



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Γεωμετρική διόρθωση, Βελτίωση, Μετασχηματισμοί
και Υπέρθεση Εικόνας SAR

Φαφούτης Ιωάννης

Εξεταστική επιτροπή :

Δρ. Μερτίκας Στυλιανός (επιβλέπων)

Δρ. Βαφείδης Αντώνης

Δρ. Ζερβάκης Μιχάλης

ΧΑΝΙΑ 2003

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για περισσότερο από τρεις δεκαετίες, αισθητήρες μεταφερόμενοι από δορυφόρους και αεροσκάφη χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και την απεικόνιση της επιφάνειας της γης, την κατανομή των διαφόρων αντικειμένων και φαινομένων στον χώρο, καθώς και τον καθορισμό της θέσης και των ιδιοτήτων τους.

Προβλέπεται ότι μέχρι το 2002 θα βρίσκονται σε τροχιά πάνω από 30 δορυφόροι Τηλεπισκόπησης, οι οποίοι θα λειτουργούν και θα ελέγχονται από διάφορα έθνη ή ιδιωτικές εταιρίες. Οι φερόμενοι από τους δορυφόρους αισθητήρες καθώς και τα προϊόντα τους (εικόνες) ποικίλουν ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Έτσι υπάρχουν συστήματα που συλλέγουν δεδομένα με διαφορετικές χωρικές, φασματικές, ραδιομετρικές και διαχρονικές διαχωριστικές ικανότητες, ανιχνεύοντας την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία ή παράγοντας τη δική τους.

Κανένας αισθητήρας από μόνος του δεν παρέχει όλα τα χαρακτηριστικά (υψηλή χωρική, φασματική, ραδιομετρική ανάλυση, μεγάλο εύρος λωρίδας σάρωσης και φασματικής καταγραφής) που απαιτούνται από τους χρήστες. Επομένως απαιτούνται πολλαπλά συστήματα ώστε να καλύπτονται οι αδυναμίες όλων των συστημάτων.

Η ανάγκη για μεγιστοποίηση του βαθμού πληροφοριών που εξάγονται από τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης, οδήγησε σε τεχνικές ενσωμάτωσης (fusion) δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες, ώστε να γίνει εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του κάθε αισθητήρα και ταυτόχρονα να διευκολυνθεί η ερμηνεία και η αξιολόγηση των δεδομένων που προκύπτουν.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται ενσωμάτωση δεδομένων από δύο εικονοληπτικά συστήματα, το σύστημα Landsat 7 (TM) και το εικονοληπτικό Radar ERS - 1 (SAR). Η καλύτερη χωρική ανάλυση του ERS-1 σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο εύρος φασματικής κάλυψης του Landsat 7 δημιουργεί μία σύμμικτη εικόνα που παρέχει ταυτόχρονα πληροφορίες και από τα δύο συστήματα.

Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Τηλεπισκόπησης και γίνεται γενική αναφορά στα εικονοληπτικά συστήματα, στα κύρια

χαρακτηριστικά τους και τις εφαρμογές τους, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος Landsat και του ERS - 1. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή στις βασικές αρχές της ψηφιακής ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας.

Στο 6^ο Κεφάλαιο αρχικά γίνεται γεωμετρική διόρθωση της εικόνας ERS - 1 με πολυωνυμικούς μετασχηματισμούς και γίνεται σύγκριση των μεθόδων της γεωμετρικής διόρθωσης σε σχέση με τον βαθμό πολυωνύμου και τη μέθοδο επαναδειγματοληψίας.

Σκοπός της γεωμετρικής διόρθωσης είναι να φέρει την εικόνα σε μορφή χάρτη, έτσι ώστε να υπάρχει σωστή αντιστοιχία μεταξύ περιοχών στην εικόνα και το έδαφος. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, είναι απαραίτητη η μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας (γραμμές και στήλες) σε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων (π.χ γεωγραφικό μήκος και πλάτος).

Ακολουθεί η ενσωμάτωση των δεδομένων με την παρουσίαση τριών τεχνικών (PCT, IHST, Brovey) και γίνεται σύγκριση και αξιολόγησή τους. Η εργασία ολοκληρώνεται με την ερμηνεία της εικόνας που προέκυψε από τον PCT μετασχηματισμό.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς τη συμβολή μερικών ανθρώπων.

Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τους μεταπτυχιακούς στο εργαστήριο Γεωδαισίας και Πληροφορικής των Γεωεπιστημών, Δαμιανίδη Κοσμά, Καραθανάση Θανάση, Τριπολιτισιώτη Αχιλλέα και Φραντζή Ξενάκη.

Ευχαριστίες οφείλω στους καθηγητές κ. Αντώνη Βαφείδη και κ. Μιχάλη Ζερβάκη που ευγενικά δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Στυλιανό Μερτίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της εργασίας αυτής καθώς και για τις συμβουλές και παρατηρήσεις του που ήταν πραγματικά πολύτιμες για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | II |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | V |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | VI |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ..... | IX |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | XII |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | 1 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | 3 |
| ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ..... | 3 |
| 2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ..... | 3 |
| 2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ | 5 |
| 2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ | 8 |
| 2.4 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ..... | 13 |
| 2.4.1 ΣΚΕΔΑΣΗ | 13 |
| 2.4.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ | 15 |
| 2.5 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ | 17 |
| 2.5.1 ΑΝΑΚΛΑΣΗ | 18 |
| 2.5.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ..... | 19 |
| 2.6 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ | 19 |
| 2.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ | 20 |
| 2.8 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΑ ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 24 |
| 2.9 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΙΚΟΝΑΣ | 25 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | 27 |
| ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ..... | 27 |
| 3.1 ΗΛΕΚΤΡΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ..... | 27 |
| 3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ | 28 |
| 3.3 ΜΕΤΡΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ | 31 |
| 3.4 ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 34 |
| 3.4.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΑΡΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ..... | 35 |
| 3.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ | 36 |
| 3.4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ (ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΑ RADAR)..... | 37 |
| 3.5 ΧΕΡΣΑΙΑ, ΕΝΑΕΡΙΑ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ- ΓΕΝΙΚΑ | 37 |
| 3.6 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ - ΓΕΝΙΚΑ..... | 38 |
| 3.6.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ | 42 |
| 3.6.2.1 ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (SPATIAL RESOLUTION)..... | 42 |
| 3.6.2.2 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (SPECTRAL RESOLUTION) | 44 |
| 3.6.2.3 ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (RADIOMETRIC RESOLUTION) | 45 |
| 3.6.2.4 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (TEMPORAL RESOLUTION)..... | 45 |
| 3.7 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ | 46 |
| 3.8 ΕΙΚΟΝΕΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΥΠΕΡΥΘΡΟ..... | 48 |
| 3.9 Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ GOES | 50 |
| 3.10 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ LANDSAT | 52 |
| 3.11 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ SPOT | 55 |
| 3.12 ΤΟ ΡΩΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ KVR - 1000 | 57 |
| 3.13 Ο ΔΕΚΤΗΣ SKYLAB S - 192 | 57 |
| 3.14 Ο ΙΑΠΩΝΙΚΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ MOS..... | 58 |
| 3.15 Ο ΙΝΔΙΚΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ IRS | 58 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | 60 |
| ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΟ RADAR | 60 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ | 60 |
| 4.2 ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ | 61 |
| 4.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RADAR..... | 62 |
| 4.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RADAR ΑΠΟ ΑΕΡΟΣ..... | 63 |
| 4.4.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 63 |
| 4.4.2 ΕΙΔΗ RADAR..... | 65 |
| 4.4.3 RADAR ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ RAR | 66 |
| 4.4.4 RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ SAR | 67 |
| 4.5 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ..... | 70 |
| 4.5.1 ΠΟΛΩΣΗ | 70 |
| 4.5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ SAR | 72 |
| 4.5.3 ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ SAR..... | 73 |
| 4.5.4 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ RADAR | 75 |
| 4.5.5 ΣΚΕΔΑΣΗ | 76 |
| 4.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ RADAR | 79 |
| 4.7 ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ RADAR | 82 |
| 4.7.1 ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΠΟ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥΣ ΛΟΒΟΥΣ | 82 |
| 4.7.2 ΣΤΙΓΜΑΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ RADAR | 83 |
| 4.8 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ RADAR..... | 84 |
| 4.8.1 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ | 84 |
| 4.8.2 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ..... | 86 |
| 4.8.3 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ Z | 87 |
| 4.8.4 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ | 88 |

| | |
|---|------------|
| 4.9 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RADAR | 89 |
| 4.9.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ SAR..... | 90 |
| 4.9.2 CONVAIR-580 C / X SAR..... | 90 |
| 4.9.3 SEA ICE AND TERRAIN ASSESSMENT (STAR) | 91 |
| 4.9.4 AIRSAR..... | 92 |
| 4.9.5 SEASAT | 92 |
| 4.9.6 ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SIR | 93 |
| 4.9.7 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ERS | 93 |
| 4.9.8 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ JERS | 94 |
| 4.9.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADARSAT | 94 |
| 4.9.10 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ENVISAT..... | 95 |
| 4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ | 95 |
| 4.11 ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ | 101 |
| 4.11.1 ΡΑΝΤΑΡΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ..... | 102 |
| 4.11.2 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ..... | 102 |
| 4.11.3 ΠΟΛΩΣΙΜΕΤΡΙΑ | 105 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | 107 |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ..... | 107 |
| 5.1 ΓΕΝΙΚΑ | 107 |
| 5.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ | 107 |
| 5.3 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ..... | 110 |
| 5.4 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ | 113 |
| 5.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ..... | 113 |
| 5.5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ | 113 |
| 5.5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΑ..... | 114 |
| 5.5.3 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ | 116 |
| 5.5.3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΛΗΣΙΕΣΤΕΡΟΥ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ..... | 116 |
| 5.5.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ..... | 117 |
| 5.5.3.3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΚΥΒΙΚΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ | 118 |
| 5.6 ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ | 118 |
| 5.7 Η ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (IMAGE ENHANCEMENT) | 120 |
| 5.7.1 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΘΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ (CONTRAST ENHANCEMENT)..... | 121 |
| 5.7.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ (HISTOGRAM EQUALIZATION) | 122 |
| 5.7.3 ΦΙΛΤΡΑ | 123 |
| 5.7.3.1 ΦΙΛΤΡΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ..... | 124 |
| 5.7.3.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΑΚΜΩΝ..... | 125 |
| 5.8 ΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (IMAGE TRANSFORMATIONS) | 128 |
| 5.9 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ..... | 131 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 | 134 |

| | |
|---|------------|
| ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ RADAR | 134 |
| 6.1 ΓΕΝΙΚΑ | 134 |
| 6.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | 134 |
| 6.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ RADAR ERS-1 (SAR)..... | 139 |
| 6.3.1 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΤΩΝ GCP'S ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ERS-1 ΑΠΟ ΕΙΚΟΝΑ LANDSAT – ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΟΛΥΩΝΥΜΟΥ | 139 |
| 6.3.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ | 144 |
| 6.4 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ERS-1 | 145 |
| 6.5 ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ | 147 |
| 6.5.1 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PCT (PRINCIPAL COMPONENT TRANSFORMATION) | 147 |
| 6.5.2 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ PCT ΕΙΚΟΝΑΣ (ERS-1 / LANDSAT TM) | 152 |
| 6.5.3 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ IHS (INTENSITY, HUE, SATURATION) | 155 |
| 6.5.4 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ BROVEY | 161 |
| 6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ..... | 163 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 | 168 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 168 |
| 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 168 |
| 7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 169 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 170 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΡΟΒΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ..... | 173 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ SAR | 180 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ RGB ΣΕ IHS | 183 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Σχήμα 2.1 Διάρθρωση πρωτογενούς εικονοληπτικού συστήματος. | 3 |
| Σχήμα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης στον χώρο..... | 5 |
| Σχήμα 2.3 Διάφορα μήκη κυμάτων..... | 6 |
| Σχήμα 2.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα..... | 8 |
| Σχήμα 2.5 Υπεριώδες διάστημα. | 9 |
| Σχήμα 2.6 Ορατή φασματική ζώνη..... | 10 |
| Σχήμα 2.7 Υπέρυθρο διάστημα. | 12 |
| Σχήμα 2.8 Διάστημα μικροκυμάτων..... | 13 |
| Σχήμα 2.9 Σκέδαση Rayleigh. | 14 |
| Σχήμα 2.10 Σκέδαση Mie..... | 15 |
| Σχήμα 2.11 Απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας..... | 16 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 2.12 Οι δίοδοι ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. | 17 |
| Σχήμα 2.13 Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας σε φύλλωμα δένδρου. | 18 |
| Σχήμα 2.14 Φασματικές ταυτότητες ορισμένων υλικών. | 20 |
| Σχήμα 2.15 Ο ορισμός της στερεάς γωνίας. | 23 |
| Σχήμα 2.16 Ο ορισμός της ακτινοβολίας. | 24 |
| Σχήμα 2.17 Ενεργό σύστημα. Παθητικό σύστημα. | 25 |
| Σχήμα 2.18 Ψηφιακή εικόνα. | 26 |
| Σχήμα 3.1 Εξάρτηση της απόκρισης R ενός ιδανικού ανιχνευτή με το μήκος κύματος λ. | 31 |
| Σχήμα 3.2 Διάγραμμα της απόκρισης R δύο ανιχνευτών σε σχέση με το μήκος κύματος λ. | 32 |
| Σχήμα 3.3 Συγκριτικό διάγραμμα της παραμέτρου D^* | 34 |
| Σχήμα 3.4 Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος σάρωσης γραμμών. | 35 |
| Σχήμα 3.5 Παράδειγμα γεωμετρίας του GIFOV. | 36 |
| Σχήμα 3.6 Σύστημα διανυσματικής καταγραφής. | 36 |
| Σχήμα 3.7 Γεωστατικός δορυφόρος. | 39 |
| Σχήμα 3.8 Ηλιο-σύγχρονη σχεδόν πολική τροχιά ενός δορυφόρου Τηλεπισκόπησης. | 40 |
| Σχήμα 3.9 Ανιούσα - Κατιούσα τροχιά. | 41 |
| Σχήμα 3.10 Παρατηρούμενη ζώνη της επιφάνειας της γης. | 41 |
| Σχήμα 3.11 Παραδείγματα διαφορετικών χωρικών διαχωριστικών ικανοτήτων. | 42 |
| Σχήμα 3.12 Η δεξιά φωτογραφία είναι διαστάσεων 832 X 624 pixels ενώ | 43 |
| Σχήμα 3.13 High Resolution Image. Σχήμα 3.14 Low Resolution Image. | 44 |
| Σχήμα 3.15 Φασματική διαχωριστική ικανότητα. | 45 |
| Σχήμα 3.16 Τρία παραδείγματα διαφορετικών ραδιομετρικών αναλύσεων. | 45 |
| Σχήμα 3.17 Σχηματικό διάγραμμα της γεωμετρίας της λήψης φωτογραφιών. | 46 |
| Σχήμα 3.18 Έγχρωμη φωτογραφία. Ψευδοχρωματική φωτογραφία. | 47 |
| Σχήμα 3.19 Θερμόγραμμα. | 49 |
| Σχήμα 3.20 Ο τυφώνας Fran πλησιάζει βορειοδυτικό τμήμα των Η.Π.Α. | 51 |
| Σχήμα 3.21 Ο Landsat 1. | 52 |
| Σχήμα 3.22 Δύο εικόνες από τον TM που δείχνουν την πορεία της υλοτόμησης. | 55 |
| Σχήμα 4.1 Τα διάφορα μέρη του Radar. | 62 |
| Σχήμα 4.2 Το Radar πλευρικής κάλυψης SLAR. | 63 |
| Σχήμα 4.3 Η αρχή λειτουργίας του Radar. | 64 |
| Σχήμα 4.4 Η γωνία παρατήρησης και η γεωμετρία της σάρωσης του Radar. | 66 |
| Σχήμα 4.5 Διαδικασία σύνθεσης μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας. | 67 |
| Σχήμα 4.6 Η διαδικασία μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler. | 69 |
| Σχήμα 4.7 Πόλωση της ακτινοβολίας του ηλεκτρικού πεδίου. | 71 |
| Σχήμα 4.8 Εικόνες με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης στην ζώνη C του Radar. | 71 |
| Σχήμα 4.9 Γεωμετρία του SAR. | 72 |
| Σχήμα 4.10 Γεωμετρία του SAR. | 72 |
| Σχήμα 4.11 Γεωμετρία του SAR. | 73 |
| Σχήμα 4.12 Η διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση. | 74 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 4.13 Οι επιδράσεις της τραχύτητας της επιφάνειας στην ανάκλαση..... | 77 |
| Σχήμα 4.14 Γωνιακή ανάκλαση. | 78 |
| Σχήμα 4.15 Αστική περιοχή..... | 78 |
| Σχήμα 4.16 Χωρική σκέδαση στα φυλλώματα. Γωνιακή ανάκλαση με δύο επιφάνειες..... | 79 |
| Σχήμα 4.17 Συμπύεση της εγγύτερης περιοχής.... | 80 |
| Σχήμα 4.18 Γεωμετρική αναστροφή. | 81 |
| Σχήμα 4.19 Γεωμετρική σμίκρυνση. | 81 |
| Σχήμα 4.20 Σκίαση του Radar. Οι κόκκινες επιφάνειες είναι υπό σκίαση. | 82 |
| Σχήμα 4.21 Στίγματα (speckles) σε εικόνα Radar. | 83 |
| Σχήμα 4.22 Συντονισμός Bragg..... | 88 |
| Σχήμα 4.23 Το σύστημα Convair-580 C / X. | 91 |
| Σχήμα 4.24 Το σύστημα STAR –2 | 91 |
| Σχήμα 4.25 Το σύστημα AirSar. | 92 |
| Σχήμα 4.26 Το σύστημα SEASAT..... | 92 |
| Σχήμα 4.27 Το σύστημα ERS-1..... | 93 |
| Σχήμα 4.28 Το σύστημα JERS-1..... | 94 |
| Σχήμα 4.29 Το σύστημα Radarsat..... | 94 |
| Σχήμα 4.30 Εικόνα SIR-C/X-SAR από τη Θάλασσα της Αραβίας..... | 96 |
| Σχήμα 4.31 Η όαση Safsaf στη νότια Αίγυπτο. | 98 |
| Σχήμα 4.32 Ο ποταμός Νείλος..... | 100 |
| Σχήμα 4.33 Είδη βλάστησης από εικόνα Radar. | 101 |
| Σχήμα 4.34 Ζευγάρι φωτογραφιών από την ίδια περιοχή με διαφορετικές γωνίες..... | 102 |
| Σχήμα 4.35 Γεωμετρία της συμβολομετρίας..... | 103 |
| Σχήμα 4.36 Συμβολογράφημα (Interferogram)..... | 104 |
| Σχήμα 4.37 Τρισδιάστατο μοντέλο. | 105 |
| Σχήμα 5.1 Ο τόνος..... | 108 |
| Σχήμα 5.2 Η μορφή. | 108 |
| Σχήμα 5.3 Το μέγεθος. | 109 |
| Σχήμα 5.4 Η δομή..... | 109 |
| Σχήμα 5.5 Η υφή..... | 110 |
| Σχήμα 5.6 Η σκίαση..... | 110 |
| Σχήμα 5.7 Ιστόγραμμα της εικόνας..... | 112 |
| Σχήμα 5.8 Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου..... | 117 |
| Σχήμα 5.9 Η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής..... | 117 |
| Σχήμα 5.10 Η μέθοδος της κυβικής παρεμβολής..... | 118 |
| Σχήμα 5.11 Dropped line..... | 119 |
| Σχήμα 5.12 Στο πάνω μέρος της εικόνας φαίνεται το φαινόμενο της λωριδοποίησης..... | 119 |
| Σχήμα 5.13 Βελτίωση της αντίθεσης με διάταξη του ιστογράμματος..... | 121 |
| Σχήμα 5.14 Εφαρμογή φίλτρου από μία μάσκα W (3x3) σε τμήμα Z (3x3) μιας εικόνας..... | 124 |
| Σχήμα 5.15 Φίλτρο μετακινούμενων μέσων τιμών. | 125 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Σχήμα 5.16 Ενίσχυση ακμών με το φίλτρο Sobel..... | 128 |
| Σχήμα 5.17 Σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματισμού των κύριων συνιστωσών.... | 130 |
| Σχήμα 5.18 Σχηματική αναπαράσταση αυτόματης ταξινόμησης..... | 132 |
| Σχήμα 5.19 Σχηματική αναπαράσταση καθοδηγούμενης ταξινόμησης. | 133 |
| Σχήμα 6.1 Η εικόνα του ERS -1..... | 136 |
| Σχήμα 6.2 Η εικόνα Landsat..... | Error! Bookmark not defined. |
| Σχήμα 6.3 Προσθήκη GCP's από τον αναλυτή. | 141 |
| Σχήμα 6.4 Γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες με πολυώνυμα 1ου, 2ου και 3ου βαθμού. | 143 |
| Σχήμα 6.5 Ενίσχυση ακμών με φίλτρα. | 146 |
| Σχήμα 6.6 Σχηματικό διάγραμμα της υπέρθεσης εικόνων, (PCT)..... | 148 |
| Σχήμα 6.7 Η σύμμικτη εικόνα ERS-1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό PCT. | 150 |
| Σχήμα 6.8 Ο χάρτης της σύμμικτης εικόνας στο ΕΓΣΑ-87.. | 151 |
| Σχήμα 6.9 Τμήμα (Α) : Διάφορα είδη βλάστησης, αγροτική περιοχή.. | 152 |
| Σχήμα 6.10 Τμήμα (Β) : Κύματα επιφανείας, εσωτερικά κύματα..... | 153 |
| Σχήμα 6.11 Τμήμα (C) : Μεταλλικός συντονισμός σε πλωτά μέσα.. | 154 |
| Σχήμα 6.12 Το τμήμα (D) : Ο ισθμός της Κορίνθου και το οδικό δίκτυο..... | 155 |
| Σχήμα 6.13 Το κυβικό σύστημα απεικόνισης των χρωμάτων RGB. | 156 |
| Σχήμα 6.14 Το κωνικό σύστημα απεικόνισης IHS..... | 157 |
| Σχήμα 6.15 Σχηματικό διάγραμμα της υπέρθεσης εικόνων, (IHST)..... | 158 |
| Σχήμα 6.16 Η σύμμικτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό IHST. | 159 |
| Σχήμα 6.17 Η σύμμικτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με την παραλλαγή του.... | 160 |
| Σχήμα 6.18 Η σύμμικτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό Brovey. | 162 |
| Σχήμα Α.1 Οι γεωγραφικές συντεταγμένες ενός σημείου στο ελλειψοειδές..... | 173 |
| Σχήμα Α.2 Ο χαρτογραφικός κάρναβος και οι καρτεσιανές συντεταγμένες χ, γ..... | 174 |
| Σχήμα Β.1 Επιπτώσεις στη γεωμετρία της εικόνας Radar από το ανάγλυφο. | 180 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 2.1 Διάφορες μονάδες μηκών κυμάτων..... | 6 |
| Πίνακας 2.2 Διάφορες μονάδες συχνοτήτων κυμάτων..... | 7 |
| Πίνακας 2.3 Μήκη κυμάτων αθροιστικών χρωμάτων..... | 10 |
| Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές ανιχνευτών φωτονίων..... | 33 |
| Πίνακας 3.2 Τα χαρακτηριστικά του GOES | 50 |
| Πίνακας 3.3 Τα χαρακτηριστικά του NOAA AVHRR..... | 51 |
| Πίνακας 3.4 Φασματικές ζώνες του MSS. | 54 |
| Πίνακας 3.5 Φασματικές ζώνες του TM..... | 54 |
| Πίνακας 3.6 Φασματικές ζώνες του SPOT..... | 56 |
| Πίνακας 3.7 Τα χαρακτηριστικά του MOS. | 58 |
| Πίνακας 3.8 Τα χαρακτηριστικά του IRS. | 59 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 4.1 Ονομασία και μήκη κύματος των Radar. | 61 |
| Πίνακας 4.2 Τιμές διηλεκτρικών σταθερών ξηρών εδαφών σε διαφορετικές συχνότητες. | 85 |
| Πίνακας 4.3 Διηλεκτρικές σταθερές του νερού. | 85 |
| Πίνακας 6.1 Τα σημεία ελέγχου και τα σφάλματα τους. | 142 |
| Πίνακας 6.2 Σύγκριση στατιστικών στοιχείων για τις τιμές φωτεινότητας..... | 142 |
| Πίνακας 6.3 Τα στατιστικά στοιχεία σε σχέση με το βαθμό του πολυωνύμου..... | 144 |
| Πίνακας 6.4 Τα στατιστικά στοιχεία για τις τιμές φωτεινότητας σε σχέση..... | 145 |
| Πίνακας 6.5 Ο μετασχηματισμός Brovey. | 161 |
| Πίνακας Α.1 Το προβολικό σύστημα HATT..... | 176 |
| Πίνακας Α.2 Το προβολικό σύστημα TM3 ⁰ | 177 |
| Πίνακας Α.3 Το προβολικό σύστημα ΕΜΠ (U.T.M.)..... | 178 |
| Πίνακας Α.4 Το προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ-87..... | 179 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σχεδόν 40 χρόνια έχουν περάσει από τότε που ο Wiley αρχικά παρατήρησε ότι το Radar πλευρικής κάλυψης (Side Looking Radar) μπορεί να βελτιώσει τη χωρική διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο με τη χρησιμοποίηση του φαινομένου Doppler. Αυτή η σημαντική παρατήρηση ήταν το έναυσμα για τη γέννηση μιας νέας τεχνολογίας Radar, του συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, SAR).

Στα επόμενα έτη, ακολούθησε μια αλματώδη ανάπτυξη στον συγκεκριμένο τομέα, οδηγώντας προς τη σταθερή πρόοδο και την απόδοση του συγκεκριμένου αισθητήρα και της επεξεργασίας των λαμβανόμενων δεδομένων του. Αν και ένα μεγάλο μέρος της συγκεκριμένης τεχνικής στόχευε αρχικά προς τις στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η ανίχνευση και η καταδίωξη κινούμενων στόχων, η δυνατότητα για τη χρησιμοποίηση αυτού του οργάνου ως αισθητήρα απεικόνισης για τις επιστημονικές εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης αναγνωρίστηκε ευρέως.

Πριν από την ανάπτυξη του εικονοληπτικού Radar, οι περισσότεροι αισθητήρες υψηλής χωρικής διαχωριστικής ικανότητας ήταν συστήματα φωτογραφικών μηχανών με ανιχνευτές που ήταν ευαίσθητοι είτε στην ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία είτε τη θερμική ακτινοβολία που εκπεμπόταν από τη γήινη επιφάνεια. Το SAR αντιπροσώπευσε μια πλήρως διαφορετική τεχνική για την Τηλεπισκόπηση.

Δεδομένου ότι ένα Radar είναι ένα ενεργό σύστημα που εκπέμπει μια ακτίνα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, επεκτείνει την δυνατότητα παρατήρησης των ιδιοτήτων της γήινης επιφάνειας που δεν ήταν προηγουμένως ανιχνεύσιμες.

Ως ενεργό σύστημα, το SAR παρέχει τη δική του ακτινοβολία και δεν εξαρτάται από το φως του Ήλιου, επιτρέποντας κατά συνέπεια τη συνεχή λειτουργία του κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Επιπλέον, ούτε τα σύννεφα, η ομίχλη και οι βροχοπτώσεις δεν έχουν σημαντική επίδραση στα

μικροκύματα που εκπέμπει το σύστημα, επιτρέποντας κατά συνέπεια την παντός καιρού απεικόνιση. Συμπερασματικά το SAR είναι ένα όργανο που είναι σε θέση να παρατηρεί συνεχώς δυναμικά φαινόμενα όπως τα ωκεάνια ρεύματα, την κίνηση των πάγων της θάλασσας, ή την παρακολούθηση της βλάστησης (Elachi et al, 1982a).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

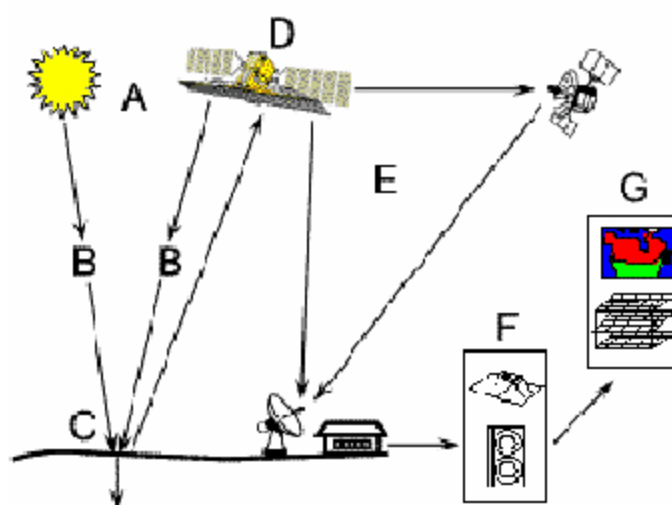
ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1 Τι είναι η Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) ορίζεται ως η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από έναν στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα να έρθει σε απευθείας επαφή με αυτόν (Μερτίκας, 1999).

Η Τηλεπισκόπηση αποτελείται από τρία τμήματα: τους στόχους που συνιστούν τα υπό μελέτη αντικείμενα ή τα φαινόμενα μιας περιοχής, τη συλλογή δεδομένων, μέσω ορισμένων οργάνων και την ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων, πάλι μέσω ειδικών οργάνων.

Η διαδικασία αυτή εμπεριέχει αλληλεπίδραση μεταξύ ακτινοβολίας και του ενδιαφερόμενου στόχου και παρατηρείται με εικονοληπτικά συστήματα η διάρθρωση των οποίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Διάρθρωση πρωτογενούς εικονοληπτικού συστήματος.

1. Πηγή Ενέργειας ή “Φωτισμού” (A)

Η πρώτη προϋπόθεση στην Τηλεπισκόπηση είναι η ύπαρξη μιας πηγής ακτινοβολίας που “φωτίζει” ή παρέχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στον υπό εξεταζόμενο στόχο.

2. Ακτινοβολία και Ατμόσφαιρα (B)

Η ακτινοβολία “ταξιδεύει” από την πηγή στον στόχο και έρχεται σε επαφή και αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα. Αυτή η αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα και δεύτερη φορά όταν η ακτινοβολία “οδεύει” από τον στόχο στον αισθητήρα.

3. Αλληλεπίδραση με τον στόχο (C)

Όταν η ακτινοβολία φθάσει στον στόχο διαμέσου της ατμόσφαιρας, αλληλεπιδρά με αυτόν με τέτοιον τρόπο που εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες της ακτινοβολίας όσο και του στόχου.

4. Καταγραφή της ακτινοβολίας από τον αισθητήρα (D)

Μετά την ανάκλαση της ακτινοβολίας ή την εκπομπή από τον στόχο, ο αισθητήρας συλλέγει και καταγράφει τα χαρακτηριστικά της.

5. Εκπομπή, Συλλογή και Επεξεργασία (E)

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία έχει καταγραφεί από τον αισθητήρα, συχνά πρέπει να μεταδοθεί σε ηλεκτρονική μορφή σε ένα σταθμό συλλογής και επεξεργασίας όπου τα δεδομένα επεξεργάζονται και διαμορφώνονται σε μια εικόνα.

6. Ερμηνεία και Ανάλυση (F)

Η επεξεργασμένη εικόνα ερμηνεύεται με κατάλληλο τρόπο οπτικά ή και ψηφιακά ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για τον υπό εξεταζόμενο στόχο.

7. Εφαρμογές (G)

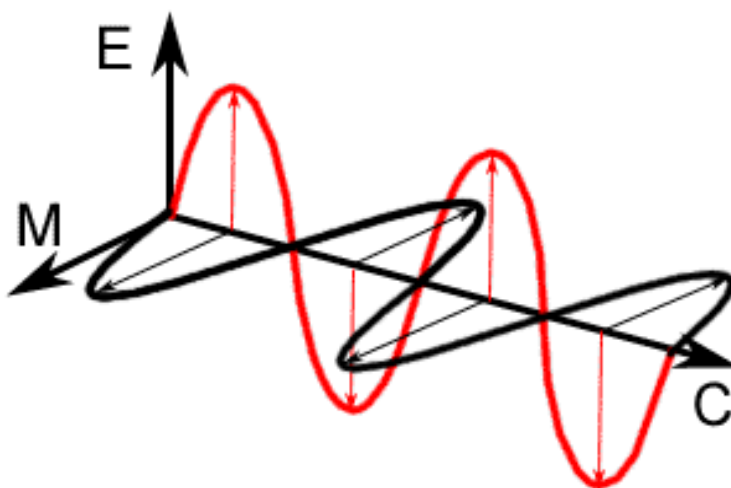
Το τελικό στάδιο επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση των εξαγομένων πληροφοριών, από την επεξεργασμένη εικόνα, για τον στόχο, ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητός και να εξαχθούν συμπεράσματα ή να επιλυθεί κάποιο πρόβλημα.

2.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Όπως προαναφέρθηκε η πρώτη προϋπόθεση για την Τηλεπισκόπηση είναι η ύπαρξη μιας πηγής ενέργειας ώστε να “φωτίζει” τον στόχο. Αυτή η ενέργεια είναι σε μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με το μήκος κύματος ή σύμφωνα με τη συχνότητα ή την ενέργεια ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συνήθως εκτείνεται μεταξύ των κοσμικών ακτίνων και των ραδιοκυμάτων.

Για την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης, το πιο σημαντικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι εκείνο που δημιουργείται από την ακτινοβολία του Ήλιου καθώς και ένα τμήμα, το οποίο χρησιμοποιούν τα Radar παράγοντας τεχνητή ακτινοβολία.

Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας θεωρεί ότι η ενέργεια μεταδίδεται με τη μορφή ενός αρμονικού ημιτονοειδούς κύματος. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο E , που αντιπροσωπεύει της ηλεκτρικές μεταβολές και το οποίο μεταβάλλεται εγκάρσια προς τη διεύθυνση διάδοσης του (Σχήμα 2.2). Επιπλέον, υπάρχει και ένα μαγνητικό πεδίο M , που είναι αλληλένδετο με το προηγούμενο αλλά είναι προσανατολισμένο κάθετα προς το ηλεκτρικό πεδίο και διαδίδεται με την ίδια φάση. Τα δύο πεδία ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός c .

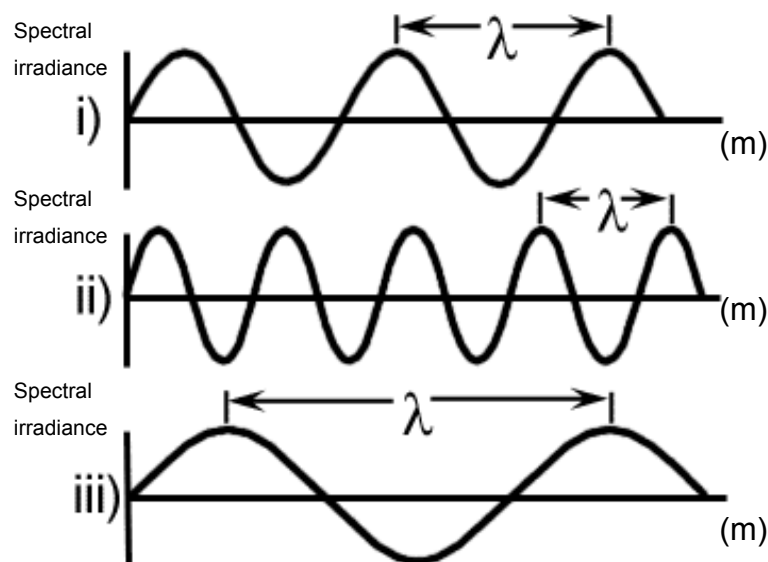


Σχήμα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης στον χώρο.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, όπως και κάθε αρμονικό κύμα, εμφανίζει τρία χαρακτηριστικά:

α. Μήκος Κύματος

Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του αρμονικού κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Διάφορα μήκη κυμάτων.

Το μήκος κύματος συμβολίζεται συνήθως με το ελληνικό γράμμα λάμδα (λ) και μετρείται σε μονάδες μήκους. Για την Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται συνήθως οι ακόλουθες μονάδες (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1 Διάφορες μονάδες μηκών κυμάτων.

| Μονάδα | Απόσταση |
|-------------------------|--------------|
| Χιλιόμετρο (km) | 1000 m |
| Μέτρο (m) | 1 m |
| Εκατοστό (cm) | 0,01 m |
| Χιλιοστό (mm) | 0,001 m |
| Μικρό (μm) | 10^{-6} m |
| Nanometer (nm) | 10^{-9} m |
| Angstrom (A) | 10^{-10} m |

β. Συχνότητα

Μετρείται ως ο αριθμός των κορυφών του αρμονικού κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που διέρχονται από συγκεκριμένο σταθερό σημείο στη μονάδα του χρόνου.

Η συχνότητα συμβολίζεται με το γράμμα ν και μετρείται σε Hertz (Hz), που ισοδυναμεί με ένα κύκλο (cycle) ανά δευτερόλεπτο (second) και σε πολλαπλάσια του Hertz.

Πίνακας 2.2 Διάφορες μονάδες συχνοτήτων κυμάτων.

| Μονάδα | Συχνότητα |
|-----------------|-----------|
| Hertz (Hz) | 1Hz |
| Kilohertz (KHz) | 1000 Hz |
| Megahertz (MHz) | 10^6 Hz |
| Gigahertz (GHz) | 10^9 Hz |

γ. Πλάτος

Ισοδυναμεί με το ύψος της κάθε κορυφής του αρμονικού κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το πλάτος συνήθως μετρείται σε επίπεδα ενέργειας (spectral irradiance).

Η ταχύτητα διάδοσης c της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι σταθερή στον κενό χώρο και ίση περίπου με $3 \cdot 10^8$ m / s (299.893 km / s). Η συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ συνδέονται με την ακόλουθη σχέση :

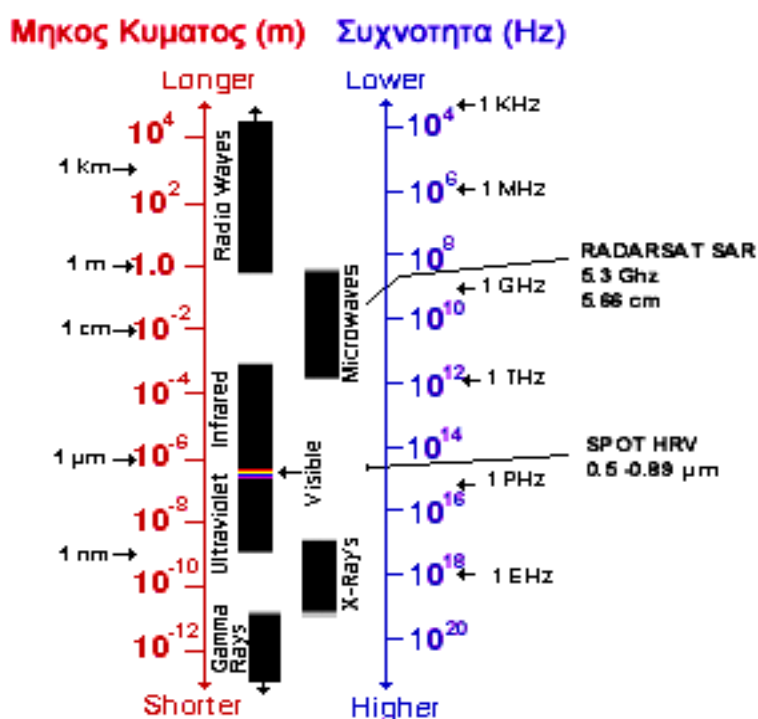
$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μπορούν να καθορισθούν χρησιμοποιώντας ή τη συχνότητα ν ή το μήκος κύματος λ .

2.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ως ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ορίζεται ολόκληρο το εύρος των μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Σχήμα 2.4) αποτελείται από φασματικές ζώνες που ορίζονται από καθορισμένες περιοχές διαστημάτων μηκών κύματος.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από τα βραχέα κύματα (συμπεριλαμβανομένου ακτίνες γ και ακτίνες χ) στα μεγάλα μήκους κύματα (συμπεριλαμβανομένου μικροκύματα και τα ραδιοκύματα). Υπάρχουν αρκετές φασματικές ζώνες που είναι χρήσιμες στην Τηλεπισκόπηση και παρατίθενται παρακάτω.



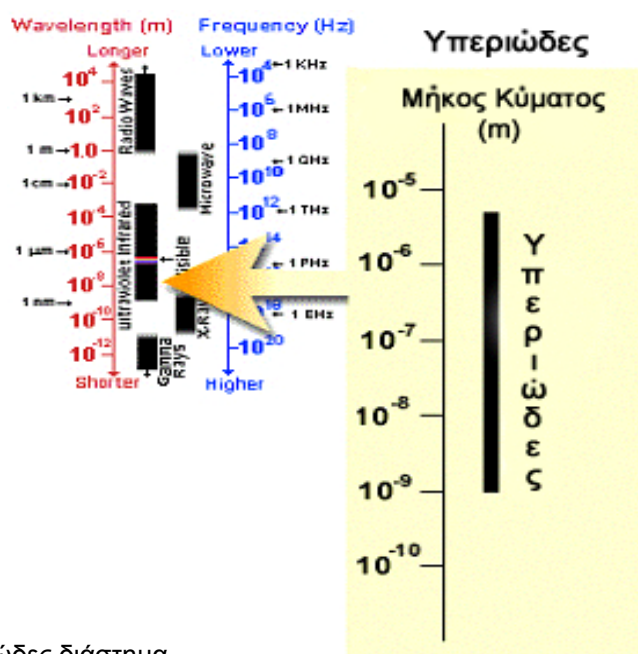
Σχήμα 2.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

- Υπεριώδης Ακτινοβολία

Για πολλούς πρακτικούς λόγους, η χρήσιμη ακτινοβολία στην Τηλεπισκόπηση εκτείνεται από την περιοχή του υπεριώδους (Ultraviolet), μια ζώνη ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που βρίσκεται μεταξύ της περιοχής των ακτίνων Χ (X-Rays) και του ορίου από όπου αρχίζει η ανθρώπινη όραση (Visible), (Σχήμα 2.5). Η υπεριώδης ζώνη εκτείνεται από 3 nm έως 0,4 μm. Εντούτοις, η ατμόσφαιρα επιτρέπει διάδοση μόνο σε μήκη κύματος από 0,3 μm έως 0,4 μm.

Η περιοχή αυτή του φάσματος είναι γνωστή ως φωτογραφική υπεριώδης ζώνη. Φωτογραφίες στην υπεριώδη περιοχή είναι δυνατόν να ληφθούν αν χρησιμοποιηθούν ειδικά φιλμ (π.χ. Kodak Plus-X Aerographic film 2402) και ειδικά φίλτρα (π.χ. Kodak Wratten 18A filter).

Οι περισσότεροι φακοί των φωτομηχανών απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία για μήκη κύματος μικρότερα των 0,35 μm . Εντούτοις, ειδικοί φακοί χαλαζία επιτρέπουν τη διάδοση της υπεριώδους με μικρότερα μήκη κύματος. Όλες οι εικόνες σε υπεριώδη καταγραφή έχουν χαμηλή αντίθεση εικόνας και μικρή διαχωριστική ικανότητα λόγω της ισχυρής ατμοσφαιρικής σκέδασης. Κατά συνέπεια οι καταγραφές στην υπεριώδη ζώνη σπάνια εφαρμόζονται εκτός ειδικών περιπτώσεων που αφορούν ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων στη θάλασσα.

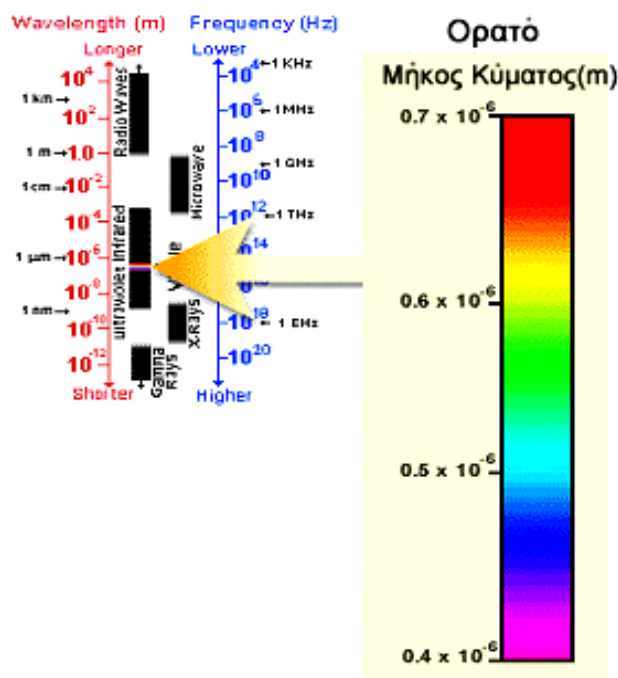


Σχήμα 2.5 Υπεριώδες διάστημα.

