

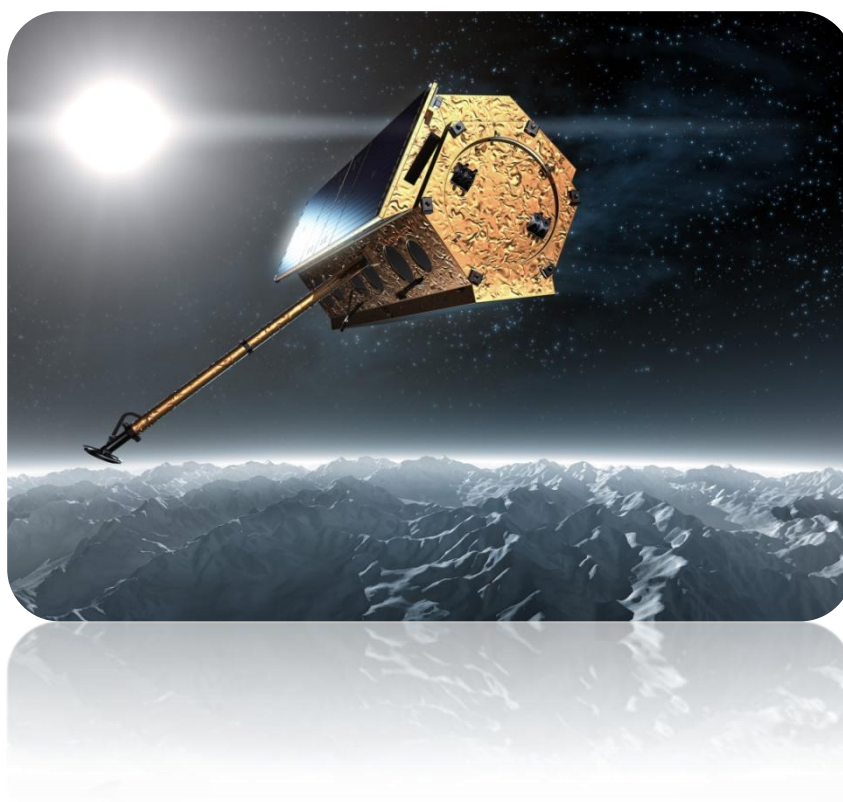
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ



Φωτογραμμετρική Επεξεργασία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Απεικονίσεων TerraSar - Χ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ

ΜΠΟΥΡΕΞΗ ΦΩΤΙΟΥ



Επιβλέπων : Ιωαννίδης Χαράλαμπος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Περιεχόμενα

Αντί Προλόγου	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
Α) ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SAR.....	4
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΡΑΝΤΑΡ	4
1.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΑ ΡΑΝΤΑΡ	5
1.3 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ(SAR)	7
1.3.1 Γενικά	7
1.3.2 Γεωμετρία Λήψης Συστημάτων SAR.....	8
1.3.3 Επεξεργασία Πρωτογενών SAR Δεδομένων	12
1.4 ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ.....	20
1.4.1 Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων	21
1.4.2 Διακριτική Ικανότητα Αζιμουθίων.....	23
1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ.....	26
1.5.1 Σμίκρυνση (Foreshortening).....	27
1.5.2 Πτύχωση (Layover).....	27
1.5.3 Σκίαση (Shadow)	28
2. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ TerraSAR -X	29
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	29
2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (IMAGE MODES)	31
2.2.1 ScanSAR Mode (SC)	31
2.2.2 StripMap Mode (SM):	33
2.2.3 Spotlight Mode (SL):	37
2.2.4 Κάλυψη Περιοχής	41
2.3 ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	43
2.3.1 Γεωμετρικές Προβολές και Αναπαράσταση Δεδομένων	43
2.3.2 Γεωμετρική - Ραδιομετρική Επεξεργασία.....	46

2.3.3	Ακρίβεια εντοπισμού των εικονοστοιχείων στο έδαφος (Pixel Localization Accuracy)	51
2.4	ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	54
2.4.1	ORI ^{SAR} - Orthorectified Image	54
2.4.2	RaN ^{SAR} - Radiometrically Corrected Image	54
2.4.3	MC ^{SAR} – Mosaic	55
2.4.4	ADM ^{SAR} - Ascending/Descending Merge	55
2.4.5	OI ^{SAR} - Oriented Image	55
2.4.6	Χρήσιμα Βοηθητικά Προϊόντα	56
2.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ	57
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ	62
3.1	ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΟ ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ ΣΤΟ ERDAS IMAGINE ORTHORADAR	62
3.2	ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	69
3.2.1	Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (Direct Linear Transformation)	69
3.2.2	Κλασματικά Πολυώνυμα (Rational Function Models)	70
B)	ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Γεωαναφορά εικόνας – Μέθοδοι και Αποτελέσματα	74
4.	ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	74
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	74
4.2	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ TerraSAR-X	74
4.3	ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ – ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	77
4.3.1	Αναγνώριση φωτοσταθερών	78
4.3.2	Φωτοσταθερά με μετρήσεις GPS	79
4.3.3	Φωτοσταθερά από ορθοφωτογραφία	83
5.	ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΕΙΚΟΝΑΣ: ΜΕΘΟΔΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	88
5.1	ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ IMAGINE RADAR ΤΗΣ ERDAS	88
5.2	ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ DLT ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ	98
5.3	RPF 2 ^{ου} Βαθμού	107
5.4	RPF 3 ^{ου} Βαθμού	113
5.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	115

6. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ	118
6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	118
6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΟΡΘΟΑΝΑΓΩΓΗΣ	119
6.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Ορθοαναγωγής - Αξιολόγηση	120
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	125
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:	135
Α) ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	135
Β) ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	141
Γ) ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΤΟ MATLAB	153
Δ) ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ	161

Εικόνες

Εικόνα 1.1: Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας	4
Εικόνα 1.2: Λειτουργία απεικονιστικού ραντάρ.	6
Εικόνα 1.3 Συνθετικό – Πραγματικό άνοιγμα κεραίας	7
Εικόνα 1.4: Αρχή Λειτουργίας SAR.....	8
Εικόνα 1.5: Στοιχεία γεωμετρίας SAR απεικόνισης	9
Εικόνα 1.6: Μεταδιδόμενος διαφοροποιημένος παλμός	10
Εικόνα 1.7:Δραστηριότητα κεραίας SAR....	10
Εικόνα 1.8: Κυματομορφή γραμμικά διαμορφωμένου σήματος	11
Εικόνα 1.9: Δειγματοληψία επιστρεφόμενου παλμού	12
Εικόνα 1.10: Απόκριση Στόχου	13
Εικόνα 1.11: Ακατέργαστη Απεικόνιση Sar.....	13
Εικόνα 1.12:Επεξεργασία Πρωτογενών Δεδομένων.....	14
Εικόνα 1.13: Διάσπαρτη ενέργεια από ένα στόχο στην ακατέργαστη εικόνα	14
Εικόνα 1.14: Συμπύεση Επιστρεφόμενου Παλμού.....	15
Εικόνα 1.15: Αναπαράσταση ισχύος επιστρεφόμενου παλμού και μεταβολή της συχνότητάς του συναρτήσει του χρόνου.	16
Εικόνα 1.16: Μεταβολή συχνότητας με μεταβολή της αζιμουθιακής γωνίας κλίσης (αριστερά), Διαδικασία Συμπύεσης και για τους δύο άξονες της εικόνας (δεξιά).....	18
Εικόνα 1.17: Συμπύεση άξονα αποστάσεων	19
Εικόνα 1.18: Συμπύεση Αζιμουθίων(1).....	19
Εικόνα 1.19:Συμπύεση Αζιμουθίων(2).....	19
Εικόνα 1.20:Ανάλυση στην κεκλιμένη απόσταση και στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους.	21
Εικόνα 1.21: Γεωμετρία συστήματος στη διεύθυνση των αζιμουθίων	24
Εικόνα 1.22: Σμίκρυνση	28
Εικόνα 1.24: Σκίαση	28
Εικόνα 1.23: Πτύχωση	28
Εικόνα 2.1: Ηλεκτρονική περιστροφή κεραίας Πηγή:	29
Εικόνα 2.2: Διαφορετικά πολωμένες κυματομορφές.....	30
Εικόνα 2.3: Τρόπος απεικόνισης ScanSAR.....	31
Εικόνα 2.4: StripMap Λειτουργία	33
Εικόνα 2.5 Γεωμετρία Απεικόνισης StripMap.....	34

Εικόνα 2.6: Γεωμετρία Τρόπου Απεικόνισης Spotlight.....	37
Εικόνα 2.7: Προσαρμογή απεικονίσεων Spotlight (κόκκινο) στην επιθυμητή περιοχή (μπλε κουκίδες).....	42
Εικόνα 2.8: Spotlight EEC σε απεικόνιση σ_0, β_0 και χρήση αρχείου με γωνίες πρόσπτωσης(GIM).	46
Εικόνα 2.9: Αρχική απόκριση στόχου	47
Εικόνα 2.10: Απόκριση στόχου μετά από συμπίεση των sidelobes.	47
Εικόνα 2.11: Χωρικά (πάνω) και ραδιομετρικά (κάτω) βελτιωμένες απεικονίσεις Stripmap.....	49
Εικόνα 2.12: Γεωμετρία παραμόρφωσης απεικόνισης ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης και σφάλμα DEM.	52
Εικόνα 2.13:Χαρακτηριστικά των DEM που διατίθενται για τα προϊόντα TerraSAR.	53
Εικόνα 2.14: Γραφική αναπαράσταση δείκτη PSLR.....	59
Εικόνα 3.1: Τομή σφαίρας με ακτίνα την απόσταση του σημείου, κώνου Doppler και μοντέλου Φ.Γ.Ε για προσδιορισμό θέσης στόχου στη Φ.Γ.Ε(γραφική αναπαράσταση αλγόριθμου Range – Doppler).....	66
Εικόνα 3.2: Διανυσματική αναπαράσταση αλγόριθμου Range – Doppler.	68
Εικόνα 4.1: Διατιθέμενη ψηφιακή απεικόνιση TerraSAR-X Spotlight HS 300MHz.	76
Εικόνα 4.2: Αποψη της ευρύτερης περιοχής της απεικόνισης και της έκτασης όπου απεικονίζεται στην απεικόνιση SAR.....	77
Εικόνα 4.3: Αναγνώριση Φωτοσταθερών στο Erdas Imagine OrthoRadar	80
Εικόνα 4.4: Δίκτυο επίλυσης βάσεων GPS.....	81
Εικόνα 4.5: Κατανομή φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου από μετρήσεις GPS.	82
Εικόνα 4.6: Κατανομή φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου	83
Εικόνα 4.7: Διατιθέμενο Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM).	84
Εικόνα 5.1: Κατανομή φωτοσταθερών (κίτρινο) – σημείων ελέγχου (πράσινο) για γεωαναφορά με DLT. Χρήση 16 φωτοσταθερών - 14 σημείων ελέγχου.	101
Εικόνα 5.2: Κατανομή φωτοσταθερών (κίτρινο)–σημείων ελέγχου (πράσινο).....	111
6.1: Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας.....	118
Εικόνα 6.2: Οπτική σύγκριση Ορθοφωτογραφίας SAR και ορθοφωτογραφιών από οπτικές εικόνες σε ΕΓΣΑ'87.	122
Εικόνα 6.3: Οπτική υπέρθεση ορθοφωτογραφίας SAR και ορθοφωτογραφιών από οπτικές εικόνες.	123
Εικόνα 6.4: Ορθοφωτογραφία σε ΕΓΣΑ'87. Φαίνονται τραβήγματα (κίτρινο)	124
Εικόνα Α.1: Γεωμετρική Απεικόνιση Ορολογίας.....	161

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1.1: Μεταβολή Φάσης, Συχνότητας και Ισχύος του σήματος με το χρόνο	17
Διάγραμμα 1.2:Επιστροφές τριών παλμών στο πεδίο χρόνου – συχνότητας (Range – Doppler), Γραφική απεικόνιση κεντροειδούς Doppler (f_{DO}).	20
Διάγραμμα 1.3: Μεταβολή της ανάλυσης στην γήινη πλευρική απόσταση(ground range) αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης. (RADARSAT 1).	22
Διάγραμμα 2.1: Σύγκριση συχνότητας μεταξύ συνεχόμενης (StripMap) και διακοπτόμενης λειτουργίας (ScanSAR)	32
Διάγραμμα 2.2: Ανάλυση στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους για λειτουργία στα 100MHz (λευκή γραμμή) και στα 150 MHz (κόκκινη γραμμή) και επικάλυψή τους (SSC προϊόντα).	35
Διάγραμμα 2.3: Ανάλυση ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης για SSC StripMap προϊόντα (καμπύλες- διεύθυνση απόστασης, ευθεία γραμμή - διεύθυνση αζιμουθίων).....	36
Διάγραμμα 2.4: Μήκος και πλάτος απεικόνισης, ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης στο κέντρο της απεικόνισης για προϊόν Spotlight HS 300MHz.	42
Διάγραμμα 2.5: Διακριτική ικανότητα επεξεργασμένων προϊόντων Spotlight HS 150,300 MHz αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης.	50
Διάγραμμα 2.6: Διακριτική ικανότητα επεξεργασμένων προϊόντων SL,SM,SC αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης	50
Διάγραμμα 2.7: Spotlight HS 150MHz (αριστερά) και 300MHz (δεξιά). Διακριτική ικανότητα(μαύρο) και αριθμός όψεων (μπλε), ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης.	60
Διάγραμμα 2.8: StripMap 100MHz (αριστερά) και 150MHz (δεξιά). Διακριτική ικανότητα (μαύρο) και αριθμός όψεων (μπλε), ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης.	60
Διάγραμμα 2.9: Διακριτική ικανότητα ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης για SSC προϊόντα όλων των τρόπων απεικόνισης (SM,SC,SL,HS) Καμπύλη: αζιμουθιακή διεύθυνση, Διακεκομμένη: Διεύθυνση αποστάσεων.....	61
Διάγραμμα 4.1: Διαφορά Συντεταγμένων Από Ορθοφωτογραφία - GPS.....	84
Διάγραμμα 5.1: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMS) Σημείων Ελέγχου (Check Points) WGS'84.	91
Διάγραμμα 5.2: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMS) Σημείων Ελέγχου (Check Points) HTRS'07	91
Διάγραμμα 5.3: Εναπομένων Σφάλμα Σημείων Ελέγχου Κανένα Φωτοσταθερό	92
Διάγραμμα 5.4: Εναπομένων Σφάλμα Σημείων Ελέγχου 11 Φωτοσταθερά.....	92
Διάγραμμα 5.5: Συνολικό RMS Σημείων Χρήση ενός φωτοσταθερού από GPS	93

Διάγραμμα 5.6: Συνολικό RMS Γεωαναφοράς Φωτοσταθερά από Ortho-DTM.....	94
Διάγραμμα 5.7: Σημεία Ελέγχου από GPS (14)	95
Διάγραμμα 5.8: RMS Σημείων Ελέγχου από GPS WGS'84	98
Διάγραμμα 5.9: RMS Σημείων Ελέγχου από Ορθοφωτογραφία & DTM WGS'84	98
Διάγραμμα 5.10: Σημεία Ελέγχου από GPS Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS	100
Διάγραμμα 5.11: Σημεία Ελέγχου από Ortho-DTM Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS	100
Διάγραμμα 5.12: Τιμές Πολυωνυμικών DLT Συντελεστών για Διαφορετικό Αριθμό Φωτοσταθερών.	101
Διάγραμμα 5.13: Σημεία Ελέγχου από GPS (Έδαφος) Χρήση 16 Φωτοσταθερών	104
Διάγραμμα 5.14: Σημεία Ελέγχου από GPS (Έδαφος) Χρήση 16 Φωτοσταθερών	104
Διάγραμμα 5.15: RMS Σημείων Ελέγχου WGS'84	107
Διάγραμμα 5.16: Τιμές Πολυωνυμικών Συντελεστών RPF 2 ^{ου} Βαθμού για διαφορετικό αριθμό φωτοσταθερών	108
Διάγραμμα 5.17: RMS Σημείων Ελέγχου Χρήση 44 Φωτοσταθερών RPF 2 ^{ου} Βαθμού.....	110
Διάγραμμα 5.18: Σύγκριση Μοντέλου Δέκτη - DLT.....	114
Διάγραμμα 5.19: Σύγκριση RPF 2 ^{ου} Βαθμού - DLT.....	114
Διάγραμμα 6.1: Ακρίβεια Ορθοφωτογραφίας.....	120

Πίνακες

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά Συστήματος TerraSAR-X.....	30
Πίνακας 2.2:Παράμετροι Τροχιάς Και Λειτουργίας TerraSAR-X.....	30
Πίνακας 2.3: Στοιχεία Απεικόνισης ScanSAR	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά StripMap Απεικόνισης	34
Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης Spotlight Mode (SI)	39
Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης Spotlight (HS)	40
Πίνακας 2.7: Διαθέσιμοι Τύποι Τροχιών, αναφορικά με την ακρίβειά τους, για τα Βασικά Προϊόντα	51
Πίνακας 2.8: Σφάλμα στη διεύθυνση των αποστάσεων για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης	53
Πίνακας 2.9: Παραδιδόμενα Βοηθητικά Προϊόντα.....	56
Πίνακας 2.10: Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά StripMap μονής πόλωσης.	57
Πίνακας 2.11: Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά Spotlight Hs 150,300 MHz μονής πόλωσης.	58
Πίνακας 4.1:Χαρακτηριστικά Απεικόνισης Sar.....	75
Πίνακας 4.2: Rms Φωτοσταθερών – Σημείων Ελέγχου Από Ορθοφωτογραφία.	85
Πίνακας 5.1: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Με Εναλλαγή Φωτοσταθερών – Σημείων Ελέγχου.....	96
Πίνακας 5.2: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Για Διαφορετικής Ακρίβειας Φωτοσταθερά.....	97
Πίνακας 5.3: Εναπομένον Σφάλμα DLT.....	103
Πίνακας 5.4: Πολυωνυμικοί Συντελεστές DLT	104
Πίνακας 5.5: Προσεγγιστική Ακρίβεια DLT Σε Έδαφος – Σύστημα Εικόνας.....	105
Πίνακας 5.6: Προσεγγιστική Ακρίβεια Γεωαναφοράς Με $Rpf2^{ou}$ Βαθμού	112
Πίνακας 5.7: Σύγκριση Μεθόδων για Ίδια Φωτοσταθερά – Σημεία Ελέγχου.	115
Πίνακας 5.8: Συγκριτική Παράθεση Αποτελεσμάτων Όλων Των Μεθόδων Για Διαφορετικούς .	117
Πίνακας 6.1: Ακρίβεια Ορθοφωτογραφίας Σε WGS'84.	121
Πίνακας 6.2: Ακρίβεια Ορθοφωτογραφίας Σε ΕΓΣΑ'87.....	121
Πίνακας A.1: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών Από Gps Σε ΕΓΣΑ'87	135
Πίνακας A.2: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών Από Gps Σε WGS '84	136
Πίνακας A.3: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών Από Gps Σε HTRS'07	137
Πίνακας A.4: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών Από Ορθοφωτογραφία + DTM Σε ΕΓΣΑ'87.....	138
ΠΙΝΑΚΑΣ A.5: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών Από Ορθοφωτογραφία + DTM σε WGS'84.....	139
Πίνακας A.6: Εικονοσυντεταγμένες Φωτοσταθερών.....	140
Πίνακας A.7:Γεωαναφορά Χωρίς Φωτοσταθερά WGS'84	141
Πίνακας A.8: Rms Σημείων Ελέγχου (Pixel) Χωρίς Gcp's WGS'84.....	141

Πίνακας A.9: Γεωαναφορά Με 11 Φωτοσταθερά Απο Gps (WGS'84)	142
Πίνακας A.10: Γεωαναφορά Με 10 Φωτοσταθερά Από Ortho + DTM (WGS'84)	143
Πίνακας A.11: Γεωαναφορά Με 11 Φωτοσταθερά Από Ortho + DTM, GPS (WGS'84).....	144
Πίνακας A.12: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου Από Gps Χρήση 16 Φωτοσταθερών Από Gps.....	145
Πίνακας A.13: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου Από Ορθοφωτογραφία – DTM Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS	145
Πίνακας A.14: Φυσικο Μοντελο, Φωτοσταθερα από Gps (14) ,Σημεία Ελέγχου από Gps (10). 146	
Πίνακας A.15: Φυσικο Μοντελο, Φωτοσταθερα από Gps (14) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)146	
Πίνακας A.16: Φυσικο Μοντελο, Φωτοσταθερα από Gps + Ortho (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho(10)	147
Πίνακας A.17: Φυσικο Μοντελο, Φωτοσταθερα από Gps + Ortho (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho(10)	147
Πίνακας A.18: Φωτοσταθερά (16) - Σημεία Ελέγχου (10) από Gps, RMS (Pixel).....	148
Πίνακας A.19:Φωτοσταθερά (16) - Σημεία Ελέγχου (28) από Ortho + DTM	148
Πίνακας A.20: Φωτοσταθερά Απο GPS (14),Σημεία Ελέγχου από Gps (10), DLT.....	149
Πίνακας A.21: Φωτοσταθερά Απο GPS (14), Σημεία Ελέγχου από Ortho (10), DLT	149
Πίνακας A.22: Φωτοσταθερά Απο GPS + Ortho (44), Σημεία Ελέγχου από Orth (10), DLT.....	150
Πίνακας A.23: Πολυωνυμικοί Συντελεστές DLT ανάλογα με Φωτοσταθερά (GPS)	150
Πίνακας A.24: RPF2 ⁰⁰ Βαθμού, Φωτοσταθερά από GPS + ORTHO (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)	151
Πίνακας A.25: RPF 2 ⁰⁰ Βαθμού, Αυξανόμενος Αριθμός Φωτοσταθερών, Σημεία Ελέγχου από ORTHO + DTM (10).....	151
Πίνακας A.26: Πολυωνυμικοί Συντελεστες RPF 2 ⁰⁰ Βαθμού	152
Πίνακας A.27: Ακρίβεια προσδιορισμού γεωδαιτικών συντεταγμένων σημείων από GPS στο WGS'84 όπως προκύπτει από το λογισμικό επίλυσης των βάσεων.	177

Αντί Προλόγου

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σ.Α.Τ.Μ κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη για όλη τη βοήθεια και την εμπιστοσύνη που μου παρείχε κατά την ανάθεση και εκπόνηση της εργασίας αυτής, καθώς και για την άριστη συνεργασία που μου προσέφερε. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και για το σύνολο των γνώσεων που αποκόμισα μέσα από την ενασχόλησή μου με τη Φωτογραμμετρία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην κα. Δήμητρα Βασιλάκη Α.Τ.Μ., για την ιδιαίτερα πολύτιμη και αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση, καθώς και για τις πολύ σημαντικές συμβουλές και το χρόνο που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ πάρα πολύ την κα. Σοφία Σοϊλέ Α.Τ.Μ., για τις υποδείξεις της, τις τεχνικές δυσκολίες που με βοήθησε να αντιμετωπίσω, το χρόνο που αφιέρωσε και τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου για το κλίμα συνεργασίας που αναπτύχθηκε και τις ευκολίες που μου παρασχέθηκαν σχετικά με τη χρήση του εργαστηρίου.

Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου Βλάση και Διονύση για τη βοήθειά τους στις μετρήσεις υπαίθρου, καθώς και όλους τους άλλους, που με τον ένα ή με τον άλλο τρόπο με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για όλα όσα έχει κάνει για μένα όλα αυτά τα χρόνια και για όσα μου έχει προσφέρει μέχρι στιγμής.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Μπουρεξής Φώτιος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται και εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι για την γεωαναφορά απεικονίσεων TerraSAR–X, συντάσσονται ορθοεικόνες και αξιολογούνται τα αποτελέσματα για κάθε μια μέθοδο. Αρχικά, περιγράφεται η τεχνική των απεικονίσεων SAR και στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας και η διαδικασία παραγωγής των προϊόντων του δορυφόρου TerraSAR–X. Αναλύεται το γενικό γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη (Range – Doppler) και οι προσεγγιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη γεωαναφορά (DLT, RPF 2^{ου} βαθμού). Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή των μεθόδων γεωαναφοράς σε μια διαθέσιμη απεικόνιση TerraSAR–X, που απεικονίζει περιοχή της ΒΑ Αττικής και γίνεται σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε μέθοδο γεωαναφοράς. Το επόμενο στάδιο της εφαρμογής είναι η χρήση της γεωαναφοράς με το γενικό φυσικό μοντέλο του δέκτη, για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας της περιοχής και αξιολόγησή της ως προς την ποιότητα και τα προβλήματα που προκύπτουν. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή των παραπάνω διαδικασιών και οι προτάσεις για περαιτέρω επεξεργασία και αξιοποίηση τέτοιου είδους απεικονίσεων.

ABSTRACT

In this diploma thesis the goal is the photogrammetric processing and evaluation of TerraSAR–X images registration and orthorectification, using three different registration methods (Range – Doppler Algorithm, DLT and 2nd order RPF). The first two chapters describe the SAR technique and TerraSAR–X operation. In particular, the characteristics, geometry, imaging modes and products of TerraSAR–X are specified, as well as how these are produced. In the next, the three registration methods are analyzed, specifically how the generic sensor model that is used, works. All the three methods are applied to a TerraSAR–X image of East Attica and the results of the registration are compared to each other and evaluated. The generic sensor model is used for the production of an orthorectified image, the quality of which is evaluated, the problems that occur are referenced and the way that can they be overcome is proposed. At the end, the conclusions of the above are cited and proposals of future work and future applications of such images are made.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η φωτογραμμετρική επεξεργασία απεικονίσεων TerraSAR – X και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη γεωαναφορά τους και την παραγωγή ορθοεικόνων. Τα τρία πρώτα κεφάλαια αναφέρονται στο απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την παρούσα διπλωματική και στα επόμενα τέσσερα περιγράφεται η πρακτική εφαρμογή και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην τεχνολογία SAR. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των δεκτών SAR, καθώς και η διαδικασία παραγωγής των απεικονίσεων από πρωτογενή δεδομένα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο δορυφόρος TerraSAR–X. Περιγράφονται οι τρεις διαφορετικοί τρόποι απεικόνισης που διαθέτει καθώς και λειτουργικά χαρακτηριστικά της κάθε μίας. Αναφέρονται τα τελικά παραγόμενα προϊόντα, ο τρόπος δημιουργίας τους και η ποιότητά τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι γεωαναφοράς που μπορούν να εφαρμοστούν δηλαδή γεωμετρικό μοντέλο δέκτη, DLT, RPF 2^{ου} βαθμού ανάλογα με τα διαθέσιμα και απαιτούμενα δεδομένα. Αναλύεται γεωμετρικά και μαθηματικά το γενικό φυσικό μοντέλο του δέκτη που χρησιμοποιείται για τη γεωαναφορά. Περιγράφονται οι προσεγγιστικές μέθοδοι γεωαναφοράς, καθώς και τα προβλήματά τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα διαθέσιμα δεδομένα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, περιγράφεται η περιοχή η οποία απεικονίζεται και ο τρόπος συλλογής των αναγκαίων δεδομένων. Περιγράφεται η διαδικασία εντοπισμού των φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου στην εικόνα και στην Φ.Γ.Ε. και αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων τους, καθώς και η ποιότητά τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των τριών μεθόδων γεωαναφοράς, για διαφορετικό αριθμό και ποιότητα φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου, σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε μέθοδο.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παραγωγή ορθοφωτογραφιών με χρήση του γενικού φυσικού μοντέλου του δέκτη και αξιολογείται η ποιότητά τους, καθώς και τα προβλήματα που προκύπτουν από τη διαδικασία αυτή.

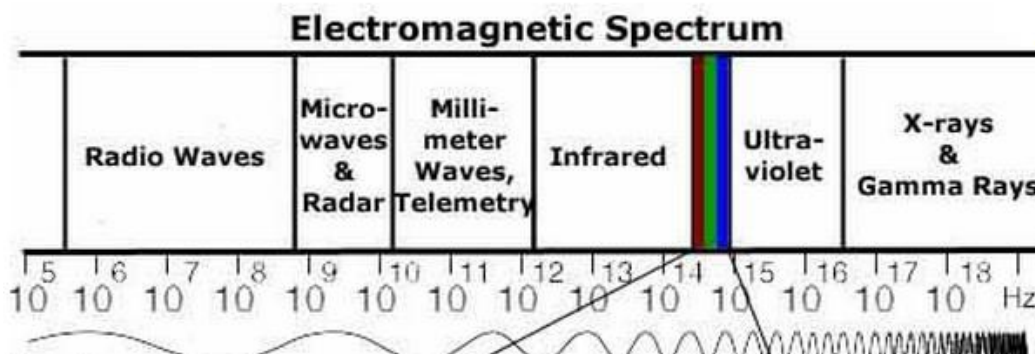
Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων γεωαναφοράς, οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν καθώς και οι μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω επεξεργασία και εκμετάλλευση των απεικονίσεων TerraSAR-X .

Α) ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ SAR

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΡΑΝΤΑΡ

Το ραντάρ (Radio Detection and Ranging) δεν είναι μια νέα τεχνική, αφού χρησιμοποιείται από τις αρχές του περασμένου αιώνα σε στρατιωτικές κυρίως εφαρμογές και από την δεκαετία του 1970 χρησιμοποιείται και σε τηλεπισκοπικές κυρίως εφαρμογές. Είναι χαρακτηριστικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, τον εντοπισμό, την απεικόνιση και την παρακολούθηση αντικειμένων. Τα ραντάρ χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, μεταξύ των οποίων είναι και η παραγωγή απεικονίσεων του εδάφους. Ένα απεικονιστικό σύστημα ραντάρ λειτουργεί στα φασματικά κανάλια των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων (220 MHz – 40 GHz) και ανιχνεύει την ανακλώμενη από την επιφάνεια της Γης ακτινοβολία, η οποία παράγεται από το ίδιο το ραντάρ.



Εικόνα 1.1: Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

Πηγή: <http://www.biosyntx.com>

Λόγω της πολυπλοκότητας ως τεχνικής και του γεγονότος πως η τελικά παραγόμενη εικόνα δεν αναπαριστά την φυσική γήινη επιφάνεια όπως αυτή αναπαρίσταται από τους οπτικούς δέκτες, δηλαδή στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και με φυσικά χρώματα, για μεγάλο διάστημα δεν υπήρξε αρκετή δραστηριότητα σε θέματα απεικονιστικών προϊόντων. Γι' αυτό το λόγο μέχρι και πριν μερικά χρόνια, υπήρχε μεγάλη διαφορά μεταξύ της ποιότητας των εικόνων από δέκτες ραντάρ και των εικόνων από οπτικούς δέκτες. Τα τελευταία όμως χρόνια και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας φαίνεται πως υπάρχει διεθνές ενδιαφέρον γύρω από την τεχνική του ραντάρ σε τηλεσκοπικές και φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Το αποτέλεσμα είναι η

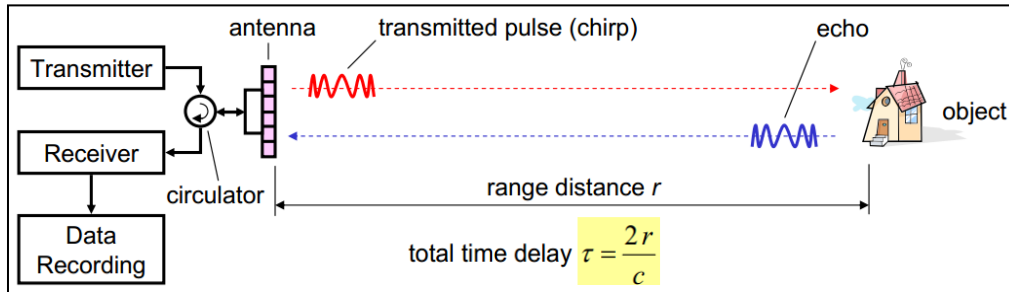
γεφύρωση του χάσματος αυτού, καθώς σήμερα υπάρχουν δέκτες ραντάρ οι οποίοι παράγουν προϊόντα τα οποία πλησιάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την διακριτική ικανότητα μιας οπτικής εικόνας. Πλέον, οι έρευνες προσανατολίζονται στη σχεδίαση συστημάτων υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας και περίοδο επαναληπτικότητας κατάλληλη για επιχειρησιακούς σκοπούς με τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real time data). Τα συστήματα ραντάρ τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εικονιστικού προϊόντος μπορεί να είναι αερομεταφερόμενα ή να είναι προσαρτημένα πάνω σε μια δορυφορική πλατφόρμα.

1.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΑ ΡΑΝΤΑΡ

Τα απεικονιστικά ραντάρ είναι ενεργητικά ανεξάρτητα συστήματα, τα οποία εκπέμπουν παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και καταγράφουν την επιστροφή τους. Το ποσό δηλαδή, της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τους στόχους της επιφάνειας της Γης. Αναφέρονται ως ενεργά και ανεξάρτητα συστήματα, διότι εκπέμπουν ακτινοβολία συλλέγοντας ενέργεια από το ηλιακό φως μέσω ηλιακών συσσωρευτών οι οποίοι βρίσκονται πάνω στην πλατφόρμα και τροφοδοτούν το σύστημα. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος / παλμού υπό κάποια γωνία προς την φυσική γήινη επιφάνεια και στη συνέχεια, τη λήψη της ανακλώμενης από τα διάφορα αντικείμενα στα οποία προσπίπτει το σήμα εκπομπής ακτινοβολίας, η οποία σκεδάζεται από αυτά (εικ. 1.2). Με τη μέτρηση του χρόνου εκπομπής – επιστροφής του παλμού καθώς επίσης και της ισχύος του, είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση αφενός της απόστασης του στόχου από το δέκτη, αφετέρου της ισχύος της ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας από το στόχο. Η απόσταση στόχου δέκτη υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (López-Dekker, 2010).

$Range = (c * T_{pulse})/2$, όπου c : η ταχύτητα του φωτός και T_{pulse} : το χρονικό διάστημα εκπομπής – λήψης παλμών.

Η κεραία (antenna) παράγει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως ενιαία δέσμη ακτινών (beam) για κάθε παλμό, η μορφή της οποίας χαρακτηρίζεται από τις διαστάσεις τις ίδιες της κεραίας και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι παλμοί αυτοί κατευθύνονται προς τη φυσική γήινη επιφάνεια μέσω ενός πομπού (transmitter). Στη συνέχεια σκεδάζονται από τα αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνειά της και κατόπιν η ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (echo) λαμβάνεται από έναν δέκτη (receiver).



Εικόνα 1.2: Λειτουργία απεικονιστικού ραντάρ

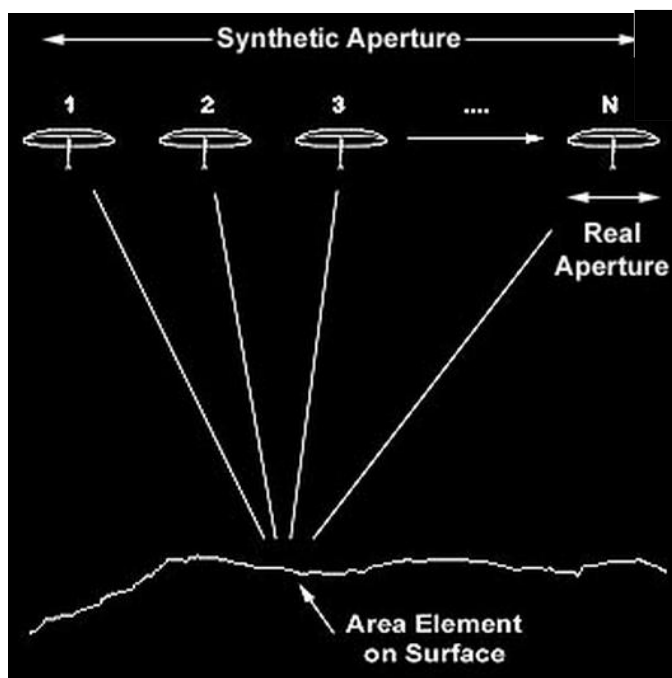
Πηγή: (López-Dekker, 2010).

Διαφοροποιημένη αναφορικά με τη φάση και το εύρος συχνοτήτων της εκπεμπόμενης, η λαμβανόμενη ακτινοβολία, αποθηκεύεται σε κάποιο μέσο (data recording) και επεξεργαζόμενη κατάλληλα παρέχει πληροφορία για την θέση του αντικειμένου στο οποίο προσέκρουσε (Κοο, 2008). Σημειώνεται, πως συνήθως η κεραία λειτουργεί ως πομπός και δέκτης παράλληλα (monostatic radar). Κάθε φορά που η κεραία εκπέμπει έναν παλμό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καταγράφεται η χρονική στιγμή της εκπομπής του και αντίστοιχα καταγράφεται και η χρονική στιγμή επιστροφής του παλμού μαζί με την εναπομένουσα ισχύ του. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια η απόστασή του από τα αντικείμενα του εδάφους, καθώς και το ποσό της ανακλώμενης ακτινοβολίας που επιστρέφει από αυτά.

Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων ραντάρ που χρησιμοποιούνται για απεικόνιση. Αυτά διακρίνονται σε:

- Ραντάρ Πραγματικού Ανοίγματος (Real Aperture Radar)
- Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar)

Η διαφορά των δύο ειδών δεκτών έγκειται στο γεγονός πως στα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος θεωρείται ως φυσικό μέγεθος της κεραίας το πραγματικό της, ενώ σε αυτά του συνθετικού ανοίγματος χρησιμοποιείται μια τεχνική αύξησης του φυσικού μήκους της κεραίας. Αυτό γίνεται μέσω χρήσης του φαινομένου Doppler κατά την επεξεργασία των λαμβανόμενων δεδομένων, αφού πρώτα λαμβάνονται πολλές επιστροφές παλμών για τα ίδια αντικείμενα(εικ. 1.3). Ως αποτέλεσμα η τελική ανάλυση της προκύπτουσας εικόνας είναι πολύ καλύτερη.



Εικόνα 1.3 Συνθετικό – Πραγματικό άνοιγμα κεραίας

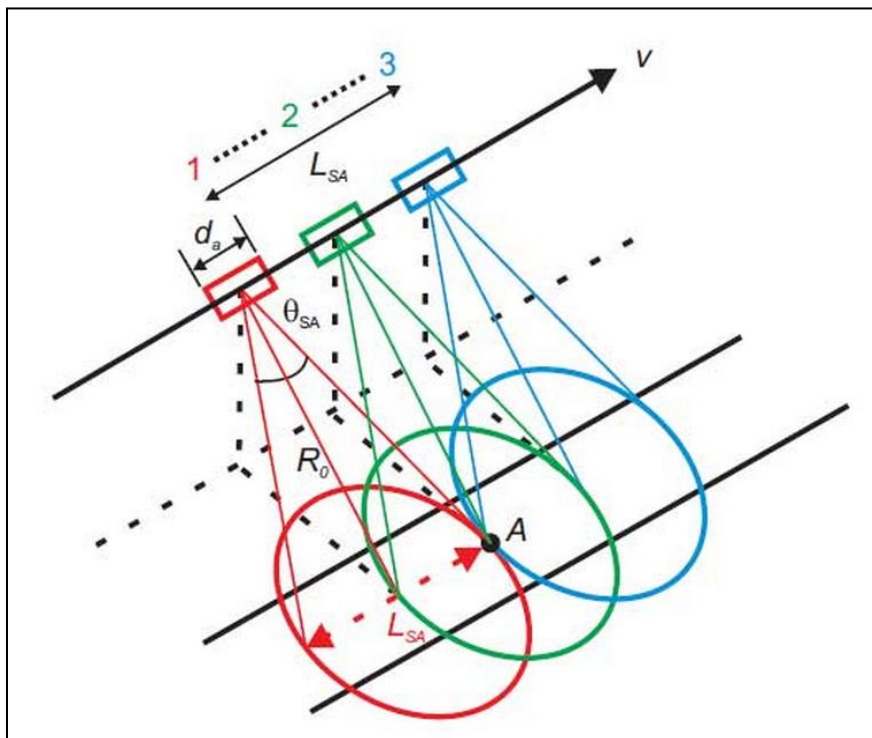
Πηγή: www.mentallandscape.com

1.3 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΠΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ(SAR)

1.3.1 Γενικά

Το πρώτο διαστημικό σύστημα SAR που τέθηκε σε τροχιά εγκαταστάθηκε από την NASA στον γεωστατικό δορυφόρο SEASAT το 1978 και λειτούργησε για περίπου έξι εβδομάδες. Η κύρια διαφορά από το απλό ραντάρ είναι πως τα συστήματα SAR συνθέτουν τεχνητά μία κεραία ιδιαίτερα μεγάλου μήκους εκμεταλλευόμενα την κίνηση του δορυφόρου και την αρχή του φαινομένου Doppler. Με παράλληλη χρήση τεχνικών επεξεργασίας σήματος έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας στην διεύθυνση των αζιμούθιων. Με τη τεχνική των απλών ραντάρ δεκτών, μεγάλη διακριτική ικανότητα σημαίνει μεγαλύτερο μήκος κεραίας, οπότε θα έπρεπε ο δέκτης στο διάστημα, να φέρει μια κεραία πολύ μεγάλων διαστάσεων, το οποίο είναι απαγορευτικό λόγω πολύ μεγάλου κόστους. Με την τεχνική του συνθετικού ανοίγματος οι ίδιοι στόχοι δέχονται ακτινοβολία από περισσότερους παλμούς. Ανάλογα με το εύρος της δέσμης της κεραίας (beamwidth), το ανακλώμενο σήμα (echo) φτάνει σε διαφορετική χρονική στιγμή στο δέκτη. Συνεπώς, για κάθε συγκεκριμένο αντικείμενο πάνω στην φυσική γήινη επιφάνεια συλλέγεται ένας μεγάλος αριθμός ανακλώμενων σημάτων. Με κατάλληλη επεξεργασία τους, το τελικό εικονιστικό προϊόν έχει μεγάλη χωρική ανάλυση κατά την

διεύθυνση παράλληλα στην τροχιά του δορυφόρου (αζιμουθιακή), σαν να είχε χρησιμοποιηθεί κεραία πολύ μεγάλου φυσικού μήκους. Στην ουσία, το μήκος της κεραίας σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται η απόσταση που διανύει ο δορυφόρος κατά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο δέκτης συλλέγει πληροφορία για κάθε συγκεκριμένο αντικείμενο. Δηλαδή, από τη χρονική στιγμή που εκπέμπεται ο πρώτος παλμός προς κάποιο στόχο, μέχρι τη χρονική στιγμή που εκπέμπεται ο τελευταίος παλμός για τον ίδιο στόχο.



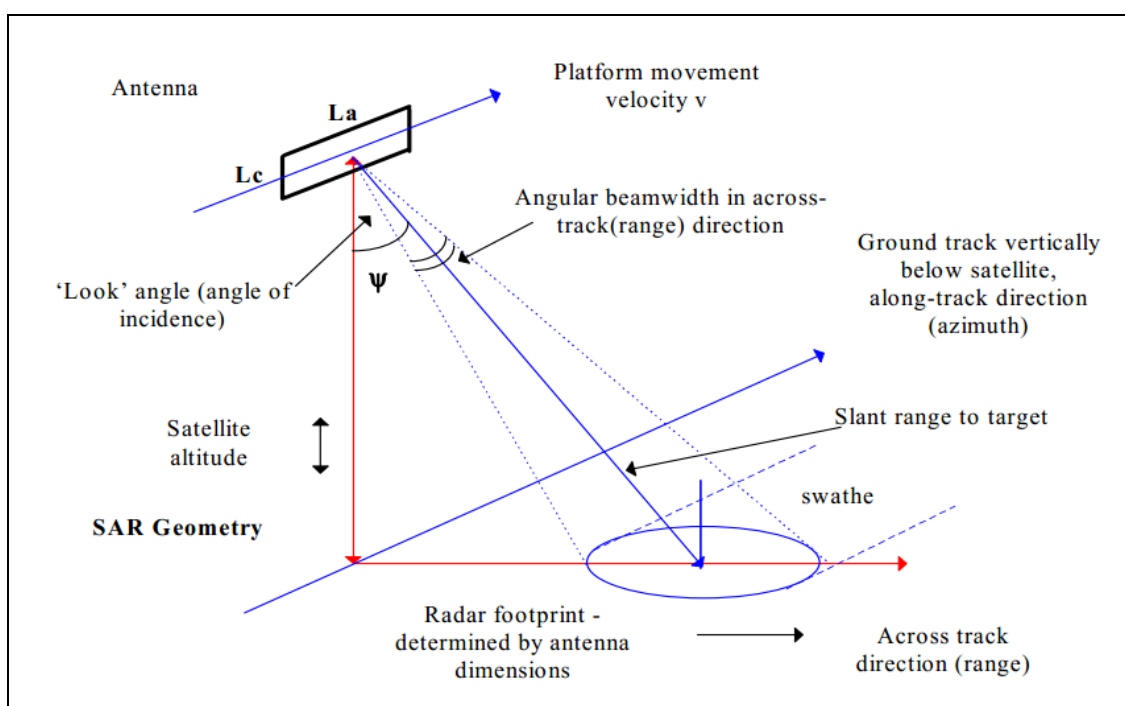
Εικόνα 1.4: Αρχή Λειτουργίας SAR

Πηγή: <http://www.hp-adtec.de>

1.3.2 Γεωμετρία Λήψης Συστημάτων SAR

Τα Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος είναι δισδιάστατα συστήματα απεικονίσεων τα οποία επεξεργαζόμενα τα ανακλώμενα σήματα για κάθε στόχο αποδίδουν την εικόνα του. Σε αντίθεση με τους οπτικούς σαρωτές, είναι συστήματα πλευρικής όρασης. Δηλαδή εκπέμπουν και λαμβάνουν την ακτινοβολία με πλάγια προοπτική ως προς το ναδίρ και με διεύθυνση πλευρικής όρασης εγκάρσια στην τροχιά του δορυφόρου. Η γωνία που σχηματίζει η πλευρική διεύθυνση με την κατακόρυφη στο στόχο, καλείται γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ένταση της οπισθοσκέδασης (backscattering) των στόχων της γήινης

επιφάνειας. Η λήψη των απεικονίσεων πραγματοποιείται είτε κατά την καθοδική τροχιά (Βορρά προς Νότο) είτε κατά την ανοδική (Νότο προς Βορρά) με δεξιά ή αριστερή πλάγια προοπτική. Ένα σύστημα ραντάρ με κάθε εκπομπή ενός παλμού φωτίζει μια περιοχή της επιφάνειας της Γης η οποία καλείται ίχνος της κεραίας (antenna footprint). Η διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου καλείται διεύθυνση αζιμουθίου της απεικόνισης (azimuth direction ή along track direction) ενώ η κάθετη προς την διεύθυνση του αζιμουθίου καλείται διεύθυνση των πλάγιων ή κεκλιμένων αποστάσεων της απεικόνισης (range direction ή across-track direction).

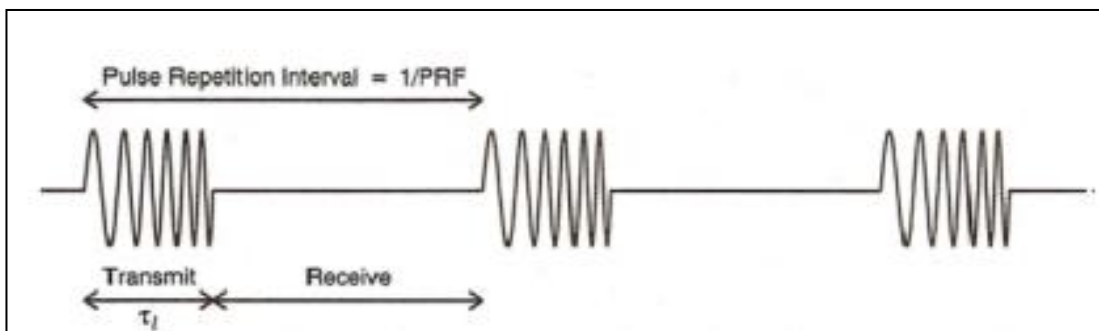


Εικόνα 1.5: Στοιχεία γεωμετρίας SAR απεικόνισης

Πηγή: www.rfic.co.uk

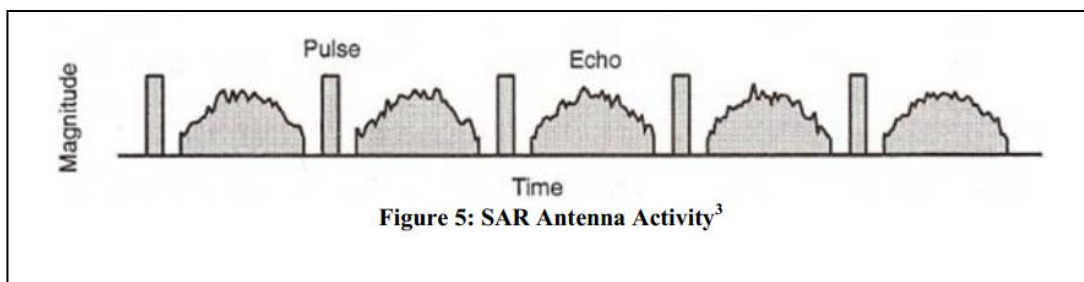
Οι παλμοί εκπέμπονται με μια σταθερή συχνότητα επανάληψης (PRF) (εικ. 1.6), σε εύρος συχνοτήτων MHz-GHz, ανάλογα με την πλατφόρμα που χρησιμοποιεί το ραντάρ και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι κατασκευασμένος ο εκάστοτε δορυφόρος. Αντίστοιχα λαμβάνονται τα επιστρεφόμενα σήματα (echoes) (εικ. 1.7). Η μέτρηση του χρόνου ο οποίος απαιτείται για να διανύσει το σήμα του ραντάρ την απόσταση δορυφόρου-γης-δορυφόρου, επιτρέπει τον καθορισμό και υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του ραντάρ και των αντικειμένων που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια, στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης (slant range). Η

αλλαγή της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος ανάλογα με την κίνηση του δορυφόρου, είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου (εικ. 1.15) και αναπαρίσταται από το φαινόμενο Doppler, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της θέσης των στόχων κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων με πολύ καλή ακρίβεια.



Εικόνα 1.6: Μεταδιδόμενος διαφοροποιημένος παλμός

Πηγή: (Schlutz, June 2009)

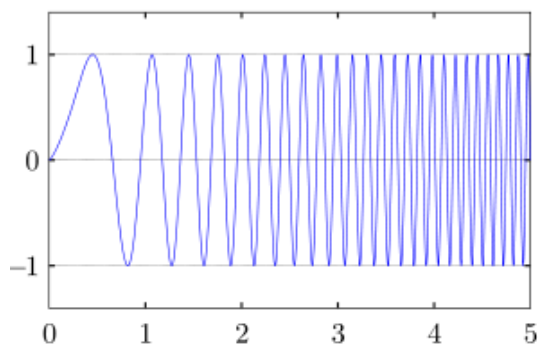


Εικόνα 1.7: Δραστηριότητα κεραίας SAR

Πηγή: (Schlutz, June 2009)

Για την παραγωγή του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια παλμών (pulse generation and modulation) η οποία ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου χρόνου και συχνότητας παλμών (timing and frequency control). Εκεί παράγονται παλμοί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με καθορισμένη φάση αναφοράς, διαφορετική για κάθε παλμό, ανά χρονικά διαστήματα τα οποία ορίζονται από τη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF). Για μεγάλη ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων του εδάφους, πρέπει οι παλμοί να είναι σύντομοι, να έχουν δηλαδή μικρή διάρκεια. Επειδή όμως παράλληλα, η ενέργειά τους δεν θα ήταν αρκετή έτσι ώστε να επιστρέψουν πίσω στο δέκτη, χρησιμοποιείται μια τεχνική διαμόρφωσης του σήματος (linear FM chirp) (Chan and Koo, 2008). Δηλαδή, το σήμα που παράγεται από το ραντάρ συνδυάζεται στο διαμορφωτή, με ένα σήμα αναφοράς άλλης μορφής (carrier) (εικ. 1.8). Έτσι, προκύπτει ένας παλμός του οποίου η διάρκεια είναι μεγαλύτερη, συνεπώς και η ενέργειά του, η συχνότητα του

οποίου μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο (linear frequency shift) μέσα σε ένα ορισμένο εύρος συχνοτήτων (bandwidth). Η αλλαγή αυτή της συχνότητας με τον χρόνο προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό των σημείων στο έδαφος.

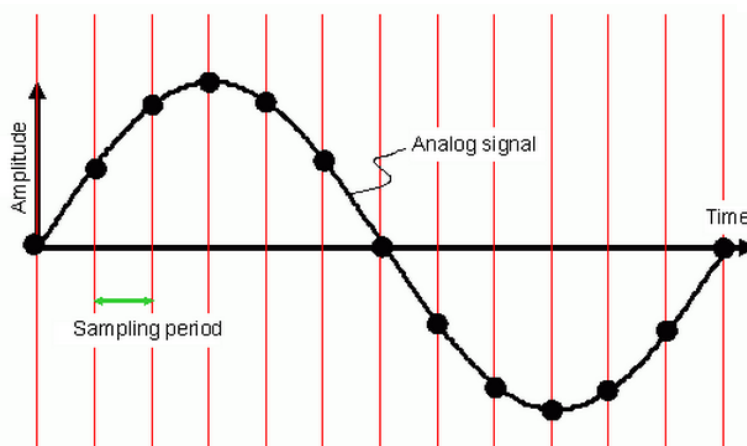


Εικόνα 1.8: Κυματομορφή γραμμικά διαμορφωμένου σήματος

Πηγή: <http://en.wikipedia.org>

Στη συνέχεια, το σήμα αποστέλλεται στον πομπό (transmitter) όπου ενισχύεται και ακολούθως αποστέλλεται στην κεραία μέσω ενός κυκλοφορητή (circ), όπου και ακτινοβολείται προς το έδαφος. Ο στόχος της κεραίας είναι να διαδίδει το σήμα προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, με παράλληλη εστίαση της ακτινοβολίας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Να ελαχιστοποιούνται δηλαδή, οι αλληλεπιδράσεις παρακείμενων αντικειμένων του εδάφους, έξω από την περιοχή αυτή. Αφού το σήμα σκεδάζεται από τους στόχους στο έδαφος, η ανακλώμενη ακτινοβολία λαμβάνεται από την κεραία και ενισχύεται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Radio Frequency Amplifier). Στο σήμα προστίθεται θόρυβος από τη διάδοσή του στην ατμόσφαιρα, αλλά και θόρυβοι οι οποίοι προστίθενται σ' αυτό εν συνεχεία από τα διάφορα εξαρτήματα του radar, οι οποίοι μεταβάλλουν τόσο το λαμβανόμενο σήμα, όσο και τον λαμβανόμενο από την κεραία θόρυβο. Η πληροφορία την οποία φέρει το σήμα επιστροφής, βρίσκεται στη φάση και το πλάτος του και όχι στη φέρουσα συχνότητα η οποία προέκυψε από την διαμόρφωσή της. Γι αυτό το λόγο το σήμα αποδιαμορφώνεται (demodulation) από έναν τετραγωνικό αποδιαμορφωτή, ο οποίος χωρίζει το σήμα σε δύο and συνιστώσες, την συμφασική και την ορθογωνική συνιστώσα (I & Q = in-phase & quadrature-phase components αντίστοιχα). Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας δύο σύγχρονους ανιχνευτές που έχουν ίδιο σήμα εισόδου, αλλά 90° διαφορά μεταξύ τους. Τα I & Q σήματα διατηρούν την πληροφορία φάσης και συνεπώς μας παρέχουν την διάκριση ανάμεσα σε αρνητική και θετική μετατόπιση Doppler (προσέγγιση ή απομάκρυνση στόχου αντίστοιχα). Έτσι, προκύπτει ένα συνεκτικό σήμα μιγαδικής μορφής με τη σε φάση συνιστώσα (in phase, I), την τετραγωνικής φάσης συνιστώσα (quadrature, Q) και ένα συντελεστή πλάτους. Στη συνέχεια, το σήμα ενισχύεται και ως προς τα δύο του κανάλια I και Q

και μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω ενός μετατροπέα A/D (Analog / digital conversion) μέσω μιας διαδικασίας η οποία αναφέρεται ως δειγματοληψία (sampling) (εικ.1.9). Η ψηφιοποίηση γίνεται σύμφωνα με το θεώρημα των Shannon-Nyquist, αναφορικά δηλαδή με το εύρος ζώνης συχνοτήτων (bandwidth) του παλμού, με συχνότητα δειγματοληψίας μεγαλύτερη από $2 \cdot \text{bandwidth}$ (Kamath,1995). Στην πραγματικότητα, αρκεί η συχνότητα δειγματοληψίας (f_R) να είναι λίγο μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συχνοτήτων λόγω του ότι από τη ψηφιοποίηση προκύπτει ζευγάρι τιμών για το σήμα I,Q (Massonnet, 2010).



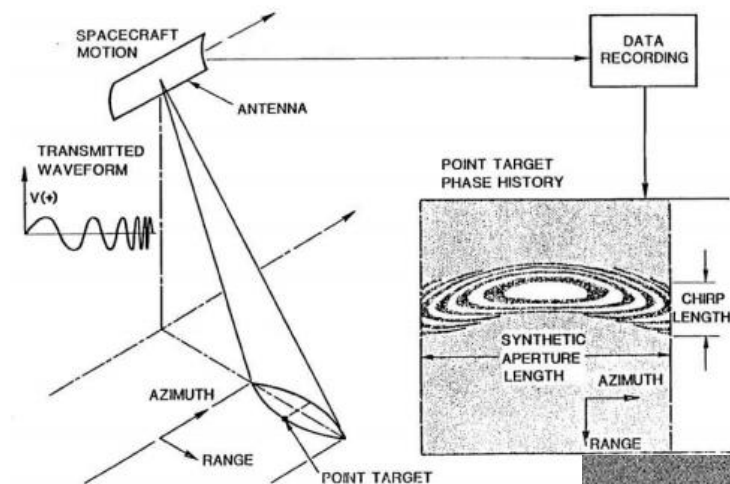
Εικόνα 1.9: Δειγματοληψία επιστρεφόμενου παλμού

Πηγή: <http://www.ustudy.in>

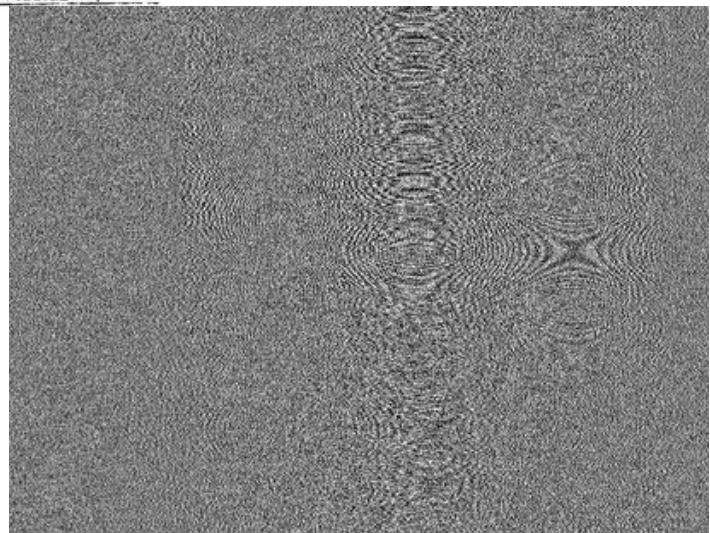
Τα δύο ψηφιοποιημένα σήματα μεταφέρονται στους επίγειους σταθμούς λήψης δεδομένων όπου παράγεται η μιγαδική απεικόνιση Sar . Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας προκύπτει από δύο τιμές, την I και την Q μετά από περαιτέρω επεξεργασία για να προκύψει το τελικό προϊόν.

1.3.3 Επεξεργασία Πρωτογενών SAR Δεδομένων

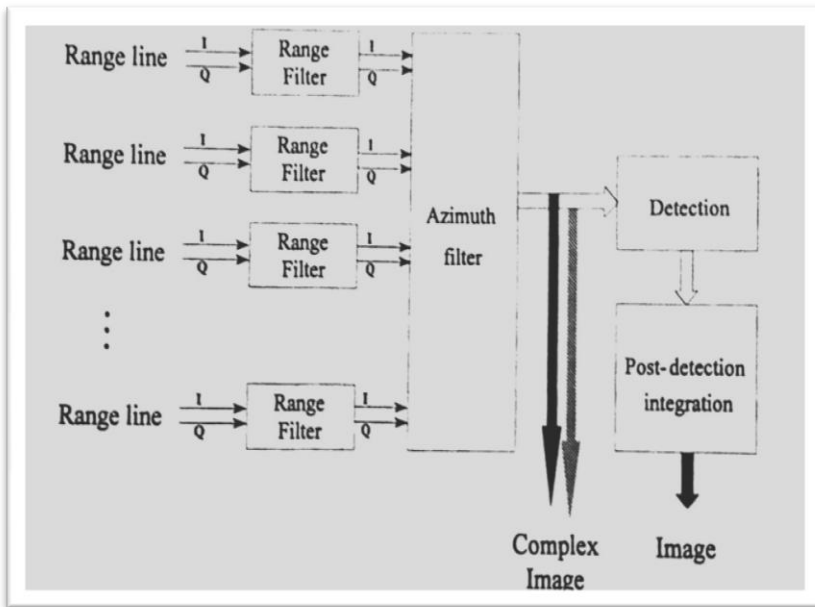
Η περαιτέρω επεξεργασία γίνεται στους γήινους σταθμούς λήψης δεδομένων, όπου παράγονται και οι τελικές απεικονίσεις, μέσω μιας συγκεκριμένης διαδικασίας επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων. Για κάθε παλμό που εκπέμπεται-λαμβάνεται από το ραντάρ, σχηματίζεται μια γραμμή δεδομένων, το κάθε στοιχείο της οποίας παρέχει πληροφορία για την επιφάνεια την φωτιζόμενη από τη δέσμη της ακτινοβολίας. Με την καταγραφή πολλών παλμών δημιουργείται ένας πίνακας δεδομένων τα οποία υπόκεινται σε επεξεργασία έτσι ώστε να προκύψει η τελική εικόνα (Lewis-Henderson,1998) (εικ. 1.12). Υπάρχουν πολλές τεχνικές επεξεργασίας που επιτρέπουν την μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων (εικ. 1.11) σε μια καλά εστιασμένη εικόνα.

**Εικόνα 1.10:** Απόκριση Στόχου

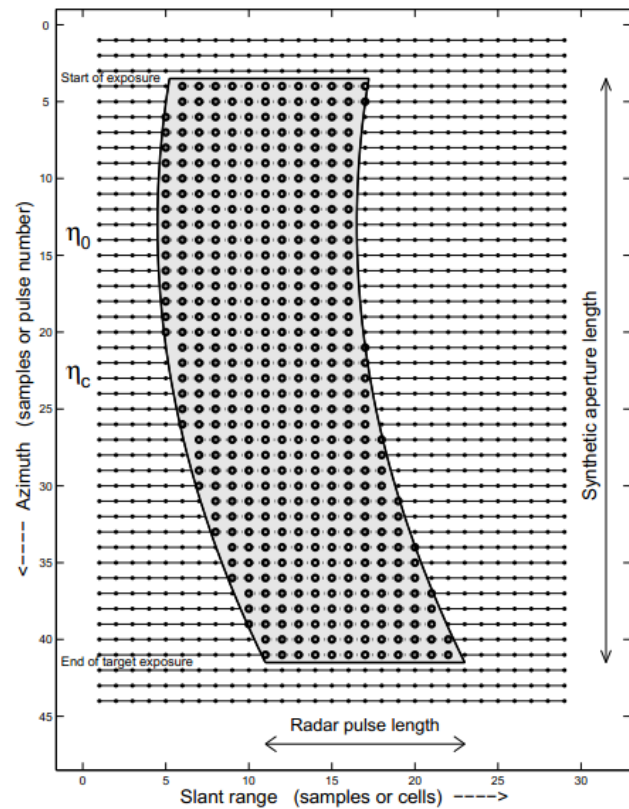
Πηγή: (Mccandless et.al, 2005)

**Εικόνα 1.11:** Ακατέργαστη Απεικόνιση SarΠηγή: <http://www.nv.et-inf.uni-siegen.de>

Ο πιο διαδεδομένος, γρήγορος και ευέλικτος τρόπος επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων και διόρθωσής τους από την πολύπλοκη διαδικασία λήψης τους, είναι ο αλγόριθμος που περιγράφεται παρακάτω. Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αναφέρεται στην επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων ως προς τη διεύθυνση των αποστάσεων και η δεύτερη ως προς τη διεύθυνση των αζιμουθίων. Τα πρωτογενή δεδομένα δεν σχηματίζουν μια κατανοητή απεικόνιση (εικ.1.11), καθώς η ενέργεια των σημείων παρουσιάζει μια διασπορά (εικ. 1.13), τόσο στον άξονα των αποστάσεων λόγω της διαμόρφωσης των παλμών, όσο και στον άξονα των αζιμουθίων, λόγω της κίνησης του δορυφόρου κατά τη συλλογή των δεδομένων (Bhanumurthy et al., 2011)



Εικόνα 1.12: Επεξεργασία Πρωτογενών Δεδομένων Πηγή: (Lewis- Henderson,1998)

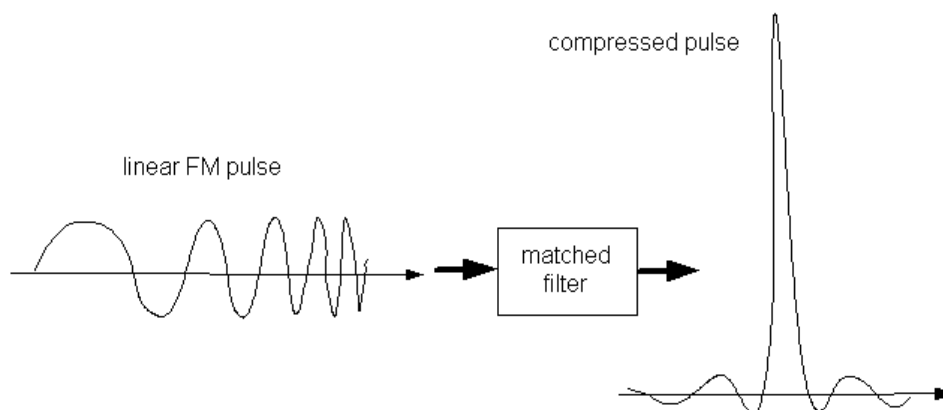


Εικόνα 1.13: Διάσπαρτη ενέργεια από ένα στόχο στην ακατέργαστη εικόνα

Πηγή: (Synthetic Aperture Concepts,2004)

Η παραγωγή της εικόνας γίνεται μέσω μιας δισδιάστατης διαδικασίας συσχέτισης των πρωτογενών δεδομένων του ραντάρ. Κατά την επεξεργασία, αυτό που γίνεται είναι η συμπίεση της πληροφορίας που υπάρχει για κάθε σημείο διάσπαρτη πάνω στην ακατέργαστη εικόνα και για τις δύο διευθύνσεις. Έτσι, κάθε στόχος αναπαρίσταται σημειακά στην τελική εικόνα, η οποία είναι ερμηνεύσιμη.

