τ.Α.tif',$
dem_path: 'ΨΜΕ.tif', bima_dem: 2.0, ulcx: 749327.29092682152987d , ulcy: 4219044.76828089635819d,
lenght: 0.056235642d , t1: double(9.861731), t2: double(26.141533) ,start: double(9.861731), stop:
double(26.141536),$
simeia_troxias: double([5052923.48,2614570.49,4345624.55,4791.72231,440.35096,-
5820.17144,5130213.14,2621272.80,4250251.35,4703.187,383.05297,-5896.29912]),$
ulf:38.08419167d , ull: 23.844475d , urf: 38.08419167d , url: 23.95549718d , llf: 38.03302981d , llr:
23.844475d, lrf: 38.03302981d, lrl: 23.95549718d,$
bima:5.0 , rang_space: 7.8039746d , azim_space: 4.0467863d , ro:827355.4587d,$
aaxis: 6378137.0d, baxis: 6356752.31414d}
```

;Αρχή αλγορίθμου

```
image=read_tiff(input.file_path)
```

```
im_size=size(image)
```

```
image=transpose(image,[1,2,0])
```

```
im_size=size(image)
```

```
print,'Διαστάσεις μη γεωαναφερμένης εικόνας'
```

```
print,im_size
```

;Υπολογισμός Μοντέλου Τροχιάς-Συντελεστές Τροχιάς

```
t1=input.t1 ;μόνο δευτερόλεπτα και κάτω/ Χρόνος για σημεία τροχιάς
```

```
t2=input.t2 ;μόνο δευτερόλεπτα και κάτω/ Χρόνος για σημεία τροχιάς
```

```
simeia=input.simeia_troxias
```

```
Asxed=double([[t1^3,t1^2,t1,1],$
```

```
[t2^3,t2^2,t2,1],$
```

```
[3*t1^2,2*t1,1,0],$
```

```
[3*t2^2,2*t2,1,0]])
```

```
dlx=double([simeia[0],$
```

```
simeia[6],$
```

```
simeia[3],$
```

```
simeia[9]])
```

```
dly=double([simeia[1],$
```

```

simeia[7],$
simeia[4],$
simeia[10]])
dlz=double([simeia[2],$
simeia[8],$
simeia[5],$
simeia[11]])
suntx=imsl_inv((transpose(Asxed)##Asxed),/double)##(transpose(Asxed)##transpose(dlx)
sunty=imsl_inv((transpose(Asxed)##Asxed),/double)##transpose(Asxed)##transpose(dly)
suntz=imsl_inv((transpose(Asxed)##Asxed),/double)##transpose(Asxed)##transpose(dlz)
print,'Συντελεστές Μοντέλου Τροχιάς στον Άξονα X','',$
suntx
print,'Συντελεστές Μοντέλου Τροχιάς στον Άξονα Y','',$
suntz
print,'Συντελεστές Μοντέλου Τροχιάς στον Άξονα Z','',$
suntz
;Τέλος υπολογισμών τροχιάς
;Καθορισμός μεγέθους τελικής εικόνας
ul=double([input.ulf,input.ul])
ur=double([input.urf,input.ur])
ll=double([input.llf,input.ll])
lr=double([input.lrf,input.lr])

maxf=max([ul[0],ur[0],ll[0],lr[0]])
minf=min([ul[0],ur[0],ll[0],lr[0]])
maxl=max([ul[1],ur[1],ll[1],lr[1]])
minl=min([ul[1],ur[1],ll[1],lr[1]])

arxiki=[maxf,minl]
teliki=[minf,maxl]
;Εισαγωγή συναρτήσεων μετατροπής συντεταγμένων από φ,λ σε x,y UTM με συγκεκριμένη ζώνη
; center_longitude=input.center_longitude , center_latitude=input.center_latitude
mapp=map_proj_init(101,zone=34,datum= 8,/GCTP) ;Καθορισμός του είδους της προβολής
,limit=[minf,minl,maxf,maxl]
metatropi=map_proj_forward([arxiki[1],teliki[1]],[arxiki[0],teliki[0]],map_structure=mapp) ;Μετατροπή
συντεταγμένων από Xmap,Ymap σε φ,λ
arxikimap=[metatropi[0,0],metatropi[1,0]]
telikimap=[metatropi[0,1],metatropi[1,1]]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
;τέλος μετατροπής
bima=input.bima ; Βήμα του τελικού γεωαναφερόμενου φατνίου (pixel)
mia=abs(round((arxikimap[0]-telikimap[0])/bima))
duo=abs(round((arxikimap[1]-telikimap[1])/bima))
geocodENvi=fltarr(mia,duo,im_size[3])
si=size(geocodENvi)
print,'Διαστάσεις Γεωαναφερόμενης εικόνας'
print,si
;Τέλος καθορισμού μεγέθους τελικής εικόνας
t11=input.start ;Χρόνος εκίνησης εικόνας (1η αζιμουθιακή γραμμή)
t22=input.stop ;Χρόνος τέλους εικόνας (Τελευταία αζιμουθιακή γραμμή)
bimat=((t22-t11)/im_size[2]) ;Καθορισμός χρονικού βήματος
rang_space=input.rang_space ;Καθορισμός χωρικού βήματος στην διεύθυνση των αποστάσεων
azim_space=input.azim_space ;Καθορισμός χωρικού βήματος στην διεύθυνση των αζιμουθίων

```

