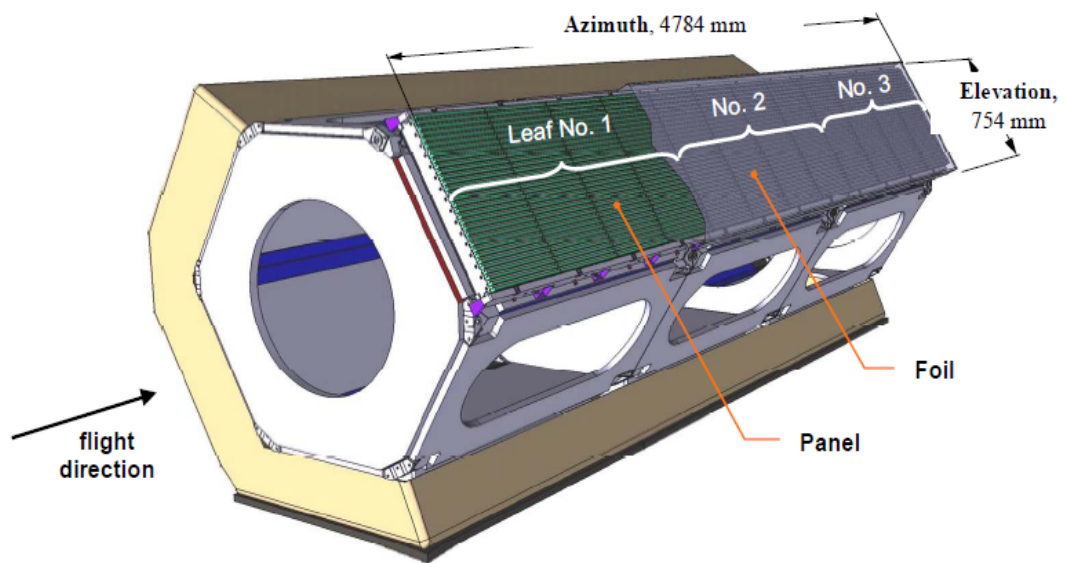




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας - Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Γεωμετρική επεξεργασία εικόνων SAR
Γεωαναφορά – Ορθοαναγωγή – Εξαγωγή οδικού δικτύου

Τσιγγενόπουλος Γεώργιος

Επιβλέπων: Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012

Αφιερώνεται,

*Στις κόρες μου Ειρήνη και Χριστίνα
στη σύζυγό μου Δέσποινα και στους
γονείς μου Δημήτρη και Ειρήνη.*

“Success is the ability to go from one failure to another with no loss of enthusiasm.”

Sir Winston Churchill

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Γεωμετρική επεξεργασία εικόνων SAR. Γεωαναφορά – Ορθοαναγωγή – Εξαγωγή οδικού δικτύου», ανατέθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών στο Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) στο γνωστικό πεδίο «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ».

Πραγματεύεται διεξοδικά την μελέτη εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, την επιρροή που έχει η χρήση διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους στην ορθοαναγωγή τέτοιων εικόνων, στην σύγκριση ραντάρ εικόνων με οπτικές εικόνες και την προσπάθεια εξαγωγής από αυτές γραμμικών στοιχείων με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού και τέλος την φωτοερμηνεία βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων επί των εικόνων αυτών.

Η είσοδος νέων τεχνολογικών εξελίξεων και τα νέα επιστημονικά και επαγγελματικά δεδομένα, με ώθησαν έτσι ώστε να επικεντρωθώ στην εργασία μου στην «Γεωμετρική επεξεργασία εικόνων SAR. Γεωαναφορά – Ορθοαναγωγή – Εξαγωγή οδικού δικτύου».

Πριν την παρουσίαση της εργασίας μου θεωρώ απαραίτητο να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν για την ολοκλήρωσή της.

Θερμότερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Ιωαννίδη Χαράλαμπο, ο οποίος με περισσή υπομονή και όρεξη με κατεύθυνε και διαμόρφωσε τον τρόπο σκέψης μου για την αντιμετώπιση των εκάστοτε προβλημάτων. Ευχαριστώ επίσης τους φίλους μου και συναδέλφους Ξυνογαλά Ευάγγελο, Γιαννούλη Δημήτριο, Στεφάνου Ευστάθιο και Μπαλλή Κωνσταντίνο για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ θερμά τη Διοίκηση της ΓΥΣ, για την διάθεση των δεδομένων (τόσο των δικών της όσο και της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.) και του απαραίτητου εξοπλισμού για την διενέργεια των ελέγχων, οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1 Ιστορικά Στοιχεία	17
1.2 Γενικά - Ραντάρ	21
1.3 Ραντάρ Απεικονίσεως.....	22
1.4 Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)	25
1.4.1 Η Εξίσωση του Ραντάρ.....	27
1.4.2 Το Φαινόμενο Doppler.....	29
1.4.3 Γεωμετρία Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.....	32
1.4.4 Χαρακτηριστικά Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος	36
1.4.4.1 Γεωμετρικές Παραμορφώσεις	36
1.4.4.2 Μηχανισμοί Σκέδασης	38
1.4.4.3 Θόρυβος - Στίγματα	43
1.4.5 Διακριτική Ικανότητα.....	45
1.4.5.1 Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων	46
1.4.5.2 Διακριτική Ικανότητα Αζιμουθίων	47
1.4.6 Επεξεργασία Πρωτογενών Δεδομένων SAR.....	48
1.5 Ανακεφαλαίωση.....	51
2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ TERRASAR – X	53
2.1 Εισαγωγή	53
2.2 Τεχνικές Απεικόνισης (Image Modes)	54
2.2.1 Standard Operational Mode	54
2.2.2 SpotLight Mode (SL)	55
2.2.3 StripMap Mode (SM)	56
2.2.4 ScanSAR Mode (SC)	57
2.2.5 Image Modes – Σύνοψη	58
2.3 Λειτουργικότητα και Εύρος Πρόσβασης Δεδομένων	59
2.4 Προτεινόμενο Εύρος Λειτουργίας	60
2.5 Κάλυψη Περιοχής Προϊόντων.....	61
2.6 Βασικά Προϊόντα	63
2.6.1 Single Look Slant Range Complex (SSC)	64
2.6.2 Multi Look Ground Range Detected (MGD)	64
2.6.3 Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC).....	66
2.6.4 Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)	67
2.7 Γεωμετρική Ανάλυση	68
2.7.1 Προϊόντα Χωρικής Ενίσχυσης	70
2.7.2 Προϊόντα Ραδιομετρικής Ενίσχυσης	70
2.8 Ραδιομετρική Ακρίβεια	72
2.9 Ακρίβεια Εντοπισμού Εικονοστοιχείων.....	73
2.9.1 Ακρίβεια Εντοπισμού Γεωκωδικοποιημένων Προϊόντων.....	74
2.10 Βελτιωμένα Προϊόντα	75
2.10.1 ORI ^{SAR} – Orthorectified Image.....	75
2.10.2 RaN ^{SAR} – Radiometrically Corrected Image	76
2.10.3 MC ^{SAR} - Mosaic	76
2.10.4 ADM ^{SAR} – Ascending/Descending Merge.....	77
2.11 Βοηθητικά Προϊόντα	78

2.12	Υπηρεσίες Πελατών.....	79
2.12.1	Oriented Image (OISAR).....	80
2.12.2	Διαθέσιμες Προβολές.....	80
2.12.3	Μορφότυπος Δεδομένων.....	80
2.12.4	Scaling.....	80
2.13	Μεγέθη Αρχείων.....	80
2.14	Ανακεφαλαίωση.....	81
3.	ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΝΑΦΟΡΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ	82
3.1	Προσεγγιστικά Μαθηματικά Μοντέλα.....	84
3.1.1	Αφινικός Μετασχηματισμός.....	84
3.1.2	DLT Μετασχηματισμός.....	87
3.1.3	RFM (Rational Function Models).....	89
3.2	Αυστηρά Μαθηματικά Μοντέλα.....	94
3.2.1	Γενικά Μοντέλα Αισθητήρων (General Sensor Models).....	95
3.2.2	Κατά Μήκος Μοντέλα Αισθητήρων (Along Track Sensor Models).....	102
3.2.3	Διαφορετικές Εκδόσεις των Κατά Μήκος Μοντέλων Αισθητήρων (Along Track Sensor Models).....	105
3.3	Λογισμικό IMAGINE OrthoRadar της Erdas.....	107
3.3.1	Σύστημα Συντεταγμένων Εφημερίδων Τροχιάς.....	107
3.3.2	Μοντελοποίηση Εφημερίδων Τροχιάς.....	107
3.3.3	Μοντελοποίηση Απεικόνισης SAR.....	109
3.4	Ανακεφαλαίωση.....	111
4.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ SAR.....	112
4.1	Ορθοαναγωγή Απεικονίσεων SAR.....	112
4.2	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Οπτικές Εικόνες.....	116
4.3	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Απεικονίσεις SAR.....	119
4.4	Εξαγωγή Ποιοτικών – Ποσοτικών Χαρακτηριστικών.....	128
4.5	Ανακεφαλαίωση.....	133
5.	ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	134
5.1	Σκοπός της Εργασίας.....	134
5.2	Δεδομένα.....	134
5.2.1	Απεικόνιση Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος TerraSAR – X.....	134
5.2.2	Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους.....	136
5.2.2.1	Αξιολόγηση των ΨΜΕ.....	140
5.2.3	Φωτοσταθερά.....	146
5.2.4	Οπτικές Εικόνες.....	146
5.2.5	Δεδομένα Αναφοράς – Ελέγχου.....	147
5.3	Παρουσίαση Λογισμικών.....	148
5.4	Ορθοαναγωγή TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής.....	149
5.5	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου.....	153
5.5.1	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Δορυφορική Εικόνα IKONOS στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής.....	153
5.5.2	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Αεροφωτογραφία της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής.....	156
5.5.3	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από την Απεικόνιση TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής.....	158

5.6	Συμπεράσματα	158
5.7	Ανακεφαλαίωση.....	159
6.	ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΡΑΝΤΑΡ	160
6.1	Οπτικά vs Ραντάρ Συστήματα	160
6.2	Φωτοερμηνεία Ραντάρ Εικόνων	161
6.2.1	Στοιχεία Φωτοερμηνείας Απεικονίσεων Ραντάρ	162
6.2.2	Φωτοερμηνεία Αστικού Περιβάλλοντος	164
6.2.2.1	Μήκος Κύματος Ραντάρ	164
6.2.2.2	Συμπληρωματική Γωνία Πρόσπτωσης	165
6.2.2.3	Πόλωση	165
6.2.2.4	Χωρική Ανάλυση.....	166
6.2.2.5	Κλίμακα Εικόνας	166
6.2.2.6	Αριθμός Όψεων (Looks)	167
6.2.2.7	Διαφορές Φάσης.....	168
6.2.2.8	Γεωμετρία Εικόνας Ραντάρ.....	168
6.2.2.9	Κατεύθυνση Λήψης-Προσανατολισμός Χαρακτηριστικών	168
6.2.2.10	Εύρος Απόστασης	169
6.2.2.11	Διηλεκτρικές Ιδιότητες	169
6.2.2.12	Τραχύτητα Επιφανείας.....	170
6.2.2.13	Τοπογραφικές Επιδράσεις	171
6.2.2.14	Περιβαλλοντικοί Παράγοντες.....	171
6.2.2.15	Αντίθεση Εικόνας	171
6.3	Οπτική Φωτοερμηνεία Απεικόνισης TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής.....	171
6.3.1	Φωτοερμηνεία Γεωμετρικών Παραμορφώσεων	172
6.3.2	Εξαγωγή Οδικού Δικτύου με Οπτική Φωτοερμηνεία στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου.....	180
6.3.3	Ανακεφαλαίωση.....	182
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	184
7.1	Ανακεφαλαίωση.....	184
7.2	Δυσκολίες	184
7.3	Συμπεράσματα	185
7.4	Επίλογος	191
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	192

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.	17
Εικόνα 1.2: Διασπορά και Ανάκλαση της Ενέργειας του Ραντάρ.	23
Εικόνα 1.3: Δημιουργία Εικόνας Ραντάρ με χρήση πλατφόρμας.	24
Εικόνα 1.4: Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.	25
Εικόνα 1.5: Παραγωγή κυκλικών κυμάτων σταθερής συχνότητας f_z	26
Εικόνα 1.6: Γεωμετρία της Σκέδασης της Ενέργειας από τον Στόχο.	27
Εικόνα 1.7: Κινούμενος Πομπός προς και μετά το Δέκτη. Η αλλαγή του Doppler στη λαμβανόμενη συχνότητα.	29
Εικόνα 1.8: Κινούμενος Πομπός προς Δέκτη σε κοντινή Απόσταση.	30
Εικόνα 1.9: Συχνότητες Doppler για εύρος αποστάσεων του δέκτη, καθώς ο πομπός περνάει από δεξιά προς τα αριστερά. Ο χρόνος μετρείται προς τα δεξιά.	32
Εικόνα 1.10: Καθοδική τροχιά (Βορράς-Νότος) και Ανοδική τροχιά (Νότος-Βορράς).	33
Εικόνα 1.11: Το Ίχνος της Κεραίας.	34
Εικόνα 1.12: Μεταδιδόμενος διαφοροποιημένος παλμός (Pulse Repetition Interval).	34
Εικόνα 1.13: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά απεικόνισης SAR.	37
Εικόνα 1.14: Γεωμετρικές Παραμορφώσεις Απεικόνισης SAR.	38
Εικόνα 1.15: Τόνοι του Γκρι Απεικόνισης SAR (Οπισθοσκέδαση).	39
Εικόνα 1.16: Διείσδυση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.	40
Εικόνα 1.17: Τυχαία Διαδρομή.	43
Εικόνα 1.18: Διακριτική Ικανότητα του Εικονοστοιχείου του Ραντάρ.	45
Εικόνα 1.19: Διακριτική Ικανότητα του Ραντάρ.	46
Εικόνα 1.20: Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων.	47
Εικόνα 1.21: Βασικές Αρχές των Ραντάρ.	48
Εικόνα 1.22: Η Επιστροφή του Σημειακού Στόχου.	49
Εικόνα 1.23: Εικόνες SIR-C (L-band, HH) και τα βήματα επεξεργασίας μέχρι την τελική μορφοποίηση της εικόνας.	50
Εικόνα 2.1: Τεχνικές Απεικόνισης TerraSAR - X	54
Εικόνα 2.2: SpotLight Mode (SL)	55
Εικόνα 2.3: StripMap Mode (SM).	57
Εικόνα 2.4: ScanSAR Mode (SC)	58
Εικόνα 2.5: Καλύψεις και Θέσεις Προϊόντων HS/SL (κόκκινο πλαίσιο).	62
Εικόνα 2.6: Όρια Σκηνής Προϊόντων HS Spotlight 300 MHz Μονής Πόλωσης για Διαφορετικές Γωνίες Λήψης στο Κέντρο της Σκηνής.	63
Εικόνα 2.7: Single Look Slant Range Complex (SSC).	64
Εικόνα 2.8: TerraSAR – X stripmap 30 x 55 km, Upsala Patagonia.	65
Εικόνα 2.9: MGD - Multi Look Ground Range Detected.	66
Εικόνα 2.10: GEC - Geocoded Ellipsoid Corrected.	66
Εικόνα 2.11: Παράδειγμα Προβολής Προϊόντος GEC (χωρίς διορθώσεις αναγλύφου).	67
Εικόνα 2.12: Παράδειγμα Προβολής Προϊόντος EEC (με διορθώσεις αναγλύφου).	68
Εικόνα 2.13: EEC – Enhanced Ellipsoid Corrected.	68
Εικόνα 2.14: Oberpfaffenhofen (Πεδίο Βαθμονόμησης).	70
Εικόνα 2.15: Ραδιομετρικά Ενισχυμένο Προϊόν stripmap.	71
Εικόνα 2.16: Διακριτική Ανάλυση SL/SM/SC σε σχέση με τη Γωνία Πρόσπτωσης.	71
Εικόνα 2.17: Διακριτική Ανάλυση HS σε σχέση με τη Γωνία Πρόσπτωσης.	72

Εικόνα 2.18: Επίδραση του DEM στην Ακρίβεια Εντοπισμού σε σχέση με τις Γωνίες Πρόσπτωσης.	74
Εικόνα 2.19: ORI ^{SAR} – Orthorectified Image.	76
Εικόνα 2.20: RaN ^{SAR} – Radiometrically Corrected Image.	76
Εικόνα 2.21: MC ^{SAR} - Mosaic.	77
Εικόνα 2.22: ADM ^{SAR} – Ascending/Descending Merge.	78
Εικόνα 3.1: Συστήματα αναφοράς που συμμετέχουν στην απευθείας γεωαναφορά.	83
Εικόνα 3.2: IKONOS, Zonguldak 3D-αφινικός μετασχηματισμός βασισμένος σε 4 control points και σε ανεξάρτητα check points με RMSX=1.91m & RMSY=18.53m.	87
Εικόνα 3.3: IKONOS, Zonguldak DLT μετασχηματισμός βασισμένος σε 6 control points και σε ανεξάρτητα check points με RMSX=2.4m & RMSY=2.4m.	89
Εικόνα 3.4: Προσδιορισμός της Θέσης του Στόχου R _t	111
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.	119
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.	120
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.	122
Εικόνα 4.4: Δημιουργία Μασκών για Αποκλεισμό Αμφισβητούμενων Περιοχών.	124
Εικόνα 4.5: Φωτοερμηνεία της Εικόνας.	125
Εικόνα 4.6: Αγροτικές Περιοχές.	126
Εικόνα 4.7: Κατοικημένες Περιοχές.	126
Εικόνα 4.8: Δασικές Περιοχές.	127
Εικόνα 4.9: Λίμνες.	127
Εικόνα 4.10: Σιδηροδρομικές Γραμμές και Οδικές Αρτηρίες.	128
Εικόνα 4.11: Μέγιστη Διαφορά της Διεύθυνσης.	132
Εικόνα 4.12: Μορφή - Σχήμα.	133
Εικόνα 5.1: Η περιοχή που καλύπτει η Εικόνα TerraSAR – X (μωβ χρώμα).	135
Εικόνα 5.2: Η Εικόνα TerraSAR – X SpotLight HS 300MHz.	136
Εικόνα 5.3: Κατανομή Φωτοσταθερών, Σημείων Σύνδεσης και Ελέγχου του block.	137
Εικόνα 5.4: : Ιδεατή κατανομή σημείων ελέγχου.	141
Εικόνα 5.5: Ιδεατή πυκνότητα σημείων ελέγχου.	141
Εικόνα 5.6: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ 5m. Εικόνα 5.7: ΨΜΕ ΓΥΣ 30m.	143
Εικόνα 5.8: ΨΜΕ ASTER 30m. Εικόνα 5.9: ΨΜΕ Automatic Extraction 10m.	143
Εικόνα 5.10: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ ΓΥΣ.	144
Εικόνα 5.11: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ ASTER.	144
Εικόνα 5.12: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ Automatic Extraction.	145
Εικόνα 5.13: Ορθοδιορθωμένη Δορυφορική Εικόνα IKONOS 1 m.	146
Εικόνα 5.14: Ορθοδιορθωμένη Αεροφωτογραφία VLSO 50 cm.	147
Εικόνα 5.15: Επίλυση Μοντέλου με 6 Φωτοσταθερά.	150
Εικόνα 5.16: Επίλυση Μοντέλου με 12 Φωτοσταθερά.	150
Εικόνα 5.17: Επίλυση Μοντέλου με 24 Φωτοσταθερά.	151
Εικόνα 5.18: Παραγόμενη Ορθοεικόνα (ΨΜΕ:ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ & 6 Φωτοσταθερά).	153
Εικόνα 5.19: Δορυφορική Εικόνα IKONOS (μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m).	154
Εικόνα 5.20: Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από IKONOS.	155
Εικόνα 5.21: Αεροφωτογραφία της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ (μέγεθος εικονοστοιχείου 0.50 m).	156
Εικόνα 5.22: Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ.	157

Εικόνα 5.23: Ραντάρ Εικόνα TerraSAR - X (μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m).....	158
Εικόνα 6.1: Διαφανές Κλίσεων (πρωτογενές υλικό ΨΜΕ Κτηματολογίου Βήματος 5m).....	172
Εικόνα 6.2: Διαφανές Προσανατολισμού(πρωτογενές υλικό ΨΜΕ Κτηματολογίου Βήματος 5m).	173
Εικόνα 6.3: Συνδυασμός Διαφανούς Aspect και Ορθοεικόνας TerraSAR – X.	174
Εικόνα 6.4: Συνδυασμός Διαφανούς Κλίσεων και Ορθοεικόνας TerraSAR – X... ..	174
Εικόνα 6.5: Συνδυασμός Διαφανών Κλίσεων, Προσανατολισμού και Ορθοεικόνας TerraSAR–X.....	175
Εικόνα 6.6: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σκίασης.	175
Εικόνα 6.7: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σκίασης.	176
Εικόνα 6.8: Ανατολικές, Νοτιοανατολικές, Βορειοανατολικές Περιοχές Ενδιαφέροντος.	177
Εικόνα 6.9: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σμίκρυνσης (κλίση).	178
Εικόνα 6.10: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σμίκρυνσης.	178
Εικόνα 6.11: Ανατολικές, Νοτιοανατολικές, Βορειοανατολικές Περιοχές Ενδιαφέροντος.	179
Εικόνα 6.12: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Πτύχωσης (κλίση).	180
Εικόνα 6.13: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Πτύχωσης.	180
Εικόνα 6.14: Οπτική Φωτοερμηνεία Οδικών Αρτηριών από Χρήστη.....	181

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά TerraSAR – X.	53
Πίνακας 2.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά High Resolution Spotlight Mode (HS)	56
Πίνακας 2.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ScanSAR Mode (SC).....	58
Πίνακας 2.4: Οι Τέσσερις Τεχνικές Απεικόνισης του TerraSAR – X.	59
Πίνακας 2.5: Λειτουργικότητα και Γωνίες Λήψης.	60
Πίνακας 2.6: Γωνίες Λήψης για Σκηνές Υψηλής Αντίθεσης.	61
Πίνακας 2.7: Είδη Τροχιών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των Βασικών Προϊόντων.	73
Πίνακας 2.8: Σφάλμα Εντοπισμού Εικονοστοιχείων λόγω Σφαλμάτων DEM και για Διαφορετικές Γωνίες Πρόσπτωσης.....	74
Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά DEM των Προϊόντων TerraSAR.....	75
Πίνακας 2.10: Διαθεσιμότητα Βοηθητικών Αρχείων TerraSAR - X.	79
Πίνακας 2.11: Μεγέθη Αρχείων Βασικών Προϊόντων TerraSAR - X.....	81
Πίνακας 3.1: Ακρίβεια του μοντέλου Dowman και Gupan στο μοντέλο (7 παράμετροι) στο πεδίο ελέγχου Aix-en-Provence (Gupan, 1987).	97
Πίνακας 3.2: Ακρίβεια του μοντέλου Dowman και Gupan στο μοντέλο (7 και 10 παράμετροι) στο πεδίο ελέγχου στην Αγγλία (Gupan, 1987).	97
Πίνακας 3.3: Ακρίβεια του μοντέλου Konecny (Konecny, 1987).....	98
Πίνακας 3.4: Ακρίβεια του μοντέλου Kratky στην Ottawa	99
Πίνακας 3.5: Ακρίβεια του μοντέλου Kratky στο Sherbrooke (Kratky, 1989).	100
Πίνακας 3.6: Ακρίβεια του μοντέλου O' Neill & Dowman (1991).....	101
Πίνακας 3.7: Ακρίβεια του μοντέλου O' Neill & Dowman (1991).....	102
Πίνακας 3.8: Ακρίβεια του μοντέλου Westin (1991).....	103
Πίνακας 3.9: Ακρίβεια του μοντέλου Poli (2004).....	105
Πίνακας 3.10: Αριθμός άγνωστων παραμέτρων Κεπλέριου Μοντέλου.	105
Πίνακας 3.11: Αριθμός άγνωστων παραμέτρων Gauss – Lambert & Herrick – Gibbs.....	106
Πίνακας 4.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Απεικονίσεων TerraSAR - X.	112
Πίνακας 4.2: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-2 (n=αριθμός σημείων ελέγχου). ...	113
Πίνακας 4.3: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-3 (n=αριθμός σημείων ελέγχου). ...	113
Πίνακας 4.4: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-4 (n=αριθμός σημείων ελέγχου). ...	113
Πίνακας 4.5: Στατιστικά Στοιχεία 25 Σημείων Ελέγχου.	115
Πίνακας 4.6: Ποσοστά Επιτυχίας.	118
Πίνακας 4.7: Ποσοστά Επιτυχίας.	119
Πίνακας 4.8: Ποσοστά Επιτυχίας.	122
Πίνακας 4.9: Συμμετέχουσες Χώρες του Προγράμματος.	123
Πίνακας 4.10: Δεδομένα SAR και Περιοχές Εφαρμογών.	124
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης TerraSAR – X, Πρακτικής Εφαρμογής.	135
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα Επίλυσης Αεροτριγωνισμού.	138
Πίνακας 5.3: Βασικά Χαρακτηριστικά ΨΜΕ Κτηματολογίου.	139
Πίνακας 5.4: Σχολιασμός Διαφορών μεταξύ των ΨΜΕ.	145
Πίνακας 5.5: Στατιστικά Στοιχεία των ΨΜΕ.	145
Πίνακας 5.6: Οριζοντιογραφικές Διαφορές dx και dy.	148
Πίνακας 5.7: Οριζοντιογραφικές Διαφορές dx και dy.	148
Πίνακας 5.8: Διαφορές dθ Γωνιών Διεύθυνσης.	148
Πίνακας 5.9: Στατιστικά Στοιχεία Επίλυσης Μοντέλου.....	151
Πίνακας 5.10: Οριζοντιογραφικές Ακρίβειες Παραχθέντων Ορθοεικόνων.	152

Πίνακας 6.1: Οπτικά vs Ραντάρ Συστήματα.	160
Πίνακας 6.2: Οπτικές vs Ραντάρ Εικόνες.	161
Πίνακας 6.3: Μέσο Ύψος και Τραχύτητα Τυπικών Αστικών Χαρακτηριστικών. ..	170
Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαγωγής Οδικού Δικτύου.	182
Πίνακας 7.1: Στατιστικά Στοιχεία Επίλυσης Μοντέλου.....	186
Πίνακας 7.2: Οριζοντιογραφικές Ακρίβειες Παραχθέντων Ορθοεικόνων.....	186
Πίνακας 7.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαγωγής Οδικού Δικτύου.	187

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται αρχικά την ορθοαναγωγή εικόνας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος με χρήση ψηφιακών μοντέλων εδάφους, διαφορετικής ακρίβειας και ανάλυσης. Στη συνέχεια εξετάζεται η δυνατότητα αυτόματης εξαγωγής οδικού δικτύου τόσο από τη συγκεκριμένη απεικόνιση ραντάρ όσο και από οπτικές εικόνες, με χρήση ειδικού λογισμικού. Τέλος υλοποιείται οπτική φωτοερμηνεία των βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων των απεικονίσεων ραντάρ όπως η σκίαση, η σμίκρυνση και η πτύχωση, με τη βοήθεια του ποιοτικότερου υπάρχοντος ψηφιακού μοντέλου εδάφους που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος. Επιπλέον, μέσα από τις διαδικασίες της οπτικής φωτοερμηνείας γίνεται προσπάθεια εξαγωγής του οδικού δικτύου της ραντάρ απεικόνισης (ψηφιοποίηση), από έναν τρίτο χρήστη, εξαγωγή και σχολιασμός των παραγόμενων αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αυτόματη εξαγωγή.

Πιο συγκεκριμένα:

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική ανασκόπηση των συστημάτων ραντάρ, παρουσιάζοντας την εξέλιξη τους στο πέρασμα των χρόνων. Αναπτύσσονται οι βασικές εξισώσεις και περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τα συστήματα των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος TerraSAR – X, καθώς επίσης και όλες οι δυνατές τεχνικές απεικόνισης (Image Modes), τα βασικά, βελτιωμένα και βοηθητικά προϊόντα του συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε αρχικά μία παρουσίαση των μοντέλων γεωαναφοράς, τόσο των προσεγγιστικών μαθηματικών μοντέλων όσο και των αυστηρών μαθηματικών μοντέλων με ταυτόχρονη παρουσίαση ανάλογων παραδειγμάτων, κατόπιν βιβλιογραφικής αναζήτησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μία βιβλιογραφική επισκόπηση για την ορθοαναγωγή απεικονίσεων SAR, για την εξαγωγή οδικού δικτύου από οπτικές εικόνες και απεικονίσεις ραντάρ και τέλος παρουσιάστηκε η μεθοδολογία προσδιορισμού των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών της εξαγωγής οδικού δικτύου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση των δεδομένων και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια υλοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων ενδιαφέροντος, ενώ στο τέλος παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα

αποτελέσματα από κάθε περίπτωση επεξεργασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο, αρχικά έγινε μία σύγκριση μεταξύ των οπτικών και των συστημάτων ραντάρ. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα στοιχεία φωτοερμηνείας απεικονίσεων των ραντάρ και ειδικότερα τα στοιχεία που επηρεάζουν τη φωτοερμηνεία σε αστικό περιβάλλον. Επί του πρακτέου, υλοποιήθηκε οπτική φωτοερμηνεία της απεικόνισης TerraSAR – X, των βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων που διέπουν ένα τέτοιο προϊόν και στο τέλος πραγματοποιήθηκε οπτική φωτοερμηνεία του οδικού δικτύου της απεικόνισης, από έναν τρίτο χρήστη με τη διαδικασία της ψηφιοποίησης χωρίς κάποιο βοηθητικό υπόβαθρο και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τα αντίστοιχα των οπτικών εικόνων με το λογισμικό Objective.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, το οποίο ακολουθεί, γίνεται μία σύνοψη όλων των δυσκολιών και συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

The present Diploma Thesis has as goal initially to orthorectify synthetic aperture radar image using digital terrain models of varying accuracy and resolution. Then it is examined the automatic extraction of road network from this imaging radar and from optical images with a specific software. Finally visual photo-interpretation of basic geometric deformations of radar imaging such as shadow, foreshortening and layover is materialized, using the highest quality existing digital terrain model covering the area of interest. Furthermore, through the process of visual photo interpretation, extraction of road network radar imaging (by digitizing) , is attempted by a third user. Last but not least extracted and commented results are compared to the results obtained from automatic extraction.

More specifically:

The **first Chapter** gives a historical overview of radar systems, presenting their evolution over the years. Basic equations are developed and key characteristics are described of synthetic aperture radar systems.

The **second Chapter** presents the main functional characteristics of satellite TerraSAR – X, as well as all possible imaging techniques (Image Modes), the basics and improved auxiliary system products.

The **third chapter** includes a presentation of models of georeference, both non rigorous and rigorous mathematical models with a presentation of similar examples, after literature search.

In the **fourth chapter** a bibliographic reference to orthorectification of SAR imaging and feature extraction, from both optical and radar images is done and finally it is presented the methodology for determining the quantitative and qualitative characteristics of road network extraction.

In the **fifth chapter** the presentation of data and software used is done. After the processing of data of interest in the end the results and comments of each case are presented.

In the **sixth chapter**, firstly a comparison between optical and radar systems is done. Then all parameters and elements, which affect urban photo interpretation, are presented. Finally, a photo interpretation is implemented of imaging TerraSAR – X and especially of the basic geometric deformations of such a product. In the end a visual photo interpretation of road network is done, by a third user, with the digitization process, without any auxiliary background and comparing results are

obtained with the corresponding one that were extracted with the software Objective.

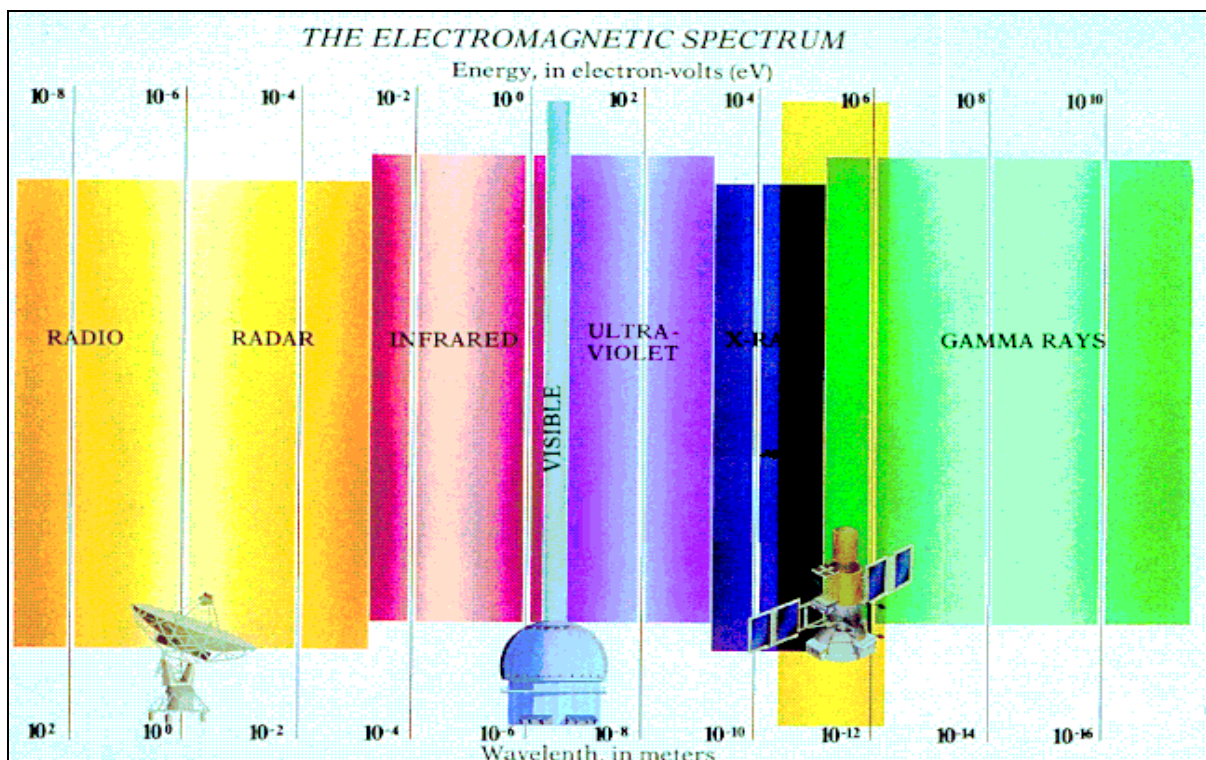
Finally in the **seventh Chapter**, the present Diploma Thesis is essentially completed. It constitutes of the Chapter of conclusions, presentation of problems, difficulties and further more proposals, in order to help the reader to assemble all the nodal points of this work and why not to be stimulated for further continuation and profit of science.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Ο όρος ραντάρ (RADAR) προέρχεται από τα αρχικά Radio Detection and Ranging (ράδιο ανίχνευση και εμβέλεια). Ένα ραντάρ είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό αντικειμένων. Η λειτουργία του βασίζεται στην εκπομπή μικροκυματικών σημάτων και στη συνέχεια στη λήψη των ανακλάσεων από τα διάφορα αντικείμενα που φωτίζονται από το σήμα εκπομπής. Για ένα μόνο στόχο ο χρόνος καθυστέρησης t της ηχούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η απόσταση R αυτού αφού τα μικροκύματα ταξιδεύουν, στο κενό και προσεγγιστικά στον αέρα, με την ταχύτητα του φωτός.

Τα ραντάρ λειτουργούν στην μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος πέρα από τις ορατές και θερμικές υπέρυθρες περιοχές. Οι εικόνες ραντάρ θεωρείται ότι περιλαμβάνουν μήκη κύματος από 1 mm έως 1 m. Μεγαλύτερα μήκη κύματος (χαμηλότερες συχνότητες), χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στις επικοινωνίες και στην πλοήγηση. Η λειτουργία του ραντάρ στην μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βελτιώνει τη διεύθυνση του σήματος (μειώνεται η εξασθένιση του σήματος), κατά τη διαδρομή του στην ατμόσφαιρα



Εικόνα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.

(Πηγή: <http://www.sigma-2.cesr.fr/sigma/detection>).

Οι εικόνες ραντάρ δεν επηρεάζονται από τη νεφοκάλυψη και την ομίχλη, όπως οι οπτικοί αισθητήρες, ενώ λειτουργούν γενικά ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Τα σύννεφα τα οποία πρόκειται να προκαλέσουν βροχή έχουν σημαντική επίδραση στα ραντάρ που λειτουργούν σε μήκη κύματος κάτω των 2 cm, ενώ η επίδρασή τους είναι σχετικά ασήμαντη για μήκη κύματος μεγαλύτερα των 4 cm.

Οι εικόνες ραντάρ λειτουργούν σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ή συχνότητα. Το αντίστοιχο το οποίο αναφέρεται ως η οπτική ή πολυφασματική περιοχή είναι για τα ραντάρ τα κανάλια στα οποία η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια καταγράφεται. Ωστόσο, ενώ αυτά τα κανάλια περιλαμβάνουν μία περιοχή ή ένα εύρος μηκών κύματος (π.χ. 0.4 – 0.5 micrometers), ένα σύστημα ραντάρ καταγράφει την απόκριση σήματος από το έδαφος ή από το στόχο (συγκεκριμένο μήκος κύματος, π.χ. 23 cm). Επιπλέον το ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνει την κόκκινη, πράσινη και μπλε φασματική περιοχή. Παρομοίως, η ενεργή μικροκυματική περιοχή περιλαμβάνει τα κανάλια X, C, L και K, τα οποία αναφέρονται σε συγκεκριμένα κομμάτια της μικροκυματικής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η απεικόνιση του καναλιού X για παράδειγμα θα είναι ένα ραντάρ το οποίο λειτουργεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος μέσα σε αυτό το κανάλι (π.χ. 3.2 cm). Η αλφαβητική αυτή αντιστοιχία των περιοχών μήκους κύματος των ραντάρ έχει τυποποιηθεί, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη κωδικοποίηση καθιερώθηκε και ιδρύθηκε από το στρατό για λόγους ασφαλείας. Στο πέρασμα των χρόνων προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν και άλλα παρόμοια σχήματα από άλλους κυβερνητικούς οργανισμούς αλλά και επιστήμονες.

Το ραντάρ αποτελεί έναν ενεργό αισθητήρα, το οποίο μεταδίδει σήμα σε ηλεκτρομαγνητική μορφή, αναπαριστώντας έτσι το ανάγλυφο και καταγράφοντας την ανακλώμενη ενέργεια η οποία επιστρέφεται από το στόχο ή την επιφάνεια. Γι' αυτόν τον λόγο ο όρος “ενεργό μικροκύμα” είναι συχνά συνώνυμος με την λέξη ραντάρ. Ως ένας ενεργός δέκτης, το ραντάρ είναι ανεξάρτητο από τον ήλιο και τις ηλιακές συνθήκες και δύναται να λειτουργήσει μέρα και νύχτα και να συλλέξει δεδομένα σε 24ωρη βάση.

Το ραντάρ χαρακτηρίζεται από μία μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών τα οποία θεωρούνται αξιοσημείωτα από τους επιστήμονες. Εκτός της 24ωρης λειτουργίας αλλά και της ανεξάρτητης καιρικών συνθηκών λειτουργίας του χαρακτηρίζεται και από τη δυνατότητα παροχής μοναδικής προοπτικής του αναγλύφου, καθώς επίσης και πολλών μοναδικών δυνατοτήτων για ποιοτική ανάλυση εδάφους.

Εν συγκρίσει με τις αεροφωτογραφίες οι εικόνες ραντάρ θεωρούνται ως ένα νεώτερο προϊόν. Η διερεύνηση των εφαρμογών τους ξεκίνησε ευρέως τη δεκαετία του 1960. Ωστόσο, η ιστορία της διερεύνησης των ραντάρ και της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων από τα διάφορα αντικείμενα προηγείται της δεκαετίας του 1960 κατά πολλά έτη. Το πρώτο πείραμα στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ραδιοκύματα, κοντά στη συχνότητα των μικροκυμάτων, πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 19^{ου}

αιώνα, από τον Heinrich Hertz. Ο Hertz έδειξε ότι ανακλάσεις προκύπτουν τόσο από μεταλλικά όσο και από μη μεταλλικά αντικείμενα (Ulaby et al., 1986). Η πρώτη πατέντα για τη χρήση των ραντάρ ως ανιχνευτή πλοίων κατοχυρώθηκε το 1904 από τον Huelsmeyer. Ωστόσο η αρχική έρευνα και ανάπτυξη των ραντάρ έλαβε χώρα σχεδόν ταυτόχρονα στη Γερμανία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Μεγάλη Βρετανία. Η ανίχνευση – εντοπισμός πλοίων και αεροσκαφών και η χρήση των ραντάρ ως βοήθημα πλοήγησης έτυχε ιδιαίτερης προσοχής από τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Μεγάλη Βρετανία στη δεκαετία του 1920 και 1930 (Page, 1962). Επίσης κατά τη διάρκεια 2^{ου} Παγκοσμίου πολέμου οι συμμαχικές δυνάμεις υλοποίησαν σημαντικά βήματα ανάπτυξης των ραντάρ.

Τα νεώτερα συστήματα ραντάρ έκαναν μετάδοση από το έδαφος στον αέρα και σε μερικές περιπτώσεις από εναέριες πλατφόρμες στο έδαφος. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου οι ερευνητές των ραντάρ παρατήρησαν την εμφάνιση σημαντικού θορύβου κατά την παρακολούθηση στόχων, όπως π.χ. πλοία και αεροπλάνα και προσπάθησαν να τον εξαλείψουν. Ευτυχώς, η πραγματικότητα ότι ο συγκεκριμένος θόρυβος αποτελούσε μία πρωτογενή εικόνα του αναγλύφου, σύντομα αναγνωρίστηκε.

Το προϊόν το οποίο παράγεται από τα συγκεκριμένα ραντάρ για τηλεπισκοπικές εφαρμογές, είναι σε μορφή συνεχόμενης λωρίδας εικόνα ή σε μορφή ψηφιακών δεδομένων. Μία σάρωση σε κατεύθυνση κάθετη στη γραμμή πτήσης της πλατφόρμας υλοποιείται με μία μέτρηση αλερετούρ του παλμού, ενώ η σάρωση κατά μήκος της γραμμής πτήσης αποκτάται με το συγχρονισμό της κίνησης της συσκευής καταγραφής με το επιστρεφόμενο σήμα. Ωστόσο, οι πραγματικές εικόνες ραντάρ, δομήθηκαν από μηχανικά περιστρεφόμενες κεραίες, οι οποίες παράγουν την λεγόμενη “οθόνη ραντάρ” (plan position indicator PPI) ή την κυκλική ένδειξη.

Τα πρωτότυπα αερομεταφερόμενα PPI ραντάρ, αναπτύχθηκαν με σκοπό να βοηθήσουν στην πλοήγηση των αεροσκαφών. Η ιδέα ήταν να δώσουν μία εικόνα στον πιλότο που θα του επιτρέψει να πλοηγηθεί σε ένα γνωστό σημείο πάνω στη γήινη επιφάνεια, παρέχοντάς του μία συνεχή και αναθεωρημένη εικόνα του εδάφους. Επίσης, επειδή ο πιλότος μπορούσε να πλοηγηθεί παρατηρώντας μόνο έντονες διαφοροποιήσεις επισημαίνοντας τα όρια μεταξύ επιφανειών με μεγάλη αντίθεση, όπως νερό και έδαφος ή επισημαίνοντας μεγάλους στόχους όπως επιβλητικά κτίρια και πόλεις, έγινε πολύ μικρή προσπάθεια στα μεταγενέστερα αερομεταφερόμενα ραντάρ για την επίτευξη ενός καλύτερου και ποιοτικότερου οπτικού αποτελέσματος των εικόνων.

Η διακριτική ικανότητα του αζιμουθίου του ραντάρ πραγματικού ανοίγματος (Real Aperture Radar), είναι μία συνάρτηση του λόγου του μήκους κύματος προς το μέγεθος του ανοίγματος της κεραίας. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος “άνοιγμα”/”μήκος κύματος”, τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση. Συνεπώς μειώνοντας το μήκος κύματος ή αυξάνοντας το μήκος της κεραίας παρέχεται καλύτερη χωρική ανάλυση κατά τη

διεύθυνση του αζιμουθίου. Με την ανάπτυξη αναμεταδοτών μηκών κύματος υψηλής ισχύος, επιτρέπεται η χρήση μικρότερων κεραιών για να επιτευχθεί επαρκής ανάλυση. Οι μικρότερες κεραίες επέτρεψαν την ανάπτυξη των αερομεταφερόμενων ραντάρ. Αρχικά οι Βρετανοί χρησιμοποίησαν αερομεταφερόμενα ραντάρ για την ανίχνευση και εντοπισμό εχθρικών αεροσκαφών κατά τις νυχτερινές επιχειρήσεις. Στη συνέχεια τα χρησιμοποίησαν για βομβαρδισμό κατά τη διάρκεια της νύχτας ή κατά τη διάρκεια άσχημων καιρικών συνθηκών.

Μετά την λήξη του πολέμου ερευνητές και επιστήμονες ξεκίνησαν μία περισσότερο έντονη έρευνα, προκειμένου να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των ραντάρ για επιστημονικούς σκοπούς. Έτσι ο Smith το 1948 συνέκρινε εικόνες ραντάρ με υπάρχοντες χάρτες της περιοχής του Greenland και παρατήρησε ότι οι εικόνες ραντάρ περιείχαν πολλές περισσότερες πληροφορίες εν συγκρίσει με τις πληροφορίες που έδινε ο χάρτης.

Επίσης λόγω της παράλληλης εξέλιξης δύο ειδών ραντάρ, του ραντάρ πλάγιας λήψης (side – looking airborne radar, SLAR) και του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (synthetic aperture radar, SAR), παρουσιάστηκε μεγάλη πρόοδος στην εξέλιξη των ραντάρ. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 η εταιρία Goodyear (1958) και το πανεπιστήμιο του Οχάιο (Cosgriff et al., 1960), διεξήγαγαν έρευνες οι οποίες λάμβαναν υπόψη τις ιδιότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε σχέση με την αντανάκλαση της πάνω σε φυσικές επιφάνειες καθώς επίσης και μετρήσεις φαινομένων οπισθοσκεδασμού τόσο για τα στατικά όσο και τα αερομεταφερόμενα ραντάρ. Έτσι στο πέρασμα του χρόνου αναπτύχθηκαν συστήματα ραντάρ με βελτιωμένη χωρική ανάλυση με αποτέλεσμα να προκληθεί το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Τα συστήματα SLAR έγιναν διαθέσιμα για εμπορική χρήση το 1969.

Η ανάπτυξη του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR), με την τεχνική επιμήκυνση της κεραίας, επιτρέπει την επίτευξη εικόνων πολύ καλής ανάλυσης κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα μήκη κύματος. Σημαντική ανάπτυξη των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος επιτεύχθηκε με τη δυνατότητα ανάλυσης των συχνοτήτων Doppler διαμέσου της ανάλυσης των συχνοτήτων των σημάτων επιστροφής (Sherwin et al., 1962). Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, χρησιμοποιήθηκε ένας επιτυχημένος επεξεργαστής χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό σφαιρικών, κυλινδρικών και κωνικών φακών προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες αναλύσεις του ανακλώμενου σήματος για εφαρμογές SAR (Cutrona et al., 1966).

Με την επιτυχή εκτόξευση του LANDSAT-1 το 1972, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε και πάλι στους οπτικούς αισθητήρες και στη συλλογή δεδομένων στην ορατή και υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η εκτόξευση των LANDSAT-2 και 3 το 1975 και 1978 αντίστοιχα έδωσε τη δυνατότητα κάλυψης πολύ μεγάλων επιφανειών της γήινης επιφάνειας με εικόνες

χωρικής ανάλυσης 80m, κάτι το οποίο είχε επιτευχθεί για πρώτη φορά. Βέβαια μετά από την επί 10 χρόνια χρήση των παραπάνω συστημάτων διαπιστώθηκαν αρκετοί περιορισμοί οι οποίοι πλέον ήταν εμφανείς, όπως η νεφοκάλυψη κατά τη στιγμή λήψης των εικόνων. Ένας δεύτερος περιορισμός ήταν οι χαμηλές συνθήκες φωτισμού (π.χ. νυχτερινές λήψεις). Ένας τρίτος παράγοντας ήταν η αλληλεπίδραση του σήματος με το στόχο, η οποία παρείχε νέα και περισσότερο ευδιάκριτη πληροφορία.

Το 1978 η εκτόξευση του δορυφόρου SEASAT αύξησε το ενδιαφέρον για τις εικόνες ραντάρ. Πλέον, προηγμένη τεχνολογία παρείχε τους τρόπους συλλογής εικόνων ραντάρ σε raster μορφότυπο καθώς επίσης και τις ακρίβειες των συγκεκριμένων δεδομένων. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η NASA εκτόξευσε τα συστήματα SIR-A και SIR-B. Ταυτόχρονα υπήρξαν και αερομεταφερόμενα συστήματα όπως το καναδικό CCRS SAR-580. Κατά την τρέχουσα περίοδο η επιστημονική κοινότητα απολαμβάνει πλέον πληθώρα δεδομένων ραντάρ τα οποία είναι διαθέσιμα από τους NASA/JPL, US Geological Survey, European Space Agency, Canadian Centre, RADARSAT International, NASDA, Japanese Space Agency κ.α. (Henderson et al., 1998).

1.2 Γενικά - Ραντάρ

Ανάλογα με την προέλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία αντανακλάται και στη συνέχεια ανιχνεύεται, οι δέκτες - σαρωτές (ή αισθητήρες) μπορούν να διακριθούν σε παθητικούς και σε ενεργητικούς. Παθητικοί είναι εκείνοι που ανιχνεύουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προερχόμενη από μία φυσική πηγή (συνήθως ο ήλιος), ενώ ενεργητικοί σαρωτές είναι εκείνοι που "φωτίζουν" (προσβάλλουν) οι ίδιοι το στόχο χρησιμοποιώντας την δική τους πηγή ακτινοβολίας, π.χ. εικονοληπτικά ραντάρ. Η τελευταία αυτή περίπτωση ονομάζεται "ραδιοεντοπισμός" ή "ραδιοανίχνευση".

Οι παθητικοί μικροκυματικοί δέκτες είναι ραδιόμετρα τα οποία ευαισθητοποιούνται στην περιοχή των μικροκυμάτων της ΗΜ ακτινοβολίας. Έχουν τις ίδιες διατάξεις με τα ηλεκτρο-οπτικά ραδιόμετρα (οπτικό σύστημα - ανιχνευτής - επεξεργαστής) καταγράφουν δε την εκπεμπόμενη από τα ίδια σώματα μικροκυματική ακτινοβολία ή/και την ανακλώμενη από τα σώματα ηλιακή μικροκυματική ακτινοβολία. Επειδή όμως η ποσότητα της ανακλώμενης ή/και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στην περιοχή των μικροκυμάτων είναι πολύ μικρή γι' αυτό για την καταγραφή ικανού σήματος απαιτείται μεγάλη χρονική διάρκεια καταγραφής της ακτινοβόλουμένης ενέργειας ανά μοναδιαία επιφάνεια. Αυτό σημαίνει μικρή ταχύτητα σάρωσης και χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα (από 10 έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα).

Οι παθητικοί μικροκυματικοί δέκτες λειτουργούν κυρίως στις συχνότητες 4.995, 10.69, 15.375 και 19.35 GHz. Ραδιομετρικές παρατηρήσεις της ατμόσφαιρας

πραγματοποιούνται κοντά στη συχνότητα των 22 GHz όπου παρουσιάζεται ισχυρή απορρόφηση από υδρατμούς. Επίσης, στην περιοχή του φάσματος 50 – 60GHz στην οποία παρουσιάζεται ισχυρή απορρόφηση από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, λειτουργούν μικροκυματικά ραδιόμετρα τα οποία προσδιορίζουν κατακόρυφα προφίλ ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας. Στην περιοχή αυτή δεν λειτουργούν ενεργητικοί δέκτες (Καραθανάση, 2012).

Οι εφαρμογές των μικροκυματικών ραδιομέτρων τηλεπισκόπησης είναι στην:

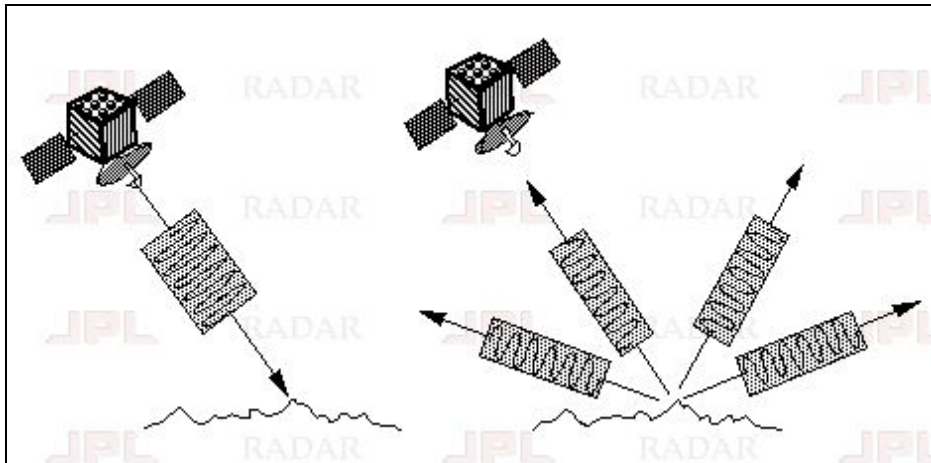
- Υδρολογία (υγρασία εδάφους, αποστράγγιση υδάτων, πρόγνωση πλημμυρών)
- Γεωργία (υγρασία εδάφους, πρόβλεψη σοδειάς, προγραμματισμός αρδεύσεων)
- Πόλοι (παρατήρηση στρώματος πάγου, παγονησίδων)
- Ωκεανοί (παρατήρηση κυμάτων, επιφανειακής θερμοκρασίας, αλμυρότητας και κηλίδων πετρελαίου)
- Μετεωρολογία και κλιματολογία (κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας, υγρασίας και προσπτώσεων)
- Παρακολούθηση κυκλώνων και τροπικών βροχών
- Στρατόσφαιρα, μεσόσφαιρα και κατώτερη θερμόσφαιρα (προφίλ θερμοκρασίας, μαγνητικού πεδίου και συγκέντρωσης αερίων).

Το ραντάρ (Radar: Radio Detection and Ranging, δηλαδή Ραδιο-Ανίχνευση και Αποστασιομέτρηση) είναι μικροκυματικό ενεργητικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, εντοπισμό, απεικόνιση και παρακολούθηση αντικειμένων.

1.3 Ραντάρ Απεικόνισεις

Τα ραντάρ απεικόνισεις αποτελούν ενεργητικά ανεξάρτητα συστήματα τα οποία εκπέμπουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ένα ραντάρ απεικόνισεις λειτουργεί σαν ένα φλας κάμερας, δεδομένου ότι παρέχει το δικό του φως προκειμένου να φωτίσει μια περιοχή στο έδαφος και να πάρει μια στιγμιαία εικόνα. Δηλαδή το φλας της κάμερας στέλνει ένα παλμό φωτός (φλας) και καταγράφει στο φιλμ το φως που αντανακλάται πίσω σε αυτό μέσα από το φακό της κάμερας. Αντί ενός φακού της κάμερας και του φιλμ, το ραντάρ χρησιμοποιεί μια κεραία και καταγραφικά συστήματα υπολογιστή για την αποθήκευση - καταγραφή εικόνων της. Ένα τυπικό ραντάρ, μετράει τη δύναμη και τον χρόνο μετάβασης - επιστροφής των σημάτων που εκπέμπονται από την κεραία του ραντάρ και αντανακλώνται από ένα απομακρυσμένο αντικείμενο ή επιφάνεια. Η κεραία του ραντάρ εκπέμπει και λαμβάνει παλμούς σε συγκεκριμένα μήκη κύματος μικροκυμάτων (στην περιοχή 1 cm έως 1 m, το οποίο αντιστοιχεί σε μια περιοχή συχνοτήτων από περίπου 300 MHz έως 30 GHz) και πολώσεις (κύματα πολωμένα σε ένα κάθετο ή οριζόντιο επίπεδο). Για ένα σύστημα ραντάρ απεικόνισεις, μεταδίδονται περίπου 1500 υψηλής ισχύος παλμοί

ανά δευτερόλεπτο προς το στόχο ή την περιοχή ενδιαφέροντος, με κάθε παλμό να έχει διάρκεια παλμού (πλάτος παλμού) περίπου 10-50 μικροδευτερόλεπτα. Ο παλμός καλύπτει τυπικά ένα μικρό εύρος συχνοτήτων, με κέντρο τη συχνότητα που έχουν επιλεγεί για το ραντάρ. Το τυπικό εύρος ζώνης για ένα ραντάρ απεικόνισης είναι από 10 έως 200 MHz. Στην επιφάνεια της Γης, η ενέργεια του παλμού του ραντάρ διασπείρεται σε όλες τις κατευθύνσεις, ενώ κάποια αντανακλάται πίσω προς την κεραία. Οι επιστροφές αυτές στο ραντάρ λαμβάνονται από την κεραία σε μια συγκεκριμένη πόλωση (οριζόντια ή κάθετη, δεν είναι απαραίτητα ίδια με τον παλμό μετάδοσης).

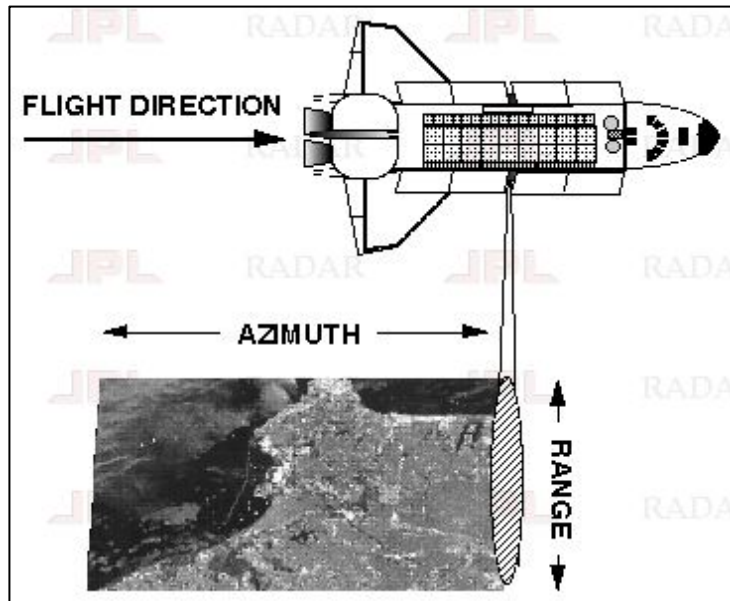


Εικόνα 1.2: Διασπορά και Ανάκλαση της Ενέργειας του Ραντάρ.

(Πηγή: <http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.htm>).

Στη συνέχεια μετατρέπονται σε ψηφιακά δεδομένα, καταγράφονται και αποθηκεύονται για μεταγενέστερη επεξεργασία και προβολή τους ως εικόνα. Δεδομένου ότι ο παλμός του ραντάρ ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός, είναι σχετικά απλό να χρησιμοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την μετάβαση και επιστροφή του παλμού προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση από το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Το επιλεγμένο πλάτος του παλμού καθορίζει τη διακριτική ικανότητα κατά την κατεύθυνση της απόστασης (cross-track). Μεγαλύτερο πλάτος σημαίνει καλύτερη διακριτική ικανότητα σε αυτή τη διάσταση.

Στην περίπτωση των ραντάρ απεικόνισης, η κεραία κινείται κατά μήκος της γραμμής πτήσης και αναπαριστά την περιοχή ενδιαφέροντος σε συγκεκριμένο πλάτος με αποτέλεσμα τη δημιουργία της εικόνας ραντάρ.



Εικόνα 1.3: Δημιουργία Εικόνας Ραντάρ με χρήση πλατφόρμας.

(Πηγή: <http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.htm>).

Το μήκος της κεραίας του ραντάρ προσδιορίζει τη διακριτική ικανότητα του αζιμουθίου κατά τη γραμμή πτήσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η κεραία τόσο καλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα στη συγκεκριμένη διάσταση (<http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.html>).

Υπάρχουν δύο είδη απεικονιστικών ραντάρ τα οποία χρησιμοποιούνται συχνότερα:

- τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος (Real Aperture Radar)
- τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar)

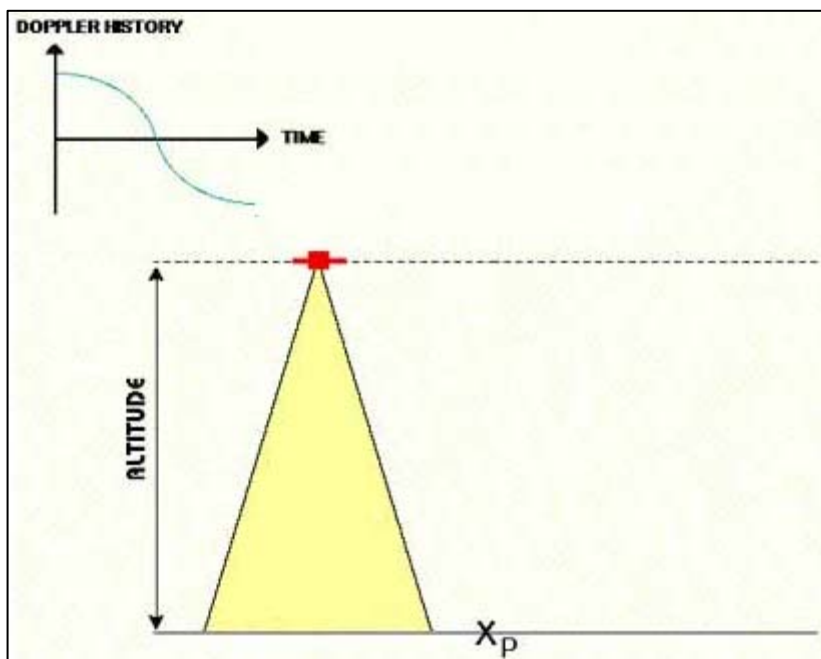
Τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος συχνά ονομάζονται και αερομεταφερόμενα ραντάρ πλάγιας λήψης (SLAR-Side Looking Airborne Radar). Τόσο τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος όσο και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος αποτελούν συστήματα πλάγιας λήψης, ενώ η κατεύθυνση του σήματος που αποστέλλουν είναι συνήθως κάθετη στη γραμμή πτήσης.

Η διαφορά των δύο ραντάρ έγκειται στη διακριτική ικανότητα κατά τη κατεύθυνση πτήσης ή κατά την κατεύθυνση του αζιμουθίου. Η διακριτική ικανότητα των ραντάρ πραγματικού ανοίγματος εξαρτάται από το εύρος της δέσμης της κεραίας και είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ του ραντάρ και του στόχου (κεκλιμένη απόσταση). Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας του σήματος συνθέτει ένα άνοιγμα κεραίας το οποίο είναι περίπου εκατό φορές μεγαλύτερο από αυτό της πραγματικής κεραίας. Αυτό υλοποιείται με την επεξεργασία μίας αλληλουχίας σημάτων τα οποία καταγράφονται στη μνήμη του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο η διακριτική ικανότητα αζιμουθίων (διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση

της πτήσης) είναι ανεξάρτητη από την απόσταση μεταξύ της κεραίας και του στόχου. Η ονομαστική διακριτική ικανότητα για ένα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος είναι περίπου μισή από το ραντάρ πραγματικού ανοίγματος. Βέβαια μπορεί να επιλεγεί μεγαλύτερη διακριτική ανάλυση προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της εικόνας. Γενικά, αναλόγως της επεξεργασίας, επιτυγχάνεται διακριτική ανάλυση της τάξης των 1-2 μέτρων για τα αερομεταφερόμενα ραντάρ και της τάξης των 5-50 μέτρων για τα ραντάρ σε διαστημικές πλατφόρμες (http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_II/radar_principles.htm).

1.4 Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

Τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος αναπτύχθηκαν με σκοπό να αντιμετωπιστούν και υπερκεραστούν προβλήματα και περιορισμοί των ραντάρ πραγματικού ανοίγματος. Τα συγκεκριμένα συστήματα επιτυγχάνουν πολύ καλή διακριτική ανάλυση κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, κάτι το οποίο είναι ανεξάρτητο από την κεκλιμένη απόσταση ως προς το στόχο και τέλος χρησιμοποιούν μικρή κεραία και σχετικά μεγάλα μήκη κύματος.



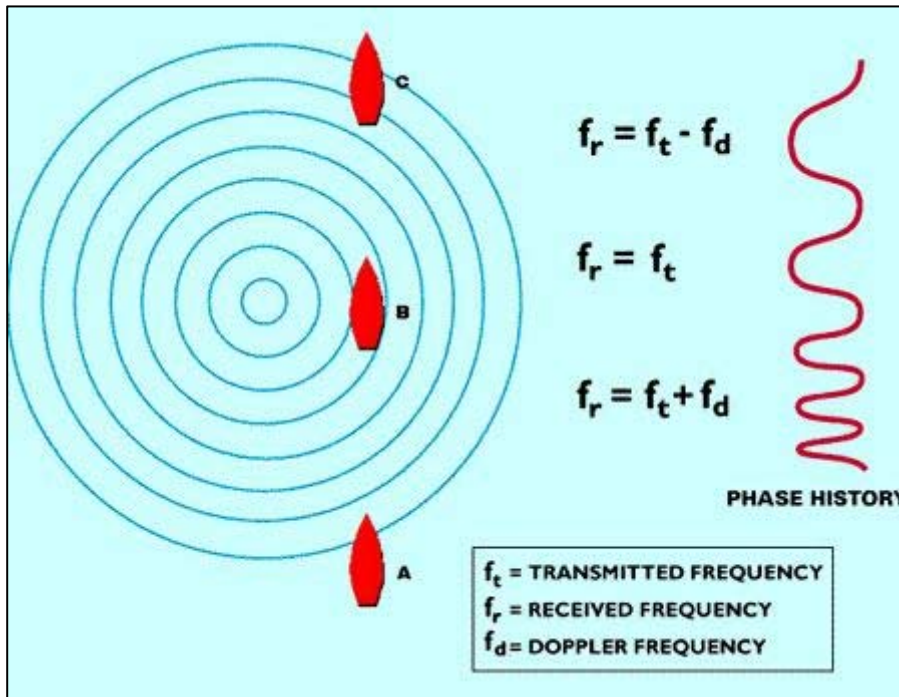
Εικόνα 1.4: Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος.

(Πηγή: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses)

Κατά τη διάρκεια της διαδρομής του το ραντάρ εκπέμπει και λαμβάνει πολλούς παλμούς σε μία ακολουθία. Έτσι, καταγράφοντας και έπειτα συνδυάζοντας κάθε ένα από αυτά τα ατομικά σήματα, δημιουργείται ένα συνθετικό άνοιγμα, το οποίο στη συνέχεια παρέχει μία καλύτερη διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι μερικές λεπτομέρειες της δομής των σημάτων αντανάκλασης που παράγονται από τους στόχους, αλλάζουν κατά τη διάρκεια της κίνησης του ραντάρ καθώς περνάει από το στόχο. Αυτή η αλλαγή

ερμηνεύεται από το φαινόμενο Doppler, το οποίο μεταξύ άλλων χρησιμοποιείται για την εστίαση των σημάτων στον επεξεργαστή.

Αν υποθέσουμε ένα έμβολο, το οποίο ανεβοκατεβαίνει στο νερό και παράγει κύκλους εκπεμπόμενων κυμάτων, καθένα από τα οποία έχει σταθερή συχνότητα f_z . Η κίνηση αυτή φαίνεται στην εικόνα (1.5):



Εικόνα 1.5: Παραγωγή κυκλικών κυμάτων σταθερής συχνότητας f_z .

(Πηγή: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses)

Τα συγκεκριμένα κύματα μεταδίδονται με γνωστή ταχύτητα, ενώ το έμβολο παράγει κύματα ανάλογα με εκείνα ενός ραντάρ. Όπως φαίνεται και στην εικόνα (1.5), θεωρούμε ένα πλοίο το οποίο κινείται κατά μήκος της διεύθυνσης $A \rightarrow B \rightarrow C$. Στη θέση B ένας επιβάτης του πλοίου θα μετρούσε τον ίδιο αριθμό κυμάτων με αυτά που εκπέμπονται. Στην A, όπου το πλοίο κινείται προς την πηγή, ο επιβάτης θα μετρούσε μεγαλύτερο αριθμό κυμάτων που εκπέμπονται από την πηγή και η ταχύτητα μετάδοσης των κυμάτων είναι ελαφρώς αυξημένη από την ταχύτητα του πλοίου. Εν αντιθέσει στη θέση C, όπου το πλοίο απομακρύνεται από την πηγή, η συχνότητα μετάδοσης είναι μικρότερη και τα κύματα μεταδίδονται στην ίδια κατεύθυνση με το πλοίο.

Η συχνότητα Doppler, είναι η διαφορά μεταξύ των λαμβανόμενων και εκπεμπόμενων συχνοτήτων και η διαφορά αυτή προκαλείται από τη σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή. Αντίστοιχα, η σχετική απόσταση μεταξύ των κορυφών του πεδίου των κυμάτων θα μπορούσε να καταγραφεί κατά μήκος της γραμμής $A \rightarrow C$ και να μετρηθεί όπως στην περίπτωση που το πεδίο των κυμάτων ήταν ακίνητο.

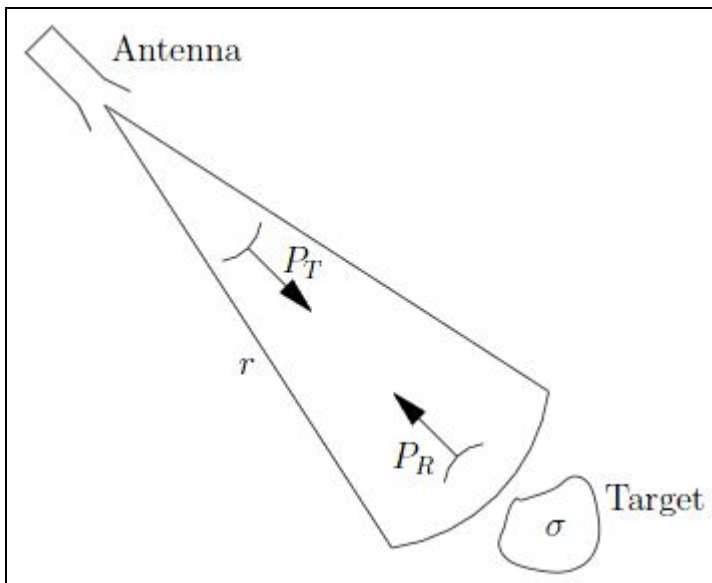
Αυτό οδηγεί σε ένα μοντέλο αντίστοιχο με το μοντέλο Doppler. Επίσης, κατά την κίνηση του πλοίου από το Α στο σημείο C, η καταγραφή που υλοποιείται μοιάζει σαν την καμπύλη στα δεξιά της εικόνας 1-5.

Στην περίπτωση που αντί για έμβολο, θεωρήσουμε μία πλατφόρμα ραντάρ η οποία εκπέμπει σήμα, το πλοίο αποτελεί ένα στόχο που κινείται διαμέσου του σήματος της κεραίας, καθώς το ραντάρ περνάει. Η καταγραφή των κυμάτων που οπισθοσκεδάζονται από τον στόχο και λαμβάνονται θα είναι παρόμοια με την καταγραφή η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα επιβάτης – πλοίο. Αυτή η καταγραφή ονομάζεται «ιστορικό» Doppler (ή «ιστορικό φάσης») των επιστρεφόμενων σημάτων.

Καθώς ο στόχος κάνει την εισοδό του στο πεδίο των κυμάτων, το πρόσημο της μετατόπισης Doppler είναι θετικό, επειδή η απόσταση πηγής – στόχου μειώνεται. Στη συνέχεια το «ιστορικό» φάσης αποθηκεύεται προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των δεδομένων του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Τη στιγμή που η κεραία είναι εγκάρσια σε σχέση με το στόχο, η λαμβανόμενη συχνότητα είναι ονομαστική, με τη συχνότητα Doppler να είναι μηδέν. Στη συνέχεια μειώνεται καθώς η κεραία της πλατφόρμας απομακρύνεται και το «ιστορικό» φάσης αποθηκεύεται προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των δεδομένων του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (<http://earth.esa.int>).

1.4.1 Η Εξίσωση του Ραντάρ

Η σχέση μεταξύ της ενέργειας που εκπέμπεται P_T , της ενέργειας που επιστρέφεται P_R , από τον στόχο και της ενέργειας P_E που καταγράφεται από την κεραία, περιγράφεται από την εξίσωση του ραντάρ.



Εικόνα 1.6: Γεωμετρία της Σκέδασης της Ενέργειας από τον Στόχο.

(Πηγή: Brunner, 2009).

Θεωρώντας ιστροπική εκπομπή της ακτινοβολίας, η εκπεμπόμενη ενέργεια διαδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η μη κατευθυνόμενη ένταση της ενέργειας S_N σε στόχο που βρίσκεται σε απόσταση r , δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_N = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad (1.1)$$

Τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούν κατευθυνόμενες κεραιές προκειμένου να μορφοποιήσουν μία μικρή δέσμη ακτινοβολίας. Οι συγκεκριμένες κεραιές διαθέτουν μηχανισμό αύξησης της έντασης της ενέργειας, ο οποίος ονομάζεται “κέρδος” της κεραιάς G :

$$G = \frac{4\pi A_A K_a}{\lambda^2} \quad (1.2)$$

Όπου το A_A αποτελεί το γεωμετρικό εμβαδό της κεραιάς, K_a ένας παράγοντας που εκφράζει την αποτελεσματικότητα της κεραιάς και λ το μήκος κύματος. Η κατευθυνόμενη ένταση της ενέργειας S_D στο στόχο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_D = S_N G \quad (1.3)$$

Η ενέργεια η οποία επιστρέφεται από το στόχο δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση της ενέργειας επί του στόχου, αλλά και από τη διατομή της κεραιάς (Radar Cross Section – RCS) σ και αποτελεί μία μέτρηση της δύναμης της ανακλαστικότητας του στόχου. Θεωρώντας ότι ο στόχος είναι μικρός σε σχέση με τη δέσμη του ραντάρ, είναι:

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{P_R}{P_I} \quad (1.4)$$

Η ενέργεια η οποία επιστρέφεται από το στόχο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$P_R = S_D \sigma \quad (1.5)$$

Θεωρούμε ότι η απόσταση μεταξύ πομπού-στόχου και στόχου-δέκτη είναι ίδια. Επιπλέον τα κέρδη της κεραιάς τόσο κατά την εκπομπή όσο και κατά την λήψη είναι ίσα, ενώ η ενέργεια που λαμβάνεται από το δέκτη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_E = \frac{P_R A_A K_a}{4\pi r^2 L} = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 r^4 L} \quad (1.6)$$

Όπου L αποτελεί έναν παράγοντα για τις απώλειες του συστήματος.