Η συμπίεση της εικόνας κατά των άξονα των αποστάσεων (range compressing) γίνεται με την εφαρμογή ενός φίλτρου, μέσω του οποίου γίνεται συνέλιξη του επιστρεφόμενου σήματος με ένα σήμα αναφοράς, το οποίο είναι πανομοιότυπο με αυτό που παράγεται (match filter) και αφορά τις επιστροφές των παλμών στο δέκτη. Το πιο κρίσιμο σημείο, είναι πως πρέπει το σήμα αναφοράς να έχει ίδια διαμόρφωση φάσης με αυτή του εκπεμπόμενου παλμού, η οποία όμως είναι διαφορετική για κάθε παλμό (Ulabay, 1981). Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή ενός σήματος στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, με πολύ πιο ευκρινή την απόκριση λόγω της ανάκλασης του επιστρεφόμενου σήματος (πιο σύντομο, με μεγαλύτερη ισχύ και μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο: SNR). Παράλληλα με τη συμπίεση, γίνεται και η εφαρμογή ενός φίλτρου για μείωση των αποκρίσεων από την ευρύτερη περιοχή, διαδικασία γνωστή και ως 'windowing'.

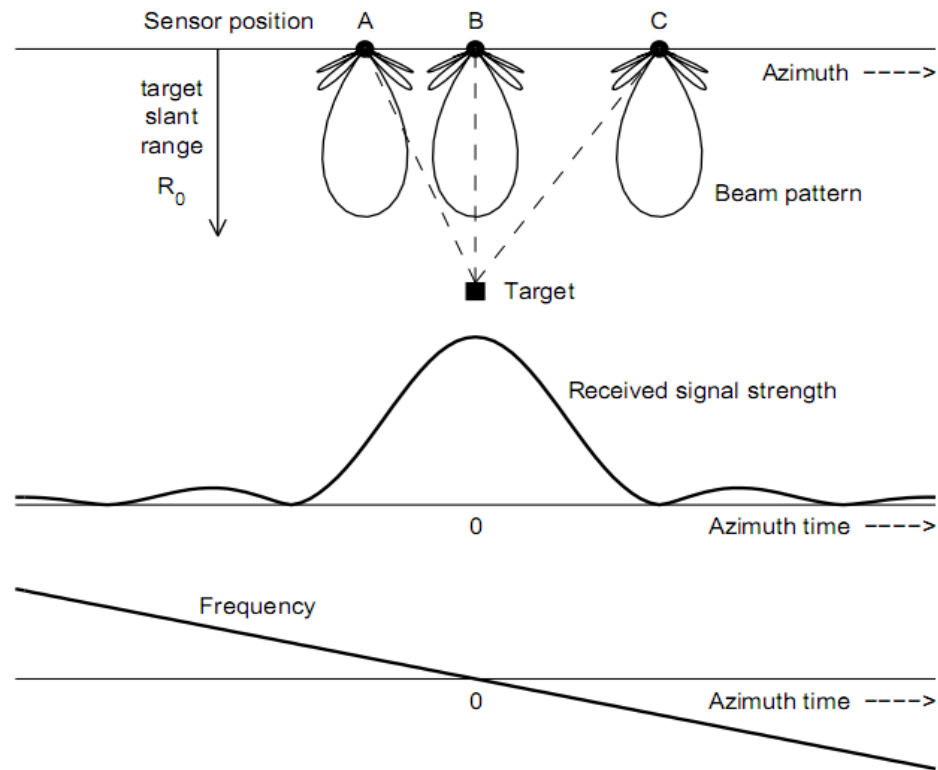


Εικόνα 1.14: Συμπίεση Επιστρεφόμενου Παλμού

Πηγή:(envisat.esa.int)

Η συμπίεση κατά τον άξονα των αζιμουθίων (azimuth compressing) γίνεται μέσω της σύνθεσης μιας κεραίας μεγαλύτερων διαστάσεων από την πραγματική και αφορά την επεξεργασία του επιστρεφόμενου σήματος ως προς το φαινόμενο Doppler όπως προαναφέρθηκε. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός πως κάθε επιστρεφόμενος παλμός έχει μια διαφορετική διαφορά φάσης με τον εκπεμπόμενο (phase shift). Η πληροφορία για την φάση κάθε παλμού καταγράφεται από το σύστημα (phase history) μαζί με το πλάτος του κάθε παλμού. Σε συνδυασμό με τη γνώση της γεωμετρίας λήψης του συστήματος, οι διαφορές φάσης που

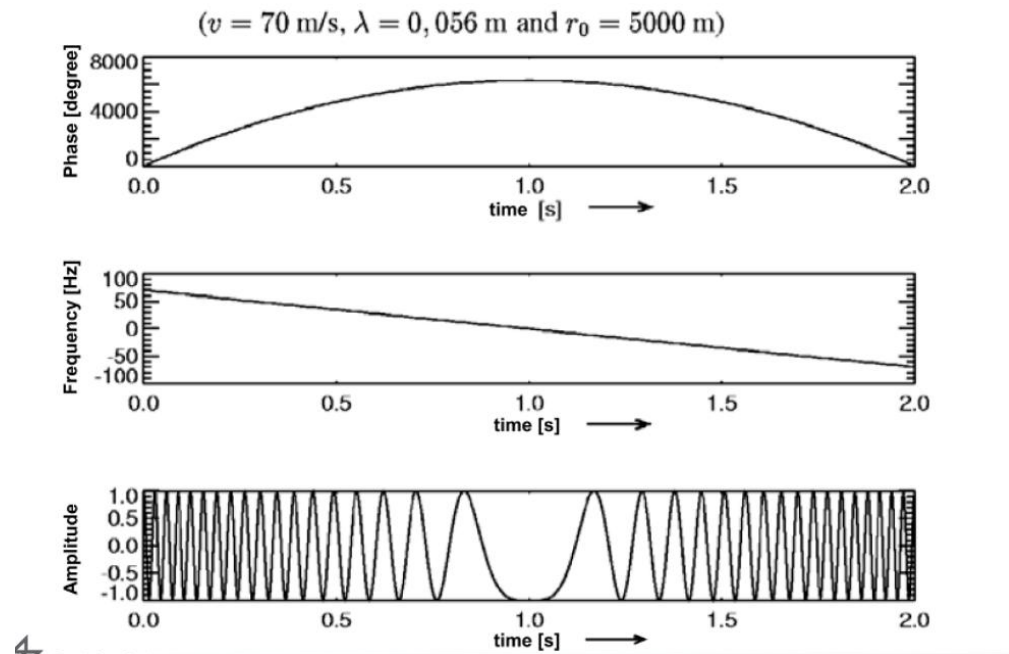
προκύπτουν, μπορούν να επεξεργαστούν με τη χρήση μιας τεχνικής συμπίεσης, αντίστοιχης με αυτής κατά τη διεύθυνση των αποστάσεων.



Εικόνα 1.15: Αναπαράσταση ισχύος επιστρεφόμενου παλμού και μεταβολή της συχνότητάς του συναρτήσει του χρόνου.

Πηγή: (Synthetic Aperture Concepts, 2004)

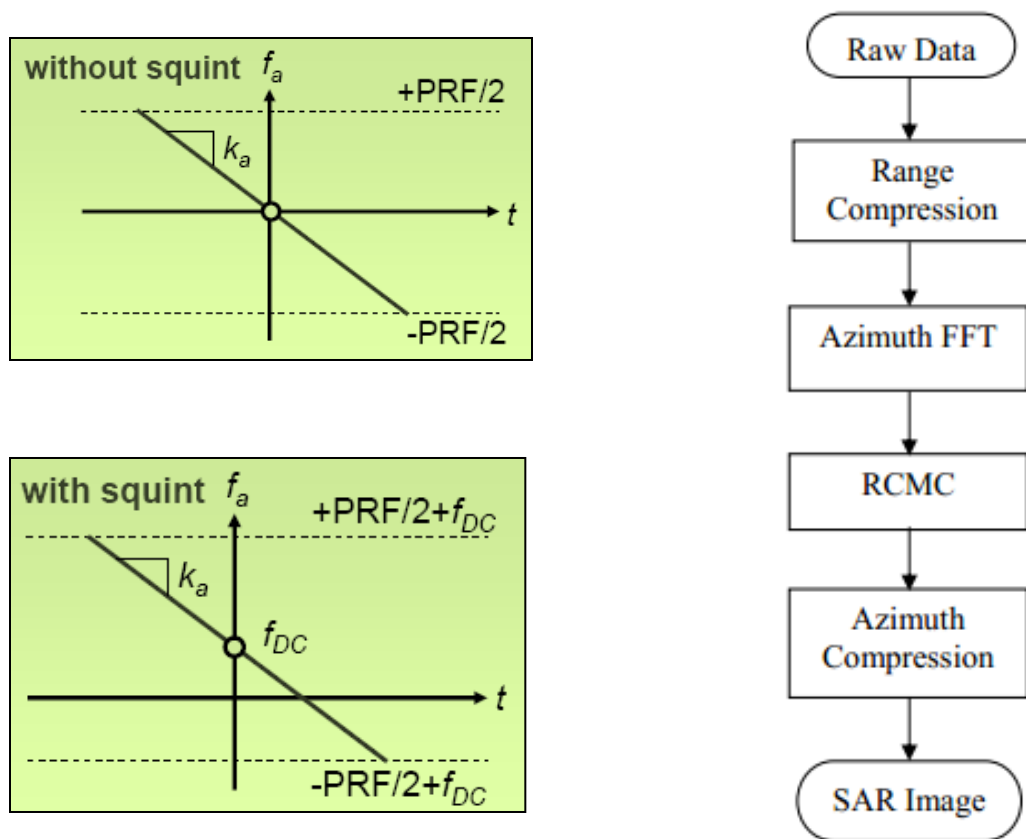
Η μεταβολή της φάσης είναι τετραγωνική συνάρτηση του χρόνου και ταυτόχρονα η μεταβολή της συχνότητας κατά Doppler, όπως ονομάζεται η στιγμιαία συχνότητα την οποία αντιλαμβάνεται ο δέκτης, είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Στο διάγραμμα 1.1 φαίνεται η μεταβολή της συχνότητας, και της φάσης, καθώς και το πλάτος από ένα αντικείμενο, καθώς αυτό ανακλά ακτινοβολία προς το δέκτη.



Διάγραμμα 1.1: Μεταβολή Φάσης, Συχνότητας και Ισχύος του σήματος με το χρόνο
Πηγή: (López-Dekker, 2010)

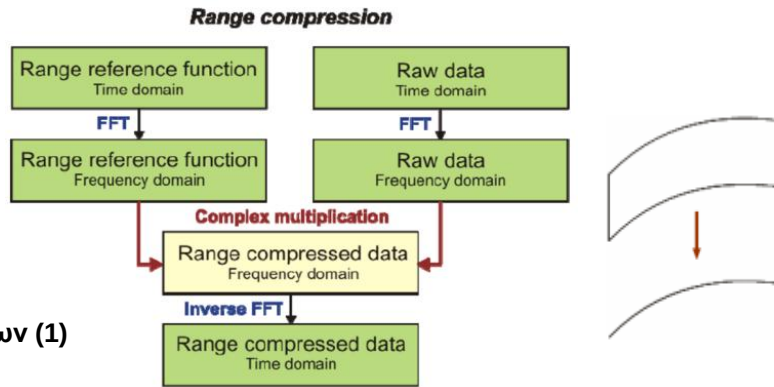
Η συμπίεση αυτή κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων έχει ως αποτέλεσμα η πληροφορία φάσης από κάθε παλμό να διορθώνεται και να αθροίζεται συνεκτικά γύρω από τη φάση αναφοράς (zero phase shift). Ως αποτέλεσμα, όλα τα σημεία προκύπτουν, σαν να είχαν ληφθεί με την ίδια γεωμετρία, αυξάνοντας την ακρίβεια προσδιορισμού τους κατά τη διεύθυνση αυτή. Η δυσκολία σε αυτό το στάδιο, είναι ο υπολογισμός του κεντροειδούς του φαινομένου Doppler (f_{DC}). Κανονικά, η τιμή του πρέπει να είναι ίση με μηδέν έτσι ώστε να μην υπάρχουν παραμορφώσεις στην εικόνα. Όμως αυτό δεν είναι εφικτό, όταν η διεύθυνση της πλάγιας απεικόνισης, δεν είναι εγκάρσια στην τροχιά του δορυφόρου (squint angle), τη στιγμή που το ραντάρ έχει διανύσει το μισό συνθετικό μήκος της κεραίας. Η συχνότητα Doppler, τη στιγμή όπου ο στόχος είναι στην επιφάνεια στην κάθετη στην τροχιά του δορυφόρου, ονομάζεται συχνότητα μηδενική κατά Doppler (zero Doppler frequency). Τη στιγμή που ο στόχος είναι στον άξονα του κυρίως λοβού της δέσμης του ραντάρ, η συχνότητα εκείνη τη στιγμή ονομάζεται κεντροειδής Doppler (Doppler centroid: f_{DC}) (διαγ.1.2) που είναι η μέση συχνότητα του φάσματος συχνοτήτων Doppler. Εάν δεν υπάρχουν μεταβολές στην κλίση της κεραίας, δηλαδή όλα τα σημεία φωτίζονται κάθετα στην τροχιά του δορυφόρου, οι δύο αυτές συχνότητες συμπίπτουν (εικ.1.16). Εφ' όσον η κεραία κατά τη στιγμή του φωτισμού παρουσιάζει γωνιακές μεταβολές ή ανώμαλη πορεία, τα αντικείμενα του εδάφους φωτίζονται υπό γωνία, οπότε οι δύο αυτές συχνότητες διαφέρουν (Lewis - Henderson, 1998).

Η παραγωγή της εικόνας γίνεται στο πεδίο της συχνότητας (Schlutz, 2009) κατά βάση και είναι μεγάλης υπολογιστικής ισχύος διαδικασία. Για το λόγο αυτό, δεν είναι ακόμη δυνατή η παραγωγή των εικόνων κατευθείαν από το δορυφόρο (real time). Ωστόσο, γίνονται προσπάθειες παραγωγής εικόνων χαμηλότερης ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, διαδικασία η οποία είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η μεταφορά από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται με γρήγορους μετασχηματισμούς Fourier (FFT) και αντίστροφα με αντίστροφους μετασχηματισμούς Fourier (IFFT). Κατά την επεξεργασία των δεδομένων, γίνονται παράλληλα και διορθώσεις για διάφορα φαινόμενα τα οποία προκαλούν παραμορφώσεις και τα οποία αναλύονται παρακάτω. Συνοπτικά οι διεργασίες που εκτελούνται φαίνονται παρακάτω (εικ. 1.17-1.19) και για τις δύο διευθύνσεις της εικόνας (Bhanumurthy et al., 2011).

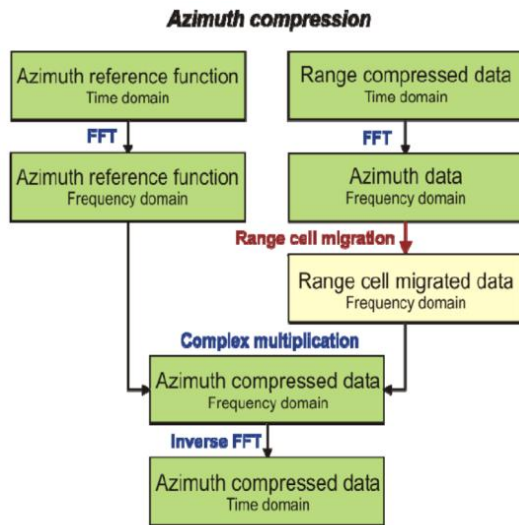


Εικόνα 1.16: Μεταβολή συχνότητας με μεταβολή της αζιμουθιακής γωνίας κλίσης (αριστερά), Διαδικασία Συμπίεσης και για τους δύο άξονες της εικόνας (δεξιά). Πηγή: (Bhanumurthy et al., 2011)

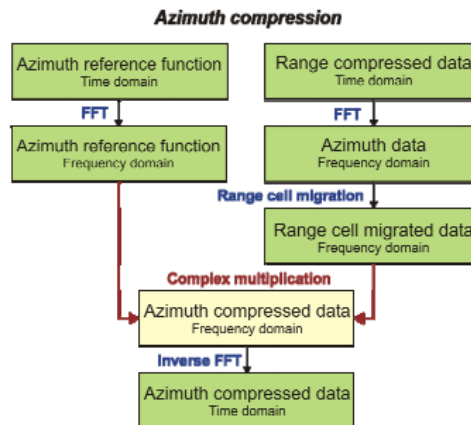
Εικόνα 1.17: Συμπίεση άξονα αποστάσεων



Εικόνα 1.18: Συμπίεση Αζιμουθίων (1)



Εικόνα 1.19: Συμπίεση Αζιμουθίων (2)

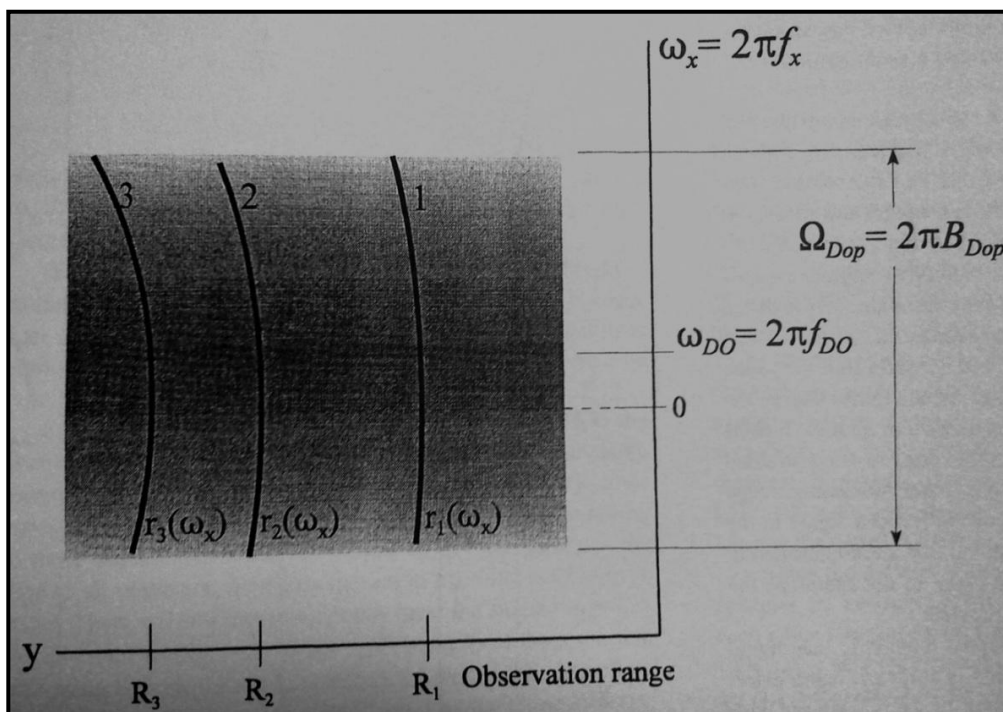


Πηγή: (Bhanumurthy et al., 2011)

Range Migration (RCMC)

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός στόχου στην κατεύθυνση των αποστάσεων, μεταβάλλεται με την κίνηση του ραντάρ κατά μήκος της τροχιάς του. Καθώς το ραντάρ σαρώνει την γήινη επιφάνεια, οι επιστροφές των σημάτων από το στόχο λαμβάνονται με μεταβαλλόμενη καθυστέρηση, λόγω της μεταβλητής απόστασης στόχου-δέκτη και κίνησης της γης (Olmsted,

1993). Έτσι προκύπτουν πολλές διαφορετικές θέσεις του στόχου αναφορικά με τη θέση του δέκτη κατά μήκος της τροχιάς του. Μετά τη συμπίεση κατά την διεύθυνση των αποστάσεων, η ενέργεια του σήματος απλώνεται στον δισδιάστατο χώρο της εικόνας σχηματίζοντας μια καμπύλη γραμμή (range migration) (εικ.1.19). Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη πριν τη συμπίεση κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων και να διορθωθεί, έτσι ώστε η θέση του στόχου να μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο. Δηλαδή, αντί για καμπύλη η πληροφορία για τη θέση του στόχου, συγκεντρώνεται σε μια ευθεία γραμμή έτσι ώστε μετά τη συμπίεσή της να προκύψει μια πολύ μικρή περιοχή (σημείο στην ουσία), όπου θα είναι και η τελική θέση του στόχου πάνω στη εικόνα.



Διάγραμμα 1.2: Επιστροφές τριών παλμών στο πεδίο χρόνου – συχνότητας (range – Doppler), Γραφική απεικόνιση κεντροειδούς Doppler (f_{DO}).

Πηγή: (Lewis - Henderson, 1998)

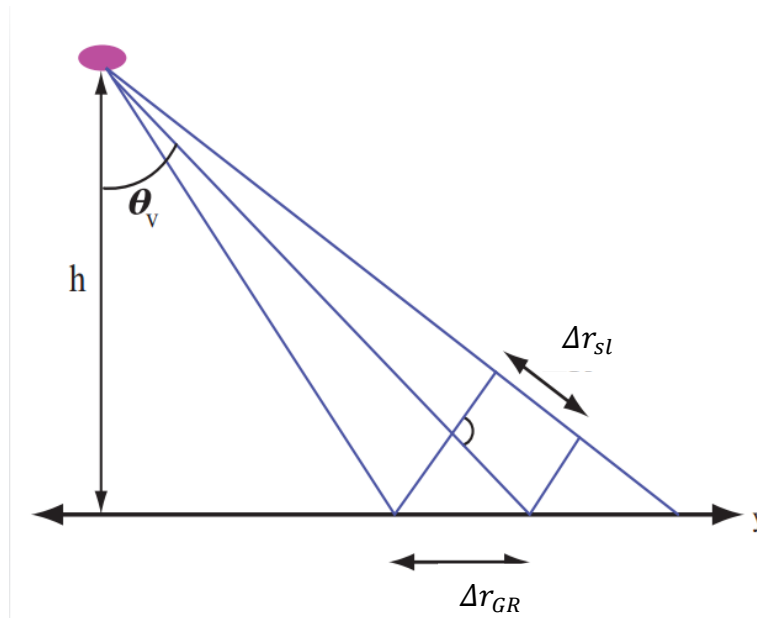
1.4 ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Η διακριτική ικανότητα ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών αντικειμένων τα οποία μπορούν να διακριθούν στην εικόνα. Στην ουσία είναι η ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο επιστρεφόμενων ηχών ίδιας περίπου ισχύος, ώστε να γίνονται αντιληπτές

από το σύστημα ως δύο διαφορετικές ανακλάσεις και να απεικονίζονται ξεχωριστά στην SAR απεικόνιση (Chan and Koo, 2008). Για να γίνει προσδιορισμός της διακριτικής ικανότητας πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο αντικείμενα στην εικόνα τα οποία να παράγουν δύο διαφορετικές επιστροφές σήματος (Massonnet et al., 2010).

1.4.1 Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων

Οι απεικονίσεις ραντάρ, συνήθως παράγονται στην διεύθυνση της πλάγιας απόστασης (slant range), αλλά μερικές φορές προβάλλονται στο επίπεδο του εδάφους. Έτσι προκύπτουν δύο εικόνες, με διαφορετική διακριτική ικανότητα, μία για την πλάγια απόσταση και μία για την πλάγια απόσταση επί του εδάφους (ground range).



Εικόνα 1.20: Ανάλυση στην κεκλιμένη απόσταση και στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους.

Πηγή:(Espinoza,2011)

Η διακριτική ανάλυση στη διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Slant Range Resolution}(\Delta r_{sl}) = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot \text{pulse bandwidth}(B)}$$

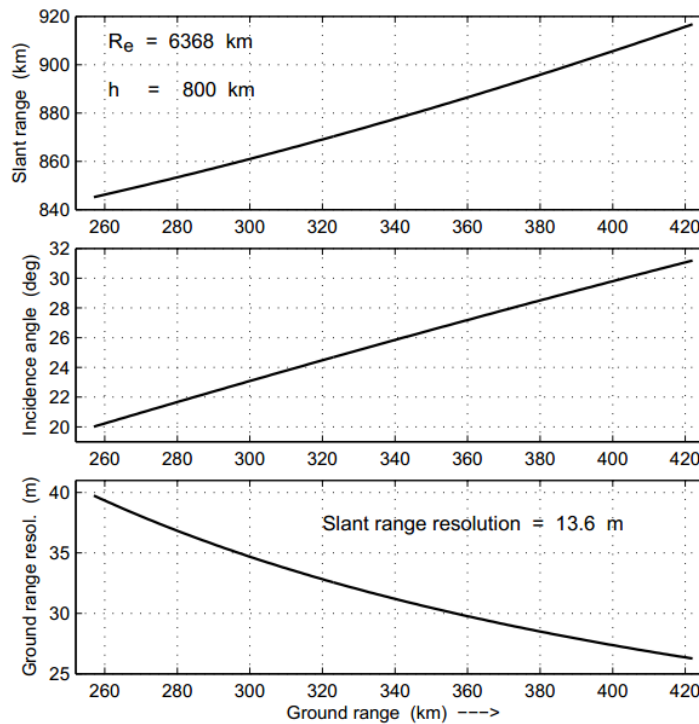
Όπως παρατηρείται, εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού (τ) ή αντίστοιχα από το εύρος συχνοτήτων του γραμμικά διαμορφωμένου σήματος του ραντάρ (B). Είναι αξιοσημείωτο ότι είναι ανεξάρτητη της απόστασης στόχου-δέκτη, αντίθετα με τις οπτικές εικόνες.

Αντίστοιχα, από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτει ότι η διακριτική ικανότητα στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους είναι:

$$\text{Ground Range Resolution}(\Delta r_{GR}) = \frac{c*\tau}{2*\theta*\sin\theta_{inc}} = \frac{c}{2*pulse\ bandwidth(B)*\sin\theta_{inc}}$$

όπου: θ_{inc} η τοπική γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

Παρατηρείται πως για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης η ανάλυση των εικόνων στη διεύθυνση των αποστάσεων βελτιώνεται. Συνεπώς, τα σημεία κάθε εικόνας έχουν διαφορετική ακρίβεια, που αυξάνεται ανάλογα με αύξηση της απόστασής τους από το δέκτη.



Διάγραμμα 1.3: Μεταβολή της ανάλυσης στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους (ground range) αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης (RADARSAT 1).

Πηγή: (Synthetic Aperture Concepts, 2004)

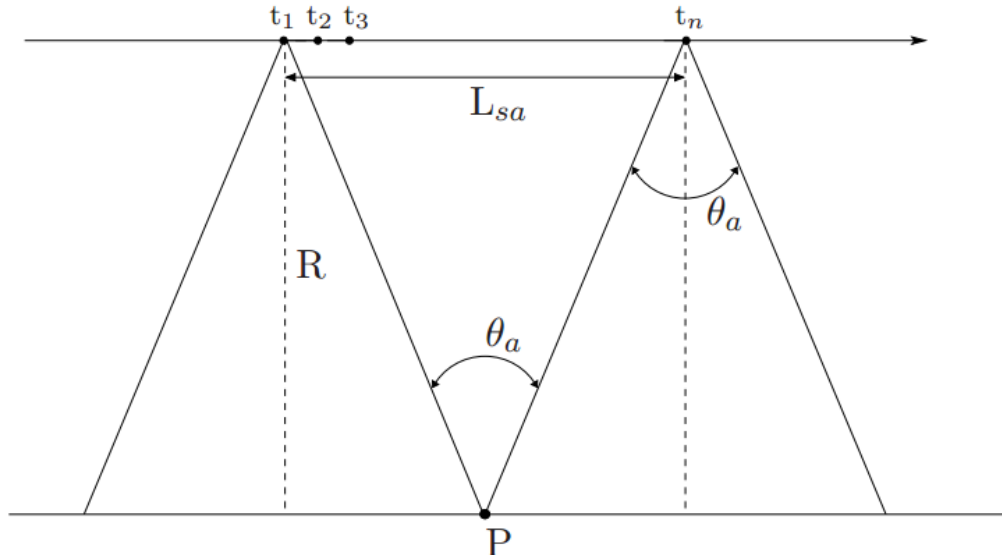
Αυτό έρχεται σε αντίθεση με ότι ισχύει για τους οπτικούς. Στο διάγραμμα 1.3, παρατίθεται ένα διάγραμμα ενδεικτικής μεταβολής της διακριτικής ικανότητας στην πλάγια απόσταση επί του εδάφους ως προς την γωνία πρόσπτωσης.

Πρακτικά, το εύρος συχνοτήτων στην παραπάνω σχέση αντικαθίσταται από τη συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος f_R , η οποία σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon, πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το εύρος συχνοτήτων του διαμορφωποιημένου παλμού. Έτσι, αποδίδεται η ορθή μορφή του σήματος και δεν χάνεται σημαντική πληροφορία. Το μέγεθος του εικονοστοιχείου εξαρτάται από τη συχνότητα αυτή, άσχετα με το ότι συνήθως είναι ελαφρά μεγαλύτερη από το εύρος συχνοτήτων στη διεύθυνση των αποστάσεων (Massonnet et al., 2010).

Για να είναι δύο αντικείμενα του εδάφους διακριτά πάνω στην εικόνα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους στο έδαφος περισσότερο από μια συγκεκριμένη απόσταση. Έτσι, για να γίνουν διακριτά από το ραντάρ, πρέπει η απόστασή τους στην διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, να είναι μεγαλύτερη από το μισό μήκος του παλμού (Massonnet et al., 2010). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα δύο σήματα επιστροφής που θα παραχθούν από τη σκέδαση του προσπίπτοντος σε κάθε αντικείμενο, πρέπει να φθάσουν στο δέκτη με τέτοια διαφορά έτσι ώστε να αναγνωριστούν ως δύο διαφορετικά και να μην συμπέσει η ηχώ του ενός με του άλλου. Σε αντίθετη περίπτωση, το τελικό εικονοστοιχείο πάνω στην εικόνα θα πάρει κάποιο τόνο του γκριζου λαμβάνοντας πληροφορία και από τα δύο, με αποτέλεσμα αυτά να μην φαίνονται στην τελική εικόνα.

1.4.2 Διακριτική Ικανότητα Αζιμουθίων

Η κίνηση της πλατφόρμας του δέκτη κατά μήκος της τροχιάς του, χρησιμοποιείται έτσι ώστε να βελτιωθεί η διακριτική ικανότητα κατά μήκος του άξονα των αζιμουθίων, δημιουργώντας μια συνθετική κεραία πολύ μεγαλύτερου μήκους από την φυσική κεραία του δέκτη. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται επειδή κάθε σημείο εμπίπτει στο φάσμα ακτινοβολίας της κεραίας σε πολλές θέσεις όπου το ραντάρ εκπέμπει και λαμβάνει ακτινοβολία, με αποτέλεσμα πολλοί παλμοί να επιστρέφουν για το ίδιο σημείο. Με την διόρθωση της φάσης του και το συνεκτικό άθροισμα των λαμβανόμενων σημάτων, αναφορικά με το χρόνο, προκύπτει η συνολική πληροφορία θέσης και απόστασης για τα σημεία αυτά.



Εικόνα 1.21: Γεωμετρία συστήματος στη διεύθυνση των αξιμουθίων

Πηγή: (Soccorsi, 2011)

Το πλάτος του ημίσειας ισχύος εύρος δέσμης των -3dB (beamwidth) για το πραγματικό άνοιγμα δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_a \approx \frac{\lambda}{D}$$

,όπου: D το μήκος της πραγματικής κεραίας και

λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Αντίστοιχα, η διακριτική ικανότητα του ραντάρ πραγματικού ανοίγματος είναι:

$$R_{az} = R_0 * \theta_a \approx \frac{\lambda * R_0}{D}$$

Από τη γεωμετρία της λήψης προκύπτει πως:

$$L_{sa} = R_0 * \theta_a \approx \frac{\lambda * R_0}{D}$$

όπου L_{sa} το μήκος του συνθετικού ανοίγματος της κεραίας.

Επίσης, παρατηρείται, πως η απόσταση στόχου-δέκτη κατά τη διάρκεια φωτισμού του σημείου αλλάζει για κάθε παλμό σε πολύ μικρό βαθμό, αρκετά όμως έτσι ώστε ο κάθε παλμός να λαμβάνεται από το δέκτη σε διαφορετική χρονική στιγμή, με διαφορετική φάση ο καθένας. Η

μεταβολή αυτή, είναι ανάλογη του φαινομένου Doppler. Αγνοώντας αυτή την αλλαγή της απόστασης, η απόσταση στόχου δέκτη, έχοντας διανύσει απόσταση χ , δίνεται από τη σχέση:

$$R_{(t)} \approx R_0 + \frac{v^2 * t^2}{2 * R_0}$$

όπου: R_0 η μικρότερη απόσταση στόχου-δέκτη, η οποία παρατηρείται όταν ο στόχος είναι στην κάθετη επιφάνεια στην τροχιά του δορυφόρου,
 v η ταχύτητα του δορυφόρου και
 t ο χρόνος όπου ο στόχος είναι στο πεδίο του ραντάρ.

Με τη μεταβολή αυτή της απόστασης η αλλαγή της φάσης είναι:

$$\varphi_{(t)} = -4\pi * R_{(t)} \approx -4 * \pi \left(R_0 + \frac{v^2 * t^2}{2R_0} \right)$$

Η συχνότητα κατά Doppler μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμική συνάρτηση του χρόνου ως:

$$f_{D(t)} = -\frac{1}{2\pi} * \frac{d}{dt} \varphi_{(t)} \approx \left(\frac{2v^2 * t}{\lambda * R_0} \right), t \in [t_{-n}, t_n]$$

η οποία θεωρείται γραμμικά διαμορφωμένη με το χρόνο και γίνεται επεξεργασία ανάλογη της διεύθυνσης των αποστάσεων. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων των Doppler (B_{dop}) προκύπτει:

$$B_{dop} = \frac{2v^2 * |t_n - t_{-n}|}{\lambda * R_0}$$

Επειδή, $|t_n - t_{-n}| = \frac{L_{sa}}{v} = \frac{\lambda * R_0}{v * D}$, από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$B_{dop} = \frac{2 * v}{D}$$

Συνεπώς, προκύπτει πως η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων είναι (Olmsted, 1993; Espinoza, 2011):

$$r_R = \frac{v}{B_{dop}} = \frac{v * D}{2v} = \frac{D}{2}$$

Δηλαδή προκύπτει πως η διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων εξαρτάται μόνο από το πραγματικό μήκος της κεραίας και βελτιώνεται με τη μείωσή του. Βέβαια, είναι

προφανές πως δεν γίνεται το μήκος της κεραίας να μειωθεί κατά πολύ, καθώς έτσι προκύπτουν άλλου είδους τεχνικά προβλήματα.

Για πιο ακριβή υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας στη διεύθυνση των αζιμουθίων, λαμβάνεται υπόψη η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας του δορυφόρου και του αποτυπώματος της κεραίας στο έδαφος. Συνεπώς, υπάρχει διαφορά ανάμεσα στα αερομεταφερόμενα και διαστημικά ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Η ικανότητα κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων τότε είναι (Massonnet et al., 2010):

$$r_R = \frac{v_B}{v_{S/C}} * \frac{D}{2}$$

όπου v_B η ταχύτητα του αποτυπώματος της κεραίας και $v_{S/C}$ η ταχύτητα του δορυφόρου. Είναι προφανές πως αυτή η σχέση δίνει καλύτερα αποτελέσματα καθώς ο λόγος $\frac{v_B}{v_{S/C}}$ είναι μικρότερος από τη μονάδα (Raney, 1986).

1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SAR ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων ραντάρ είναι η δυνατότητα αδιάκοπης λειτουργίας τους. Λειτουργούν ημέρα-νύχτα, δηλαδή δεν επηρεάζονται από συνθήκες φωτισμού της περιοχής και καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και της νεφοκάλυψης που επικρατούν στην ατμόσφαιρα, γι' αυτό και ονομάζονται παντός καιρού. Αυτό συμβαίνει επειδή η ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση είναι ελάχιστες στην ζώνη των μικροκυμάτων καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που χρησιμοποιείται στα ραντάρ αναφέρεται στη μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το οποίο αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 3mm έως 1m. Συνεπώς, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυτής είναι εν γένει μεγαλύτερο από το μέγεθος των σταγονιδίων της βροχής και ως εκ τούτου τα διαπερνά σχετικά εύκολα χωρίς ιδιαίτερες απώλειες. Τα δεδομένα μιας SAR απεικόνισης είναι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων οι οποίες καθορίζονται από την ισχύ του σήματος οπισθοσκέδασης ενός αντικειμένου μέσω ενός συντελεστή, ο οποίος ονομάζεται συντελεστής οπισθοσκέδασης (σο). Μέσω αυτού προσδιορίζεται η φωτεινότητα κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας. Τα στοιχεία από τα οποία εξαρτάται η τιμή του συντελεστή αυτού σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της περιοχής, δηλαδή την ομαλότητά της και το είδος των αντικειμένων επ' αυτής. Δηλαδή από τη γεωμετρία, την περιεκτικότητά σε νερό, και τη διηλεκτρική σταθερά των

αντικειμένων πάνω σ' αυτήν, καθώς και από παραμέτρους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης). Οι απεικονίσεις SAR έχουν εντελώς διαφορετική λογική αναφορικά με τις οπτικές εικόνες. Οι διαφορετικές τιμές των τόνων του γκρίζου αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα αντικείμενα. Οι απεικονίσεις SAR εμφανίζουν διάφορες γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως αναστροφή (layover), σμίκρυνση (foreshortening) και σκίαση (shadow), οι οποίες δεν οφείλονται στις συνθήκες φωτισμού της γήινης επιφάνειας από τον ήλιο, αλλά στη γεωμετρία του συστήματος δέκτη - Φ.Γ.Ε τη στιγμή της παρατήρησης.

1.5.1 Σμίκρυνση (Foreshortening)

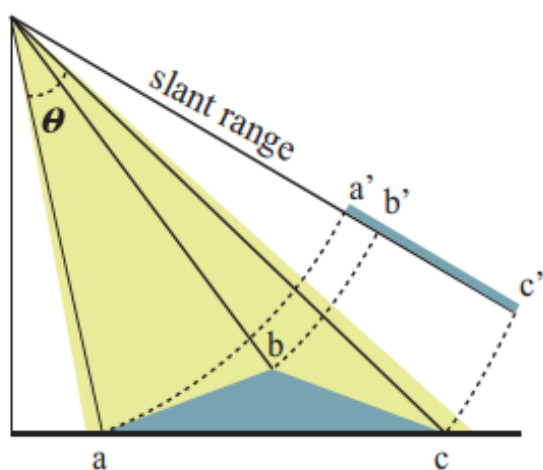
Πρόκειται για γεωμετρική παραμόρφωση συνεπεία της οποίας η απόσταση στην πλάγια απεικόνιση, μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται σε έδαφος με έντονο ανάγλυφο, προκύπτει μειωμένη σε σύγκριση με το αν τα σημεία αυτά βρίσκονταν πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπου η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η δέσμη ακτινών του ραντάρ έχει κλίση μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης. Από την παρουσία της σμίκρυνσης, προκύπτουν δύο φαινόμενα: το ένα είναι οι περιοχές να φαίνονται στην εικόνα συμπιεσμένες και το άλλο, οι περιοχές να χαρακτηρίζονται από φωτεινότερους τόνους του γκρίζου, επειδή το επιστρεφόμενο σήμα ενισχύεται, καθώς όλη η πληροφορία τείνει να συγκεντρωθεί σε μια πολύ μικρή περιοχή της εικόνας. Η μέγιστη επίδραση του φαινομένου αυτού παρατηρείται όταν η επιφάνεια είναι κάθετη στην δέσμη του ραντάρ, όπου όλα της τα σημεία απέχουν εξίσου από το δέκτη και όλη η πληροφορία τείνει να συγκεντρωθεί σε ένα εικονοστοιχείο.

1.5.2 Πτύχωση (Layover)

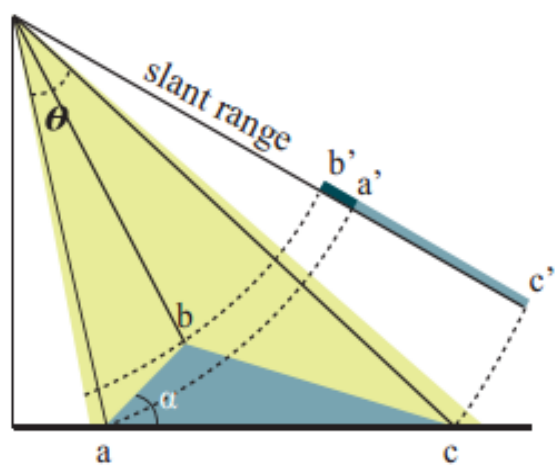
Πρόκειται για μια ακραία μορφή σμίκρυνσης, με τη διαφορά πως η κλίση της επιφάνειας στο έδαφος, είναι μεγαλύτερη από την γωνία πρόσπτωσης. Συνεπώς, τα υψηλότερα σημεία έχουν μικρότερη πλευρική απόσταση από το δέκτη, σχετικά με αυτά που βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο. Έτσι προκαλείται αναστροφή της γεωμετρικής απεικόνισης των σημείων στην εικόνα και η επιφάνεια έχει ιδιαίτερα φωτεινές τιμές του γκρίζου.

1.5.3 Σκίαση (Shadow)

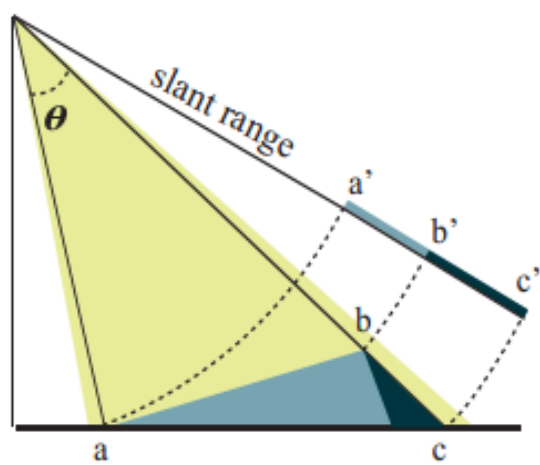
Είναι ένα φαινόμενο το οποίο προκαλείται λόγω μη επαρκούς φωτισμού επιφανειών από το ραντάρ, οι οποίες έχουν κλίση προς την αντίθετη πλευρά από αυτήν που φωτίζει. Αυτό γίνεται όταν κάποια πλευρά, έχει κλίση μικρότερη από την γωνία διόπτρευσης. Έτσι, προκύπτουν περιοχές στην εικόνα, για τις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία. Επιφάνειες με μεγαλύτερη κλίση παράγουν μεγαλύτερες σκιές και αντίστοιχα συμβαίνει και για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης του ραντάρ, δηλαδή για μεγαλύτερες πλάγιες αποστάσεις.



Εικόνα 1.22: Σμίκρυνση



Εικόνα 1.24: Πτύχωση



Εικόνα 1.23: Σκίαση

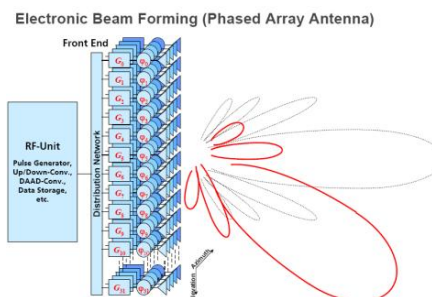
2. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ TerraSAR -X

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η δορυφορική πλατφόρμα που χρησιμοποιεί ο TerraSAR-X για την δημιουργία μιας απεικόνισης ονομάζεται TSX-1. Ο TerraSar είναι ένας δέκτης ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ο οποίος χρησιμοποιεί μια ‘ενεργή’ κεραία (active phased antenna). Αυτή αποτελείται από στοιχειώδη σωματίδια, τα οποία μεταφέρουν την ακτινοβολία από την πηγή στο χώρο. Μια τέτοιου τύπου κεραία είναι ικανή να αλλάζει τη φάση του εκπεμπόμενου σήματος, έτσι ώστε η δέσμη των ακτινών στο χώρο να μεταδίδεται υπό γωνία και όχι κάθετα στην πλατφόρμα, με ηλεκτρονικό τρόπο, χωρίς δηλαδή να στρέφεται στο χώρο (εικ.2.1). Με την ιδιότητα αυτή της κεραίας και τον πολύ ακριβή προσδιορισμό του χρόνου από το σύστημα του ραντάρ, δίνεται δυνατότητα συλλογής στοιχείων από την επιφάνεια του εδάφους με διάφορες τεχνικές που αναλύονται παρακάτω, παρέχοντας η κάθε μια διαφορετικά προϊόντα.

Λόγω των μικρών πραγματικών διαστάσεων της κεραίας, το σύστημα ενδείκνυται για προϊόντα υψηλής αξιμουθιακής διακριτικής ικανότητας, παράλληλα όμως περιορίζεται το τελικό πλάτος της απεικόνισης (swath width) στο έδαφος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως για επίτευξη υψηλής ανάλυσης στη διεύθυνση των αξιμουθίων, πρέπει η συχνότητα των παλμών (PRF) που εκπέμπονται από το ραντάρ να είναι υψηλή. Ανάλογα με τον προγραμματισμό του συστήματος αναφορικά με την μέτρηση του χρόνου και την κατεύθυνση του σήματος από την κεραία, προκύπτουν διαφορετικές τεχνικές απεικόνισης (imaging modes) με ποικίλο τρόπο συλλογής δεδομένων. Από τους πολλούς αυτούς συνδυασμούς έχουν αναπτυχθεί τέσσερα συστήματα απεικόνισης, τα προϊόντα των οποίων έχουν διαφορετική χωρική και ραδιομετρική ανάλυση. Κάθε ένα από αυτά προορίζεται για διαφορετικές εφαρμογές. Οι τρόποι απεικόνισης οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή βασικών προϊόντων, κατά αύξουσα τελική ποιότητα είναι οι εξής:

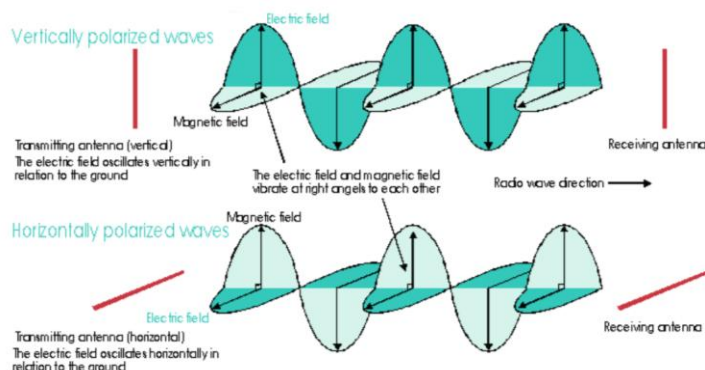
- ScanSar mode **(SC)**
- Stripmap mode **(SM)**
- Spotlight mode **(SL)**
- High Resolution Spotlight **(HS)**



Εικόνα 2.1: Ηλεκτρονική περιστροφή κεραίας Πηγή: (Lopez, 2010)

Όλοι οι τρόποι απεικόνισης μπορούν να χρησιμοποιούν μονή ή και διπλή πόλωση, εκτός από το Scansar mode το οποίο έχει μονή. Η διπλή πόλωση ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του ραντάρ μπορεί να είναι:

- HH (Horizontal-Horizontal)
- VH(Vertical-Horizontal)
- HV(Horizontal-Vertical)
- VV(Vertical- Vertical)



Εικόνα 2.2: Διαφορετικά πολωμένες κυματομορφές

Πηγή:(www.cdt21.com)

System Parameters	
Radar carrier frequency	9.65 GHz
Radiated RF Peak Power	2 kW
Incidence angle range for stripmap / ScanSAR	20° – 45° full performance (15°-60° accessible)
Polarizations	HH, VH, HV, VV
Antenna length	4.8 m
Nominal look direction	right
Antenna width	0.7 m
Number of stripmap / ScanSAR elevation beams	12 (full performance range) 27 (access range)
Number of spotlight elevation beams	91 (full performance range) 122 (access range)
Number spotlight azimuth beams	229
Incidence angle range for spotlight modes	20° – 55° full performance (15°-60° accessible)
Pulse Repetition Frequency (PRF)	2.0 kHz – 6.5 kHz
Range Bandwidth	max. 150 MHz (300 MHz experimental)

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά Συστήματος TerraSAR-X

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Orbit and Attitude Parameters	
Nominal orbit height at the equator	514 km
Orbits / day	15 ² / ₁₁
Revisit time (orbit repeat cycle)	11 days
Inclination	97.44°
Ascending node equatorial crossing time	18:00 ± 0.25 h (local time)
Attitude steering	"Total Zero Doppler Steering"

Πίνακας 2.1: Παράμετροι Τροχιάς και Λειτουργίας

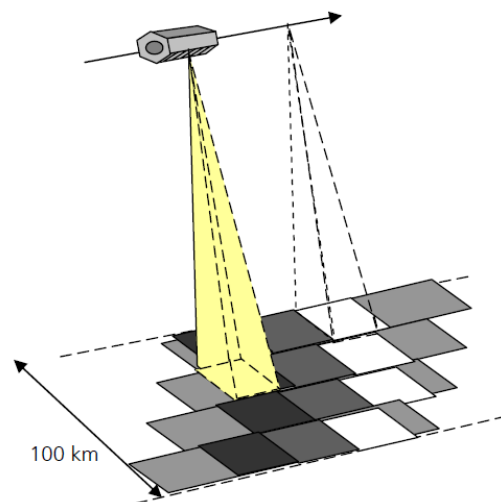
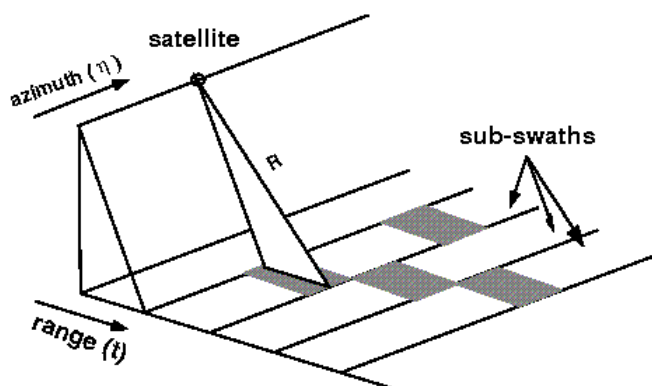
TerraSAR-X

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (IMAGE MODES)

2.2.1 ScanSAR Mode (SC)

ScanSAR operation mode:



Εικόνα 2.3: Τρόπος απεικόνισης ScanSAR

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

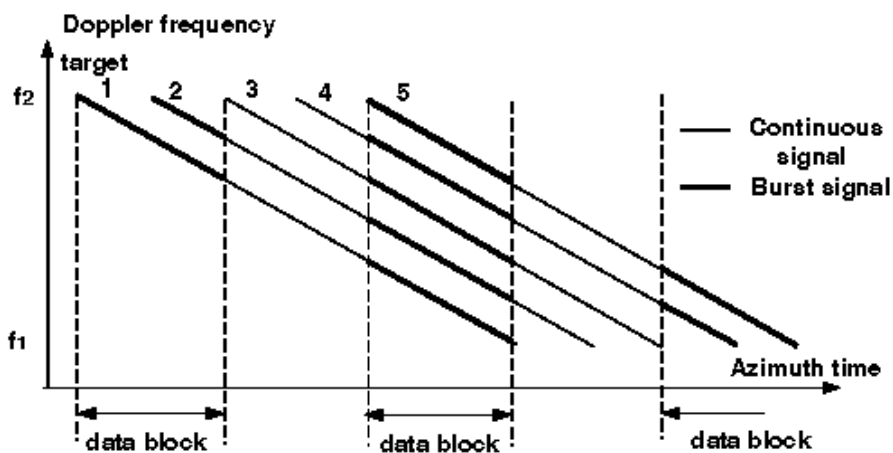
Πρόκειται για την απεικόνιση με τη μικρότερη διακριτική ικανότητα, αλλά με την μεγαλύτερη κάλυψη εδάφους αναφορικά με το πλάτος της. Αυτή η απεικόνιση στηρίζεται σε μια τεχνική αλλαγής της γωνίας ανύψωσης της κεραίας (elevation angle), η οποία εκτελείται ηλεκτρονικά από τα στοιχεία της κεραίας. Μεταβάλλεται δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) με τέτοιο τρόπο, ώστε το ραντάρ αντί για μια λωρίδα εδάφους να σαρώνει περισσότερα μονοπάτια (subswaths) (εικ. 2.3). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση του πλάτους της απεικόνισης (swath width). Ο TerraSAR-X, συνδυάζει την σάρωση τεσσάρων διαδοχικών μονοπατιών, η οποία γίνεται παρόμοια με την απεικόνιση StripMap, για την παραγωγή μιας ενιαίας λωρίδας απεικόνισης μεγαλύτερου πλάτους από αυτήν του StripMap, ίση με 100km. Η σάρωση του εδάφους δεν γίνεται παράλληλα, αλλά τμηματικά. Δηλαδή αρχικά η γωνία ανύψωσης σταθεροποιείται σε μια τιμή και διαδοχικοί παλμοί σαρώνουν ένα τμήμα εδάφους της πρώτης λωρίδας. Στην συνέχεια η γωνία ανύψωσης αλλάζει και σαρώνεται ένα τμήμα εδάφους, το οποίο ανήκει σε μια διαφορετική λωρίδα από την προηγούμενη, ας πούμε της δεύτερης, με μια γωνιακή μετατόπιση ως προς το προηγούμενο (λόγω της κίνησης του δορυφόρου). Αυτό γίνεται μέχρι που σαρώνεται και ένα τμήμα της τέταρτης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σχηματίζοντας ουσιαστικά ένα μπλοκ από τμηματικούς φωτισμούς του εδάφους. Από τη στιγμή

που κάθε μονοπάτι ξανα φωτίζεται από το ραντάρ, μετά από χρονικό διάστημα μικρότερο από αυτό που χρειάζεται ο δορυφόρος για να καλύψει το συνθετικό άνοιγμα της κεραίας, κάθε σημείο του εδάφους συνεισφέρει στο σήμα και μπορεί να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια στην μετέπειτα επεξεργασία. Ως αποτέλεσμα, για κάθε στόχο λαμβάνεται πληροφορία από ένα τμήμα μικρότερο του συνολικού εύρους συχνοτήτων, μειώνοντας έτσι το φάσμα συχνοτήτων Doppler στη διεύθυνση των αζιμουθίων. Ως συνέπεια μειώνεται η διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση των αζιμουθίων η οποία εξαρτάται από το εύρος ζώνης συχνοτήτων των αζιμουθίων. Οι παράμετροι της απεικόνισης φαίνονται παρακάτω (πιν. 2.3).

Parameter	Value
Number of sub-swaths	4
Swath width (ground range)	100 km
Nominal L1b product length	150 km
Full performance incidence angle range	20° - 45°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	27 (9 x 4-beam combinations in full perf. range)
Azimuth resolution	18.5 m
Ground range resolution	1.70 m - 3.49 m (@ 45°..20° incidence angle)

Πίνακας 2.3: Στοιχεία Απεικόνισης ScanSAR

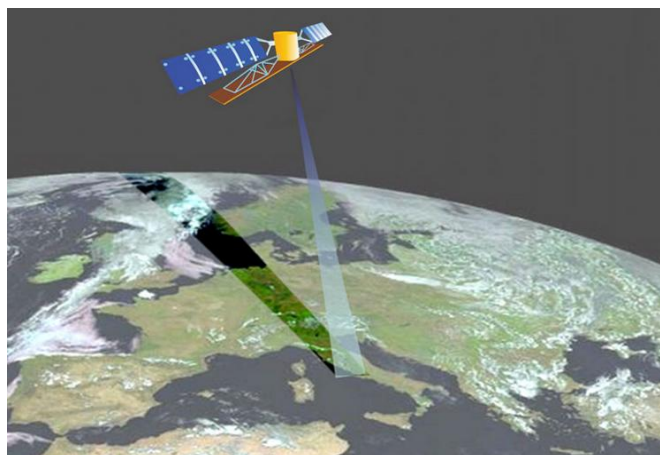
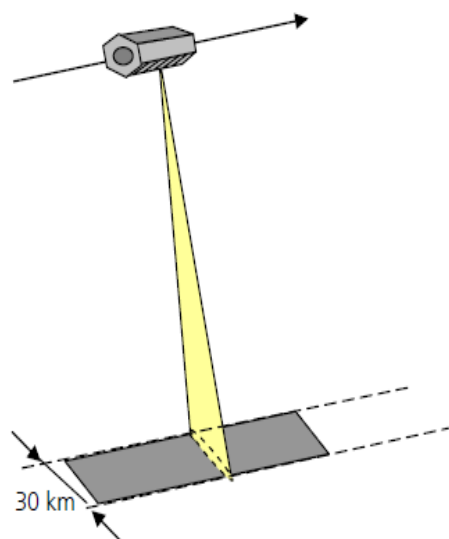
Πηγή: (Eidener et al., 2010)



Διάγραμμα 2.1: Σύγκριση συχνότητας μεταξύ συνεχόμενης (StripMap) και διακοπτόμενης λειτουργίας (ScanSAR).

Πηγή: (Cumming et al. 2005)

2.2.2 StripMap Mode (SM):

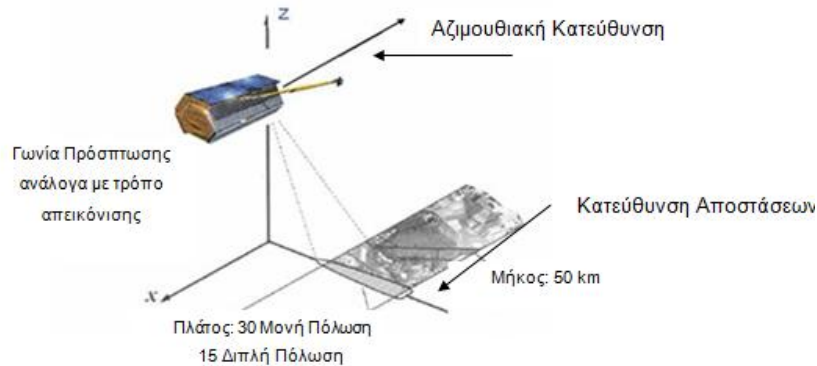


Εικόνα 2.4: StripMap Λειτουργία

Πηγή: (www.treuropa.com, (Eidener et al., 2010)

Είναι η βασικότερη και συνηθέστερη μορφή λειτουργίας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και σε προηγούμενους δορυφορικούς δέκτες. Διαδοχικοί παλμοί μικροκυματικής ακτινοβολίας μεταδίδονται προς το έδαφος, υπό τη μορφή δέσμης ακτινών (beam), σχηματίζοντας ουσιαστικά μια λωρίδα εδάφους (ground swath). Η κλίση της κεραίας του ραντάρ είναι σταθερά ορισμένη ως προς την κατακόρυφη στο ναδίρ, η οποία ονομάζεται γωνία ανύψωσης ή γωνία φωτισμού (elevation, illumination angle) και ως προς την διεύθυνση των αζιμουθίων ή κατά μήκος της τροχιάς (azimuth steering angle, squint angle). Η ανάλυση της λωρίδας εδάφους που τελικά προκύπτει, ως εικονιστικό προϊόν, είναι σταθερή στην διεύθυνση των αζιμουθίων (azimuth) και παρουσιάζει μια μικρή διακύμανση κατά την διεύθυνση των αποστάσεων (range), καθώς η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) των παλμών στο έδαφος αλλάζει ανάλογα με την απόσταση στόχου – δέκτη (slant range). Το πλάτος της λωρίδας που διαγράφεται στο έδαφος (swath width) είναι σταθερό και είναι ίσο με 30χλμ για μονή πόλωση και 15 χλμ για διπλή πόλωση. Αντίθετα, το μήκος της απεικόνισης δεν είναι σταθερό και εξαρτάται καθαρά από τις δυνατότητες του δέκτη. Περιορίζεται από το πόσο μπορεί να διαρκέσει η μπαταρία του, από την ελεύθερη μνήμη του στην οποία καταγράφει τα δεδομένα, καθώς και από τη διακύμανση της θερμοκρασίας του (Eidener et al., 2008). Ανάλογα με τη συχνότητα την οποία

το σύστημα παράγει παλμούς και τις διεργασίες τις οποίες έχει επιτελέσει μέχρι εκείνη την στιγμή, οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζονται, μειώνοντας το μέγιστο χρόνο παρατήρησης. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι αυτής της απεικόνισης καθώς και η γεωμετρία λήψης φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (εικ. 2.4, 2.5).



Εικόνα 2.5 Γεωμετρία Απεικόνισης StripMap

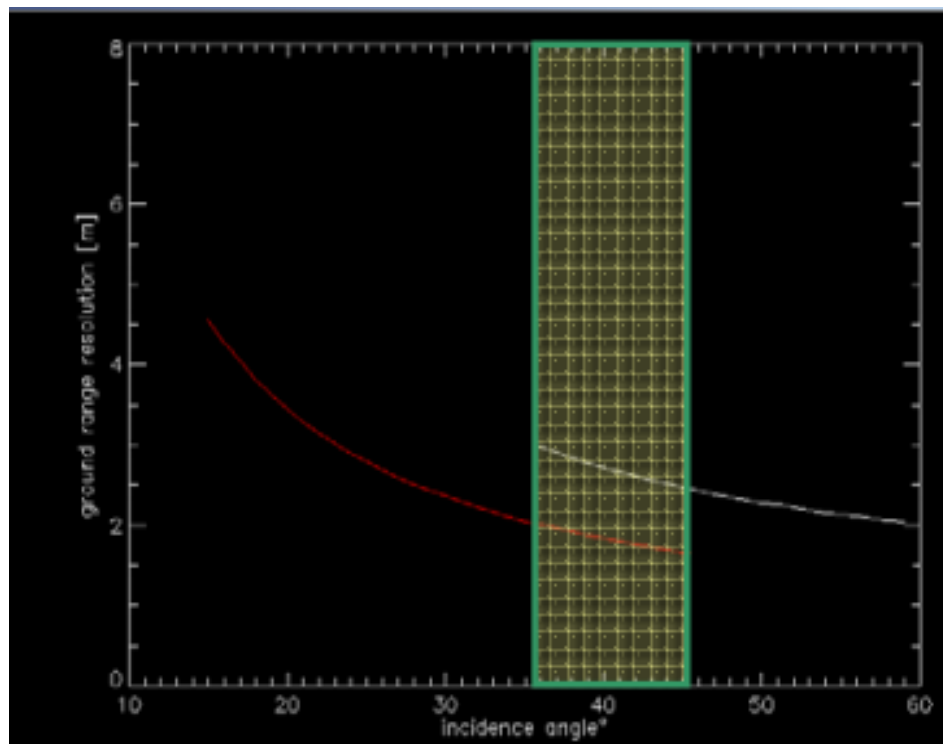
Parameter	Value
Swath width (ground range)	30 km single pol. 15 km dual pol.
Nom. L1b product length	50 km
Full performance incidence angle range	20° - 45°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	27 (12 full perf.)
Azimuth resolution	3.3 m (6.6 m dual pol.)
Ground range resolution	1.70 m - 3.49 m (@ 45°.. 20° incidence angle)
Polarizations	HH or VV (single) HH/VV, HH/HV, VV/VH (dual)

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά StripMap Απεικόνισης

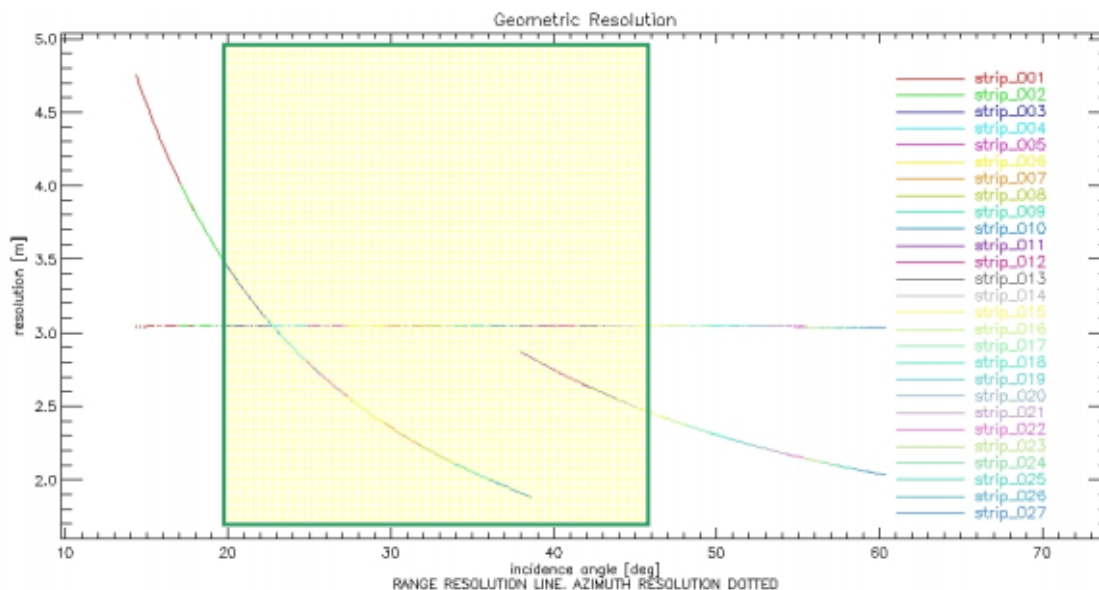
Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Σημειώνεται, πως η συχνότητα παραγωγής παλμών μπορεί να διαφέρει κατά τη διάρκεια της παρατήρησης λόγω των πολύ αυστηρών χρονικών διαστημάτων ανάμεσα στα οποία πρέπει το ραντάρ να παράγει ή όχι παλμούς, έτσι ώστε να μην αλλοιωθεί το ονομαστικό πλάτος της λωρίδας εδάφους ακόμη και σε έδαφος με έντονη εναλλαγή υψομέτρων. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται υπόψη από τον επεξεργαστή ο οποίος αποθηκεύει τα πρωτογενή δεδομένα, στα οποία γίνεται δειγματοληψία του επιστρεφόμενου σήματος (sampling) με την υψηλότερη συχνότητα που προκύπτει (sampling frequency).