```

ro=input.ro ;Καθορισμός απόστασης δορυφόρου με πρώτο σημείο εικόνας (az=0,rang=0) από το hdr
;Αρχή διαδικασίας γεωαναφοράς
stilimexy=dblarr(si[1],si[2],3)
for j=0,si[2]-1 do begin
stilimexy[0:si[1]-1,j,0]=arxikimap[1]-j*bima
endfor
for i=0,si[1]-1 do begin
stilimexy[i,0:si[2]-1,1]=arxikimap[0]+i*bima
endfor
;Εισαγωγή Ψηφιακού μοντέλου εδάφους
dem=read_tiff(input.dem_path)
print,Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Εισήχθει'
bima_dem=input.bima_dem ;Βήμα του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους
si_dem=size(dem)
ulc=[input.ulcx,input.ulcy] ;Upper Left Corner of DEM επί χάρτου συντεταγμένες
lenght=input.lenght
for i=0,si[1]-1 do for j=0,si[2]-1 do begin
deiktisx=(stilimexy[i,j,1]-ulc[0])/bima_dem
deiktisy=(ulc[1]-stilimexy[i,j,0])/bima_dem
if deiktisx GE si_dem[1]-1 OR deiktisx LE 0.0 OR deiktisy GE si_dem[2]-1 OR deiktisy LE 0.0 then
begin
stilimexy[i,j,2]=0.0
endif else begin
stilimexy[i,j,2]=dem[round(deiktisx),round(deiktisy)]
endelse
endfor
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
dem=0
number_el=n_elements(geocodEnvi)/2
geocodENvi=0
h2=dblarr(number_el)
for j=1,si[2] do begin
h2[(j-1)*si[1]:(j*si[1]-1)]=stilimexy[0:si[1]-1,j-1,2]+39.0d
endfor
;Μετατροπή των (xmap,ymap,h) χάρτου και ορθομετρικό υψόμετρο σε γεωκεντρικές συντεταγμένες του
GRS'80 συστήματος αναφοράς
print,Έναρξη διαδικασίας μετατροπής συντεταγμένων από χ,y ΧΑΡΤΟΥ ΣΕ φ,λ ΓΕΩΚΕΝΤΡΙΚΑ ΚΑΙ
ΜΕΤΑ ΣΕ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΑ X,Y,Z'
stilimexy0=reform(stilimexy[*,*],number_el)
stilimexy1=reform(stilimexy[*,*],number_el)
stilimexy=0
vectorp=dblarr(3,number_el)
metfl=map_proj_inverse(stilimexy1[0:number_el/2],stilimexy0[0:number_el/2],map_structure=mapp,/radius)
aaxis=input.aaxis
baxis=input.baxis
e2=(aaxis^2-baxis^2)/aaxis^2
;!!!!!!!
Rn=aaxis/(sqrt(1-e2*(sin(metfl[1,*])^2)))
aas=size(Rn)
xx=(Rn+h2[0:aas[2]-1])*cos(metfl[1,*])*cos(metfl[0,*])
aa=size(xx)
vectorp[0,0:aa[2]-1]=[xx]

```