- Ορατό Φάσμα

Το ορατό φάσμα εκτείνεται μεταξύ του διαστήματος από 0,4 έως 0,7 μm . Μολονότι το ορατό φάσμα αποτελεί ένα πολύ μικρό τμήμα του φάσματος (Σχήμα 2.6), έχει μεγάλη σημασία στην Τηλεπισκόπηση. Τα όρια του ορατού φωτός καθορίζονται από την ευαισθησία του συστήματος της ανθρώπινης όρασης. Ο ανθρώπινος οφθαλμός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι $\lambda = 0,555 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ενώ η

ευαισθησία αυτή ελαττώνεται προς το μέρος των μακρύτερων και βραχύτερων κυμάτων.



Σχήμα 2.6 Ορατή φασματική ζώνη.

Η ορατή ακτινοβολία υποδιαιρείται σε τρία βασικά χρώματα που ονομάζονται πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα (additive primaries) και εκτείνονται προσεγγιστικά από 0,4 μ m έως 0,5 μ m (μπλε), 0,5 μ m έως 0,6 μ m (πράσινο) και από 0,6 μ m μέχρι 0,7 μ m (ερυθρό).

Πίνακας 2.3 Μήκη κυμάτων **αθροιστικών** χρωμάτων.

| Χρώμα | Μήκος κύματος |
|----------------|------------------------|
| Βιολετί | 0,400 – 0,446 μ m |
| Μπλε | 0,446 – 0,500 μ m |
| Πράσινο | 0,500 – 0,578 μ m |
| Κίτρινο | 0,578 – 0,592 μ m |
| Πορτοκαλί | 0,592 – 0,620 μ m |
| Ερυθρό | 0,620 – 0,700 μ m. |

Ονομάζονται πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα επειδή κανένα πρωτεύον χρώμα δεν μπορεί να παραχθεί από σύνθεση δύο άλλων. Όλα τα υπόλοιπα χρώματα μπορούν να παραχθούν από σύνθεση των τριών πρωτευόντων χρωμάτων με κατάλληλη αναλογία.

Το χρώμα στο φιλμ της συμβατικής έγχρωμης φωτογραφίας, στις χρωστικές ουσίες και στις βαφές δημιουργείται από συνδυασμό τριών αφαιρετικών πρωτευόντων χρωμάτων (subtractive primaries) (κίτρινο, κυανό, βιολετί). Κάθε ένα από τα αφαιρετικά πρωτεύοντα χρώματα απορροφά το ένα τρίτο από τα αθροιστικά χρώματα στο ορατό φάσμα.

Τα πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα αφορούν εκπεμπόμενη ενέργεια, ενώ τα αφαιρετικά χρώματα αναφέρονται σε ανακλώμενη ενέργεια και καθορίζουν χρώματα χρωστικών ουσιών και βαφών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή φιλμ, φωτογραφιών και άλλων εικόνων.

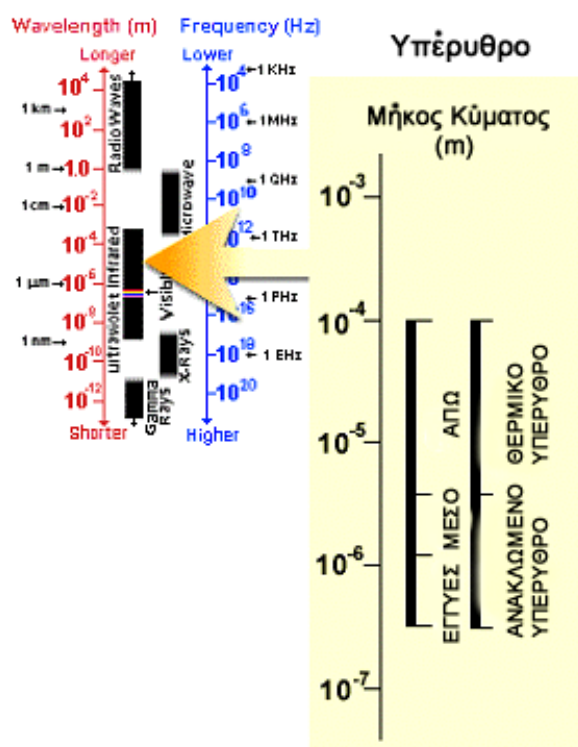
- Υπέρυθρος Ακτινοβολία

Μήκη κύματος μεγαλύτερα από εκείνα του ερυθρού τμήματος του ορατού φωτός ορίζουν την περιοχή της θερμικής ακτινοβολίας που εκτείνεται από 0,7 μm έως 300 μm . Οι όροι εγγύς, μέσο και άπω υπέρυθρο συνήθως χρησιμοποιούνται για την υποδιαίρεση της περιοχής του υπέρυθρου σε τρεις ζώνες, αν και τα όρια τους δεν είναι πλήρως καθορισμένα. Το εύρος του υπεριώδους είναι σχετικά μεγάλο σε σύγκριση με το ορατό, καθώς για την Τηλεπισκόπηση εκτείνεται από 0,72 μm έως 15 μm (40 φορές μεγαλύτερο από την ορατή ζώνη). Εξαιτίας αυτού του μεγάλου εύρους μηκών κύματος που περιέχει, η υπεριώδης ακτινοβολία εμφανίζει ποικίλες ιδιότητες.

Η πρώτη περιοχή του υπέρυθρου εκτείνεται από 0,7 μm έως 3 μm και αφορά στην εγγύς και μέση υπέρυθρη ακτινοβολία (Σχήμα 2.7). Στην περιοχή αυτή συμπεριλαμβάνεται και το φωτογραφικό υπέρυθρο (0,7 μm έως 0,9 μm), που χρησιμοποιείται στις υπέρυθρες φωτογραφίες.

Η περιοχή αυτή της ακτινοβολίας είναι εκείνη που εκπέμπεται από τον ήλιο και ανακλάται από τη γήινη επιφάνεια (ανακλώμενο υπέρυθρο). Η ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο συμπεριφέρεται με τρόπο ανάλογο με το ορατό φάσμα. Συνεπώς, οι εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν εικόνες στο εγγύς υπέρυθρο έχουν φίλτρα, φιλμ και

φωτογραφικές μηχανές με χαρακτηριστικά που είναι παρόμοια με εκείνα της συμβατικής φωτογραφίας με καταγραφές στο ορατό.

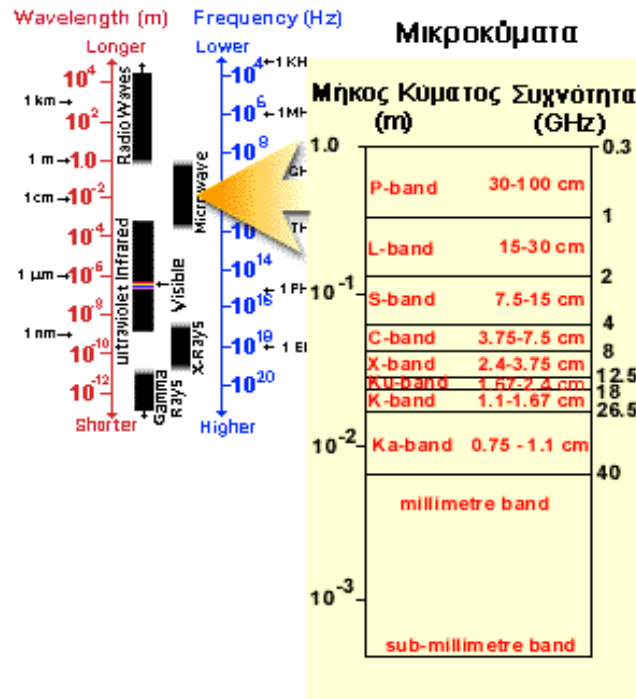


Σχήμα 2.7 Υπέρυθρο διάστημα.

Η δεύτερη κατηγορία της υπέρυθρης ακτινοβολίας αποτελείται από την άπω υπέρυθρη ζώνη, που συνιστάται από μήκη κύματος πέραν του ορατού, εκτεινόμενη από 3 μm έως 14 μm αλλά και σε περιοχές που αγγίζουν τα μικροκύματα (1 mm). Αυτή η ακτινοβολία είναι ουσιαστικά διαφορετική από της ορατής και του ανακλώμενου υπέρυθρου. Το άπω υπέρυθρο είναι εκείνο το τμήμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη γη και ουσιαστικά αποτελεί τη θερμική ενέργεια. Για τον λόγο αυτό ονομάζεται επίσης θερμικό υπέρυθρο.

- Μικροκυματική Ακτινοβολία

Η μικροκυματική ακτινοβολία εκτείνεται από 1 mm έως 1 m (Σχήμα 2.8) και χρησιμοποιείται από τα ενεργά εικονοληπτικά συστήματα Radar όπου και θα γίνει εκτενέστερη περιγραφή στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 2.8 Διάστημα μικροκυμάτων.

2.4 Αλληλεπιδράσεις με την ατμόσφαιρα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πριν φτάσει στην επιφάνεια της γης διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα της γης. Αιωρούμενα σωματίδια και μεγάλα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων στην ατμόσφαιρα μπορούν να την επηρεάσουν με τους μηχανισμούς της σκέδασης και της απορρόφησης.

2.4.1 Σκέδαση

Η σκέδαση (scattering) λαμβάνει χώρα όταν σωματίδια ή μεγάλα μόρια αερίων προκαλούν την διασκόρπιση της με συνέπεια μέρος της ηλιακής δέσμης, να επιστρέψει στο διάστημα και να μην εισέλθει και προσπέσει στην επιφάνεια της γης.

Το ποσοστό της σκέδασης που επέρχεται εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, την αφθονία των σωματιδίων ή των μεγάλων μορίων των αερίων, το πάχος της ατμόσφαιρας από την οποία διέρχεται η ακτινοβολία.

Υπάρχουν τρία είδη σκέδασης που αφορούν στην Τηλεπισκόπηση και είναι:

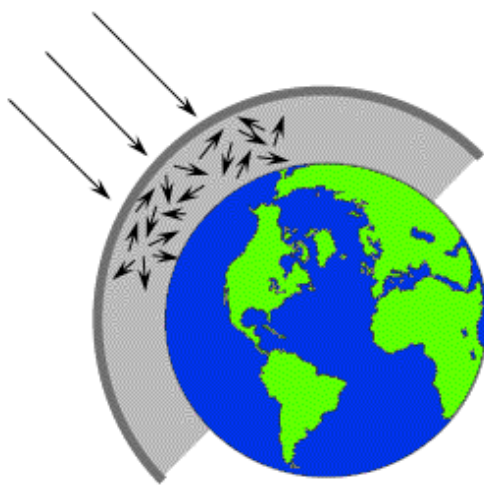
- **Σκέδαση Rayleigh**

Η σκέδαση Rayleigh πήρε το όνομα της από τον O. Rayleigh ο οποίος στο τέλος της δεκαετίας του 1890 έδειξε ότι σε μια τέλεια, καθαρή ατμόσφαιρα

αποτελούμενη μόνο από ατμοσφαιρικά αέρια, προκαλείται σκέδαση του φωτός με τρόπο τέτοιο ώστε το ποσοστό της σκέδασης να είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Η σκέδαση Rayleigh απαντάται όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν διάμετρο d πολύ μικρότερη του μήκους κύματος (λ) της ακτινοβολίας. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να είναι μικρά ψήγματα σκόνης ή μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων, όπως άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2). Τα σωματίδια αυτά έχουν διαμέτρους πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος της ορατής ή της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Η σκέδαση Rayleigh εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας δηλαδή μεταβάλλεται σε διαφορετικές περιοχές του φάσματος. Ο νόμος της σκέδασης του Rayleigh δηλώνει ότι το ποσοστό της σκέδασης (%) είναι αντιστρόφως ανάλογο της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος λ :

$$\text{Σκέδαση Rayleigh} \propto 1 / \lambda^4 \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.9 Σκέδαση Rayleigh.

- **Σκέδαση Mie**

Η σκέδαση Mie προκαλείται από τα μεγαλύτερα σωματίδια της ατμόσφαιρας συμπεριλαμβανομένων της σκόνης, του καπνού, της αιθαλομίχλης και των σταγονιδίων νερού. Σωματίδια που προκαλούν τη σκέδαση Mie έχουν διαμέτρους d που είναι περίπου ίσες με το μήκος κύματος λ της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Η σκέδαση Mie μπορεί να επηρεάσει

μεγάλο εύρος μηκών κύματος στην περιοχή του ορατού ή και κοντά στο ορατό. Τα αποτελέσματα της εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, αλλά όχι με τον απλό τρόπο όπως η σκέδαση Rayleigh της εξίσωσης (2.2). Η σκέδαση Mie τείνει να είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (0-5 km), όπου τα μεγαλύτερα σωματίδια αφθονούν.

- **Μη - επιλεκτική σκέδαση**

Η μη επιλεκτική σκέδαση προκαλείται από σωματίδια όπως των συννέφων, της ομίχλης κλπ., που είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Για ακτινοβολία στο ορατό και στο εγγύς του ορατού, τέτοια σωματίδια μπορεί να είναι μεγαλύτερα από σταγονίδια νερού ή μεγάλα σωματίδια της αιωρούμενης σκόνης.

Μη επιλεκτική σκέδαση σημαίνει ότι η σκέδαση δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας και όλα τα μήκη κύματος σκεδάζονται ομοιόμορφα. Έτσι όταν επέλθει τέτοια σκέδαση, παρατηρείται μια λευκόχρους ή γκριζωπή αχλύς, επειδή όλα τα μήκη κύματος σκεδάζονται ομοιόμορφα στην ορατή περιοχή του ορατού φάσματος.



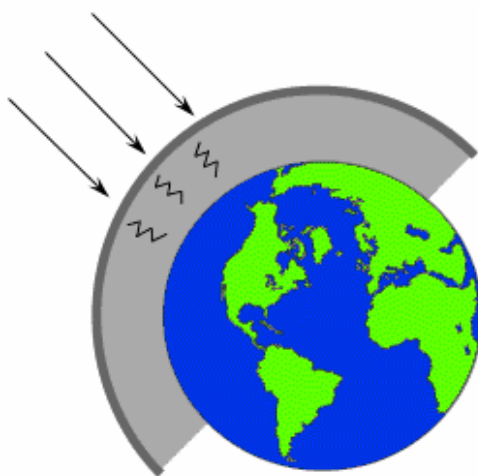
Σχήμα 2.10 Σκέδαση Mie.

2.4.2 Απορρόφηση

Οι πιο σημαντικοί απορροφητές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι το όζον (O_3), το οξυγόνο (O_2), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Το όζον που συγκεντρώνεται σε ύψη 20-30 km στη στρατόσφαιρα είναι ο κύριος απορροφητής της υπεριώδους

ακτινοβολίας σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,24 μm . Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) απορροφά το μέσο και άπω υπέρυθρο. Η μεγαλύτερη όμως απορρόφηση επέρχεται στη φασματική ζώνη που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 13 μm έως 17,5 μm (άπω υπέρυθρο).

Τέλος η ατμοσφαιρική υγρασία (H_2O) με τη μορφή υδρατμών συγκρατεί ένα μεγάλο ποσοστό (μέχρι 80%) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις φασματικές ζώνες που εκτείνονται από 5,5 μm έως 7 μm και πέραν των 27 μm .



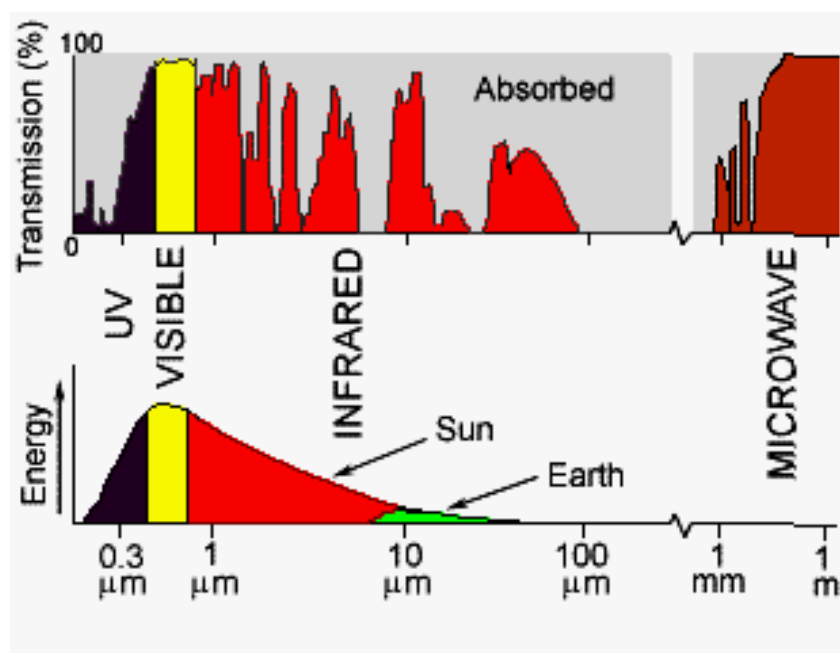
Σχήμα 2.11 Απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Συμπερασματικά, η ατμόσφαιρα επιλεκτικά επιτρέπει τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος αυτά στα οποία επιτρέπεται η διέλευση μέσω της ατμόσφαιρας ονομάζονται δίοδοι ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (atmospheric windows).

Η θέση, η έκταση και η αποτελεσματικότητα των ατμοσφαιρικών διόδων καθορίζεται από τα φασματικά χαρακτηριστικά απορρόφησης των ατμοσφαιρικών αερίων. Οι δίοδοι της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας έχουν σημασία στην Τηλεπισκόπηση διότι ορίζουν τα συγκεκριμένα μήκη κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχηματισμό εικόνων.

Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε μήκη κύματος που δεν αντιστοιχούν στις διόδους ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας εξασθενεί σημαντικά από την ατμόσφαιρα και συνεπώς δεν είναι αποτελεσματική στις καταγραφές εικόνων

με συνέπεια τα αντίστοιχα μήκη κύματος να μην χρησιμοποιούνται για καταγραφές.



Σχήμα 2.12 Οι δίοδοι ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

2.5 Αλληλεπιδράσεις με επιφάνειες

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δεν απορροφάται ή δεν σκεδάζεται στην ατμόσφαιρα φθάνει και αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της γης. Υπάρχουν τρεις τύποι αλληλεπίδρασης που λαμβάνουν χώρα όταν η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια και τα ποσοστά ενέργειας που αντιστοιχούν σε αυτές εξαρτώνται από τη φύση της επιφανείας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτές είναι η απορρόφηση (absorption (A)), η διάδοση (transmission (T)) και η ανάκλαση (reflection (R)), (Σχήμα 2.13).

Απορρόφηση (A) λαμβάνει χώρα όταν η ακτινοβολία απορροφάται από τον στόχο ενώ διάδοση (T) όταν η ακτινοβολία διέρχεται διαμέσου αυτού. Τέλος ανάκλαση (R) συντελείται όταν η ακτινοβολία αλλάξει διεύθυνση αφού προσπέσει στην επιφάνεια. Η ανάκλαση χρησιμοποιείται από την Τηλεπισκόπηση κυρίως για την καταγραφή της ορατής ή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία των δεκτών εξαρτάται από την ακτινοβολία που προέρχεται από τον Ήλιο. Καταγραφή ανακλώμενης

ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί όχι μόνο με τη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και ακτινοβολίας από συσκευές, όπως τα Radar ή το flash κάποιας φωτομηχανής.



Σχήμα 2.13 Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας σε φύλλωμα δένδρου.

2.5.1 Ανάκλαση

Ανάκλαση λαμβάνει χώρα όταν μια ακτίνα φωτός αλλάζει διεύθυνση, αφού προσπέσει σε επιφάνεια. Η φύση της ανάκλασης εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αν η επιφάνεια είναι ομαλή σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε δημιουργείται κατοπτρική ανάκλαση. Η κατοπτρική ανάκλαση επιστρέφει όλη ή μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Η γωνία πρόσπτωσης είναι τότε ίση με την γωνία ανάκλασης. Στο ορατό φάσμα κατοπτρική ανάκλαση εμφανίζεται σε λείες επιφάνειες όπως κάτοπτρα, ήρεμες υδάτινες επιφάνειες, μεταλλικές επιφάνειες κλπ.

Αν η επιφάνεια είναι τραχεία σχετικά με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τότε μπορεί να επέλθει διάχυση ή ισότροπη ανάκλαση. Στη διάχυση του φωτός η ενέργεια διασκορπίζεται ισότροπα προς όλες τις διευθύνσεις. Η επιφάνεια που δημιουργεί μια τέτοιου είδους ανάκλαση ονομάζεται επιφάνεια του Lambert, επειδή επινοήθηκε από τον Lambert ως πειραματική ιδανική επιφάνεια για την περιγραφή της διάχυσης και της οπτικής συμπεριφοράς πολλών επιφανειών καθώς και για τη μέτρηση της έντασης του φωτός.

Ο όρος albedo ορίζεται ως ο λόγος του ποσού της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα σώμα προς το ποσό της

προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) και μπορεί να αναφέρεται σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ή μόνο στην ορατή φασματική ζώνη.

2.5.2 Διαπερατότητα

Μετάδοση της ακτινοβολίας πραγματοποιείται εφόσον η ακτινοβολία διέρχεται από συγκεκριμένο μέσο χωρίς σημαντική εξασθένηση. Για ένα ορισμένο πάχος υλικού, όπως η ατμόσφαιρα ή η θάλασσα, η ικανότητα του υλικού να μεταδίδει ακτινοβολία μετρείται με τον συντελεστή διαπερατότητας τ , που εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\tau = \Phi / \Phi_0 \quad (2.3)$$

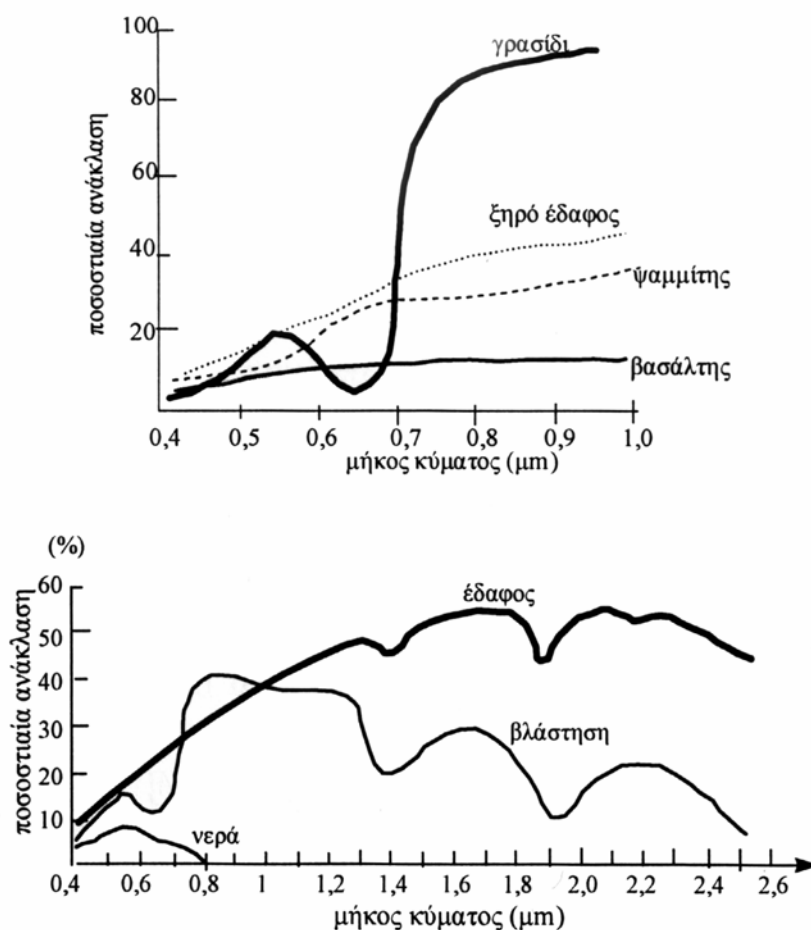
όπου Φ είναι η ισχύς της ακτινοβολίας που διέρχεται από το μέσο και Φ_0 η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει. Η διαπερατότητα τ πολλών υλικών μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα τα φυλλώματα των δέντρων είναι αδιαφανή στην ορατή ακτινοβολία, ενώ επιτρέπουν μετάδοση της ακτινοβολίας -είναι διαφανή- σε σημαντική αναλογία στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Γενικά, όταν ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, τότε χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι όροι για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του.

1. *Συντελεστής Απορρόφησης (α)*. Ορίζεται ως ο λόγος της απορροφώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.
2. *Συντελεστής Ανάκλασης (ρ)*. Ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.
3. *Συντελεστής Διαπερατότητας (τ)*. Ορίζεται ως ο λόγος της διαδιδόμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

2.6 Φασματικές ιδιότητες των αντικειμένων

Κάθε υλικό παρουσιάζει ξεχωριστή κατανομή της ανακλώμενης, εκπνευπόμενης ή απορροφώμενης ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος κύματος λ . Μελέτη της φασματικής αυτής απόκρισης επιτρέπει τη διάκριση ενός αντικειμένου από κάποιο άλλο ή την αξιολόγηση της πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ή χημικές ιδιότητες των αντικειμένων ή φαινομένων. Η μορφή της καμπύλης της φασματικής

απόκρισης ενός αντικειμένου ή φαινομένου σε σχέση με το μήκος κύματος λ ονομάζεται φασματική ταυτότητα ή φασματική υπογραφή (spectral signature) του αντικειμένου ή του φαινομένου, και είναι μοναδική για κάθε αντικείμενο. Το Σχήμα 2.14 παρουσιάζει τις φασματικές ταυτότητες ορισμένων υλικών.



Σχήμα 2.14 Φασματικές ταυτότητες ορισμένων υλικών.

2.7 Βασικές Σχέσεις της ακτινοβολίας

Ενέργεια ακτινοβολίας Q

Η ακτινοβολούμενη ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που μεταφέρεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι ένα μέτρο της ικανότητας της ακτινοβολίας να παράγει φυσικό έργο μετακινώντας κάτι με μια δύναμη, θερμαίνοντας ένα αντικείμενο, ή προκαλώντας μια μεταβολή στην κατάσταση ενός υλικού. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια προκαλεί σε ευαίσθητα στοιχεία των δεκτών (ανιχνευτές) τέτοιες φυσικές μεταβολές ώστε αυτές να αποτελούν

ενδείξεις για την ύπαρξη της. Η μονάδα μέτρησης της ακτινοβολούμενης ενέργειας είναι το [joule,J].

Ροή ακτινοβολίας Φ

Η ακτινοβολούμενη ροή Φ (radiant flux, power), ή ισχύς, είναι ο ρυθμός μεταβολής της ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά δευτερόλεπτο [second, s] καθώς διέρχεται από μία επιφάνεια στον χώρο :

$$\Phi = dQ / dt \text{ σε } [J / s] = [W] \quad (2.4)$$

Η μονάδα της ροής Φ είναι το [watt] = [joule / second]. Για την Τηλεπισκόπηση η ροή Φ της ακτινοβολίας μπορεί να εκφράζεται και ως ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτουν σε έναν ανιχνευτή. Επίσης η ροή μπορεί να εκφράζεται ως ο ρυθμός μεταβολής ενός τμήματος του ορατού φάσματος, οπότε αναφέρεται σε φωτεινή ροή. Όταν η ροή Φ είναι σταθερή, τότε η ολική ηλεκτρομαγνητική ενέργεια Q σε [joule] που διέρχεται σε χρόνο t σε [second] θα είναι :

$$Q = \Phi \cdot t \quad (2.5)$$

Όταν η ροή $\Phi(t)$ σε [watt] μεταβάλλεται από τον χρόνο t_1 στον χρόνο t_2 , τότε η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια Q σε [joule] δίνεται από το ολοκλήρωμα :

$$Q = \int \Phi(t) dt \quad (2.6)$$

Πυκνότητα ροής E ή M της ακτινοβολίας

Όταν η ροή ακτινοβολίας Φ σε [watt] αποκόπτεται από μία επίπεδη επιφάνεια A , τότε είναι συχνά αναγκαίο να είναι γνωστό το ποσό της ροής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας σε $[W / m^2]$. Η ροή Φ που αποκόπτεται από κάποια επιφάνεια θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι απαρτίζεται από άπειρα μικρά τμήματα ροής $d\Phi$ που αποκόπτονται από απειροστά τμήματα dA της επιφάνειας.

Ο λόγος ($d\Phi / dA$) της ροής ακτινοβολίας ως προς την απειροστή αυτή επιφάνεια ορίζεται ως η πυκνότητα ροής E της ακτινοβολίας σε κάθε σημείο της επιφάνειας :

$$E = d\Phi / dA \text{ σε } [W / m^2] \quad (2.7)$$

Η πυκνότητα ροής μπορεί να αναφέρεται σε ακτινοβολία όταν προσπίπτει σε μια επιφάνεια ή όταν εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια. Στην περίπτωση της πρόσπτωσης η πυκνότητα ροής συμβολίζεται με E και μετρείται σε $[W / m^2]$. Αντίθετα η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια ονομάζεται αφετική ικανότητα (radiant exitance), συμβολίζεται με M και μετρείται επίσης σε $[W / m^2]$.

Στερεά γωνία Ω

Ως στερεά γωνία Ω ορίζεται το σύνολο των ακτίνων που συνδέουν ορισμένο σημείο O του χώρου προς όλα τα σημεία της περιμέτρου τυχούσας σφαιρικής επιφάνειας A (Σχήμα 2.15). Το εμβαδόν της επιφάνειας A σε $[m^2]$ είναι ανάλογο της στερεάς γωνίας Ω και ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης r , δηλαδή :

$$A = \Omega \cdot r^2 \quad (2.8)$$

Άρα η στερεά γωνία Ω είναι :

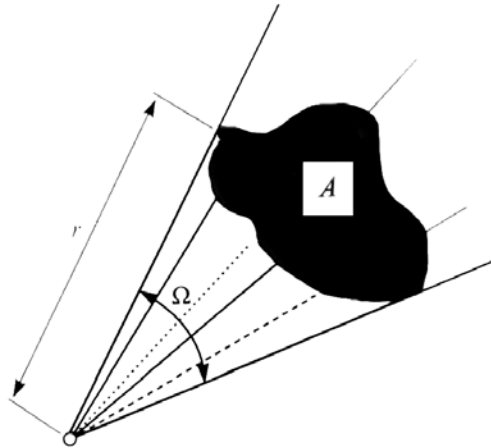
$$\Omega = A / r^2 \text{ σε [sterad]} \quad (2.9)$$

που δεν είναι τίποτα άλλο από το πηλίκο του εμβαδού A , το οποίο αποκόπτεται από την επιφάνεια της σφαίρας, δια του τετραγώνου της ακτίνας r . Μονάδα μέτρησης της στερεάς γωνίας Ω είναι το στερεακτίνιο [sterad ή sr], το οποίο είναι αδιάστατο μέγεθος.

Δηλαδή, το 1 στερεακτίνιο [sr] είναι η στερεά γωνία που έχει κορυφή το κέντρο μιας σφαίρας με ακτίνα ίση με τη μονάδα μήκους και βαίνει σε τμήμα της σφαιρικής αυτής επιφάνειας το οποίο έχει εμβαδό ίσο με τη μονάδα της επιφάνειας.

Η παραπάνω εξίσωση (2.8) ισχύει μόνο για σφαιρικές επιφάνειες, αλλά κατά κανόνα, αν $r^2 \gg A$, τότε η επιφάνεια μιας μη σφαιρικής επιφάνειας προσεγγίζεται από μία σφαιρική.

Επειδή το εμβαδό μιας σφαιρικής επιφάνειας είναι $4\pi r^2$, η στερεά γωνία που αντιστοιχεί ολόκληρη τη σφαίρα είναι 4π [sr]. Για το ημισφαίριο η στερεά γωνία που αντιστοιχεί είναι 2π [sr].



Σχήμα 2.15 Ο ορισμός της στερεάς γωνίας.

Ένταση I της ακτινοβολίας

Η ένταση I της ακτινοβολίας μιας σημειακής πηγής σε μια ορισμένη διεύθυνση είναι η ακτινοβολούμενη ροή Φ ανά μονάδα στερεάς γωνίας Ω :

$$I = d\Phi / d\Omega \text{ σε } [W / sr] \quad (2.10)$$

Η μονάδα της ακτινοβολούμενης έντασης είναι το $[W / sr]$. Αν μια πηγή είναι ισότροπος (δηλαδή, ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις διευθύνσεις) τότε η ένταση I της ακτινοβολίας, σε $[W/sr]$, ισότροπης πηγής που εκπέμπει ροή Φ σε $[W]$, λόγω του ότι η επιφάνεια της σφαίρας αντιστοιχεί σε στερεά γωνία 4π $[sr]$, θα είναι :

$$I = \Phi / 4\pi \text{ σε } [W / sr] \quad (2.11)$$

Ο λογικός και μαθηματικός συνδυασμός των παραπάνω βασικών σχέσεων της ακτινοβολίας επιτρέπει τον ορισμό μιας χρήσιμης σχέσης της **Ακτινοβολίας** (radiance) L η οποία χρησιμοποιείται συχνά στην Τηλεπισκόπηση επειδή μεγάλο τμήμα της ασχολείται με τη ροή ακτινοβολίας που εκπέμπεται από κάποια περιοχή και φθάνει στον ανιχνευτή.

Ως ακτινοβολία L ορίζεται το πηλίκο της ροής Φ ανά μονάδα επιφάνειας και στερεάς γωνίας Ω , για επιφάνεια όμως κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσής της :

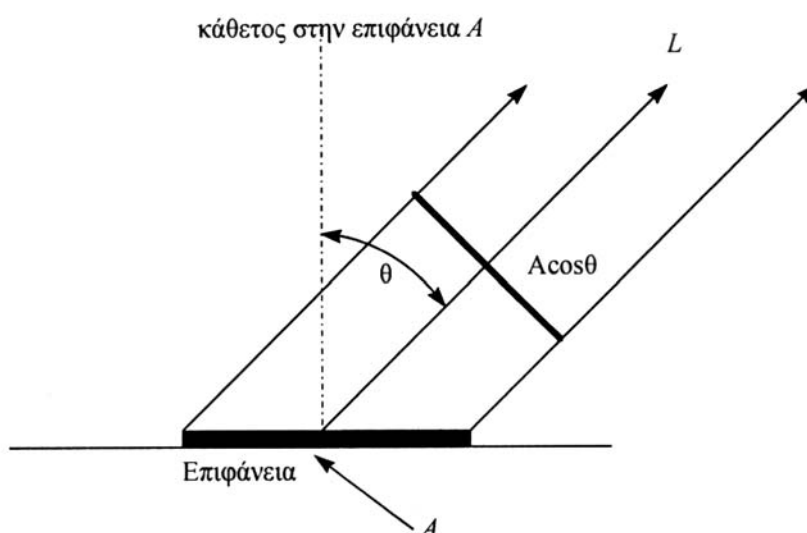
$$L = d\Phi / (d\Omega \cdot dA) \text{ σε } [W / (m^2 \cdot sr)] \quad (2.12)$$

Η έννοια της ακτινοβολίας αντιστοιχεί κατά κάποιο τρόπο στην έννοια του φωτισμού.

Η επιφάνεια της πηγής, εμβαδού A , κάθετη ως προς τη διεύθυνση διάδοσης η οποία σχηματίζει μία γωνία θ με την κάθετο, έχει εμβαδό $A \cos \theta$ (Σχήμα 2.16). Αν το τμήμα της επιφάνειας της πηγής θεωρηθεί σημειακό, τότε η ένταση I της ακτινοβολίας σε $[W/sr]$ κατά τη διεύθυνση διάδοσης θ θα είναι :

$$I = L \cdot (A \cdot \cos \theta) \quad (2.13)$$

Η πηγή η οποία δεν μεταβάλλει την τιμή της ακτινοβολίας L σε $[W / (m^2 \cdot sr)]$ ως συνάρτηση της γωνίας θ ονομάζεται πηγή Lambert.



Σχήμα 2.16 Ο ορισμός της ακτινοβολίας.

2.8 Παθητικά και Ενεργά εικονοληπτικά συστήματα

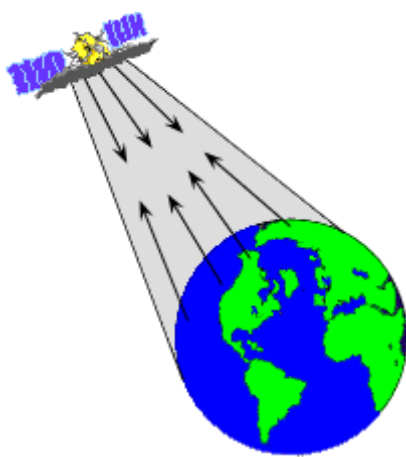
Τα εικονοληπτικά συστήματα Τηλεπισκόπησης διαχωρίζονται σε παθητικά και ενεργά. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στην φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τα εικονοληπτικά συστήματα.

Έτσι τα συστήματα που μετράνε την ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο ανακλώμενη στην επιφάνεια της γης στο ορατό φάσμα ή την ακτινοβολία που απορροφάται από την επιφάνεια της γης και επανεκπέμπεται στο υπέρυθρο φάσμα, ονομάζονται **παθητικά συστήματα**.

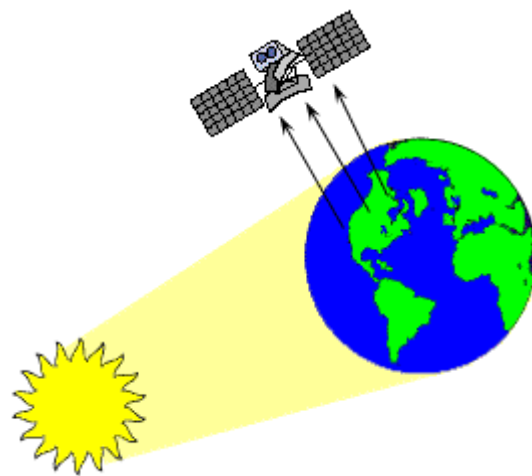
Τα παθητικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία, στο ορατό φάσμα, σε μια περιοχή, όταν αυτή

είναι διαθέσιμη, δηλαδή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όσο αναφορά την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τη γη (θερμικό υπέρυθρο) μπορεί να μετρηθεί από τα παθητικά συστήματα μέρα ή νύχτα αρκεί η ένταση της να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καταγραφεί.

Τα **ενεργά συστήματα** παρέχουν την δική τους ακτινοβολία ώστε να “φωτίζουν” την γη και να μετράνε την ανακλώμενη ακτινοβολία σε μήκη κύματος που δεν παρέχονται από τον ήλιο όπως μικροκύματα. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιούνται μέρα ή νύχτα ανεξάρτητα από τις συνθήκες οπτικής ορατότητας. Αναλυτικότερη αναφορά στα ενεργά συστήματα θα γίνει στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 2.17 Ενεργό σύστημα.



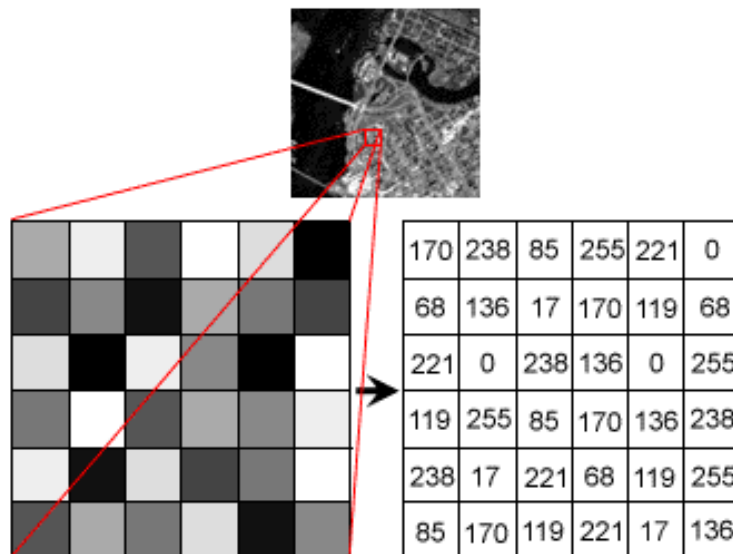
Παθητικό σύστημα.

2.9 Γενικά χαρακτηριστικά εικόνας

Η εικόνα αναφέρεται στη συνάρτηση δύο μεταβλητών της έντασης της ακτινοβολίας $f(x,y)$ όπου τα x,y συμβολίζουν συντεταγμένες και η τιμή f της συνάρτησης είναι ανάλογη της φωτεινότητας της εικόνας στη συγκεκριμένη θέση (x,y) .

Για να γίνει σωστή επεξεργασία της εικόνας με υπολογιστές, είναι αναγκαίο η συνάρτηση $f(x,y)$ να ψηφιοποιηθεί. Ψηφιακή εικόνα είναι η εικόνα $f(x,y)$ που έχει μετατραπεί από αναλογική σε διακριτή συνάρτηση και ως προς τις συντεταγμένες (x,y) και ως προς την ένταση f της ακτινοβολίας. Η ψηφιακή εικόνα θεωρείται ένας πίνακας που οι στήλες και οι γραμμές του αντιστοιχούν

στις συντεταγμένες της εικόνας, ενώ κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί στην τιμή του τόνου του γκρι για αυτό το σημείο (Σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.18 Ψηφιακή εικόνα.

Τα στοιχεία μιας τέτοιας ψηφιακής διάταξης ονομάζονται εικονοστοιχεία ή ψηφίδες (pictures elements ή pixels). Ψηφιοποίηση ως προς τις συντεταγμένες (x,y) της εικόνας ονομάζεται δειγματοληψία της εικόνας, ενώ ψηφιοποίηση του πλάτους της έντασης της ακτινοβολίας ονομάζεται ψηφιοποίηση ή κβαντοποίηση του επιπέδου του γκρι.

Έτσι, η ψηφιακή εικόνα είναι μια νέα συνάρτηση $DN(I,j)$, όπου οι συντεταγμένες (x,y) έχουν μετατραπεί σε ακέραιους αριθμούς (I,j) και η ένταση f είναι τώρα μια συνάρτηση με ακέραια τιμή DN (Digital Number) του επιπέδου του γκρι.

Η διαδικασία της ψηφιοποίησης απαιτεί στην πράξη ποσότητες που είναι ακέραιες δυνάμεις του δύο, δηλαδή :

$$DN = 2^k \quad (2.14)$$

όπου DN συμβολίζει τον αριθμό των επιπέδων του γκρι και k ο βαθμός της διαβάθμισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

3.1 Ηλεκτροοπτικοί αισθητήρες

Οι ηλεκτροοπτικοί αισθητήρες των συστημάτων Τηλεπισκόπησης (electro - optical sensors) χρησιμοποιούνται για να μετασχηματίσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης σε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό και κατόπιν οπτικό σήμα. Παραδοσιακά αυτή η διαδικασία μετασχηματισμού υλοποιείται με τα φωτογραφικά γαλακτώματα των φιλμ. Τα γαλακτώματα αυτά αφενός καταγράφουν και αφετέρου αποθηκεύουν την πληροφορία με μία και μόνον λειτουργία. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση κάποιου γαλακτώματος, όπως αργυρούχου αλίτη (silver halide), διαποτισμένου με κρυστάλλους, οι οποίοι μεταβάλλονται από λευκοί σε μαύρους καθώς αυξάνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία, και δημιουργούν έτσι τα αρνητικά της φωτογραφίας.

Τα φωτογραφικά γαλακτώματα είναι ευαίσθητα σε ακτινοβολία με μήκη κύματος μέχρι $\lambda = 1 \mu\text{m}$ κατά προσέγγιση. Πέραν αυτού του ορίου, η ακτινοβολία προσεγγίζει τη θερμική υπέρυθρη ζώνη και η περιεχόμενη θερμότητα της ακτινοβολίας αρχίζει να επηρεάζει το γαλάκτωμα. Για να φτάσει η ακτινοβολία στο γαλάκτωμα, θα πρέπει επίσης να διέλθει μέσα από ένα σύστημα φακών, το οποίο είναι κατασκευασμένο κατά κανόνα από κρύσταλλο ή γυαλί. Ενώ η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα διαδοθεί μέσω του γυαλινού φακού αποτελεσματικά για μήκη κύματος $< 1 \mu\text{m}$, πάνω από αυτό το όριο το γυαλί αρχίζει να γίνεται αδιαφανές και επιτρέπει όλο και λιγότερη ακτινοβολία να διέλθει μέσα από τη μάζα του.

Έγχρωμα συμβατικά και έγχρωμα υπέρυθρα φωτογραφικά γαλακτώματα καταγράφουν σε τρεις διαφορετικές ζώνες μηκών κύματος (μπλε, κόκκινο, πράσινο), οι οποίες παρουσιάζουν επικάλυψη. Είναι

επομένως δύσκολο να μετρηθούν και να καταγραφούν οι στενές φασματικές ζώνες που συχνά απαιτούνται για τη διάκριση χαρακτηριστικών τύπων της επιφάνειας της γης. Επιπροσθέτως, τα φωτογραφικά γαλακτώματα καταγράφουν μόνο σε αναλογική μορφή, και επομένως απαιτείται σάρωση και κατόπιν ψηφιοποίηση της φωτογραφίας ώστε τα στοιχεία της να μπορούν να αναγνωριστούν από υπολογιστές. Κατά συνέπεια υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας (χρήσης) άλλων τύπων ανιχνευτών ακτινοβολίας που να μπορούν να μετρούν και να καταγράφουν ακτινοβολία με μεγάλο εύρος μηκών κύματος σε στενές φασματικές ζώνες. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση των ηλεκτροπτικών ανιχνευτών.