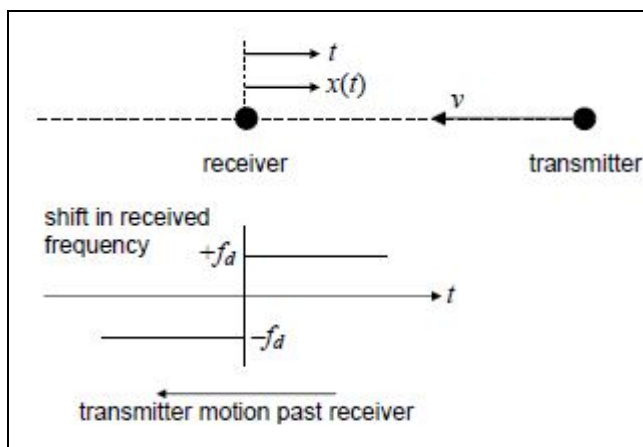
Ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων του ραντάρ είναι ο λόγος Σήματος προς Θόρυβο (Signal – to – Noise Ratio, SNR):

$$SNR = \frac{P_E \tau}{k K} = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma \tau}{(4 \pi)^3 r^4 L k K} \quad (1.7)$$

Όπου k είναι η σταθερά Boltzmann, K ο θόρυβος της θερμοκρασίας και τ η διάρκεια του παλμού του μικροκύματος. Όσο υψηλότερο είναι το SNR, τόσο λιγότερα είναι τα προβλήματα που προκαλεί ο θόρυβος, και ως εκ τούτου τόσο καλύτερα υλοποιείται ο εντοπισμός και ανίχνευση αδύναμων σημάτων στα καταγεγραμμένα δεδομένα (Brunner, 2009).

1.4.2 Το Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler, σύμφωνα με το οποίο η ημιτονοειδής μορφή της συχνότητας επηρεάζεται από την ταχύτητα του σήματος τόσο της γεννήτριας αυτού όσο και του δέκτη αυτού, είναι κεντρικής σημασίας για το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Παρατηρείται πιο συχνά στο σήμα που διαχέεται από το ανάγλυφο ή ανακλάται από ένα διακριτό αντικείμενο. Αρχικά θεωρείται κινούμενος πομπός ο οποίος πλησιάζει και προσπερνάει σταθερό δέκτη, ενώ ο δέκτης είναι στην ευθεία με το διάνυσμα ταχύτητας του πομπού (εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Κινούμενος Πομπός προς και μετά το Δέκτη. Η αλλαγή του Doppler στη λαμβανόμενη συχνότητα.

(Πηγή: Richards, 2009).

Ορίζεται η απόσταση (χρονικά μεταβαλλόμενη) μεταξύ του πομπού και του δέκτη ως $x(t)$, η οποία μετριέται στη θετική κατεύθυνση δεξιά, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7. Ο χρόνος t , ορίζεται να είναι ίσος με μηδέν όταν ο πομπός βρίσκεται στη θέση του δέκτη και θετικός, όταν βρίσκεται δεξιά του δέκτη, όπως φαίνεται και πάλι στην εικόνα 1.7. Σε μία γνωστή απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη X_0 , ο χρόνος δίνεται από την σχέση:

$$t = \frac{X_0}{v} \quad (1.8)$$

Όπου v είναι η ταχύτητα του πομπού ως προς το δέκτη. Σε χρόνο t , είναι $x(t)=vt$. Το σήμα εκπέμπεται σε ημιτονοειδή μορφή συναρτήσεως της $\cos\omega t$ και φτάνει στον πομπό μετά από χρόνο καθυστέρησης $t_D = x(t)/c$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός. Συνεπώς μπορεί να γραφτεί:

$$\cos\omega(t + t_D) = \cos\left[\omega t + \frac{2\pi x(t)}{\lambda}\right] \text{ since } \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας το $x(t)$, παρατηρείται ότι το λαμβανόμενο σήμα είναι:

$$\cos\left(\omega t + \frac{2\pi vt}{\lambda}\right) = \cos\left(\omega + \frac{2\pi v}{\lambda}\right)t \quad (1.10)$$

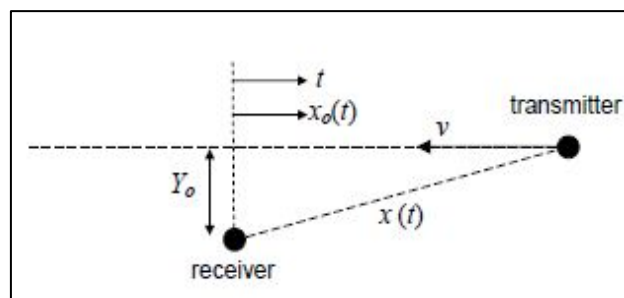
Η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος είναι ο συντελεστής του χρόνου στην τελευταία εξίσωση, αποτελείται από την συχνότητα που μεταδίδεται και αναπροσαρμόζεται από την λεγόμενη συνιστώσα Doppler:

$$\omega_r = \omega + \omega_d, \quad \omega_d = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (1.11)$$

Η προηγούμενη σχέση μπορεί επίσης να γραφτεί, εκφράζοντας τη συχνότητα σε Hz:

$$f_r = f + f_d, \quad f_d = \frac{v}{\lambda} \quad (1.12)$$

Έτσι, η συχνότητα της ληφθείσας ημιτονοειδούς κυματομορφής μετατοπίζεται εξαιτίας της ταχύτητας του πομπού ως προς το δέκτη. Όταν ο πομπός περνάει το δέκτη, το πρόσημο της Doppler μετατόπισης αντιστρέφεται, διότι το πρόσημο της συνάρτησης $x(t)$ αντιστρέφεται όταν ο χρόνος t είναι αρνητικός. Η αλλαγή αυτή στη συχνότητα Doppler, καθώς ο πομπός περνάει το δέκτη γίνεται στιγμιαία. Στην πράξη ο πομπός είναι περισσότερο πιθανό να περάσει από το δέκτη σε μία απόσταση Y_0 , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 1.8:



Εικόνα 1.8: Κινούμενος Πομπός προς Δέκτη σε κοντινή Απόσταση.

(Πηγή: Richards, 2009).

Συνεπώς η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη σε μία χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$x(t) = \sqrt{Y_0^2 + (vt)^2} \quad (1.13)$$

Παρατηρείται ότι το λαμβανόμενο ημιτονοειδές σήμα φτάνει με μία καθυστέρηση φάσης $\varphi(t)$ και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{x(t)}{\lambda} \quad (1.14)$$

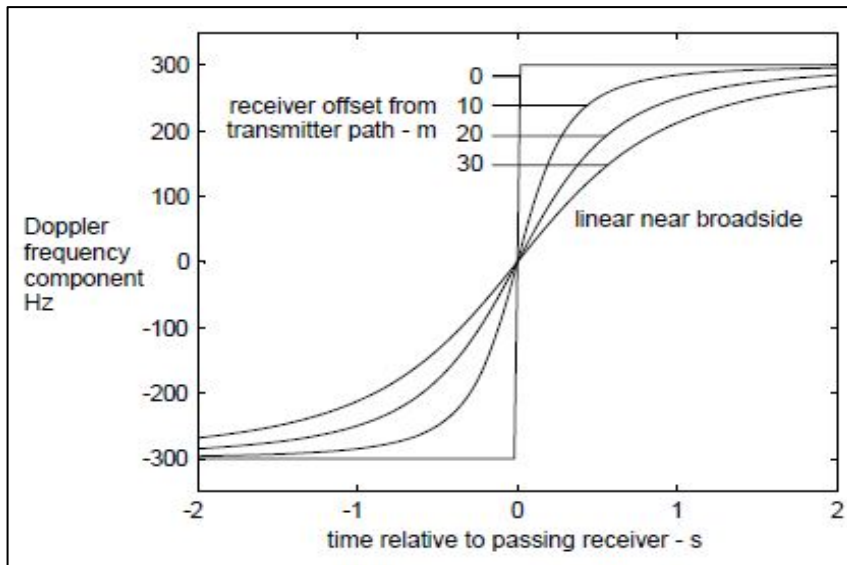
Στην απλούστερη περίπτωση η καθυστέρηση φάσης είναι $2\pi(vt/\lambda)$. Συγκρίνοντας την καθυστέρηση φάσης με τις σχέσεις (1.10 και 1.11) συμπεραίνεται ότι η συχνότητα Doppler είναι η παράγωγος χρόνου της φάσης καθυστέρησης. Συνεπώς γενικεύοντας η σχέση (1.14) γίνεται:

$$\omega_d = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2\pi dx(t)}{\lambda dt} \quad (1.15)$$

Και με τη σχέση (1.13) προκύπτει:

$$f_d = \frac{1}{\lambda} \frac{dx(t)}{dt} = \frac{v^2}{\lambda} \left[Y_0^2 + (vt)^2 \right]^{-0.5} \quad (1.16)$$

Αυτό αναπαρίσταται στην παρακάτω εικόνα και για έναν πομπό ο οποίος ίπταται με 1000kms^{-1} , εκπέμπει στα 300MHz και με ένα δέκτη στα 0m, 100m, 200m και 300m.



Εικόνα 1.9: Συχνότητες Doppler για εύρος αποστάσεων του δέκτη, καθώς ο πομπός περνάει από δεξιά προς τα αριστερά. Ο χρόνος μετριέται προς τα δεξιά.

(Πηγή: Richards, 2009).

Αν στη σχέση (1.16) $Y_0=0$, τότε προκύπτει η σχέση (1.12). Επίσης αν $vt \ll Y_0$, π.χ. όταν ο πομπός περνάει πολύ κοντά από το δέκτη. Τότε η σχέση (1.13) μπορεί να γίνει:

$$x(t) = Y_0 + \frac{v^2}{2Y_0} t^2 \quad (1.17)$$

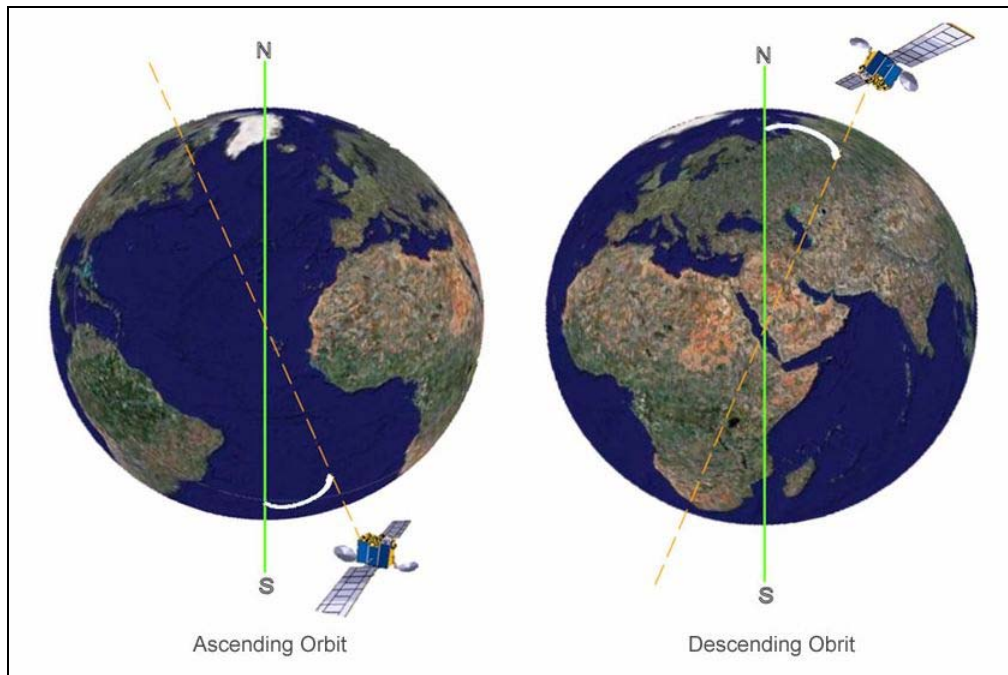
Και η μετατόπιση της συχνότητας Doppler είναι:

$$f_d = \frac{1}{\lambda} \frac{dx(t)}{dt} = \frac{v^2}{\lambda Y_0} t \quad (1.18)$$

Συνεπώς η λαμβανόμενη συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά όταν ο πομπός περνάει πολύ κοντά στο δέκτη και φαίνεται στην εικόνα (1.9) (Richards, 2009).

1.4.3 Γεωμετρία Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος

Τα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, εν αντιθέσει, με τους οπτικούς δέκτες, εκπέμπουν και λαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε πλάγια προοπτική στη δεξιά ή αριστερή γωνία της κίνησης του δορυφόρου και εγκάρσια της τροχιάς του. Η λήψη των απεικονίσεων πραγματοποιείται είτε κατά την τροχιά από Βορρά προς Νότο ή από Νότο προς Βορρά.

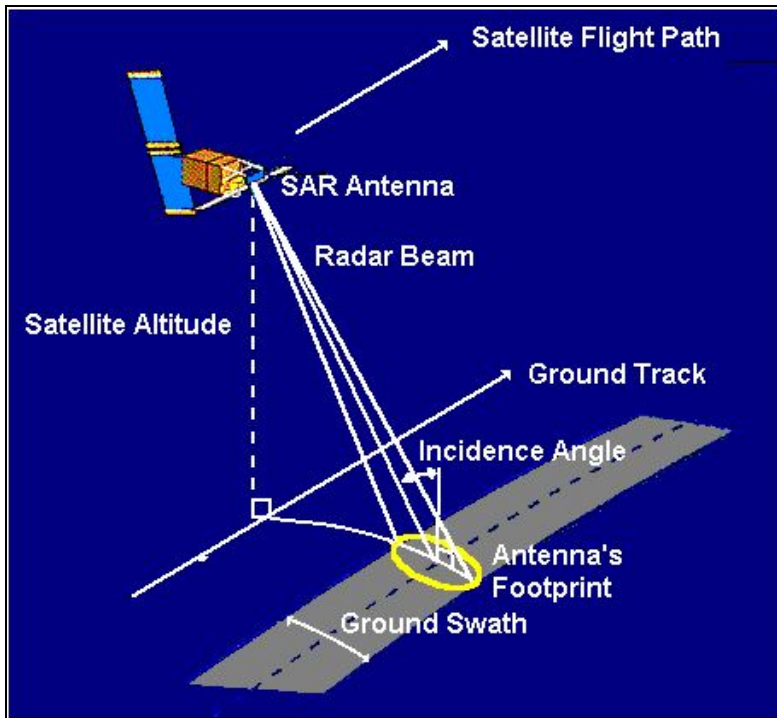


Εικόνα 1.10: Καθοδική τροχιά (Βορράς-Νότος) και Ανοδική τροχιά (Νότος-Βορράς).

(Πηγή: <http://www.treuropa.com/Home/Technique/SARImagery/tabid/409/Default.aspx>).

Η διεύθυνση κατά την οποία το σύστημα του ραντάρ εκπέμπει και λαμβάνει την ακτινοβολία καλείται διεύθυνση παρατήρησης (look direction ή Line Of Sight – LOS). Η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση παρατήρησης με την κάθετη στο έδαφος καλείται γωνία παρατήρησης (look angle), η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ένταση της οπισθοσκέδασης (backscattering) των στόχων της γήινης επιφάνειας.

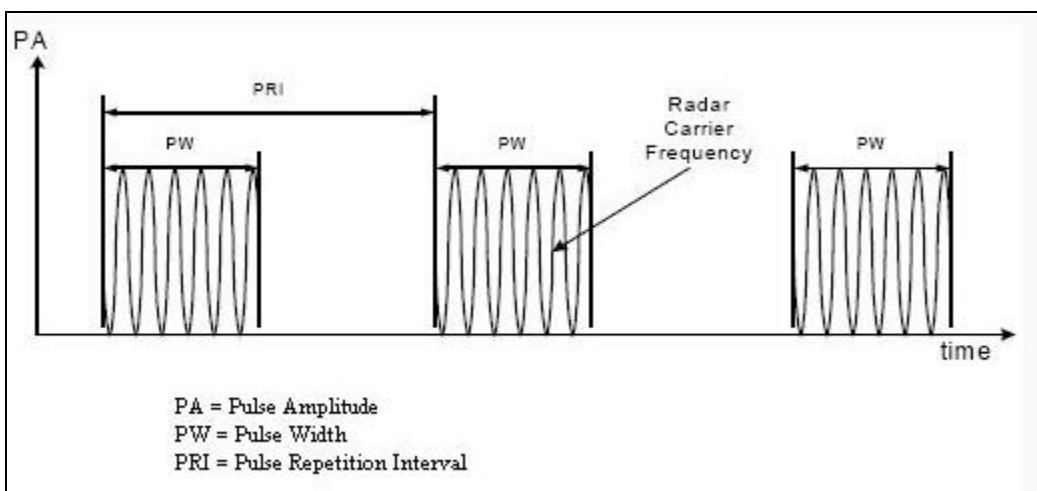
Το σύστημα ραντάρ σαρώνει σε κάθε στιγμή μία περιοχή της επιφάνειας της γης, η οποία ονομάζεται ίχνος της κεραίας (antenna footprint). Η διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου καλείται διεύθυνση αζιμουθίου της απεικόνισης (azimuth direction ή along track direction), ενώ η κάθετη προς τη διεύθυνση του αζιμουθίου της απεικόνισης καλείται διεύθυνση των πλάγιων αποστάσεων της απεικόνισης (range direction ή across-track direction).



Εικόνα 1.11: Το Ίχνος της Κεραίας.

(Πηγή: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/mw.htm>).

Οι παλμοί εκπέμπονται με μία σταθερή συχνότητα επανάληψης (PRF), σε εύρος συχνοτήτων MHz-GHz, ανάλογα με την πλατφόρμα που χρησιμοποιεί το ραντάρ και τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται, με σκοπό να φτάνουν στους στόχους-αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης. Αντίστοιχα λαμβάνονται και τα επιστρεφόμενα σήματα. 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.



Εικόνα 1.12: Μεταδιδόμενος διαφοροποιημένος παλμός (Pulse Repetition Interval).

(Πηγή: <http://www.google.gr/imgres?q=pulse+repetition+interval>)

Τόσο το εκπεμπόμενο όσο και το λαμβανόμενο σήμα αποτελούν μία σύνθετη ποσότητα και ένα σύστημα ραντάρ λειτουργεί συνεκτικά όταν καταγράφεται τόσο το πραγματικό (real) όσο και το φανταστικό (imaginary) κανάλι της ηχούς. Τα δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν είτε ως IQ (μιγαδικός αριθμός) ή ως πραγματικός αριθμός. Όταν μόνο η ισχύς του σήματος καταγράφεται τότε το ραντάρ λειτουργεί ως ένα όργανο το οποίο δεν έχει συνοχή.

Η κλίμακα σχετίζεται με την ακτινοβολία η οποία οπισθοσκεδάζεται στον αισθητήρα από τον εκάστοτε στόχο που βρίσκεται στη γήινη επιφάνεια και το οποίο εκφράζεται μαθηματικά με την εξίσωση του ραντάρ (Κουρκούλη, 2010).

Για την παραγωγή του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, χρησιμοποιείται μία 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). Προκειμένου τα σημεία του εδάφους να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια, πρέπει οι παλμοί να είναι σύντομοι και να έχουν μικρή διάρκεια. Ταυτόχρονα δημιουργείται ένα πρόβλημα ανεπαρκούς ενέργειας των παλμών για να επιστρέψουν στο δέκτη, το οποίο λύνεται με τη χρήση μίας τεχνικής διαμόρφωσης του σήματος (linear FM chirp). Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένας παλμός του οποίου η διάρκεια και συνεπώς η ενέργεια είναι μεγαλύτερη, ενώ η συχνότητα του μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο (linear frequency shift) μέσα σε ένα ορισμένο εύρος συχνοτήτων (bandwidth).

Έπειτα το σήμα αποστέλλεται στον πομπό (transmitter) όπου ενισχύεται και στη συνέχεια αποστέλλεται στην κεραία μέσω ενός κυκλοφορητή, όπου και ακτινοβολείται προς το έδαφος. Η κεραία διαδίδει το σήμα προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, με παράλληλη εστίαση της ακτινοβολίας στην περιοχή ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι αλληλεπιδράσεις παρακείμενων αντικειμένων του εδάφους, εκτός της περιοχής αυτής. Το σήμα σκεδάζεται από τους στόχους στο έδαφος και η ανακλώμενη ακτινοβολία λαμβάνεται από την κεραία και ενισχύεται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Στο σήμα προστίθεται θόρυβος τόσο από τη διάδοσή του στην ατμόσφαιρα όσο και από τα διάφορα εξαρτήματα του ραντάρ, οι οποίοι μεταβάλλουν το λαμβανόμενο σήμα. Η πληροφορία την οποία φέρει το σήμα επιστροφής, βρίσκεται στη φάση και το πλάτος του και όχι στη φέρουσα συχνότητα η οποία προέκυψε από τη διαμόρφωσή της. Έτσι το σήμα αποδιαμορφώνεται από έναν τετράγωνο αποδιαμορφωτή, ο οποίος χωρίζει το σήμα σε δύο and συνιστώσες, οι οποίες ονομάζονται συμφασική και ορθογωνική συνιστώσα (I & Q in – phase & quadrature – phase components). Αυτό υλοποιείται με δύο σύγχρονους ανιχνευτές που έχουν το ίδιο σήμα εισόδου, αλλά διαφέρουν μεταξύ τους κατά 90° . Τα σήματα I & Q διατηρούν την πληροφορία φάσης και παρέχουν τη διάκριση ανάμεσα σε αρνητική και θετική μετατόπιση Doppler. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα συνεκτικό σήμα μιγαδικής μορφής με τη σε φάση συνιστώσα, την τετραγωνικής

φάσης συνιστώσα και ένα συντελεστή πλάτους. Έπειτα, ενισχύεται και ως προς τις δύο συνιστώσες και μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω ενός μετατροπέα Analog/Digital conversion, με τη διαδικασία της δειγματοληψίας. Τέλος, τα ψηφιοποιημένα σήματα μεταφέρονται στους επίγειους σταθμούς λήψης δεδομένων όπου και παράγεται η μιγαδική απεικόνιση του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, ενώ κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας προκύπτει από δύο τιμές, την I και την Q μετά από περαιτέρω επεξεργασία για να προκύψει το τελικό προϊόν (Μπουρεξής, 2012).

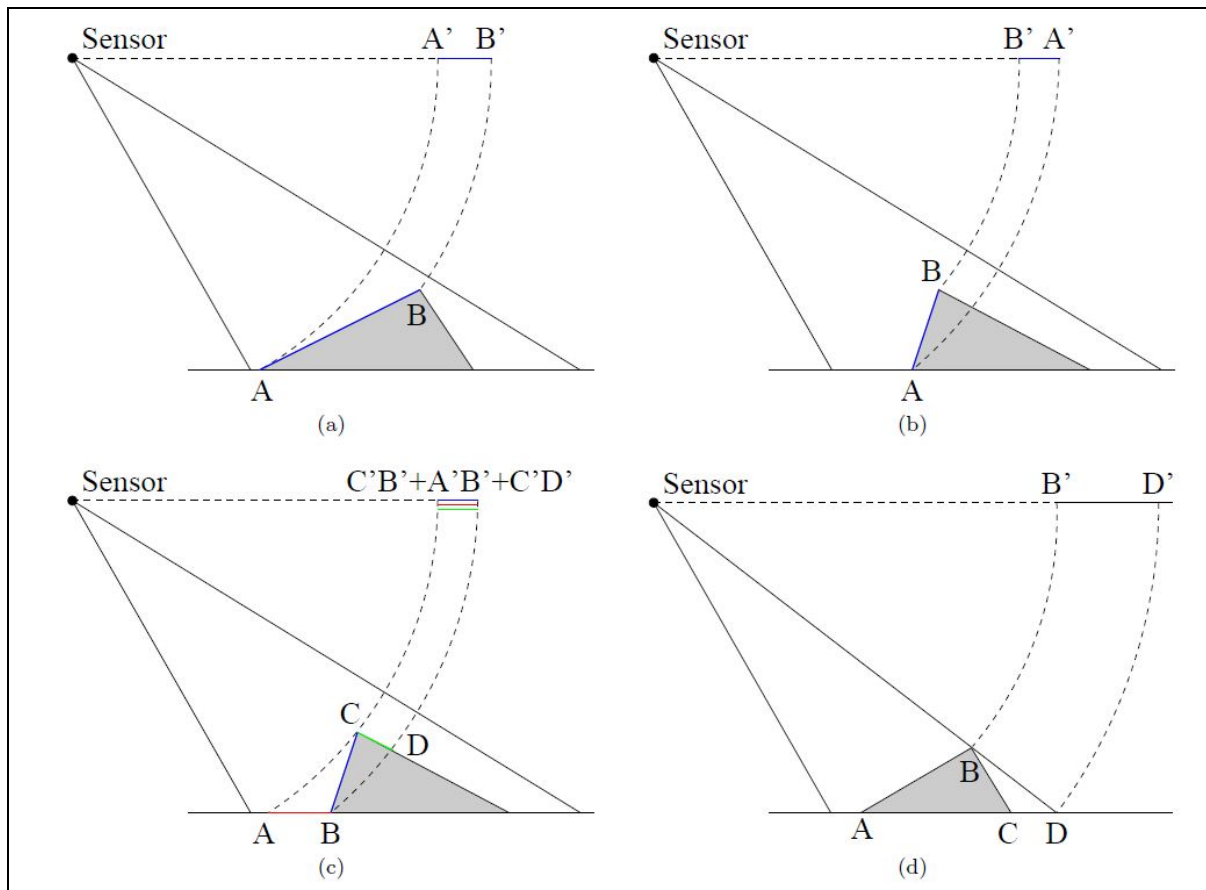
1.4.4 Χαρακτηριστικά Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος

1.4.4.1 Γεωμετρικές Παραμορφώσεις

Η πλάγια λήψη των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος σε συνδυασμό με το γήινο ανάγλυφο προκαλούν γεωμετρικές παραμορφώσεις-διαστροφές, όπως τη σμίκρυνση (foreshortening), μετατόπιση αναγλύφου (relief displacement), πτύχωση (layover), 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.

Τα δεδομένα μιας εικόνας συνθετικού ανοίγματος αποτελούν ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων οι οποίες καθορίζονται από την ισχύ του σήματος οπισθοσκέδασης ενός αντικειμένου μέσω ενός συντελεστή, ο οποίος ονομάζεται συντελεστής οπισθοσκέδασης σ_0 . Με τον συντελεστή αυτό προσδιορίζεται η φωτεινότητα του κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας, ενώ 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. Συνεπώς διαφορετικές τιμές των τόνων του γκρι αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα αντικείμενα.

Σμίκρυνση (foreshortening): Το φαινόμενο της σμίκρυνσης (εικόνα 1-13 [a]) αποτελεί κυρίαρχο φαινόμενο στις ορεινές περιοχές. Οι κεκλιμένες επιφάνειες οι οποίες είναι προσανατολισμένες απέναντι από το δέκτη, φαίνονται μικρότερες στην εικόνα SAR από ότι είναι στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα η απόσταση AB είναι πολύ μεγαλύτερη από την προβολή της ίδιας A'B' στην κεκλιμένη απόσταση της SAR εικόνας. Η συμπίεση της κεκλιμένης απόστασης συμβάλλει στη δημιουργία μιας περισσότερο φωτεινής περιοχής A'B', επειδή περιέχει ολόκληρη την ενέργεια που σκεδάζεται από την μεγαλύτερη επιφάνεια AB.



Εικόνα 1.13: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά απεικόνισης SAR.

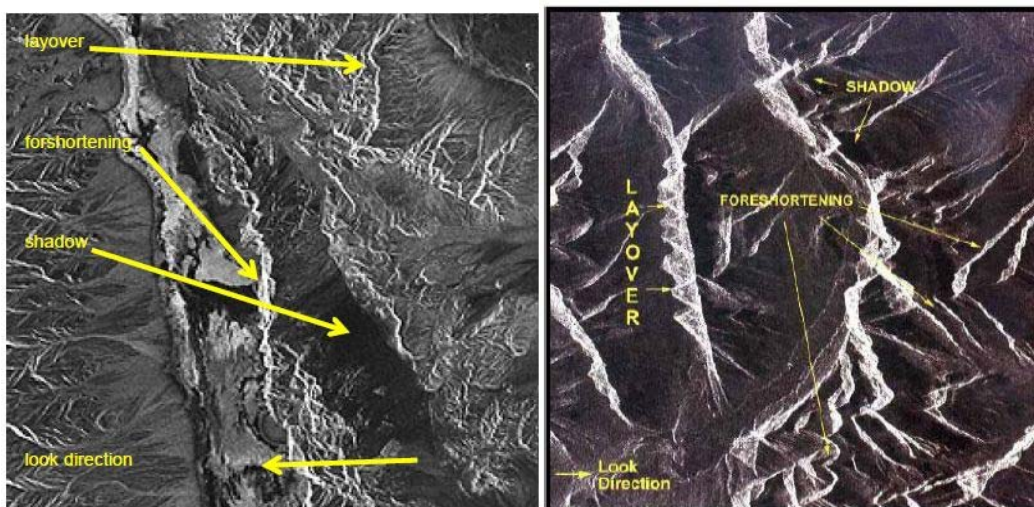
(Πηγή: Brunner, 2009)

Μετατόπιση αναγλύφου (relief displacement): Τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος μετράνε αποστάσεις μεταξύ ενός αντικειμένου και του αισθητήρα. Ως εκ τούτου, αν η κλίση της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης, το επάνω μέρος της κεκλιμένης επιφάνειας μετατοπίζεται στην εικόνα προς τον αισθητήρα, όπως φαίνεται στην εικόνα (1-13 [b]). Ακόμη και στην περίπτωση που το σημείο A βρίσκεται στο έδαφος μπροστά από το υπερυψωμένο σημείο B, η προβολή επί της κεκλιμένης απόστασης της SAR είναι αντεστραμμένη, δηλαδή το σημείο B' είναι κοντύτερα στον αισθητήρα από το σημείο A'.

Πτύχωση (layover): Το φαινόμενο της πτύχωσης σχετίζεται με το φαινόμενο της μετατόπισης του αναγλύφου. Αν μία κλίση είναι περισσότερη απότομη από την ακτίνα του ραντάρ, τμήματα της επιφάνειας του εδάφους, η κεκλιμένη επιφάνεια απέναντι από τον αισθητήρα και τμήματα της κεκλιμένης επιφάνειας που απομακρύνονται από τον αισθητήρα είναι σε ίσες αποστάσεις από την κεραία του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Για αυτόν τον λόγο ο οπισθοσκεδασμός των τμημάτων αυτών στον αισθητήρα την ίδια χρονική στιγμή, προκαλεί το φαινόμενο της πτύχωσης, όπου τα διαφορετικά σήματα δεν μπορούν πλέον να διαχωριστούν. Για παράδειγμα στην εικόνα (1-13 [c]), το κεκλιμένο τμήμα BC είναι περισσότερο απότομο από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας του ραντάρ, με αποτέλεσμα τα

τμήματα AB, BC, CD να βρίσκονται εντός της ίδιας απόστασης από τον αισθητήρα. Για αυτόν τον λόγο ο οπισθοσκεδασμός τους βρίσκεται επί της περιοχής C'B'+A'B'+C'D'.

Σκίαση (shadow): Οι σκιάσεις είναι περιοχές για τις οποίες δεν καταγράφεται οπισθοσκεδασμός στον αισθητήρα, διότι αποκλείονται από την ακτίνα του ραντάρ. Αυτό συμβαίνει όταν επιφάνειες οι οποίες απομακρύνονται από τον αισθητήρα, είναι περισσότερο απότομες από την περιοχή που «φωτίζει» το ραντάρ, όπως φαίνεται στην εικόνα (1-13 [d]). Η περιοχή μεταξύ του τμήματος BD δεν μπορεί να απεικονιστεί από την ακτίνα του ραντάρ, επειδή το τμήμα BC είναι περισσότερο απότομο από την ακτίνα του ραντάρ, προκαλώντας έτσι την περιοχή σκίασης B'D' (Brunner, 2009).



Εικόνα 1.14: Γεωμετρικές Παραμορφώσεις Απεικόνισης SAR.

(Πηγή: Halounova, 2009)

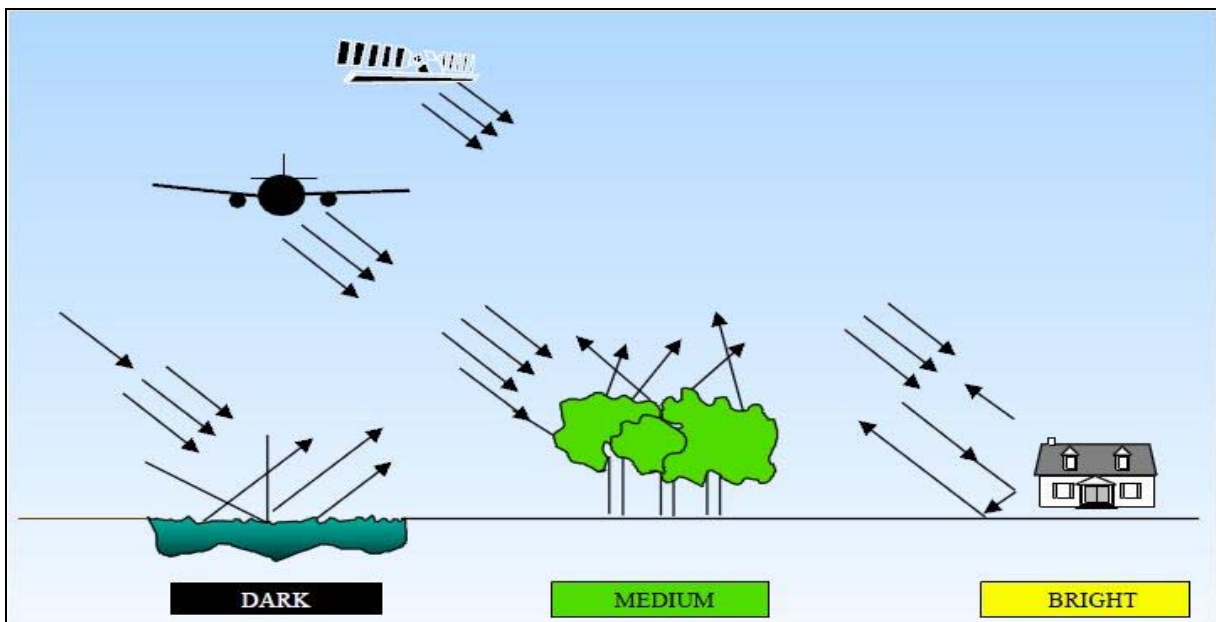
1.4.4.2 Μηχανισμοί Σκέδασης

Οι εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος αντιπροσωπεύουν τον οπισθοσκεδασμό για συγκεκριμένη περιοχή του εδάφους. Οι σκοτεινές περιοχές στην εικόνα αντιπροσωπεύουν χαμηλή οπισθοσκέδαση, ενώ οι φωτεινότερες υψηλή οπισθοσκέδαση. Τα φωτεινά χαρακτηριστικά της εικόνας προέρχονται από μεγαλύτερη αναλογία αντανάκλασης της ενέργειας του ραντάρ πίσω στο ίδιο το ραντάρ, ενώ τα σκοτεινά χαρακτηριστικά προέρχονται από μικρότερη ενέργεια αντανάκλασης.

Η οπισθοσκέδαση μίας περιοχής, σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, ποικίλει εξαιτίας παραγόντων όπως το φυσικό μέγεθος των αντικειμένων που προκαλούν το φαινόμενο της σκέδασης, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων της περιοχής, η περιεκτικότητα σε υγρασία, με τα υγρότερα αντικείμενα να εμφανίζονται φωτεινότερα και τα στεγνά αντικείμενα να εμφανίζονται σκοτεινά. Εξαιρεση αποτελεί μία λεία επιφάνεια νερού, η οποία αντιδρά σαν μία επίπεδη επιφάνεια η οποία η οποία αντανάκλα τους εισερχόμενους παλμούς μακριά από τον στόχο. Οι συγκεκριμένες

επιφάνειες εμφανίζονται με σκοτεινή απόχρωση. Επίσης στοιχεία όπως το μήκος κύματος και η πόλωση των παλμών του ραντάρ καθώς επίσης και οι γωνίες παρατήρησης επιδρούν επίσης στο φαινόμενο της οπισθοσκέδασης.

Ένας πολύ καλός κανόνας στην ανάλυση των εικόνων ραντάρ είναι ότι όσο υψηλότερος ή φωτεινότερος είναι ο οπισθοσκεδασμός στην εικόνα, τόσο πιο σκληρή είναι η επιφάνεια που απεικονίζεται. Επίπεδες επιφάνειες οι οποίες αντανακλούν λίγη ή σχεδόν καθόλου ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, θα εμφανίζονται πάντα σκοτεινές στις εικόνες ραντάρ.



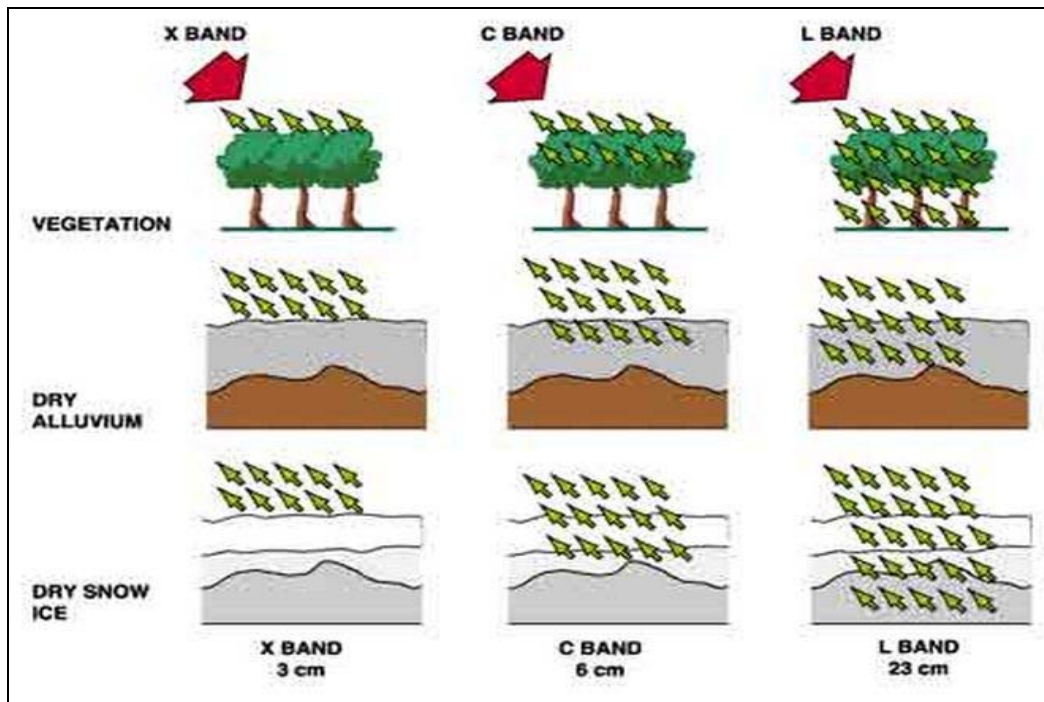
Εικόνα 1.15: Τόνοι του Γκρι Απεικόνισης SAR (Οπισθοσκέδαση).

(Πηγή: Natural Resources Canada, GLOBE SAR)

Η βλάστηση θεωρείται σαν μία σχεδόν σκληρή επιφάνεια στα μήκη κύματος που εκπέμπουν τα περισσότερα ραντάρ και για αυτόν τον λόγο απεικονίζονται με την απόχρωση του γκρι ή μία ελαφριά απόχρωση γκρι στην εικόνα ραντάρ.

Επιφάνειες με κλίση που βρίσκονται απέναντι από το ραντάρ έχουν ισχυρότερη οπισθοσκέδαση από επιφάνειες που απομακρύνονται από αυτό με αποτέλεσμα να απεικονίζονται φωτεινότερες σε μία εικόνα ραντάρ. Στην περίπτωση ενός αστικού τοπίου με οδικές αρτηρίες και κτίρια σε παράταξη, ενδέχεται οι παλμοί του ραντάρ να αναπηδήσουν πάνω στους δρόμους και στη συνέχεια να αναπηδήσουν πάλι στα κτίρια (διπλή αναπήδηση-double bounce) και στη συνέχεια να επιστρέψουν στο ραντάρ, ενώ απεικονίζονται στην εικόνα ραντάρ πολύ φωτεινές (άσπρες). Οι δρόμοι και οι αυτοκινητόδρομοι, επειδή αποτελούν επίπεδες επιφάνειες απεικονίζονται με σκοτεινές αποχρώσεις. Κτίρια τα οποία δεν είναι διατεταγμένα σε κάποιου είδους παράταξη, με αποτέλεσμα οι παλμοί του ραντάρ να αντανακλώνται απευθείας πίσω, απεικονίζονται με ανοιχτή γκρι απόχρωση, όπως πολύ σκληρές επιφάνειες.

Ανάλογα με τη συχνότητα και την πόλωση τα κύματα μπορούν να διεισδύσουν στη βλάστηση και σε ξηρές συνθήκες, μέχρι ένα βαθμό, να διεισδύσουν στο έδαφος (π.χ. χιόνι ή άμμος). Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι και η διείσδυση στο στόχο. Επίσης, τα κύματα πολλαπλής πόλωσης (VH/HV) παρουσιάζουν ένα σημαντικά λιγότερο βαθμό διείσδυσης από τα συν-πολωμένα (HH/VV) ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



Εικόνα 1.16: Διείσδυση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.

(Πηγή: SAR Land Applications Tutorial, esa)

Η οπισθοσκέδαση στα ραντάρ εξαρτάται επίσης και από τις διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου. Έτσι για τα μέταλλα και το νερό η διηλεκτρική σταθερά είναι υψηλή, ενώ για τα υπόλοιπα σχεδόν άλλα υλικά είναι σχετικά χαμηλή. Για τα περισσότερα υλικά, σε ξηρές συνθήκες, η διηλεκτρική σταθερά κυμαίνεται από 3 έως 8, ενώ για το νερό είναι πολύ παραπάνω από 80. Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία των εδαφών ή των επιφανειών με βλάστηση μπορεί να παράγει μία αξιοσημείωτη αύξηση της αντανάκλασης του σήματος του ραντάρ.

Σύμφωνα με το παραπάνω φαινόμενο, τα συστήματα SAR χρησιμοποιούνται επίσης για την ανάκτηση του περιεχομένου υγρασίας του εδάφους και κυρίως για τα γυμνά εδάφη. Η μέτρηση βασίζεται στη μεγάλη αντίθεση μεταξύ των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των ξηρών και υγρών εδαφών. Όσο το έδαφος βρέχεται-υγραίνεται, η διηλεκτρική του σταθερά ποικίλει από 2.5, όταν είναι ξηρό, μέχρι 25 έως 30 σε συνθήκες κορεσμού υγρασίας. Αυτό μεταφράζεται σε αύξηση της ενέργειας αντανάκλασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συμπέρασμα της υγρασίας του εδάφους από το συντελεστή

οπισθοσκέδασης, είναι εφικτό αλλά περιορίζεται στη χρήση πολωτικών και διπλής συχνότητας (C-, L-band) αισθητήρων ραντάρ, προκειμένου να διαχωριστεί η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους και της υγρασίας. (Synthetic Aperture Radar Land Applications Tutorial, Part I Background and Theory, esa).

Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της κάθε επιφάνειας προσδίδουν και ανάλογα χαρακτηριστικά στο φαινόμενο της οπισθοσκέδασης. Έτσι οι αστικές περιοχές προσδίδουν ισχυρή οπισθοσκέδαση, το δάσος ενδιάμεση οπισθοσκέδαση, τα γαλήνια νερά και γενικά οι ομαλές επιφάνειες χαμηλή οπισθοσκέδαση, η θαλασσοταραχή αυξημένη οπισθοσκέδαση λόγω των θυελλωδών ανέμων κτλ. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σ_0 παρέχει πληροφορίες για την εκάστοτε περιοχή την οποία απεικονίζουν κάθε φορά τα ραντάρ, ενώ οι παράμετροι που συμβάλλουν στο μηχανισμό της οπισθοσκέδασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι παράμετροι απεικόνισης των ραντάρ όπως η συχνότητα f , η πόλωση p και η γωνία πρόσπτωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι παράμετροι επιφανείας όπως η τραχύτητα, το γεωμετρικό σχήμα και οι διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου.

Συχνότητα: η συχνότητα της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προσδιορίζει το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη σχετική τραχύτητα της εκάστοτε επιφάνειας. Το βάθος διείσδυσης τείνει να είναι μεγαλύτερο με μεγαλύτερα μήκη κύματος. Στην περίπτωση του δάσους, η ακτινοβολία θα διεισδύσει στα πρώτα φύλλα στην κορυφή του δέντρου με χρήση του καναλιού X ($\lambda = 3\text{cm}$). Στην περίπτωση όμως του καναλιού L ($\lambda = 23\text{cm}$), η ακτινοβολία διεισδύει στα φύλλα και σε μικρά κλαδιά. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση άλλου είδους επιφανειών και στόχων. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι το βάθος διείσδυσης εξαρτάται και από την υγρασία του στόχου (τα μικροκύματα δεν διεισδύουν στο νερό παραπάνω από λίγα χιλιοστά).

Πόλωση: η πόλωση περιγράφει τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου ως συνιστώσα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα απεικονιστικά ραντάρ δύνανται να έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις πόλωσης. Ωστόσο οι γραμμικές διαμορφώσεις πόλωσης οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι HH, VV, HV, VH. Ο πρώτος όρος συσχετίζεται με την πόλωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ενώ ο δεύτερος όρος με την λαμβανόμενη ακτινοβολία. Για παράδειγμα ο συμβολισμός X_{HV} αναφέρεται στο κανάλι X με H να είναι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία και V να είναι η λαμβανόμενη ακτινοβολία. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, η πόλωση παρέχει πληροφορίες στα διαφορετικά επίπεδα ενός στόχου, ενώ το βάθος διείσδυσης του κύματος του ραντάρ ποικίλει με την επιλεγθείσα πόλωση. Η πόλωση παρέχει επίσης πληροφορίες για τη μορφή και τον προσανατολισμό μικρών στοιχείων τα οποία συνθέτουν μία επιφάνεια ή ένα στόχο.

Τραχύτητα: η τραχύτητα σχετίζεται και εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης. Μία επιφάνεια θεωρείται τραχεία αν η δομή της έχει διαστάσεις που

είναι συγκρίσιμες με το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Σύμφωνα με το κριτήριο του Rayleigh, μία επιφάνεια θεωρείται ομαλή αν:

$$\lambda < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (1.19)$$

ενώ θεωρείται τραχεία αν:

$$\lambda > \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (1.20)$$

όπου:

h είναι το μέσο ύψος των επιφανειακών διαφοροποιήσεων

λ είναι το μήκος κύματος και

θ είναι η γωνία πρόσπτωσης.

Ένα παράδειγμα της τραχύτητας της επιφανείας μπορεί να παρατηρηθεί στις ζώνες επαφής μεταξύ εδάφους και νερών. Το νερό που βρίσκεται στην ενδοχώρα τείνει να είναι σχετικά ομαλό ως επιφάνεια και η περισσότερη από την ενέργειά αντανακλάται μακριά από το ραντάρ. Αντιθέτως το έδαφος τείνει να έχει υψηλότερη τραχύτητα. Τα νερά απεικονίζονται γενικά με σκούρο τόνο στις εικόνες ραντάρ, εκτός από την περίπτωση ισχυρών ανέμων ή ρευμάτων τα οποία αυξάνουν την τραχύτητα της επιφανείας του νερού με αποτέλεσμα να προκαλείται υψηλή οπισθοσκέδαση (σκέδαση Bragg).

Στην περιοχή των μικροκυμάτων, αυτή η διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων ιδιοτήτων της γης και του νερού μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμη για εφαρμογές όπως υπολογισμός της έκτασης της πλημμύρας ή της διάβρωσης των παράκτιων ζωνών.

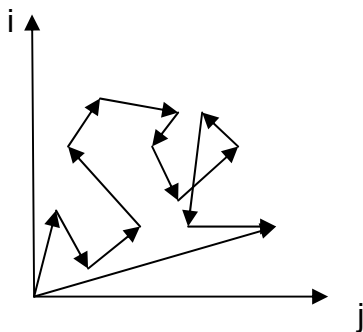
Γωνία Πρόσπτωσης: η γωνία πρόσπτωσης ορίζεται από τη γωνία μεταξύ της καθέτου στην απεικονιζόμενη επιφάνεια και της κατεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τους περισσότερους φυσικούς στόχους ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Πειραματικές μελέτες διεξήχθησαν από τους Ulaby et al. (1978), χρησιμοποιώντας πέντε διαφορετικά είδη εδαφών με διαφορετική τραχύτητα αλλά με παρόμοια περιεκτικότητα σε υγρασία. Διαπιστώθηκε πως με χρήση του καναλιού L (1.1 GHz), η οπισθοσκέδαση των ομαλών δειγμάτων ήταν πολύ ευαίσθητη στις γωνίες πρόσπτωσης κοντά στο ναδίρ. Στην περίπτωση των περισσότερο τραχειών δειγμάτων, η οπισθοσκέδαση ήταν σχεδόν ανεξάρτητη από την επιλεγείσα γωνία πρόσπτωσης.

Υγρασία: η περίπλοκη διηλεκτρική σταθερά αποτελεί ένα μέτρο των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών υλικών. Αποτελείται από δύο μέρη (τη διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα), τα οποία και τα δύο είναι υψηλά εξαρτώμενα από την περιεκτικότητα της υγρασίας των εκάστοτε υλικών. Στην μικροκυματική περιοχή, τα περισσότερα φυσικά υλικά έχουν διηλεκτρική σταθερά η οποία κυμαίνεται από 3 έως

8, σε ξηρές συνθήκες. Το νερό παρουσιάζει υψηλή διηλεκτρική σταθερά (80), τουλάχιστον 10 φορές περισσότερο από το ξηρό έδαφος. Έτσι μία αλλαγή στην περιεκτικότητα της υγρασίας προκαλεί σημαντικές αλλαγές στις διηλεκτρικές ιδιότητες των φυσικών υλικών. Αύξηση στην περιεκτικότητα της υγρασίας σχετίζεται με αυξημένη ανακλαστικότητα στο ραντάρ. Η διείσδυση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα αντικείμενο αποτελεί μία αντίστροφη συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό. Στην περίπτωση της βλάστησης, το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από την υγρασία, την πυκνότητα για τη γεωμετρική δομή των φυτών (φύλλα, κλαδιά) (<http://earth.esa.int>).

1.4.4.3 Θόρυβος - Στίγματα

Τα στίγματα (speckle), αποτελούν ένα είδος θορύβου, το οποίο παράγεται από συνδεδεμένα συστήματα όπως τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος και τα συστήματα λέιζερ (η ακτινοβολία του ήλιου δεν ανήκει σε συνδεδεμένο σύστημα). Παρουσιάζεται ως μία τυχαία δομή εικονοστοιχείων, η οποία προκαλείται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που σκεδάζονται από τις διάφορες επιφάνειες ή τα αντικείμενα. Κάθε στόχος ή επιφάνεια συνεισφέρει στην οπισθοσκέδαση της ενέργειας η οποία δημιουργείται από το άθροισμα όλων των υπαρχόντων σκεδάσεων μετά από μία τυχαία διαδρομή όπως φαίνεται στην εικόνα 1-17.



Εικόνα 1.17: Τυχαία Διαδρομή.

(Πηγή: SAR Land Applications Tutorial, esa)

Το συγκεκριμένο άθροισμα μπορεί να είναι είτε υψηλό είτε χαμηλό και εξαρτάται από την όλη διαδικασία της οπισθοσκέδασης κατά την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με στόχο ή επιφάνεια. Αυτή στατιστική διακύμανση (απόκλιση), ή αβεβαιότητα, σχετίζεται με την φωτεινότητα κάθε εικονοστοιχείου στην απεικόνιση του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος.

Κατά τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων του ραντάρ σε πραγματική εικόνα, ο θόρυβος εξακολουθεί να υπάρχει, αλλά μπορεί στη συνέχεια να μειωθεί με τη βοήθεια προχωρημένων διαδικασιών αποκατάστασης της εικόνας (φιλτράρισμα θορύβου). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο θόρυβος – στίγμα αποτελεί μία πραγματική ηλεκτρομαγνητική μέτρηση και αποτελεί αντικείμενο εκμετάλλευσης στη συμβολομετρία των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR).

Ένα καλά αποδεκτό μοντέλο για την περιγραφή – ανάπτυξη του θορύβου είναι η πολλαπλασιαστική τυχαία συνάρτηση F (multiplicative fading random process F), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$I = R_F \quad (1.21)$$

Όπου I είναι η παρατηρούμενη ένταση (παρατηρούμενος θόρυβος από ανακλαστικότητα), R είναι η τυχαία διαδικασία ανακλαστικότητας του ραντάρ (ανακλαστικότητα χωρίς θόρυβο).

Το πρώτο βήμα για το φιλτράρισμα του θορύβου αποτελεί να διαπιστωθεί αν ο θόρυβος αναπτύσσεται στη γειτονιά του υπό εξέταση εικονοστοιχείου. Αν ισχύει αυτό τότε υπολογίζεται η ανακλαστικότητα του ραντάρ ως συνάρτηση της παρατηρούμενης έντασης, βασιζόμενη σε μερικά τοπικά στατιστικά στοιχεία και σε μία *a priori* γνώση της υπό εξέταση σκηνής. Προκειμένου να υλοποιηθεί σωστά ο θόρυβος απαιτείται η εφαρμογή και χρήση μεγάλων παραθύρων. Αντίθετα, απαιτείται καλή διατήρηση της χωρικής ανάλυσης προκειμένου να μην αλλοιωθούν λεπτά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες της εικόνας όπως χαρακτηριστικά δομής ή υφής.

Στις εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, ενδέχεται να αναπτυχθεί θόρυβος εν μέρει σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως π.χ. αστική περιοχή. Στην ακραία περίπτωση μεμονωμένου στόχου, οι διακυμάνσεις της έντασης κυριαρχούνται από μία ντετερμινιστική συνάρτηση η οποία δεν πρέπει να επηρεάζεται από τη διαδικασία φιλτραρίσματος του θορύβου. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις προτιμάται εφαρμογή μικρότερων παραθύρων.

Η διαδικασία φιλτραρίσματος του θορύβου αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ της απομάκρυνσης του θορύβου και τη διατήρηση λεπτομερειών και χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος (χωρική ανάλυση). Τα λεγόμενα προσαρμοστικά φίλτρα τα οποία εφαρμόζονται σε κατάλληλες περιοχές και μοντέλα θορύβου, είναι τα περισσότερο κατάλληλα για εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος υψηλής χωρικής ανάλυσης και όταν ο θόρυβος δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως. Σε γενικές γραμμές, τέτοια φίλτρα είναι όλα προσαρμοστικά ως μία συνάρτηση του τοπικού συντελεστή απόκλισης και μπορούν να ενισχυθούν με τον καθορισμό ελάχιστης τιμής για την καλύτερη εξομάλυνση του θορύβου και για ένα ανώτερο όριο διατήρησης της υφής ή ενός σημειακού στόχου. Ο συντελεστής απόκλισης (π.χ. μέση/τυπική απόκλιση), αποτελεί έναν καλό δείκτη της παρουσίας ετερογένειας εντός ενός παραθύρου. Μπορεί να υιοθετηθεί όταν είναι παρούσα μόνο ισοτροπική μορφή υφής και ενδέχεται να βοηθηθεί από συντελεστές αναλογίας για ανισοτρόπως προσανατολισμένα χαρακτηριστικά υφής.

Τα ενισχυμένα φίλτρα θορύβου, περιέχουν επίσης τη δυνατότητα, ο συντελεστής απόκλισης να μπορεί να βοηθηθεί από γεωμετρικούς ανιχνευτές και ότι ο ανιχνευτής αναλογίας επεκτείνεται στην ανίχνευση γραμμικών χαρακτηριστικών και

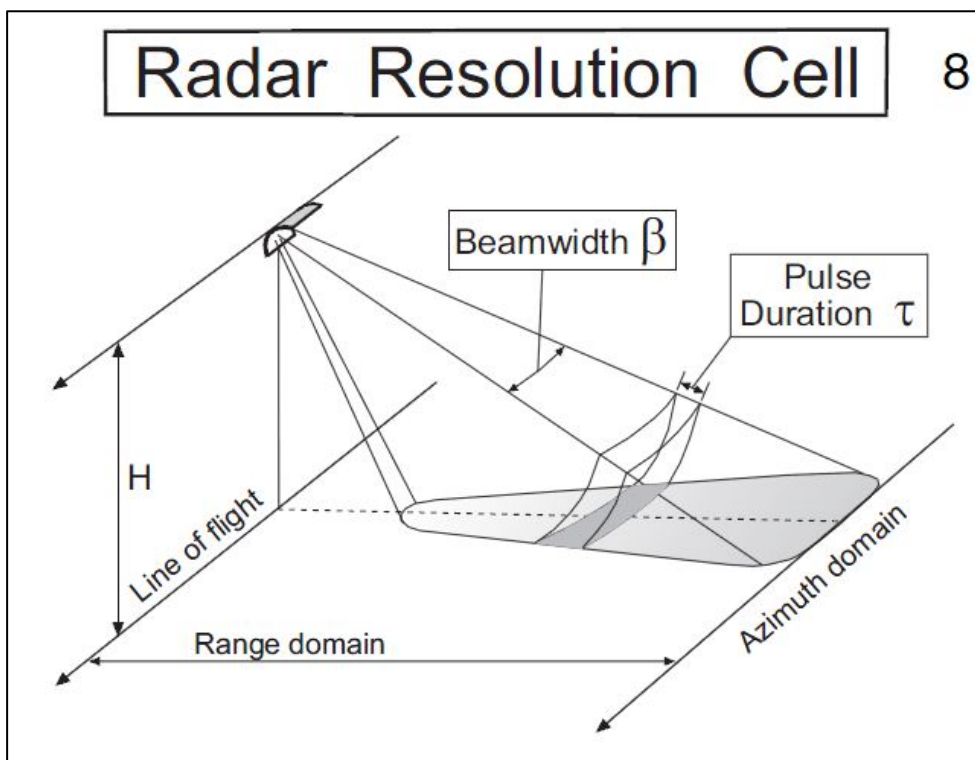
απομονωμένων σκεδαστών (Synthetic Aperture Radar Land Applications Tutorial, Part I Background and Theory, esa).

1.4.5 Διακριτική Ικανότητα

Η χωρική ανάλυση των ραντάρ εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και ειδικότερα το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της εικόνας του ραντάρ εξαρτάται από:

- τη διάρκεια του παλμού
- την απόσταση επί εδάφους
- το εύρος της δέσμης

Η διάρκεια του παλμού και η απόσταση επί του εδάφους ορίζουν τη χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση της εκπεμπόμενης ενέργειας, η οποία ονομάζεται διακριτική ικανότητα αποστάσεων. Το εύρος της δέσμης ορίζει τη χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση της πτήσης, η οποία ονομάζεται διακριτική ικανότητα αζιμουθίων.

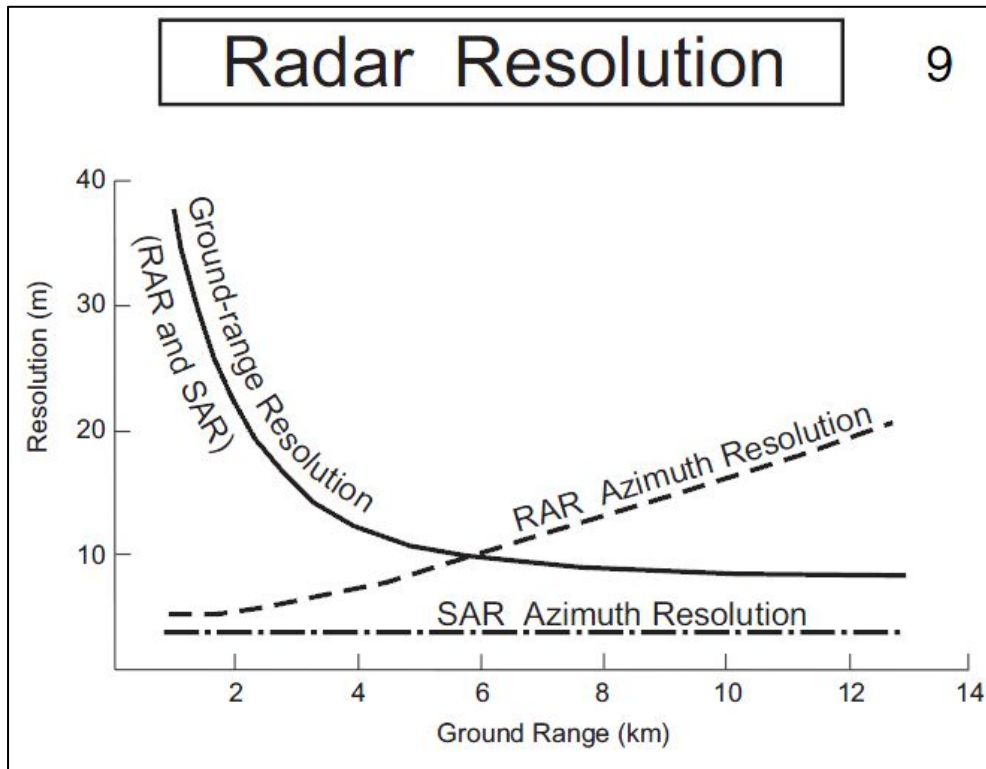


Εικόνα 1.18: Διακριτική Ικανότητα του Εικονοστοιχείου του Ραντάρ.

(Πηγή: Introduction To Microwave Remote Sensing, David P. Lusch, 1999)

Στην εικόνα 1-18 οι δύο διαστάσεις της εικόνας ραντάρ ορίζονται από τη διεύθυνση των αποστάσεων που είναι κάθετη στην τροχιά πτήσης και από τη διεύθυνση του αζιμουθίου που είναι παράλληλη με την τροχιά πτήσης. Οι διαστάσεις του εικονοστοιχείου της ραντάρ εικόνας εξαρτώνται από τη διάρκεια του παλμού και το

αζιμουθιακό εύρος δέσμης. Δεδομένου ότι το εύρος της δέσμης αποκλίνει με αυξανόμενη τάση όλο και περισσότερο, το ίδιο κάνει και το απεικονιζόμενο αποτύπωμα. Από την άλλη πλευρά η διάρκεια του παλμού είναι σταθερή σε όλο το πλάτος της λωρίδας. Η διακριτική ικανότητα απόστασης είναι είτε σταθερή (πλάγια ή κεκλιμένη διακριτική ικανότητα απόστασης) είτε αντιστρόφως εξαρτάται από την απόσταση (διακριτική ικανότητα απόστασης). Η αζιμουθιακή διακριτική ικανότητα είναι ανάλογη της απόστασης για τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος και σταθερή για τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (εικόνα 1-19) (Lusch, 1999).



Εικόνα 1.19: Διακριτική Ικανότητα του Ραντάρ.

(Πηγή: Introduction To Microwave Remote Sensing, David P. Lusch, 1999)

1.4.5.1 Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις στον τομέα της απόστασης. Η κεκλιμένη ή πλάγια απόσταση αναφέρεται στη γραμμή οπτικής επαφής της ακτίνας μεταξύ της κεραίας του ραντάρ και μίας θέσης στον τομέα της απόστασης. Στη περίπτωση των κεκλιμένων ή πλάγιων αποστάσεων, η διακριτική ικανότητα αποστάσεων είναι σταθερή και εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια του παλμού, τόσο μικρότερο είναι το ενεργειακό πακέτο εκπομπής (κατά τον άξονα της απόστασης) και τόσο μικρότερη είναι η διακριτική ικανότητα της κεκλιμένης ή πλάγιας απόστασης (εικόνα 1-20).

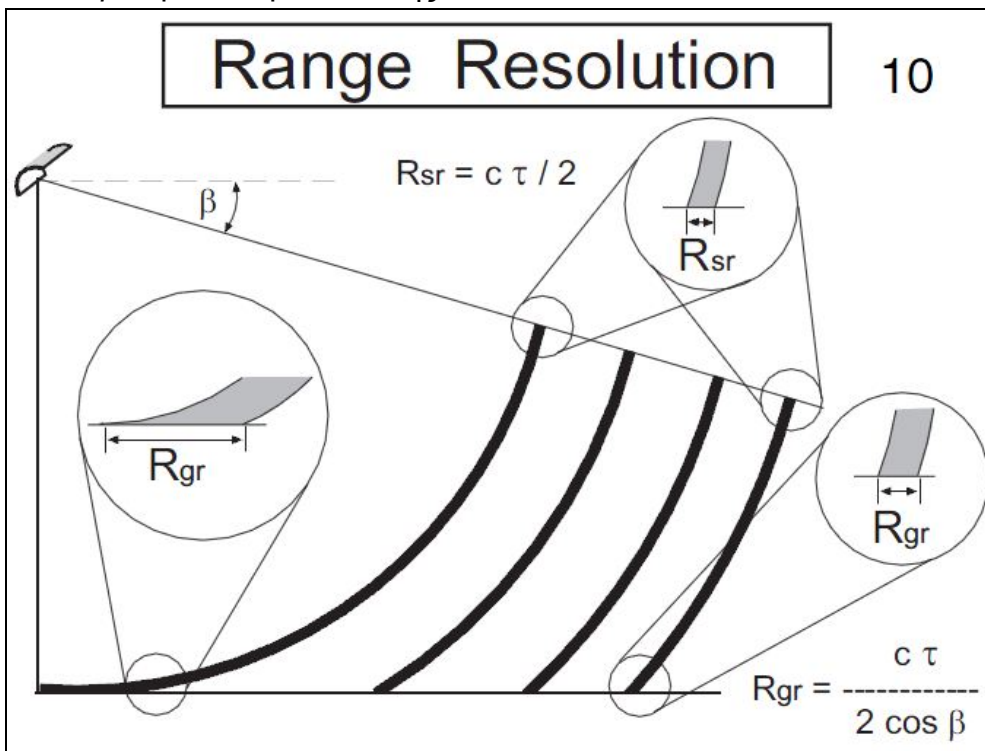
Η διακριτική ικανότητα της απόστασης είναι μία συνάρτηση της διάρκειας του παλμού αλλά σχετίζεται επίσης αντίστροφα και με την απόσταση επί του εδάφους. Η διακριτική ικανότητα της απόστασης επί του εδάφους είναι χειρότερη στις

Κοντινότερες αποστάσεις και καλύτερη στις περισσότερο απομακρυσμένες αποστάσεις (εικόνες 1-19 & 1-20).

Η γωνία β σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θέση της επίγειας απόστασης. Μία τιμή της γωνίας β απεικονίζει την κοντινή περιοχή της απόστασης στη λωρίδα, ενώ μεγάλες τιμές της γωνίας β ακτινοβολούν τις μακρινές περιοχές της απόστασης. Η γωνία β και η διακριτική ικανότητα της απόστασης σχετίζονται με την εξίσωση 1-22 (David P. Lusch, 1999):

$$R_{GR} = \frac{c\tau}{2 \cos \beta} \tag{1.22}$$

Όπου τ = η διάρκεια του παλμού
 $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
 β = γωνία πρόσπτωσης



Εικόνα 1.20: Διακριτική Ικανότητα Αποστάσεων.

(Πηγή: Introduction To Microwave Remote Sensing, David P. Lusch, 1999)

1.4.5.2 Διακριτική Ικανότητα Αζιμουθίων

Όπως δίδεται από τον Raney (1998), η εξίσωση για τη μέγιστη δυνατή διακριτική ικανότητα αζιμουθίου για ένα σύστημα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\alpha(SAR)} = \frac{V_D D_A}{V_{SC}^2} \tag{1.23}$$

Όπου:

- $R_{a(SAR)}$ = διακριτική ικανότητα αζιμουθίου
- V_B = αναλογία του ίχνους κίνησης της κεραίας στην απεικονιζόμενη επιφάνεια
- V_{SC} = ταχύτητα του δέκτη SAR
- D_A = μέγεθος της κεραίας (μήκος) κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου

Για συστήματα SAR τα οποία βρίσκονται επί αεροσκαφών η σχέση (1.23) απλοποιείται και γίνεται:

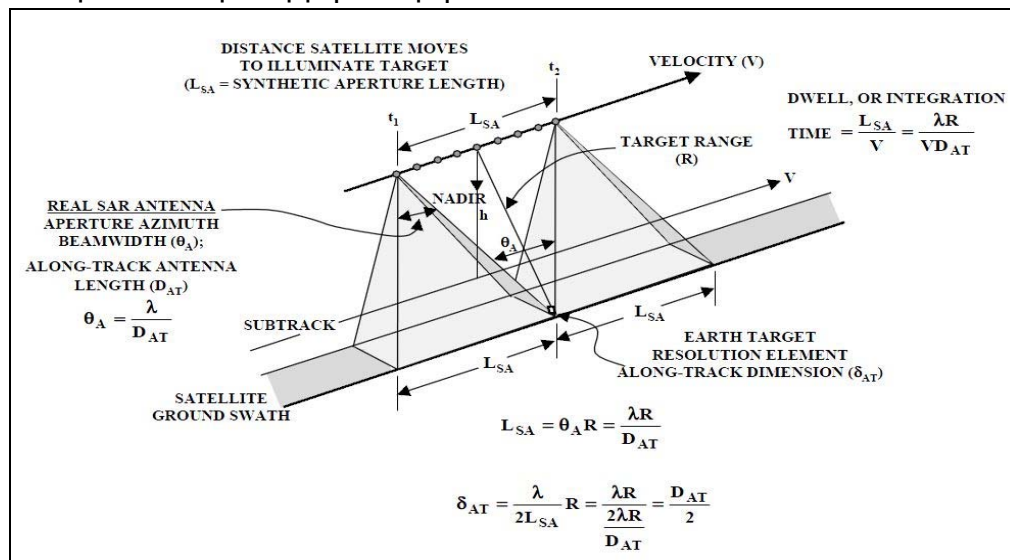
$$R_a(SAR) = \frac{D_A}{2} \tag{1.24}$$

Μελετώντας τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνεται ότι (Lusch, 1999):

- Η διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου είναι ανεξάρτητη της απόστασης και είναι σταθερή σε όλο το μήκος της λωρίδας.
- Μικρότερες κεραίες SAR παράγουν καλύτερη διακριτική ανάλυση κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Το αντίθετο συμβαίνει στα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος.
- Όταν η αναλογία $\frac{V_B}{V_{SC}}$ είναι μικρή, τότε η διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου ενός διαστημικού SAR δέκτη είναι καλύτερη από την αντίστοιχη ενός συστήματος SAR επί αεροσκάφους.

1.4.6 Επεξεργασία Πρωτογενών Δεδομένων SAR

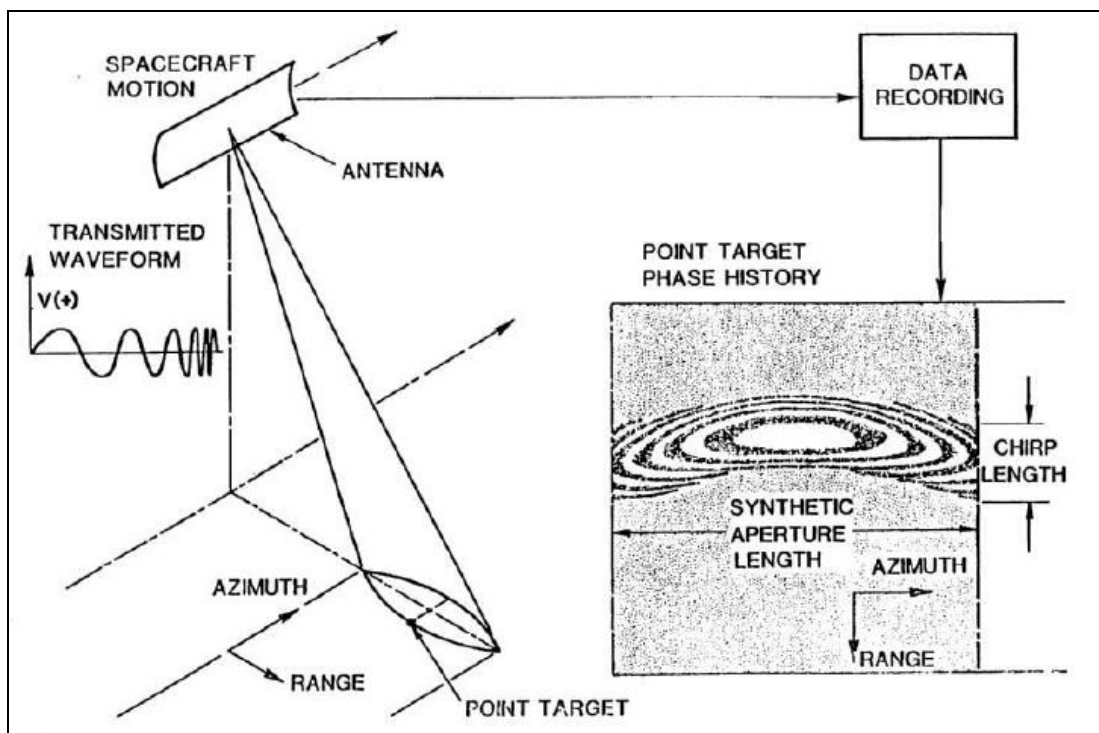
Σε έναν επεξεργαστή του σήματος των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος υπάρχουν συγκεκριμένες λειτουργίες οι οποίες απαιτούνται για τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε μία ερμηνεύσιμη εικόνα.



Εικόνα 1.21: Βασικές Αρχές των Ραντάρ.

(Πηγή: SAR Marine User's Manual, McCandless et al, 2005.)

Τα πρωτογενή δεδομένα των SAR δεν αποτελούν εικόνα, διότι οι σημειακοί στόχοι απλώνονται σε ένα εύρος (εξαιτίας της μεγάλης συχνότητας του κωδικοποιημένου παλμού), και στη διάσταση της κατά μήκος τροχιάς (εξαιτίας της πραγματικής ακτίνας που κινείται δια μέσου του σημειακού στόχου για τη διάρκεια του χρόνου παραμονής), όπως φαίνεται στην εικόνα 1-21. Στην εικόνα 1-22 απεικονίζεται το ίχνος των πρωτογενών δεδομένων ενός τυπικού σημειακού στόχου καθώς η δέσμη κινείται κατά μήκος της τροχιάς ή κατά μήκος της κατεύθυνσης του αζιμουθίου. Καθώς το ραντάρ κινείται, η απόσταση μεταξύ ραντάρ – στόχου ποικίλει, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα επικαμπύλιο ίχνος. Δηλαδή δημιουργείται κατά μήκος της τροχιάς ένα ίχνος συχνότητας/χρόνου κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, που προκαλείται από το Doppler, και το εύρος των κωδικοποιημένων παλμών παράγει ένα κάπως παρόμοιο ίχνος χρόνου/συχνότητας κατά τη διεύθυνση της απόστασης.



Εικόνα 1.22: Η Επιστροφή του Σημειακού Στόχου.

(Πηγή: SAR Marine User's Manual, McCandless et al, 2005.)

Στη συνέχεια ο επεξεργαστής σήματος του SAR συμπιέζει τη διαδιδόμενη πληροφορία του στόχου σε δύο διαστάσεις (στη διεύθυνση της απόστασης και κατά μήκος της τροχιάς), προκειμένου να δημιουργηθεί η εικόνα. Η πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης διαδικασίας αποκαλύπτεται στην εικόνα 1-23. Η εικόνα 1-23α, αποτελεί παράδειγμα καταγραφής πρωτογενών δεδομένων εικόνας, τα οποία καταγράφονται από ένα σύστημα SAR. Όλα τα σημείο - στόχοι που υπάρχουν στην δέσμη ακτίνας σε κάθε παλμό έχουν επιβληθεί και δημιουργήσει ένα περίπλοκο σχέδιο που δεν είναι δυνατόν να ερμηνευτεί προκειμένου να αναγνωριστούν στόχοι

ενδιαφέροντος. Τη συγκεκριμένη κατάσταση καλείται να διευκρινίσει ο επεξεργαστής του συστήματος SAR, προκειμένου να δημιουργηθεί η εικόνα της απεικονιζόμενης επιφάνειας. Βέβαια μαζί με τα πρωτογενή δεδομένα είναι ενσωματωμένες διάφορες παραμορφώσεις και διαταραχές. Τέτοια παραδείγματα προκαλούνται από την περιστροφή της γης την περίοδο λήψης, από την τροχιά του συστήματος ραντάρ, το θόρυβο που εισάγεται, το ανάγλυφο κτλ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πρέπει να εκτελεστούν πολλές και περίπλοκες διαδικασίες και επεξεργασίες πριν τη μορφοποίηση της εικόνας, όπως διόρθωση της πλατφόρμας για τις αποκλίσεις κατά roll, pitch, yaw και την κίνηση του στόχου κατά τη διάρκεια του χρόνου παραμονής του ραντάρ/στόχου.