Λόγω κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του συστήματος, δεν είναι δυνατή η εκπομπή παλμών στην ονομαστική συχνότητα των 150MHz για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης, ανάλογα πάντα με την συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF), στα προϊόντα Stripmap. Γι' αυτό το λόγο ενδέχεται να υπάρξει μείωση στα 100 MHz για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης μεταβάλλοντας την ανάλυση στην διεύθυνση των αποστάσεων όπως φαίνεται παρακάτω (διαγ. 2.2).



Διάγραμμα 2.2: Ανάλυση στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους για λειτουργία στα 100MHz (λευκή γραμμή) και στα 150 MHz (κόκκινη γραμμή) και επικάλυψή τους (SSC προϊόντα). Πηγή: (Eidener et al., 2010)



Διάγραμμα 2.3: Ανάλυση ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης για SSC StripMap προϊόντα (καμπύλες - διεύθυνση απόστασης, ευθεία γραμμή - διεύθυνση αζιμουθίων).

Πηγή: (Fritz et al., 2010)

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα απεικόνισης StripMap μπορεί να λειτουργεί σε μονή ή διπλή πόλωση. Δηλαδή το σήμα που επιστρέφει στον δέκτη, μπορεί να είναι ίδιας μορφής με αυτό που εκπέμφθηκε ή να διαφέρει κατά 90 μοίρες, καταλήγοντας σε ένα ή δύο εικονιστικά επίπεδα αντίστοιχα. Η απεικόνιση με διπλή πόλωση εφαρμόζεται εναλλάσσοντας την πόλωση των διαδοχικών παλμών κατά την εκπομπή ή και την λήψη τους. Έτσι για κάθε κανάλι πόλωσης ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής παλμών είναι το μισό του συνολικού. Για να έχουμε σωστή δειγματοληψία του ανακλώμενου συμπιεσμένου σήματος (impulse target response), κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων για κάθε κανάλι, ο συνολικός ρυθμός παραγωγής παλμών πρέπει να διπλασιαστεί. Ως αποτέλεσμα, το πλάτος της απεικόνισης στο έδαφος υποδιπλασιάζεται από αυτό της μονής πόλωσης. Λόγω ενός ανώτατου ορίου στην συχνότητα μετάδοσης παλμών, το οποίο είναι ίσο με 6.5 KHz προκύπτουν κενά στην κατεύθυνση των αζιμουθίων, λόγω χαμηλής συχνότητας δειγματοληψίας των εισερχόμενων παλμών. Αυτά αντιμετωπίζονται με μείωση του εύρους συχνοτήτων των αζιμουθίων (azimuth bandwidth) στον επεξεργαστή του ραντάρ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τελική ανάλυση στην διεύθυνση των αζιμουθίων (azimuth resolution) να μειώνεται στο μισό σχετικά με την μονή πόλωση.

2.2.3 Spotlight Mode:

Σε αυτόν τον τρόπο απεικόνισης η κεραία του δέκτη στρίβει διαδοχικά με το χρόνο στην διεύθυνση των αζιμουθίων κατά μια γωνία (azimuth steering angle), έτσι ώστε τα σημεία στο έδαφος να δέχονται τους παλμούς της μικροκυματικής ακτινοβολίας(φωτίζονται) για περισσότερο χρόνο, όπως φαίνεται παρακάτω:

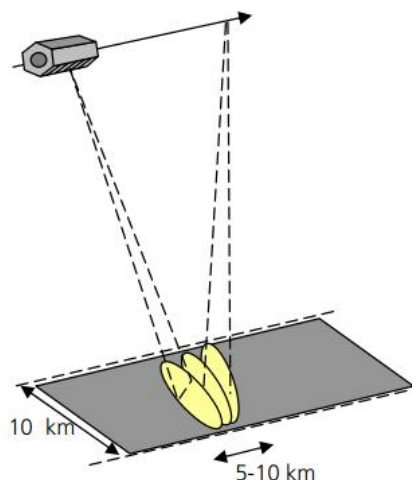
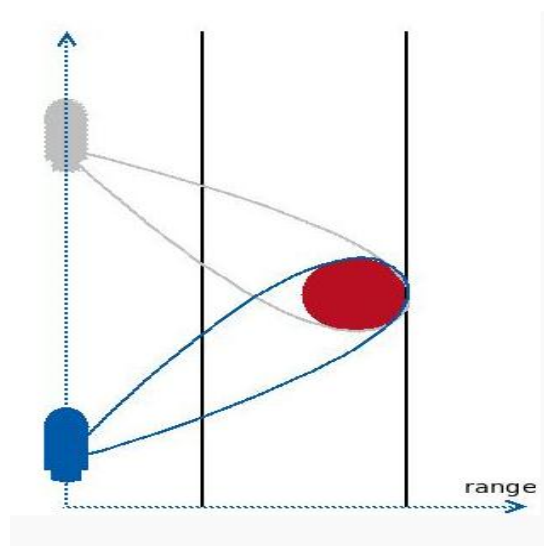


Fig. 2-3: Imaging geometry in spotlight mode



Εικόνα 2.6: Γεωμετρία Τρόπου Απεικόνισης Spotlight

Πηγή: (Eidener et al., 2010), (<http://www.spg.tu-darmstadt.de>)

Στην ουσία αυτό που επιτυγχάνεται, είναι η περαιτέρω αύξηση του συνθετικού μήκους της κεραίας. Συνεπώς, προκύπτει ακόμα μεγαλύτερη ανάλυση της εικόνας στην αζιμουθιακή διεύθυνση, σε σχέση με μια απλή Sar απεικόνιση, αλλά και μείωση του πλάτους της απεικόνισης (swath width) παράλληλα. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν, η δέσμη των ακτινών που εκπέμπεται από το ραντάρ να 'φώτιζε' μια συγκεκριμένη περιοχή του εδάφους, για ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα της απλής τεχνικής του συνθετικού ανοίγματος, με το πέρασμα του δορυφόρου πάνω από την περιοχή αυτή. Έτσι, συντίθεται μια κεραία μεγαλύτερου μήκους και συνεπώς μια πολύ καλύτερη ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων της επιφάνειας στα οποία προσπίπτει η δέσμη αυτή των ακτινών θα ήταν δυνατή. Αυτό όμως δεν είναι εφικτό λόγω του πολύ μικρού αποτυπώματος της δέσμης στην επιφάνεια του εδάφους (antenna footprint) και της αλλαγής της συχνότητας (Doppler shift), η οποία οφείλεται στο φαινόμενο Doppler και η οποία προκύπτει από την κίνηση του δορυφόρου. Αντί για αυτό προκύπτουν

αποτυπώματα πολύ κοντά το ένα στο άλλο, πολλά σημεία των οποίων εμπίπτουν σε μια ενιαία περιοχή η οποία 'φωτίζεται' διαρκώς, κατά το χρονικό διάστημα για το οποίο το ραντάρ διανύει την απόσταση του συνθετικού ανοίγματος στο διάστημα. Αυτό γίνεται διαδοχικά, έως ένα ανώτατο όριο σχετικά με το μήκος της απεικονιζόμενης κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων (along – track) περιοχής. Το γεγονός αυτό προκύπτει από τη γεωμετρία λήψης του συστήματος, γιατί ο δορυφόρος στο διάστημα διανύει πολύ μεγάλη απόσταση στο διάστημα για την απεικόνιση μιας μικρής περιοχής εδάφους, συνεπώς δεν μπορεί να λειτουργεί κατ' αυτόν τον τρόπο συνεχόμενα.

Με βάση την θεωρητική αυτή προσέγγιση παράγονται δύο παραλλαγές του Sliding Spotlight Mode, με διαφορετικές τιμές ακρίβειας στην αζιμουθιακή διεύθυνση και διαφορετικά μεγέθη εικόνας. Αυτές οι διαφορές προκύπτουν από την ταχύτητα εναλλαγής της γωνίας της δέσμης στην αζιμουθιακή διεύθυνση και από τα εύρη διακύμανσης της γωνίας αυτής καθεαυτής. Αυτές είναι:

- High Resolution Spotlight Mode (HS)
- Spotlight Mode (SL)

Είναι προφανές, πως αυτός ο τρόπος απεικόνισης γίνεται σε πολύ μικρό χρόνο (όπως και οι άλλοι), με παράλληλη στροφή της κεραίας με πολύ μεγάλη ακρίβεια και για προκαθορισμένες εκ των προτέρων περιοχές. Συνεπώς, απαιτείται ένας πολύ ακριβής προγραμματισμός λήψεως και πολύ ακριβή στοιχεία προσδιορισμού της θέσης του δορυφόρου και της χρονικής στιγμής όπου θα αρχίσει η λήψη των δεδομένων, στοιχεία τα οποία προκύπτουν από τον υπολογισμό των εφημερίδων του δορυφόρου και ελέγχονται από δέκτες GPS. Σφάλματα προσδιορισμού των παραμέτρων αυτών επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την τελική απεικόνιση στην απαιτούμενη από τον χρήστη περιοχή. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν 122 προκαθορισμένα εύρη τιμών της γωνίας ανύψωσης της δέσμης (elevation beam patterns), έτσι ώστε ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της προς απεικόνιση περιοχής να προσαρμόζεται όσο το δυνατόν καλύτερα το κέντρο της δέσμης στο κέντρο της περιοχής προς απεικόνιση. Αντίστοιχα, υπάρχουν 229 προκαθορισμένες γωνίες περιστροφής της δέσμης ως προς την αζιμουθιακή διεύθυνση (squint angle), από τις οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι 125 από αυτές για να μεγιστοποιήσουν το συνθετικό άνοιγμα της κεραίας.

Spotlight Mode (SL)

Με αυτόν τον τρόπο απεικόνισης η ταχύτητα αλλαγής της γωνίας στην διεύθυνση των αζιμουθίων είναι μικρότερη από την HS, με αποτέλεσμα την μείωση της διακριτικής ικανότητας στην διεύθυνση των αζιμουθίων και την αύξηση του μήκους της εικόνας στην ίδια διεύθυνση (swath width) αναφορικά με την Spotlight HS. Μέσω της μείωσης της ταχύτητας αλλαγής της γωνίας αυτής ο χρόνος φωτισμού του κάθε στόχου μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση του συνθετικού μήκους της κεραίας. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι της απεικόνισης αυτής είναι (πιν. 2.5):

Parameter	Value
Scene extension	10 km (azimuth) x 10 km (ground range)
Full performance Incidence angle range	20° - 55°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	91 (full performance) 122 (data access)
Number of azimuth beams	up to 125 out of 229
Azimuth steering angle	up to $\pm 0.75^\circ$
Azimuth resolution	1.7 m (single polarization) 3.4 m (dual polarization)
Ground range resolution	1.48 m - 3.49 m (@ 55°..20° incidence angle)
Polarizations	HH or VV (single) HH/VV (dual)

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης Spotlight Mode (SL)

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Σημειώνεται, πως παρά την εφαρμογή του φίλτρου Hamming για συμπίεση των αποκρίσεων στο σήμα λόγω θορύβου, η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων δεν επηρεάζεται και το πλάτος της απεικόνισης δεν μειώνεται όπως γίνεται στη High Resolution Spotlight Mode απεικόνιση.

High Resolution Spotlight Mode (HS)

Πρόκειται για το προϊόν με τη μεγαλύτερη δυνατή διακριτική ικανότητα κατά την διεύθυνση των αζιμουθίων. Αυτός ο τρόπος απεικόνισης είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με τέτοια γεωμετρία έτσι ώστε το τελικό απεικονιστικό προϊόν να έχει ονομαστική διακριτική ικανότητα κατά την διεύθυνση των αζιμουθίων (azimuth resolution) γύρω στα 1.1m και οι διαστάσεις της εικόνας να είναι 5 x 10km. Τα χαρακτηριστικά της απεικόνισης φαίνονται παρακάτω (πιν. 2.6):

Parameter	Value
Scene extension	5 km (azimuth) x 10 km (ground range)
Full performance incidence angle range	20° - 55°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	91 (full performance) 122 (data access)
Number of azimuth beams	up to 125 out of 229
Azimuth steering angle	up to $\pm 0.75^\circ$
Azimuth resolution	1.1 m (single polarization) 2.2 m (dual polarization)
Ground range resolution	1.48 m - 3.49 m (@ 55°..20° incidence angle) 0.74 m – 1.77 m (with 300 MHz bandwidth option and reduced swath extent in range)
Polarizations	HH or VV (single) HH/VV (dual)

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης Spotlight (HS)

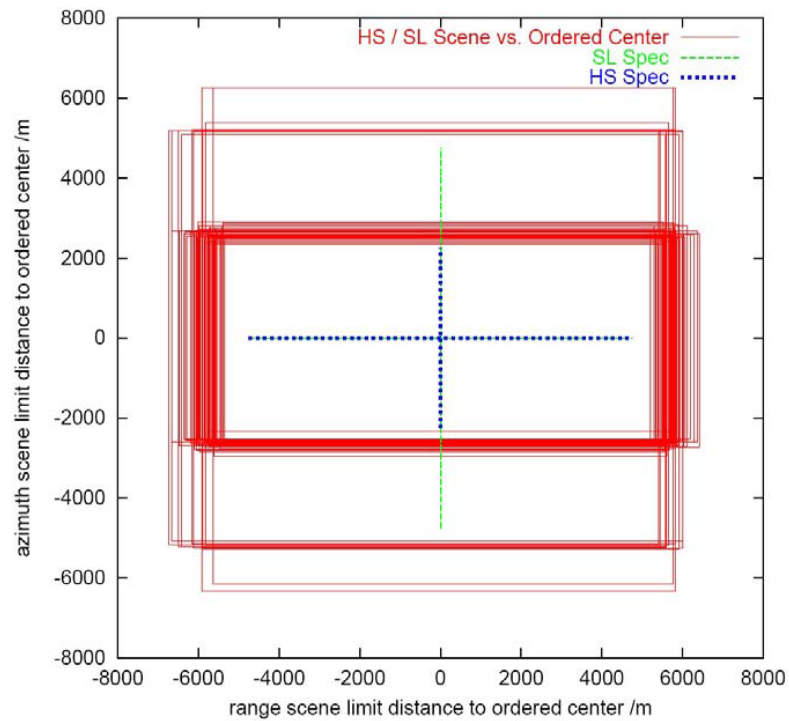
Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Το ονομαστικό εύρος συχνοτήτων (bandwidth) το οποίο χρησιμοποιεί αυτή η απεικόνιση είναι 150 MHz, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί εύρος συχνοτήτων της τάξης των 300 MHz. Το προϊόν αυτό βρίσκεται σε πειραματικό ακόμα στάδιο χωρίς ακόμα να έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες τεκμηρίωσης των παραγόμενων προϊόντων. Ωστόσο κάποιες δοκιμές που έχουν γίνει οδηγούν σε πολύ καλά αποτελέσματα αναφορικά με την ποιότητα της εστίασης, της σταθερότητας της φάσης και της ραδιομετρίας της τελικής εικόνας, περιορίζοντας όμως

παράλληλα τη διάσταση της απεικόνισης κατά τη διεύθυνση των αποστάσεων (swath width). Αναφέρεται πως στην παρούσα διπλωματική η εικόνα που διατίθεται είναι αυτής της κατηγορίας.

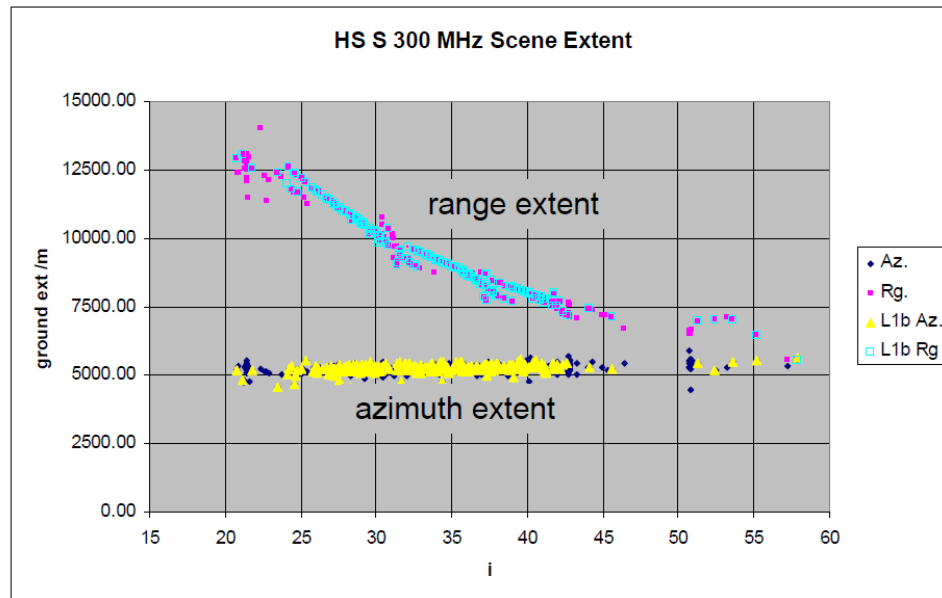
2.2.4 Κάλυψη Περιοχής

Η απεικόνιση μιας συγκεκριμένης περιοχής από τον δορυφόρο TerraSAR-X σχετίζεται άμεσα με την ακριβή γνώση της τροχιάς του, τον ακριβή χρόνο όπου θα αρχίσει και θα σταματήσει να συλλέγει δεδομένα, την σωστή ρύθμιση για ορθή λήψη των επιστρεφόμενων παλμών σχετικά με την απόσταση από το έδαφος και τον ακριβή υπολογισμό του κεντροειδούς του φαινομένου Doppler, που χρησιμοποιείται στην μετέπειτα επεξεργασία. Για το λόγο αυτό, δίνεται ένα περιθώριο στον χρόνο συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε να αποφευχθεί μείωση του ονομαστικού μήκους των προϊόντων. Αυτό είναι εύκολο για τις μεθόδους StripMap και ScanSar αλλά πιο δύσκολο για την μέθοδο Spotlight. Αύξηση του χρόνου καταγραφής δεδομένων, θα σήμαινε παράλληλα μείωση στην ανάλυση κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση. Το ραντάρ εκμεταλλεύεται στο έπακρο την απόσταση κατά μήκος της τροχιάς του έτσι ώστε να σχηματίζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο άνοιγμα κεραίας, αλλά λόγω φυσικών ορίων, δεν δύναται να ξεπεράσει κατά πολύ τα ήδη περιορισμένα όρια. Ωστόσο, πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι εν γένει τα παραγόμενα προϊόντα είναι μέσα στο όριο των ± 300 m το οποίο έχει θεσπιστεί αναφορικά με την ακρίβεια αναπαράστασης μιας συγκεκριμένης περιοχής του εδάφους για τις Spotlight απεικονίσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται πως η διάσταση των εικόνων κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων, παρουσιάζει μια πολύ μικρή μείωση λόγω των φυσικών περιορισμών στην εκτίμηση του ακριβούς κεντροειδούς του φαινομένου Doppler και των μετρήσεων του χρόνου. Τα προϊόντα του πειραματικού HS παρουσιάζουν μείωση του πλάτους της απεικόνισης κατά τον άξονα των αποστάσεων, έχοντας παράλληλα το κεντρικό σημείο της εικόνας τοποθετημένο στο σωστό αντίστοιχο σημείο της προς αποτύπωση περιοχής. Αυτό συμβαίνει λόγω κάποιων τεχνικών περιορισμών στην αποθήκευση των επιστρεφόμενων παλμών από το δορυφόρο, σχετικά με την προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων (buffering). Παρακάτω φαίνεται η προσαρμογή των HS Spotlight εικόνων σε κάποιο συγκεκριμένο κέντρο αναφοράς και η μεταβολή των διαστάσεών τους ανάλογα με την γωνία ανύψωσης.



Εικόνα 2.7: Προσαρμογή απεικονίσεων Spotlight (κόκκινο) στην επιθυμητή περιοχή (μπλε κουκίδες).

Πηγή: (Eidener et al., 2010)



Διάγραμμα 2.4: Μήκος και πλάτος απεικόνισης, ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης στο κέντρο της απεικόνισης για προϊόν Spotlight HS 300MHz.

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

2.3 ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Τα αρχικά δεδομένα SAR που συλλέγονται από τον δορυφόρο, αποστέλλονται στα κέντρα ελέγχου στο έδαφος και μετατρέπονται σε κατηγοριοποιημένα βασικά προϊόντα από τον επεξεργαστή του TerraSar-X στο έδαφος, τον TerraSAR-X Multi Mode SAR Processor (TMSP). Ένα σύνολο προϊόντων έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε να καλύπτει τις απαιτούμενες από τους χρήστες ανάγκες, αναφορικά με την γεωμετρική και ραδιομετρική ανάλυση και την γεωμετρική προβολή στο έδαφος. Τα βασικά προϊόντα είναι:

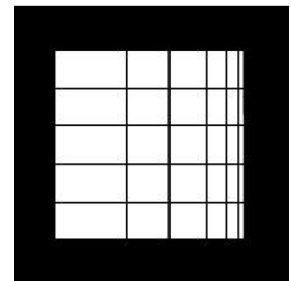
- Single Look Slant Range Complex (SSC)
- Multi Look Ground Range Detected (MGD)
- Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)
- Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

2.3.1 Γεωμετρικές Προβολές και Αναπαράσταση Δεδομένων

Single Look Slant Range Complex (SSC)

Γεωμετρική προβολή:

Αζιμούθιο – Κεκλιμένη Απόσταση (Slant range)



Το εικονιστικό προϊόν αυτής της κατηγορίας είναι το βασικό προϊόν του εστιασμένου σήματος του ραντάρ, το οποίο προέρχεται από μία ενιαία δέσμη ακτινών (single look). Ο ένας άξονας της εικόνας αναπαριστά τις κεκλιμένες αποστάσεις μεταξύ δέκτη – εδάφους (slant range), ενώ ο άλλος ο κάθετος σ' αυτόν, αναπαριστά τις τιμές των αζιμουθίων. Τα εικονοστοιχεία των οποίων οι τιμές προκύπτουν από μιγαδικές συναρτήσεις, είναι τοποθετημένα ανά ίσες αποστάσεις. Στη διεύθυνση των αζιμουθίων τα εικονοστοιχεία τοποθετούνται σύμφωνα με τη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF), απ' όπου προκύπτει το χρονικό διάστημα μεταξύ των παλμών (PRI)

$$PRI=1/PRF$$

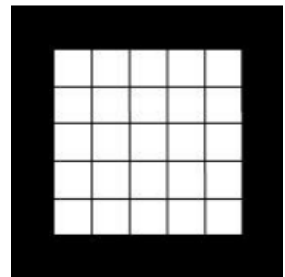
Στη διεύθυνση των κεκλιμένων αποστάσεων αυτό γίνεται σύμφωνα με συχνότητα δειγματοληψίας της απόστασης (RSF). Για κάθε εικονοστοιχείο, γίνεται τέτοια επεξεργασία, ώστε

να προκύπτει η τιμή του σαν να είχε ληφθεί από θέση εγκάρσια στην τροχιά του δορυφόρου (zero Doppler Processing). Έτσι, μεγιστοποιείται ο λόγος σήματος προς θόρυβο και ελαχιστοποιούνται οι ασάφειες φάσης, συνεπώς προσδιορίζεται η θέση του σημείου στη διεύθυνση των αζιμουθίων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τα προϊόντα Spotlight και StripMap η παραπάνω διαδικασία γίνεται για μια τεχνητή τιμή PRF, η οποία συνήθως είναι η μεγαλύτερη η οποία προκύπτει κατά τη στιγμή της λήψης των σημάτων, τέτοια ώστε το φάσμα των συχνοτήτων Doppler να αναπαριστάται όσο το δυνατόν καλύτερα. Ωστόσο, σημειώνεται πως το κεντροειδές του φαινομένου Doppler (f_{bc}), δηλαδή η στιγμιαία συχνότητα κατά τη στιγμή που κάθε στόχος βρίσκεται στην κεντρική διεύθυνση του αποτυπώματος της κεραίας (antenna footprint), μεταβάλλεται σημαντικά με το αζιμούθιο ή εναλλακτικά με το χρόνο. Αυτή η μεταβολή της απόστασης στόχου – δέκτη, έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη συσχέτιση μεταξύ απόστασης και αζιμουθίου και τα καθιστά όχι εύκολα διαχωρίσιμα. Συνεπώς, το κεντροειδές του φαινομένου Doppler (f_{bc}) δεν μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια και εισάγει κάποιο σφάλμα στο σύστημα, το οποίο όμως αντιμετωπίζεται από την μετέπειτα επεξεργασία. Τα προϊόντα SSC προορίζονται για επιστημονικούς κυρίως σκοπούς όπου είναι απαραίτητη όλη η πληροφορία φάσης και το συνολικό εύρος συχνοτήτων.

Multi Look Ground Range Detected (MGD)

Γεωμετρική προβολή:

Αζιμούθιο –Κεκλιμένη Απόσταση επί του εδάφους (Ground range)

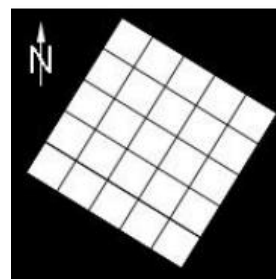


Αυτός ο τύπος προϊόντων έχει προκύψει από πολλές όψεις ("look"), με μειωμένα επίπεδα θορύβου και σχεδόν τετραγωνική μορφή εικονοστοιχείων στο έδαφος, σε ισαπέχουσα διάταξη και στις δύο κατευθύνσεις. Οι κεκλιμένες αποστάσεις (slant range) έχουν μετατραπεί σε κεκλιμένες αποστάσεις επί του εδάφους (ground range), μέσω ενός απλού πολυωνυμικού μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας το ελλειψοειδές του WGS'84 και ένα μέσο υψόμετρο της εκάστοτε περιοχής που απεικονίζεται. Το πλεονέκτημα αυτού του προϊόντος είναι πως δεν έχει εφαρμοστεί κανένας μετασχηματισμός ως προς κάποιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, συνεπώς δεν υπάρχουν παραμορφώσεις από παρεμβολή λόγω μετασχηματισμών. Για το λόγο αυτό όμως, η ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων στο έδαφος είναι μικρότερη από τα προϊόντα στα οποία έχει γίνει γεωαναφορά.

Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)

Γεωμετρική προβολή:

Προβολή σε χάρτη με διορθώσεις ελλειψοειδούς.

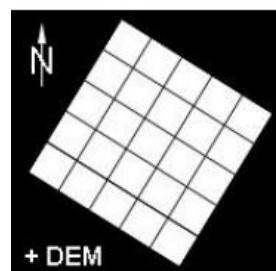


Πρόκειται για εικόνες “multilook” οι οποίες έχουν γεωαναφερθεί στο ελλειψοειδές του WGS '84 με την υπόθεση ενός ενιαίου υψομέτρου, για όλη την περιοχή απεικόνισης. Επίσης, για τις εικόνες αυτές έχει γίνει προβολή σε χάρτη μέσω των προβολών UTM και UPS, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής. Επειδή δεν χρησιμοποιείται ψηφιακό μοντέλο εδάφους, η ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων στο έδαφος ποικίλλει, ανάλογα με το ανάγλυφο. Οι ακρίβειες που αναφέρονται, απευθύνονται σε επίπεδο έδαφος όπου το θεωρούμενο υψόμετρο ταιριάζει με το πραγματικό τοπικό υψόμετρο. Για μεγάλες εναλλαγές υψομέτρου, τα σφάλματα που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλα, ειδικά για μικρές τοπικές γωνίες πρόσπτωσης.

Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

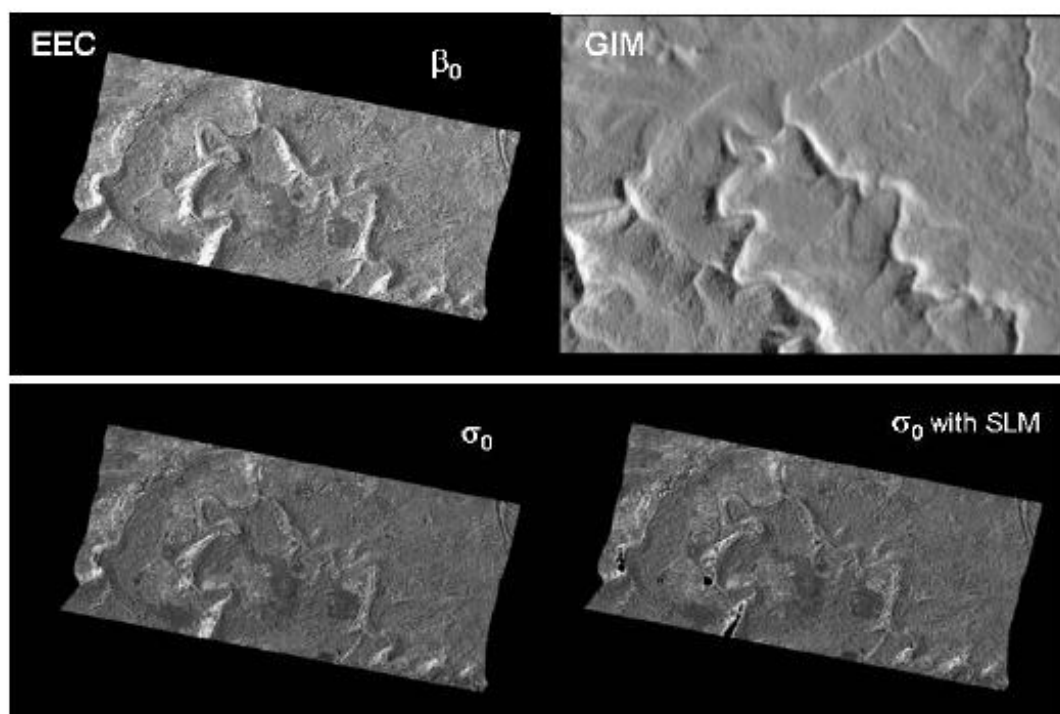
Γεωμετρική προβολή:

Προβολή σε χάρτη με διορθώσεις ελλειψοειδούς
και χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους.



Όπως και τα GEC και τα MGD, τα προϊόντα EEC είναι “multilook”. Έχουν γεωαναφερθεί στο ελλειψοειδές του WGS '84 και έχουν προβληθεί σε χάρτη με παράλληλη χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους, για ορθή προσαρμογή και εξάλειψη των σφαλμάτων λόγω ανάγλυφου. Διαθέσιμες προβολές για τις εικόνες αυτές, είναι οι UTM και UPS. Η χρήση του DEM αυξάνει κατά πολύ την ακρίβεια της γεωαναφοράς, αναφορικά πάντα με την ποιότητά του, δηλαδή πόσο πυκνό είναι και τι ακρίβειας στοιχεία παρέχει. Σημαντικό παράγοντα στην ακρίβεια παίζει και η γωνία πρόσπτωσης, όπου αυξανόμενη αυξάνει και την ακρίβεια της γεωαναφοράς. Τα DEM που χρησιμοποιούνται είναι τα καλύτερα διαθέσιμα όπως αυτά των SRTM/X-SAR, SRTM/C-band, ERS-tandem data, DTED-1, DTED-2 τα οποία όμως ακόμα έχουν ελλείψεις και σφάλματα. Με χρήση του SRTM ψηφιακού μοντέλου εδάφους τα προϊόντα από τις απεικονίσεις StripMap and ScanSar είναι άκρως ικανοποιητικά (Eidener, 2010). Όμως για τα προϊόντα της κατηγορίας Spotlight δεν προσφέρεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα, καθώς λόγω της μεγάλης διακριτικής ικανότητας αυτού του είδους της απεικόνισης απαιτείται καλύτερης ακρίβειας ψηφιακό μοντέλο

εδάφους. Για τα EEC προϊόντα, υπάρχει η δυνατότητα παροχής δεδομένων σχετικά με τη τοπική γωνία πρόσπτωσης (geocoded incidence angle mask (GIM)) του κάθε εικονοστοιχείου, έτσι ώστε να υπάρχει πληροφορία για περιοχές της εικόνας με μειωμένη ακρίβεια και παραμορφώσεις. Με την βοήθεια αυτών των δεδομένων είναι εφικτοί δύο τύποι ραδιομετρικής επεξεργασίας. Από την ραδιομετρική αναπαράσταση των εικονοστοιχείων στην φωτεινότητα της κεραίας (β_0) γίνεται διόρθωση σχετικά με τις συνθήκες φωτισμού της περιοχής (λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές γωνίες πρόσπτωσης) και την προβολή στην γήινη επιφάνεια. Έτσι, μπορούν να προκύψουν εικόνες με βάση την ανακλαστικότητα του κάθε στόχου (σ_0, γ_0) (εικ.2.8).



Εικόνα 2.8: Spotlight EEC σε απεικόνιση σ_0 , β_0 και χρήση αρχείου με γωνίες

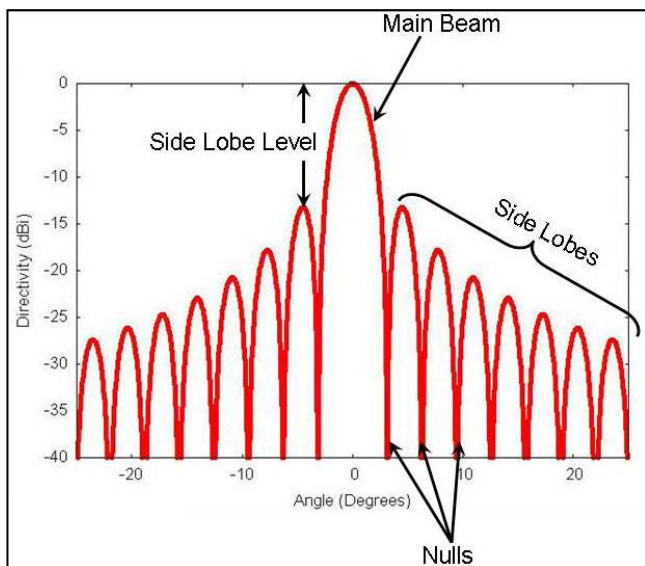
πρόσπτωσης (GIM).

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

2.3.2 Γεωμετρική - Ραδιομετρική Επεξεργασία

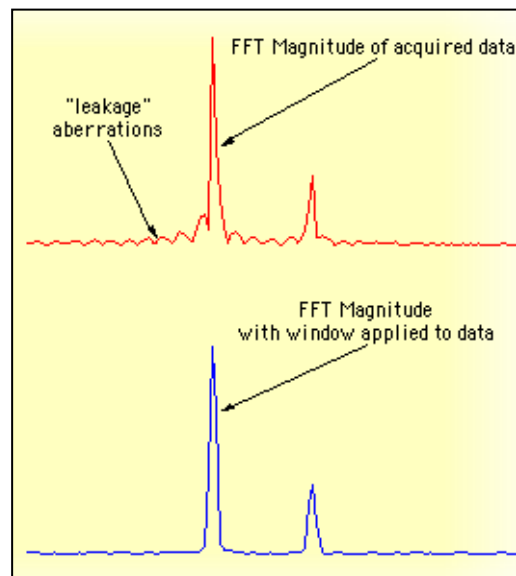
Η θεωρητική μέγιστη ακρίβεια της κεκλιμένης απόστασης (maximum slant range resolution) του TerraSAR-X σε λειτουργία μονής πόλωσης και εύρος συχνοτήτων αποστάσεων (range bandwidth) 150 MHz είναι ίση με 0.89m, χωρίς να έχει γίνει αφαίρεση θορύβου (spectral weighting). Για όλα τα προϊόντα, η μέγιστη ανάλυση μειώνεται εφαρμόζοντας στο εύρος συχνοτήτων των αποστάσεων και των αζιμουθίων ένα φίλτρο, έτσι ώστε να συμπιεστούν οι θόρυβοι στις αποκρίσεις των σημάτων από τους στόχους και έτσι να εκτιμηθεί μια καλύτερη τιμή για την αναπαράσταση του εκάστοτε στόχου, διαδικασία η οποία αναφέρεται ως Hamming

windowing ($a=0.6$) (Eineder, 2008). Στην ουσία αυτό που γίνεται είναι οι συμπίεση των λοβών που προκύπτουν από θόρυβο (sidelobes), έτσι ώστε να μην υπάρχει σύγχυση μεταξύ πραγματικών αποκρίσεων και θορύβου (εικ. 2.9, 2.10).



Εικόνα 2.9: Αρχική απόκριση στόχου

Πηγή: (en.wikipedia.org)



Εικόνα 2.10: Απόκριση στόχου μετά από συμπίεση των sidelobes.

Πηγή: (www.wavemetrics.com)

Η εφαρμογή μιας τέτοιας διαδικασίας είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου απεικονίζονται οικιστικές και βιομηχανικές περιοχές όπου υπάρχει πολύ μεγάλη οπισθοσκέδαση λόγω της τραχείας υφής τους. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται στην τελική εικόνα πολύ μεγάλη αντίθεση μεταξύ των τόνων των εικονοστοιχείων, εισάγοντας ασάφεια στην ερμηνεία τους. Βέβαια μια τέτοια διαδικασία δεν είναι απόλυτη, καθώς με μεγάλη αύξηση του δείκτη PSLR (δηλαδή της διαφοράς της mainlobe από την μεγαλύτερη sidelobe) προκαλείται μείωση της ανάλυσης της εικόνας. Η τελική ακρίβεια στην κεκλιμένη απόσταση που προκύπτει είναι ίση με 1.2m ελαφρώς αυξημένη από την ονομαστική η οποία είναι 1.1m. Αυτό γίνεται επειδή το εύρος συχνοτήτων των αζιμουθίων μεγαλώνει, ενώ το εύρος συχνοτήτων των αποστάσεων μένει σταθερό. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των εικόνων, εν γένει αναφέρονται σε σημεία με μικρές γωνίες πρόσπτωσης τα οποία έχουν και το μεγαλύτερο πρόβλημα, επομένως δεν χειροτερεύουν την ανάλυση των εικόνων οι οποίες συνολικά σε όλο τους το εύρος έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα από την ονομαστική.

Ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης, η ακρίβεια των 1.2m στην κεκλιμένη απόσταση διαιρούμενη με το ημίτονο της γωνίας αυτής, μεταφράζεται σε ακρίβεια στη κεκλιμένη απόσταση

επί του εδάφους (ground range resolution). Λόγω περιορισμών συγχρονισμού αποστολής-λήψης παλμών, το εύρος συχνοτήτων των 150 MHz δεν μπορεί να επιτευχθεί για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης όπως προαναφέρθηκε. Για αυτό το λόγο στα προϊόντα StripMap και ScanSar ενδέχεται το εύρος συχνοτήτων στην μακρινή απόσταση (far range) να λειτουργεί στα 100MHz, διατηρώντας την ακρίβεια κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους, μειώνοντας όμως τη ραδιομετρική ανάλυση της εικόνας. Στα προϊόντα Spotlight HS 300 MHz λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα, αλλά λόγω περιορισμένου χώρου προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων (buffering) μειώνεται το πλάτος της απεικόνισης για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (διαγ. 2.4).

Το μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixel spacing) στα προϊόντα όπου έχει γίνει περαιτέρω επεξεργασία (detected) προκύπτει από εφαρμογή του κριτηρίου δειγματοληψίας του Nyquist, δηλαδή είναι ίση με το μισό της ανάλυσης της εικόνας. Στα προϊόντα στα οποία δεν γίνονται οι παραπάνω επεξεργασίες, τα οποία απεικονίζονται ως συνάρτηση κεκλιμένης απόστασης-χρόνου (SSC), το μέγεθος των εικονοστοιχείων δίνεται από τη φυσική συχνότητα δειγματοληψίας του ραντάρ. Για τη διεύθυνση των αποστάσεων, δίνεται από τη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) και για την αζιμουθιακή διεύθυνση από συχνότητα δειγματοληψίας αποστάσεων (RSF) οι οποίες μετατρέπονται σε αποστάσεις εικονοστοιχείων .

Στα προϊόντα όπου έχει γίνει περαιτέρω επεξεργασία και τα οποία αναφέρονται σε κάποια επιφάνεια αναφοράς, η ανάλυση της εικόνας έχει μειωθεί, με στόχο τη μείωση του σημειακού θορύβου, δηλαδή την καλύτερη ραδιομετρική απεικόνιση. Αυτό γίνεται μέσω των πολλών όψεων (looks), όπως προαναφέρθηκε. Η δέσμη ακτινών που παράγει το ραντάρ χωρίζεται σε μικρότερες, στενότερες δέσμες οι οποίες στην συνέχεια επεξεργάζονται ως ξεχωριστές και αθροίζονται ανεξάρτητα, με αποτέλεσμα την ραδιομετρική εξομάλυνση της εικόνας. Στην ουσία είναι σαν να προκύπτει μια εικόνα από πολλές όψεις (multilooking). Έτσι προκύπτουν δύο διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας προϊόντων, η μία αφορά σε παραγωγή εικόνων με την καλύτερη δυνατή χωρική ανάλυση (spatially enhanced) και η άλλη σε παραγωγή εικόνων με βέλτιστη ραδιομετρική ανάλυση (radiometrically enhanced). Και με τις δύο τεχνικές, τα εικονοστοιχεία που προκύπτουν είναι τετραγωνικά, έχουν δηλαδή ίδια μεγέθη κατά τον άξονα των αποστάσεων και αζιμουθίων.

Αναφέρεται, πως οι δύο τεχνικές επεξεργασίας δεν αποτελούν κάποια ξεχωριστή κατηγορία προϊόντων. Ουσιαστικά περιγράφεται η διαφορά μεταξύ προϊόντων μιας όψης ('single look') και πολλών όψεων (multilook). Τα προϊόντα στα οποία έχει γίνει γεωαναφορά (detected) όπως προαναφέρθηκε προκύπτουν, από πολλές όψεις. Ουσιαστικά δηλαδή, τα SSC προϊόντα μπορούν να προκύψουν για βέλτιστη χωρική ή ραδιομετρική αναπαράσταση.

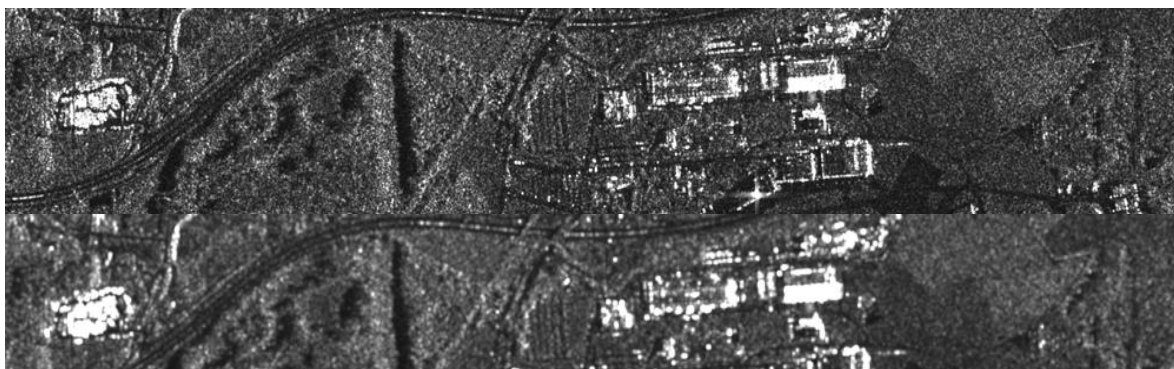
Spatially Enhanced Products (SE)

Τα προϊόντα αυτά είναι σχεδιασμένα για να παρέχουν την καλύτερη δυνατή χωρική ανάλυση εδάφους, αναφορικά με τον τρόπο απεικόνισης του ραντάρ, την πόλωση και την εκάστοτε γωνία πρόσπτωσης. Επειδή όλα τα σημεία δεν έχουν την ίδια διακριτική ικανότητα και στις δύο διευθύνσεις, θεωρείται πως η μικρότερη που προκύπτει ανάλογα με τις παραπάνω παραμέτρους, είτε στην διεύθυνση των αζιμουθίων είτε σ' αυτή των πλάγιων αποστάσεων στο έδαφος για κάθε στόχο, από αυτή προκύπτει και η τετραγωνική διάσταση των εικονοστοιχείων. Για τα σημεία τα οποία έχουν προσδιοριστεί με καλύτερη ακρίβεια, γίνεται προσαρμογή σε αυτό το μέγεθος εικονοστοιχείου και η εναπομένουσα, από τη μείωση του εύρους συχνοτήτων πληροφορία, χρησιμοποιείται για αφαίρεση θορύβου από την εικόνα και ραδιομετρική εξομάλυνση.

Radiometrically Enhanced Products (RE)

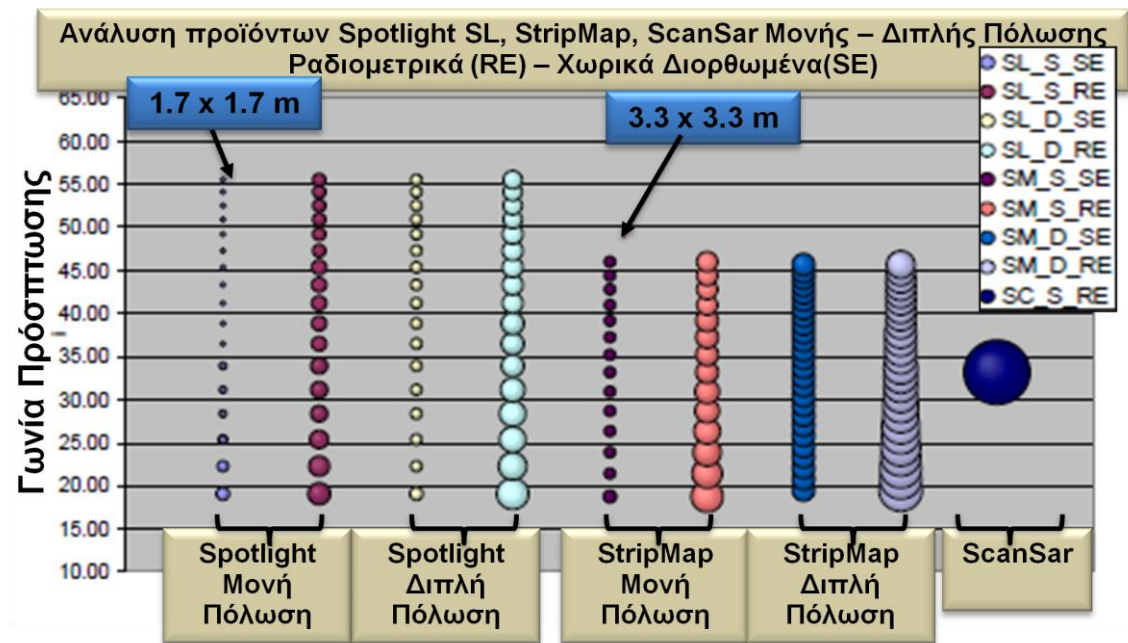
Πρόκειται για ραδιομετρικά διορθωμένα προϊόντα όπου η συνολική ανάλυση της εικόνας και για τις δύο διευθύνσεις ελαττώνεται σκόπιμα, έτσι ώστε να αφαιρεθεί ένα μεγάλο ποσοστό του θορύβου που υπάρχει στην εικόνα, μέσω της multilooking διαδικασίας που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση μέχρι 6-7 όψεις (looks), καταλήγοντας σε τελική ραδιομετρική ανάλυση εικόνας περίπου ίση με 1.5dB. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) ο οποίος μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, λαμβάνεται υπόψη και αντιμετωπίζεται, αλλάζοντας το αναμενόμενο μέγιστο επίπεδο θορύβου από οπισθοσκέδαση, αντίστοιχα. Από την μειωμένη ανάλυση της εικόνας, το μέγεθος των εικονοστοιχείων αυξάνεται (θεώρημα Shannon) και το μέγεθός της μειώνεται σημαντικά.

Παρακάτω, φαίνονται οι προκύπτουσες αναλύσεις διάφορων προϊόντων αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης.

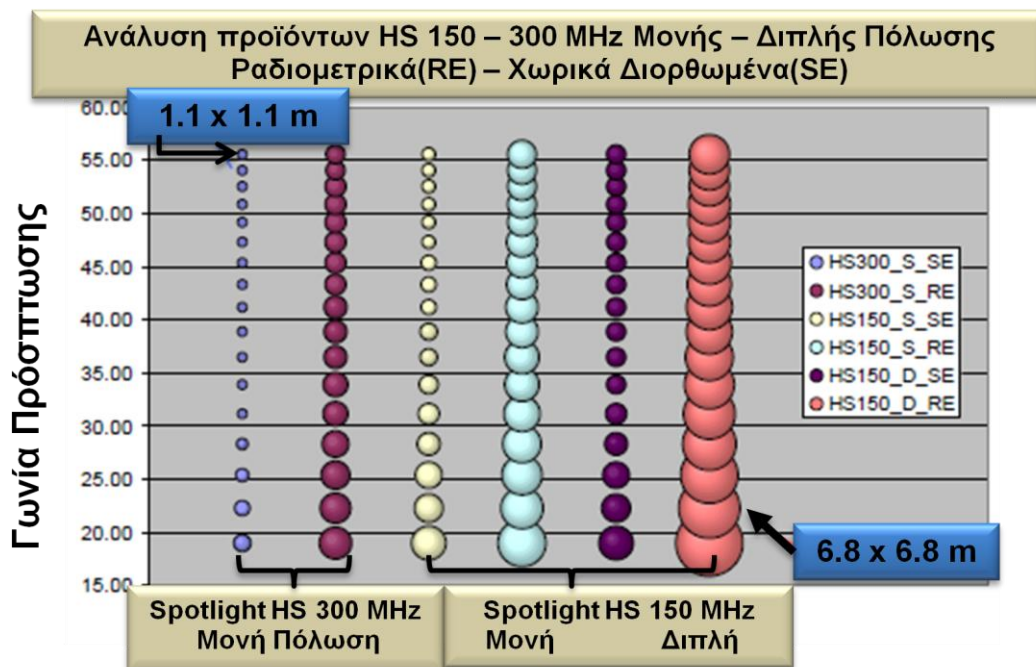


Εικόνα 2.11: Χωρικά (πάνω) και ραδιομετρικά(κάτω) βελτιωμένες απεικονίσεις StripMap.

Πηγή: (Eidener et al., 2010)



Διάγραμμα 2.5: Διακριτική ικανότητα επεξεργασμένων προϊόντων SL,SM,SC αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης
Πηγή: (Eidener et al., 2010)



Διάγραμμα 2.6: Διακριτική ικανότητα επεξεργασμένων προϊόντων Spotlight HS 150,300 MHz αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης
Πηγή: (Eidener et al., 2010)

2.3.3 Ακρίβεια εντοπισμού των εικονοστοιχείων στο έδαφος (Pixel Localization Accuracy)

Η ακρίβεια εντοπισμού ενός εικονοστοιχείου στο έδαφος (pixel localization accuracy) αναφέρεται στην ακρίβεια με την οποία μπορεί να προσδιορισθεί η πραγματική θέση ενός εικονοστοιχείου στο έδαφος, από μετρήσεις πάνω στην εικόνα. Αυτή η ακρίβεια εξαρτάται κατά πολύ από την ακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου κατά τη στιγμή των μετρήσεων. Υπάρχουν τρεις τύποι τροχιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των βασικών προϊόντων με διαφορετική ακρίβεια ο καθένας οι οποίοι φαίνονται παρακάτω (πιν. 2.7).

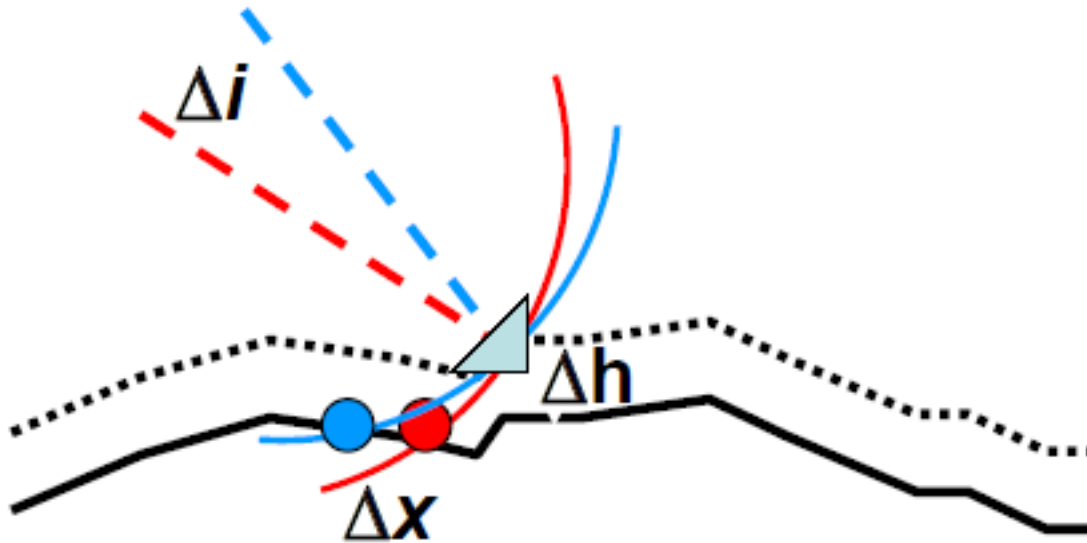
Orbit type	Required Accuracy	Purpose
predicted (PRED)	700 m along track	Processing of near real time products (NRT) only.
rapid (RAPD)	2 m (3D, 1 sigma)	Standard processing of basic products.
science (SCIE)	20 cm (3D, 1 sigma), aiming at 10 cm	Processing for high accuracy purposes, e.g. for interferometry.

Πίνακας 2.7: Διαθέσιμοι τύποι τροχιών, αναφορικά με την ακρίβειά τους, για τα βασικά προϊόντα.
Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Όπως παρατηρείται και στον παραπάνω πίνακα, η θεωρητική καλύτερη ακρίβεια με την οποία μπορεί να προσδιορισθεί η τροχιά του δορυφόρου παράλληλα με ακριβή μέτρηση του χρόνου είναι περίπου 2m, για επεξεργασία των βασικών προϊόντων. Συνεπώς, γνωρίζοντας το ακριβές μοντέλο διάδοσης των σημάτων στο χώρο, η γεωαναφορά μιας εικόνας SSC είναι δυνατή με ακρίβεια της τάξης των 2m και καλύτερης. Ωστόσο, το σήμα υπόκειται σε διάφορες παραμορφώσεις της τροχιάς που ακολουθεί, λόγω της διάδοσής του και στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα η τελική αυτή ακρίβεια να διπλασιάζεται (2-4m). Με χρήση μοντέλων που προσομοιώνουν τις παραμορφώσεις στις οποίες υπόκειται το σήμα με πολύ καλή ακρίβεια και με χρήση των τροχιών του δορυφόρου με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια (0.2m), προκύπτουν προϊόντα γεωμετρικής ακρίβειας γύρω στο 1m για όλα τα προϊόντα παραγωγής. Αναφέρεται (Eidener et al., 2010), πως από σχετικές επεξεργασίες που έχουν γίνει για ίδιες περιοχές μετά από πολλές λήψεις, έχουν προκύψει επεξεργασμένα προϊόντα με γεωμετρική ακρίβεια καλύτερη του ενός εικονοστοιχείου.

Για τα προϊόντα SSC στα οποία δεν έχει γίνει περαιτέρω επεξεργασία, τα σφάλματα προσδιορισμού των εικονοστοιχείων στο έδαφος, σχετίζονται μόνο με τις παραμέτρους του συστήματος και τη γεωμετρία λήψης. Τα Geocoded EEC προϊόντα είναι εικόνες στις οποίες έχει

γίνει γεωαναφορά και χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, πάνω στο οποίο προβάλλονται οι εικόνες. Το σφάλμα εξαρτάται τόσο από τις προηγούμενες παραμέτρους όσο και από την ακρίβεια με την οποία το έδαφος αναπαρίσταται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Επίσης, όσο μικρότερη η γωνία πρόσπτωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση λόγω σφάλματος του DEM. Αυτό φαίνεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα (εικ. 2.12).



Εικόνα 2.12: Γεωμετρία παραμόρφωσης απεικόνισης ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης και σφάλμα DEM.

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

Με τέλεια αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους από ένα DEM και λήψεις με μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, η θεωρητική ακρίβεια προσδιορισμού ενός εικονοστοιχείου στο χώρο είναι της τάξης του εικονοστοιχείου. Καθώς μειώνεται η υψομετρική ακρίβεια του DEM, που χρησιμοποιείται, μειώνεται αντίστοιχα και η ακρίβεια προσδιορισμού του εικονοστοιχείου στο έδαφος. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το σφάλμα αυτό στην διεύθυνση των αποστάσεων, συγκριτικά με τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης και για διαφορετικά σφάλματα του DEM.

Incidence Angle	20°	23°	26°	29°	32°	35°	38°	41°	44°	47°	48°	50°
Displacement Factor	2.75	2.36	2.05	1.80	1.60	1.43	1.28	1.15	1.03	0.93	0.90	0.83
DEM Elevation Error	Resulting Location Error [m]											
2	5.5	4.7	4.1	3.6	3.2	2.9	2.6	2.3	2.1	1.9	1.8	1.7
6	16.5	14.2	12.3	10.8	9.6	8.6	7.7	6.9	6.2	5.6	5.4	4.9
8	22	19	16	14	13	12	11	9	9	8	7	7
16	44	38	33	29	25	23	21	18	17	15	14	13
30	82	71	61	54	48	43	38	34	31	28	27	25
100	275	236	205	180	160	143	128	115	103	93	90	83

Πίνακας 2.8: Σφάλμα στη διεύθυνση των αποστάσεων για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.

Πηγή: (Fritz et al., 2007)

Με την παράδοση των προϊόντων αυτών δίνεται και ένας ποιοτικός χάρτης DEM, έτσι ώστε να γίνεται γνωστό τι είδους DEM έχει χρησιμοποιηθεί κάθε φορά και που υπάρχουν κενά ή παραλείψεις. Τα DEM που χρησιμοποιούνται φαίνονται παρακάτω (εικ. 2.13).

DEM product	vertical accuracy		grid size	limitations
	relative	absolute		
SRTM / X-SAR	6 m	16 m	1 "	+60° with gaps
SRTM / C-band	8 m	16 m	3 "	+ 60°
ERS-tandem	20 m	30 m	1 "	limited availability
DTED-1	20 m	30 m	3 "	limited availability
GLOBE	varying 10 m – 100s of meters		30 "	no restrictions, poor quality

Εικόνα 2.13: Χαρακτηριστικά των DEM που διατίθενται για τα προϊόντα TerraSAR.

Πηγή: (Eidener et al., 2010)

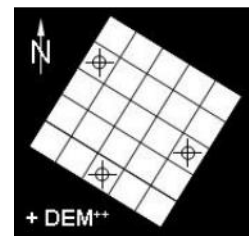
Τα προϊόντα Multi-Look Ground-range Detected (MGD) και Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) χρησιμοποιούν ένα μέσο υψόμετρο της εκάστοτε περιοχής αντί για DTM, συνεπώς έχουν μικρή ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης τους στην διεύθυνση των αποστάσεων.

2.4 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Αυτού του είδους οι εικόνες είναι παράγωγα των βασικών εικονιστικών προϊόντων, επικεντρωμένες σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος ή είναι εικόνες οι οποίες έχουν υποστεί περισσότερη επεξεργασία, σε θέματα σχετικά με τη ραδιομετρική διόρθωση και ορθοαναγωγή, την παραγωγή εικονομοσαϊκών και τη σύνθεση εικόνων. Έχουν περισσότερες επιλογές επεξεργασίας από τα βασικά προϊόντα, μαζί με χρήσιμες πληροφορίες που παρέχονται συνοδευτικά.

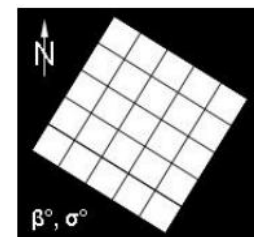
2.4.1 ORI^{SAR} - Orthorectified Image

Πρόκειται για εικόνες στις οποίες έχει γίνει ορθοαναγωγή και η τελική τους ακρίβεια είναι πολύ καλή. Έχουν γεωαναφερθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια και έχουν διορθωθεί τα σφάλματα λόγω αναγλύφου με χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους πολύ καλής ακρίβειας, το οποίο μπορεί προέρχεται από τον τελικό χρήστη της εικόνας ή αγοράζεται ξεχωριστά από την ίδια την εταιρεία. Συνεπώς το κόστος αγοράς τους είναι αρκετά μεγαλύτερο. Η ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων στο έδαφος είναι πολύ καλύτερη από αυτή των βασικών προϊόντων. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους δεν διαφέρουν από των Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC) εικόνων.



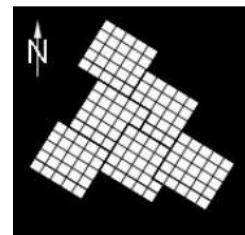
2.4.2 RaN^{SAR} - Radiometrically Corrected Image

Πρόκειται για εικόνες οι οποίες στις οποίες έχει γίνει ραδιομετρική βαθμονόμηση ή ραδιομετρική εξομάλυνση, δηλαδή υπολογισμός του σ_0 ή του γ_0 συντελεστή αντίστοιχα για κάθε εικονοστοιχείο. Η επεξεργασία αυτή γίνεται με στόχο την αντιμετώπιση τοπογραφικών παραμορφώσεων λόγω διαφορετικής σκέδασης του σήματος από το έδαφος και διαφορετικών τοπικών γωνιών πρόσπτωσης. Είναι πολύ χρήσιμη τεχνική για ταξινόμηση και σύγκριση διαφορετικών εικόνων ή και περιοχών, καθώς και για δημιουργία ενός ενιαίου σχηματισμού εικόνων. Η επεξεργασία αυτή γίνεται για τα προϊόντα GEC, EEC και ORI^{SAR}.



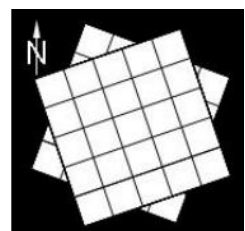
2.4.3 MC^{SAR} – Mosaic

Αποτελούν σχηματισμό ενός ενιαίου μπλοκ για την απεικόνιση μιας περιοχής μεγαλύτερων διαστάσεων από τις οριοθετημένες διαστάσεις εδάφους που απεικονίζεται στα παραπάνω προϊόντα. Τα πρωτογενή δεδομένα από τα οποία αποτελούνται είναι εικόνες τύπου GEC, EEC ή ORI^{SAR} στις οποίες έχει γίνει ραδιομετρική διόρθωση και το ταίριασμά τους έχει γίνει πάνω σε φυσικά όρια, έτσι ώστε να μην προκύπτουν διαφορές οπτικής φύσεως στο τελικό αποτέλεσμα.



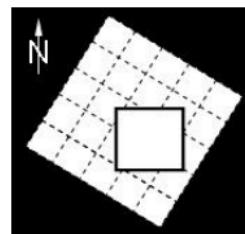
2.4.4 ADM^{SAR} - Ascending/Descending Merge

Είναι προϊόντα τα οποία προέρχονται από συγχώνευση απεικονίσεων από ανοδικές και καθοδικές τροχιές. Η τεχνική αυτή έχει ως πλεονέκτημα την μείωση των σκιών και των ασαφειών του εδάφους οι οποίες προκύπτουν από την γεωμετρία λήψης του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύ έντονο ανάγλυφο όπου η εμφάνιση φαινομένων σκίασης και πτύχωσης είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της εικόνας. Τα προϊόντα GEC, EEC και ORI^{SAR} χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τέτοιων εικόνων και υπάρχουν ως πρωτογενή δεδομένα με την παράδοση των εικόνων. Ένα αρχείο το οποίο ονομάζεται Source Image Mask (SOU) παρέχει την πληροφορία για την προέλευση κάθε εικονοστοιχείου της τελικής εικόνας.



2.4.5 OI^{SAR} - Oriented Image

Είναι προϊόντα στα οποία δεν έχει γίνει κάποια περαιτέρω επεξεργασία από αυτές που έχουν αναφερθεί, αλλά είναι αποσπάσματα εικόνων, για περιπτώσεις όπου δεν χρειάζεται ολόκληρη η πληροφορία μιας εικόνας των παραπάνω κατηγοριών αλλά κάποια συγκεκριμένη περιοχή ανάμεσα σε κάποια όρια προσδιοριζόμενα από το χρήστη. Μπορούν να προκύψουν μόνο από τις εικόνες στις οποίες έχει γίνει γεωαναφορά σε κάποιο ελλειψοειδές και όχι από τις εικόνες SSC.



2.4.6 Χρήσιμα Βοηθητικά Προϊόντα

Ανάλογα με την κατηγορία της τελικής εικόνας παραδίδονται παράλληλα κάποια raster αρχεία πληροφορίας πολύ σημαντικής, για περαιτέρω επεξεργασία. Εν ολίγοις αυτά είναι:

Geocoded Incidence Angle Mask (GIM): Αρχείο με τις τοπικές γωνίες πρόσπτωσης και τα εικονοστοιχεία με σκίαση και πτύχωση σε κωδικοποιημένη μορφή.

Incidence Angle Mask (IAM): Εναλλακτική παρουσίαση των τοπικών γωνιών πρόσπτωσης, μη κωδικοποιημένων.

Layover and Shadow Mask (LSM): Είναι το υπόλοιπο τμήμα του IAM το οποίο περιέχει τα σημεία με σκίαση και τις περιοχές πτύχωσης.

Local Resolution Mask (RES): Περιέχει την ανάλυση κάθε εικονοστοιχείου, όπως αυτή εξαρτάται από την τοπική γωνία πρόσπτωσης και το ανάγλυφο.

Source Mask (SOU): Δείχνει την προέλευση κάθε εικονοστοιχείου σε εικόνες που προέρχονται από σύνθεση περισσότερων.

Enumeration files: Αποτελούνται από τα αρχεία Along Track Enumeration file (ALT) και Across Track Enumeration file (ACT). Από αυτά δίνεται η θέση κάθε εικονοστοιχείου συναρτήσει της κεκλιμένης απόστασης και του αζιμουθίου. Χρήσιμη πληροφορία για γεωαναφορά παραγόμενων προϊόντων.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας όπου φαίνονται τα βοηθητικά προϊόντα που παραδίδονται με κάθε τύπο προϊόντων.