Οι ηλεκτροπτικοί αισθητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μέσω **ανιχνευτών** (detectors), σε ηλεκτρόνια ή άλλα ανιχνεύσιμα ηλεκτρικά σήματα ώστε να μεταφέρουν πληροφορίες της εικόνας που καταγράφεται. Ένα στοιχείο του ανιχνευτή μπορεί να θεωρηθεί ότι δρα με τον ίδιο τρόπο όπως αυτό ενός απλού κόκκου στο φωτογραφικό γαλάκτωμα, μόνο που η ανίχνευση και η καταγραφή δεν πραγματοποιούνται στο ίδιο υλικό. Δηλαδή ο ανιχνευτής ανιχνεύει μόνο την εισερχόμενη ακτινοβολία, ενώ το ηλεκτρικό σήμα που δημιουργείται δειγματοληπτείται και κβαντοποιείται αργότερα, ώστε να καταγράφεται σε ένα μέσο αναγνώσιμο από υπολογιστές (ταινίες, δίσκους, CD, κλπ.). Αυτή η καταγραφή και η δειγματοληψία μπορούν να γίνουν αφότου το ηλεκτρικό σήμα μεταδοθεί και καταγραφεί σε κάποιον σταθμό λήψης στη γη.

3.2 Ταξινόμηση ανιχνευτών ακτινοβολίας

Η επιλογή του κατάλληλου ανιχνευτή ακτινοβολίας είναι θεμελιώδους σημασίας στην αποτελεσματικότητα ενός συστήματος Τηλεπισκόπησης, ειδικά όσον αφορά την ευαισθησία και το δυναμικό εύρος κατά την αποθήκευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

α. Θερμικοί ανιχνευτές. Βασίζονται στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός υλικού ευαίσθητου στη θερμότητα η οποία οφείλεται στην ακτινοβολία που απορροφάται από το υλικό. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του υλικού δημιουργεί μια δεύτερη φυσική μεταβολή που μπορεί να παρατηρηθεί, συνήθως μέσω της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης υλικών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Για παράδειγμα, μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C μπορεί να συνεπάγεται αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης κατά 4% στο υλικό του ανιχνευτή.

Για τους θερμικούς ανιχνευτές στο ορατό (0,4 - 0,7 μm) και στο εγγύτατο υπέρυθρο (0,7 - 1,4 μm) χρησιμοποιούνται υλικά που βασίζονται στο κάδμιο (CdS, CdSe, CdTe). Στο εγγύς υπέρυθρο (1,4 - 3 μm) χρησιμοποιούνται υλικά βασισμένα στον μόλυβδο (Pb), ενώ στο μέσο (3 - 14 μm) και στο άπω υπέρυθρο (14 μm - 1mm) χρησιμοποιούνται υλικά που βασίζονται στο ίνδιο (In), το τελλούριο (Te) και σε διάφορα κράματα από ενυδραργυρωμένο πυρίτιο (Si) και γερμάνιο (Ge). Ενώ όλοι αυτοί οι τύποι των ανιχνευτών ακτινοβολίας ανταποκρίνονται σε όλα τα μήκη κύματος λ της ακτινοβολίας, δεν έχουν την ικανότητα της ταχείας απόκρισης που απαιτείται από τα συστήματα Τηλεπισκόπησης και δεν θα εξεταστούν περαιτέρω.

β. Ανιχνευτές φωτονίων. Χρησιμοποιούν τα προσπίπτοντα φωτόνια που περιέχονται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για να διεγείρουν ηλεκτρόνια του υλικού της επιφάνειας του ανιχνευτή, ώστε τα ηλεκτρόνια να μετακινηθούν από το ένα επίπεδο ενέργειας τους σε κάποιο άλλο εντός του κρυστάλλου του υλικού του ανιχνευτή. Η διαδικασία αυτή γίνεται για μικρό χρονικό διάστημα. Η απόκριση του ανιχνευτή φωτονίων είναι ανάλογη με τον αριθμό των μεταπτώσεων των ηλεκτρονίων οι οποίες λαμβάνουν χώρα ανά [watt] εισερχόμενης ακτινοβολίας. Ο ανιχνευτής φωτονίων ανταποκρίνεται μόνον όταν η ενέργεια E του φωτονίου που προσπίπτει στην επιφάνεια του είναι μεγαλύτερη από την ολική ηλιακή πυκνότητα ροής E_G της ακτινοβολίας που φθάνει στη γη από τον Ήλιο.

Ο συνδετικός κρίκος ανάμεσα στα κυματικά χαρακτηριστικά, συχνότητα ν και μήκος κύματος λ , με τα σωματιδιακά χαρακτηριστικά, ενέργεια του φωτονίου, καθορίζεται από τον νόμο του *Planck*.

Ο νόμος αυτός περιγράφει τη σχέση μεταξύ της συχνότητας ν της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, και της ενέργειας E , που μεταφέρεται από ένα φωτόνιο :

$$E = h \nu \quad (3.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck ίση με $6,625 \times 10^{-34}$ [joule • second]. Η παραπάνω σχέση (3.1) μπορεί επίσης να εκφραστεί ως συνάρτηση της ταχύτητας του φωτός c και του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας :

$$E = h \ c / \lambda \quad (3.2)$$

Ο ανιχνευτής ανταποκρίνεται εφόσον η ενέργεια E του εισερχόμενου φωτονίου (εξίσωση 3.2) είναι μεγαλύτερη από το E_G της ακτινοβολίας που φθάνει στη γη από τον Ήλιο (δηλαδή, $E \geq E_G$). Επομένως, το άνω όριο πάνω από το οποίο δεν μπορεί να γίνει διέγερση του ανιχνευτή ή το μήκος κύματος αποκοπής λ_c του ανιχνευτή πάνω από το οποίο δεν είναι δυνατή η εκπομπή φωτονίων, είναι :

$$\lambda \leq \lambda_c = h \ c / E_G \quad (3.3)$$

Η ισχύς Φ σε [watt] της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δίδεται από τη σχέση (Seyrafi and Hovanessian, 1993, Schott, 1997) :

$$\Phi = N_\phi \ h \ c / \lambda \quad (3.4)$$

όπου N_ϕ είναι ο αριθμός των [φωτονίων / second]. Η ικανότητα απόκρισης (αντίδρασης) R (responsivity) του ανιχνευτή φωτονίων ορίζεται από τη σχέση :

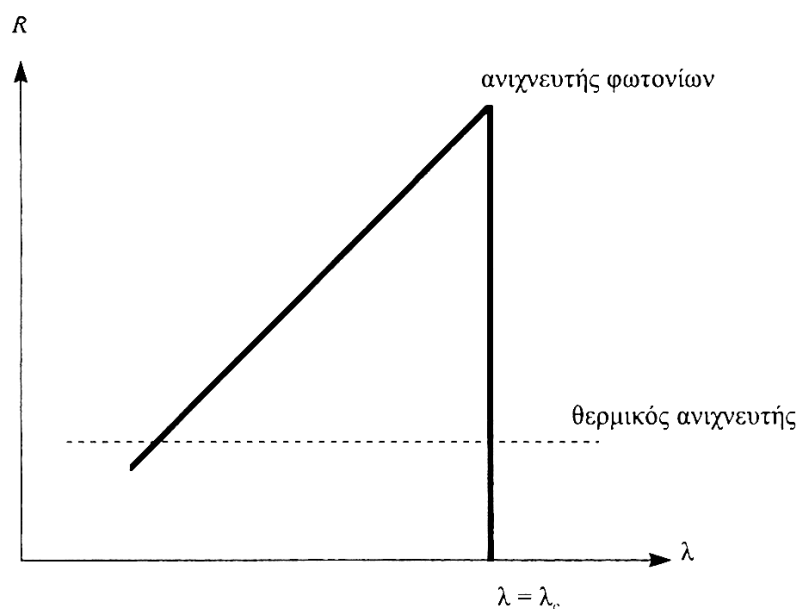
$$R = \eta \ k \ N_\phi = \eta \ k \ \Phi \ \lambda / h \ c \quad (3.5)$$

όπου η είναι η απόδοση των φωτονίων του ανιχνευτή και k κάποια σταθερά αναλογίας.

Η ικανότητα απόκρισης R του ανιχνευτή είναι ένα μέτρο της ποσότητας του ηλεκτρικού σήματος που δημιουργείται σε [volt] για κάθε [watt] εισερχόμενης ακτινοβολίας Φ . Η ικανότητα απόκρισης R αυξάνεται όταν αυξάνεται η ισχύς Φ της εισερχόμενης δέσμης μέχρι το μήκος κύματος αποκοπής λ_c . Αντίθετα ένας θερμικός ανιχνευτής παρουσιάζει σταθερή ικανότητα απόκρισης ανεξαρτήτως της εισερχόμενης ισχύος της ακτινοβολίας.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η εξάρτηση της ικανότητας απόκρισης R από το μήκος κύματος λ . Ο ιδανικός ανιχνευτής φωτονίων θα έχει μέγιστη τιμή R όταν $\Phi = \Phi_c$, δηλαδή όταν $\lambda = \lambda_c$. Καθώς η ισχύς Φ είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος λ της ακτινοβολίας, την ίδια στιγμή η ικανότητα

απόκρισης R του ανιχνευτή θα προσεγγίζει το μηδέν ($R \rightarrow 0$). Η απόκριση R του ανιχνευτή φωτονίων θα ελαττώνεται όσο το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται μικρότερο, ενώ η ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από λ_c (δηλαδή, $\lambda > \lambda_c$) δεν είναι ανιχνεύσιμη.



Σχήμα 3.1 Εξάρτηση της απόκρισης R ενός ιδανικού ανιχνευτή σε σχέση με το μήκος κύματος λ .

Οι ανιχνευτές φωτονίων κατασκευάζονται από πυρίτιο που έχει εμποτιστεί με άλλα συστατικά ώστε να τους δώσει τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Τα τυπικά συστατικά μπορεί να είναι πυρίτιο (Si), θειούχος μόλυβδος (Lead Sulphide, γαληνίτης), τελουριούχος κάδμιο-υδράργυρος (Mercury Cadmium Telluride, MCT, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$), αντιμονιούχο ίνδιο (Indium Antimonide), γερμάνιο με προσμίξεις υδραργύρου (Mercury Doped Germanium) κλπ. Δύο διαγράμματα απόκρισης ανιχνευτών υπέρυθρης ακτινοβολίας φαίνονται στο Σχήμα 3.2

3.3 Μέτρα της συμπεριφοράς των ανιχνευτών

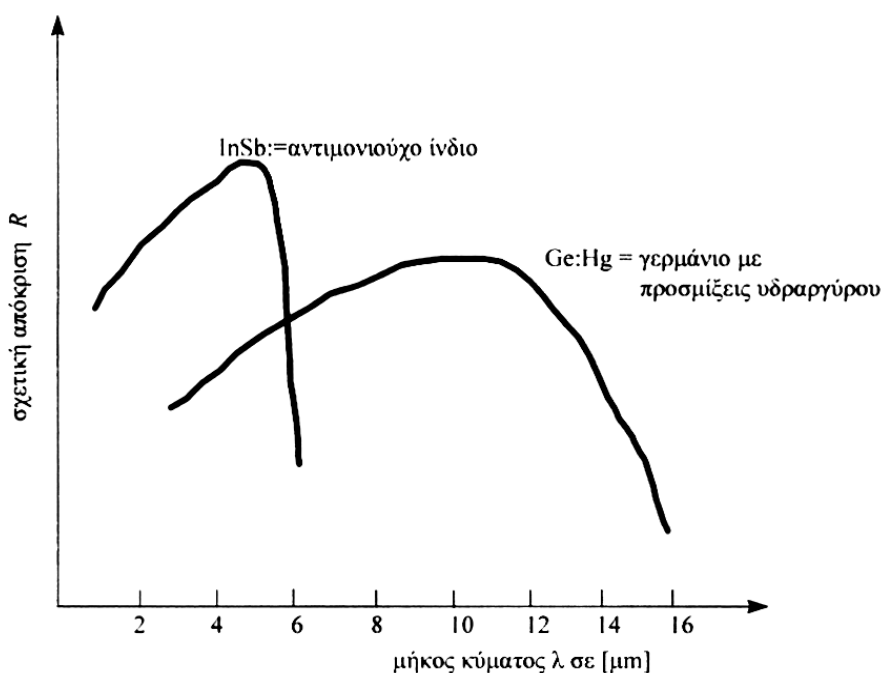
Η συμπεριφορά ενός ανιχνευτή φωτονίων μπορεί να αξιολογηθεί από δύο μέτρα, την **απόδοση φωτονίων** ή (quantum efficiency) ή την **ισοδύναμη**

ισχύ θορύβου NEP (Noise Equivalent Power). Τα μέτρα αυτά αναφέρονται συχνά στις προδιαγραφές των συστημάτων Τηλεπισκόπησης.

Η ισοδύναμη ισχύς θορύβου NEP είναι ένα μέτρο της ελάχιστης εισερχόμενης ισχύος που μπορεί να ενεργοποιήσει τον ανιχνευτή ή του θορύβου του ίδιου του ανιχνευτή σε όρους της ισχύος της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Η NEP ορίζεται ως η ισχύς της εισερχόμενης ακτινοβολίας που απαιτείται για να δημιουργηθεί ένας λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise-ratio) στον ανιχνευτή ίσος με τη μονάδα. Η ισοδύναμη ισχύς θορύβου του ανιχνευτή αναφέρεται στο εύρος της φασματικής ζώνης του λαμβανομένου σήματος (συνήθως 1 Hz). Μαθηματικά η NEP ορίζεται ως:

$$NEP = \Phi_{\max} V_N / V_S \quad (3.6)$$

όπου Φ_{\max} είναι η μέγιστη ισχύς σε [watt] της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον ανιχνευτή, V_S είναι το μέγιστο δυναμικό του σήματος που αναπτύσσεται από τον ανιχνευτή [volts] και V_N είναι το δυναμικό του θορύβου (το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του) που αναπτύσσεται από τον ανιχνευτή.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα της απόκρισης R δύο ανιχνευτών σε σχέση με το μήκος κύματος λ .

Ένα άλλο μέτρο που σχετίζεται με τη NEP λαμβάνει υπόψη το εμβαδό A_d της επιφάνειας του ανιχνευτή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση ανιχνευτών διαφορετικού εμβαδού. Ένας ανιχνευτής με μεγαλύτερο εμβαδό A_d θα διαθέτει περισσότερα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο που προσπίπτουν στην επιφάνεια του σε σχέση με έναν ανιχνευτή με μικρότερο εμβαδό. Για να ληφθεί υπόψη αυτή η διαφορά, χρησιμοποιείται ο συγκριτικός όρος (Elachi, 1987, Seyrafi and Hovanessian, 1993, Schott, 1997):

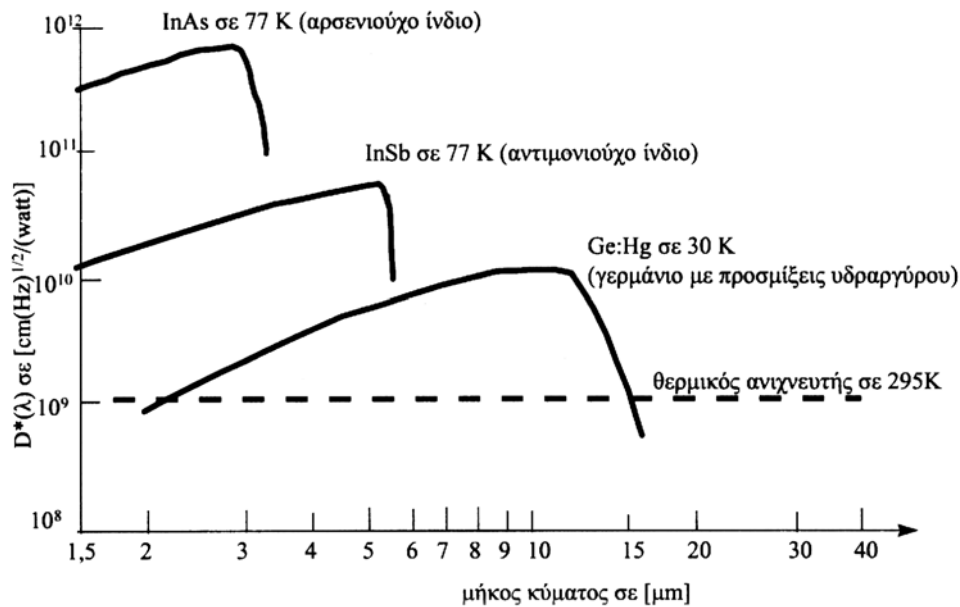
$$D^* = (A_d \Delta f)^{1/2} / (NEP) \quad [(\text{cm Hz})^{1/2} / \text{W}] \quad (3.7)$$

όπου A_d είναι το εμβαδό της επιφάνειας του ανιχνευτή σε $[\text{cm}^2]$, Δf είναι η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος σε $[\text{Hz}]$ (συνήθως $\Delta f = 1/(2\Delta t)$, όπου Δt ο χρόνος παραμονής για κάθε IFOV, και NEP είναι η ισοδύναμη ισχύς θορύβου σε $[\text{watt}]$. Η παράμετρος D^* (specific detectivity ή D “star”) αυξάνεται όταν ο ανιχνευτής γίνεται πιο αποδοτικός, και είναι ανεξάρτητη του εμβαδού του ανιχνευτή.

Η παράμετρος D^* εξαρτάται από το μήκος κύματος λ (Σχήμα 3.3), το ηλεκτρικό πλάτος Δf της ζώνης του συστήματος καταγραφής που προσαρμόζεται στον ανιχνευτή και την ταχύτητα δειγματοληψίας των οπτικών και ηλεκτρικών συστημάτων ενίσχυσης που σχετίζονται με τον ανιχνευτή. Άρα η παράμετρος D^* είναι συνάρτηση της ταχύτητας δειγματοληψίας f_s , του μήκους κύματος λ και του πλάτους της φασματικής ζώνης.

Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές ανιχνευτών φωτονίων.

| Υλικό Ανιχνευτή | D^* | $\lambda_{\max} = \lambda_c$ |
|--------------------|----------------------|------------------------------|
| Πυρίτιο | 9×10^{11} | $1 \mu\text{m}$ |
| Θειούχος Μόλυβδος | 6×10^{11} | $2,1 \mu\text{m}$ |
| Αντιμονιούχο ίνδιο | 5×10^{11} | $5 \mu\text{m}$ |
| MCT | $4,5 \times 10^{10}$ | $12 \mu\text{m}$ |



Σχήμα 3.3 Συγκριτικό διάγραμμα της παραμέτρου D^* διαφόρων ανιχνευτών στο υπέρυθρο σε διαφορετικές θερμοκρασίες σε σχέση με το μήκος κύματος λ .

3.4 Εικονοληπτικά συστήματα

Υπάρχουν τρεις τύποι συστημάτων καταγραφών (ανιχνευτών) ακτινοβολίας στην Τηλεπισκόπηση:

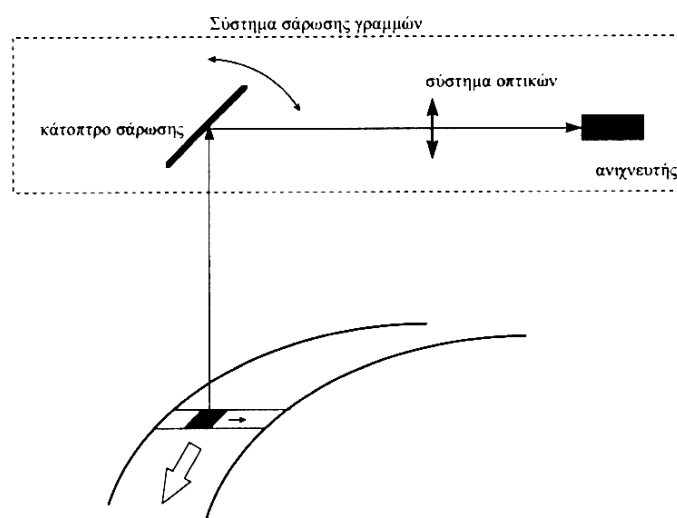
- (i) Τα συστήματα σάρωσης γραμμών (line scanning systems), που χρησιμοποιούν ένα επίπεδο κάτοπτρο το οποίο ταλαντώνεται ή περιστρέφεται ώστε να ανακλάται η ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης και να κατευθύνεται σε μια σειρά ανιχνευτών.
- (ii) Τα συστήματα διανυσματικής καταγραφής (array sensor systems), που χρησιμοποιούν μια σειρά ανιχνευτών σε διάταξη μονοδιάστατου (ή δισδιάστατου) πίνακα για να ανιχνεύουν και να καταγράφουν την ακτινοβολία από τη γη.
- (iii) Τα συστήματα κεραιών (antenna systems), που είναι ειδικά σχεδιασμένα για τη ζώνη των μικροκυμάτων και μπορεί να είναι πραγματικού ανοίγματος (RAR) ή συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR) (Κεφάλαιο 4).

3.4.1 Συστήματα σάρωσης γραμμών

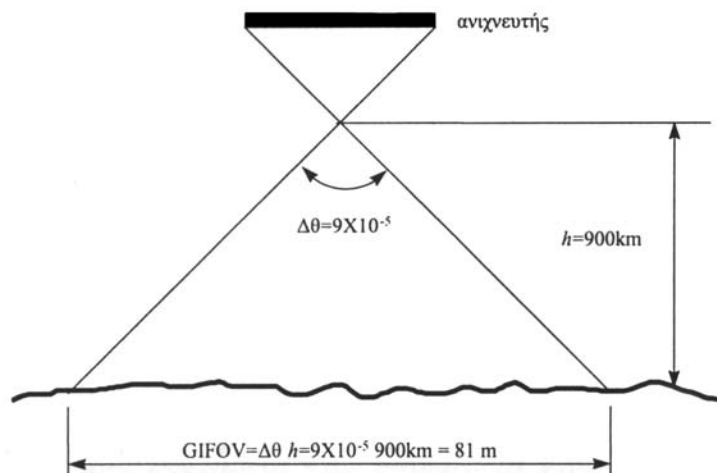
Τα συστήματα σάρωσης γραμμών (line scanning systems) χρησιμοποιούν ένα κάτοπτρο που ταλαντώνεται με επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς τη διεύθυνση της πτήσης, και το οποίο διαδοχικά κατευθύνει την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από τη γήινη επιφάνεια στον ανιχνευτή ή στους ανιχνευτές. Η πρόσω κίνηση της πλατφόρμας (αεροσκάφος ή δορυφόρος) του αισθητήρα φέρει κατά αυτόν τον τρόπο το κάτοπτρο σε θέση τέτοια ώστε να ενεργοποιήσει την καταγραφή της επόμενης γραμμής σάρωσης, κοκ. (Σχήμα 3.4).

Το εμβαδό της γήινης επιφάνειας από την οποία καταγράφεται η ακτινοβολία ορίζεται ως **στιγμιαίο οπτικό πεδίο εδάφους GIFOV** (Ground Instantaneous Field of View) του ανιχνευτή. Τούτο εξαρτάται: από (α) τις διαστάσεις του ανιχνευτή, (β) τη γραμμική ταχύτητα της πλατφόρμας του αισθητήρα, (γ) το ύψος πτήσης της πλατφόρμας, (δ) τη συχνότητα ταλάντωσης του κατόπτρου, και (ε) τη συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος που προέρχεται από τον ανιχνευτή.

Το **στιγμιαίο οπτικό πεδίο IFOV** μετρείται σε ακτίνια [rad], και αναφέρεται στην επίκεντρο γωνία $\Delta\theta$ κύκλου με κέντρο τον ανιχνευτή και με ακτίνα το ύψος πτήσης H και η οποία βαίνει του στοιχείου της γήινης επιφάνειας. Από αυτήν τη γωνιακή τιμή $\Delta\theta$ και το ύψος της πτήσης H της πλατφόρμας μπορεί να καθορισθεί το GIFOV του ανιχνευτή στο έδαφος (Σχήμα 3.5).



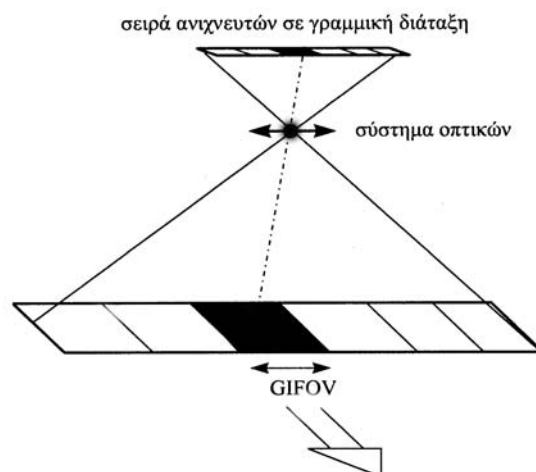
Σχήμα 3.4 Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος σάρωσης γραμμών.



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα γεωμετρίας του GIFOV.

3.4.2 Συστήματα διανυσματικής καταγραφής

Ένα σύστημα διανυσματικής καταγραφής (array sensor systems) δεν χρησιμοποιεί κάτοπτρο για να σαρώνει εγκάρσια την επιφάνεια της γης, καθώς κάθε στοιχείο της εικόνας (ψηφίδα) καταγράφεται από ανεξάρτητο στοιχείο του ανιχνευτή (Σχήμα 3.6). Το πλάτος κάθε ηλεκτρονικού στοιχείου του ανιχνευτή όταν προβάλλεται στην επιφάνεια της γης από το ύψος H της πλατφόρμας του αισθητήρα, καθορίζει το GIFOV κατά την εγκάρσια της πτήσης διάσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Η πρόσω ταχύτητα της πλατφόρμας του αισθητήρα και η ταχύτητα δειγματοληψίας καθορίζει τη διάσταση του GIFOV κατά μήκος της κατεύθυνσης της πτήσης.



Σχήμα 3.6 Σύστημα διανυσματικής καταγραφής.

Κάθε ανιχνευτής μετρά ακτινοβολία και αποθηκεύει το σήμα που προκύπτει στον χρόνο που χρειάζεται η πλατφόρμα για να μετακινηθεί στην επόμενη θέση της γραμμής της εικόνας. Τα καταγεγραμμένα σήματα της ακτινοβολίας ονομάζονται **ψηφιακές τιμές DN** (Digital Numbers) ή **τιμές αρίθμησης CN** (Count Values). Όλα τα DN, για ολόκληρη τη γραμμή σάρωσης μεταδίδονται προς κάποιον επίγειο σταθμό λήψης συνήθως στο ίδιο κλάσμα του δευτερολέπτου κατά το οποίο καταγράφονται. Απαιτείται επομένως μεταφορά μεγάλου αριθμού δεδομένων από τους δορυφόρους στους επίγειους σταθμούς.

3.4.3 Συστήματα κεραιών (Εικονοληπτικά Radar)

Τα εικονοληπτικά συστήματα Radar θα μελετηθούν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4.

3.5 Χερσαία, Εναέρια και Δορυφορικά συστήματα- Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε οι ηλεκτροπτικοί αισθητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μέσω ανιχνευτών (detectors), σε ηλεκτρόνια ή άλλα ανιχνεύσιμα ηλεκτρικά σήματα ώστε να μεταφέρουν πληροφορίες της εικόνας που καταγράφεται. Οι ηλεκτροπτικοί αισθητήρες (sensors) τοποθετούνται είτε σε χερσαία είτε σε εναέρια (αεροσκάφη, διαστημικά σκάφη, δορυφόρους) συστήματα.

Τα χερσαία συστήματα συνήθως χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν λεπτομερείς πληροφορίες του εδάφους οι οποίες συγκρίνονται με τις πληροφορίες που προκύπτουν από εναέρια συστήματα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται σύγκριση αυτών των πληροφοριών ώστε να γίνει καλύτερος και ακριβέστερος χαρακτηρισμός του εδάφους. Το μειονέκτημα των χερσαίων συστημάτων είναι η μικρή εδαφική κάλυψη καθώς και ο μεγαλύτερος χρόνος που απαιτείται σε σχέση με τα εναέρια συστήματα για την πραγματοποίησή της.

Τα εναέρια συστήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό στην Τηλεπισκόπηση και χωρίζονται σε **συστήματα αεροσκαφών** και σε **δορυφορικά συστήματα**. Από τη δεκαετία του 1960 και νωρίς το 1970 ξεκίνησε η χρήση των αεροσκαφών για Τηλεπισκόπηση. Υπάρχουν ορισμένα

λειτουργικά χαρακτηριστικά των δεκτών των αεροσκαφών σε σχέση με εκείνα των δορυφόρων.

1. Ο όγκος των καταγεγραμμένων στοιχείων στα συστήματα αεροσκαφών είναι αρκετά μεγαλύτερος. Τούτο είναι αποτέλεσμα του μεγάλου αριθμού καναλιών και του μεγάλου αριθμού ψηφίδων που παράγονται. Συχνά οι σαρωτές αεροσκαφών μπορούν να καταγράψουν μέχρι και 100 ψηφίδες εγκάρσια της λωρίδας σάρωσης με πολλές χιλιάδες γραμμές σάρωσης σε μια γραμμή πτήσης.

2. Το γωνιακό οπτικό πεδίο, FOV, των συσκευών των αεροσκαφών είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο των δορυφόρων. Συνέπεια όμως του μεγάλου οπτικού πεδίου FOV είναι οι μεγάλες παραμορφώσεις στα άκρα (περιθώρια) των εικόνων. Διορθώσεις των γεωμετρικών αυτών παραμορφώσεων επιτυγχάνονται με ψηφιακή επεξεργασία.

3. Δεν υπάρχει σταθερότητα στο ύψος της πτήσης των αεροσκαφών και του προσανατολισμού των. Αντίθετα, οι δορυφόροι (π.χ Landsat 4) έχουν μίαν αβεβαιότητα $\pm 0,01^\circ$ στη γωνία προσανατολισμού με μια σταθερότητα 10^{-6} degrees / s. Εξαιτίας της τριβής του αέρα με το αεροσκάφος δημιουργούνται διαταράξεις και αποπροσανατολισμός των συσκευών και των οργάνων.

4. Τέλος, το κόστος συλλογής των δεδομένων με αεροσκάφη είναι αρκετά υψηλό και συνήθως επιβαρύνουν συγκεκριμένο χρήστη.

Η χρήση όμως των αεροσκαφών παρουσιάζει και ορισμένα πλεονεκτήματα.

Ο χρήστης μπορεί ο ίδιος να επιλέξει τις ζώνες φασματικής καταγραφής για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ στενές-λεπτές ζώνες (π.χ. $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$).

Επίσης, τα αεροσκάφη μπορούν να πετάξουν στη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος και σε συγκεκριμένο ύψος πτήσης ανάλογα με τις απαιτήσεις.

3.6 Δορυφορικά Συστήματα - Γενικά

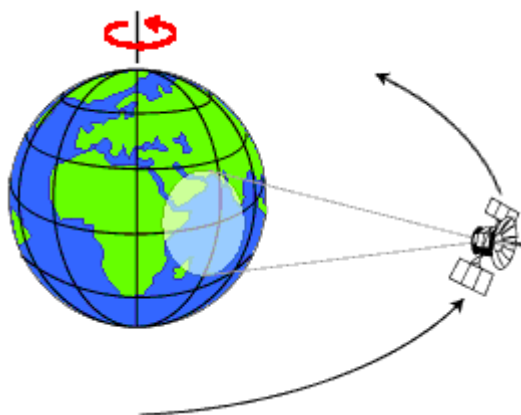
Εκτός από τους στρατιωτικούς και μετεωρολογικούς δορυφόρους, προβλέπεται ότι μέχρι το 2002 θα βρίσκονται σε τροχιά πάνω από 30 δορυφόροι Τηλεπισκόπησης, που θα λειτουργούν και θα ελέγχονται από διάφορα έθνη ή ιδιωτικές εταιρείες. Η πρώτη επιτυχία των αμερικανικών δορυφόρων Landsat το 1972 παρότρυνε κι άλλες κυβερνήσεις ή εταιρείες διαφόρων χωρών να ξεκινήσουν παρόμοια δορυφορικά προγράμματα

Τηλεπισκόπησης. Το σύστημα SPOT αναπτύχθηκε από τους Γάλλους, με πρώτη εκτόξευση το 1986. Η κυβέρνηση της Ινδίας ξεκίνησε το πρόγραμμα IRS το 1988. Η ευρωπαϊκή εταιρεία διαστήματος (European Space Agency, ESA) έθεσε σε τροχιά τους δορυφόρους ERS -1 και ERS -2 αρχίζοντας από το 1990 και το ίδιο έκανε και η Ιαπωνία με την NASDA και τον δορυφόρο JERS-1 το ίδιο έτος. Τέλος οι Καναδοί μπήκαν στο σκηνικό με τον δορυφόρο Radarsat το 1991.

3.6.1 Χαρακτηριστικά Δορυφόρων

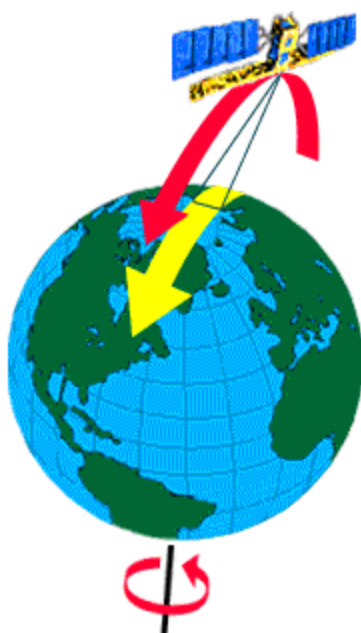
Η ακολουθούμενη γραμμή του δορυφόρου ονομάζεται τροχιά και τα χαρακτηριστικά της εξαρτώνται από την ικανότητα και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο αισθητήρας. Η επιλογή της τροχιάς μπορεί να διαφέρει αναφορικά με το ύψος από την επιφάνεια της γης, τον προσανατολισμό και την περιστροφή σε σχέση με τη γη.

Δορυφόροι, σε μεγάλα υψόμετρα, οι οποίοι “βλέπουν” το ίδιο τμήμα της γήινης επιφάνειας συνεχώς, έχουν **γεωστατικές** τροχιές. Οι **γεωστατικοί δορυφόροι**, σε υψόμετρα της τάξης των 36.000 km, κινούνται με ταχύτητες ίσες με την ταχύτητα περιστροφής της γης ώστε να μοιάζουν ακίνητοι σε σχέση με την υπό εξεταζόμενη περιοχή του εδάφους. Το γεγονός αυτό επιτρέπει σε αυτούς να παρατηρούν και να συλλέγουν πληροφορίες αδιάκοπα στην ίδια περιοχή του εδάφους της γης. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα έχουν οι μετεωρολογικοί και οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι. Εξαιτίας του μεγάλου υψομέτρου, ένας μετεωρολογικός δορυφόρος μπορεί να παρατηρεί τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες σε ολόκληρο το ημισφαίριο της γης.



Σχήμα 3.7 Γεωστατικός δορυφόρος.

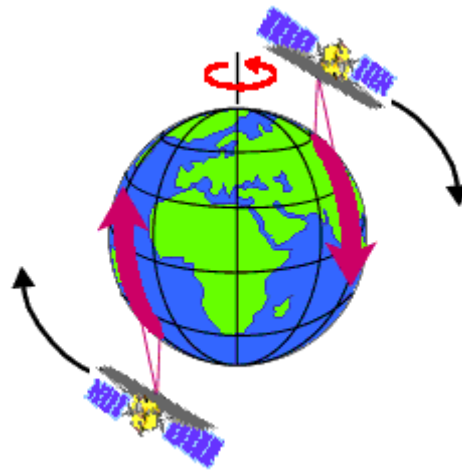
Οι δορυφόροι Τηλεπισκόπησης βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα (500 έως 900 km) από ό,τι οι γεωστατικός και ακολουθούν κυκλικές, ηλιο-σύγχρονες και σχεδόν πολικές τροχιές. Σε μια τέτοια τροχιά, ο δορυφόρος διασχίζει ένα συγκεκριμένο παράλληλο κύκλο της Γης, περίπου την ίδια τοπική ηλιακή ώρα σε κάθε του διέλευση, με το τροχιακό του επίπεδο να είναι προσανατολισμένο έτσι ώστε να διατηρεί σταθερή γωνία με την ηλιακή δέσμη (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Ηλιο-σύγχρονη σχεδόν πολική τροχιά ενός δορυφόρου Τηλεπισκόπησης.

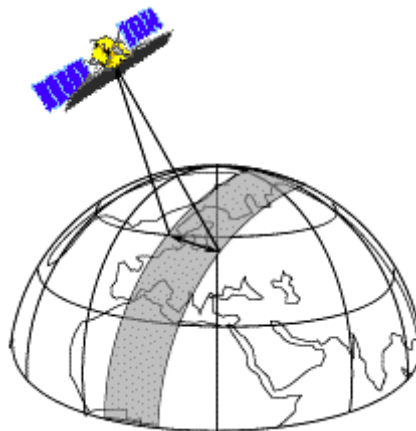
Συνεπώς για ένα παρατηρητή πάνω στη γήινη επιφάνεια, ο δορυφόρος θα καλύπτει την περιοχή του την ίδια πάντα τοπική ώρα ελαχιστοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τις μεταβολές στον ηλιακό φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε δεδομένο γεωγραφικό πλάτος ϕ , το ύψος του Ήλιου πάνω από τον ορίζοντα και ο προσανατολισμός του (αζιμούθιο) θα είναι περίπου ίδια για παρόμοιες εποχές την ώρα των καταγραφών. Για δύο όμως εικόνες που λήφθηκαν σε διαφορετικά πλάτη, ή διαφορετικές εποχές, θα παρατηρηθούν διαφορές στο ύψος του Ήλιου εξαιτίας της φαινόμενης κίνησης του από εποχή σε εποχή.

Δορυφόροι σε ηλιο-σύγχρονες τροχιές καταγράφουν εικόνες και από τη φωτισμένη αλλά και από τη σκοτεινή πλευρά της γης. Οι δορυφόροι έχουν κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο την ημέρα και από Νότο προς Βορρά τη νύχτα. Οι δέκτες που η λειτουργία τους βασίζεται στην ανακλώμενη ηλιακή ενέργεια, λαμβάνουν δεδομένα μόνο κατά την κατιούσα τροχιά. Αντιθέτως τα Radar και οι δέκτες θερμικής ακτινοβολίας λαμβάνουν δεδομένα ανεξάρτητα του ηλιακού φωτισμού και συνεπώς μπορούν να συλλέγουν δεδομένα και κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 3.9 Ανιούσα - Κατιούσα τροχιά.

Καθώς ο δορυφόρος κινείται κυκλικά γύρω από τη γη, παρατηρεί συγκεκριμένο τμήμα (ζώνη) της επιφάνειας της γης της οποίας το πλάτος (swath) μπορεί να κυμανθεί από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα.



Σχήμα 3.10 Παρατηρούμενη ζώνη της επιφάνειας της γης.

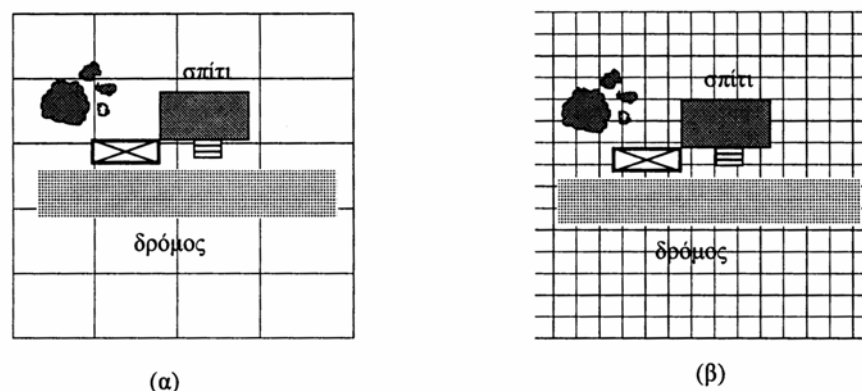
Εκμεταλλευόμενος ο δορυφόρος την περιστροφή της γης από δυτικά προς ανατολικά καθώς και την πολική του τροχιά, μετατοπίζεται προς τα δυτικά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες ζώνες παρατήρησης. Ανάλογα με την περίοδο του εκάστοτε δορυφόρου προκύπτει και ο αριθμός των περιστροφών που απαιτείται από τον δορυφόρο ώστε να συμπληρωθεί ένας κύκλος κάλυψης ολόκληρης της επιφάνειας της γης.

3.6.2 Διαχωριστική ικανότητα και δειγματοληψία

Δύο παράγοντες είναι σημαντικοί για την ποιότητα και το περιεχόμενο της εικόνας: η διαχωριστική ικανότητα και η συχνότητα δειγματοληψίας. Η **διαχωριστική ικανότητα** αναφέρεται στη μέγιστη ανάλυση μιας μέτρησης και σχετίζεται με την ικανότητα ενός συστήματος να διαχωρίζει αντικείμενα. Διακρίνεται σε χωρική, φασματική, ραδιομετρική και διαχρονική διαχωριστική ικανότητα. Συχνότητα δειγματοληψίας είναι η ταχύτητα συλλογής των δεδομένων. Διακρίνεται και αυτή σε φασματική, χωρική και διαχρονική συχνότητα δειγματοληψίας.

3.6.2.1 Χωρική διαχωριστική ικανότητα (Spatial Resolution)

Η χωρική διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση ενός συστήματος έχει να κάνει με την ικανότητα ενός συστήματος να διακρίνει αντικείμενα στη γεωμετρική τους διάσταση. Μια γεωμετρική επιφάνεια μπορεί να καταγραφεί με συγκεκριμένη διαχωριστική ικανότητα. Ένα παράδειγμα δύο καταγραφών με διαφορετικές χωρικές αναλύσεις φαίνεται στα Σχήματα 3.11 και 3.12



Σχήμα 3.11 Παραδείγματα διαφορετικών χωρικών διαχωριστικών ικανοτήτων.

Στην περίπτωση (α) του Σχήματος 3.11 κανένα αντικείμενο δεν καταλαμβάνει ολόκληρο ένα εικονοστοιχείο. Έτσι το κάθε εικονοστοιχείο αποδίδει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που προέρχεται από διαφορετικά αντικείμενα. Αυτά ονομάζονται **μικτά εικονοστοιχεία**. Τα μικτά εικονοστοιχεία είναι δύσκολο να διαχωριστούν το ένα από το άλλο. Από την άλλη πλευρά, το Σχήμα 3.11.β έχει καλύτερη χωρική διαχωριστική ικανότητα στον χώρο (εικονοστοιχεία μικρότερων διαστάσεων).



Σχήμα 3.12 Η δεξιά φωτογραφία είναι διαστάσεων 832 X 624 pixels ενώ η αριστερή είναι με μεγαλύτερα εικονοστοιχεία και προφανώς μικρότερης χωρικής διαχωριστικής ικανότητας.

Στην παράγραφο 2.9 αναφέρθηκε ότι η ψηφιακή εικόνα θεωρείται ένας πίνακας που οι στήλες και οι γραμμές του αντιστοιχούν στις συντεταγμένες της εικόνας, ενώ κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί στην τιμή του τόνου του γκρι για αυτό το σημείο. Τα στοιχεία μιας τέτοιας ψηφιακής διάταξης ονομάζονται εικονοστοιχεία ή ψηφίδες (pictures elements ή pixels), και είναι οι μικρότερες μονάδες της εικόνας. Τα εικονοστοιχεία είναι συνήθως τετράγωνα και αναπαριστούν συγκεκριμένο τμήμα της εικόνας. Εάν ένα εικονοληπτικό σύστημα έχει χωρική διαχωριστική ικανότητα 20 m και εάν μια φωτογραφία από αυτό το εικονοληπτικό σύστημα απεικονίζεται σε μέγιστη ανάλυση (full resolution), τότε το κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστά μια περιοχή 20 m x 20 m στο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση η χωρική διαχωριστική ικανότητα και το μέγεθος του εικονοστοιχείου ταυτίζεται. Εντούτοις, είναι πιθανό το μέγεθος του εικονοστοιχείου να είναι μεγαλύτερο από τη χωρική διαχωριστική ικανότητα

του αισθητήρα ώστε να μπορεί να καλυφθεί μεγαλύτερη περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση η εικόνα έχει χαμηλή ανάλυση (coarse or low resolution).



Σχήμα 3.13 High Resolution Image.

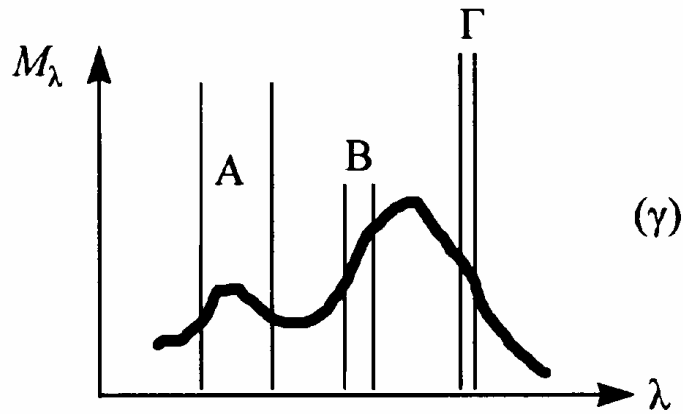


Σχήμα 3.14 Low Resolution Image.