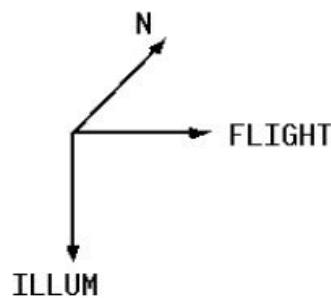
(α)



(β)



(γ)



(Στην εικόνα 1-23α παρουσιάζεται το πλάτος επιστροφής του ραντάρ. Η ενέργεια του ραντάρ απλώνεται κατά τη διεύθυνση της απόστασης (~10 microsecond ή 3 km) και κατά τη διεύθυνση του

αζιμουθίου (~1.6 km), με αποτέλεσμα να καλύπτεται μία περιοχή έκτασης περίπου 4.8 km². Στην εικόνα 1-23β παρουσιάζεται το πλάτος της εικόνας μετά τη συμπίεση κατά τη διεύθυνση της απόστασης και στην εικόνα 1-23γ παρουσιάζεται μία πλήρως επεξεργασμένη εικόνα ραντάρ μετά τη συμπίεση κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου.)

Εικόνα 1.23: Εικόνες SIR-C (L-band, HH) και τα βήματα επεξεργασίας μέχρι την τελική μορφοποίηση της εικόνας.

(Πηγή: SAR Marine User's Manual, McCandless et al.)

Οι συγκεκριμένες ανωμαλίες – παραμορφώσεις στην εικόνα ραντάρ δύνανται να

απομακρυνθούν με τη βοήθεια επαναληπτικών διαδικασιών οι οποίες περιλαμβάνουν διορθώσεις θέσης και τροχιάς, αποσαφήνιση του εύρους της καμπυλότητας με χρήση διορθωτικών αλγορίθμων και την επιλογή από ένα μεγάλο εύρος εφαρμόσιμων τεχνικών αυτόματης εστίασης. Τα ανεπτυγμένα συστήματα SAR όπως π.χ. ERS-1, ERS-2, ALMAZ, RADARSAT-2 κ.α., κανονικοποιούν τις επιδράσεις της γης με την εφαρμογή μερικών μοιρών (± 3 μοίρες κατά τη διάρκεια μίας τυπικής τροχιάς 90 λεπτών) της προγραμματισμένης εκτροπής διεύθυνσης με την θέση της τροχιάς της πλατφόρμας του δορυφόρου. Αντικειμενικός σκοπός είναι να κατευθύνει την δέσμη της κεραίας προκειμένου να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα του ίχνους του δορυφόρου επί του εδάφους. Όπως προαναφέρθηκε στις εικόνες 1-23β & γ, παρουσιάζονται τα ενδιάμεσα βήματα μετά τη συμπίεση πρώτα κατά τη διεύθυνση της απόστασης και μετά κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου (κατά μήκος της πτήσης). Σε όλη αυτήν τη διαδικασία ενσωματώνονται όλες οι περίπλοκες διορθώσεις που προαναφέρθηκαν.

Μία από τις τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την μορφοποίηση των εικόνων SAR είναι η τεχνική εκτίμησης του φάσματος Fourier, κοινώς γνωστή ως “Fast Fourier Transform”. Συνοψίζοντας, η μορφοποίηση της εικόνας του ραντάρ απαιτεί πολλές διαδικασίες επεξεργασίας του σήματος των επιστροφών φάσης του ραντάρ. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί, θεωρώντας ένα σύστημα SAR συλλογής μονο-κάναλων δεδομένων για ένα εύρος πλάτους της εικόνας 100km, το οποίο κινείται με μία ταχύτητα συλλογής 7.600 m/sec και ότι μπορεί να δημιουργήσει μία εικόνα ραντάρ μετά την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, της τάξης των 10m κατά τη διεύθυνση της απόστασης και των 10m κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου, ότι το σύστημα SAR συλλέγει πάνω από 7.000.000 εικονοστοιχεία και ότι ο επεξεργαστής της εικόνας απαιτεί περισσότερο από 1000 λειτουργίες/εικονοστοιχείο προκειμένου να παραχθεί η εικόνα. Ένας πραγματικός επεξεργαστής πρέπει να έχει τις δυνατότητες να εκτελέσει περίπου 10^9 λειτουργίες/sec, για τη μορφοποίηση της εικόνας (McCandless et al, 2005).

Η επεξεργασία των εικόνων SAR αποτελεί μία διαδικασία με σκοπό την αναδόμηση της εικόνας που φωτίζεται από το ραντάρ, από τους παλμούς που ανακλάστηκαν από κάθε μεμονωμένο στόχο, ελήφθησαν από την κεραία του δέκτη και καταχωρήθηκαν στην μνήμη ή μεταδόθηκαν σε ένα επίγειο κέντρο επεξεργασίας δεδομένων.

1.5 Ανακεφαλαίωση

Ανακεφαλαιώνοντας, στο τρέχον κεφάλαιο, αρχικά έγινε μία ιστορική ανασκόπηση των συστημάτων ραντάρ, παρουσιάζοντας την εξέλιξη τους στο πέρασμα των χρόνων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία γενική περιγραφή των ραντάρ πραγματικού και συνθετικού ανοίγματος. Αναπτύχθηκαν οι βασικές εξισώσεις και περιγράφηκαν τα βασικά φαινόμενα που διέπουν τα συστήματα ραντάρ. Τέλος παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (γεωμετρικές παραμορφώσεις, μηχανισμοί σκέδασης, θόρυβος) και έγινε αναφορά

στη διακριτική ικανότητα συγκεκριμένων συστημάτων, αλλά και στην επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2), περιγράφονται και αναλύονται τα χαρακτηριστικά και δυνατότητες του δορυφορικού συστήματος TerraSAR – X.

2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ TerraSAR – X

2.1 Εισαγωγή

Το δορυφορικό σύστημα TerraSAR – X αποτελεί ένα εμπορικό ραντάρ συνθετικού ανοίγματος γερμανικής προελεύσεως, το οποίο εκτοξεύτηκε τον Ιούνιο 2007 και με προγραμματισμένη διάρκεια ζωής 5 ετών. Ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου δορυφορικού συστήματος βασίστηκε στην τεχνογνωσία και εμπειρία η οποία αποκτήθηκε στις αποστολές των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος SIR – C/X-SAR (1994) και SRTM (2000). Το σύστημα φέρει αισθητήρα X – band υψηλής συχνότητας και δύναται να λειτουργήσει με πολλαπλές τεχνικές απεικόνισης, προκειμένου να αντιμετωπίσει απαιτήσεις πολλών και εξειδικευμένων εφαρμογών.

Η αποστολή TerraSAR - X βασίζεται σε σύμβαση δημοσίου και ιδιωτικού δικαίου μεταξύ του γερμανικού υπουργείου εκπαίδευσης και επιστημών το οποίο αντιπροσωπεύεται από το γερμανικό κέντρο αεροδιαστημικής βιομηχανίας DLR και της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Εταιρίας EADS Astrium GmbH.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αναλύονται στον πίνακα 2-1:

TerraSAR-X Technical Facts	
Operational life	5 years
Orbit	Sun-synchronous repeat orbit
Repeat period	11 days
Equatorial crossing time (GMT)	18:00h ascending pass (± 0.25h) 06:00h descending pass (± 0.25h)
Inclination	97.44°
Altitude at the equator	514 km (319.8 miles)
Antenna type	Active Phases Array Antenna, electronically separable
Antenna size	4.78 m x 0.7 m (15,7 feet x 2,3 feet)
Center Frequency	9.65 GHz (X band)
Chirp bandwidth	150 MHz / 300 MHz
Nominal acquisition direction	Right side
Polarization	Single, dual - depending on imaging mode quadruple is available as advanced polarization mode

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά TerraSAR – X.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

Τον Ιούνιο 2012 ο TerraSAR – X, ουσιαστικά συμπληρώθηκε σε τροχιά από τον δίδυμο δορυφόρο TanDEM – X, για την απόκτηση δεδομένων πανομοιότυπων παραμέτρων και σταθερότητας.

2.2 Τεχνικές Απεικόνισης (Image Modes)

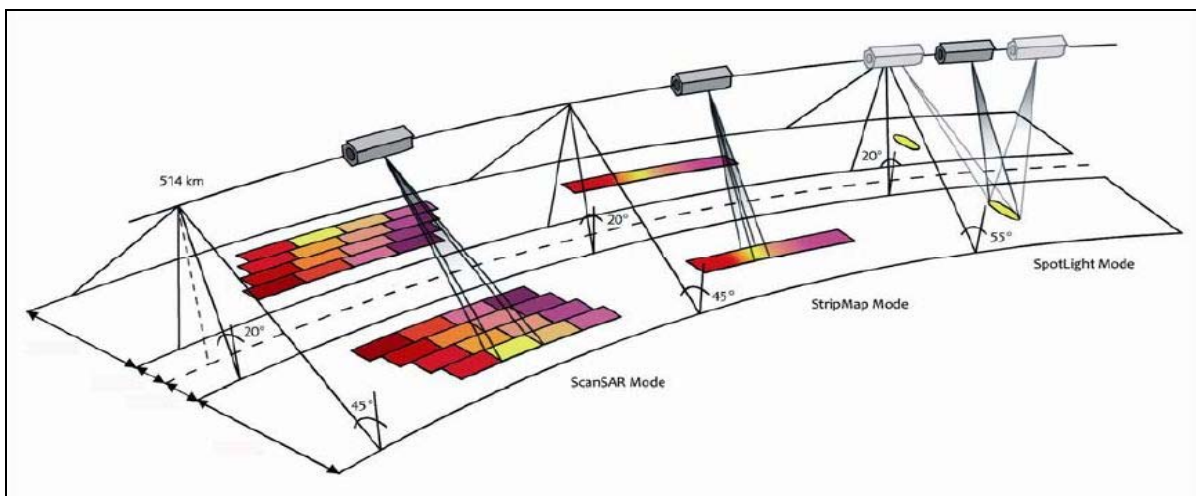
Ο συγχρονισμός του αισθητήρα καθώς και οι δυνατότητες στόχευσης της ηλεκτρονικής κεραίας δύνανται να προγραμματιστούν επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την δημιουργία ενός αριθμού συνδυασμού τεχνικών απεικόνισης. Συνολικά σχεδιάστηκαν τέσσερις τεχνικές απεικόνισης προκειμένου να υποστηρίξουν μία ποικιλία εφαρμογών από εικόνες μεσαίας έως υψηλής ανάλυσης. Εξαιτίας της μικρής κεραίας το σύστημα δύναται να επιτύχει υψηλή αζιμουθιακή ανάλυση. Ως εκ τούτου η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF), πρέπει να είναι υψηλή, κάτι όμως που περιορίζει το μέγιστο πλάτος της λωρίδας (TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009).

Οι ακόλουθες τεχνικές απεικόνισης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των βασικών προϊόντων:

- Stripmap mode SM σε μονή ή διπλή πόλωση
- High Resolution Spotlight mode HS σε μονή ή διπλή πόλωση
- Spotlight mode SL σε μονή ή διπλή πόλωση
- ScanSAR mode SC σε μονή πόλωση

2.2.1 Standard Operational Mode

Η συγκεκριμένη τεχνική απεικόνισης υλοποιείται με τη μονή κεραία λήψης με τη βοήθεια της οποίας δύνανται να ληφθούν οι τεχνικές απεικόνισης HighResolution SpotLight και SpotLight, StripMap και ScanSAR. Σε αυτές τις τεχνικές απεικόνισης χρησιμοποιείται ένα εύρος συχνοτήτων αποδιαμόρφωσης έως 300 MHz.

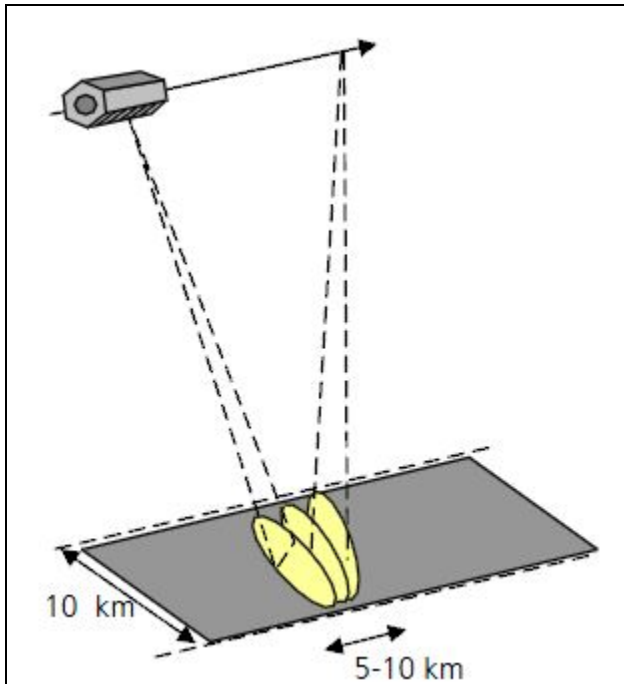


Εικόνα 2.1: Τεχνικές Απεικόνισης TerraSAR - X .

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.2.2 SpotLight Mode (SL)

Η συγκεκριμένη τεχνική απεικόνισης χρησιμοποιεί ακτίνα δέσμης σε σειρά η οποία έχει την κατεύθυνση του αζιμουθίου προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος φωτισμού. Αυτό όμως οδηγεί σε έναν περιορισμό στην παραγωγή της εικόνας, δηλαδή στο μέγεθος της σκηνής, που είναι 10 km x 10 km για την απεικόνιση SpotLight και 10 km x 5 km (πλάτος x μήκος) για την απεικόνιση HighResolution SpotLight (HS).



Εικόνα 2.2: SpotLight Mode (SL) .

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Αυτός ο εκλεπτυσμένος τρόπος απεικόνισης καθιστά εφικτή την λήψη δεδομένων με ανάλυση έως 1 m στην απεικόνιση HighResolution SpotLight (HS) (για λήψη με εύρος δέσμης 300 MHz) και 2 m στην απεικόνιση standard SpotLight.

Στη συγκεκριμένη τεχνική απεικόνισης το σύστημα δύναται να λάβει και εικόνες υψηλής ανάλυσης High Resolution Spotlight (HS), με χωρική ανάλυση αζιμουθίου 1.1 m και μέγεθος σκηνής στην κατεύθυνση του αζιμουθίου 5 km. Τα χαρακτηριστικά της αναλύονται παρακάτω στον πίνακα 2-2.

Ο TerraSAR – X δύναται να λειτουργήσει και πειραματικά στα 300 MHz αντί της τυπικής τιμής των 150 MHz. Η λειτουργία του συστήματος στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων δεν έχει προσδιοριστεί και τα προϊόντα αυτής της συχνότητας δύναται να μην τηρούν τις προδιαγραφές των προϊόντων στα 150 MHz. Βέβαια όλες οι ενέργειες χαρακτηρισμού των προϊόντων στα 300 MHz μονής πόλωσης παρουσίασαν εξαιρετικά αποτελέσματα ποιότητας, σταθερότητας της φάσης και ραδιομετρίας.

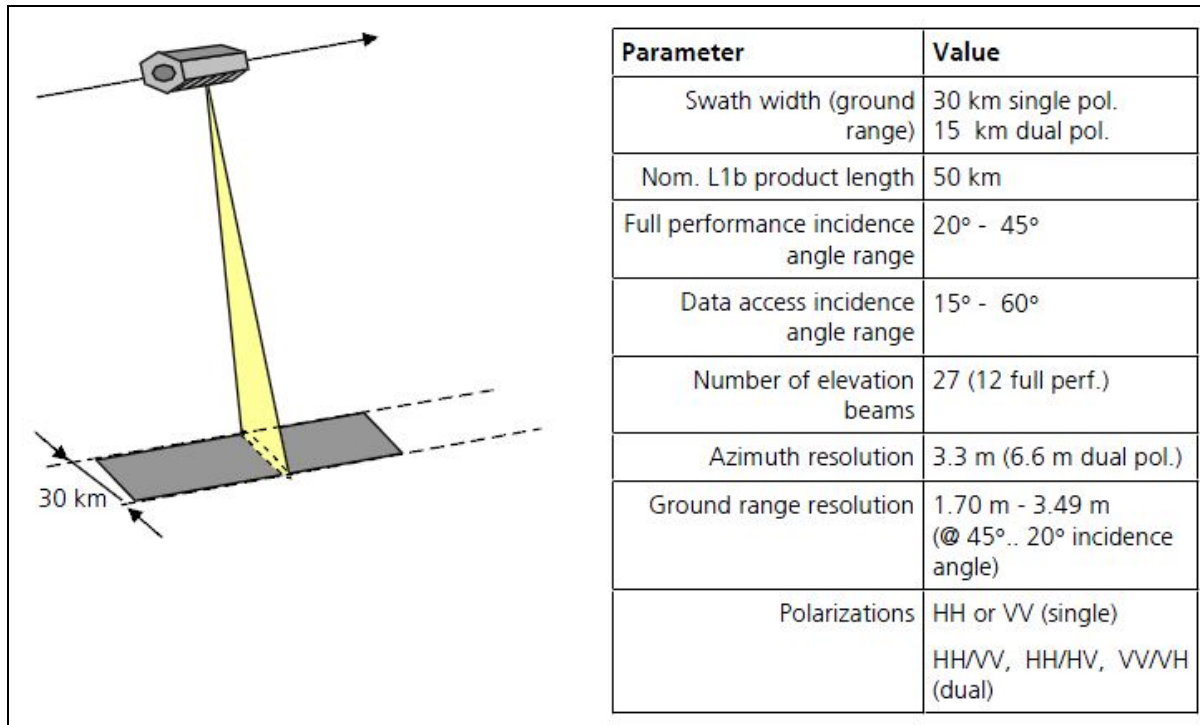
Parameter	Value
Scene extension	5 km (azimuth) x 10 km (ground range)
Full performance incidence angle range	20° - 55°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	91 (full performance) 122 (data access)
Number of azimuth beams	up to 125 out of 229
Azimuth steering angle	up to $\pm 0.75^\circ$
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 2.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά High Resolution Spotlight Mode (HS) .

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.2.3 StripMap Mode (SM)

Αποτελεί τη βασικότερη τεχνική απεικόνισης των ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, όπως π.χ. στον ERS-1 και σε άλλα δορυφορικά ραντάρ. Η λωρίδα εδάφους φωτίζεται με συνεχή ακολουθία παλμών ενώ η κεραία της δέσμης είναι σταθερή σε υψόμετρο και αζιμούθιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη μίας συνεχούς ποιότητας στην λωρίδα των εικόνων (στην κατεύθυνση πτήσης). Τα προϊόντα StripMap διπλής πόλωσης έχουν ελαφρώς μικρότερη χωρική ανάλυση και μικρότερο πλάτος από τα αντίστοιχα μονής πόλωσης. Επίσης στη συγκεκριμένη τεχνική απεικόνισης δύναται να επιτευχθεί χωρική ανάλυση έως 3 m. Το τυπικό μέγεθος σκηνής είναι 30 km x 50 km (πλάτος x μήκος), ωστόσο είναι δυνατή επέκταση μήκους έως 1650 km.

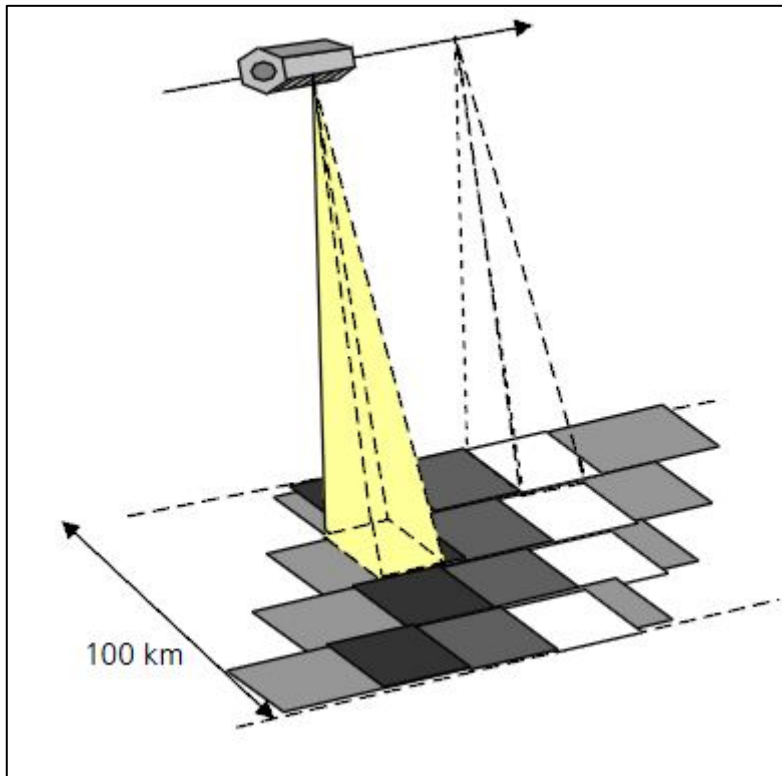


Εικόνα 2.3: StripMap Mode (SM).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.2.4 ScanSAR Mode (SC)

Στη συγκεκριμένη τεχνική απεικόνισης το σύστημα της ηλεκτρονικής κεραίας χρησιμοποιείται για την απόκτηση γειτονικών και ελαφρώς επικαλυπτόμενων λήψεων με διαφορετικές γωνίες λήψης οι οποίες επεξεργάζονται σε μία ενιαία τελική λήψη. Υπάρχει δυνατότητα απόκτησης λωρίδας πλάτους 100 km (και ακόμη περισσότερο) με τη σάρωση τεσσάρων γειτονικών επίγειων υποπεριοχών με χρήση ημι-ανεξάρτητων δεσμών ακτίνας και με διαφορετική γωνία λήψης. Εξαιτίας των εναλλαγών των ακτινών λαμβάνονται μόνο ριπές της ηχούς του ραντάρ, με αποτέλεσμα την μείωση του εύρους δέσμης, το οποίο συνεπάγεται μείωση στην ανάλυση του αζιμουθίου. Τέλος στη συγκεκριμένη τεχνική δύναται να επιτευχθεί χωρική ανάλυση έως 18 m. Το τυπικό μέγεθος σκηνής είναι 100 km x 150 km (πλάτος x μήκος), προκειμένου τα αρχεία εικόνας να είναι εύκολα διαχειρίσιμα, αλλά και πάλι το μήκος δύναται να επεκταθεί έως 1650 km.



Εικόνα 2.4: ScanSAR Mode (SC) .

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

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: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ScanSAR Mode (SC).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.2.5 Image Modes – Σύνοψη

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2-4), παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργικοί τρόποι απεικόνισης του TerraSAR – X. Οι τέσσερις διαφορετικές τεχνικές απεικόνισης διαφέρουν ως προς τη χωρική ανάλυση της εικόνας και ως προς την κάλυψη αυτής.

Imaging Mode	Standard Scene Size* [km]	Maximum Acquisition Length [km]	Slant Range Res. ¹ [m]	Azimuth Res. ¹ [m]	Polarization	Full Performance Range [°]
HighRes SpotLight (HS)	10 x 5	5	1.2	1.1.	Single (VV or HH)	20° to 55°
			1.2	2.2	Dual (HH & VV)	
HighRes SpotLight 300 MHz (HS300)	7-10 x 5	5	0.6	1.1	Single (VV or HH)	20° to 55°
SpotLight (SL)	10 x 10	10	1.2	1.7	Single (VV or HH)	20° to 55°
			1.2	3.4	Dual (HH & VV)	
StripMap (SM)	30 x 50 single pol	1.650	1.2	3.3	Single (VV or HH)	20° to 45°
	15 x 50 dual pol		1.2	6.6	Dual (HH & VV, HH & HV, or VV and VH)	
ScanSAR (SC)	100 x 150	1.650	n/a	18.5	Single (VV or HH)	20° to 45°

Πίνακας 2.4: Οι Τέσσερις Τεχνικές Απεικόνισης του TerraSAR – X.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.3 Λειτουργικότητα και Εύρος Πρόσβασης Δεδομένων

Η πλήρης και ορθή λειτουργικότητα του συστήματος TerraSAR – X ορίζεται βάσει κατασκευαστή για γωνίες λήψης εντός του επονομαζόμενου «Εύρους Πλήρους Λειτουργικότητας» για τη τεχνική εικόνων της δεξιάς λήψης. Η πλατφόρμα βέβαια δύναται να λειτουργήσει και για αριστερές λήψεις ή ακόμη και για ένα μεγαλύτερο εύρος γωνιών λήψης, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το επονομαζόμενο «Εύρος Πρόσβασης Δεδομένων». Οι συγκεκριμένες λειτουργίες βελτιώνουν το χρόνο πρόσβασης σε μία σκηνή, όμως εξαιτίας μειωμένης απόδοσης τα συγκεκριμένα προϊόντα δεν διατίθενται.

Imaging Mode	Polarization Mode	Full Performance Beam Configurations	Incidence Angle (Look Angle) Range
Stripmap	single	strip_003- strip_014	19.7° - 45.5° (18.2° - 41.3°)
Stripmap	dual	stripNear_003 - stripFar_014	19.9° - 45.4° (18.3° - 41.3°)
Spotlight & High-Resolution Spotlight	single & dual	spot_010 – spot_100	19.7° - 55.2° (18.2° - 49.5°)
ScanSAR	single	scan_003 – scan_011	19.7° - 45.5° (18.2° - 41.3°)

Πίνακας 2.5: Λειτουργικότητα και Γωνίες Λήψης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.4 Προτεινόμενο Εύρος Λειτουργίας

Γενικά ο προσδιορισμός στοιχείων όπως ο έλεγχος της ασάφειας και η αξιολόγηση του TerraSAR – X αποτελούν πρόκληση λόγω του μικρού μεγέθους της κεραίας του. Συνέπεια του μεγέθους της κεραίας αποτελεί ο αρκετά υψηλός PRF με ελάχιστες τιμές της τάξης των 3000 Hz. Γενικά τηρούνται οι δείκτες ασάφειας αλλά σε ορισμένες γεωμετρικές εικόνων οι ασάφειες ενδέχεται να επικρατούν σε εικόνες υψηλής αντίθεσης (π.χ. λιμάνια). Για αυτόν τον λόγο ορίστηκε ένας δείκτης, για τον χρήστη, ο οποίος καθορίζει την ποιότητα της ασάφειας σε σχέση με την υφή της εικόνας. Ο δείκτης αυτός ονομάστηκε «Προτεινόμενο Εύρος Λειτουργίας», ο οποίος καθορίζει ένα εύρος γωνιών κλίσης που θεωρούνται προτιμητέες για σκηνές με πολύ υψηλή αντίθεση.

Επίσης προσδιορίστηκε ότι δεν ήταν εφικτός ένας συνολικός δείκτης ασάφειας, αλλά ξεχωριστός τόσο για τη διεύθυνση των αζιμουθίων όσο και για τη διεύθυνση των αποστάσεων. Τέλος προσδιορίστηκε ότι τα προϊόντα εικόνας είναι καλύτερα για τιμές ασαφειών αζιμουθίου περίπου -20 dB ή και καλύτερες και για τιμές ασαφειών απόστασης περίπου -25 dB ή και καλύτερες. Στον πίνακα 2-6 παρουσιάζονται οι συνιστώμενες γωνίες λήψης για σκηνές υψηλής αντίθεσης.

Mode	Pol Mode	High Contrast Recommended Performance Beams (Criteria Rg -25 dB Az -20 dB)	Incidence Angle (Look Angle) Ranges
Stripmap	Single	strip_003 - strip_014	19.7° - 45.5° (18.2° - 41.3°)
Stripmap	Dual	stripNear_003 - stripFar_011	19.9° - 40.3° (18.3° - 36.8°)
SL & HS	Single	spot_010 - spot_079	19.7° - 49.7° (18.2° - 44.9°)
SL & HS	Dual	spot_010 - spot_059	19.7° - 43.3° (18.2° - 39.4°)
ScanSAR	Single	scan_003 - scan_011	19.7° - 45.5° (18.2° - 41.3°)

Πίνακας 2.6: Γωνίες Λήψης για Σκηνές Υψηλής Αντίθεσης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.5 Κάλυψη Περιοχής Προϊόντων

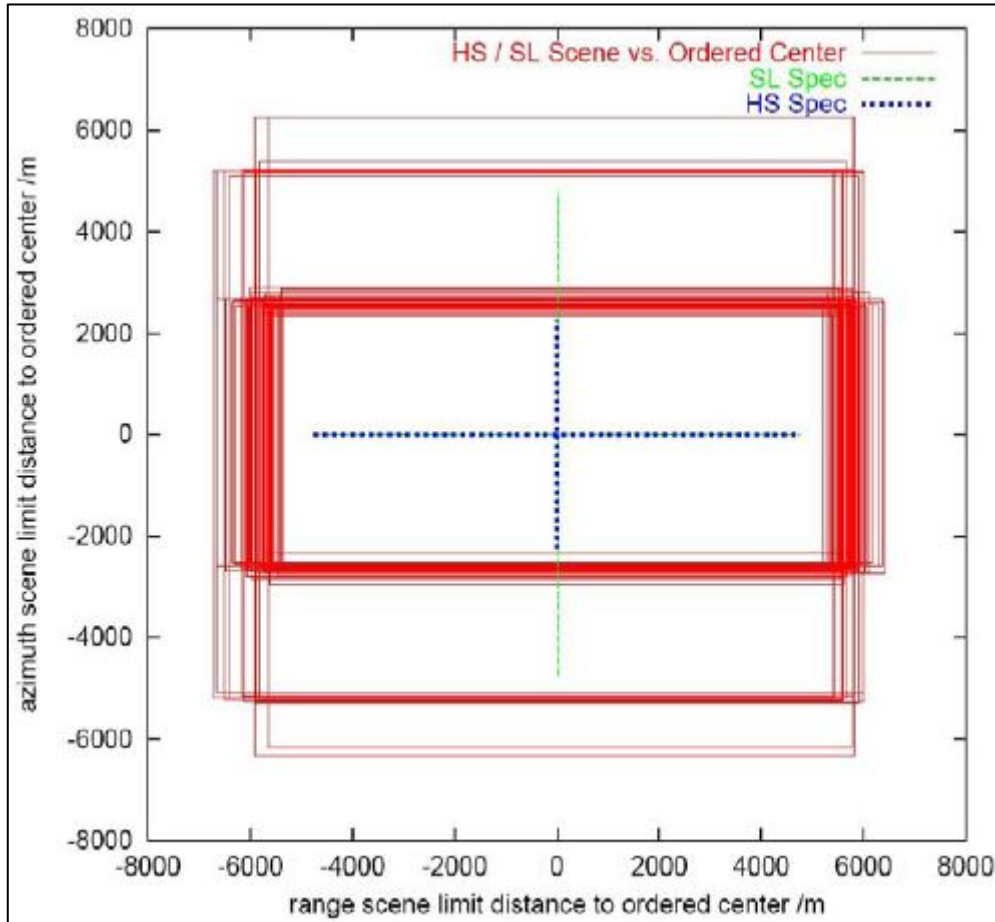
Η θέση του προϊόντος εξαρτάται από την τροχιά του συστήματος, τον ακριβή χρόνο έναρξης αζιμουθίου, το ορθό παράθυρο της ηχούς για τη διεύθυνση των αποστάσεων (τα σφάλματα του DEM, το οποίο χρησιμοποιείται για την πλοήγηση) και ειδικά για τα προϊόντα απεικόνισης spotlight, το κεντροειδές Doppler, το οποίο χρησιμοποιείται ως αρχή του συστήματος των συντεταγμένων Doppler.

Λαμβάνεται υπόψη επίσης, γύρω από την τροχιά του δορυφόρου μία ζώνη της τάξης των ± 250 m, με τη βοήθεια ενός περιθωρίου της τάξης του 1 km. Επίσης το παράθυρο της ηχούς έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ακολουθεί το ανάγλυφο.

Κατά την παραγγελία σκηνής σύμφωνα με τις τυπικές τεχνικές απεικόνισης, διατίθεται εγγύηση ότι τα προϊόντα παράδοσης καλύπτουν τουλάχιστον περιοχή 10 km x 10 km για τα προϊόντα SL και 10 km x 5 km για τα προϊόντα HS με κέντρο τις συντεταγμένες που έχουν δοθεί για την παραγγελία. Ότι ισχύει για όλες τις ακρίβειες των δεδομένων SAR, το κεντροειδές Doppler και οι αποκλίσεις του επηρεάζουν σημαντικά τον αζιμουθιακό χρόνο έναρξης και πέρατος του προϊόντος. Ενώ η διάρκεια λήψης δεδομένων για τις εκδόσεις stripmap ή ScanSAR δύναται εύκολα να επεκταθεί με συγκεκριμένα όρια, η κατάσταση περιπλέκεται για τις απεικονίσεις spotlight εξαιτίας της αζιμουθιακής κατεύθυνσης της δέσμης ακτινών. Τα περιθώρια είναι μικρότερα στην κατεύθυνση του αζιμουθίου προκειμένου να εξασφαλιστεί η λήψη προϊόντος υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, οι σκηνές λήψης ικανοποιούν τον περιορισμό του περιθωρίου των 300 m για την ακρίβεια προσδιορισμού του προϊόντος.

Η συγκεκριμένη ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων ενδιαφέροντος οφείλεται και στον ακριβή μηχανισμό κατεύθυνσης της κεραίας του συστήματος, ο οποίος έχει

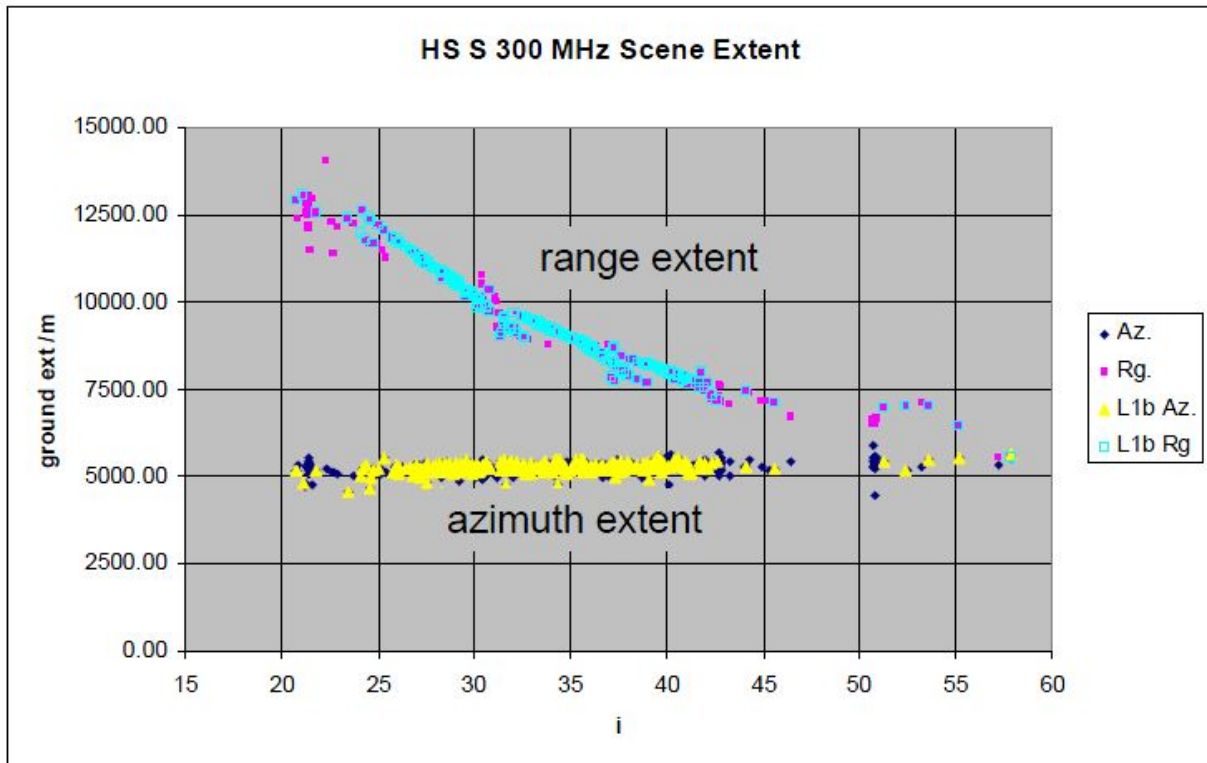
ρυθμιστεί με συγκεκριμένα ίχνη αστέρων, με αποτέλεσμα να μειώνεται το σφάλμα επί εδάφους σε λιγότερο από 20 m. Επιπλέον, με τη βοήθεια μετρήσεων GPS, λαμβάνεται υπόψη διόρθωση στο χρόνο έναρξης της λήψης, η οποία εφαρμόζεται εν πτήση. Έτσι το σφάλμα επί εδάφους για τα προϊόντα ScanSAR είναι κάτω των 50 m.



Εικόνα 2.5: Καλύψεις και Θέσεις Προϊόντων HS/SL (κόκκινο πλαίσιο).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζεται μία ελαφρώς μειωμένη επέκταση του προϊόντος spotlight στην κατεύθυνση του αζιμουθίου εξαιτίας των χρονικών ακριβειών, καθώς επίσης και του κεντροειδούς του Doppler. Τα προϊόντα HS στην πειραματική έκδοση των 300 MHz παρουσιάζουν μία ελαφρώς μικρότερη επέκταση στην κατεύθυνση των αποστάσεων. Στην εικόνα 2-6 παρουσιάζονται οι ληφθείσες σκηνές προϊόντος HS 300 MHz (τα δύο διαφορετικά χρώματα σε κάθε διάσταση αντιπροσωπεύουν διαφορετικά επίπεδα επεξεργασίας).



Εικόνα 2.6: Όρια Σκηνής Προϊόντων HS Spotlight 300 MHz Μονής Πόλωσης για Διαφορετικές Γωνίες Λήψης στο Κέντρο της Σκηνής.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.6 Βασικά Προϊόντα

Τα πρωτογενή δεδομένα του δορυφορικού συστήματος TerraSAR – X, επεξεργάζονται και καταλήγουν στη βασική μορφή προϊόντων με τη βοήθεια του επεξεργαστή TerraSAR – X Multi Mode SAR Processor (TMSP). Με τη βοήθεια των δυνατοτήτων του δορυφόρου και της πλατφόρμας αυτού, παράγονται κατάλληλα προϊόντα επεξεργασμένα ως προς:

- Τη γεωμετρική και ραδιομετρική ανάλυση
- Τη γεωμετρική προβολή
- Βοηθητικά αρχεία πληροφοριών

Όλα τα βασικά προϊόντα εικόνας του TerraSAR – X επεξεργάζονται και παραδίδονται σε φωτεινότητα ραντάρ β_0 , καθιστώντας τα συγκρίσιμα με τα προϊόντα επίγειας απόστασης των ERS-1 και 2, ENVISAT/ASAR και RADARSAT. Σε αντίθεση με τους ENVISAT και ERS, τα περίπλοκα προϊόντα κεκλιμένης απόστασης παραδίδονται επίσης στη φωτεινότητα των ραντάρ.

Τα βασικά προϊόντα του TerraSAR διαφοροποιούνται σε τέσσερα είδη, τα οποία είναι διαθέσιμα και ανεξάρτητα αλλά και σε συνδυασμό:

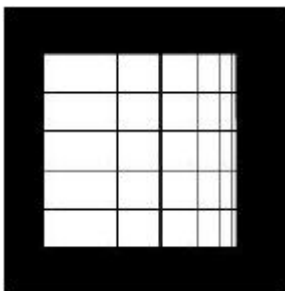
- Single Look Slant Range Complex (SSC)
- Multi Look Ground Range Detected (MGD)
- Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)
- Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

2.6.1 Single Look Slant Range Complex (SSC)

Στο συγκεκριμένο προϊόν η γεωμετρική προβολή ορίζεται από το αζιμούθιο και την κεκλιμένη απόσταση. Αποτελεί το βασικό μονοεικονικό προϊόν, το οποίο προέρχεται από την εστίαση της δέσμης ακτινών του ραντάρ. Τα εικονοστοιχεία τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις στην διεύθυνση του αζιμουθίου (σύμφωνα με το χρονικό διάστημα επανάληψης παλμού $PRI = 1/PRF$) και στην κεκλιμένη απόσταση (σύμφωνα με το εύρος δείγματος της συχνότητας), ενώ τα δεδομένα παρουσιάζονται υπό τη μορφή μιγαδικών αριθμών. Κάθε εικονοστοιχείο επεξεργάζεται στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων Doppler. Η συγκεκριμένη μετατροπή είναι συμβατή με τα τυπικά προϊόντα κεκλιμένης απόστασης τα οποία διατίθενται από τους ERS-1/2, ENVISAT/ASAR, RADARSAT και X-SAR/SIRC.

Τα προϊόντα spotlight θα επεξεργαστούν σύμφωνα με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων Doppler, όπως ακριβώς και τα προϊόντα stripmap με την επιλογή μίας τεχνητής PRF, αρκετά μεγάλης έτσι ώστε να τηρήσει ολόκληρο το επεξεργασμένο φάσμα Doppler. Ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το κεντροειδές Doppler διαφέρει σημαντικά σε σχέση με το αζιμούθιο.

Το προϊόν SSC διατίθεται για επιστημονικές εφαρμογές οι οποίες απαιτούν ολόκληρο το εύρος δέσμης και την πληροφορία φάσης.

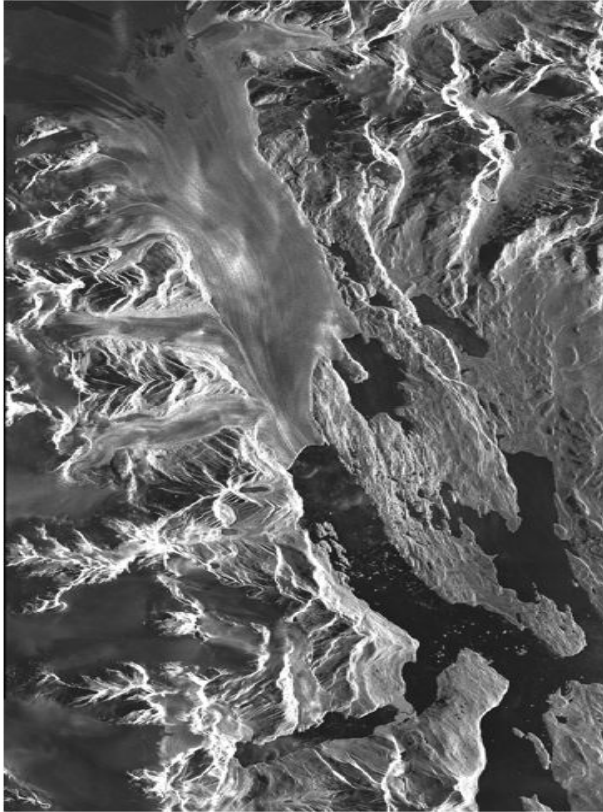


Εικόνα 2.7: Single Look Slant Range Complex (SSC).

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.6.2 Multi Look Ground Range Detected (MGD)

Στο συγκεκριμένο προϊόν η γεωμετρική προβολή ορίζεται από το αζιμούθιο και την απόσταση επί του εδάφους (χωρίς διορθώσεις αναγλύφου). Στην εικόνα 2-8 φαίνεται η μη ικανοποιητική απόδοση του αναγλύφου από το συγκεκριμένο προϊόν.



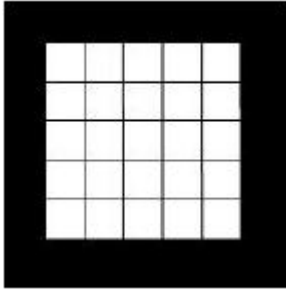
Εικόνα 2.8: TerraSAR – X stripmap 30 x 55 km, Upsala Patagonia.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Το προϊόν προέρχεται από πολλές λήψεις με μείωση του θορύβου και περίπου τετραγωνική μορφή των εδαφοψηφίδων. Οι εικονοσυντεταγμένες ορίζονται από την κατεύθυνση της πτήσης και την απόσταση επί του εδάφους. Η ισοδιάσταση των εικονοστοιχείων είναι ίδια τόσο κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου όσο και επί της επίγειας απόστασης. Με τη βοήθεια ενός πολυωνυμικού μετασχηματισμού υλοποιείται μετατροπή της κεκλιμένης σε προβολή επί του εδάφους και με χρήση του ελλειψοειδούς WGS84 και ένα μέσο και σταθερό υψόμετρο.

Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου προϊόντος είναι ότι δεν έχει εφαρμοστεί κάποιος γεωδαιτικός μετασχηματισμός με αποτέλεσμα να μην παρατηρούνται προβλήματα παραμορφώσεων επί της εικόνας. Βέβαια αυτό συνεπάγεται μικρότερη ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων εν συγκρίσει με τα γεωκωδικοποιημένα προϊόντα. Για τα προϊόντα TS-X L1b ο κάρναβος συντεταγμένων υπολογίζεται με ένα γενικευμένο DEM, ενώ η προβολή της εικόνας υλοποιείται με ένα υψόμετρο για όλη τη σκηνή ενδιαφέροντος.

Τέλος το προϊόν είναι χρήσιμο στις περιπτώσεις που η γεωκωδικοποίηση ή η ορθοαναγωγή είναι να υλοποιηθεί από τον ενδιαφερόμενο χρήστη και όταν δεν απαιτείται να γίνει γεωκωδικοποίηση.



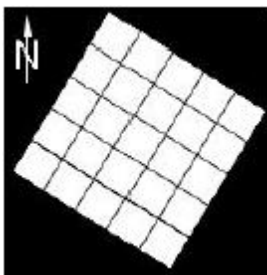
Εικόνα 2.9: MGD - Multi Look Ground Range Detected.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.6.3 Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)

Στο συγκεκριμένο προϊόν η γεωμετρική προβολή ορίζεται από χαρτογραφική προβολή με διορθώσεις λόγω ελλειψοειδούς (χωρίς διορθώσεις αναγλύφου).

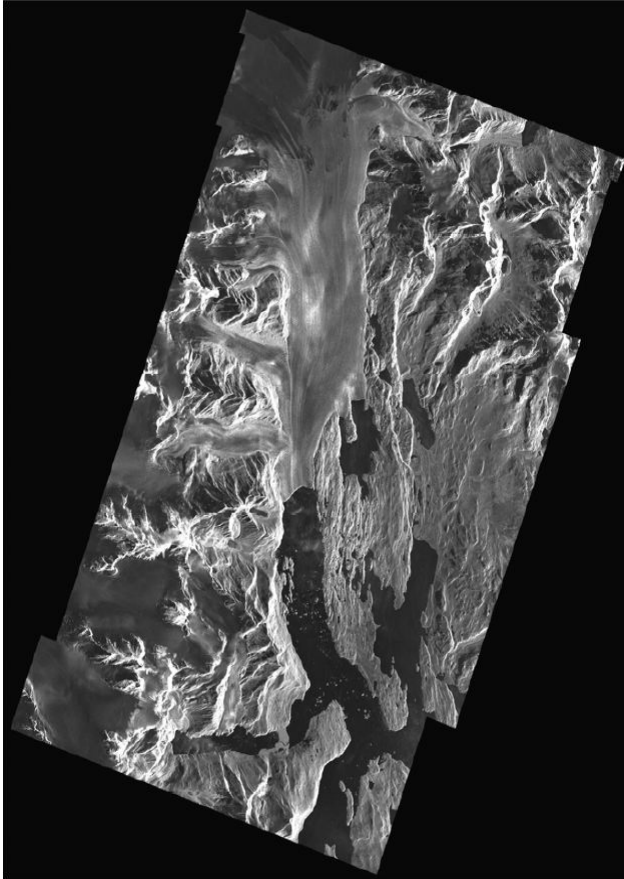
Το προϊόν GEC προέρχεται επίσης από πολλές λήψεις. Η προβολή και αναδόμηση της εικόνας έχει γίνει στο WGS84 θεωρώντας ένα μέσο υψόμετρο για όλη την περιοχή. Διαθέσιμοι κάρναβοι συντεταγμένων είναι οι UTM (Universal Transversal Mercator) και UPS (Universal Polar Stereographic). Επίσης επειδή δεν λαμβάνονται υπόψη οι διορθώσεις λόγω αναγλύφου, η ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων ποικίλει αναλόγως του αναγλύφου.



Εικόνα 2.10: GEC - Geocoded Ellipsoid Corrected.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

Οι ακρίβειες που διατίθενται για το συγκεκριμένο προϊόν απευθύνονται σε επίπεδα εδάφη, επειδή το υποτιθέμενο υψόμετρο πλησιάζει και στην πραγματική τιμή. Τέλος στις περιπτώσεις έντονων μεταβολών αναγλύφου, τα σφάλματα είναι μεγάλα και ειδικά για τις μικρές γωνίες πρόσπτωσης.



Εικόνα 2.11: Παράδειγμα Προβολής Προϊόντος GEC (χωρίς διορθώσεις αναγλύφου).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.6.4 Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)

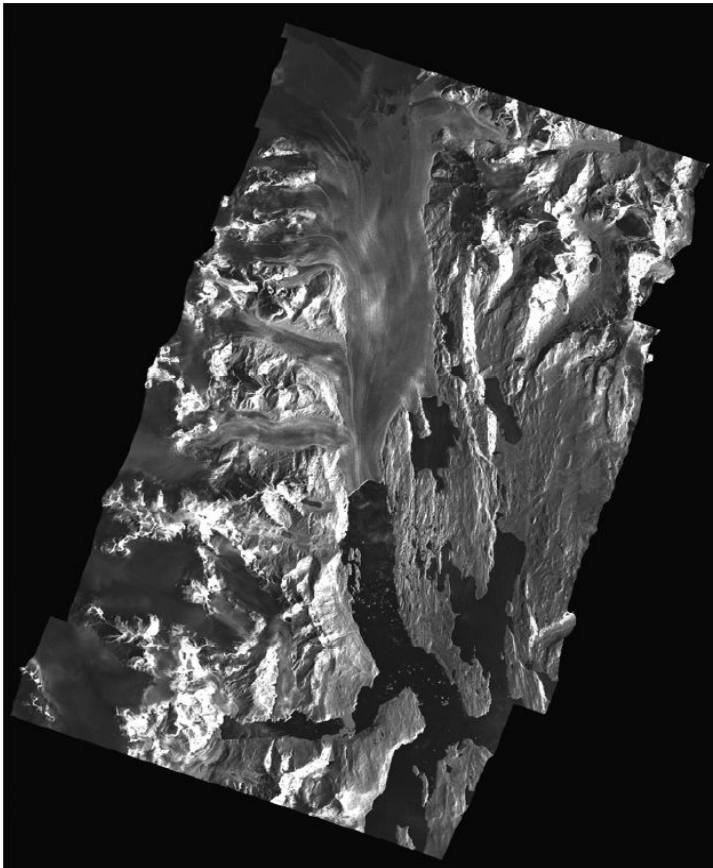
Στο συγκεκριμένο προϊόν η γεωμετρική προβολή ορίζεται από χαρτογραφική προβολή με διορθώσεις λόγω αναγλύφου, χρησιμοποιώντας ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM).

Το προϊόν EEC, όπως και το προϊόν GEC, προέρχεται από πολλές λήψεις. Έχει υλοποιηθεί προβολή και αναδόμηση αυτού στο ελλειψοειδές WGS84, ενώ οι διαστροφές λόγω αναγλύφου έχουν διορθωθεί με χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Διαθέσιμοι κάρναβοι συντεταγμένων είναι οι UTM και UPS.

Εξαιτίας της διόρθωσης λόγω αναγλύφου, η ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων θεωρείται αρκετά υψηλή. Βέβαια η ακρίβεια αυτή εξαρτάται τόσο από το είδος του αναγλύφου όσο και από την ποιότητα και ανάλυση του DEM, αλλά και τη γωνία πρόσπτωσης.

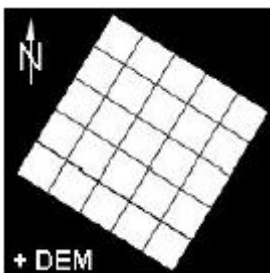
Τα προϊόντα EEC παράγονται με χρήση των καλύτερων διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Τα συγκεκριμένα DEM έχουν συντεθεί από διαφορετικές πηγές όπως, SRTM/X-SAR, SRTM/C-band, ERS-tandem, DTED-1 και DTED-2. Εναπομείναντα κενά συμπληρώνονται από τα δεδομένα GLOBE. Στην εικόνα 2-12 απεικονίζεται παράδειγμα προϊόντος EEC, με την εικόνα να έχει υποστεί στροφή και

διόρθωση λόγω αναγλύφου.



Εικόνα 2.12: Παράδειγμα Προβολής Προϊόντος EEC (με διορθώσεις αναγλύφου).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)



Εικόνα 2.13: EEC – Enhanced Ellipsoid Corrected.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.7 Γεωμετρική Ανάλυση

Η θεωρητική μέγιστη ανάλυση στην κεκλιμένη απόσταση για το προϊόντα TerraSAR μονής πόλωσης είναι 0.89 m, για δέσμη ακτινών στα 150 MHz. Σε όλα τα προϊόντα έχει υλοποιηθεί σκόπιμη μείωση της ανάλυσης με εφαρμογή ειδικού φίλτρου τόσο στη διεύθυνση των αποστάσεων όσο και στη διεύθυνση των αζιμουθίων (παράθυρο Hamming), έτσι ώστε ο θόρυβος να μειωθεί στα -25 dB ή και καλύτερα. Η

συγκεκριμένη μείωση θορύβου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απεικόνιση αστικών και βιομηχανοποιημένων περιοχών, όπου η υψηλή χωρική ανάλυση του συστήματος προκαλεί έντονη οπισθοσκέδαση, η οποία οδηγεί με τη σειρά της σε εικόνες υψηλής αντίθεσης. Ταυτόχρονα υλοποιείται και μείωση του επιπέδου ασαφειών κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου. Επεκτείνοντας το εύρος δέσμης κατά τη διεύθυνση του αζιμουθίου στην απεικόνιση stripmap και αυξάνοντας της γωνίες πρόσπτωσης στην απεικόνιση SpotLight, η προκύπτουσα διεύρυνση της απόκρισης θα μπορούσε να αντισταθμιστεί. Ωστόσο εξαιτίας του σταθερού εύρους δέσμης, η ανάλυση στη διεύθυνση της απόστασης γίνεται χειρότερη, με αποτέλεσμα να προκύψει διακριτική ανάλυση κεκλιμένης απόστασης της τάξης των 1.2 m, αντί του 1.1 m βάσει των προδιαγραφών στα 150 MHz.

Ανάλογα με τη γωνία κλίσης η διακριτική ανάλυση των 1.2 m επί της κεκλιμένης απόστασης, διαιρούμενη με το ημίτονο της συγκεκριμένης γωνίας μετατρέπεται σε ακρίβεια επί του εδάφους. Εξαιτίας χρονικών περιορισμών του συστήματος, το εύρος δέσμης των 150 MHz, δεν δύναται να επιτευχθεί για όλες της γωνίες πρόσπτωσης. Ανάλογα με τις πραγματικές χρονικές παραμέτρους, οι μακρινές ακτίνες δέσμης στα προϊόντα Stripmap και ScanSAR λειτουργούν στα 100 MHz. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται η διακριτική ανάλυση επί του εδάφους αλλά υποβαθμίζεται η ραδιομετρική ανάλυση της εικόνας. Από την άλλη πλευρά τα προϊόντα των 300 MHz μπορούν να παραγγελθούν για την HS απεικόνιση, αλλά λόγω περιορισμών προσωρινής αποθήκευσης του συστήματος επιβάλλεται μείωση της έκτασης σκηνης για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.

Η θεωρητική διακριτική ανάλυση στη διεύθυνση του αζιμουθίου, για την απεικόνιση stripmap είναι η μισή του μήκους της κεραίας. Δηλαδή $4.8 \text{ m} / 2 = 2.4 \text{ m}$. Εξαιτίας του μετρήσιμου δείγματος του $\sin(x)/x$, προκύπτει πάντα ψευδές φάσμα Doppler. Με τη βοήθεια του επεξεργαστή υλοποιείται μείωση του εύρους δέσμης και μορφοποίηση του φάσματος, έτσι ώστε να μειωθούν οι ασάφειες, ενώ μία σταθερή διακριτική ανάλυση της τάξης των 3.3 m αποτελεί τον επιδιωκόμενο στόχο για όλα τα προϊόντα stripmap μονής πόλωσης.

Στα προϊόντα stripmap διπλής πόλωσης, η αποτελεσματική διακριτική ανάλυση αυτών προσαρμόζεται στα 6.6 m, η οποία είναι μισή από την αντίστοιχη των προϊόντων μονής πόλωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για όλα τα σύνθετα προϊόντα SSC η διακριτική ανάλυση δίνεται στη διεύθυνση του αζιμουθίου και στην κεκλιμένη απόσταση, ενώ για όλα τα υπόλοιπα προϊόντα η γεωμετρική ανάλυση αναφέρεται σε απόσταση επί του εδάφους. Επίσης η γεωμετρική τους ανάλυση μειώνεται προκειμένου να μειωθούν τα στίγματα και ο θερμικός θόρυβος, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ραδιομετρική τους ανάλυση. Για αυτόν τον λόγο καθορίζονται δύο στρατηγικές. Η πρώτη προσανατολίζεται στην ενίσχυση και βελτίωση της χωρικής ανάλυσης ενώ η δεύτερη στην ενίσχυση και βελτίωση της ραδιομετρικής ανάλυσης. Βέβαια και στις δύο

περιπτώσεις προκύπτει εδαφοψηφίδα σχήματος τετραγώνου (Eidener et al., 2010).

2.7.1 Προϊόντα Χωρικής Ενίσχυσης

Τα προϊόντα χωρικής ενίσχυσης (Spatially Enhanced Products – SE) σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη τετραγωνική διακριτική ανάλυση επί εδάφους. Αναλόγως της τεχνικής απεικόνισης, της πόλωσης και της γωνίας πρόσπτωσης, η τιμή της μεγαλύτερης διακριτικής ανάλυσης στη διεύθυνση του αζιμουθίου ή στην απόσταση επί του εδάφους προσδιορίζει και το μέγεθος του εικονοστοιχείου σχήματος τετραγώνου. Στη συνέχεια η μικρότερη τιμή της διακριτικής ανάλυσης προσαρμόζεται στο συγκεκριμένο μέγεθος και η αντίστοιχη μείωση του εύρους της δέσμης χρησιμοποιείται για τη μείωση του θορύβου (Eidener et al., 2010).

Η εικόνα 2-14, αποτελεί προϊόν stripmap χωρικά ενισχυμένο με 1.2 looks και περίπου 3.2 m διακριτικής ανάλυσης του πεδίου βαθμονόμησης στο Oberpfaffenhofen. Το μέγεθος της σκηνής είναι 2.9 km x 1.4 km με πυκνότητα εικονοστοιχείων 1.25 m.



Εικόνα 2.14: Oberpfaffenhofen (Πεδίο Βαθμονόμησης).

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.7.2 Προϊόντα Ραδιομετρικής Ενίσχυσης

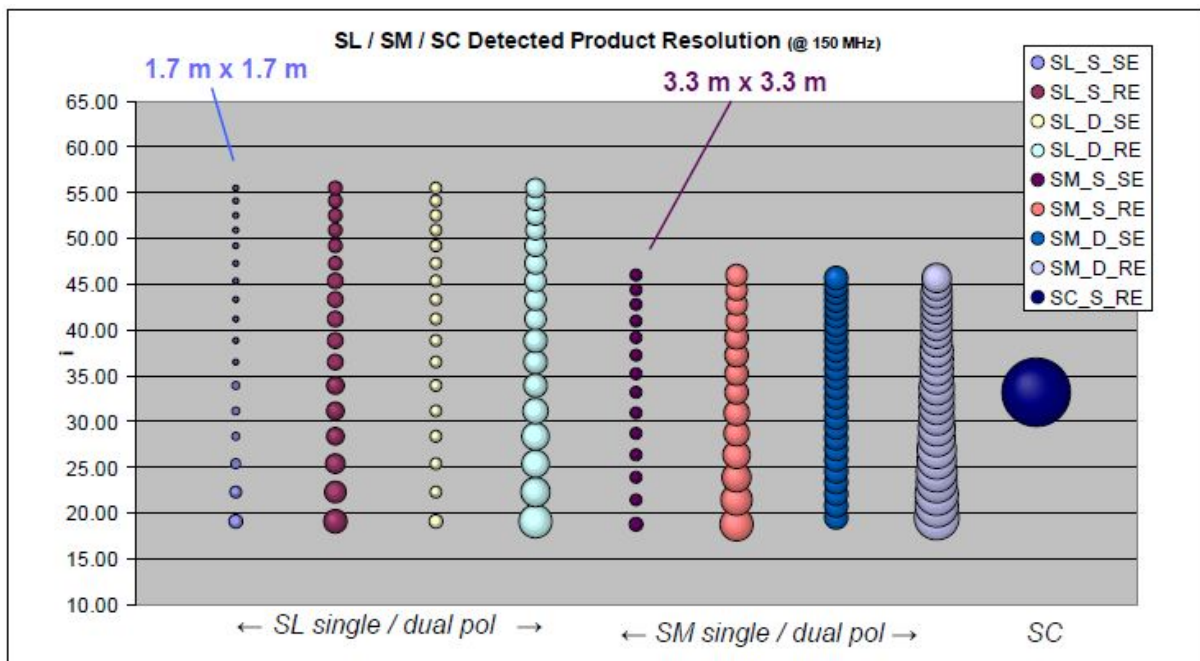
Στα συγκεκριμένα προϊόντα η διακριτική ανάλυση τόσο στη διεύθυνση του αζιμουθίου όσο και στη διεύθυνση των αποστάσεων μειώνεται, προκειμένου να μειωθεί και ο θόρυβος με ένα μέσο όρο περίπου 6 (από 5 έως 7) όψεων (looks) και να επιτευχθεί ραδιομετρική ανάλυση της τάξης των 1.5 dB. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο SNR, ο οποίος γενικά μειώνεται όσο αυξάνονται οι γωνίες πρόσπτωσης και θεωρείται ως υποτιθέμενη οπισθοσκέδαση τιμή ίση με -6 dB με γωνία 20° και -12 dB με γωνία 50°. Εξαιτίας της μειωμένης διακριτικής ανάλυσης της εικόνας, η απαιτούμενη πυκνότητα των εικονοστοιχείων δύναται να ελαττωθεί με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά και το μέγεθος δεδομένων του προϊόντος.

Στην εικόνα 2-15 φαίνεται παράδειγμα προϊόντος stripmap, ραδιομετρικά ενισχυμένου, στα 5.5 looks και με διακριτική ανάλυση της τάξης των 6.8 m. Τέλος στις εικόνες 2-16 και 2-17 παρουσιάζονται οι διακριτικές αναλύσεις των διάφορων προϊόντων σε σχέση πάντα με τη γωνία πρόσπτωσης.



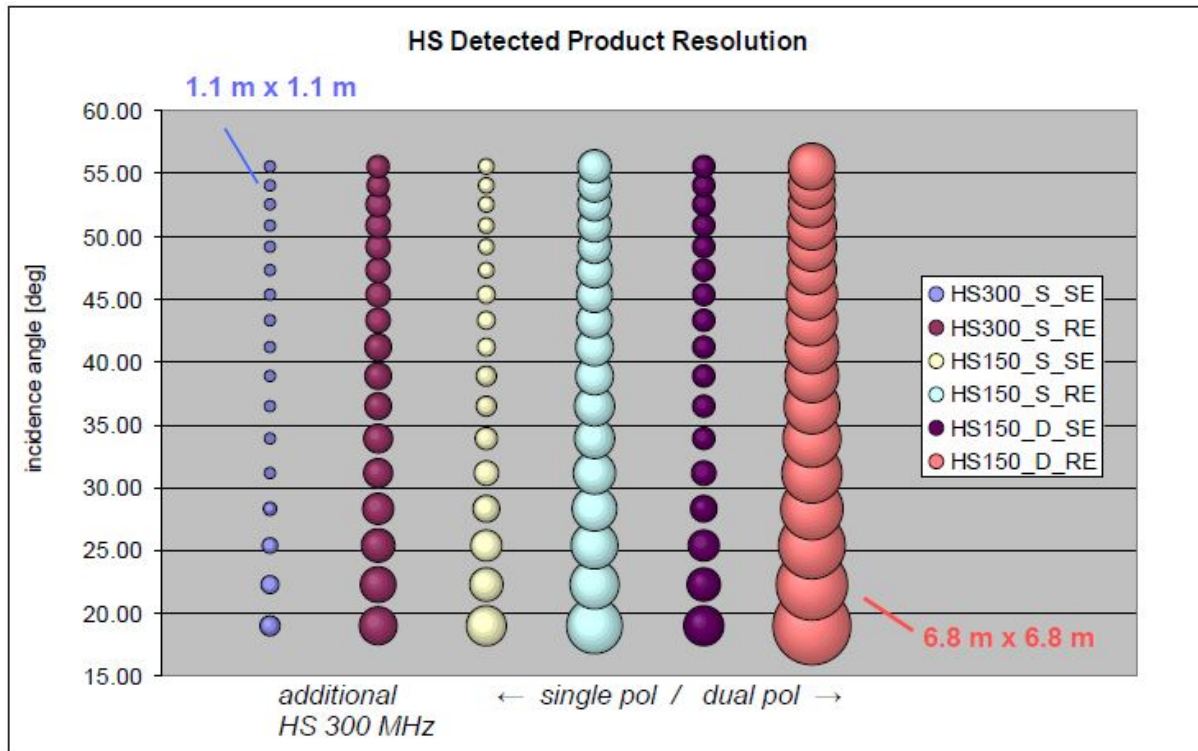
Εικόνα 2.15: Ραδιομετρικά Ενισχυμένο Προϊόν stripmap.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)



Εικόνα 2.16: Διακριτική Ανάλυση SL/SM/SC σε σχέση με τη Γωνία Πρόσπτωσης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)



Εικόνα 2.17: Διακριτική Ανάλυση HS σε σχέση με τη Γωνία Πρόσπτωσης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

2.8 Ραδιομετρική Ακρίβεια

Η ραδιομετρική ακρίβεια των προϊόντων προσδιορίζεται από δύο ορισμούς, αυτόν της απόλυτης ραδιομετρικής ακρίβειας και αυτόν της σχετικής ραδιομετρικής ακρίβειας (Eidener et al., 2010):

➤ Απόλυτη Ραδιομετρική Ακρίβεια

Η συγκεκριμένη παράμετρος ορίζεται ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μεταξύ της μετρημένης και της πραγματικής διατομής του ραντάρ, σε διαφορετικές τοποθεσίες της ίδιας σκηνής και μάλιστα διαχρονικά. Η Απόλυτη Ραδιομετρική Ακρίβεια για τα προϊόντα απεικόνισης (συμπεριλαμβανομένων των σφαλμάτων που προέρχονται από τις συσκευές βαθμονόμησης και επεξεργασίας) η οποία λαμβάνεται κατά τις φάσεις λήψης είναι 0.6 dB.

➤ Σχετική Ραδιομετρική Ακρίβεια

Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι η τυπική απόκλιση του ραδιομετρικού σφάλματος γνωστών στόχων από μία λήψη δεδομένων. Για τον υπολογισμό της λαμβάνονται υπόψη το μοτίβο της κεραίας, γνώση για το σύστημα σκόπευσης της κεραίας και διάφορες παρεκκλίσεις του οργάνου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Τέλος για τα προϊόντα stripmap, η σχετική ραδιομετρική ακρίβεια των δεδομένων stripmap είναι

0.3 dB.

2.9 Ακρίβεια Εντοπισμού Εικονοστοιχείων

Η ακρίβεια εντοπισμού εικονοστοιχείων προσδιορίζει την ακρίβεια με την οποία ένα εικονοστοιχείο των βασικών προϊόντων TerraSAR μπορεί να μετασχηματιστεί σε θέση στο έδαφος. Για τα σύνθετα προϊόντα κεκλιμένης απόστασης δεν έχει εκτελεστεί μετατροπή της κεκλιμένης απόστασης σε απόσταση στο έδαφος. Σημαντικά σφάλματα επίσης υπεισέρχονται και από τον προσδιορισμό της τροχιάς GPS. Επίσης, χρησιμοποιούνται τρία είδη τροχιών για την επεξεργασία των βασικών προϊόντων, όπως φαίνεται στον πίνακα 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: Είδη Τροχιών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των Βασικών Προϊόντων.

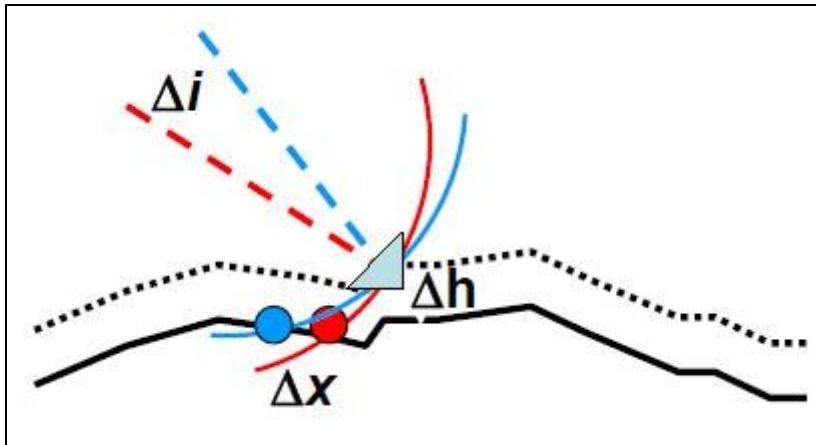
(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Μελετώντας τον πίνακα 2-7 και λαμβάνοντας υπόψη πληροφορίες τροχιάς και χρόνου, οι οποίες παρέχονται για τα βασικά προϊόντα, ένας χρήστης δύναται να προσδιορίσει 3D συντεταγμένες σε ένα σύνθετο προϊόν κεκλιμένης απόστασης, με μία ακρίβεια της τάξης των 2 m ή και καλύτερη. Η ακρίβεια των 2 m δηλώνεται για την περίπτωση της τέλει γνώσης της διαδρομής του σήματος. Ωστόσο, το σήμα του ραντάρ υπόκειται σε καθυστερήσεις λόγω των διαφορετικών δεικτών διάθλασης του κενού, της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, με αποτέλεσμα η ακρίβεια να είναι πλέον της τάξης των 2-4 m και να εξαρτάται από τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν, το μήκος της διαδρομής του σήματος και ως εκ τούτου και από τη γωνία πρόσπτωσης. Η καθυστέρηση του σήματος εξαιτίας της τροπόσφαιρας δύναται εύκολα να μοντελοποιηθεί, ενώ είναι σχετικά σταθερή σε σχέση με το χρόνο. Αντίθετα οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας είναι σχετικά ασταθής, αλλά όχι ιδιαίτερα σημαντικές στο κανάλι X. Ένας μέσος όρος καθυστερήσεων έχει διορθωθεί και μοντελοποιηθεί για χρήση στον επεξεργαστή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος TerraSAR – X, αποτελεί η απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια, η οποία λόγω της ακριβούς τροχιάς, της βαθμονόμησης των καθυστερήσεων των οργάνων, των προσδιορισμένων χρονικών διορθώσεων που εκτελούνται στον επεξεργαστή, είναι σαφώς περισσότερο βελτιωμένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να δηλώνεται πιστοποιημένα απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια της τάξης του 1 m (Eidener et al., 2010).

2.9.1 Ακρίβεια Εντοπισμού Γεωκωδικοποιημένων Προϊόντων

Τα συγκεκριμένα γεωκωδικοποιημένα προϊόντα έχουν προβληθεί σε ψηφιακό μοντέλο εδάφους με αποτέλεσμα τα σφάλματα του DEM να υπεισέρχονται στο προϊόν και να επηρεάζουν και την ακρίβεια εντοπισμού των εικονοστοιχείων. Η επιδιωκόμενη ακρίβεια εξαρτάται από την ακρίβεια της τροχιάς, την ακρίβεια του χρόνου και ειδικότερα την υψομετρική ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου αναφοράς. Για χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης η ακρίβεια του DEM είναι περισσότερο σημαντική από ότι για υψηλότερες γωνίες πρόσπτωσης (εικόνα 2-18).



Εικόνα 2.18: Επίδραση του DEM στην Ακρίβεια Εντοπισμού σε σχέση με τις Γωνίες Πρόσπτωσης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Η επίδραση της ακρίβειας του DEM, στην ακρίβεια προσδιορισμού των εικονοστοιχείων αναλύεται στον πίνακα 2-8:

	20°	23°	26°	29°	32°	35°	38°	41°	44°	47°	48°	50°	inci- dence angle
DEM elevation error	2,75	2,36	2,05	1,80	1,60	1,43	1,28	1,15	1,03	0,93	0,90	0,83	dis- placeme- nt factor
2 m	5,5	4,7	4,1	3,6	3,2	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	resulting location error in meters
6 m	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 m	22	19	16	14	13	12	11	9	9	8	7	7	
16 m	44	38	33	29	25	23	21	18	17	15	14	13	
30 m	82	71	61	54	48	43	38	34	31	28	27	25	
100 m	275	236	205	180	160	143	128	115	103	93	90	83	

Πίνακας 2.8: Σφάλμα Εντοπισμού Εικονοστοιχείων λόγω Σφαλμάτων DEM και για Διαφορετικές Γωνίες Πρόσπτωσης.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Στον πίνακα 2-8 αναλύεται η μετατόπιση του εικονοστοιχείου, η οποία προκαλείται από υψομετρικά σφάλματα του DEM. Η συνεφαπτομένη της γωνίας πρόσπτωσης αποτελεί τον παράγοντα ο οποίος μετατρέπει το υψομετρικό σφάλμα σε σφάλμα εντοπισμού. Οι πηγές των ψηφιακών μοντέλων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για

την παραγωγή των προϊόντων TerraSAR, αναλύονται στον πίνακα 2-9:

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

Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά DEM των Προϊόντων TerraSAR.

(Πηγή: Eidener et al., 2010)

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την παράδοση των προϊόντων EEC, παραδίδεται και ένας ποιοτικός χάρτης στον οποίο καθορίζεται το DEM που χρησιμοποιήθηκε για την αντίστοιχη εικόνα.

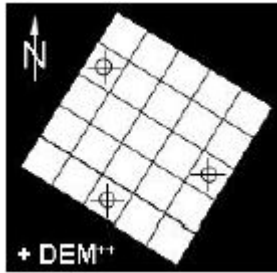
Τέλος τα προϊόντα MGD και GEC παράγονται με χρήση ενός μέσου υψομέτρου για την προβολή της σκηνής στο έδαφος και για αυτόν τον λόγο έχουν περιορισμένη ακρίβεια εντοπισμού (Eidener et al., 2010).

2.10 Βελτιωμένα Προϊόντα

Τα βελτιωμένα προϊόντα TerraSAR – X, αποτελούν κυρίως προϊόντα τα οποία έχουν εστιαστεί σε συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος ή αντιπροσωπεύουν χαρτογραφικά προϊόντα τα οποία έχουν υποστεί ένα υψηλότερο επίπεδο επεξεργασίας όπως ραδιομετρική διόρθωση και ορθοαναγωγή, δημιουργία μωσαϊκών, υποεικόνων αλλά και συγχωνεύσεις. Τα συγκεκριμένα προϊόντα συνοδεύονται και από επιπρόσθετη βοηθητική πληροφορία. Επιπλέον είναι δυνατόν να προκύψουν βελτιωμένα προϊόντα από άλλα βελτιωμένα προϊόντα, όπως π.χ. δημιουργία μωσαϊκού ραντάρ από ορθοαναηγμένες εικόνες υψηλής ανάλυσης.