Availability of Auxiliary Files							
	GIM	IAM	LSM	SOU	RES	ALT	ACT
ORI ^{SAR}	✓	✓	✓		✓	✓*	✓*
RAN ^{SAR}	✓	✓	✓				
MC ^{SAR}	✓*	✓*	✓*	✓	✓*		
OI ^{SAR}	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*		
ADM ^{SAR}	✓*	✓*	✓*	✓	✓*		

Πίνακας 2.9: Παραδιδόμενα βοηθητικά προϊόντα

Πηγή: (Fritz, 2007)

2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

Παρακάτω, παρατίθενται συγκριτικοί πίνακες για τα προϊόντα StripMap μονής πόλωσης και HS Spotlight 150 – 300 MHz μονής πόλωσης, τα οποία είναι και τα πιο βασικά προϊόντα. Περιλαμβάνονται τα συνολικά στοιχεία επεξεργασίας, για γωνίες πρόσπτωσης 20° και 40°. Αντίστοιχοι πίνακες για τα υπόλοιπα προϊόντα παρατίθενται στο παράρτημα.

Mnemonic	{MGD, GEC, EEC}_SE_SM_S		{MGD, GEC, EEC}_RE_SM_S		SSC_SM_S
Imaging Mode	SM				
Product Type	Detected				Complex
Geometric Projection	{MGD, GEC, EEC}				SSC
Polarization Mode	S				
Resolution Mode	SE		RE		
Number of Polarimetric Channels	1				
Polarization Mode	{HH, VV}				
Data collection range	15°-60°				
Full Performance range	20°-45°				
Recomm. Performance range	20°-45°				
Range Scene Size [km]	30				
Azimuth scene size [km]	50				
Abs. Radiometric Accuracy [dB]	0.6				
Relative Radiom. Accuracy [dB]	0.30				
NESZ [dB]	-19				
Ambiguity Ratio [dB]	< -17				
PSLR [dB]	-25				
ISLR [dB]	-18				
Num. of Inc. Angle Masks	1				0
Bit per Pixel	16				32
Hamming coefficient	0.6				0.60
Incidence angle (20°-45°)	20	45	20	45	
Slant range resolution [m]					1.2
Ground Range Resolution [m]	3.5	3.3	8.0	7.0	
Azimuth Resolution [m]	3.5	3.3	8.0	7.0	3.3
Approx. Range Pixel Spacing [m]	1.5	1.25	4	3.25	0.9
Appr. Azimuth Pixel Spacing [m]	1.5	1.25	4	3.25	2.0
Effective number of looks	1.0	1.3	6.1	6.4	
Pixel localization accuracy [m]					1.0
Radiometric resolution [dB]	3.1	2.9	1.5	1.5	
Product Size (MB)	2667	3840	375	568	3300

Πίνακας 2.10: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά StripMap μονής πόλωσης.

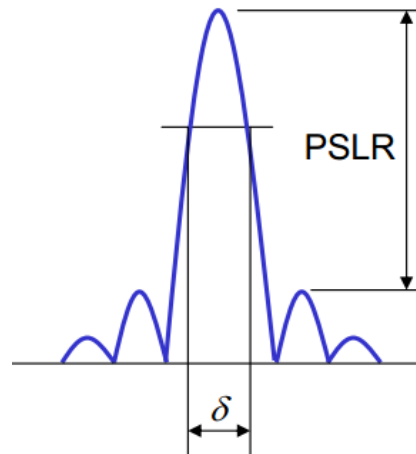
Mnemonic	{MGD, GEC, EEC} SE HS S		{MGD, GEC, EEC} RE HS S		SSC HS S
Imaging Mode	HS				
Product Type	Detected				Complex
Geometric Projection	{MGD, GEC, EEC}				SSC
Polarization Mode	S				
Resolution Mode	SE		RE		
Number of Polarimetric Channels	1				
Polarization Mode	{HH, VV}				
Data collection range	15°-60°				
Full Performance range	20°-55°				
Recomm. Performance range	20°-50°				
Range Scene Size [km]	10				
Azimuth scene size [km]	5				
Abs. Radiometric Accuracy [dB]	unspecified				
Rel. Radiometric Accuracy [dB]	unspecified				
NESZ [dB]	-19				
Ambiguity Ratios [dB]	< -17				
PSLR [dB]	-25				
ISLR [dB]	-18				
Inc. Angle Masks	1				0
Bit per Pixel	16				32
Hamming coefficient	0.6				0.60
Incidence angle (20°-55°)	20	55	20	55	
Slant range resolution [m]					1.2
Ground Range Resolution [m]	3.5	1.4	4.7	3.1	
Azimuth Resolution [m]	3.5	1.4	4.7	3.1	1.1
Range Pixel Spacing [m]	1.5	0.5	2	1.5	0.9
Azimuth Pixel Spacing [m]	1.5	0.5	2	1.5	0.8
Effective number of looks	3.0	1.3	6.3	5.9	
Pixel localization accuracy [m]					1.0
Radiometric resolution [dB]	2.1	3.0	1.5	1.7	
Product Size (MB)	89	800	50	89	275
	HS 300 MHz (Characterisation only)				
Range Scene Size [km]	10 ... 5				
Slant range resolution [m]					0.6
Ground Range Resolution [m]	1.8	1.1	3.4	3.0	
Azimuth Resolution [m]	1.8	1.1	3.4	3.0	1.1
Range Pixel Spacing [m]	0.75	0.5	1.5	1.25	0.5
Azimuth Pixel Spacing [m]	0.75	0.5	1.5	1.25	0.8
Effective number of looks	1.5	1.2	5.0	9.0	
Radiometric resolution [dB]	2.7	3.1	1.7	1.4	
Product Size (MB)	356	800	89	128	500

Πίνακας 2.11: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά Spotlight HS 150,300 MHz μονής πόλωσης.

Ο δείκτης PSLR (Peak Sidelobe Ratio) αναπαριστά την ικανότητα του δέκτη να αναγνωρίσει έναν αδύναμο στόχο από έναν διπλανό του πολύ πιο ισχυρό. Είναι η σχέση μεταξύ της έντασης του κύριου λοβού (mainlobe), του λαμβανόμενου σήματος από ένα στόχο και της μέγιστης έντασης της μεγαλύτερης εκ των παράπλευρων λοβών (sidelobes).

$$\text{PSLR} = 10 \log_{10}(\text{I}_{\text{peak}} / \text{I}_{\text{side}})$$

Θεωρητικά, μια συμπαγής μορφή του επιστρεφόμενου σήματος, θα ήταν προτιμότερη για καλύτερη ποιότητα εικόνας, αλλά κάτι τέτοιο οδηγεί σε χαμηλότερη ανάλυση εικόνας. Οπότε μια μέση λύση είναι επιθυμητή.



Εικόνα 2.14: Γραφική αναπαράσταση δείκτη PSLR

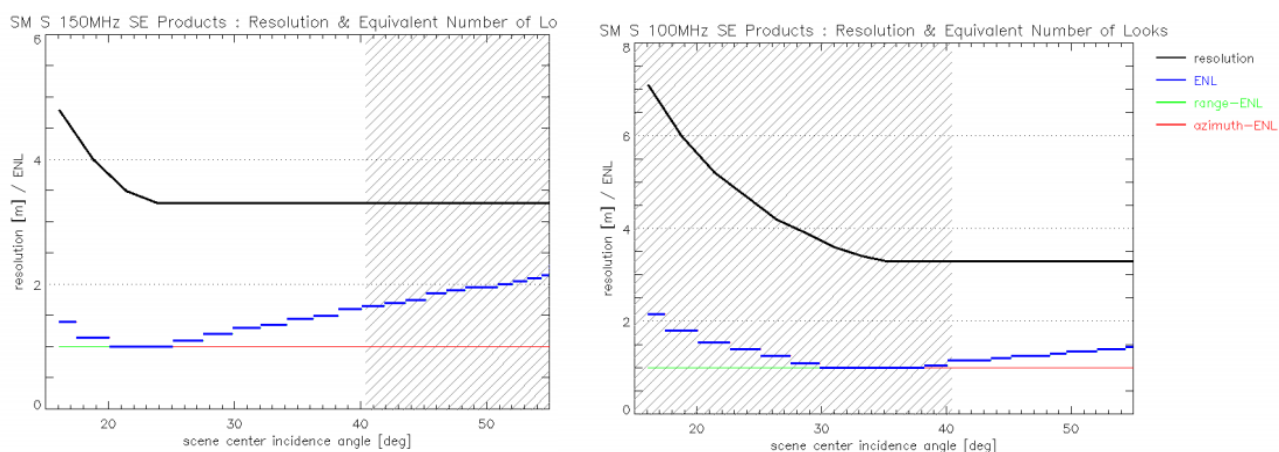
Πηγή: (López-Dekker, 2010).

Αντίστοιχα, ο δείκτης ISLR (Integrated Sidelobe Ratio) αναπαριστά την ικανότητα του δέκτη να ανιχνεύσει αδύναμους στόχους σε περιοχές όπου υπάρχουν ισχυρές αποκρίσεις από άλλους στόχους. Είναι η αναλογία μεταξύ της ενέργειας της mainlobe και της συνολικής ενέργειας των sidelobes.

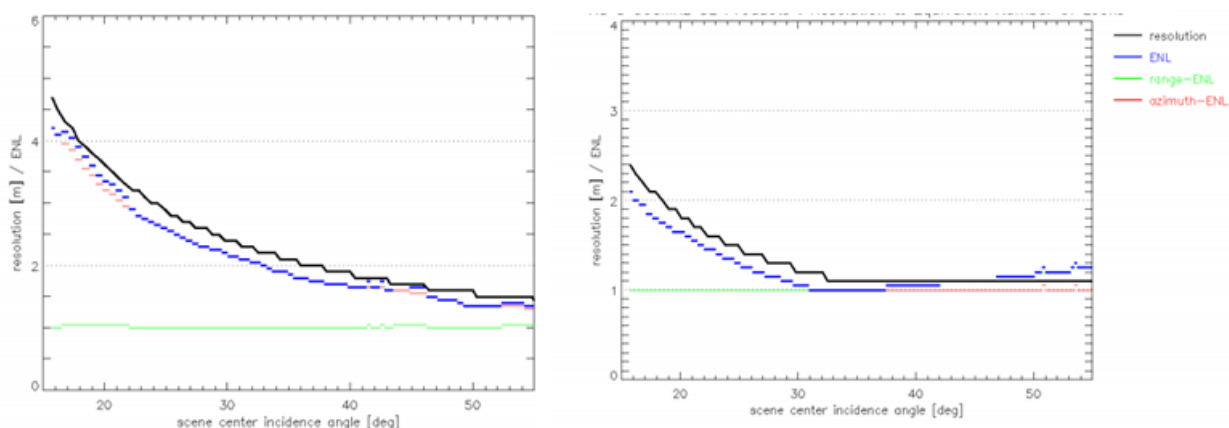
$$\text{ISLR} = 10 \log_{10}[\text{E}_{\text{main}}/\text{E}_{\text{side}}].$$

Ο δείκτης NESZ (Noise Equivalent Sigma Zero) είναι η ομαλοποιημένη οπισθοσκέδαση από ένα στόχο, σχετιζόμενη με το θόρυβο που παρατηρείται στις Sar απεικονίσεις ο οποίος προέρχεται από τα συστήματα του ραντάρ.

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά διαγράμματα τα οποία δείχνουν την ανάλυση και τον αριθμό των όψεων' looks' για τις εικόνες που έχουν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία(όχι SSC) και έχουν προβληθεί σε κάποιο σύστημα, ανάλογα με την εκάστοτε γωνία πρόσπτωσης. Τα διαγράμματα αφορούν τα προϊόντα StripMap και Spotlight HS 150, 300MHz τα οποία επεξεργάζονται για μέγιστη χωρική ανάλυση (SE).

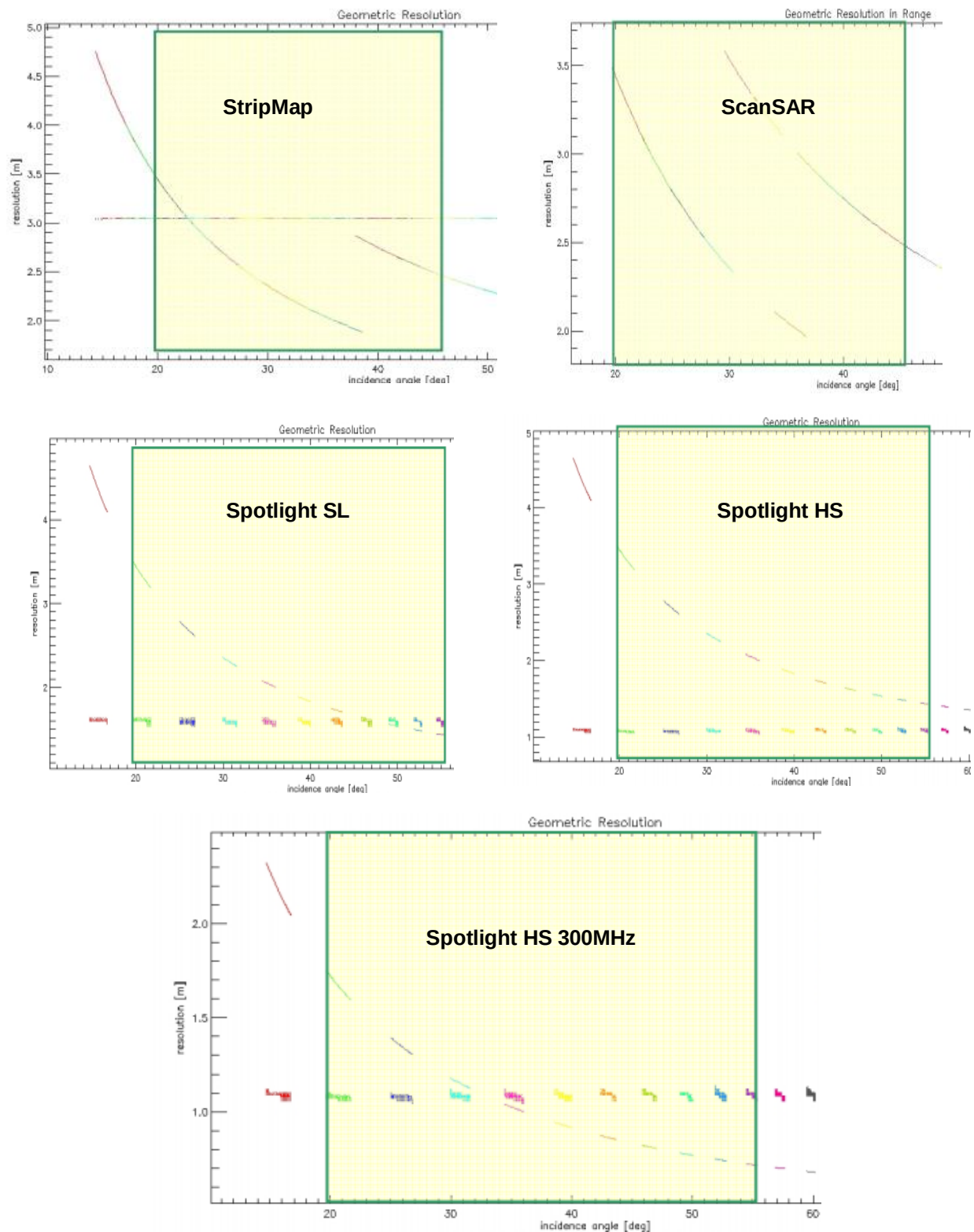


Διάγραμμα 2.8: StripMap 100MHz(αριστερά) και 150MHz(δεξιά). Διακριτική ικανότητα(μαύρο) και αριθμός όψεων (μπλε), ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης. Πηγή: (Basic Product Specification,DLR,2010)



Διάγραμμα 2.7: Spotlight HS 150MHz(αριστερά) και 300MHz(δεξιά). Διακριτική ικανότητα(μαύρο) και αριθμός όψεων (μπλε), ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης. Πηγή: (Basic Product Specification,DLR,2010)

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης των ακτινών που παράγονται από το ραντάρ στο έδαφος, η τελική διαχωριστική ικανότητα κατά μήκος του άξονα των αποστάσεων μεταβάλλεται, αυξανόμενη με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Για τους διάφορους τρόπους λειτουργίας του TerraSAR-X οπτικοποιούνται οι μεταβολές αυτές στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 2.9: Διακριτική ικανότητα ανάλογα με γωνία πρόσπτωσης για SSC προϊόντα όλων των τρόπων απεικόνισης (SM,SC,SL,HS). Καμπύλη: αζιμουθιακή διεύθυνση, Διακεκομμένη: Διεύθυνση αποστάσεων.
Πηγή: (Basic Product Specification,DLR,2010)

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ

3.1 ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΟ ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ ΣΤΟ ERDAS IMAGINE ORTHORADAR

Η εικόνα όπως παρέχεται από την εταιρία είναι σε μη συμβατή μορφή με τα κοινά προγράμματα απεικόνισης. Επίσης, το μέγεθος τέτοιου είδους εικόνων είναι αρκετά μεγάλο, με συνέπεια την απαιτούμενη αυξημένη υπολογιστική ισχύ. Όλες οι διεργασίες και οι εφαρμογές γίνονται με χρήση της πλατφόρμας Erdas Imagine και συγκεκριμένα του OrthoRadar. Η πλατφόρμα του Erdas Imagine είναι προσαρμοσμένη έτσι ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται τέτοιου είδους εικόνες με ευελιξία χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για να είναι δυνατή η επεξεργασία τέτοιου είδους απεικονίσεων πέρα από την απλή εμφάνιση στην οθόνη του υπολογιστή, είναι απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες συνοδεύουν την εικόνα ως μεταδεδομένα. Η πλατφόρμα Erdas Imagine έχει τη δυνατότητα να διαβιβάζει την πληροφορία αυτή και να την παρέχει στο χρήστη για μελλοντική επεξεργασία. Είναι προφανές, πως κάθε δέκτης ραντάρ συνθετικού ανοίγματος έχει διαφορετική γεωμετρία συλλογής, αποθήκευσης και διάθεσης δεδομένων και ενδέχεται τα δεδομένα αυτά να παρέχονται σε διαφορετικές μονάδες και με διαφορετικό τρόπο. Για το λόγο αυτό υπάρχουν στην πλατφόρμα προκαθορισμένοι αλγόριθμοι, οι οποίοι απευθύνονται στους διαφορετικούς τύπους δεκτών ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, έτσι ώστε να συλλέγουν όλη την πληροφορία και να την μεταβιβάζουν σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο ανάλογα με την επιθυμητή επεξεργασία. Έτσι υπάρχει μια κοινή επιφάνεια αναφοράς, όπου κάθε φορά, συλλέγονται τα απαιτούμενα στοιχεία για την διενέργεια της όποιας επεξεργασίας.

Η εφαρμογή OrthoRadar, χρησιμοποιείται για γεωαναφορά και ορθοαναγωγή εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Δημιουργούνται δηλαδή εικόνες, κάθε εικονοστοιχείο των οποίων αντιστοιχεί σε μια μικρή επιφάνεια στο έδαφος και το οποίο έχει συντεταγμένες στην εκάστοτε προβολή που χρησιμοποιείται. Γίνεται δηλαδή μια διαδικασία μετατροπής της εικόνας σε χάρτη με οριζοντιογραφικές συντεταγμένες σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς. Η ορθοαναγωγή γίνεται, αφού πρώτα έχει καθοριστεί το μοντέλο όπου συνδέει το σύστημα αναφοράς της εικόνας με το γεωδαιτικό (γεωαναφορά). Οι πληροφορίες που απαιτούνται για το σκοπό αυτό συλλέγονται από τα μεταδεδομένα των εικόνων, αφού πρώτα η κάθε εικόνα αναγνωρίζεται μέσω της επικεφαλίδας της. Όλες οι πληροφορίες αποθηκεύονται με συγκεκριμένο τρόπο σε ένα μοντέλο, το Generic Sar Node Model το οποίο περιγράφει μοναδικά την κάθε εικόνα. Αναφέρεται, πως το αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη δεν είναι γνωστό, δηλαδή οι παραμορφώσεις

που υπεισέρχονται στην εικόνα κατά τη διαδικασία λήψης. Χρησιμοποιείται όμως, ένα πιο γενικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη σχέση μεταξύ του συστήματος της εικόνας και του γεωδαιτικού, με χρήση των στοιχείων που παρέχονται από το δορυφόρο και του αλγόριθμου Range - Doppler. Έτσι, για κάθε δέκτη και διαφορετικό τρόπο συλλογής δεδομένων, προκύπτει και κάποιο διαφορετικό μοντέλο με διαφορετικές παραμέτρους. Λόγω του σχεδιασμού του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, η γεωαναφορά μιας εικόνας είναι δυνατή και χωρίς χρήση σημείων γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων (GCP's). Επειδή γίνεται μέτρηση της απόστασης κάθε σημείου της απεικονιζόμενης περιοχής από το δέκτη και παράλληλα καταγράφεται ο χρόνος εκπομπής και λήψης με συνεκτικό τρόπο, γνωρίζοντας τη θέση του δορυφόρου στο χώρο σε ένα γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων και θεωρώντας μια επιφάνεια αναφοράς η οποία παρομοιάζει την φυσική γήινη επιφάνεια, είναι δυνατός ο υπολογισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων ενός σημείου στη φυσική γήινη επιφάνεια μέσω μετρήσεων εικονοσυντεταγμένων. Συνεπώς, η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η θέση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης, σχετίζεται άμεσα με την τελική ακρίβεια της εικόνας. Όμως, για να είναι δυνατή η γνώση της θέσης του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης των εικόνων, με πολύ καλή ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιηθούν σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες (φωτοσταθερά). Αυτό που γίνεται δηλαδή, είναι μια διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου μέσω γνωστών σημείων στην επιφάνεια του εδάφους, για τα οποία η απόστασή τους από το δορυφόρο είναι γνωστή, καθώς και η γεωμετρία λήψης τους.

Η τροχιά του δορυφόρου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων από το ραντάρ δεν δίνεται ως συνάρτηση του χρόνου. Δηλαδή δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του δορυφόρου τις χρονικές στιγμές εκπομπής-λήψης των παλμών για κάθε ένα σημείο άμεσα. Αντί αυτού, δίνονται οι θέσεις του δορυφόρου για τουλάχιστον τρεις χρονικές στιγμές. Για τον TerraSAR-X δίνονται οι θέσεις του δορυφόρου για δώδεκα διαδοχικές χρονικές στιγμές. Γι' αυτόν το λόγο υπολογίζονται οι θέσεις του δορυφόρου σε συνάρτηση με το χρόνο, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της θέσης του με παρεμβολή σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μέσα στο διάστημα των μετρήσεων. Σημειώνεται, πως οι θέσεις του δορυφόρου πρέπει να αναφέρονται σε ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Αν αναφέρονται σε κάποιο άλλου τύπου σύστημα, π.χ αδρανειακό, τότε μετατρέπονται σε ένα γεωκεντρικό.

Θεωρείται, πως μια παρεμβολή δευτέρου βαθμού δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνεπώς, οι συναρτήσεις χρόνου-θέσης δορυφόρου που προκύπτουν και για τις οποίες πρέπει να υπολογιστούν οι συνιστώσες είναι:

$$R_{s,x} = a_1 + a_2 t + a_3 t^2$$

$$R_{s,y} = b_1 + b_2 t + b_3 t^2$$

$$R_{s,z} = c_1 + c_2 t + c_3 t^2$$

$$V_{s,x} = d_1 + d_2 t + d_3 t^2$$

$$V_{s,y} = e_1 + e_2 t + e_3 t^2$$

$$V_{s,z} = f_1 + f_2 t + f_3 t^2$$

όπου: R_s και V_s είναι η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου αντίστοιχα:

$$R_s = [R_{s,x} \ R_{s,y} \ R_{s,z}]^T$$

$$V_s = [V_{s,x} \ V_{s,y} \ V_{s,z}]^T$$

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών των πολυωνύμων πρέπει αρχικά να γίνει κάποια προεπεξεργασία. Αν δίνονται παραπάνω από τρεις διαδοχικές θέσεις του δορυφόρου, επιλέγονται οι διαδοχικές τρεις που προσαρμόζονται καλύτερα στην περιοχή ενδιαφέροντος και καλύπτουν όλο το φάσμα της απεικόνισης. Επιλέγεται δηλαδή, ένα εύρος μέσα στο οποίο βρίσκεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο συλλέχθηκε η εικόνα. Αν προκύπτουν περισσότερα από ένα σύνολα τα οποία ανταποκρίνονται στους παραπάνω περιορισμούς επιλέγεται αυτό που η κεντρική χρονική στιγμή του, προσαρμόζεται καλύτερα στη χρονική στιγμή λήψης των δεδομένων. Από τη στιγμή που βρίσκεται η καλύτερη τριάδα σημείων η λύση προκύπτει από την επίλυση του συστήματος:

$$A^*x=b$$

όπου ο πίνακας A είναι:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix}$$

όπου t_1, t_2, t_3 οι χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν σε κάθε θέση του δορυφόρου με χρονική στιγμή αναφοράς την $t=0$, που είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία ο δορυφόρος βρίσκεται στη δεύτερη θέση.

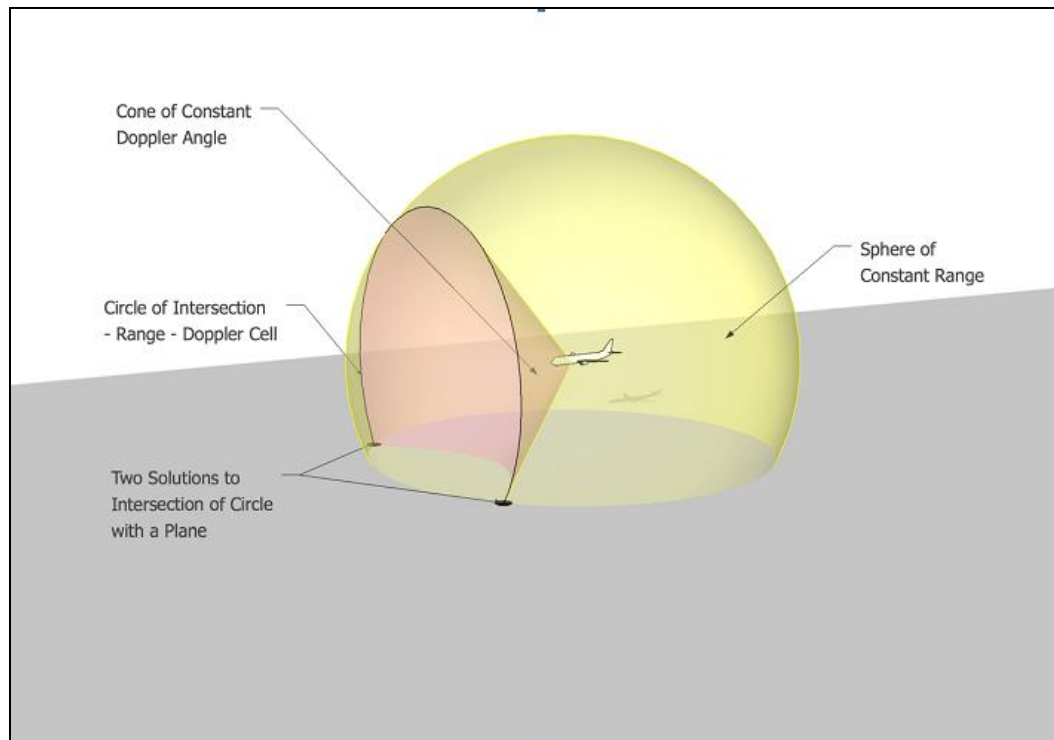
Ο πίνακας b είναι:

$b = [R_{s,x}(1) \ R_{s,x}(2) \ R_{s,x}(3)]^T$ όπου $R_{s,x}(i)$ είναι η κατά x συνιστώσα της i θέσης του δορυφόρου ($i=1:3$)

Με την επίλυση του συστήματος (LU decomposition) προσδιορίζεται ο πίνακας x :

$$x = [a_1 \ a_2 \ a_3^T].$$

Το ίδιο γίνεται και με τις συναρτήσεις $R_{s,y}$, $R_{s,z}$, $V_{s,x}$, $V_{s,y}$, $V_{s,z}$ ώστε να προκύψει το σύνολο των αναγκαίων συντελεστών. Σημειώνεται, πως οι θέσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτών των συντελεστών προέρχονται από παρεμβολή από τις δοθείσες θέσεις του δορυφόρου, άρα περιέχουν σφάλματα ανάλογα με την ποιότητά τους και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων για την διόρθωσή τους. Αυτό γίνεται παρακάτω, αφού πρώτα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται το σύστημα της εικόνας με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω της παλέτας Sar Imaging Model. Υπολογίζεται το διάνυσμα θέσης του κάθε σημείου από το δορυφόρο, στην επιφάνεια της γης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο, σφαίρα, ελλειψοειδές ή ένα ελλειψοειδές μαζί με κάποιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Το Erdas Imagine OrthoRadar θεωρεί ένα εκ των δύο τελευταίων. Το διάνυσμα αυτό, μέσω του οποίου προκύπτουν και οι επίπεδες γεωδαιτικές συντεταγμένες του, προσδιορίζεται μέσω του αλγόριθμου Range – Doppler. Η θέση του σημείου στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από την τομή μιας σφαίρας, με ακτίνα την απόσταση του σημείου από τη φυσική γήινη επιφάνεια μέχρι το δέκτη, του κώνου Doppler και του μοντέλου που περιγράφει την φυσική γήινη επιφάνεια (εικ.3.1, 3.2). Ο κώνος Doppler σχηματίζεται μέσω της αζιμουθιακής γωνίας κλίσης (squint angle). Είναι η μετατροπή του επιπέδου, το οποίο είναι εγκάρσιο στην τροχιά του δορυφόρου, σε κωνική μορφή, λόγω φωτισμού του εδάφους υπό γωνία διαφορετική της ορθής ως προς την αζιμουθιακή κατεύθυνση. Όταν δηλαδή η αζιμουθιακή γωνία είναι 90° ο κώνος Doppler είναι ένα επίπεδο εγκάρσιο στην τροχιά του. Έτσι, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, προκύπτουν δύο σημεία τομής, αλλά το ένα απορρίπτεται καθώς είναι γνωστή προσεγγιστικά η θέση του σημείου στη φυσική γήινη επιφάνεια



Εικόνα 3.1: Τομή σφαίρας με ακτίνα την απόσταση του σημείου, κώνου Doppler και μοντέλου Φ.Γ.Ε για προσδιορισμό θέσης στόχου στη Φ.Γ.Ε (γραφική αναπαράσταση αλγόριθμου Range – Doppler).

Για να γίνουν τα παραπάνω, χρειάζεται για κάθε ξεχωριστό εικονοστοιχείο να υπολογιστεί η κεκλιμένη του απόσταση, το κεντροειδές Doppler και η χρονική στιγμή την οποία φωτίζεται από τον δορυφόρο.

Η χρονική στιγμή φωτισμού του εκάστοτε εικονοστοιχείου (i,j) δίνεται από τη σχέση:

$$T(j) = T(0) + \frac{j - 1}{N_a - 1} * t_{dur}$$

όπου:

- i η εικονοσυντεταγμένη στη διεύθυνση των αποστάσεων,
- j η εικονοσυντεταγμένη στη διεύθυνση των αζιμουθίων,
- T(0) η χρονική στιγμή την οποία αρχίζει να καταγράφει ο δορυφόρος,
- N_a ο αριθμός των εικονοστοιχείων κατά τον άξονα των αποστάσεων και
- t_{dur} η διάρκεια καταγραφής για την συγκεκριμένη εικόνα.

Το κεντροειδές Doppler εξαρτάται από την επεξεργασία των δεδομένων από των επεξεργαστή του ραντάρ. Δηλαδή αν τα δεδομένα αναφέρονται στην μηδενική κατά Doppler συχνότητα όπου ο κώνος Doppler μετατρέπεται σε επίπεδο ή όχι. Στην περίπτωση μας ισχύει η πρώτη συνθήκη. Εάν τα δεδομένα αναφέρονται στην μηδενική κατά Doppler συχνότητα το κεντροειδές Doppler ισούται με μηδέν. Στην άλλη περίπτωση μπορεί να είναι αριθμός διάφορος του μηδενός ή ακόμα και να μεταβάλλεται με την κεκλιμένη απόσταση. Η κεκλιμένη απόσταση εύκολα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{sl}(i) = r_{sl} + (i - 1) * \Delta r_{sr}$$

όπου: $R_{sl}(i)$ είναι η κεκλιμένη απόσταση για τα εικονοστοιχεία στην i θέση του άξονα των αποστάσεων,

r_{sl} είναι η κοντινή κεκλιμένη απόσταση (near slant range) και

Δr_{sr} το μέγεθος των εικονοστοιχείων κατά τον άξονα των αποστάσεων.

Στην περίπτωση όπου η προβολή της εικόνας κατά τον άξονα των αποστάσεων είναι στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους, τότε ο μετασχηματισμός είναι πιο περίπλοκος και σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο μετατροπής της κεκλιμένης απόστασης στην κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους από τον επεξεργαστή του δορυφόρου.

Το σύστημα των τριών εξισώσεων το οποίο επιλύεται για τον προσδιορισμό της θέσης του στόχου στη Φ.Γ.Ε είναι:

$$f_D = \frac{2}{\lambda * R_{sl}} (\overline{R_s} - \overline{R_t}) * (\overline{V_s} - \overline{V_t}) \quad f_D > 0 \text{ για κίνηση πριν το στόχο}$$

$$R_{sl} = |R_s - R_t|$$

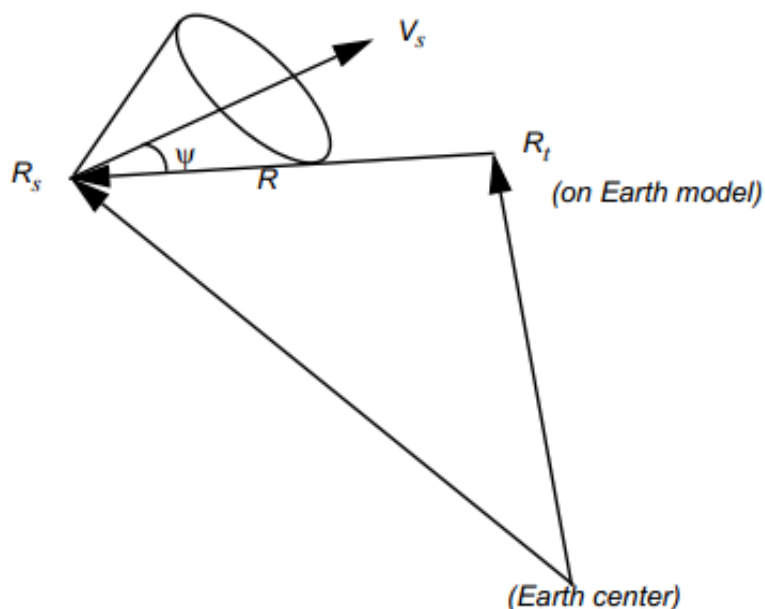
$$\frac{R_s(x^2) + R_s(y^2)}{(R_e + h_{targ})^2} + \frac{R_s(z^2)}{(R_m + h_{targ})^2} = 1$$

όπου: R_s και $\overline{V_s}$ η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου αντίστοιχα,

$\overline{V_t}$ είναι η ταχύτητα του στόχου (δηλαδή ίση με μηδέν βάσει του συστήματος αναφοράς),

R_e και R_m είναι ο μεγάλος και ο μικρός άξονας του ελλειψοειδούς αναφοράς, αντίστοιχα.

Η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου μπορούν να υπολογισθούν από τη χρονική στιγμή φωτισμού $T(j)$ από την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού της τροχιάς του δορυφόρου.



Εικόνα 3.2: Διανυσματική αναπαράσταση αλγόριθμου Range – Doppler.

Πηγή: Erdas Field Guide, 2010

Η διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου μπορεί τώρα να γίνει με χρήση της παραπάνω διαδικασίας. Υπάρχουν τρεις διορθώσεις οι οποίες γίνονται στην τροχιά του δορυφόρου, η κατά μήκος, η κάθετη στην τροχιά και η ακτινική (θα μπορούσαμε να πούμε ότι σχετίζεται με την γωνία ανύψωσης). Η διόρθωση κατά μήκος της τροχιάς γίνεται πρώτη και οι άλλες δύο εκτελούνται ταυτόχρονα. Για κάθε σημείο με γνωστές συντεταγμένες πρέπει να είναι γνωστές (μετρημένες) και οι εικονοσυντεταγμένες του (φωτοσταθερό). Οι εικονοσυντεταγμένες μετατρέπονται σε διάνυσμα θέσης του σημείου στην Φ.Γ.Ε. από το δέκτη, υπολογίζοντας νέες γεωδαιτικές συντεταγμένες για το σημείο. Αυτές συγκρίνονται με τις γνωστές και με βάση τη διαφορά τους (ουσιαστικά βάσει των διανυσμάτων θέσεως) γίνονται οι παραπάνω διορθώσεις της τροχιάς του δορυφόρου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση των τιμών των παραμέτρων της τροχιάς του δορυφόρου.

3.2 ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Για την επίτευξη του προσανατολισμού ή της γεωαναφοράς μιας δορυφορικής εικόνας ή μιας αεροφωτογραφίας, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια άμεση σχέση αναφοράς μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων και των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων στη φυσική γήινη επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της γνώσης διαφόρων παραμέτρων του συστήματος λήψης των εικόνων, όπως η θέση του δέκτη τη στιγμή της λήψης, η εσωτερική γεωμετρία του συστήματος και ο τρόπος διάδοσης του σήματος στην ατμόσφαιρα. Όλες αυτές οι παράμετροι, αναφέρονται ως γεωμετρία λήψης του συστήματος. Γενικά, ο μετασχηματισμός μεταξύ του χώρου των αντικειμένων στη φυσική γήινη επιφάνεια και του χώρου της εικόνας γίνεται με εφαρμογή του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου του δέκτη. Δηλαδή με εφαρμογή όλων των παραπάνω παραμέτρων και μοντέλων. Η πληροφορία όμως για τις τιμές όλων αυτών των παραμέτρων και των μοντέλων, δεν είναι πάντα διαθέσιμη. Οι εταιρίες παροχής αυτών των εικόνων δεν δίνουν πληροφορία για αυτές τις παραμέτρους για λόγους ανταγωνιστικότητας ή δίνουν έμμεσα πληροφορίες, η αξιοποίηση των οποίων δεν έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ακρίβειας. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί προσεγγιστικά ή εμπειρικά μαθηματικά μοντέλα, μέσω των οποίων είναι δυνατός ο προσδιορισμός της σχέσης που συνδέει το χώρο της εικόνας με τον τρισδιάστατο χώρο της φυσικής γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν διάφορες τέτοιες μέθοδοι, διαφορετικής πολυπλοκότητας και ακρίβειας η καθεμία. Τα μοντέλα αυτά δεν χρησιμοποιούν κάποια παράμετρο του δορυφόρου και δεν έχουν καμία φυσική σημασία. Τέτοια μοντέλα είναι απλά πολυώνυμα πρώτου ή δευτέρου βαθμού ή και πολυώνυμα ανώτερου βαθμού ή ρητές συναρτήσεις. Δύο αντιπροσωπευτικά μοντέλα είναι ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός(DLT) και τα Κλασματικά Πολυώνυμα (RFM) τα οποία και αναλύονται παρακάτω.

3.2.1 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (Direct Linear Transformation)

Η μέθοδος DLT ουσιαστικά είναι μια απλοποιημένη μορφή των κλασματικών πολυωνύμων. Αναφέρεται ως άμεση γιατί χρησιμοποιούνται πολυώνυμα πρώτου βαθμού, οπότε ο υπολογισμός των συνιστωσών των πολυωνύμων αυτών είναι πιο εύκολος. Όπως προαναφέρθηκε, αναπτύσσεται μια μαθηματική σχέση μέσω της οποίας περιγράφεται η σχέση μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων και του τρισδιάστατου φυσικού χώρου. Ο DLT μετασχηματισμός αποδίδει δύο εξισώσεις για κάθε σημείο και έχει έντεκα άγνωστες παραμέτρους

(a_i, b_i, c_i) , οπότε χρειάζονται τουλάχιστον 6 φωτοσταθερά σημεία για τον υπολογισμό τους. Οι εξισώσεις έχουν ως εξής (Karara, 1989):

$$s = \frac{a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z}, \quad l = \frac{b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z}$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών των πολυωνύμων γίνεται με εφαρμογή της μεθόδου των εμμέσων παρατηρήσεων των ελαχίστων τετραγώνων για γραμμικό σύστημα, αφού πρώτα το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων μετατραπεί στην παρακάτω μορφή:

$$F_x = P_1(X, Y, Z) - s * P_2(X, Y, Z) = 0$$

$$F_y = P_3(X, Y, Z) - l * P_2(X, Y, Z) = 0$$

Όπου είναι της μορφής: $A * x = l$ και η λύση δίνεται από τη σχέση: $x = (A^T A)^{-1} * A^T * l$

όπου ως x αναφέρεται ο πίνακας των αγνώστων (a_i, b_i, c_i) και ως A ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου προσδιορισμού της σχέσης μεταξύ της εικόνας και της φυσικής γήινης επιφάνειας είναι ένας γρήγορος τρόπος έμμεσης γεωαναφοράς της εικόνας χωρίς την απαίτηση μεγάλου αριθμού φωτοσταθερών. Ωστόσο η αδυναμία της μεθόδου έγκειται στο γεγονός πως ο τρισδιάστατος φυσικός χώρος ενδέχεται να μην αναπαρίσταται με μεγάλη ακρίβεια και ενδέχεται σημεία τα οποία βρίσκονται σε εντελώς διαφορετική θέση από τα φωτοσταθερά, να αναπαρίστανται σε εντελώς διαφορετική θέση στην τελική εικόνα παρουσιάζοντας μεγάλο σφάλμα προσδιορισμού της θέσης τους.

3.2.2 Κλασματικά Πολυώνυμα (Rational Function Models)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ρητές συναρτήσεις πολυωνύμων πρώτου έως τρίτου βαθμού. Η μέθοδος συχνά αναφέρεται και ως Rational Polynomial Coefficients Model. Τα κλασματικά πολυώνυμα πρώτου βαθμού είναι σχεδόν όμοια με τον DLT μετασχηματισμό αν θεωρηθεί πως ο παρονομαστής και για τις δύο εικονοσυντεταγμένες παραμένει ίδιος. Τα κλασματικά πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν με μεγαλύτερη αξιοπιστία τη σχέση μεταξύ εικόνας και φυσικής γήινης επιφάνειας, εισάγοντας στο σύστημα κάποιους περαιτέρω όρους. Τα κλασματικά πολυώνυμα τρίτου βαθμού χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν με ακόμη

καλύτερο τρόπο τη σχέση μεταξύ του χώρου της εικόνας και της Φ.Γ.Ε αναφορικά με τις άλλες μεθόδους. Τα πολυώνυμα πρώτου βαθμού διορθώνουν τη μετάθεση, στροφή και μεταβολή της κλίμακας του συστήματος της εικόνας ως προς το γεωδαιτικό σύστημα, καθώς και μια διόρθωση αναφορικά με τη λοξότητα τους. Τα πολυώνυμα δευτέρου βαθμού προσδίδουν στο σύστημα τις ίδιες διορθώσεις με αυτά του πρώτου βαθμού και επιπροσθέτως διορθώνουν το σύστημα ως προς τυχόν συστροφές και κυρτότητά του. Τα πολυώνυμα τρίτου βαθμού διορθώνουν τις ίδιες παραμορφώσεις με αυτά του δευτέρου συμπεριλαμβάνοντας και κάποιες άλλες διορθώσεις οι οποίες δεν έχουν κάποια ιδιαίτερη φυσική σημασία σχετική με τη γεωμετρία λήψης του συστήματος (Toulin, 2004). Έχει διαπιστωθεί, πως τα κλασματικά πολυώνυμα ενδέχεται να εισάγουν σφάλματα, σχετιζόμενα με την ακρίβεια εντοπισμού των σημείων στην τελική διορθωμένη εικόνα, όταν πρόκειται για οπτικές εικόνες (Caloz and Collet, 2001). Είναι ευέλικτος τρόπος μετασχηματισμού καθώς επιτρέπει το μετασχηματισμό σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς (γεωγραφικών, γεωκεντρικών, προβολικών συντεταγμένων) (Paderes et al., 1989) και μεταφέρει τα σφάλματα στα σημεία γύρω από τα φωτοσταθερά με ποιο ομαλό τρόπο (Burden and Faires, 1997). Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης παράλληλα και στοιχείων του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου της απεικόνισης για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών των πολυωνύμων, όπου τότε η λύση αναφέρεται ως ανεξάρτητη του τρισδιάστατου χώρου (terrain independent), σε αντίθετη περίπτωση αναφέρεται ως εξαρτώμενη από τα φωτοσταθερά (terrain dependent) (Tao et al., 2001; Chen et al., 2006). Όταν ο υπολογισμός των συντελεστών των πολυωνύμων γίνεται μόνο με χρήση φωτοσταθερών σημείων, ενδέχεται η επίλυση να μην είναι σταθερή λόγω υπερπαραμετροποίησης των συναρτήσεων με την εφαρμογή των πολυωνύμων ανώτερου βαθμού (Dolloff, 2004). Εν μέρει, αυτό αντιμετωπίζεται από την κανονικοποίηση των τιμών των συντελεστών στο διάστημα [-1,1] (OGC, 1999), όχι όμως εντελώς. Για κάθε σημείο στην εικόνα προκύπτουν δύο εξισώσεις, μια για την x εικονοσυντεταγμένη και μια για την y εικονοσυντεταγμένη. Ανάλογα με τον αριθμό των αγνώστων κάθε φορά, δηλαδή ανάλογα με το βαθμό των πολυωνύμων, απαιτείται και ανάλογος αριθμός φωτοσταθερών. Σε κάθε περίπτωση βέβαια λαμβάνεται μεγαλύτερος αριθμός φωτοσταθερών για να γίνει συνόρθωση των παρατηρήσεων. Η γενική μορφή του μοντέλου φαίνεται παρακάτω (Grodecki et al, 2001).

$$s = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

$$l = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

όπου s, l , οι κανονικοποιημένες τιμές των εικονοσυντεταγμένων και X, Y, Z οι κανονικοποιημένες τιμές των συντεταγμένων των φωτοσταθερών. Η κανονικοποίηση γίνεται με την παρακάτω διαδικασία.

$$s = \frac{x - x_{offset}}{x_{scale}}, \quad l = \frac{y - y_{offset}}{y_{scale}}, \quad X = \frac{X_r - X_{offset}}{X_{scale}}, \quad Y = \frac{Y_r - Y_{offset}}{Y_{scale}}, \quad Z = \frac{Z_r - Z_{offset}}{Z_{scale}}$$

όπου x, y, X, Y, Z_{offset} είναι οι μέσες τιμές των εικονοσυντεταγμένων (s, l) και των συντεταγμένων των φωτοσταθερών (X, Y, Z) οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$x_{offset} = \frac{\sum x}{n}, \quad y_{offset} = \frac{\sum y}{n}, \quad X_{offset} = \frac{\sum X_r}{n}, \quad Y_{offset} = \frac{\sum Y_r}{n}, \quad Z_{offset} = \frac{\sum Z_r}{n}$$

όπου x, y, X_r, Y_r, Z_r οι συντεταγμένες πριν την κανονικοποίηση.

Οι τιμές x, y, X, Y, Z_{scale} είναι συντελεστές κλίμακας οι οποίοι προκύπτουν από:

$$\begin{aligned} x_{scale} &= \max(|x_{max} - x_{offset}|, |x_{min} - x_{offset}|) \\ y_{scale} &= \max(|y_{max} - y_{offset}|, |y_{min} - y_{offset}|) \\ X_{scale} &= \max(|X_{r,max} - X_{offset}|, |X_{r,min} - X_{offset}|) \\ Y_{scale} &= \max(|Y_{r,max} - Y_{offset}|, |Y_{r,min} - Y_{offset}|) \\ Z_{scale} &= \max(|Z_{r,max} - Z_{offset}|, |Z_{r,min} - Z_{offset}|) \end{aligned}$$

Η επίλυση του συστήματος για την εύρεση των συντελεστών των πολυωνύμων γίνεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αρχικά υπολογίζονται οι συντελεστές των πολυωνύμων από επίλυση του συστήματος γραμμικά, αφού πρώτα μετατραπούν οι εξισώσεις στην παρακάτω μορφή. Σχηματίζονται οι εξισώσεις παρατήρησης (Zhang, 2005):

$$\begin{aligned} F_x &= P_1(X, Y, Z) - s * P_2(X, Y, Z) = 0 \\ F_y &= P_3(X, Y, Z) - l * P_4(X, Y, Z) = 0 \end{aligned}$$

Όπου είναι της μορφής:

$$A * x = l$$

και η λύση δίνεται από τον τύπο:

$$x = (A^T A)^{-1} * A^T * l$$

Στη συνέχεια, το σύστημα μετατρέπεται ξανά στην αρχική του μορφή και η επίλυση γίνεται με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων ή την γενική μέθοδο για μη γραμμικά συστήματα, επαναληπτικά έως ότου οι συντελεστές που προκύπτουν να σταθεροποιηθούν γύρω από μια τιμή. Σε περίπτωση όπου παρουσιάζεται αδυναμία υπολογισμού λόγω αστάθειας του πίνακα των συντελεστών των αγνώστων η επίλυση δύναται να πραγματοποιηθεί με εμπειρική επαναληπτική μέθοδο (Wang et al., 2001), εισάγοντας στο σύστημα παραπάνω βοηθητικά στοιχεία για να υπάρξει σύγκλιση.

Ωστόσο, τα κλασματικά πολυώνυμα έχουν και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα (Madani 1999). Για παράδειγμα δεν μπορούν να περιγράψουν επαρκώς τοπικές διαστροφές(π.χ. σε SAR απεικονίσεις), δεν είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε πολύ μεγάλες εικόνες και οι συντελεστές των παραμέτρων μετασχηματισμού τους δεν έχουν φυσική ερμηνεία συνεπώς δεν γίνεται να προκύψουν κάποια συμπεράσματα από τις τιμές τους. Επίσης, σε περίπτωση μηδενικού παρονομαστή δεν υπάρχει λύση και ενδέχεται να υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών προκαλώντας σημαντικά σφάλματα. Επίσης, φαίνεται πως πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το ανάγλυφο, η ακρίβεια των φωτοσταθερών και η κατανομή τους (Tao and Hu, 2002), με καλύτερα αποτελέσματα να προκύπτουν για επίπεδο έδαφος και όσο το δυνατόν πυκνή και κανονική κατανομή φωτοσταθερών.

B) ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Γεωαναφορά εικόνας – Μέθοδοι και Αποτελέσματα

4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Αντικείμενο των διάφορων εφαρμογών που πραγματοποιήθηκαν, είναι η γεωαναφορά μιας απεικόνισης TerraSAR-X με διάφορες μεθόδους και η παραγωγή ορθοφωτογραφιών της περιοχής. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- Συλλογή απαραίτητων δεδομένων και στοιχείων (φωτοσταθερά, σημεία ελέγχου, ορθοφωτογραφίες από οπτικές εικόνες, ψηφιακό μοντέλο εδάφους)
- Γεωαναφορά εικόνας SAR με διαφορετικές μεθόδους

Με βάση το γενικό φυσικό μοντέλο του δέκτη (Αλγόριθμος Range-Doppler)

Με εμπειρικές-προσεγγιστικές σχέσεις (DLT, RPF)

- Παραγωγή Ορθοφωτογραφιών
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων

4.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ TerraSAR-X

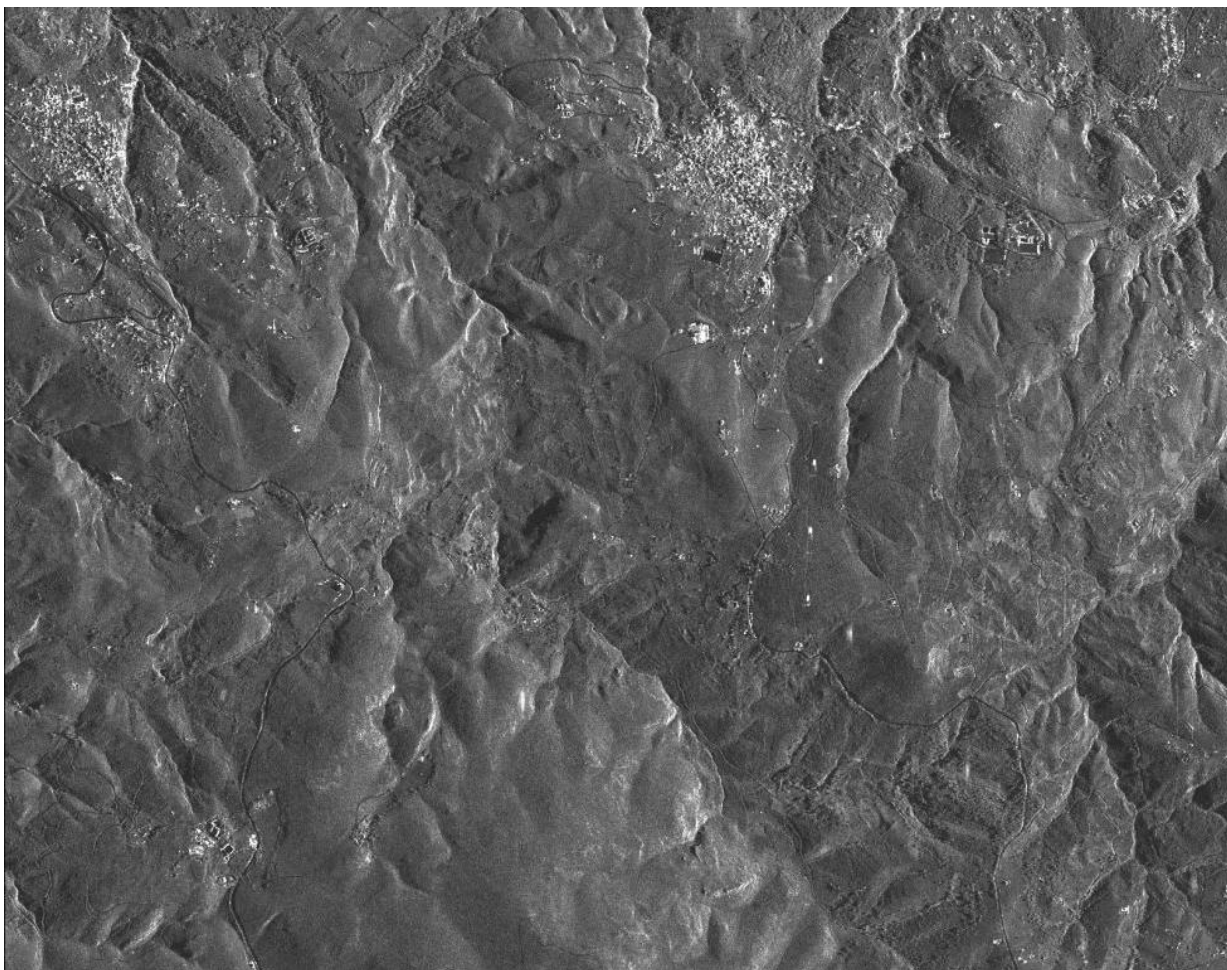
Η δορυφορική απεικόνιση SAR, που χρησιμοποιήθηκε, είναι προϊόν του δορυφόρου TerraSAR-X. Έχει ληφθεί με τον τρόπο απεικόνισης Spotlight High Resolution(HS) τον Φεβρουάριο του 2009. Κανονικά, η συχνότητα λειτουργίας αυτού του τρόπου απεικόνισης είναι 150MHz, αλλά η συγκεκριμένη εικόνα έχει προκύψει από μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας ίση με 300MHz, η οποία είναι σε πειραματικό στάδιο. Είναι της μορφής SSC (Single Look Slant Range) με μονή πόλωση (HH). Τα προϊόντα αυτής της μορφής είναι στην προβολή του επιπέδου των αζιμουθίων και της κεκλιμένης απόστασης. Δεν έχει εφαρμοστεί καμία ραδιομετρική εξομάλυνση και οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων έχουν προκύψει από το δείκτη φωτεινότητας της κεραίας (β_0). Το μέγεθος της απεικόνισης στο έδαφος είναι πλάτους μικρότερου από 10km και μήκους 5 km, όπως έχει προαναφερθεί για αυτού του είδους την απεικόνιση (εικ.2.9). Η ονομαστική διακριτική ικανότητα είναι 0,6m κατά τον άξονα των αποστάσεων και

1,1m κατά τον άξονα των αζιμουθίων. Η κατεύθυνση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης είναι από Βορρά προς Νότο και με αριστερή γωνία φωτισμού της περιοχής.

Χαρακτηριστικά Εικόνας SAR	
Ημερομηνία Λήψης	2/2/2009
Αριθμός γραμμών κάθετα στη διεύθυνση των αζιμουθίων (Azimuth Lines)	6264
Αριθμός γραμμών κάθετα στη διεύθυνση των αποστάσεων (Range Lines)	12288
Μήκος κύματος (λ) (m)	0.031067
Γωνία εκπομπής - λήψης ($^{\circ}$)	90
Διάρκεια λήψης (sec)	0.77321
Μέγεθος εικονοστοιχείου κατά τον άξονα των αποστάσεων (m)	0.454702
Μέγεθος εικονοστοιχείου κατά τον άξονα των αζιμουθίων (m)	0.867648

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά της απεικόνισης SAR που χρησιμοποιήθηκε

Η εικόνα προκύπτει από σύνθεση δύο επιπέδων. Το ένα περιέχει όλη την πληροφορία για την κεκλιμένη απόσταση και το άλλο περιέχει την πληροφορία από την επεξεργασία της φάσης. Επειδή προκύπτει κατευθείαν από τα πρωτογενή δεδομένα και δεν έχει υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, διαθέτει όλη την πληροφορία φάσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές. Η εικόνα όπως λαμβάνεται από την εταιρία στην αρχική της μορφή φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.1: Διατιθέμενη ψηφιακή απεικόνιση TerraSAR-X Spotlight HS 300MHz.

Η περιοχή η οποία απεικονίζεται βρίσκεται ΒΑ του Νομού Αττικής στην περιοχή του Καλάμου και του Μαркоπούλου. Πρόκειται για μια περιοχή με σχετικά έντονο ανάγλυφο και με μέσο υψόμετρο περίπου 270μ. Η μέγιστη υψομετρική διαφορά είναι της τάξης των 400m. Στο εσωτερικό της περιοχής βρίσκονται οι οικισμοί Καλάμου και Μαркоπούλου και η υπόλοιπη έκταση χαρακτηρίζεται ως γεωργική και δασική γη με διάσπαρτα κτίρια που χρησιμοποιούνται ως κατοικίες ή μικρές βιοτεχνίες. Στο κάτω κεντρικό μέρος της εικόνας παρατηρείται η ύπαρξη ενός όρους, περιοχή στην οποία δεν υπάρχουν χαρακτηριστικά σημεία. Στην περιοχή αυτή δεν κατέστη δυνατή η αναγνώριση αντικειμένων για χρήση ως φωτοσταθερών ή σημείων σύνδεσης. Παρακάτω, φαίνεται μια γενικότερη άποψη της περιοχής και της σχετικής της θέσης ως προς την γύρω περιοχή από οπτικές δορυφορικές εικόνες, έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η θέση της, η κάλυψή της και η σύνδεσή της με την απεικόνιση SAR.



Εικόνα 4.2: Άποψη της ευρύτερης περιοχής της απεικόνισης και της έκτασης όπου απεικονίζεται στην απεικόνιση SAR.

4.3 ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ – ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για την εφαρμογή των παραπάνω διαδικασιών και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων απαιτούνται φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου. Κάθε μέθοδος γεωαναφοράς που εφαρμόζεται απαιτεί και διαφορετικό αριθμό φωτοσταθερών. Λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτούμενων φωτοσταθερών για την εφαρμογή όλων των μεθόδων, συλλέχθηκαν δύο κατηγορίες φωτοσταθερών αναφορικά με την ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων τους στη φυσική γήινη επιφάνεια. Για την πρώτη κατηγορία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με δέκτες GPS και για την δεύτερη προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των σημείων στο έδαφος με χρήση ορθοφωτογραφιών και ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται ψηφιακό μοντέλο επιφανείας της περιοχής. Παρακάτω όταν γίνεται αναφορά σε DTM εννοείται στην πραγματικότητα DSM.

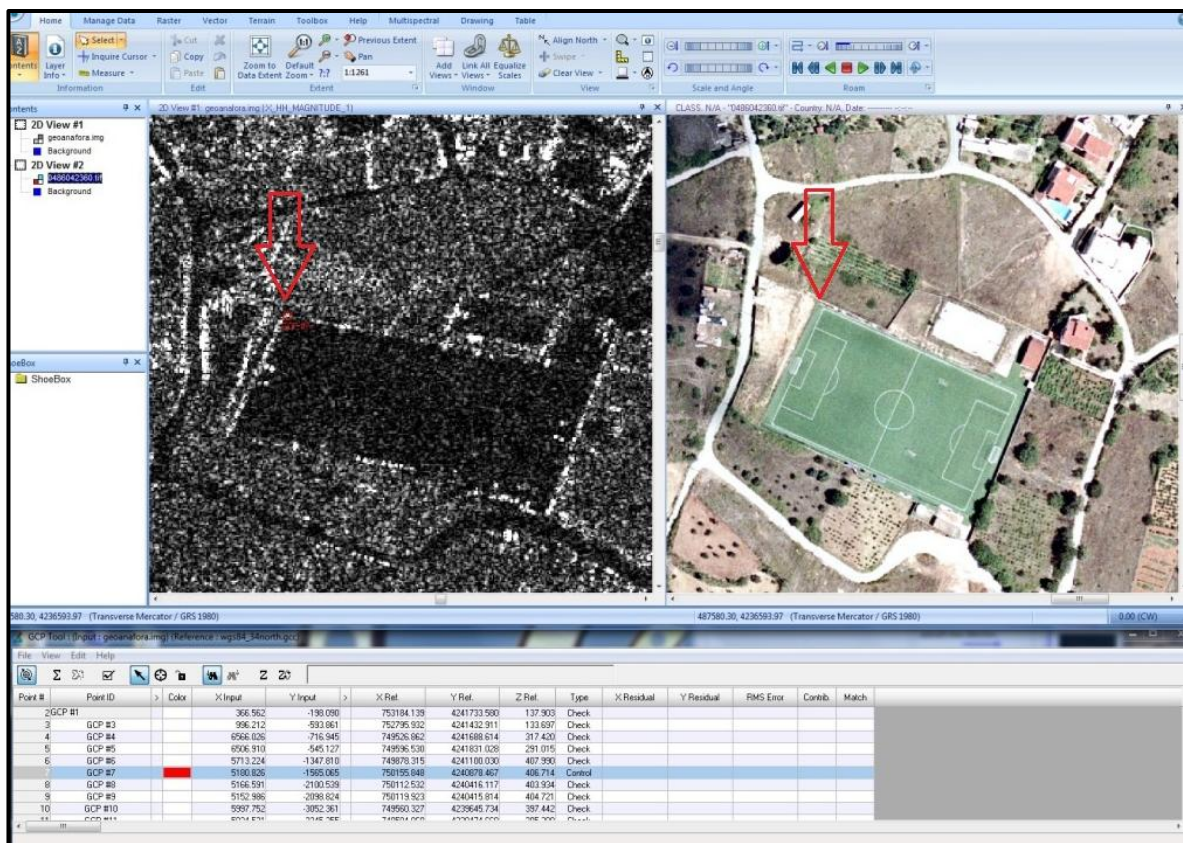
4.3.1 Αναγνώριση φωτοσταθερών

Ο εντοπισμός των φωτοσταθερών δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη υπόθεση λόγω της ιδιαιτερότητας των εικόνων SAR, του σημειακού θορύβου, και των παραμορφώσεων που υπάρχουν στην συγκεκριμένη εικόνα η οποία δεν έχει διορθωθεί για τις παραμορφώσεις λόγω του αναγλύφου. Καταλληλότερα σημεία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου, συνήθως είναι αντικείμενα τα οποία παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση με τον περιβάλλοντα χώρο στον οποίο βρίσκονται, αναφορικά με το ύψος τους και με το υλικό κατασκευής τους. Συνήθως αντικείμενα τα οποία βρίσκονται σε υψηλότερες θέσεις από τα γειτονικά τους, απεικονίζονται με πιο ανοικτούς τόνους του γκριζου, ιδιαίτερα όταν υπάρχει σημαντική υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό, επιφάνειες με μικρή διαφοροποίηση του υψομέτρου (π.χ. χέρσες εκτάσεις) παρουσιάζουν σημαντικά ποσοστά σημειακού θορύβου (speckle). Γενικά, είναι δύσκολη η τυποποίηση των χαρακτηριστικών των αντικειμένων τα οποία γίνονται εύκολα διακριτά σε μια εικόνα SAR και η ανάπτυξη ενός μοντέλου αναγνώρισής τους. Ωστόσο, παρατηρείται πως οι δέκτες SAR και συγκεκριμένα ο TerraSAR-X είναι ευαίσθητοι σε ύπαρξη γραμμικών κυρίως προτύπων, τα οποία παρουσιάζουν υψομετρική διαφοροποίηση με διπλανά στοιχεία του φυσικού χώρου(της τάξης του ενός μέτρου και πάνω). Τέτοια σημεία μπορεί να είναι τομές περιφράξεων ή γωνίες κτιρίων ή ακόμα και οτιδήποτε άλλο αντικείμενο με έντονη διαφοροποίηση ύψους με τον γενικότερο περιβάλλοντα χώρο του (π.χ. πυλώνες ΔΕΗ). Αναφέρεται, πως γωνίες κτιρίων είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν όταν τα κτίρια βρίσκονται μέσα σε πόλεις ή σε οικισμούς, λόγω της πυκνής δόμησης και συνεπώς της δύσκολης αναγνώρισής τους λόγω της μειωμένης ραδιομετρικής ανάλυσης. Επισημαίνεται, πως ιδιαίτερα σε αστικό περιβάλλον, λόγω της έντονης εναλλαγής υψομέτρου παρατηρείται έντονη οπισθοσκέδαση και η εικόνα παρουσιάζει σημαντικά επίπεδα σημειακού θορύβου (speckle). Αυτό είναι αντίστοιχο με το παράδειγμα των χέρσων εδαφών, με τη διαφορά πως στην περίπτωση του αστικού περιβάλλοντος οι απεικόνιση χαρακτηρίζεται από εναλλαγή πολύ έντονων τόνων του γκριζου με μεγάλη διακύμανση τιμών φωτεινότητας. Επίσης, παρατηρείται, πως αντικείμενα των οποίων το υλικό κατασκευής τους είναι μέταλλο ή κάποιο παρόμοιο υλικό ανακλούν σε μεγαλύτερο βαθμό την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και αποτυπώνονται εντονότερα στην εικόνα. Για το λόγο αυτό άλλωστε, η πλειονότητα των φωτοσταθερών που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ακμές μεταλλικών κατασκευών. Όταν μια επιφάνεια του φυσικού χώρου παρουσιάζει ομοιομορφία (λεία υφή) τότε είναι αρκετά εύκολος ο διαχωρισμός της από μια διπλανή επιφάνεια με τραχεία υφή. Συνδυαστικά με τα προηγούμενα, παρατηρείται πως επιφάνειες του φυσικού χώρου των οποίων αλλάζει σημαντικά η ομαλότητα και η υφή γίνονται

εύκολα διακριτές, ειδικά όταν μεταξύ τους υπάρχει τεχνητός διαχωρισμός (περίφραξη). Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να αποτελούν γήπεδα ποδοσφαίρου, δρόμοι, πισίνες ή γεωργικές εκτάσεις με χαμηλή και ομοιόμορφη βλάστηση. Λόγω της μη διαφοροποίησης του αναγλύφου τους, τέτοιες επιφάνειες απεικονίζονται με πολύ σκούρους τόνους του γκριζου, ιδιαίτερα οι δρόμοι. Μια άλλη περίπτωση που προκύπτει από τα παραπάνω, είναι η χρήση αξονοδιασταυρώσεων ως φωτοσταθερά, σε περίπτωση μη ύπαρξης πιο ευκρινών αντικειμένων στην εικόνα. Τέτοιες περιπτώσεις ωστόσο αποφεύγονται, καθώς δεν αποτελούν την πιο αξιόπιστη λύση. Ιδανική, είναι η χρήση τομών περιφράξεων με κάθετη σε αυτές οδό, δίνοντας προσοχή στο διάκενο παρά την οδό και την περίφραξη, γιατί αυτό δεν είναι διακριτό στην SAR απεικόνιση. Κατά τη διαδικασία επιλογής των φωτοσταθερών, αρχικά προσδιορίσθηκε μεγάλος αριθμός σημείων στην εικόνα, από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα καλύτερα που προέκυψαν και των οποίων ήταν εύκολη η πρόσβαση στην περίπτωση των επίγειων μετρήσεων.