3.6.2.2 Φασματική διαχωριστική ικανότητα (Spectral Resolution)

Κάθε υλικό παρουσιάζει ξεχωριστή κατανομή της ανακλώμενης, εκπεμπόμενης ή απορροφώμενης ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος κύματος λ . Μελέτη της φασματικής αυτής απόκρισης επιτρέπει τη διάκριση ενός αντικειμένου από κάποιο άλλο ή την αξιολόγηση της πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ή χημικές ιδιότητες των αντικειμένων ή φαινομένων.

Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται μια φασματική καμπύλη με τρεις φασματικές ζώνες καταγραφής A, B, Γ. Το πλάτος, η θέση και ο αριθμός των φασματικών ζωνών αντιπροσωπεύουν τη φασματική διαχωριστική ικανότητα του καταγραφικού συστήματος. Η φασματική διαχωριστική ικανότητα καθορίζει την ικανότητα του συστήματος να διακρίνει μεμονωμένους στόχους, όπως το είδος της βλάστησης, τον τύπο ορυκτών και πετρωμάτων κλπ. Η χρήση πολλαπλών φασματικών ζωνών καταγραφής αυξάνει σημαντικά την ικανότητα διάκρισης στόχων. Επιπλέον η διαχωριστική ικανότητα B είναι καλύτερη από τη διαχωριστική ικανότητα A, επειδή η φασματική λεπτομέρεια στη ζώνη A δεν μπορεί να διαχωριστεί με ακρίβεια όπως στη ζώνη B. Η σχέση των φασματικών διαχωριστικών ικανοτήτων για τις μεμονωμένες ζώνες είναι $A < B < \Gamma$.



Σχήμα 3.15 Φασματική διαχωριστική ικανότητα.

3.6.2.3 Ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα (Radiometric Resolution)

Γενικά η ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα περιγράφει την ικανότητα του εικονοληπτικού συστήματος να περιγράφει το μέγιστο ποσό της πληροφορίας που εμπεριέχεται σε μια εικόνα. Δηλαδή περιγράφει την ευαισθησία του συστήματος και την ικανότητα του όσο αφορά στον αριθμό των διαβαθμίσεων που χρησιμοποιούνται για την ψηφιοποίηση της έντασης της ακτινοβολίας.

Ο αριθμός των διαβαθμίσεων εκφράζεται από τον αριθμό των ψηφιακών τιμών (bits) που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της μέγιστης τιμής. Από την εξίσωση 2.14 για παράδειγμα, για $k=1, 2, 3, 4, 8$ bit, ο αριθμός των διαβαθμίσεων του επιπέδου του γκρι είναι 2, 4, 8, 16, 256 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.16 Τρία παραδείγματα διαφορετικών ραδιομετρικών αναλύσεων. Από αριστερά προς τα δεξιά 8, 4, 2 bit.

3.6.2.4 Διαχρονική διαχωριστική ικανότητα (Temporal Resolution)

Η διαχρονική διαχωριστική ικανότητα αναφέρεται στο πόσο συχνά μπορεί να επαναληφθεί η λήψη εικόνων μιας περιοχής. Η ικανότητα της

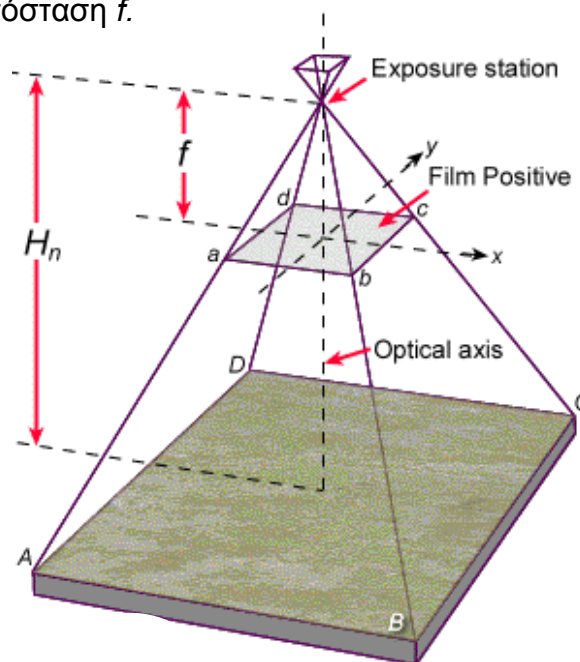
λήψης εικόνας από την ίδια περιοχή σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα είναι πολύ σημαντική για την Τηλεπισκόπηση. Τα φασματικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι δυνατό να έχουν αλλάξει μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η παρακολούθηση αυτής της αλλαγής με τη σύγκριση των δύο εικόνων. Για παράδειγμα μπορεί να διαπιστωθούν μεταβολές π.χ στην βλάστηση, στην τεκτονική κ.τ.λ.

3.7 Φωτογραφικά συστήματα και αεροφωτογραφίες

Τα φωτογραφικά συστήματα και η χρησιμοποίησή τους για αεροφωτογραφίες είναι τα απλούστερα και τα πιο παλιά συστήματα για την Τηλεπισκόπηση. Ανήκουν στην κατηγορία των παθητικών συστημάτων και χρησιμοποιούν φακό που ορίζει το βάθος πεδίου των συστημάτων. Η σχέση μεταξύ της απόστασης α ενός αντικειμένου από τον φακό, της απόστασης β του ειδώλου του από τον φακό και της εστιακής απόστασης f δίδεται από τη σχέση :

$$1 / f = (1 / (H_n - f)) + (1 / f) \quad (3.8)$$

Συνεπώς, για ένα δεδομένο φακό όπου το f είναι σταθερό, καθώς αλλάζει η απόσταση α του αντικειμένου, αλλάζει και η απόσταση β του ειδώλου από τον φακό. Για τις αεροφωτογραφίες η απόσταση των αντικειμένων είναι το άπειρο ($\alpha = \infty$), και συνεπώς η απόσταση β των ειδώλων θα πρέπει να είναι ίση με την εστιακή απόσταση f .



Σχήμα 3.17 Σχηματικό διάγραμμα της γεωμετρίας της λήψης φωτογραφιών.

Τα φωτογραφικά φιλμ που χρησιμοποιούνται είναι ευαίσθητα στα μήκη κύματος από 0,3 μm έως 0,9 μm , διάστημα που εμπεριέχει τη φωτογραφική υπεριώδης ζώνη (UV), το ορατό και το εγγυές υπέρυθρο. Ανάλογα με τα φιλμ που θα χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μήκη κύματος, προκύπτουν και οι κατηγορίες των αεροφωτογραφιών που θα προκύψουν.

(α) **Παγχρωματικές** (ασπρόμαυρες) (Panchromatic). Χρησιμοποιείται φιλμ που είναι ευαίσθητο στο φωτογραφικό υπεριώδες και στο ορατό φάσμα, και η αεροφωτογραφία που προκύπτει είναι ασπρόμαυρη με τον βαθμό ευαισθησίας του φιλμ να είναι ομοιόμορφος σε όλη την έκταση της εικόνας. Οι παγχρωματικές αεροφωτογραφίες απεικονίζουν μόνο τις μεταβολές της φωτεινότητας ενός φωτεινού πεδίου και χρησιμοποιούνται κυρίως για χαρτογραφήσεις και για φωτοερμηνεία.

(β) **Έγχρωμες**. Χρησιμοποιείται φιλμ με τρεις στρώσεις, όπου η κάθε στρώση είναι ευαίσθητη σε διαφορετικά μήκη κύματος. Έτσι για μια κανονική έγχρωμη φωτογραφία (**normal colour photograph**) οι στρώσεις του φιλμ είναι ευαίσθητες στο κόκκινο, μπλε, πράσινο (RGB) όπως και η ανθρώπινη όραση, με αποτέλεσμα να απεικονίζουν την πραγματικότητα, όπως την αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι (π.χ τα δέντρα φαίνονται πράσινα). Σε μια έγχρωμη υπέρυθρη φωτογραφία (CIR), χρησιμοποιείται φωτογραφικό φιλμ του οποίου οι στρώσεις είναι ευαίσθητες στο πράσινο, κόκκινο και φωτογραφικό υπέρυθρο. Αυτές οι φωτογραφίες ονομάζονται ψευδοχρωματικές (**false colour photography**) και χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς, επειδή διακρίνεται το καμουφλάζ (**camouflage**) από τα φυσικά φυλλώματα.



Σχήμα 3. 18 Έγχρωμη φωτογραφία.



Ψευδοχρωματική φωτογραφία.

Οι φωτογραφικές μηχανές μπορούν να τοποθετηθούν σε σύνολο διαφορετικών πλατφορμών όπως χερσαίες, σε ελικόπτερα, σε αεροσκάφη και διαστημικά σκάφη. Μεγάλης λεπτομέρειας φωτογραφίες λαμβάνονται από αεροσκάφη και είναι χρήσιμες για πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται λεπτομερής προσδιορισμός της ταυτότητας του εδάφους. Η εδαφική κάλυψη μιας φωτογραφίας εξαρτάται από την εστιακή απόσταση του φακού, το ύψος της πλατφόρμας και το είδος του φιλμ. Ενδεικτικές τιμές εστιακών αποστάσεων είναι $f = 90\text{ mm}$, 210 mm και συνήθως 152 mm .

Όσο μεγαλύτερη είναι η εστιακή απόσταση, τόσο μικρότερη είναι η εδαφική κάλυψη αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (μεγάλη κλίμακα). Η εδαφική κάλυψη εξαρτάται επίσης από το ύψος της πλατφόρμας. Σε μεγάλα υψόμετρα η φωτογραφική μηχανή "βλέπει" μια μεγαλύτερη περιοχή από ότι σε χαμηλότερα υψόμετρα αλλά με μικρότερη λεπτομέρεια (μικρή κλίμακα). Όσο αφορά την χωρική διαχωριστική ικανότητα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το φωτογραφικό σύστημα δίνει διαχωριστικές ικανότητες της τάξης των 50 cm .

Συμπερασματικά τα φωτογραφικά εικονοληπτικά συστήματα είναι χρήσιμα όταν η χωρική διαχωριστική είναι ζωτικότερης σημασίας από ότι η φασματική, διότι η τελευταία είναι μικρότερη σε σχέση με τους ηλεκτροπτικούς αισθητήρες. Αυτό συμβαίνει διότι τα έγχρωμα συμβατικά και έγχρωμα υπέρυθρα φωτογραφικά γαλακτώματα καταγράφουν σε τρεις διαφορετικές ζώνες μηκών κύματος (μπλε, κόκκινο, πράσινο) οι οποίες παρουσιάζουν επικάλυψη και είναι δύσκολο να μετρηθούν οι στενές φασματικές ζώνες που συχνά απαιτούνται για τη διάκριση χαρακτηριστικών τύπων της επιφάνειας της γης.

3.8 Εικόνες στο θερμικό υπέρυθρο

Η υπέρυθρη ζώνη διακρίνεται στην εγγύς, στη μέση και στην άπω φασματική ζώνη και είναι συνήθως μη πολωμένη ακτινοβολία. Η ζώνη του εγγύς υπέρυθρου συμπεριφέρεται με ιδιότητες ανάλογες του ορατού. Αποτελεί το ανακλώμενο υπέρυθρο που εκτείνεται από $0,76\text{ }\mu\text{m}$ μέχρι $3,0\text{ }\mu\text{m}$ και δεν χρησιμοποιείται σε θερμικές καταγραφές. Καταγραφή του εγγύς υπέρυθρου πραγματοποιείται με φιλμ, φίλτρα και φωτομηχανές που χρησιμοποιούνται και στο ορατό, με μικρές όμως διαφορές. Η ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε μήκη

κύματος από 3 έως 14 μm ονομάζεται θερμικό υπέρυθρο και υποδιαιρείται στο μέσο και άπω υπέρυθρο.

Η Τηλεπισκόπηση στο θερμικό φάσμα βασίζεται σε όργανα που διαφέρουν σημαντικά από τις φωτογραφικές μηχανές και τα φιλμ που χρησιμοποιούνται στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο. Το μέσο υπέρυθρο (3-5 μm) χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση στόχων υψηλών θερμοκρασιών, όπως πυρκαγιών, λάβας και άλλων θερμών πηγών, επειδή σύμφωνα με τον νόμο μετατοπίσεων του Wien το μέγιστο της ακτινοβολούμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε φασματική καμπύλη με θερμοκρασία 600K (327°C) περίπου. Το άπω υπέρυθρο (8-14 μm) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση των δασών, των αυτοκινητοδρόμων, των αεροδιαδρόμων και γενικά στόχων που παρουσιάζουν μέτριες θερμοκρασίες, των 300K (27°C) περίπου.

Τα θερμικά συστήματα έχουν κατά κανόνα κακή χωρική διαχωριστική ικανότητα, εν μέρει λόγω της ανάγκης να διατηρηθεί υψηλή η ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα του συστήματος, η οποία μπορεί να καταγράψει θερμοκρασιακές διαφορές της τάξης των 0,1 °C. Μια θερμική εικόνα η οποία εμπεριέχει θερμοκρασιακά δεδομένα (**θερμόγραμμα** - thermogram) απεικονίζεται με διαβαθμίσεις του γκρι, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμότερα υλικά) να έχουν φωτεινότερους τόνους του γκρι και με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες (ψυχρότερα υλικά) να έχουν σκοτεινότερους τόνους του γκρι.



Σχήμα 3.19 Θερμόγραμμα.

3.9 Ο δορυφόρος GOES

Ο GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) σχεδιάστηκε από τη NASA για λογαριασμό της εθνικής υπηρεσίας ωκεανών και ατμόσφαιρας NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Το δορυφορικό δίκτυο περιλαμβάνει δύο δορυφόρους σε υψόμετρα της τάξης των 36000 km. Ο ένας βρίσκεται σε γεωγραφικό μήκος δυτικά 75° W και καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Νότιας και Βόρειας Αμερικής καθώς και το μεγαλύτερο τμήμα του Ατλαντικού Ωκεανού. Ο άλλος βρίσκεται σε γεωγραφικό μήκος δυτικά 135° W και καλύπτει τον Ατλαντικό Ωκεανό. Η εδαφική κάλυψη που παρέχουν μαζί εκτείνεται από 20° W έως 165° E.

Ο GOES παρέχει πληροφορίες κυρίως για μετεωρολογικά δεδομένα με εικόνες κάθε 15 λεπτά με ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα 10 bit και χωρική διαχωριστική ικανότητα από 1 km έως 4 km ανάλογα με τη φασματική ζώνη. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι φασματικές ζώνες που χρησιμοποιεί, η αντίστοιχη χωρική διαχωριστική ικανότητα καθώς και οι εφαρμογές.

Πίνακας 3.2 Τα χαρακτηριστικά του GOES

| Διάυλος | Μήκος Κύματος (μm) | Χωρική Ανάλυση | Εφαρμογή |
|---------|---------------------|----------------|--|
| 1 | 0,52 – 0,72 (ορατό) | 1 km | Μόλυνση, νεφοκάλυψη, ανίχνευση τυφώνων, καταιγίδων |
| 2 | 3,78 – 4,03 | 4 km | Ανίχνευση νυχτερινής ομίχλης, ταξινόμηση νεφών νερού ή πάγου, ανίχνευση πυρκαγιών, εκρήξεων ηφαιστείων, μέτρηση επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας |
| 3 | 6,47 – 7,02 | 4 km | Παρατήρηση της κίνησης της ατμόσφαιρας |
| 4 | 10,2 – 11,2 | 4 km | Ανίχνευση ισχυρών βροχοπτώσεων κ.α |
| 5 | 11,5 – 12,5 | 4 km | Ανίχνευση μικρών ποσοτήτων υγρασίας μέτρηση επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας, ανίχνευση ηφαιστειακής τέφρας . |



Σχήμα 3.20 Ο τυφώνας Fran πλησιάζει βορειοδυτικό τμήμα των Η.Π.Α (Μπαχάμες, Σεπτέμβριος 1996.

Η NOAA είναι επίσης υπεύθυνη για άλλο ένα δορυφορικό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για μετεωρολογικούς σκοπούς όσο και για άλλες εφαρμογές. Αυτοί οι δορυφόροι έχουν ηλιο-σύγχρονες τροχιές, σχεδόν πολικές και βρίσκονται σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 830 έως 870 km, παρέχοντας αλληλοσυμπληρωματικές πληροφορίες στον GOES.

Ο αισθητήρας αυτών των δορυφόρων ονομάζεται AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) και ανιχνεύει την ακτινοβολία στο ορατό, στο εγγυές και μέσο υπέρυθρο, καθώς και στο θερμικό υπέρυθρο του φάσματος.

Πίνακας 3.3 Τα χαρακτηριστικά του NOAA AVHRR.

| Διάυλος | Μήκος Κύματος (μm) | Χωρική Ανάλυση | Εφαρμογές |
|---------|--------------------------|----------------|--|
| 1 | 0,58 – 0,68 (κόκκινο) | 1.1 km | Παρακολούθηση πάγων, νεφών, ομίχλης |
| 2 | 0,725 – 1,1 (IR) | 1.1 km | Νερό, βλάστηση, καλλιέργειες, κ.α |
| 3 | 3,55 – 3,93 (μέσο IR) | 1.1 km | Παρακολούθηση ηφαιστειών, πυρκαγιών |
| 4 | 10,3 – 11,3 (θερμικό IR) | 1.1 km | Επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας, μέτρηση υγρασίας εδαφών |
| 5 | 11,5 – 12,5 (θερμικό IR) | 1.1 km | Επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας, μέτρηση υγρασίας εδαφών. |

3.10 Οι δορυφόροι Landsat

Το πρώτο δορυφορικό σύστημα Τηλεπισκόπησης ήταν το Landsat. Αναπτύχθηκε από την αμερικανική NASA και προοριζόταν για την παροχή σχεδόν παγκόσμιας κάλυψης της γήινης επιφάνειας σε τακτή βάση. Αποτελεί το κατεξοχήν μέσο λήψης εικόνων Τηλεπισκόπησης και θεωρείται το σύστημα βάσει του οποίου αναπτύχθηκαν και ελέγχθηκαν όλα τα μετέπειτα δορυφορικά προγράμματα. Αρχικά ονομαζόταν ERTS (Earth Resources Technology Satellite), αλλά το όνομα του άλλαξε δύο μόλις χρόνια μετά την πρώτη εκτόξευση. Έξι (6) δορυφόροι Landsat τέθηκαν σε τροχιά επιτυχώς. Ο Landsat 1 εκτοξεύτηκε το 1972, ο Landsat 2 το 1975, ο Landsat 3 το 1978, ο Landsat 4 το 1982, ο Landsat 5 το 1984 και ο Landsat 7 το 1999. Κάθε δορυφόρος Landsat έχει ένα σύστημα σάρωσης γραμμών το οποίο καταγράφει εικόνες της γης σε ψηφιακή μορφή και τις μεταδίδει σε επίγειους σταθμούς.

Οι πρώτοι δορυφόροι Landsat 1, 2 και 3 ήταν σχεδιασμένοι να φέρουν δύο συστήματα δεκτών για την καταγραφή εικόνων Τηλεπισκόπησης: τη συσκευή Return Beam Vidicon (RBV) και τον πολυφασματικό σαρωτή (Multi-Spectral Scanner, MSS). Το RBV ήταν όργανο που έμοιαζε πολύ με φωτογραφική μηχανή. Παρείχε τη δυνατότητα υψηλής γεωμετρικής αλλά χαμηλής φασματικής και ραδιομετρικής ανάλυσης. Δηλαδή, οι γεωμετρικές θέσεις των διαφόρων χαρακτηριστικών της γης αντιπροσωπεύονταν με ακρίβεια, αλλά χωρίς λεπτομέρεια όσον αφορά το χρώμα και τη φωτεινότητα τους.



Σχήμα 3.21 Ο Landsat 1.

Αντίθετα, το όργανο MSS ήταν σχεδιασμένο να παρέχει "υψηλή ακρίβεια" για τα φασματικά επιφανειακά χαρακτηριστικά της γης, αλλά μικρότερη ακρίβεια εντοπισμού. Εξαιτίας τεχνικών προβλημάτων, η χρήση του RBV περιορίστηκε και ο κύριος δέκτης για τους δορυφόρους Landsat έγινε η συσκευή MSS.

Η νέα γενιά δορυφόρων Landsat 4 και 5 διέφερε σημαντικά από τους πρώτους Landsat, επειδή περιελάμβανε βελτιώσεις στην τεχνολογία των δεκτών και στις παραμέτρους της τροχιάς. Οι Landsat 4 και 5 είναι εφοδιασμένοι με μια νέα βελτιωμένη έκδοση του MSS που ονομάζεται "Θεματικός Χαρτογράφος" (Thematic Mapper, TM) σε ελεύθερη μετάφραση. Σε αυτούς τους δορυφόρους υπάρχουν και τα δύο συστήματα MSS και TM. Το TM έχει τη δυνατότητα να παρέχει καλύτερη χωρική ανάλυση, μεγαλύτερη ραδιομετρική λεπτομέρεια, και λεπτομερή φασματική πληροφορία. Στις 5 Οκτωβρίου του 1993, εκτοξεύτηκε ο νέος δορυφόρος Landsat 6, που όμως η εκτόξευση του απέτυχε και δεν κατέστη δυνατό να τεθεί στην κατάλληλη θέση στην τροχιά του.

Ο νέος δορυφόρος Landsat 7 εκτοξεύτηκε το πρώτο τρίμηνο του 1999 και κατασκευάστηκε για λογαριασμό της αμερικανικής NASA, ενώ η λειτουργία του ελέγχεται από την NOAA. Ο Landsat 7 καταγράφει 7 φασματικές ζώνες με καλύτερη χωρική ανάλυση (π.χ 15 m στην παγχρωματική, 30 m στην πολυφασματική και 60 m στη θερμική) από τους δύο προηγούμενους δορυφόρους Landsat 4 και 5. Η καταγραφή γίνεται με ένα νέο όργανο που ονομάζεται ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), που θεωρείται βελτιωμένη μορφή του TM του Landsat 5.

Η συσκευή MSS έχει 4 φασματικά κανάλια, με κάθε κανάλι να έχει χωρική διαχωριστική ικανότητα 60 x 80 m και ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα 6 bit.

Χρησιμοποιεί επίπεδο περιστρεφόμενο κάτοπτρο για να σαρώσει την επιφάνεια της γης με κατεύθυνση από δυτικά προς τα ανατολικά. Το κάτοπτρο του MSS ταλαντώνεται με πλάτος σάρωσης που αντιστοιχεί σε γωνία $11,56^{\circ}$. Σε ύψος πτήσης 918 km, η γωνία αυτή αντιστοιχεί σε λωρίδα πλάτους 185 km καθέτως προς τη διεύθυνση πτήσης του δορυφόρου. Κάθε εικόνα του MSS έχει διαστάσεις 185 km x 185 km στο έδαφος. Σε κάθε ταλάντωση του κατόπτρου δημιουργούνται έξι διαδοχικές γραμμές σάρωσης. Επομένως

επειδή καταγράφονται δεδομένα σε 4 φασματικές ζώνες, απαιτούνται $6 \times 4 = 24$ ανιχνευτές στον MSS.

Πίνακας 3.4 Φασματικές ζώνες του MSS.

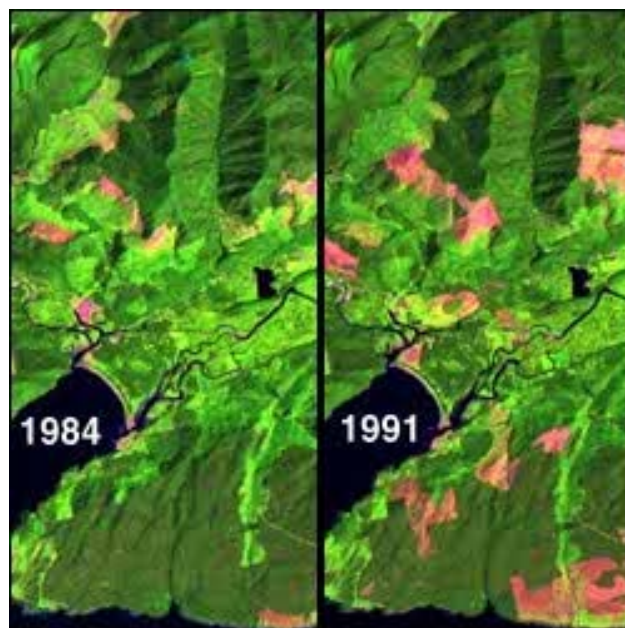
| Κανάλι | | Μήκος Κύματος (μm) |
|---------------|-------------|----------------------|
| Landsat 1,2,3 | Landsat 4,5 | |
| MSS 4 | MSS 1 | 0,5 – 0,6 (πράσινο) |
| MSS 5 | MSS 2 | 0,6 – 0,7 (κόκκινο) |
| MSS 6 | MSS 3 | 0,7 – 0,8 (υπέρυθρο) |
| MSS 7 | MSS 4 | 0,8 – 1,1 (υπέρυθρο) |

Η συλλογή δεδομένων από τον MSS τερματίστηκε το 1992 με την αντικατάσταση του από τον TM που βρισκόταν στον Landsat 4. Ο TM παρέχει βελτιώσεις σε σχέση με τον MSS όπως : καλύτερη χωρική και ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα, 7 φασματικές ζώνες, αύξηση στον αριθμό των ανιχνευτών. Έτσι η χωρική διαχωριστική ικανότητα είναι 30 m για όλες τις φασματικές ζώνες, με εξαίρεση το θερμικό υπέρυθρο (120 m), και η ραδιομετρική είναι 8 bit.

Πίνακας 3.5 Φασματικές ζώνες του TM.

| Διάυλος | Μήκος Κύματος (μm) | Εφαρμογές |
|---------|-----------------------|--|
| TM 1 | 0,45 – 0,52 (μπλε) | Διάκριση εδαφών, είδους βλάστησης |
| TM 2 | 0,52 – 0,60 (πράσινο) | Αξιολόγηση υγείας φυτών |
| TM 3 | 0,63 – 0,69 (κόκκινο) | Διάκριση τύπων βλάστησης |
| TM 4 | 0,76 – 0,90 | Καθορισμός βιομάζας και χαρτογραφίες ακτογραμμής |
| TM 5 | 1,55 – 1,75 | Αποκάλυψη υγρασίας σε εδάφη και βλάστηση |
| TM 6 | 10,4 – 12,5 | Εντοπισμός ορυκτών, υδροθερμικά εξαλλοιωμένων πετρωμάτων |
| TM 7 | 2,08 – 2,35 | Θερμικές καταγραφές, εκτίμηση εδαφικής υγρασίας |

Ο παραπάνω πίνακας δείχνει τη φασματική διαχωριστική ικανότητα του TM καθώς και τις κύριες εφαρμογές της κάθε φασματικής ζώνης.



Σχήμα 3.22 Δύο εικόνες από τον TM που δείχνουν την πορεία της υλοτόμησης από το 1984 έως το 1991.

3.11 Οι δορυφόροι SPOT

Το γαλλικό πρόγραμμα Τηλεπισκόπησης SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) ξεκίνησε το 1977. Ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 21 Φεβρουαρίου του 1986 και σχεδιάστηκε από το Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) στην Τουλούζη, σε συνεργασία με άλλα ευρωπαϊκά κέντρα. Το σύστημα SPOT σχεδιάστηκε για μελέτες χρήσεων γης, για εκτίμηση των ανανεώσιμων φυσικών διαθεσίμων, για ανίχνευση ορυκτών και για χαρτογραφικές μελέτες σε κλίμακες 1:50.000 και 1:100.000.

Οι συσκευές του SPOT αποτελούνται από δύο πανομοιότυπους δέκτες, έναν πομπό και μαγνητικούς καταγραφείς. Οι δύο δέκτες, γνωστοί ως όργανα HRV (High Resolution Visible) έχουν τη δυνατότητα σάρωσης χωρίς τη μηχανική περιστροφή κάποιου κατόπτρου. Το HRV καλύπτει μια επιφάνεια εμβαδού 60 x 60 m στο έδαφος. Δύο όμως πανομοιότυπα όργανα HRV εγκατεστημένα το ένα δίπλα στο άλλο στον δορυφόρο δημιουργούν λωρίδα σάρωσης πλάτους 117 km.

Το σύστημα HRV μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους και να καλύπτει εικόνες στην παγχρωματική (P) και στην πολυφασματική ζώνη (XS).

Στην παγχρωματική κάλυψη, ο δέκτης είναι ευαίσθητος για καταγραφές στη ζώνη του φάσματος από $P = 0,51-0,73 \mu\text{m}$. Απεικονίζει μία λωρίδα πλάτους

60 km ίση με 6.000 ψηφίδες ανά γραμμή σάρωσης με χωρική ανάλυση 10 m x 10 m. Σε αυτήν την παγχρωματική εικόνα, το σύστημα HRV έχει υψηλή χωρική ανάλυση αλλά καταγράφει μια ευρεία περιοχή του φάσματος.

Στην πολυφασματική κάλυψη, το σύστημα HRV καταγράφει τρεις ζώνες του φάσματος: Δίαυλος 1 (XS - 1 = 0,50 - 0,59 μm , πράσινο). Δίαυλος 2 (XS - 2 = 0,61 - 0,68 μm , ερυθρό), και Δίαυλος 3 (XS - 3 = 0,79 - 0,89 μm , εγγύς υπέρυθρο). Και εδώ ο δέκτης απεικονίζει λωρίδα πλάτους 60 km ίση, χρησιμοποιώντας 3.000 ψηφίδες για κάθε γραμμή σάρωσης με χωρική ανάλυση 20 m x 20 m. Οι τρεις εικόνες (δίαυλοι) από την πολυφασματική (XS) λειτουργία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν ψευδο-χρωματική εικόνα όπως και στον Landsat.

Ο δορυφόρος SPOT είναι σε ηλιο-σύγχρονη τροχιά γύρω στα 832 km, διασχίζοντας τον ισημερινό στις 10:30 πμ. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των δορυφόρων SPOT φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 Φασματικές ζώνες του SPOT.

| Mode/Band | Μήκος Κύματος (μm) |
|---------------------|---------------------------------|
| Παγχρωματική (PLA) | 0,51 – 0,73 |
| Πολυφασματική (MLA) | |
| Δίαυλος 1 | 0,50 – 0,59 |
| Δίαυλος 2 | 0,61 – 0,68 |
| Δίαυλος 3 | 0,79 – 0,89 |

Ο δορυφόρος SPOT-3 εκτοξεύτηκε και λειτούργησε από τις αρχές του 1994 μέχρι και το 1997, όπου για κάποιο λόγο σταμάτησε να λειτουργεί. Ο SPOT - 4 εκτοξεύτηκε τον Μάρτιο του 1998 και φέρει ένα νέο όργανο που ονομάζεται HRVIR (High Resolution Visible and Infrared). Έτσι θα υπάρχει ένα επιπλέον πολυφασματικό κανάλι στη μέση υπέρυθρη ζώνη 1,85 -1,75 μm , αλλά δεν θα υπάρχει παγχρωματική καταγραφή. Αντ' αυτού όμως, στο κανάλι 0,68 - 0,68 μm θα διαθέτει χωρική ανάλυση όχι μόνον των 20 m αλλά και των 10 m.

3.12 Το ρώσικο σύστημα KVR - 1000

Το σύστημα KVR-1000 χρησιμοποιήθηκε ως αναγνωριστική φωτογραφική μηχανή από την πρώην Σοβιετική Ένωση. Ονομάστηκε έτσι επειδή διέθετε φωτομηχανή εστιακής απόστασης $f = 1000 \text{ mm}$ και από τα αρχικά Kamera Vysokogo Razresheniya (κάμερα υψηλής χωρικής ανάλυσης). Αρκετές φορές κάθε χρόνο οι Ρώσοι έθεταν σε τροχιά μία φωτομηχανή KVR-1000 για να καταγράψει τη γήινη επιφάνεια για διάστημα 45 ημερών. Φωτογράφιζε σχεδόν το ήμισυ της στερεάς γης κατά μήκος της τροχιάς του από ένα χαμηλό ύψος της τάξης των $h = 220 \text{ km}$ με κλίση τροχιάς $i = 65^\circ$. Σε αυτό το ύψος το KVR-1000 φωτογράφιζε εικόνες με χωρική (γεωμετρική) ανάλυση 2-3 m. Σήμερα οι φωτογραφίες αυτές από το KVR-1000 έχουν μετατραπεί σε ψηφιακές εικόνες μετά από σάρωση και διατίθενται στην αγορά.

3.13 Ο δέκτης Skylab S - 192

Το διαστημόπλοιο Skylab ήταν επανδρωμένο και εκτοξεύτηκε το 1973 από τη NASA των ΗΠΑ. Είχε σχεδόν κυκλική τροχιά και τέθηκε εκτός λειτουργίας τον Φεβρουάριο του 1975. Το 1979 εισήλθε στη γήινη ατμόσφαιρα, πράγμα που είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή του κάπου κοντά στην Αυστραλία.

Ένα από τα πειράματα του Skylab ήταν και ο οπτικο-μηχανικός σαρωτής S-192, που έφερε 13 διαύλους καταγραφής. Έφερε ένα σύνολο οργάνων, γνωστών ως EREP (Earth Resources Experiment Package). Η τροχιά είχε κλίση $i = 50^\circ$ ως προς τον ισημερινό, και ύψος πτήσης $h = 435 \text{ Km}$. Με αυτήν την τροχιά μπορούσε να παρατηρήσει το 75% της γήινης επιφάνειας από γεωγραφικά πλάτη 50° νότια μέχρι 50° βόρεια. Το σύστημα EREP αποτελείτο από 6 τύπους ανιχνευτών. Ένας από αυτούς ήταν και ο πολυφασματικός σαρωτής S-192, ο οποίος χρησιμοποιούσε κωνικό σαρωτή. Οι διαδρομές των τροχιών επαναλαμβάνονταν κάθε 5 ημέρες, αλλά δεν υπήρχε πλήρης κάλυψη της γης λόγω νεφοκάλυψης και λόγω του χρονο-διαγράμματος των αστροναυτών. Το Skylab εκτοξεύτηκε ανεπάνδρωτο αλλά επανδρωνόταν αργότερα από τα διαστημόπλοια Apollo. Οι μαγνητικές ταινίες και τα φιλμ επιστρέφονταν στη γη με τους αστροναύτες. Εξαιτίας των

πολύπλοκων γεωμετρικών διορθώσεων που απαιτούνται για τις εικόνες του Skylab, δεν έχει γίνει ευρεία χρήση των εικόνων και φωτογραφιών του (S - 90A και S - 190B).

3.14 Ο ιαπωνικός δορυφόρος MOS

Οι δορυφόροι MOS - 1 και MOS - 1b (Marine Observation Satellites) εκτοξεύτηκαν από την Ιαπωνία τον Φεβρουάριο του 1987 και τον Ιανουάριο του 1990 αντίστοιχα. Αν και αρχικά είχαν ως στόχο τις ωκεανογραφικές παρατηρήσεις, τα δεδομένα από τους δύο οπτικούς ανιχνευτές, τον MESSR (Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer) και τον VTIR (Visible and Thermal Infrared Radiometer), κατέληξαν να έχουν εφαρμογές και σε άλλα πεδία της Τηλεπισκόπησης. Οι δορυφόροι αυτοί φέρουν και το ραδιόμετρο μικροκυματικής σάρωσης MSR (Microwave Scanning Radiometer) για την καταγραφή της υγρασίας εδάφους, και για εφαρμογές στους πάγους και τα χιόνια.

Πίνακας 3.7 Τα χαρακτηριστικά του MOS.

| Αισθητήρας | Μήκος Κύματος (μm) | Χωρική Ανάλυση | Πλάτος Ζώνης |
|------------|--------------------|----------------|--------------|
| MESSR | 0,51 – 0,59 | 50 m | 100 km |
| | 0,61 – 0,69 | 50 m | 100 km |
| | 0,72 – 0,80 | 50 m | 100 km |
| | 0,80 – 1,10 | 50 m | 100 km |
| VTIR | 0,50 – 0,70 | 900 m | 1500 km |
| | 6,0 – 7,0 | 2700 m | 1500 km |
| | 10,5 – 11,5 | 2700 m | 1500 km |
| | 11,5 - 12,5 | 2700 m | 1500 km |

3.15 Ο ινδικός δορυφόρος IRS

Η Ινδία έχει πετάξει μια σειρά δορυφόρων Τηλεπισκόπησης από το 1988, όπως οι IRS - 1A, IRS - 1B, IRS - 1E, IRS - P2, IRS - 1C, IRS - P3, και IRS -1D. Ο τελευταίος δορυφόρος, IRS - 1D, διαθέτει τρεις σειρές ανιχνευτών, την παγχρωματική μηχανή (PAN), τον αισθητήρα LISS - III (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) και τον αισθητήρα ευρέος πεδίου WiFS (Wide Field Sensor). Η παγχρωματική μηχανή PAN (Band - 1) παρέχει χωρική

ανάλυση 5,8 x 5,8 m με πλάτος λωρίδας σάρωσης 70 km. Η μηχανή αυτή μπορεί να κατευθυνθεί σε πλάγια λήψη και κατά αυτόν τον τρόπο να επαναλάβει τη λήψη εικόνων μιας τοποθεσίας κάθε 5 ημέρες. Ο αισθητήρας LISS-III παρέχει πολυφασματικά στοιχεία σε τέσσερις φασματικές ζώνες. Η χωρική ανάλυση του φθάνει τα 23,5 x 23,5 m με πλάτος λωρίδας 141 Km για τις τρεις ζώνες (Band-2 = 0,520-0,590 μm, Band-3 = 0,620-0,680 μm, Band-4 = 0,770-0,860 μm), και τα 70,5 m x 70,5 m με πλάτος λωρίδας 148 km για την τελευταία ζώνη (Band-5 = 1,55-1,70 μm). Στον αισθητήρα ευρέος πεδίου WiFS υπάρχουν δύο φασματικές ζώνες με πλάτος λωρίδας σάρωσης 810 Km και με χωρική ανάλυση 188,3 m x 188,3 m.

Πίνακας 3.8 Τα χαρακτηριστικά του IRS.

| Αισθητήρας | Μήκος Κύματος (μm) | Χωρική Ανάλυση | Πλάτος Ζώνης | Επαναληπτικότητα |
|----------------|--------------------|----------------|--------------|------------------|
| PAN | 0,5 – 0,75 | 5,8 m | 70 km | 24 ημέρες |
| LISS-II | | | | |
| Πράσινο | 0,52 – 0,59 | 23 m | 142 km | 24 ημέρες |
| Κόκκινο | 0,62 – 0,68 | 23 m | 142 km | 24 ημέρες |
| Ε. Υπέρυθρο | 0,77 – 0,86 | 23 m | 142 km | 24 ημέρες |
| Μέσο Υπέρυθρο | 1,55 – 1,70 | 70 m | 148 km | 24 ημέρες |
| WiFS | | | | |
| Κόκκινο | 0,62 – 0,68 | 188 m | 774 km | 5 ημέρες |
| Ε. Υπέρυθρο | 0,77 – 0,86 | 188 m | 774 km | 5 ημέρες |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΙΚΟΝΟΛΗΠΤΙΚΟ RADAR

4.1 Γενικά

Radar είναι η συντομογραφία της αγγλικής έκφρασης “**R**adio **d**etection and **r**anging”, που υποδηλώνει ότι το σύστημα αυτό λειτουργεί στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών και των μικροκυμάτων και ανιχνεύει την ανακλώμενη ή ακτινοβολούμενη ενέργεια από το έδαφος.

Σε αντίθεση με τα παθητικά ραδιόμετρα μικροκυμάτων που ανιχνεύουν την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα της γης, ένα *ενεργό εικονοληπτικό σύστημα Radar* εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας μικρής διάρκειας και καταγράφει τις επιστροφές τους από τους στόχους της επιφάνειας.

Το Radar εκπέμπει μικροκυματική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από κεραία μεταφερόμενη είτε από αεροσκάφος είτε από δορυφόρο για να ακτινοβολεί την επιφάνεια της γης, ώστε να μετρά την ένταση αλλά και τη διαφορά φάσης της επιστρέφουσας σκεδασμένης ακτινοβολίας. Παρέχοντας τη δική του ακτινοβολία, το Radar λειτουργεί εντελώς ανεξάρτητα από το ηλιακό φως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και της νύχτας και κατά κανόνα δεν είναι ευαίσθητο στις καιρικές συνθήκες.

Το εικονοληπτικό Radar παρέχει πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα) καθώς και για τις διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας.

Συνοψίζοντας, το Radar είναι ένα ενεργό εικονοληπτικό σύστημα κατάλληλο για την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων με βραχύχρονες εξελίξεις, όπου απαιτούνται επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις ανεξάρτητα από τις συνθήκες “οπτικής ορατότητας”.

4.2 Μήκη Κύματος

Το Radar χρησιμοποιεί μονοχρωματική σύμφωνη ακτινοβολία συγκεκριμένων μήκων κύματος λ . Ο Πίνακας 4.1 παραθέτει τα διάφορα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για το Radar καθώς και την συχνότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπει.

Πίνακας 4.1 Ονομασία και μήκη κύματος των Radar.

| Ονομασία Ζώνης | Συχνότητα (GHz). | Ζώνη μήκους κύματος λ (cm) | Συμβατικές Ζώνες Radar |
|----------------|------------------|------------------------------------|------------------------|
| Ka | 26,5 - 40 | 0,75 - 1,1 | 0,86 cm |
| K | 18 - 25,5 | 1,1 - 1,67 | |
| Ku | 12,5 - 18 | 1,7 - 2,4 | |
| X | 8 - 12, 5 | 2,4 - 3,8 | 3 -3,2 cm |
| C | 4 - 8 | 3,8 - 7,5 | 6 cm |
| S | 2 - 4 | 7,5 - 15,0 | |
| L | 1 - 2 | 15 - 30 | 23,5 cm 24cm 25 cm |
| P | 0,3 - 1 | 30 - 100 | 68 cm |

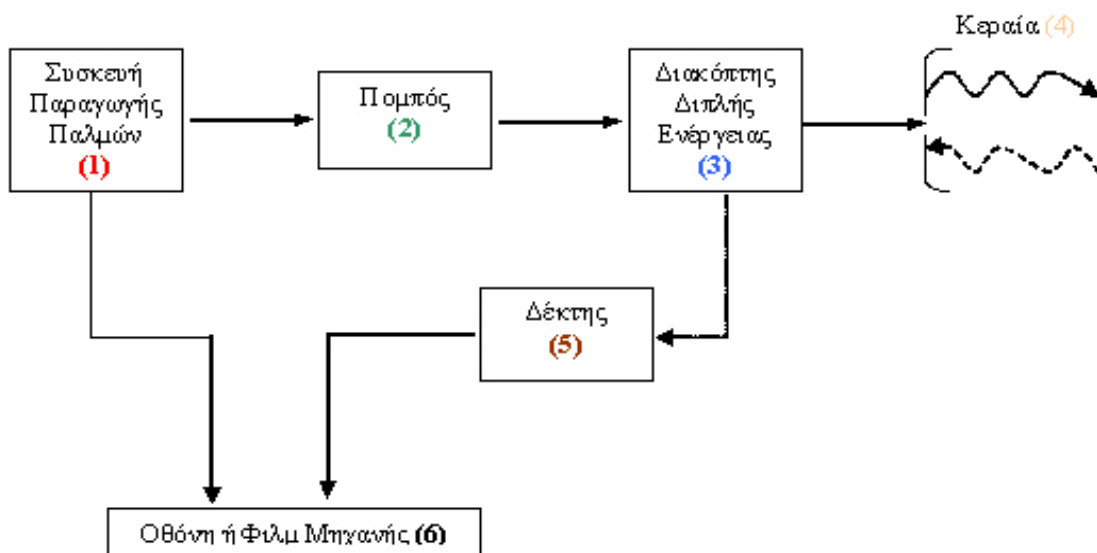
Το ενεργό εικονοληπτικό σύστημα Radar (όπως προαναφέρθηκε) δεν εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία αλλά παρέχει την δική του ακτινοβολία της οποίας το μήκος κύματος μπορεί να επιλεγθεί ανάλογα με την περίπτωση. Η επιλογή του μήκους κύματος (συχνότητας) είναι τέτοια ώστε η απορρόφηση (εξασθένηση) από ατμοσφαιρικά μόρια (οξυγόνο ή υδρατμοί) καθώς και η σκέδαση να είναι μικρή. Αναφορικά στο εύρος συχνοτήτων 1 - 10 GHz (3 - 30 cm) η ατμοσφαιρική απορρόφηση τείνει στο 0% (Curlander J. C., 1991).

Με αυτό τον τρόπο ένα ενεργό εικονοληπτικό σύστημα Radar είναι πάντα ικανό να απεικονίζει την επιφάνεια της γης ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.

Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε βροχοπτώσεις και κάτω από την γήινη επιφάνεια αυξάνεται με το μήκος κύματος. Έτσι τα μικροκύματα μεγάλου μήκους κύματος, όπως τα L και τα P, έχουν την ικανότητα να διαπερνούν ξηρές επιφάνειες, όπως άμμο, χιόνι και βλάστηση, σε βάθος.