2.10.1 ORI^{SAR} – Orthorectified Image

Το συγκεκριμένο προϊόν αποτελεί γεωκωδικοποιημένη εικόνα υψηλής ακρίβειας, στην οποία περιλαμβάνονται και οι διορθώσεις λόγω αναγλύφου. Με αυτόν τον τρόπο έχουν αφαιρεθεί οι εκτροπές λόγω αναγλύφου. Επίσης, εξαιτίας της σημαντικής επίδρασης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους στην ακρίβεια εντοπισμού εικονοστοιχείων στην ορθοαναηγμένη εικόνα, χρησιμοποιούνται ψηφιακά μοντέλα εδάφους υψηλής ακρίβειας για την παραγωγή των προϊόντων ORI^{SAR}. Αυτό οδηγεί σε εντοπισμό εικονοστοιχείων υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 2.19: ORI^{SAR} – Orthorectified Image.

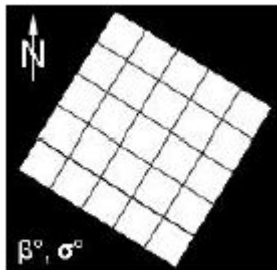
(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

Οι τυπικές χαρτογραφικές προβολές που χρησιμοποιούνται είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84.

2.10.2 RaN^{SAR} – Radiometrically Corrected Image

Τα συγκεκριμένα προϊόντα έχουν υποστεί επιπλέον ραδιομετρική βαθμονόμηση από αυτή των βασικών προϊόντων και έχουν διορθωθεί από σκέδαση περιοχής τοπικών εικονοστοιχείων και τοπικής γωνίας πρόσπτωσης.

Οι τυπικές χαρτογραφικές προβολές που χρησιμοποιούνται είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84. Η ραδιομετρική διόρθωση συνίσταται για εικόνες που πρόκειται να υποστούν κάποια είδους ταξινόμηση, καθώς επίσης και στην περίπτωση χρήσης πολλών γειτονικών εικόνων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση ενός ενιαίου μωσαϊκού, με αποτέλεσμα την ελάττωση των ραδιομετρικών μεταβολών στο τελικό προϊόν.

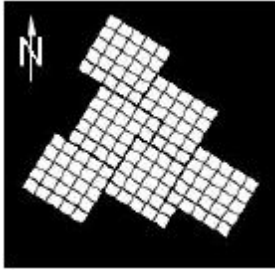


Εικόνα 2.20: RaN^{SAR} – Radiometrically Corrected Image.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.10.3 MC^{SAR} - Mosaic

Προκειμένου να καλυφθεί μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή σε σχέση με μία τυπική σκηνή, τότε ενώνονται γειτονικές γεωκωδικοποιημένες ή ορθοανηγμένες εικόνες και προκύπτει ένα ενιαίο μωσαϊκό. Προϊόντα τα οποία δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως πρωτογενές υλικό για τη δημιουργία μωσαϊκού είναι τα ORI^{SAR}, EEC ή GEC.



Εικόνα 2.21: MC^{SAR} - Mosaic.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικές γραμμές, όπως π.χ. οδικό δίκτυο, με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η ένωση των εικόνων, χωρίς να φαίνονται ραφές, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του τελικού μωσαϊκού. Επίσης όλες οι σκηνές είναι ραδιομετρικά ισορροπημένες.

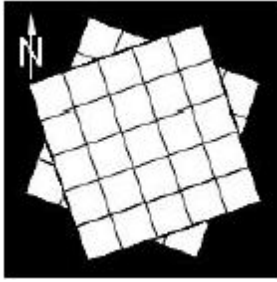
Τέλος οι τυπικές χαρτογραφικές προβολές που χρησιμοποιούνται είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84, ενώ το τελικό προϊόν δύναται να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή χάρτη.

2.10.4 ADM^{SAR} – Ascending/Descending Merge

Το συγκεκριμένο προϊόν, αποτελεί προϊόν συγχώνευσης εικόνων σε τροχιά. Παράδειγμα αποτελεί ο συνδυασμός εικόνων SAR από καθοδικές και ανοδικές δεξιάς όψης τροχιές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την διαδικασία ανάλυσης εικόνας. Με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μείωση της επίδρασης τυπικών φαινομένων, όπως σκίαση και πτύχωση, τα οποία συνήθως είναι ορατά και ενδέχεται να θέσουν διάφορα τμήματα υπό διερεύνηση.

Ως δεδομένα εισαγωγής για την παραγωγή των συγκεκριμένων προϊόντων χρησιμοποιούνται τα προϊόντα EEC, ORI^{SAR} και MC^{SAR}, ενώ τυπικές χαρτογραφικές προβολές που χρησιμοποιούνται είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84.

Τέλος τα συγκεκριμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται για περιοχές με ορεινούς όγκους με απότομες κλίσεις, όπου τα φαινόμενα της σκίασης και της πτύχωσης, δημιουργούν προβλήματα στη διαδικασία της ανάλυσης.



Εικόνα 2.22: ADM^{SAR} – Ascending/Descending Merge.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.11 Βοηθητικά Προϊόντα

Όλα τα βελτιωμένα προϊόντα TerraSAR, συνοδεύονται από βοηθητικά raster προϊόντα τα οποία περιέχουν πληροφορίες για μετατροπές, πληροφορίες θέσης, καθώς επίσης και άλλες βοηθητικές πληροφορίες. Ανάλογα με το είδος του βελτιωμένου προϊόντος υπάρχει και το αντίστοιχο διαθέσιμο βοηθητικό προϊόν. Όλα τα διαθέσιμα βοηθητικά προϊόντα αναλύονται παρακάτω:

- Geocoded Incidence Angle Mask (GIM): περιέχει πληροφορίες της τοπικής γωνίας πρόσπτωσης και της θέσης σκίασης και πύχωσης. Επιπλέον δύναται να χρησιμοποιηθεί για περεταίρω επεξεργασία, όπως ραδιομετρική βαθμονόμηση με χρήση της πληροφορίας για τη γωνία πρόσπτωσης. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο για τα προϊόντα EEC, ORI^{SAR}, RAN^{SAR}, καθώς και για οποιοδήποτε άλλο προϊόν το οποίο προέρχεται από αυτά.
- Incidence Angle Mask (IAM): αποτελεί μία εναλλακτική παρουσίαση της πληροφορίας τοπικής γωνίας πρόσπτωσης. Οι τιμές δεν είναι κωδικοποιημένες και για αυτόν τον λόγο το προϊόν αυτό δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας για περεταίρω επεξεργασία, όπως ραδιομετρική βαθμονόμηση. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο για τα προϊόντα ORI^{SAR}, RAN^{SAR}, καθώς και για οποιοδήποτε άλλο προϊόν το οποίο προέρχεται από αυτά.
- Layover and Shadow Mask (LSM): αποτελεί επίσης εναλλακτική παρουσίαση της πληροφορίας τοπικής γωνίας πρόσπτωσης. Περιέχει όλες εκείνες τις διαθέσιμες πληροφορίες για περιοχές σκίασης και πύχωσης που υπάρχουν στην εικόνα. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο για τα προϊόντα ORI^{SAR}, RAN^{SAR}, καθώς και για οποιοδήποτε άλλο προϊόν το οποίο προέρχεται από αυτά.
- Local Resolution Mask (LES): προσδιορίζει την πραγματική διακριτική ανάλυση στο έδαφος, του συστήματος SAR, η οποία εξαρτάται από την τοπική τοπογραφία της περιοχής αλλά και από τη γωνία πρόσπτωσης για κάθε εικονοστοιχείο. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο για τα προϊόντα ORI^{SAR}, καθώς και για οποιοδήποτε άλλο προϊόν το οποίο προέρχεται από αυτά.

- Source Mask (SOU): παρέχει μία συγκεκριμένη αριθμητική τιμή, η οποία επιτρέπει την ταυτοποίηση κάθε πρωτογενούς εικόνας εισαγωγής για κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία εξαγωγής. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο για τα προϊόντα MC^{SAR} και ADM^{SAR}, όπως και για τα προϊόντα OI^{SAR}.
- Enumeration files: τα συγκεκριμένα αρχεία αποτελούνται από τα αρχεία Along Track Enumeration file (ALT) και Across Track Enumeration file (ACT). Τα δύο τελευταία αρχεία δίνουν πληροφορίες για την πραγματική θέση της γεωμετρίας του συστήματος SAR (απόσταση – αζιμούθιο) για κάθε εξαγόμενο εικονοστοιχείο. Τα αρχεία αυτά είναι χρήσιμα για μετατροπές μεταξύ κεκλιμένων αποστάσεων και γεω-κωδικοποιημένων γεωμετριών. Το προϊόν αυτό είναι διαθέσιμο μόνο για τα προϊόντα ORI^{SAR} στην περίπτωση μόνο που τελευταία παράγεται με χρήση DEM.

Ο πίνακας 2-10 παρέχει εν συντομία τη διαθεσιμότητα των βοηθητικών προϊόντων ανά είδος βελτιωμένου προϊόντος TerraSAR – X.

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

Πίνακας 2.10: Διαθεσιμότητα Βοηθητικών Αρχείων TerraSAR - X.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.12 Υπηρεσίες Πελατών

Οι συγκεκριμένες υπηρεσίες είναι διαθέσιμες τόσο για τα βασικά όσο και για τα βελτιωμένα προϊόντα TerraSAR – X και παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.12.1 Oriented Image (OISAR)

Το συγκεκριμένο προϊόν αποτελεί τμήμα μίας ορθοανηγμένης ή γεωκωδικοποιημένης εικόνας ή ενός μωσαϊκού. Το τμήμα ενδιαφέροντος προσδιορίζεται από τον ενδιαφερόμενο με την παροχή πολυγώνου ή συντεταγμένων της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι τυπικές χαρτογραφικές προβολές που χρησιμοποιούνται είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84.

2.12.2 Διαθέσιμες Προβολές

Οι τυπικές χαρτογραφικές προβολές τόσο για τα βασικά όσο και για τα βελτιωμένα προϊόντα TerraSAR – X είναι οι UTM ή UPS, με ελλειψοειδές αναφοράς το WGS84. Εάν ζητηθεί υπάρχει δυνατότητα μετατροπής σε χαρτογραφική προβολή ενδιαφέροντος.

2.12.3 Μορφότυπος Δεδομένων

Για όλα τα προϊόντα TerraSAR – X, ο τυπικός μορφότυπος παράδοσής τους είναι Geotiff, ενώ ο μορφότυπος παροχής μεταδεδομένων είναι xml. Βέβαια υπάρχει δυνατότητα παροχής και σε άλλους μορφότυπους αρχείων, κατόπιν παραγγελίας, όπως NITF, ERDAS IMG, Geomatics PIX, κτλ.

2.12.4 Scaling

Όλα τα προϊόντα TerraSAR – X που παράγονται είναι 16 bit. Μόνο σε περιπτώσεις που ζητηθεί, όπως π.χ. για οπτικούς σκοπούς σε χαρτογραφικές εφαρμογές, τότε το προϊόν δύναται να υποβαθμιστεί σε 8 bit.

2.13 Μεγέθη Αρχείων

Για τα βασικά προϊόντα TerraSAR – X, το μέγεθος του αρχείου εξαρτάται από την τεχνική απεικόνιση, το είδος του προϊόντος, την ανάλυση της εικόνας και από την πόλωση αυτής. Για τα βελτιωμένα προϊόντα ORI^{SAR} και RAN^{SAR} τα μεγέθη αρχείων είναι παρόμοια με αυτά των βασικών προϊόντων ενώ για τα υπόλοιπα βελτιωμένα προϊόντα, το μέγεθος του αρχείου εξαρτάται από την έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Στον πίνακα 2-11 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα μεγέθη αρχείων των βασικών προϊόντων.

Imaging mode	Polarisation Mode	Minimum and Maximum Number of Pixels of an MGD Product	Product Size [Mb] MGD, GEC or EEC	Product Size [Mb] SSC
High Resolution SpotLight	Single	2.000 x 1.000 to 2.500 x 6.250	12 to 313	single polarisation: 275 dual polarisation: 196
SpotLight	Single	~1.430 x ~1.430 to 10.000 x 10.000	12 to 400	single polarisation: 244 dual polarisation: 166
StripMap	Single	7.500 x 12.500 to 20.000 x ~33.300	375 to 2667	4400
	Dual	~1.670 x ~5.550 to 5.000 x ~16.700	56 to 500	1760
ScanSAR	Single	12.500 x 18.750	938 to 1224	N/A

Πίνακας 2.11: Μεγέθη Αρχείων Βασικών Προϊόντων TerraSAR - X.

(Πηγή: TerraSAR – X Image Product Guide, infoterra GmbH 12/2009)

2.14 Ανακεφαλαίωση

Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και αναπτύχθηκαν τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος TerraSAR – X, καθώς επίσης παρουσιάστηκαν και αναπτύχθηκαν όλες οι δυνατές τεχνικές απεικόνισης (Image Modes), τα βασικά, βελτιωμένα και βοηθητικά προϊόντα του συστήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3), γίνεται μία αναφορά στα μοντέλα και μεθόδους αναφοράς που δύνανται να εφαρμοστούν σε ψηφιακά προϊόντα εικόνων.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

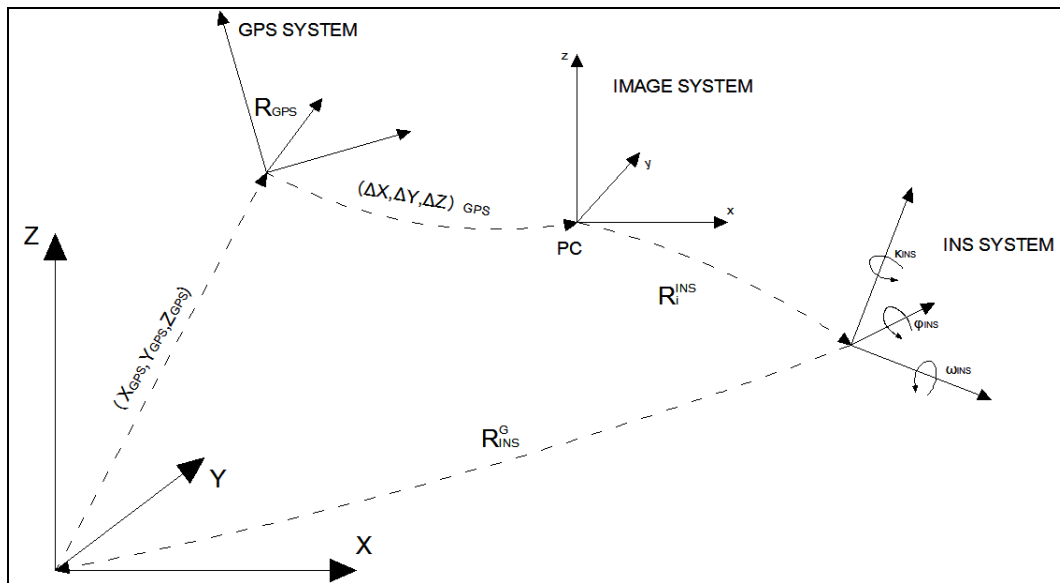
Η διαδικασία της γεωαναφοράς διακρίνεται σε απευθείας και σε έμμεση γεωαναφορά. Η απευθείας γεωαναφορά μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν είναι γνωστή η γεωμετρία των πρωτογενών στοιχείων που λαμβάνονται από τον δορυφόρο. Η γεωμετρία αυτή επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες (Τσιγγενόπουλος, 2011):

- Τον εσωτερικό προσανατολισμό του δέκτη
- Τον εξωτερικό προσανατολισμό του δέκτη (θέση και προσανατολισμός του ως προς ένα επίγειο σύστημα)
- Τις στροφές ανάμεσα στον αισθητήρα και το σύστημα του δέκτη
- Την τοπογραφία της περιοχής της Γης που ενδιαφέρει το χρήστη

Για να πραγματοποιηθεί απευθείας γεωαναφορά, πρέπει οι παραπάνω παράμετροι να είναι γνωστές και με επαρκή ακρίβεια. Στην περίπτωση που η ακρίβεια είναι πολύ μεγάλη, τότε είναι πιθανό να μη χρειάζονται φωτοσταθερά στη διαδικασία της αναγωγής. Ο εσωτερικός προσανατολισμός του δέκτη πρέπει να είναι γνωστός εξαρχής από εργαστηριακές διαδικασίες βαθμονόμησης ή βαθμονόμηση κατά την λήψη. Ο εξωτερικός προσανατολισμός πρέπει να υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της λήψης των εικόνων με τη χρήση των μετρήσεων GPS για τη θέση και μετρήσεων INS (Inertial Navigation System) για τον προσανατολισμό.

Η επιρροή της τοπογραφίας της περιοχής στη γεωαναφορά, εξαρτάται από το υψόμετρο πτήσης και το οπτικό πεδίο του αισθητήρα.

Οι παρατηρήσεις που παρέχονται από τα συστήματα GPS/INS δεν αναφέρονται στο σύστημα του δέκτη: τα δεδομένα θέσης αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα με διεύθυνση αυτή της κεραίας του GPS και τα δεδομένα προσανατολισμού αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα επίσης που έχει το κέντρο του στο όργανο του συστήματος INS. Αυτά τα δύο συστήματα μετακινούνται και στρέφονται ώστε να γίνουν παράλληλα με εκείνο της εικόνας. Παρ' όλα αυτά απαιτείται οι εξισώσεις συγγραμμικότητας να επεκταθούν περαιτέρω προκειμένου να συμπεριλάβουν τα διανύσματα μετατόπισης και τις μη συμβατές γωνίες που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των παραπάνω συστημάτων (Καροπούλου, 2007).



Εικόνα 3.1: Συστήματα αναφοράς που συμμετέχουν στην απευθείας γεωαναφορά.

(Πηγή: Καροπούλου, 2007)

Στην έμμεση γεωαναφορά, με την προϋπόθεση ότι η ασυμβατότητα μεταξύ των γωνιών που προαναφέρθηκαν είναι γνωστή, οι επίγειες συντεταγμένες των σημείων, που παρατηρούνται στο στερεοζεύγος εικόνων, μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση εμπροσθομορφίας. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, οι μεταθέσεις που παρέχονται από μετρήσεις GPS και οι γωνίες στροφής που δίνουν τα συστήματα INS δεν είναι διαθέσιμες και κατά συνέπεια δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας γεωαναφορά. Για τις παραμέτρους αυτές πρέπει να πραγματοποιηθούν διαδικασίες βαθμονόμησης μετά την πτήση, μαζί με επιπρόσθετες μετρήσεις σφαλμάτων που μπορεί να συμπεριλαμβάνονται στις παρατηρήσεις των συστημάτων GPS/INS. Η λύση του προβλήματος επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση στον κυρίως φωτογραμμετρικό τριγωνισμό κατάλληλων εξισώσεων που μοντελοποιούν τον εξωτερικό προσανατολισμό του αισθητήρα και λαμβάνουν υπόψη τις μετρήσεις των GPS/INS. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μοντέλο έμμεσης γεωαναφοράς, ενώ τα προτεινόμενα μοντέλα περιλαμβάνουν εξισώσεις που εξαρτώνται από το χρόνο (Καροπούλου, 2007).

Η σύνδεση των εικονοσυντεταγμένων με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες ή αλλιώς η γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων ή αλλιώς ο προσανατολισμός των εικόνων, μπορεί να γίνει με εφαρμογή (Ιωαννίδης, 2007):

- Προσεγγιστικού μαθηματικού μοντέλου (Non – Rigorous model)
Ο μετασχηματισμός ανάμεσα στο χώρο της εικόνας και στο χώρο του αντικειμένου εκφράζεται με γενικευμένες σχέσεις χωρίς να μοντελοποιείται η φυσική διαδικασία απεικόνισης.
- Αυστηρού μαθηματικού μοντέλου δέκτη (Rigorous model)
Πολυπλοκότητα του μαθηματικού μοντέλου, ενώ υπάρχει διαφορετική

γεωμετρία σε κάθε δέκτη και τέλος υπάρχουν δέκτες με άγνωστη γεωμετρία.

Το αυστηρά μαθηματικό μοντέλο ή φυσικό μοντέλο αντιπροσωπεύει τη φυσική διαδικασία απεικόνισης. Οι παράμετροι που εμπλέκονται σε αυτό περιγράφουν τη θέση και τον προσανατολισμό ενός αισθητήρα με βάση ένα γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Τα φυσικά μοντέλα περιλαμβάνουν τις αυστηρά μαθηματικά προσδιορισμένες εξισώσεις συγγραμμικότητας και γενικά δίνουν υψηλή ακρίβεια (της τάξης του ενός εικονοστοιχείου). Στα φυσικά μοντέλα οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και κάθε μία από αυτές έχει φυσική σημασία. Βέβαια επιπλέον βελτίωση του μοντέλου μπορεί ακόμη να επιτευχθεί με την προσθήκη παραμέτρων βαθμονόμησης (Καροπούλου, 2007).

Παρ' όλο που τα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα αισθητήρων είναι περισσότερο ακριβή, προτιμούνται σε μεγάλο βαθμό τα προσεγγιστικά μοντέλα τα οποία είναι ανεξάρτητα από την πλατφόρμα και τους τύπους του αισθητήρα. Στα προσεγγιστικά μοντέλα ο μετασχηματισμός ανάμεσα στο χώρο της εικόνας και το χώρο του αντικειμένου εκφράζεται με γενικευμένες σχέσεις χωρίς να μοντελοποιείται η φυσική διαδικασία απεικόνισης. Συνεπώς τα μοντέλα αυτά, ανάλογα με τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε αφινικά (affine), τα DLT (Direct Linear Transformation) και τα RFM (Rational Functions Models). Η περιγραφή ανάμεσα στην εικόνα και τις συντεταγμένες του αντικειμένου γίνεται μέσω (Καροπούλου, 2007):

- 2D και 3D πολυωνύμων
- Πηλίκων πολυωνύμων, πιο συνηθισμένα 3^{ης} τάξης (Rational Function Model-RFM ή Rational Polynomial Coefficients-RPC)

τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή δισδιάστατης ή τρισδιάστατης πληροφορίας για μονοεικονική ή στερεοσκοπική επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, χωρίς να απαιτείται αναφορά στο μοντέλο του δέκτη ή στην εφημερίδα του δορυφόρου και χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό από επίγεια φωτοσταθερά (RFM-1) ή για να προσεγγιστεί το αυστηρά μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα το οποίο εμπεριέχεται σε βοηθητικά αρχεία των εικόνων (RFM-2).

3.1 Προσεγγιστικά Μαθηματικά Μοντέλα

3.1.1 Αφινικός Μετασχηματισμός

Ο αφινικός μετασχηματισμός που συνδέει τον τρισδιάστατο χώρο του αντικειμένου (X, Y, Z) με το δισδιάστατο χώρο της εικόνας (x, y) περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned}x &= A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \\y &= A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8\end{aligned}\tag{3-1}$$

Όπου :

$A_1 - A_8$ οι παράμετροι που περιγράφουν τις τρεις στροφές των αξόνων, την αποχή από την καθετότητα, τις δύο μετατοπίσεις (κατά x και κατά y), και τους κατά x και κατά y συντελεστές κλίμακας.

x, y οι συντεταγμένες κατά γραμμή και στήλη

X, Y, Z οι επίγειες συντεταγμένες σε καρτεσιανό σύστημα

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να περιγραφεί η σχέση του αφινικού προβολικού μοντέλου με το προοπτικό μοντέλο που εκφράζεται με τη συνθήκη της συγγραμμικότητας. Συγκεκριμένα, η γενική μορφή του αφινικού μετασχηματισμού είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ A_5 & A_6 & A_7 & A_8 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} & A_{12} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}\tag{3-2}$$

Ωστόσο, η τελευταία εξίσωση είναι:

$$1 = A_9 X + A_{10} Y + A_{11} Z + A_{12}\tag{3-3}$$

Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τη συνθήκη της συγγραμμικότητας σχηματίζονται δύο αντί για τρεις εξισώσεις που συνδέουν γραμμικά το σύστημα του αντικειμένου με το σύστημα της εικόνας. Στην πραγματικότητα η παραδοχή της ενιαίας κλίμακας είναι το κλειδί για τη μετατροπή της μη γραμμικής συνθήκης συγγραμμικότητας σε μία μορφή απλού γραμμικού μετασχηματισμού (Καροπούλου, 2007).

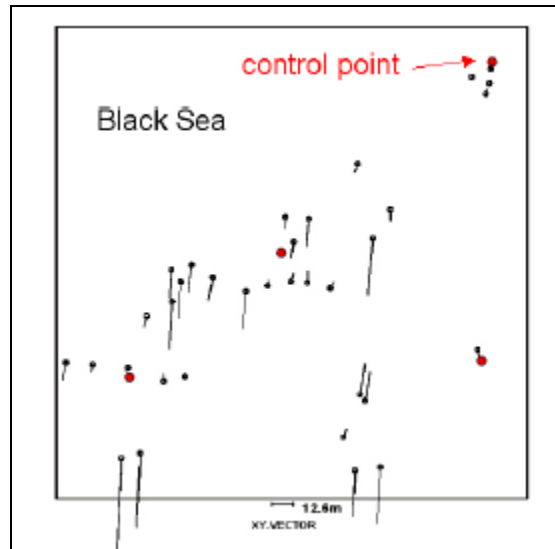
Κατά την τρισδιάστατη αναπαράσταση του αντικειμένου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα μοντέλο, που είναι διαμορφωμένο για ένα στερεοζεύγος αφινικών εικόνων, από τέσσερα σημεία σύνδεσης, και μπορεί να συνδεθεί με το χώρο του αντικειμένου από ένα τρισδιάστατο αφινικό μετασχηματισμό (12 βαθμοί ελευθερίας). Από την άλλη πλευρά, για την ειδική περίπτωση της κεντρικής προβολής όπου η εσωτερική γεωμετρία είναι γνωστή, απαιτούνται πέντε σημεία για να διαμορφωθεί ένα μοντέλο που στη συνέχεια μετασχηματίζεται στο χώρο του αντικειμένου με ένα μετασχηματισμό ομοιότητας (7 βαθμοί ελευθερίας). Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο προσεγγίσεων έγκειται στην ύπαρξη μη ενιαίας κλίμακας και μη καθετότητας των αξόνων και στον διαφορετικό συντελεστή κλίμακας σε κάθε άξονα του χώρου του μοντέλου. Για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο σωστού σχήματος από εικόνες που έχουν υποστεί αφινικό μετασχηματισμό, πρέπει να επιβληθούν δεσμεύσεις μεταξύ των παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού, οι οποίες να περιγράφουν την

ορθογωνικότητα και την ομοιόμορφη κλίμακα. Ακόμη, πρέπει να προστεθεί μία τρίτη εικόνα προκειμένου να απαλειφθεί η ασάφεια που προκύπτει από την παραδοχή ενός ενιαίου συντελεστή κλίμακας.

Για δορυφορικούς γραμμικούς σαρωτές, όμως, αυτές οι παράμετροι μπορούν να αγνοηθούν λόγω της γεωμετρίας των αισθητήρων Pushbroom. Στα συστήματα εικόνων με περιορισμένο οπτικό πεδίο, αβεβαιότητες και αποκλίσεις λόγω του αισθητήρα και άλλες παράμετροι της αφινικής διαστροφής, σπάνια έχουν σημασία. Αυτό επιτρέπει ακόμα, τη χρήση του αφινικού μοντέλου με αρκετή ακρίβεια τόσο σε ενδιάμεσο στάδιο επεξεργασίας εικόνων (π.χ. αναγωγή) όσο και σε πρωτογενή στοιχεία εικόνας.

Το αφινικό μοντέλο αρχικά εφαρμόστηκε με επιτυχία για τον προσανατολισμό των εικόνων του δορυφόρου SPOT και MOMS-2P (Hattori et al., 2000; Okamoto et al., 1998; 1999) και έχει χαρακτηριστικά που δεικνύουν καταλληλότητα για Υψηλής Ανάλυσης Δορυφορικές Εικόνες (HRSI). Αποτελέσματα ερευνών επικεντρωμένων στη λειτουργία του αφινικού μοντέλου, έχουν δείξει ακόμη ότι μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια μικρότερη του ενός μέχρι ένα pixel για στερεοαπόδοση ζεύγους εικόνων από τον δέκτη του IKONOS. Παρά τα αποτελέσματα αυτά υπάρχουν αρκετές αμφιβολίες σχετικά με την προσαρμοστικότητα του μοντέλου. Αυτές οφείλονται κυρίως στο ότι σε κάποιες περιπτώσεις δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό ότι το δορυφορικό σύστημα της εικόνας λειτουργεί με γραμμικό τρόπο (Καροπούλου, 2007).

Οι Jacobsen, Büyüksalih, Topan, στο άρθρο τους «Geometric Models for the Orientation of High Resolution Optical Satellite Sensors», αναφέρουν την εφαρμογή 3D αφινικού μετασχηματισμού σε δορυφορικές εικόνες IKONOS σε ένα πεδίο στην περιοχή Zonguldak της Τουρκίας. Στο συγκεκριμένο πεδίο μετρήθηκαν control points με δέκτες GPS με επαρκή ακρίβεια. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα του προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων με τη βοήθεια του 3D αφινικού μετασχηματισμού και με χρήση 4 ομοιόμορφα κατανεμημένων control points, τα οποία είχαν αρκετά διαφορετικές τιμές στο υψόμετρο. Επίσης ανεξάρτητα σημεία ελέγχου οδήγησαν σε μη αποδεκτά $RMSX=1.91m$ και $RMSY=18.53m$. Το γεωμετρικό πρόβλημα φάνηκε από τους συντελεστές συσχέτισης $r=0.999$, με αποτέλεσμα αυτό να επισημανθεί από το πρόγραμμα του πανεπιστημίου του Ανόβερου TRAN3D (Jacobsen et al., 2005).



Εικόνα 3.2: IKONOS, Zonguldak 3D-αφινικός μετασχηματισμός βασισμένος σε 4 control points και σε ανεξάρτητα check points με $RMSX=1.91m$ & $RMSY=18.53m$.

(Πηγή: Jacobsen et al.)

Οι *Dial, Grodecki*, στο άρθρο τους «*RPC Replacement Camera Models*», αναφέρουν μεταξύ άλλων ότι πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν τη γεωμετρία δορυφορικών εικόνων με τη βοήθεια του αφινικού μετασχηματισμού. Το αφινικό μοντέλο ουσιαστικά καταρρέει στο βαθμό που η γωνία λήψης δεν είναι σταθερή σε όλη την εικόνα. Η γωνία λήψης μπορεί να αλλάξει στο πεδίο λήψης δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης (π.χ. η δορυφορική εικόνα IKONOS έχει 0.9° FOV) αισθητά εξαιτίας της σάρωσης των δορυφόρων Pushbroom και ιδιαίτερος όταν η λωρίδα είναι μεγάλη ή δεν είναι παράλληλη της κίνησης του δορυφόρου. Τέλος παρ' όλο που τα αφινικά μοντέλα έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μερικές περιπτώσεις, σε άλλες έχουν παρουσιαστεί σημαντικές δυσκολίες στην περιγραφή του μοντέλου του αισθητήρα (Dial et al., 2005).

Οι *Vozikis, Fraser, Jansa*, στο άρθρο τους «*Alternative Sensor Orientation Models For High Resolution Satellite Imagery*», συγκρίνουν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μη παραμετρικών μοντέλων σε δορυφορικές εικόνες IKONOS και SPOT στις περιοχές της Αθήνας, της Μελβούρνης και του Σαν Ντιέγκο. Παρατηρήθηκε ότι με τη χρήση 8 GCPs, σε κάθε σκηνή, το μοντέλο που προσέγγιζε καλύτερα το γεωμετρικό μοντέλο του SPOT και του IKONOS καλύτερα, ήταν αυτό που προέκυπτε με τον αφινικό μετασχηματισμό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αφινικός μετασχηματισμός, αποτελεί το περισσότερο αξιόπιστο μοντέλο για την αξιοποίηση δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης, με ακρίβειες οι οποίες είναι κάτω του ενός εικονοστοιχείου (Vozikis et al., 2003).

3.1.2 DLT Μετασχηματισμός

Ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός DLT, είναι στην ουσία ένας γραμμικός μετασχηματισμός, του οποίου η επίλυση βασίζεται μόνο στα επίγεια σημεία ελέγχου

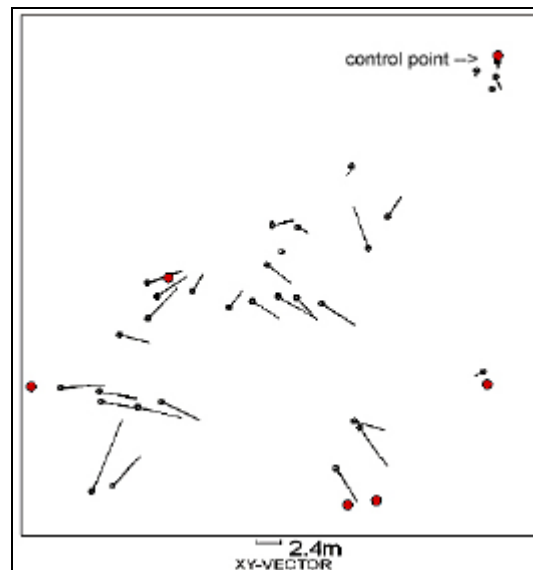
και δεν απαιτεί τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού ούτε την πληροφορία της εφημερίδας του δορυφόρου. Η προσέγγιση του DLT προτάθηκε για τη γεωμετρική μοντελοποίηση των εικόνων του SPOT (El Manadili and Novak, 1996) και εφαρμόστηκε στις εικόνες του IRS-1C (Savorol and Armenakis, 1998). Στην προσέγγιση (Wang, 1999) βελτιώθηκε με επιπλέον διορθώσεις στην αυτοβαθμονόμηση. Σε γενικές γραμμές, οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε 2Δ και 3Δ εμπειρικά μοντέλα, όπως αυτά που παρουσιάζονται, είναι συμφέρουσες αν το αυστηρό μαθηματικό μοντέλο ή οι παράμετροι του συστήματος λήψης δεν είναι διαθέσιμες. Τα DLT τέλος αφορούν σε γραμμική προσέγγιση της συνθήκης συγγραμμικότητας χωρίς χρήση προσεγγιστικών τιμών. Συνήθως έχουν επικουρικό ρόλο καθώς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αρχικών τιμών όταν εφαρμόζεται η MET σε άλλα μοντέλα (Καροπούλου, 2007).

Πιο συγκεκριμένα εκφράζει την προβολική σχέση εικόνας- τρισδιάστατου χώρου μέσω 11 παραμέτρων ως εξής:

$$x = \frac{b_{11} * X + b_{12} * Y + b_{13} * Z + b_{14}}{b_{31} * X + b_{32} * Y + b_{33} * Z + 1} \quad (3-4)$$

$$y = \frac{b_{21} * X + b_{22} * Y + b_{23} * Z + b_{24}}{b_{31} * X + b_{32} * Y + b_{33} * Z + 1} \quad (3-5)$$

Οι Jacobsen, Büyüksalih, Topan, στο άρθρο τους «Geometric Models for the Orientation of High Resolution Optical Satellite Sensors», αναφέρουν την εφαρμογή DLT μετασχηματισμού σε δορυφορικές εικόνες IKONOS σε ένα πεδίο στην περιοχή Zonguldak της Τουρκίας. Στην περίπτωση αυτή οι 11 άγνωστοι του μετασχηματισμού για τη συσχέτιση μεταξύ των συντεταγμένων του αντικειμένου και αυτών της εικόνας προσδιορίζονται με τουλάχιστον 6 σημεία. Το μικρό πεδίο λήψης που έχουν οι εικόνες υψηλής ανάλυσης, μαζί με τη περιορισμένη, από πλευράς υψομέτρου, κατανομή των αντικειμένων και σε σχέση με το υψόμετρο πτήσης του δορυφόρου, οδήγησε σε αριθμητικά προβλήματα. Ο DLT μετασχηματισμός βασίζεται σε μία προοπτική γεωμετρία της εικόνας, η οποία είναι διαθέσιμη μόνο κατά την κατεύθυνση της γραμμής CCD.



Εικόνα 3.3: IKONOS, Zonguldak DLT μετασχηματισμός βασισμένος σε 6 control points και σε ανεξάρτητα check points με $RMSX=2.4m$ & $RMSY=2.4m$.

(Πηγή: Jacobsen et al., 2005)

Οι *Manadili* και *Novak* (1996), εφάρμοσαν μία απλή μαθηματική μέθοδο που βασίζεται στον DLT μετασχηματισμό, προκειμένου να εξηγήσουν τη γεωμετρία λήψης των εικόνων του δορυφόρου SPOT. Η μέθοδος που πρότειναν εφαρμόστηκε αφού έγινε πρώτα διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων από διαστροφές, λόγω της περιστροφής της γης και από διαφορετικά μεγέθη ρίξει λόγω της απόκλισης της λήψης από την αυστηρά κατακόρυφη. Επιπρόσθετα, παρέχονται διορθώσεις για άλλου είδους συστηματικά σφάλματα. Προκειμένου να αξιολογηθεί η προσέγγιση αυτή, γίνονται δοκιμές με πραγματικά και φανταστικά δεδομένα. Τα δεδομένα προσομοίωσης προκύπτουν από ένα γενικό μοντέλο που θεωρείται ότι περιγράφει την τροχιά του SPOT χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Euler, τις μεταπτώσεις του δορυφόρου και τα διανύσματα ταχυτήτων, όσο και τις γωνίες προσανατολισμού του αισθητήρα ως συναρτήσεις του χρόνου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ακρίβεια καλύτερη του ενός ρίξει, που μπορεί να επιτευχθεί με τουλάχιστον 6 φωτοσταθερά. Ωστόσο, εξετάζονται κι άλλες παράμετροι που απορροφούν σφάλματα όπως εκείνα των εικονοσυντεταγμένων, του αριθμού και της ποιότητας των επιγείων σημείων ελέγχου και του λόγου B/h.

3.1.3 RFM (Rational Function Models)

Τα RFM αποτελούν υποκατηγορία των προσεγγιστικών μοντέλων και χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερη κλίμακα εν συγκρίσει με τον αφινικό και τον DLT μετασχηματισμό .

Πρόκειται για ρητές συναρτήσεις (πολυώνυμα ή πολυωνυμικά κλάσματα), που περιέχουν όλη την πληροφορία για τον προσανατολισμό των εικόνων. Περιλαμβάνουν πολλές περισσότερες παραμέτρους από τα αφινικά μοντέλα και τα μοντέλα DLT. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι κάθε μία συνάρτηση αποτελείται από δύο

DLT, έναν στον αριθμητή και έναν στον παρονομαστή. Οι συντελεστές των πολυωνύμων αυτών όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν έχουν κάποια φυσική σημασία. Συνήθως παρέχονται οι συντελεστές των πολυωνύμων μαζί με τα μεταδεδομένα και ο χρήστης καλείται να τους επαναπροσδιορίσει, διαδικασία γνωστή ως **refinement**. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται πρόσθετες παρατηρήσεις και με κατάλληλη επεξεργασία επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή τους στο μοντέλο της περιοχής ενδιαφέροντος. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να υποκαταστήσει ικανοποιητικά όλα τα μοντέλα αισθητήρων, όπως τα προοπτικά, εκείνα των γραμμικών σαρωτών και τα SAR (Καροπούλου, 2007).

Φυσιολογικά οι άγνωστοι αυτοί συντελεστές προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο κάρναβο αντικειμένου και τον αντίστοιχό του στην εικόνα. Συγκεκριμένα, πρώτα προσδιορίζεται ένας κανονικός κάρναβος εικόνας και οι 3D εικονοσυντεταγμένες των επιγείων σημείων του εδάφους υπολογίζονται με τη χρήση ενός 3D φυσικού μοντέλου που έχει ήδη επιλυθεί, όπως λ.χ. το SPOTCHECK+ (Kratky, 1989). Αν το μοντέλο για τη μετάβαση από την εικόνα στο έδαφος παρέχεται από τα βοηθητικά αρχεία σκηνης (όπως στους δορυφόρους SPOT-5/HRG και SPOT-5/HRS), ο κάρναβος αρχικά κατασκευάζεται στο χώρο της εικόνας και μετά προβάλλεται σε τρία διαφορετικά ύψη στο χώρο του αντικειμένου. Και στις δύο περιπτώσεις, τα σημεία του κάρναβου που αναφέρονται στο αντικείμενο και στην εικόνα χρησιμοποιούνται σαν φωτοσταθερά προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις και να υπολογιστούν οι άγνωστοι συντελεστές των πολυωνύμων (Toutin, 2004).

Η μορφή του μοντέλου RPC (Rational Polynomial Coefficients) ανάμεσα στις εικονοσυντεταγμένες και στις επίγειες συντεταγμένες δίδεται από τους παρακάτω τύπους:

$$x = \frac{p_1(X, Y, Z)}{p_3(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j a_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k} \quad (3-6)$$

$$y = \frac{p_2(X, Y, Z)}{p_3(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j b_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_m X^{i-j} Y^{j-k} Z^k} \quad (3-7)$$

Όπου a_m , b_m , c_m οι πολυωνυμικοί συντελεστές ($c_0=1$)

$$m = \frac{i(i+1)(i+2)}{6} + \frac{j(j+1)}{2} + k \quad (3-8)$$

Ο βαθμός του πολυωνύμου κάθε επίγειας συντεταγμένης και ο ολικός βαθμός όλων των επίγειων συντεταγμένων είναι μέχρι και τρίτος (3). Κατά συνέπεια, κάθε πολυώνυμο έχει 20 όρους:

$$P_1 = \left[\begin{aligned} & a_0 + a_1Z + a_2Y + a_3X + a_4ZY + a_5ZX \\ & + a_6YX + a_7Z^2 + a_8Y^2 + a_9X^2 + a_{10}ZXY \\ & + a_{11}Z^2Y + a_{12}Z^2X + a_{13}Y^2Z + a_{14}Y^2X \\ & + a_{15}ZX^2 + a_{16}YX^2 + a_{17}Z^3 + a_{18}Y^3 + a_{19}X^3 \end{aligned} \right] \quad (3-9)$$

Τα RF εφαρμόστηκαν από τον Madani (1999) προκειμένου να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Συγκεκριμένα τα σύγκρισε με τα φυσικά μοντέλα. Εξέτασε την ακρίβεια της επίλυσης με RF χρησιμοποιώντας 12 δορυφορικές σκηνές του SPOT (τύπου Level 1A) της περιοχής του Winchester στην Virginia. Με τη χρήση δύο στερεοζευγών και 50 επιγείων σημείων ελέγχου, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων εκτιμήθηκε από τις διαφορές των επίγεια μετρημένων και των υπολογισμένων φωτοσταθερών σε 0,18 m. Το αντίστοιχο για τη Z συντεταγμένη ήταν περίπου 10 m. Κατά συνέπεια, τα RF εφαρμόστηκαν επιτυχώς στις σκηνές του SPOT και με κατάλληλη επιλογή των πολυωνύμων αυτών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες των ψηφιακών φωτογραμμετρικών συστημάτων.

Οι Tao and Hu (2000; 2001b) και Tao et al. (2000) πραγματοποίησαν μία επίλυση ελαχίστων τετραγώνων για την εξαγωγή παραμέτρων των RF και εκτίμησαν την ακρίβεια προσαρμογής τους χρησιμοποιώντας δεδομένα από DEM, μία δορυφορική σκηνή από τον SPOT και μία αεροφωτογραφία. Στην έρευνά τους εξετάστηκαν διάφορα σενάρια με διαφορετικής τάξης πολυώνυμα και διαφορετικές μορφές των παρονομαστών αυτών και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Αποδείχτηκε ότι τα RF είναι ευαίσθητα ως προς τη διανομή των σημείων ελέγχου (CPs). Αν αυτά είναι ορθά κατανομημένα, τα RF συμπεριφέρονται πρακτικά καλύτερα απ' ό,τι τα κανονικά πολυώνυμα (χωρίς παρονομαστή). Οι συγγραφείς πρότειναν δύο μεθόδους προκειμένου να ανανεώνονται οι επιλύσεις των μοντέλων RF με τη χρήση επιπρόσθετων επιγείων σημείων ελέγχου (GCPs).

Τα παραπάνω αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι τα μοντέλα RF μπορούν να προσεγγίσουν τα φυσικά μοντέλα, αν εφαρμοστούν σε εικόνες γραμμικών σαρωτών ή μηχανές πλαισίου (frame cameras). Από την άλλη πλευρά, η απόλυτη ακρίβεια του προσδιορισμού της 3D απεικόνισης των σημείων του εδάφους, εξαρτάται από την ακρίβεια του φυσικού μοντέλου και της μεθόδου προσδιορισμού των RF.

Οι Fraser et al. (2001) εξέτασαν την ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων εδάφους (geopositioning) με χρήση στερεοσκοπικών εικόνων του IKONOS (IKONOS Geo imagery), σε περιοχή της Μεμβούρνης. Εξετάζονται για το σκοπό αυτό και συγκρίνονται το μοντέλο RF, ένα εκτεταμένο μοντέλο DLT και μία αφινική προβολή. Για τον προσδιορισμό 2D και 3D θέσης προέκυψε ακρίβεια καλύτερη του 1 m με τη

χρήση του RF.

Οι Baltasvias et al. (2001) εξέτασαν τα ραδιομετρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων του IKONOS καθώς και τη χρήση τους για παραγωγή ορθοφωτογραφίας και απόδοσης 3D πληροφορίας. Εκτιμήθηκε η θέση των σημείων με χρήση των ίδιων στερεοσκοπικών εικόνων της περιοχής της Μεμβούρνης. Με τη βοήθεια 4 με 8 προσδιορισμένων με ακρίβεια και καλά κατανεμημένων σημείων επιγείου ελέγχου και μία απλή μετάθεση (η οποία είναι δυνατό να απορροφήσει το συστηματικό σφάλμα που συνήθως παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των επιλύσεων με RF), επιτεύχθηκαν ακρίβειες της τάξης των 0.4-0.5 m σε οριζοντιογραφικές συντεταγμένες και της τάξης των 0.6-0.8 m σε υψομετρικές. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν στην εφαρμογή του πλήρους πακέτου των 80 πολυωνυμικών συντελεστών (RFCs) για κάθε εικόνα, ή μικρότερου αριθμού αυτών έπειτα από απομάκρυνση των όρων ανώτερης τάξης.

Οι Tao et al. (2000) παρουσίασαν πως τα RFM, σε αντίθεση με τα φυσικά μοντέλα των αισθητήρων, δεν απαιτούν επιπλέον γνώση για το κάθε είδος εικόνας, όπως παραμέτρους τροχιάς και παραμέτρους προσανατολισμού της πλατφόρμας. Επίσης για τον λόγο ότι τα αυστηρά μοντέλα δεν είναι πάντα διαθέσιμα, τα μοντέλα RFM αποτελούν ένα εναλλακτικό μοντέλο αισθητήρα για την αναγωγή της εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, διαπίστωσαν, ότι για αεροφωτογραφίες, τα μοντέλα RFM και τα πολυωνυμικά μοντέλα, είναι ικανά να αποδώσουν ικανοποιητική ακρίβεια. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η ακρίβεια παραμένει ίδια τόσο με χρήση 4^{ου} βαθμού μοντέλου RFM όσο και με τη χρήση 6^{ου} βαθμού μοντέλου RFM. Επομένως χρήση μοντέλων μεγαλύτερου βαθμού δεν απαιτούνται. Επίσης οι επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης στα μοντέλα RFM παρέχουν καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την μέθοδο της απευθείας επίλυσης.

Τέλος σημειώνεται ότι η μέθοδος της απευθείας επίλυσης είναι και αυτή επαρκής όταν είναι διαθέσιμος ικανοποιητικός αριθμός GCPs (Tao, et al., 2000).

Οι Fraser και Hanley (2005) απέδειξαν ότι το μοντέλο προσανατολισμού RPC παρουσιάζει την ίδια μετρητική αξία με τα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα τόσο για τις δορυφορικές εικόνες Ikonos όσο και για τις QuickBird. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα RPCs, τα οποία παράχθηκαν από την Space Imaging, Inc., and DigitalGlobe, Inc. είναι ισοδύναμα με τα αυστηρά μοντέλα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πρόβλημα όσον αφορά την εφαρμογή τους σε στερεοσκοπικές εικόνες, οι οποίες καλύπτουν οποιοδήποτε είδος πεδίου. Συγκρίνοντας τις δορυφορικές εικόνες Ikonos και QuickBird δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφορές. Τόσο η μία όσο και η άλλη παρέχουν τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια κατά τη διεύθυνση cross - track. Επίσης στα πεδία ελέγχου οι QuickBird είχαν λίγο καλύτερη ακρίβεια στο υψόμετρο, ενώ οι Ikonos είχαν καλύτερη along - track ακρίβεια. Το θέμα της εμφάνισης εναπομεινάντων συστηματικών σφαλμάτων κατά τη διεύθυνση along - track, έχει ιδιαίτερη σημασία για τους χρήστες οι οποίοι κάνουν χρήση μοντέλων

προσανατολισμού αισθητήρων τα οποία βασίζονται σε χαμηλού βαθμού εμπειρικές συναρτήσεις, όπως το 3D αφινικό μοντέλο. Ανάλογη εμπειρία (Fraser & Yamakawa, 2003; 2004; Noguchi et al., 2004; Hanley et al., 2002) έδειξε ότι επιτυχία με τέτοια μοντέλα είναι υψηλά εξαρτώμενη από την απουσία πηγών μεγάλων σφαλμάτων, όπως αστάθεια στην ταχύτητα σάρωσης. Ενώ οι εικόνες Ikonos οι οποίες έχουν προέλθει με αντίστροφη σάρωση δεν παρουσιάζουν τέτοιου είδους σφάλματα, δεν συμβαίνει το ίδιο με τις εικόνες οι οποίες έχουν προέλθει με εμπρός σάρωση για τις IKONOS και για τις εικόνες QuickBird. Πράγματι, οι συγγραφείς οι οποίοι έχουν μελετήσει τη συμπεριφορά των εικόνων QuickBird με χρήση χαμηλού επιπέδου εμπειρικών μοντέλων αποδεικνύεται ότι δεν παρουσιάζουν αποτελέσματα ιδιαίτερης ακρίβειας. Βέβαια, από την άλλη μεριά, η χρήση μοντέλων RPCs οδήγησε στην επίτευξη αποτελεσμάτων βέλτιστης ακρίβειας (Fraser, et al., 2005).

Οι Topolo and Poli, παρουσίασαν στο άρθρο τους τη γεωαναφορά δορυφορικής εικόνας EROS – A1, τόσο με μοντέλο RFM όσο και με αυστηρά μαθηματικό μοντέλο. Το μοντέλο RFM χρησιμοποιήθηκε σε μονοσκοπικές εικόνες, ενώ το αυστηρό μοντέλο εφαρμόστηκε σε στερεοζεύγος. Οι ακρίβειες με την εφαρμογή του μοντέλου RFM ήταν λιγότερο από μισό pixel για τα GCPs και περίπου 2 pixels για τα CPs. Το πλεονέκτημα του μοντέλου RFM είναι ότι αποτελεί μία γενικευμένη μέθοδο η οποία είναι ανεξάρτητη από την πλατφόρμα του αισθητήρα και επίσης μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικούς αισθητήρες, χωρίς να είναι γνωστή η γεωμετρία τους. Από την άλλη μεριά το μοντέλο RFM είναι πολύ ασταθές και η αποδοτικότητά του και η ακρίβειά του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την κατανομή των GCPs, το εύρος των υψομετρικών τιμών, τη συμπεριφορά του αισθητήρα και τον παράγοντα Tikonov. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να συνυπολογιστούν για κάθε εικόνα. Επίσης κακή εκτίμηση των συγκεκριμένων παραγόντων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ακρίβειας θέσης και στην εμφάνιση διαστρωφών στην τελική εικόνα. Στην περίπτωση του στερεοζεύγους που γεωαναφέρθηκε με το αυστηρά μαθηματικό μοντέλο με 8 GCPs, επιτεύχθηκε στα CPs ακρίβεια της τάξης των 1-2 pixels. Επιπλέον το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί με μία καλύτερη διερεύνηση στην ακρίβεια της γεωμετρίας του αισθητήρα. Τέλος για την περεταίρω διερεύνηση της αξιολόγησης των εικόνων EROS-A1, απαιτείται πρώτα από όλα η μέτρηση νέων σημείων στο έδαφος και στην εικόνα, με υποψηφιακή ακρίβεια, προκειμένου να συνεχιστούν οι έλεγχοι. Επιπλέον θα χρειαστεί η αξιολόγηση των αλγορίθμων, των μοντέλων RFM, οι οποίοι έχουν να κάνουν με την εξαγωγή DTM από στερεοζεύγος εικόνων (Topolo, et al).

Τα RFM μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να προσδιοριστούν οι 80 συντελεστές με κατ' ελάχιστο 40 φωτοσταθερά. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να γίνει συνόρθωση, απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές για τους αγνώστους οι οποίες προσδιορίζονται με διάφορες τεχνικές. Ο προσδιορισμός των τιμών αυτών δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί ως προς την ακρίβεια και κατά συνέπεια το σύστημα είναι δύσκολο να συνορθωθεί.

Ο δεύτερος τρόπος, είναι η διάθεση των πολυωνυμικών συντελεστών στα μεταδεδομένα και η χρήση τους για πραγματοποίηση γεωαναφοράς.

Τα RFM έχουν μεγάλη ευελιξία στη χρήση συστημάτων αναφοράς καθώς μπορούν να παρέχουν συντεταγμένες αντικειμένου σε κάθε σύστημα όπως γεωκεντρικό, γεωγραφικό ή σύστημα που αναφέρεται σε συγκεκριμένη χαρτογραφική προβολή. Επιπλέον έχουν την ιδιότητα να προσομοιάζουν ικανοποιητικά στις προοπτικές εξισώσεις. Με επαρκή πληροφορία ελέγχου (σημεία ελέγχου), μπορούν τα RFM να επιτύχουν πολύ υψηλή ακρίβεια προσαρμογής και να υποστηρίξουν μεγέθη που εξαρτώνται από το χρόνο σε καλή ταχύτητα. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο τα RFM μπορούν να αντικαταστήσουν τα μοντέλα αισθητήρων.

Επειδή δεν υπάρχουν λειτουργικές σχέσεις ανάμεσα στις παραμέτρους του φυσικού μοντέλου αισθητήρα και εκείνες των RFM, οι φυσικές παράμετροι μπορούν με δυσκολία να καλυφθούν από τα RFM και έτσι η πληροφορία του αισθητήρα μπορεί να κρατηθεί μυστική. Προκειμένου να προστατευτεί αυτή η πληροφορία κάποιες εμπορικές εταιρίες δορυφορικών δεδομένων, όπως η Space Imaging Inc., παρέχουν στους χρήστες τα RFM αντί των συντελεστών του φυσικού μοντέλου. Συνεπώς χωρίς τη γνώση των φυσικών μοντέλων, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν φωτογραμμετρικές διαδικασίες όπως ορθοαναγωγή, στερεοαναπαραγωγή και δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας (Καροπούλου, 2007).

3.2 Αυστηρά Μαθηματικά Μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα που προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Το μοντέλο που αφορά στους αισθητήρες pushbroom βασίζεται στις εξισώσεις συγγραμμικότητας που τροποποιούνται και συνδυάζονται με μεθόδους προσδιορισμού των επιδράσεων της τροχιάς. Το μοντέλο είναι πιθανό να λυθεί απευθείας αν δίδεται η κατάλληλη πληροφορία στο αρχείο των μεταδεδομένων. Είναι το πιο ακριβές μοντέλο διότι σε αντίθεση με τα μοντέλα που δεν έχουν φυσικά χαρακτηριστικά, είναι δυνατό μέσω αυτού να προσδιοριστούν οι σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν κατά τη λήψη των εικόνων από αισθητήρες pushbroom. Κατά συνέπεια καθίσταται επίσης δυνατό να προβλεφθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε μέρη της εικόνας για τα οποία δεν υπάρχουν παρατηρήσεις.

Ένα αυστηρό μοντέλο αισθητήρα θα πρέπει να περιγράφει την κατάσταση του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της λήψης (σάρωσης) των εικόνων. Έξι παράμετροι είναι αρκετές για την περιγραφή του διανύσματος της θέσης και της ταχύτητας και άλλοι τρεις για τον προσανατολισμό, σε μία χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια, για έναν αισθητήρα pushbroom το απλούστερο μοντέλο έχει εννιά άγνωστες παραμέτρους, ώστε να περιγράφεται πλήρως η κατάσταση του.

Από την άλλη πλευρά το μοντέλο θα πρέπει να έχει την ιδιότητα να προσαρμόζεται

σε διαφορετικούς αισθητήρες που σαρώνουν κατά τη διεύθυνση πτήσης τους. Για το λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται στις εξισώσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας οι οποίες, προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της γεωμετρίας λήψης των εικόνων, συνδυάζονται με στοιχεία και άλλες πληροφορίες της τροχιάς (Καροπούλου Θ., 2007).

3.2.1 Γενικά Μοντέλα Αισθητήρων (General Sensor Models)

➤ Μοντέλο Dowman – Gagan (1987; 1988)

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Gagan (1987). Αποτελεί την πρώτη προσπάθεια σύνδεσης των παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων με χρήση της γεωμετρίας της τροχιάς τους.

Αρχικά έγιναν οι εξής επισημάνσεις (Μιχάλης, 2005):

- Ο προσανατολισμός των δεδομένων SPOT πρέπει να γίνεται σε ένα γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων προκειμένου να αποφεύγονται διαστροφές οι οποίες οφείλονται στην καμπυλότητα της γης και στην προβολή του χάρτη και να τη διευκολύνουν ενσωματώνοντας πληροφορίες από πηγές μεταδεδομένων, οι οποίες ενδέχεται να είναι διαθέσιμες.
- Η παγχρωματική εικόνα του SPOT καταγράφεται σε μία περίοδο 9 sec. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής η γεωμετρία της εικόνας αυτής είναι κινηματική.

Η ανάπτυξη του μοντέλου υλοποιήθηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο, το οποίο είναι πολύ σημαντικό, διότι αξιολογείται στο συγκεκριμένο διδακτορικό ως το πιο πολύπλοκο, η φυσική σχέση μεταξύ των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού των framelets ήταν πλήρως κατανοητή. Η σχέση μεταξύ συνεχόμενων framelets χαρακτηρίζεται από δυναμικό προσανατολισμό παραμέτρων, οι οποίοι μοντελοποιούνται από χαμηλού βαθμού πολυώνυμα. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε μία εντατική προσπάθεια προκειμένου να προσδιοριστεί ο βαθμός του πολυωνύμου. Ξεκινώντας με πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού, υπολογίστηκαν οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε εικόνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$X_c(t) = X_o + a_1t + b_1t^2$$

$$Y_c(t) = Y_o + a_2t + b_2t^2$$

$$Z_c(t) = Z_o + a_3t + b_3t^2$$

$$\omega_c(t) = \omega_o + a_4t + b_4t^2$$

$$\phi_c(t) = \phi_o + a_5t + b_5t^2$$

$$\kappa_c(t) = \kappa_o + a_6t + b_6t^2$$

(3-10)

Οι συγκεκριμένες εξισώσεις με τις 18 παραμέτρους, που είναι να προσδιοριστούν, δεν παρέχουν ένα πρακτικό σετ παραμέτρων, διότι σε μία γραμμική διάταξη, σε αντίθεση με τις frame εικόνες, συγκεκριμένες παράμετροι είναι υψηλά συσχετισμένες η μία με την άλλη, με αποτέλεσμα να προκύπτει μία ιδιαίτερα ασταθής λύση που αντανακλά στη μονοδιάστατη φύση της γραμμικής διάταξης.

Στο επόμενο στάδιο παρουσιάζεται το τροχιακό μοντέλο του αισθητήρα ως εξής:

- Ο δορυφόρος κινείται πάνω σε μία πολύ καλά προσδιορισμένη τροχιά ενώ συνεχώς στοχεύει προς το κέντρο της γης. Ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας, μπορεί στη συνέχεια να μοντελοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις τροχιακές παραμέτρους.
- Είναι αποδεκτό ότι 2 από τις 6 παραμέτρους έχουν πολύ μικρή επιρροή στη γεωμετρία της εικόνας. Αυτές είναι ο βασικός ημιάξονας (a) της ελλειπτικής τροχιάς και ο ορισμός της περιγείου εξαιτίας της πολύ χαμηλής εκκεντρότητας της τροχιάς.
- Οι δύο παράμετροι που επηρεάζονται από αυτές τις κινήσεις είναι αληθής ανωμαλία (v) και το σημείο ανύψωσης (Ω) και μοντελοποιούνται με γραμμικές μεταβολές γωνιών σε συνάρτηση με το χρόνο ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} v &= v_o + v_1 \cdot x & (3-11) \\ \Omega &= \Omega_o + \Omega_1 \cdot x \end{aligned}$$

Ο ρυθμός μεταβολής των v και Ω μπορεί να υπολογιστεί από την περίοδο της τροχιάς και το ρυθμό περιστροφής της γης. Με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία οι άγνωστες παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού είναι 4 (v_o , Ω_o , i , a) και για αυτόν τον λόγο απαιτούνται 2 GCPs για την επίλυση του μοντέλου. Ωστόσο εξαιτίας διαταραχών της τροχιάς, είναι απίθανο να στοχεύει ο αισθητήρας ακριβώς στο κέντρο της γης. Έτσι για τον προσανατολισμό προστίθεται επιπρόσθετες στροφές του αισθητήρα και οι άγνωστες παράμετροι είναι 7. Τέλος, προστίθενται γραμμικές μεταβολές γωνιών σε συνάρτηση με το χρόνο, στον πίνακα στροφής, με αποτέλεσμα οι άγνωστοι πλέον να φτάνουν τους 10, για κάθε εικόνα.

Η ακρίβεια του μοντέλου ελέγχθηκε σε δύο πεδία. Το πρώτο πεδίο ήταν η περιοχή γύρω από το Aix-en-Provence της νότιας Γαλλίας. Το πεδίο αξιολογήθηκε με τη βοήθεια της ακρίβειας ενός στερεομοντέλου. Ο έλεγχος έγινε 3 εικόνες SPOT level 1A. Χρησιμοποιήθηκαν 10 GCPs και 20 CPs, τα οποία μετρήθηκαν από χάρτες κλίμακας 1:25.000. Από τους ίδιους χάρτες υπολογίστηκαν 42 υψόμετρα προκειμένου να γίνει και υψομετρικός έλεγχος. Τα αποτελέσματα με το 7-παραμετρικό μοντέλο φαίνονται παρακάτω:

Αριθμός GCPs που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό	10	6
Οριζοντιογραφικό RMS (20 CPs) (m)	17.7	17.7
Υψομετρικό RMS (62 CPs, B/H=.73) (m)	5.4	5.9
Υψομετρικό RMS (53 CPs, B/H=.32) (m)	8.0	

Πίνακας 3.1: Ακρίβεια του μοντέλου Dowman και Gugan στο μοντέλο (7 παράμετροι) στο πεδίο ελέγχου Aix-en-Provence (Gugan, 1987).

(Πηγή: Μιχάλης, 2005)

Ένα επιπλέον στερεοζεύγος εικόνων SPOT χρησιμοποιήθηκε σε πεδίο ελέγχου στην Αγγλία, για τον έλεγχο της ακρίβειας. Στις συγκεκριμένες εικόνες χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός GCPs με ακρίβεια 1m στο X, Y και Z. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν 10 GCPs για τον προσανατολισμό, και 17 CPs για τον έλεγχο της ακρίβειας. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για το 7-παραμετρικό και 10-παραμετρικό μοντέλο:

Αριθμός παραμέτρων	7	10
Οριζοντιογραφικό RMS (m)	8.8	8.7
Υψομετρικό RMS (m)	10.2	7.4

Πίνακας 3.2: Ακρίβεια του μοντέλου Dowman και Gugan στο μοντέλο (7 και 10 παράμετροι) στο πεδίο ελέγχου στην Αγγλία (Gugan, 1987).

(Πηγή: Μιχάλης, 2005)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η ακρίβεια του μοντέλου μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση υψηλής ποιότητας GCPs.

➤ **Μοντέλο Konecny et al. (1987)**

Ως γνωστόν ο εξωτερικός προσανατολισμός κάθε γραμμής προσδιορίζεται από 6 παραμέτρους. Στην περίπτωση της δορυφορικής φωτογραμμετρίας, οι παράμετροι των γειτονικών γραμμών είναι υψηλά συσχετιζόμενες όταν ο αισθητήρας είναι σε πλατφόρμα που κινείται σε σχεδόν κυκλική τροχιά σε μεγάλο υψόμετρο. Επίσης υποτίθεται ότι ο αισθητήρας κινείται ομοιόμορφα και ομαλά χωρίς επιτάχυνση κατά τη στιγμή της λήψης της εικόνας. Σε μία πρώτη προσέγγιση οι γωνίες προσανατολισμού θεωρούνται σταθερές. Τέλος αν οι παραπάνω υποθέσεις υιοθετηθούν στο μοντέλο είναι ξεκάθαρο ότι το μοντέλο δεν συμβαδίζει με την πραγματικότητα (Μιχάλης, 2005).

Στην πραγματικότητα η ελλειπτική μορφή της τροχιάς και οι διάφορες επιταχύνσεις που υφίστανται, μαζί με τις διάφορες κινήσεις οι οποίες οφείλονται στις μεταβολές του πεδίου βαρύτητας αναγκάζουν την πλατφόρμα να μην κινείται σε σταθερή τροχιά

και οι γωνίες ω , φ και κ δεν είναι δυνατό να παραμένουν σταθερές.

Ο δορυφόρος κινείται πολύ ομαλά στην τροχιά του και επιπρόσθετα τα υψόμετρα του εδάφους είναι μικρά συγκρινόμενα με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου. Εξαιτίας των 6 παραμέτρων προσανατολισμού της προβολικής προοπτικής, είναι υψηλά συσχετιζόμενες η μία με την άλλη και η βελτιστοποίηση της τροχιάς μπορεί να αποκλείσει μη γραμμικές αλλαγές ω , φ , κ . Οι μεταβολές των γωνιών είναι συναρτήσεις του χρόνου και μπορούν να εκφράζονται σαν επιπρόσθετοι παράμετροι οι οποίες μεταβάλλουν τη γεωμετρία της εικόνας. Μαζί με τις έξι παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την ομαλή κίνηση, προστέθηκαν 8 επιπλέον παράμετροι οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις πιο πιθανές διαστροφές. Συνεπώς οι 8 επιπλέον παράμετροι είναι η διαφορά μεταξύ της ομαλής κίνησης με την πραγματικότητα. Έτσι ο συνολικός αριθμός άγνωστων παραμέτρων είναι 14 για κάθε εικόνα, ενώ πλεονάζουσες παράμετροι αφαιρέθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα BINGO.

Το μοντέλο ελέγχθηκε με ένα στερεοζεύγος εικόνων SPOT στη νότια Γαλλία. Χρησιμοποιήθηκαν 18 GCPs, από χάρτες κλίμακας 1:25.000, προκειμένου να σταθεροποιηθεί η γεωμετρία, εξαιτίας της κάλυψης με πάνω από 50% του πεδίου. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Bingo και οι ακρίβειες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:

Αριθμός GCPs που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσανατολισμό	18	34
Αριθμός CPs που χρησιμοποιήθηκαν	68	52
RMS X (m)	10.9	11.3
RMS Y (m)	13.7	13.8
RMS Z (m)	6.5	6.2

Πίνακας 3.3: Ακρίβεια του μοντέλου Kopecný (Kopecný, 1987).

(Πηγή: Μιχάλης, 2005)

Όπως προαναφέρθηκε επιπρόσθετες παράμετροι αφαιρέθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα BINGO. Σε κάθε περίπτωση αφαιρούνται συνήθως 3 ή 4 παράμετροι. Σαν αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9 ή 10 παράμετροι για κάθε εικόνα.

➤ Μοντέλο Kratky (1989)

Πριν την περιγραφή του μοντέλου πρέπει να αναφερθούν 3 παραδοχές, οι οποίες είναι σημαντικές στην ανάπτυξη των μοντέλων των αισθητήρων (Μιχάλης, 2005):

- Ο χρόνος είναι η μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή
- Η επίδραση της περιστροφής της γης λαμβάνεται υπόψη
- Οι συντεταγμένες κατά τη γραμμή πτήσης έχουν την ίδια κλίμακα

Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο συνολικός αριθμός των άγνωστων παραμέτρων για την επίλυση σε ένα στερεοζεύγος είναι 28:

- 12 παράμετροι προσανατολισμού παρουσιάζονται από τις σχετικές θέσεις (X, Y, Z) των προβολικών κέντρων των εικόνων SPOT και από τις σχετικές θέσεις (κ, φ, ω) των αισθητήρων. Όλες σχετίζονται με το κέντρο των εικόνων
- 12 επιπρόσθετες παράμετροι είναι γραμμικές και δευτεροβάθμιες μεταβολές της θέσης των στοιχείων οι οποίες μοντελοποιούνται από πολυώνυμα εξαρτώμενα από το χρόνο
- 4 επιπρόσθετες παράμετροι ως παράμετροι αυτοβαθμονόμησης, προκειμένου να αντισταθμιστεί έλλειψη πληροφορίας της φωτογραμμετρικής βαθμονόμησης των αισθητήρων HRV.

Το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί, αγνοώντας τους δευτεροβάθμιους όρους, όταν εκτιμάται βέβαια ότι αυτό είναι εφικτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο αριθμός των αγνώστων μειώνεται κατά 6 και φτάνει στους 22 συνολικά. Επίσης επιβάλλονται περιορισμοί προκειμένου τα προβολικά κέντρα να τηρηθούν εντός συγκεκριμένων ελλειπτικών τροχιακών στοιχείων.

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 3 πεδία ελέγχου: Ottawa, Sherbrooke (Καναδάς) και Grenoble (Γαλλία). Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των δύο πρώτων πεδίων καθώς το τρίτο οδηγεί στα ίδια συμπεράσματα:

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων	26	20	22
Αριθμός GCPs για τον προσανατολισμό	6	6	5
Αριθμός CPs	65	65	65
RMS E (m)	4.8	4.9	4.6
RMS N (m)	6.0	6.3	5.3
RMS H (m)	12.9	12.2	8.4

Πίνακας 3.4: Ακρίβεια του μοντέλου Kratky στην Ottawa

(Πηγή: Kratky, 1989)

Αριθμός GCPs για τον προσανατολισμό	16	9	7	5
Αριθμός CPs	237	244	246	248
RMS E (m)	4.9	5.2	5.3	5.6
RMS N (m)	5.1	5.8	6.1	5.3
RMS H (m)	7.3	7.9	7.9	7.5

Πίνακας 3.5: Ακρίβεια του μοντέλου Kratky στο Sherbrooke (Kratky, 1989).

(Πηγή: Μιχάλης, 2005)

Από τους πίνακες φαίνεται ότι οι 22 παράμετροι του μοντέλου δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα και συνίσταται σαν μία τυπική προσέγγιση, ενώ μόνο 5 GCPs, καλά κατανομημένα στην εικόνα απαιτούνται προκειμένου να δοθεί μία καλή επίλυση.

➤ **Μοντέλο Westin (1990)**

Η προσέγγιση του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η ακόλουθη (Μιχάλης, 2005):

- Χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο τροχιακό μοντέλο. Είναι αποδεκτό ότι κατά τη χρονική διάρκεια μίας σκηνής, η τροχιά δύναται να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από μία κυκλική τροχιά. Η τροχιακή ακτίνα επιτρέπεται να ποικίλει συναρτήσει του χρόνου προκειμένου να υπολογιστεί μία ελλειπτική μορφή της τροχιάς. Το σχήμα της ακτίνας της τροχιάς προσδιορίζεται με την προσαρμογή τρίτου βαθμού πολυωνύμων στην τροχιακή ακτίνα που προέρχεται από τις εφημερίδες. Το σχήμα θεωρείται σταθερό, εκτός από τον σταθερό όρο. Η ομάδα των τροχιακών στοιχείων που είναι να υπολογιστούν μειώνονται στους 4 αντί 6.
- Επίσης απαιτείται να υπολογιστεί η θέση του δορυφόρου. Όπως οι γωνιακές ταχύτητες μετρούνται κατά την πτήση, οι σχετικές γωνίες θέσης μπορούν να υπολογιστούν με ενσωμάτωση. Είναι αποδεκτό ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις είναι αρκετά σταθερές, έτσι ώστε τελικά να απαιτείται να υπολογιστούν μόνο οι σταθεροί όροι.
- Οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού που είναι να προσαρμοστούν είναι οι ακόλουθοι 7:

i , κλίση

Ω , δεξιόστροφη ανύψωση του σημείου ανύψωσης

t_0 , χρόνος κατά το σημείο ανύψωσης

r_0 , τροχιακή ακτίνα όταν $t=t_0$

ω , roll

φ , pitch

κ , yaw

Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε σε μία εικόνα (όχι σε στερεοζεύγος). Μετρήθηκαν 84 καλά προσδιορισμένα GCPs από χάρτες κλίμακας 1:10.000 και κάνοντας χρήση όλων αυτών προκύπτουν οι παρακάτω τυπικές αποκλίσεις:

$$S_x=2.9\text{m}, \quad S_y=2.7\text{m}, \quad S_d=4.0\text{m}$$

➤ **Μοντέλο O'Neill - Dowman (1991)**

Οι 3 βασικές κατευθύνσεις του συγκεκριμένου μοντέλου είναι (Μιχάλης, 2005):

- Χρήση όλων των διαθέσιμων βοηθητικών πληροφοριών προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των GCPs που απαιτούνται για τη δόμηση του μοντέλου
- Λειτουργική απλότητα. Η χρήση απλών και εύκολα κατανοητών αλγορίθμων προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρ' όλο βέβαια που χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη προσέγγιση το μοντέλο είναι αρκετά περίπλοκο. Αυτό οφείλεται διότι τα τηλεμετρικά δεδομένα του δορυφόρου είναι χαμηλής ποιότητας
- Ένας αρθρωτός κώδικας δομής.

Το στερεομοντέλο ρυθμίζεται στα ακόλουθα 2 βήματα:

- Δημιουργία ενός σχετικού μοντέλου με χρήση της επικεφαλίδας SPOT-1
- Προσανατολισμός του σχετικού μοντέλου με χρήση ενός απόλυτου συστήματος συντεταγμένων, χρησιμοποιώντας έναν μικρό αριθμό, τυπικά 3 GCPs.

Κατά την αξιολόγηση του μοντέλου, είναι προφανές ότι 2 GCPs, δεν είναι αρκετά για να δώσουν αποδεκτή ακρίβεια του μοντέλου. Ωστόσο αν χρησιμοποιηθούν 3 GCPs η ακρίβεια τότε είναι συγκρίσιμη με την ακρίβεια άλλων μοντέλων στα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερες άγνωστες παράμετροι.

Αριθμός GCPs για τον προσανατολισμό	2	2	3	3
Αριθμός CPs	102	93	94	93
RMS X,Y (m)	31.8	21.6	13.8	13.5
RMS Z (m)	12.1	11.4	10.2	10.5

Πίνακας 3.6: Ακρίβεια του μοντέλου O' Neill & Dowman (1991).