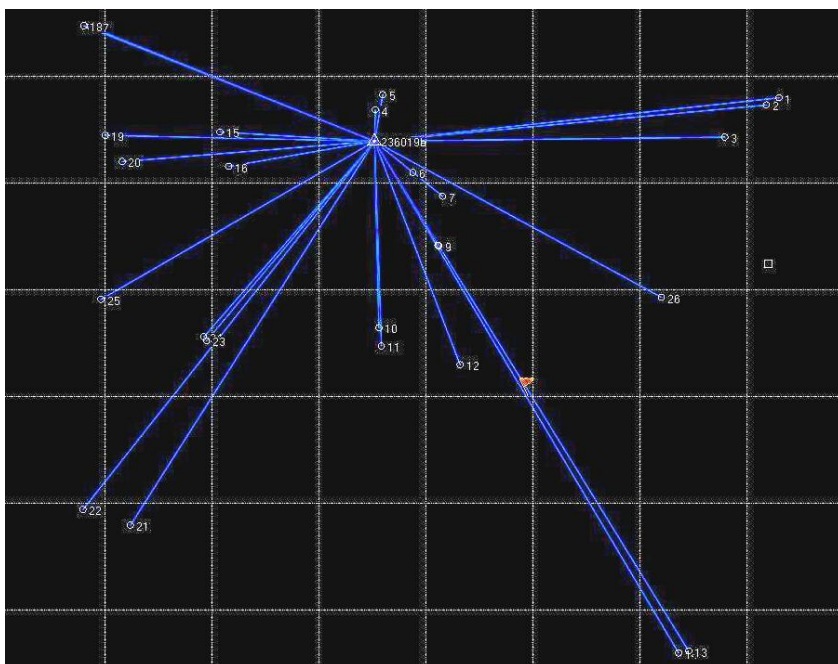
4.3.2 Φωτοσταθερά με μετρήσεις GPS

Για την εξάλειψη των αβεβαιοτήτων αναφορικά με τις πηγές σφαλμάτων, κρίθηκε αναγκαία η χρήση φωτοσταθερών σημείων πολύ καλής ακρίβειας. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που εισάγονται στο σύστημα λόγω της χρήσης των φωτοσταθερών και να υπολογιστούν τα εναπομένοντα σφάλματα προσδιορισμού των σημείων που οφείλονται στο μοντέλο γεωαναφοράς. Έτσι, είναι δυνατή η τεκμηρίωση της ονομαστικής ακρίβειας του δορυφόρου. Για το λόγο αυτό έγιναν μετρήσεις των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών με δέκτες GPS. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό των συντεταγμένων τους είναι αυτή του ημικινηματικού εντοπισμού. Αρχικά, εντοπίστηκαν στην SAR εικόνα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά. Για διευκόλυνση της διαδικασίας και την ορθή αναγνώριση των σημείων στο έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν και οπτικοί ορθοφωτοχάρτες της περιοχής, που έχουν συνταχθεί από την Κτηματολόγιο Α.Ε, έτσι ώστε να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη των σημείων και να είναι πιο εύκολος ο εντοπισμός τους στο ύπαιθρο. Έμφαση δόθηκε στην κατανομή των φωτοσταθερών σημείων, έτσι ώστε να πλησιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την κανονική κατανομή και να βρίσκονται σε διαφορετικές υψομετρικές θέσεις, για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη του αναγλύφου της περιοχής. Παρακάτω φαίνεται η αναγνώριση χαρακτηριστικών σημείων τόσο στην εικόνα SAR, όσο και στις οπτικές ορθοφωτογραφίες.



Εικόνα 4.3: Αναγνώριση Φωτοσταθερών στο Erdas Imagine OrthoRadar

Για τη μέτρηση των φωτοσταθερών χρησιμοποιήθηκε το Spectra Precision EPOCH 25 L1/ L2 RTK GPS δύο συχνοτήτων. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο ύπαιθρο, αρχικά εντοπίστηκαν στην περιοχή τα διαθέσιμα τριγωνομετρικά σημεία της Γ.Υ.Σ για τα οποία δίνονταν οι συντεταγμένες τους στο προβολικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ'87. Από τα σημεία αυτά επιλέχθηκε ένα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως βάση. Η δημιουργία δικτύου βάσεων, δεν κρίθηκε αναγκαία, καθώς η προσδοκώμενη ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων των φωτοσταθερών με αυτή τη μέθοδο, είναι υπεραρκετή. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο ένας δέκτης GPS (base) στήθηκε στο τριγωνομετρικό T604350 (βάση), το οποίο επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι σε κεντρική θέση της απεικόνισης και ο άλλος δέκτης (rover) τοποθετούνταν στα επιλεγμένα σημεία.

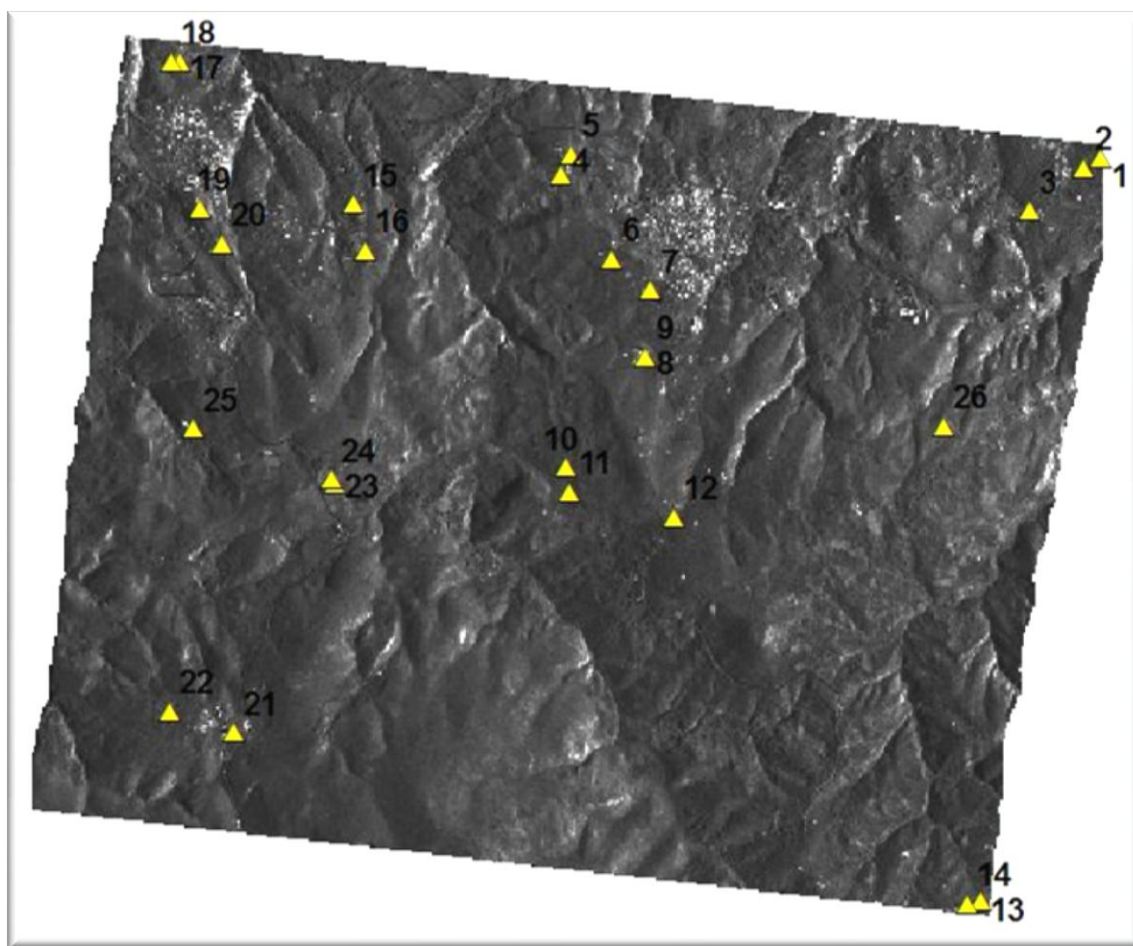


Εικόνα 4.4: Δίκτυο επίλυσης βάσεων GPS

Με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, επιλέχθηκε ο χρόνος παραμονής σε κάθε σημείο να κυμαίνεται από 5 έως 10 λεπτά, ανάλογα κάθε φορά με την απόσταση του κάθε σημείου από τη βάση. Ωστόσο, κάποια σημεία μετρήθηκαν με στατικό εντοπισμό για εξασφάλιση της μέτρησής τους. Με αυτό τον τρόπο, ενδέχεται ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση των ασαφειών φάσης κάθε βάσης να ήταν ανεπαρκής, με αποτέλεσμα τα φωτοσταθερά να είχαν ακρίβεια μερικών εκατοστών αντί των χιλιοστών, που είναι η μέγιστη δυνατή ακρίβεια προσδιορισμού με τη μέθοδο του στατικού εντοπισμού. Όμως, ακρίβειες της τάξης των λίγων εκατοστών είναι πλήρως αποδεκτές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τελικώς, με την επίλυση των βάσεων η οποία έγινε με το λογισμικό Spectra Precision Office, προέκυψε ακρίβεια προσδιορισμού των φωτοσταθερών καλύτερη από ένα εκατοστό. Οι μετρήσεις έγιναν σε χρονικό διάστημα δύο ημερών, από την ίδια βάση. Η επίλυση του δικτύου έγινε για τρία διαφορετικά συστήματα αναφοράς. Οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν στο WGS'84, στο ΕΓΣΑ'87 και στο ETRS'05. Αναφέρεται, πως τα WGS'84 και ETRF'05 χρησιμοποιούν ως ελλειψοειδές αναφοράς το ελλειψοειδές του WGS'84 ενώ το ΕΓΣΑ'87 χρησιμοποιεί το μετατοπισμένο ελλειψοειδές GRS'80. Για τον υπολογισμό των ορθομετρικών υψομέτρων χρησιμοποιήθηκε το παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM'96 συνεπώς, τα ορθομετρικά υψόμετρα που προκύπτουν δεν είναι άριστης ποιότητας λόγω έλλειψης τοπικού μοντέλου γεωειδούς. Η αποχή μεταξύ του ελλειψοειδούς του

WGS'84 και του γεωειδούς στην περιοχή είναι περίπου 39,4m με το ελλειψοειδές να κείται κάτω από το γεωειδές, ενώ η αντίστοιχη αποχή για το ελλειψοειδές του ΕΓΣΑ'87 είναι 7m περίπου.

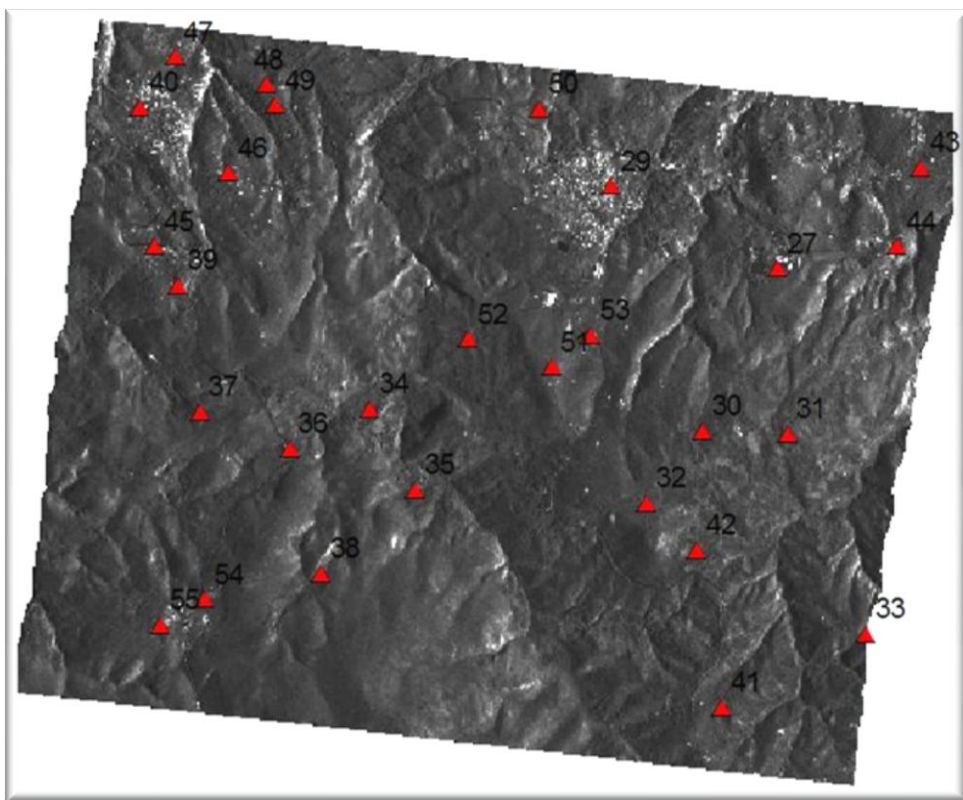
Ο συνολικός αριθμός φωτοσταθερών τα οποία μετρήθηκαν με αυτή τη μέθοδο είναι 26. Η κατανομή των φωτοσταθερών αυτών στην περιοχή και η μορφή του δικτύου φαίνεται στην εικ. 4.5. Οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών στα διάφορα συστήματα αναφοράς και οι ακρίβειες επίλυσης των βάσεων δίνονται στο παράρτημα. Όπως προαναφέρθηκε, η κατανομή των φωτοσταθερών παρουσιάζει ένα κενό ακριβώς κάτω από το κέντρο της περιοχής. Στην περιοχή αυτή δεν κατέστη δυνατή η απόκτηση φωτοσταθερών λόγω μη ύπαρξη χαρακτηριστικών αντικείμενων, που να είναι ευδιάκριτα στην εικόνα και των οποίων οι θέσεις στη φυσική γήινη επιφάνεια να μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Πρόκειται για μια χέρσα έκταση η οποία εκτείνεται από τους πρόποδες έως την κορυφή ενός όρους καλυμμένη από πυκνή βλάστηση.



Εικόνα 4.5: Κατανομή φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου από μετρήσεις GPS.
(1^η ποιοτική κατηγορία)

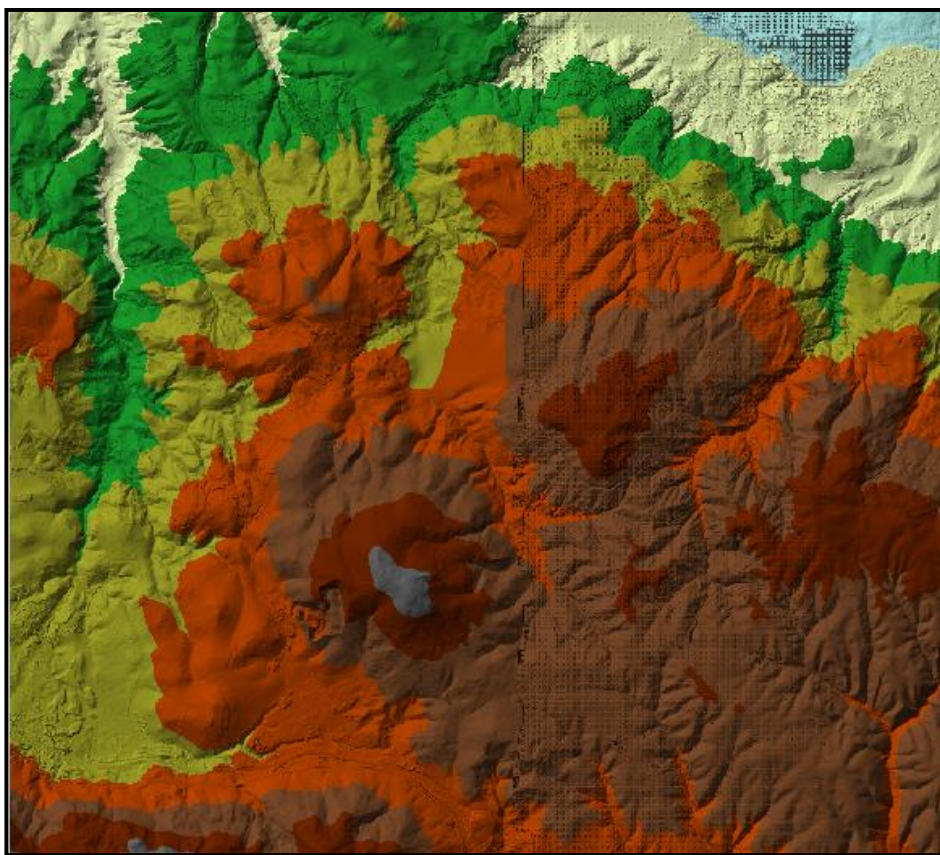
4.3.3 Φωτοσταθερά από ορθοφωτογραφία

Για την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων συλλέχθηκαν σημεία από ορθοφωτογραφία και ψηφιακό μοντέλο εδάφους, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως σημεία ελέγχου των συνορθώσεων. Η μόνη περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κάποια από αυτά για τον προσδιορισμό κάποιου μοντέλου μεταξύ εικόνας και φυσικής γήινης επιφάνειας είναι με τη μέθοδο των κλασματικών πολυωνύμων 3^{ου} βαθμού, όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών για τον υπολογισμό των συντελεστών τους. Οι ορθοφωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν παραχωρήθηκαν από τον ΟΚΧΕ, συντάχθηκαν από αεροφωτογραφίες, κλίμακας περίπου 1:15.000, φωτοληψίας 2010, και αναφέρονται στο ΕΓΣΑ'87. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι σε μορφή καννάβου (grid) με πυκνότητα 10m, έχει ληφθεί με φωτογραμμετρικές διαδικασίες από τις ίδιες αεροφωτογραφίες και τα υψόμετρα είναι ορθομετρικά, αναφερόμενα στο ΕΓΣΑ'87. Η διαδικασία επιλογής των φωτοσταθερών, που ακολουθήθηκε, είναι αντίστοιχη με την μέτρηση των συντεταγμένων των φωτοσταθερών στο έδαφος. Η μόνη διαφορά είναι ότι αντί να γίνουν επίγειες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ορθοφωτογραφίες και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής.



Εικόνα 4.6: Κατανομή φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου από ορθοφωτογραφία και DTM(2^η ποιοτική κατηγορία).

Αρχικά, εντοπίστηκαν στην εικόνα SAR σημεία λεπτομερειών σε όλη την εικόνα και σε περιοχές όπου η μέτρηση των συντεταγμένων των σημείων με επίγειες μετρήσεις ήταν απαγορευτική, λόγω αδυναμία πρόσβασης. Στη συνέχεια, τα αντίστοιχα σημεία αναγνωρίστηκαν στις ορθοφωτογραφίες και σκοπεύτηκαν με αποτέλεσμα την εξαγωγή των οριζοντιογραφικών καρτεσιανών συντεταγμένων τους στο ΕΓΣΑ'87. Η απεικόνιση των ορθοφωτογραφιών έγινε στο Viewer του Erdas και οι συντεταγμένες των σημείων λήφθηκαν με το εργαλείο Inquire tool. Το υψόμετρο των σημείων αυτών προέκυψε από παρεμβολή στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους με στοιχείο εισόδου τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες των σημείων. Το αρχικό μοντέλο εδάφους της περιοχής ήταν χωρισμένο σε δύο αρχεία shapefile (.shp) σε μορφή καννάβου (grid) τα οποία ήταν επικαλυπτόμενα. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGis στο οποίο έγινε συνένωση των δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε ένα και στη συνέχεια μετατροπή του παραγόμενου ψηφιακού μοντέλου εδάφους από κατανομή καννάβου σε κατανομή τριγώνων (TIN). Τα δύο shapefile εισάχθηκαν με την εντολή Add και συνενώθηκαν με την εντολή Geoprocessing -> Merge. Με την εντολή create TIN μέσω της εργαλειοθήκης 3D Analyst έγινε η μετατροπή σε μορφή τριγώνων.



Εικόνα 4.7: Διατιθέμενο Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM).

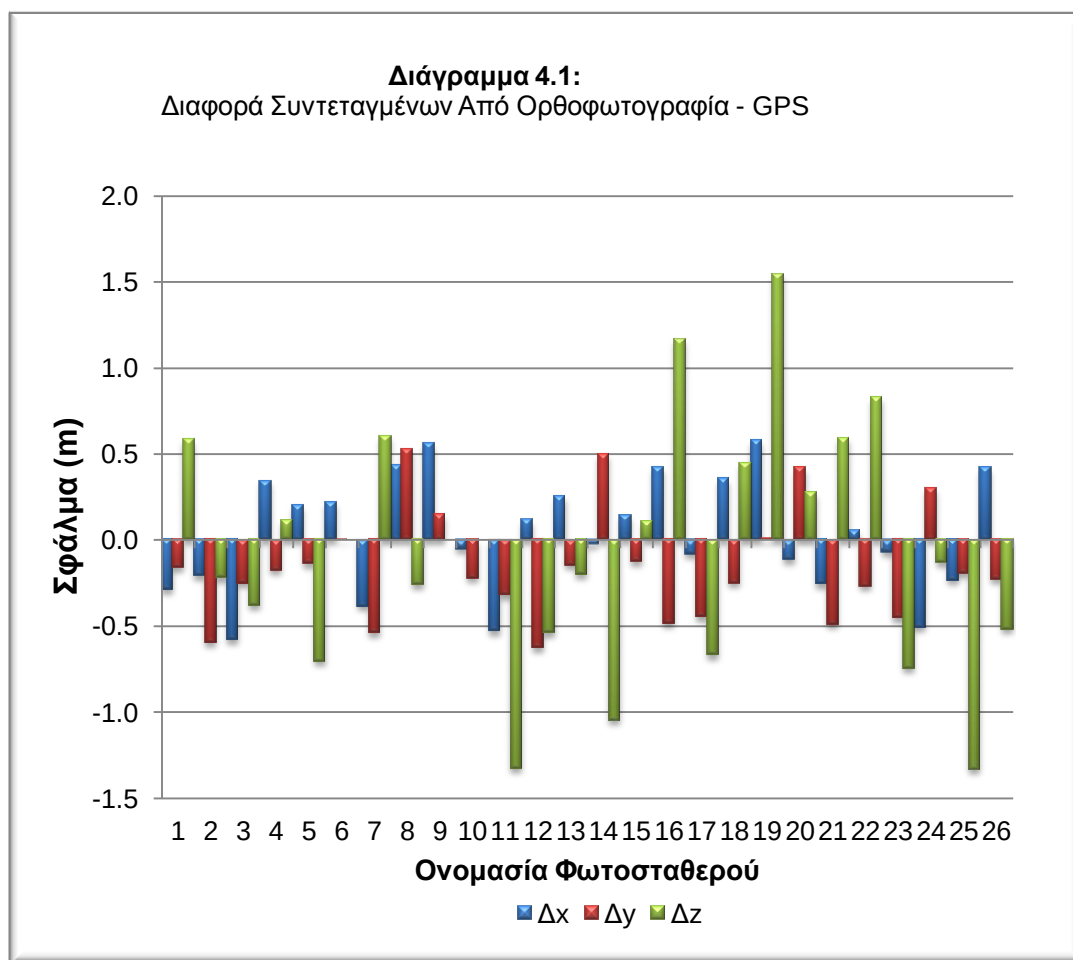
Για την παρεμβολή στο DTM, δημιουργήθηκε ένα αρχείο κειμένου (.txt) με τις οριζόντιες συντεταγμένες των σημείων και έγινε εισαγωγή του στο ArcGIS μέσω της εντολής Add Data. Έτσι προβλήθηκαν τα σημεία πάνω στην επιφάνεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και αποδόθηκε σε κάθε ένα η τιμή του υψομέτρου που αντιστοιχεί στην εκάστοτε θέση. Με τον τρόπο αποκτήθηκαν οι τρισδιάστατες καρτεσιανές όλων των σημείων. Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες που προέκυψαν μετατράπηκαν σε συντεταγμένες στην προβολή UTM 34 North του WGS'84, έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση των σημείων και σε αυτό το σύστημα.

Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος της ακρίβειας δεδομένων της ορθοφωτογραφίας και του DTM. Όπως υπολογίστηκαν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων, η αντίστοιχη διαδικασία εφαρμόσθηκε και για τον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων σημείων που έχουν υπολογισθεί από μετρήσεις GPS. Έτσι προκύπτουν δύο πακέτα συντεταγμένων για κάθε σημείο, οι οποίες συγκρίνονται αντίστοιχα μεταξύ τους.

Γνωρίζοντας την ακρίβεια προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων με GPS, η οποία είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών οριζοντιογραφικά και μερικών εκατοστών υψομετρικά, γίνεται προσδιορισμός της ακρίβειας των γεωδαιτικών συντεταγμένων που προκύπτουν, από το συνδυασμό ορθοφωτογραφίας και ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Επειδή μέσω των μετρήσεων με GPS το σφάλμα που προκύπτει είναι πολύ μικρό, οριζοντιογραφικά τουλάχιστον, η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων απεικονίζει το σφάλμα των συντεταγμένων των φωτοσταθερών που εξάγονται από την ορθοφωτογραφία. Το σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων στο οποίο γίνεται η σύγκριση, είναι το ΕΓΣΑ'87 για να αποφευχθεί η εισαγωγή στο σύστημα επιπλέον σφάλματος, λόγω μετασχηματισμού συντεταγμένων. Για την αναγωγή των ορθομετρικών υψομέτρων που προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιείται μια μέση αποχή γεωειδούς για όλη την περιοχή, η οποία υπολογίζεται από τις επιλύσεις των βάσεων του GPS στα δύο αυτά συστήματα αναφοράς, χρησιμοποιώντας το παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM'96. Για το λόγο αυτό, στα υψόμετρα που προκύπτουν, προστίθεται κάποιο συστηματικό σφάλμα της τάξης των λίγων εκατοστών.

Έλεγχος Αξιοπιστίας Ορθοφωτογραφίας – DTM (26 σημεία)			
	X	Y	Z
RMS(m)	0.335	0.355	0.729

Πίνακας 4.2: RMS φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου από ορθοφωτογραφία.



Από τον υπολογισμό του RMS, για κάθε άξονα του συστήματος συντεταγμένων και αναφορικά με τα διαθέσιμα δεδομένα, τα αποτελέσματα κρίνονται λογικά και αναμενόμενα. Η αναμενόμενη θεωρητική ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων των φωτοσταθερών είναι της τάξης των 0.5m οριζοντιογραφικά (η κλίμακα σύνταξης των ορθοφωτογραφιών από τον ΟΚΧΕ είναι 1:2.500) και 1m υψομετρικά, για καλά σκοπευόμενα σημεία. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών είναι μικρότερη από το μέγεθος του εικονοστοιχείου της απεικόνισης SAR. Αντίστοιχα, η υψομετρική ακρίβεια είναι μικρότερη από το μέγεθος του εικονοστοιχείου κατά τον άξονα των αζιμουθίων και της ίδιας τάξης από αυτό στην διεύθυνση των κεκλιμένων αποστάσεων. Δηλαδή, η ακρίβεια των συντεταγμένων των σημείων που υπολογίζονται από τις ορθοφωτογραφίες - DTM, κυμαίνεται στο μέγεθος του εικονοστοιχείου της αρχικής απεικόνισης SAR. Λόγω της φύσης των απεικονίσεων SAR, δεν μπορεί να εκτιμηθεί η ακρίβεια μέτρησης εικονοσυντεταγμένων, αλλά γενικά μπορεί να ειπωθεί

ότι είναι χειρότερη από ένα εικονοστοιχείο. Από τα παραπάνω είναι προφανές πως τα σφάλματα των συντεταγμένων στο γεωδαιτικό σύστημα που προκύπτουν προσδίδουν κάποια παραπάνω αβεβαιότητα στο σύστημα, η οποία κυμαίνεται στο μέγεθος του εικονοστοιχείου. Συνεπώς η τελική ακρίβεια της γεωαναφοράς της εικόνας από χρήση τέτοιων φωτοσταθερών δεν αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά.

5. ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΕΙΚΟΝΑΣ: ΜΕΘΟΔΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ IMAGINE RADAR ΤΗΣ ERDAS

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού, είναι ο προσδιορισμός της ακρίβειας των επίπεδων γεωδαιτικών συντεταγμένων που αποδίδονται σε κάθε εικονοστοιχείο της διορθωμένης εικόνας, με τη διαδικασία της γεωαναφοράς της. Για την επίτευξη της διαδικασίας αυτής, είναι αναγκαία η χρήση φωτοσταθερών όταν πρόκειται για συμβατικές οπτικές δορυφορικές εικόνες ή αεροφωτογραφίες. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία αυτή είναι δυνατή και χωρίς χρήση φωτοσταθερών, στην περίπτωση των εικόνων οι οποίες παράγονται από απεικονιστικά ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, λόγω της γεωμετρίας λήψης της εικόνας και της πληροφορίας φάσης η οποία συγκρατείται στο αρχείο της εικόνας. Η χρήση των φωτοσταθερών στην περίπτωση αυτή, χρησιμεύει ως βοηθητικό στοιχείο βελτιστοποίησης, αποσκοπώντας στον καλύτερο προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων του δορυφόρου, τη χρονική στιγμή λήψης της εικόνας, σε ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Παρακάτω, γίνονται διάφορες εφαρμογές της διαδικασίας με χρήση διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών ή ακόμα και κανενός. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού πακέτου Imagine Radar της Erdas και συγκεκριμένα του OrthoRadar. Η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται οι επίπεδες συντεταγμένες των σημείων είναι αυτή όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο με χρήση του αλγόριθμου Range – Doppler, όπως αυτός έχει δομηθεί στο λογισμικό αυτό. Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Αρχικά σκοπεύονται τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου στην απεικόνιση SAR και προκύπτουν οι εικονοσυντεταγμένες τους.
- Για τα σημεία αυτά είναι γνωστές οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες, όπως έχουν προκύψει σε κάποιο σύστημα αναφοράς, όπως προαναφέρθηκε.
- Ως στοιχεία εισόδου τη θέση των φωτοσταθερών στη φυσική γήινη επιφάνεια, το λογισμικό υπολογίζει το διάνυσμα θέσης των φωτοσταθερών από το δορυφόρο τη στιγμή της λήψης (απόσταση σημείου – δέκτη), διορθώνοντας έτσι την αρχική εκτίμηση της θέσης του. Εάν ο αριθμός των φωτοσταθερών είναι περισσότερος από ένα, το λογισμικό εκτελεί συνόρθωση των παρατηρήσεων, υπολογίζοντας τη βέλτιστη λύση.
- Με την νέα διορθωμένη θέση του δέκτη, το λογισμικό εκτελεί τον αλγόριθμο όπως προαναφέρθηκε, με τον οποίο υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών, οι οποίες αντιστοιχούν στις δοθείσες γεωδαιτικές συντεταγμένες τους.

- Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι αρχικές εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών, οι οποίες προέκυψαν με την σκόπευσή τους, με αυτές που προέκυψαν από τη γεωαναφορά της εικόνας. Οι διαφορές που προκύπτουν για κάθε φωτοσταθερό, αποτελούν το σφάλμα προσδιορισμού της θέσης του εκάστοτε σημείου (εναπομένον σφάλμα).

Στη συνέχεια, τα δύο τελευταία βήματα της παραπάνω διαδικασίας επαναλαμβάνονται με τη διαφορά πως αντί για φωτοσταθερά, χρησιμοποιούνται σημεία ελέγχου και προκύπτουν τα αντίστοιχα σφάλματα. Η ύπαρξη σημείων ελέγχου είναι αναγκαία έτσι ώστε να εκτιμηθεί η εξωτερική ακρίβεια της συνόρθωσης. Τα σημεία ελέγχου σε αντίθεση με τα φωτοσταθερά, δεν συμμετέχουν στη διόρθωση της θέσης του δέκτη και συνεπώς αποτελούν ανεπηρέαστο δείκτη της ακρίβειας της διαδικασίας. Ενδέχεται δηλαδή, το μοντέλο να προσαρμόζεται καλά γύρω από τα φωτοσταθερά, χωρίς να αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σημεία που βρίσκονται σε τελείως διαφορετικές θέσεις πάνω στην εικόνα, μακριά από τα φωτοσταθερά. Για τα σφάλματα που προκύπτουν, εκτιμάται το σ0 *a posteriori* και το RMS της γεωαναφοράς. Επίσης, υπολογίζεται το εναπομένον σφάλμα κάθε σημείου, ξεχωριστά για τον άξονα των κεκλιμένων αποστάσεων και των αζιμουθίων, καθώς και το συνολικό τους RMS. Οι τιμές των σφαλμάτων έχουν μονάδες εικονοστοιχείων. Γνωρίζοντας το μέγεθος των εικονοστοιχείων στη φυσική γήινη επιφάνεια (GSD), το σφάλμα ανάγεται σε μονάδες στη φυσική γήινη επιφάνεια (μέτρα).

Η περιγραφή των βημάτων της παραπάνω διαδικασίας στο Imagine Radar της Erdas αναλύεται παρακάτω:

Από την εργαλειοθήκη του Erdas επιλέγεται η καρτέλα Radar και από το μενού που εμφανίζεται επιλέγεται η εφαρμογή Orthoradar. Ανοίγει έτσι το παράθυρο Set GeoCorrection Input File όπου επιλέγεται η εικόνα προς επεξεργασία από την επιλογή From Image File από τη θέση όπου βρίσκεται στο δίσκο. Πατώντας το κουμπί OK ανοίγει η εικόνα σε ένα παράθυρο (Viewer) και παράλληλα ανοίγει το παράθυρο Generic SAR Model Properties. Εδώ φαίνονται όλες οι πληροφορίες της εικόνας οι οποίες διαβάζονται από το λογισμικό μέσω της επικεφαλίδας που συνοδεύει το αρχείο της εικόνας, καθώς και επιλέγονται όλες οι ρυθμίσεις για την γεωαναφορά – ορθοαναγωγή της εικόνας. Στην καρτέλα Projection επιλέγεται η προβολή όπου θα χρησιμοποιηθεί για την γεωαναφορά – ορθοαναγωγή της εικόνας. Στην καρτέλα General επιλέγεται η επιλογή Use GCP's έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν φωτοσταθερά για τη γεωαναφορά – ορθοαναγωγή και αυτόματα ανοίγει το παράθυρο GCP Tool Reference Setup. Εδώ επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα εισαχθούν τα φωτοσταθερά στο σύστημα. Επιλέγεται η

επιλογή Keyboard Only έτσι ώστε να εισάγουμε τις συντεταγμένες αναφοράς των φωτοσταθερών χειροκίνητα και παράλληλα ανοίγει το παράθυρο GCP Tool. Στο παράθυρο αυτό γίνεται η σκόπευση των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου, καθώς και η συνόρθωση για τη διόρθωση της θέσης του δορυφόρου και ο υπολογισμός των σφαλμάτων των σημείων. Με την επιλογή του εικονιδίου Input GCP σκοπεύονται τα σημεία πάνω στην εικόνα όπου έχει ανοίξει από πριν στο παράθυρο Viewer. Κάθε φορά που σκοπεύεται ένα σημείο ενημερώνονται τα πεδία X Input και Y Input στα οποία φαίνονται οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων. Αφού ολοκληρωθεί η σκόπευση όλων των σημείων για τα οποία είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους στη φυσική γήινη επιφάνεια, εισάγονται στα πεδία του πίνακα XRef, YRef, ZRef οι συντεταγμένες αναφοράς οι οποίες είναι οι γνωστές συντεταγμένες των σημείων και για τις οποίες θα υπολογιστούν στη συνέχεια οι αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες. Το επόμενο στάδιο, αφού έχουν εισαχθεί και οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων και οι γήινες συντεταγμένες είναι η διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης. Για να γίνει αυτό επιλέγονται ποια από τα σημεία θα χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά και ποια ως σημεία ελέγχου. Αυτό γίνεται από την καρτέλα Edit και την επιλογή του εικονιδίου Set Point. Στη συνέχεια επιλέγεται η εντολή Solve Geometric Model μέσω του εικονιδίου Σ, όπου γίνεται η διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου. Η αλλαγή των στοιχείων της τροχιάς του δορυφόρου γίνεται αντιληπτή παρατηρώντας το παράθυρο Generic SAR Model Properties στην καρτέλα Ephemeris, όπου φαίνονται τα διανύσματα και οι ταχύτητες θέσης του δορυφόρου σε ένα γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων. Παράλληλα, προκύπτουν οι τιμές των σφαλμάτων των εικονοσυντεταγμένων που υπολογίζονται και συγκρίνονται με αυτές που έχουν ήδη προκύψει, από τη σκόπευση των φωτοσταθερών. Ενημερώνονται δηλαδή, τα πεδία X Residual, Y Residual, Z Residual για κάθε φωτοσταθερό και πάνω από τον πίνακα φαίνεται το συνολικό RMS ξεχωριστά για τα X και Y, καθώς και το συνολικό σε μονάδες εικονοστοιχείων. Στη συνέχεια, για τον αντίστοιχο υπολογισμό των σφαλμάτων για τα σημεία ελέγχου επιλέγεται το εικονίδιο Check Point Residuals όπου φαίνονται στον πίνακα, τα σφάλματα μόνο για τα σημεία ελέγχου καθώς και τα συνολικά σφάλματα αντίστοιχα. Το σφάλμα δηλαδή που προκύπτει και για τις δύο κατηγορίες σημείων, απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων των σημείων, τα οποία έχουν αναγνωρισθεί και σκοπευτεί πάνω στην απεικόνιση SAR και των εικονοσυντεταγμένων των σημείων που προκύπτουν από το λογισμικό με χρήση του αλγορίθμου Range – Doppler. Η μετατροπή του σφάλματος αυτού σε μονάδες στη φυσική γήινη επιφάνεια με χρήση του μεγέθους του εικονοστοιχείου, αποδίδει την ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων στο έδαφος.

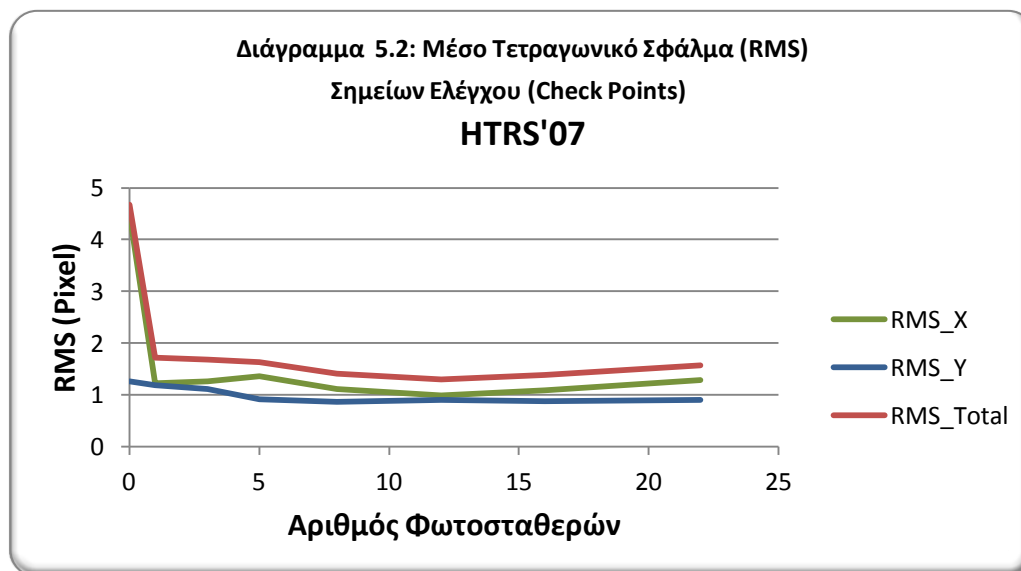
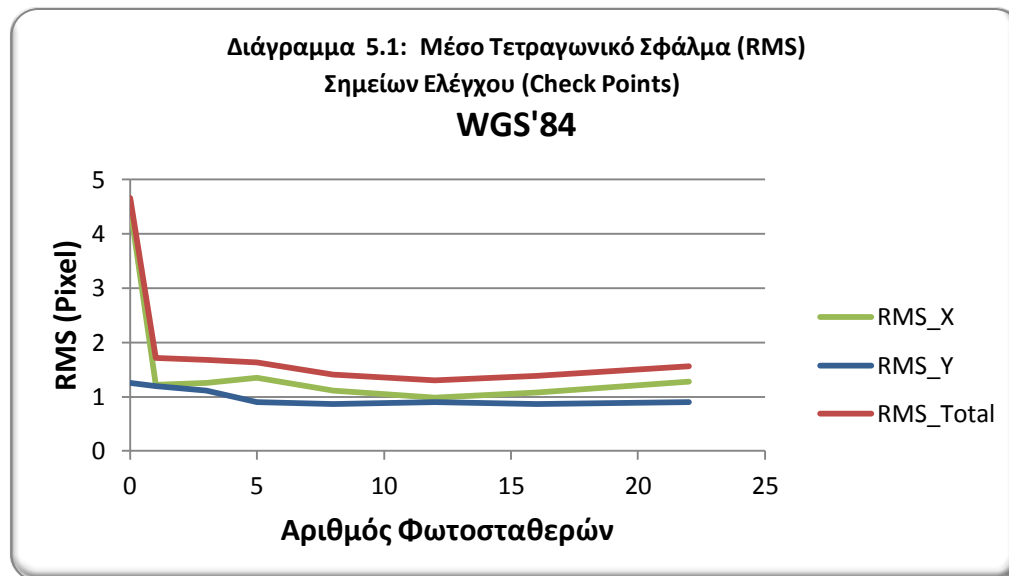
Η παραπάνω διαδικασία, εφαρμόζεται στα προβολικά συστήματα αναφοράς ETRS '05 και WGS'84 και για διαφορετικούς συνδυασμούς φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου. Για το

γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ '87, γίνεται γεωαναφορά χωρίς χρήση φωτοσταθερών μόνο. Αυτό γίνεται, γιατί παρατηρήθηκε πως ορίζοντας ως γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς το ΕΓΣΑ '87 και χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά, δεν γίνεται εμφανής διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου. Επίσης, με διαφορετικό συνδυασμό φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου, τα εναπομένοντα σφάλματα είναι πάντα τα ίδια. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα, είναι πως τα φωτοσταθερά λαμβάνονται υπόψη από το λογισμικό, αλλά οι διορθώσεις που προκύπτουν για την τροχιά του δορυφόρου δεν είναι εμφανείς. Έτσι δεν μπορεί να εκτιμηθεί η ακρίβεια της γεωαναφοράς άμεσα. Ωστόσο, στην ορθοφωτογραφία που παράγεται, προκύπτει πολύ καλή ακρίβεια, αντίστοιχη με αυτή που προκύπτει και για τα άλλα δύο συστήματα. Έτσι γίνεται εκτίμηση της ακρίβειας της γεωαναφοράς στο ΕΓΣΑ'87 σε επόμενο κεφάλαιο (5^ο), μέσω σκόπευσης των φωτοσταθερών στην ορθοδιορθωμένη εικόνα. Αναφέρεται, πως τα υψόμετρα των φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου τα οποία εισάγονται στο σύστημα, πρέπει να είναι γεωμετρικά, καθώς το λογισμικό κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Range – Doppler, θεωρεί την φυσική γήινη επιφάνεια ως ελλειψοειδές και το υψόμετρο του κάθε σημείου πρέπει να αναφέρεται στο αντίστοιχο ελλειψοειδές αναφοράς του συστήματος που χρησιμοποιείται και όχι στο γεωειδές. Συνεπώς, τα υψόμετρα που χρησιμοποιούνται για την γεωαναφορά της εικόνας στο ΕΓΣΑ '87, είναι γεωμετρικά αναφερόμενα στο ελλειψοειδές GRS 80 χωρίς να έχει γίνει η μετάθεση ως προς το κέντρο της γης. Αυτό γίνεται γιατί το λογισμικό εκτελεί τον αλγόριθμο προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων θεωρώντας τη φυσική γήινη επιφάνεια ως ένα γεωκεντρικό ελλειψοειδές. Η θεώρηση αυτή προκύπτει από το γεγονός πως κατά τη χρήση γεωμετρικών υψομέτρων αναφερόμενα στο μετατοπισμένο ελλειψοειδές του ΕΓΣΑ '87 τα σφάλματα που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλα, δυσανάλογα με αυτά που προκύπτουν για τα άλλα δύο συστήματα αναφοράς. Παρατηρήθηκε, πως με μετατροπή των υψομέτρων αυτών στο ίδιο ελλειψοειδές χωρίς μετάθεση, το σφάλμα προσδιορισμού των σημείων μειώθηκε κατά πολύ και είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό που προκύπτει για τα άλλα δύο συστήματα αναφοράς. Ακόμα ένας λόγος που επιβεβαιώνει την επιλογή αυτή είναι, πως το λογισμικό είναι δομημένο έτσι ώστε να χρησιμοποιεί το ελλειψοειδές του WGS'84 ως βασική επιφάνεια αναφοράς. Η εφαρμογή του αλγορίθμου Range – Doppler, γίνεται χρησιμοποιώντας αυτό το ελλειψοειδές αναφοράς για την ανάπλαση της γεωμετρίας του. Για μέγιστη ακρίβεια και εξάλειψη συστηματικών σφαλμάτων, προτείνεται από τον κατασκευαστή μετατροπή των συντεταγμένων σε αυτό ελλειψοειδές αναφοράς (Erdas Field Guide, 2010).

Για την εξαγωγή των σφαλμάτων από γεωαναφορά της εικόνας στα συστήματα WGS'84 και HTRS'07, χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών, ακολουθείται διαφορετική διαδικασία από αυτή με χρήση φωτοσταθερών. Αυτό οφείλεται σε αδυναμία του λογισμικού να υπολογίσει τα

εναπομένοντα σφάλματα των σημείων ελέγχου, χωρίς να έχει γίνει χρήση κανενός φωτοσταθερού. Έτσι, θα έπρεπε να γίνει ο έλεγχος της γεωαναφοράς σκοπεύοντας τα σημεία ελέγχου στην παραγόμενη ορθοφωτογραφία και συγκρίνοντας άμεσα γεωδαιτικές συντεταγμένες. Σε αυτήν την περίπτωση, το σφάλμα της γεωαναφοράς με χρήση ή όχι φωτοσταθερών θα προέκυπτε, από σκόπευση των ίδιων σημείων ελέγχου δύο φορές. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται η σύγκριση να περιείχε κάποιο ποσοστό σφάλματος από την σκόπευση των σημείων. Θεωρητικά, το σφάλμα αυτό θα έπρεπε να είναι πολύ μικρό, αλλά για αποφυγή αυτού του ενδεχομένου γίνεται η παρακάτω διαδικασία. Γίνεται προσπάθεια εύρεσης γεωδαιτικών συντεταγμένων ενός σημείου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως φωτοσταθερό και οι οποίες δεν αλλάζουν καθόλου την τροχιά του δορυφόρου. Για να γίνει αυτό, γίνεται μια αρχική γεωαναφορά της εικόνας χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών, θεωρώντας ως μέσο υψόμετρο της περιοχής το υψόμετρο ενός συγκεκριμένου σημείου. Από την ορθοδιορθωμένη εικόνα που προκύπτει (τουλάχιστον για το σημείο αυτό), σκοπεύεται το συγκεκριμένο σημείο και προκύπτουν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του. Συνδυάζοντας τις συντεταγμένες που προκύπτουν, με το γνωστό υψόμετρο του σημείου, αυτό θεωρείται ως φωτοσταθερό, η χρήση του οποίου όμως δεν διορθώνει την τροχιά του δορυφόρου, αφού οι συντεταγμένες του προέκυψαν από το ίδιο το μοντέλο. Στην πραγματικότητα, οι συντεταγμένες που προκύπτουν με διαδοχικές δοκιμές, τροποποιούνται ελάχιστα για να μην επηρεαστεί καθόλου η τροχιά του δορυφόρου. Έτσι, ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιώντας ως φωτοσταθερό το σημείο αυτό και σημεία ελέγχου όλα τα υπόλοιπα σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων.

Παρακάτω, παρατίθενται διαγράμματα στα οποία φαίνεται η ακρίβεια της γεωαναφοράς, για τα συστήματα WGS'84 και HTRS'07 και διαφορετικό αριθμό φωτοσταθερών. Οι αντίστοιχοι αναλυτικοί πίνακες, από τους οποίους προκύπτουν τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα. Οι τιμές σφάλματος που προκύπτουν για χρήση ενός συγκεκριμένου αριθμού φωτοσταθερών κάθε φορά, προκύπτουν από τη εφαρμογή διαφορετικών συνδυασμών φωτοσταθερών αναφορικά με τη θέση τους και εξαγωγή του μέσου όρου των σφαλμάτων που προκύπτουν. Επίσης, αναφέρεται, πως ως φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου χρησιμοποιούνται μόνο αυτά που έχουν προκύψει από μετρήσεις GPS.

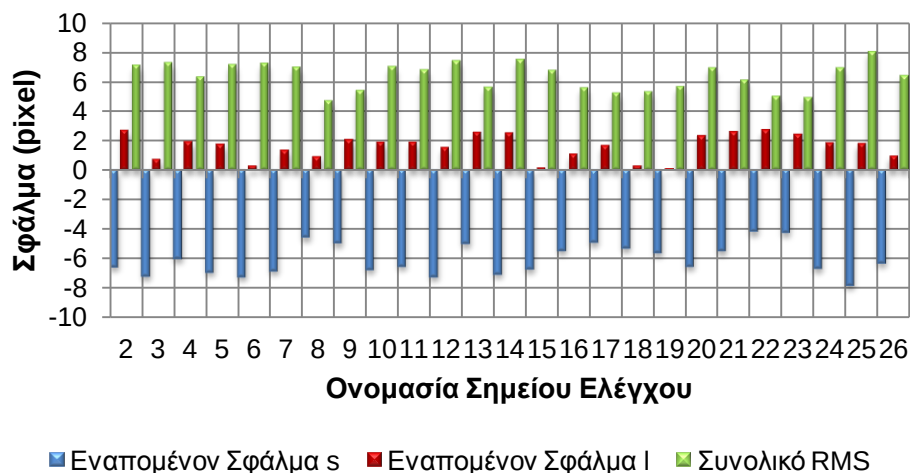


Από τα παραπάνω προκύπτει, πως αρκεί ένα μόνο φωτοσταθερό για να αφαιρεθούν τα συστηματικά σφάλματα, τα οποία εμπεριέχονται στο σύστημα, όταν δεν γίνεται χρήση κανενός φωτοσταθερού. Με χρήση παραπάνω του ενός φωτοσταθερού, η ακρίβεια της γεωαναφοράς βελτιώνεται, κατά ένα μικρό βαθμό της τάξης του 0.5 pixel το πολύ. Η βελτίωση δεν φαίνεται ιδιαίτερα σημαντική, ωστόσο για εργασίες ακριβείας πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Η καλύτερη λύση, προκύπτει με χρήση 12 φωτοσταθερών κατανομημένα σε κανονικές, όσο το δυνατόν, θέσεις πάνω στην εικόνα. Παρατηρείται, πως η χρήση πολλών φωτοσταθερών (άνω των 15) μειώνει την ακρίβεια της γεωαναφοράς. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού εισέρχονται στο σύστημα σφάλματα από τη σκόπευση των φωτοσταθερών στην εικόνα, τα οποία επηρεάζουν την

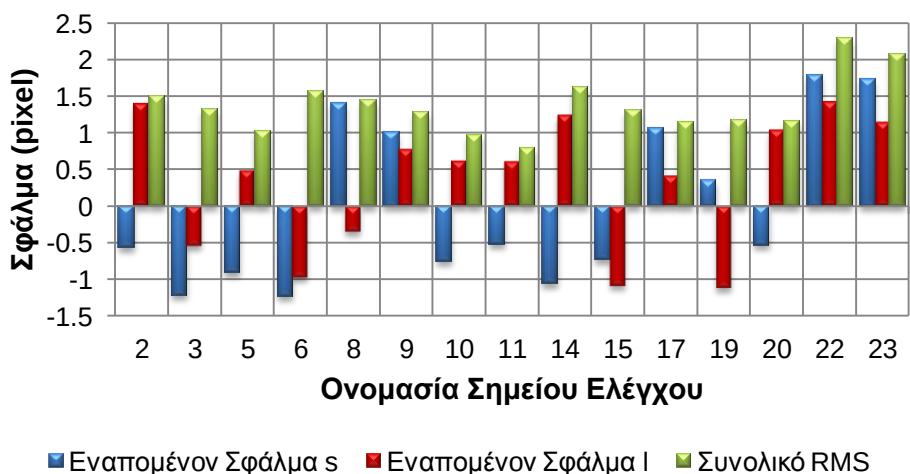
τελική ακρίβεια της γεωαναφοράς, όταν ο αριθμός τους είναι μεγάλος. Τα αποτελέσματα και για τα δύο συστήματα αναφοράς είναι σχεδόν ίδια, πράγμα αναμενόμενο, αφού το ελλειψοειδές αναφοράς τους είναι ουσιαστικό το ίδιο. Με μη χρήση φωτοσταθερών, το συνολικό σφάλμα της γεωαναφοράς που προκύπτει, είναι αρκετά μεγαλύτερο, της τάξης των 4.5 pixel. Τέτοια ακρίβεια γεωαναφοράς δεν ενδείκνυται για φωτογραμμετρικές εργασίες, μπορεί να χρησιμεύει όμως, σε άλλες εφαρμογές (π.χ. τηλεπισκόπηση).

Ενδεικτικά, παρατίθενται τα εναπομένοντα σφάλματα και το συνολικό RMS κάθε σημείου, για γεωαναφορά χωρίς κανένα φωτοσταθερό, καθώς και με τον καλύτερο συνδυασμό τους (χρήση 11 φωτοσταθερών) στο WGS'84.

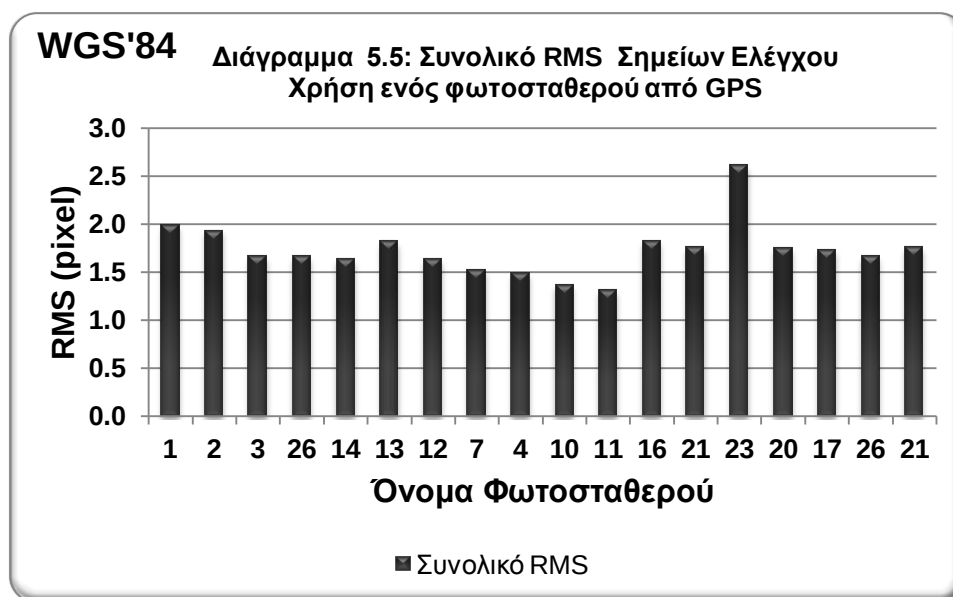
WGS'84 Διάγραμμα 5.3: Εναπομένον Σφάλμα Σημείων Ελέγχου Κανένα Φωτοσταθερό



WGS'84 Διάγραμμα 5.4: Εναπομένον Σφάλμα Σημείων Ελέγχου 11 Φωτοσταθερά

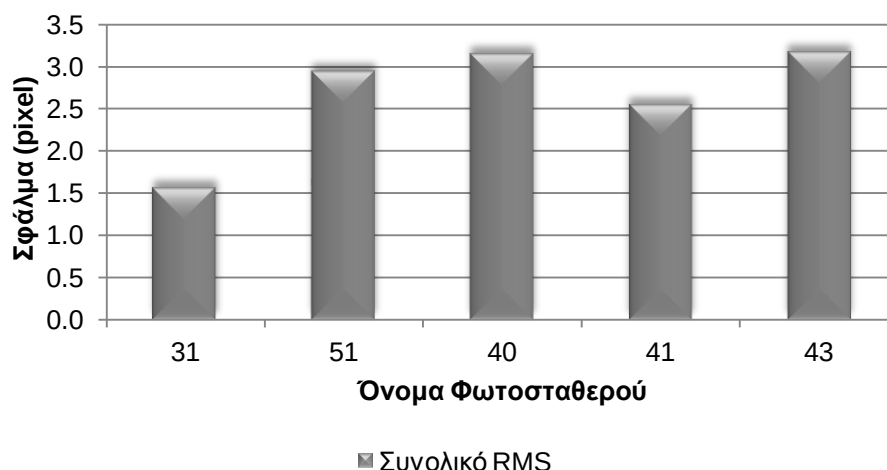


Παρακάτω, γίνεται διερεύνηση της ακρίβειας η οποία επιτυγχάνεται, με χρήση μόνο ενός φωτοσταθερού, σε διαφορετικές θέσεις πάνω στην εικόνα. Τα φωτοσταθερά τοποθετούνται στον άξονα των τετμημένων, αναφορικά με τη θέση τους πάνω στην εικόνα, από αριστερά προς τα δεξιά. Τα κεντρικά φωτοσταθερά είναι τα 10,11 και στην ευρύτερη περιοχή του κέντρου βρίσκονται τα 4,7,12.



Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, το μικρότερο σφάλμα με χρήση ενός μοναδικού φωτοσταθερού για την γεωαναφορά της εικόνας SAR, προκύπτει όταν αυτό είναι στο κέντρο της εικόνας (σημεία ελέγχου 10,11). Ωστόσο, η μέγιστη διαφορά που προκύπτει αν αυτό είναι στα όρια της εικόνας, είναι σχετικά μικρή, της τάξης του 0.5 pixel. Η μεγάλη τιμή σφάλματος που προκύπτει με χρήση του φωτοσταθερού 23, οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα σκόπευσής του, καθώς δεν ήταν ιδιαίτερα ευδιάκριτο στην εικόνα. Μια διαφορά 0.5 pixel, σε μονάδες στη Φ.Γ.Ε σημαίνει σφάλμα μικρότερο από 0,5m. Οπότε μπορεί να ειπωθεί, πως σε περιοχές όπου η αναγνώριση χαρακτηριστικών αντικειμένων είναι πολύ δύσκολη, η χρήση ακόμα και ενός φωτοσταθερού, οπουδήποτε πάνω στην εικόνα, μπορεί να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Βέβαια, προτείνεται να χρησιμοποιείται, αν είναι δυνατόν, φωτοσταθερό σε κεντρική θέση της εικόνας για μέγιστη ακρίβεια. Εάν η ακρίβεια με την οποία έχει μετρηθεί ένα φωτοσταθερό είναι χειρότερη (π.χ. από ορθοφωτογραφία και DTM), το συνολικό RMS που προκύπτει, φαίνεται παρακάτω για διαφορετικές θέσεις του μοναδικού φωτοσταθερού, όπως και προηγουμένως. Τα σφάλματα, αναφέρονται, μόνο στα σημεία ελέγχου από GPS.

WGS'84 Διάγραμμα 5.6: Συνολικό RMS Γεωαναφοράς
Φωτοσταθερά από Ortho-DTM



Για το παραπάνω διάγραμμα, δεν έχει χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός διαφορετικών φωτοσταθερών, καθώς δεν μπορεί να διερευνηθεί η προκύπτουσα ακρίβεια της γεωαναφοράς. Στο σύστημα περιλαμβάνονται και σφάλματα από τον υπολογισμό των συντεταγμένων των φωτοσταθερών. Αυτό που εκτιμάται, είναι η ακρίβεια της γεωαναφοράς με χειρότερης ποιότητας φωτοσταθερά. Παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά μεταξύ των αποτελεσμάτων και η ακρίβεια της γεωαναφοράς χειροτερεύει, αλλά διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Συνεπώς, για εφαρμογές με μικρότερη απαίτηση σε ακρίβεια, είναι αποτελεσματική η χρήση τέτοιου είδους φωτοσταθερών.

Παρακάτω, γίνεται χρησιμοποιούνται 10 φωτοσταθερά από την πρώτη ποιοτική κατηγορία και 10 από την δεύτερη. Γίνονται δύο δοκιμές. Αρχικά, ως φωτοσταθερά χρησιμοποιούνται αυτά από GPS και σημεία ελέγχου αυτά από ορθοφωτογραφία και DTM. Στη συνέχεια, γίνεται το αντίστροφο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	GCP's(10)	CP(10)	RMS (pixel)		
			X	Y	Συνολικό
1η Δοκιμή	GPS	Ortho+DTM	2.316	0.841	2.464
2η Δοκιμή	Ortho+DTM	GPS	2.515	1.136	2.760

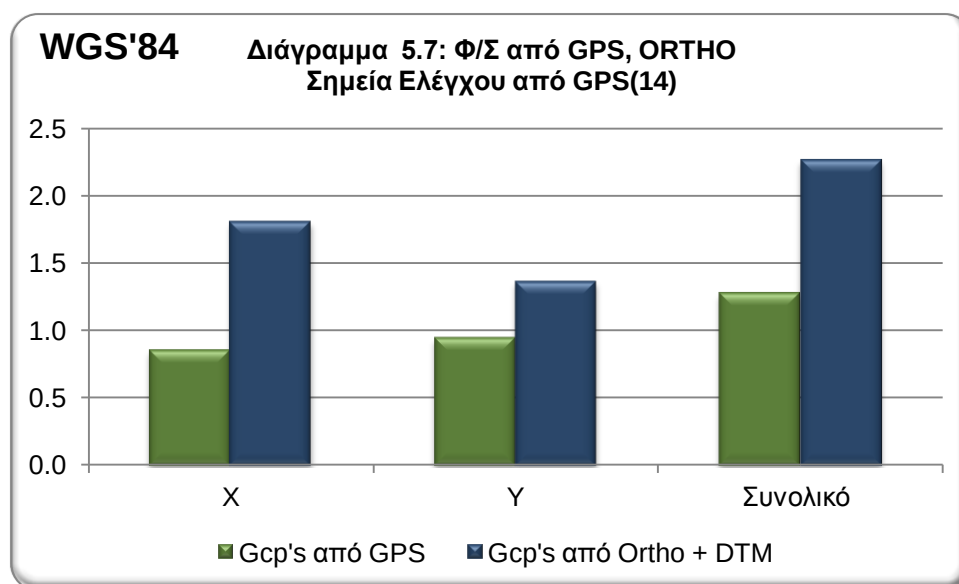
Πίνακας 5.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων με εναλλαγή φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου.

Από την παραπάνω σύγκριση, συμπεραίνεται, πως και στις δύο περιπτώσεις, το σφάλμα που προκύπτει είναι ουσιαστικά το ίδιο. Η αυξημένη τιμή του σχετικά με αυτό που προκύπτει από χρήση φωτοσταθερών μόνο της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας οφείλεται στην αυξημένη αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών και των σημείων σύνδεσης.

Η τελευταία εφαρμογή, είναι χρήση φωτοσταθερών της πρώτης κατηγορίας, στη συνέχεια της δεύτερης και σύγκριση σε σημεία ελέγχου της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας.

	GCP's(10)	CP(14)	RMS (pixel)		
			X	Y	Συνολικό
1η Δοκιμή	GPS	GPS	0.852	0.943	1.271
2η Δοκιμή	Ortho+DTM	GPS	1.810	1.368	2.269

Πίνακας 5.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικής ακρίβειας φωτοσταθερά.



Είναι φανερό, πως χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά από την πρώτη ποιοτική κατηγορία, η ακρίβεια της γεωαναφοράς προκύπτει πολύ καλύτερη. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας, επιδρά αρνητικά στη διόρθωση της θέσης του δέκτη, με αποτέλεσμα την μείωση της τελικής ακρίβειας της γεωαναφοράς.