4.3 Γενική περιγραφή εικονοληπτικού συστήματος Radar

Ένα τυπικό σύστημα Radar (Σχήμα 4.1) αποτελείται από (1) την συσκευή παραγωγής παλμών η οποία εκπέμπει μικροκυματική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τη βοήθεια ενός (2) πομπού. Ο πομπός διαμέσου ενός (3) διακόπτη διπλής ενέργειας (εκπομπής-λήψης) μεταβιβάζει την ακτινοβολία σε μια (4) κατευθυνόμενη κεραία η οποία διαμορφώνει και εναρμονίζει κάθε παλμό ώστε να τον μεταδώσει στον εξεταζόμενο στόχο. Οι ανακλώμενοι παλμοί συλλέγονται από την ίδια κεραία και μεταβιβάζονται σε ένα (5) δέκτη ο οποίος τους ενισχύει και τους μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα.



Σχήμα 4.1 Τα διάφορα μέρη του Radar.

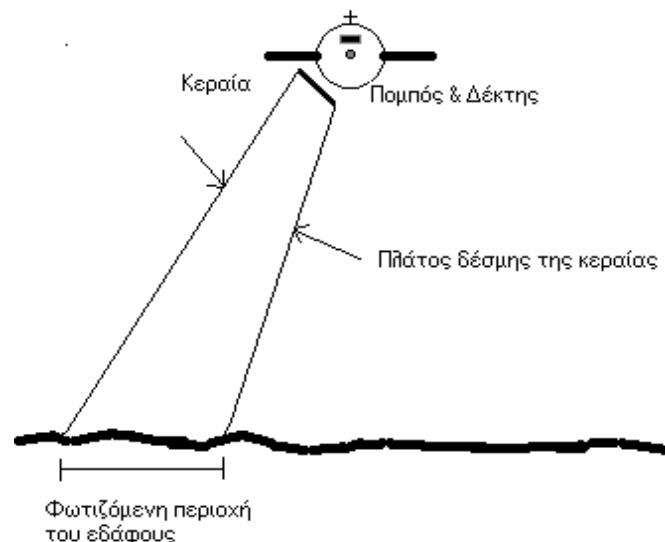
Ο δέκτης καταγράφει το σήμα Radar για κάθε επιστρεφόμενο ανακλώμενο παλμό. Η χρονική διάρκεια κάθε παλμού είναι της τάξης του msec (περίπου 1500 παλμοί / sec) και η ταχύτητα διάδοσης τους είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός. Το πλάτος του σήματος είναι ανάλογο με την ένταση του λαμβανόμενου παλμού. Αναλόγως, το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα διαμορφώνει την ένταση μιας μετακινούμενης κηλίδας φωτός σε μια (6) οθόνη (CRT). Το φως της κηλίδας εστιάζεται σε φωτογραφικό φιλμ και σαρώνεται εγκάρσια της διεύθυνσης μετακίνησης του φιλμ. Σε κάθε επιστρεφόμενο παλμό αντιστοιχεί μια γραμμή σάρωσης του φιλμ. Τελικά οι παλμοί

καταγράφονται ο ένας δίπλα στον άλλον καθώς μετακινείται το φιλμ σχηματίζοντας μια δισδιάστατη εικόνα Radar.

4.4 Συστήματα Radar από αέρος

4.4.1 Γενικά

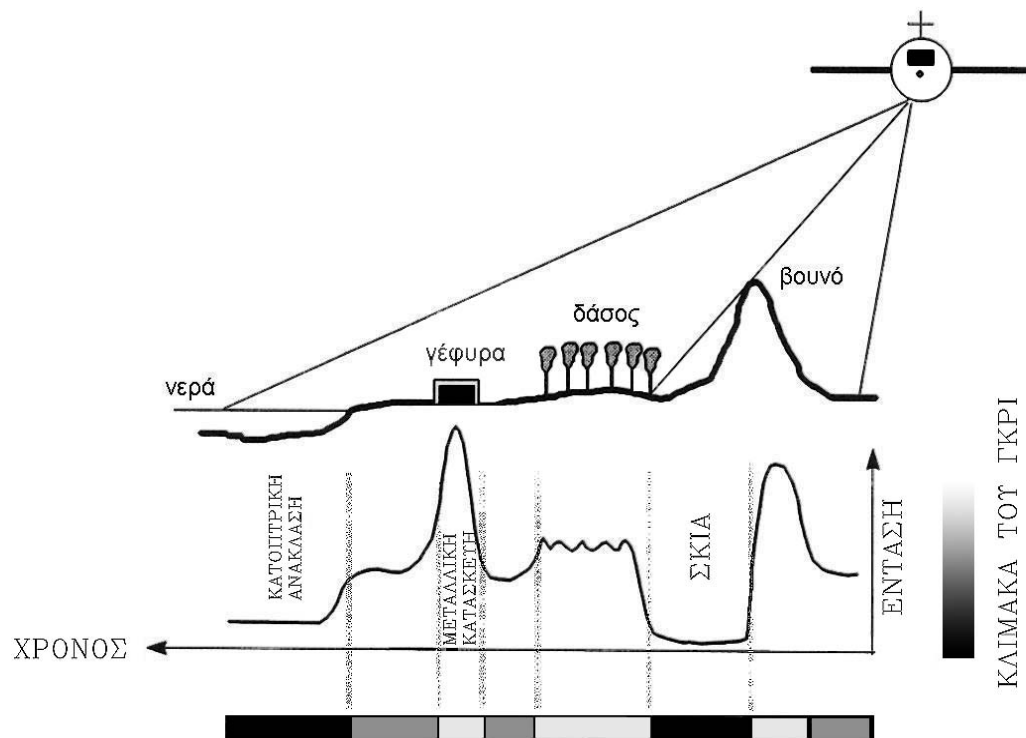
Ένα σύστημα Radar μπορεί να τοποθετηθεί και να μεταφερθεί από ένα αεροσκάφος ή από ένα δορυφόρο στην υπό εξέταση περιοχή που ενδιαφέρει ώστε να σχηματιστεί η εικόνα του εξεταζόμενου εδάφους. Το σύστημα αυτό (Σχήμα 4.2) ονομάζεται SLAR (Side Looking Airborne Radar).



Σχήμα 4.2 Το Radar πλευρικής κάλυψης SLAR.

Μια μακριά, ευθύγραμμη κεραία η οποία μοιάζει με κύλινδρο κομμένο κατά τον μεγάλο του άξονα, είναι τοποθετημένη κατά μήκος της ατράκτου ενός αεροσκάφους. Η κεραία εκπέμπει παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πλευρικά του αεροσκάφους και εγκάρσια της κατεύθυνσης πτήσεως.

Ο παλμός ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός μέχρι να “φωτίσει” στενές λωρίδες του εδάφους καθέτως προς την γραμμή πτήσης του αεροσκάφους όπου και τελικά ανακλάται. Εξαιτίας της σκέδασης, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαχέεται σε διάφορες κατευθύνσεις και ένα μέρος της επιστρέφει στην κεραία όπου γίνεται η επεξεργασία της.



Σχήμα 4.3 Η αρχή λειτουργίας του Radar.

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται μια λωρίδα κάλυψης του εδάφους που επιστρέφει στην κεραία. Ο παλμός απεικονίζεται ως συνάρτηση του χρόνου μετάβασης και επιστροφής στον οριζόντιο άξονα με τους μικρότερους χρόνους δεξιά και εγγύτερα στο ίχνος του αεροσκάφους.

Οι μεγαλύτεροι χρόνοι μετάβασης βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος και απώτερα του ίχνους του αεροσκάφους.

Για να προσδιοριστούν οι θέσεις των σημείων στο έδαφος, ο χρόνος διάδοσης του παλμού μετατρέπεται σε απόσταση με το να τον πολλαπλασιαστεί με την ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η πλευρά του βουνού που αντικρίζει την κεραία, εξαιτίας του προσανατολισμού της σε σχέση με την κεραία του Radar, παρουσιάζει ισχυρή επιστροφή σήματος. Το βουνό εμποδίζει τον εκπεμπόμενο παλμό να προσπέσει πάνω στο έδαφος ακριβώς πίσω του. Συνεπώς δεν υπάρχει σήμα επιστροφής για αυτήν την υποσκιαζόμενη περιοχή. Σε αυτήν την περίπτωση η προσκύπτουσα σκοτεινή χαρακτηριστική απόκριση της εικόνας ονομάζεται **σκιά** του Radar.

Εν συνεχεία, η βλάστηση δημιουργεί μια “πιτσιλωτή” εικόνα (signature) μέσης έντασης, εξαιτίας των πολλαπλών μορφών και σχημάτων και προσανατολισμού των φυτών.

Τα μεταλλικά αντικείμενα όπως η γέφυρα του Σχήματος 4.3, προκαλούν ισχυρά σήματα επιστροφής εξαιτίας της γεωμετρίας και των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των μετάλλων.

Τέλος, η ενέργεια του Radar που προσπίπτει σε ήρεμα νερά ανακλάται κατά μεγάλο μέρος με γωνία ανάκλασης ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Ελάχιστη ενέργεια τότε επιστρέφει στην κεραία αποδίδοντας σκοτεινό σήμα. Λείες επιφάνειες όπως ασφαλτικοί τάπητες, επιφάνειες αποξηραμένων λιμνών, διάδρομοι αεροδρομίων, μεγάλοι δρόμοι, νερά χωρίς κυματισμούς, κλπ. ονομάζονται **στόχοι κατοπτρικής ανάκλασης** (specular targets). Όταν οι επιφάνειες αυτές βρίσκονται κοντά στον άξονα πτήσης καταλήγουν σε σήμα ανοικτού τόνου του γκρι, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όταν βρίσκονται μακριά από τον άξονα πτήσης, δημιουργούν σκούρους τόνους του γκρι (μηδενική επιστροφή σήματος).

Ο παλμός επιστροφής του Radar μετατρέπεται σε γραμμή σάρωσης πάνω σε οθόνη αντιστοιχίζοντας σκούρους τόνους σε σήματα επιστροφής χαμηλής έντασης και φωτεινούς τόνους σε σήματα επιστροφής υψηλής έντασης. Η προκύπτουσα γραμμή σάρωσης καταγράφεται πάνω σε ρολό φιλμ που μετακινείται συγχρόνως με την ταχύτητα του αεροσκάφους. Καθώς το αεροσκάφος μετακινείται προς τα εμπρός, διαδοχικές γραμμές σάρωσης παράγονται ώστε να σχηματίσουν την τελική εικόνα του Radar.

Είναι σημαντικός ο ρόλος των ιδιοτήτων της πηγής (Radar) αλλά και του εξεταζόμενου στόχου. Οι χαρακτηριστικές φασματικές ταυτότητες (signatures) που γίνονται αντιληπτές από το Radar είναι μία πολύπλοκη συνάρτηση των αλληλεπιδράσεων του εδάφους και του εκπεμπόμενου παλμού και θα εξεταστούν στη συνέχεια.

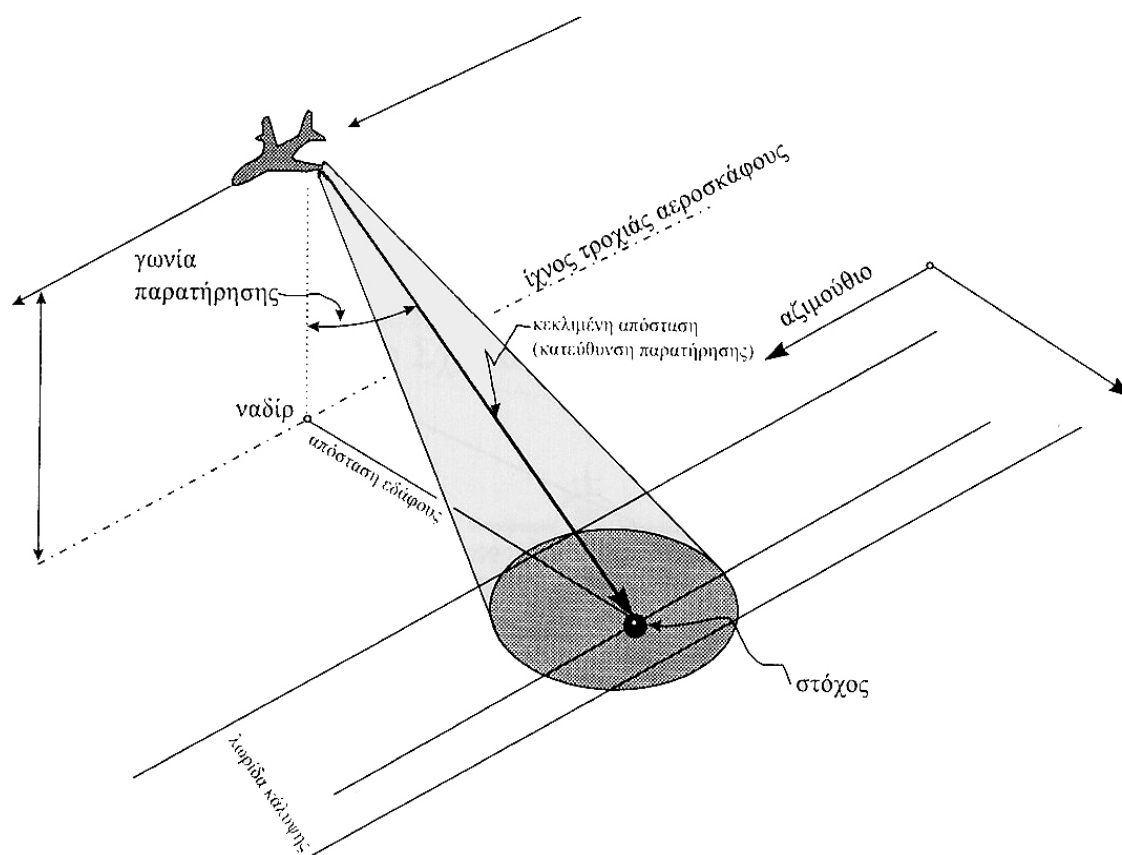
4.4.2 Είδη Radar

Στην Τηλεπισκόπηση υπάρχουν δύο είδη εικονοληπτικών SLAR Radar, τα Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture Radar, **RAR**) και τα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar, **SAR**).

4.4.3 Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας RAR

Το Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας (RAR) χρησιμοποιεί κεραία μέγιστου πρακτικού μήκους ώστε να εκπέμψει στενή γωνιακή δέσμη ακτινοβολίας. Οι διαστάσεις της “φωτιζόμενης” επιφάνειας εδάφους από το Radar ελέγχονται από διάφορες μεταβλητές. Μια από αυτές είναι το φυσικό (ενεργό) μήκος D της κεραίας σε σχέση με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας.

Μια κεραία μεγάλου μήκους D επιτρέπει στο σύστημα να εστιάζει ενέργεια σε μικρή, στενή περιοχή του εδάφους. Επομένως τα συστήματα (RAR) απαιτούν μεγάλου μήκους κεραίες για να επιτύχουν λεπτομερή απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους. Συνήθως η ικανότητα του αεροσκάφους να μεταφέρει μεγάλες κεραίες εν πτήση αποτελεί και το πρακτικό όριο για τη διαχωριστική ικανότητα (χωρική ανάλυση) των απεικονίσεων (RAR). Ο περιορισμός του μήκους D της κεραίας αποτελεί το περιοριστικό όριο για χρήση των συστημάτων RAR από διαστημόπλοια και δορυφόρους.



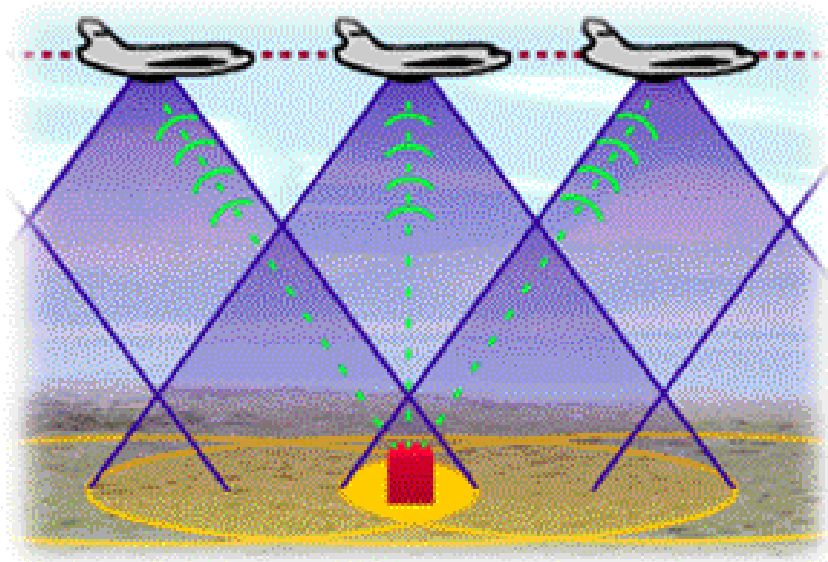
Σχήμα 4.4 Η γωνία παρατήρησης και η γεωμετρία της σάρωσης του Radar.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η γεωμετρία σάρωσης του Radar. Η γωνία από το ναδίρ μέχρι τον στόχο ονομάζεται γωνία παρατήρησης (look angle) και η γωνία του πλάτους της δέσμης της κεραίας ονομάζεται γωνιακό πλάτος της δέσμης της κεραίας.

4.4.4 Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR

Το Radar συνθετικού ανοίγματος αναπτύχθηκε για να ξεπεράσει το μειονέκτημα του πεπερασμένου μήκους της κεραίας του συστήματος RAR. Το σύστημα συνθετικού ανοίγματος χρησιμοποιεί σχετικά μικρή κεραία που εκπέμπει μια μετρίου εύρους δέσμη ακτινοβολίας μικροκυμάτων.

Το σύστημα (SAR) έχει την ικανότητα να συνθέτει μια πάρα πολύ μεγάλη κεραία τεχνητά χρησιμοποιώντας την πρόσω κίνηση του αεροσκάφους και την αρχή του φαινομένου Doppler, με μικρού όμως μήκους κεραία. Οι διαδοχικές θέσεις της κεραίας Radar (Σχήμα 4.5) κατά τη διάρκεια της πτήσης αξιοποιούνται με ηλεκτρονικά μέσα και μπορούν να θεωρηθούν ως θέσεις ενός τμήματος μιας πολύ μεγαλύτερης σε μήκος συνθετικής κεραίας.



Σχήμα 4.5 Διαδικασία σύνθεσης μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας κατά Doppler.

Οι συστηματικές αλλαγές που εμφανίζονται στη συχνότητα του ανακλώμενου σήματος του Radar αποτελούν βασικό στοιχείο της περαιτέρω επεξεργασίας.

Τα αντικείμενα-στόχοι παρουσιάζουν διαφορετικές μετατοπίσεις στη συχνότητα κατά Doppler σε σχέση με τις αποστάσεις τους από τη γραμμή πτήσης του αεροσκάφους. Η μικρή κεραία (SAR) εκπέμπει δέσμη ακτινοβολίας μεγάλου γωνιακού πλάτους β κατά την εγκάρσια διεύθυνση της πτήσης σε τακτά χρονικά διαστήματα και κατά μήκος της γραμμής πτήσης (Σχήμα 4.5).

Κατά τη διαδικασία της σάρωσης, εξαιτίας του μεγάλου γωνιακού πλάτους β της δέσμης, οι στόχοι εμφανίζονται αρχικά στο "οπτικό" πεδίο της κεραίας, κατόπιν μετακινούνται εντός του πεδίου και τελικά εξέρχονται. Ο δέκτης (SAR) μετρά και καταγράφει τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ εκπομπής και λήψης του παλμού και καθορίζεται η διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση.

Αν απομονωθεί ένας στόχος ως χαρακτηριστικό στοιχείο του εδάφους, θα εμφανιστούν οι ακόλουθες διαμορφώσεις στη συχνότητα της ακτινοβολίας του παλμού.

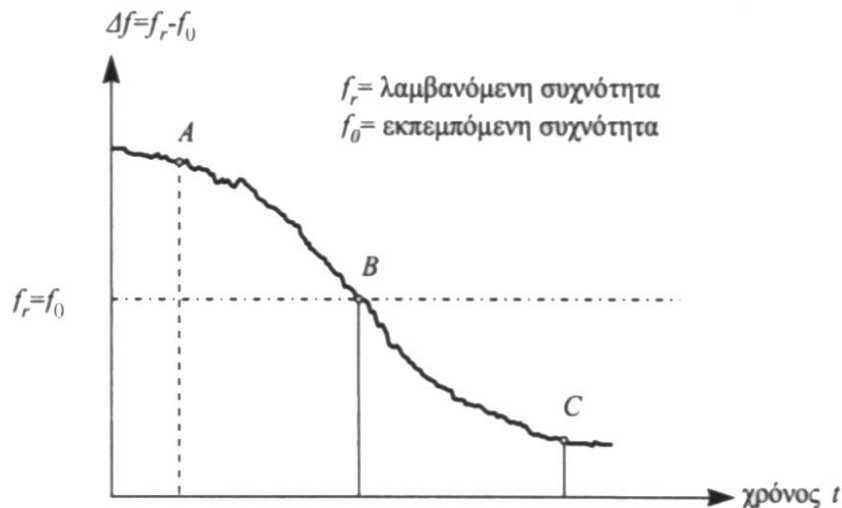
Πρώτον, όταν ο στόχος εισέρχεται στο οπτικό πεδίο της δέσμης μπροστά από το αεροσκάφος (ή δορυφόρο), τότε το σήμα επιστροφής μετατοπίζεται προς υψηλότερες συχνότητες (θετικό Doppler).

Δεύτερον, όταν το αεροσκάφος είναι κάθετο προς τη θέση του στόχου, δεν υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα (μηδενικό Doppler).

Τρίτον, καθώς το αεροσκάφος απομακρύνεται από τον στόχο, τα σήματα επιστροφής εμφανίζονται με μικρότερες συχνότητες (αρνητικό Doppler) απ' ό,τι το εκπεμπόμενο σήμα του παλμού.

Μια κεραία π.χ. φυσικού μήκους 1 ή 2 m μπορεί να δημιουργήσει τεχνητά κεραία μήκους 600 m.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται οι ακόλουθες διαμορφώσεις στη συχνότητα της ακτινοβολίας του παλμού για ένα απομονωμένο στόχο ως χαρακτηριστικό στοιχείο του εδάφους. Όταν ο στόχος εισέρχεται στο οπτικό πεδίο της δέσμης μπροστά από το αεροσκάφος ή το δορυφόρο, τότε το σήμα επιστροφής μετατοπίζεται προς υψηλότερες συχνότητες (θετικό Doppler). Όταν ο στόχος είναι κάθετος προς το αεροσκάφος, δεν υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα (μηδενικό Doppler). Τέλος όταν το αεροσκάφος απομακρύνεται από τον στόχο, τα σήματα επιστροφής εμφανίζονται με μικρότερες συχνότητες (αρνητικό Doppler) απ' ό,τι το εκπεμπόμενο σήμα του παλμού.



Σχήμα 4.6 Η διαδικασία μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler.

Το ιστορικό της μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler συγκρίνεται με την εκπεμπόμενη συχνότητα του παλμού. Η διαφορά ονομάζεται **ιστορικό φάσης** (phase history) και περιλαμβάνει καταγραφή των μεταβολών της συχνότητας της ακτινοβολίας όπως έγιναν αντιληπτές από τη μετακινούμενη κεραία.

Τα ιστορικά φάσης καταγράφονται είτε σε φιλμ είτε σε μαγνητικά μέσα για περαιτέρω επεξεργασία. Η ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων (SAR) και ο μετασχηματισμός τους από αρχικά πρωτογενή σε ερμηνεύσιμα δεδομένα πραγματοποιείται υπολογιστικά.

Τα ψηφιακά δεδομένα (SAR) περιλαμβάνουν ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις και τελικά είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν εικόνες Radar σε οθόνη ή σε διαθέσιμο φιλμ.

Για να δημιουργηθούν εικόνες Radar που να μπορούν να ερμηνευτούν βάσει των ιστορικών αρχείων φάσης, πρέπει να γίνει επεξεργασία των διαθέσιμων των φιλμ με οπτικά μέσα. Τα διαθέσιμα περιέχουν τα ιστορικά φάσης εκατομμυρίων στόχων, κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται ως οριζόντιες γραμμές σκούρων ή ανοικτών τόνων του γκρι διαφορετικού μήκους. Με κάποια οπτική συσχέτιση, τα διαθέσιμα των φιλμ προβάλλονται με φως laser και κάθε ιστορικό αρχείο φάσης μετατρέπεται από πληροφορία συχνότητας σε τελική εικόνα, που ονομάζεται ολόγραμμα Radar (Radar Hologram).

Στην παρούσα εργασία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR).

4.5 Θεμελιώδεις έννοιες

4.5.1 Πόλωση

Το διάνυσμα E του ηλεκτρικού πεδίου του εκπεμπόμενου παλμού Radar μπορεί να πολωθεί ή να ταλαντωθεί, ή στο κατακόρυφο ή στο οριζόντιο επίπεδο. Κατά την πρόσπτωσή του στο έδαφος η περισσότερη ενέργεια που επιστρέφει προς την κεραία Radar διατηρεί την ίδια πόλωση με εκείνη της εκπομπής. Η ακτινοβολία αυτή καταγράφεται ως εικόνα **παράλληλης πόλωσης** (Horizontal – Horizontal, **HH**), όπου υπάρχει οριζόντια εκπομπή-οριζόντια επιστροφή. Αντιστοίχως ακτινοβολία στην οποία υπάρχει κατακόρυφη εκπομπή – κατακόρυφη επιστροφή συμβολίζεται με (Vertical – Vertical, **VV**).

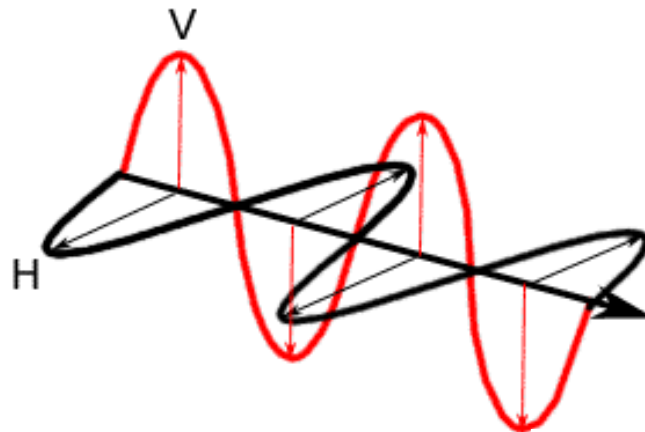
Πολλές φορές οι ιδιότητες του στόχου (π.χ τραχύτητα) έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του αρχικού επιπέδου της πόλωσης της ακτινοβολίας. Έτσι μπορεί αρχικά να γίνει εκπομπή παλμού Radar **H** και αφού αυτός αλληλεπιδράσει με τον στόχο να μεταβληθεί σε **V**. Σε αυτή την περίπτωση το Radar δεν θα μπορέσει να αναγνωρίσει τον στόχο αν είναι προγραμματισμένο για καταγραφή εικόνων παράλληλης πόλωσης **HH**. Για τον λόγο αυτό, μερικά εικονοληπτικά Radar διαθέτουν και δεύτερη κεραία λήψης, που λαμβάνει ενέργεια με επίπεδο πόλωσης κάθετο προς την αρχική πόλωση του εκπεμπόμενου παλμού. Η προκύπτουσα εικόνα ονομάζεται **εγκάρσιας πόλωσης** ή **HV** (οριζόντια εκπομπή - κατακόρυφη επιστροφή, Horizontal – Vertical) ή **VH** (κατακόρυφη εκπομπή - οριζόντια επιστροφή, Vertical – Horizontal).

Παρακάτω φαίνονται οι πιθανοί συνδυασμοί :

- HH – για οριζόντια εκπομπή και οριζόντια λήψη.
- VV - για κατακόρυφη εκπομπή και κατακόρυφη λήψη.
- HV - για horizontal εκπομπή και κατακόρυφη λήψη.
- VH - για κατακόρυφη εκπομπή και horizontal λήψη.

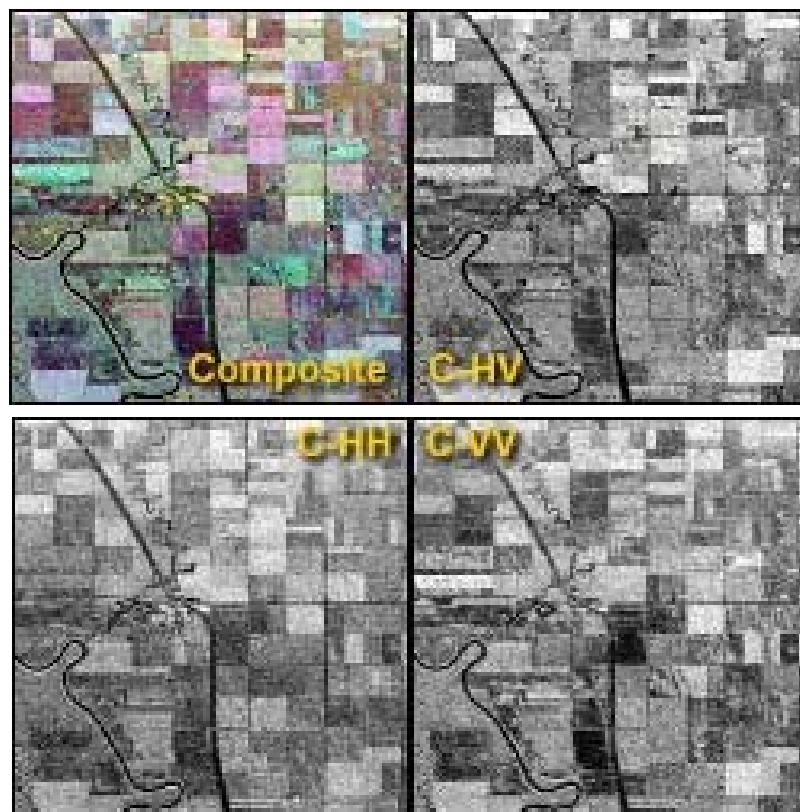
Η μεταβολή του επιπέδου της πόλωσης είναι εντονότερη στις επιφάνειες με βλάστηση παρά στα χερσαία εδάφη. Τα φύλλα, τα κλαδιά, οι κορμοί των

δένδρων, προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις που είναι υπεύθυνες για τη μεταβολή του επιπέδου της πόλωσης.



Σχήμα 4.7 Πόλωση της ακτινοβολίας του ηλεκτρικού πεδίου.

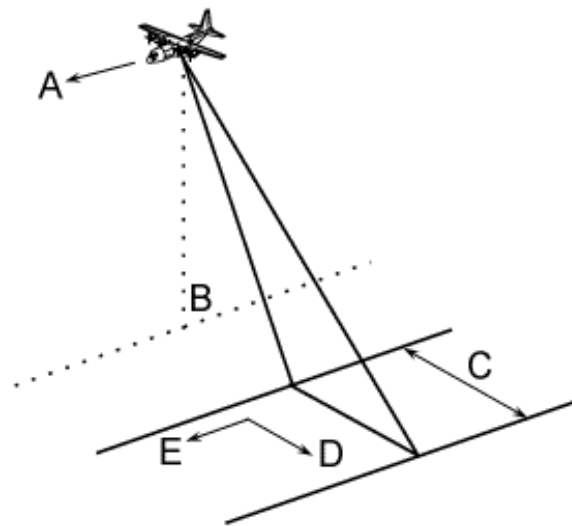
Παρακάτω φαίνονται 4 εικόνες Radar στην ζώνη C ($\lambda = 3,8 - 7,5$ cm) από την ίδια αγροτική περιοχή με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης. Η επάνω αριστερή εικόνα είναι συνδυασμός των άλλων τριών αντιστοιχώντας στην καθεμιά από ένα πρωτεύον αθροιστικό χρώμα (RGB, Red - Green - Blue).



Σχήμα 4.8 Εικόνες με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης στην ζώνη C του Radar.

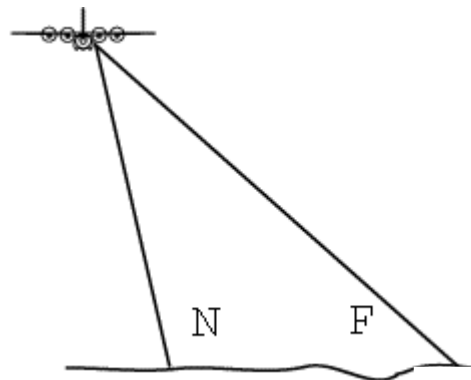
4.5.2 Γεωμετρία SAR

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η γεωμετρία του (SAR) το οποίο είναι τοποθετημένο σε μια εναέρια πλατφόρμα (αεροσκάφος, διαστημικό σκάφος δορυφόρο). Η πλατφόρμα κινείται με κατεύθυνση πτήσης (A) με το ναδίρ (B) να βρίσκεται ακριβώς κάτω από αυτή. Οι μικροκυματικοί παλμοί εκπέμπονται πλευρικά του αεροσκάφους και εγκάρσια της κατεύθυνσης πτήσης “φωτίζοντας” μια ζώνη (swath), (C). Με το (D), (Range) συμβολίζεται η εγκάρσια απόσταση στο έδαφος σε σχέση με την κατεύθυνση πτήσης, ενώ με το (E), (Azimuth) συμβολίζεται η απόσταση στο έδαφος παράλληλη με την κατεύθυνση πτήσης.



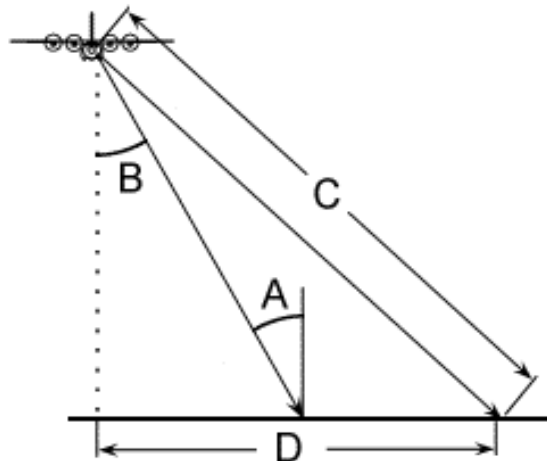
Σχήμα 4.9 Γεωμετρία του SAR.

Το τμήμα της ζώνης (C) που βρίσκεται εγγύτερα του ναδίου λέγεται near range (N), ενώ αυτό που βρίσκεται μακρύτερα από το ναδίρ λέγεται far range (F), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10 Γεωμετρία του SAR.

Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle), (A), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του Radar και της επιφάνειας της γης, ενώ με το (B) συμβολίζεται η γωνία παρατήρησης (look angle). Στην περίπτωση που το έδαφος είναι οριζόντιο τότε οι δύο γωνίες ταυτίζονται. Η κατεύθυνση παρατήρησης (slant range) συμβολίζεται στο Σχήμα με το (C), το μήκος της οποίας (slant range distance) είναι η απόσταση μεταξύ Radar και στόχου ενώ η πραγματική οριζόντια απόσταση (ground range distance) συμβολίζεται με το γράμμα (D).



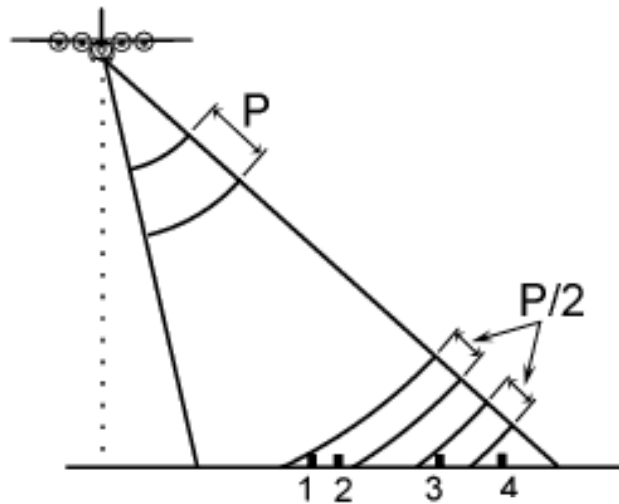
Σχήμα 4.11 Γεωμετρία του SAR.

4.5.3 Χωρική διαχωριστική ικανότητα SAR

Ως χωρική διαχωριστική ικανότητα του Radar ορίζεται η ελάχιστη απόσταση δύο αντικειμένων ίσης ανακλαστικότητας που μπορούν να εμφανισθούν μεμονωμένα σε εικόνα Radar. Το πιο σημαντικό κριτήριο για τον καθορισμό της διαχωριστικής ικανότητας είναι το μέγεθος του ορθογώνιου παλμού (pulse rectangle), όπως προβάλλεται στο έδαφος τη δεδομένη χρονική στιγμή της άφιξής του. Το ορθογώνιο του παλμού είναι παρόμοιο με το εικονοστοιχείο (pixel) των εικόνων του Landsat.

Όταν δύο ή περισσότερα αντικείμενα βρίσκονται εντός του ίδιου ορθογώνιου του παλμού, δεν μπορούν να διακριθούν ως ξεχωριστές οντότητες στην εικόνα. Αν τα αντικείμενα απέχουν απόσταση που υπερβαίνει την αντίστοιχη διάσταση του ορθογώνιου παλμού, τότε θα απεικονιστούν ξεχωριστά. Το μέγεθος του ορθογώνιου του παλμού καθορίζεται από δύο είδη διαχωριστικής ικανότητας:

A) Τη χωρική διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση (range resolution).
Καθορίζεται από το φυσικό μήκος (χρονική διάρκεια) του παλμού του Radar που εκπέμπεται από την κεραία και **ονομάζεται μήκος του παλμού τ (s)**. Πολλαπλασιάζοντας το μέγεθος αυτό με την ταχύτητα του φωτός c (m/s) προκύπτει η γεωμετρική του διάσταση στο μήκος της κατεύθυνσης παρατήρησης (slant range distance – κεκλιμένη απόσταση).



Σχήμα 4.12 Η διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται ότι τα αντικείμενα 1 και 2 που απέχουν κεκλιμένες αποστάσεις που είναι ίσες ή μικρότερες του $(c \tau / 2 = P / 2)$ θα δημιουργήσουν επιστροφές που φθάνουν στην κεραία σαν ένας συνεχής παλμός, συγχωνεύοντας τα δύο αντικείμενα σε ένα.

Αν η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ των δύο στόχων είναι μεγαλύτερη του $(P / 2)$ τότε τα σήματα θα καταγραφούν ως δύο ξεχωριστές ενότητες. Επομένως η διαχωριστική ικανότητα R_{sr} στην κεκλιμένη απόσταση που μετρείται στην εγκάρσια διάσταση αντιστοιχεί στο μισό του μήκους του παλμού σε μέτρα :

$$R_{sr} = \tau \ c / 2 \text{ [m]} \quad (4.1)$$

Χρησιμοποιώντας την γωνία πρόσπτωσης θ τελικά προκύπτει η χωρική διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση :

$$R_r = \tau \ c / 2 \sin \theta \text{ [m]} \quad (4.2)$$

Β) Τη χωρική διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο (azimuth resolution).

Η χωρική διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο καθορίζεται από το γωνιακό πλάτος της δέσμης της ακτινοβολίας όπως αυτή προβάλλεται στο έδαφος και παράλληλα με την πτήση του αεροσκάφους. Για να είναι δυνατόν να διαχωριστούν στόχοι με Radar, πρέπει να απέχουν απόσταση, σε διεύθυνση παράλληλη με αυτήν της πτήσης, μεγαλύτερη από το γωνιακό πλάτος της δέσμης, που αντιστοιχεί σε μέτρα στο έδαφος.

Παρατήρηση του Σχήματος 4.5 φανερώνει ότι το μήκος του συνθετικού ανοίγματος που δημιουργείται είναι ίσο με το γωνιακό πλάτος β της δέσμης της πραγματικής κεραίας στο έδαφος σε μέτρα. Αν η πραγματική κεραία έχει φυσικό μήκος D , τότε το γωνιακό πλάτος της δέσμης θα είναι :

$$\beta_r = \lambda / D \text{ [rad]} \quad (4.3)$$

που στην απόσταση S του στόχου δίνει μια διάσταση κατά το αζιμούθιο L_a ίση με :

$$L_a = S \beta_r = S \lambda / D \quad (4.4)$$

Αυτό είναι και το μήκος του συνθετικού ανοίγματος της κεραίας (SAR). Η θεωρητική τιμή της χωρικής διαχωριστικής ικανότητας στο αζιμούθιο R_a του (SAR) είναι ίσο με το μισό του πραγματικού μήκους της κεραίας :

$$R_a = D / 2 \text{ [m]} \quad (4.5)$$

Συνοψίζοντας, στο Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (SAR) η χωρική διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση εξαρτάται από το μήκος του παλμού, από τη γωνία πρόσπτωσης και είναι ανεξάρτητη από το ύψος πτήσης της πλατφόρμας. Τέλος όσο αφορά τη χωρική διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο εξαρτάται από το μήκος D της κεραίας και είναι ανεξάρτητη από το ύψος πτήσης της πλατφόρμας, της κεκλιμένης απόσταση καθώς και του μήκους κύματος της ακτινοβολίας του Radar.

4.5.4 Η εξίσωση του Radar

Ένα εικονοληπτικό σύστημα Radar δημιουργεί μια εικόνα στην οποία ο αριθμός των επιπέδων του γκρι DN (digital number) σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) καθορίζεται από την ένταση του ανακλώμενου σήματος του Radar από

κάποιο στόχο. Η εξίσωση 4.6 περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στο Radar, τον στόχο και το επιστρεφόμενο σήμα (UNSWCRS, 1986) :

$$P_r = G^2 P_t \lambda^2 \sigma / (4\pi^3) R^4 \quad (4.6)$$

όπου :

P_r = Το επιστρεφόμενο σήμα στην κεραία (W)

G = Συντελεστής ενίσχυσης

P_t = Το εκπεμπόμενο σήμα (W)

λ = Το μήκος κύματος (m)

σ = Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (m^2)

R = Η απόσταση μεταξύ στόχου και κεραίας (m)

Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης σ , εκφράζει την ικανότητα του στόχου να ανακλά ή να σκεδάζει την ενέργεια και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (UNSWCRS, 1986):

$$\sigma = 4 \pi r^2 (E_s / E_i)^2 \quad (4.7)$$

όπου E_s είναι το ηλεκτρικό πεδίο που σκεδάζεται και μετράται στην κεραία, και E_i είναι το ηλεκτρικό πεδίο που προσπίπτει στο στόχο και μετράται στον στόχο.

4.5.5 Σκέδαση

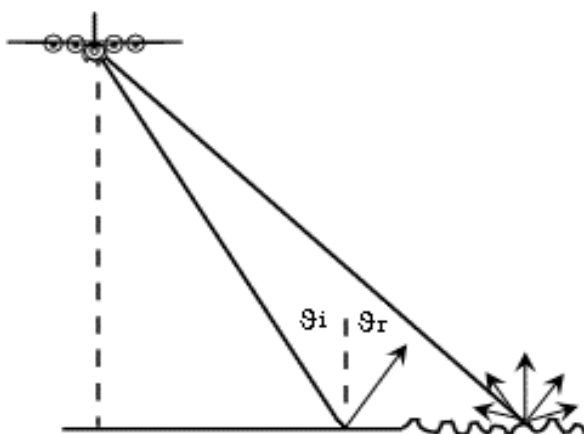
Στη φασματική ζώνη των Radar, η ατμοσφαιρική σκέδαση που παρατηρείται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι αμελητέα λόγω του μεγάλου μήκους κύματος της σε σχέση με άλλες φασματικές ζώνες (π.χ ορατό). Η ακτινοβολία επηρεάζεται κυρίως από την αλληλεπίδραση της με τους στόχους της επιφάνειας της γης. Η “φωτεινότητα” που θα παρουσιάσει ένας στόχος σε μια εικόνα Radar εξαρτάται από το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που θα γυρίσει πίσω στο σύστημα. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από το μηχανισμό αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον στόχο, που είναι συνάρτηση αρκετών μεταβλητών και παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του Radar (μήκος κύματος, πόλωση, γωνία πρόσπτωσης, κλπ.) καθώς και με τα χαρακτηριστικά του στόχου (τοπογραφία, ανάγλυφο, είδος επιφάνειας). Επειδή όλα τα

παραπάνω συσχετίζονται, είναι ανέφικτο να διαχωριστεί και να καθοριστεί ο τρόπος που δρα ανεξάρτητα η κάθε παράμετρος και πως αυτή εμφανίζεται μεμονωμένα σε μια εικόνα Radar. Μολαταύτα είναι δυνατό να γίνει μια ομαδοποίηση αυτών των μεταβλητών σε τρεις βασικές ομάδες:

- Γεωμετρία Radar.
- Τραχύτητα του στόχου.
- Ποσοστό υγρασίας και διηλεκτρική σταθερά του στόχου.

Υπάρχουν διάφορες μορφές σκέδασης της ακτινοβολίας του Radar : η **επιφανειακή** (surface scattering), που περιλαμβάνει την κατοπτρική ανάκλαση (specular scattering), τη διάχυση (diffusion) και την γωνιακή ανάκλαση (corner reflection) καθώς και η **χωρική** (volume scattering).