```

print, 'Έτοιμο το X/2'
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
xx=0
yy=(Rn+h2[0:aa[2]-1])*cos(metfl[1,*])*sin(metfl[0,*])
vectorp[1,0:aa[2]-1]=[yy]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
yy=0
print, 'Έτοιμο το Y/2'
zz=((1-e2)*Rn+h2[0:aa[2]-1])*sin(metfl[1,*])
vectorp[2,0:aa[2]-1]=[zz]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
zz=0
print, 'Έτοιμο το Z/2'
Rn=0
metfl=0
metfl2=map_proj_inverse(stilimexy1[number_el/2:number_el-1],stilimexy0[number_el/2:number_el-1],map_structure=mapp,/radians)
stilimexy0=0
stilimexy1=0
Rn2=aaxis/(sqrt(1-e2*(sin(metfl2[1,*])^2)))
asd=size(Rn2)
xx2=(Rn2+h2[aa[2]:number_el-1])*cos(metfl2[1,*])*cos(metfl2[0,*])
vectorp[0,aa[2]:number_el-1]=[xx2]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
xx2=0
print, 'Έτοιμο το X/2'
yy2=(Rn2+h2[aa[2]:number_el-1])*cos(metfl2[1,*])*sin(metfl2[0,*])
vectorp[1,aa[2]:number_el-1]=[yy2]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
yy2=0
print, 'Έτοιμο το Y/2'
zz2=((1-e2)*Rn2+h2[aa[2]:number_el-1])*sin(metfl2[1,*])
vectorp[2,aa[2]:number_el-1]=[zz2]
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
zz2=0
print, 'Έτοιμο το Z/2'
Rn2=0
metfl2=0
stilimexy=0
e2=0
h2=0
stilimexy0=0
stilimexy1=0
print, 'Τέλος διαδικασίας μετατροπής'
print, 'Έλεγχος της προς Γεωαναφοράς εικόνας'
print, im_size
geocodENvi=fltarr(mia,duo,im_size[3])
print, 'Έλεγχος των διαστάσεων της Γεωαναφερόμενης εικόνας'
print, size(geocodENvi)
geocodENvi1a=reform(geocodENvi[*,*],0,number_el)
geocodENvi2a=reform(geocodENvi[*,*],1,number_el)
;Υπολογισμός θέσης του σημείου στην RADAR εικόνα
;Δίνουμε αρχικές τιμές στην θέση και ταχύτητα του δορυφόρου για την παρούσα γεωδαιτική θέση

```

```

fd1=1.0
fd2=0.0
t=t11+2220*bimat
t0=1.0
r1=0.0
r2=0.0
ttt=t11+2220*bimat
tend=t11+5000*bimat
;ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ
print, 'Αρχή της διαδικασίας ΕΜΜΕΣΗΣ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ της δ.ψ.τ.α.'
repeat begin
;πρώτη θέση
diaf1=dblarr(3,number_el)
fd1=dblarr(number_el)
vectors1=[suntx[0]*t^3+suntx[1]*t^2+suntx[2]*t+suntx[3],suntly[0]*t^3+suntly[1]*t^2+suntly[2]*t+suntly[3],s
untz[0]*t^3+suntz[1]*t^2+suntz[2]*t+suntz[3]]
veloci1=[3*suntx[0]*t^2+2*suntx[1]*t+suntx[2],3*suntly[0]*t^2+2*suntly[1]*t+suntly[2],3*suntz[0]*t^2+2*s
untz[1]*t+suntz[2]]
diaf1[0,0:number_el/2]=vectorp[0,0:number_el/2]-vectors1[0]
diaf1[1,0:number_el/2]=vectorp[1,0:number_el/2]-vectors1[1]
diaf1[2,0:number_el/2]=vectorp[2,0:number_el/2]-vectors1[2]
r1=sqrt((vectors1[0]-vectorp[0,0:number_el/2])^2+(vectors1[1]-vectorp[1,0:number_el/2])^2+(vectors1[2]-
vectorp[2,0:number_el/2])^2)
fd1[0:number_el/2]=-(2.0/length)*((veloci1[0]*diaf1[0,0:number_el/2])+
(veloci1[1]*diaf1[1,0:number_el/2])+(veloci1[2]*diaf1[2,0:number_el/2]))/r1
r1=0
diaf1[0,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[0,number_el/2+1:number_el-1]-vectors1[0]
diaf1[1,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[1,number_el/2+1:number_el-1]-vectors1[1]
diaf1[2,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[2,number_el/2+1:number_el-1]-vectors1[2]
r11=sqrt((vectors1[0]-vectorp[0,number_el/2+1:number_el-1])^2+(vectors1[1]-
vectorp[1,number_el/2+1:number_el-1])^2+(vectors1[2]-vectorp[2,number_el/2+1:number_el-1])^2)
fd1[number_el/2+1:number_el-1]=-(2.0/length)*((veloci1[0]*diaf1[0,number_el/2+1:number_el-1])+
(veloci1[1]*diaf1[1,number_el/2+1:number_el-1])+(veloci1[2]*diaf1[2,number_el/2+1:number_el-1]))/r11
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
diaf1=0
r11=0
;δεύτερη θέση (ένα χρονικό βήμα περισσότερο)
t0=t+bimat
diaf2=dblarr(3,number_el)
fd2=dblarr(number_el)
vectors2=[suntx[0]*t0^3+suntx[1]*t0^2+suntx[2]*t0+suntx[3],suntly[0]*t0^3+suntly[1]*t0^2+suntly[2]*t0+su
ntly[3],suntz[0]*t0^3+suntz[1]*t0^2+suntz[2]*t0+suntz[3]]
veloci2=[3*suntx[0]*t0^2+2*suntx[1]*t0+suntx[2],3*suntly[0]*t0^2+2*suntly[1]*t0+suntly[2],3*suntz[0]*t0^
2+2*suntz[1]*t0+suntz[2]]
diaf2[0,0:number_el/2]=vectorp[0,0:number_el/2]-vectors2[0]
diaf2[1,0:number_el/2]=vectorp[1,0:number_el/2]-vectors2[1]
diaf2[2,0:number_el/2]=vectorp[2,0:number_el/2]-vectors2[2]
r2=sqrt((vectors2[0]-vectorp[0,0:number_el/2])^2+(vectors2[1]-vectorp[1,0:number_el/2])^2+(vectors2[2]-
vectorp[2,0:number_el/2])^2)
fd2[0:number_el/2]=-(2.0/length)*((veloci2[0]*diaf2[0,0:number_el/2])+
(veloci2[1]*diaf2[1,0:number_el/2])+(veloci2[2]*diaf2[2,0:number_el/2]))/r2
r2=0
diaf2[0,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[0,number_el/2+1:number_el-1]-vectors2[0]

```