5.2 ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ DLT ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

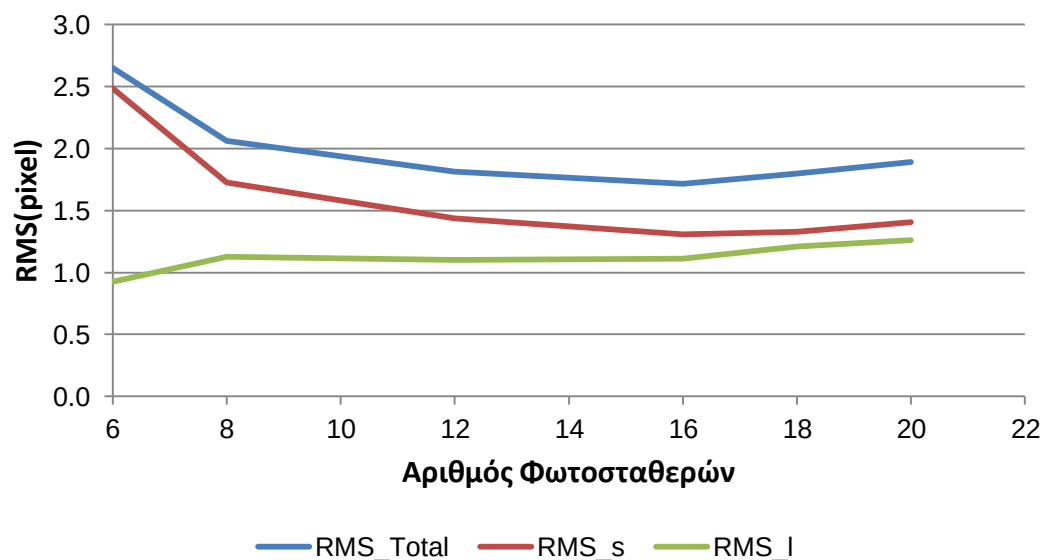
Η επόμενη μέθοδος γεωαναφοράς που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή του Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT). Για τον υπολογισμό των αγνώστων συντελεστών των κλασματικών πολυωνύμων, μέσω της επίλυσης του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων (παρ.4.1), έγινε χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab. Στο λογισμικό αυτό, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος μέσω του οποίου γίνεται συνόρθωση του δικτύου με την μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων των ελαχίστων τετραγώνων. Ως στοιχεία εισόδου, χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες ενός επαρκούς αριθμού φωτοσταθερών, τόσο στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, όσο και στο σύστημα της εικόνας. Τα ελάχιστα απαιτούμενα φωτοσταθερά για τον υπολογισμό είναι 6 αφού το σύστημα έχει 11 αγνώστους. Για κάθε ένα φωτοσταθερό προκύπτουν 2 εξισώσεις παρατήρησης, οπότε με χρήση 6 φωτοσταθερών προκύπτουν 12 εξισώσεις παρατήρησης. Τα υπόλοιπα σημεία γνωστών συντεταγμένων (γεωδαιτικών και εικονοσυντεταγμένων) που δεν χρησιμοποιούνται ως φωτοσταθερά, χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία ελέγχου της γεωαναφοράς. Ο υπολογισμός των συντελεστών των πολυωνύμων, έγινε για διαφορετικό συνδυασμό φωτοσταθερών-σημείων ελέγχου και διαφορετική κατανομή τους πάνω στην εικόνα. Τα φωτοσταθερά που συμμετέχουν στη συνόρθωση κάθε φορά, επιλέχθηκε να είναι αυτά της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας, δηλαδή αυτά που έχουν προκύψει από μετρήσεις GPS. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε οι συντελεστές των πολυωνύμων που υπολογίζονται, να έχουν την μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Λόγω του μικρού αριθμού φωτοσταθερών που απαιτούνται για αυτή τη μέθοδο, ο αριθμός των σημείων από μετρήσεις GPS (26) είναι αρκετός έτσι ώστε κάθε φορά, κάποια να χρησιμοποιούνται ως φωτοσταθερά και τα υπόλοιπα να χρησιμοποιούνται ως σημεία ελέγχου. Τα υπόλοιπα σημεία γνωστών συντεταγμένων της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας (28), χρησιμοποιούνται και αυτά ως σημεία ελέγχου της γεωαναφοράς. Ο διαχωρισμός των σημείων ελέγχου γίνεται για εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια της μεθόδου. Η μία, αφορά σε αυτά που έχουν προκύψει από μετρήσεις GPS και η άλλη, σε αυτά από χρήση ορθοφωτογραφίας και DTM. Από τα σημεία ελέγχου της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας, δεν μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την ακρίβεια της μεθόδου, λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων τους. Το εναπομένον σφάλμα κάθε σημείου στην περίπτωση αυτή, οφείλεται όχι μόνο στο μαθηματικό μοντέλο του μετασχηματισμού, αλλά και στο σφάλμα προσδιορισμού της θέσης του στη Φ.Γ.Ε.

Για κάθε επίλυση υπολογίζεται το RMS και το εναπομένον σφάλμα κάθε φωτοσταθερού που συμμετέχει στη συνόρθωση. Αντίστοιχα, υπολογίζεται το RMS και το *a posteriori* τυπικό σφάλμα

της γεωαναφοράς. Τα αντίστοιχα, γίνονται και για τα σημεία ελέγχου τα οποία δεν συμμετέχουν στη συνόρθωση του συστήματος. Για το λόγο αυτό, από αυτά προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Το σφάλμα που προκύπτει για τα σημεία ελέγχου, αποτελεί ανεπηρέαστο δείκτη προσαρμογής του μοντέλου στη Φ.Γ.Ε. Μέσω των σφαλμάτων των σημείων ελέγχου, αναδεικνύεται η ακρίβεια του μετασχηματισμού. Ο παραπάνω μετασχηματισμός, μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε κάποια προβολή, είτε σε κάποιο ελλειψοειδές αναφοράς του εκάστοτε συστήματος. Ως επακόλουθο, ως συντεταγμένες του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προβολικές (x,y,z) ή οι γεωδαιτικές (φ,λ,η) των σημείων αντίστοιχα. Ως υψόμετρο μπορεί να θεωρηθεί είτε το ορθομετρικό, είτε το γεωμετρικό. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, ως σύστημα αναφοράς χρησιμοποιείται το ελλειψοειδές του WGS'84, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη εφαρμογή. Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών των πολυωνύμων είναι γεωδαιτικές, αναφερόμενες στο ελλειψοειδές του WGS'84. Γίνεται χρήση του γεωμετρικού υψομέτρου, το οποίο είναι καλύτερης ακρίβειας από το ορθομετρικό, λόγω του προσδιορισμού των συντεταγμένων των φωτοσταθερών με μετρήσεις GPS, στην συγκεκριμένη περίπτωση. Ο μετασχηματισμός εφαρμόστηκε και στην προβολή UTM 34 North του συστήματος αυτού, χρησιμοποιώντας τις προβολικές συντεταγμένες των σημείων και το γεωμετρικό τους υψόμετρο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τα δύο αυτά συστήματα αναφοράς, δεν διαφέρουν. Η διαδικασία υπολογισμού και ο κώδικας στο Matlab παρατίθενται στο παράρτημα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους διάφορους συνδυασμούς φωτοσταθερών-σημείων ελέγχου και συστημάτων αναφοράς φαίνονται παρακάτω, μαζί με τους συντελεστές των πολυωνύμων που προκύπτουν. Σε κάθε εφαρμογή του μετασχηματισμού, χρησιμοποιούνται διαφορετικά φωτοσταθερά, με όσο είναι δυνατόν καλύτερη κατανομή. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται γίνονται διαδοχικά για 6,8,12,16,18,20 και 22 φωτοσταθερά σημεία. Στην εφαρμογή αυτή, χρησιμοποιούνται σημεία ελέγχου και από τις δύο ποιοτικές κατηγορίες, για τα οποία υπολογίζεται ξεχωριστά η ακρίβεια της γεωαναφοράς.

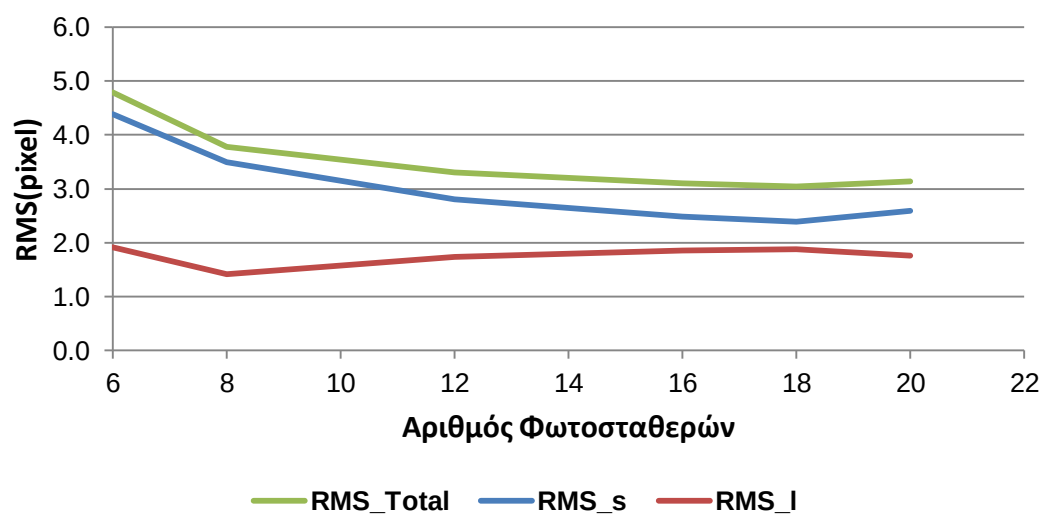
DLT

Διάγραμμα 5.8: RMS Σημείων Ελέγχου από GPS
WGS'84

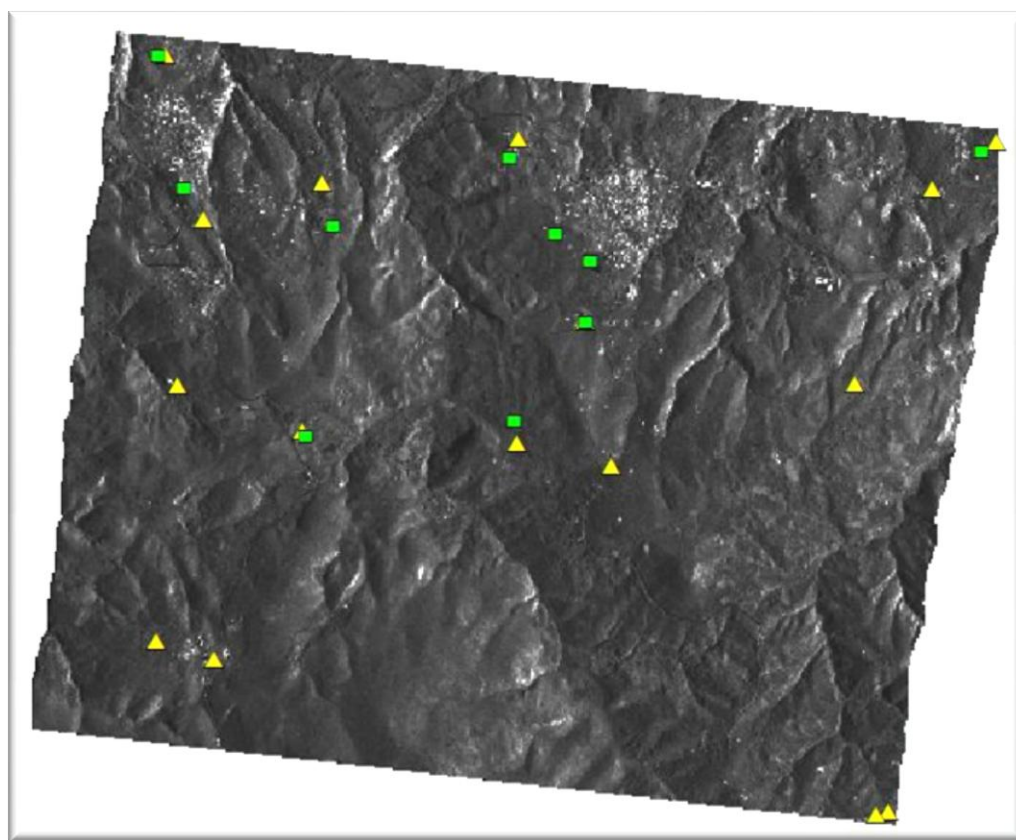


DLT

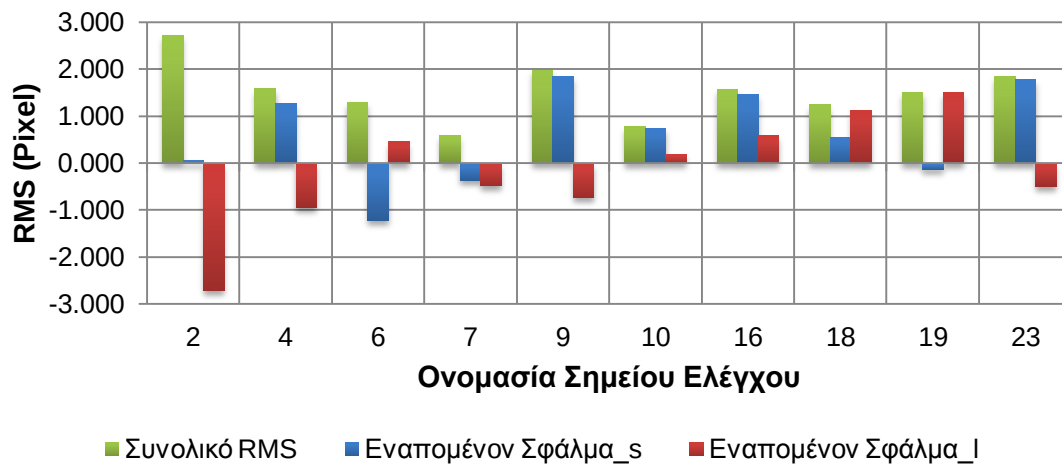
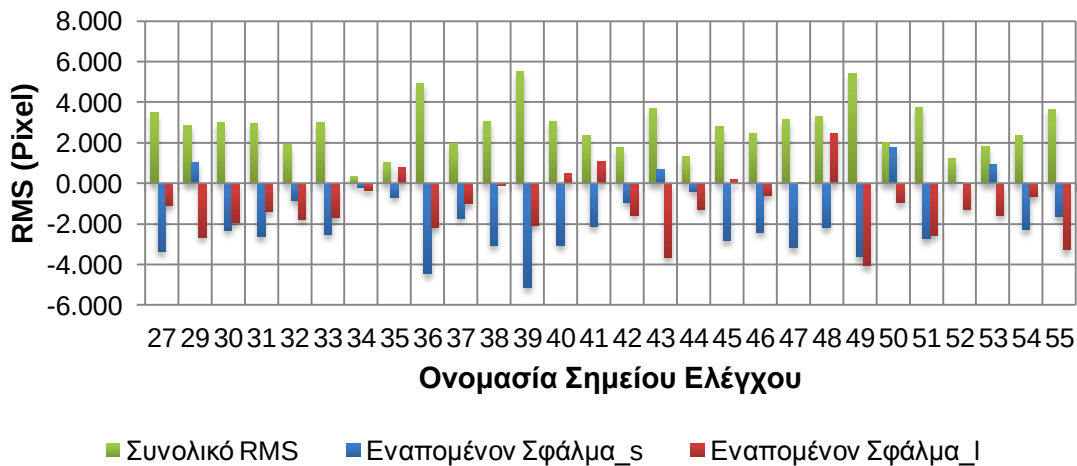
Διάγραμμα 5.9: RMS Σημείων Ελέγχου από
Ορθοφωτογραφία & DTM
WGS'84



Από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι προφανές, πως τα σφάλματα που υπολογίζονται για τα σημεία ελέγχου της δεύτερης κατηγορίας είναι σαφώς πιο αυξημένα από τα προηγούμενα. Παρατηρείται, πως η ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων της δεύτερης κατηγορίας πάνω στην εικόνα, είναι περίπου διπλάσια από αυτήν των σημείων της πρώτης κατηγορίας. Η διαφορά μεταξύ των δύο ποιοτικών κατηγοριών, αναφορικά με την ακρίβειά τους, είναι της τάξης μεγέθους της αβεβαιότητας προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων ελέγχου της δεύτερης κατηγορίας. Το αποτέλεσμα κρίνεται λογικό και αναμενόμενο. Αφού η ακρίβεια μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων αυτών είναι μικρότερη, αναμένεται και χειρότερη ακρίβεια υπολογισμού των νέων συντεταγμένων τους μέσω του μετασχηματισμού. Επίσης, κανένα από αυτά δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό των αγνώστων συντελεστών, έτσι ώστε να επηρεάζει τον υπολογισμό τους. Παρακάτω, παρατίθεται ενδεικτικά, τα εναπομένοντα σφάλματα για κάθε σημείο ελέγχου, και για τις δύο ποιοτικές κατηγορίες, τα οποία προκύπτουν από χρήση 16 φωτοσταθερών της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας, μαζί με την κατανομή τους. Οι αντίστοιχοι πίνακες παρατίθενται στο παράρτημα.



Εικόνα 5.1: Κατανομή φωτοσταθερών (κίτρινο) – σημείων ελέγχου (πράσινο) για γεωαναφορά με DLT.
Χρήση 16 φωτοσταθερών - 14 σημείων ελέγχου.

DLT**Διάγραμμα 5.10: Σημεία Ελέγχου από GPS**
Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS**DLT****Διάγραμμα 5.11: Σημεία Ελέγχου από Ortho-DTM**
Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS

Παρατηρείται, πως τα εναπομένοντα σφάλματα που προκύπτουν για κάθε σημείο, παρουσιάζουν αρκετά καλή ομοιογένεια και εν γένει δεν παρουσιάζονται ακραίες τιμές. Σε συνδυασμό με το μικρό RMS, αυτό σημαίνει, πως η ποιότητα και η αξιοπιστία της γεωαναφοράς εν γένει, είναι καλή. Αυτό ισχύει τόσο για τα σημεία ελέγχου της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας, όσο και αυτά της δεύτερης, όπως προκύπτει από τα αντίστοιχα διαγράμματα. Το εναπομένον

σφάλμα που προκύπτει για αυτό το συνδυασμό φωτοσταθερών-σημείων σύνδεσης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.3: Εναπομένον Σφάλμα DLT Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS WGS'84			
Σημεία Ελέγχου		σ0 (pixel)	RMS (pixel)
GPS	s	1.010	1.192
	l	1.204	1.215
	Συνολικό	1.505	1.615
Ortho+DTM	s	1.705	2.435
	l	1.452	1.834
	Συνολικό	2.240	3.048

Οι συντελεστές των πολυωνύμων οι οποίοι υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία, μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των αριθμού των φωτοσταθερών. Οι διαφορές που προκύπτουν για κάθε διαδοχική επίλυση του συστήματος είναι της τάξης του 10^{-3} και αρκετά μικρότερες. Η λύση του συστήματος είναι δυνατή και οι συντελεστές που υπολογίζονται κάθε φορά, είναι ελαφρά βελτιωμένοι, λόγω της αύξησης του βαθμού ελευθερίας του συστήματος. Γραφικά, αυτό φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Παρατηρείται, πως οι συντελεστές δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και δεν υπάρχει υψηλός δείκτης συσχέτισής τους με το αποτέλεσμα. Αυτό είναι και το επιθυμητό, έτσι ώστε η αλλαγή της τιμής ενός συντελεστή, να μην έχει μεγάλη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Το φάσμα τιμών τους κυμαίνεται μεταξύ του διαστήματος $[-1,1]$ περίπου. Στο παραπάνω διάγραμμα η μεταβολή των τιμών τους δεν είναι διακριτή, λόγω της μικρής τους διαφοροποίησης. Θεωρείται, πως οι καλύτερες τιμές των συντελεστών είναι αυτές οι οποίες προκύπτουν με χρήση των περισσότερων φωτοσταθερών. Αναλυτικά οι τιμές των συντελεστών που προκύπτουν με χρήση 22 φωτοσταθερών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Όνομα Συντελεστή	Τιμές Συντελεστών DLT (22Φωτοσταθερά)
a0	0.146604937348043000
a1	1.082664812302170000
a2	0.049247226338001300
a3	0.000206263494276224
b0	1.121150379055070000
b1	0.169915272200955000
b2	0.000395740383303253
b3	0.000134901564671710
c1	0.000181436494836735
c2	0.000441848387783314
c3	0.000084632387796191

Πίνακας 5.4: Πολυωνυμικοί Συντελεστές DLT

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μετασχηματισμού, γίνεται στο σύστημα της εικόνας. Με βάση τους υπολογισμένους πολυωνυμικούς συντελεστές και τις γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου και των φωτοσταθερών, υπολογίζονται νέες εικονοσυντεταγμένες των σημείων αυτών. Από τη διαφορά τους από τις ήδη γνωστές εικονοσυντεταγμένες των σημείων, προκύπτει η αξιοπιστία της μεθόδου. Συνεπώς, το σφάλμα που προκύπτει κάθε φορά, έχει μονάδες εικονοστοιχείων (pixel). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την χρήση του DLT μετασχηματισμού ως μέθοδο γεωαναφοράς στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ξεκάθαρα, πως η ακρίβεια της μεθόδου κυμαίνεται στην περιοχή των 1-1,5 pixel τόσο κατά τον άξονα των αποστάσεων (s) όσο και κατά τον άξονα των αζιμουθίων (l), με συνολική ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων ελέγχου στην εικόνα λιγότερη από 2,0 pixel. Η ακρίβεια αυτή, προκύπτει με χρήση ικανοποιητικού αριθμού φωτοσταθερών (πάνω από 12), με όσο το

δυνατόν κανονική κατανομή και καλή ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων τους και στα δύο συστήματα (φυσικού χώρου, εικόνας). Παρατηρείται, πως η καλύτερη ακρίβεια, επιτυγχάνεται με χρήση περίπου 16 φωτοσταθερών, χωρίς όμως να μεταβάλλεται ιδιαίτερα με χρήση περισσότερων από 10. Η ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων στην εικόνα, μεταφράζεται σε ακρίβεια εντοπισμού στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του εικονοστοιχείου, σε μονάδες φυσικού χώρου (π.χ. μέτρα). Ενδεικτικά είναι:

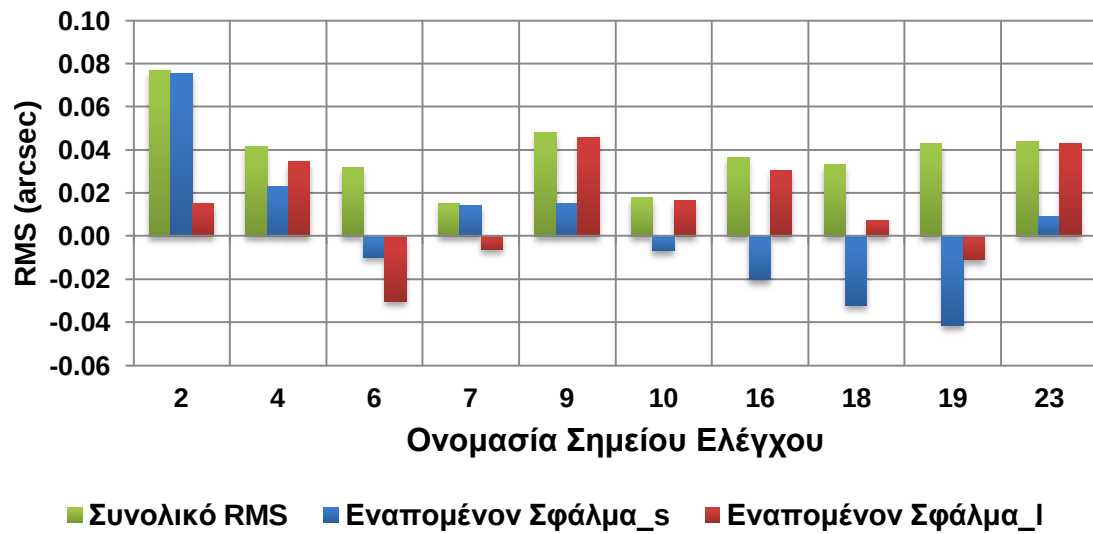
RMS Εικόνα - Φ.Γ.Ε			
	s	l	Συνολικό
Εικόνα (Pixel)	1.40	1.30	1.91
Έδαφος (m)	0.63	1.11	1.27

Πίνακας 5.5: Προσεγγιστική ακρίβεια DLT σε έδαφος – σύστημα εικόνας

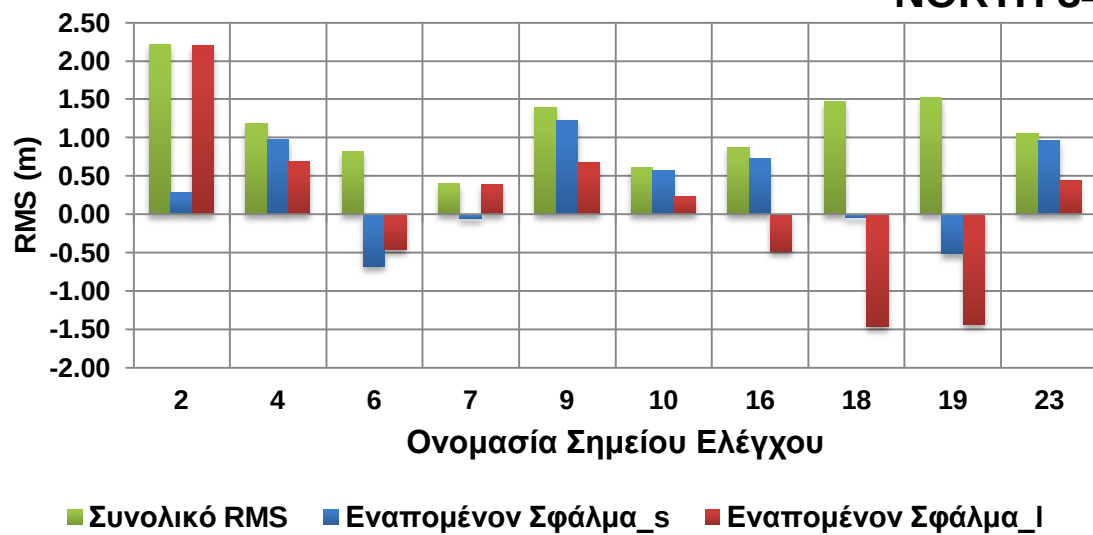
Μετά τον υπολογισμό των συντελεστών των κλασματικών πολυωνύμων, εφαρμόστηκε η αντίστροφη διαδικασία. Ως άγνωστοι παράμετροι του συστήματος, θεωρήθηκαν οι οριζοντιογραφικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου. Ως στοιχεία εισόδου στο σύστημα των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι υπολογισμένοι συντελεστές, οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων και το υψόμετρό τους. Δημιουργήθηκε δηλαδή, ένα σύστημα 2 εξισώσεων με δύο αγνώστους, για το οποίο υπολογίστηκε η μοναδική του λύση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μοντέλο. Έτσι, συγκρίνονται άμεσα οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου στο αντίστοιχο σύστημα αναφοράς και όχι οι εικονοσυντεταγμένες με αναγωγή στη Φ.Γ.Ε, ανάλογα με το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Τα αποτελέσματα από αυτή την διαδικασία ταιριάζουν πλήρως με τα προηγούμενα και επιβεβαιώνουν την ακρίβεια της μεθόδου. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα του ελέγχου για τα σημεία της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας, τόσο στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS'84, όσο και στην προβολή UTM North 34 του WGS'84, όπου τα αποτελέσματα είναι πιο εύκολα αντιληπτά. Οι αντίστοιχοι πίνακες από τους οποίους προκύπτουν τα διαγράμματα παρατίθεται αναλυτικά στο παράρτημα.

DLT

Διάγραμμα 5.13: Σημεία Ελέγχου από GPS (Έδαφος)
Χρήση 16 Φωτοσταθερών

WGS'84**DLT**

Διάγραμμα 5.14: Σημεία Ελέγχου από GPS (Έδαφος)
Χρήση 16 Φωτοσταθερών

**UTM
NORTH 34**

5.3 RPF 2^{ου} Βαθμού

Η επόμενη μέθοδος γεωαναφοράς είναι αυτή με τα κλασματικά πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την DLT μέθοδο (φωτοσταθερά, σημεία ελέγχου). Η μόνη διαφορά είναι, πως σε αυτή την μέθοδο γεωαναφοράς, οι άγνωστοι συντελεστές είναι περισσότεροι, αφού χρησιμοποιούνται και όροι δεύτερου βαθμού για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της εικόνας και της Φ.Γ.Ε. Η αναλυτική μορφή των εξισώσεων του συστήματος φαίνεται παρακάτω (OGC, 1999):

$$s = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \quad , \quad l = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}$$

ή

$$s = \frac{a_1 + a_2Y + a_3X + a_4Z + a_5YX + a_6YZ + a_7XZ + a_8Y^2 + a_9X^2 + a_{10}Z^2}{b_1 + b_2Y + b_3X + b_4Z + b_5YX + b_6YZ + b_7XZ + b_8Y^2 + b_9X^2 + b_{10}Z^2}$$

$$l = \frac{c_1 + c_2Y + c_3X + c_4Z + c_5YX + c_6YZ + c_7XZ + c_8Y^2 + c_9X^2 + c_{10}Z^2}{d_1 + d_2Y + d_3X + d_4Z + d_5YX + d_6YZ + d_7XZ + d_8Y^2 + d_9X^2 + d_{10}Z^2}$$

όπου s, l οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων στην εικόνα, a_i, b_i, c_i, d_i οι άγνωστοι συντελεστές και P_i τα αντίστοιχα πολυώνυμα.

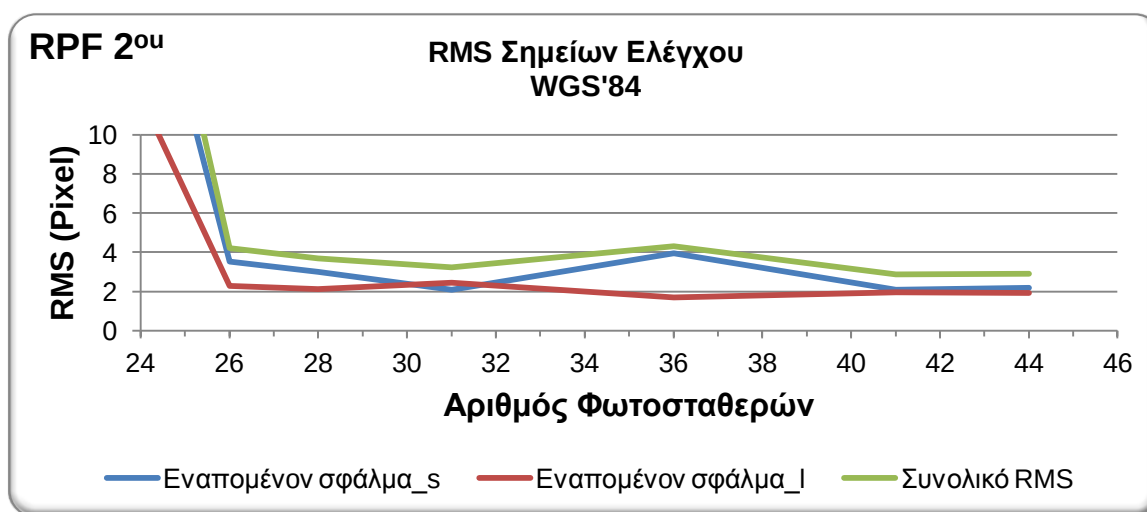
Οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου είναι δέκα για κάθε πολυώνυμο, συνεπώς οι συνολικοί άγνωστοι συντελεστές είναι σαράντα. Για ευκολία στον υπολογισμό των αγνώστων θεωρείται πως οι συντελεστές b_1, d_1 είναι ίσοι με τη μονάδα. Η θεώρηση αυτή δεν προσδίδει σφάλμα στον υπολογισμό των υπόλοιπων συντελεστών, αφού η διόρθωση για αυτή την τιμή αφομοιώνεται από τους άλλους δύο σταθερούς συντελεστές a_1, c_1 . Οπότε, οι τελικοί συνολικοί άγνωστοι είναι 38. Από κάθε φωτοσταθερό προκύπτουν δύο εξισώσεις παρατήρησης, συνεπώς χρειαζόμαστε τουλάχιστον 19 φωτοσταθερά για την επίλυση του συστήματος και κάποια ακόμα για την επίτευξη ικανού βαθμού ελευθερίας της επίλυσης. Στην μέθοδο αυτή, όπως και προηγουμένως, γίνονται διάφορες δοκιμές στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS'84. Η επίλυση του συστήματος και ο υπολογισμός των αγνώστων συντελεστών έγινε στο λογισμικό πακέτο Matlab. Το σύστημα αρχικά μετατρέπεται σε γραμμική μορφή και επιλύεται με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων έτσι ώστε να προκύψουν οι αρχικές τιμές των

συντελεστών. Στη συνέχεια, το σύστημα επιλύεται μη γραμμικά, με αρχικές τιμές αυτές που έχουν προκύψει από πριν. Αυτό γίνεται για να προκύψουν συντελεστές οι οποίοι να περιγράφουν το μαθηματικό μοντέλο με μεγαλύτερη ακρίβεια, έτσι ώστε να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα. Στην ιδανική περίπτωση, οι επαναλήψεις σταματούν όταν οι διορθώσεις των συντελεστών που προκύπτουν κάθε φορά δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση. Από το συνολικό αριθμό σημείων γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων και εικονοσυντεταγμένων, κάποια χρησιμοποιούνται ως φωτοσταθερά και τα υπόλοιπα ως σημεία ελέγχου της γεωαναφοράς. Για κάθε φωτοσταθερό υπολογίζεται το RMS και το *a posteriori* τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης για κάθε άξονα, καθώς και το αντίστοιχο συνολικό. Τα αντίστοιχα σφάλματα υπολογίζονται στη συνέχεια και για τα σημεία ελέγχου. Γίνονται δοκιμές για διαφορετικό αριθμό φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου κάθε φορά με διαφορετική κατανομή.

Το σοβαρότερο πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου, είναι ο προσδιορισμός των αρχικών τιμών των συντελεστών των πολυωνύμων. Λόγω του μεγάλου αριθμού των αγνώστων συντελεστών, ο μη ακριβής προσδιορισμός των προσωρινών τιμών των αγνώστων συντελεστών μέσω της επίλυσης του γραμμικού συστήματος, οδηγεί το σύστημα σε μη αξιόπιστη επίλυση. Το σύστημα των κανονικών εξισώσεων που προκύπτει είναι κατά περίπτωση ασταθές, λόγω του αδύναμου πίνακα σχεδιασμού (A) που προκύπτει από τα δεδομένα. Επίσης, οι τιμές των αγνώστων συντελεστών που προκύπτουν, παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος διακύμανσης, με πολύ μεγάλες και μικρές τιμές. Παράλληλα, κάποιοι από αυτούς παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης με την τελική τιμή της συνάρτησης. Έτσι, το συνολικό σφάλμα προσδιορισμού των σημείων στο σύστημα της εικόνας, είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό που παρατηρείται, είναι η προσαρμογή του μοντέλου ικανοποιητικά γύρω από τα περισσότερα σημεία ελέγχου, για κάποια όμως, το σφάλμα που προκύπτει είναι εξαιρετικά μεγάλο (της τάξης των 10^2 pixel). Αυτό σημαίνει, πως η Φ.Γ.Ε δεν περιγράφεται επαρκώς από το μοντέλο και πως η λύση είναι αναξιόπιστη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, έγινε προσπάθεια εύρεσης προσωρινών τιμών των συντελεστών με διάφορους τρόπους. Παρατηρήθηκε, πως με χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων κανονικοποίησης των συντεταγμένων των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου και συνδυασμό αυτών για την επίλυση του συστήματος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πολύ καλύτερα. Αρχικά, υπολογίζονται οι προσωρινές τιμές των αγνώστων συντελεστών με μια συγκεκριμένη κανονικοποίηση των δεδομένων, μέσω επίλυσης του γραμμικού συστήματος. Στη συνέχεια, τα δεδομένα κανονικοποιούνται βάσει της μεθόδου που αναφέρεται παραπάνω. Το μη γραμμικό σύστημα επιλύεται για τις νέες κανονικοποιημένες τιμές των δεδομένων με προσωρινές τιμές των αγνώστων συντελεστών αυτές που υπολογίστηκαν από πριν, με διαφορετική όμως

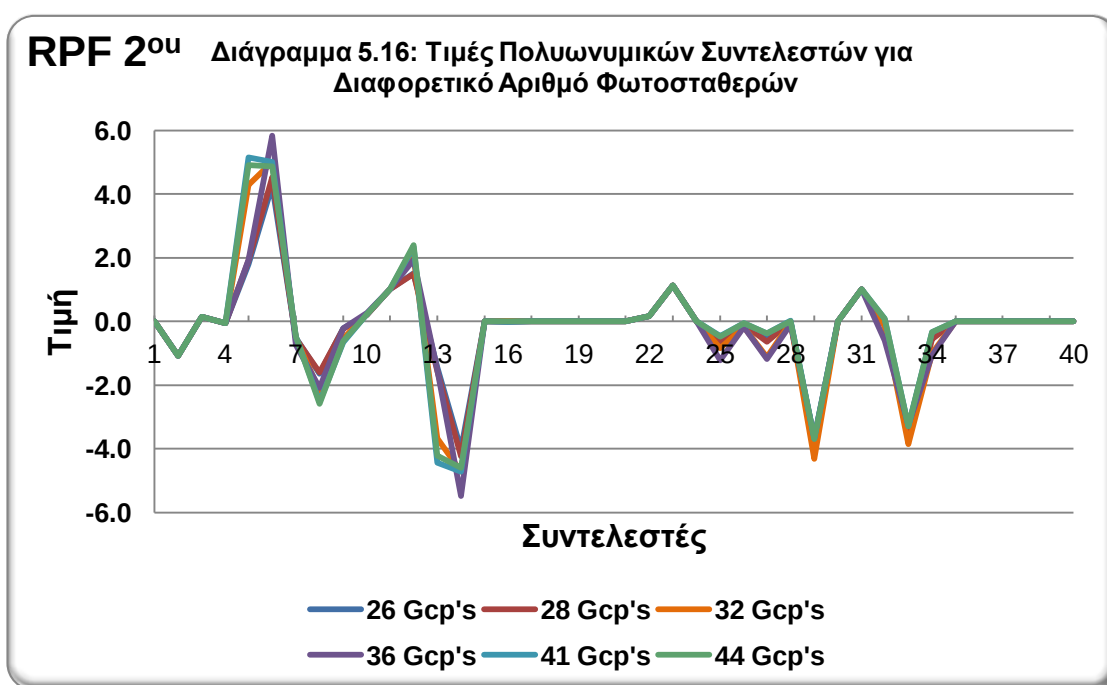
κανονικοποίηση των δεδομένων. Αναφέρεται, πως αυτή η διαδικασία δεν αποτελεί κανόνα στην αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων και απλά χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται χρήση αυτής της τεχνικής καθώς παρατηρείται, πως τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πολύ πιο ικανοποιητικά. Από τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο, πως ο προσδιορισμός αρχικών τιμών πολύ κοντά στις πραγματικές είναι μείζονος σημασίας. Οι προσεγγιστικές τιμές που απαιτούνται πρέπει να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές, έτσι ώστε το σύστημα να επέρχεται σε σύγκλιση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί από χρήση μεγάλου αριθμού φωτοσταθερών, της καλύτερης δυνατής ακρίβειας.

Παρακάτω φαίνεται το εναπομένον σφάλμα των σημείων ελέγχου και το συνολικό RMS, για διαφορετικό συνδυασμό φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου κάθε φορά. Σημειώνεται, πως τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιούνται έχουν προκύψει και από τις δύο ποιοτικές κατηγορίες. Αντίστοιχα, τα σημεία ελέγχου, είναι μόνο της δεύτερης κατηγορίας.

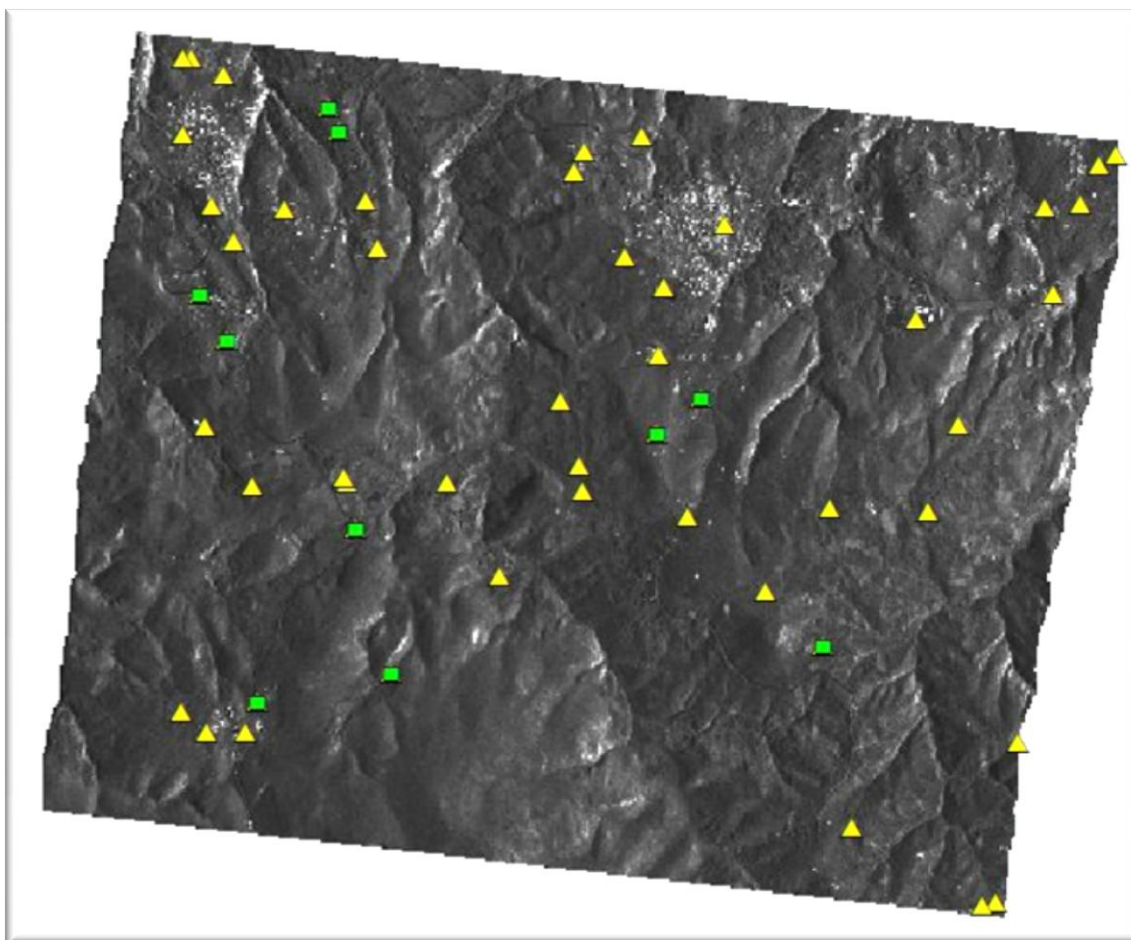


Παρατηρείται, πως για να προκύψουν καλά αποτελέσματα και το σύστημα να συγκλίνει σε μία τελική λύση, χρειάζονται τουλάχιστον 26 φωτοσταθερά καλά κατανομημένα πάνω στην εικόνα. Αν και με τη χρήση 26 φωτοσταθερών προέκυψαν καλά αποτελέσματα, στη συνέχεια, η λύση δεν ήταν τόσο καλή και παρατηρήθηκε ανομοιομορφία στα τελικά αποτελέσματα. Ωστόσο, με αύξηση των φωτοσταθερών το σύστημα έγινε πιο σταθερό και οι συντελεστές δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες διαφορές. Παρόλο που οι συνολικοί άγνωστοι είναι 38, απαιτείται βαθμός ελευθερίας του συστήματος μεγαλύτερος από 14. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης πολλών παραμέτρων στο σύστημα, των οποίων οι τιμές είναι αρχικά άγνωστες και για τις οποίες πρέπει να υπάρξει μια αρχική εκτίμηση. Με χρήση λιγότερων φωτοσταθερών το σύστημα δεν συγκλίνει και τα

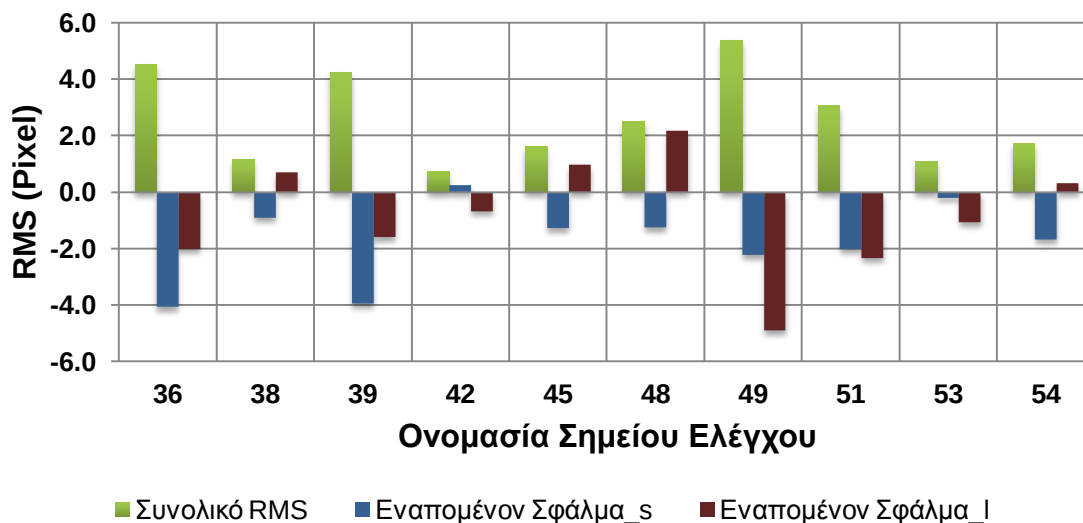
αποτελέσματα που προκύπτουν εμπεριέχουν πολύ μεγάλο σφάλμα. Επίσης, οι τιμές των συντελεστών παρουσιάζουν μεγάλο εύρος διακύμανσης και μεγάλο βαθμό συσχέτισης με το τελικό αποτέλεσμα. Τελικά, οι συντελεστές που υπολογίζονται με χρήση διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών κάθε φορά, παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή και όχι ιδιαίτερες αποκλίσεις μεταξύ τους, ιδιαίτερα με χρήση πάνω από 40 φωτοσταθερών. Λόγω των περισσότερων παραμέτρων που υπολογίζονται σχετικά με τον DLT μετασχηματισμό, οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς με την αύξηση των παρατηρήσεων (φωτοσταθερών) η επίλυση του συστήματος δυναμώνει, μέσω της αύξησης του βαθμού ελευθερίας. Επίσης, ενδέχεται οι αποκλίσεις των τιμών των συντελεστών να οφείλονται στο γεγονός πως στη συνόρθωση χρησιμοποιούνται φωτοσταθερά και από τις δύο ποιοτικές κατηγορίες. Αρχικά, χρησιμοποιούνται μόνο φωτοσταθερά από την πρώτη ποιοτική κατηγορία και κάθε φορά προστίθενται φωτοσταθερά της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας. Λόγω της διαφοράς αυτής στην ποιότητα μέτρησής τους, οι συντελεστές που υπολογίζονται κάθε φορά, επηρεάζονται και σε μεγαλύτερο βαθμό. Για το λόγο αυτό παρατηρείται αύξηση του σφάλματος της γεωαναφοράς κατά τη χρήση 34 με 38 φωτοσταθερών. Με την εισαγωγή στο σύστημα αρκετών φωτοσταθερών της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας, η επίλυση συγκλίνει προς μια πιο σταθερή μορφή. Συνεπώς τέτοιες διαφορές είναι ικανοποιητικές, για τα συγκεκριμένα δεδομένα, καθώς η γενική μορφή του μοντέλου δεν αλλάζει ιδιαίτερα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Παρακάτω, φαίνονται τα εναπομένοντα σφάλματα κάθε σημείου, με χρήση 44 φωτοσταθερών, καθώς και η κατανομή τους. Παρατηρείται, πως τα περισσότερα σημεία έχουν χαμηλά εναπομένοντα σφάλματα, κάποια όμως παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερα. Δηλαδή, τα εναπομένοντα σφάλματα από τα οποία προκύπτει το τελικό RMS της μεθόδου, παρουσιάζουν μια μικρή διακύμανση. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει ακριβώς της σχέση μεταξύ Φ.Γ.Ε και εικόνας για τις θέσεις των σημείων αυτών. Χρήση περισσότερων φωτοσταθερών με κανονική κατανομή ενδέχεται να μειώσει τις διαφορές αυτές και τα σφάλματα προσδιορισμού της θέσης των σημείων να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία και μικρότερο RMS.



Εικόνα 5.2: Κατανομή φωτοσταθερών (κίτρινο)–σημείων ελέγχου (πράσινο) για γεωαναφορά με RPF2^{0u} βαθμού. Χρήση 44 φωτοσταθερών, 10 σημείων ελέγχου.

RPF 2^{ου}**Διάγραμμα 5.17: RMS Σημείων Ελέγχου
Χρήση 44 Φωτοσταθερών**

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται και σε αυτήν την περίπτωση στο σύστημα της εικόνας. Αντίστοιχα με προηγούμενως, τα σφάλματα από το σύστημα της εικόνας μετατρέπονται σε σφάλματα στη Φ.Γ.Ε βάσει του μεγέθους του εικονοστοιχείου. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν την περίπτωση χρήσης 44 φωτοσταθερών, όπου παρουσιάζεται το μικρότερο RMS για τα σημεία ελέγχου. Με χρήση περισσότερων φωτοσταθερών και με καλή κατανομή, ενδέχεται να το συνολικό RMS να μειωθεί περαιτέρω.

RMS Εικόνα - Φ.Γ.Ε			
	s	l	Συνολικό
Εικόνα (Pixel)	2.00	2.00	2.83
Έδαφος (m)	0.90	1.70	1.92

Πίνακας 5.6: Προσεγγιστική ακρίβεια γεωαναφοράς με RPF2^{ου} βαθμού σε έδαφος – σύστημα εικόνας.

Οι τελικές τιμές των συντελεστών, θεωρείται πως είναι αυτές που προκύπτουν από τη χρήση 44 φωτοσταθερών, όπου παρουσιάζεται και το μικρότερο RMS. Οι τιμές τους αναλυτικά φαίνονται στο παράρτημα.

5.4 RPF 3^{ου} Βαθμού

Η μέθοδος που ακολουθείται στη συνέχεια, είναι με τα κλασματικά πολυώνυμα 3^{ου} βαθμού. Η αναλυτική μορφή των εξισώσεων του συστήματος φαίνεται παρακάτω:

$$s = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \quad , \quad l = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}$$

όπου τα πολυώνυμα P_i είναι:

$$P_1(X, Y, Z) = a_1 + a_2Y + a_3X + a_4Z + a_5YX + a_6YZ + a_7XZ + a_8Y^2 + a_9X^2 + a_{10}Z^2 + a_{11}XYZ + a_{12}Y^3 + a_{13}YX^2 + a_{14}YZ^2 + a_{15}Y^2X + a_{16}X^3 + a_{17}XZ^2 + a_{18}Y^2Z + a_{19}X^2Z + a_{20}Z^3$$

$$P_2(X, Y, Z) = b_1 + b_2Y + b_3X + b_4Z + b_5YX + b_6YZ + b_7XZ + b_8Y^2 + b_9X^2 + b_{10}Z^2 + b_{11}XYZ + b_{12}Y^3 + b_{13}YX^2 + b_{14}YZ^2 + b_{15}Y^2X + b_{16}X^3 + b_{17}XZ^2 + b_{18}Y^2Z + b_{19}X^2Z + b_{20}Z^3$$

$$P_3(X, Y, Z) = c_1 + c_2Y + c_3X + c_4Z + c_5YX + c_6YZ + c_7XZ + c_8Y^2 + c_9X^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}Y^3 + c_{13}YX^2 + c_{14}YZ^2 + c_{15}Y^2X + c_{16}X^3 + c_{17}XZ^2 + c_{18}Y^2Z + c_{19}X^2Z + c_{20}Z^3$$

$$P_4(X, Y, Z) = d_1 + d_2Y + d_3X + d_4Z + d_5YX + d_6YZ + d_7XZ + d_8Y^2 + d_9X^2 + d_{10}Z^2 + d_{11}XYZ + d_{12}Y^3 + d_{13}YX^2 + d_{14}YZ^2 + d_{15}Y^2X + d_{16}X^3 + d_{17}XZ^2 + d_{18}Y^2Z + d_{19}X^2Z + d_{20}Z^3$$

Οι άγνωστοι συντελεστές που πρέπει να υπολογισθούν είναι 80, συνεπώς χρειάζονται τουλάχιστον 40 φωτοσταθερά σημεία για τον υπολογισμό τους. Θεωρείται και εδώ, όπως και πριν, πως οι συντελεστές b_1, d_1 είναι ίσοι με τη μονάδα. Τελικά ο συνολικός αριθμός των αγνώστων που προκύπτει είναι ίσος με 78. Οπότε χρειάζονται τουλάχιστον 39 φωτοσταθερά μαζί με κάποια ακόμα για να γίνει συνόρθωση. Παρατηρείται πως για αυτήν τη μέθοδο απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών. Αυτός είναι και ο λόγος όπου λήφθηκαν φωτοσταθερά από ορθοφωτογραφία και ψηφιακό μοντέλο εδάφους, καθώς η μέτρηση μεγάλου αριθμού φωτοσταθερών στο ύπαιθρο με GPS ήταν δύσκολη και χρονοβόρα, λόγω τεχνικών δυσκολιών. Συνεπώς, στην παρούσα μέθοδο χρησιμοποιούνται φωτοσταθερά και από τις δύο ποιοτικές κατηγορίες. Η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών των πολυωνύμων είναι η ίδια με αυτήν που ακολουθείται για τα κλασματικά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού. Δηλαδή, επιλύεται το

παραπάνω σύστημα με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων για γραμμικά συστήματα και στη συνέχεια οι τιμές των συντελεστών των πολυωνύμων που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές στην επίλυση του συστήματος μη γραμμικά, με τις έμμεσες παρατηρήσεις.

Κατά τη εφαρμογή αυτής της μεθόδου γεωαναφοράς, παρατηρήθηκε αδυναμία επίλυσης του συστήματος των κανονικών εξισώσεων. Λόγω της υπερπαραμετροποίησης του συστήματος, ο πίνακας σχεδιασμού του συστήματος προέκυψε αδύναμος. Περιείχε στοιχεία τα οποία διέφεραν κατά πολλές τάξεις μεγέθους, με αποτέλεσμα η αντιστροφή του να γίνεται κάθε φορά με κάποιο ποσοστό σφάλματος. Ως αποτέλεσμα, οι υπολογιζόμενες διορθώσεις περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό σφάλματος. Το σύστημα δηλαδή, οδηγούνταν σε λάθος σύγκλιση. Με δοκιμές για φωτοσταθερά λιγότερα από 44 το σύστημα δεν σύγκλινε καθόλου και ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων ήταν αδύνατος. Με μεγαλύτερο αριθμό φωτοσταθερών οι τιμές των συντελεστών που προκύπτουν κάθε φορά έχουν πολύ ευρύ φάσμα τιμών με πολύ μεγάλες και αντίστοιχα μικρές τιμές (της τάξης του 10^{20}). Σε κάθε δοκιμή με διαφορετικό αριθμό φωτοσταθερών, παρουσιάζονται πολύ μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών τους και δεν υπάρχει σύγκλισή τους ακόμα και μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται κάθε φορά. Παρατηρείται, πως με αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών οι τιμές των συντελεστών βελτιώνονται σημαντικά, εμπίπτοντας σε πολύ μικρότερο εύρος τιμών. Με χρήση όλων των σημείων γνωστών συντεταγμένων ως φωτοσταθερά, οι τιμές που προέκυψαν είναι πολύ κοντά στις αναμενόμενες. Λόγω της μη ύπαρξης ικανοποιητικού αριθμού σημείων ελέγχου, δεν έγινε δυνατή η ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Συμπερασματικά, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου με ικανοποιητικά αποτελέσματα, απαιτείται αρκετά μεγαλύτερος αριθμός φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου από αυτά που διατίθενται στην συγκεκριμένη εφαρμογή (55). Με εισαγωγή στο σύστημα παραπάνω εξισώσεων παρατήρησης, τα αποτελέσματα αναμένεται να είναι πολύ καλύτερα, αντίστοιχα των παραπάνω μεθόδων.

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

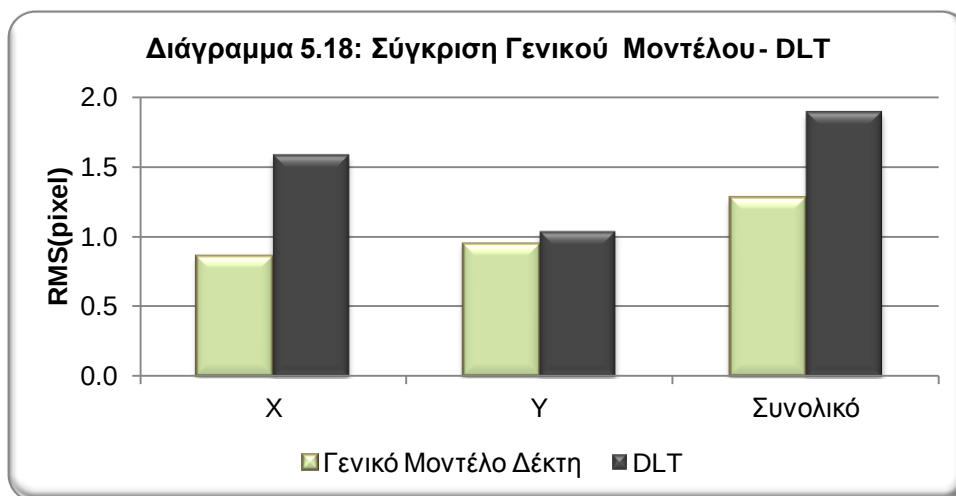
Στις προηγούμενες παραγράφους, γίνεται εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων γεωαναφοράς με διαφορετικά κάθε φορά αποτελέσματα. Η ακρίβεια της γεωαναφοράς, κάθε φορά όμως, προκύπτει για διαφορετικό αριθμό και ποιότητα σημείων ελέγχου. Έτσι, γίνεται διερεύνηση της καλύτερης δυνατής ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί με κάθε μέθοδο, βάσει των διατιθέμενων στοιχείων. Για να γίνει αξιόπιστη σύγκριση των παραπάνω μεθόδων γεωαναφοράς, πρέπει ο έλεγχος της ακρίβειας, να γίνεται με χρήση των ίδιων σημείων ελέγχου, δηλαδή να υπάρχει κοινή βάση αναφοράς. Επειδή κατά τη διερεύνηση των μεθόδων απαιτείται διαρκώς και μεγαλύτερος αριθμός φωτοσταθερών, τα διατιθέμενα σημεία ελέγχου μειώνονται. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη συνολική σύγκριση όλων των μεθόδων γεωαναφοράς, είναι τα (10) σημεία ελέγχου από τα οποία προέκυψε και η ακρίβεια του μοντέλου RPF 2^{ου} βαθμού. Αυτά τα σημεία ελέγχου έχουν εξαχθεί από τα δεδομένα (ορθοφωτογραφίες και DTM) του ΟΚΧΕ. Επίσης, για να είναι πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα σχετικά με την σύγκριση των παραπάνω μεθόδων, χρησιμοποιούνται τα ίδια φωτοσταθερά και στις τρεις μεθόδους γεωαναφοράς, δηλαδή 44 φωτοσταθερά σημεία.

	RMS (pixel)		
	X	Y	Συνολικό
Φυσικό Μοντέλο	3.029	2.043	3.654
DLT	3.057	1.890	3.595
RPF2 ^{ου}	2.186	1.923	2.911

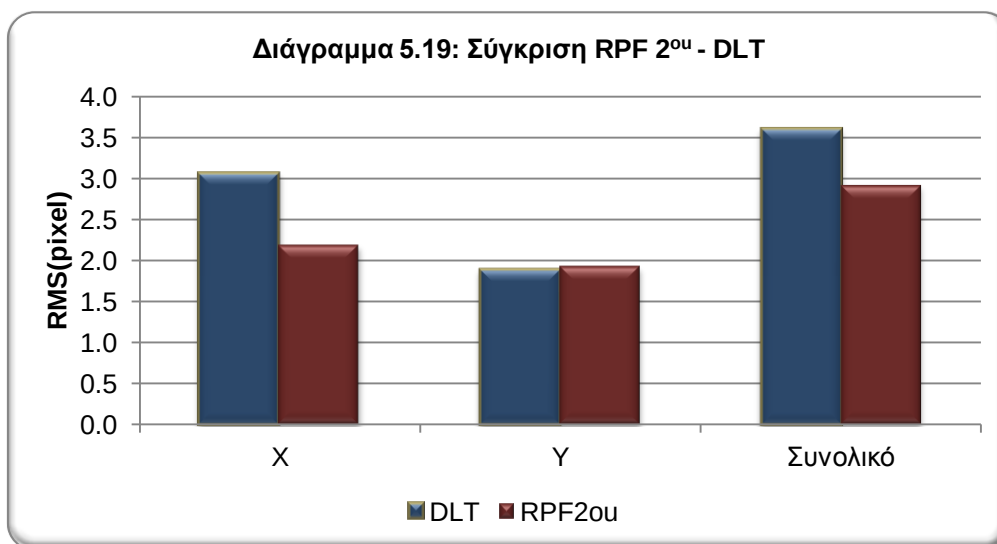
Πίνακας 5.7: Σύγκριση μεθόδων για ίδια φωτοσταθερά – σημεία ελέγχου.

Από την παραπάνω σύγκριση, παρατηρείται, πως η καλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με την χρήση των κλασματικών πολυωνύμων 2^{ου} βαθμού. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί και να ληφθεί σοβαρά υπόψη, πως η χρήση τόσο μεγάλου αριθμού φωτοσταθερών στη γεωαναφορά με το γενικό μοντέλο του δέκτη, εισάγει σφάλματα στο σύστημα αλλοιώνοντας την ποιότητα την γεωαναφοράς και τα οποία μπορούν να αποφευχθούν με χρήση λιγότερων φωτοσταθερών. Για να συγκριθούν οι μέθοδοι μεταξύ τους με μεγαλύτερη αξιοπιστία, πρέπει να γίνει χρήση φωτοσταθερών ίδιας ποιότητας, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι εφικτό. Για εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων αυτό που γίνεται, είναι η σύγκριση ανά δύο των μεθόδων. Δηλαδή, συγκρίνεται το μοντέλο του δέκτη με τον DLT μετασχηματισμό και στη συνέχεια ο DLT με τα RPF 2^{ου} βαθμού.

Η σύγκριση DLT και γενικού μοντέλου δέκτη γίνεται χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου μόνο από την πρώτη ποιοτική κατηγορία, δηλαδή από μετρήσεις GPS. Η σύγκριση γίνεται χρησιμοποιώντας 12 ίδια φωτοσταθερά και τα υπόλοιπα 14 ως σημεία ελέγχου. Επισημαίνεται, πως και για τις δύο μεθόδους, η ακρίβεια δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα, με χρήση περισσότερων φωτοσταθερών. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Στη συνέχεια, συγκρίνεται ο μετασχηματισμός DLT με τον RPF 2^{ου} βαθμού. Ξανά όπως και πριν χρησιμοποιούνται ίδια φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου. Χρησιμοποιούνται 44 φωτοσταθερά και από τις δύο ποιοτικές κατηγορίες και 10 σημεία ελέγχου, μόνο από την δεύτερη, δηλαδή από ορθοφωτογραφία και DTM. Και για τις δύο μεθόδους αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών, σημαίνει και αύξηση του βαθμού ελευθερίας του συστήματος, οπότε η λύση είναι καλύτερη.



Από τα παραπάνω φαίνεται ξεκάθαρα, με το γενικό μοντέλο του δέκτη και τα κλασματικά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού, η ακρίβεια της γεωαναφοράς που προκύπτει, είναι καλύτερη από αυτή που επιτυγχάνεται με τον DLT μετασχηματισμό. Ωστόσο, το ποια από τις δύο είναι καλύτερη, δεν μπορεί να ειπωθεί με σαφήνεια, καθώς δεν υπάρχει μια κοινή βάση αναφοράς.

Παρακάτω παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας, όπου φαίνεται η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με κάθε μέθοδο, για διαφορετικό αριθμό και ποιότητα φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου.

RMS (Pixel)					
	Check Points	Control Points	X	Y	TOTAL
Γενικό Μοντέλο Δέκτη	GPS(14)	GPS(12)	0.852	0.943	1.271
	ORTHO(10)	GPS(12)	3.029	2.043	3.654
	ORTHO(10)	ORTHO+GPS(44)	2.774	1.947	3.389
DLT	GPS(14)	GPS(12)	1.583	1.037	1.893
	ORTHO(10)	GPS(12)	4.136	1.970	4.581
	ORTHO(10)	ORTHO+GPS(44)	3.057	1.890	3.595
RPF 2ου	ORTHO(10)	ORTHO+GPS(44)	2.186	1.923	2.911

Πίνακας 5.8: Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων όλων των μεθόδων για διαφορετικούς συνδυασμούς φωτοσταθερών – σημείων ελέγχου.