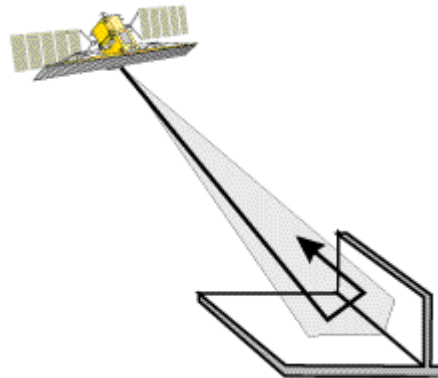
Στην περίπτωση μια λείας επιφάνειας ενδέχεται να επέλθει καθαρή κατοπτρική ανάκλαση στην ακτινοβολία των μικροκυμάτων, όπου η γωνία πρόσπτωσης θ_i ισούται με τη γωνία ανάκλασης θ_r (Σχήμα 4.13). Στην περίπτωση αυτή η ανακλώμενη διεύθυνση είναι διαφορετική από τη διεύθυνση της πρόσπτωσης και επομένως η περιοχή αυτή στην εικόνα Radar θα εμφανίζεται σκοτεινή (μαύρη). Αν η επιφάνεια δεν είναι τελείως λεία (Σχήμα 4.13), αλλά εμφανίζει κάποια τραχύτητα, τότε η ανακλώμενη ενέργεια διαχέεται και τμήμα αυτής επιστρέφει στον δέκτη του Radar (διάχυση). Το τμήμα αυτό της επιφάνειας εμφανίζεται φωτεινό στην εικόνα του Radar.



Σχήμα 4.13 Οι επιδράσεις της τραχύτητας της επιφάνειας στην ανάκλαση.

Παράδειγμα κατοπτρικής ανάκλασης αποτελούν οι ήρεμες υδάτινες επιφάνειες, οι δρόμοι.

Στόχοι οι οποίοι έχουν δύο (ή και περισσότερες) επιφάνειες (συνήθως λείες) κάθετες μεταξύ τους μπορούν να προκαλέσουν γωνιακή ανάκλαση (corner reflection). Ο προσανατολισμός των επιφανειών μπορεί να είναι τέτοιος (Σχήμα 4.14) ώστε σχεδόν όλη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία να ανακλαστεί κατευθείαν πίσω στο Radar εξαιτίας της “διπλής αναπήδησης” ανάκλασης (double bounce reflection).



Σχήμα 4.14 Γωνιακή ανάκλαση.

Τεχνητοί γωνιακοί ανακλαστήρες με περίπλοκα γωνιώδη σχήματα είναι συνήθεις σε αστικά περιβάλλοντα (κτίρια, γέφυρες, ανθρώπινες κατασκευές). Φυσικοί γωνιακοί ανακλαστήρες αποτελούν συνήθως πτυχωμένα πετρώματα, προσόψεις λόφων, ευθυτενής προεξέχουσα βλάστηση στο νερό κ.α. Σε όλες τις περιπτώσεις οι γωνιακοί ανακλαστήρες εμφανίζονται με μεγάλες τιμές φωτεινότητας στην εικόνα.

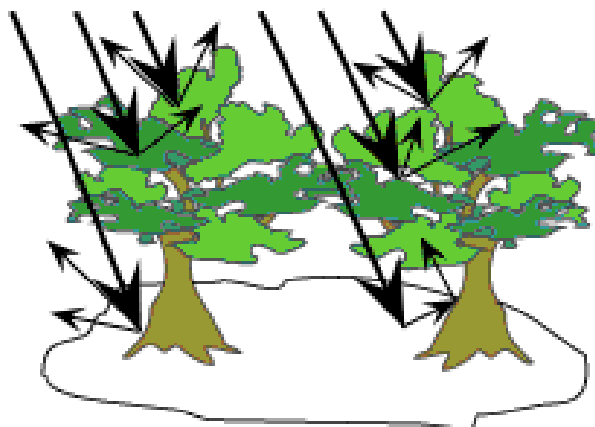


Σχήμα 4.15 Αστική περιοχή, όπου με μεγάλες τιμές φωτεινότητας (λευκό χρώμα) παρουσιάζονται ανθρώπινες κατασκευές.

Η χωρική σκέδαση αναφέρεται κυρίως στην περίπτωση που η ακτινοβολία έχει τέτοια χαρακτηριστικά (μήκος κύματος) ώστε να μπορεί να διεισδύσει κάτω από επιφάνεια γης μικρής διηλεκτρικής σταθεράς (άμμος ή ελαφρύ έδαφος) και να συναντήσει στερεό γεωλογικό υπόβαθρο όπου και θα σκεδαστεί. Η σκέδαση αυτή συνδέεται με τις χωρικές ανομοιογένειες σε κλίμακες συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Παρόλο που τα φυτά που αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία επιφανειακά, η σκέδαση έχει τα χαρακτηριστικά της χωρικής σκέδασης, αφού τα φυλλώματα εμφανίζουν διαστάσεις που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος των μικροκυμάτων της ακτινοβολίας του Radar.

Σε όλες τις περιπτώσεις σκέδασης ο βασικός παράγοντας που θα δημιουργήσει μια από τις παραπάνω μορφές σκέδασης είναι η τραχύτητα της επιφάνειας όπως ορίζεται από το κριτήριο Rayleigh το οποίο εξετάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.16 Χωρική σκέδαση στα φυλλώματα. Γωνιακή ανάκλαση με δύο επιφάνειες (λείο έδαφος μεγάλης διηλεκτρικής σταθεράς – κορμός.)

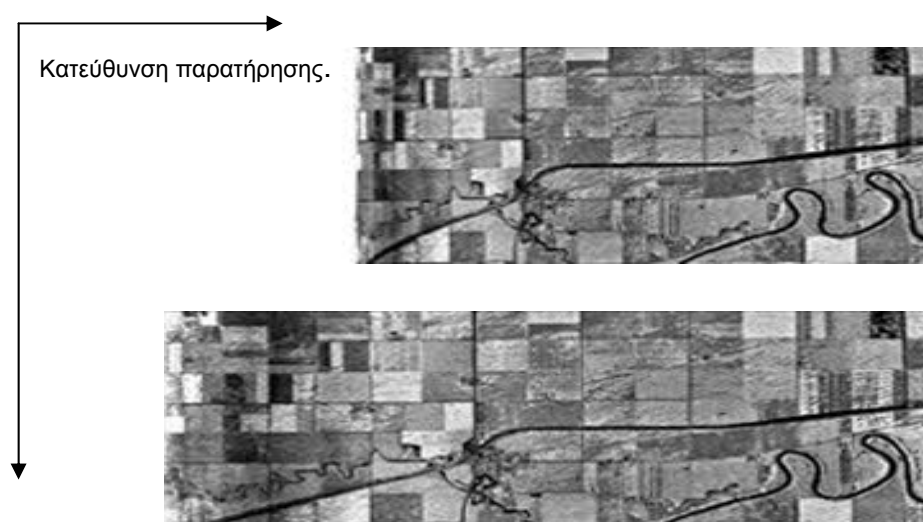
4.6 Γεωμετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα Radar

Καθορίστηκε ότι η χωρική διαχωριστική ικανότητα R_r στην απόσταση εγκάρσια της πτήσης του αεροσκάφους είναι συνάρτηση της στιγμιαίας γωνίας πρόσπτωσης θ και δίδεται από τη σχέση :

$$R_r = \tau \cdot c / 2 \cdot \sin\theta \text{ [m]} \quad (4.8)$$

Επομένως η περιοχή του εδάφους που αντιπροσωπεύεται από ψηφίδες, στην εγγύτερη περιοχή του ίχνους της πτήσης θα πρέπει να έχει διαστάσεις μεγαλύτερες απ' ό,τι στην απώτερη περιοχή.

Όταν όμως προβάλλεται η γραμμή σάρωσης του Radar σε οθόνη (soft copy) ή σε κάποιο εκτυπωτή (hard copy), η διάσταση των ψηφίδων διατηρείται ίση σε όλη την έκταση της γραμμής σάρωσης. Επομένως οι διαστάσεις των ψηφίδων που βρίσκονται εγγύτερα της πτήσης υπόκεινται σε "συμπίεση" σε σχέση με εκείνες της απώτερης περιοχής (Σχήμα 4.17). Τούτο έχει ως συνέπεια τη γεωμετρική παραμόρφωση της περιοχής της εικόνας Radar.



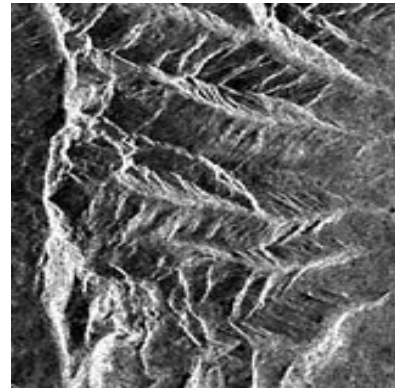
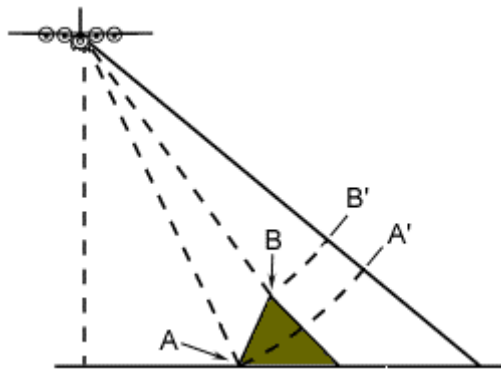
Σχήμα 4.17 Συμπίεση της εγγύτερης περιοχής (πάνω εικόνα) κατά την προβολή της σε οθόνη. Πραγματική γεωμετρία της περιοχής (κάτω εικόνα).

Αν η εικόνα Radar πρόκειται να αποδοθεί άμεσα στο αεροσκάφος, τότε θα πρέπει η ταχύτητα σάρωσης της φωτεινής κηλίδας προβολής στην οθόνη να μεταβάλλει την ταχύτητα της ανομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής σάρωσης, ώστε να αποφευχθεί η γεωμετρική παραμόρφωση της συμπίεσης.

Γεωμετρικές παραμορφώσεις λαμβάνουν χώρα στις εικόνες Radar λόγω μετατόπισης του αναγλύφου (relief displacement). Ως συνέπεια αυτού είναι η εμφάνιση της **αναστροφής** (layover) και της **σμίκρυνσης** (foreshortening) στις εικόνες Radar.

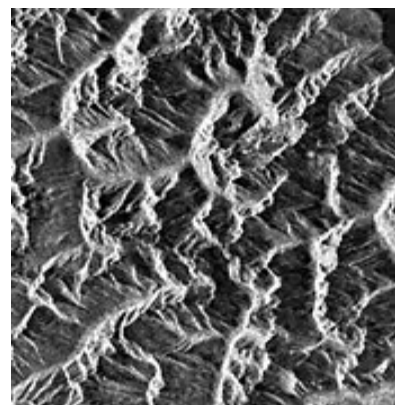
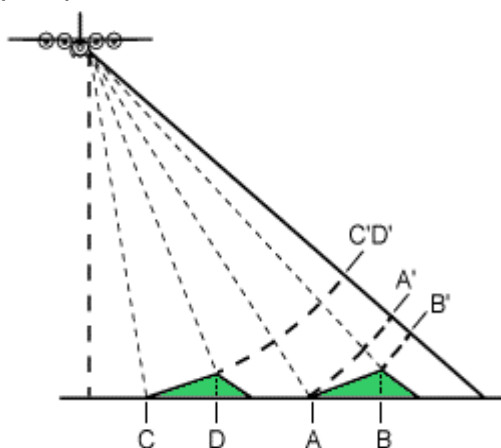
Όταν ο μικροκυματικός παλμός φθάσει σε στόχο ορισμένου ύψους (π.χ βουνό), το σήμα επιστροφής από την κορυφή του βουνού, επειδή αυτό

βρίσκεται πιο κοντά στην κεραία του Radar, θα φθάσει νωρίτερα από ό,τι το σήμα από τη βάση του. Έτσι αντί να εμφανιστεί στην εικόνα πρώτα η βάση και εν συνεχεία η κορυφή, γίνεται αναστροφή (Σχήμα 4.18) των σημάτων και εμφανίζεται πρώτα η κορυφή και μετά η βάση.



Σχήμα 4.18 Γεωμετρική αναστροφή.

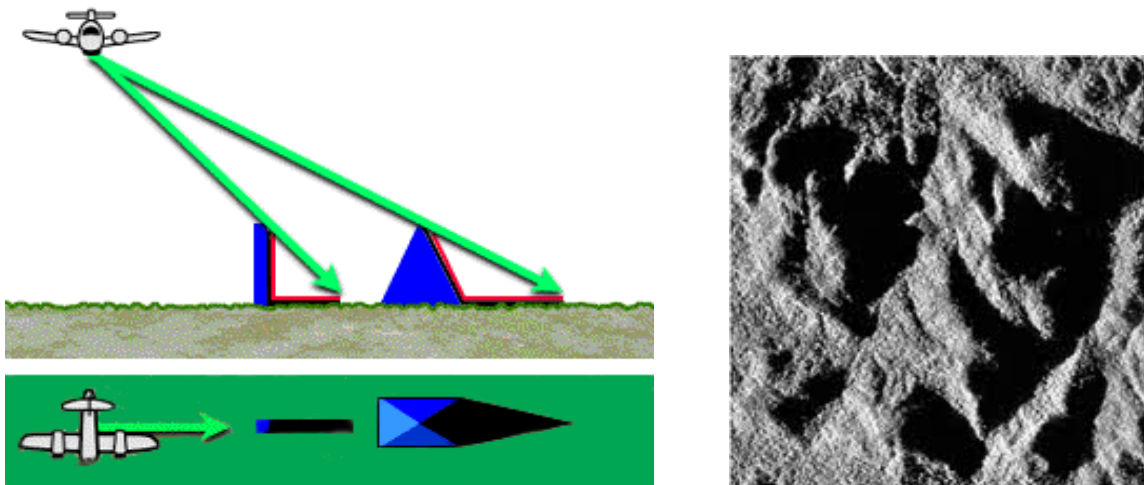
Όταν ο μικροκυματικός παλμός φθάσει στη βάση ενός βουνού πριν συναντήσει την κορυφή (Σχήμα 4.19), τότε θα συμβεί το φαινόμενο της γεωμετρικής παραμόρφωσης της σμίκρυνσης (foreshortening). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση επειδή το Radar μετράει την κεκλιμένη απόσταση, η πλαγιά (A - B) θα εμφανιστεί συμπιεσμένη και το μήκος της θα αναπαριστάται λανθασμένα (A' - B'). Ανάλογα με τη γωνία της πλαγιάς σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης, η σφοδρότητα του φαινομένου θα μεταβάλλεται.



Σχήμα 4.19 Γεωμετρική σμίκρυνση.

Το φαινόμενο της σμίκρυνσης μεγιστοποιείται όταν το προσπίπτον κύμα είναι κάθετο στην επιφάνεια της πλαγιάς με αποτέλεσμα η βάση και η κορυφή της πλαγιάς να απεικονίζονται ταυτόχρονα ως ένα σημείο (C' - D').

Οι δύο παραπάνω γεωμετρικές παραμορφώσεις έχουν ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της **σκίασης** του Radar. Σκίαση π.χ λαμβάνει χώρα όταν το Radar δεν μπορεί να “φωτίσει” την πίσω πλευρά μια πλαγιάς ενός βουνού. Στην περίπτωση του Radar οι σκιές είναι απόλυτες και εμφανίζονται μαύρες, σε αντίθεση με τις σκιές στις εικόνες στο ορατό και στο υπέρυθρο. Στις τελευταίες οι υπό εξέταση στόχοι που βρίσκονται σε σκιασμένη περιοχή μπορούν να αναγνωριστούν εξαιτίας της διάχυσης του ορατού και του υπέρυθρου φωτός.



Σχήμα 4.20 Σκίαση του Radar. Οι κόκκινες επιφάνειες είναι υπό σκίαση.

4.7 Ραδιομετρικές παραμορφώσεις στην εικόνα Radar

4.7.1 Θόρυβος από πλευρικούς λοβούς

Στη διαδικασία της εικονοληψίας του Radar θεωρήθηκε ότι η ενέργεια που κατευθύνεται στην επιφάνεια του εδάφους περιορίζεται σε μια στενή δέσμη κατά τη διεύθυνση εγκάρσια της πτήσης. Στην πραγματικότητα η κεραία δημιουργεί κατοπτρικές δέσμες ακτινοβολίας σε σχέση με τον κύριο λοβό ενέργειας. Οι πλευρικοί αυτοί λοβοί εκπέμπουν ενέργεια σε διευθύνσεις διαφορετικές του κεντρικού λοβού αλλά με μικρότερα επίπεδα ενέργειας.

Οι λοβοί πλευρικά του κεντρικού λοβού θα επιτρέπουν χρόνους επιστροφής του παλμού εντός του εύρους που σχετίζεται με τον κεντρικό λοβό. Συνεπώς οι επιστροφές που λαμβάνονται από στόχους που ακτινοβολούνται από αυτούς του πλευρικούς λοβούς θα υπερτίθενται στις επιστροφές του κεντρικού λοβού. Όμως η περιοχή του εδάφους που πρακτικά λαμβάνει ικανοποιητική ενέργεια από τους πλευρικούς λοβούς θα

πρέπει να είναι στενή και περιορισμένη στην εγγύτερη περιοχή της πτήσης. Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι δημιουργούνται στενές λωρίδες που παρατηρούνται κατά μήκος της διεύθυνσης της τροχιάς.

4.7.2 Στίγματα εικόνων Radar

Η κύρια διαφορά μεταξύ εικόνων Radar και άλλων εικόνων Τηλεπισκόπησης που καταγράφουν ανακλώμενη ηλιακή ενέργεια είναι ότι στις τελευταίες η ενέργεια που καταγράφεται προέρχεται από ασύμφωνη πηγή. Αποτελείται δηλαδή από άπειρο σύνολο ημιτονικών κυμάτων ακτινοβολίας με όλα τα δυνατά μήκη κύματος και οι φάσεις τους κατανέμονται εντελώς τυχαία μεταξύ $(0, 2\pi)$. Επομένως η ανάμειξη άπειρων συχνοτήτων και διαφορών φάσης περιγράφεται από ένα κύμα μέσης ισχύος που δεν δημιουργεί διαχρονικές μεταβολές στην ένταση του. Όταν ένας αισθητήρας λαμβάνει ενέργεια από πολλαπλούς στόχους εντός των διαστάσεων της ψηφίδας, οι ενέργειες απλώς προστίθενται και δεν δημιουργείται παρεμβολή των κυμάτων.

Στα ενεργά Radar, όμως, η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι μονοχρωματική και σύμφωνη, αποτελείται δηλαδή από μια συχνότητα και φάση. Επομένως, ανακλάσεις από πολλαπλούς στόχους εντός των διαστάσεων της ψηφίδας δημιουργούν φαινόμενα συμβολής, άλλες φορές προσθετικά και άλλες αφαιρετικά. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα ότι μερικές ψηφίδες στις εικόνες Radar είναι φωτεινότερες απ' ό,τι ανεμένετο και άλλες στην ίδια περιοχή της εικόνας πιο σκούρες. Η εικόνα του Radar σε αυτή την περίπτωση εμφανίζει μια μορφή (Σχήμα 4.21) σαν να έχει ψεκαστεί με αλάτι και πιπέρι και λέγεται ότι παρουσιάζει στίγματα ή κηλιδώσεις (speckles).



Σχήμα 4.21 Στίγματα (speckles) σε εικόνα Radar.

4.8 Παράγοντες που επηρεάζουν τις εικόνες Radar

Οι χαρακτηριστικές φασματικές ταυτότητες που γίνονται αντιληπτές από το Radar εξαρτώνται τόσο από τις ιδιότητες της πηγής όσο και από τις ιδιότητες του στόχου. Οι ιδιότητες της πηγής ακτινοβολίας του Radar που περιλαμβάνουν το μήκος κύματος λ , την πόλωση της ακτινοβολίας και τη γωνία πρόσπτωσης εξετάστηκαν προηγουμένως. Οι ιδιότητες των παρατηρούμενων στόχων σχετίζονται με την διηλεκτρική σταθερά, την τραχύτητα και τον συντονισμό.

4.8.1 Διηλεκτρική σταθερά

Στην περίπτωση της μικροκυματικής ακτινοβολίας του Radar, εάν η επιφάνεια του παρατηρούμενου στόχου είναι ομοιογενής και λεία τότε η ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα λάβει χώρα στην επιφάνεια του. Ένα ποσοστό της ακτινοβολίας θα ανακλαστεί και ένα άλλο ποσοστό θα διεισδύσει στην επιφάνεια μέσα στο υλικό και θα αποσβεστεί. Η ένταση των δύο παραπάνω φαινομένων εξαρτώνται από τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους.

Στην περίπτωση της λείας επιφάνειας, επέρχεται κατοπτρική ανάκλαση με το επίπεδο της ανακλώμενης ισχύος σε σχέση με την ισχύ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια, να εκφράζεται με τον συντελεστή ρ .

$$\rho = |R|^2 \quad (4.9)$$

όπου R είναι ο συντελεστής ανάκλασης κατά Fresnel της επιφάνειας αέρα-εδάφους.

1) Στην περίπτωση της κάθετης ανάκλασης ($\theta = 0^\circ$) και θεωρώντας ότι το έδαφος δεν προκαλεί απώλειες στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, ο συντελεστής ανάκλασης είναι (Elachi, 1987):

$$R_N = (1 - \sqrt{\epsilon_r}) / (1 + \sqrt{\epsilon_r}) \quad (4.10)$$

όπου ϵ_r είναι η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους. Όταν η διηλεκτρική σταθερά της επιφάνειας είναι 1, τότε δεν επέρχεται ανάκλαση (100%

απορρόφηση της ακτινοβολίας). Στην περίπτωση του νερού, όπου $\epsilon_r = 81$, τότε $R = 0,8$ και ο συντελεστής ανάκλασης $\rho = 64\%$, που σημαίνει ότι 64% της ισχύος της ακτινοβολίας θα ανακλαστεί.

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 απεικονίζονται τυπικές τιμές διηλεκτρικών σταθερών ξηρών εδαφών (άμμος, ιλύς, άργιλος) σε διαφορετικές συχνότητες. Είναι φανερό ότι όλα τα εδάφη έχουν παρόμοιες διηλεκτρικές σταθερές σε όλες τις συχνότητες της μικροκυματικής ακτινοβολίας.

Πίνακας 4.2 Τιμές διηλεκτρικών σταθερών ξηρών εδαφών σε διαφορετικές συχνότητες (P. HOEKSTRA and A. DELANY, 1974).

| f | ϵ_r |
|---------|--------------|
| 500 MHz | 3,5 |
| 4 GHz | 3,2 |
| 10 GHz | 2,3 |
| 26 GHz | 2,3 |

Στον Πίνακα 4.3 αντιπαραβάλλονται οι αντίστοιχες τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού (στους 25 °C).

Πίνακας 4.3 Διηλεκτρικές σταθερές του νερού.

| f | ϵ_r |
|---------|--------------|
| 500 MHz | 79 |
| 4 GHz | 77 |
| 10 GHz | 50 |
| 26 GHz | 25 |

Επομένως, η υγρασία που πιθανόν να εμπεριέχεται σε ένα έδαφος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ανακλαστικότητα και συνεπώς την εικόνα του Radar. Η διηλεκτρική σταθερά των πετρωμάτων και των εδαφών αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία. Μια αύξηση στη διηλεκτρική σταθερά αυξάνει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Για παράδειγμα ένα έδαφος με υψηλή υγρασία θα εμφανιστεί φωτεινότερο απ' ό,τι ένα ξηρό έδαφος λόγω μεγαλύτερου συντελεστή ανάκλασης.

2) Στην περίπτωση πλάγιας κατοπτρικής ανάκλασης ο συντελεστής R του Fresnel εξαρτάται τώρα από την πόλωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για οριζόντια πολικότητα :

$$R_H = (\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) / (\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) \quad (4.11)$$

και για κατακόρυφη πολικότητα :

$$R_H = (-\varepsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) / (\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) \quad (4.12)$$

όπου θ_i η γωνία πρόσπτωσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας.

Και στις δύο περιπτώσεις η ανακλώμενη διεύθυνση είναι διαφορετική από τη διεύθυνση της πρόσπτωσης και επομένως η περιοχή αυτή στην εικόνα Radar θα εμφανίζεται σκοτεινή (μαύρη).

4.8.2 Τραχύτητα

Η επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται άλλοτε τραχεία και άλλοτε λεία, εξαρτώμενη ουσιαστικά από το μήκος κύματος λ και τη γωνία πρόσπτωσης. Το βασικό κριτήριο καθορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ , είναι το κριτήριο του **Rayleigh**. Μια επιφάνεια θεωρείται **λεία**, όταν το μέσο ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών Δh είναι μικρότερο από το κριτήριο του Rayleigh που καθορίζεται από τη σχέση :

$$\Delta h < \lambda / 8 \cos\theta \quad (4.13)$$

όπου Δh είναι το ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών, λ το μήκος κύματος και θ η γωνία πρόσπτωσης.

Το κριτήριο Rayleigh τροποποιήθηκε αργότερα ώστε να ορίζει την ανώτατη και την κατώτατη τιμή του Δh . Το τροποποιημένο κριτήριο ώστε να θεωρηθεί μια επιφάνεια **λεία** είναι :

$$\Delta h < \lambda / 25 \cos\theta \quad (4.14)$$

και για να θεωρηθεί μια επιφάνεια **τραχεία** θα πρέπει το ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών της να είναι μεγαλύτερο από το :

$$\Delta h < \lambda / 4,4 \cos \theta \quad (4.15)$$

Επομένως, μια επιφάνεια ενδιάμεσης τραχύτητας θα είναι εκείνη για την οποία ισχύει :

$$\lambda / 25 \cos \theta < \Delta h < \lambda / 4,4 \cos \theta \quad (4.16)$$

Η τραχεία επιφάνεια δημιουργεί ένα σχετικά ομοιόμορφο σήμα επιστροφής Radar ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης θ , ενώ η λεία επιφάνεια παρέχει έντονα σήματα επιστροφής σε γωνίες πρόσπτωσης σχεδόν κατακόρυφες, αλλά μηδενικό ή ελάχιστο σήμα σε χαμηλές γωνίες βάθους. Μια επιφάνεια ενδιάμεσης τραχύτητας ανακλά μέρος της ενέργειας και διασκορπίζει την υπόλοιπη.

4.8.3 Βάθος διείσδυσης z

Ένα σημαντικό θέμα της μικροκυματικής ραδιομετρίας είναι το βάθος διείσδυσης z στις επιφάνειες των στόχων, όπως και το ποσοστό της απώλειας της ισχύος της ακτινοβολίας καθώς διέρχεται μέσα από διάφορα στρώματα της γης. Αν η πυκνότητα του μηχανισμού σκέδασης θεωρηθεί σταθερή σε όλος το βάθος z τότε η απώλεια της ισχύος εκφράζεται εκθετικά ως :

$$p(z) = p(O^+) \bullet \exp (-\kappa_e \bullet z) \quad (4.17)$$

όπου $p(O^+)$ είναι η αρχική ένταση της ακτινοβολίας, z το βάθος διείσδυσης και κ_e είναι ο συντελεστής απόσβεσης (extinction coefficient). Το βάθος διείσδυσης για το οποίο η ένταση $p(z)$ της ακτινοβολίας πέφτει στο $(1 / e)$ ορίζεται ως μήκος της ελεύθερης διαδρομής (extinction depth). Ο συντελεστής απόσβεσης εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας καθώς και από της διηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας διείσδυσης. Σε ξηρά ομοιογενή εδάφη θα παρατηρείται διείσδυση της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε μεγαλύτερο βάθος απ' ότι σε ένα έδαφος με υγρασία. Τυπικές τιμές στο βάθος διαπερατότητας είναι τα $z = 0,5 - 0,1 \text{ m}$ για το νερό και $z = 1 - 6 \text{ m}$ για περιοχές ξηρών εδαφών (π.χ ερήμων).

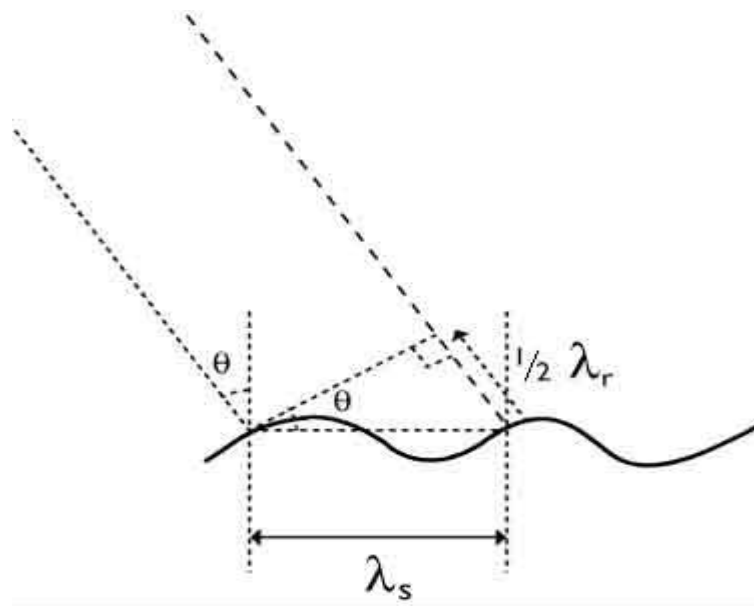
4.8.4 Συντονισμός της ακτινοβολίας

Μεταλλικά σώματα

Ο συντονισμός (resonance) της ακτινοβολίας των στόχων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στις εικόνες Radar, επειδή πολύ μικρά σώματα ενδέχεται να επιστρέψουν πολύ πιο έντονα σήματα απ' ό,τι μεγαλύτερα σώματα. Ο συντονισμός παρατηρείται σε μεταλλικές κατασκευές με υψηλή διηλεκτρική σταθερά, των οποίων οι διαστάσεις είναι ακέραια πολλαπλάσια του $\lambda / 2$ όπου λ το μήκος κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο του συντονισμού στα μεταλλικά σώματα έχει ως αποτέλεσμα τα τελευταία να εμφανίζονται ευκρινώς στην εικόνα ακόμα και στην περίπτωση που το μέγεθος τους μπορεί να είναι μικρότερο της χωρικής διαχωριστικής ικανότητας του Radar.

Συντονισμός Bragg

Ένα άλλο είδους συντονισμού με μεγάλο ενδιαφέρον παρατηρείται όταν οι στόχοι που δημιουργούν τη σκέδαση κατανέμονται σε περιοδική μορφή (π.χ επιφάνεια κυματισμού θαλάσσης). Σε αυτή την περίπτωση η επιστροφή των σημάτων από περιοδικούς σκεδαστές (κύματα) είναι δυνατόν να είναι συμφασική και επομένως η συνολική ενέργεια να ενισχύεται, ή να είναι εκτός φάσης και να απαλείφεται.



Σχήμα 4.22 Συντονισμός Bragg.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του Bragg δίνεται από τον τύπο :

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (4.18)$$

όπου :

n = ακέραιος αριθμός.

λ = μήκος κύματος ακτινοβολίας.

d = ισαπόσταση μεταξύ διαδοχικών στόχων (δικτυωτών επιπέδων σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα, Κρυσταλλογραφία).

θ = γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

Η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην Τηλεπισκόπηση στην περίπτωση του Radar, θεωρώντας ως d την απόσταση των περιοδικά εμφανιζόμενων σκεδαστών (Σχήμα 4.22) ως :

$$n \lambda_r = 2 \lambda_s \sin \theta \quad (4.19)$$

όπου :

n = ακέραιος αριθμός.

λ_r = μήκος κύματος της ακτινοβολίας του Radar.

λ_s = ισαπόσταση μεταξύ σκεδαστών (θαλάσσια κύματα).

θ = γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

Επιλύοντας ως προς λ_s προκύπτει :

$$\lambda_s = n \lambda_r / 2 \sin \theta \quad (4.20)$$

Επομένως συντονισμός παρατηρείται όταν το λ_s είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του λ_r .

4.9 Συστήματα Radar

Ένα εικονοληπτικό σύστημα Radar όπως προαναφέρθηκε μπορεί να μεταφέρεται είτε από αεροσκάφος είτε από δορυφόρο. Η επιλογή της μιας ή της άλλης πλατφόρμας έχει να κάνει με την υπάρχουσα εφαρμογή για την οποία χρειάζεται να ληφθεί η εικόνα Radar. Και στις δύο περιπτώσεις, ένα σημαντικό πλεονέκτημα του Radar συνθετικού ανοίγματος είναι ότι η χωρική διαχωριστική ικανότητα είναι ανεξάρτητη του ύψους της πλατφόρμας.

4.9.1 Σύγκριση εναέριων και δορυφορικών συστημάτων SAR

Παρόλο που η χωρική διαχωριστική ικανότητα είναι ανεξάρτητη από το ύψος πτήσης, η παρατηρούμενη γεωμετρία καθώς και η εδαφική κάλυψη μπορούν να επηρεαστούν από αυτό.

Στα αεροσκάφη για να επιτευχθεί μια εύλογη εδαφική κάλυψη (π.χ 50 - 70 km) θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (π.χ 60° - 70°). Αυτό όμως θα έχει ως συνέπεια την εμφάνιση εντονότερων γεωμετρικών παραμορφώσεων (σκίαση). Στα δορυφορικά συστήματα, τα οποία λειτουργούν σε εκατονταπλάσια ύψη, μπορούν να επιτύχουν την ίδια εδαφική κάλυψη με μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης (π.χ 5° - 15°), με ταυτόχρονη μείωση κάποιων γεωμετρικών παραμορφώσεων (σκίαση) αλλά με αύξηση κάποιων άλλων (αναστροφή, σμίκρυνση).

Τα εναέρια συστήματα είναι πιο ευέλικτα στην ικανότητα τους να συλλέγουν δεδομένα σε διαφορετικές γωνίες παρατήρησης και πρόσπτωσης ανάλογα με το τοπικό ανάγλυφο, σε οποιαδήποτε περιοχή και οποιαδήποτε ώρα, εφόσον ο καιρός το επιτρέπει. Αντιθέτως, τα δορυφορικά συστήματα είναι λιγότερο ευέλικτα, αφού η παρατηρούμενη γεωμετρία και η χρονική συλλογή των δεδομένων εξαρτώνται και περιορίζονται από την τροχιά του δορυφόρου. Σε αντιδιαστολή όμως με το προηγούμενο μπορούν να συλλέξουν περισσότερα δεδομένα σε μεγαλύτερη περιοχή σε σχέση με τα εναέρια στον ίδιο χρόνο, εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχουν ευέλικτοι δορυφόροι οι οποίοι έχουν περίοδο μίας ημέρας.

Τέλος στα εναέρια συστήματα δεν υπάρχει σταθερότητα στο ύψος της πτήσης των αεροσκαφών και του προσανατολισμού των. Αντίθετα, οι δορυφόροι (π.χ Landsat 4) έχουν μian αβεβαιότητα $\pm 0,01^\circ$ στη γωνία προσανατολισμού με μια σταθερότητα 10^{-6} degrees / s. Εξαιτίας της τριβής του αέρα με το αεροσκάφος δημιουργούνται διαταράξεις και αποπροσανατολισμός των συσκευών. Αντιπροσωπευτικά συστήματα παρατίθενται παρακάτω.

4.9.2 Convair-580 C / X SAR

Το σύστημα Convair-580 C/X SAR αναπτύχθηκε από το Καναδικό κέντρο Τηλεπισκόπησης (Canada Centre for Remote Sensing). Λειτουργεί στις

φασματικές ζώνες C - (5,66 cm) και X - (3,24 cm) με μια μεγάλη ποικιλία γωνιών παρατήρησης (5° - 90°). Η κύρια εφαρμογή του είναι στην ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων στη θάλασσα και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.



Σχήμα 4.23 Το σύστημα Convair-580 C / X.

4.9.3 Sea Ice and Terrain Assessment (STAR)

Η Καναδέζικη εταιρεία Intera ήταν η πρώτη εταιρεία που ανέπτυξε σύστημα εικονοληπτικού Radar για εμπορικό σκοπό σε όλο τον κόσμο. Χρησιμοποιεί δύο αεροσκάφη το STAR-1 και 2 στη φασματική ζώνη X (3,2 cm) με HH πόλωση. Η εδαφική κάλυψη κυμαίνεται μεταξύ 19 - 50 km και η χωρική διαχωριστική ικανότητα από 5 - 18 m. Η βασική εφαρμογή ήταν ο έλεγχος του πάγων της θάλασσας στο βόρειο τμήμα του Καναδά και η ανάλυση εδαφών.

Το STAR ήταν επίσης το πρώτο σύστημα που διοχέτευε τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στους επίγειους σταθμούς επεξεργασίας.



Σχήμα 4.24 Το σύστημα STAR –2 .

4.9.4 AirSar

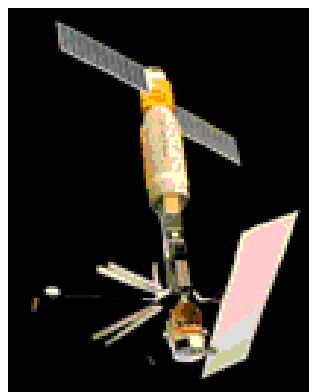
Η αμερικανική NASA μπήκε στο προσκήνιο με το πρώτο σύστημα πολλαπλών συχνοτήτων και πολώσεων. Σε συνεργασία με το εργαστήριο JPL (Jet Propulsion Laboratory) έθεσαν σε λειτουργία το σύστημα AirSar σε τρεις φασματικές ζώνες C, L και P με οποιοδήποτε συνδυασμό πόλωσης της ακτινοβολίας (π.χ. HH, HV, VH, και VV). Η χωρική διαχωριστική ικανότητα είναι 12 m και οι γωνίες πρόσπτωσης κυμαίνονται από 0° - 70° .



Σχήμα 4.25 Το σύστημα AirSar.

4.9.5 SEASAT

Ο SEASAT ήταν το πρώτο δορυφορικό σύστημα που εκτοξεύθηκε το 1978 και έφερε Radar συνθετικού ανοίγματος. Το Radar λειτουργούσε στη φασματική ζώνη L (23,5 cm) με HH πόλωση και με γωνίες πρόσπτωσης που κυμαινόντουσαν από 9° έως 15° μοίρες σε ύψος 790 km. Η εδαφική κάλυψη ήταν 100km με χωρική διαχωριστική ικανότητα 25 m. Η κύρια εφαρμογή του ήταν στην παρατήρηση των ωκεανών, καταγραφή της ταχύτητας των κυμάτων και της τοπογραφίας.



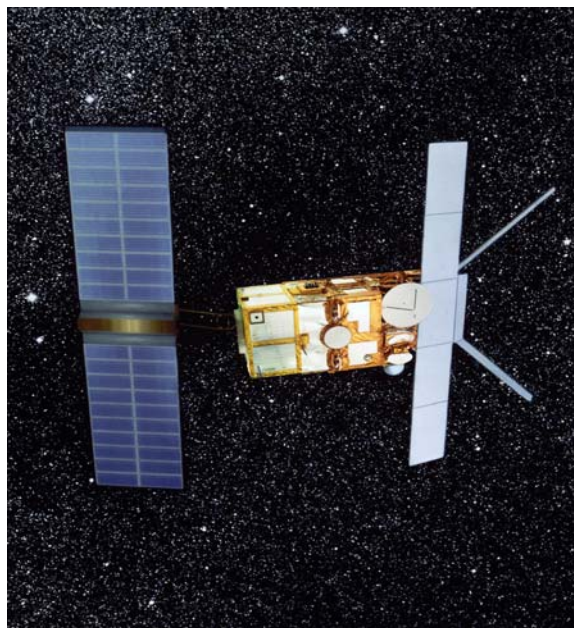
Σχήμα 4.26 Το σύστημα SEASAT.

4.9.6 Τα συστήματα SIR

Τα δορυφορικά προγράμματα SIR-A και SIR-B (Shuttle Imaging Radar) ήταν πειραματικά προγράμματα της αμερικανικής NASA που χρησιμοποιούσαν το διαστημόπλοιο Shuttle σε ύψος πτήσης 250 Km. Το σύστημα SIR-B είχε χωρική διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση $R_r = 5,8 - 17$ m και στο αζιμούθιο $R_a = 25$ m σε πόλωση HH, ενώ η εδαφική κάλυψη εκυμαίνοντο από 30 - 60 km. Στα δύο παραπάνω συστήματα προστέθηκε και το SIR-C/X-SAR με τρεις διαφορετικές κεραίες: μία στη φασματική ζώνη L (23,5 cm), στην C (5,8 cm) και στην X (3 cm) με χωρική διαχωριστική ικανότητα 30 m x 30 m.

4.9.7 Το ευρωπαϊκό σύστημα ERS

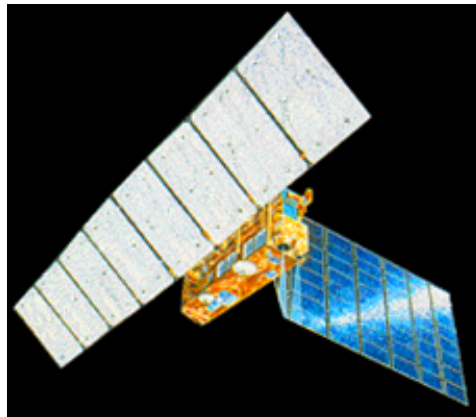
Η Ευρωπαϊκή Εταιρεία Διαστήματος έθεσε σε τροχιά τον δορυφόρο Τηλεπισκόπησης ERS-1 τον Ιούλιο του 1991 με στόχο την παρατήρηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο δορυφόρος βρισκόταν σε ύψος 780 km με περίοδο $T = 100$ min. Διέθετε σύστημα SAR στη φασματική ζώνη C (5,6 cm) με εδαφική κάλυψη 100 km, γωνία πρόσπτωσης $20^\circ - 26^\circ$ και χωρική διαχωριστική ικανότητα 12,5 m. Τα δεδομένα του ERS-1 SAR χρησιμοποιούνται για ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων, για ανίχνευση πλοίων, για την παρατήρηση της χλωρίδας κ.λ.π.



Σχήμα 4.27 Το σύστημα ERS-1.

4.9.8 Το σύστημα JERS

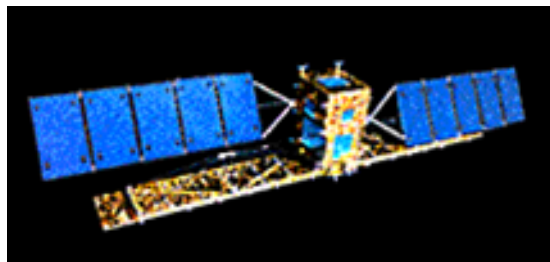
Η Ιαπωνική (NASDA) εκτόξευσε το δορυφόρο JERS-1 το Φεβρουάριο του 1992. Ο δορυφόρος έφερε εικονοληπτικό σύστημα Radar SAR που λειτουργούσε στη φασματική ζώνη L (23,5 cm) με πόλωση HH. Η εδαφική κάλυψη του συστήματος ήταν 75 km και η χωρική διαχωριστική ικανότητα ήταν 18 x 18 m. Η γωνία πρόσπτωσης του JERS-1 ήταν 35⁰ μοίρες και το σύστημα εξαιτίας του μεγάλου μήκους κύματος είχε την ικανότητα μερικής διείσδυσης στην βλάστηση και σε άλλους τύπους επιφανείας.



Σχήμα 4.28 Το σύστημα JERS-1.

4.9.9 Το σύστημα Radarsat

Το σύστημα Radarsat της Καναδέζικης Εταιρείας Διαστήματος τέθηκε σε λειτουργία τον Νοέμβριο του 1995. Λειτουργεί στη φασματική ζώνη C (5,6 cm) με πολικότητα HH με μία μεγάλη γκάμα εδαφικών καλύψεων που κυμαίνονται από 35 έως 500 km με αντίστοιχες χωρικές διαχωριστικές ικανότητες από 10 έως 100 m. Το σύστημα διαθέτει επαναληπτικότητα λήψης κάθε 24 ημέρες που μπορεί να φτάσει την 1 με 5 ημέρες λόγω των διαφορετικών γωνιών παρατήρησης που κυμαίνονται από 20 έως 50⁰.



Σχήμα 4.29 Το σύστημα Radarsat.

4.9.10 Το σύστημα Envisat

Η Ευρωπαϊκή Εταιρεία Διαστήματος (ESA) έθεσε σε τροχιά τον δορυφόρο Τηλεπισκόπησης Envisat (Environmental Satellite) τον Μάρτιο του 2002, ο οποίος θα είναι ενεργός για 5 έτη, κυρίως για περιβαλλοντικές εφαρμογές. Ο δορυφόρος παρέχει μετρήσεις της ατμόσφαιρας, ωκεανών, εδαφών και πάγων. Οι πληροφορίες του υποστηρίζουν επιστημονικές έρευνες και επιτρέπουν την παρατήρηση και καταγραφή περιβαλλοντικών και κλιματολογικών αλλαγών. Η χωρική διαχωριστική ικανότητα του συστήματος είναι 25 m.

4.10 Εφαρμογές

Η ερμηνεία των εικόνων Radar σχετίζεται ιδιαίτερα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τον περιβάλλοντα χώρο της περιοχής που απεικονίζει. Εξαρτάται επίσης από το μήκος κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης καθώς και από τις επιδράσεις του νερού και της υγρασίας.