Αριθμός GCPs για τον προσανατολισμό	2	4	3	3
Αριθμός CPs	130	130	130	120
RMS X,Y (m)	21.8	15.3	16.1	15.5
RMS Z (m)	14.8	8.6	10.9	7.9

Πίνακας 3.7: Ακρίβεια του μοντέλου O' Neill & Dowman (1991).

3.2.2 Κατά Μήκος Μοντέλα Αισθητήρων (Along Track Sensor Models)

➤ Μοντέλο Westin (1991)

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά μία επέκταση του μοντέλου που εισήγαγε ο Westin το 1990 για μονοσκοπική εικόνα. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφεται από συνολικά 7 άγνωστες παραμέτρους για τον εξωτερικό προσανατολισμό, από τις οποίες 3 αντιπροσωπεύουν μία απλοποιημένη τροχιά δορυφόρου (i , Ω , r_0), οι επόμενες 3 αντιπροσωπεύουν τις γωνίες στροφής (ω , ϕ , κ) και ο τελευταίος t_0 αντιπροσωπεύει το χρόνο τη στιγμή της ανύψωσης (Μιχάλης, 2005).

Για την επέκταση της θεωρίας σε περισσότερες σκηνές του δορυφόρου, απαιτείται οι 4 τροχιακές παράμετροι να θεωρηθούν ως διορθώσεις στις υπολογισμένες τιμές για κάθε νέα σκηνή. Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του τροχιακού μοντέλου υπολογίζονται από τις εφημερίδες κάθε σκηνής. Έτσι χρησιμοποιώντας τις ίδιες διορθώσεις για κάθε σκηνή, η συνολική εικόνα θεωρείται αμετάβλητη και οι συνολικές τροχιακές παράμετροι για το συνολικό πέρασμα του δορυφόρου μειώνεται στις 3.

Για τις παραμέτρους θέσης και το χρόνο του σημείου ανύψωσης προτείνεται ένα περισσότερο πολύπλοκο μοντέλο. Οι συγκεκριμένες 4 παράμετροι είναι διαφορετικές για κάθε σκηνή. Αυτό γίνεται για την αντιμετώπιση προβλημάτων όταν υπάρχει κενό στην ακολουθία των σκηνών.

Στην περίπτωση ύπαρξης επικαλυπτόμενων σκηνών χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με βάρη των οποίων οι τιμές ορίζονται ιδιαίτερα υψηλές.

Η ακρίβεια του συγκεκριμένου μοντέλου διερευνήθηκε με 2 σκηνές SPOT οι οποίες χωρίζονται από ένα κενό τεσσάρων σκηνών, το οποίο ισοδυναμεί με 210km στο έδαφος ή 31sec σε χρόνο. Συλλέχθηκαν 2 GCPs στη δεύτερη σκηνή και κανένα στην πρώτη. Στη συνέχεια η γεωμετρία των σκηνών αυτών αξιολογήθηκε, μετά την αναγωγή, με χρήση ενός μεγάλου αριθμού CPs, 84 στην πρώτη και 43 στη δεύτερη. Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των CPs θεωρήθηκαν χωρίς λάθος. Έτσι με τη βοήθεια του μοντέλου και των τρισδιάστατων συντεταγμένων των CPs, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός των εικονοσυντεταγμένων των CPs. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα.

Εικόνα	1	2
Αριθμός GCPs για τον προσανατολισμό	0	2
Αριθμός CPs	84	43
RMS X (m)	8.9	4.7
RMS Y (m)	6.6	4.0

Πίνακας 3.8: Ακρίβεια του μοντέλου Westin (1991).

➤ **Μοντέλο Kornus & Lehner (1999)**

Το συγκεκριμένο μοντέλο εστιάζεται στον αισθητήρα MOMS-02. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στον εσωτερικό προσανατολισμό του μοντέλου, όπου προστέθηκε ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων προκειμένου να αντιπροσωπευτεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια η περίπλοκη εσωτερική γεωμετρία του συγκεκριμένου αισθητήρα. Συνολικά ορίστηκαν 5 παράμετροι για την ακριβή περιγραφή της γεωμετρίας του αισθητήρα (Μιχάλης, 2005):

- 2 μεταθέσεις
- 1 στροφή της διάταξης CCD στο επίπεδο της εικόνας k
- 1 απόκλιση της εστιακής απόστασης
- 1 μοντελοποίηση των παραμέτρων του αισθητήρα λόγω της καμπυλότητας

Ο εξωτερικός προσανατολισμός μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια πολυωνυμικής συνάρτησης 3^{ου} βαθμού.

Η ακρίβεια του μοντέλου αξιολογήθηκε με τη βοήθεια 9 σκηνών της τροχιάς του T083C, οι οποίες συντέθηκαν σε μία λωρίδα μήκους περίπου 415km, καλύπτοντας ένα μέρος της νότιας Γερμανίας και της Αυστρίας. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 148 GCPs τα οποία μετρήθηκαν στερεοσκοπικά (UTM). Από τα σημεία αυτά 7 ή 4 σημεία χρησιμοποιήθηκαν σαν GCPs, ενώ όλα τα άλλα χρησιμοποιήθηκαν σαν CPs.

➤ **Μοντέλο Fritsch & Stallman (2000)**

Οι βασικές παραδοχές στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι ακόλουθες (Μιχάλης, 2005):

- Η κίνηση του δορυφόρου είναι μία καλά προσδιορισμένη σχεδόν ελλειπτική τροχιά
- Ο αισθητήρας στοχεύει στο κέντρο της γης

- Οι εικόνες λαμβάνονται με σαρωτή pushbroom ανά σταθερά χρονικά διαστήματα
- Κάθε γραμμή έχει τη δικιά της εξαρτώμενη θέση από το χρόνο και τις δικές της παραμέτρους
- Δεν απαιτείται αναδόμηση και των 6 παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, αλλά οι συγκεκριμένες παράμετροι συσχετίζονται πάρα πολύ με τις γειτονικές γραμμές
- Το πολύ στενό πεδίο λήψης έχει σαν αποτέλεσμα σε σχεδόν παράλληλες ακτίνες της εικόνας. Αυτό οδηγεί σε υψηλή συσχέτιση του προβολικού κέντρου των συντεταγμένων και της γωνίας όρασης του αισθητήρα

Για τη διερεύνηση της ακρίβειας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν στερεοσκοπικές εικόνες T08C5 και T08FE, επιπέδου 1, ενώ τα GCPs που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκαν από τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:25.000 και 1:50.000, με μία ακρίβεια της τάξης των 5-10m. Τέλος μετά τον έλεγχο του μοντέλου επιτεύχθηκαν ακρίβειες οριζοντιογραφικά 11-14m και υψομετρικά 13m.

➤ **Μοντέλο Poli (2004)**

Οι φωτογραμμετρικές συνθήκες συγγραμμικότητας περιγράφουν την προοπτική γεωμετρία κάθε γραμμής της εικόνας. Η θέση και ο προσανατολισμός του αισθητήρα μοντελοποιούνται από ακριβείς πολυωνυμικές συναρτήσεις 2^{ου} βαθμού, συναρτήσεως του χρόνου. Η τροχιά της πλατφόρμας χωρίζεται σε τμήματα, ανάλογα με τον αριθμό και την κατανομή των διαθέσιμων GCPs και TPs. Επιπρόσθετες ψευδοπαρατηρήσεις μπορούν να σταθεροποιήσουν μερικές ή όλες τις παραμέτρους σε κατάλληλες τιμές. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει επίσης και αυτοβαθμονόμηση, η οποία απαιτείται για τη διόρθωση συστηματικών σφαλμάτων. Στην περίπτωση δορυφορικής εικόνας, οι διαθέσιμες εφημερίδες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των περίπου τιμών των παραμέτρων μοντελοποίησης του εξωτερικού προσανατολισμού. Οι απαιτούμενες γεωμετρικές παράμετροι, συνήθως είναι διαθέσιμες από τον πάροχο της εικόνας ή από τη βιβλιογραφία (Μιχάλης, 2005).

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε στερεοζεύγος HRS στην περιοχή της Βαυαρίας και της Αυστρίας. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 41 σημεία ως GCPs και ως CPs. Τα καλύτερα αποτελέσματα στο RMSE των CPs, επιτεύχθηκαν στη μοντελοποίηση του εξωτερικού προσανατολισμού με χρήση πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού και αυτοβαθμονόμησης. Επίσης με τη μεταβολή του αριθμού των GCPs και των CPs, το RMSE ήταν πάντα λιγότερο από 1 pixel.

Αριθμός GCPs & CPs	RMSE east (m)	RMSE north (m)	RMSE height (m)
8+31	3.68	6.52	4.75
16+25	3.46	6.22	3.75
41+0	3.24	5.52	3.68

Πίνακας 3.9: Ακρίβεια του μοντέλου Poli (2004).

3.2.3 Διαφορετικές Εκδόσεις των Κατά Μήκος Μοντέλων Αισθητήρων (Along Track Sensor Models)

➤ Μοντέλο Kepler

Η έκδοση του μοντέλου βασίζεται στο Κεπλέριο πρόβλημα. Στην απλή περίπτωση 2 στερεοεικόνων, ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων είναι συνολικά 12. Το κυρίως διάνυσμα του βασικού framelet της πρώτης εικόνας αντιπροσωπεύει τις 6 από τις άγνωστες παραμέτρους. Το ίδιο διάνυσμα του βασικού framelet της δεύτερης εικόνας σχετίζεται με το αντίστοιχο διάνυσμα της πρώτης εικόνας, μέσω της κεπλέριας εξίσωσης, με αποτέλεσμα να μην είναι άγνωστο στην επίλυση. Οι υπόλοιπες 6 άγνωστες παράμετροι είναι οι γωνίες στροφής των δύο εικόνων. Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων των 2 εικόνων το μοντέλο τροποποιείται ως εξής: το κυρίως διάνυσμα του βασικού framelet της πρώτης εικόνας θεωρείται άγνωστο, ενώ το αντίστοιχο των υπόλοιπων εικόνων σχετίζεται με το διάνυσμα της πρώτης εικόνας μέσω της κεπλέριας εξίσωσης και επομένως δεν είναι άγνωστα. Για κάθε εικόνα προστίθενται 3 άγνωστες παράμετροι, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις γωνίες στροφής και για N εικόνες είναι τελικά $6 + 3 * N$. Είναι ολοφάνερο ότι ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων μειώνεται δραματικά όσο ο αριθμός των εικόνων αυξάνεται συγκρίνοντας με την περίπτωση υπολογισμού των παραμέτρων για κάθε εικόνα ξεχωριστά.

Αριθμός εικόνων	Αριθμός αγνώστων παραμέτρων
2	12
3	15
4	18
5	21

Πίνακας 3.10: Αριθμός αγνώστων παραμέτρων Κεπλέριου Μοντέλου.

Στο μοντέλο Kepler, όλες οι εικόνες συμπεριφέρονται σαν μία εικονική εικόνα, της οποίας οι συντεταγμένες υπολογίζονται αν προστεθεί το χρονικό διάστημα λήψης, από την πρώτη εικόνα στην επόμενη.

➤ Μοντέλο Lambert - Gauss

Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην περίπτωση 2 στερεοεικόνων. Ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων είναι 12. Στην περίπτωση

ύπαρξης περισσότερων των 2 εικόνων χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο Herrick – Gibbs. Η θέση των διανυσμάτων του βασικού framelet των 2 εικόνων αντιπροσωπεύουν 6 από τις άγνωστες παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού. Το διάνυσμα ταχύτητας του βασικού framelet κάθε εικόνας σχετίζεται με τη θέση των διανυσμάτων μέσω της μεθόδου Gauss – Lambert. Οι υπόλοιπες 6 άγνωστες παράμετροι είναι οι γωνίες στροφής των 2 εικόνων. Έτσι ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων μειώνεται κατά 6, σε σχέση με την ατομική επίλυση της κάθε εικόνας ξεχωριστά. Στο μοντέλο Gauss – Lambert και οι 2 εικόνες συμπεριφέρονται σαν μία εικονική εικόνα. Ωστόσο οι συντεταγμένες του framelet υπολογίζονται από το σχετικό βασικό framelet της κάθε εικόνας. Με άλλα λόγια το συγκεκριμένο μοντέλο χωρίζει την εικονική εικόνα σε 2 τμήματα με αντίστοιχα προβολικά κέντρα, τα οποία σχετίζονται με τις εξισώσεις Gauss – Lambert (Μιχάλης, 2005).

➤ **Συνδυασμένο Μοντέλο Gauss – Lambert και Herrick - Gibbs**

Στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων των 2 εικόνων, τότε χρησιμοποιείται το μοντέλο Gauss – Lambert σε συνδυασμό με το μοντέλο Herrick – Gibbs ως εξής: τα διανύσματα θέσης των προβολικών κέντρων του βασικού framelet κάθε εικόνας είναι άγνωστα στην επίλυση (9 άγνωστες παράμετροι). Με τη χρήση του μοντέλου Herrick – Gibbs το διάνυσμα ταχύτητας των προβολικών κέντρων του βασικού framelet της μεσαίας εικόνας είναι δυνατό να υπολογιστεί. Επίσης με τη χρήση του μοντέλου Gauss – Lambert μπορούν να υπολογιστούν τα διανύσματα ταχύτητας των δύο ακριανών εικόνων. Οι γωνίες στροφής κάθε εικόνας είναι επίσης άγνωστες παράμετροι (9 άγνωστες παράμετροι). Στην περίπτωση 3 εικόνων, ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων είναι συνολικά 18 (διανύσματα θέσης και γωνίες στροφής κάθε εικόνας). Συνεπώς οι άγνωστες παράμετροι μειώνονται κατά 9, σε σχέση με την περίπτωση επίλυσης της κάθε εικόνας ξεχωριστά. Στην περίπτωση ύπαρξης N στερεοεικόνων ο συνολικός αριθμός αγνώστων παραμέτρων είναι:

$(3 \text{ (διάνυσμα θέσης κάθε εικόνας)} + 3 \text{ (γωνία στροφής κάθε εικόνας)}) * N$

Αριθμός εικόνων	Αριθμός άγνωστων παραμέτρων
3	18
4	24
5	30

Πίνακας 3.11: Αριθμός άγνωστων παραμέτρων Gauss – Lambert & Herrick – Gibbs.

Συνεπώς το συγκεκριμένο μοντέλο χωρίζει τη συνολική εικονική εικόνα σε έναν αριθμό τμημάτων ίσο με τον αριθμό των εικόνων, των οποίων τα προβολικά κέντρα των βασικών framelet των ακριανών εικόνων σχετίζονται η μία με την άλλη με τις εξισώσεις Gauss – Lambert, ενώ τα προβολικά κέντρα των βασικών framelet των ενδιάμεσων εικόνων σχετίζονται η μία με την άλλη με τις εξισώσεις Herrick – Gibbs (Μιχάλης, 2005).

3.3 Λογισμικό IMAGINE OrthoRadar της Erdas

Η ορθοαναγωγή εικόνων SAR απαιτεί συγκεκριμένες πληροφορίες για τον αισθητήρα και την εικόνα SAR. Διαφορετικοί αισθητήρες έχουν διαφορετικές παραμέτρους και σε διαφορετικές μονάδες. Η Erdas προκειμένου να υποστηρίξει πολλούς αισθητήρες και εικόνες SAR, έχει αναπτύξει για το λογισμικό της το μοντέλο SAR node model. Με αυτόν τον τρόπο οι παράμετροι του κάθε αισθητήρα μετατρέπονται και προσαρμόζονται στο μοντέλο SAR node model κατά την εισαγωγή ή ακόμη διαβάζονται και απευθείας (ERDAS Field GuideTM, 2010).

Η διαδικασία της αναγωγής περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Μοντελοποίηση των εφημερίδων τροχιάς και αξιολόγηση – βελτίωση
- Χαρτογραφική παραγωγή και δημιουργία καννάβου
- Μορφότυπος προϊόντων εξαγωγής (συμπεριλαμβάνονται και οι διορθώσεις αναγλύφου)

3.3.1 Σύστημα Συντεταγμένων Εφημερίδων Τροχιάς

Τόσο οι θέσεις όσο και οι ταχύτητες της πλατφόρμας θεωρείται ότι αναφέρονται σε ένα γήινο σύστημα συντεταγμένων. Στην περίπτωση που οι εφημερίδες τροχιάς αναφέρονται σε ένα εσωτερικό σύστημα αναφοράς, τότε η σουίτα IMAGINE OrthoRadar, τις μετατρέπει σε ένα επίγειο σύστημα συντεταγμένων.

Το επίγειο αυτό σύστημα συντεταγμένων είναι ένα γεωκεντρικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων το οποίο περιστρέφεται μαζί με τη Γη. Ο άξονας x του συστήματος ορίζεται από το κέντρο της Γης και από το 0 γεωγραφικό μήκος στον Ισημερινό. Ο άξονας z ορίζεται από το κέντρο της Γης και από τον γεωγραφικό Βόρειο Πόλο, ενώ ο άξονας y συμπληρώνει και ολοκληρώνει το δεξιόστροφο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

3.3.2 Μοντελοποίηση Εφημερίδων Τροχιάς

Οι εφημερίδες τροχιάς του συστήματος της πλατφόρμας περιγράφονται το λιγότερο από τρεις ή και περισσότερες θέσεις και διανύσματα ταχύτητας αυτής. Για την πρόβλεψη της θέσης και ταχύτητας της πλατφόρμας σε συγκεκριμένο χρόνο t, απαιτούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 R_{s,x} &= a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \\
 R_{s,y} &= b_1 + b_2 t + b_3 t^2 \\
 R_{s,z} &= c_1 + c_2 t + c_3 t^2 \\
 V_{s,x} &= d_1 + d_2 t + d_3 t^2 \\
 V_{s,y} &= e_1 + e_2 t + e_3 t^2 \\
 V_{s,z} &= f_1 + f_2 t + f_3 t^2
 \end{aligned}
 \tag{3-12}$$

Όπου R_s αποτελεί τη θέση του αισθητήρα και V_s την ταχύτητα του αισθητήρα και είναι:

$$R_s = [R_{s,x} \ R_{s,y} \ R_{s,z}]^T \tag{3-13}$$

$$V_s = [V_{s,x} \ V_{s,y} \ V_{s,z}]^T \tag{3-14}$$

Για να προσδιοριστούν οι παράμετροι του μοντέλου $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$, απαιτείται αρχικά κάποιου είδους προεπεξεργασία. Επιλέγονται οι καλύτερες τρεις διαδοχικές θέσεις του δορυφόρου, οι οποίες προσαρμόζονται καλύτερα στην περιοχή ενδιαφέροντος και καλύπτουν το χρονικό διάστημα λήψης της απεικόνισης. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα σετ των τριών σημείων κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, τότε επιλέγεται εκείνο το σετ δεδομένων το οποίο έχει κεντρική χρονική στιγμή, η οποία πλησιάζει περισσότερο στην κεντρική χρονική στιγμή της εικόνας.

Με την επιλογή του καταλληλότερου σετ δεδομένων, τότε η μοντελοποίηση των εφημερίδων τροχιάς υλοποιείται με την επίλυση του ακόλουθου συστήματος:

$$Ax = b \tag{3-15}$$

Όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & t_1 & t_1^2 \\ 1.0 & t_2 & t_2^2 \\ 1.0 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \tag{3-16}$$

Και t_1, t_2, t_3 είναι οι χρόνοι οι οποίοι σχετίζονται με την κάθε θέση της πλατφόρμας, ενώ επιλέγεται ως χρονική στιγμή αναφοράς η $t=0.0$, η οποία είναι και η χρονική στιγμή κατά την οποία ο δορυφόρος είναι στη δεύτερη διαδοχική θέση.

Ο πίνακας b ορίζεται ως εξής:

$$b = [R_{s,x}(1) R_{s,x}(2) R_{s,x}(3)]^T \quad (3-17)$$

Όπου $R_{s,x(i)}$ είναι η x συνιστώσα της i θέσης της πλατφόρμας ($i = 1: 3$).

Επιλύοντας την εξίσωση 3-15 ως προς x , προκύπτει:

$$x = [a_1 a_2 a_3]^T \quad (3-18)$$

Η ίδια διαδικασία υλοποιείται για την επίλυση των συστημάτων $R_{s,y}$, $R_{s,z}$, $V_{s,x}$, $V_{s,y}$, $V_{s,z}$.

3.3.3 Μοντελοποίηση Απεικόνισης SAR

Η μοντελοποίηση της εικόνας SAR υλοποιείται με τη σύνδεση των εικονοσυντεταγμένων (γραμμές και εικονοστοιχεία της εικόνας SAR) με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς.

Έτσι για κάθε γραμμή και εικονοστοιχείο της εικόνας SAR προσδιορίζεται η αντίστοιχη θέση στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Η θέση αυτή δύναται να κείται είτε πάνω σε ένα απλοποιημένο ελλειψοειδές είτε σε ένα απλοποιημένο ελλειψοειδές διορθωμένο με ένα υψομετρικό μοντέλο και να περιγραφεί σε γεωγραφικό μήκος, πλάτος και σε υψόμετρο ή σε x , y , z του γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς.

Σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός της θέσης υλοποιείται με την εύρεση της τομής του κώνου, της ακτίνας της σφαίρας και του γήινου μοντέλου, αφού πρώτα βρεθεί το κεντροειδές Doppler και η κεκλιμένη απόσταση για ένα εικονοστοιχείο της εικόνας SAR.

Η χρονική στιγμή φωτισμού $T(j)$ δίνεται από τη σχέση:

$$T(j) = T(0) + \frac{j-1}{N_a-1} \times t_{dur} \quad (3-19)$$

Όπου $T(0)$ είναι η χρονική στιγμή έναρξης του φωτισμού, N_a ο αριθμός των γραμμών στη διεύθυνση της απόστασης και t_{dur} η διάρκεια φωτισμού για την καταγραφή της εικόνας.

Ο υπολογισμός του κεντροειδούς Doppler f_d , εξαρτάται από τον τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων. Αν τα δεδομένα αναφέρονται στη μηδενική κατά Doppler συχνότητα τότε το κεντροειδές Doppler είναι ίσο με μηδέν, διαφορετικά η τιμή του είναι διάφορη του μηδενός ή και να μεταβάλλεται με την κεκλιμένη απόσταση. Ο υπολογισμός της κεκλιμένης απόστασης από ένα εικονοστοιχείο i , εξαρτάται από την προβολή της εικόνας και δίνεται από την σχέση 3-20:

$$R_{sl}(i) = r_{sl} + (i - 1) \times \Delta r_{sr} \quad (3-20)$$

Όπου $R_{sl}(i)$ είναι η κεκλιμένη απόσταση στο εικονοστοιχείο i , r_{sl} είναι η εγγύς κεκλιμένη απόσταση και Δr_{sr} αποτελεί την πυκνότητα των εικονοστοιχείων στην κεκλιμένη απόσταση. Τέλος στην περίπτωση που η προβολή είναι στην απόσταση επί του εδάφους, τότε ο υπολογισμός είναι περισσότερο περίπλοκος και εξαρτάται από τον τρόπο που τα δεδομένα πρωτογενώς είχαν προβληθεί σε απόσταση επί του εδάφους από τον επεξεργαστή SAR.

Για την εύρεση της θέσης ενός στόχου R_t σε σχέση με ένα εικονοστοιχείο στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης και μίας γραμμής στη διεύθυνση της κεκλιμένης απόστασης, προσδιορίζεται ως η τομή του κώνου Doppler, της ακτίνας της σφαίρας και του γήινου μοντέλου. Για τον υπολογισμό της θέσης επιλύονται οι παρακάτω εξισώσεις:

$$f_D = \frac{2}{\lambda R_{sl}} (\bar{R}_s - \bar{R}_t) \cdot (\bar{V}_s - \bar{V}_t) \quad (3-21)$$

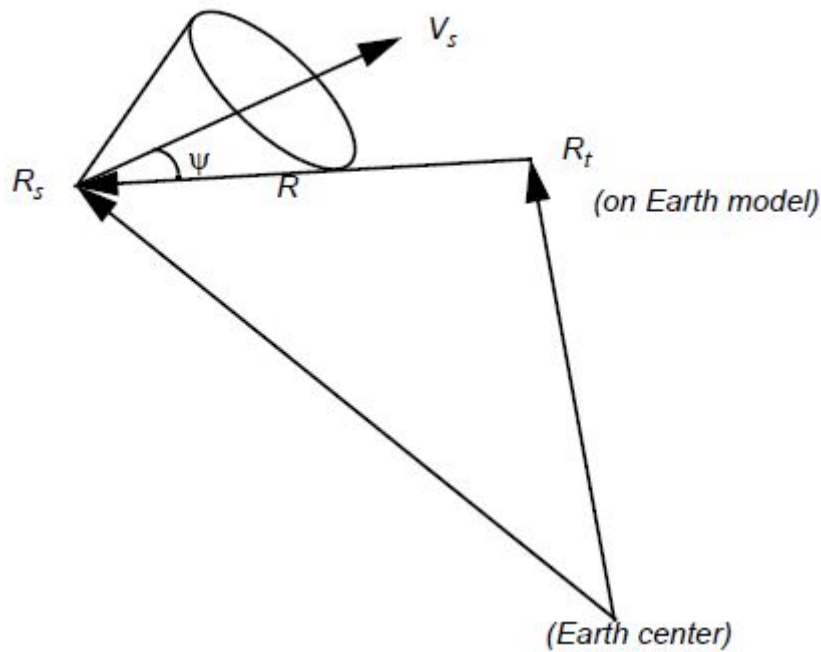
$f_D > 0$ for forward squint

$$R_{sl} = |R_s - R_t| \quad (3-22)$$

$$\frac{R_s(x)^2 + R_s(y)^2}{(R_e + h_{targ})^2} + \frac{R_s(z)^2}{(R_m + h_{targ})^2} = 1 \quad (3-23)$$

Όπου: R_s και V_s είναι η θέση και η ταχύτητα της πλατφόρμας αντίστοιχα, V_t είναι η ταχύτητα του στόχου (η οποία είναι μηδέν σε αυτό το σύστημα αναφοράς), R_e και R_m ο μεγάλος και ο μικρός ημιάξονας αντίστοιχα της γης. Στην εικόνα 3-33 αναπαρίσταται γραφικά ο προσδιορισμός της θέσης του στόχου R_t ως η τομή του κώνου Doppler, της ακτίνας της σφαίρας και του γήινου μοντέλου.

Για την προσαρμογή – διόρθωση των εφημερίδων της τροχιάς του δορυφόρου υπάρχουν τρεις δυνατές προσεγγίσεις διόρθωσης. Η κατά μήκος της τροχιάς, η κάθετη στην τροχιά και η ακτινική διόρθωση. Στη σουίτα IMAGINE OrthoRadar η κατά μήκος διόρθωση της τροχιάς εκτελείται ξεχωριστά, ενώ η κάθετη στην τροχιά και η ακτινική διόρθωση γίνονται ταυτόχρονα. Οι διορθώσεις υλοποιούνται χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα που σχετίζονται με τα GCPs. Οι εικονοσυντεταγμένες μετατρέπονται σε γεωδαιτικές, οι οποίες συγκρίνονται με τις υπάρχουσες, υπολογίζονται οι διαφορές και εφαρμόζονται για τη διόρθωση της τροχιάς του δορυφόρου.



Εικόνα 3.4: Προσδιορισμός της Θέσης του Στόχου R_t .

(Πηγή: ERDAS Field Guide™, 2010)

3.4 Ανακεφαλαίωση

Στο παρών κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε αρχικά μία παρουσίαση των μοντέλων γεωαναφοράς, τόσο των προσεγγιστικών μαθηματικών μοντέλων όσο και των αυστηρών μαθηματικών μοντέλων με ταυτόχρονη παρουσίαση ανάλογων παραδειγμάτων, κατόπιν βιβλιογραφικής αναζήτησης. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4), υλοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση στην ορθοαναγωγή απεικονίσεων SAR, στην εξαγωγή οδικού δικτύου τόσο από οπτικές εικόνες όσο και από ραντάρ, ενώ στο τέλος παρουσιάζεται η μεθοδολογία εξαγωγής ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών για την περίπτωση εξαγωγής οδικού δικτύου.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ SAR

4.1 Ορθοαναγωγή Απεικονίσεων SAR

Η Badurska (2011), στο άρθρο «*Orthorectification and Geometric Verification of High Resolution TerraSAR – X Images*», χρησιμοποίησε απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης TerraSAR – X high resolution Spotlight HH πόλωσης, με σκοπό τη μελέτη της δυναμικότητας συγκεκριμένων SAR απεικονίσεων σε αστικό περιβάλλον. Γι' αυτόν τον λόγο οι λήψεις έγιναν στην πόλη Krakow. Τα χαρακτηριστικά των απεικονίσεων έχουν ως παρακάτω:

Name	TSX-1	TSX-2	TSX-3	TSX-4	TSX-5	TSX-6
Date of acquisitions	20091011	20091016	20091027	20100311	20101022	20101106
Type of orbit	DSC	DSC	DSC	ASC	ASC	DSC
Elevation beam identification	Spot_060	Spot_030	Spot_030	Spot_049	Spot_079	Spot_090
Incidence angle [°]	43.2	30.9	30.9	39.0	49.3	52.5
Processing level	EEC	SSC	SSC	SSC	EEC	EEC
Type of product	SE	-	-	-	SE	SE
Polarization	HH	HH	HH	HH	HH	HH
Ground range resolution [m]	1.74	2.29	2.29	1.87	1.58	1.51
Azimuth resolution [m]	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

Πίνακας 4.1:Τεχνικά Χαρακτηριστικά Απεικονίσεων TerraSAR - X.

(Πηγή: Badurska, 2011)

Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για την ορθοαναγωγή αλλά και για τον έλεγχο των προϊόντων, προήλθαν από μία ορθοαναγμένη αεροφωτογραφία με μέγεθος εικονοστοιχείου 25 cm έτους λήψης 2006. Κατά την αναγνώριση των ίδιων σημείων στην ραντάρ απεικόνιση παρατηρήθηκαν δυσκολίες εντοπισμού αυτών σε αντίθεση με την οπτική εικόνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γεωμετρική ποιότητα των ορθοαναγμένων SAR απεικονίσεων εξαρτάται από την υψομετρική ακρίβεια και ανάλυση του χρησιμοποιούμενου ΨΜΕ σε συνδυασμό με το είδος του αναγλύφου και την γωνία πρόσπτωσης. Στο συγκεκριμένο άρθρο αναφέρεται ότι για την ορθοαναγωγή χρησιμοποιήθηκαν δύο διαθέσιμα ΨΜΕ:

- DEM LPIS: με βήμα καννάβου 1 m, το οποίο εξάχθηκε από στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:13.000, ενώ η υψομετρική του ακρίβεια είναι της τάξης των 0.6 m
- DTED – 2: με βήμα καννάβου 30 m, το οποίο εξάχθηκε από υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000, ενώ η υψομετρική του ακρίβεια είναι της τάξης του 1/3 της ισοδιάστασης των ισοϋψών.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλύσεις ακρίβειας των ορθοανηγμένων προϊόντων με χρήση τόσο διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών όσο και των δύο διαφορετικών ΨΜΕ, που προαναφέρθηκαν:

Number of GCPs	DEM LPIS			DTED-2				
	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]
1	36	1.82	1.23	2.20	39	2.13	1.63	2.68
3	28	2.34	1.97	3.06	30	2.04	2.54	3.25
5	29	3.09	1.06	3.27	30	2.74	1.58	3.16
7	29	3.45	1.58	3.79	29	3.41	1.86	3.88
9	24	3.32	2.25	4.01	26	3.26	2.43	4.07

Πίνακας 4.2: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-2 (n=αριθμός σημείων ελέγχου).

(Πηγή: Badurska, 2011)

Number of GCPs	DEM LPIS			DTED-2				
	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]
1	35	1.78	1.24	2.17	38	2.17	1.07	2.42
3	29	2.40	2.12	3.20	31	2.08	2.60	3.33
5	29	3.03	1.09	3.22	30	2.80	1.75	3.30
7	29	2.29	1.17	3.49	30	3.51	1.69	3.89
9	25	3.30	2.10	3.91	26	3.36	2.21	4.02

Πίνακας 4.3: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-3 (n=αριθμός σημείων ελέγχου).

(Πηγή: Badurska, 2011)

Number of GCPs	DEM LPIS			DTED-2				
	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]	n	RMS _x [m]	RMS _y [m]	RMS _{xy} [m]
1	30	3.03	1.94	3.60	27	3.15	1.86	3.66
3	31	2.32	2.17	3.18	31	2.11	2.48	3.26
5	33	2.71	2.35	3.59	32	2.55	2.65	3.68
7	33	3.20	1.71	3.63	32	3.40	1.48	3.71

Πίνακας 4.4: Ακρίβειες Ορθοανηγμένης TSX-4 (n=αριθμός σημείων ελέγχου).

(Πηγή: Badurska, 2011)

Από την μελέτη των πινάκων παρατηρείται πως αύξηση των φωτοσταθερών προκαλεί μείωση της ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Βέβαια το συγκεκριμένο φαινόμενο δεν παρουσιάστηκε και στην απεικόνιση TSX-4. Αξίζει να σημειωθεί προς η απόκτηση των απεικονίσεων 2 και 3 έγινε κατά την καθοδική τροχιά, ενώ της απεικόνισης 4 έγινε κατά την ανοδική τροχιά. Η διεθνής βιβλιογραφία όμως δεν

αναφέρει ότι το είδος τροχιάς (ανοδική ή καθοδική), επηρεάζει τη γεωμετρική ακρίβεια των προϊόντων. Βέβαια, σύμφωνα με τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο άρθρο δύναται να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αύξηση των φωτοσταθερών δε συνεπάγεται και βελτίωση της ακρίβειας των ορθοανηγμένων προϊόντων, καθώς επίσης πως χρήση ενός αριθμού φωτοσταθερών από 3 έως 5 οδηγεί σε μία βέλτιστη προσέγγιση της καλύτερης δυνατής ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί στο τελικό ορθοανηγμένο προϊόν. Συγκρίνοντας επίσης τις ακρίβειες των τελικών προϊόντων σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα ΨΜΕ, παρατηρήθηκε ότι οι ακρίβειες ήταν σχεδόν παρόμοιες, ενώ η χρήση του βελτιωμένου ΨΜΕ DEM LPIS, οδήγησε και στην ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια του τελικού ορθοανηγμένου προϊόντος σε σχέση με το ΨΜΕ DTED-2.

Οι Ortiz, Breidenbach, Knuth, Kandler (2012), στο άρθρο **«The Influence of DEM Quality on Mapping Accuracy of Coniferous-and Deciduous-Dominated Forest Using TerraSAR-X Images»**, αναφέρουν τη χρησιμότητα των εικόνων ραντάρ υψηλής ανάλυσης για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των δασών. Επίσης αναφέρεται ότι για την ορθή φωτοερμηνεία των SAR απεικονίσεων απαιτείται να υλοποιηθεί προεπεξεργασία των δεδομένων η οποία περιλαμβάνει την ορθοαναγωγή και τη ραδιομετρική βαθμονόμηση της SAR απεικόνισης. Επιπλέον η ποιότητα και ανάλυση του χρησιμοποιούμενου ΨΜΕ, αποτελούν σημαντικά χαρακτηριστικά για τις προαναφερθείσες επεξεργασίες της ραντάρ απεικόνισης. Στο άρθρο αυτό χρησιμοποιήθηκαν απεικονίσεις TerraSAR – X υψηλής ανάλυσης SpotLight, για δύο περιοχές της νότιας Γερμανίας, οι οποίες καλύπτονταν από φυλλοβόλα και κωνοφόρα δέντρα. Τα ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το ΨΜΕ SRTM 90 m, ΨΜΕ το οποίο προήλθε από αερομεταφερόμενο laser σαρωτή ανάλυσης 5 m και DSM ALS, επίσης ανάλυσης 5 m. Η ορθοαναγωγή των ραντάρ απεικονίσεων με χρήση των ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης, ήταν απαραίτητη για τη μείωση των λαθών εντοπισμού εικονοστοιχείων, καθώς επίσης και για την αύξηση της ακρίβειας ταξινόμησης των ειδών των δασών. Το προαναφερθέν αποδείχτηκε με την υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης των εικόνων ραντάρ με τα ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης, αφού οι συντελεστές ταξινόμησης k , είχαν τιμές της τάξης του 0.40. Αντίθετα η ταξινόμηση που πραγματοποιήθηκε στις εικόνες που ορθοδιορθώθηκαν με το SRTM 90 m, παρουσίασαν χαμηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης με το συντελεστή ταξινόμησης k να παρουσιάζει τιμές τις τάξης του 0.20.

Οι Reinartz, Muller, Suri, Schneider, Schwind, Bamler (2009), στο άρθρο με τίτλο **«Using Geometric Accuracy Of TerraSAR-X Data For Improvement Of Direct Sensor Orientation And Ortho-Rectification Of Optical Satellite Data»**, αναφέρουν ότι αν το χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ είναι υψηλής ακρίβειας τότε και τα γεωκωδικοποιημένα προϊόντα που προκύπτουν είναι επίσης υψηλής ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα η εργασία εστίασε στην εύρεση σημείων επί του εδάφους στη ραντάρ απεικόνιση (TerraSAR – X), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της γεωμετρικής ακρίβειας ορθοανηγμένων οπτικών δεδομένων. Δηλαδή για την εύρεση των σημείων χρησιμοποιήθηκε απεικόνιση TerraSAR – X και στη συνέχεια τα σημεία

αυτά αναγνωρίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την ορθοαναγωγή της οπτικής απεικόνισης ALOS – PRISM. Το τελικό προϊόν ελέγχεται με σημεία ελέγχου για τις γεωμετρικές του ιδιότητες. Επίσης λόγω της διαφορετικής φύσης των χρησιμοποιούμενων εικόνων (ραντάρ εικόνα vs οπτική εικόνα), τα σημεία σύνδεσης και ελέγχου επιλέχθηκαν σε σχετικά επίπεδες αγροτικές περιοχές, οι οποίες περιελάμβαναν και οδικό δίκτυο. Αστικές περιοχές και δασικές εκτάσεις, αποκλείστηκαν από τη συγκεκριμένη διαδικασία εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας των αντικειμένων.

Η απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια αναγωγής των οπτικών δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης (με χρήση ΨΜΕ), χωρίς χρήση φωτοσταθερών, κυμαίνεται από 5 m έως 50 m, ανάλογα με το δορυφόρο. Η γεωμετρική ποιότητα των δεδομένων TerraSAR – X είναι πολύ υψηλότερη (κυμαίνεται από 1 m έως 3 m), εάν η ακρίβεια του ΨΜΕ είναι αρκετά υψηλή. Γι' αυτόν άλλωστε τον λόγο τα δεδομένα TerraSAR – X μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε επιλεγμένες περιοχές, για τη βελτίωση της ορθοαναγωγής οπτικών δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης. Επί του πρακτέου, στην περιοχή Marseille της Γαλλίας, μετρήθηκαν 25 φωτοσταθερά με δέκτες GPS, ενώ οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μία οπτική εικόνα ALOS ανάλυσης 2.5 m και μία ραντάρ εικόνα TerraSAR – X (προϊόν Stripmap) ανάλυσης 1.25 m. Η λήψη της οπτικής εικόνας έγινε στις 12 Μαρτίου 2007, ενώ αυτής της ραντάρ απεικόνισης στις 20 Απριλίου 2009. Επίσης εντοπίστηκαν 10 κοινά σημεία και στις δύο απεικονίσεις (επί των εικόνων) και χρησιμοποιήθηκαν για την ορθοαναγωγή της οπτικής εικόνας. Η ορθοαναγωγή της οπτικής εικόνας, στη συνέχεια, υλοποιήθηκε και με χρήση 8 φωτοσταθερών, τα οποία ήταν μετρημένα με δέκτες GPS. Στη συνέχεια έγινε επίθεση της μίας ορθοεικόνας πάνω στην άλλη και διαπιστώθηκαν πολύ λίγες οπτικά ανιχνεύσιμες διαφορές. Έπειτα προκειμένου να προσδιοριστεί η γεωμετρική ακρίβεια της ορθοαναγμένης οπτικής σκηνής με χρήση φωτοσταθερών από τη ραντάρ απεικόνιση, τα φωτοσταθερά που μετρήθηκαν με δέκτες GPS, μετρήθηκαν και στο προαναφερθέν ορθοαναγμένο προϊόν με τα παρακάτω αποτελέσματα:

	x	y
Mean [m]	-1.7	-3.4
Standard deviation [m]	2.6	3.0
RMSE [m]	3.1	4.5

Πίνακας 4.5: Στατιστικά Στοιχεία 25 Σημείων Ελέγχου.

(Πηγή: Reinartz et al., 2009)

Επισημαίνεται ότι η ακρίβεια ορθοαναγωγής που επιτεύχθηκε, με χρήση των φωτοσταθερών από την ραντάρ εικόνα, είναι της τάξης του ενός με δύο εικονοστοιχείων, η οποία είναι σχεδόν συγκρίσιμη με την ακρίβεια της ορθοεικόνας που δημιουργήθηκε με χρήση φωτοσταθερών μετρημένα με δέκτες GPS.

4.2 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Οπτικές Εικόνες

Στην παρούσα παράγραφο αναφέρονται επιγραμματικά, κατόπιν αναζήτησης στη διεθνή βιβλιογραφία, περιπτώσεις εξαγωγής δρόμων από οπτικές εικόνες που επικρατούν στην επιστημονική κοινότητα (Τσιγγενόπουλος Γ. , 2009).

Ο Chunsun Zhang (2004) παρουσίασε ένα πρακτικό σύστημα για την αυτόματη εξαγωγή 3-D δρόμων από στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες, το οποίο ολοκληρώνει και ενοποιεί την επεξεργασία δεδομένων έγχρωμων εικόνων και υπαρχουσών ψηφιακών χωρικών βάσεων δεδομένων. Η εργασία που περιγράφει το παρόν άρθρο υλοποιήθηκε εντός του προγράμματος **ATOMI** (**A**utomated reconstruction of **T**opographic **O**bjects from aerial images using vectorized **M**ap **I**nformation), το οποίο αναπτύχθηκε σε συνεργασία με το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Γραφείο Τοπογραφίας, με σκοπό τη χρήση αεροφωτογραφιών και δεδομένων DTM, καθώς και αυτόματων διαδικασιών για τη βελτίωση διανυσματικών δεδομένων (αξόνων δρόμων, κτίρια) από τους ψηφιοποιημένους τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:25 000. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμες αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:16 000, με 30cm εστιακή απόσταση, 60% / 20% κατά μήκος/πλάγια επικάλυψη, σαρωμένες με 14μm σε Zeis SCAI. Η υπάρχουσα γεωβάση, η οποία ονομάζεται VEC25, περιέχει δεδομένα δρόμων καθώς επίσης και άλλα γεωγραφικά αντικείμενα. Η VEC25 προήλθε από τη ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1 : 25 000, χρησιμοποιώντας ημιαυτόματες διαδικασίες. Οι συγκεκριμένοι δρόμοι θεωρούνται τοπολογικά σωστοί, αλλά εξαιτίας της μερικώς αυτόματης εξαγωγής τους, μερικά λάθη μπορεί να υπάρχουν. Η περιοχή εφαρμογής (1 σκηνή στην Ελβετία και 1 στο Βέλγιο) ήταν **αγροτική με δασικές εκτάσεις και λίγες κατοικίες**. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά αντιστοιχία των δύο σκηνών ήταν:

- Ποσοστό πληρότητας – **συνολικά** (completeness) : **94.2% / 97.6%**.
- Ποσοστό ορθότητας – **συνολικά** (correctness) : **96.9% / 98.1%**.
- Μήκος δικτύου αναφοράς (km) : **12.4 / 12.86**.
- Μήκος δικτύου εξαγωγής (km) : **11.69 / 12.50**.

Στο ίδιο άρθρο αναφέρεται ότι στην περίπτωση διάθεσης δορυφορικών εικόνων IKONOS, αναφορικά με την ύπαρξη στενών δρόμων πιθανώς να υπήρχε πρόβλημα στην εξαγωγή τους. Γι' αυτόν το λόγο προτείνεται δορυφορική εικόνα με εδαφοψηφίδα 0.5m.

Οι Mena, Malrica (2005) παρουσίασαν μία μέθοδο αυτόματης εξαγωγής δρόμων σε αγροτική και ημιαστική περιοχή. Η πορεία της εργασίας τους έχει ως εξής:

- Προεπεξεργασία των δεδομένων.
- Εξαγωγή των αντικειμένων και ταξινόμηση.
- Μετατροπή σε διανυσματικά αντικείμενα.
- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

- Εκχώρηση ιδιοτήτων.
- Ενημέρωση των υπαρχουσών διανυσματικών αντικειμένων.

Η εφαρμογή της διαδικασίας τους έγινε σε RGB δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα σε **ορθοεικόνες IKONOS**, με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Ανάλυση:	3	2	1	2	2	M.O.: 2m
Πληρότητα:	86	66	86	75	91	81%
Ορθότητα:	96	65	93	85	94	87%
Ποιότητα:	83	48	81	67	87	73%

Στην παρούσα εργασία δεν δίνονται στοιχεία για την έκταση της περιοχής που καλύπτουν οι εικόνες. Το μόνο που φαίνεται είναι πολύ μικρά αποσπάσματα εικόνων και στα οποία αναφέρονται τα παραπάνω ποσοστά επιτυχίας.

Οι Bacher, Mayer (2005) παρουσίασαν την αυτόματη εξαγωγή δρόμων από δορυφορικές εικόνες **IKONOS (1m) σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές**. Ουσιαστικά η εφαρμογή έγινε σε δύο εικόνες έκτασης **1131*1090** pixels η πρώτη και **2251*2251** η δεύτερη. Στην αρχή υλοποιείται ταξινόμηση των εικόνων. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, καθώς επίσης και έναν αριθμό γεωμετρικών περιορισμών προσδιορίζονται οι γραμμές Steger ως υποθετικοί δρόμοι. Οι δρόμοι στην ήδη ταξινομημένη εικόνα εμφανίζονται ως καθαρές φωτεινές γραμμές, ενώ το υπόβαθρο είναι μαύρο. Στην πράξη οι δρόμοι έχουν ομαλές καμπύλες προκειμένου να επιτρέπουν την ανάπτυξη λογικών ταχυτήτων κατά την οδήγηση. Γι' αυτό το λόγο οι γραμμές που έχουν σε συγκεκριμένα σημεία μεγάλες καμπύλες, αλλάζουν από δρόμους σε μη-δρόμους. Έτσι προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό οι εξαγόμενες γραμμές διαιρούνται σε συνεχόμενα σημεία με μεγάλη καμπύλη, έτσι ώστε να θεωρηθούν υποθετικά τμήματα δρόμων και να συνεχιστεί η παραπέρα επεξεργασία της εικόνας με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Στη συνέχεια οι υποθετικοί δρόμοι αξιολογούνται με τη χρησιμοποίηση φασματικής πληροφορίας, προκειμένου να αφαιρεθούν εσφαλμένα αποτελέσματα. Έτσι χρησιμοποιώντας τα ήδη αξιολογημένα κομμάτια δρόμων υλοποιείται η παραγωγή του οδικού δικτύου. Τα αποτελέσματα των παραπάνω σκηνών είναι:

- Σκηνή 1: πληρότητα:**64%** ορθότητα:**90%**
- Σκηνή 2: πληρότητα:**74%** ορθότητα:**71%**

Οι Ziems, Gerke, Heipke (2007) παρουσιάζουν την εξαγωγή δρόμων από πολυφασματικές εικόνες IKONOS. Η μεθοδολογία συνδυάζει μία προσέγγιση βασισμένη στην ανίχνευση γραμμών για την εξαγωγή δρόμων μαζί με την έγχρωμη τμηματοποίηση περιοχής. Επίσης υπάρχουν βάσεις δεδομένων για δρόμους χρησιμοποιούνται με δύο τρόπους: πρώτα, για τον υπολογισμό των παραμέτρων εξαρτώμενων της εκάστοτε σκηνής, κατά την προσέγγιση της ανίχνευσης γραμμών

και δεύτερον για τον αποκλεισμό περιοχών μη-δρόμων από την εξαγωγή και την αξιοποίηση της διαθέσιμης έγχρωμης πληροφορίας. Τονίζεται ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδιάστηκε για ανοιχτές αγροτικές περιοχές. Γι' αυτό το λόγο αποκλείστηκαν αστικές περιοχές. Τέλος τα αποτελέσματα αναφέρονται παρακάτω:

No	Πεδίο εφαρμογής	Πληρότητα	Ορθότητα	RMS [pix]
<i>IKONOS 3 Sub2</i>				
1	Best EuroSDR	0.85	0.91	1.59
2	Gerke EuroSDR	0.75	0.52	1.35
3	SET A (no NDVI)	0.78	0.91	1.22
4	SET A	0.83	0.90	1.22
5	SET B	0.83	0.92	1.22
6	SET C	0.75	0.52	1.35
<i>IKONOS 3 Sub1</i>				
7	Best EuroSDR	0.81	0.87	0.97
8	Gerke EuroSDR	0.80	0.65	1.53
9	SET A (no NDVI)	0.75	0.75	1.20
10	SET A	0.77	0.76	1.42
11	SET B	0.76	0.75	1.40
12	SET C	0.80	0.65	1.53

Πίνακας 4.6: Ποσοστά Επιτυχίας.

(Πηγή: Τσιγγενόπουλος, 2009)

Οι Idbraim, Mammass, Aboutajdine, Ducrot (2008) παρουσίασαν ένα αυτόματο σύστημα εξαγωγής δρόμων σε αστικές περιοχές, από δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από μία αυτόματη διαδικασία η οποία εφαρμόζει φιλτράρισμα σε κάθε κανάλι στις κύριες κατευθύνσεις των δρόμων. Η επιλογή των κυρίων κατευθύνσεων προέρχεται από ένα κριτήριο βασισμένο στον υπολογισμό ενός παράγοντα για την ανίχνευση της κατεύθυνσης. Το δεύτερο στάδιο βασίζεται σε έναν αλγόριθμο τμηματοποίησης. Η συγκεκριμένη διαδικασία παρέχει ένα χάρτη αποφάσεων, ο οποίος επιτρέπει τη διόρθωση λαθών από το πρώτο στάδιο. Μία αναλογία επιφανείας προς περίμετρο χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό, μεταξύ όλων των τμημάτων, εκείνων που πιθανώς αντιπροσωπεύουν δρόμο. Τέλος για την αποφυγή κενών μεταξύ των κομματιών των δρόμων, ακολουθείται μία διαδικασία, η οποία στηρίζεται στην εγγύτητα και τη συγγραμμικότητα μεταξύ των κομματιών. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν **Landsat ETM+** και **αεροφωτογραφίες**, ενώ η περιοχή που κάλυπταν ήταν της τάξης του **1km²** με τα κάτωθι αποτελέσματα:

LANDSAT			
	Πληρότητα %	Ορθότητα %	Ποιότητα %
Test site 1	0.81	0.67	0.58
Test site 2	0.89	0.69	0.64
Αεροφωτογραφία			
	Πληρότητα %	Ορθότητα %	Ποιότητα %
Test site	0.85	0.59	0.53

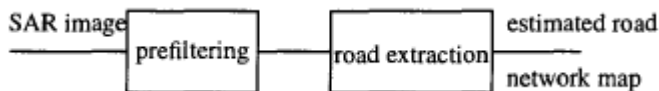
Πίνακας 4.7: Ποσοστά Επιτυχίας.

(Πηγή: Τσιγγενόπουλος, 2009)

4.3 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Απεικονίσεις SAR

Στην τρέχουσα παράγραφο αναφέρονται επιγραμματικά, κατόπιν αναζήτησης στη διεθνή βιβλιογραφία, περιπτώσεις εξαγωγής δρόμων από SAR εικόνες που επικρατούν στην επιστημονική κοινότητα.

Οι Bolon, Chanussot, Issa, Lambert (1999), στο άρθρο τους "**Comparison of prefiltering operators for road network extraction in SAR images**", παρουσιάστηκε ένας τρόπος διευθέτησης του προβλήματος ανίχνευσης οδικού δικτύου από SAR εικόνες. Το πρόβλημα οφείλεται στην ύπαρξη θορύβου στις συγκεκριμένες απεικονίσεις, ενώ το άρθρο εστιάζει στη σύγκριση από την εφαρμογή διάφορων μη γραμμικών φίλτρων για την εξαγωγή οδικού δικτύου. Από την άλλη αποδεικνύεται ότι τεχνικές εφαρμογής φίλτρων αφαίρεσης θορύβου, δεν είναι πάντα οι καταλληλότερες για την εξαγωγή οδικού δικτύου. Το διάγραμμα εργασιών που ακολουθήθηκε έχει ως εξής:

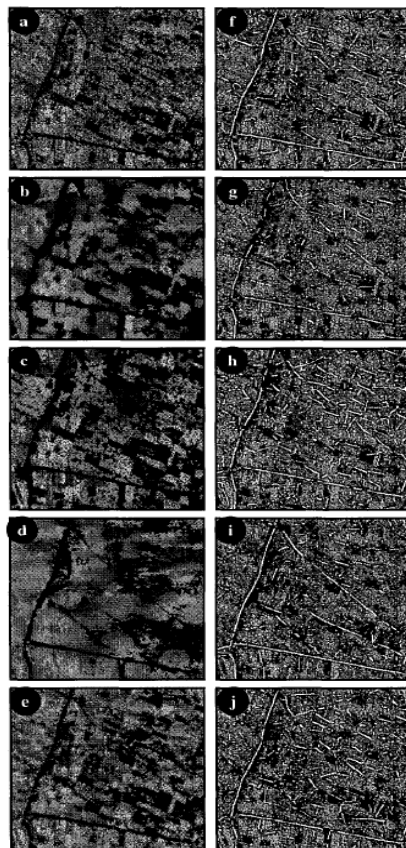


Εικόνα 4.1: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.

(Πηγή: Bolon et al., 1999)

Αρχικά υλοποιήθηκε το μοντέλο εξαγωγής των δρόμων. Κάθε εικονοστοιχείο του δρόμου ανήκει σε ένα τμήμα το οποίο δεν είναι μεγαλύτερο από ένα ελάχιστο μήκος l_0 . Ορίστηκε ως ελάχιστο μήκος l_0 μήκος ίσο με 21 εικονοστοιχεία (συσχετισμένο με γραμμικά στοιχεία επί του εδάφους μήκους περίπου 280 m για εικόνες ERS-1 PRI και το οποίο αποτελεί ένα ελάχιστο μήκος γραμμικών στοιχείων για τυπικό επαρχιακό οδικό δίκτυο). Τα ανιχνεύσιμα αντικείμενα δεν πρέπει να είναι πολύ πλατιά. Αποφασίστηκε η ανίχνευση δρόμων πλάτους ίσο με 3 εικονοστοιχεία (συσχετισμένα πλάτη επί του εδάφους περίπου 40 m για εικόνες ERS-1 PRI). Τέλος ορίστηκαν χαρακτηριστικά τα οποία είναι σκοτεινότερα από τα περιβάλλοντα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν μη γραμμικά στοιχεία ή πολύ μικρά στοιχεία και έπειτα αφαιρέθηκαν απομονωμένες αιχμές ή πολύ μεγάλες περιοχές. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν φίλτρα για την εξομάλυνση των εικόνων και την αφαίρεση θορύβου. Τα φίλτρα εφαρμόστηκαν στην εικόνα SAR ERS-1 με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Adaptive mean filter: size 11x11, threshold $\tau=25$,
- Anisotropic diffusion filter: $k=10$, $\Delta=0.1$, 100 iterations,
- Adaptive weighted da filter: size 41x41,
- Modified Lee filter: size 9x9, $C_{max}=15$



Τα φίλτρα anisotropic diffusion και modified Lee φαίνεται να έχουν παρόμοιο αποτέλεσμα ομαλοποίησης, ενώ το φίλτρο anisotropic diffusion φαίνεται να έχει καλύτερο αποτέλεσμα τοπικής αντίθεσης. Το φίλτρο adaptive mean φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα ομαλοποίησης και διατήρησης ακμών από το φίλτρο Lee. Το φίλτρο adaptive weighted da , εξαιτίας του μεγάλου παραθύρου εφαρμογής παρουσιάζει ένα πολύ δραστικότερο αποτέλεσμα και παρ' όλο που η πληροφορία της υψής και του σχήματος έχει σχεδόν εξαφανιστεί, το συγκεκριμένο φίλτρο φαίνεται να είναι το περισσότερο κατάλληλο για την ενίσχυση λεπτών γραμμών. Στην περίπτωση της ανίχνευσης οδικού δικτύου, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται πρώτα από το φίλτρο adaptive weighted da και έπειτα από το φίλτρο Lee filter. Στην εικόνα 4-2 παρουσιάζονται τα παραδείγματα εξαγωγής οδικού δικτύου με εφαρμογή αντίστοιχων φίλτρων.

a/ original image	f/ network extracted from a
b/ adaptive mean filter	g/ network extracted from b
c/ anisotropic diffusion	h/ network extracted from c
d/ adaptive da filter	i/ network extracted from d
e/ modified Lee filter	j/ network extracted from e

Εικόνα 4.2: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.

(Πηγή: Bolon et al., 1999)

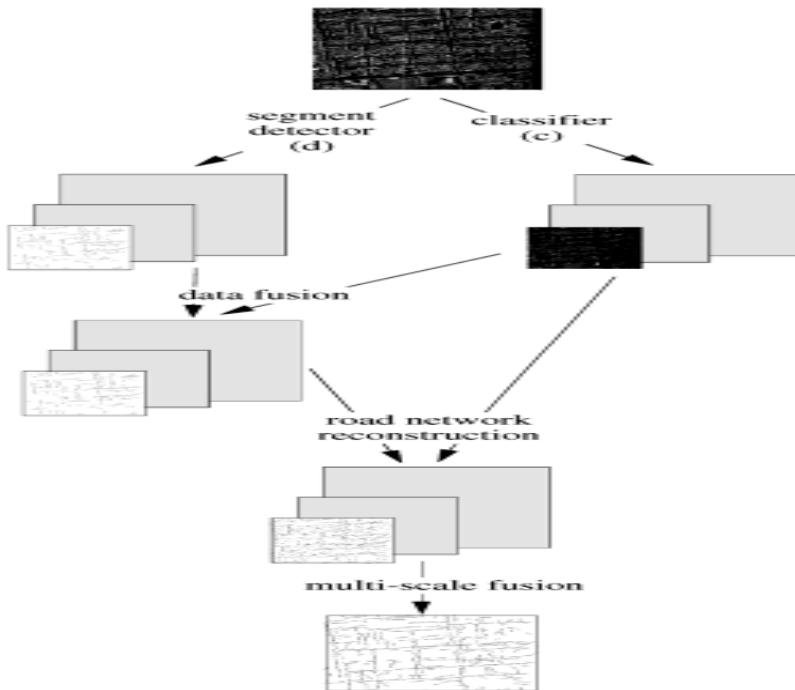
Οι Wessel, Wiedermann, Hellwich, Arndt (2002) ερεύνησαν την αυτόματη εξαγωγή δρόμων από εικόνες SAR σε δύο μεγάλες περιοχές συνολικής έκτασης 110km². Η εκτίμηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων υλοποιήθηκε με τη σύγκριση αυτών με δεδομένα αναφοράς τα οποία αποτελούνταν από διαφορετικές κατηγορίες δρόμων (αυτοκινητόδρομος, κύριος δρόμος, δευτερεύων δρόμος). Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων υποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα της εξαγωγής εξαρτώνται από τις υπάρχουσες κατηγορίες δρόμων. Η εξαγωγή των κύριων δρόμων παρουσίασε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αναφορικά με το ποσοστό πληρότητας (completeness) οι αυτοκινητόδρομοι και οι δευτερεύοντες δρόμοι δεν μπορούν να εξαχθούν πλήρως αυτόματα, εξαιτίας του πλάτους τους, της ορατότητας ή ακόμη και λόγω της ανυπαρξίας μοντέλου για εξαγωγή αυτοκινητόδρομων. Η εξαγωγή των γραμμών υλοποιείται στα επιμέρους κανάλια της εικόνας. Εισάγοντας σαφείς και καθορισμένες γνώσεις για τους δρόμους, τότε παράγονται υποθέσεις για τα τμήματα των δρόμων. Έπειτα τα τμήματα των δρόμων τα οποία εξάγονται από τα διαφορετικά

κανάλια της εικόνας συγχωνεύονται, εισάγονται διασταυρώσεις δρόμων και δομείται ένα γράφημα βαρών των τμημάτων των δρόμων. Τελικά εξάγεται ένα δίκτυο δρόμων με την ένωση σημείων που παράγονται από νοερά μονοπάτια διαμέσου του γραφήματος βαρών. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας των εικόνων είναι περίπου 2m. Τέλος τα ποσοστά επιτυχίας που παρουσιάστηκαν είχαν ως εξής:

- Ποσοστό πληρότητας – ελάχιστη/μέγιστη τιμή **συνολικά** (completeness): **45.6% / 76.4%**.
- Ποσοστό ορθότητας – ελάχιστη/μέγιστη τιμή **συνολικά** (correctness): **42.7% / 57.9%**.
- Ποσοστό πληρότητας – ελάχιστη/μέγιστη τιμή κύριοι δρόμοι (completeness): **82.5% / 94.1%**.
- Ποσοστό πληρότητας – ελάχιστη/μέγιστη τιμή δευτερεύοντες δρόμοι (completeness): **42.1% / 71.6%**.
- Ποσοστό πληρότητας – ελάχιστη/μέγιστη τιμή αυτοκινητόδρομοι (completeness): **35.4% / 68.3%**.

Τονίζεται ότι τα επιμέρους ποσοστά ανά κατηγορία δρόμων, αναφέρονται στην εξαγωγή δρόμων ανά κανάλι και όχι συνολικά σε όλα τα κανάλια από τα οποία αποτελούνται οι συγκεκριμένες εικόνες.

Οι Lisini, Tison, Tupin, Gamba (2006), στο άρθρο τους "Feature Fusion to improve Road Network Extraction in High-Resolution SAR Images", παρουσίασαν τρόπους εξαγωγής οδικού δικτύου από εικόνες SAR υψηλής ανάλυσης μέσα από διαδικασίες σύνθεσης και ταξινόμησης (στατιστικές πληροφορίες) και ανίχνευσης γραμμών (πληροφορίες δομής). Η συγκεκριμένη σύνθεση υλοποιήθηκε σε επίπεδο χαρακτηριστικού, κάτι το οποίο βοηθάει τόσο στη βελτίωση του επιπέδου πιθανοφάνειας όσο και στον αριθμό των εξαχθέντων δρόμων. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξετάζεται με τη βοήθεια δύο μεθόδων ταξινόμησης και με μία γραμμή εξαγωγής οδικού δικτύου. Οι δύο ταξινομητές που χρησιμοποιούνται είναι ο ταξινομητής Markovian και ο ταξινομητής Fuzzy ARTMAP, ενώ η ροή εργασιών που ακολουθείται έχει ως φαίνεται στην εικόνα 4-3:



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα Ροής Εργασιών.

(Πηγή: Lisini et al., 2006)

Τα αποτελέσματα της εξαγωγής οδικού δικτύου φαίνονται παρακάτω:

	fig. 3(a)	fig. 3(c)	fig. 3(d)
correctness	51.4%	75.9%	78.4%
completeness	47.6%	40.3%	46.1%
	fig. 4(a)	fig. 4(c)	fig. 4(d)
correctness	34.8%	56.5%	57.1%
completeness	76.6%	41.6%	48.7%
		fig. 4(f)	fig. 4(g)
correctness		43.6%	47.8%
completeness		62.9%	71.9%

Πίνακας 4.8: Ποσοστά Επιτυχίας.

(Πηγή: Lisini et al., 2006)

Οι Bellmann και Hellwich (2006), στο άρθρο τους *"Sensor and Data Fusion Contest Information for Mapping from Airborne SAR and Optical Imagery"*, προσπάθησαν να απαντήσουν σε δύο ερωτήματα:

- (1) Μπορούν τα δεδομένα τα οποία προέρχονται από SAR αερομεταφερόμενους αισθητήρες να ανταγωνιστούν επάξια τους οπτικούς αισθητήρες στον ευρύτερο τομέα της χαρτογράφησης;
- (2) Τι μπορεί να αποκομιστεί από την ταυτόχρονη χρήση και εκμετάλλευση SAR και οπτικών δεδομένων, πχ. όταν εφαρμόζονται μέθοδοι συνένωσης των πληροφοριών που απορρέουν από τα συγκεκριμένα δεδομένα;

Η συγκεκριμένη μελέτη περιλάμβανε 3 φάσεις:

Φάση I : Οπτική φωτοερμηνεία

Φάση II : Αυτόματη εξαγωγή αντικειμένων και ταξινόμηση

Φάση III: Συνένωση των δεδομένων των αισθητήρων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συμμετέχοντες που έλαβαν μέρος στη συγκεκριμένη μελέτη, καθώς επίσης και τα αντικείμενα ενδιαφέροντος του καθενός:

Participants	Phase			Image Data		Linear Objects			Areal Objets			
	I	II	III	SAR	Optical	roads	railways	rivers	agricult.	forest	built-up	lakes
Budapest University of Technology and Economics, HUNGARY	✓	✓		✓	✓	✓					✓	
Photogrammetry Department General Command of Mapping, TURKEY	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
University of Hannover, GERMANY Institute for Photogrammetry and GeoInformation	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
University of Rome "La Sapienza" Department Info-Com, ITALY	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓
Fraunhofer Institute Information and Data Processing, GERMANY		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Technical University Munich Photogrammetry and Remote Sensing, GERMANY		✓	✓	✓		✓						
Ness A.T Inc. ISRAEL			✓			✓	✓				✓	
TNO Human Factors THE NETHERLANDS			✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
Chinese Academy of Surveying and Mapping, CHINA			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 4.9: Συμμετέχουσες Χώρες του Προγράμματος.

(Πηγή: Bellmann.and Hellwich, 2006)

Επιπλέον οι περιοχές εφαρμογής και τα δεδομένα SAR που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Test Site	Sensor	Polarisation	λ	Test Data Resolution	Looks
Trudering, <i>Germany</i>	AeS-1	None	X-Band	1.5 m	16
Oberpfaffenhofen, <i>Germany</i>	E-SAR	Lexicographic	L-Band	3.0 m	4
Copenhagen, <i>Denmark</i>	EMISAR	Pauli	C-Band	4.0 m	8
Fjärdhundra, <i>Sweden</i>	EMISAR	Pauli	C-Band	4.0 m	8

Πίνακας 4.10: Δεδομένα SAR και Περιοχές Εφαρμογών.

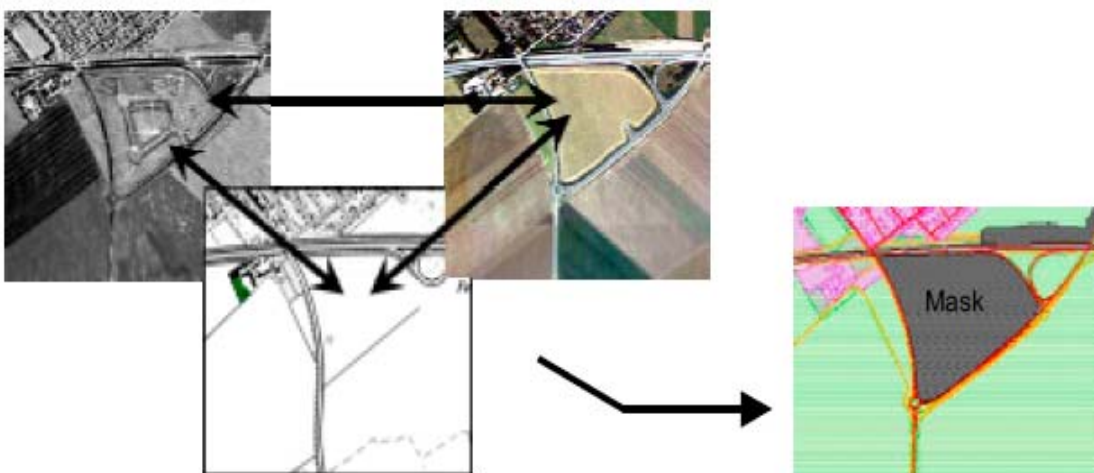
(Πηγή: Bellmann and Hellwich, 2006)

Οι αντίστοιχες οπτικές εικόνες ήταν υψηλότερης ανάλυσης. Γι' αυτόν τον λόγο έγινε αναδόμηση αυτών έτσι ώστε το μέγεθος του εικονοστοιχείου τους να είναι ίδιο με αυτό των SAR απεικονίσεων.

Επιπρόσθετα, για τις συγκεκριμένες περιοχές συλλέχθηκαν και τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:25.000, ως βοηθητικά δεδομένα για τις χρήσεις γης και τις διαδικασίες ταξινόμησης.

Τα δεδομένα αναφοράς παράχθηκαν με σύνθεση των πληροφοριών των SAR απεικονίσεων, των οπτικών δεδομένων και στη συνέχεια εξαγωγή από αυτά του χάρτη αναφοράς. Στην περίπτωση που έλειπε πληροφορία, τότε χρησιμοποιούνταν οι πληροφορίες που έδινε ο αντίστοιχος τοπογραφικός χάρτης.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν ειδικές μάσκες προκειμένου να αποκλειστούν αντικείμενα τα οποία δεν υπήρχε η δυνατότητα να προσδιοριστούν επακριβώς. Με αυτόν τον τρόπο οι συγκεκριμένες περιοχές αποκλείστηκαν και από τη διαδικασία της φωτοερμηνείας.



Εικόνα 4.4: Δημιουργία Μασκών για Αποκλεισμό Αμφισβητούμενων Περιοχών.

(Πηγή: Bellmann and Hellwich, 2006)

Για την αξιολόγηση των δεδομένων δημιουργήθηκαν δύο κατηγορίες αντικειμένων, γραμμικές και επιφανειακές:

- Κατοικημένες περιοχές
- Υδρολογικές επιφάνειες
- Γεωργικές εκτάσεις
- Δασικές εκτάσεις
- Σιδηροδρομικές γραμμές
- Οδικό δίκτυο
- Στενές οδικές αρτηρίες

Η φωτοερμηνεία των εικόνων υλοποιήθηκε ως εξής:



Εικόνα 4.5: Φωτοερμηνεία της Εικόνας.

(Πηγή: Bellmann and Hellwich, 2006)

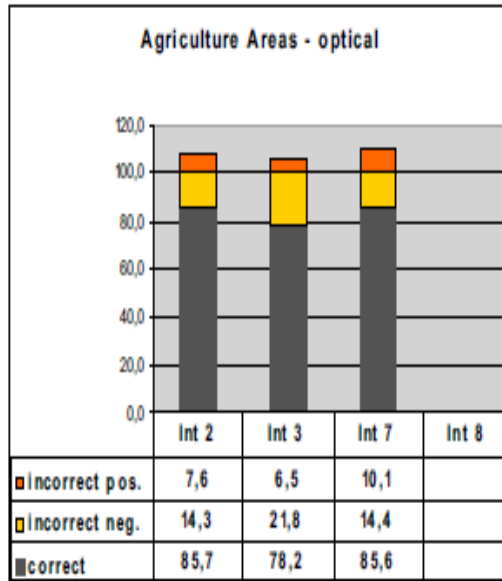
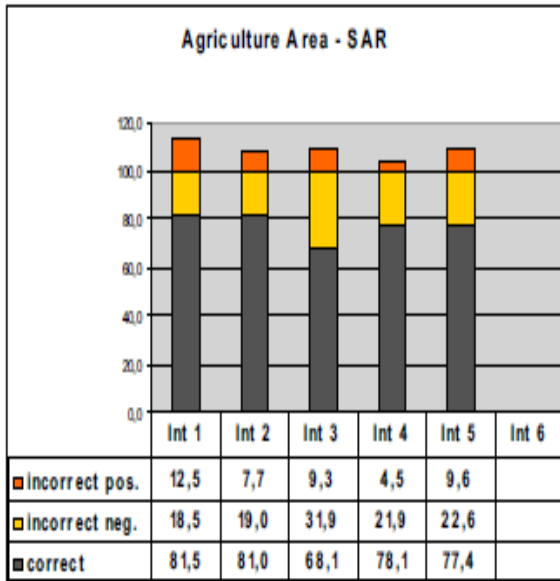
Η εικόνα 4-5 αποτελεί ένα παράδειγμα φωτοερμηνείας κατοικημένων περιοχών. Από το αποτέλεσμα της αφαίρεσης των επιπέδων αναφοράς και του φωτοερμηνευτή προκύπτουν τα κάτωθι αποτελέσματα:

- Μαύρο χρώμα: περιοχές με ορθή φωτοερμηνεία
- Πορτοκαλί: θετικές λάθος περιοχές που έχουν φωτοερμηνευτεί
- Κίτρινο: αρνητικές λάθος περιοχές που έχουν φωτοερμηνευτεί

Δηλαδή οι σωστές περιοχές που έχουν φωτοερμηνευτεί είναι αυτές οι οποίες υπήρχαν και στα δεδομένα αναφοράς αλλά και στα δεδομένα του φωτοερμηνευτή. Οι θετικές λάθος περιοχές είναι αυτές οι οποίες εντοπίστηκαν από τον φωτοερμηνευτή αλλά δεν υπάρχουν στα δεδομένα αναφοράς. Οι αρνητικές λάθος περιοχές υπάρχουν στα δεδομένα αναφοράς, αλλά δεν έχουν εντοπιστεί από τον φωτοερμηνευτή.

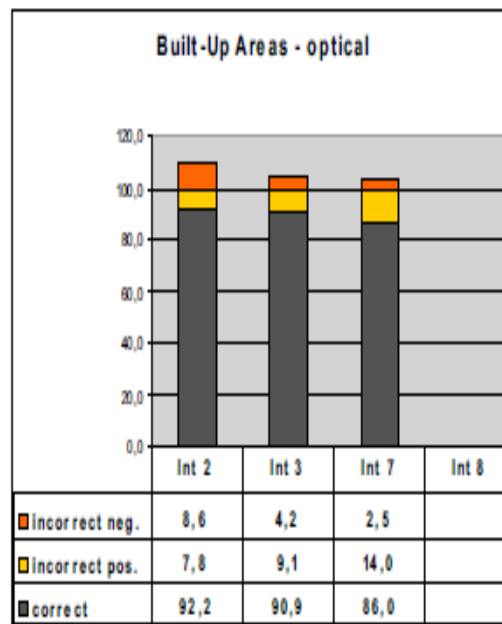
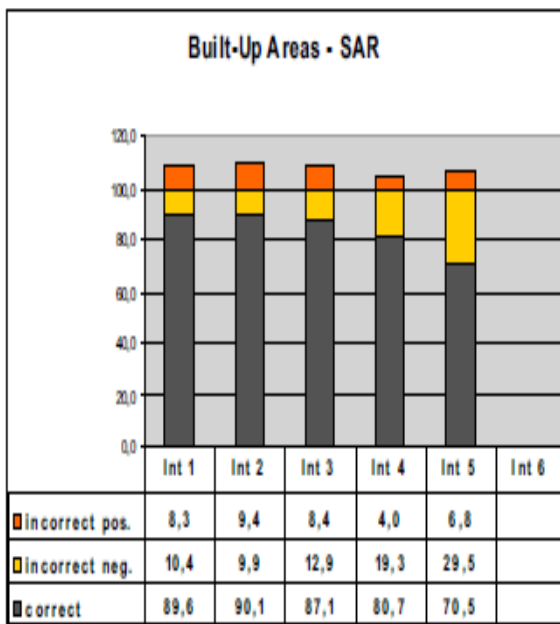
Αντίστοιχα για τα γραμμικά αντικείμενα δημιουργούνται ουδέτερες ζώνες για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα εξαγωγής για μία συγκεκριμένη περιοχή έχουν ως εξής:



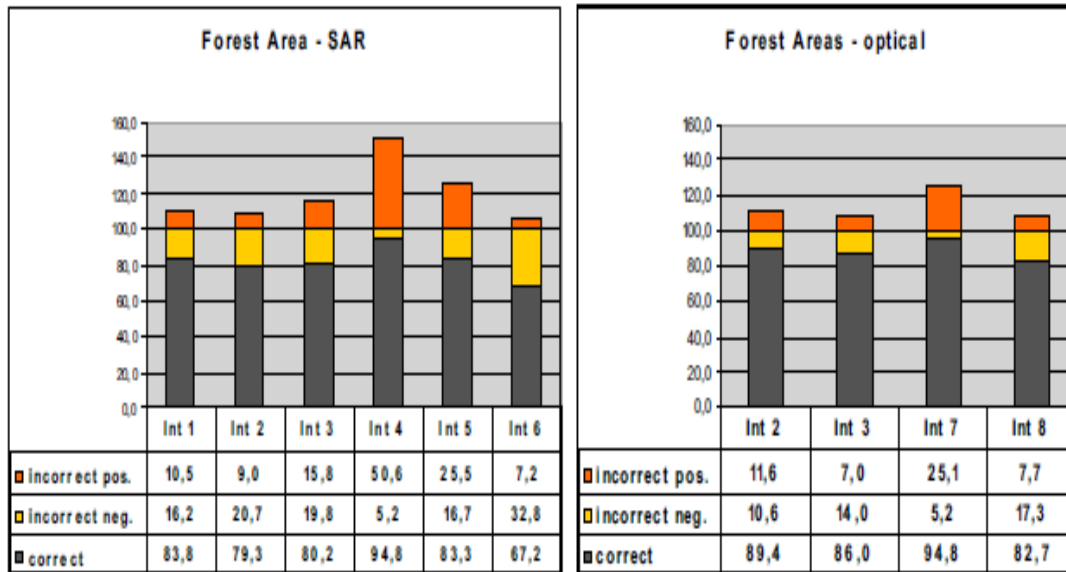
Εικόνα 4.6: Αγροτικές Περιοχές.