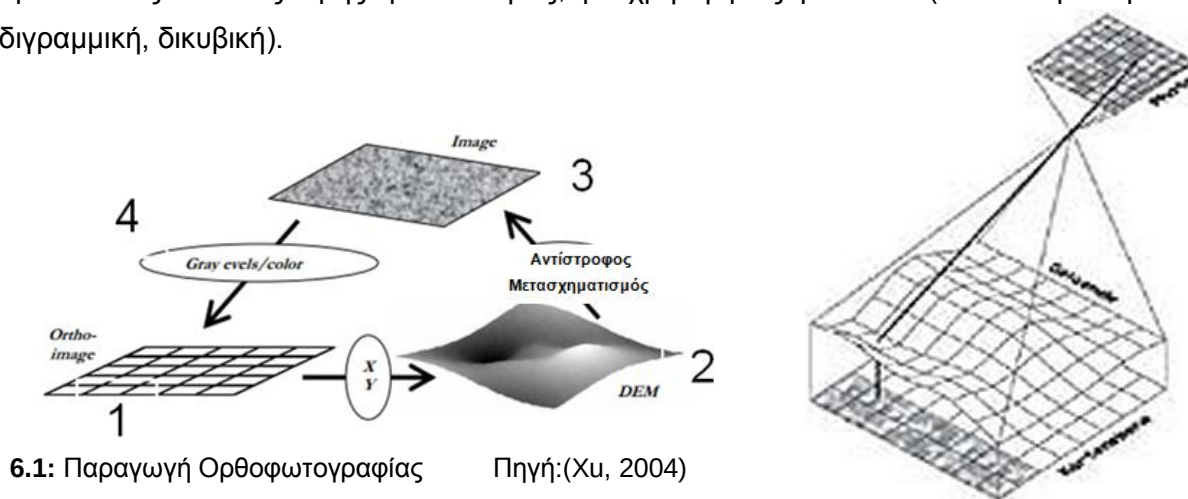
Από την εξέταση των αποτελεσμάτων, που παρατίθενται στον πίνακα 5.8, προκύπτει σαφώς ότι η αύξηση του σφάλματος με τη χρήση των 44 φωτοσταθερών και του γενικού μοντέλου του δέκτη οφείλεται στην αβεβαιότητα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας. Έτσι, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται από τη χρήση των κλασματικών πολυωνύμων δευτέρου βαθμού και του γενικού μοντέλου του δέκτη είναι αρκετά κοντά. Πάντως, και για τις τρεις μεθόδους, η διαφορά στο σφάλμα που προκύπτει στην σύγκριση με χρήση 44 φωτοσταθερών, είναι πολύ μικρή, της τάξης του 0,5pixel. Αν ληφθεί υπόψη, πως η ακρίβεια σκόπευσης των σημείων πάνω στην εικόνα είναι χειρότερη από ένα pixel, και πως τα σημεία ελέγχου δεν είναι πάρα πολλά, μπορεί να θεωρηθεί, πως οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζουν παρόμοια ακρίβεια γεωαναφοράς.

6. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑΣ

6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το τελευταίο στάδιο της εφαρμογής, είναι η παραγωγή ορθοεικόνας από την ψηφιακή απεικόνιση SAR. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτήν για τις οπτικές εικόνες. Το μόνο που διαφέρει είναι το γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη που χρησιμοποιείται. Όπως στις αεροφωτογραφίες χρησιμοποιείται η συνθήκη συγγραμμικότητας, στις απεικονίσεις SAR γίνεται χρήση του αλγόριθμου Range – Doppler, όπως αυτός περιγράφεται σε παραπάνω κεφάλαιο. Αντίστοιχα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα των οποίων οι παράμετροι υπολογίστηκαν παραπάνω. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε παραγωγή ορθοεικόνας μόνο με χρήση του γενικού γεωμετρικού μοντέλου του δέκτη. Αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται μετά τη διαδικασία της γεωαναφοράς είναι η εξής:

- Καθορισμός των ορίων σύνταξης της ορθοεικόνας.
- Καθορισμός μεγέθους εδαφοψηφίδας του καννάβου από τον οποίο απαρτίζεται η ορθοεικόνα.
- Καθορισμός των οριζοντιογραφικών γεωδαιτικών συντεταγμένων του κέντρου κάθε φατνίου του καννάβου/εδαφοψηφίδας
- Παρεμβολή στο DTM για προσδιορισμό του υψομέτρου καθενός από τα παραπάνω σημεία.
- Αντίστροφη χρήση του αλγορίθμου Range – Doppler για εύρεση των εικονοσυντεταγμένων, που αντιστοιχούν σε κάθε φατνίο του καννάβου της ορθοεικόνας..
- Ραδιομετρική παρεμβολή στην εικόνα SAR για απόδοση σε κάθε φατνίο του καννάβου της ορθοεικόνας κάποιας τιμής φωτεινότητας, με χρήση μιας μεθόδου (κοντινότερου γείτονα, διγραμμική, δικυβική).



Μέχρι στιγμής, περιγράφηκε ο τρόπος με τον οποίο η Φ.Γ.Ε συνδέεται με το σύστημα της εικόνας. Σκοπός της ορθοαναγωγής είναι η μετατροπή της αρχικής εικόνας σε ορθή προβολή σε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Λόγω όμως της γεωμετρίας λήψης, παρουσιάζονται διαστροφές στην αρχική εικόνα οι οποίες πρέπει να διορθωθούν. Αυτό γίνεται με την αντίστροφη διαδικασία, μέσω της ορθοαναγωγής. Δηλαδή για ένα σημείο του οποίου έχει υπολογισθεί η θέση σε ένα ελλειψοειδές αναφοράς, προσδιορίζεται η θέση του στην εικόνα SAR με διόρθωση των διαστροφών αυτών. Αυτό γίνεται με χρήση ενός ενιαίου υψόμετρου της περιοχής ή ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση, δεν εξαλείφονται τελείως οι διαστροφές, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη εναλλαγή υψόμετρου και οι παραμορφώσεις παραμένουν στην τελική εικόνα.

6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΟΡΘΟΑΝΑΓΩΓΗΣ

Παράγονται ορθοεικόνες για τα τρία διαφορετικά συστήματα αναφοράς, στα οποία είναι γνωστές οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών. Επίσης, παράγονται ορθοφωτογραφίες χωρίς χρήση φωτοσταθερών, με χρήση των παραμέτρων της αρχικής εικόνας, όπως παραδίδονται από την εταιρία. Η τελική ακρίβεια της ορθοφωτογραφίας εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια με την οποία ο δορυφόρος συλλέγει τα δεδομένα (δηλαδή από την ακρίβεια της αρχικής εικόνας SAR) και από την ποιότητα της γεωαναφοράς. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η ποιότητα του DTM. Λόγω του γεωμετρικού μοντέλου λήψης των δεδομένων από το δορυφόρο, η ακρίβεια των υψομέτρων και η πυκνότητα των σημείων έχει πολύ μεγάλη επίδραση στο τελικό προϊόν. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ορθοαναγωγή είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό των υψομέτρων των φωτοσταθερών της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας. Ο καθορισμός του μεγέθους της εδαφοψηφίδας γίνεται βάσει της ακρίβειας της αρχικής απεικόνισης SAR. Αν θεωρήσουμε πως η αρχική εικόνα έχει ακρίβεια γεωαναφοράς λίγο χειρότερη από 1m, τότε η κλίμακά της είναι περίπου 1:5000 και συνεπώς το μέγεθος της εδαφοψηφίδας ίσο με 0,5m. Για το βήμα καννάβου των σημείων για τα οποία θα υπολογιστούν οι επίπεδες γεωδαιτικές συντεταγμένες, τίθεται μια ενδεικτική τιμή των 200 pixel. Το διάστημα αυτό για το οποίο θα γίνει παρεμβολή για τον προσδιορισμό των επίπεδων γεωδαιτικών συντεταγμένων των εικονοστοιχείων είναι αυθαίρετα επιλεγμένο και το μέγεθός του δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού προϊόντος.

Η πυκνότητα του DTM πρέπει να είναι 2-10mm στο σύστημα της εικόνας επειδή η περιοχή έχει έντονο ανάγλυφο. Αυτή η πυκνότητα μεταφράζεται σε 10-50m στο έδαφος. Το DTM το οποίο

χρησιμοποιείται έχει σημεία υψομετρικής πληροφορίας ανά 10 m, συνεπώς είναι κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η υψομετρική του ακρίβεια είναι περίπου 1m, η οποία είναι ικανοποιητική, αφού είναι της τάξης μεγέθους της ακρίβειας της αρχικής εικόνας. Ως μέθοδος παρεμβολής για τον προσδιορισμό της τιμής φωτεινότητας για κάθε εικονοστοιχείο χρησιμοποιείται αυτή του κοντινότερου γείτονα και η διγραμμική. Η δικυβική καλό είναι να αποφεύγεται στα προϊόντα SAR.

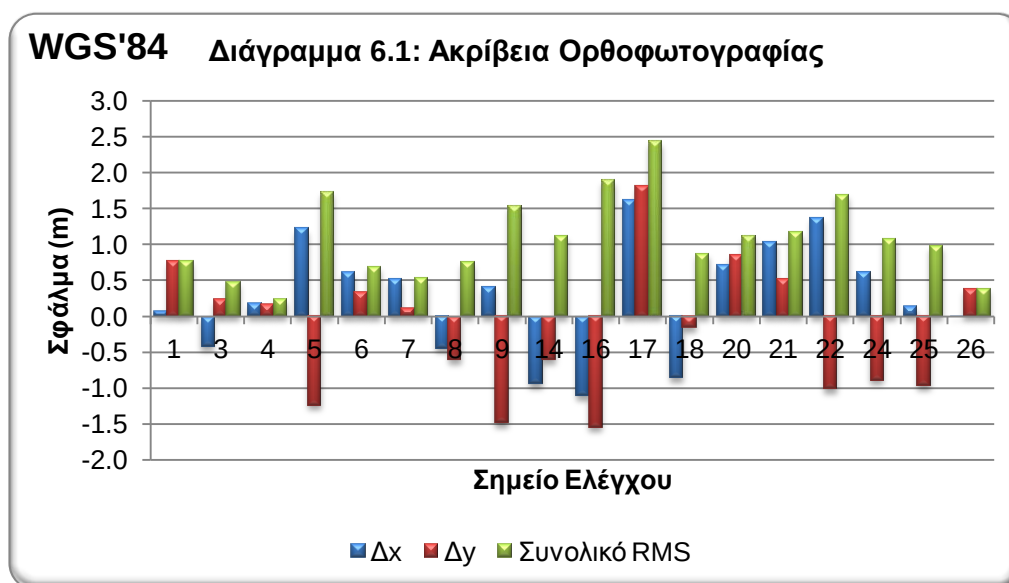
Η παραγωγή της ορθοεικόνας με χρήση του γενικού μοντέλου του δέκτη γίνεται στο περιβάλλον του Erdas Imagine Orthoradar στο ίδιο παράθυρο όπου γίνεται και η γεωαναφορά της εικόνας. Στο παράθυρο Geometric Model Properties και στην καρτέλα General επιλέγεται το ψηφιακό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και η εντολή Orthorectify. Στην καρτέλα Sparse Map Grid επιλέγεται το βήμα καννάβου των σημείων για τα οποία θα υπολογιστούν οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Στη συνέχεια από το παράθυρο Geometric Model επιλέγεται η εντολή Resample και ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο. Εδώ επιλέγεται η μέθοδος ραδιομετρικής παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί, το μέγεθος των εικονοστοιχείων και για τις δύο διευθύνσεις καθώς και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των άκρων της ορθοεικόνας. Καθορίζοντας τις απαιτούμενες παραπάνω παραμέτρους η διαδικασία της ορθοαναγωγής ολοκληρώνεται με την εντολή OK. Η ορθοεικόνα παράγεται σε μορφή .img. Για μετατροπή της σε άλλη μορφή συμβατή με άλλα λογισμικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καρτέλα Data Preparation της κεντρικής εργαλειοθήκης του Erdas.

6.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Ορθοαναγωγής - Αξιολόγηση

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας παραγωγής της ορθοεικόνας γίνεται έλεγχος της ορθοαναγωγής. Γίνεται δηλαδή, ανάδειξη της ποιότητας της ορθοεικόνας και της αξιοπιστίας της. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, οπτικά ή μετρητικά.

Η μια μέθοδος που ακολουθείται για έλεγχο της αξιοπιστίας της ορθοεικόνας είναι ο προσδιορισμός των οριζοντιογραφικών γεωδαιτικών συντεταγμένων σημείων, για τα οποία είναι ήδη γνωστές οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να γίνει για το σύνολο των σημείων γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, όπως έχουν προκύψει παραπάνω. Ωστόσο, πιο ασφαλή συμπεράσματα εξάγονται με τη χρήση των σημείων της πρώτης ποιοτικής κατηγορίας, των οποίων οι συντεταγμένες έχουν υπολογισθεί με GPS και είναι πολύ καλής ακρίβειας. Έτσι, το εναπομένον σφάλμα σε κάθε σημείο οφείλεται αποκλειστικά από την ποιότητα της ορθοαναγωγής. Το εναπομένον σφάλμα κάθε σημείου ελέγχου της ορθοαναγωγής και το

συνολικό RMS για τα σκοπευόμενα σημεία ελέγχου φαίνονται παρακάτω. Ο έλεγχος γίνεται στην προβολή UTM North 34 του WGS'84.



Το *a posteriori* τυπικό σφάλμα και το RMS της διαδικασίας ελέγχου από σκόπευση (18) σημείων ελέγχου φαίνεται συνολικά στον πίνακα 6.1:

	X (m)	Y(m)	Συνολικό (m)
σ0	0.773	0.894	1.182
RMS	0.835	0.932	1.251

Πίνακας 6.1: Ακρίβεια ορθοεικόνας σε WGS'84.

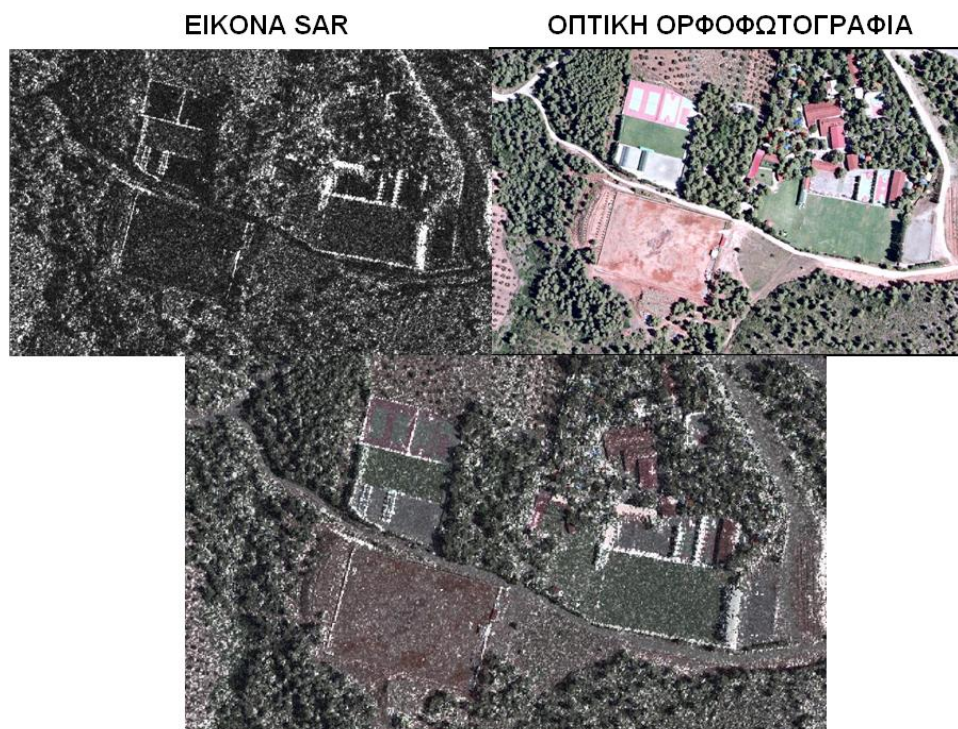
Για τα άλλα δύο συστήματα αναφοράς (ΕΓΣΑ'87 και HTRS'07) η ακρίβεια που προκύπτει είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους. Ειδικά για το ΕΓΣΑ'87, ακολουθώντας την αντίστοιχη διαδικασία με σκόπευση (16) σημείων ελέγχου είναι:

	X (m)	Y(m)	Συνολικό (m)
RMS	1.186	1.056	1.588

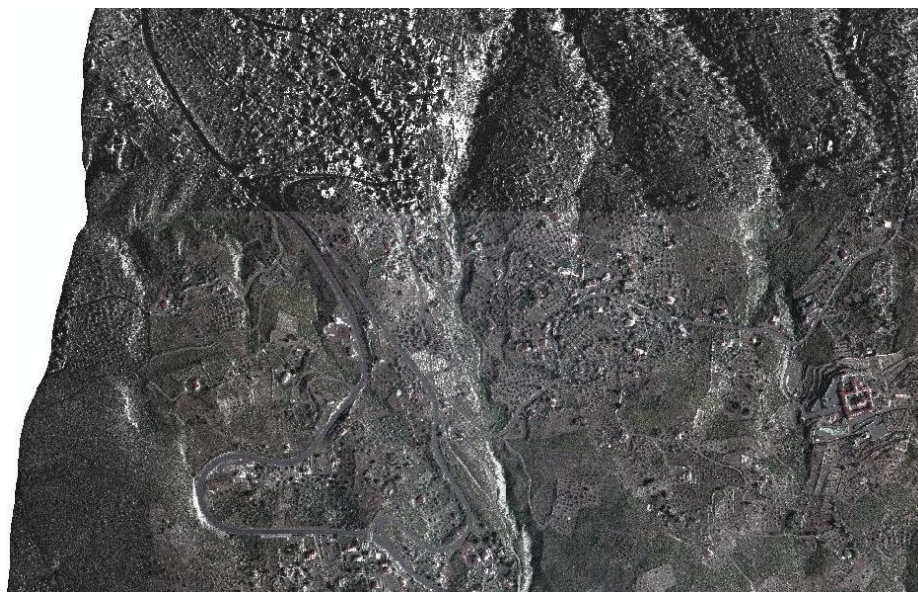
Πίνακας 6.2: Ακρίβεια ορθοεικόνας σε ΕΓΣΑ'87.

Η διαφορά που προκύπτει για το συνολικό RMS είναι μικρότερη από 0.5 pixel και δεν μπορεί η εκτιμηθεί η προέλευσή της, καθώς ενδέχεται να οφείλεται σε σφάλμα σκόπευσης των σημείων ελέγχου.

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της ορθοαναγωγής, είναι οπτικά. Γίνεται υπέρθεση της παραγόμενης ορθοφωτογραφίας με οπτικές ορθοφωτογραφίες τις περιοχής. Οι οπτικές ορθοφωτογραφίες που διατίθενται, αναφέρονται στο ΕΓΣΑ'87. Για το λόγο αυτό, η σύγκριση γίνεται για την παραγόμενη ορθοφωτογραφία σε ΕΓΣΑ'87. Θα μπορούσε να γίνει μετασχηματισμός των διατιθέμενων ορθοφωτογραφιών και στα άλλα δύο συστήματα, αλλά με τον τρόπο αυτό θα εισέρχονταν στο σύστημα κάποια σφάλματα από το μετασχηματισμό. Έτσι δεν πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία στα άλλα δύο συστήματα αναφοράς. Σημειώνεται, πως η σύγκριση στο ΕΓΣΑ'87 γίνεται για παραγόμενη ορθοφωτογραφία με χρήση 10 καλά κατανεμημένων φωτοσταθερών, από τη χρήση των οποίων, γίνεται τελικά διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου, άσχετα με το αν αυτό δεν είναι εμφανές κατά τη διαδικασία της γεωαναφοράς. Τα καταλληλότερα αντικείμενα για αυτήν την διαδικασία είναι κυρίως γραμμικά πρότυπα (δρόμοι, όρια γεωτεμαχίων) και εν γένει αντικείμενα τα οποία είναι ευδιάκριτα στην SAR ορθοφωτογραφία και τα οποία καταλαμβάνουν μεγάλη περιοχή στην εικόνα. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



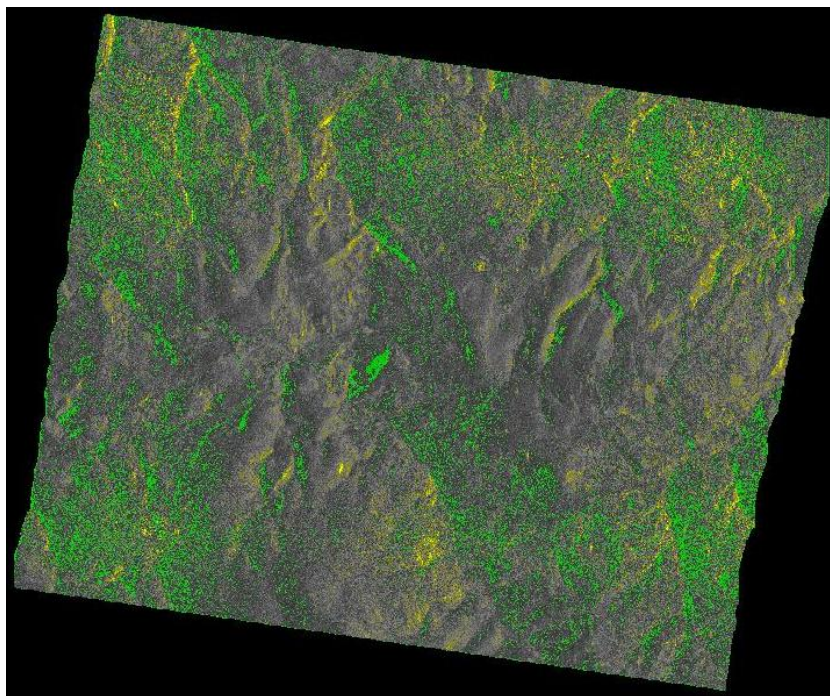
Εικόνα 6.2: Οπτική σύγκριση Ορθοφωτογραφίας SAR και ορθοφωτογραφιών από οπτικές εικόνες σε ΕΓΣΑ'87.



Εικόνα 6.3: Οπτική υπέρθεση ορθοφωτογραφίας SAR και ορθοφωτογραφιών από οπτικές εικόνες.

Οι οπτικές διαφορές που προκύπτουν είναι πολύ μικρές της τάξης των 2-3 pixel και οι οποίες ουσιαστικά δεν είναι εύκολα παρατηρήσιμες. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί, είναι πως η ακρίβεια με την οποία έχει γίνει η γεωαναφορά είναι πολύ καλή, με αποτέλεσμα την πολύ καλή ποιότητα της παραγόμενης ορθοεικόνας. Αυτό είναι και το αναμενόμενο αναφορικά με την ακρίβεια που έχει προκύψει προηγουμένως.

Στις παραχθείσες ορθοεικόνες, παρουσιάζονται περιοχές όπου δεν υπάρχει πληροφορία. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Στην αρχική εικόνα υπάρχουν περιοχές με έλλειψη πληροφορίας, λόγω γεωμετρίας της λήψης των δεδομένων. Οι περιοχές αυτές κατά τη διαδικασία της ορθοαναγωγής διατηρούνται και παράλληλα αλλάζει η οριζοντιογραφική τους θέση. Επίσης, λόγω διόρθωσης των παραμορφώσεων που υπάρχουν στην αρχική εικόνα από τη γεωμετρία λήψης της, στην τελική εικόνα παρουσιάζονται περιοχές με πολύ έντονους τόνους του γκριζου, στις οποίες δεν υπάρχει πληροφορία. Η αρχική εικόνα δηλαδή, έχει 'μαζεμένη' πληροφορία στις περιοχές αυτές, η οποία δεν είναι δυνατό να 'απλωθεί' στην τελική εικόνα. Παρουσιάζονται δηλαδή κενά, όπως συμβαίνει στις ορθοφωτογραφίες που προκύπτουν από οπτικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό δεν είναι εύκολα αντιμετωπίσιμο, καθώς χρειάζεται εξαγωγή πληροφορίας από άλλες εικόνες, είτε διπλανές, είτε από αντίθετη κατεύθυνση λήψης.(B-N,N-B).



Εικόνα 6.4: Ορθοφωτογραφία σε ΕΓΣΑ'87. Φαίνονται τραβήγματα (κίτρινο) και έλλειψη πληροφορίας από γεωμετρία λήψης (πράσινο).

Στην παραπάνω ορθοδιορθωμένη εικόνα φαίνονται οι περιοχές της εικόνας οι οποίες έχουν 'τραβηχτεί' (κίτρινη απόχρωση) και με πράσινο χρώμα οι περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει πληροφορία, λόγω της γεωμετρίας λήψης της αρχικής εικόνας SAR (κεφ1.6), οι οποίες κανονικά απεικονίζονται με πολύ μικρές τιμές τόνων του γκριζου. Παρατηρείται έντονα η δεύτερη περίπτωση, σε περιοχές όπου καλύπτονται από πυκνή βλάστηση (γωνίες εικόνας) και εντός των οικισμών, λόγω έντονης εναλλαγής του αναγλύφου (περιοχές με αραιό πράσινο χρώμα με έντονο κοκκίδισμα - speckle).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η τεχνολογία των απεικονίσεων SAR και αναλύθηκαν τα προϊόντα του δορυφόρου TerraSar-X, με παράλληλη ανάπτυξη των επιμέρους χαρακτηριστικών τους. Ειδικότερα, επεξεργάστηκε η διατιθέμενη εικόνα SAR, η οποία έχει παράχθει με τον τρόπο απεικόνισης Spotlight Mode HS 300Hz (πειραματικό στάδιο). Η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε, αφορά στις διαφορετικές μεθόδους γεωαναφοράς αυτής της εικόνας SAR και στον προσδιορισμό της ακρίβειας με την οποία αυτή επιτυγχάνεται. Το τελικό στάδιο, αφορά στην παραγωγή ορθοεικόνας και στον προσδιορισμό της ακρίβειάς μέτρησης πάνω σ' αυτήν. Εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι γεωαναφοράς, εκ των οποίων οι τρεις απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτοί είναι:

- Γενικό Γεωμετρικό Μοντέλο Δέκτη (Range – Doppler)
- Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (DLT)
- Κλασματικά Πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού (RPF 2^{ου} βαθμού)
- Κλασματικά Πολυώνυμα 3^{ου} βαθμού (RPF 3^{ου} βαθμού)

Η διαδικασία της γεωαναφοράς με το γενικό γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη και η παραγωγή των ορθοεικόνων, έγιναν στο περιβάλλον του ERDAS Imagine. Για τη γεωαναφορά με τα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα αναπτύχθηκε λογισμικό στο περιβάλλον MatLab.

Τα καλύτερα αποτελέσματα γεωαναφοράς προκύπτουν με χρήση του γενικού γεωμετρικού μοντέλου του δέκτη, όπως αυτό καθορίζεται από το Erdas και τα κλασματικά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού. Η ακρίβεια της γεωαναφοράς που προκύπτει από τη χρήση του γενικού μοντέλου του δέκτη, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Είναι αντίστοιχη με την ονομαστική ακρίβεια αυτού του είδους των προϊόντων, η οποία αναφέρεται από την εταιρία παραγωγής τους, την DLR. Η ακρίβεια που προκύπτει από τη χρήση των προσεγγιστικών μεθόδων γεωαναφοράς, είναι γενικά πολύ καλή, με διαφορές μικρότερες από 1 pixel σε σύγκριση με το μοντέλο του δέκτη. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές τις μεθόδους είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αν ληφθεί υπόψη, πως δεν παρέχονται οι τιμές των πολυωνυμικών συντελεστών από την εταιρία και ο προσδιορισμός τους γίνεται με τη χρήση σχετικώς μικρού αριθμού φωτοσταθερών κάθε φορά. Επισημαίνεται, πως η εφαρμογή της μεθόδου με τα κλασματικά πολυώνυμα 3^{ου} βαθμού δεν κατέστη δυνατή, καθώς απαιτείται αρκετά μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών των πολυωνύμων. Η ακρίβεια της γεωαναφοράς με DLT μετασχηματισμό εμφανίζεται λίγο χειρότερη από αυτή του RPF 2^{ου}

βαθμού. Θεωρητικά αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί η χρήση των συντελεστών δευτέρου βαθμού έχει σκοπό να διορθώσει περαιτέρω το μοντέλο από μικρότερης επίδρασης εναπομένοντα σφάλματα μεταξύ των δύο συστημάτων. Η μέγιστη ακρίβεια αυτής της μεθόδου ωστόσο, δεν μπορεί να εκτιμηθεί, καθώς χρησιμοποιήθηκαν και φωτοσταθερά μειωμένης ακρίβειας στον υπολογισμό των συντελεστών. Με αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών και της ακρίβειάς τους, οι πολυωνυμικοί συντελεστές αναμένεται να υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια, αποδίδοντας καλύτερα αποτελέσματα. Η πιθανότητα κάποιο σημείο να παρουσιάσει σφάλμα εκτός της περιοχής του $[-2\sigma, 2\sigma]$ μειώνεται με χρήση ανώτερου βαθμού πολυωνύμων, καθώς η Φ.Γ.Ε αναπαρίσταται με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω στοιχεία, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η χρήση προσεγγιστικών μεθόδων γεωαναφοράς είναι δυνατό να παράγει τελικά προϊόντα πολύ καλής ποιότητας. Πιθανόν, με χρήση του γενικού μοντέλου του δέκτη να προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα, αλλά και με τις προσεγγιστικές αυτές μεθόδους γεωαναφοράς τα αποτελέσματα είναι άκρως ικανοποιητικά.

Το βασικό πλεονέκτημα χρήσης του γενικού γεωμετρικού μοντέλου του δέκτη είναι, πως η διαδικασία της γεωαναφοράς μπορεί να γίνει και χωρίς χρήση φωτοσταθερών. Επίσης, παρατηρείται, πως με χρήση ακόμα και ενός μόνο φωτοσταθερού η ακρίβεια της γεωαναφοράς βελτιώνεται σημαντικά και ουσιαστικά τα αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται με χρήση περισσότερων του ενός φωτοσταθερών. Στην πραγματικότητα, βελτιώνονται κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό. Λόγω του τρόπου λήψης των δεδομένων, με την τεχνική του συνθετικού ανοίγματος, υπολογίζεται κάθε φορά η απόσταση κάθε σημείου της Φ.Γ.Ε από το δορυφόρο. Με εισαγωγή στο σύστημα ενός φωτοσταθερού και γνωστή την απόσταση στόχου – δέκτη, προσδιορίζεται η θέση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης με πολύ καλύτερη ακρίβεια από αυτήν που υπολογίζεται από τις εφημερίδες του δορυφόρου (+20m στην καλύτερη περίπτωση) και ο αλγόριθμος Range – Doppler δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Αφαιρούνται δηλαδή, τα συστηματικά σφάλματα από το σύστημα, λόγω αβεβαιότητας προσδιορισμού της θέσης του δορυφόρου. Με χρήση τριών φωτοσταθερών και πάνω διορθώνονται και τυχόν στροφές μεταξύ του συστήματος αναφοράς του δορυφόρου και του γεωδαιτικού. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι πως με χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού, η θέση του πάνω στην εικόνα δεν διαφοροποιεί σε μεγάλο βαθμό την τελική ακρίβεια της γεωαναφοράς. Επιπροσθέτως, για λίγο χειρότερη ακρίβεια, της τάξης του 1.5-2m στο έδαφος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωτοσταθερό, κάποιο σημείο γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, του οποίου οι γεωδαιτικές συντεταγμένες έχουν προκύψει από άλλες μεθόδους με όχι τόσο καλή ακρίβεια όπως αυτές από GPS. Από τα παραπάνω, είναι προφανές, πως χρησιμοποιώντας το γενικό γεωμετρικό μοντέλο του δέκτη, η ανάγκη για μετρήσεις στο ύπαιθρο περιορίζεται σημαντικά και σχεδόν εξαλείφεται.

Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς μπορεί να επιτευχθεί σημαντική οικονομία και να γίνουν εφαρμογές για περιοχές όπου η πρόσβαση είναι πολυδάπανη, δύσκολη ή και αδύνατη. Ακόμα, σε πολλές περιπτώσεις λόγω της μειωμένης ραδιομετρικής ανάλυσης των απεικονίσεων SAR και την απουσία χαρακτηριστικών σημείων στο έδαφος, η αναγνώριση πολλών φωτοσταθερών πάνω στην εικόνα, μπορεί να είναι αδύνατη ή και αμφιβόλου ποιότητας. Συνεπώς, με χρήση πολύ μικρού αριθμού φωτοσταθερών είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας.

Τα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα δεν απαιτούν γνώση των στοιχείων του δορυφόρου και της γεωμετρίας λήψης των εικόνων. Η διαδικασία της γεωαναφοράς της εικόνας με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εύκολη από υπολογιστικής άποψης και οικονομικότερη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν είναι διαθέσιμα στοιχεία για την ακριβή τροχιά του δορυφόρου ή όταν δεν απαιτείται η καλύτερη δυνατή ακρίβεια, καθώς όσο μεγαλύτερης ακρίβειας στοιχεία παραδίδονται μαζί με την εικόνα τόσο αυξάνεται και το κόστος. Ωστόσο, το δυσκολότερο στοιχείο αναφορικά με τη χρήση τους είναι ο αυξημένος αριθμός φωτοσταθερών τα οποία απαιτούνται για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών τους. Το γεγονός αυτό, αυξάνει σημαντικά το κόστος, μέσω της ανάγκης για επίγειες μετρήσεις στο ύπαιθρο, για αποτελέσματα αυξημένης ακρίβειας. Επίσης, για περιοχές με έντονο ανάγλυφο, είναι απαραίτητη η χρήση φωτοσταθερών σε όλο το εύρος της εικόνας και σε θέσεις έτσι ώστε να αναπαρίστανται επαρκώς οι εναλλαγές του υψομέτρου μέσω του προσεγγιστικού μαθηματικού μοντέλου. Ιδανική, είναι η δημιουργία ενός πυκνού και κανονικού καννάβου φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου. Το γεγονός αυτό όμως, μπορεί να είναι απαγορευτικό λόγω αδυναμίας πρόσβασης στην περιοχή, όπως προαναφέρθηκε και στα τελικά προϊόντα να υπάρχουν μεγάλα οριζοντιογραφικά σφάλματα και παραμορφώσεις.

Τέλος, αξιολογείται η ποιότητα των ορθοεικόνων που παράγονται. Η ακρίβεια μέτρησης στις ορθοδιορθωμένες εικόνες είναι περίπου 1 μέτρο, η οποία κρίνεται ικανοποιητική για τέτοιου είδους απεικονίσεις. Κάποιες από τις παραμορφώσεις που υπάρχουν στην αρχική εικόνα διορθώνονται και η μορφή των αντικειμένων αποκαθίσταται. Τα αντικείμενα διακρίνονται σε αντίστοιχο βαθμό με την αρχική εικόνα. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια είναι η αναμενόμενη από την γεωαναφορά, της τάξης του 1m. Ωστόσο, σημεία τα οποία δεν περιγράφονται επαρκώς από το DTM, ενδέχεται να απεικονίζονται σε λάθος θέσεις πάνω στην εικόνα. Επίσης, υπάρχουν περιοχές στην εικόνα χωρίς πληροφορία όπου χρειάζεται συμπλήρωσή τους από άλλες απεικονίσεις.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι μελλοντικές εργασίες που μπορούν να γίνουν με χρήση της συγκεκριμένης κατηγορίας εικόνων SAR είναι:

- Συλλογή περισσότερων φωτοσταθερών από επίγειες μετρήσεις GPS για διερεύνηση της μέγιστης δυνατής ακρίβειας γεωαναφοράς με κλασματικά πολυώνυμα 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού. Προτείνεται η χρήση περί των 100 σημείων γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων.
- Δημιουργία ορθοεικόνας και έλεγχος της αξιοπιστίας της, χρησιμοποιώντας προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα.
- Χρήση και άλλων προγραμμάτων/λογισμικών για προσδιορισμό της γεωαναφοράς με χρήση του μοντέλου του δέκτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους.

Με χρήση μόνο μιας εικόνας, οι δυνατότητες επεξεργασίας περιορίζονται στις παραπάνω εφαρμογές. Με απόκτηση άλλης μιας διπλανής εικόνας μπορούν να γίνουν πολλές διαφορετικές εφαρμογές και να ερευνηθεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια των παραγόμενων προϊόντων σε κάθε περίπτωση (π.χ. παραγωγή DTM υψηλής ακρίβειας). Αν και το κόστος απόκτησης μιας τέτοιας εικόνας είναι υψηλό, αναμένεται μείωση της τιμής με το πέρασμα του χρόνου ειδικά όταν πρόκειται για εικόνα παλαιότερης χρονολογίας λήψης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

- Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H.M., 1971. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Bhanumurthy, M.Y., and Y. Mallikarjuna Reddy, 2011. SAR Data Processing with Range Cell Migration, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Department of ECE, Vasireddy Venkatadri Institute of Technology Nambur(V), Pedakakani (M), Guntur Dist., A.P. ,INDIA.
- Caloz R., Collet C., 2001. Precis De Teledetection Transformations Geometriques, In Traitements Numeriques D'images De Teledetection, Volume 3, Pp. 76–105.
- Chan, Y. K., and V. C. Koo, 2008. An introduction to synthetic aperture radar (SAR), Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 2, 27-60, 2008.
- Chen, L., Teo, T., 2002. Rigorous Generation of Orthophotos From Eros-A High Resolution Satellite Images. International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing And Spatial Information Sciences, Ottawa, Canada.
- Cumming, I.G., and Wong, F.H., 2005. Digital Processing Of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms And Implementation. Artech House, Boston.
- Curlander, J.C., McDonough, R.N., 1991. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. Wiley, 672p.
- Dowmann, I., Dolloff, J., 2000. An evaluation of rational function for photogrammetric restitution. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, The Netherlands, 16–23 July 2000 (Amsterdam, The Netherlands: GITC) Vol 33 (B3).

- Eineder, M., T. Fritz, 2006. TerraSAR-X Ground Segment, SAR Basic Product Specification Document (TX-GS-DD-3302), Release 1.4, 06. October, 2006.
- Erdas., 2010. Erdas Field Guide, Fifth Edition. Erdas, Inc. Atlanta, Ga., 2010.
- Espinoza-Molina, D., 2011. Advanced Methods for High Resolution SAR information extraction: Data and User-driven evaluation approaches for Image Information Mining. Dissertation, Télécom ParisTech.
- Floyd M. Henderson, and Anthony J. Lewis, 1998. Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing, Vol 2. New York: John Wiley.
- Franceschetti, G., Lanari, R., 1999. Synthetic aperture radar processing, CRC, 328.
- Fritz, T., Eineder, M., 2010. TerraSAR-X Basic Product Specification Document, TX-GS-DD-3302, Issue 1.5, 15/10/2010
- Fritz, T., 2007. TerraSAR-X Level 1b Product Format Specification. TX-GS-DD-3307, Issue 1.3, December 2007.
- Fritz, T., Eineder, M., 2007. Value Added Product Specification. (TSXX-ITD-SPE-0009), 2007.
- Grodecki, J., 2001. Ikonos Stereo feature extraction—RPC approach. Proceedings of the ASPRS Annual Conference, St Louis, Missouri, USA, 23–27 April 2001 (Bethesda, MD: ASPRS).
- Guo. Z., Zhu. Z., 2008. A Study Of The Rpc Model Of Terrasar-X And Cosmo-Skymed Sar Imagery. The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences. Vol. Xxxvii. Part B1. Beijing, 2008.
- Ian G. Cumming, Yi Guo, and Frank H. Wong. Analysis and Precision Processing of Radarsat ScanSAR Data. In Geomatics in the Era of Radarsat, GER'97, Ottawa, Canada, May 25-30, 1997.

- Kamath, J., 1995. Real time imaging systems for synthetic aperture radar using coarse quantized correlators with VLSI realisation, Doctoral dissertation, University of Idaho, Idaho, USA, 1995.
- López-Dekker, P., 2010. Esa Sar Course 1. Radar Remote Sensing Course. Warsaw, 2010.
- Madani, M., 1999. Real-Time Sensor-Independent Positioning by Rational Functions, Proceedings of ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation, Barcelona, Spain, November 25-26, (Barcelona, Spain: ISPRS).
- Massonnet, D., Souyris, J.C., 2010. Imaging with Synthetic Aperture Radar.
- Mccandless. S., Jackson. C. Jr, 2005. Sar Marine User's Manual, NOAASARManual.
- NGA.SIG.0005_1.0, 2010. Spotlight Synthetic Aperture Radar (SAR) Sensor Model Supporting Precise Geopositioning. Version 1.0, March 2010.
- OGC, 1999. The OpenGIS Abstract Specification-Topic 7: The Earth Imagery Case.
- Olmsted, C., 1993. Scientific Sar User's Guide, Alaska Sar Facility.
- Paredes, F. C., Mikhail , E. M., Fagerman, J. A., 1989. Batch And On-Line Evaluation Of Stereo Spot Imagery. Proceedings Of The Asprs – Acsm Convention, Baltimore,Md (Bethesda, Md: Asprs), Vol. 3.
- Raney. R.K., 1986. Doppler Properties of Radars in Circular Orbits, International Journal of Remote Sensing, Vol. 7, No. 9, 1986.
- Roth. A., Huber. M., Kosmann. D., 2004. Geocoding Of Terrasar-X Data. Dlr, German Remote Sensing Data Center.
- Sanjay. K. S., Devakanth. S.N., Srinivasan. T.P., Gopala. B.K., Srivastava. R.K, 2008. Rational Polynomial Modelling For Cartosat-1 Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008.

- Schlutz. M., 2009. Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB, Dissertation. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, June 2009.
- Schmidt, N., Weber. M., Raggam. J., Gutjahr., J., Wimmer. A., 2007. Terra Sar-X Value Added Image Products, International Archives Of Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences.
- Shu. Li., 2005. Improved Doppler Centroid Estimation Algorithms For Satellite Sar Data. Master's Thesis, Dept. Of Electrical And Computer Eng., The University Of British Columbia, 5500 - 2332 Main Mall, Vancouver, Bc, Canada V6t 1z4, December 2005.
- Soccorsi. M., 2010. Parameter Estimation And Modeling Of High Resolution Synthetic Aperture Radar Data, Dissertation, Telecom Paristech.
- Sohn, H.G., Park, C.H, and Chang, H., 2005. Rational Function Model based Image Matching for Digital Elevation Models, ThePhotogrammetric Records, 20(112).
- Synthetic Aperture Concepts, 2004, <http://www.scribd.com/doc/77648351/CW-chap04>
- Tao, V., Hu Y., 2001. A Comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Tao, V., Hu, Y., 2002. 3d Reconstruction methods based on the rational function model. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol.67, No12, December 2001,
- Toutin. T., 2011. State-Of-The-Art Of Geometric Correction Of Remote Sensing Data: A Data Fusion Perspective. International Journal Of Image And Data Fusion Vol. 2, No. 1, March 2011.
- Toutin. T., 2004. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods”, Int J. Remote Sensing, 20 May, Vol. 25, No. 10, 1893–1924.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, 1981. Microwave remote sensing, active and passive. Vol. I: Fundamentals and Radiometry. Artech House, Norwood.

- Valadan. M. J., Zoej, S. Sadeghian, 2007. Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric Processing of Ikonos Geo Image.
- Vassilaki, D., Ioannidis, C., 2008. Combined use of Spaceborne Optical and SAR Data – Incompatible Data Sources or a Useful Procedure?. Integrating Generations, FIG Working Week, Stockholm, Sweden 14-19 June 2008
- Vassilaki, D., Ioannidis, C., 2010 Georeference of High Resolution TerraSAR Images with RPFs. 30th EARSeL Symposium: Remote Sensing for Science, Education and Culture, Paris, 2010.
- Vassilaki, D., Ioannidis, C., Stamos, A., 2011. Georeference of TerraSAR-X Images using Science Orbit Data. 31st EARSeL Symposium, Prague, 2011.
- Wang. X., Dingyou. L., Zhang. Q., And Hailan,H., 2001. The Iteration by Correcting Characteristic Value and Its Application in Surveying Data Processing. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 15(2):3–6, 2001.
- Xu, J.Z., 2004. The Rational Function Model (RFM) in Photogrammetric Mapping: Method and Accuracy, Department of Earth and Space Science & Engineering, North York, Ontario, May 2004.
- Sanjay. K. S., Devakanth. S.N., Srinivasan. T.P., Gopala. B.K., Srivastava. R.K, 2008. Rational Polynomial Modelling For Cartosat-1 Data. The International Archives Of The Photogr Ammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences. Vol. Xxxvii. Part B1. Beijing 2008.

Ελληνική

Αγατζά - Μπαλοδήμου Α. Μ., 2005. Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις I

Βέης, Γ., Μπιλήρης, Χ., Παπαζήση, Κ., 2006. Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας

Ιστοσελίδες:

- <http://www.cdt21.com/resources/guide3.asp>.
- en.wikipedia.org
- envisat.esa.int
- www.rfic.co.uk
- <http://www.treuropa.com/Home/Technique/SARImagery/tabid/409/Default.aspx>.
- http://www.spg.tudarmstadt.de/forschung_11/researchprojects_1/syntheticaperturesonar_1/syntheticaperturesonar.en.jsp.
- <http://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis/signalprocessing/spectralwindowing.html>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:

Α) ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ:

Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από GPS

ΕΓΣΑ'87						
Όνομα Φωτοσταθερού	Προβολικές			Γεωδαιτικές		
	Χ	Υ	Ζ(ορθ.)	φ	λ	h(γεωμ.)
1	490771.480	4237550.645	108.617	38.285975589	23.894477291	115.509
2	490651.425	4237486.531	98.379	38.285396519	23.893105386	105.274
3	490253.976	4237198.844	94.182	38.282799528	23.888564799	101.091
4	486997.440	4237560.232	277.949	38.286015242	23.851323301	284.873
5	487071.637	4237700.202	251.542	38.287277784	23.852169133	258.460
6	487329.356	4236961.013	368.521	38.280619563	23.855129292	375.463
7	487599.348	4236730.736	367.243	38.278547981	23.858220292	374.191
8	487541.098	4236270.387	364.469	38.274398303	23.857562408	371.432
9	487548.469	4236269.845	365.256	38.274393519	23.857646687	372.220
10	486964.629	4235518.897	357.995	38.267617351	23.850985731	364.988
11	486982.795	4235347.273	355.845	38.266070855	23.851196554	362.844
12	487712.347	4235146.362	450.888	38.264270436	23.859539733	457.888
13	489759.985	4232397.602	493.718	38.239522937	23.882985986	500.794
14	489665.564	4232383.085	495.075	38.239391016	23.881907238	502.152
15	485539.178	4237400.211	219.686	38.284550747	23.834652253	226.624
16	485610.457	4237074.842	268.382	38.281619530	23.835473888	275.331
17	484357.016	4238425.368	153.078	38.293770059	23.821112576	159.988
18	484301.449	4238436.213	149.462	38.293866829	23.820476895	156.372
19	484468.019	4237403.388	226.693	38.284561477	23.822404409	233.637
20	484616.341	4237152.466	235.016	38.282302622	23.824105799	241.968
21	484582.657	4233745.447	368.888	38.251596463	23.823794859	375.950
22	484145.664	4233907.210	331.377	38.253046747	23.818796855	338.435
23	485350.021	4235449.433	354.651	38.266966415	23.832529795	361.655
24	485325.994	4235487.344	359.425	38.267307692	23.832254343	366.428
25	484377.056	4235868.770	257.259	38.270729268	23.821398201	264.254
26	489612.843	4235718.481	430.664	38.269450630	23.881255878	437.630
236019	486980.232	4237266.469	357.211	38.283367472	23.851131943	364.145

Πίνακας Α.1: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από GPS σε ΕΓΣΑ'87

WGS '84						
Όνομα Φωτοσταθερού	Προβολικές (UTM 34 North)			Γεωδαιτικές		
	Χ	Υ	Z(ορθ.)	φ	λ	h(γεωμ.)
1	753302.142	4241801.610	108.617	38.288567094	23.896175547	148.144
2	753184.139	4241733.580	98.379	38.287988051	23.894803590	137.903
3	752795.932	4241432.911	94.182	38.285391141	23.890262805	133.697
4	749526.862	4241688.614	277.949	38.288607302	23.853020198	317.42
5	749596.530	4241831.028	251.542	38.289869835	23.853866093	291.015
6	749878.315	4241100.030	368.521	38.283211561	23.856826156	407.99
7	750155.848	4240878.467	367.243	38.281139946	23.859917203	406.714
8	750112.532	4240416.117	364.469	38.276990302	23.859259203	403.934
9	750119.923	4240415.814	365.256	38.276985517	23.859343484	404.721
10	749560.327	4239645.734	357.995	38.270209485	23.852682169	397.442
11	749584.069	4239474.660	355.845	38.268662995	23.852892964	395.29
12	750320.313	4239297.381	450.888	38.266862428	23.861236329	490.342
13	752457.663	4236614.399	493.718	38.242114709	23.884682709	533.172
14	752363.689	4236596.814	495.075	38.241982804	23.883603925	534.527
15	748073.465	4241481.199	219.686	38.287143080	23.836348624	259.13
16	748155.326	4241158.070	268.382	38.284211848	23.837170204	307.823
17	746857.749	4242468.188	153.078	38.296362563	23.822808767	192.512
18	746801.818	4242477.231	149.462	38.296459344	23.822173069	188.896
19	747001.968	4241449.588	226.693	38.287153984	23.824100406	266.117
20	747158.471	4241203.429	235.016	38.284895114	23.825801793	274.44
21	747235.380	4237794.566	368.888	38.254189075	23.825490094	408.268
22	746793.043	4237942.185	331.377	38.255639438	23.820491981	370.75
23	747947.606	4239523.837	354.651	38.269558821	23.834225657	394.068
24	747922.342	4239560.976	359.425	38.269900098	23.833950203	398.842
25	746960.815	4239911.684	257.259	38.273321854	23.823093836	296.663
26	752202.700	4239931.340	430.664	38.272042287	23.882953262	470.155
236019	749519.189	4241394.220	357.211	38.285959517	23.852828753	396.678

Πίνακας Α.2: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από GPS σε WGS '84

HTRS'07						
Όνομα Φωτοσταθερού	Προβολικές			Γεωδαιτικές		
	X	Y	Z(ορθ.)	φ	λ	h(γεωμ.)
1	490919.902	2237837.695	108.617	38.288564125	23.896170727	148.18
2	490799.849	2237773.582	98.379	38.287985082	23.894798769	137.94
3	490402.402	2237485.896	94.182	38.285388172	23.890257985	133.734
4	487145.878	2237847.275	277.949	38.288604331	23.853015380	317.456
5	487220.075	2237987.245	251.542	38.289866864	23.853861275	291.052
6	487477.791	2237248.054	368.521	38.283208590	23.856821338	408.027
7	487747.781	2237017.779	367.243	38.281136976	23.859912384	406.751
8	487689.531	2236557.432	364.469	38.276987332	23.859254385	403.97
9	487696.902	2236556.890	365.256	38.276982547	23.859338666	404.758
10	487113.065	2235805.947	357.995	38.270206515	23.852677352	397.479
11	487131.231	2235634.323	355.845	38.268660025	23.852888146	395.327
12	487860.777	2235433.410	450.888	38.266859458	23.861231512	490.379
13	489908.404	2232684.662	493.718	38.242111740	23.884677892	533.209
14	489813.983	2232670.144	495.075	38.241979835	23.883599109	534.564
15	485687.625	2237687.257	219.686	38.287140108	23.836343806	259.167
16	485758.902	2237361.888	268.382	38.284208877	23.837165386	307.86
17	484505.471	2238712.412	153.078	38.296359591	23.822803949	192.549
18	484449.904	2238723.257	149.462	38.296456372	23.822168252	188.933
19	484616.472	2237690.433	226.693	38.287151012	23.824095589	266.154
20	484764.792	2237439.513	235.016	38.284892142	23.825796976	274.477
21	484731.105	2234032.505	368.888	38.254186103	23.825485279	408.305
22	484294.115	2234194.270	331.377	38.255636466	23.820487166	370.787
23	485498.466	2235736.483	354.651	38.269555850	23.834220841	394.105
24	485474.438	2235774.393	359.425	38.269897127	23.833945386	398.879
25	484525.507	2236155.823	257.259	38.273318882	23.823089020	296.7
26	489761.264	2236005.526	430.664	38.272039317	23.882948443	470.191
236019	487128.668	2237553.510	357.211	38.285956547	23.852823934	396.715

Πίνακας Α.3: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από GPS σε HTRS'07

Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από Ορθοφωτογραφία + DTM:

ΕΓΣΑ'87						
Όνομα Φωτοσταθερού	Προβολικές			Γεωδαιτικές		
	Χ	Υ	Ζ(ορθ.)	φ	λ	h(γεωμ.)
27	489339.297	4236453.672	318.372	38.2760733	23.8781177	325.342
29	488034.803	4237151.469	308.907	38.2823457	23.8631918	315.877
30	488696.047	4235170.699	503.952	38.2645027	23.8707840	510.922
31	489374.548	4235125.810	496.666	38.2641064	23.8785406	503.636
32	488232.301	4234610.368	551.555	38.2594468	23.8654922	558.525
33	489947.218	4233506.004	534.829	38.2495145	23.8851098	541.799
34	486046.293	4235434.007	301.745	38.2668385	23.8404894	308.715
35	486393.087	4234772.592	327.678	38.2608828	23.8444665	334.648
36	485393.180	4235134.839	352.113	38.2641319	23.8330297	359.083
37	484685.237	4235454.828	340.922	38.2670039	23.8249303	347.892
38	485619.557	4234131.152	427.334	38.2550898	23.8356377	434.304
39	484542.531	4236471.719	320.813	38.2761662	23.8232767	327.783
40	484287.658	4237904.759	160.068	38.2890769	23.8203310	167.038
41	488777.912	4232952.857	512.703	38.2445154	23.8717549	519.673
42	488622.078	4234218.925	492.593	38.2559239	23.8699537	499.563
43	490506.101	4237223.611	91.952	38.2830254	23.8914472	98.922
44	490301.127	4236599.909	218.178	38.2774022	23.8891121	225.148
45	484369.283	4236792.945	273.936	38.2790582	23.8212889	280.906
46	484977.194	4237362.139	225.195	38.2841984	23.8282273	232.165
47	484576.667	4238302.846	147.667	38.2926696	23.8236271	154.637
48	485299.836	4238056.813	168.211	38.2904644	23.8319019	175.181
49	485370.804	4237889.139	199.019	38.2889544	23.8327169	205.989
50	487477.870	4237789.669	191.911	38.2880899	23.8568127	198.881
51	487509.335	4235722.424	446.925	38.2694594	23.8572090	453.895
52	486854.630	4235969.565	320.275	38.2716774	23.8497199	327.245
53	487830.027	4235963.580	387.539	38.2716372	23.8608709	394.509
54	484678.09	4233954.28	368.678	38.2534802	23.8248810	375.648
55	484316.78	4233761.35	380.484	38.2517352	23.8207559	387.454

Πίνακας Α.4: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από ορθοφωτογραφία + DTM σε ΕΓΣΑ'87

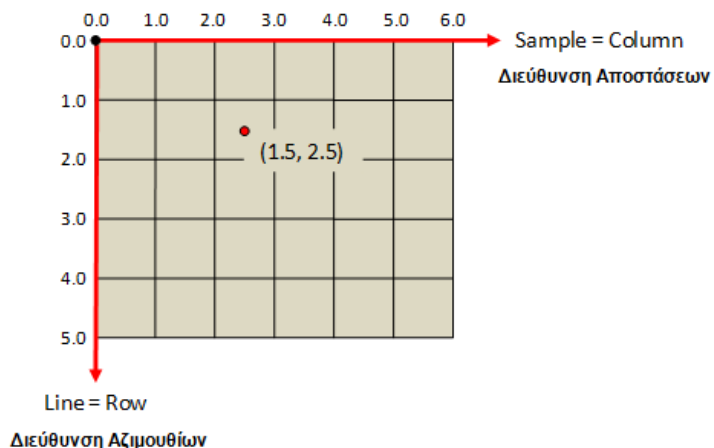
WGS '84						
Όνομα Φωτοσταθερού	Προβολικές (UTM 34 North)			Γεωδαιτικές		
	Χ	Υ	Z(ορθ.)	φ	λ	h(γεωμ.)
27	751905.220	4240657.830	318.372	38.278664979	23.879815197	357.901
29	750577.750	4241313.440	308.907	38.284937581	23.864889031	348.437
30	751303.460	4239353.650	503.952	38.267094460	23.872480974	543.408
31	751983.590	4239330.780	496.666	38.266698076	23.880237836	536.136
32	750857.790	4238778.130	551.555	38.262038620	23.867188906	590.975
33	752608.980	4237729.150	534.829	38.252106159	23.886806844	574.239
34	748644.540	4239531.010	301.745	38.269430757	23.842185610	341.151
35	749012.880	4238880.700	327.678	38.263475067	23.846162627	367.062
36	748000.990	4239210.570	352.113	38.266724235	23.834725505	391.49
37	747282.500	4239507.650	340.922	38.269596432	23.826625954	380.297
38	748259.000	4238214.000	427.334	38.257682178	23.837333437	466.671
39	747106.750	4240520.130	320.813	38.278758636	23.824972587	360.231
40	746805.290	4241945.210	160.068	38.291669407	23.822027093	199.545
41	751457.330	4237137.920	512.703	38.247107310	23.873451472	552.06
42	751260.370	4238399.240	492.593	38.258515749	23.871650503	532.004
43	753047.320	4241465.870	91.952	38.285616978	23.893145376	131.543
44	752862.550	4240835.350	218.178	38.279993716	23.890810032	257.736
45	746923.040	4240835.800	273.936	38.281650695	23.822984797	313.364
46	747512.600	4241424.860	225.195	38.286790785	23.829923468	264.663
47	747081.430	4242352.770	147.667	38.295262083	23.825323371	187.168
48	747812.750	4242130.170	168.211	38.293056757	23.833598418	207.718
49	747889.180	4241964.760	199.019	38.291546753	23.834413392	238.52
50	749999.960	4241933.710	191.911	38.290681826	23.858509837	231.457
51	750098.560	4239866.990	446.925	38.272051331	23.858905635	486.378
52	749435.680	4240092.930	320.275	38.274269478	23.851416455	359.724
53	750411.500	4240118.610	387.539	38.274229102	23.862567751	466.411
54	747324.06	4238006.53	368.678	38.2560727	23.82657636	447.385
55	746968.94	4237801.84	380.484	38.25432782	23.82245105	459.174

Πίνακας Α.5: Συντεταγμένες Φωτοσταθερών από ορθοφωτογραφία + DTM σε WGS'84

Εικονοσυντεταγμένες Φωτοσταθερών Σημείων Ελέγχου:

Εικονοσυντεταγμένες Φωτοσταθερών – Σημείων Ελέγχου					
	s	l		s	l
1	159.489	-107.825	29	4598.295	-1011.010
2	366.562	-198.090	30	2678.121	-3163.576
3	996.212	-593.861	31	1484.931	-3103.578
4	6566.026	-716.945	32	3285.654	-3879.698
5	6506.910	-545.127	33	16.166	-4856.719
6	5713.224	-1347.810	34	7664.755	-3299.656
7	5180.826	-1565.065	35	6852.753	-3998.305
8	5166.591	-2100.539	36	8674.517	-3747.476
9	5152.986	-2098.824	37	10012.940	-3500.470
10	5997.752	-3052.361	38	7919.841	-4858.057
11	5924.521	-3245.255	39	10553.871	-2362.551
12	4468.240	-3354.607	40	11577.186	-771.013
13	113.017	-6153.093	41	1956.966	-5682.824
14	275.051	-6185.253	42	2578.896	-4261.545
15	9165.728	-1141.711	43	562.452	-520.605
16	8892.481	-1500.457	44	598.282	-1268.398
17	11593.933	-164.903	45	10999.838	-2026.486
18	11699.308	-163.038	46	10139.845	-1275.692
19	11041.638	-1314.702	47	11187.101	-268.716
20	10706.531	-1574.518	48	9824.586	-432.762
21	9717.506	-5468.751	49	9617.978	-605.977
22	10575.209	-5356.074	50	5892.737	-375.699
23	8821.263	-3397.363	51	4979.152	-2728.542
24	8869.691	-3358.630	52	6356.477	-2554.704
25	10770.819	-3079.774	53	4551.653	-2401.147
26	1303.316	-2388.868	54	9605.535	-5214.453
27	2120.827	-1593.962	55	10175.486	-5491.934

Πίνακας Α.6: Εικονοσυντεταγμένες Φωτοσταθερών



Β) ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Γενικό Φυσικό Μοντέλο Δέκτη:

Πίνακας Α.7:ΓΕΩΔΑΦΟΡΑ ΧΩΡΙΣ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ WGS'84			
Όνομα Σημείου Ελέγχου	Εναπομένον Σφάλμα s (pixel)	Εναπομένον Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
GCP #2	-6.562	2.65	7.077
GCP #3	-7.212	0.715	7.247
GCP #4	-6.026	1.915	6.323
GCP #5	-6.91	1.741	7.126
GCP #6	-7.224	0.285	7.229
GCP #7	-6.826	1.355	6.959
GCP #8	-4.591	0.913	4.68
GCP #9	-4.986	2.031	5.384
GCP #10	-6.752	1.865	7.005
GCP #11	-6.521	1.863	6.782
GCP #12	-7.24	1.528	7.399
GCP #13	-5.017	2.503	5.607
GCP #14	-7.051	2.486	7.476
GCP #15	-6.728	0.175	6.73
GCP #16	-5.481	1.069	5.585
GCP #17	-4.933	1.665	5.207
GCP #18	-5.308	0.31	5.318
GCP #19	-5.638	0.143	5.64
GCP #20	-6.531	2.293	6.922
GCP #21	-5.506	2.55	6.068
GCP #22	-4.209	2.671	4.985
GCP #23	-4.263	2.397	4.891
GCP #24	-6.691	1.821	6.935
GCP #25	-7.819	1.781	8.019
GCP #26	-6.316	0.944	6.386
GCP #27	-9.827	1.867	10.003
GCP #29	-5.295	3.42	6.303
GCP #30	-7.121	2.589	7.577
GCP #31	-6.931	1.942	7.198
GCP #32	-5.654	2.455	6.163
GCP #33	-7.166	3.027	7.78
GCP #34	-7.755	2.894	8.278
GCP #35	-8.753	1.992	8.977
GCP #36	-10.517	4.256	11.345
GCP #37	-6.94	2.765	7.471
GCP #38	-6.841	2.09	7.153
GCP #39	-9.871	3.484	10.468
GCP #40	-9.186	1.259	9.272
GCP #41	-7.966	1.078	8.038
GCP #42	-6.896	3.095	7.559
GCP #43	-6.452	4.155	7.674
GCP #44	-6.282	1.973	6.584
GCP #45	-7.838	1.446	7.97
GCP #46	-8.845	2.302	9.14
GCP #47	-10.101	1.509	10.213
GCP #48	-9.586	-0.896	9.628
GCP #49	-10.978	5.588	12.318
GCP #50	-6.737	2.095	7.055
GCP #51	-8.152	3.574	8.901
GCP #52	-7.477	3.282	8.165
GCP #53	-5.653	2.856	6.334
GCP #54	-7.535	2.751	8.021
GCP #55	-6.486	5.079	8.238

Πίνακας Α.8: Rms Σημείων Ελέγχου (pixel) Χωρίς GCP's			
Είδος Σημείων Ελέγχου	s	l	Total
GPS+ORTHO	7.245	2.477	7.656
GPS	4.494	1.259	4.667

Πίνακας Α.9: ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ 11 ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS (WGS'84)				
Όνομα Σημείου Ελέγχου	Είδος Σημείου	Εναπομένον Σφάλμα s (pixel)	Εναπομένον Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
GCP #1	Control	-0.489	-1.299	1.388
GCP #2	Check	-0.562	1.394	1.503
GCP #3	Check	-1.212	-0.541	1.327
GCP #4	Control	-0.026	0.659	0.659
GCP #5	Check	-0.91	0.484	1.031
GCP #6	Check	-1.224	-0.971	1.562
GCP #7	Control	-0.826	0.098	0.832
GCP #8	Check	1.409	-0.344	1.451
GCP #9	Check	1.014	0.774	1.276
GCP #10	Check	-0.752	0.609	0.967
GCP #11	Check	-0.521	0.607	0.8
GCP #12	Control	-1.24	0.272	1.269
GCP #13	Control	0.983	1.246	1.587
GCP #14	Check	-1.051	1.23	1.618
GCP #15	Check	-0.728	-1.082	1.304
GCP #16	Control	0.519	-0.187	0.551
GCP #17	Check	1.067	0.409	1.143
GCP #18	Control	0.692	-0.947	1.173
GCP #19	Check	0.362	-1.113	1.171
GCP #20	Check	-0.531	1.037	1.164
GCP #21	Control	0.494	1.293	1.384
GCP #22	Check	1.791	1.415	2.283
GCP #23	Check	1.737	1.141	2.078
GCP #24	Control	-0.691	0.564	0.892
GCP #25	Control	-1.819	0.524	1.893
GCP #26	Control	-0.316	-0.313	0.444
GCP #27	Check	-3.827	0.611	3.876
GCP #29	Check	-0.295	2.163	2.183
GCP #30	Check	-1.121	1.332	1.741
GCP #31	Check	-0.931	0.685	1.156
GCP #32	Check	0.346	1.198	1.247
GCP #33	Check	-1.166	1.771	2.12
GCP #34	Check	-1.755	1.638	2.401
GCP #35	Check	-2.753	0.735	2.849
GCP #36	Check	-4.517	2.999	5.422
GCP #37	Check	-0.94	1.509	1.778
GCP #38	Check	-0.841	0.833	1.184
GCP #39	Check	-3.871	2.228	4.466
GCP #40	Check	-3.186	0.003	3.186
GCP #41	Check	-1.966	-0.178	1.974
GCP #42	Check	-0.896	1.838	2.045
GCP #43	Check	-0.452	2.899	2.934
GCP #44	Check	-0.282	0.716	0.769
GCP #45	Check	-1.838	0.19	1.848
GCP #46	Check	-2.845	1.046	3.031
GCP #47	Check	-4.101	0.253	4.109
GCP #48	Check	-3.586	-2.153	4.183
GCP #49	Check	-4.978	4.331	6.598
GCP #50	Check	-0.737	0.838	1.116
GCP #51	Check	-2.152	2.318	3.163
GCP #52	Check	-1.477	2.026	2.507
GCP #53	Check	0.347	1.599	1.637
GCP #54	Check	-1.535	1.495	2.142
GCP #55	Check	-0.486	3.822	3.853

Πίνακας Α.10: ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ 10 ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ ΟΡΤΗΟ + DTM (WGS'84)