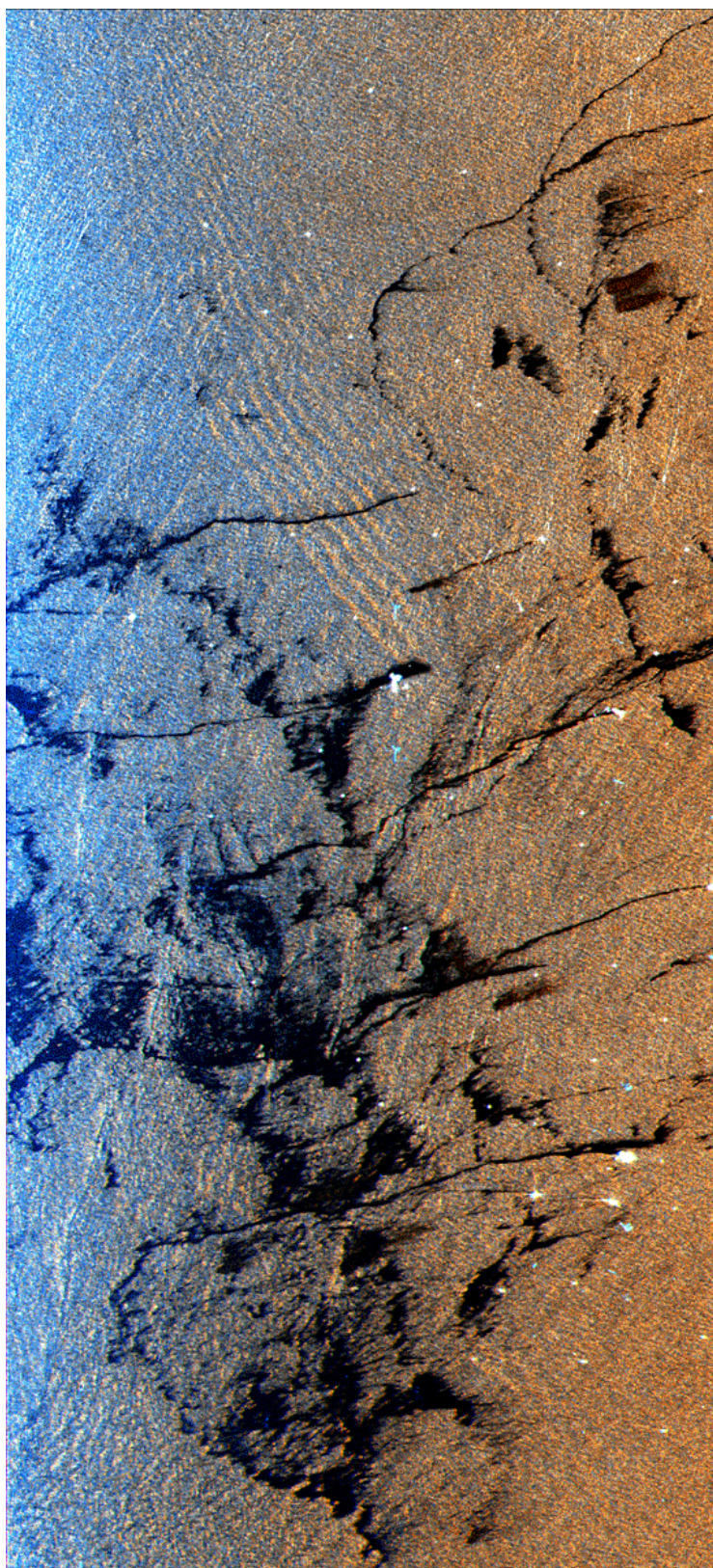
Έτσι η ερμηνεία παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα δίκτυα απορροής, το τοπογραφικό ανάγλυφο, τις κλίσεις των πετρωμάτων, τη χλωρίδα, το είδος των εδαφών, την υγρασία του εδάφους, την κατεύθυνση των οδικών αρτηριών, το μέγεθος των κτιρίων και την πυκνότητα της αστικής κάλυψης, κλπ.

Οι κύριες εφαρμογές των εικονοληπτικών συστημάτων Radar είναι :

Ωκεανογραφία, Ρύπανση

Τα Radar παρέχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης και μέτρησης της έκτασης της διαρροής πετρελαίου στην επιφάνεια της θάλασσας από φυσικές ή ανθρωπογενείς αιτίες. Στο Σχήμα 4.30 φαίνεται μια εικόνα που λήφθηκε τον Οκτώβριο του 1994 περίπου 150 km δυτικά της Βομβάης, Ινδία, στην Αραβική θάλασσα. Η εικόνα απεικονίζει μία έκταση 20 km x 45 km και λήφθηκε με το σύστημα SIR-C / X-SAR.

Τα χρώματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος και πολώσεις του Radar ως εξής: Το κόκκινο είναι στην L ζώνη με πόλωση VV, το πράσινο είναι ο μέσος όρος της L ζώνης και το μπλε είναι στην C ζώνη με πόλωση VV.



Σχήμα 4.30 Εικόνα SIR-C/X-SAR από τη Θάλασσα της Αραβίας.

Οι επιμήκεις μελανές λωρίδες είναι εκτεταμένες πετρελαιοκηλίδες που περιβάλλουν τις πλατφόρμες πετρελαίου.

Οι πλατφόρμες πετρελαίου όντας μεταλλικές κυρίως κατασκευές εμφανίζονται ως λευκές κηλίδες λόγω του φαινομένου του συντονισμού και της γωνιακής ανάκλασης.

Οι πετρελαιοκηλίδες εξομαλύνουν την επιφάνεια της θάλασσας, προκαλώντας κατοπτρική ανάκλαση στην ακτινοβολία του Radar με ελάχιστη επιστροφή σήματος στον δέκτη, με αποτέλεσμα να δημιουργούν σκούρους τόνους του γκρι στην εικόνα.

Υπάρχουν επίσης δύο μορφές ωκεάνιων κυμάτων που εμφανίζονται σε αυτήν την εικόνα. Η κυρίαρχη ομάδα μεγάλων κυμάτων (ανώτερο κέντρο) ονομάζονται εσωτερικά κύματα (internal waves). Τα εσωτερικά κύματα (με μεγάλο πλάτος και περίοδο) δημιουργούνται στη διεπιφάνεια δύο διαφορετικών μέσων διάδοσης και δημιουργούνται στο εσωτερικό της θάλασσας ως δευτερογενή κύματα είτε από παλίρροιες, είτε από σεισμούς, είτε από την ανάμειξη νερών διαφορετικής αλατότητας ή θερμοκρασίας, είτε από υποβρύχια.

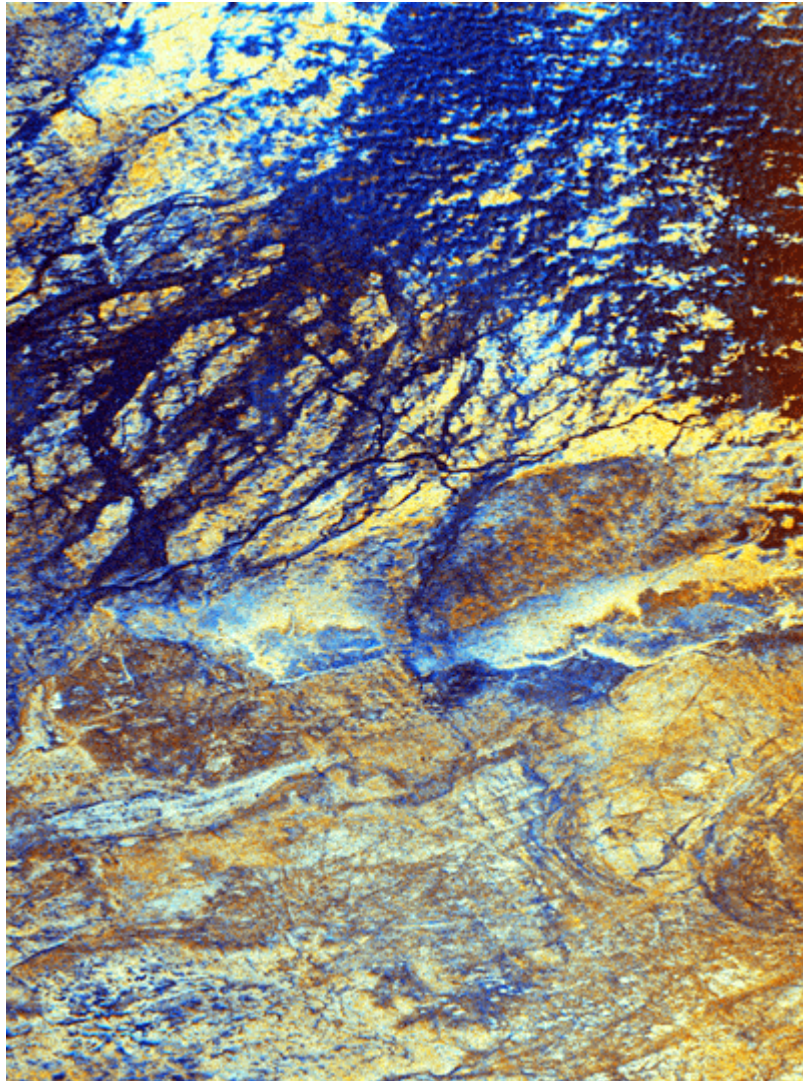
Τέλος κύματα επιφανείας (ρυτιδώσεις νερού, capillary waves) που προκαλούνται από ανέμους εμφανίζονται σε όλη την έκταση της εικόνας και είναι πιο ευδιάκριτα στην αριστερή πλευρά της εικόνας.

Γεωλογία

Στο Σχήμα 4.31 απεικονίζεται μια ψευδοχρωματική εικόνα της ακατοίκητης όασης Safsaf στη νότια Αίγυπτο κοντά στα σύνορα της Αιγύπτου με το Σουδάν. Η εικόνα παρήχθη από το σύστημα SIR-C/X-SAR από τις ζώνες L και C στις 9 Απριλίου του 1994. Στην εικόνα εμφανίζονται λεπτομερείς δομές βραχωδών υποστρωμάτων. Με το σκούρο μπλε απεικονίζονται κανάλια τα οποία αποτελούσαν τμήμα μια παλαιάς κοιλάδας την οποία διέσχισε ένας ποταμός. Στην φωτογραφίες στο οπτικό φάσμα τα κανάλια αυτά δεν φαίνονται διότι είναι καλυμμένα με άμμο.

Υποτίθεται ότι η μεγάλη κοιλάδα δημιουργήθηκε από έναν από τους διάφορους αρχαίους ποταμούς που προϋπήρξε του Νείλου εκατομμύρια έτη πριν. Τα μικρά κανάλια είναι νεότερα, και πιθανώς διαμορφωμένα κατά τη

διάρκεια των σχετικά υγρών κλιματολογικών περιόδων μέσα στα προηγούμενα εκατό χιλιάδες χρόνια.



Σχήμα 4.31 Η οάση Safsaf στη νότια Αίγυπτο.

Παρακινούμενοι από το παραπάνω γεγονός γεωλόγοι και αρχαιολόγοι μελέτησαν την περιοχή και ανακάλυψαν ασυνήθιστη συγκέντρωση πέτρινων εργαλείων που πιθανώς χρησιμοποιήθηκαν από προϊστορικούς ανθρώπους (*Homo erectus*) πριν εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Πιθανολογείται λοιπόν η περιοχή αυτή να είχε υποστηρίξει βλάστηση και την ύπαρξη ζώων σε παλαιότερους υγρότερους χρόνους. Σήμερα, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, η περιοχή είναι ερημική, ακατοίκητη με ξηρασία εκτός από μερικές διεσπαρμένες οάσεις.

Αυτή η ψευδοχρωματική σύνθετη εικόνα παρήχθη από τις οριζόντιες εικόνες πόλωσης στις ζώνες C και L. Στη C ζώνη αντιστοιχεί το κόκκινο, η L ζώνη με πόλωση (HH) εμφανίζεται με πράσινο, και η αναλογία αυτών των δύο εικόνων $(L(HH) / C(HH))$ εμφανίζεται με μπλε. Τα αρχικά και σύνθετα χρώματα στην εικόνα δείχνουν το βαθμό στον οποίο η C ζώνη, η L ζώνη, η αναλογία τους ή ο μερικός συνδυασμός και των τριών, αποκρίνονται στην τραχύτητα της επιφάνειας. Χρησιμοποιώντας αυτό το σχέδιο χρωματισμού, οι περιοχές που εμφανίζονται φωτεινές και σε L ζώνη και σε C ζώνη είναι χρωματισμένες κίτρινες, ενώ οι περιοχές που εμφανίζονται φωτεινότερες σε L ζώνη από ότι στη C ζώνη εμφανίζονται πιο μπλε. Περαιτέρω ανάλυση της εικόνας έδειξε ότι και οι δύο ζώνες μπορούν και διεισδύουν εύκολα στο λεπτό στρώμα της άμμου πλάτους 12 cm.

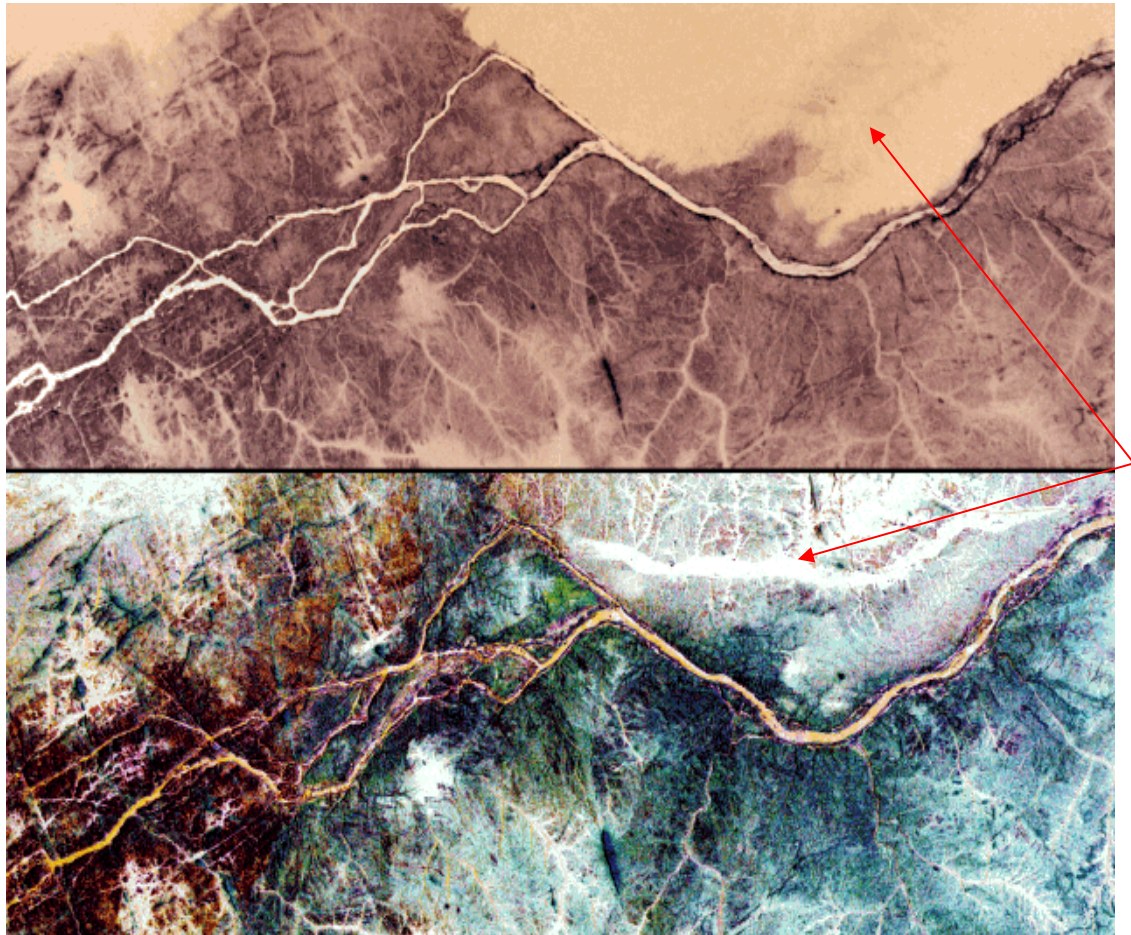
Αυτές είναι δύο εικόνες (Σχήμα 4.32) τμήματος του ποταμού του Νείλου, κοντά στον τέταρτο καταρράκτη στο Σουδάν. Η πάνω εικόνα είναι μια φωτογραφία που λήφθηκε στο υπέρυθρο από το διαστημόπλοιο Columbia τον Νοέμβριο του 1995. Η κάτω εικόνα Radar αποκτήθηκε από το σύστημα SIR-C/X-SAR.

Η παχιά, άσπρη περιοχή στο πάνω μέρος της εικόνας ραντάρ είναι ένα αρχαίο κανάλι του Νείλου που θάβεται τώρα κάτω από τα στρώματα της άμμου. Αυτό το κανάλι δεν μπορεί να φανεί στη πάνω φωτογραφία και η ύπαρξή του δεν ήταν γνωστή προτού να υποβληθεί σε επεξεργασία η εικόνα ραντάρ.

Η περιοχή στο αριστερό και στις δύο εικόνες εμφανίζει πώς ο Νείλος αναγκάζεται για να ρεύσει μέσω ενός χαοτικού συνόλου σπασιμάτων να χωριστεί σε μικρότερα κανάλια, γεγονός που δείχνει ότι ο Νείλος έχει αυτήν την πορεία ροής σχετικά πρόσφατα.

Οι εικόνες Radar έχουν επιτρέψει στους επιστήμονες να αναπτύξουν νέες θεωρίες για να εξηγήσουν την προέλευση της "μεγάλης κάμψης" του Νείλου στο Σουδάν, όπου ο ποταμός παίρνει μια ευρεία στροφή στο νοτιοδυτικό σημείο πριν αποκτήσει ξανά βόρεια πορεία προς τη Μεσόγειο θάλασσα.

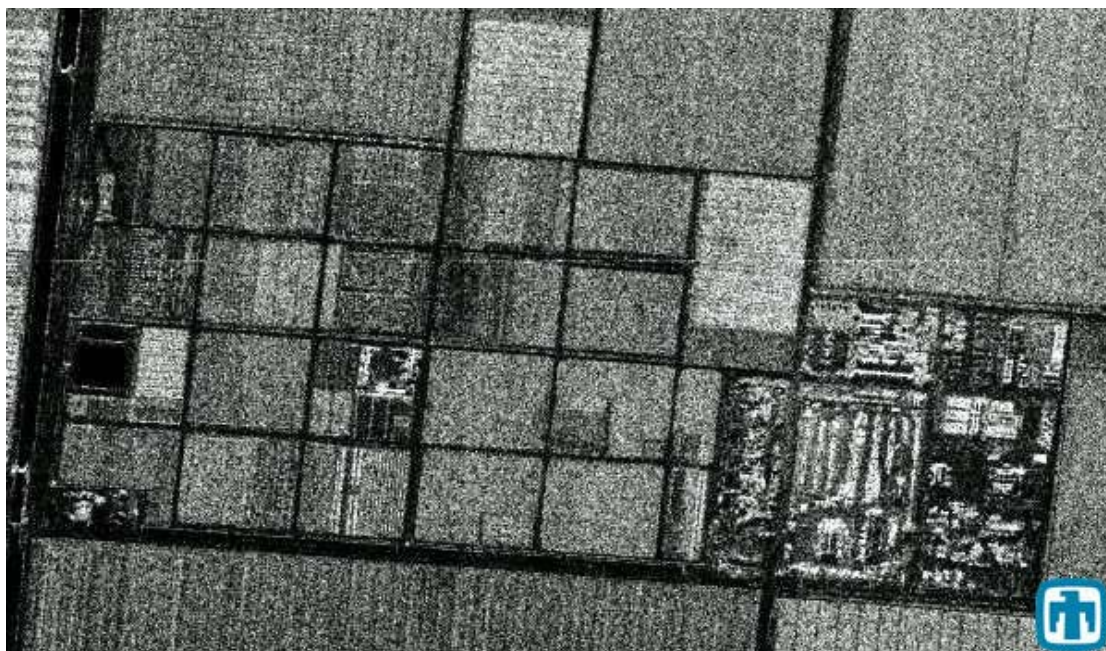
Κάθε εικόνα είναι περίπου 50 km x 19 km. Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στην L ζώνη με πόλωση HV και το μπλε αντιστοιχεί στην L ζώνη με πόλωση HH.



Σχήμα 4.32 Ο ποταμός Νείλος. Στην πάνω εικόνα (υπέρυθρο) δεν φαίνεται το αρχαίο θαμμένο κανάλι (άσπρη παχιά γραμμή), το οποίο εμφανίζεται λόγω διείσδυσης της ακτινοβολίας Radar στην κάτω εικόνα.

Βλάστηση

Εικόνες Radar έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τον προσδιορισμό της έκτασης της κάλυψης της βλάστησης και για την παρακολούθηση της αποψίλωσης της δασικής βλάστησης ειδικά σε περιοχές με έντονη νεφοκάλυψη. Πειράματα με εικόνες Radar και εργασίες πεδίου έδειξαν ότι το φάσμα από 10-30 cm (S και L ζώνη) είναι καταλληλότερο για τη διάκριση μεγάλων φυτών, ενώ το φάσμα των μικρότερων μηκών κύματος από 2 έως 4 cm είναι πιο χρήσιμο για τα μικρότερα φυτά και τις αγροτικές καλλιέργειες.



Σχήμα 4.33 Είδη βλάστησης από εικόνα Radar.

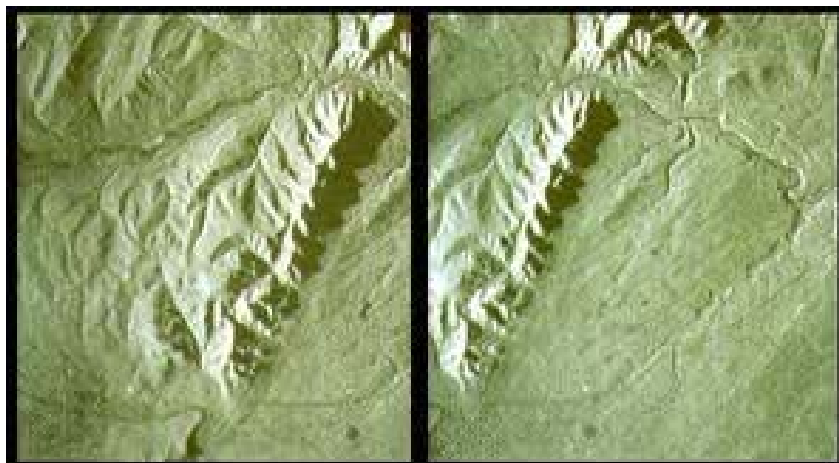
Τέλος οι εικόνες Radar είναι χρήσιμες σε ανίχνευση κοιτασμάτων και σε πολλές εφαρμογές μηχανικών, όπως σχεδιασμό οδικών αρτηριών, κατασκευές φραγμάτων και γεφυρών, κατασκευές λιμανιών. Οι εικόνες έχουν φανεί εξαιρετικά χρήσιμες σε περιοχές που καλύπτονται από νέφη και διακρίνονται για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών γραμμώσεων (π.χ ρήγματα) και της γεωμορφολογίας του εδάφους. Επιφανειακοί γεωλογικοί σχηματισμοί όπως αντίκλινα, σύγκλινα και πτυχώσεις πετρωμάτων έχουν κάποια σχέση με την υπόγεια γεωλογική δομή και είναι μετρήσιμα από δέκτες Radar. Η διάκριση επιτυγχάνεται εξαιτίας της ευαισθησίας του σήματος επιστροφής του Radar σε αλλαγές στην κλίση των πετρωμάτων, στους τύπους και τις μορφές του δικτύου απορροής κλπ. Όλα αυτά τα στοιχεία αποτελούν ένδειξη της λιθολογίας της περιοχής και αποτελούν στοιχεία για ανίχνευση πετρελαίου και φυσικού αερίου.

4.11 Προηγμένες εφαρμογές

Οι προηγμένες εφαρμογές των εικονοληπτικών Radar είναι βασικά τρεις: η “Ρανταργραμετρία” (Radargrammetry), η Συμβολομετρία (Interferometry) και η Πολωσιμετρία (Polarimetry).

4.11.1 “Ρανταργραμμετρία”

Το εικονοληπτικό σύστημα Radar στη συγκεκριμένη περίπτωση συλλέγει ένα ζευγάρι εικόνων από την ίδια ακριβώς περιοχή αλλά με διαφορετική γωνία παρατήρησης ή πρόσπτωσης (Σχήμα 4.34).



Σχήμα 4.34 Ζευγάρι φωτογραφιών από την ίδια περιοχή με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

Με την επικάλυψη των εικόνων δίνεται η δυνατότητα να αναπαραχθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο με κατάλληλες τεχνικές δίνει πληροφορίες για την ακριβή μέτρηση υψομετρικών διαφορών και θέσης σημείων εδάφους (ανάλογη περίπτωση με τη φωτογραμμετρία (Photogrammetry)).

4.11.2 Συμβολομετρία

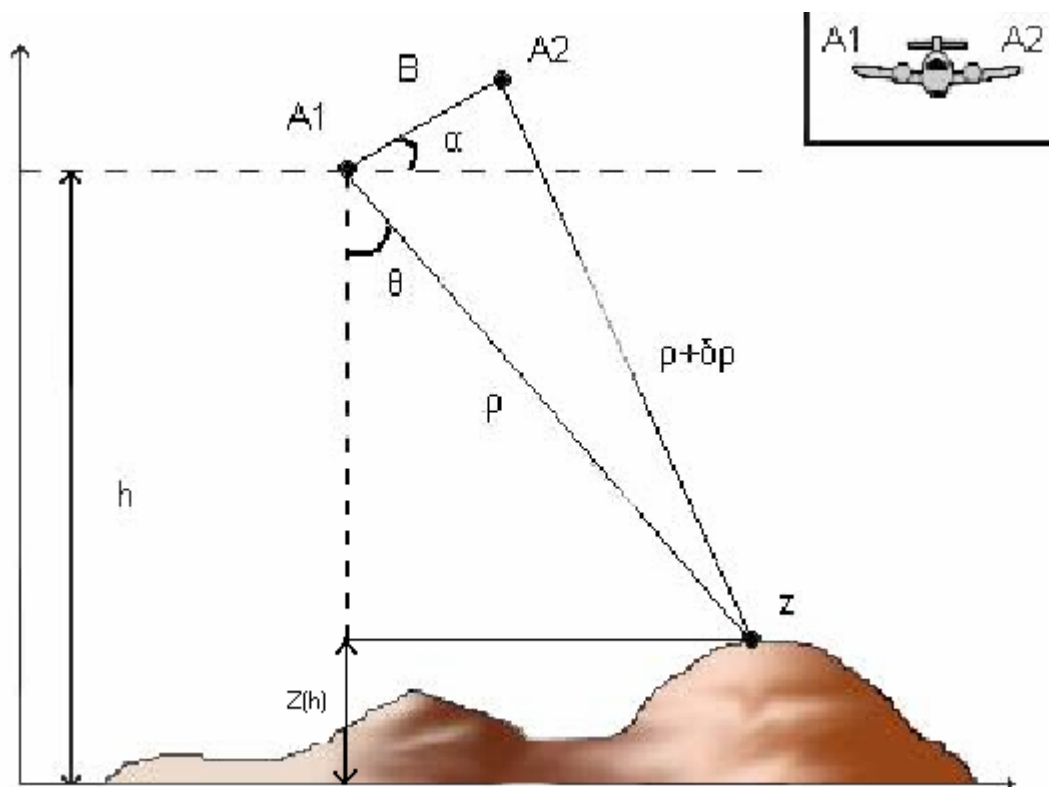
Η συμβολομετρία είναι μια τεχνική με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί:

Το τοπογραφικό υψόμετρο μιας περιοχής, η ταχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας, οι μικρομετακινήσεις περιοχών που έχουν υποστεί δυναμικά φαινόμενα (π.χ μετακινήσεις επιφανειακών ρηγμάτων από σεισμούς, μετακινήσεις ωκεάνιων πάγων, κλπ), (Madsen & Zebker, 1999).

Η συμβολομετρία Radar βασίζεται περισσότερο σε μετρήσεις διαφοράς φάσης του σήματος επιστροφής παρά σε μετρήσεις πλάτους του. Η μέτρηση της διαφοράς φάσης επιτυγχάνεται έχοντας δύο κεραίες Radar στην ίδια πλατφόρμα (π.χ αεροσκάφος) ή με διαδοχικά περάσματα σε διαφορετικές

ημερομηνίες από την ίδια περιοχή με πλατφόρμα που φέρει μία κεραία (δορυφόρος).

Στο Σχήμα 4.35 φαίνεται η γεωμετρία της συμβολομετρίας για αεροσκάφος που φέρει δύο κεραίες A1, A2, Radar οι οποίες απέχουν απόσταση B (Baseline), είναι τοποθετημένες εγκάρσια της ατράκτου και “φωτίζουν” το ίδιο σημείο στο έδαφος Z.



Σχήμα 4.35 Γεωμετρία της συμβολομετρίας.

Η γωνία παρατήρησης είναι θ , το ύψος της πλατφόρμας συμβολίζεται με h , η απόσταση του σημείου από την κεραία είναι ρ και η γωνία που σχηματίζουν με τον ορίζοντα οι κεραίες συμβολίζεται με α .

Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτει ότι :

$$z(h) = h - \rho \cos\theta \quad (4.21)$$

όπου $z(h)$ είναι το ζητούμενο υψόμετρο του σημείου z . Εφαρμόζοντας τον νόμο των συνημιτόνων προκύπτει:

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2 \rho B \cos(\theta + 90^\circ - \alpha) = \rho^2 + B^2 + 2 \rho B \sin(\alpha - \theta)$$

Επιλύοντας ως προς $\sin(\alpha - \theta)$ προκύπτει ότι:

$$\sin(\alpha - \theta) = [(\rho + \delta\rho)^2 - \rho^2 - B^2] / 2 \rho B \quad (4.22)$$

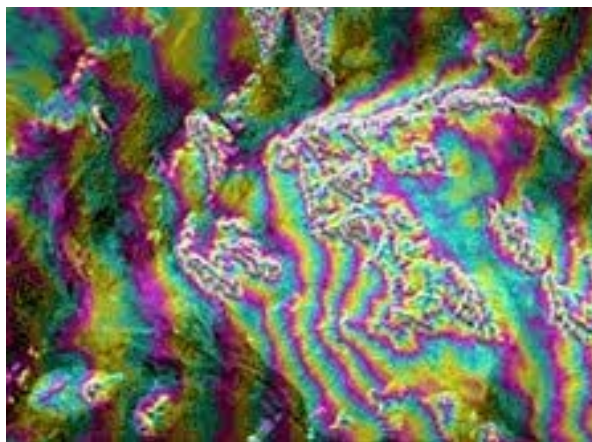
Η μετρούμενη διαφορά φάσης ϕ από τις δύο κεραίες συνδέεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\delta\rho = \lambda \Delta\phi / 4 \pi \quad (4.23)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.19), (4.20) και (4.21) προκύπτει η τελική σχέση:

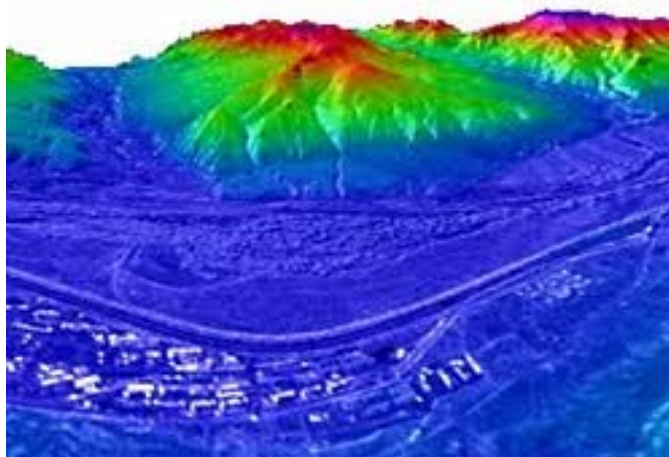
$$z = h - \{[(\lambda \phi / 4 \pi)^2 - B^2] \cos\theta / [2 B \sin(\alpha - \theta) - 2 (\lambda \phi / 4 \pi)]\} \quad (4.24)$$

Όλοι οι όροι της εξίσωσης είναι άμεσα γνωστοί εκτός από τη διαφορά φάσης $\Delta\phi$ η οποία υπολογίζεται από τις κεραίες. Επομένως υπολογίζεται το υψόμετρο του σημείου z . Το προσδιορισμένο με αυτόν τον τρόπο υψόμετρο z μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνόρθωση των γεωμετρικών παραμορφώσεων της εικόνας που οφείλονται στο τοπογραφικό ανάγλυφο.



Σχήμα 4.36 Συμβολογράφημα (Interferogram). Τα χρώματα συμβολίζουν τις διακυμάνσεις στο ύψος.

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε ένα συμβολογράφημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ένα τρισδιάστατο τοπογραφικό μοντέλο (Σχήμα 4.37).



Σχήμα 4.37 Τρισδιάστατο μοντέλο.

4.11.3 Πολωσιμετρία

Η έννοια της πολωσιμετρίας στα Radar υπαινίχτηκε ήδη στην αναφορά των βασικών αρχών Radar στην παράγραφο 4.5.1. Η Πολωσιμετρία περιλαμβάνει τη διάκριση μεταξύ των πολώσεων που ένα σύστημα Radar είναι σε θέση να διαβιβάσει και να λάβει. Τα περισσότερα ραντάρ διαβιβάζουν την ακτινοβολία μικροκυμάτων είτε οριζόντια (H) είτε κάθετα (V) και ομοίως, λαμβάνουν το επιστρεφόμενο σήμα μόνο σε μια από αυτές τις πολώσεις

Τα πολωσιμετρικά Radar είναι σε θέση να διαβιβάσουν και να λάβουν και τις οριζόντιες και τις κάθετες πολώσεις. Κατά συνέπεια, είναι σε θέση να λάβουν και να επεξεργαστούν και τους τέσσερις συνδυασμούς αυτών των πολώσεων: HH, HV, VH, και VV.

Κάθε ένα από αυτά τα "κανάλια πόλωσης" έχει ποικίλες ευαισθησίες στα διαφορετικά χαρακτηριστικά επιφάνειας και τις ιδιότητες. Κατά συνέπεια, η διάθεση των στοιχείων πολυ-πόλωσης βοηθά να βελτιώσει τον προσδιορισμό, και τη διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των στόχων.

Εκτός από την καταγραφή του πλάτους του επιστρεφόμενου σήματος για κάθε πόλωση, τα περισσότερα πολωσιμετρικά Radar είναι επίσης ικανά να καταγράψουν τις πληροφορίες της φάσης των επιστρεφόμενων σημάτων.

Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει περαιτέρω την πολωσιμετρική "υπογραφή" των διαφορετικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων επιφάνειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ

5.1 Γενικά

Η ανάλυση και η ερμηνεία (analysis and interpretation) μιας εικόνας Τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό και την μέτρηση διαφόρων ιδιοτήτων των στόχων προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για αυτούς. Ανάλογα με την μορφή των δεδομένων (αναλογική ή ψηφιακή, analog format or digital format) που επεξεργάζεται ο αναλύτης ταξινομείται σε αναλογική επεξεργασία εικόνας (analog processing and analysis) και σε ψηφιακή επεξεργασία εικόνας (digital processing and analysis). Στην πρώτη περίπτωση τα δεδομένα είναι σε κάποιο φωτογραφικό χαρτί ανεξαρτήτως του τύπου του αισθητήρα που συνέλεξε τα δεδομένα καθώς και από τον τρόπο συλλογής. Στη δεύτερη περίπτωση τα δεδομένα έχουν ψηφιοποιηθεί και επεξεργάζονται σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή.

5.2 Στοιχεία της ερμηνείας εικόνας

Οι στόχοι που εμφανίζονται στις εικόνες Τηλεπισκόπησης μπορούν να καθοριστούν και να διαχωριστούν οπτικά ανάλογα με τις διαφορές που παρουσιάζονται σε χαρακτηριστικά στοιχεία τους όπως ο τόνος (tone), η μορφή (shape), το μέγεθος (size), τη δομή (pattern), την υφή (texture), την σκίαση (shadow).

Ο τόνος αναφέρεται στη σχετική φωτεινότητα ή το χρώμα των αντικειμένων σε μια εικόνα. Γενικά, ο τόνος είναι το θεμελιώδες στοιχείο για τη διάκριση μεταξύ των διαφορετικών στόχων ή των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Οι παραλλαγές στον τόνο επιτρέπουν επίσης στα στοιχεία της μορφής, της υφής, και της δομής των αντικειμένων να διακριθούν.



Σχήμα 5.1 Ο τόνος.

Η μορφή αναφέρεται στη γενική μορφή, το σχήμα των μεμονωμένων αντικειμένων. Η μορφή μπορεί να είναι μια πολύ διακριτική ένδειξη για την ερμηνεία.



Σχήμα 5.2 Η μορφή.

Το μέγεθος των αντικειμένων σε μια εικόνα σχετίζεται με την κλίμακα. Είναι σημαντικό να αξιολογηθεί το μέγεθος ενός στόχου σχετικά με άλλα αντικείμενα σε μια σκηνή, καθώς επίσης και το απόλυτο μέγεθος, για να βοηθήσει στην ερμηνεία εκείνου του στόχου.



Σχήμα 5.3 Το μέγεθος.

Η δομή αναφέρεται στη χωρική ρύθμιση των ορατά ευδιάκριτων αντικειμένων. Χαρακτηριστικά μια τακτική επανάληψη των παρόμοιων τόνων και των υφών θα παραγάγει ένα διακριτικό και τελικά αναγνωρίσιμο σχέδιο.



Σχήμα 5.4 Η δομή.

Η υφή αναφέρεται στη ρύθμιση και τη συχνότητα της τονικής παραλλαγής στους τομείς μιας εικόνας. Η υφή είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για τη διάκριση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων στα εικονοληπτικά Radar.



Σχήμα 5.5 Η υφή.

Η σκίαση είναι επίσης χρήσιμη στην ερμηνεία δεδομένου ότι μπορεί να παρέχει μια ιδέα του σχεδιαγράμματος και του σχετικού ύψους ενός στόχου ή των στόχων, που μπορούν να καταστήσουν τον προσδιορισμό ευκολότερο.



Σχήμα 5.6 Η σκίαση.

5.3 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας – Βασικές έννοιες

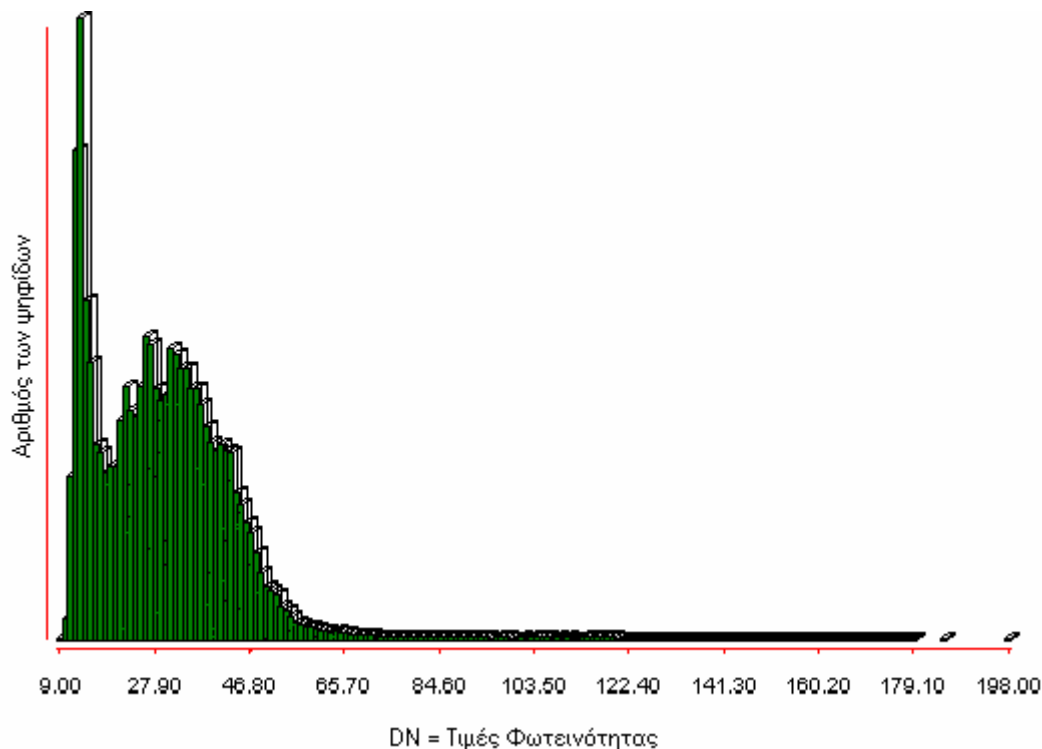
Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας λαμβάνει χώρα όταν τα δεδομένα έχουν ψηφιοποιηθεί σε αποθηκευτικά μέσα ώστε να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για αυτά, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και διαφόρων εξειδικευμένων λογισμικών (software) που έχουν αναπτυχθεί. Στην παράγραφο 2.9 έγινε αναφορά στην μορφή της ψηφιακής εικόνας η οποία

θεωρείται ένας πίνακας που οι στήλες και οι γραμμές του αντιστοιχούν στις συντεταγμένες της εικόνας, ενώ κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί στην τιμή του τόνου του γκρι για αυτό το σημείο. Τα στοιχεία μιας τέτοιας ψηφιακής διάταξης ονομάζονται εικονοστοιχεία ή ψηφίδες (pictures elements ή pixels). Κάθε ψηφίδα (pixel) της εικόνας έχει συντεταγμένες (x, y) στο σύστημα της εικόνας, με διακριτές τιμές (i, j) , που αντιστοιχούν σε δειγματοληψία του χώρου της γήινης επιφάνειας. Οι τιμές της κλίμακας του γκρι $g(x, y)$ των ψηφίδων προσδιορίζονται από τη μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας της επιφάνειας.

Η τιμή της κάθε ψηφίδας ονομάζεται **φωτεινότητα** και αντιστοιχεί στο επίπεδο διαβάθμισης του γκρι. Στην πολυφασματική εικόνα μια ψηφίδα διαθέτει περισσότερες από μία τιμές φωτεινότητας (ή επίπεδα διαβάθμισης του γκρι). Εάν παρασταθεί γραφικά ο αριθμός των ψηφίδων που εμφανίζονται στην εικόνα και διαθέτουν συγκεκριμένο επίπεδο της κλίμακας του γκρι προκύπτει το **ιστόγραμμα της εικόνας**.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται μια εικόνα από το θεματικό χαρτογράφο του Landsat στη φασματική ζώνη 3 (TM 3 Band) καθώς και το ιστόγραμμα της.





Σχήμα 5.7 Ιστόγραμμα της εικόνας. Στον άξονα x παρουσιάζονται οι τιμές φωτεινότητας μιας εικόνας 8-bit ($2^8 = 256$ διαβαθμίσεις φωτεινότητας) και στον y ο αριθμός των ψηφιδών που διαθέτουν τη συγκεκριμένη φωτεινότητα.

Από κάθε ιστόγραμμα μπορεί να προσδιοριστεί το αθροιστικό ιστόγραμμα ή τη συνάρτηση κατανομής $F(g_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$ αθροίζοντας για κάθε επίπεδο του γκρι όλες τις προηγούμενες συχνότητες τα επίπεδα των οποίων δεν είναι υψηλότερα από το συγκεκριμένο επίπεδο διαβάθμισης g_i .

Η επεξεργασία περιλαμβάνει γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις, βελτιώσεις και μετασχηματισμούς, ώστε ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται οι εικόνες να προκύψουν χρήσιμες πληροφορίες.

Η πιο κοινή κατηγοριοποίηση των παραπάνω λειτουργιών επεξεργασίας για την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας είναι :

- Η προεπεξεργασία (Preprocessing)
- Η βελτίωση της εικόνας (Image Enhancement)
- Ο μετασχηματισμός της εικόνας (Image Transformation)
- Ταξινόμηση εικόνας (Image Classification)

5.4 Προεπεξεργασία

Οι διαδικασίες προεπεξεργασίας αφορούν τη διόρθωση γεωμετρικών και ραδιομετρικών σφαλμάτων που εμφανίζονται στις εικόνες.

Τα γεωμετρικά σφάλματα οφείλονται σε πολλούς παράγοντες όπως η μη σταθερότητα της πλατφόρμας, η περιστροφή της γης, η πεπερασμένη ταχύτητα σάρωσης (μερικών ανιχνευτών), η καμπυλότητα της γης, σε σφάλματα ανιχνευτών, σε μεταβολές της ταχύτητας και του ύψους της πλατφόρμας, σε πανοραμικές παραμορφώσεις, σε μεταβολές της τροχιάς δορυφόρων κ.α.

Επιπλέον των επιδράσεων στη γεωμετρία της εικόνας, υπάρχουν και οι επιδράσεις στη ραδιομετρία της εικόνας, που οφείλονται σε διαφορετικούς παράγοντες, όπως είναι ο θόρυβος του συστήματος λήψης, η κακή ή ελαττωματική λειτουργία των αισθητήρων και η ατμόσφαιρα.