```

diaf2[1,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[1,number_el/2+1:number_el-1]-vectors2[1]
diaf2[2,number_el/2+1:number_el-1]=vectorp[2,number_el/2+1:number_el-1]-vectors2[2]
r22=sqrt((vectors2[0]-vectorp[0,number_el/2+1:number_el-1])^2+(vectors2[1]-
vectorp[1,number_el/2+1:number_el-1])^2+(vectors2[2]-vectorp[2,number_el/2+1:number_el-1])^2)
fd2[number_el/2+1:number_el-1]=-(2.0/length)*((veloci2[0]*diaf2[0,number_el/2+1:number_el-1])+
(veloci2[1]*diaf2[1,number_el/2+1:number_el-1])+(veloci2[2]*diaf2[2,number_el/2+1:number_el-1]))/r22
;Εξοικονόμηση ΜΝΗΜΗΣ RAM
diaf2=0
r22=0
fd12=fd1*fd2
fd1=0
fd2=0
t=t+bimat
ttt=ttt+bimat
;
result=where(fd12 LE 0.0)
fd12=0
si_result=size(result)
if result[0] EQ -1 then begin
print,'Οι χρόνοι ή η περιοχή είναι διάφορες μεταξύ τους/Times and Coordinates are irrelevant'
print,'Το συμβάν έγινε την χρονική στιγμή t=', ' ',t
endif else begin
vectorp2=dblarr(3,si_result[1])
vectorp2[0:2,*]=vectorp[0:2,result]
tlim1=t-bimat
tlim2=t
n=0
ffvectors=[suntx[0]*tp^3+suntx[1]*tp^2+suntx[2]*tp+suntx[3],suntz[0]*tp^3+suntz[1]*tp^2+suntz[2]*tp+s
untz[3],suntz[0]*tp^3+suntz[1]*tp^2+suntz[2]*tp+suntz[3]]
r2tel=sqrt((ffvectors[0]-vectorp2[0,*])^2+(ffvectors[1]-vectorp2[1,*])^2+(ffvectors[2]-vectorp2[2,*])^2)
azim=(tp-t11)/bimat
rang=(r2tel-ro)/rang_space
www3=where(rang LE im_size[1] AND rang GT 0.0)
if www3[0] NE -1 then begin
www3_si=size(www3)
geocodENvi1a[round(result[www3])]=image[round(rang[www3]),round(azim),0]
geocodENvi2a[round(result[www3])]=image[round(rang[www3]),round(azim),1]
print,'Χρόνος t=',t,' OK!!!'
www3=0
endif
endelse
endrep until ttt GT tend
;Array to Matrix
geocodENvi=fltarr(mia,duo,im_size[3])
geoc1a=reform(geocodENvi1a,si[1],si[2])
geoc2a=reform(geocodENvi2a,si[1],si[2])
geocodENvi[*,* ,0]=geoc1a
geocodENvi[*,* ,1]=geoc2a
print,'Ολοκλήρωση διαδικασίας και αποθήκευση αρχείου'
save,geocodenvi,filename='full file path

```



## ΠΑΡΑΤΗΜΑ ΙΙ

## Πρόγραμμα Υπολογισμού Σφαλμάτων από Σημεία Ελέγχου

Copyright (C) 2010 Dimitris Sykas

This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.

**PRO elgxs\_geo\_hyperion**