Όνομα Σημείου Ελέγχου	Είδος Σημείου	Εναπομένον Σφάλμα s (pixel)	Εναπομένον Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
GCP #1	Check	0.511	-1.654	1.731
GCP #2	Check	0.438	1.039	1.127
GCP #3	Check	-0.212	-0.897	0.921
GCP #4	Check	1.974	0.304	1.997
GCP #5	Check	1.09	0.129	1.097
GCP #6	Check	0.776	-1.326	1.537
GCP #7	Check	1.174	-0.257	1.202
GCP #8	Check	3.409	-0.699	3.48
GCP #9	Check	3.014	0.419	3.043
GCP #10	Check	1.248	0.254	1.274
GCP #11	Check	1.479	0.252	1.5
GCP #12	Check	0.76	-0.083	0.765
GCP #13	Check	1.983	0.891	2.174
GCP #14	Check	-0.051	0.875	0.876
GCP #15	Check	2.272	-1.437	2.688
GCP #16	Check	3.519	-0.542	3.56
GCP #17	Check	4.067	0.054	4.067
GCP #18	Check	3.692	-1.302	3.914
GCP #19	Check	3.362	-1.468	3.669
GCP #20	Check	2.469	0.682	2.562
GCP #21	Check	3.494	0.938	3.618
GCP #22	Check	4.791	1.06	4.907
GCP #23	Check	4.737	0.786	4.802
GCP #24	Check	1.309	0.209	1.325
GCP #25	Check	1.181	0.169	1.193
GCP #26	Check	1.684	-0.668	1.812
GCP #27	Control			
GCP #29	Check	1.705	1.808	2.485
GCP #30	Control			
GCP #31	Check	0.069	0.33	0.337
GCP #32	Check	2.346	0.843	2.493
GCP #33	Control			
GCP #34	Check	0.245	1.282	1.306
GCP #35	Control			
GCP #36	Check	-2.517	2.644	3.651
GCP #37	Check	2.06	1.154	2.361
GCP #38	Check	1.159	0.478	1.253
GCP #39	Check	-0.871	1.873	2.065
GCP #40	Control			
GCP #41	Control			
GCP #42	Check	1.104	1.483	1.849
GCP #43	Check	0.548	2.544	2.602
GCP #44	Check	0.718	0.361	0.803
GCP #45	Check	1.162	-0.165	1.174
GCP #46	Check	0.155	0.691	0.708
GCP #47	Control			
GCP #48	Control			
GCP #49	Check	-1.978	3.976	4.441
GCP #50	Control			
GCP #51	Check	-0.152	1.962	1.968
GCP #52	Control			
GCP #53	Check	2.347	1.244	2.656
GCP #54	Check	0.465	1.139	1.231
GCP #55	Check	2.514	3.467	4.283

Πίνακας Α.11: ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕ 11 ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ ΟΡΤΗΟ + DTM, GPS (WGS'84)

Όνομα Σημείου Ελέγχου	Είδος Σημείου	Εναπομένον Σφάλμα s (pixel)	Εναπομένον Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
GCP #1	Control			
GCP #2	Check	-0.562	1.441	1.547
GCP #3	Check	-1.212	-0.494	1.309
GCP #4	Control			
GCP #5	Check	-0.91	0.531	1.054
GCP #6	Control			
GCP #7	Check	0.174	0.145	0.227
GCP #8	Check	2.409	-0.297	2.428
GCP #9	Check	2.014	0.821	2.175
GCP #10	Check	0.248	0.656	0.701
GCP #11	Control			
GCP #12	Check	-0.24	0.319	0.399
GCP #13	Check	0.983	1.293	1.624
GCP #14	Check	-1.051	1.277	1.654
GCP #15	Check	0.272	-1.035	1.07
GCP #16	Check	1.519	-0.14	1.525
GCP #17	Check	2.067	0.456	2.117
GCP #18	Check	1.692	-0.9	1.916
GCP #19	Control			
GCP #20	Check	0.469	1.084	1.181
GCP #21	Check	1.494	1.34	2.007
GCP #22	Check	2.791	1.462	3.151
GCP #23	Check	2.737	1.188	2.984
GCP #24	Control			
GCP #25	Check	-0.819	0.571	0.998
GCP #26	Check	-0.316	-0.266	0.413
GCP #27	Check	-2.827	0.658	2.903
GCP #29	Check	0.705	2.21	2.32
GCP #30	Check	-1.121	1.379	1.778
GCP #31	Check	-0.931	0.732	1.185
GCP #32	Control			
GCP #33	Check	-0.166	1.818	1.825
GCP #34	Check	-0.755	1.685	1.846
GCP #35	Check	-1.753	0.782	1.919
GCP #36	Check	-3.517	3.046	4.653
GCP #37	Control			
GCP #38	Control			
GCP #39	Check	-2.871	2.275	3.663
GCP #40	Check	-2.186	0.05	2.187
GCP #41	Check	-1.966	-0.131	1.97
GCP #42	Control			
GCP #43	Check	-0.452	2.946	2.98
GCP #44	Check	-0.282	0.763	0.813
GCP #45	Check	-0.838	0.237	0.871
GCP #46	Check	-1.845	1.093	2.145
GCP #47	Check	-3.101	0.3	3.116
GCP #48	Control			
GCP #49	Check	-3.978	4.378	5.915
GCP #50	Check	0.263	0.885	0.923
GCP #51	Check	-2.152	2.365	3.198
GCP #52	Check	-0.477	2.073	2.127
GCP #53	Check	1.347	1.646	2.127
GCP #54	Check	-1.535	1.542	2.175
GCP #55	Check	0.514	3.87	3.904

Πίνακας A.12: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου από GPS Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS			
Ονομασία Σημείου Ελέγχου	Υπολειπόμενο Σφάλμα s (pixel)	Υπολειπόμενο Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
2	0.062	-2.710	2.711
4	1.271	-0.941	1.581
6	-1.210	0.455	1.292
7	-0.362	-0.480	0.601
9	1.843	-0.722	1.980
10	0.750	0.188	0.773
16	1.455	0.582	1.567
18	0.555	1.114	1.245
19	-0.135	1.496	1.502
23	1.780	-0.492	1.847
RMS	1.192	1.215	1.615

Πίνακας A.13: Σφάλμα Σημείων Ελέγχου από Ορθοφωτογραφία - DTM Χρήση 16 Φωτοσταθερών από GPS			
Ονομασία Σημείου Ελέγχου	Υπολειπόμενο Σφάλμα s (pixel)	Υπολειπόμενο Σφάλμα l (pixel)	Συνολικό RMS (pixel)
27	-3.336	-1.091	3.510
29	1.051	-2.666	2.866
30	-2.300	-1.912	2.991
31	-2.616	-1.365	2.950
32	-0.811	-1.755	1.933
33	-2.499	-1.672	3.007
34	-0.167	-0.336	0.375
35	-0.659	0.807	1.042
36	-4.448	-2.168	4.949
37	-1.701	-0.973	1.960
38	-3.040	-0.106	3.042
39	-5.121	-2.054	5.517
40	-3.043	0.488	3.082
41	-2.106	1.070	2.362
42	-0.927	-1.548	1.805
43	0.686	-3.633	3.697
44	-0.380	-1.266	1.322
45	-2.802	0.179	2.808
46	-2.416	-0.574	2.483
47	-3.158	0.024	3.158
48	-2.183	2.485	3.307
49	-3.616	-4.047	5.427
50	1.792	-0.940	2.024
51	-2.727	-2.545	3.730
52	0.006	-1.255	1.255
53	0.949	-1.554	1.821
54	-2.277	-0.645	2.367
55	-1.638	-3.261	3.650
RMS	2.435	1.834	3.136

Πίνακας Α.14: ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS (14) Σημεία Ελέγχου από GPS (10)			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_I	Συνολικό RMS
1	-0.489	-1.654	1.725
3	-0.212	-0.897	0.921
4	-0.026	0.303	0.305
6	-1.224	-1.326	1.805
8	1.409	-0.699	1.573
9	1.014	0.419	1.097
10	-0.752	0.253	0.793
13	0.983	0.891	1.327
16	0.519	-0.543	0.751
18	-0.308	-1.302	1.338
19	-0.638	-1.469	1.601
20	-1.531	0.681	1.675
21	0.494	0.938	1.06
24	-0.691	0.209	0.722
RMS	0.852	0.943	1.271

Πίνακας Α.15: ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS (14) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_I	Συνολικό RMS
36	-4.517	2.644	1.725
38	-1.841	0.478	0.921
39	-3.871	1.873	0.305
42	-0.896	1.483	1.805
45	-1.838	-0.165	1.573
48	-3.586	-2.508	1.097
49	-4.978	3.976	0.793
51	-2.152	1.962	1.327
53	0.347	1.244	0.751
54	-2.535	1.139	1.338
RMS	3.029	2.043	3.654

Πίνακας Α.16: ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS + ORTHO (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
36	-4.517	2.473	5.150
38	-0.841	0.307	0.895
39	-3.871	1.702	4.229
42	0.104	1.312	1.316
45	-1.838	-0.336	1.868
48	-3.586	-2.679	4.476
49	-3.978	3.806	5.505
51	-2.152	1.792	2.800
53	1.347	1.074	1.723
54	-1.535	0.969	1.815
RMS	2.774	1.947	3.389

Πίνακας Α.17: ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS + ORTHO (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
36	-3.517	1.908	4.001
38	0.159	-0.258	0.303
39	-1.871	1.136	2.189
42	0.104	0.747	0.754
45	0.162	-0.902	0.916
48	-1.586	-3.244	3.611
49	-2.978	3.24	4.401
51	-1.152	1.226	1.682
53	1.347	0.508	1.440
54	-0.535	0.403	0.670
RMS	1.753	1.712	2.451

Πίνακας A.18: Φωτοσταθερά (16) - Σημεία Ελέγχου (10) από GPS RMS (pixel)			
Check Point	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
2	0.062	-2.710	2.711
4	1.271	-0.941	1.581
6	-1.210	0.455	1.292
7	-0.362	-0.480	0.601
9	1.843	-0.722	1.980
10	0.750	0.188	0.773
16	1.455	0.582	1.567
18	0.555	1.114	1.245
19	-0.135	1.496	1.502
23	1.780	-0.492	1.847
RMS	1.192	1.215	1.615

Πίνακας A.19: Φωτοσταθερά (16) - Σημεία Ελέγχου (28) από Ortho + DTM RMS (pixel)			
Check Point	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
27	-3.336	-1.091	3.510
29	1.051	-2.666	2.866
30	-2.300	-1.912	2.991
31	-2.616	-1.365	2.950
32	-0.811	-1.755	1.933
33	-2.499	-1.672	3.007
34	-0.167	-0.336	0.375
35	-0.659	0.807	1.042
36	-4.448	-2.168	4.949
37	-1.701	-0.973	1.960
38	-3.040	-0.106	3.042
39	-5.121	-2.054	5.517
40	-3.043	0.488	3.082
41	-2.106	1.070	2.362
42	-0.927	-1.548	1.805
43	0.686	-3.633	3.697
44	-0.380	-1.266	1.322
45	-2.802	0.179	2.808
46	-2.416	-0.574	2.483
47	-3.158	0.024	3.158
48	-2.183	2.485	3.307
49	-3.616	-4.047	5.427
50	1.792	-0.940	2.024
51	-2.727	-2.545	3.730
52	0.006	-1.255	1.255
53	0.949	-1.554	1.821
54	-2.277	-0.645	2.367
55	-1.638	-3.261	3.650
RMS	2.479	1.868	3.104

Πίνακας Α.20: ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS (14),Σημεία Ελέγχου από GPS (10), DLT			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
1	-1.304	2.292	2.637
3	0.567	2.227	2.298
4	1.291	-0.914	1.582
6	-1.783	0.347	1.816
8	2.455	0.546	2.515
9	1.905	-0.596	1.996
10	0.905	0.318	0.959
13	2.068	0.074	2.070
16	0.809	0.434	0.918
18	0.235	0.912	0.942
19	-1.378	1.178	1.813
20	-1.966	-0.785	2.117
21	-0.883	-0.287	0.929
24	-2.494	0.135	2.497
RMS	1.583	1.037	1.893

Πίνακας Α.21: ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS (14), Σημεία Ελέγχου από Ortho (10), DLT			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
36	-5.359	-1.801	5.653
38	-4.329	0.780	4.399
39	-7.879	-1.885	8.101
42	-0.182	-0.474	0.508
45	-4.849	0.124	4.850
48	-1.616	1.981	2.556
49	-3.620	-4.593	5.849
51	-3.254	-1.975	3.806
53	1.147	-1.398	1.808
54	-3.224	-0.520	3.265
RMS	4.136	1.970	4.581

Πίνακας A.22: ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS + ORTHO (44), Σημεία Ελέγχου από Ortho (10), DLT			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
36	-4.147	-2.007	4.607
38	-2.604	0.289	2.620
39	-5.511	-2.032	5.874
42	-0.335	-0.681	0.759
45	-3.003	0.136	3.006
48	-2.141	2.754	3.489
49	-3.729	-3.808	5.330
51	-2.895	-1.924	3.476
53	0.839	-0.962	1.276
54	-1.554	-0.545	1.647
RMS	3.057	1.890	3.595

Πίνακας A.23: ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ DLT ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ (GPS)						
	8 Gcp's	12 Gcp's	16 Gcp's	18 Gcp's	20 Gcp's	22 Gcp's
a1	0.1459981475	0.1464016489	0.1467086270	0.1467671087	0.1464100579	0.1466049373
a2	1.0822019771	1.0823721350	1.0827527191	1.0827511009	1.0826558714	1.0826648123
a3	0.0502026716	0.0496427890	0.0491132626	0.0490251000	0.0494406270	0.0492472263
a4	0.0002226444	0.0001957076	0.0002349432	0.0002082932	0.0002176932	0.0002062635
b1	1.1213400779	1.1210390829	1.1211423419	1.1210506010	1.1212439435	1.1211503791
b2	0.1698395996	0.1697628033	0.1698668754	0.1699011813	0.1699204355	0.1699152722
b3	0.0002977581	0.0003056981	0.0005476156	0.0005887249	0.0002830322	0.0003957404
b4	0.0000509385	0.0001182867	0.0001152474	0.0001276238	0.0001297409	0.0001349016
c1	0.0007986875	0.0009633894	0.0000858812	0.0000937820	0.0004020187	0.0001814365
c2	0.0000951513	0.0004145975	0.0005899708	0.0005701558	0.0004664799	0.0004418484
c3	0.0010561055	0.0007708851	0.0002112574	0.0002676737	0.0001456627	0.0000846324

Πίνακας Α.24: RPF2ου, ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΑ ΑΠΟ GPS + ORTHO (44) Σημεία Ελέγχου από Ortho (10)			
Σημείο Ελέγχου	(RMS) (pixel)		
	Εναπομένον Σφάλμα_s	Εναπομένον Σφάλμα_l	Συνολικό RMS
36	-4.051	-1.875	4.464
38	-0.905	1.163	1.474
39	-3.938	-1.964	4.401
42	0.255	-0.670	0.717
45	-1.272	0.175	1.284
48	-1.255	2.412	2.719
49	-2.216	-4.157	4.711
51	-2.006	-1.824	2.712
53	-0.192	-1.048	1.066
54	-1.676	0.505	1.750
RMS	2.186	1.923	2.911

Πίνακας Α.25: RPF 2 ^{ου} Βαθμού, Αυξανόμενος Αριθμός Φωτοσταθερών, Σημεία Ελέγχου από ORTHO + DTM (10)			
Αριθμός Φωτοσταθερών	Εναπομένον σφάλμα_s	Εναπομένον σφάλμα_l	Συνολικό RMS
19	26.395	204.472	206.168
20	5.396	22.716	23.348
22	38.618	21.676	44.286
26	3.536	2.285	4.210
28	3.00	2.12	3.673
31	2.086	2.447	3.215
36	3.953	1.689	4.299
41	2.100	1.950	2.865
44	1.85	1.63	2.461

	Πίνακας Α.26: ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ RPF 2 ^{ου} Βαθμού					
α/α	26 Gcp's	28 Gcp's	32 Gcp's	36 Gcp's	41 Gcp's	44 Gcp's
α1	-3.74E-04	-3.83E-04	-3.76E-04	-3.43E-04	-3.93E-04	-3.44E-04
α2	-1.08E+00	-1.08E+00	-1.08E+00	-1.08E+00	-1.08E+00	-1.08E+00
α3	1.47E-01	1.47E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.49E-01	1.48E-01
α4	-4.83E-02	-4.79E-02	-4.72E-02	-4.67E-02	-4.69E-02	-4.74E-02
α5	1.79E+00	1.92E+00	4.28E+00	1.94E+00	5.15E+00	4.91E+00
α6	4.27E+00	4.53E+00	5.02E+00	5.84E+00	5.00E+00	4.86E+00
α7	-5.17E-01	-5.46E-01	-5.17E-01	-7.33E-01	-4.79E-01	-4.70E-01
α8	-1.64E+00	-1.61E+00	-2.19E+00	-2.09E+00	-2.52E+00	-2.59E+00
α9	-2.11E-01	-2.29E-01	-5.41E-01	-2.26E-01	-6.54E-01	-6.18E-01
α10	1.97E-01	2.08E-01	2.30E-01	2.66E-01	2.30E-01	2.25E-01
b1	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
b2	1.51E+00	1.49E+00	2.03E+00	1.93E+00	2.33E+00	2.39E+00
b3	-1.44E+00	-1.57E+00	-3.67E+00	-1.52E+00	-4.44E+00	-4.21E+00
b4	-4.01E+00	-4.24E+00	-4.72E+00	-5.47E+00	-4.72E+00	-4.60E+00
b5	3.18E-03	3.02E-03	-1.72E-03	-3.50E-03	-4.42E-03	-2.45E-03
b6	-2.11E-03	-3.05E-03	-5.01E-03	-9.13E-03	-5.76E-03	-4.33E-03
b7	9.05E-04	-1.17E-03	-2.96E-03	2.73E-03	-2.07E-03	-3.64E-03
b8	8.66E-04	1.42E-03	2.34E-03	4.31E-03	2.98E-03	2.90E-03
b9	3.62E-03	2.81E-03	4.49E-06	3.20E-03	-1.66E-03	-1.95E-03
b10	1.07E-03	-2.73E-04	-7.59E-04	1.19E-03	-8.16E-05	-1.02E-03
c1	-1.98E-04	-2.62E-04	-3.38E-04	-2.85E-04	-1.81E-04	-1.48E-04
c2	1.70E-01	1.70E-01	1.69E-01	1.70E-01	1.70E-01	1.70E-01
c3	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00
c4	-3.09E-05	2.28E-04	9.98E-04	4.38E-04	1.26E-04	-2.43E-05
c5	-6.20E-01	-6.83E-01	-8.35E-01	-1.23E+00	-4.58E-01	-4.70E-01
c6	-6.94E-02	-9.54E-02	-1.69E-01	-1.80E-01	-5.77E-02	-5.72E-02
c7	-4.58E-01	-6.30E-01	-1.12E+00	-1.18E+00	-3.83E-01	-3.79E-01
c8	-8.40E-03	-1.25E-02	-2.73E-02	-1.01E-01	1.53E-02	1.35E-02
c9	-3.72E+00	-3.97E+00	-4.31E+00	-3.66E+00	-3.68E+00	-3.69E+00
c10	6.62E-05	8.24E-04	-1.84E-04	8.82E-04	-4.53E-04	-2.35E-04
d1	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
d2	-5.04E-02	-7.33E-02	-1.62E-01	-6.01E-01	8.83E-02	7.79E-02
d3	-3.32E+00	-3.54E+00	-3.84E+00	-3.26E+00	-3.28E+00	-3.29E+00
d4	-4.08E-01	-5.62E-01	-9.98E-01	-1.05E+00	-3.40E-01	-3.37E-01
d5	-2.00E-03	-1.54E-03	-9.50E-04	-2.09E-03	1.61E-03	1.41E-03
d6	-1.61E-03	-3.93E-04	1.93E-03	-1.68E-03	5.81E-04	5.87E-04
d7	6.86E-04	2.50E-03	-7.42E-04	2.10E-03	-3.01E-03	-2.42E-03
d8	2.22E-04	3.34E-04	2.32E-03	1.25E-03	6.60E-04	4.16E-04
d9	1.38E-03	1.81E-03	-2.26E-04	5.03E-04	-6.35E-04	-6.66E-04
d10	-4.13E-04	7.07E-04	-3.47E-03	8.44E-04	-8.74E-04	-4.62E-04

end

```

M=26%Sinolikos arithmos fotostatherwn- simeiwnelegxou

%Arithmos fotostatherwn pou simetexoun sti sinortrhosi(g)
g=12;
%Fotostathera pou simetexoun sti sinortrhosi(f)
f=[2,5,7,11,12,14,15,17,22,23,25,26];
%Arithmos Simeiwnelegxou (t)
t=M-g;
%Simeia Elegxou(e)
e=[1,3,4,6,8,9,10,13,16,18,19,20,21,24];

m = 2*g;    %Plithos eksisosewn paratirisis
r = m-11;   %Vathos eleutherias sistimatos

fprintf('\n Arithmos fotostatherwn: %g',g)
fprintf('\n Arithmos eksisosewn paratirisis: %g\n',m)

%Dimiourgia pinaka sxediasmou (A)
A1=zeros(g,11);
A2=zeros(g,11);

for i=f;

X = W(i,2);
Y = W(i,3);
Z = W(i,4);
s= W(i,5);
l= W(i,6);

A1(i,1)= X;
A1(i,2)= Y;
A1(i,3)= Z;
A1(i,4)= 1;
A1(i,5)= 0;
A1(i,6)= 0;
A1(i,7)= 0;
A1(i,8)= 0;
A1(i,9)= -s.*X;
A1(i,10)= -s.*Y;
A1(i,11)= -s.*Z;

A2(i,1)= 0;
A2(i,2)= 0;
A2(i,3)= 0;
A2(i,4)= 0;
A2(i,5)= X;
A2(i,6)= Y;
A2(i,7)= Z;
A2(i,8)= 1;
A2(i,9)= -l.*X;
A2(i,10)= -l.*Y;
A2(i,11)= -l.*Z;

b1(i,1)=(s);
b2(i,1)=(1);

A=[A1;A2];
b=[b1;b2];

end
%Epilisi grammikou sistimatos
dx=(A'*A)\A'*b;

```

```

L=dx;
U=A*dx-b;
%Ypologismos so_aposteriori sinorthosis
so_aposteriori = sqrt((U'*U)/r);
fprintf('\n so_aposteriori fotostatherwn: %g\n\n',so_aposteriori)

%Sintelestes poluwnumwn
a1=L(1)
a2=L(2)
a3=L(3)
a4=L(4)
b1=L(5)
b2=L(6)
b3=L(7)
b4=L(8)
c1=L(9)
c2=L(10)
c3=L(11)

C=load('simeia_elegxou_wgs_DLT.txt'); % Eisagwgi arxeiou simeiwv elegxou

%Arxikopoihsh dianusmatwn
S=zeros(M,1);
L=zeros(M,1);
H=zeros(M,3);
ds=zeros(M,1);
dl=zeros(M,1);

for i=e;
X = C(i,2);
Y = C(i,3);
Z = C(i,4);

%Ypologismos newv kanonikopoiimenwn eikonosintetagmenwn

s_new(i,1)=(a1.*X+a2.*Y+a3.*Z+a4)/(c1.*X+c2.*Y+c3.*Z+1);
l_new(i,1)=(b1.*X+b2.*Y+b3.*Z+b4)/(c1.*X+c2.*Y+c3.*Z+1);

%Antistrofi ths kanonikopoihshs

H(i,1)=G(i,1);
H(i,2)=(s_new(i,1).*Sscale)+Smean;
H(i,3)=(l_new(i,1).*Lscale)+Lmean;

%Ypologismos enapomenwn sfalmatwn

ds(i,1)=H(i,2)-G(i,5);
dl(i,1)=H(i,3)-G(i,6);

end

Enapomenvn_sfalma_s=ds
Enapomenvn_sfalma_l=dl

%Ypologismos RMS simeiwv elegxou
RMS_s=sqrt(sum(ds.^2)./t)
RMS_l=sqrt(sum(dl.^2)./t)
RMS_Total=sqrt(RMS_s^2+RMS_l^2)

toc

```

```

clc
clear all
format long g
format compact
tic
fprintf('\t\t\t\t\t Algorithmos Geoanaforas me klasmatika poluonyma Zou vathmou')

fprintf('\n\n \t\t\t\t\t Oi eksisoseis einai tis morfis:')

fprintf('\n\n\t\t\t\t\t\t\t xn=P1(X,Y,Z)/P2(X,Y,Z)\n')
fprintf('\t\t\t\t\t\t\t yn=P3(X,Y,Z)/P4(X,Y,Z)\n')

%Eisodos Geodaitikon suntetagmenwn fotostatheron apo arxeio(G)
G=load('FOTOSTATHERA_RPF2ou.txt');
%Kanonikopoiish timwn
n=length(G); %Arithmos fotostatheron pros kanonikopoihs
%Ypologismos meswn timwn
D=mean(G);
Xmean=D(2);
Ymean=D(3);
Zmean=D(4);
Smean=D(5);
Lmean=D(6);
%Ypologismos megaluterwn timwn
Gmax=max(G);
Xmax=Gmax(2);
Ymax=Gmax(3);
Zmax=Gmax(4);
Smax=Gmax(5);
Lmax=Gmax(6);
%Ypologismos mikroterwn timwn
Gmin=min(G);
Xmin=Gmin(2);
Ymin=Gmin(3);
Zmin=Gmin(4);
Smin=Gmin(5);
Lmin=Gmin(6);
%Syntelestis kanonikopoihs
Xscale=max(abs(Xmax-Xmean),abs(Xmin-Xmean));
Yscale=max(abs(Ymax-Ymean),abs(Ymin-Ymean));
Zscale=max(abs(Zmax-Zmean),abs(Zmin-Zmean));
Sscale=max(abs(Smax-Smean),abs(Smin-Smean));
Lscale=max(abs(Lmax-Lmean),abs(Lmin-Lmean));
%Dimiourgia pinaka me kanonikopoihmenes times(W)
for i=1:n
    W(i,1)=G(i,1);
    W(i,2)=(G(i,2)-Xmean)/Xscale;
    W(i,3)=(G(i,3)-Ymean)/Yscale;
    W(i,4)=(G(i,4)-Zmean)/Zscale;
    W(i,5)=(G(i,5)-Smean)/Sscale;
    W(i,6)=(G(i,6)-Lmean)/Lscale;
end
%Sinolikos arithmos fotostatherwn- simeiwv elegxou
M=54;
%Arithmos fotostatherwn pou simetexoun sti sinortrhosi(g)
g=44;
%Fotostathera pou simetexoun sti sinortrhosi(f)
f=[1:26,29:34,37,40,41,43,44,46,47,50,52,55];
%Arithmos Simeiwv Elegxou (t)
t=M-g;
%Simeia Elegxou(e)
e=[36,38,39,42,45,48,49,51,53,54];

m = 2*g; %Plithos eksisosewn paratirisis
r = m-38; %Vathos eleutherias sistimatos

```

```

fprintf('\n Arithmos fotostaTherwn: %g',g)
fprintf('\n Arithmos eksiswsewn paratirisis: %g',m)
fprintf('\n Vathmos eleutherias: %g\n\n',r)

%Epilush grammikou sistimatos
%Arxikopoihsh dianismatwn
dx=zeros(38,1);
Jx = zeros(g,38);
Jy = zeros(g,38);
dlx=zeros(g,1);
dly=zeros(g,1);

for i=f;
X = W(i,2);
Y = W(i,3);
Z = W(i,4);
u= W(i,5);
v= W(i,6);

%Ypologismos pinaka sxediasmou (J)
Jx(i,1)= 1;
Jx(i,2)= Y;
Jx(i,3)= X;
Jx(i,4)= Z;
Jx(i,5)= X.*Y;
Jx(i,6)= Y.*Z;
Jx(i,7)= X.*Z;
Jx(i,8)= Y.^2;
Jx(i,9)= X.^2;
Jx(i,10)= Z.^2;
Jx(i,11)= -u.*Y;
Jx(i,12)= -u.*X;
Jx(i,13)= -u.*Z;
Jx(i,14)= -u.*Y.*X;
Jx(i,15)= -u.*Y.*Z;
Jx(i,16)= -u.*X.*Z;
Jx(i,17)= -u.*Y.^2;
Jx(i,18)= -u.*X.^2;
Jx(i,19)= -u.*Z.^2;
Jy(i,20)= 1;
Jy(i,21)= Y;
Jy(i,22)= X;
Jy(i,23)= Z;
Jy(i,24)= Y.*X;
Jy(i,25)= Y.*Z;
Jy(i,26)= X.*Z;
Jy(i,27)= Y.^2;
Jy(i,28)= X.^2;
Jy(i,29)= Z.^2;
Jy(i,30)= -v.*Y;
Jy(i,31)= -v.*X;
Jy(i,32)= -v.*Z;
Jy(i,33)= -v.*Y.*X;
Jy(i,34)= -v.*Y.*Z;
Jy(i,35)= -v.*X.*Z;
Jy(i,36)= -v.*Y.^2;
Jy(i,37)= -v.*X.^2;
Jy(i,38)= -v.*Z.^2;

dlx(i,1)=u;
dly(i,1)=v;
end

dl=[dlx;dly];
%Διορθώσεις των προσεγγιστικών τιμών των αγνωστων
J=[Jx;Jy];
dx =(inv(J'*J))*J'*dl;
U=J*dx-dl;
so_aposteriori = sqrt((U'*U)/r);

```

```

%Prosorines times agnwstwn
a1= dx(1);      b1=1;
a2= dx(2);      b2= dx(11);
a3= dx(3);      b3= dx(12);
a4= dx(4);      b4= dx(13);
a5= dx(5);      b5= dx(14);
a6= dx(6);      b6= dx(15);
a7= dx(7);      b7= dx(16);
a8= dx(8);      b8= dx(17);
a9= dx(9);      b9= dx(18);
a10= dx(10);    b10= dx(19);
c1= dx(20);     d1=1;
c2= dx(21);     d2= dx(30);
c3= dx(22);     d3= dx(31);
c4= dx(23);     d4= dx(32);
c5= dx(24);     d5= dx(33);
c6= dx(25);     d6= dx(34);
c7= dx(26);     d7= dx(35);
c8= dx(27);     d8= dx(36);
c9= dx(28);     d9= dx(37);
c10= dx(29);    d10= dx(38);

Jx = zeros(g,38);
Jy = zeros(g,38);

dlx=zeros(g,1);
dly=zeros(g,1);

p = 1;
while(p<100);
    p;

    for i=f;

        X = W(i,2);
        Y = W(i,3);
        Z = W(i,4);
        s= W(i,5);
        l= W(i,6);

        P1=(a1 + X.*a3 + Y.*a2 + Z.*a4 + X.^2.*a9 + Y.^2.*a8 + Z.^2.*a10 + X.*Y.*a5 + X.*Z.*a7 +
Y.*Z.*a6);
        P2=(b1 + X.*b3 + Y.*b2 + Z.*b4 + X.^2.*b9 + Y.^2.*b8 + Z.^2.*b10 + X.*Y.*b5 + X.*Z.*b7 +
Y.*Z.*b6);
        P3=(c1 + X.*c3 + Y.*c2 + Z.*c4 + X.^2.*c9 + Y.^2.*c8 + Z.^2.*c10 + X.*Y.*c5 + X.*Z.*c7 +
Y.*Z.*c6);
        P4=(d1 + X.*d3 + Y.*d2 + Z.*d4 + X.^2.*d9 + Y.^2.*d8 + Z.^2.*d10 + X.*Y.*d5 + X.*Z.*d7 +
Y.*Z.*d6);

        Jx(i,1)= 1./P2;
        Jx(i,2)= Y./P2;
        Jx(i,3)= X./P2;
        Jx(i,4)= Z./P2;
        Jx(i,5)= (X.*Y)./P2;
        Jx(i,6)= Y.*Z./P2;
        Jx(i,7)= (X.*Z)./P2;
        Jx(i,8)= Y.^2./P2;
        Jx(i,9)= X.^2./P2;
        Jx(i,10)= Z.^2./P2;

        Jx(i,11)= (-Y.* P1./P2.^2);
        Jx(i,12)= (-X.* P1./P2.^2);
        Jx(i,13)= (-Z.* P1./P2.^2);
        Jx(i,14)= (-X.*Y.*P1./P2.^2);
        Jx(i,15)= (-Y.*Z.*P1./P2.^2);
        Jx(i,16)= (-X.*Z.*P1./P2.^2);
        Jx(i,17)= (-Y.^2.*P1./P2.^2);
        Jx(i,18)= (-X.^2.*P1./P2.^2);

```

```

Jx(i,19)= (-Z.^2.*P1./P2.^2);

Jy(i,20)=1./P4;
Jy(i,21)=Y./P4;
Jy(i,22)=X./P4;
Jy(i,23)=Z./P4;
Jy(i,24)=(X.*Y)./P4;
Jy(i,25)=(Y.*Z)./P4;
Jy(i,26)=(X.*Z)./P4;
Jy(i,27)=Y.^2./P4;
Jy(i,28)=X.^2./P4;
Jy(i,29)=Z.^2./P4;

Jy(i,30)=-Y.* P3./P4.^2;
Jy(i,31)=-X.* P3./P4.^2;
Jy(i,32)=-Z.* P3./P4.^2;
Jy(i,33)=-X.*Y.*P3./P4.^2;
Jy(i,34)=-Y.*Z.*P3./P4.^2;
Jy(i,35)=-X.*Z.*P3./P4.^2;
Jy(i,36)=-Y.^2.*P3./P4.^2;
Jy(i,37)=-X.^2.*P3./P4.^2;
Jy(i,38)=-Z.^2.*P3./P4.^2;

dlx(i,1)=- (a1+a2.*Y+a3.*X+a4.*Z+a5.*Y.*X+a6.*Y.*Z+a7.*X.*Z+a8.*Y.^2+a9.*X.^2+a10.*Z.^2)...
./ (b1+b2.*Y+b3.*X+b4.*Z+b5.*Y.*X+b6.*Y.*Z+b7.*X.*Z+b8.*Y.^2+b9.*X.^2+b10.*Z.^2)+s;

dly(i,1)=- (c1+c2.*Y+c3.*X+c4.*Z+c5.*Y.*X+c6.*Y.*Z+c7.*X.*Z+c8.*Y.^2+c9.*X.^2+c10.*Z.^2)...
./ (d1+d2.*Y+d3.*X+d4.*Z+d5.*Y.*X+d6.*Y.*Z+d7.*X.*Z+d8.*Y.^2+d9.*X.^2+d10.*Z.^2)+l;

dl=[dlx;dly];

end

J=[Jx;Jy];
dx = (inv(J'*J))*J'*dl;
U=J*dx-dl;
so_aposteriori = sqrt((U'*U)/r);

%Telikoi poluonimikoi sintelestes
a1 = a1 + dx(1);
a2 = a2 + dx(2);
a3 = a3 + dx(3);
a4 = a4 + dx(4);
a5 = a5 + dx(5);
a6 = a6 + dx(6);
a7 = a7 + dx(7);
a8 = a8 + dx(8);
a9 = a9 + dx(9);
a10 = a10 + dx(10);

b1 = 1;
b2 = b2 + dx(11);
b3 = b3 + dx(12);
b4 = b4 + dx(13);
b5 = b5 + dx(14);
b6 = b6 + dx(15);
b7 = b7 + dx(16);
b8 = b8 + dx(17);
b9 = b9 + dx(18);
b10 = b10 + dx(19);

c1 = c1 + dx(20);
c2 = c2 + dx(21);
c3 = c3 + dx(22);
c4 = c4 + dx(23);
c5 = c5 + dx(24);
c6 = c6 + dx(25);

```

```

c7 = c7 + dx(26);
c8 = c8 + dx(27);
c9 = c9 + dx(28);
c10 = c10 + dx(29);

d1 = 1;
d2 = d2 + dx(30);
d3 = d3 + dx(31);
d4 = d4 + dx(32);
d5 = d5 + dx(33);
d6 = d6 + dx(34);
d7 = d7 + dx(35);
d8 = d8 + dx(36);
d9 = d9 + dx(37);
d10 = d10 + dx(38);

p=p+1;
end

so_aposteriori = sqrt((U'*U)/r);

Coef=zeros(1,38);

Coef=[a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,...
      b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,...
      c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,...
      d1,d2,d3,d4,d5,d6,d7,d8,d9,d10,]';

Polyvnumikoi_Syntelestes=Coef

H=zeros(M,3);
ds=zeros(M,1);
dl=zeros(M,1);
s_new=zeros(M,1);
l_new=zeros(M,1);

for i=e;

X = W(i,2);
Y = W(i,3);
Z = W(i,4);

s_new(i,1)=(a1+a2.*Y+a3.*X+a4.*Z+a5.*Y.*X+a6.*Y.*Z+a7.*X.*Z+a8.*Y.^2+a9.*X.^2+a10.*Z.^2)...
./ (b1+b2.*Y+b3.*X+b4.*Z+b5.*Y.*X+b6.*Y.*Z+b7.*X.*Z+b8.*Y.^2+b9.*X.^2+b10.*Z.^2);

l_new(i,1)=(c1+c2.*Y+c3.*X+c4.*Z+c5.*Y.*X+c6.*Y.*Z+c7.*X.*Z+c8.*Y.^2+c9.*X.^2+c10.*Z.^2)...
./ (d1+d2.*Y+d3.*X+d4.*Z+d5.*Y.*X+d6.*Y.*Z+d7.*X.*Z+d8.*Y.^2+d9.*X.^2+d10.*Z.^2);
%Antistrofi ths kanonikopoihs
H(i,1)=G(i,1);
H(i,2)=(s_new(i,1).*Sscale)+Smean;
H(i,3)=(l_new(i,1).*Lscale)+Lmean;

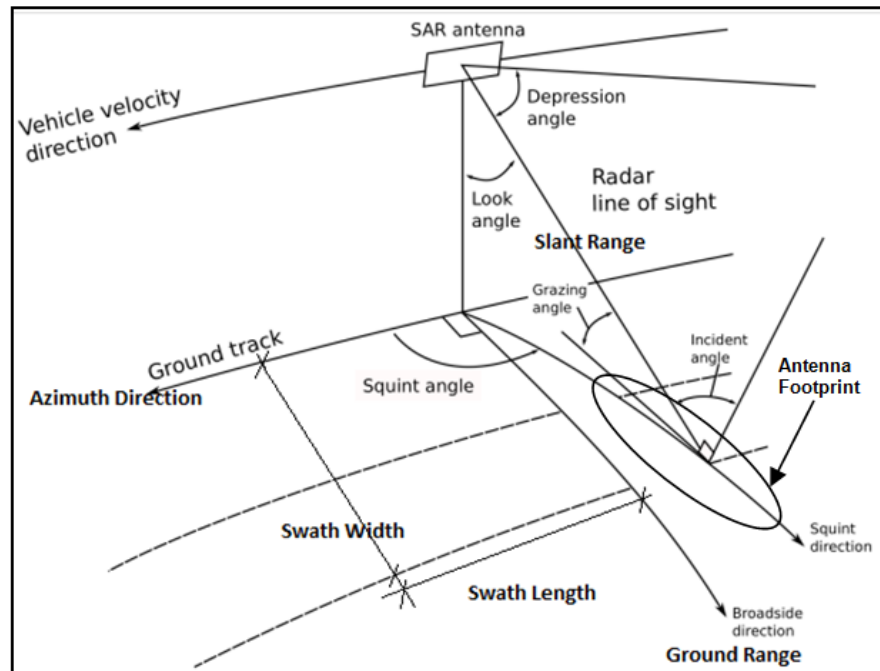
%Ypologismos enapomenwn sfalmatwn
ds(i,1)=H(i,2)-G(i,5);
dl(i,1)=H(i,3)-G(i,6);
end

Enapomenvn_sfalma_s=ds;
Enapomenvn_sfalma_l=dl;

%Ypologismos RMS simeiwn elegxou
RMS_s=sqrt(sum(ds.^2)./t)
RMS_l=sqrt(sum(dl.^2)./t)
RMS_Total=sqrt(RMS_s^2+RMS_l^2)
toc

```

Δ) ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ



Εικόνα Α.1: Γεωμετρική Απεικόνιση Ορολογίας

- Altitude (Ύψος Πτήσης): Η απόσταση ραντάρ - ελλειψοειδούς, η κατακόρυφη στον ισημερινό.
- Antenna footprint (Αποτύπωμα κεραίας): Η επιφάνεια φωτισμού του εδάφους από έναν H/M παλμό.
- Azimuth Direction (Αζιμουθιακή διεύθυνση): Διεύθυνση παράλληλη στην τροχιά του δορυφόρου.
- Depression angle (Γωνία διόπτρευσης): Συμπληρωματική γωνίας φωτισμού.
- Earth normal vector (Κάθετο διάνυσμα): Η κατακόρυφη στην γήινη επιφάνεια.
- Far range (Μακρινή κεκλιμένη απόσταση): Η πιο μακρινή από το Ναδύρ κεκλιμένη απόσταση.
- Ground range (Κεκλιμένη απόσταση επί του εδάφους): Η προβολή της κεκλιμένης απόστασης πάνω στη Φ.Γ.Ε.
- Illumination, look, elevation angle (Γωνία φωτισμού): η γωνία μεταξύ κατακόρυφου στο ναδύρ και εκάστοτε κεκλιμένου διανύσματος.
- Incidence angle (Γωνία πρόσπτωσης): Γωνία μεταξύ κατακόρυφου στην Φ.Γ.Ε και κεκλιμένου διανύσματος.
- Local incidence angle (Τοπική γωνία πρόσπτωσης): Γωνία μεταξύ τοπικού κατακόρυφου στο σημείο και το κεκλιμένο διάνυσμα στο σημείο.

- Near range (Εγγύς κεκλιμένη απόσταση): Η εγγύτερη στο ναδίρ κεκλιμένη απόσταση. Η μικρότερη απόσταση στόχου – δέκτη(κεκλιμένη απόσταση).
- Range direction (Διεύθυνση αποστάσεων): Η κάθετη διεύθυνση σε αυτή των αζιμουθίων. Κάθετη στην τροχιά του δορυφόρου. Διεύθυνση μετάδοσης – λήψης σήματος.
- Slant range (Κεκλιμένη απόσταση): Απόσταση στόχου δέκτη στη διεύθυνση των αποστάσεων.
- Squint angle, azimuth steering angle:γωνία περιστροφής της δέσμης ως προς την αζιμουθιακή διεύθυνση
- Swath width (Πλάτος απεικόνισης): Το πλάτος της απεικόνισης στη διεύθυνση των αποστάσεων
- Swath length (Μήκος απεικόνισης): Το μήκος της απεικόνισης στην διεύθυνση των αζιμουθίων.

Ε) ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ

Παρακάτω απεικονίζονται τα φωτοσταθερά κατά αύξοντα αριθμό, πάνω σε ορθοφωτογραφίες της Κτηματολόγιο Α.Ε.(2007–2009) και του Ο.Κ.Χ.Ε(2010), μαζί με φωτογραφίες όπου τραβήχτηκαν κατά το χρονικό διάστημα των μετρήσεων στο ύπαιθρο. Παράλληλα δίνονται και οι συντεταγμένες τους στο ΕΓΣΑ'87 όπου εύκολα μπορεί να αποδοθεί η γενικότερη θέση τους από την ιστοσελίδα της Κτηματολόγιο Α.Ε.

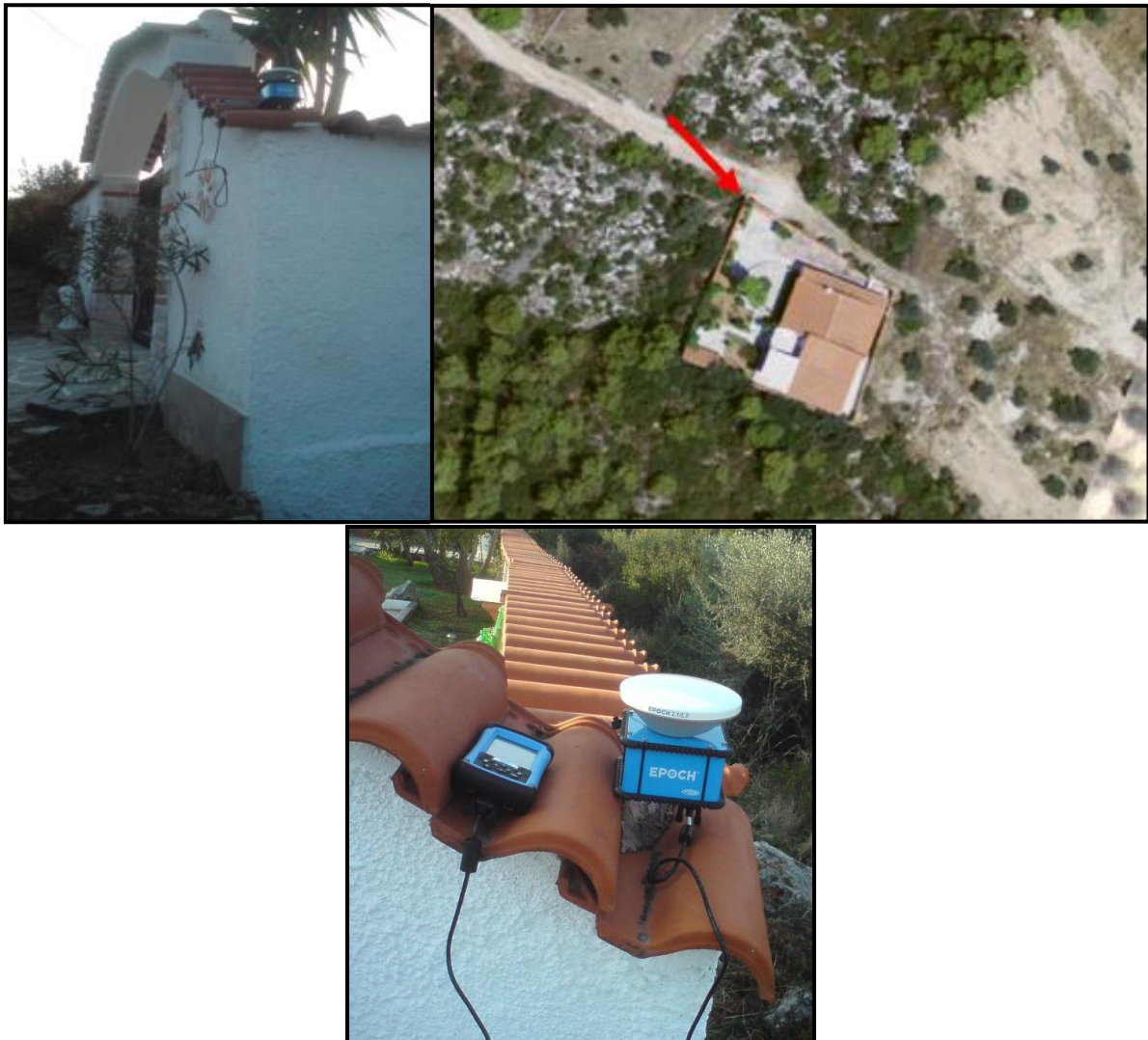
Gcp No 1:

Τοποθεσία: Άγιοι Απόστολοι, Οδός Βεργίνας.

Περιγραφή: Βόρεια τομή ορίων ιδιοκτησίας πάνω σε μάντρα με κεραμίδι. Κεντρικό σημείο τομής.

Ύψος κεραίας GPS: 0,144m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87:490771.480,4237550.645,108.617



Gcp No 2:

Τοποθεσία: Άγιοι Απόστολοι, Οδός Δεξαμενής.

Περιγραφή: Ανατολική τομή ορίων ιδιοκτησίας πάνω σε μάντρα

Ύψος κεραίας GPS: 0,173m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 490651.425,4237486.531,98.379

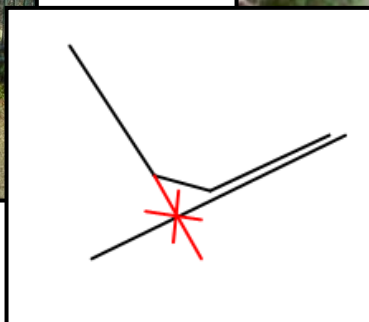
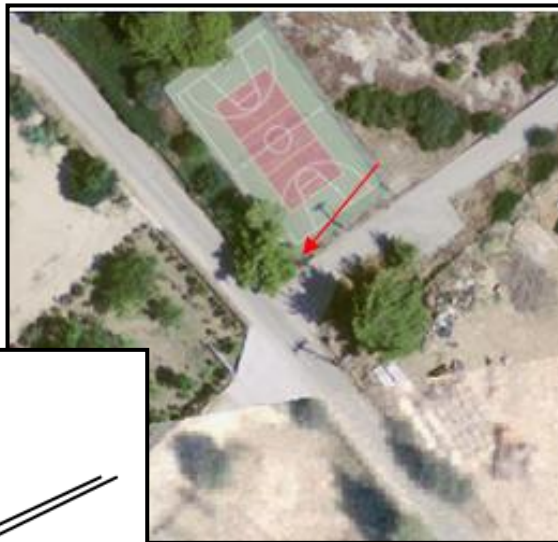
**Gcp No 3:**

Τοποθεσία: Άγιοι Απόστολοι, Οδός Ομήρου, Κατασκηνώσεις

Περιγραφή: Σημείο πάνω σε φράχτη από συρματόπλεγμα. Νοητή τομή με προέκταση περίφραξης γηπέδου μπάσκετ(έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 490253.976,4237198.844,94.182



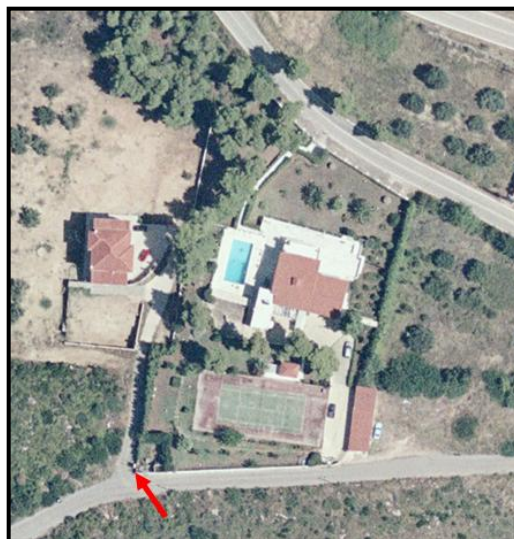
Gcp No 4:

Τοποθεσία: Κάλαμος, Οδός Καλάμου - Μαρκοπούλου

Περιγραφή: Τομή ΝΔ ορίων ιδιοκτησίας, η οποία βρίσκεται πάνω στο δρόμο Καλάμου – Μαρκοπούλου(κάτω σημείο τομής, έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 486997.440,4237560.232,277.949

**Gcp No 5:**

Τοποθεσία: Κάλαμος, Οδός Καλάμου - Μαρκοπούλου

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησίας, γωνία χτιστής μάντρας πάνω στο δρόμο προς Μαρκόπουλο(κάτω σημείο τομής, έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487071.637,4237700.202,251.542



Gcp No 6:

Τοποθεσία: Κάλαμος, Οδός Καλάμου - Μαρκοπούλου

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησίας, γωνία χτιστής μάντρας στο δρόμο προς Μαρκόπουλο(πάνω στην χτιστή μάντρα).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487329.356,4236961.013,368.521

**Gcp No 7:**

Τοποθεσία: Κάλαμος, Γήπεδο Καλάμου

Περιγραφή: Τομή ΒΔ ορίων περίφραξης γηπέδου(έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487599.348,4236730.736,367.243



Gcp No 8:

Τοποθεσία: Κάλαμος, Νεκροταφείο Καλάμου

Περιγραφή: Μέσο σημείο γωνίας δυτικού τοιχίου παρά την οδό(πάνω στο τοίχιο).

Ύψος κεραίας GPS: 0,173m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487541.098,4236270.387,364.469

**Gcp No 9:**

Τοποθεσία: Κάλαμος, Νεκροταφείο Καλάμου

Περιγραφή: Ακραίο μνημείο(σημείο πάνω στο δυτικό τοίχιο).

Ύψος κεραίας GPS: 0,144m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487548.469,4236269.845,365.256



Gcp No 10:

Τοποθεσία: Κάτω από Κάλαμο, κέντρο περιοχής.

Περιγραφή: Δυτική τομή ορίων ιδιοκτησίας από συρματοπλέγμα(έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 486964.629,4235518.897,357.995

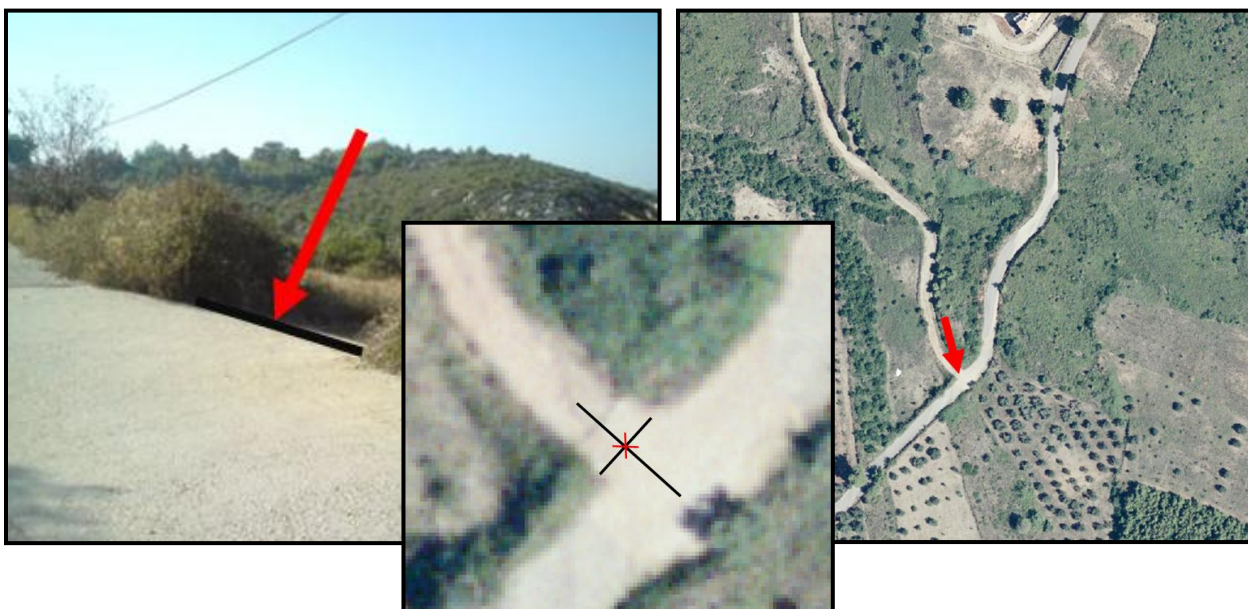
**Gcp No 11:**

Τοποθεσία: Κάτω από Κάλαμο, κέντρο περιοχής.

Περιγραφή: Τομή αγροτικών οδών. Σημείο στον άξονα της κάθετης οδού, πάνω στο δεξιό όριο της άλλης.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 486982.795,4235347.273,355.845



Gcp No 12:

Τοποθεσία: Κάτω από Κάλαμο, κέντρο περιοχής.

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησιών(πρόσωπο ιδιοκτησιών).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 487712.347,4235146.362,450.888

**Gcp No 13:**

Τοποθεσία: Μικροχώρι

Περιγραφή: ΝΔ τομή ορίων ιδιοκτησίας από συρματοπλέγμα(πρόσωπο ιδιοκτησίας, έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 489759.985,4232397.602,493.718



Gcp No 14:

Τοποθεσία: Μικροχώρι

Περιγραφή: ΝΔ τομή ορίων ιδιοκτησίας από συρματόπλεγμα(πρόσωπο ιδιοκτησίας, έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 489665.564,4232383.085,495.075

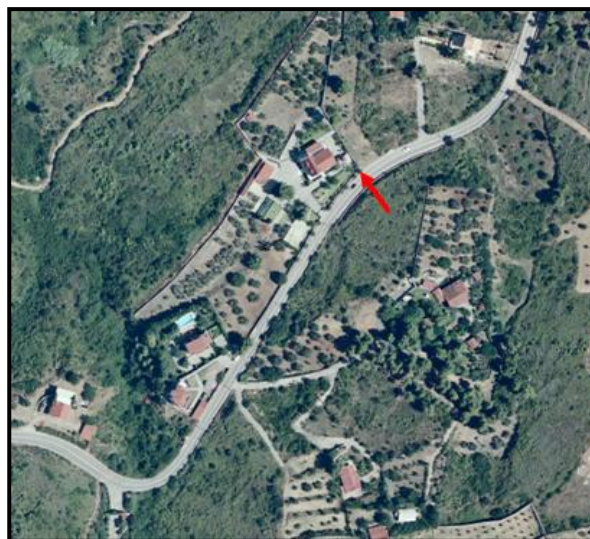
**Gcp No 15:**

Τοποθεσία: Μεταξύ Καλάμου – Μαρκοπούλου, κάτω από μοναστήρι.

Περιγραφή: ΒΑ τομή ορίων ιδιοκτησίας (πρόσωπο ιδιοκτησίας, εξωτερικά, έδαφος). Κατασκευή περίφραξης από κάγκελα.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 485539.178,4237400.211,219.686



Gcp No 16:

Τοποθεσία: Μοναστήρι Εισοδείων της Θεοτόκου.

Περιγραφή: Μέσο σημείο τομής περίφραξης(συρματόπλεγμα) κήπου εντός του μοναστηριού, στο πίσω μέρος του. Σημείο πάνω στο τοίχιο έδρασης της περίφραξης, ύψους περίπου 20cm.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 485610.457,4237074.842,268.382

**Gcp No 17:**

Τοποθεσία: Μαρκόπουλο, Οδός Ίριδος.

Περιγραφή: ΝΑ γωνία ορίων ιδιοκτησίας(έδαφος, πρόσωπο ιδιοκτησίας). Περίφραξη από κάγκελα.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484357.016,4238425.368,153.078



Gcp No 18:

Τοποθεσία: Μαρκόπουλο, Οδός Ίριδος.

Περιγραφή: ΒΔ γωνία ορίων ιδιοκτησίας(κάτω μέρος περίφραξης, πίσω μέρος ιδιοκτησίας).

Περίφραξη από συρματοπλέγμα.

Ύψος κεραίας GPS: 0,173m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484301.449,4238436.213,149.462

**Gcp No 19:**

Τοποθεσία: Μαρκόπουλο, Οδός Προφήτη Ηλία

Περιγραφή: Τομή ορίου ιδιοκτησίας(συρματοπλέγμα) με νοητή προέκταση του απέναντι κάθετου ορίου ιδιοκτησίας(μάντρα).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484468.019,4237403.388,226.693



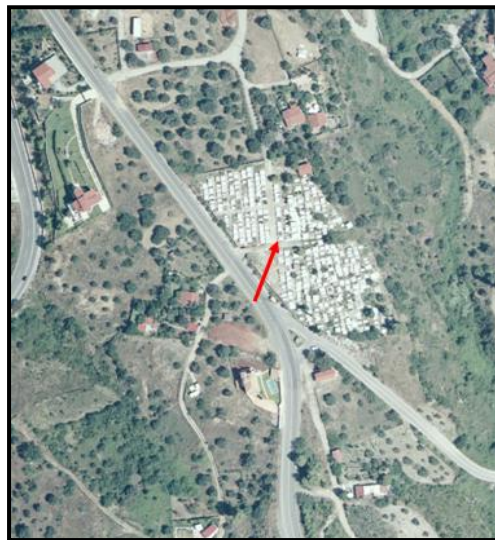
Gcp No 20:

Τοποθεσία: Νεκροταφείο Μαρκοπούλου

Περιγραφή: Τομή κύριου οδικού άξονα με δευτερεύον, σε γωνία μνημείου.

Ύψος κεραίας GPS: 0,144m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484616.341,4237152.466,235.016

**Gcp No 21:**

Τοποθεσία: Οδός Μαρκοπούλου - Πολυδενδρίου

Περιγραφή: Γωνία ορίων ιδιοκτησίας (μάντρα, έδαφος, εξωτερικά)

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484582.657,4233745.447,368.888



Gcp No 22:

Τοποθεσία: Πάροδος της οδού Μαρκοπούλου - Ωροπού

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησίας (μάντρα, έδαφος, εξωτερικά, πρόσωπο). Δυτικά(αριστερά) από καγκελόπορτα.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484145.664,4233907.210,331.377

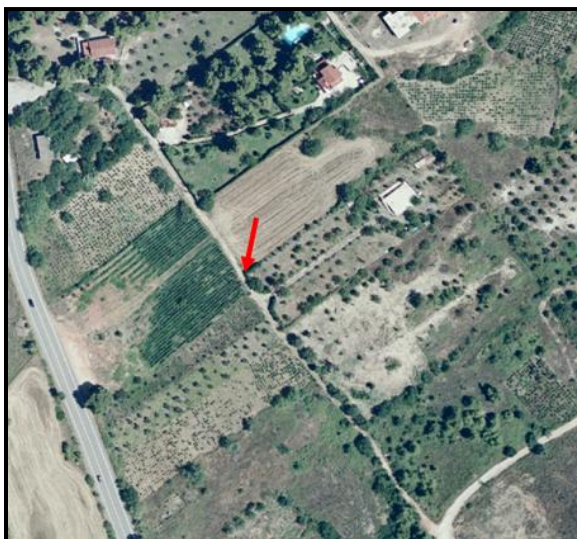
**Gcp No 23:**

Τοποθεσία: Κάτω από Μαρκόπουλο

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησίας (συρματόπλεγμα με βλάστηση, έδαφος, εξωτερικά, πρόσωπο). Ιδιοκτησία με πρόσωπο σε αγροτική οδό παράλληλα της Μαρκοπούλου – Πολυδενδρίου.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 485350.021,4235449.433,354.651



Gcp No 24:

Τοποθεσία: Κάτω από Μαρκόπουλο

Περιγραφή: Τομή ορίων ιδιοκτησίας (συρματοπλέγμα με υψηλή βλάστηση, έδαφος, εξωτερικά, πρόσωπο). Ιδιοκτησία με πρόσωπο σε αγροτική οδό παράλληλα της Μαρκοπούλου – Πολυδευδρίου.

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 485325.994,4235487.344,359.425

**Gcp No 25:**

Τοποθεσία: Οδός προς Άγιο Ιωάννη. Πάροδος Μαρκοπούλου – Πολυδευδρίου, κάτω από Μαρκόπουλο.

Περιγραφή: Ανατολικό(δεξιό) σημείο τομής περίφραξης και μεταλλικής πόρτας εισόδου(καγκελόπορτας), σε ιδιοκτησία με κατοικία(έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 484377.056,4235868.770,257.259



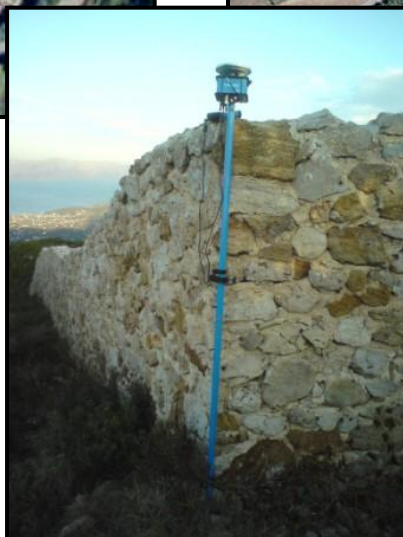
Gcp No 26:

Τοποθεσία: Νότια κατασκηνώσεων Κορέλκο.

Περιγραφή: Δυτική γωνία περίφραξης ιδιοκτησίας(κατασκευή από πέτρα, έδαφος).

Ύψος κεραίας GPS: 2,120m

Συντεταγμένες ΕΓΣΑ'87: 489612.843,4235718.481,430.664



Baseline Processing Report

Processing Summary

Observation	From	To	Solution Type	H. Prec. (Meter)	V. Prec. (Meter)	Geodetic Az.	Ellipsoid Dist. (Meter)	ΔHeight (Meter)
236019a --- 13 (B63)	236019a	13	Fixed	0.030	0.036	166.873	5608.714	136.493
236019a --- 14 (B62)	236019a	14	Float	0.381	0.369	167.892	5575.207	137.848
236019a --- 2 (B58)	236019a	2	Fixed	0.015	0.024	96.087	3679.237	-258.775
236019a --- 3 (B57)	236019a	3	Fixed	0.017	0.022	101.213	3275.737	-262.981
236019a --- 12 (B54)	236019a	12	Fixed	0.011	0.024	178.731	2243.839	93.664
236019a --- 11 (B55)	236019a	11	Fixed	0.009	0.024	199.814	1919.952	-1.388
236019a --- 10 (B51)	236019a	10	Fixed	0.008	0.022	200.467	1748.328	0.764
236019a --- 1 (B50)	236019a	1	Fixed	0.010	0.024	95.136	3803.386	-248.534
236019a --- 9 (B52)	236019a	9	Fixed	0.008	0.019	166.910	1147.688	8.043
236019a --- 8 (B53)	236019a	8	Fixed	0.008	0.017	167.251	1143.581	7.255
236019a --- 7 (B59)	236019a	7	Fixed	0.009	0.016	145.310	819.049	10.036
236019a --- 5 (B61)	236019a	5	Fixed	0.012	0.013	13.122	443.439	-105.663
236019a --- 6 (B60)	236019a	6	Fixed	0.010	0.013	145.658	464.070	11.312
236019a --- 4 (B56)	236019a	4	Fixed	0.010	0.011	3.624	294.386	-79.259
236019b --- 22 (B36)	236019b	22	Fixed	0.013	0.031	244.519	4397.107	-25.928
236019b --- 26 (B37)	236019b	26	Fixed	0.015	0.023	133.738	3055.200	73.476
236019b --- 18 (B41)	236019b	18	Fixed	0.015	0.025	326.109	2924.189	-207.782
236019b --- 17 (B47)	236019b	17	Fixed	0.014	0.040	326.382	2868.931	-204.166
236019b --- 21 (B66)	236019b	21	Fixed	0.011	0.023	237.957	4261.481	11.590
236019b --- 25 (B49)	236019b	25	Fixed	0.010	0.020	268.530	2955.828	-100.015
236019b --- 19 (B67)	236019b	19	Fixed	0.013	0.016	303.365	2516.926	-130.561
236019b --- 23 (B35)	236019b	23	Fixed	0.009	0.020	246.452	2442.107	-2.611
236019b --- 24 (B38)	236019b	24	Fixed	0.009	0.020	247.584	2430.314	2.164
236019b --- 20 (B68)	236019b	20	Fixed	0.012	0.014	296.831	2367.564	-122.238
236019b --- 15 (B45)	236019b	15	Fixed	0.013	0.022	305.790	1447.813	-137.548
236019b --- 16 (B48)	236019b	16	Fixed	0.010	0.021	291.050	1383.655	-88.855

Πίνακας Α.27: Ακρίβεια προσδιορισμού γεωδαιτικών συντεταγμένων σημείων από GPS στο WGS'84 όπως προκύπτει από το λογισμικό επίλυσης των βάσεων.