(Πηγή: Bellmann et al. , 2006)



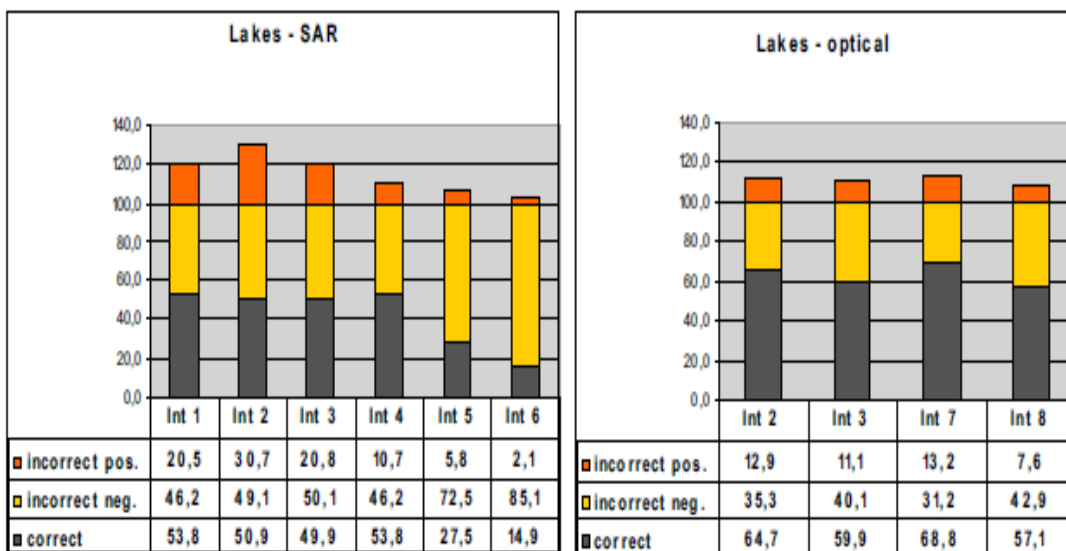
Εικόνα 4.7: Κατοικημένες Περιοχές.

(Πηγή: Bellmann et al. , 2006)



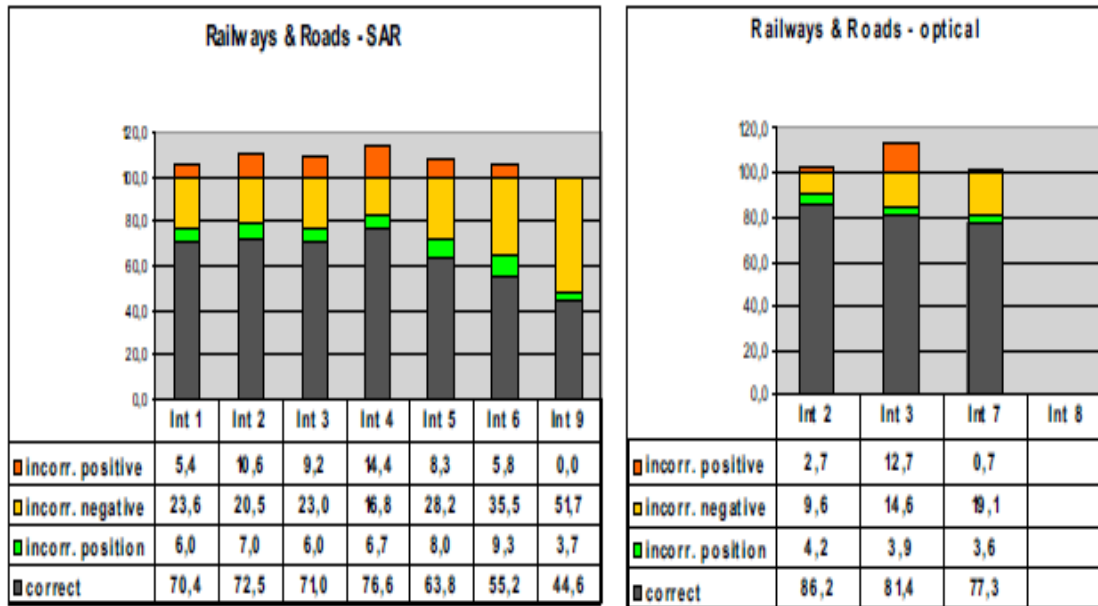
Εικόνα 4.8: Δασικές Περιοχές.

(Πηγή: Bellmann et al. , 2006)



Εικόνα 4.9: Λίμνες.

(Πηγή: Bellmann et al. , 2006)



Εικόνα 4.10: Σιδηροδρομικές Γραμμές και Οδικές Αρτηρίες.

(Πηγή: Bellmann et al. , 2006)

4.4 Εξαγωγή Ποιοτικών – Ποσοτικών Χαρακτηριστικών

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τρόποι μέτρησης και ελέγχου αποτελεσμάτων για την εξαγωγή των δρόμων. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται προέρχεται από την αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία (Τσιγγενόπουλος Γ. , 2009).

Οι Wiedermann, Heipke, Mayer (1998), στο άρθρο τους «Empirical Evaluation of Automatically Road Axes», παρουσίασαν μία μεθοδολογία για εσωτερική αυτό-διάγνωση και εξωτερική αξιολόγηση αυτόματων συστημάτων εξαγωγής δρόμων. Για την υλοποίηση της εξωτερικής αξιολόγησης απαιτούνται δεδομένα αναφοράς και η σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα της αυτόματης εξαγωγής για την παραγωγή των τελικών συμπερασμάτων. Το πλάνο εργασιών της αξιολόγησης των δεδομένων των εξαγόμενων δρόμων ουσιαστικά υλοποιείται με τη σύγκριση των εξαγόμενων αξονικών γραμμών με τις αξονικές γραμμές των δεδομένων αναφοράς. Και τα δύο είδη δεδομένων είναι σε διανυσματική μορφή.

Η αξιολόγηση υλοποιείται σε δύο βήματα:

- (1) ταύτιση των αρχικών εξαγόμενων δρόμων με το δίκτυο αναφοράς και
- (2) υπολογισμός των μετρήσεων ποιότητας των αποτελεσμάτων.

Οι μετρήσεις ποιότητας ουσιαστικά απαντούν σε δύο ερωτήματα:

- (1) πόσο ολοκληρωμένο είναι το εξαγόμενο οδικό δίκτυο και
- (2) πόσο σωστό είναι.

Η πληρότητα συσχετίζεται με τις απαιτήσεις του χρήστη, ενώ η ορθότητα από την άλλη, σχετίζεται με την πιθανότητα μία εξαγόμενη γραμμή να αποτελεί όντως δρόμο. Μία απλή μέθοδος ταύτισης αποτελεί η λεγόμενη μέθοδος της «ουδέτερης ζώνης» (**buffer method**). Στη συγκεκριμένη μέθοδο ταύτιση θεωρείται όταν τμήμα του ενός δικτύου βρίσκεται εντός συγκεκριμένης απόστασης από το άλλο δίκτυο. Επίσης η ταύτιση δεν επηρεάζεται από διαφορετικές τοπολογίες του δικτύου, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ένας πλεονάζων αριθμός των τμημάτων εξαγωγής δεν θα ανιχνευτεί και επίσης οι διαφορετικές κατευθύνσεις μεταξύ των τμημάτων των δύο δικτύων δεν λαμβάνονται υπόψη. Εάν ένα εικονοστοιχείο των εξαγόμενων δρόμων είναι εντός της ουδέτερης ζώνης των δεδομένων αναφοράς, τότε αυτό θεωρείται ότι ανήκει στα εξαχθέντα δεδομένα ταύτισης (**matched extraction**) και το αντίστροφο. Επίσης, εάν ένα εικονοστοιχείο των δεδομένων αναφοράς είναι εντός της ουδέτερης ζώνης των εξαγόμενων δρόμων, τότε αυτό θεωρείται ότι ανήκει στα δεδομένα αναφοράς ταύτισης (**matched reference**). Οι μετρήσεις ποιότητας είναι οι ακόλουθες:

Πληρότητα (completeness):

$$\text{Completeness} = (\text{length of matched reference}) / (\text{length of reference}) \quad (4-6)$$

$$\text{Completeness} \in [0;1]$$

Δηλαδή η πληρότητα η οποία παίρνει τιμές από 0 έως και 1 είναι:

$$(\text{μήκος δεδομένων αναφοράς που ταυτίζονται}) / (\text{μήκος δεδομένων αναφοράς}).$$

Η πληρότητα αποτελεί το ποσοστό του δικτύου αναφοράς το οποίο βρίσκεται εντός της ουδέτερης ζώνης των εξαχθέντων δεδομένων. Η βέλτιστη τιμή είναι 1.

Ορθότητα (correctness):

$$\text{Correctness} = (\text{length of matched extraction}) / (\text{length of extraction}) \quad (4-7)$$

$$\text{Correctness} \in [0;1]$$

Δηλαδή η ορθότητα η οποία παίρνει τιμές από 0 έως και 1 είναι:

$$(\text{μήκος δεδομένων εξαγωγής που ταυτίζονται}) / (\text{μήκος δεδομένων εξαγωγής}).$$

Η ορθότητα αποτελεί το ποσοστό των εξαχθέντων δεδομένων τα οποία βρίσκονται εντός της ουδέτερης ζώνης του δικτύου αναφοράς. Η βέλτιστη τιμή είναι 1.

Ποιότητα (quality):

$$\text{Quality} = (\text{length of matched extraction}) / (\text{length of extraction} + \text{length of unmatched reference}) \quad (4-8)$$

$$\text{Quality} \in [0;1]$$

Δηλαδή η ποιότητα η οποία παίρνει τιμές από 0 έως και 1 είναι:

(μήκος δεδομένων εξαγωγής που ταυτίζονται) / (άθροισμα του μήκους δεδομένων εξαγωγής και του μήκους των δεδομένων αναφοράς που δεν ταυτίζονται).

ή διαφορετικά

$$\text{Quality} = (\text{Completeness} * \text{Correctness}) / (\text{Completeness} + \text{Correctness}) \quad (4-9)$$

Δηλαδή η ποιότητα είναι:

(πληρότητα επί ορθότητα) / (πληρότητα μείον το γινόμενο της πληρότητας επί την ορθότητα συν την ορθότητα)

Η ποιότητα αποτελεί ένα περισσότερο γενικό χαρακτηριστικό του τελικού αποτελέσματος, συνδυάζοντας την Πληρότητα και την Ορθότητα σε μία μόνο μέτρηση, ενώ η βέλτιστη τιμή είναι 1.

Πλεονασμός (redundancy):

$$\text{Redundancy} = (\text{length of matched extraction} - \text{length of matched reference}) / (\text{length of matched extraction}) \quad (4-10)$$

Δηλαδή ο πλεονασμός είναι:

(μήκος των δεδομένων εξαγωγής που ταυτίζονται μείον το μήκος των δεδομένων αναφοράς που ταυτίζονται) / (μήκος των δεδομένων εξαγωγής που ταυτίζονται)

Ο πλεονασμός αντιπροσωπεύει το ποσοστό των εξαχθέντων δεδομένων τα οποία είναι πλεονάζοντα. Η βέλτιστη τιμή για τον πλεονασμό είναι 0.

RMS:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (d(\text{extr}_i; \text{ref}))^2}{l}} \quad (4-11)$$

Όπου,

l = ο αριθμός των τμημάτων των δεδομένων εξαγωγής τα οποία ταυτίζονται και

$d(\text{extr}_i; \text{ref})$ = η κοντινότερη απόσταση μεταξύ του i – th τμήματος των δεδομένων εξαγωγής που ταυτίζονται και των δεδομένων αναφοράς του δικτύου.

Επίσης το RMS παίρνει τιμές από 0 έως και το πλάτος της ουδέτερης ζώνης. Η διαφορά RMS εκφράζει τη μέση απόσταση μεταξύ των ταυτισμένων εξαχθέντων δεδομένων και των ταυτισμένων δεδομένων αναφοράς και επομένως και τη γεωμετρική ακρίβεια των εξαχθέντων δεδομένων. Επίσης εάν θεωρηθεί ότι υπάρχει μία ισόποση κατανομή των εξαχθέντων δεδομένων, εντός της ουδέτερης ζώνης του δικτύου αναφοράς τότε:

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{3}} * \text{buffer width} \quad (4-12)$$

Όπου **buffer width** είναι το πλάτος της ουδέτερης ζώνης.

Τέλος η βέλτιστη τιμή είναι 0.

Στατιστικά κενών (gap statistics):

➤ **Αριθμός κενών ανά km**

$$\text{No. of gaps per km} = \frac{n}{\text{length of reference [km]}} \quad (4-13)$$

n=number of gaps

Δηλαδή ο αριθμός κενών ανά km είναι:

$$(\text{αριθμός κενών}) / (\text{μήκος δεδομένων αναφοράς σε km})$$

Ο αριθμός των κενών στα δεδομένα αναφοράς αποτελεί ένα δείκτη της κατάτμησης των εξαχθέντων αποτελεσμάτων. Η βέλτιστη τιμή για τον αριθμό των κενών ανά km είναι 0.

➤ **Μέσο μήκος κενών (mean gap length)**

$$\mu_{\text{gap length [m]}} = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i l_i)}{n} \quad (4-14)$$

Όπου g_i = μήκος του i – th κενού σε [m].

Δηλαδή το **μέσο μήκος κενών** = (το άθροισμα των μηκών των κενών) / (τον αριθμό των κενών)

Η βέλτιστη τιμή είναι 0.

Τέλος η πληρότητα δύναται να υπολογιστεί από τον αριθμό κενών ανά km και το μέσο μήκος κενών ως ακολούθως:

$$completeness = 1 - (No. of gaps per km * \frac{\mu gap length}{1000}) \quad (4-15)$$

Δηλαδή η **πληρότητα** = $1 - (\text{αριθμός κενών ανά km} * \text{μέσο μήκος κενών} / 1000)$.

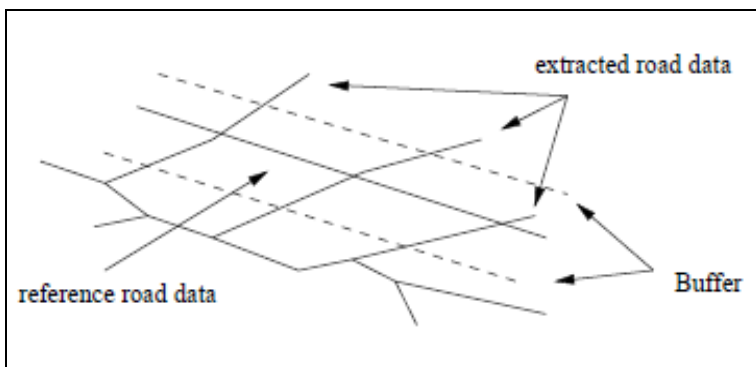
Οι παράμετροι οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, για τον υπολογισμό των παραπάνω ποσοστών, είναι πρωτεύοντος **το πλάτος της ουδέτερης ζώνης (buffer width)** και η **μέγιστη διαφορά της διεύθυνσης (maximum direction difference)**, ενώ δευτερευόντος η κατάσταση των δεδομένων των εξαγόμενων δρόμων, η οποία μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της αξιολόγησης. Αναλυτικότερα:

✓ **Πλάτος ουδέτερης ζώνης (buffer width)**

Εάν το πλάτος της ουδέτερης ζώνης είναι αρκετά μεγάλο, τότε λάθος εξαγωγές οδικού δικτύου πλησίον του πραγματικού δρόμου, ενδέχεται να θεωρηθούν ως δρόμοι. Αντιθέτως, εάν το πλάτος επιλεχθεί αρκετά μικρό, τότε σωστά δεδομένα δρόμων, τα οποία είναι ελαφρώς γεωμετρικά ανακριβή, ενδέχεται να απορριφθούν. Συνήθως για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιλέγεται ένα πλάτος ίσο με το μισό πλάτος του δρόμου που πρόκειται να εξαχθεί.

✓ **Μέγιστη διαφορά της διεύθυνσης (maximum direction difference)**

Κάποια λάθη ενδέχεται να μην ανιχνευτούν, εάν δεν ληφθεί υπόψη η διεύθυνση των αξόνων των δρόμων, κατά τη διαδικασία της ταύτισης. Υπάρχει πιθανότητα εξαχθέντες δρόμοι, επειδή κείνται εντός της ουδέτερης ζώνης, να θεωρηθεί ότι αποτελούν σωστά αποτελέσματα (ταύτιση με τα δεδομένα αναφοράς), παρ' ότι, είναι λάθος (Εικόνα 4-11).



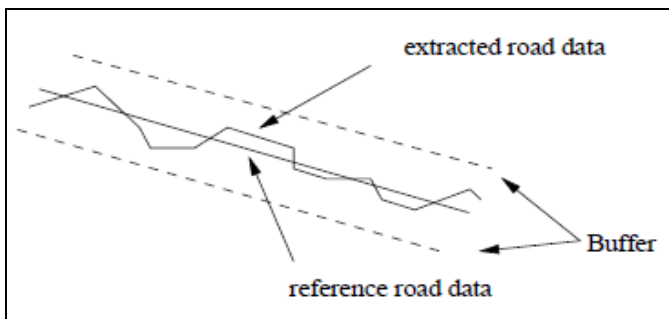
Εικόνα 4.11: Μέγιστη Διαφορά της Διεύθυνσης.

(Πηγή: Τσιγγενόπουλος, 2009)

Βέβαια αυτό το πρόβλημα επιλύεται με την έρευνα της διαφοροποίησης της διεύθυνσης των δύο κομματιών που είναι προς ταύτιση. Έτσι αν αυτή είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι (**maximum direction difference**), τότε απορρίπτεται τα δύο αυτά κομμάτια να θεωρηθούν ως ταυτισμένα.

✓ **Μορφή-Σχήμα (shape)**

Σε μερικές περιπτώσεις τα εξαχθέντα αποτελέσματα μπορεί να κινούνται γύρω από τα δεδομένα αναφοράς, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-12. Τότε πολύ πιθανόν να χρειάζεται να υπάρξει κάποιο εργαλείο υπολογισμού του σχήματος, π.χ. που να βασίζεται στον υπολογισμό της καμπυλότητας, έτσι ώστε να καθορίζεται αν θα είναι αποδεκτό ή όχι το αποτέλεσμα λόγω της μορφής του.



Εικόνα 4.12: Μορφή - Σχήμα.

(Πηγή: Τσιγγενόπουλος, 2009)

4.5 Ανακεφαλαίωση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο υλοποιήθηκε μία βιβλιογραφική επισκόπηση αρχικά στην ορθοαναγωγή απεικονίσεων SAR, ενώ στη συνέχεια έγινε μία βιβλιογραφική αναφορά στην εξαγωγή χαρακτηριστικών και συγκεκριμένα του οδικού δικτύου, τόσο από οπτικές εικόνες όσο και από απεικονίσεις ραντάρ. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5), ακολουθεί η πρακτική εφαρμογή της εργασίας.

5. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

5.1 Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας χωρίζεται στα ακόλουθα σκέλη:

- Στο πρώτο σκέλος υλοποιείται ορθοαναγωγή της εικόνας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR – X με τη βοήθεια διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους, τόσο από πλευράς ακρίβειας όσο και από διαφορετικού μεγέθους βήματος καννάβου αυτών. Επίσης γίνεται χρήση φωτοσταθερών μετρημένων με δέκτες GPS, του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ.
- Στο δεύτερο σκέλος γίνεται μία προσπάθεια εξαγωγής του οδικού δικτύου τόσο από οπτικές εικόνες, που καλύπτουν την ίδια περιοχή με αυτήν της εικόνας ραντάρ, διαφορετικού μεγέθους εικονοστοιχείου (δορυφορική εικόνα και αεροφωτογραφία με μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m και 50 cm αντίστοιχα) ενώ μελετάται και η δυνατότητα ή μη εξαγωγής οδικού δικτύου από την εικόνα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR – X.
- Στο τρίτο και τελευταίο σκέλος υλοποιείται φωτοερμηνεία της εικόνας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR - X, μελετώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (γεωμετρικές παραμορφώσεις) εικόνων τέτοιου είδους.

5.2 Δεδομένα

5.2.1 Απεικόνιση Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος TerraSAR – X

Η συγκεκριμένη εικόνα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, η οποία διατέθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ, αποτελεί προϊόν του δορυφόρου TerraSAR – X. Ο τρόπος απεικόνισης είναι HighResolution SpotLight (HS). Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης απεικόνισης έχουν αναλυθεί και παρουσιαστεί στην παράγραφο 2.2.2 της συγκεκριμένης εργασίας. Πιο συγκεκριμένα η απεικόνιση έχει ληφθεί τον Φεβρουάριο του 2009, με συχνότητα λήψης στα 300 MHz. Επίσης αποτελεί προϊόν SSC (Single Look Slant Range), μονής πόλωσης HH. Οι διαστάσεις της εικόνας είναι περίπου 12 x 6 km και το μέγεθος εικονοστοιχείου αυτής 1 m. Η κατεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου είναι από Βορρά προς Νότο και συγκεκριμένα με δεξιά γωνία λήψης. Τέλος η εικόνα αποτελείται από δύο επίπεδα. Το επίπεδο με πληροφορία για τη συγκεκριμένη απόσταση και το επίπεδο με πληροφορία για τη φάση. Συνοπτικά, μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης απεικόνισης παρουσιάζονται στον πίνακα 5-1:

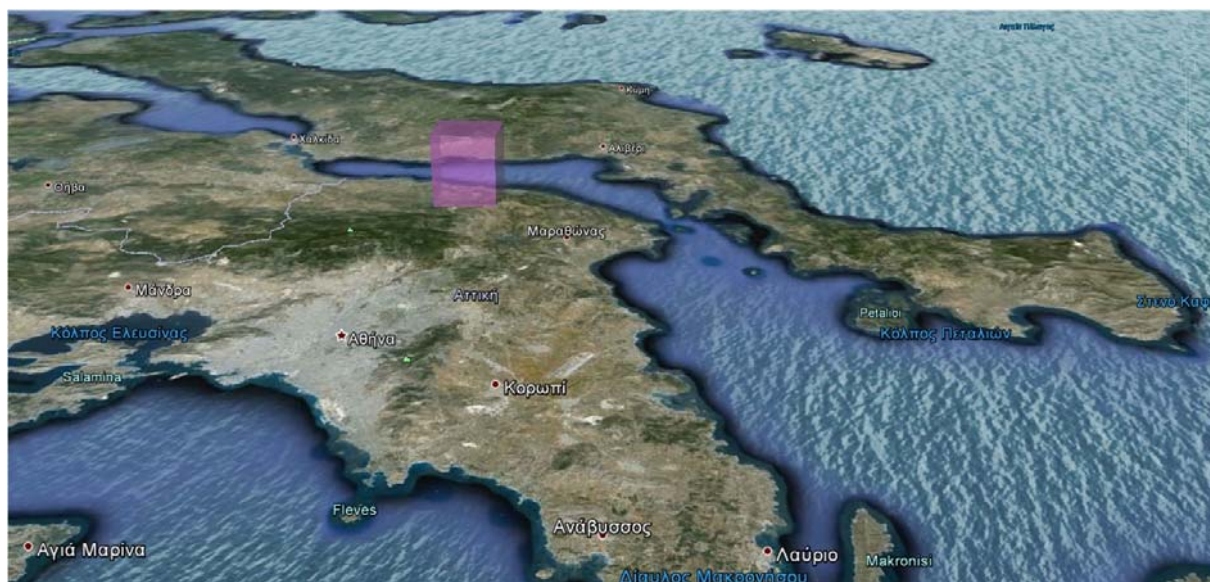
Χαρακτηριστικά Εικόνας TerraSAR – X Πρακτικής Εφαρμογής

Μέγεθος Αζιμουθίου	Εικονοστοιχείου	Διεύθυνσης	0.8676
Μέγεθος Αποστάσεων	Εικονοστοιχείου	Διεύθυνσης	0.4547
Γωνία Πρόσπτωσης σε Μοίρες			53.8263922
Ημερομηνία Λήψης			2 Φεβ 2009
Διάρκεια Εικόνας σε Δευτερόλεπτα			0.7732
Μήκος Κύματος λ σε μέτρα			0.031067

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Απεικόνισης TerraSAR – X, Πρακτικής Εφαρμογής.

(Πηγή: SAR Metadata Editor-ERDAS, 2010)

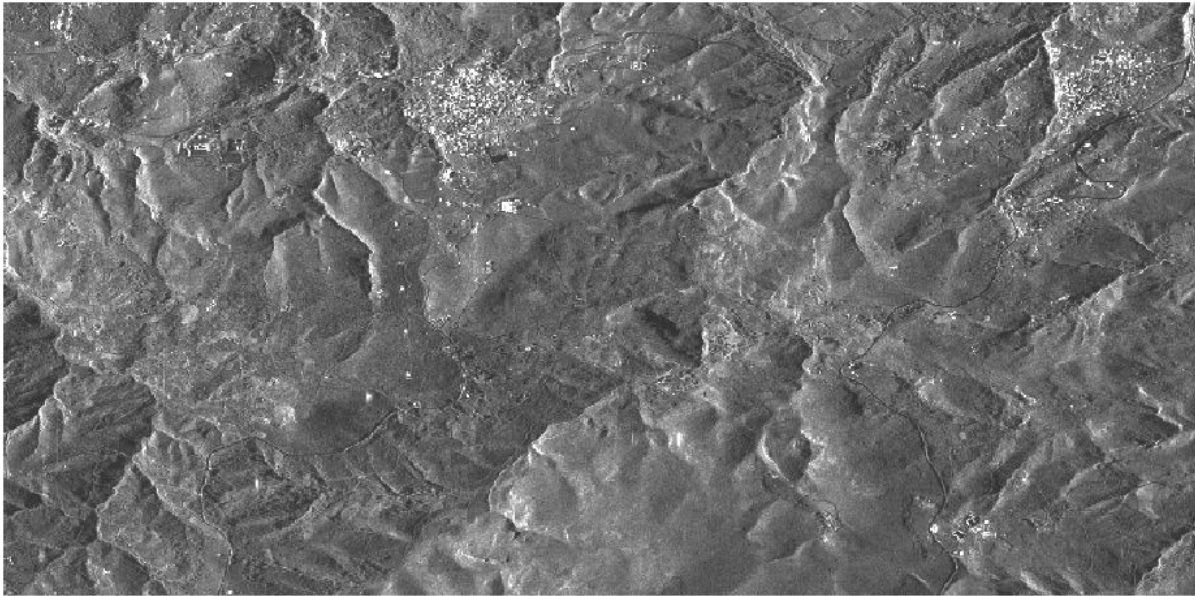
Η ευρύτερη περιοχή στην οποία εντοπίζεται η εικόνα TerraSAR – X της πρακτικής εφαρμογής φαίνεται στην εικόνα 5-1. Η εικόνα ραντάρ καλύπτει τους οικισμούς Κάλαμου και Μαρκόπουλου. Το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι περίπου 270 m.



Εικόνα 5.1: Η περιοχή που καλύπτει η Εικόνα TerraSAR – X (μωβ χρώμα).

(Πηγή: Google Earth)

Εντός των ορίων της ραντάρ εικόνας εντοπίζονται δύο οικισμοί. Ο οικισμός του Καλάμου και ο οικισμός του Μαρκόπουλου. Η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, όπως π.χ. στο νοτιότερο τμήμα αυτής υπάρχει ορεινός όγκος με μέγιστο υψόμετρο της τάξης των 600 m. Επίσης εντός της περιοχής υπάρχουν τόσο δασικές όσο και γεωργικές εκτάσεις. Τέλος εκτός των δύο προαναφερθέντων οικισμών, υπάρχουν και διάσπαρτα εντός των ορίων της εικόνας και άλλα κτίσματα, τόσο κατοικιών όσο και βιοτεχνικών εγκαταστάσεων, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή διασχίζεται τόσο από πρωτεύον όσο και από δευτερεύον επαρχιακό οδικό δίκτυο. Στην εικόνα 5-2 παρουσιάζεται η εικόνα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR – X, η οποία επεξεργάστηκε και μελετήθηκε ανά τα διάφορα στάδια της πρακτικής εφαρμογής της συγκεκριμένης εργασίας.



Εικόνα 5.2: Η Εικόνα TerraSAR – X SpotLight HS 300MHz.

5.2.2 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους

Όπως προαναφέρθηκε, για την ορθοαναγωγή της ραντάρ εικόνας χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα εδάφους, ενώ στο τέλος υλοποιήθηκαν συγκρίσεις ακριβειών, με τη βοήθεια των φωτοσταθερών, των τελικών παραγόμενων ορθοαναγμένων προϊόντων. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται ως εξής:

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο προήλθε από επικαλυπτόμενα διαθετικά του ΟΚΧΕ (Βήμα Καννάβου 10 m):

Το συγκεκριμένο ΨΜΕ προήλθε από 24 παγχρωματικά επικαλυπτόμενα διαθετικά του ΟΚΧΕ έτους λήψης 2010 και κλίμακας 1: 10.000. Αρχικά σαρώθηκαν τα 24 παγχρωματικά διαθετικά σε φωτογραμμετρικό σαρωτή στα 2400 dpi. Από τη σάρωση προκύπτει ότι στο 1 cm υπάρχουν 944 pixels, ενώ από την κλίμακα της αεροφωτογραφίας το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι 0.11 m (το 1 cm στην αεροφωτογραφία αντιστοιχεί σε 100 m, λόγω της κλίμακας που είναι 1:10.000 και είναι $100/944 = 0.11$ m). Συνεπώς η ελάχιστη τιμή σάρωσης των αεροφωτογραφιών, προκύπτει από την ακόλουθη σχέση που συνδέει την κλίμακα της εικόνας, την εδαφοψηφίδα και την ανάλυση σάρωσης:

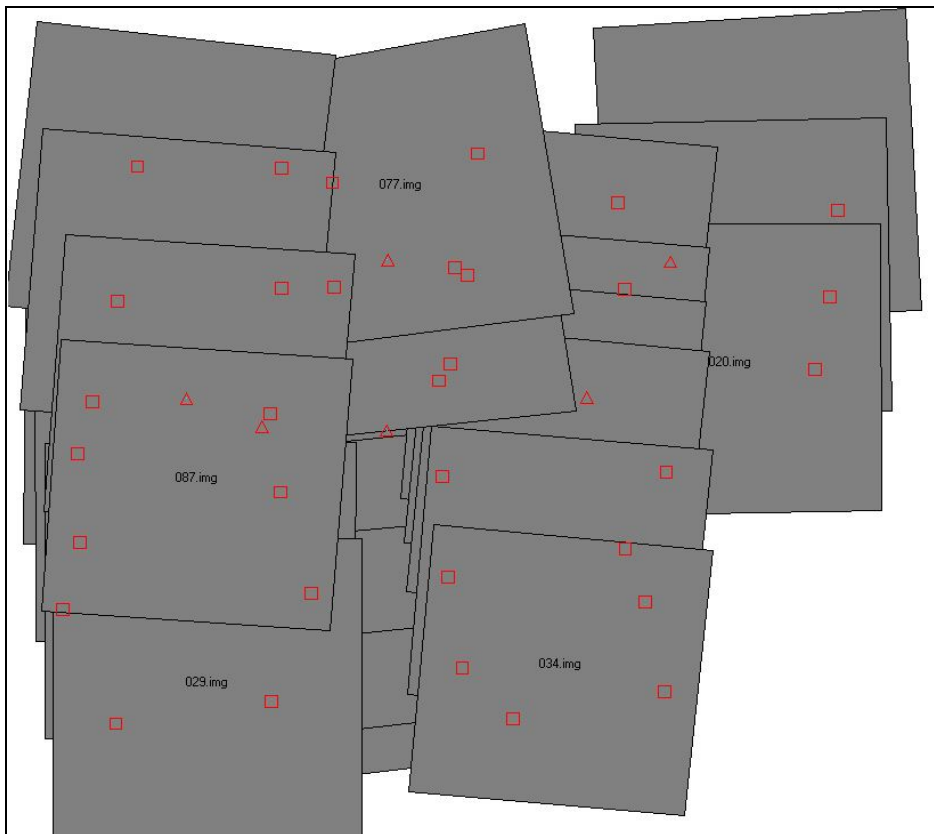
$$N_{(dpi)} = \frac{25.4 k 10^{-3}}{D_m} \quad (5-1)$$

Όπου: $N_{(dpi)}$ ο αριθμός των στιγμών ανά ίντσα (dpi)
 k η κλίμακα της εικόνας
 D η εδαφοψηφίδα σε m

Συνεπώς είναι: $N_{(dpi)} = (25.4 * 10.000 * 10^{-3}) / 0.11 = 2309$ dpi και συμπεραίνεται ότι η σάρωση των διαθετικών στα 2400 dpi είναι επαρκής.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια της σουίτας LPS της Erdas υλοποιήθηκε η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού, ενώ πιο συγκεκριμένα εκτελέστηκαν κατά σειρά οι ακόλουθες εργασίες:

- Δημιουργία νέου έργου και ρύθμιση παραμέτρων
- Εισαγωγή εικόνων και δημιουργία πυραμίδων για την ευκολότερη διαχείριση αυτών
- Αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού των εισαχθέντων εικόνων
- Σκόπηση σημείων σύνδεσης
- Σκόπηση φωτοσταθερών και ορισμός σημείων ως σημείων ελέγχου
- Επίλυση αεροτριγωνισμού



Εικόνα 5.3: Κατανομή Φωτοσταθερών, Σημείων Σύνδεσης και Ελέγχου του block.

Από την επίλυση του αεροτριγωνισμού και με χρήση 6 φωτοσταθερών και 33

σημείων σύνδεσης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Επίλυση Αεροτριγωνισμού	
Total RMSE (pixel)	3.9917
Ground X (m)	0.3694
Ground Y (m)	0.3658
Ground Z (m)	1.0510
Image X (pixel)	2.8423
Image Y (pixel)	2.6022

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα Επίλυσης Αεροτριγωνισμού.

Μετά την αποδοχή των αποτελεσμάτων επίλυσης του αεροτριγωνισμού, υλοποιήθηκε το τελικό στάδιο, το οποίο αφορούσε στην αυτόματη εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος.

Θεωρώντας πως ο χρήστης δύναται να παράγει από μία εικόνα με μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m, χαρτογραφικό προϊόν κλίμακας 1: 5000 ή και μικρότερη, τότε από την επόμενη σχέση προκύπτει το εξής:

$$dX = dY = 0.2 \text{ έως } 2 \text{ cm στην κλίμακα του χάρτη} \quad (5-2)$$

Δηλαδή από την σχέση 5-2 ορίζεται ουσιαστικά το βήμα καννάβου του ΨΜΕ σε σχέση με την κλίμακα του τελικού προϊόντος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως προαναφέρθηκε, το τελικό προϊόν είναι κλίμακας 1: 5000 και θεωρώντας ως απαίτηση την παραγωγή ΨΜΕ με πυκνή υψομετρική πληροφορία τότε το βήμα καννάβου του ΨΜΕ είναι:

$$dX = dY = 0.2 \text{ στην κλίμακα του χάρτη που είναι } 1:5000 = 10 \text{ m} \quad (5-3)$$

Συνεπώς με τη βοήθεια του εργαλείου DTM extraction της σουίτας LPS του ERDAS, ορίζεται ως μέγεθος κελιού ΨΜΕ τόσο κατά X όσο και κατά Y ίσο με 10 m. Επίσης ορίζεται ως σύστημα αναφοράς το ίδιο με αυτό που είχε οριστεί για την επίλυση του αεροτριγωνισμού:

Horizontal Projection	UTM
Horizontal Spheroid	WGS84
Zone Number	34
Horizontal Datum	WGS84
Horizontal Units	meters
Vertical Spheroid	WGS84
Vertical Datum	World Wide 15-Minute Geoid Height (EGM96)
Vertical Units	meters

Στη συνέχεια το εργαλείο αναγνωρίζει αυτόματα όλες τις δυνατές επικαλύψεις των διαθετικών, δηλαδή όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγαριών που δύνανται να

προκύψουν για την αυτόματη εξαγωγή του ΨΜΕ. Ο χρήστης πρέπει μόνο να ορίσει ένα κατώφλι επικάλυψης μεταξύ των επικαλυπτόμενων εικόνων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζοντας ως ελάχιστη επικάλυψη 50 %, τότε το εργαλείο αναγνωρίζει 28 διαφορετικά ζευγάρια επικαλυπτόμενων διαθετικών με επικαλύψεις οι οποίες κυμαίνονται από 54 % έως 89 %.

Έπειτα δηλώνεται και πάλι στο συγκεκριμένο εργαλείο, αν επιθυμεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει και τα φωτοσταθερά, τα σημεία σύνδεσης ή ελέγχου ή ακόμη και αν επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ένα εξωτερικό ΨΜΕ, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια του παραγόμενου ΨΜΕ. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε χρήση μόνο της επιλογής των φωτοσταθερών.

Τελικά αφού οριστούν όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι τότε επιλέγεται να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής του ΨΜΕ. Τονίζεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έγιναν περαιτέρω εργασίες διόρθωσης του παραγόμενου ΨΜΕ, αλλά χρησιμοποιήθηκε για την ορθοαναγωγή το ΨΜΕ όπως προέκυψε από το εργαλείο DTM extraction.

➤ Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Κτηματολογίου (Βήμα Καννάβου 5 m):

Στο πλαίσιο του Γ' ΚΠΣ η Κτηματολόγιο Α.Ε. συνέταξε τα ακόλουθα χαρτογραφικά υπόβαθρα:

α) Πλήρως Ορθοανηγμένες Ψηφιακές Ορθοφωτογραφίες Πολύ Μεγάλης Κλίμακας (VLSO),

β) Ψηφιακές Ορθοφωτογραφίες Μεγάλης Κλίμακας (LSO),

γ) Ψηφιακές Ορθοφωτογραφίες & DTM Ακριβείας για Χάραξη Αιγιαλού και

δ) Ψηφιακοί Ιστορικοί Ορθοφωτοχάρτες από αεροφωτογραφίες έτους λήψης 1945 / 1960.

Για την ολοκλήρωση του προγράμματος LSO χρησιμοποιήθηκε ΨΜΕ με βήμα καννάβου 5 m και τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Μέγεθος Εικονοστοιχείο στο Έδαφος	5.00 m
Περιμετρική επικάλυψη	300 m
Τύπος αρχείου	ESRI Floating Point Grid
Διανομή Πινάκιδων	ITRF κλίμακας 1: 5000
Διαστάσεις Πινάκιδας στο έδαφος	4600 m x 3600 m
Αριθμός Πινάκιδων	13350
Γεωμετρική ακρίβεια	RMSE _Z ≤ 2.00 m
Απόλυτη υψομετρική ακρίβεια	≤ 3.92 m, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Πίνακας 5.3: Βασικά Χαρακτηριστικά ΨΜΕ Κτηματολογίου.

(Πηγή: Καββάδας, Κτηματολόγιο Α.Ε)

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ΨΜΕ της Κτηματολόγιο Α.Ε., το οποίο είχε λίγο μεγαλύτερες διαστάσεις από την TerraSAR – X εικόνα.

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Βήμα Καννάβου 30 m):

Για την ορθοαναγωγή της TerraSAR – X χρησιμοποιήθηκε ΨΜΕ της ΓΥΣ, το οποίο είχε λίγο μεγαλύτερες διαστάσεις από την TerraSAR – X εικόνα.

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER Global DEM (Βήμα Καννάβου 30 m):

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM διατίθεται από την METI και NASA με τη βοήθεια των ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center) και LP DAAC (NASA Land Processes Distributed Active Archive Center), χωρίς χρέωση και για όλους τους χρήστες του κόσμου, ως συνδρομή στο Παγκόσμιο Σύστημα Παρατήρησης της Γης (GEOSS). Διατίθεται σε τμήματα διαστάσεων $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ και καλύπτει επιφάνειες μεταξύ 83°N και 83°S , **με υψομετρική ακρίβεια της τάξης των 20 m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 % και οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των 30 m με επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %**. Το συγκεκριμένο ΨΜΕ διατίθεται σε μορφότυπο geotiff και σε γεωγραφικές συντεταγμένες με βήμα καννάβου 30 m. Το κάθε τμήμα διαστάσεων $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ συνοδεύεται από δύο αρχεία: α) το αρχείο δεδομένων DEM και β) το αρχείο πιστοποίησης - ποιότητας το οποίο περιλαμβάνει τις περιοχές ανωμαλιών των δεδομένων και επιπλέον τις πηγές των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωσή τους (ASTER Global DEM Validation, 2009). Η συγκεκριμένη έκδοση αποτέλεσε την 1^η έκδοση του συγκεκριμένου ΨΜΕ, ενώ στη συνέχεια πέρη τα τέλη του 2011 προέκυψε και 2^η βελτιωμένη έκδοση του συγκεκριμένου ΨΜΕ. Για την ορθοαναγωγή της εικόνας SAR χρησιμοποιήθηκε ΨΜΕ της 1^{ης} έκδοσης.

5.2.2.1 Αξιολόγηση των ΨΜΕ

Η αξιολόγηση της υψομετρικής ακρίβειας των προαναφερθέντων ΨΜΕ δύναται να υλοποιηθεί με τις δύο ακόλουθες τεχνικές (Ξυνογαλάς και Σοϊλέ, 2012):

- Pixel to point (τεχνική αναφερόμενη και ως DEM-to-control point):

με βάση την επιλογή γνωστών υψομετρικών σημείων αναφοράς και της αντίστοιχης υψομετρικής τιμής στην ίδια οριζοντιογραφική θέση επί του ΨΜΕ που ελέγχεται

- Pixel to Pixel (τεχνική αναφερόμενη και ως DEM-to-DEM):

με σύγκριση ενός ΨΜΕ αναφοράς με το υπό έλεγχο ΨΜΕ κατόπιν σύγκρισης των αντίστοιχων ψηφιακών τιμών.

Στις προαναφερθείσες τεχνικές ελέγχου των ΨΜΕ, προστίθενται και οι ακόλουθες:

- Με τη δημιουργία μοντέλου σκίασης των ΨΜΕ και τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων,
- Με την σύγκριση παραγόμενων ισοϋψών από τα ΨΜΕ και έλεγχο προσαρμογής τους σε καμπύλες τοπογραφικών διαγραμμάτων.

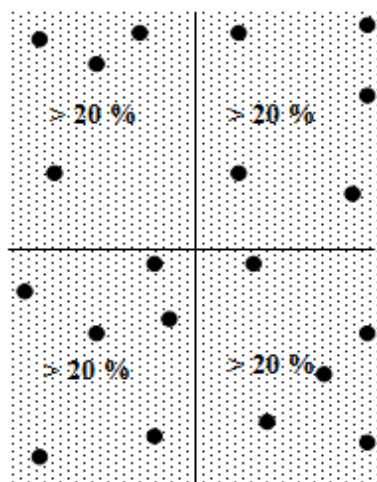
Η τεχνική αξιολόγησης ΨΜΕ με τον έλεγχο από γνωστά υψομετρικά στοιχεία, περιγράφεται αναλυτικότερα στα παρακάτω στάδια (ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., 2005):

- Είδος ελέγχων

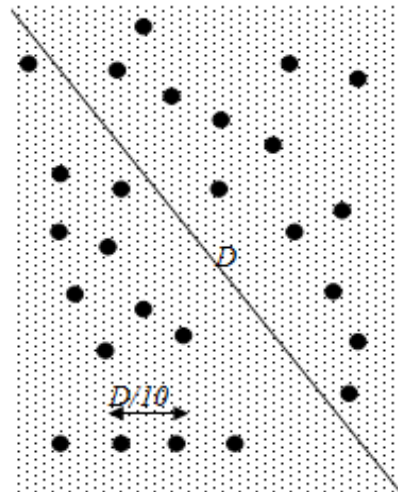
Το είδος των ελέγχων, αφορά στον έλεγχο της υψομετρικής ακρίβειας ενός ΨΜΕ με τις μεθόδους της κατηγορίας pixel to point.

- Επιλογή θέσης

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η βέλτιστη κατανομή και πυκνότητα των σημείων ελέγχου, η οποία εφαρμόζεται σε μια από τις περιοχές ελέγχου, έχει ως ακολούθως:



Εικόνα 5.4: : Ιδεατή κατανομή σημείων ελέγχου.



Εικόνα 5.5: Ιδεατή πυκνότητα σημείων ελέγχου.

- Σύγκριση τιμών

Οι τιμές των υψομέτρων των γνωστών υψομετρικών σημείων και αυτών που

προέκυψαν από τα υπόβαθρα των ΨΜΕ, καταγράφονται σε πίνακες της παρακάτω μορφής με σκοπό τον υπολογισμό των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών, που προσδιορίζουν την ακρίβεια των ελεγχόμενων προϊόντων.

Οι πίνακες αυτοί, διατίθενται ελεύθερα στον διαδικτυακό τόπο του National Standard for Spatial Data Accuracy του FGDC (Federal Geographic Data Committee - <http://www.fgdc.gov/>) και υπολογίζουν αυτόματα τα παρακάτω:

- Το **άθροισμα (sum)** των τετραγώνων των διαφορών $d = Z_{\text{ανεξάρτητο}} - Z_{\text{DEM}}$ μεταξύ των τιμών των υψομέτρων των γνωστών σημείων και αυτών των υποβάθρων των ΨΜΕ
- Τον **μέσο όρο του αθροίσματος** (διαίρεση του αθροίσματος με το πλήθος των σημείων που ελέχθησαν)
- Το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)** ($RMSE = \sqrt{(\sum d^2)/N}$)
- Την **ακρίβεια**, η οποία σύμφωνα με τα National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) του FGDC, για επίπεδο εμπιστοσύνης ελέγχων **95%**, ορίζεται ως το γινόμενο της τιμής του *RMSE* με έναν συντελεστή ο οποίος λαμβάνει την τιμή **1.96** για **υψομετρικούς** ελέγχους.

Εκτός από τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη, εξετάζονται και τα παρακάτω στατιστικά στοιχεία για την αξιολόγηση των ΨΜΕ, ως προς την υψομετρική τους ακρίβεια:

- Η μέση τιμή (**mean**) -καθώς και η ελάχιστη (**min**) και μέγιστη (**max**) τιμή- των διαφορών: $d = Z_{\text{ανεξάρτητο}} - Z_{\text{DEM}}$ μεταξύ των τιμών των σημείων γνωστών υψομέτρων και αυτών των υποβάθρων των ΨΜΕ ($mean = \sum d/N$) και
- Η τυπική απόκλιση αυτής της διαφοράς **stdev** ($stdev = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})^2}{N}}$)
- Κύρτωση (**Kurtosis**): Η κύρτωση χαρακτηρίζει τη σχετική οξύτητα ή ομαλότητα μιας κατανομής, σε σύγκριση με την κανονική κατανομή. Θετική κύρτωση υποδηλώνει κατανομή με σχετικές οξύνσεις. Αρνητική κύρτωση υποδηλώνει σχετικά ομαλή κατανομή.

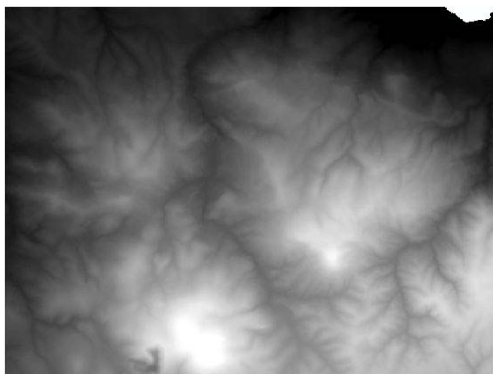
$$Kurtosis = \frac{\left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{x_j - \bar{x}}{s} \right)^4 \right\}}{\frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}} \quad (5-4)$$

- Ασυμμετρία (**Skewness**): Η ασυμμετρία χαρακτηρίζει το βαθμό έλλειψης συμμετρίας μιας κατανομής, γύρω από τη μέση τιμή της. Θετική ασυμμετρία

υποδηλώνει κατανομή με ασύμμετρη ουρά που εκτείνεται προς τα δεξιά, προς περισσότερο θετικές τιμές. Αρνητική ασυμμετρία υποδηλώνει κατανομή με ασύμμετρη ουρά που εκτείνεται προς τα αριστερά, προς περισσότερο αρνητικές τιμές.

$$\text{Skewness} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_j - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (5-5)$$

Στη συγκεκριμένη εργασία η αξιολόγηση των ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκαν υλοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου "Pixel to Pixel" (τεχνική αναφερόμενη και ως DEM-to-DEM). Δηλαδή υλοποιήθηκε σύγκριση όλων των ΨΜΕ που χρησιμοποιήθηκαν με ένα ΨΜΕ αναφοράς κατόπιν σύγκρισης των αντίστοιχων ψηφιακών τιμών. **Ως ΨΜΕ αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ΨΜΕ της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ.** Από τη σύγκριση των ΨΜΕ μεταξύ τους προέκυψαν τα ακόλουθα οπτικά και στατιστικά αποτελέσματα:



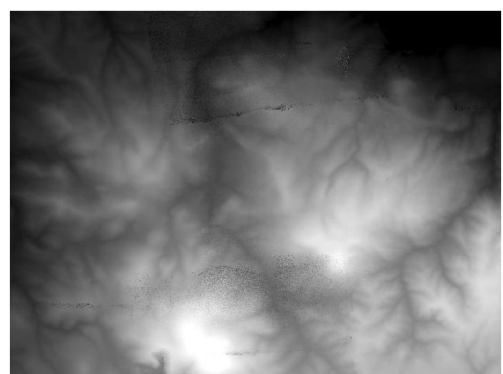
Εικόνα 5.6: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ 5m.



Εικόνα 5.7: ΨΜΕ ΓΥΣ 30m

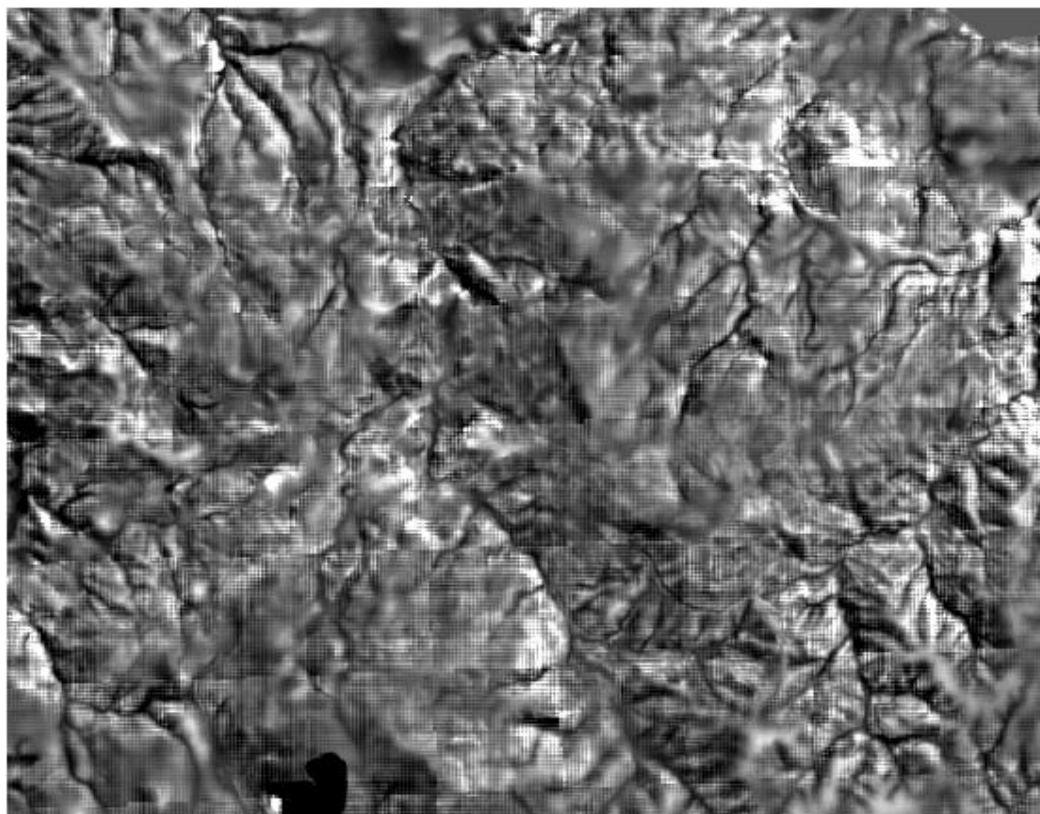


Εικόνα 5.8: ΨΜΕ ASTER 30m.

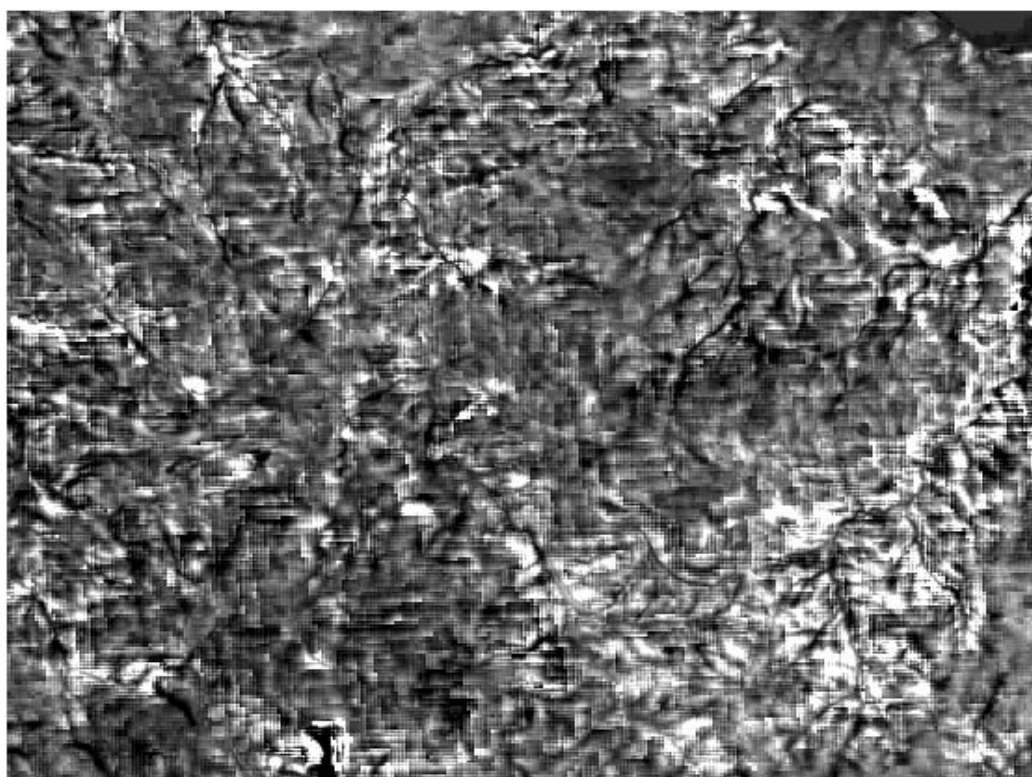


Εικόνα 5.9: ΨΜΕ Automatic Extraction 10m.

Ενώ από τις αφαιρέσεις μεταξύ των ΨΜΕ, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 5.10: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ ΓΥΣ.



Εικόνα 5.11: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ ASTER.



Εικόνα 5.12: ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΨΜΕ Automatic Extraction.

Επίσης τα στατιστικά στοιχεία των αντίστοιχων διαφορών των ΨΜΕ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5-5. Τόσο από την μελέτη των στατιστικών στοιχείων όσο και από την οπτική εξέταση των προκυπτουσών διαφορών μεταξύ των ΨΜΕ προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Σχολιασμός Διαφορών μεταξύ ΨΜΕ	
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΓΥΣ	Συγκρίνοντας τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών των ΨΜΕ, συμπεραίνεται, ότι μετά το ΨΜΕ του ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ, ακολουθεί σε ποιότητα αυτό της ΓΥΣ, του ASTER και τελευταίο αυτό που προήλθε από την αυτόματη εξαγωγή (σύγκριση για την περιοχή ενδιαφέροντος)
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ASTER	
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs Automatic Extraction	

Πίνακας 5.4: Σχολιασμός Διαφορών μεταξύ των ΨΜΕ.

Στατιστικά Στοιχεία ΨΜΕ								
	Max	Min	Mean	Std	Skewness	Kyrtosis	RMSE	NSSDA(95%)
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ΓΥΣ	51.21	-149.34	0.75	8.37	-3.98	54.32	8.41	16.48
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs ASTER	63.04	-54.02	5.34	7.17	0.17	5.23	8.94	17.51
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs Automatic Extraction	233.21	-167.23	7.5	13.67	1.07	7.61	15.59	30.56

Πίνακας 5.5: Στατιστικά Στοιχεία των ΨΜΕ.

Αξίζει να σημειωθεί, όπως φαίνεται άλλωστε και στην εικόνα 5-12, η διαφορά των

ΨΜΕ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ vs Automatic Extraction, παρουσιάζει σημαντικό θόρυβο. Αυτό δικαιολογείται και από το ΨΜΕ Automatic Extraction, το οποίο είχε σημαντικό θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός πιθανώς να οφείλεται στη σάρωση των διαθετικών, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε δύο φορές. Ο σκοπός της υλοποίησης της δεύτερης σάρωσης των διαθετικών ήταν η βελτίωση της πρώτης σάρωσης, η οποία παρουσίασε σημαντικό θόρυβο. Τελικά και η δεύτερη σάρωση παρουσίασε θόρυβο, αλλά σε μικρότερο βαθμό σε σύγκριση με την πρώτη σάρωση των διαθετικών.

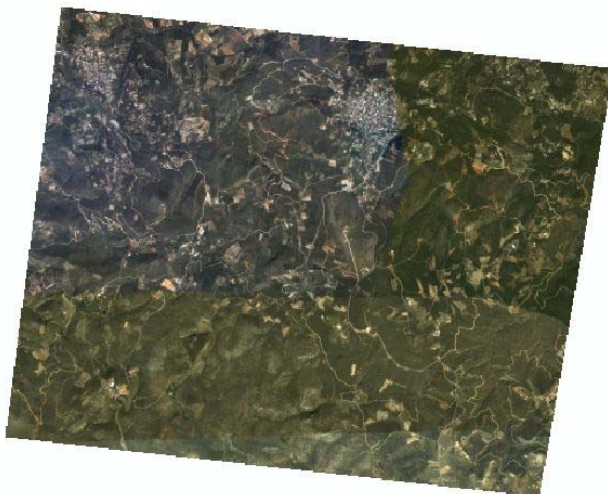
5.2.3 Φωτοσταθερά

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 26 φωτοσταθερά του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ (Μπουρεξής, Φ., 2012), τα οποία μετρήθηκαν με δέκτες GPS. Η ακρίβεια των φωτοσταθερών είναι της τάξης του 1 cm και καλύτερη. Τα φωτοσταθερά χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αυτόματη παραγωγή του ΨΜΕ βήματος 10 m από τα επικαλυπτόμενα διαθετικά, όσο και στην παραγωγή των ορθοεικόνων και στον προσδιορισμό των ακριβειών αυτών με χρήση των διαφορετικών ΨΜΕ. Επίσης η προβολή που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της UTM 34 North στο WGS84, ενώ το υψόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι ορθομετρικό.

5.2.4 Οπτικές Εικόνες

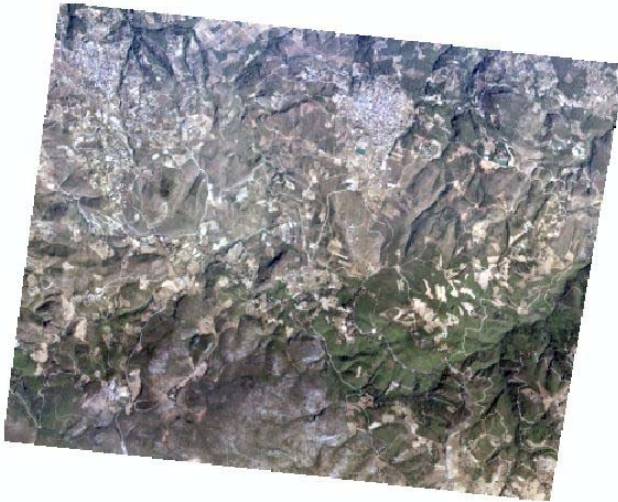
Οι οπτικές εικόνες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία ήταν δορυφορική εικόνα IKONOS, με μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m και ορθοαναηγμένη, της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, καθώς επίσης και ορθοαναηγμένη αεροφωτογραφία, της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, με μέγεθος εικονοστοιχείου 50 cm, του προγράμματος VLSO.

Η περιοχή η οποία ορίζεται τόσο από τη δορυφορική εικόνα όσο και από την αεροφωτογραφία είναι αυστηρά ίδια με την περιοχή που ορίζεται από την απεικόνιση του TerraSAR – X, προκειμένου να επιτευχθεί πανομοιότυπη μέθοδος ελέγχου - συμπερασμάτων των οπτικών προϊόντων με το προϊόν της ραντάρ απεικόνισης.



Εικόνα 5.13: Ορθοδιορθωμένη Δορυφορική Εικόνα IKONOS 1 m.

(Πηγή: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού)



Εικόνα 5.14: Ορθοδιορθωμένη Αεροφωτογραφία VLSO 50 cm.

(Πηγή: ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.)

5.2.5 Δεδομένα Αναφοράς – Ελέγχου

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα πληρότητας και ορθότητας στην εξαγωγή του οδικού δικτύου τόσο από τις προαναφερθείσες οπτικές εικόνες όσο και από τη ραντάρ απεικόνιση της συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής που ορίζεται από τα γεωγραφικά αυτά προϊόντα, δημιουργήθηκαν δεδομένα αναφοράς (reference data).

Η δημιουργία των συγκεκριμένων δεδομένων αναφοράς υλοποιήθηκε με ψηφιοποίηση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος οδικού δικτύου των εικόνων. Δημιουργήθηκαν δύο διανυσματικά γραμμικά αρχεία, το ένα για το πρωτεύον οδικό δίκτυο και το άλλο για το δευτερεύον.

Η ψηφιοποίηση των συγκεκριμένων οδικών αρτηριών έγινε από την οπτική εικόνα καλύτερης γεωμετρικής ανάλυσης, δηλαδή την εικόνα 50 cm της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ. Προκειμένου όμως να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα αναφοράς και στις τρεις εικόνες πραγματοποιήθηκε μία σειρά ελέγχων. Σκοπός της χρήσης των ίδιων δεδομένων αναφοράς από όλες τις εικόνες είναι πρώτον εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων για τα ποσοστά πληρότητας και ορθότητας εξαγωγής οδικού δικτύου και κατά δεύτερο λόγο για μείωση του χρόνου και κόστους στη διεργασία εξαγωγής του οδικού δικτύου.

Στον πρώτο έλεγχο υλοποιήθηκε οριζοντιογραφική σύγκριση κατά x και y μεταξύ της εικόνας της Κτηματολόγιο και της δορυφορικής εικόνας IKONOS και μεταξύ της εικόνας της Κτηματολόγιο και της ραντάρ απεικόνισης. Για τον έλεγχο αυτό εντοπίστηκαν 23 σημεία και στις τρεις εικόνες και οι διαφορές που εντοπίστηκαν ανά ζευγάρι ελέγχου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ - ΙΚΟΝΟΣ	
dx (m)	-0.612
dy (m)	-0.021

Πίνακας 5.6: Οριζοντιογραφικές Διαφορές dx και dy.

ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ - SAR	
dx (m)	-0.438
dy (m)	0.569

Πίνακας 5.7: Οριζοντιογραφικές Διαφορές dx και dy.

Στον δεύτερο έλεγχο εντοπίστηκαν υπάρχουσες διαφορές διευθύνσεων μεταξύ των προαναφερθέντων ζευγαριών εικόνων. Αρχικά σχεδιάστηκαν ευθείες γραμμές μεταξύ των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των οριζοντιογραφικών διαφορών μεταξύ των εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο υλοποιήθηκαν συνολικά 11 ευθείες γραμμές. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι γωνίες διεύθυνσης των συγκεκριμένων ευθειών ως προς τον Βορρά και στις τρεις εικόνες και στο τέλος υπολογίστηκαν οι διαφορές των γωνιών διεύθυνσης μεταξύ των ζευγαριών Κτηματολόγιο και της δορυφορικής εικόνας ΙΚΟΝΟΣ και της Κτηματολόγιο με τη ραντάρ απεικόνιση.

ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ - ΙΚΟΝΟΣ	
dθ	0.33970°
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ - SAR	
dθ	0.30840°

Πίνακας 5.8: Διαφορές dθ Γωνιών Διεύθυνσης.

Μελετώντας τις οριζοντιογραφικές διαφορές και τις διαφορές στις γωνίες διεύθυνσης και συνεκτιμώντας τα πλάτη των δρόμων των κατηγοριών δρόμων της μελέτης (από 6 m έως 12 m), συμπεραίνεται ότι δύναται να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα αναφοράς και στις τρεις εικόνες.

5.3 Παρουσίαση Λογισμικών

Για την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω λογισμικά, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά:

- Σουίτα LPS της ERDAS, προκειμένου να υλοποιηθεί η αυτόματη εξαγωγή του ΨΜΕ
- Σουίτα OrthoRadar της ERDAS, προκειμένου να υλοποιηθεί η ορθοαναγωγή της απεικόνισης TerraSAR – X
- Σουίτα Objective της ERDAS, προκειμένου να υλοποιηθεί η αυτόματη εξαγωγή του οδικού δικτύου από τις οπτικές και από τη ραντάρ απεικόνιση
- Λογισμικό ArcGIS, προκειμένου να εκτελεστούν εργασίες ψηφιοποίησης

(δεδομένα αναφοράς) και να δημιουργηθούν κατάλληλες ζώνες για τον υπολογισμό πληρότητας και ποιότητας των εξαχθέντων δεδομένων οδικού δικτύου

- Λογισμικό AutoCAD, για την υλοποίηση όλων εκείνων των απαραίτητων εργασιών σχεδίασης προκειμένου να υπολογιστούν οριζοντιογραφικές διαφορές και διαφορές των γωνιών διεύθυνσης των δεδομένων αναφοράς
- Λογισμικό Excel, για τον υπολογισμό ακριβειών των παραγόμενων ορθοεικόνων, των στοιχείων που απαιτούνται για τον έλεγχο των δεδομένων αναφοράς κτλ.

5.4 Ορθοαναγωγή TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής

Στη συγκεκριμένη εργασία υλοποιήθηκε ορθοαναγωγή της ραντάρ απεικόνισης TerraSAR – X, με χρήση ΨΜΕ διαφορετικού βήματος και ακριβειών. Επίσης για την ορθοαναγωγή χρησιμοποιήθηκαν τα φωτοσταθερά ως εξής:

- Υλοποιήθηκε ορθοαναγωγή της απεικόνισης SAR χρησιμοποιώντας κάθε φορά ένα ΨΜΕ και κάνοντας χρήση 6, 12 και 24 φωτοσταθερών.
- Στη συνέχεια για την εύρεση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας της ορθοαναγωγής, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 23 σημεία ελέγχου.
- Συνεπώς παράχθηκαν συνολικά 3 ορθοεικόνες ανά ΨΜΕ. Δηλαδή 3 ορθοεικόνες με ΨΜΕ της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ και χρήση 6, 12 και 24 φωτοσταθερών. Το ίδιο έγινε και με τα υπόλοιπα 3 ΨΜΕ (ΓΥΣ, ASTER και αυτόματο ΨΜΕ).
- Συνοψίζοντας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 ορθοαναγωγές (12 ορθοεικόνες) και στη συνέχεια υλοποιήθηκαν συνολικά 12 έλεγχοι προκειμένου να προσδιοριστεί η οριζοντιογραφική ακρίβεια των τελικών ορθοαναγμένων SAR απεικονίσεων.
- Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των ακριβειών.

Η διαδικασία της ορθοαναγωγής εκτελέστηκε στη σουίτα OrthoRadar της ERDAS. Εν συντομία τα βήματα της ορθοαναγωγής περιγράφονται ως εξής:

- Επιλογή της εικόνας ραντάρ για ορθοδιόρθωση
- Επιλογή επιθυμητού ΨΜΕ που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την ορθοαναγωγή

- Επιλογή χρήσης φωτοσταθερών
- Επιλογή προβολικού συστήματος (UTM Z34 N, WGS84)
- Επιλογής εισαγωγής φωτοσταθερών από το πληκτρολόγιο (X, Y, Z)
- Επίλυση του μοντέλου

Συνολικά έγιναν 3 επιλύσεις του γεωμετρικού μοντέλου. Η μία με χρήση 6 φωτοσταθερών, η άλλη με 12 και η τρίτη με 24 φωτοσταθερά. Παρακάτω παρατίθενται οι τρεις συγκεκριμένες επιλύσεις.

GCP Tool : (Input : in_6.gcc) (Reference : ref_6.gcc)

File View Edit Help

Control Point Error: (X) 0.6125 (Y) 0.9178 (Total) 1.1034

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.
1	GCP #1	■	160.776	-107.164	753302.142	4241801.610	108.617	Control	-0.776	-1.249	1.470	1.332
2	GCP #11	■	5927.334	-3244.443	749584.069	4239474.660	353.845	Control	-0.334	0.807	0.874	0.732
3	GCP #7	■	5181.976	-1564.969	750155.848	4240878.467	367.243	Control	-0.976	-0.417	1.062	0.962
4	GCP #13	■	114.668	-6152.118	752457.663	4236614.399	493.718	Control	0.332	1.610	1.644	1.490
5	GCP #17	■	11594.603	-164.971	746857.749	4242468.188	153.078	Control	-0.603	-0.270	0.661	0.599
6	GCP #21	■	9716.668	-5469.485	747235.380	4237794.566	368.888	Control	0.332	-0.052	0.336	0.305
7	GCP #6	■						Control				

Εικόνα 5.15: Επίλυση Μοντέλου με 6 Φωτοσταθερά.

GCP Tool : (Input : in_12.gcc) (Reference : ref_12.gcc)

File View Edit Help

Control Point Error: (X) 1.0691 (Y) 0.9684 (Total) 1.4425

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.
3	GCP #11	■	5927.334	-3244.443	749584.069	4239474.660	353.845	Control	-0.334	0.981	1.036	0.718
4	GCP #25	■	10766.553	-3080.437	746960.815	4239911.684	257.259	Control	1.447	-0.577	1.568	1.080
5	GCP #26	■	1305.323	-2387.500	752202.700	4239931.340	430.664	Control	-0.323	0.618	0.697	0.483
6	GCP #3	■	998.189	-594.796	752795.932	4241432.911	94.182	Control	-1.189	-1.914	2.253	1.562
7	GCP #7	■	5181.976	-1564.969	750155.848	4240878.467	367.243	Control	-0.976	-0.244	1.006	0.698
8	GCP #13	■	114.668	-6152.118	752457.663	4236614.399	493.718	Control	1.332	1.784	2.226	1.543
9	GCP #15	■	9166.632	-1140.859	748073.465	4241481.199	219.686	Control	-1.632	-0.667	1.763	1.222
10	GCP #17	■	11594.603	-164.971	746857.749	4242468.188	153.078	Control	-0.603	-0.097	0.610	0.423
11	GCP #20	■	10706.224	-1574.323	747158.471	4241203.429	235.016	Control	-1.224	0.794	1.459	1.011
12	GCP #21	■	9716.668	-5469.485	747235.380	4237794.566	368.888	Control	1.332	0.122	1.338	0.927
13	GCP #18	■						Check				

Εικόνα 5.16: Επίλυση Μοντέλου με 12 Φωτοσταθερά.

GCP Tool : (Input : in.gcc) (Reference : ref.gcc)

File View Edit Help

Control Point Error: (X) 1.1920 (Y) 1.0132 (Total) 1.5644

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.
1	GCP #1	Red	160.776	-107.164	753302.142	4241801.610	108.617	Control	0.224	-0.924	0.950	0.608
2	GCP #5	Red	6508.641	-544.476	749596.530	4241831.028	251.542	Control	-1.641	0.849	1.848	1.181
3	GCP #23	Red	8823.956	-3397.420	747947.606	4239523.837	354.651	Control	-0.956	0.798	1.245	0.796
4	GCP #11	Red	5927.334	-3244.443	749584.069	4239474.660	353.845	Control	-0.334	1.133	1.181	0.755
5	GCP #25	Red	10766.553	-3080.437	746960.815	4239911.684	257.259	Control	2.447	-0.425	2.484	1.588
6	GCP #26	Red	1305.323	-2387.500	752202.700	4239931.340	430.664	Control	-0.323	0.769	0.834	0.533
7	GCP #2	Red	367.835	-193.744	753184.139	4241733.580	98.379	Control	0.165	-0.547	0.571	0.365
8	GCP #3	Red	998.189	-594.796	752795.932	4241432.911	94.182	Control	-1.189	-1.763	2.126	1.359
9	GCP #4	Red	6568.373	-719.060	749526.862	4241688.614	277.949	Control	-1.373	-1.743	2.219	1.418
10	GCP #6	Red	5717.503	-1347.309	749878.315	4241100.030	368.521	Check				
11	GCP #7	Red	5181.976	-1564.969	750155.848	4240878.467	367.243	Control	-0.976	-0.092	0.981	0.627
12	GCP #8	Red	5166.599	-2099.587	750112.532	4240416.117	364.469	Control	2.401	0.321	2.423	1.549
13	GCP #9	Red	5155.389	-2097.808	750119.923	4240415.814	365.256	Control	-0.389	1.504	1.554	0.993
14	GCP #10	Red	5999.292	-3052.906	749560.327	4239645.734	357.995	Control	-1.292	-0.222	1.311	0.838
15	GCP #12	Red	4468.387	-3354.738	750320.313	4239297.381	450.888	Control	-0.387	-0.145	0.414	0.264
16	GCP #13	Red	114.668	-6152.118	752457.663	4236614.399	493.718	Control	0.332	1.935	1.964	1.255
17	GCP #14	Red	275.136	-6184.364	752363.689	4236596.814	495.075	Control	0.864	1.833	2.026	1.295
18	GCP #15	Red	9166.632	-1140.859	748073.465	4241481.199	219.686	Control	-1.632	-0.515	1.711	1.094
19	GCP #16	Red	8891.266	-1500.770	748155.326	4241158.070	268.382	Control	1.734	-0.786	1.904	1.217
20	GCP #17	Red	11594.603	-164.971	746857.749	4242468.188	153.078	Control	0.397	0.055	0.401	0.256
21	GCP #18	Red	11701.353	-163.074	746801.818	4242477.231	149.462	Control	-1.353	-1.269	1.855	1.186
22	GCP #19	Red	11042.562	-1314.248	747001.968	4241449.588	226.693	Control	-0.562	-0.946	1.100	0.703
23	GCP #20	Red	10706.224	-1574.323	747158.471	4241203.429	235.016	Control	-0.224	0.945	0.971	0.621
24	GCP #21	Red	9716.668	-5469.485	747235.380	4237794.566	368.888	Control	1.332	0.273	1.360	0.869
25	GCP #22	Red	10581.805	-5356.930	746793.043	4237942.185	331.377	Check				
26	GCP #24	Red	8870.251	-3358.766	747922.342	4239560.976	359.425	Control	-1.251	0.143	1.259	0.805
27	GCP #27	Red						Check				

Εικόνα 5.17: Επίλυση Μοντέλου με 24 Φωτοσταθερά.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των τριών προηγούμενων επιλύσεων παρατηρούμε ότι:

Αριθμός Φωτοσταθερών	Σφάλμα Φωτοσταθερών κατά X (σε εικονοστοιχεία)	Σφάλμα Φωτοσταθερών κατά Y (σε εικονοστοιχεία)	Συνολικό Σφάλμα
24	1.1920	1.0132	1.5644
12	1.0691	0.9684	1.4425
6	0.6125	0.9178	1.1034

Πίνακας 5.9: Στατιστικά Στοιχεία Επίλυσης Μοντέλου.