```

input={tiep_1ou: '.txt',$
tiep_2ou: '.txt',$
tiep_rst: '.txt',$
bima_dem: 5.0, dem: '.tif',$
ulc: [38.37652778d,23.08524167d]}
polyn1=read_ascii(input.tiep_1ou);Δομή: Xhyperion,Yhyperion,Xspot,Yspot
polyn2=read_ascii(input.tiep_2ou);Δομή: Xhyperion,Yhyperion,Xspot,Yspot
polyn3=read_ascii(input.tiep_rst);Δομή: Xhyperion,Yhyperion,Xspot,Yspot

polyn1=polyn1.field1
polyn2=polyn2.field1
polyn3=polyn3.field1
si_pol1=size(polyn1)
si_pol2=size(polyn2)
si_pol3=size(polyn3)

diafores=[polyn1[0,*]-polyn1[2,*],polyn1[1,*]-polyn1[3,*]]
uux=diafores[0,*]*diafores[0,*]
uuy=diafores[1,*]*diafores[1,*]
diafores2=[polyn2[0,*]-polyn2[2,*],polyn2[1,*]-polyn2[3,*]]
uux2=diafores2[0,*]*diafores2[0,*]
uuy2=diafores2[1,*]*diafores2[1,*]
diafores3=[polyn3[0,*]-polyn3[2,*],polyn3[1,*]-polyn3[3,*]]
uux3=diafores3[0,*]*diafores3[0,*]
uuy3=diafores3[1,*]*diafores3[1,*]

rmsx=sqrt((total(uux))/(si_pol1[2]-1))
rmsy=sqrt((total(uuy))/(si_pol1[2]-1))
print,'Μέσο σφάλμα στο X σε μέτρα Ιου ',rmsx,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyr: ',rmsx/10.0,'
',sqrt(rmsx^2+rmsy^2)
print,'Μέσο σφάλμα στο Y σε μέτρα Ιου ',rmsy,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyr: ',rmsy/10.0
print,'Διαφορές σε κάθε tie point σε μέτρα'
print,diafores

```



```

rmsx2=sqrt((total(uux2))/(si_pol2[2]-1))
rmsy2=sqrt((total(uuy2))/(si_pol2[2]-1))
print,'Μέσο σφάλμα στο X σε μέτρα 2ου ',rmsx2,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyp:
',rmsx2/10.0,' ',sqrt(rmsx2^2+rmsy2^2)
print,'Μέσο σφάλμα στο Y σε μέτρα 2ου ',rmsy2,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyp:
',rmsy2/10.0
print,'Διαφορές σε κάθε tie point σε μέτρα'
print,diafores2
rmsx3=sqrt((total(uux3))/(si_pol3[2]-1))
rmsy3=sqrt((total(uuy3))/(si_pol3[2]-1))
print,'Μέσο σφάλμα στο X σε μέτρα στο RST ',rmsx3,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyp:
',rmsx3/10.0,' ',sqrt(rmsx3^2+rmsy3^2)
print,'Μέσο σφάλμα στο Y σε μέτρα στο RST ',rmsy3,' Σε σχέση με το μέγεθος του pixel του Hyp:
',rmsy3/10.0
print,'Διαφορές σε κάθε tie point σε μέτρα'
print,diafores3
ulc=input.ulc
xymap=polyn1[2:3,*]
xymap2=polyn2[2:3,*]
xymap3=polyn3[2:3,*]
xyh=dblarr(3,si_pol1[2])
xyh[0:1,*]=xymap
xyh2=dblarr(3,si_pol2[2])
xyh2[0:1,*]=xymap2
xyh3=dblarr(3,si_pol2[2])
xyh3[0:1,*]=xymap3
mapp=map_proj_init(101,zone=34,datum= 8)
ulcmap=map_proj_forward(ulc[1],ulc[0],map_structure=mapp)
dem=read_tiff(input.dem)
si_dem=size(dem)
bima_dem=input.bima_dem
;Εισαγωγή της Πάνω Αριστερής Γωνίας σε MOIPEΣ (φ,λ) ////double(0.0000462962963)
ulc=input.ulc
for i=0,si_pol1[2]-1 do begin
deiktisf=(ulcmap[1]-xymap[1,i])/bima_dem
deiktisl=(xymap[0,i]-ulcmap[0])/bima_dem
deiktisf2=(ulcmap[1]-xymap2[1,i])/bima_dem
deiktisl2=(xymap2[0,i]-ulcmap[0])/bima_dem
deiktisf3=(ulcmap[1]-xymap3[1,i])/bima_dem
deiktisl3=(xymap3[0,i]-ulcmap[0])/bima_dem
if deiktisf GE si_dem[2]-1 OR deiktisf LE 0.0 OR deiktisl GE si_dem[1]-1 OR deiktisl LE 0.0 then begin
xyh[2,i]=0.0
endif else begin
xyh[2,i]=dem[round(deiktisl),round(deiktisf)]
endelse
if deiktisf2 GE si_dem[2]-1 OR deiktisf2 LE 0.0 OR deiktisl2 GE si_dem[1]-1 OR deiktisl2 LE 0.0 then
begin
xyh2[2,i]=0.0
endif else begin
xyh2[2,i]=dem[round(deiktisl),round(deiktisf)]
endelse
if deiktisf3 GE si_dem[2]-1 OR deiktisf3 LE 0.0 OR deiktisl3 GE si_dem[1]-1 OR deiktisl3 LE 0.0 then
begin

```

```
xyh3[2,i]=0.0
endif else begin
xyh3[2,i]=dem[round(deiktisl),round(deiktisf)]
endelse
endfor
dem=0
q1=where(xyh[2,*] LE 150.0)
qq1=size(q1)
uux11=diafores[0,q1]*diafores[0,q1]
uuy11=diafores[1,q1]*diafores[1,q1]
rmsx1le=sqrt((total(uux11))/(qq1[1]-1))
rmsy1le=sqrt((total(uuy11))/(qq1[1]-1))
print,'1 RMSx LE 150: ',rmsx1le
print,'1 RMSy LE 150: ',rmsy1le
print,'1 RMSx% LE 150: ',rmsx1le/10.0
print,'1 RMSy% LE 150: ',rmsy1le/10.0
q1=where(xyh[2,*] GT 150.0)
qq1=size(q1)
uux11=diafores[0,q1]*diafores[0,q1]
uuy11=diafores[1,q1]*diafores[1,q1]
rmsx1le=sqrt((total(uux11))/(qq1[1]-1))
rmsy1le=sqrt((total(uuy11))/(qq1[1]-1))
print,'1 RMSx GT 150: ',rmsx1le
print,'1 RMSy GT 150: ',rmsy1le
print,'1 RMSx% GT 150: ',rmsx1le/10.0
print,'1 RMSy% GT 150: ',rmsy1le/10.0
;
q1=where(xyh[2,*] LE 150.0)
qq1=size(q1)
uux11=diafores3[0,q1]*diafores3[0,q1]
uuy11=diafores3[1,q1]*diafores3[1,q1]
rmsx1le=sqrt((total(uux11))/(qq1[1]-1))
rmsy1le=sqrt((total(uuy11))/(qq1[1]-1))
print,'3 RMSx LE 150: ',rmsx1le
print,'3 RMSy LE 150: ',rmsy1le
print,'3 RMSx% LE 150: ',rmsx1le/10.0
print,'3 RMSy% LE 150: ',rmsy1le/10.0
q1=where(xyh[2,*] GT 150.0)
qq1=size(q1)
uux11=diafores3[0,q1]*diafores3[0,q1]
uuy11=diafores3[1,q1]*diafores3[1,q1]
rmsx1le=sqrt((total(uux11))/(qq1[1]-1))
rmsy1le=sqrt((total(uuy11))/(qq1[1]-1))
print,'3 RMSx GT 150: ',rmsx1le
print,'3 RMSy GT 150: ',rmsy1le
print,'3 RMSx% GT 150: ',rmsx1le/10.0
print,'3 RMSy% GT 150: ',rmsy1le/10.0
END
```