Παρατηρώντας τον πίνακα 5-9, προκύπτει ότι η μείωση του αριθμού φωτοσταθερών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου, οδηγεί και σε μείωση του σφάλματος τόσο κατά X και κατά Y όσο και συνολικά.

- Μετά την επίλυση του μοντέλου ο χρήστης περνάει στη διαδικασία της αναδόμησης πλέον της εικόνας. Τότε ορίζεται και το μέγεθος του εικονοστοιχείου του παραγόμενου ορθοανηγμένου προϊόντος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή ορίστηκε μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m.
- Τελικά υλοποιείται έλεγχος του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Ο έλεγχος δύναται να γίνει τόσο οπτικά με επίθεση ενός ΨΜΕ της περιοχής επί του ορθοανηγμένου προϊόντος όσο και με χρήση επαρκούς αριθμού σημείων ελέγχου (τουλάχιστον 20) και εξαγωγή σφάλματος.

Στην περίπτωση εξαγωγής σφάλματος με χρήση φωτοσταθερών, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 23 φωτοσταθερά μετρημένα με δέκτες GPS και τα αποτελέσματα προκύψαν με τη βοήθεια των πινάκων οι οποίοι διατίθενται ελεύθερα στον διαδικτυακό τόπο του National Standard for Spatial Data Accuracy του FGDC (Federal Geographic Data Committee - <http://www.fgdc.gov/>). Τα αποτελέσματα που προκύψαν με χρήση διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών και διαφορετικών ΨΜΕ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

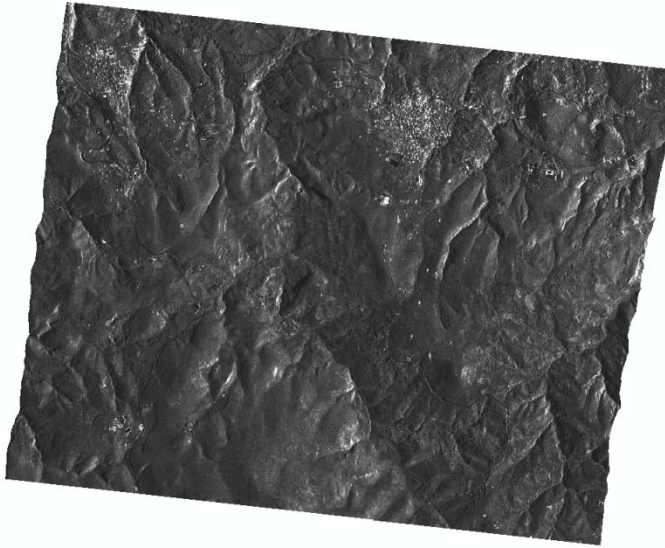
Αριθμός Φωτοσταθερών (που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του μοντέλου-OrthoRadar σουίτα)	24	12	6
RMSE – CE90 (σε m) (έλεγχος με χρήση 23 φωτοσταθερών)			
Χρησιμοποιούμενα ΨΜΕ			
Automatic Extraction (10m)	7.25 – 10.99	7.11 – 10.80	6.92 – 10.51
Aster GDEM (30m)	4.41 – 6.69	4.34 – 6.59	3.82 – 5.80
ΓΥΣ (30m)	3.81 – 5.79	3.62 – 5.50	3.46 – 5.25
ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. (5m)	1.30 – 1.97	1.21 – 1.83	1.20 – 1.82

Πίνακας 5.10: Οριζοντιογραφικές Ακρίβειες Παραχθέντων Ορθοεικόνων.

Παρατηρώντας τον πίνακα 5-10 προκύπτουν δύο συμπεράσματα:

- Όσο μειώνεται ο αριθμός των φωτοσταθερών που συμμετέχουν στην ορθοαναγωγή παρατηρείται ότι μειώνεται και το οριζοντιογραφικό σφάλμα του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Η παρατήρηση αυτή συμβαδίζει και με τον πίνακα 5-9 (βήμα επίλυσης μοντέλου χωρίς ακόμη να έχει γίνει η ορθοδιόρθωση της εικόνας), σύμφωνα με τον οποίο παρατηρείται ότι μείωση του αριθμού φωτοσταθερών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου, οδηγεί και σε μείωση του σφάλματος τόσο κατά Χ και κατά Υ όσο και συνολικά.
- Όσο καλύτερη είναι η ακρίβεια και ανάλυση του χρησιμοποιούμενου ΨΜΕ για την ορθοαναγωγή της εικόνας, τότε τόσο καλύτερη είναι και η οριζοντιογραφική ακρίβεια του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Η παρατήρηση αυτή συμβαδίζει και με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τέλος δείγμα από τις παραγόμενες ορθοεικόνες της απεικόνισης SAR έχει ως κάτωθι:



Εικόνα 5.18: Παραγόμενη Ορθοεικόνα (ΨΜΕ:ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ & 6 Φωτοσταθερά).

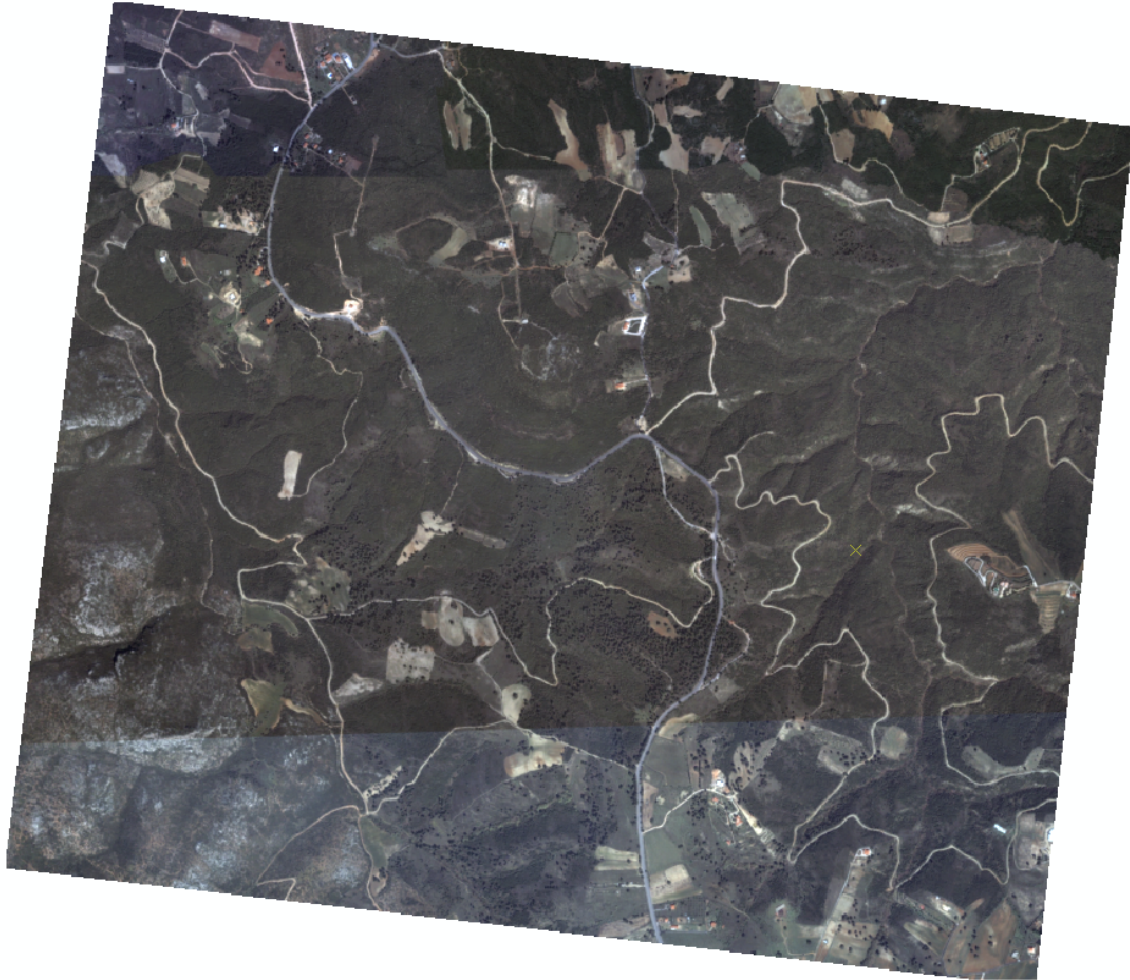
Συνοψίζοντας, κατά κύριο λόγο η ακρίβεια της ορθοεικόνας είναι εγγενώς συνάρτηση της ακρίβειας του ΨΜΕ και των εν συνεχεία σφαλμάτων παρεμβολής υψομέτρων. Αν υπήρχε ένα ΨΜΕ για κάθε ψηφίδα της ορθοεικόνας, δεν θα απαιτείτο καμία παρεμβολή (οπότε δεν θα υφίστατο σφάλμα παρεμβολής). Από την άλλη, συλλογή τόσο πυκνών ΨΜΕ δεν είναι βέβαια ρεαλιστική σε παραγωγικό περιβάλλον, έτσι στην πράξη η επιλογή της πυκνότητας του επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μορφή του εδάφους καθώς και από άλλα παράγωγα προϊόντα που πιθανώς επίσης ζητούνται, πχ. Ισούψεις (Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας, Μετάφραση Φεβ 2000).

5.5 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου

Επί του πρακτέου γίνεται εξαγωγή οδικού δικτύου από μία ορθοανηγμένη δορυφορική εικόνα IKONOS, με μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m, μία ορθοφωτογραφία με μέγεθος εικονοστοιχείου 50 cm και την ορθοανηγμένη εικόνα TerraSAR – X, με μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m. Όλες οι εικόνες είναι ορθοανηγμένες και απεικονίζουν ακριβώς την ίδια γεωγραφική περιοχή. Η εξαγωγή του οδικού δικτύου έγινε με χρήση της σουίτας Objective της ERDAS.

5.5.1 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Δορυφορική Εικόνα IKONOS στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής

Στη συγκεκριμένη υποεικόνα IKONOS αναγνωρίστηκαν δρόμοι με πλάτη από 3 m έως 10 m. Επίσης η συγκεκριμένη εικόνα αποτελεί ένα πολύγωνο με περίμετρο $P=11.68$ km και εμβαδόν $E=8.42$ km². Η περιοχή η οποία απεικονίζεται φαίνεται στην εικόνα 5-19:



Εικόνα 5.19: Δορυφορική Εικόνα IKONOS (μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m).

Για την εξαγωγή του δικτύου δηλώθηκαν συνολικά 41 δείγματα εκπαίδευσης, 30 (+) δείγματα και 11 (-) δείγματα, ενώ συνοπτικά τα βήματα επεξεργασίας που ακολουθήθηκαν έχουν ως εξής:

Επίπεδο Raster Object Creators:

Probability Threshold: 0.90

Επίπεδο Raster Object Operator:

Probability Filter: minimum probability = 0.30

Size Filter: minimum object size = 15 pixels

Centerline Convert: min width = 5 pixels & max width = 35 pixels

Επίπεδο Raster to Vector Conversion:

Επιλέχθηκε Line Trace (ανίχνευση γραμμής)

Επίπεδο Vector Object Operator:

Στη συγκεκριμένη εικόνα στο στάδιο του επεξεργαστή των διανυσματικών αντικειμένων (Vector Object Operator) οι συναρτήσεις που επιλέγονται για την επεξεργασία της είναι:

Generalize: tolerance= 1m

Line Link: automatic

Line Snap: T junction (max Gap= 30m)

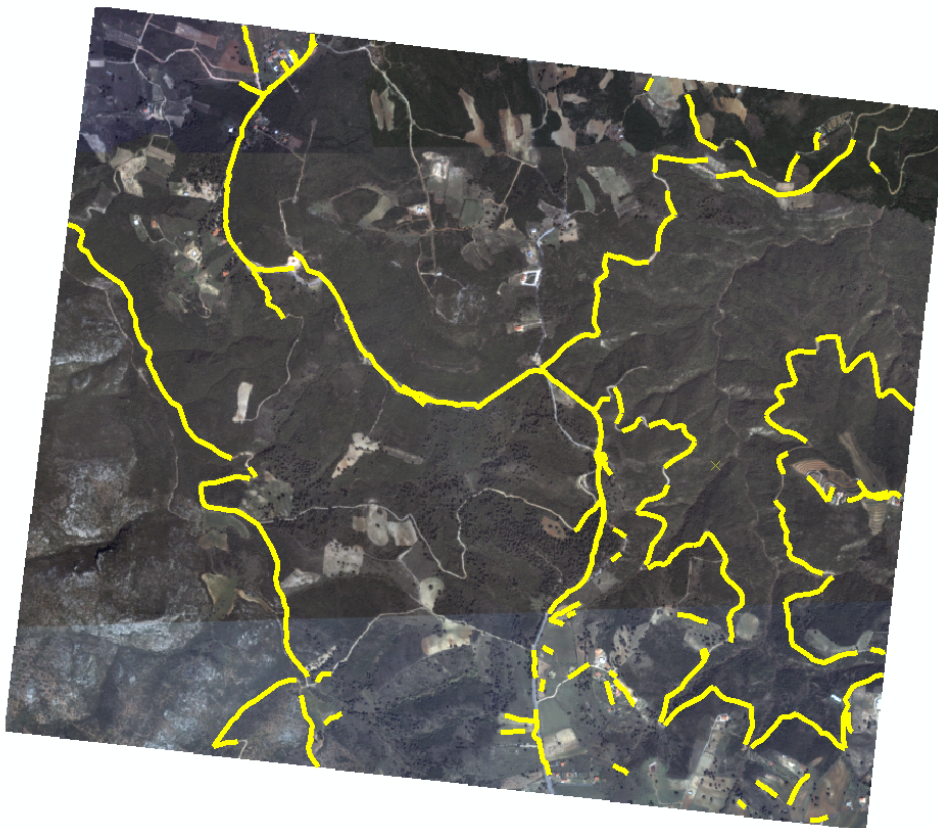
L extension (max Dist= 20m)

Trim= 20m

Line Remove: Max Gap= 40m

Min Remove length= 15m

Έτσι προκύπτει η τελική εικόνα, στην οποία είναι εμφανή τα τελικά αποτελέσματα εξαγωγής των δρόμων:



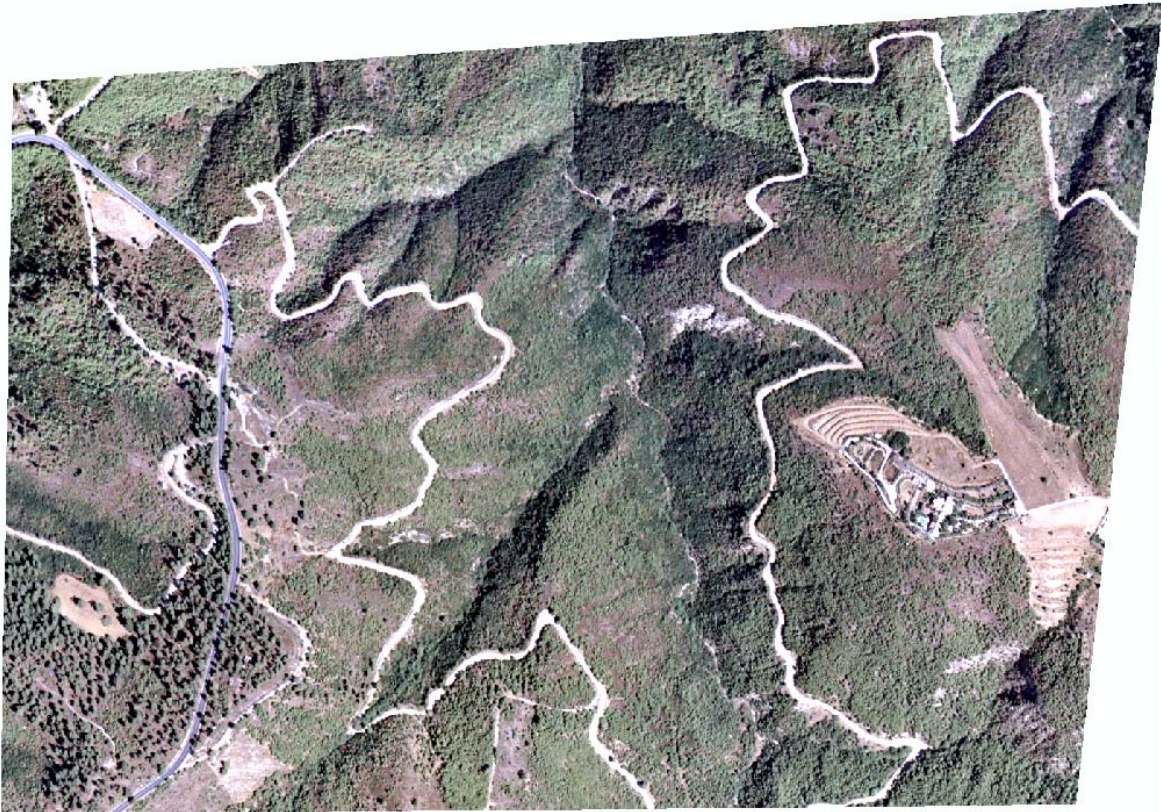
Εικόνα 5.20: Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από IKONOS.

Τέλος τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα από την εξαγωγή του οδικού δικτύου έχουν ως εξής:

Length reference data	: 16051.31 m	
Length extraction	: 27705.67 m	completeness: 86.54%
Length of matched extraction	: 14040.27 m	correctness : 50.68%
Length of matched reference	: 13890.26 m	quality : 47.01%
Length of unmatched reference	: 2161.05 m /Buffer 6 m	

5.5.2 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από Αεροφωτογραφία της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής

Στη συγκεκριμένη υποεικόνα της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ αναγνωρίστηκαν δρόμοι με πλάτη ίδια όπως και στην περίπτωση του τμήματος της εικόνας ΙΚΟΝΟΣ. Η συγκεκριμένη όμως εικόνα προς επεξεργασία είναι περίπου 6 φορές μικρότερη σε σχέση την εικόνα ΙΚΟΝΟΣ που επεξεργάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επίσης η συγκεκριμένη εικόνα αποτελεί ένα πολύγωνο με περίμετρο $P=4.62$ km και εμβαδόν $E=1.28$ km². Η περιοχή η οποία απεικονίζεται φαίνεται στην εικόνα 5-21:



Εικόνα 5.21: Αεροφωτογραφία της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ (μέγεθος εικονοστοιχείου 0.50 m).

Επίπεδο Raster Object Creators:

Probability Threshold: 0.90

Επίπεδο Raster Object Operator:

Probability Filter: minimum probability = 0.20

Size Filter: minimum object size = 40 pixels

Centerline Convert: min width = 5 pixels & max width = 50 pixels

Επίπεδο Raster to Vector Conversion:

Επιλέχθηκε Line Trace (ανίχνευση γραμμής)

Επίπεδο Vector Object Operator:

Στη συγκεκριμένη εικόνα στο στάδιο του επεξεργαστή των διανυσματικών αντικειμένων (**Vector Object Operator**) οι συναρτήσεις που επιλέγονται για την επεξεργασία της είναι:

Generalize: tolerance= 1m

Line Link: automatic

Line Snap: T junction (max Gap= 35m)

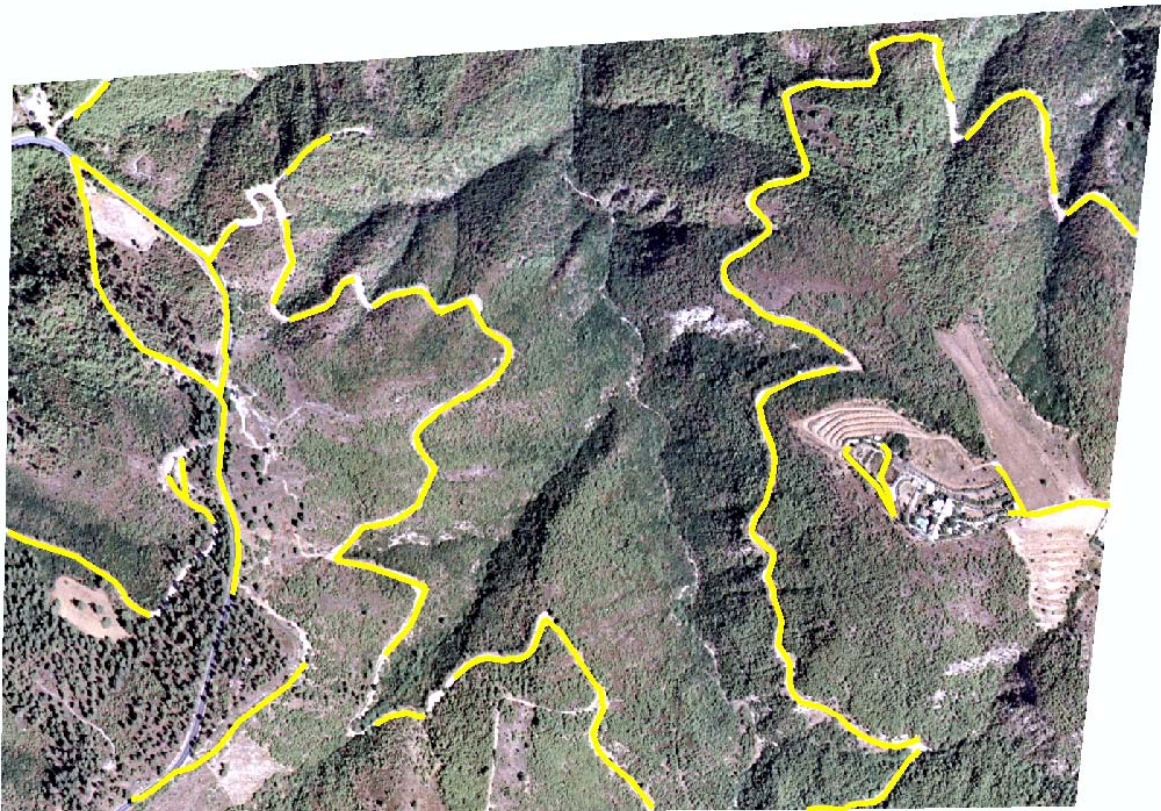
L extension (max Dist= 30m)

Trim= 20m

Line Remove: Max Gap= 40m

Min Remove length= 15m

Έτσι προκύπτει η τελική εικόνα, στην οποία είναι εμφανή τα τελικά αποτελέσματα εξαγωγής των δρόμων:



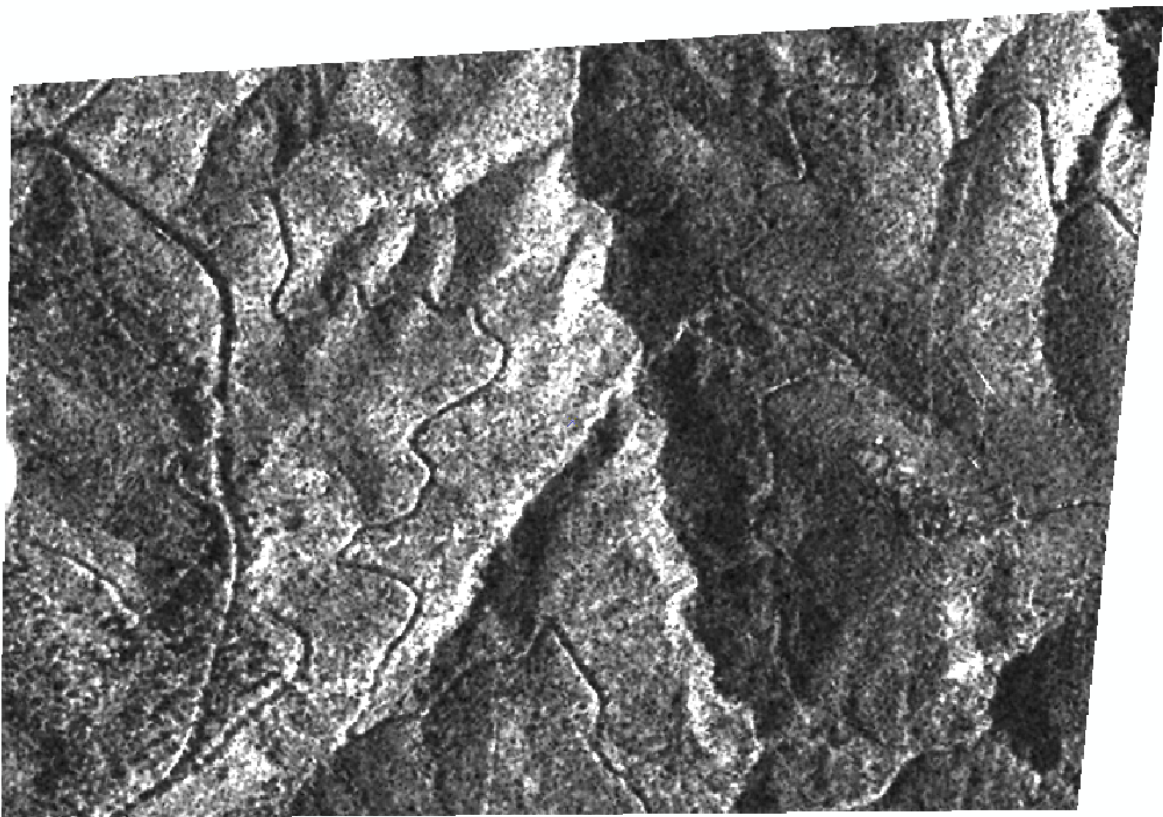
Εικόνα 5.22: Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ.

Τέλος τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα από την εξαγωγή του οδικού δικτύου έχουν ως εξής:

Length reference data	: 6586.30 m	
Length extraction	: 5775.39 m	completeness: 82.81%
Length of matched extraction	: 5380.08 m	correctness : 93.16%
Length of matched reference	: 5454.05 m	quality : 77.89%
Length of unmatched reference	: 1132.25 m	
Buffer 6 m		

5.5.3 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου από την Απεικόνιση TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής

Στην προσπάθεια εξαγωγής οδικού δικτύου με το λογισμικό IMAGINE Objective από την ραντάρ εικόνα TerraSAR – X, τα αποτελέσματα εξαγωγής είναι πολύ φτωχά και για αυτόν τον λόγο δεν είναι άξια αναφοράς.



Εικόνα 5.23: Ραντάρ Εικόνα TerraSAR - X (μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m).

5.6 Συμπεράσματα

Στην προσπάθεια εξαγωγής οδικού δικτύου από τις προαναφερθείσες εικόνες διαπιστώνονται τα παρακάτω:

Η εξαγωγή οδικού δικτύου από τις οπτικές εικόνες ήταν επιτυχής εν αντιθέση με την εξαγωγή οδικού δικτύου από τη ραντάρ εικόνα TerraSAR – X, η οποία κρίνεται ανεπιτυχής, με χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα:

Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά εξαγωγής οδικού δικτύου της IKONOS είναι αρκετά ικανοποιητικά (**completeness: 86.54%**, **correctness: 50.68%**, **quality: 47.01%**). Βέβαια αν συγκριθούν με τα αντίστοιχα ποσοστά εξαγωγής της εικόνας της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ (**completeness: 82.81%**, **correctness: 93.16%**, **quality: 77.89%**), διαπιστώνεται ότι υστερούν ως προς την ορθότητα και ποιότητα. Αυτό δύναται να εξηγηθεί για τους ακόλουθους λόγους, σύμφωνα με τους οποίους η αεροφωτογραφία της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ υπερτερεί έναντι της δορυφορικής εικόνας IKONOS:

- ✓ Καλύτερη γεωμετρική και ραδιομετρική ανάλυση (μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου της αεροφωτογραφίας, κατά το ήμισυ, σε σχέση με τη δορυφορική εικόνα)
- ✓ Η έκταση της περιοχής που καλύπτει η αεροφωτογραφία σε σχέση με τη δορυφορική εικόνα, είναι περίπου 6 φορές μικρότερη, κάτι το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή ποιοτικότερων αποτελεσμάτων. Δηλαδή εικόνες με μικρότερη έκταση δίνουν και ποιοτικότερα αποτελέσματα εξαγωγής και γενικότερα είναι ευκολότερα επεξεργάσιμες από τα αντίστοιχα λογισμικά. Τέλος το φαινόμενο της επεξεργασίας μικρών εικόνων, σε έκταση, είναι κάτι που εφαρμόζεται διεθνώς στη βιβλιογραφία.

Η εξαγωγή οδικού δικτύου από την TerraSAR – X, οδήγησε σε ανεπιτυχή αποτελέσματα, παρ' όλο που δοκιμάστηκαν όλα τα δυνατά μοντέλα εξαγωγής που διαθέτει το λογισμικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την επεξεργασία της ραντάρ εικόνας, εφαρμόστηκαν σε αυτήν φίλτρα αφαίρεσης θορύβου και στη συνέχεια φίλτρα ενίσχυσης (IMAGINE OrthoRadar). Εντούτοις οι συγκεκριμένες επεξεργασίες δεν βοήθησαν στην εξαγωγή οδικού δικτύου. Τέλος η εικόνα που επεξεργάστηκε ήταν αντίστοιχης έκτασης με αυτήν της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, κάτι το οποίο επίσης δεν οδήγησε σε επιτυχή αποτελέσματα.

5.7 Ανακεφαλαίωση

Ανακεφαλαιώνοντας, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας. Έγινε παρουσίαση των δεδομένων και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια υλοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων ενδιαφέροντος, ενώ στο τέλος παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα από κάθε περίπτωση επεξεργασίας. Το επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6), εστιάζει στην φωτοερμηνεία των εικόνων ραντάρ.

6. ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΡΑΝΤΑΡ

Στο τρέχον κεφάλαιο υλοποιείται μία σύγκριση μεταξύ των οπτικών εικόνων και των εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την φωτοερμηνεία αστικών και γενικότερα ανθρωπογενών χαρακτηριστικών, ενώ στο τέλος γίνεται μια προσπάθεια οπτικής φωτοερμηνείας της ραντάρ απεικόνισης TerraSAR – X.

6.1 Οπτικά vs Ραντάρ Συστήματα

Στον πίνακα 6-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων οπτικών και ραντάρ απεικονίσεων:

<i>Οπτικά vs Ραντάρ Συστήματα</i>		
1	V bands – λειτουργία κατά την ημέρα IR bands – λειτουργία ημέρα και νύχτα	Λειτουργία ημέρα και νύχτα, ανεξαρτήτως του ηλιακού φωτός
2	Σημαντική επίδραση της ατμόσφαιρας στα μετρημένα δεδομένα	Δυνατότητα λήψης με όλες τις καιρικές συνθήκες (μικρή ευαισθησία στα σύννεφα και σε συνθήκες χαμηλής βροχόπτωσης)
3	Απαιτούνται ατμοσφαιρικές διορθώσεις	Καμία επίδραση από τις ατμοσφαιρικές συνιστώσες
4	Μικρή ευαισθησία στις διηλεκτρικές ιδιότητες	Ευαισθησία στις διηλεκτρικές ιδιότητες (περιοχές με νερό, βιομάζα, πάγος)
5	Μικρή ευαισθησία στη σκληρότητα των επιφανειών (ταχύτητα θαλάσσιων ρευμάτων και ανέμων)	Ευαισθησία στη σκληρότητα των επιφανειών (ταχύτητα θαλάσσιων ρευμάτων και ανέμων)
6	Όχι μετρήσεις αποστάσεων (interferometry)	Ακριβείς μετρήσεις αποστάσεων (interferometry)
7	Όχι επιπλέον ευαισθησία στα ανθρωπογενή αντικείμενα	Ευαισθησία στα ανθρωπογενή αντικείμενα
8	Όχι επιπλέον ευαισθησία στη δομή στόχων	Ευαισθησία στη δομή στόχων (polarimetry)
9	Όχι διείσδυση στο υπέδαφος	Διείσδυση στο υπέδαφος

Πίνακας 6.1: Οπτικά vs Ραντάρ Συστήματα.

(Πηγή: Halounova, 2009)

Επιπλέον των διαφορών του πίνακα 6-1, υπάρχουν και οι διαφορές που αναφέρονται στον πίνακα 6-2 (φωτοερμηνεία εικόνων):

Οπτικές vs Ραντάρ Εικόνες		
1	Εύκολες στην ερμηνεία	Περίπλοκες αλληλεπιδράσεις (δύσκολες στην ερμηνεία, περίπλοκη επεξεργασία)
2	Εύκολη οπτική φωτοερμηνεία	Επιδράσεις θορύβου (δύσκολες στην οπτική φωτοερμηνεία)
3	Όχι τοπογραφικές επιδράσεις	Τοπογραφικές επιδράσεις
4	Χαμηλή επίδραση της σκληρότητας επιφανειών	Επίδραση της σκληρότητας επιφανειών

Πίνακας 6.2: Οπτικές vs Ραντάρ Εικόνες.

(Πηγή: Halounova, 2009)

6.2 Φωτοερμηνεία Ραντάρ Εικόνων

Παραδοσιακά οι εικόνες ραντάρ καταγράφονταν απευθείας σε αρνητικά φιλμ. Στη συνέχεια επεξεργάζονταν φωτογραφικά προκειμένου να παραχθεί η επιθυμητή αντίθεση στη σκηνή. Για αυτόν τον λόγο για πολλά χρόνια, η φωτοερμηνεία των εικόνων ραντάρ γινόταν οπτικά, χρησιμοποιώντας τεχνικές που είχαν αναπτυχθεί για τη φωτοερμηνεία αεροφωτογραφιών. Στη συνέχεια έγινε δυνατή η μετατροπή των εικόνων που είχαν καταγραφεί σε αρνητικό φιλμ, σε ψηφιακό μορφότυπο ή ακόμη και η απευθείας καταγραφή πρωτογενών δεδομένων σε ψηφιακά μέσα και μορφότυπους. Αυτό έπειτα βοήθησε στο χειρισμό και επεξεργασία δεδομένων ραντάρ με τη βοήθεια τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων (Henderson et al., 1998).

Οι απεικονίσεις ραντάρ έχουν μερικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι ριζικά διαφορετικά από αυτά των απεικονίσεων οι οποίες έχουν ληφθεί με ηλεκτρο-οπτικούς δέκτες, π.χ. Landsat, Spot απεικονίσεις και αεροφωτογραφίες. Οι διαφορές σ' αυτά τα χαρακτηριστικά οφείλονται στην διαφορετική τεχνική λήψης των απεικονίσεων ραντάρ και σχετίζονται είτε με την ένταση του σκεδαζόμενου, καταγραφόμενου σήματος (τόνος, κηλίδωση, υφή) ή με την γεωμετρία εδάφους και λήψης της απεικόνισης. Οι απεικονίσεις ραντάρ είτε είναι σε ψηφιακή μορφή ή σε αναλογική, έχουν εντελώς διαφορετική όψη από αυτή την οποία έχει συνηθίσει να βλέπει το ανθρώπινο μάτι. Οι διαφορετικοί τόνοι του γκρίζου αντιστοιχούν σε διαφορετικό βαθμό της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τους στόχους. Οι σκιές οι οποίες παρατηρούνται στις απεικονίσεις ραντάρ σχετίζονται με την γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από το ραντάρ και όχι με τις συνθήκες φωτισμού της γήινης επιφάνειας από τον ήλιο. Γι αυτό οι απεικονίσεις ραντάρ κυρίως αναδεικνύουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός στόχου σε αντίθεση με τις απεικονίσεις οι οποίες έχουν ληφθεί στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος οι οποίες αναδεικνύουν το χρώμα, την χημική σύνθεση ή την θερμοκρασία του στόχου. Οι οπτικές ομοιότητες μεταξύ των

απεικονίσεων ραντάρ και των απεικονίσεων των ηλεκτρο-οπτικών δεκτών συχνά οδηγούν σε εσφαλμένα πορίσματα, γι αυτό και η ανάλυση των απεικονίσεων ραντάρ απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και ειδικές γνώσεις (Καραθανάση, Β. 2012).

6.2.1 Στοιχεία Φωτοερμηνείας Απεικονίσεων Ραντάρ

Τα βασικά φωτοερμηνευτικά χαρακτηριστικά των απεικονίσεων ραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- Ο τόνος
- Το σχήμα
- Το μέγεθος
- Η σκιά
- Το πρότυπο
- Η δομή
- Η υφή

Ο Τόνος:

Μια επιφάνεια θεωρείται τραχεία (rough) εάν η δομή της επιφάνειάς της έχει διαστάσεις συγκρίσιμες με αυτήν του προσπίπτοντος μήκους κύματος. Εάν μία επιφάνεια είναι τραχεία ή ομαλή εξαρτάται από το μέγεθος των μεταβολών της κατά ύψος, το μήκος κύματος και την γωνία πρόσπτωσης.

Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος τόσο πιο μαλακή εμφανίζεται η επιφάνεια. Η τραχύτερη επιφάνεια σκεδάζει την ακτινοβολία ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις (diffuse reflectance), με αποτέλεσμα να επιστρέφει σήμα υψηλής έντασης στο δέκτη και η απεικόνιση να εμφανίζει ανοικτούς τόνους του γκρι γι αυτόν τον στόχο. Αντίθετα το ήρεμο νερό π.χ. το οποίο έχει ομαλή επιφάνεια συμπεριφέρεται ως τέλεια ανακλαστική επιφάνεια (specular reflectance) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σήμα επιστροφής και ο στόχος να εμφανίζεται με σκούρους τόνους του γκρι. Γενικά, οι τόνοι του γκριζου οι οποίοι εμφανίζονται σε μία απεικόνιση radar αντιστοιχούν σε διαφορετικούς συντελεστές οπισθοσκέδασης οι οποίοι με τη σειρά τους αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους στόχων. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης μιας επιφάνειας παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην διαμόρφωση των τόνων του γκριζου μιας απεικόνισης. Άλλες παράμετροι είναι η υγρασία (διηλεκτρική σταθερά) του στόχου, η γωνία πρόσπτωσης και ο προσανατολισμός του στόχου ως προς την γωνία όρασης του ραντάρ. Όσο μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης τόσο ελαττώνεται το σήμα επιστροφής. Το ήρεμο νερό εμφανίζεται με σκούρους τόνους στην απεικόνιση, τα δένδρα με μεσαίους τόνους και τα κτήρια με υψηλούς τόνους. Στον τόνο του γκριζου των κτηρίων πρωτεύοντα ρόλο έπαιξε ο προσανατολισμός τους ως προς την γωνία όρασης του ραντάρ.

Το Σχήμα:

Ως σχήμα θα μπορούσε να οριστεί το όριο ενός αντικειμένου. Μερικά φυσικά και τεχνικά αντικείμενα, όπως π.χ. ένας αεροδιάδρομος, έχει χαρακτηριστικό σχήμα στις απεικονίσεις ραντάρ, με αποτέλεσμα να απεικονίζεται με σκούρο τόνο του γκρι. Επίσης η ευκρίνεια του σχήματος των αντικειμένων τα οποία μπορούν να απεικονιστούν σε μία εικόνα ραντάρ, εξαρτάται και από τη διακριτική ικανότητα του δέκτη.

Η Υφή:

Η υφή αναφέρεται στον βαθμό τραχύτητας μιας απεικονιζόμενης επιφάνειας και εκφράζει την συχνότητα εναλλαγής των τόνων του γκριζου ανά μοναδιαία επιφάνεια. Το μοναδιαίο στοιχείο υφής είναι το μικρότερο ραδιομετρικά στοιχείο το οποίο συνθέτει την υφή. Η υφή στις ραντάρ απεικονίσεις μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικρο-υφή, μεσο-υφή και μακρο-υφή. Για παράδειγμα ένας δέκτης ίππεται πάνω από μια δασώδη περιοχή σε τέτοιο ύψος ώστε να μην μπορεί να διακρίνει μεμονωμένα φύλλα αλλά αρκετά χαμηλά ώστε να διακρίνει την συγκόμωση των δένδρων. Πρώτα διακρίνει τις διαφορετικές συγκεντρώσεις δένδρων. Τα δένδρα τα οποία απαρτίζουν μια συγκέντρωση μπορεί να είναι οξιές, πεύκα, δρυς, κλπ. Οι διαφορετικές συγκεντρώσεις ορίζουν την μακρο-υφή ή τη δομή μιας απεικόνισης. Οι συγκομώσεις των δένδρων είναι οι μοναδιαίες επιφάνειες για τη διάκριση των διαφορετικών ειδών δένδρων. Αυτές ορίζουν τη μεσο-υφή και μια συγκόμωση είναι το μοναδιαίο στοιχείο υφής. Ο τόνος του γκριζου του κάθε εικονοστοιχείου εξαρτάται από την ποσότητα και τον προσανατολισμό των φύλλων τα οποία σκεδάζουν την ακτινοβολία. Τα οριζόντια φύλλα σκεδάζουν πολύ περισσότερη ακτινοβολία από ότι τα κάθετα. Αυτή η διαφορά φωτεινότητας μεταξύ εικονοστοιχείων τα οποία ανήκουν στην ίδια κατηγορία εμφανίζονται στην απεικόνιση ως μικρο-υφή και είναι η λεγόμενη κηλίδωση ή θόρυβος ραντάρ απεικόνισης.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι:

- Η κηλίδωση επικάθεται της υφής και της δομής δημιουργώντας προβλήματα στις επεξεργασίες υφής ή αναγνώρισης γραμμών. Είναι θόρυβος πολλαπλασιαστικός και όχι προσθετικός. Δηλαδή ενισχύοντας τις τιμές της απεικόνισης (ως αποτέλεσμα αύξησης της εκπεμπόμενης ισχύος), ενισχύεται και η κηλίδωση.
- Τόνος είναι η μέση τιμή της ενεργού διατομής radar για επιφάνεια αντίστοιχη του ενός εικονοστοιχείου. Η χωρική εναλλαγή του τόνου μας δίνει την υφή.
- Η υφή σχετίζεται με τη χωρική κατανομή των τιμών των εικονοστοιχείων και εξαρτάται από την απεικόνιση, για ένα σύστημα το οποίο παρέχει απεικονίσεις σταθερής ποιότητας.

- Η υφή και η δομή εξαρτώνται από τη διακριτική ικανότητα του συστήματος.
- Οποιαδήποτε επεξεργασία υφής πρέπει να εκτελείται σε απεικονίσεις SAR μη διορθωμένες γεωμετρικά, γιατί οποιαδήποτε γεωμετρική διόρθωση όπως π.χ. αυτή η οποία μετατρέπει την πλευρική απόσταση σε απόσταση εδάφους έχει επιπτώσεις στη ραδιομετρία (τις αρχικές ψηφιακές τιμές) των απεικονίσεων.

6.2.2 Φωτοερμηνεία Αστικού Περιβάλλοντος

Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην ένταση των επιστροφών των συστημάτων ραντάρ από τα διάφορα επιφανειακά αντικείμενα, είναι πολλοί και περίπλοκοι. Παρ' όλο που έχουν αναπτυχθεί πολλά θεωρητικά μοντέλα, με τη βοήθεια των οποίων γίνεται προσπάθεια περιγραφής του τρόπου με τον οποίο τα διάφορα επιφανειακά αντικείμενα αντανακλούν την ενέργεια που εκπέμπουν τα ραντάρ, περισσότερο πρακτική και αποδοτική πηγή γνώσεων αποτέλεσαν οι διάφορες πρακτικές παρατηρήσεις. Συνοπτικά οι παράγοντες επιρροής της έντασης των επιστροφών των ραντάρ είναι οι παράμετροι των συστημάτων των ραντάρ, οι ιδιότητες των χαρακτηριστικών της επιφάνειας ή οι παράμετροι των στόχων και περιβαλλοντικές παράμετροι (Henderson et al., 1998).

Οι βασικές παράμετροι των συστημάτων ραντάρ είναι το μήκος κύματος, η πόλωση, το μήκος του παλμού και η γωνία πρόσπτωσης, η γεωμετρία της εικόνας, ο αριθμός των όψεων (looks) και οι διαφορές φάσεις των κυμάτων των ραντάρ. Οι ιδιότητες των χαρακτηριστικών επιφανείας που επιδρούν στις επιστροφές των ραντάρ είναι αυτές που απορρέουν από τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι η τραχύτητα της επιφάνειας και ο προσανατολισμός των χαρακτηριστικών. Επίσης η πιο σημαντική μέτρηση από τις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι η διηλεκτρική σταθερά, η οποία αποτελεί ένδειξη ανακλαστικότητας και αγωγιμότητας των επιφανειακών υλικών. Οι πιο σημαντικές περιβαλλοντικές παράμετροι είναι το είδος των εδαφών, το είδος και η ποσότητα των καλύψεων βλάστησης, η υγρασία του εδάφους, οι χρήσεις γης και η ιστορία των οικισμών και τέλος οι κλιματικές και εποχικές αλλαγές. Οι επιδράσεις μερικών από τις προαναφερθείσες παραμέτρους έχουν αναφερθεί από τους Fung και Ulaby (1983) και τους Simonett και Davis (1983).

6.2.2.1 Μήκος Κύματος Ραντάρ

Το μήκος κύματος των ραντάρ δύναται να επιδράσει στην ανίχνευση οικισμών και στη φωτοερμηνεία αστικών σκηνών με ποικίλους τρόπους. Πρώτα απ' όλα, τα χαρακτηριστικά των επιφανειών ανταποκρίνονται διαφορετικά στους παλμούς ραντάρ διαφορετικών μηκών κύματος και παράγουν ποικίλες επιστροφές. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι η τραχύτητα των επιφανειών προσδιορίζεται σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος του ραντάρ. Μία επιφάνεια η οποία απεικονίζεται ομαλή σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος μπορεί στη συνέχεια να εμφανίζεται ως λίγο τραχιά σε ένα μεγαλύτερο ή μικρότερο μήκος κύματος.

Δευτερευόντως, το μήκος κύματος της ενέργειας του ραντάρ, επιδρά στη διακριτική ανάλυση μιας εικόνας κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων. Επιπλέον το μήκος κύματος των μικροκυμάτων, καθορίζει το βάθος διείσδυσης στις καλύψεις βλάστησης και στο ανάγλυφο της επιφάνειας και συνεπώς την πιθανή επίδραση της σκεδαζόμενης έντασης για μία γνωστή περιοχή (Trevett, 1986).

Μόνο τα μεγάλα μήκη κύματος δύνανται να αποκαλύψουν χαρακτηριστικά της επιφάνειας, τα οποία είναι κρυμμένα κάτω από βλάστηση, καθώς επίσης παρέχουν και πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους.

6.2.2.2 Συμπληρωματική Γωνία Πρόσπτωσης

Η συγκεκριμένη γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από ένα υποθετικό οριζόντιο επίπεδο και της ακτίνας του ραντάρ από την κεραία στον στόχο επί του εδάφους. Για μία επίπεδη επιφάνεια, η συγκεκριμένη γωνία αποτελεί τη συμπληρωματική γωνία της γωνίας πρόσπτωσης (η γωνία που σχηματίζεται από το κατακόρυφο επίπεδο και την ακτίνα του ραντάρ), αλλά για μία επιφάνεια με κλίση η σχέση των δύο προαναφερθέντων γωνιών δεν είναι τόσο απλή.

Η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης επηρεάζει την ανίχνευση οικισμών με τη βοήθεια του ελέγχου που ασκεί επί της διακριτικής ικανότητας στη διεύθυνση των αποστάσεων. Υψηλότερη διακριτική ανάλυση επιτρέπει ανίχνευση μικρότερων οικιών. Επιπλέον η συγκεκριμένη γωνία επηρεάζει το μήκος σκίασης, με αποτέλεσμα μικρότερες γωνίες να δίνουν μεγαλύτερη σκίαση, με αποτέλεσμα οικισμοί ή οικίες οι οποίες βρίσκονται πίσω από κεκλιμένες επιφάνειες να είναι μη ανιχνεύσιμες.

Ο Henderson (1990) αξιολόγησε την επίδραση συγκεκριμένων γωνιών στην ανίχνευση κατοικιών. Εξετάστηκαν τρία δείγματα με τρεις διαφορετικές γωνίες και διαπιστώθηκε ότι απότομες συμπληρωματικές γωνίες πρόσπτωσης με τιμή μικρότερη από 20°, δεν αποτελούσαν χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση κατοικιών, λόγω ύπαρξης πολλών σφαλμάτων. Αντίθετα αύξηση των γωνιών οδήγησε στην βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης κατοικιών, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από μία συγκεκριμένη τιμή αύξησης, η ακρίβεια μειωνότανε.

6.2.2.3 Πόλωση

Μία από τις πρώτες μελέτες για την επίδραση της πόλωσης, έγινε από τον Lewis (1968; 1969), ο οποίος εξέτασε την ανίχνευση διάφορων πολιτισμικών χαρακτηριστικών με χρήση των Ka-band HH, HV, VV και VH πολωμένων εικόνων. Οι HV πολωμένες εικόνες, αποδείχτηκε πως ήταν οι καταλληλότερες για την ανίχνευση χαρακτηριστικών υψηλής έντασης, όπως κτίσματα σε αστικές περιοχές ή κτίσματα τα οποία ήταν σε φάρμες. Λιγότερο κατάλληλες ήταν οι HH και VH πολωμένες εικόνες, ενώ οι VV πολωμένες εικόνες ήταν οι λιγότερο επιθυμητές για τις συγκεκριμένες εργασίες ανίχνευσης.

Ο Bryan (1975) παρουσίασε τα πλεονεκτήματα χρήσης εικόνων πολλαπλών

συχνοτήτων και πολώσεων για τη φωτοερμηνεία αστικών χαρακτηριστικών. Επίσης συμπεράνε ότι εάν η φωτοερμηνεία υλοποιούνταν σε ένα μήκος κύματος και οι χάρτες πόλωσης προέρχονταν από X-HV εικόνες, τότε επιτύγχανε υψηλότερη φωτοερμηνευτική ακρίβεια σε σύγκριση με τις πολωμένες εικόνες X-HH, L-HH και L-HV.

Οι Henderson και Mogilski (1987) μελέτησαν την επίδραση της πόλωσης στη συστηματική χαρτογράφηση αστικών χρήσεων γης. Για τη μελέτη τους χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις πυκνόμετρου X-band και πολωμένων δεδομένων για την πόλη του Los Angeles. Η μελέτη έδειξε ότι η χρήση δεδομένων μονής πόλωσης δεν ήταν επιθυμητή για καμία από τις κατηγορίες χρήσεων γης. Επίσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι από τις συνολικά επτά κατηγορίες χρήσεων γης, μόνο η κατηγορία των εμπορικών χρήσεων προκαλούσε μία σημαντική διαφορά στην απόκριση του σήματος ραντάρ, μεταξύ των πολώσεων HH και HV.

6.2.2.4 Χωρική Ανάλυση

Η χωρική ανάλυση σε μία εικόνα ραντάρ, αναφέρεται στην ελάχιστη διακριτή απόσταση που απαιτείται, έτσι ώστε δύο ανακλαστικές ραντάρ να παράγουν δύο διακριτά σήματα ραντάρ στις εικόνες. Η χωρική ανάλυση προσδιορίζεται, όπως έχει ήδη προαναφερθεί από την ανάλυση στη διεύθυνση των αποστάσεων και από την ανάλυση στη διεύθυνση των αζιμουθίων.

Οι Inkster et al. (1980) εξέτασαν τις επιδράσεις της χωρικής ανάλυσης στη φωτοερμηνεία χρήσεων και καλύψεων γης σε γεωργικές και δασικές εκτάσεις. Η μελέτη τους έδειξε ότι περίπου το 90% των αγροτικών εκτάσεων ήταν δυνατό να ταυτοποιηθεί με χρήση του τόνου και της υψής των συγκεκριμένων εκτάσεων, αλλά οι δασικές εκτάσεις, ήταν δύσκολο να διαχωριστούν σε αναλύσεις χειρότερες από 10 x 10 m. Ωστόσο, οι επιδράσεις της χωρικής ανάλυσης στην ανίχνευση κατοικιών, καθώς επίσης και η ακρίβεια της σε βάθους ανάλυσης του αστικού περιβάλλοντος, ουδέποτε αξιολογήθηκαν. Διαισθητικά, εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης επιτρέπουν την ανίχνευση μικρότερων κατοικιών και των ορίων που αυτές σχηματίζουν με τις γειτονικές τους.

6.2.2.5 Κλίμακα Εικόνας

Η κλίμακα εικόνας σχετίζεται άμεσα με τη χωρική ανάλυση που παρέχουν τα συστήματα ραντάρ και επηρεάζει την οπτική φωτοερμηνεία της εικόνας ραντάρ. Όταν οι εικόνες παρουσιάζονται κάτω από συγκεκριμένη κλίμακα, τα γεωμετρικά στοιχεία τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται στην οπτική φωτοερμηνεία, γίνονται δύσκολα διακριτά. Επίσης, όταν τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά κάθε μεμονωμένου εικονοστοιχείου δύνανται να οπτικοποιηθούν καθαρά, η περεταίρω μεγέθυνση των εικόνων μπορεί να δυσχεραίνουν την φωτοερμηνεία χωρικών προτύπων. Το μέγεθος της μεγέθυνσης ορίζεται από το θόρυβο – κηλίδωση της εικόνας ραντάρ. Οι Simonett και Davis (1983) πρότειναν ότι ο μέγιστος συντελεστής μεγέθυνσης για εικόνες διακριτικής ανάλυσης 15 m, είναι περίπου 10, χωρίς την αφαίρεση θορύβου.

Οι Henderson και Anuta (1979; 1980) εξέτασαν την επίδραση της κλίμακας της εικόνας στην ανίχνευση κατοικιών ποικίλων μεγεθών. Συνέκριναν τον αριθμό των κατοικιών που ανιχνεύτηκαν με το ελάχιστο μέγεθος των κατοικιών σε X-band, K-band και L-band εικόνες και σε επτά διαφορετικές κλίμακας από 1:180.000 έως 1:600.000 και διαπιστώθηκε ότι εικόνες μεγάλης κλίμακας είχαν μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορισμού και επέτρεπαν την ανίχνευση πολύ μικρότερων κατοικιών. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι εικόνες κλίμακας 1:200.000 ή και μεγαλύτερης ήταν απαραίτητες για την ανίχνευση οικισμών. Επίσης αναλόγως της κλίμακας και του μήκους κύματος, το ελάχιστο μέγεθος ανίχνευσης κατοικιών κυμαινόταν για οικισμούς με πληθυσμό από 200 έως 25.000, ενώ όσο αυξάνεται ο πληθυσμός, η ακρίβεια εντοπισμού αυξάνεται επίσης.

6.2.2.6 Αριθμός Όψεων (Looks)

Ο θόρυβος-κηλίδωση αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για διαδικασίες αυτόματης ταξινόμησης εικόνων ραντάρ. Επίσης επηρεάζει την οπτική ποιότητα των εικόνων ραντάρ και περιορίζει επίσης το συντελεστή μεγέθυνσης για τις συγκεκριμένες εικόνες. Ακόμη δύναται να εμποδίσει τον ακριβή εντοπισμό μικρών οικισμών. Γι' αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί αφαίρεσης ή περιορισμού του συγκεκριμένου φαινομένου, όπως η εφαρμογή ειδικών φίλτρων.

Βέβαια ο θόρυβος δύναται να αφαιρεθεί με τη δημιουργία εικόνας πολλαπλών όψεων. Τα συστήματα ραντάρ παρέχουν πολλά εργαλεία ελέγχου του μεγέθους του κελιού της εικόνας τόσο κατά τη διεύθυνση των αποστάσεων όσο και κατά τη διεύθυνση των αζιμουθίων. Η δέσμη ακτίνας δύναται να υποδιαιρεθεί σε έναν αριθμό μικρότερων δεσμών ακτίνας, κάθε μία από τις οποίες παρέχει μία ανεξάρτητη «όψη» ή δείγμα της απεικονιζόμενης σκηνής. Η κατανομή των επιπέδων θορύβου εντός των συγκεκριμένων ανεξάρτητων εικόνων είναι επίσης ανεξάρτητη η μία από την άλλη. Με αυτόν τον τρόπο η μείωση του θορύβου επιτυγχάνεται υπολογίζοντας το μέσο όρο των ανεξάρτητων αυτών εικόνων. Το επίπεδο της μείωσης θορύβου σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των όψεων. Εάν N ο αριθμός των ανεξάρτητων εικόνων που χρησιμοποιούνται, η τυπική απόκλιση του θορύβου της εικόνας θα μειωθεί κατά ένα παράγοντα N . Με άλλα λόγια όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων δειγμάτων που χρησιμοποιούνται, τόσο μικρότερη είναι η τυπική απόκλιση του θορύβου στην υπόλοιπη εικόνα, άρα τόσο περισσότερο ομαλοποιημένη είναι η εικόνα με λιγότερο κοκκώδεις τόνους του γκρι της εικόνας και συνεπώς τόσο καλύτερη φωτοερμηνεία αυτής δύναται να επιτευχθεί.

Ωστόσο το τίμημα της μείωσης του θορύβου με τη διαδικασία των πολλαπλών όψεων, είναι η μείωση της χωρικής ανάλυσης των πρωτογενών δεδομένων κατά ένα συντελεστή N . Για παράδειγμα για την εικόνα SEASAT SAR, η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αζιμουθίων είναι 6.5 m. Συνεπώς η διαδικασία λήψης τεσσάρων ανεξάρτητων όψεων μειώνει τη χωρική ανάλυση στα 25 m.

6.2.2.7 Διαφορές Φάσης

Τα πολωτικά ραντάρ μετρούν την ηχώ των ραντάρ χρησιμοποιώντας διαφορετικές πολώσεις και παράγουν πολλές εικόνες της ίδιας περιοχής με διαφορετικό περιεχόμενο εικόνας. Επιπλέον επιτρέπουν την εξέταση των διαφορών φάσης μεταξύ σημάτων διαφορετικών πολώσεων. Μελέτες από επιστήμονες στο Microwave Instrumentation Laboratory of the European Space Research and Technology Center (ESTEC), στην Ολλανδία, κατά τη διάρκεια του προγράμματος Multiple Airborne Experiments Towards Radar Observation (MAESTRO) (1989), έδειξαν ότι η πληροφορία φάσης των ραντάρ ήταν χρήσιμη για την ανίχνευση των σοδιών, καθώς επίσης και για το διαχωρισμό διαφορετικών ειδών χρήσεων γης (Desnos και Attena, 1991; Wooding και Attena, 1992). Σε μία βαθμονομημένη εικόνα ραντάρ περιοχής του San Francisco (Desnos και Attena, 1991), η υδάτινη επιφάνεια έχει πολύ μικρή διαφορά φάσης, όπως άλλωστε προβλέπεται από τα μοντέλα οπισθοσκέδασης των ραντάρ. Τα κτίσματα κατά μήκος παράλληλων δρόμων παρουσιάζουν περίπου 180° διαφορά φάσης εξαιτίας των μηχανισμών διπλής ανάκλασης. Η παλιά πόλη και το πάρκο δείχνουν ένα μεγάλο εύρος διαφορών φάσης εξαιτίας της ύπαρξης περισσότερο πολύπλοκης γεωμετρίας των αντικειμένων που προκαλούν την οπισθοσκέδαση.

6.2.2.8 Γεωμετρία Εικόνας Ραντάρ

Πολλά έμφυτα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων ραντάρ επηρεάζουν την ανίχνευση, χαρτογράφηση και ανάλυση οικισμών και κτισμάτων. Τα περισσότερο σημαντικά χαρακτηριστικά από αυτά είναι οι σκιάσεις ραντάρ, οι σμικρύνσεις και οι πτυχώσεις. Οι επιδράσεις των συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι σημαντικές στη φωτοερμηνεία των εικόνων ραντάρ. Για παράδειγμα οικισμοί ή χρήσεις γης που καλύπτονται από το φαινόμενο της σκίασης είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν και μόνο λήψη εικόνων από διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης ή κατεύθυνση λήψης μπορούν να βοηθήσουν στην ανίχνευση αυτών.

Το φαινόμενο της σμίκρυνσης συμβαίνει στις εικόνες ραντάρ σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με 90° , με αποτέλεσμα το μήκος της κεκλιμένης απόστασης στο έδαφος να είναι ίσο με το κεκλιμένο μήκος στην εικόνα ραντάρ. Η σμίκρυνση επηρεάζει την ανίχνευση οικισμών με δύο τρόπους. Πρώτα απ' όλα η μείωση αυτή που προκαλείται στην κλίμακα από το φαινόμενο της σμίκρυνσης δύναται να οδηγήσει στη μη ανίχνευση μικρού μεγέθους κατοικιών και δευτερευόντως, όσο μεγαλύτερο είναι το φαινόμενο της σμίκρυνσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας που παρουσιάζεται στην εικόνα. Όταν το ποσοστό της σμίκρυνσης αγγίζει ένα συγκεκριμένο επίπεδο, η ενέργεια είναι τόσο υψηλή, με αποτέλεσμα την υπερφόρτωση τη δέκτη. Έτσι η αντίθεση της εικόνας μεταξύ κτισμάτων και του περιβάλλοντα χώρου μειώνεται αισθητά.

6.2.2.9 Κατεύθυνση Λήψης-Προσανατολισμός Χαρακτηριστικών

Ο Lewis (1968; 1969) ήταν μεταξύ των πρώτων που είχαν εντοπίσει τις επιδράσεις της κατεύθυνσης λήψης ή του προσανατολισμού των χαρακτηριστικών στην ένταση

οπισθοσκέδασης. Κατέγραψε ότι η ανίχνευση γραμμικών χαρακτηριστικών, όπως π.χ. σιδηροδρομικές γραμμές, εξαρτάται από την γωνία η οποία σχηματίζεται από τη γραμμή πτήσης αλλά και τον προσανατολισμό των γραμμικών χαρακτηριστικών. Ο Lewis διαπίστωσε πως τα γραμμικά χαρακτηριστικά ήταν πιο εύκολα ανιχνεύσιμα στις ΗΗ πολωμένες εικόνες όταν τα γραμμικά χαρακτηριστικά ήταν παράλληλα με τη γραμμή πτήσης και στην ΗV πολωμένη εικόνα όταν τα γραμμικά χαρακτηριστικά ήταν σε γωνία διαφορετική από την παράλληλο με τη γραμμή πτήσης.

Αργότερα ο Bryan (1979) ήταν ο πρώτος ο οποίος ποσοτικοποίησε τη συγκεκριμένη παράμετρο και διαπίστωσε, από μετρήσεις των γωνιών μεταξύ του αζιμουθίου του ραντάρ και των προσανατολισμών των δρόμων, ότι όταν η γωνία ήταν μικρότερη από 10° (σε σχέση με την κατεύθυνση λήψης), τότε αυτό είχε ως αποτέλεσμα την επιστροφή υψηλής ή φωτεινής επιστροφής. Τα αποτελέσματα του επιβεβαιώθηκαν αργότερα από τους Henderson (1980a; 1990), Henderson and Anuta (1980), Henderson and Wharton (1980), Hardaway et al. (1982) και Lo (1986b).

6.2.2.10 Εύρος Απόστασης

Η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης μειώνεται από την εγγύς απόσταση προς την μακρινή απόσταση, με αποτέλεσμα την αύξηση της διακριτικής ανάλυσης στη διεύθυνση των αποστάσεων σε σύγκριση με τη μακρινή απόσταση. Δευτερευόντως, το εύρος της απόστασης επηρεάζει τη διακριτικότητα των αντικειμένων στις εικόνες των ραντάρ πραγματικού ανοίγματος, επειδή η διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του αζιμουθίου είναι μεγαλύτερη στην εγγύς απόσταση και βαθμιαία μειώνεται απέναντι στη μακρινή απόσταση. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό και ως « R^4 power loss» και σχετίζεται με το εύρος απόστασης. Δηλαδή η ενέργεια που λαμβάνεται από την κεραία του ραντάρ είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της ενέργειας του εύρους της απόστασης (Werle, 1992). Επιπρόσθετα, λόγω του σχήματος της κεραίας των συστημάτων ραντάρ, οι επιστροφές στο μέσο εύρος απόστασης είναι περισσότερο έντονες σε σχέση με την εγγύς και τη μακρινή απόσταση, επειδή η κεραία μεταδίδει περισσότερη ενέργεια από το κέντρο της παρά από τα άκρα της.

6.2.2.11 Διηλεκτρικές Ιδιότητες

Μία σημαντική ιδιότητα η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αλληλεπίδραση ενός αντικειμένου με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η διηλεκτρική σταθερά. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες μιας επιφάνειας, όπως εκφράζονται με τη διηλεκτρική σταθερά, επηρεάζουν την επιστροφή του ραντάρ αφού επηρεάζουν σημαντικά την απορρόφηση και εκπομπή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η επίδραση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων στα επιφανειακά υλικά και στην ανίχνευση οικισμών και φωτοερμηνεία των αστικών χαρακτηριστικών εντοπίζεται καλύτερα στα μεταλλικά αντικείμενα, τα οποία έχουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Η τιμή αυτή της διηλεκτρικής σταθεράς συμβάλλει στις πολύ φωτεινές επιστροφές των μεταλλικών γεφυρών, στα σιλό, στις σιδηροδρομικές γραμμές, καθώς επίσης και σε άλλα αστικά

χαρακτηριστικά. Ωστόσο, οι υψηλές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς του υγρού εδάφους και της βλάστησης μπορούν να οδηγήσουν σε αβεβαιότητες φωτοερμηνείας παράγοντας φωτεινές επιστροφές παρόμοιες των αστικών χαρακτηριστικών.

6.2.2.12 Τραχύτητα Επιφανείας

Οι τραχείς επιφάνειες διαχέουν την ανακλώμενη ενέργεια και τη σκεδάζουν προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι ομαλές επιφάνειες ανακλούν την προσπίπτουσα ενέργεια μακριά από τον αισθητήρα, με αποτέλεσμα τη χαμηλή επιστροφή σήματος. Η τραχύτητα του εδάφους μετριέται σε εκατοστά και προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά υψής, τα οποία συγκρίνονται σε μέγεθος με το μήκος κύματος του ραντάρ.

Αν μία επιφάνεια συμπεριφέρεται απέναντι στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σαν μία ομαλή ή τραχεία επιφάνεια δύναται να αξιολογηθεί με τη χρήση του κριτηρίου Rayleigh (Sabins, 1987).

	Radar systems	Westinghouse	Goodyear	Seasat	SIR-A	SIR-B	Almaz	ERS-1	JERS-1	Radar sat
Wavelength	0.857cm(ka-band)	3cm band	x- band	23.5cm L-band	23.5cm L-band	23.5cm L-band	10cm S-band	5.66cm C-band	23.5cm L-band	5.6cm C-band
Depression angle (degrees)	40	40	70	40	35-75	40-60	67	55	30-80	
Roughness Criteria (cm)	<0.05 & >0.30	<0.19 & >1.06	<1.00 & >5.68	<1.46 & >8.35	<1.64-0.97 & >9.31-5.53	<0.62-0.46 & >3.54-2.62	<0.25 & >1.40	<1.15 & >6.52	<0.45 & -0.23 & >2.55 & -1.29	
Features (height)										
Water (0,2cm)	intermediate	intermediate	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth
Pavement (0.2cm)	intermediate	intermediate	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth	smooth
Bare soil (0.5cm)	rough	rough	smooth	smooth	smooth	Smooth to intermediate	intermediate	smooth	intermediate	
Grass (10cm)	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough
Bushes (150cm)	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough
Buildings (>400cm)	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough
Trees (>600cm)	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough	rough

Πίνακας 6.3: Μέσο Ύψος και Τραχύτητα Τυπικών Αστικών Χαρακτηριστικών.

(Πηγή: Henderson et al., 1998)

Από τον πίνακα 6-3 διαπιστώνεται ότι εκτός από το μήκος κύματος και η

συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης, επηρεάζουν το κριτήριο της ομαλότητας και της τραχύτητας. Σε πολύ μικρές συμπληρωματικές γωνίες πρόσπτωσης, η περισσότερη αν όχι όλη η ενέργεια η οποία προσπίπτει στην ομαλή επιφάνεια, ανακλάται μακριά από το σύστημα του ραντάρ, ενώ σε πολύ υψηλές συμπληρωματικές γωνίες πρόσπτωσης (80° έως 90°), η περισσότερη από την προσπίπτουσα ενέργεια επιστρέφει πίσω στο σύστημα της κεραίας.

6.2.2.13 Τοπογραφικές Επιδράσεις

Οι τοπογραφικές επιδράσεις αναφέρονται στην οπισθοσκέδαση του ραντάρ, η οποία προκαλείται από επικλινείς επιφάνειες, συγκρινόμενες με την επιστροφή που λαμβάνεται από οριζόντιες επιφάνειες. Η τοπογραφία αλληλεπιδρά με τη συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης και την κατεύθυνση λήψης ενός συστήματος ραντάρ με τέσσερις τρόπους: γωνιακή ανάκλαση, σκίαση, πτύχωση και σμίκρυνση.

6.2.2.14 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες διακρίνονται σε φυσικές και πολιτισμικές μεταβλητές. Οι φυσικές μεταβλητές είναι τα είδη των εδαφών, συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος, το είδος και η ποσότητα βλάστησης και το κλίμα. Οι πολιτισμικές μεταβλητές περιλαμβάνουν το πρότυπο των οικισμών, το μέγεθος και η πυκνότητα αυτών σε διαφορετικές πολιτισμικές περιοχές.

6.2.2.15 Αντίθεση Εικόνας

Η αντίθεση μεταξύ γειτονικών χρήσεων γης και κατηγοριών καλύψεων γης, αποτελεί επίσης έναν παράγοντα που καθορίζει τις απαιτήσεις χωρικής ανάλυσης για την ανίχνευση οικισμών και την ανάλυση των αστικών περιοχών.

6.3 Οπτική Φωτοερμηνεία Απεικόνισης TerraSAR – X στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου Αττικής

Η οπτική φωτοερμηνεία της συγκεκριμένης απεικόνισης TerraSAR – X, υλοποιείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα σκοπός της οπτικής φωτοερμηνείας είναι η ανάδειξη των βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων συγκεκριμένων απεικονίσεων, όπως η σκίαση, η πτύχωση και η σμίκρυνση, ενώ στο δεύτερο βήμα ο σκοπός της οπτικής φωτοερμηνείας είναι η ανάδειξη του οδικού δικτύου της συγκεκριμένης απεικόνισης, αλλά μόνο οπτικά. Δηλαδή, υλοποιείται ψηφιοποίηση του οδικού δικτύου της απεικόνισης από έναν ανεξάρτητο τρίτο χρήστη. Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ο συγκεκριμένος χρήστης έχει πολύ μεγάλη εμπειρία στη φωτοερμηνεία οπτικών εικόνων, αλλά μηδενική στη φωτοερμηνεία ραντάρ απεικονίσεων και ότι η συγκεκριμένη προσπάθεια εξαγωγής οδικού δικτύου από συγκεκριμένο προϊόν, αποτελεί και την παρθενική του φορά. Επίσης πρόκειται να εξαχθούν τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα εξαγωγής σε σχέση με τα ίδια δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και για την περίπτωση της αυτόματης εξαγωγής οδικού δικτύου με το λογισμικό Objective. Τέλος στην συγκεκριμένη εργασία οπτικής φωτοερμηνείας δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο βοηθητικό προϊόν

υποβάθρου, όπως π.χ. μία αεροφωτογραφία, μία δορυφορική εικόνα ή ακόμη και ένας χάρτης.

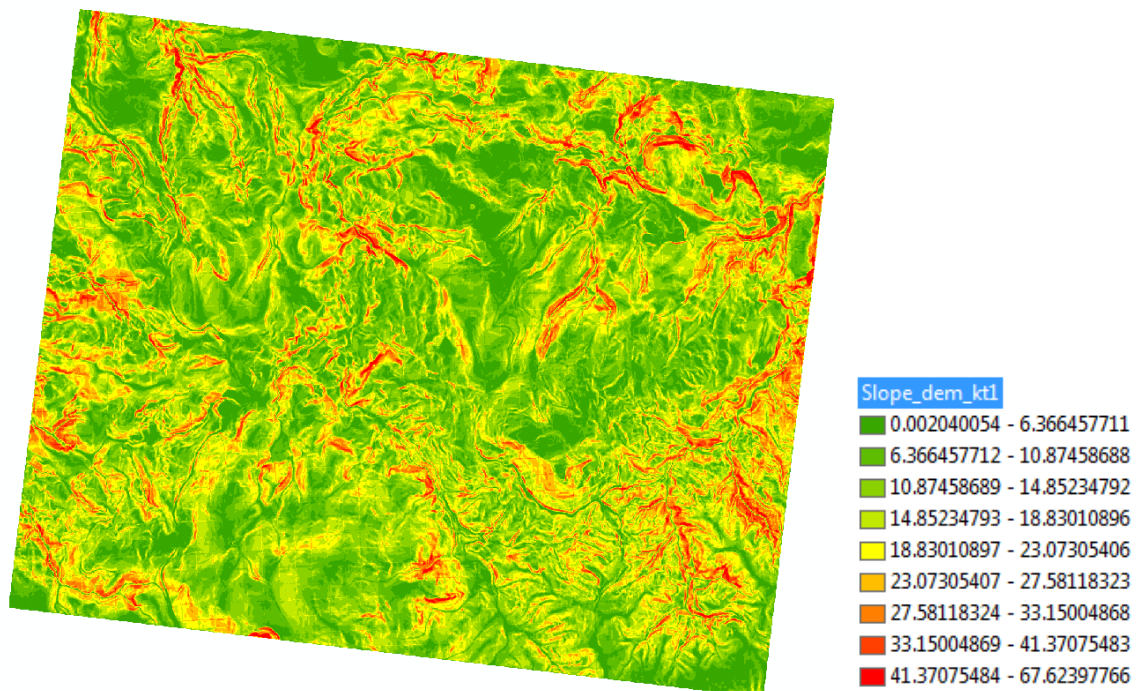
6.3.1 Φωτοερμηνεία Γεωμετρικών Παραμορφώσεων

Για την οπτική φωτοερμηνεία των γεωμετρικών παραμορφώσεων της σκίασης (shadow), της σμίκρυνσης (foreshortening) και της πτύχωσης (layover) της συγκεκριμένης απεικόνισης TerraSAR - X, ο φωτοερμηνευτής απαιτείται να γνωρίζει τις εξής πληροφορίες:

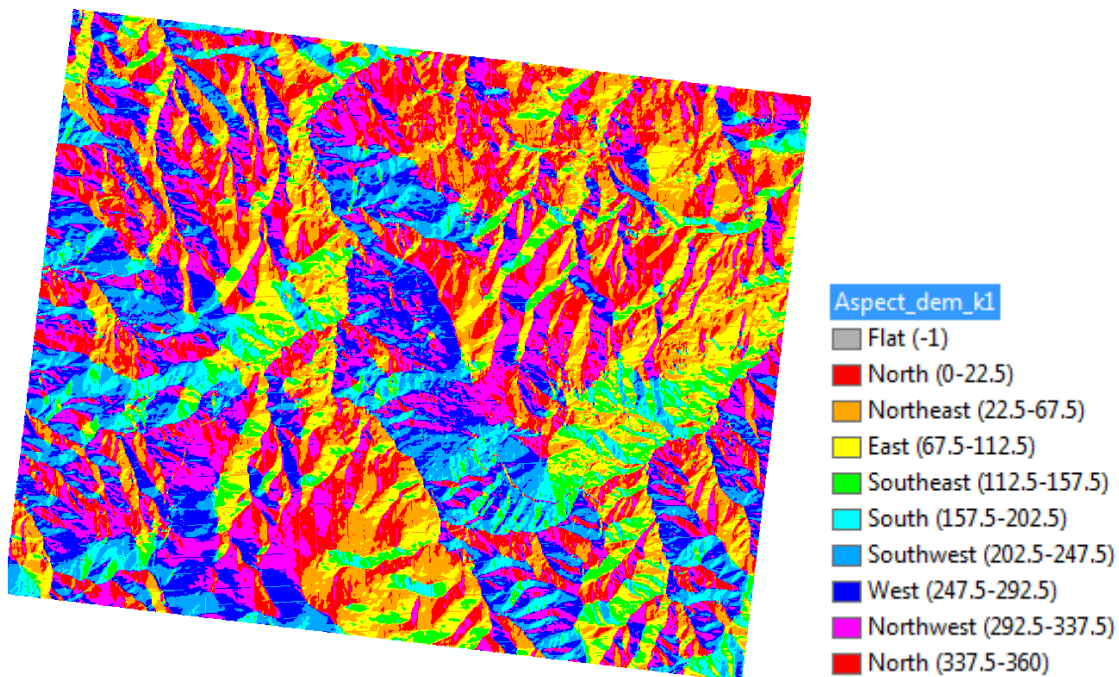
- ✓ Κατεύθυνση κίνησης του δορυφόρου: από Β προς Ν (καθοδική τροχιά)
- ✓ Γωνία Λήψης: δεξιά
- ✓ Γωνία πρόσπτωσης: 53.82°
- ✓ Μονής Πόλωσης HH

Εκτός των προαναφερθέντων στοιχείων, για την οπτική φωτοερμηνεία θα χρησιμοποιηθεί το ΨΜΕ του ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ, σύμφωνα με το οποίο δύναται να προκύψει τόσο ένα **διαφανές ΚΛΙΣΕΩΝ (slope)** όσο και ένα **διαφανές ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ (aspect)**. Το πρώτο διαφανές χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της κλίσης των εδαφών με τη γωνία πρόσπτωσης, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των εδαφών σε σχέση με την κατεύθυνση κίνησης του δορυφόρου, αλλά και με τη γωνία λήψης αυτού.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαφανή κλίσεων και προσανατολισμού, όπως αυτά προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. βήματος 5 m:



Εικόνα 6.1: Διαφανές Κλίσεων (πρωτογενές υλικό ΨΜΕ Κτηματολογίου Βήματος 5m).



Εικόνα 6.2: Διαφανές Προσανατολισμού(πρωτογενές υλικό ΨΜΕ Κτηματολογίου Βήματος 5m).

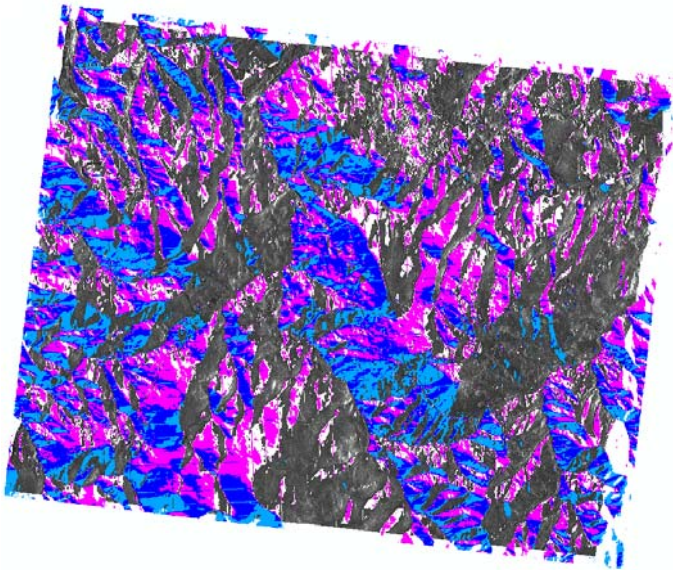
➤ Εντοπισμός Σκίασης (shadow)

Όπως έχει προαναφερθεί οι σκιάσεις αποτελούν περιοχές για τις οποίες δεν καταγράφεται οπισθοσκεδασμός στον αισθητήρα, διότι αποκλείονται από την ακτίνα του ραντάρ. Αυτό συμβαίνει όταν επιφάνειες οι οποίες απομακρύνονται από τον αισθητήρα, είναι περισσότερο απότομες από την περιοχή που «φωτίζει» το ραντάρ και επιπλέον έχουν κλίση προς την αντίθετη πλευρά από αυτήν που φωτίζει το ραντάρ. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης και όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση των συγκεκριμένων επιφανειών, τόσο μεγαλύτερες σκιές παράγονται. Επίσης οι σκιές απεικονίζονται με σκούρο μαύρο χρώμα (δεν δίνουν σήμα επιστροφής), ενώ μία τελευταία ένδειξη εντοπισμού του συγκεκριμένου φαινομένου, αποτελεί η συμπληρωματική γωνία φωτισμού ή πρόσπτωσης. Δηλαδή εάν η κεκλιμένη επιφάνεια η οποία κοιτάζει αντίθετα προς το ραντάρ έχει κλίση η οποία είναι μεγαλύτερη από τη συμπληρωματική γωνία φωτισμού «depression angle», τότε παράγει σκιά.

Η γωνία φωτισμού της συγκεκριμένης απεικόνισης είναι 53.82° και η συμπληρωματικής της γωνία είναι $90^\circ - 53.82^\circ = 36.18^\circ$. Το ραντάρ έχει καθοδική τροχιά από Βορρά προς Νότο και κοιτάει προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει πως βλέπει τις επιφάνειες που έχουν προσανατολισμό ανατολικά, νοτιοανατολικά και βορειοανατολικά και αντίθετα δεν βλέπει τις επιφάνειες που έχουν προσανατολισμό δυτικά, νοτιοδυτικά και βορειοδυτικά. Συνεπώς μελετώντας το διαφανές προσανατολισμού (aspect), που προκύπτει από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους,

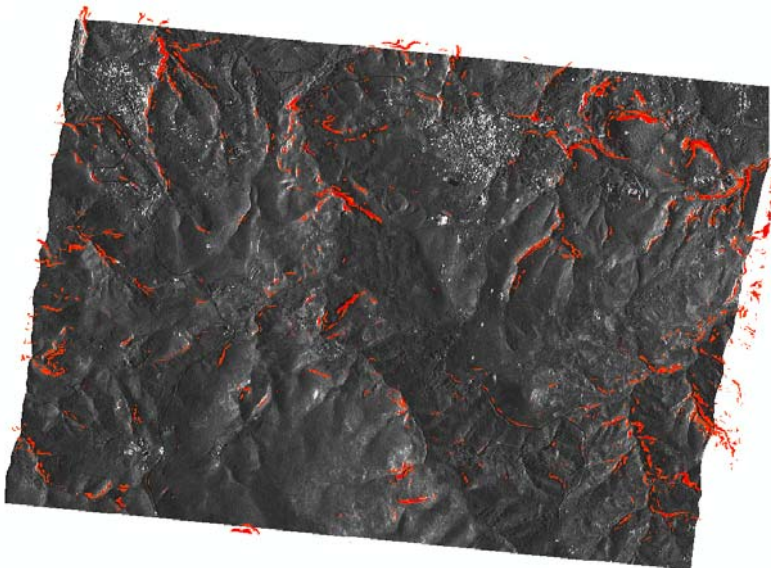
αρχικά ο φωτοερμηνευτής αποκλείει επιφάνειες στις οποίες δεν αναμένεται εντοπισμός του φαινομένου σκίασης και εντοπίζει επιφάνειες (αντίθετες) στις οποίες αναμένεται το φαινόμενο σκίασης. Στη συνέχεια μελετώντας το διαφανές κλίσεων, ο φωτοερμηνευτής δύναται να εντοπίσει όλες εκείνες τις αντίθετες επιφάνειες στις οποίες η κλίση τους είναι μεγαλύτερη από 36.18° και στις οποίες αναμένεται το φαινόμενο της σκίασης.

Συνδυάζοντας ο φωτοερμηνευτής τα προαναφερθέντα διαφανή με τη συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης και την ορθοεικόνα TerraSAR – Χ, προκύπτουν οι παρακάτω απεικονίσεις:



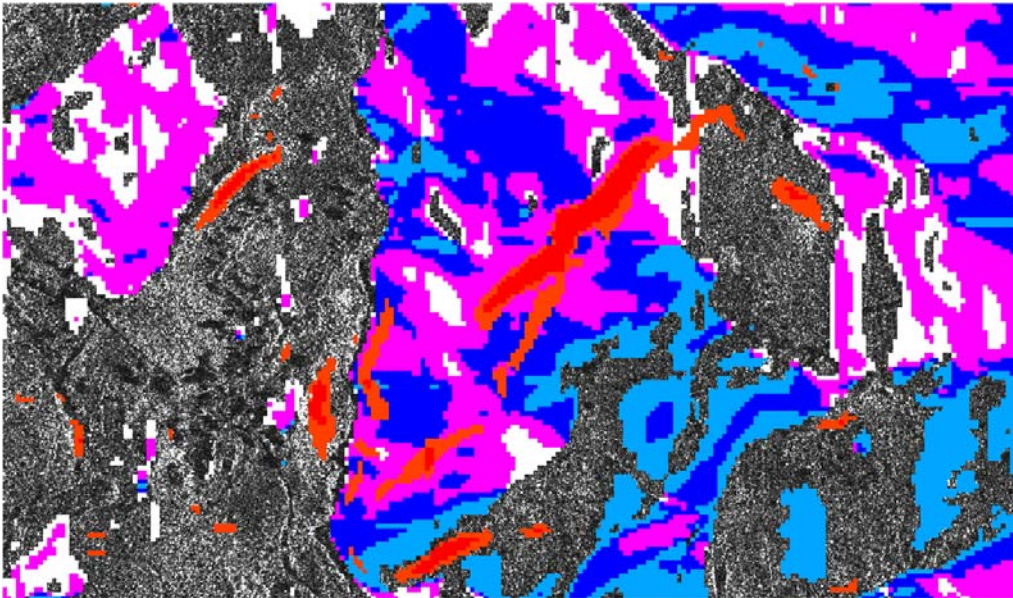
Εικόνα 6.3: Συνδυασμός Διαφανούς Aspect και Ορθοεικόνας TerraSAR – Χ.

Στην εικόνα 6-3 απεικονίζονται όλες εκείνες οι επιφάνειες οι οποίες έχουν προσανατολισμό δυτικό, νοτιοδυτικό και βορειοδυτικό.

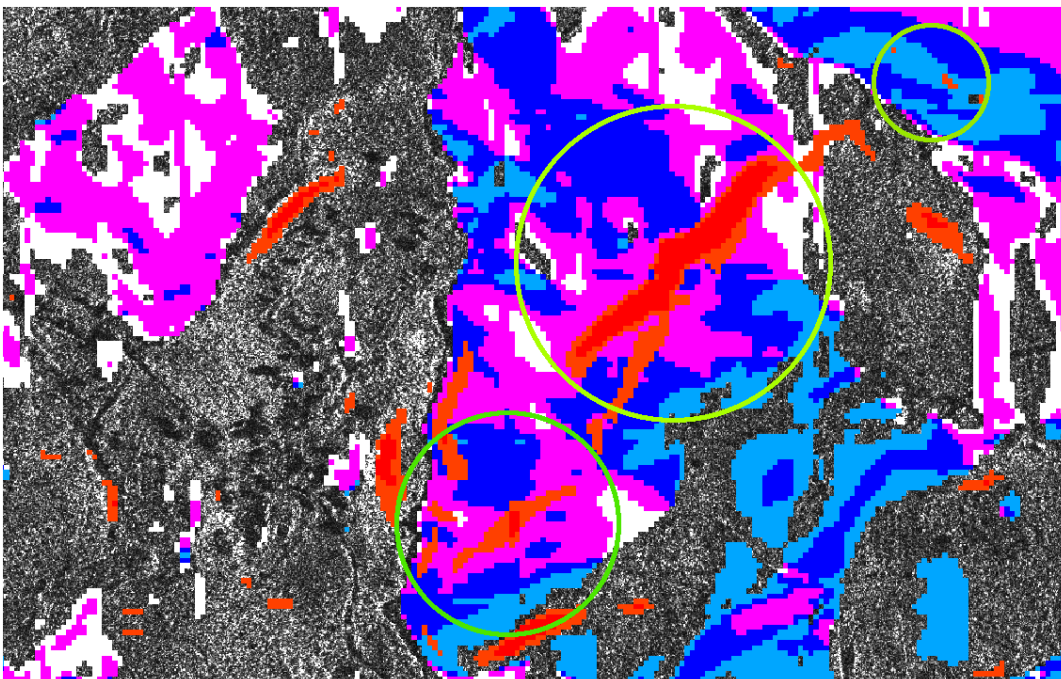


Εικόνα 6.4: Συνδυασμός Διαφανούς Κλίσεων και Ορθοεικόνας TerraSAR – Χ.

Στην εικόνα 6-4 απεικονίζονται όλες εκείνες οι επιφάνειες οι οποίες έχουν κλίση από 33.15° έως 67.62° . Τελικά εστιάζοντας σε μία συγκεκριμένη περιοχή επαληθεύεται η προαναφερθείσα διαδικασία εντοπισμού του φαινομένου της σκίασης:

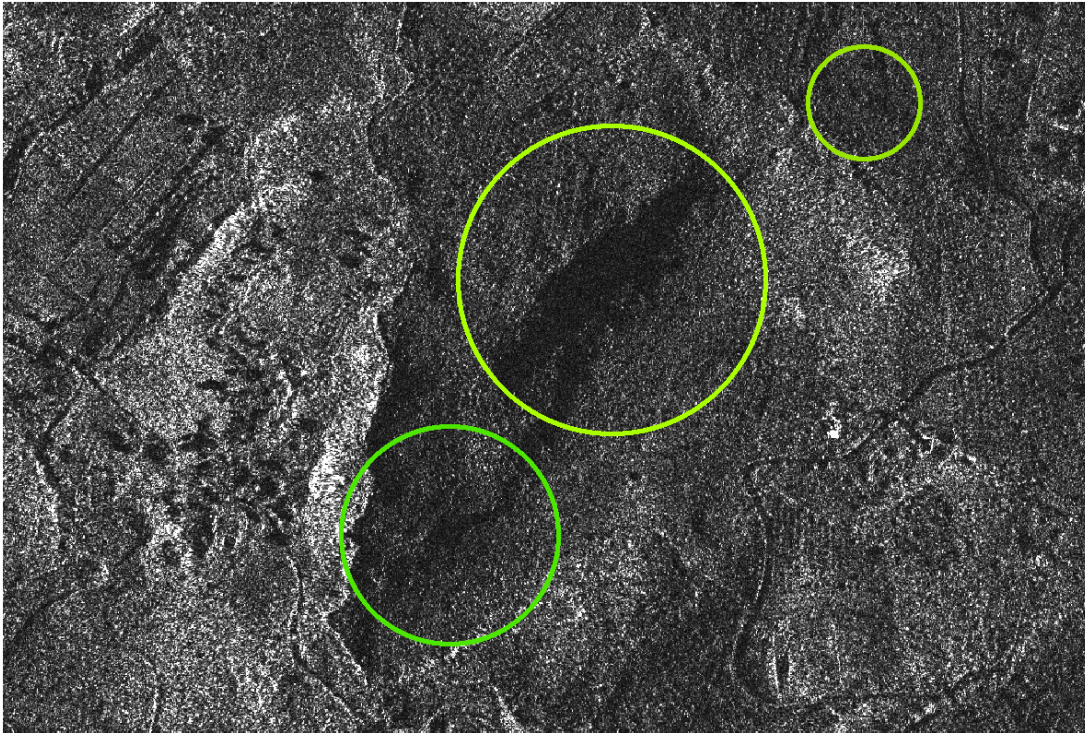


Εικόνα 6.5: Συνδυασμός Διαφανών Κλίσεων, Προσανατολισμού και Ορθοεικόνας TerraSAR-X.



Εικόνα 6.6: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σκίασης.

Στην εικόνα 6-6, εντοπίζονται οι περιοχές του φαινομένου της σκίασης διότι ικανοποιούνται τόσο περιοχές με αντίθετο προσανατολισμό (δυτικό, νοτιοδυτικό και βορειοδυτικό με χρώματα αντίστοιχα μπλε, σιέλ και μωβ), οι οποίες ταυτόχρονα έχουν κλίση μεγαλύτερη από 36.18° . Η οπτική επαλήθευση φαίνεται στην εικόνα 6-7:



Εικόνα 6.7: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σκίασης.

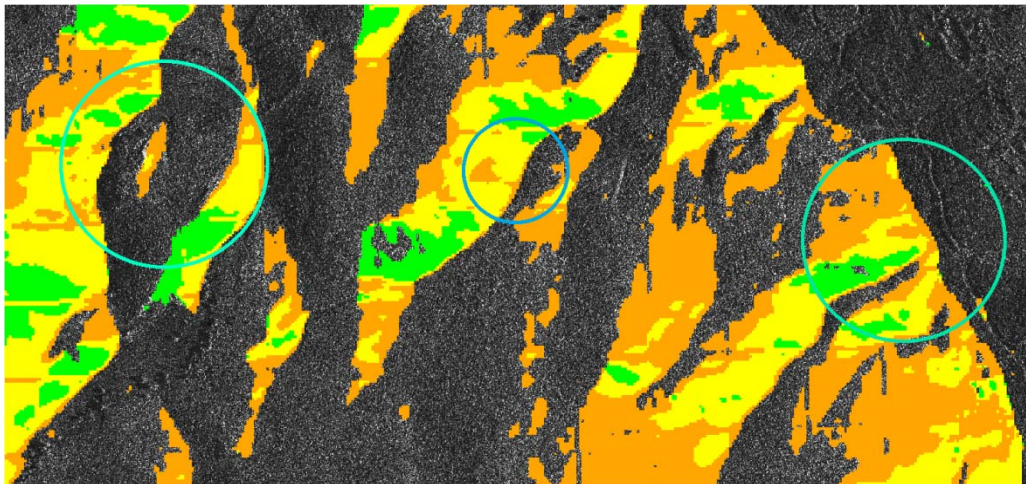
Ολόκληρη η προαναφερθείσα διαδικασία, θα μπορούσε να ονομαστεί ως «Εμμεση – Σταδιακή Φωτοερμηνεία», του φαινομένου της σκίασης στην ορθοεικόνα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR – X και δύναται να τηρηθεί, με τους αντίστοιχους περιορισμούς και για τα φαινόμενα σμίκρυνσης και πτύχωσης. Βασική προϋπόθεση της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί τα ψηφιακά γεωγραφικά υλικά (απεικόνιση ραντάρ και ψηφιακό μοντέλο εδάφους) να προβάλλονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς και πιο συγκεκριμένα η ραντάρ απεικόνιση να έχει ορθοδιορθωθεί και στη διαδικασία της φωτοερμηνείας να χρησιμοποιείται το ίδιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

➤ Εντοπισμός Σμίκρυνσης (foreshortening)

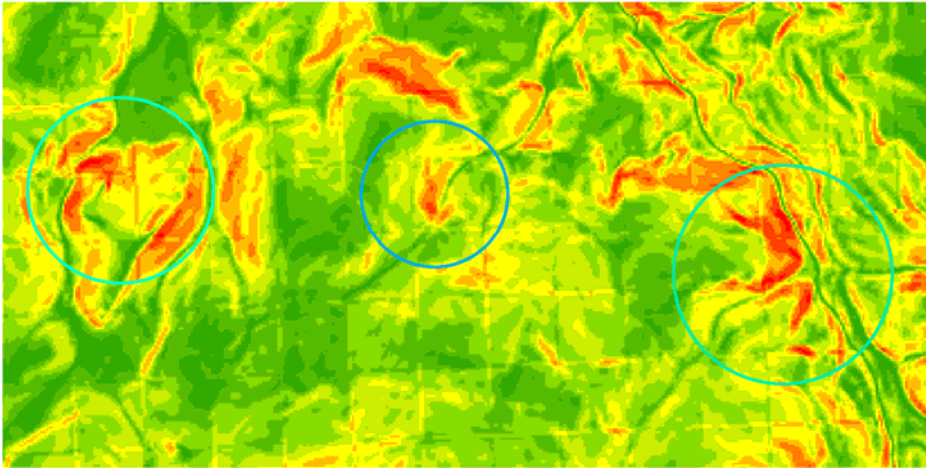
Το φαινόμενο της σμίκρυνσης αποτελεί κυρίαρχο φαινόμενο στις ορεινές περιοχές. Οι κεκλιμένες επιφάνειες οι οποίες είναι προσανατολισμένες απέναντι από το δέκτη, φαίνονται μικρότερες στην εικόνα SAR από ότι είναι στην πραγματικότητα. Η συμπίεση της κεκλιμένης απόστασης συμβάλλει στη δημιουργία μιας περισσότερο φωτεινής περιοχής, επειδή περιέχει ολόκληρη την ενέργεια που σκεδάζεται από την μεγαλύτερη πραγματική επιφάνεια. Επίσης το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται στις επιφάνειες εκείνες στις οποίες προσπίπτει η δέσμη ακτινών του ραντάρ που έχει κλίση μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης. Συνοψίζοντας, όταν η κλίση μιας επιφάνειας, η οποία βλέπει προς της κεραία του ραντάρ, είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του ραντάρ, τότε προκύπτει σμίκρυνση της επιφάνειας. Στη συνέχεια εξαιτίας της συγκεκριμένης συμπίεσης, προκαλείται ενίσχυση του επιστρεφόμενου σήματος, η οποία φτάνει στο μέγιστό της όταν η κλίση της επιφάνειας είναι κάθετη στη δέσμη του ραντάρ. Σ' αυτή την περίπτωση η τοπική

γωνία πρόσπτωσης είναι μηδενική και όλα τα σημεία της κεκλιμένης επιφάνειας απέχουν ίδια απόσταση από το radar και γι αυτό έχουν την ίδια θέση στην απεικόνιση. Αυτή είναι η μέγιστη δυνατή σμίκρυνση μιας επιφάνειας και αντιμετωπίζεται με την γεωμετρική διόρθωση της απεικόνισης λαμβάνοντας υπ' όψη το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Η γωνία φωτισμού της συγκεκριμένης απεικόνισης είναι 53.82° . Το ραντάρ έχει καθοδική τροχιά από Βορρά προς Νότο και κοιτάει προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει πως βλέπει τις επιφάνειες που έχουν προσανατολισμό ανατολικά, νοτιοανατολικά και βορειοανατολικά. Συνεπώς μελετώντας το διαφανές προσανατολισμού (aspect), που προκύπτει από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αρχικά ο φωτοερμηνευτής εντοπίζει επιφάνειες στις οποίες αναμένεται εντοπισμός του φαινομένου σμίκρυνσης (ανατολικές, νοτιοανατολικές και βορειοανατολικές). Στη συνέχεια μελετώντας το διαφανές κλίσεων, ο φωτοερμηνευτής δύναται να εντοπίσει όλες εκείνες τις ορεινές επιφάνειες στις οποίες η κλίση τους είναι μικρότερη από 53.82° και στις οποίες αναμένεται το φαινόμενο της σμίκρυνσης. Για τον ευκολότερο εντοπισμό του συγκεκριμένου φαινομένου εντοπίστηκαν ορεινές επιφάνειες με κλίση λίγο μικρότερη από 53.82° και ακολουθήθηκε και πάλι η μεθοδολογία της «**Εμμεσης – Σταδιακής Φωτοερμηνείας**».



Εικόνα 6.8: Ανατολικές, Νοτιοανατολικές, Βορειοανατολικές Περιοχές Ενδιαφέροντος.



Εικόνα 6.9: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σμίκρυνσης (κλίση).

Στις συγκεκριμένες τρεις περιοχές που εντοπίστηκαν με την οπτική φωτοερμηνεία, ο προσανατολισμός των περιοχών είναι ανατολικός, νοτιοανατολικός και βορειοανατολικός, το υψόμετρό τους κυμαίνεται από 400 έως 500 m και οι κλίσεις των επιφανειών είναι λίγο μικρότερες από 45° , ενώ τέλος φαίνεται ότι ξεχωρίζουν και λόγω εντονότερου φωτισμού σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές.



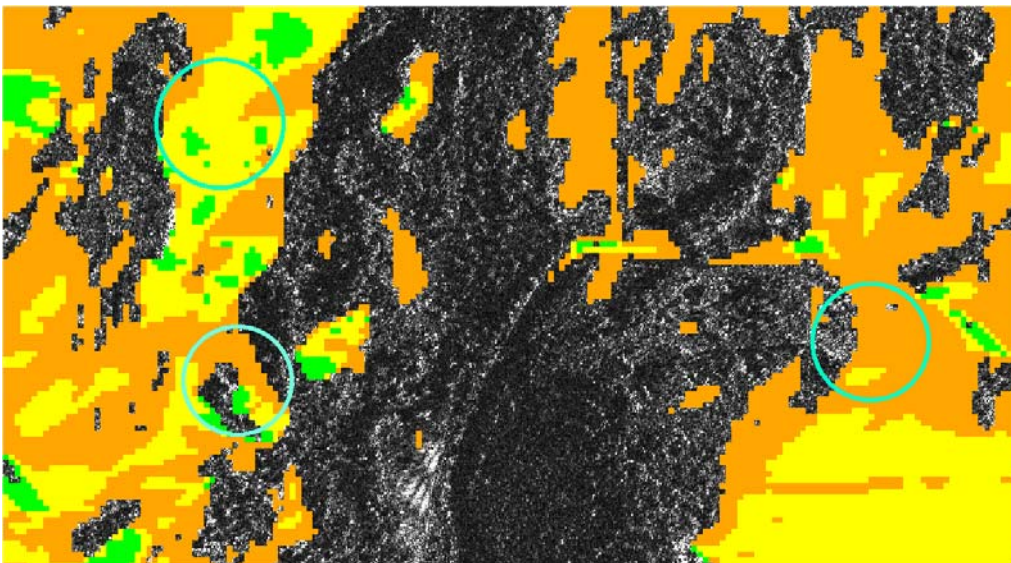
Εικόνα 6.10: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Σμίκρυνσης.

➤ Εντοπισμός Πτύχωσης (Layover)

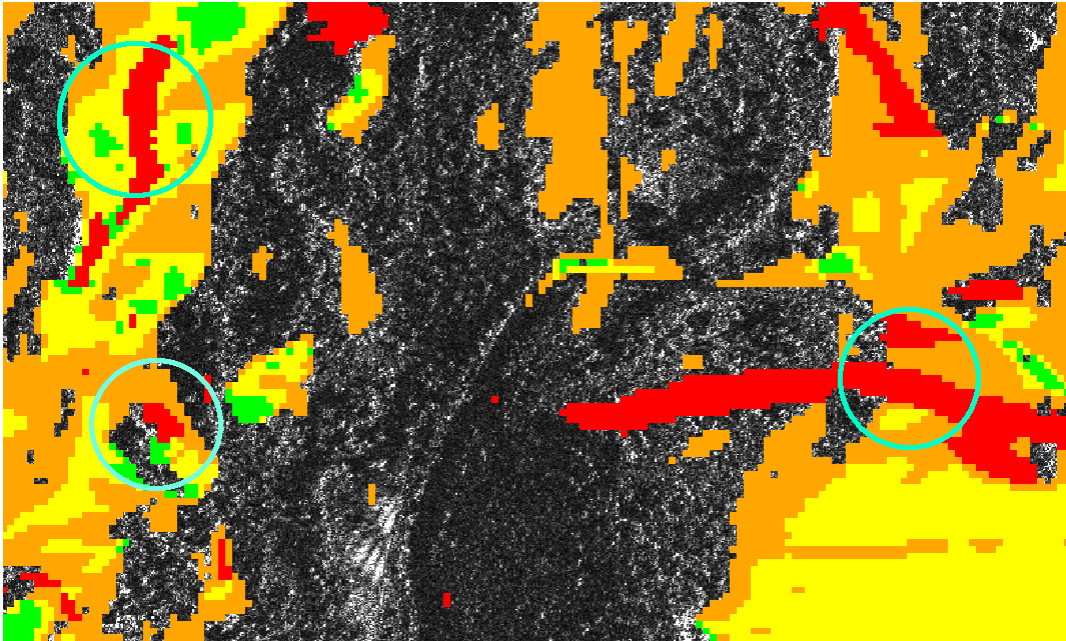
Το φαινόμενο της πτύχωσης σχετίζεται με το φαινόμενο της μετατόπισης του αναγλύφου. Αν μία κλίση είναι περισσότερη απότομη από την ακτίνα του ραντάρ, τμήματα της επιφάνειας του εδάφους, η κεκλιμένη επιφάνεια απέναντι από τον αισθητήρα και τμήματα της κεκλιμένης επιφάνειας που απομακρύνονται από τον αισθητήρα είναι σε ίσες αποστάσεις από την κεραία του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Για αυτόν τον λόγο ο οπισθοσκεδασμός των τμημάτων αυτών στον αισθητήρα την ίδια χρονική στιγμή, προκαλεί το φαινόμενο της πτύχωσης, όπου τα διαφορετικά σήματα δεν μπορούν πλέον να διαχωριστούν. Πρόκειται για ακραία

μορφή σμίκρυνσης, με τη διαφορά πως η κλίση της επιφάνειας στο έδαφος είναι μεγαλύτερη από την γωνία πρόσπτωσης και η επιφάνεια απεικονίζεται με ιδιαίτερα φωτεινές τιμές του γκριζου, ενώ τα σημεία τα οποία βρίσκονται στην κορυφή έχουν μικρότερη πλευρική απόσταση ακόμη και από τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε επίπεδες επιφάνειες και οπτικά εγγύτερα στο ναδίρ του ραντάρ, με αποτέλεσμα η διάταξη όλων αυτών των σημείων στην απεικόνιση να είναι ακριβώς αντίθετη από αυτήν της φυσικής πραγματικότητας.

Η γωνία φωτισμού της συγκεκριμένης απεικόνισης είναι 53.82° . Το ραντάρ έχει καθοδική τροχιά από Βορρά προς Νότο και κοιτάει προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει πως βλέπει τις επιφάνειες που έχουν προσανατολισμό ανατολικά, νοτιοανατολικά και βορειοανατολικά. Συνεπώς μελετώντας το διαφανές προσανατολισμού (aspect), που προκύπτει από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αρχικά ο φωτοερμηνευτής εντοπίζει επιφάνειες στις οποίες αναμένεται εντοπισμός του φαινομένου σμίκρυνσης (ανατολικές, νοτιοανατολικές και βορειοανατολικές). Στη συνέχεια μελετώντας το διαφανές κλίσεων, ο φωτοερμηνευτής δύναται να εντοπίσει όλες εκείνες τις ορεινές επιφάνειες στις οποίες η κλίση τους είναι μεγαλύτερη από 53.82° και στις οποίες αναμένεται το φαινόμενο της πτύχωσης. Ακολουθήθηκε και πάλι η μεθοδολογία της «**Εμμεσης – Σταδιακής Φωτοερμηνείας**».

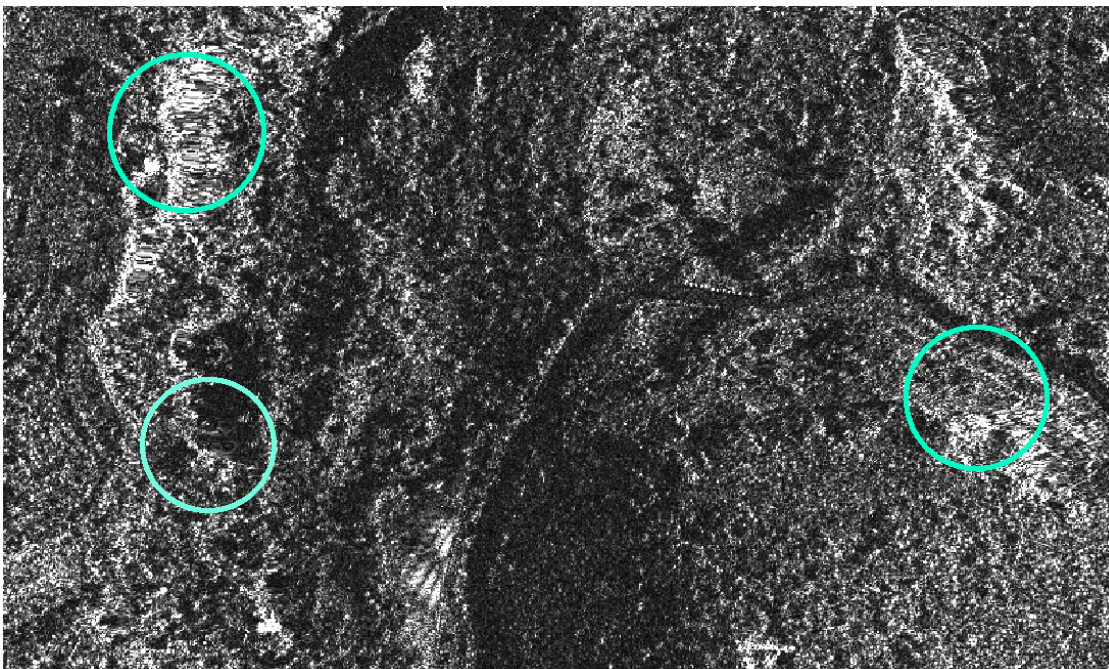


Εικόνα 6.11: Ανατολικές, Νοτιοανατολικές, Βορειοανατολικές Περιοχές Ενδιαφέροντος.



Εικόνα 6.12: Συνδυαστικός Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Πτύχωσης (κλίση).

Τέλος στην εικόνα 6-13 απεικονίζονται οι τρεις περιοχές στις οποίες υπάρχει το φαινόμενο της πτύχωσης:



Εικόνα 6.13: Εντοπισμός Περιοχών του Φαινομένου Πτύχωσης.

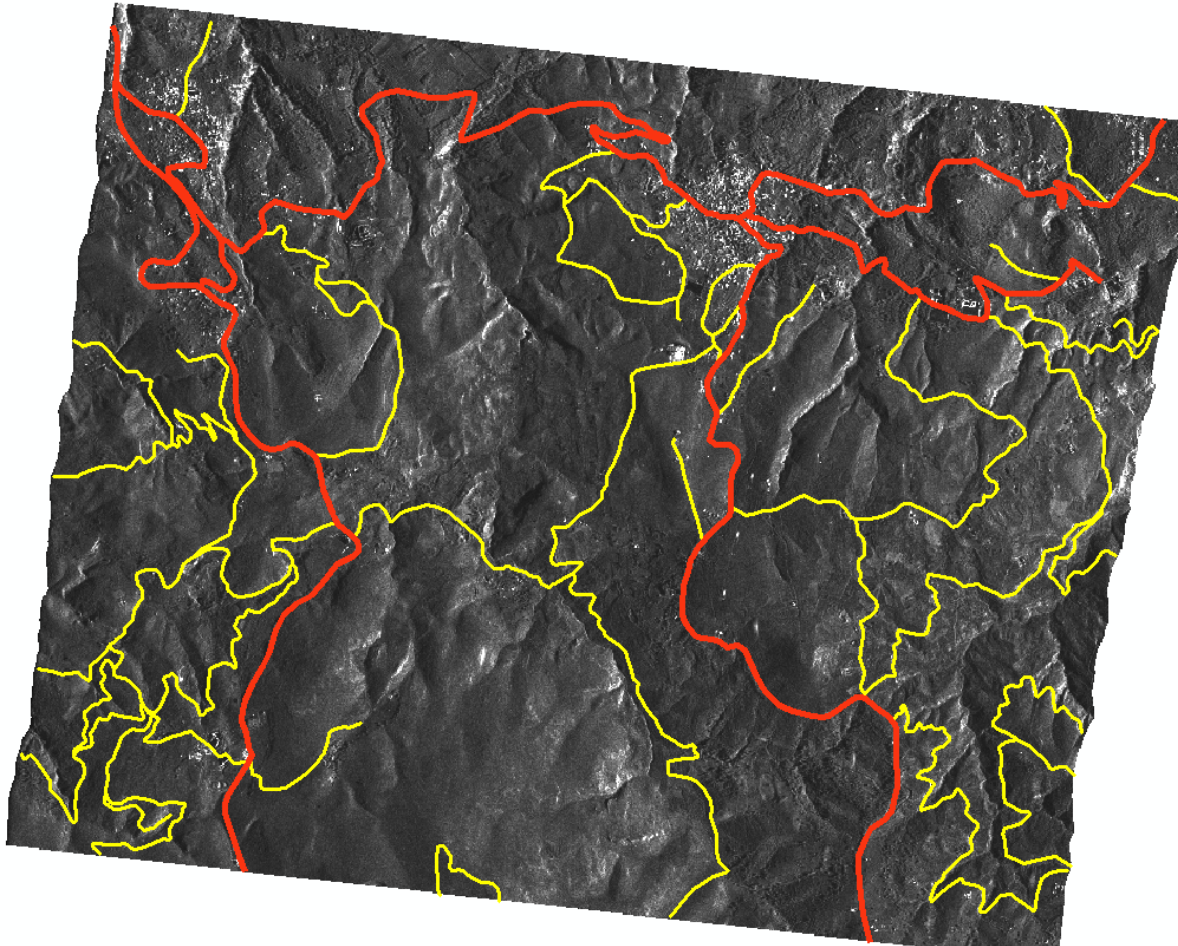
6.3.2 Εξαγωγή Οδικού Δικτύου με Οπτική Φωτοερμηνεία στην Περιοχή Καλάμου-Μαρκόπουλου

Στα πλαίσια της οπτικής φωτοερμηνείας, έγινε μία προσπάθεια εξαγωγής οδικού δικτύου με τη διαδικασία της οπτικής ψηφιοποίησης από έναν τρίτο χρήστη. Ο συγκεκριμένος χρήστης έχει πολύ μεγάλη εμπειρία στην φωτοερμηνεία οπτικών

εικόνων, αλλά μηδενική στη φωτοερμηνεία απεικονίσεων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εργασία αποτέλεσε για τον ίδιο την πρώτη του επαφή με προϊόντα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος.

Από τον χρήστη ζητήθηκε να αναγνωρίσει δύο κατηγορίες δρόμων, ανάλογα με το πλάτος αυτών. Έτσι ζητήθηκε να αναγνωρίσει αρχικά την πρώτη κατηγορία με το μεγαλύτερο πλάτος δρόμου και στη συνέχεια τη δεύτερη κατηγορία με το αμέσως μικρότερο πλάτος δρόμου. Βοηθητικά δεν δόθηκε και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο συγκεκριμένο υπόβαθρο, όπως χάρτης ή δορυφορική εικόνα, για την αναγνώριση και ψηφιοποίηση των συγκεκριμένων οδικών αρτηριών. Τέλος τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας συγκρίθηκαν με τα ίδια δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και στην περίπτωση της αυτόματης εξαγωγής οδικού δικτύου με το λογισμικό Objective.

Οπτικά τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης φαίνονται στην εικόνα 6-14:



Εικόνα 6.14: Οπτική Φωτοερμηνεία Οδικών Αρτηριών από Χρήστη.

Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών δρόμων φαίνονται παρακάτω:

Length reference data	: 68282.09 m	
Length extraction	: 89090.98 m	completeness: 70.20%
Length of matched extraction	: 47782.27 m	correctness : 53.63%
Length of matched reference	: 47933.27 m	quality : 43.66%
Length of unmatched reference	: 20348.82 m	
Buffer 6 m		

Η περιοχή η οποία καλύπτει η απεικόνιση ραντάρ έχει εμβαδόν $E = 37.30 \text{ km}^2$ και περίμετρο $\Pi = 24.54 \text{ km}$. Συνοπτικά τα αποτελέσματα εξαγωγής όλων των δοκιμών που υλοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Δορυφορική Εικόνα IKONOS (1 m)-με το Objective	Αεροφωτογραφία ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ (50 cm)-με το Objective	TerraSAR – X (1 m)-με το Objective	TerraSAR – X (1 m)-με οπτική φωτοερμηνεία
Περίμετρος (km)	11.68	4.62	4.62	24.54
Εμβαδόν (km ²)	4.82	1.28	1.28	37.30
Completeness (%)	86.54	82.81	-	70.20
Correctness (%)	50.68	93.16	-	53.63
Quality (%)	47.01	77.89	-	43.66

Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαγωγής Οδικού Δικτύου.

Μελετώντας τον πίνακα 6-4 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Από την αυτόματη εξαγωγή οδικού δικτύου με το λογισμικό Objective προκύπτει για τις οπτικές εικόνες ότι με τη βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας (από 1m στα 50cm) και με αντίστοιχη μείωση του εμβαδού της περιοχής κατά $\frac{1}{4}$, βελτιώθηκαν θεαματικά τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα. Η αυτόματη εξαγωγή του οδικού δικτύου από την απεικόνιση TerraSAR – X, δεν είχε αποτελέσματα, ενώ τέλος η εξαγωγή οδικού δικτύου με τη διαδικασία της οπτικής φωτοερμηνείας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εμβαδόν της απεικόνισης είναι περίπου 9 φορές μεγαλύτερο από αυτό που καλύπτει η δορυφορική εικόνα IKONOS και ο χρήστης είχε μηδενική προγενέστερη εμπειρία με εικόνες ραντάρ. Ένα τελευταίο στοιχείο το οποίο πρέπει να προστεθεί στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι και ο χρόνος επεξεργασίας. Δηλαδή ο χρόνος επεξεργασίας των εικόνων με το λογισμικό κυμαινόταν από 30 έως 40 λεπτά (για οπτικές εικόνες), ενώ ο χρόνος της οπτικής φωτοερμηνείας (για απεικόνιση ραντάρ) από τον χρήστη κυμάνθηκε από 20 έως 30 λεπτά.

6.3.3 Ανακεφαλαίωση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αρχικά έγινε μία σύγκριση μεταξύ των οπτικών και των συστημάτων ραντάρ. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα στοιχεία φωτοερμηνείας

απεικονίσεων των ραντάρ και ειδικότερα τα στοιχεία που επηρεάζουν τη φωτοερμηνεία σε αστικό περιβάλλον. Επί του πρακτέου, υλοποιήθηκε οπτική φωτοερμηνεία της απεικόνισης TerraSAR – X, των βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων που διέπουν ένα τέτοιο προϊόν και στο τέλος πραγματοποιήθηκε οπτική φωτοερμηνεία του οδικού δικτύου που καλύπτει η απεικόνιση, από έναν τρίτο χρήστη με τη διαδικασία της ψηφιοποίησης χωρίς κάποιο βοηθητικό υπόβαθρο και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τα αντίστοιχα των οπτικών εικόνων με το λογισμικό Objective. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, το οποίο ακολουθεί, γίνεται μία σύνοψη όλων των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

7. Συμπεράσματα

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν αρχικά, εκτός των ιστορικών στοιχείων, οι βασικές αρχές που διέπουν τα ραντάρ απεικονίσεως και ειδικότερα τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του συστήματος TerraSAR – X, ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν βιβλιογραφικά τα μοντέλα γεωαναφοράς, τόσο τα προσεγγιστικά όσο και τα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα γεωαναφοράς δορυφορικών και μη απεικονίσεων.

Το πρακτικό μέρος στην εργασία χωρίζεται σε δύο σκέλη:

- Το πρώτο αναφέρεται στην ορθοαναγωγή της ραντάρ απεικόνισης TerraSAR – X,
- Το δεύτερο αναφέρεται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών από την ραντάρ απεικόνιση TerraSAR – X και ειδικότερα:
 - ❖ Στην εξέταση της δυνατότητας αυτόματης εξαγωγής οδικού δικτύου από την ραντάρ απεικόνιση και σύγκριση με την αντίστοιχη εξαγωγή από οπτικές εικόνες,
 - ❖ Στη φωτοερμηνεία βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων των συστημάτων ραντάρ, όπως η σκίαση, η πτύχωση και η σμίκρυνση και στη συνέχεια,
 - ❖ Η εξαγωγή οδικού δικτύου της ραντάρ απεικόνισης TerraSAR – X, με τη διαδικασία της οπτικής φωτοερμηνείας (βλέπω και ψηφιοποιώ), από έναν ανεξάρτητο τρίτο χρήστη.

7.2 Δυσκολίες

Πριν γίνει αναφορά στις δυσκολίες που συναντήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπήρχε προγενέστερη επαφή και τριβή με τέτοιου είδους ψηφιακά προϊόντα. Η γνωριμία με αυτά έγινε μέσω της βιβλιογραφικής αναζήτησης και την τριβή με την συγκεκριμένη απεικόνιση TerraSAR –X.

Στο πρώτο σκέλος, που αφορά στην ορθοαναγωγή της ραντάρ απεικόνισης, οι δυσκολίες συναντώνται αρχικά σε βασικά θέματα κατανόησης αυτής της απεικόνισης, από την οπτικοποίηση της, μέχρι την στόχευση των κατάλληλων φωτοσταθερών για την γεωαναφορά της. Σημαντικός βαθμός δυσκολίας παρουσιάστηκε, επίσης, στην αναγνώριση και στόχευση των απαραίτητων σημείων ελέγχου προκειμένου να

αξιολογηθούν τα τελικά ορθοανηγμένα προϊόντα, αναλόγως του εκάστοτε ψηφιακού μοντέλου εδάφους που χρησιμοποιούνταν. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς ότι συνολικά υλοποιήθηκαν τέσσερις ορθοδιορθώσεις της απεικόνισης, αφού υπήρχαν τέσσερα ψηφιακά μοντέλα εδάφους, ενώ κάθε ορθοδιόρθωση γινόταν με χρήση διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών δηλαδή με χρήση 24, 12 και 6 φωτοσταθερών. **Συνολικά έγιναν 12 ορθοδιορθώσεις, άρα και 12 αξιολογήσεις ακρίβειας του τελικού προϊόντος.**

Στο δεύτερο σκέλος, που αφορά στην αυτόματη εξαγωγή γραμμικών στοιχείων (οδικό δίκτυο) από την ραντάρ απεικόνιση, παρατηρήθηκε αδυναμία εξαγωγής οδικού δικτύου με χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού, εν αντιθέσει βέβαια με τις αντίστοιχες οπτικές εικόνες στις οποίες υλοποιήθηκε με ικανοποιητικά αποτελέσματα η εξαγωγή οδικού δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την επεξεργασία της απεικόνισης εφαρμόστηκαν φίλτρα ομαλοποίησης, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του θορύβου, και φίλτρα ενίσχυσης ακμών, προκειμένου να τονιστούν τα γραμμικά στοιχεία, όπως οι οδικές αρτηρίες.

Επίσης, **στο δεύτερο σκέλος** που αφορά στη φωτοερμηνεία βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων, όπως της σκίασης, της σμίκρυνσης και της πτύχωσης στη ραντάρ απεικόνιση, δεδομένης και της υπαρκτής μηδενικής εμπειρίας με τέτοιου είδους προϊόντα, παρουσιάστηκε αρχικά μεγάλη δυσκολία στην οπτική αναγνώριση τέτοιου είδους φαινομένων. Η δυσκολία αυτή αρχικά υπερκεράστηκε, μέσα από την κατανόηση της περιγραφής τέτοιου είδους φαινομένων, κατόπιν βιβλιογραφικής αναζήτησης και στη συνέχεια εμμέσως με τη χρήση του ποιοτικότερου ψηφιακού μοντέλου της περιοχής, όπως άλλωστε περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Τέλος, **στο δεύτερο σκέλος** που αφορά στην οπτική φωτοερμηνεία του οδικού δικτύου από την ραντάρ απεικόνιση από έναν τρίτο χρήστη, οι δυσκολίες συναντώνται στην αδυναμία του χρήστη να διακρίνει αρχικά την ύπαρξη γραμμικών στοιχείων και στη συνέχεια να πιστοποιήσει ότι το συγκεκριμένο γραμμικό στοιχείο είναι οδική αρτηρία και τελικά να την ψηφιοποιήσει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της δυσκολίας αποτέλεσε η ύπαρξη βλάστησης, δηλαδή δέντρων πλησίον του δρόμου ή ακόμη και η κάλυψη των δρόμων από δέντρα τα οποία εφάπτονταν των οδικών αρτηριών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σημαντικού θορύβου, ο οποίος οδηγούσε είτε σε μη ψηφιοποίηση υπαρκτού δρόμου είτε σε εσφαλμένη ψηφιοποίηση αυτού.

7.3 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία, διακρίνονται σε δύο βασικές ομάδες. Η πρώτη ομάδα σχετίζεται με το πρώτο σκέλος της εργασίας, ενώ η δεύτερη ομάδα με το δεύτερο σκέλος της εργασίας.

Στην πρώτη ομάδα συμπερασμάτων ανήκουν αυτά τα οποία εξάγονται από την

ορθοαναγωγή της απεικόνισης TerraSAR – X. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου προκύπτουν τα στατιστικά στοιχεία του πίνακα 7-1:

Αριθμός Φωτοσταθερών	Σφάλμα Φωτοσταθερών κατά X (σε εικονοστοιχεία)	Σφάλμα Φωτοσταθερών κατά Y (σε εικονοστοιχεία)	Συνολικό Σφάλμα
24	1.1920	1.0132	1.5644
12	1.0691	0.9684	1.4425
6	0.6125	0.9178	1.1034

Πίνακας 7.1: Στατιστικά Στοιχεία Επίλυσης Μοντέλου.

Αναλόγως του αριθμού των φωτοσταθερών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου (24, 12, 6), αντιστοιχεί και ένα σφάλμα, αρχικά κατά x, κατά y και τέλος ένα συνολικό σφάλμα (όλα υπολογίζονται σε pixels). Παρατηρώντας τον πίνακα 7-1, προκύπτει ότι η μείωση του αριθμού φωτοσταθερών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου, οδηγεί και σε μείωση του σφάλματος τόσο κατά X και κατά Y όσο και συνολικά.

Συνεπώς, αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών δε συνεπάγεται και βελτίωση της ακρίβειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση των σφαλμάτων εντοπισμού φωτοσταθερών στην απεικόνιση TerraSAR-X. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο έχει παρατηρηθεί και βιβλιογραφικά. Μετά την επίλυση του συγκεκριμένου ενδιάμεσου βήματος σειρά έχει και η χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προκειμένου να προκύψει το τελικό ορθοαναγμένο προϊόν. Τα αποτελέσματα που προκύψαν με χρήση διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών και διαφορετικών ΨΜΕ, για την παραγωγή του τελικού ορθοαναγμένου προϊόντος, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7-2:

Αριθμός Φωτοσταθερών (χρήση OrthoRadar suite)	24	12	6
	RMSE – CE90 (σε m) (έλεγχος: σύγκριση συν/νων 23 φ/σ μετρημένων με GPS με τις αντίστοιχες συν/νες των ίδιων σημείων επί της ορθοεικόνας)		
Χρησιμοποιούμενα ΨΜΕ			
Αυτόματο ΨΜΕ (βήμα 10m)	7.25 – 10.99	7.11 – 10.80	6.92 – 10.51
ΨΜΕ από Aster GDEM (30m)	4.41 – 6.69	4.34 – 6.59	3.82 – 5.80
ΨΜΕ της ΓΥΣ (30m)	3.81 – 5.79	3.62 – 5.50	3.46 – 5.25
ΨΜΕ της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. (5m)	1.30 – 1.97	1.21 – 1.83	1.20 – 1.82

Πίνακας 7.2: Οριζοντιογραφικές Ακρίβειες Παραθθέντων Ορθοεικόνων.

Από τον πίνακα 7-2 προκύπτουν τα ακόλουθα δύο συμπεράσματα:

- Όσο μειώνεται ο αριθμός των φωτοσταθερών που συμμετέχουν στην ορθοαναγωγή μειώνεται το οριζοντιογραφικό σφάλμα του τελικού παραγόμενου προϊόντος. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τα απεικονιζόμενα τον πίνακα 6-1.
- Όσο καλύτερη είναι η ακρίβεια και ανάλυση του χρησιμοποιούμενου ΨΜΕ για την ορθοαναγωγή της εικόνας τόσο καλύτερη είναι η οριζοντιογραφική ακρίβεια του τελικού παραγόμενου προϊόντος.

Οι προηγούμενες δύο παρατηρήσεις συμβαδίζουν με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία χρήση 3 έως 5 φωτοσταθερών οδηγεί στην καλύτερη δυνατή ακρίβεια, που δύναται να επιτευχθεί στο τελικό ορθοανηγμένο προϊόν, καθώς επίσης χρήση βελτιωμένου ΨΜΕ οδηγεί στην καλύτερη ακρίβεια του τελικού ορθοανηγμένου προϊόντος.

Η δεύτερη ομάδα συμπερασμάτων αφορά στην εξαγωγή των γραμμικών στοιχείων αλλά και την οπτική φωτοερμηνεία των βασικών γεωμετρικών παραμορφώσεων και του οδικού δικτύου της απεικόνισης TerraSAR-X.

Στον πίνακα 7-3, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ανά εικόνα με το εμβαδό και την περίμετρο αυτής και ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο έχει γίνει η εξαγωγή:

	Δορυφορική Εικόνα IKONOS (1 m)-με το Objective	Αεροφωτογραφία ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ (50 cm)-με το Objective	TerraSAR – X (1 m)-με το Objective	TerraSAR – X (1 m)-με οπτική φωτοερμηνεία
Περίμετρος (km)	11.68	4.62	4.62	24.54
Εμβαδόν (km ²)	4.82	1.28	1.28	37.30
Completeness (%)	86.54	82.81	-	70.20
Correctness (%)	50.68	93.16	-	53.63
Quality (%)	47.01	77.89	-	43.66

Πίνακας 7.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Εξαγωγής Οδικού Δικτύου.

Από τον πίνακα 7-3 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

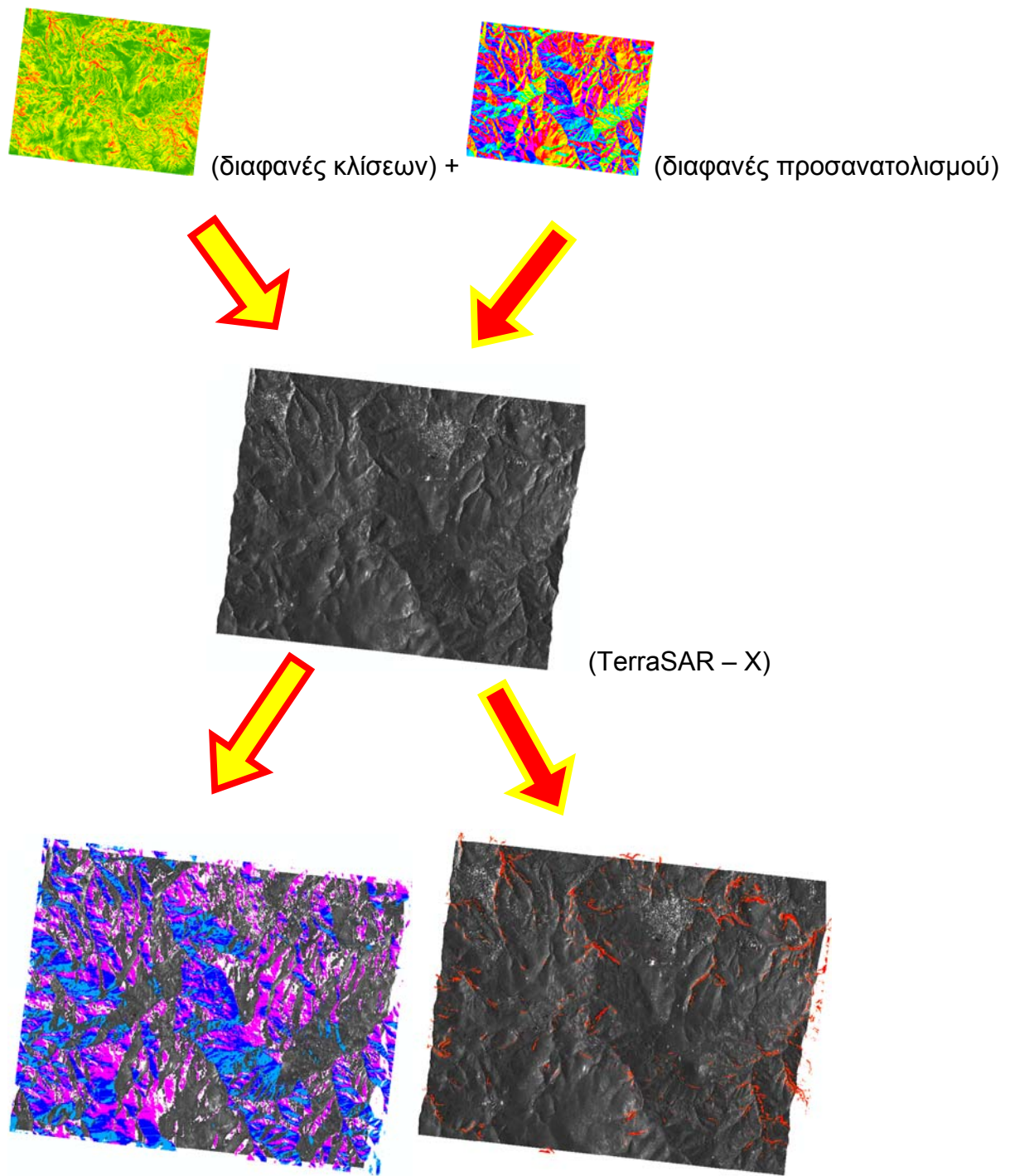
- Από την αυτόματη εξαγωγή οδικού δικτύου με το λογισμικό Objective προκύπτει για τις οπτικές εικόνες ότι με τη βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας (από 1m στα 50cm) και με αντίστοιχη μείωση του εμβαδού της περιοχής κατά ¼, βελτιώθηκαν θεαματικά τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα.
- Η αυτόματη εξαγωγή του οδικού δικτύου από την απεικόνιση TerraSAR – X, δεν είχε αποτελέσματα (δεν εξήχθη οδικό δίκτυο) παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα ομαλοποίησης και ενίσχυσης ακμών.

- Η εξαγωγή οδικού δικτύου, με τη διαδικασία της οπτικής φωτοερμηνείας από τρίτο ανεξάρτητο χρήστη, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εμβαδόν της απεικόνισης είναι περίπου 9 φορές μεγαλύτερο από αυτό που καλύπτει η δορυφορική απεικόνιση IKONOS και ο χρήστης δεν είχε καμία προγενέστερη εμπειρία με εικόνες ραντάρ. Ένα τελευταίο στοιχείο το οποίο πρέπει να προστεθεί στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι και ο χρόνος επεξεργασίας. Δηλαδή, ο χρόνος επεξεργασίας των εικόνων με το λογισμικό κυμαινόταν από 30 έως 40 λεπτά (για οπτικές εικόνες), ενώ ο χρόνος της οπτικής φωτοερμηνείας (για απεικόνιση ραντάρ) από τον χρήστη κυμάνθηκε από 20 έως 30 λεπτά.

Τέλος, για την οπτική φωτοερμηνεία των γεωμετρικών παραμορφώσεων της σκίασης (shadow), της σμίκρυνσης (foreshortening) και της πτύχωσης (layover), ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

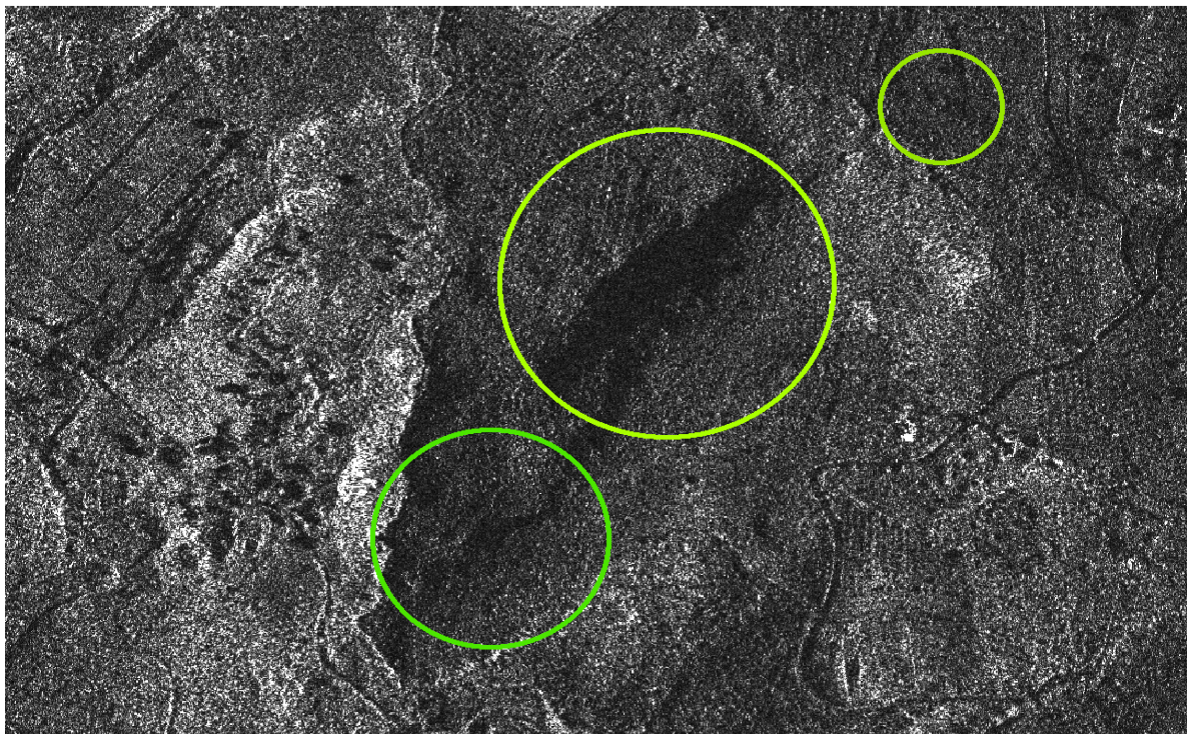
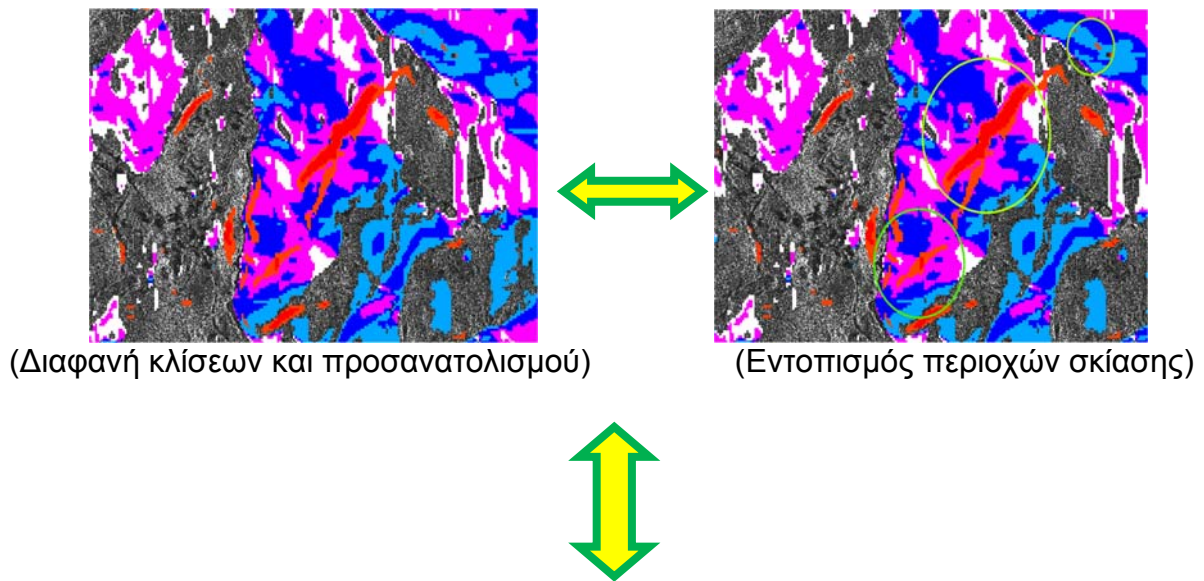
- Προσδιορίστηκε η κατεύθυνση κίνησης του δορυφόρου (από Β προς Νότο ή αντίστροφα)
- Προσδιορίστηκε η γωνία λήψης (αριστερά ή δεξιά)
- Προσδιορίστηκε η γωνία πρόσπτωσης και η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης
- Επιλέχθηκε το ποιοτικότερο ΨΜΕ το οποίο χρησιμοποιήθηκε και για την ορθοαναγωγή της απεικόνισης TerraSAR – X
- Δημιουργήθηκε διαφανές κλίσεων (slope) και διαφανές προσανατολισμού (aspect). Το πρώτο διαφανές χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της κλίσης των εδαφών με τη γωνία πρόσπτωσης, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί ο προσανατολισμός των εδαφών σε σχέση με την κατεύθυνση κίνησης του δορυφόρου, αλλά και με τη γωνία λήψης αυτού.
- Μελετήθηκαν οι παραμορφώσεις λόγω σκίασης, σμίκρυνσης και πτύχωσης και οι αντίστοιχες παράμετροι και περιορισμοί
- Συνδυάστηκαν όλα τα παραπάνω βήματα και έγινε εξαγωγή του επιδιωκόμενου τελικού προϊόντος.

Συνοπτικά, και σχηματικά, τα παραπάνω βήματα έχουν ως εξής:



Οι παραπάνω συνδυασμοί προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς όπως γωνία πρόσπτωσης, κατεύθυνση τροχιάς και λήψης και τις παραμέτρους των γεωμετρικών παραμορφώσεων.





(Εντοπισμός περιοχών φαινομένου σκίασης)

Η προαναφερθείσα διαδικασία, θα μπορούσε να ονομαστεί «**Έμμεση – Σταδιακή Φωτοερμηνεία**», του φαινομένου της σκίασης στην ορθοεικόνα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος TerraSAR – X και δύναται να τηρηθεί, με τους αντίστοιχους περιορισμούς και για τα φαινόμενα σμίκρυνσης και πτύχωσης. Βασική προϋπόθεση της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί τα ψηφιακά γεωγραφικά υλικά (απεικόνιση ραντάρ και ψηφιακό μοντέλο εδάφους) να προβάλλονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς και πιο συγκεκριμένα η ραντάρ απεικόνιση να έχει ορθοδιορθωθεί και στη διαδικασία της φωτοερμηνείας να χρησιμοποιείται το ίδιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

7.4 Επίλογος

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν τρόποι και μέθοδοι εκμετάλλευσης μίας εικόνας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος υψηλής ανάλυσης. Μελετήθηκαν οι δυνατότητες που απορρέουν από την επεξεργασία ενός τέτοιου προϊόντος (ορθοεικόνα, φωτοερμηνεία), αλλά και οι περιορισμοί που προκύπτουν, όπως στην αυτόματη εξαγωγή γραμμικών στοιχείων με χρήση ειδικού λογισμικού. Παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των απεικονίσεων αυτών εν συγκρίσει με τις οπτικές εικόνες.

Στο μέλλον θα είχε ενδιαφέρον η εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους από ένα ζευγάρι ραντάρ απεικονίσεων και η σύγκριση αυτού με ένα υπάρχον ΨΜΕ, όπως αυτό της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η οπτική φωτοερμηνεία μίας εικόνας ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, μελετώντας όμως κάθε μία από τις δεκαπέντε παραμέτρους του κεφαλαίου έξι, οι οποίες πρέπει να συνυπολογιστούν στην περίπτωση ειδικότερα της φωτοερμηνείας αστικού περιβάλλοντος. Βιβλιογραφικά η μελέτη τέτοιων παραμέτρων ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1980. Προκειμένου όμως ένας μελετητής να καταλήξει στην επιρροή που έχει μία παράμετρος στη φωτοερμηνεία συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, πρέπει να την εξετάσει ταυτόχρονα με όλες τις δυνατότητες οι οποίες παρέχονται από ένα σύστημα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος και να καταλήξει στο τελικό επιθυμητό φωτοερμηνευτικό αποτέλεσμα.

Βέβαια στο τέλος, όσα ερωτήματα και αν απαντώνται μέσα από τη διαδικασία της μελέτης και επεξεργασίας των εικόνων, άλλα τόσα γεννιούνται καθοδηγώντας το χρήστη στον επιθυμητό στόχο, ο οποίος δεν είναι άλλος από **τη συνεχή διερεύνηση και μάθηση**.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASTER GDEM-METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS (2009). "ASTER Global DEM Validation". Summary Report.

Badurska Monika. "Orthorectification and Geometric Verification of High Resolution TerraSAR – X Images", GEOMATICS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, Volume 5, Number 3, 2011.

Bellmann A. , Hellwich O. , (2006). "Sensor and Data Fusion Contest Information for Mapping from Airborne SAR and Optical Imagery". Final Report on Phase I, Computer Vision & Remote Sensing – University of Technology, Berlin.

Bolon P. , Chanussot J. , Issa I. , Lambert P. , (1999). "Comparison of prefiltering operators for road network extraction in SAR images". GNRS – GdR ISIS – Information, Signal and Image Processing – University of Savoie, France.

Brunner, D. (2009). " Advanced Methods For Building Information Extraction From Very High Resolution SAR Data To Support Emergency Response". PhD Dissertation, International Doctorate School in Information and Communication Technologies, DISI - University of Trento.

David P. Lusch (1999). "Introduction To Microwave Remote Sensing". Center For Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University.

Dial, Grodecki. "RPC Replacement Camera Models".

Eidener, M., T. Fritz, (2010). "TerraSAR – X Ground Segment". SAR Basic Product Specification Document (TX-GS-DD-3302), v1.7.

EI-Manadili Y., K. Novak (1996). "Precision rectification of SPOT imagery using the Direct Linear Transformation", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 1, pp. 67-72.

Erdas IMAGINE, (2010). "ERDAS Field Guide™"

ESA. "Synthetic Aperture Παντάρ Land Applications Tutorial, Part I Background and Theory". Sarmap, esa, UNESCO.

Floyd M. Henderson, Anthony J. Lewis. (1998). "Principles & Applications of IMAGING PANTAP". Manual of Remote Sensing Third Edition, Volume 2.

Fraser & Hanley. "Bias- compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 71, No. 8, August 2005, pp. 909–915.

Halounova, L. (2009). "Light SAR 1, Παντάρ Basics". ADVANCED TRAINING COURSE ON LAND REMOTE SENSING, ESA, Prague (Czech Republic).

infoterra GmbH (2009). "TerraSAR – X Image Product Guide". infoterra GmbH, Astrium GmbH.

Jacobsen, Büyüksalih, Topan. "Geometric Models for the Orientation of High Resolution Optical Satellite Sensors".

John A. Richards, (2009). "Remote Sensing with Imaging Παντάρ". Springer Series on Signals and Communication Technology.

Lisini G. , Tison C. , Tupin F. , Gamba P. , (2006). "Feature Fusion to improve Road Network Extraction in High-Resolution SAR Images". IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 3, NO. 2.

Michalis, P. (2005). "Generic Rigorous Model for Along Track Stereo Satellite Sensors". A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London, Department of Geomatic Engineering, University College London.

Natural Recourses Canada. "Educational Resources for Παντάρ Remote Sensing". GLOBE SAR, Canada.

Reinartz P. , Muller R. , Suri S. , Schneider M. , Schwind P. , Bamler R. " USING GEOMETRIC ACCURACY OF TERRASAR-X DATA FOR IMPROVEMENT OF DIRECT SENSOR ORIENTATION AND ORTHO-RECTIFICATION OF OPTICAL SATELLITE DATA", German Aerospace Center (DLR), Remote Sensing Technology Institute, 2009.

Samuel W. McCandless, Christofer R. Jackson (2005). "Chapter 1. Principles of Synthetic Aperture Παντάρ". SAR Marine User's Manual.

Sonia M. Ortiz, Johannes Breidenbach, Ralph Knuth, Gerald Kandler. "The Influence of DEM Quality on Mapping Accuracy of Coniferous-and Deciduous-Dominated Forest Using TerraSAR-X Images", Remote Sens. 2012, 4, 661-681; doi:10.3390/rs4030661.

Tao, Hu, Mercer, Schnick, Zhang. "IMAGE RECTIFICATION USING A GENERIC SENSOR MODEL – RATIONAL FUNCTION MODEL", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3 Amsterdam 2000.

Tonolo και Poli. "GEOREFERENCING OF EROS-A1 HIGH RESOLUTION IMAGES WITH RIGOROUS AND RATIONAL FUNCTION MODEL".

Vozikis, Fraser, Jansa. "Alternative Sensor Orientation Models For High Resolution Satellite Imagery".

Βραδής Χ. , Καπράς Γ., Πέτσα Ε. , (2000). "Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας". Μετάφραση του "The Fundamentals of Digital Photogrammetry", ISM International Systemap Corporation-Καναδάς 1998, ΤΑΤΜ/ΕΜΠ.

Ιωαννίδης, Χ. (2007). "Συμπληρωματικές Σημειώσεις Φωτογραμμετρία II και διαφάνειες". ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα.

Καββάδας, Ι. "ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΥΠΟΒΑΘΡΩΝ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ". ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., Αθήνα.

Καραθανάση, Β. (2012). "Μικροκυματική Τηλεπισκόπηση". Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Καροπούλου Θ., (2007). "Ανάπτυξη Αλγορίθμου για απευθείας Γεωαναφορά Δορυφορικών Εικόνων-Εφαρμογή σε Εικόνες ASTER". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Κουρκούλη, Π. (2010). "Παρατήρηση της εδαφικής παραμόρφωσης του δέλτα του Μόρνου με τη χρήση της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Μπουρεξής, Φ. (2012). "Φωτογραμμετρική Επεξεργασία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Απεικονίσεων ". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Ξυνογαλάς, Ε., Σοϊλέ, Σ., (2012). "Αξιολόγηση Ελεύθερων Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους GDEM (ASTER) και SRTM". Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι, ΕΜΠ-ΔΠΜΣ.

Τσιγγενόπουλος, Γ. (2009). "Αυτόματη Εξαγωγή Χαρτογραφικών Χαρακτηριστικών Από Δορυφορικές Εικόνες". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Τσιγγενόπουλος, Γ., (2011). "ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ". Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι, ΕΜΠ-ΔΠΜΣ.

Url' s

(Ημερομηνία τελευταίας ενεργού πρόσβασης 28 Μαΐ 2012)

<http://www.sigma-2.cesr.fr/sigma/detection>

<http://el.wikipedia.org/wiki/Τηλεπισκόπηση>

<http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingραντάρν3.html>

http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Ραντάρ Courses/Ραντάρ Course II/ραντάρ principles.htm

<http://www.treuropa.com/Home/Technique/SARImagery/tabid/409/Default.aspx>

<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/mw.htm>

<http://www.google.gr/imgres?q=pulse+repetition+interval>