5.5 Γεωμετρικές διορθώσεις

Ο σκοπός της γεωμετρικής διόρθωσης της εικόνας είναι να μετασχηματιστεί το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (x, y) , το οποίο έχει υποστεί γεωμετρική παραμόρφωση, σε συγκεκριμένο σύστημα (X, Y) χαρτογραφικής προβολής.

Υπάρχουν δύο μεθοδολογίες διόρθωσης των γεωμετρικών σφαλμάτων των δορυφορικών εικόνων. Η πρώτη απαιτεί να είναι γνωστά με ακρίβεια τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου. Η δεύτερη χρησιμοποιεί μαθηματικές σχέσεις για τη συσχέτιση των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων στην εικόνα με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος.

5.5.1 Γεωμετρικές διορθώσεις με μοντέλα της τροχιάς

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη γνώση των παραμέτρων που περιγράφουν την τροχιά του δορυφόρου ή του αεροσκάφους, την περιστροφή της γης, την ταχύτητα δειγματοληψίας για την κβαντοποίηση της έντασης της ακτινοβολίας κλπ. Η γεωμετρική διόρθωση της εικόνας από το σύστημα (x, y) της εικόνας στο σύστημα (X, Y) του χάρτη εκφράζεται από έναν ευθύ μετασχηματισμό T σύμφωνα με τη γενική σχέση :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = T1 \cdot T2 \cdot T3 \cdot T4 \cdot T5 \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

όπου το T αποτελείται από διάφορες παραμέτρους T1, T2, T3, T4, T5 που περιέχουν πληροφορίες αντίστοιχα για τη γεωμετρία του αισθητήρα, της τροχιάς, της γης, της χαρτογραφικής προβολής και τον προσανατολισμό, κλίμακα. Κάθε βήμα που εμπλέκεται στη διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης θα πρέπει να είναι γνωστό. Επίσης ο αντίστροφος μετασχηματισμός από το σύστημα (X, Y) του χάρτη στο σύστημα (x,y) της εικόνας :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

θα πρέπει να είναι γνωστός ή να μπορεί να προσδιοριστεί. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά περίπλοκη και χρονοβόρα, αλλά αποτελεσματική όταν η φύση και οι όλοι μηχανισμοί των γεωμετρικών παραμορφώσεων είναι απολύτως καθορισμένοι.

5.5.2 Γεωμετρικές διορθώσεις με πολυώνυμα

Μια δεύτερη τεχνική βασίζεται στον καθορισμό ενός μαθηματικού μετασχηματισμού πολυωνύμων, ανεξαρτήτως της πηγής και του είδους της γεωμετρικής παραμόρφωσης την οποία προκάλεσαν. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτείται χάρτης που να απεικονίζει την περιοχή που αντιστοιχεί στην εικόνα ο οποίος να είναι γεωμετρικά ορθός (**image to map rectification**), ή απαιτείται άλλη εικόνα από την ίδια περιοχή η οποία να είναι διορθωμένη γεωμετρικά και να είναι ενταγμένη σε μία χαρτογραφική προβολή (**image to image rectification**).

Αρχικά ορίζονται δύο συστήματα αναφοράς, με το ένα σύστημα να περιγράφει τις θέσεις των σημείων στον χάρτη ή στη διορθωμένη εικόνα (X, Y) και το άλλο σύστημα να περιγράφει τις θέσεις των ψηφίδων στην αδιόρθωτη γεωμετρικά εικόνα (x, y). Γίνεται η θεώρηση ότι τα δύο συστήματα αναφοράς σχετίζονται μεταξύ τους με ένα ζευγάρι συναρτήσεων απεικονίσεων f, g της γενικής μορφής :

$$\begin{aligned}x &= f (X , Y) \\y &= g (X , Y)\end{aligned}\tag{5.3}$$

Αν οι συναρτήσεις είναι γνωστές τότε είναι δυνατόν να εντοπιστεί ένα σημείο (x, y) στην αδιόρθωτη εικόνα, αν είναι γνωστές οι συντεταγμένες (X, Y) στον χάρτη ή στην διορθωμένη εικόνα και αντίστροφα.

Οι συναρτήσεις μετασχηματισμού συνήθως επιλέγονται ως απλά πολυώνυμα έως τρίτου βαθμού. Για παράδειγμα ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού θα έχει την παρακάτω μορφή :

$$\begin{aligned}x &= a_0X + a_1Y + a_2 \\y &= b_0X + b_1Y + b_2\end{aligned}\tag{5.4}$$

Αν προσδιοριστούν οι συντελεστές (a, b) τότε η αδιόρθωτη εικόνα με σύστημα αναφοράς (x, y) θα διορθωθεί γεωμετρικά και θα ενταχθεί στη χαρτογραφική προβολή του χάρτη (X, Y) ή της γεωμετρικά διορθωμένης εικόνας, αφού για κάθε σημείο της (x, y) θα υπολογίζεται το “διορθωμένο” (X,Y). Για να προσδιοριστούν οι συντελεστές στην παραπάνω σχέση χρειάζονται 3 σημεία γνωστών συντεταγμένων :

$$\begin{aligned}(x_1, y_1) &= f (X_1, Y_1), \\(x_2, y_2) &= f (X_2, Y_2) \\(x_3, y_3) &= f (X_3, Y_3)\end{aligned}$$

Η αντιστοίχιση καθενός σημείου $(x_n, y_n) = f (X_n, Y_n)$ γίνεται χειροκίνητα από τον αναλυτή σε προγράμματα επεξεργασίας εικόνας σε σημεία που διαγράφονται ευκρινώς στις εικόνες και στους χάρτες (διασταυρώσεις δρόμων, στροφές ποταμών, ακτογραμμές κλπ.). Τα σημεία αυτά ονομάζονται **σημεία ελέγχου στο έδαφος** (Ground Control Points, GCPs). Στην περίπτωση που διατίθενται περισσότερα σημεία, τότε η λύση δίνεται με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, όπως π.χ η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Καλώς καθορισμένα ζεύγη σημείων ελέγχου θα πρέπει να επιλεγούν για να διορθώσουν την εικόνα και να εξασφαλίσουν ακριβή αναπαράσταση του μαθηματικού πολυωνύμου. Ως γενικός κανόνας, συνίσταται η κατανομή των σημείων ελέγχου να γίνει έτσι ώστε να υπάρχουν GCPs γύρω από τα περιθώρια της εικόνας με κάποια ομοιόμορφη διασπορά σε όλο το τμήμα της εικόνας.

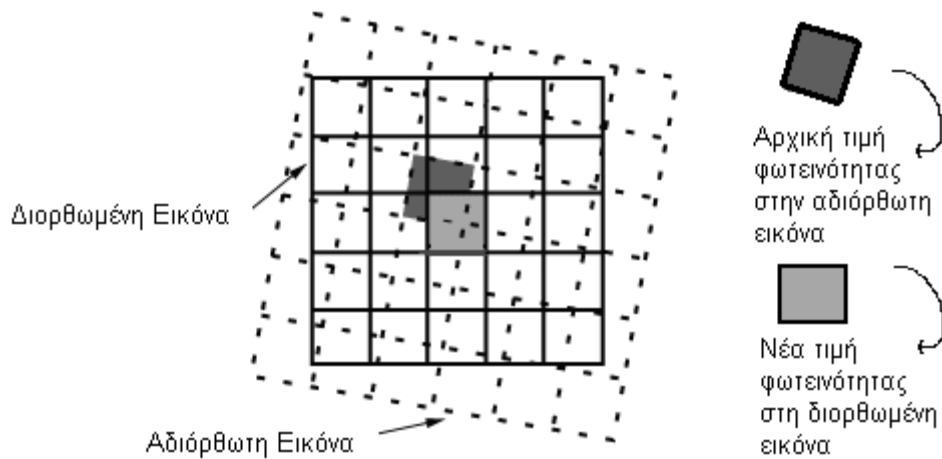
Αφού γίνουν όλες οι προηγούμενες διορθώσεις, η εικόνα μετασχηματίζεται έτσι ώστε οι συντεταγμένες της να αναφέρονται σε ένα χαρτογραφικό σύστημα συντεταγμένων.

5.5.3 Επανάληψη της δειγματοληψίας

Από τη στιγμή που προσδιοριστούν τα πολυώνυμα του γεωμετρικού μετασχηματισμού, θα να υπολογιστούν εξ'αρχής οι νέες τιμές DN του επιπέδου διαβάθμισης του γκρι, ώστε οι ακριβείς χωρικές τους θέσεις να αντιστοιχούν στα κέντρα του νέου καννάβου της διορθωμένης εικόνας. Κατά κανόνα οι νέες θέσεις των κέντρων των μετασχηματισμένων ψηφίδων δεν ταυτίζονται με τις αρχικές δειγματοληπτικές θέσεις. Για να προσδιοριστούν οι νέες τιμές DN στα νέα κέντρα των μετασχηματισμένων ψηφίδων, θα πρέπει να επαναληφθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας (resampling). Για το σκοπό αυτό υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνικές: (1) η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου, (2) η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής και (3) η μέθοδος της κυβικής παρεμβολής.

5.5.3.1 Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου

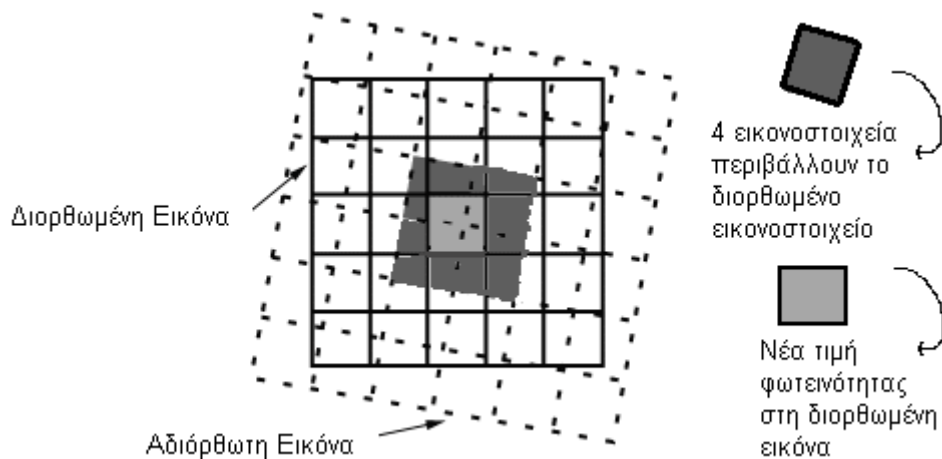
Στη μέθοδο αυτή το διορθωμένο εικονοστοιχείο λαμβάνει την τιμή φωτεινότητας από ένα αρχικό εικονοστοιχείο το οποίο έχει την ιδιότητα το κέντρο του να είναι πλησιέστερο στο κέντρο του διορθωμένου. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι αρκετά γρήγορη υπολογιστικά και εξασφαλίζει κατά κάποιο τρόπο ότι οι προκύπτουσες τιμές DN της φωτεινότητας θα παραμένουν οι ίδιες με της αρχικής εικόνας. Χρησιμοποιείται κυρίως για πολυφασματικά δεδομένα καθώς κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας διατηρείται η συσχέτιση μεταξύ των διάφορων διαύλων.



Σχήμα 5.8 Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.

5.5.3.2 Η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα τέσσερα πλησιέστερα εικονοστοιχεία για τη διεξαγωγή μιας δισδιάστατης γραμμικής παρεμβολής έτσι ώστε να ληφθεί η τιμή φωτεινότητας του διορθωμένου εικονοστοιχείου.



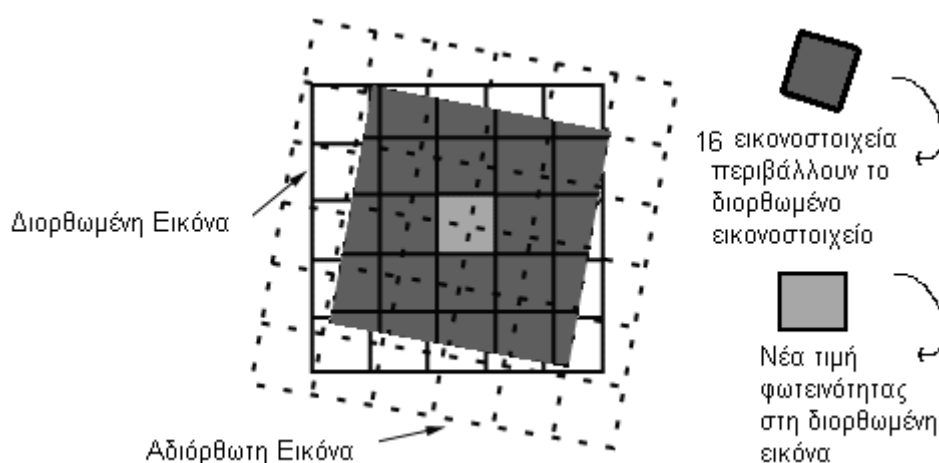
Σχήμα 5.9 Η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής.

Λόγω της δισδιάστατης γραμμικής παρεμβολής ελαττώνονται τα υψηλής συχνότητας στοιχεία της εικόνας με αποτέλεσμα μιας πιο ομαλής μορφής της εικόνας. Η τεχνική αυτή δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε

πολυφασματικές εικόνες γιατί κατά τη διάρκεια της δισδιάστατης παρεμβολής η συσχέτιση μεταξύ δύο διαύλων μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά.

5.5.3.3. Η μέθοδος της κυβικής δειγματοληψίας

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα 16 πλησιέστερα εικονοστοιχεία σε ένα πίνακα 4x4 και υπολογίζει την τιμή φωτεινότητας του διορθωμένου εικονοστοιχείου χρησιμοποιώντας δισδιάστατη παρεμβολή τρίτης τάξης. Με την εφαρμογή της τεχνικής αυτής δημιουργούνται εικόνες πιο ομαλές από ότι στη διγραμμική τεχνική και χρησιμοποιείται, κυρίως, όταν η εικόνα προορίζεται για φωτοερμηνεία.



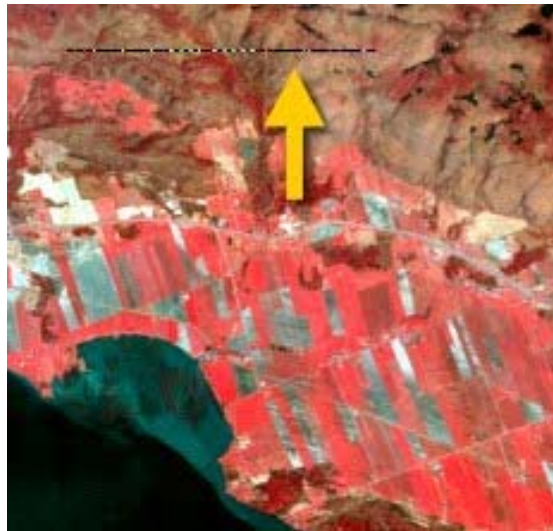
Σχήμα 5.10 Η μέθοδος της κυβικής παρεμβολής.

5.6 Ραδιομετρικές διορθώσεις

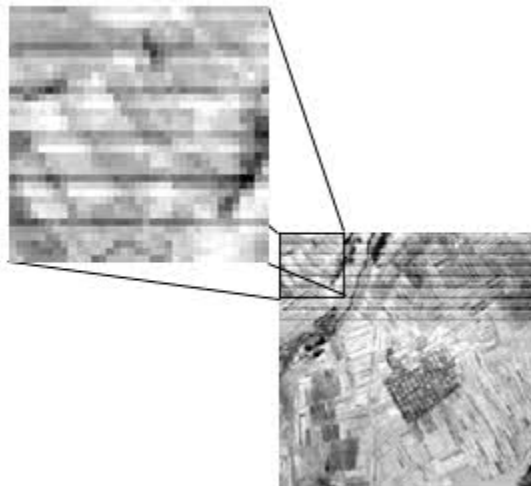
Υπάρχουν δύο τύποι ραδιομετρικών παραμορφώσεων της εικόνας που θα πρέπει να διορθωθούν : (1) η σχετική φωτεινότητα μιας συγκεκριμένης ψηφίδας μπορεί να παραμορφώνεται από δίαυλο σε δίαυλο, ή από ανιχνευτή σε ανιχνευτή, και (2) η ακτινοβολία σε ένα συγκεκριμένο δίαυλο καταγραφής ενδέχεται να είναι διαφορετική από την ακτινοβολία του στόχου στο έδαφος.

(1) Το πρώτο είδος ραδιομετρικής παραμόρφωσης αφορά εικόνες στις οποίες δεν καταγράφονται συγκεκριμένες γραμμές σάρωσης. Τέτοια προβλήματα εμφανίζονται συχνά και οφείλονται στα όργανα σάρωσης ή δειγματοληψίας κατά τη διάρκεια μετάδοσης ή καταγραφής των δεδομένων εικόνας ή κατά την αναπαραγωγή των μαγνητικών μέσων καταγραφής, κλπ. Το πρόβλημα της

ραδιομετρίας έγκειται στο γεγονός ότι κανένας ανιχνευτής σε ένα αισθητήρα δεν λειτουργεί πανομοιότυπα και εντελώς ταυτόχρονα με τους υπόλοιπους. Αν το πρόβλημα της διαφοροποίησης των ανιχνευτών ενός αισθητήρα γίνει έντονο, τότε παρατηρούνται φαινόμενα απορρύθμισης της καταγραφής μιας γραμμής που συνεπάγεται σε απολεσθείσες γραμμές σάρωσης (drooped lines) και στο φαινόμενο της λωριδοποίησης (striping).



Σχήμα 5.11 Drooped line. Η μαύρη γραμμή στο πάνω μέρος της εικόνας είναι απολεσθείσα γραμμή.



Σχήμα 5.12 Στο πάνω μέρος της εικόνας φαίνεται το φαινόμενο της λωριδοποίησης.

Για την επίλυση των παραπάνω ραδιομετρικών παραμορφώσεων οι ανιχνευτές ρυθμίζονται και βαθμονομούνται εργαστηριακά με σημεία

αναφοράς εργαστηριακές πηγές ακτινοβολίας ή φυσικές πηγές γνωστής ανακλαστικότητας.

Για την απόλυτη βαθμονόμηση, η σχέση μεταξύ σήματος εισόδου και σήματος εξόδου σε έναν ανιχνευτή προς βαθμονόμηση θεωρείται γραμμική και της μορφής :

$$V_0 = a + bV_i \quad (5.5)$$

όπου V_i η παρατηρούμενη ανάγνωση στο επίπεδο του γκρι και V_0 η γνωστή ανάγνωση από την πηγή αναφοράς. Κάθε ένας από αυτούς τους ανιχνευτές θα διαθέτει δική του συνάρτηση μετασχηματισμού ελαφρώς διαφορετική από των υπολοίπων ανιχνευτών. Προσδιορίζονται τελικά οι συντελεστές a, b από τις διάφορες μετρήσεις με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

(2) Το δεύτερο είδος της παραμόρφωσης προέρχεται κυρίως από την παρουσία της ατμόσφαιρας, που ως μέσο διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δημιουργεί τέτοιες ραδιομετρικές παραμορφώσεις. Στην παράγραφο 2.4 εξετάστηκε πως επιδρά η ατμόσφαιρα στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα φαινόμενα της σκέδασης και της απορρόφησης. Οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις εξαιτίας της ατμόσφαιρας διορθώνονται με μαθηματικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους όλα τα παραπάνω φαινόμενα. Στις φασματικές ζώνες που λειτουργούν τα εικονοληπτικά Radar τα παραπάνω φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα και δεν επηρεάζουν πρακτικά την μικροκυματική ακτινοβολία.

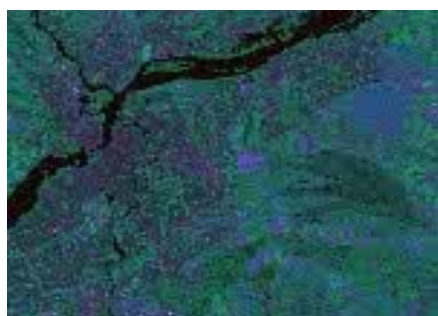
5.7 Η βελτίωση της εικόνας (Image Enhancement)

Η βελτίωση της εικόνας έχει ως στόχο, με διάφορες ραδιομετρικές βελτιώσεις να κάνει κάποια χαρακτηριστικά της εικόνας πιο ευδιάκριτα με την τροποποίηση των χρωμάτων της ή της έντασης της ακτινοβολίας. Σκοπός είναι να τονιστούν επιλεγμένες λεπτομέρειες της εικόνας, όπως διαφορές στη βλάστηση ή στο έδαφος, ώστε να επιτευχθεί ταχύτερη και ακριβέστερη ερμηνεία σε σχέση με την αρχική εικόνα.

5.7.1 Βελτίωση της αντίθεσης με το ιστόγραμμα (Contrast Enhancement)

Το ανθρώπινο μάτι πρακτικά μπορεί να διακρίνει καλά μέχρι 64 επίπεδα διακύμανσης της κλίμακας του γκρι σε μια εικόνα. Όταν το ιστόγραμμα μιας εικόνας (π.χ 8 bit = 256 DN, 256 διαβαθμίσεις του επιπέδου του γκρι) είναι συγκεκριμένο με μικρό εύρος τιμών σε χαμηλές τιμές φωτεινότητας (0 – 80, σκούρα εικόνα) ή σε υψηλές τιμές (220 - 255, φωτεινή εικόνα) οι αντιθέσεις στην εικόνα είναι πολύ μικρές και οι διαφορές δυσδιάκριτες. Ο αναλύτης λοιπόν πρέπει να εφαρμόσει τεχνικές διορθώσεις του ιστογράμματος ώστε να βελτιωθούν οι αντιθέσεις της εικόνας. (Contrast Enhancement). Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή του αρχικού εύρους της διακύμανσης των τιμών $x = DN$ σε κάποιο άλλο είτε με διάταση είτε με σύμπτυξη του ιστογράμματος της.

Η διάταση (histogram stretching) του ιστογράμματος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των χαμηλότερων και ανώτερων ορίων από το ιστόγραμμα (συνήθως οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές φωτεινότητας στην εικόνα) και την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού ώστε να “τεντωθεί” το αρχικό εύρος για να καλύψει όλες τις τιμές φωτεινότητας (0 - 255). Στο Σχήμα 5.13, η ελάχιστη τιμή της φωτεινότητας της αριστερής εικόνας στο ιστόγραμμα είναι 84 και η μέγιστη τιμή είναι 153. Αυτά τα 70 επίπεδα καταλαμβάνουν λιγότερο από το ένα τρίτο των πλήρων 256 επιπέδων διαθέσιμων. Ένα γραμμικό τέντωμα επεκτείνει ομοιόμορφα αυτήν την μικρή σειρά για να καλύψει την πλήρη σειρά των τιμών από 0 έως 255. Αυτό ενισχύει την αντίθεση στην εικόνα με τις φωτεινές περιοχές να εμφανίζονται φωτεινότερες και αντιστοίχως τις σκοτεινές περιοχές να εμφανίζονται σκοτεινότερες, καθιστώντας την οπτική ερμηνεία πολύ ευκολότερη.



Σχήμα 5.13 Βελτίωση της αντίθεσης με διάταση του ιστογράμματος.

Και οι δύο διαδικασίες της διάτασης και σύμπτυξης του εύρους διακύμανσης των τιμών του επιπέδου του γκρι στο ιστόγραμμα της εικόνας, μπορούν να επιτευχθούν ή με γραμμικούς ή με μη γραμμικούς μετασχηματισμούς οι οποίοι ωστόσο διατηρούν τη διάταξη των τιμών των εικονοστοιχείων και είναι πάντοτε αντιστρέψιμοι.

Ένας γραμμικός σχηματισμός που εφαρμόζεται συνήθως είναι :

$$y = ax + b \quad (5.6)$$

όπου x οι αρχικές τιμές της φωτεινότητας και y οι επιθυμητές τελικές τιμές. Το τροποποιημένο τελικό ιστόγραμμα δίνεται από μια σχέση της μορφής :

$$f_y(y) = \frac{1}{a} f_x\left(\frac{y-b}{a}\right) \quad (5.7)$$

Για παράδειγμα στην παραπάνω εικόνα του Σχήματος 5.13 οι αρχικές τιμές κυμαίνονται από :

$$84 < x < 153 \quad (5.8)$$

και με τη βοήθεια της σχέσης (5.6) προκύπτει :

$$84a + b < y < 153a + b \quad (5.9)$$

Με την απαίτηση των καινούριων ορίων να κυμαίνονται από 0 έως 255 προσδιορίζονται τα a, b με τη λύση του συστήματος 2×2 . Τέλος από την σχέση (5.6) προσδιορίζονται οι νέες τιμές y της φωτεινότητας από τις αρχικές τιμές x . Αν η εφαρμογή το απαιτεί η ίδια διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί με μη γραμμικές σχέσεις, όπως λογαριθμικές ή εκθετικές εκφράσεις.

5.7.2 Εξίσωση ιστογράμματος (Histogram Equalization)

Ο σκοπός της εξίσωσης του ιστογράμματος είναι να μετατρέψει το αρχικό σχήμα $F_x(X)$ του ιστογράμματος μιας εικόνας σε κάποιο άλλο $F_y(y)$ μιας ομοιόμορφης κατανομής που να διαθέτει την ίδια συχνότητα εμφάνισης για κάθε ψηφιακή τιμή του επιπέδου του γκρι. Τούτο επιτυγχάνεται με την εξίσου κατανομή του αθροιστικού ιστογράμματος $F_x(X)$ της αρχικής εικόνας σε

255 τμήματα (κυψέλες), όταν φυσικά η κλίμακα είναι από DN=0 έως DN=255. Κάθε κυψέλη θα αντιστοιχεί σε ένα ψηφιακό αριθμό $y = GL$ στη διορθωμένη για την αντίθεση εικόνα. Η διαδικασία της εξίσωσης του ιστογράμματος μπορεί να θεωρηθεί ως ταίριασμα δύο ιστογραμμάτων (Gonzalez and Woods, 1992). Αυτή η διαδικασία είναι χρήσιμη επίσης επειδή αποτελεί τμήμα της διαδικασίας της υπέρθεσης εικόνων (fusion) από διαφορετικούς αισθητήρες

5.7.3 Φίλτρα

Σε αντίθεση με τις παραπάνω βελτιώσεις της εικόνας, υπάρχουν τεχνικές βελτίωσης της εικόνας που καθορίζουν τροποποιημένες τιμές του γκρι για μια ψηφίδα λαμβάνοντας υπόψιν τον συνδυασμό των τιμών των γειτονικών ψηφίδων.

Αυτές οι τεχνικές υλοποιούνται με τον καθορισμό ενός παραθύρου \mathbf{W} με συντελεστές βάρους και διαστάσεων $m \times n$ το οποίο μετακινείται σε όλη την εικόνα για κάθε γραμμή και στήλη της. Για παράδειγμα ένα παράθυρο \mathbf{W} (ή μάσκα) διαστάσεων (3×3) θα έχει τη μορφή :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

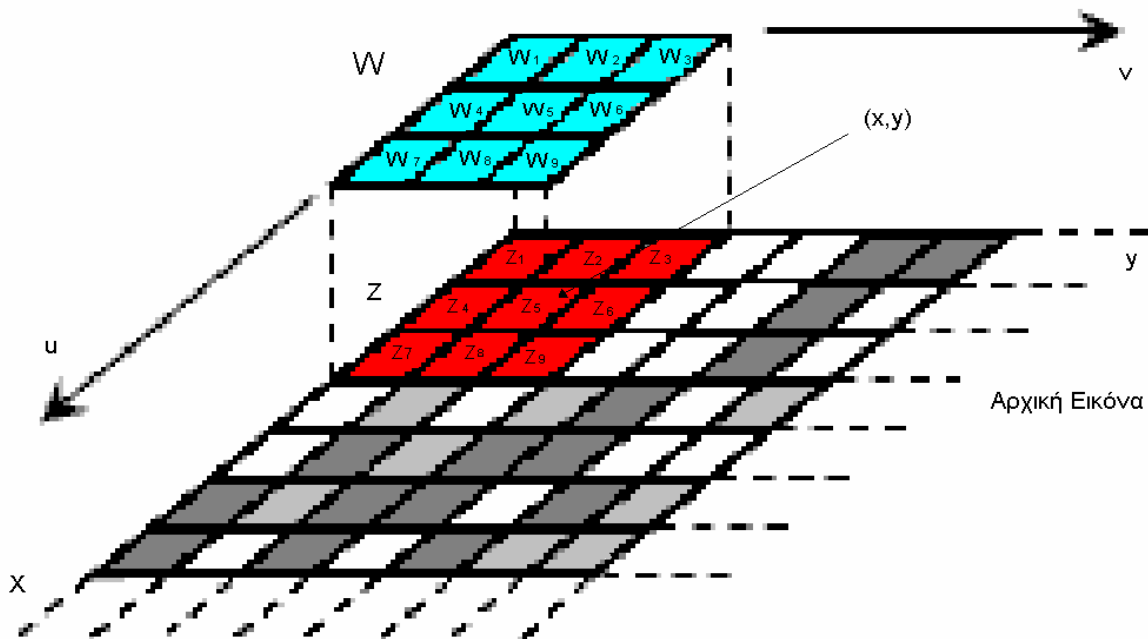
και εφαρμόζεται στην εικόνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14

Η βασική διαδικασία είναι να υπολογιστούν τα αθροίσματα των γινομένων των τιμών του επιπέδου του γκρι του τμήματος της εικόνας, όπως αυτό ορίζεται κάτω από τη θέση του πίνακα βαρών, με τα στοιχεία του \mathbf{W} . Έτσι η προκύπτουσα νέα τιμή R του γκρι για την κεντρική ψηφίδα του τμήματος της εικόνας μιας μάσκας \mathbf{W} θα είναι :

$$R = \mathbf{z}^T \mathbf{w} = [z_1 z_2 z_3 \dots z_9] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_9 \end{bmatrix} = z_1 w_1 + z_2 w_2 + \dots z_9 w_9 \quad (5.11)$$

Αν το κέντρο της μάσκας βρίσκεται στη θέση (x,y) στην εικόνα, η τιμή του επιπέδου του γκρι στη θέση (x,y) αντικαθίσταται από την τιμή R της εξίσωσης 5.11. Η μάσκα μετακινείται στην επόμενη ψηφίδα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η διαδικασία συνεχίζεται για όλες τις θέσεις των ψηφίδων της εικόνας.

Οι μάσκες ή αλλιώς **φίλτρα** είναι δυνατό, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται η εικόνα, να την εξομαλύνουν, να απαλείφουν τυχαίο θόρυβο, να ενισχύουν τις ακμές της ή τις γραμμώσεις της.



Σχήμα 5.14 Εφαρμογή φίλτρου από μία μάσκα W (3×3) σε τμήμα Z (3×3) μιας εικόνας.

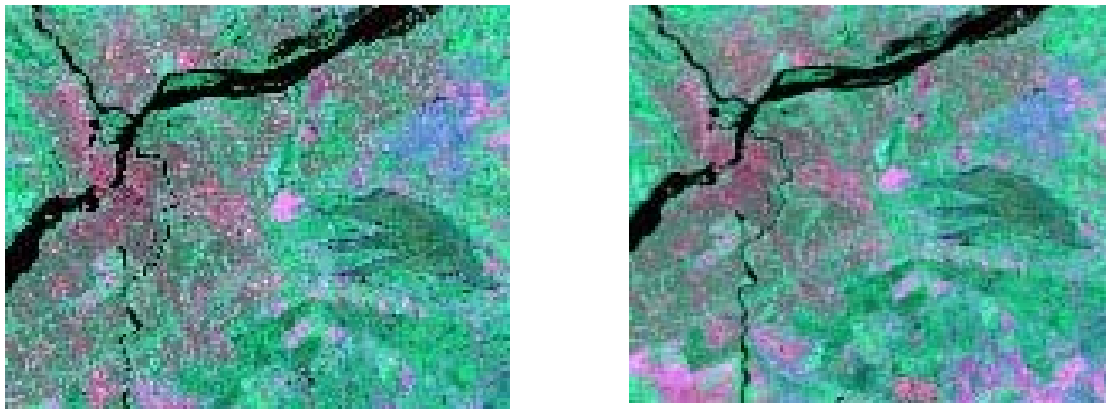
5.7.3.1 Φίλτρα εξομάλυνσης

Ένα φίλτρο εξομάλυνσης ή φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (low-pass filter) χρησιμοποιείται για να υπογραμμίσει τους μεγαλύτερους, ομοιογενείς τομείς του παρόμοιου τόνου της εικόνας και την απαλοιφή μικρών λεπτομερειών από αυτήν. Κατά συνέπεια, τα χαμηλής διέλευσης φίλτρα χρησιμεύουν γενικά για την θόλωση της εικόνας και για την ελάττωση του θορύβου της. Τέτοια είναι τα φίλτρα μετακινούμενων μέσων τιμών, φίλτρα διαμέσου τιμής κ.α.

Έστω ένα φίλτρο (3×3) **μετακινούμενων μέσων τιμών** για μία γειτονιά ψηφίδων τότε αυτό θα είναι της μορφής :

$$R(i, j) = \frac{1}{9} \left[\sum_{m=i-1}^{m=i+1} \sum_{n=j-1}^{n=j+1} z(m, n) \right] \quad (5.12)$$

Στα φίλτρα μέσων τιμών μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μάσκες μεγαλύτερες διαστάσεων, όπως (5x5) και (7x7) και με διαφορετικά βάρη για μία γειτονιά ψηφίδων.



Σχήμα 5.15 Φίλτρο μετακινούμενων μέσων τιμών. Η δεξιά εικόνα έχει υποστεί εξομάλυνση.

Στο φίλτρο της **διαμέσου τιμής** το επίπεδο του γκρι κάθε ψηφίδας αντικαθίσταται από τη διάμεσο τιμή μιας γειτονιάς ψηφίδων που περιβάλλει την υπό αντικατάσταση ψηφίδα. Η διάμεσος τιμή m ενός συνόλου τιμών είναι τέτοια ώστε οι μισές (50%) από τις τιμές του συνόλου να είναι μικρότερες από m και οι υπόλοιπες μισές (50%) μεγαλύτερες από m .

Για να επιτευχθεί αυτό το φίλτρο διατάσσει τις τιμές κατά αύξουσα ή φθίνουσα σειρά, προσδιορίζει τη διάμεσο τιμή και κατόπιν αντικαθιστά την τιμή της κεντρικής ψηφίδας με τη διάμεσο. Το φίλτρο της διαμέσου τιμής δεν τροποποιεί τις τιμές του γκρι της εικόνας, επειδή η διάμεσος τιμή ενός συνόλου αριθμών είναι πάντα ίση με μία από τις τιμές του συνόλου.

5.7.3.2 Ενίσχυση ακμών

Η **ακμή μιας εικόνας** είναι μια ασυνέχεια ή μια απότομη μεταβολή στην κλίμακα του γκρι σε κάποια ψηφίδα ή σε ομάδα ψηφίδων, που πιθανόν να παρουσιάζει ενδιαφέρον, όπως π.χ για τον καθορισμό ορίων αγροτεμαχίων, ή για τον εντοπισμό γεωλογικών δομών (π.χ ρηγμάτων). Αυτή η απότομη

μεταβολή στην κλίμακα του γκρι μπορεί να αναγνωριστεί από την πρώτη παράγωγο ή κλίση της εικόνας. Η πρώτη παράγωγος σε μία διάσταση ορίζεται από τις διαφορές των τιμών z του επιπέδου του γκρι των γειτονικών ψηφίδων. Για μια στήλη j της εικόνας οι απλές διαφορές:

$$\Delta z(i) \equiv z(i+1) - z(i) \quad (5.13)$$

θα ενισχύσει την ακμή που πιθανόν να παρουσιάζεται και θα συμπίεσει το τμήμα της εικόνας για το οποίο δεν υπάρχουν απότομες μεταβολές στις τιμές z του επιπέδου του γκρι. Αν υπολογιστούν ακόμη μια φορά οι διαφορές τότε λαμβάνονται οι διπλές διαφορές:

$$\Delta^{(2)} z(i) \equiv \Delta z(i+1) - \Delta z(i) = \{z(i+2) - z(i+1)\} - \{z(i+1) - z(i)\} = z(i+2) - 2z(i+1) + z(i) \quad (5.14)$$

που ως συντελεστές βάρους $[w_1, w_2, w_3]$ των ακολουθιακών τιμών έχουν $[1, -2, 1]$. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί η θέση της ακμής ως το σημείο μηδενισμού της συνάρτησης των διπλών διαφορών. Για μια συνάρτηση $z(x,y)$ δύο διαστάσεων του επιπέδου του γκρι, η κλίση της z στη θέση (x,y) ή η πρώτη παράγωγος, ορίζεται από το διάνυσμα :

$$\nabla z \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial z}{\partial x} \\ \frac{\partial z}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

με το μέτρο του να είναι :

$$\|\nabla z\| = \sqrt{z_x^2 + z_y^2} \quad (5.16)$$

Στην πράξη χρησιμοποιείται ως κλίση το άθροισμα των απόλυτων τιμών των πρώτων παραγώγων :

$$\|\nabla z\| \cong |z_x| + |z_y| \quad (5.17)$$

Έστω το υποσύνολο της εικόνας που βρίσκεται κάτω από μια μάσκα με διαστάσεις (3x3) ως:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

τότε το φίλτρο απλών διαφορών (διαφορικό) για το σημείο z_5 μπορεί να υλοποιηθεί σε διακριτή μορφή με διαφορές της τρίτης και της πρώτης γραμμής καθώς και της τρίτης και πρώτης στήλης σύμφωνα με τη σχέση :

$$\|\Delta z\| = |(z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3)| + |(z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7)| \quad (5.19)$$

Ένα χρησιμοποιούμενο φίλτρο που χρησιμοποιείται για ανίχνευση ακμών είναι το φίλτρο **Laplace** του οποίου η μορφή του είναι :

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5.20)$$

και προσεγγίζεται για διακριτές συναρτήσεις, σε μια περιοχή (3x3), από τη σχέση:

$$\nabla^2 z \cong (z_2 + z_4 + z_6 + z_8) - 4z_5 \quad (5.21)$$

Μολονότι η λαπλασιανή ανταποκρίνεται σε απότομες μεταβολές του επιπέδου του γκρι, σπανίως χρησιμοποιείται για αναγνώριση ακμών, επειδή είναι ευαίσθητη στον θόρυβο της εικόνας.

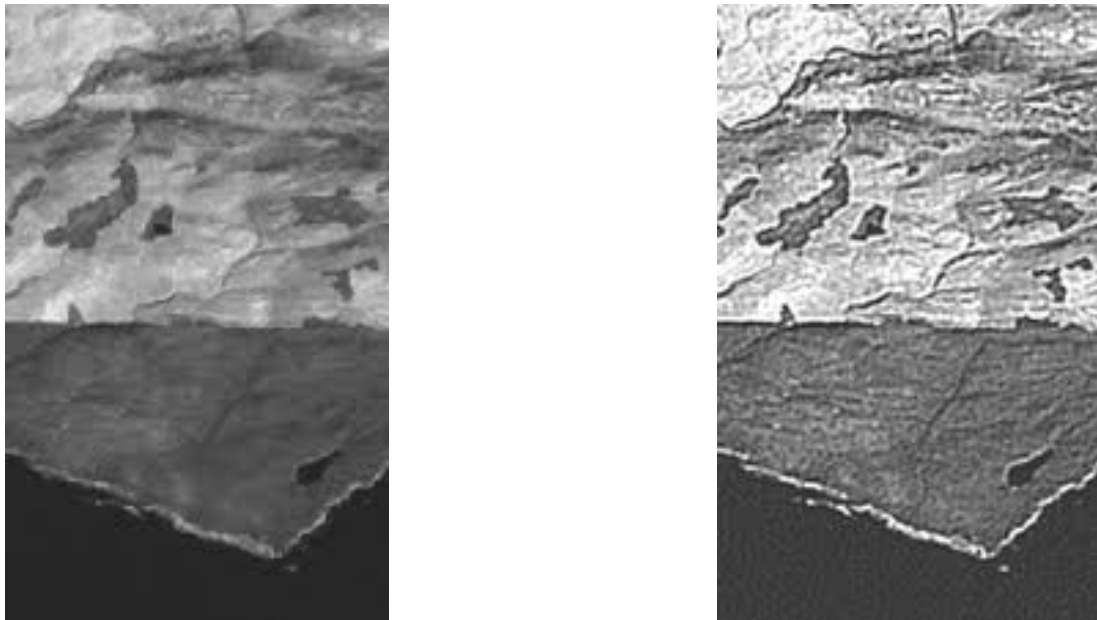
Η πιο χρησιμοποιούμενη μάσκα για ανίχνευση των ακμών είναι το φίλτρο **Sobel** του οποίου η μορφή είναι :

$$W_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad W_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

και τα διαφορικά κατά x και y ορίζονται ως:

$$\begin{aligned} z_x &= (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \\ z_y &= (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Οι ακμές που ανιχνεύουν γενικά τα φίλτρα ενίσχυσης ακμών αντιστοιχούν συνήθως σε γεωλογικές γραμμώσεις της περιοχής της εικόνας. Οι γεωλογικές γραμμώσεις μπορεί να αντιστοιχούν σε ρήγματα, σε ενώσεις γεωλογικών σχηματισμών κλπ. Μολαταύτα ως ακμές μπορούν να παρουσιάζονται δρόμοι, σιδηροδρομικές γραμμές, ποταμοί κλπ. διότι και αυτοί οι στόχοι παρουσιάζουν απότομη μεταβολή του γκρι σε σχέση με το περιβάλλον τους.



Σχήμα 5.16 Ενίσχυση ακμών με το φίλτρο Sobel.

5.8 Οι μετασχηματισμοί της εικόνας (Image Transformations)

Οι μετασχηματισμοί της εικόνας γίνονται συνήθως σε πολυφασματικές εικόνες και επιτρέπουν τη δημιουργία νέων εικόνων ή νέων διαύλων (κανάλια). Η μετασχηματισμένη εικόνα είναι δυνατό να έχει καλύτερες ιδιότητες και μερικά χαρακτηριστικά της πιο ευδιάκριτα, ακόμη και όταν χρησιμοποιείται μικρότερος αριθμός διαστάσεων (καναλιών).

Οι μετασχηματισμοί αυτοί επιτυγχάνονται συνήθως με απλές αριθμητικές πράξεις της πρόσθεσης, της αφαίρεσης και της διαίρεσης στις

τιμές z του επιπέδου του γκρι των ψηφίδων ή ακόμα και στις τιμές της φασματικής ανακλαστικότητας SR (spectral reflectance) μεταξύ των διαφόρων καναλιών.

Ο λόγος :

$$R(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^p a_k z_k}{\sum_{k=1}^p b_k z_k} \quad (5.24)$$

είναι ο λόγος των τιμών ψηφίδων στη θέση (i, j) , όπου a, b σταθερές και p είναι ο αριθμός των φασματικών ζωνών (διαύλων). Τέτοιοι λόγοι χρησιμοποιούνται ευρέως για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας της βλάστησης χρησιμοποιώντας τις φασματικές ζώνες στο ορατό R (Red), G (Green), B (Blue) καθώς και το εγγύς υπέρυθρο (NIR , Near Infrared). Ένας συνηθισμένος λόγος είναι ο R_v :

$$R_v = \frac{z(NIR)}{z(R)} \quad (5.25)$$

ο οποίος ονομάζεται **δείκτης βλάστησης** (vegetation index) όπου η τιμή φωτεινότητας κάθε ψηφίδας προκύπτει από τη διαίρεση της τιμής z στο εγγύς υπέρυθρο $z(NIR)$ δια την τιμή στη ζώνη του ερυθρού $z(R)$. Ο συγκεκριμένος λόγος τείνει να βελτιώνει την εμφάνιση της βλάστησης στην εικόνα.

Αν δημιουργηθεί ο παραπάνω λόγος όχι με τις τιμές z του επιπέδου του γκρι, αλλά με τις φασματικές ανακλαστικότητες τότε προκύπτει ο λόγος :

$$R_v = \frac{SR(NIR)}{SR(R)} \quad (5.26)$$

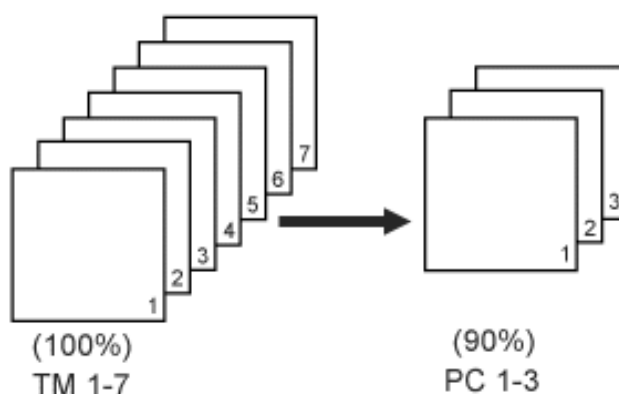
Για μια υγιή βλάστηση η διαφορά της φασματικής ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) και στο ερυθρό (R) είναι αρκετά υψηλή ενώ για ασθενή βλάστηση η διαφορά είναι μικρότερη. Επομένως μπορεί να διακριθεί η κατάσταση υγείας μεταξύ δύο τύπων βλάστησης από τη σύγκριση των λόγων R_{v1}, R_{v2} . Διάφοροι άλλοι δείκτες έχουν δημιουργηθεί για τον χαρακτηρισμό της βλάστησης, με τον **κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης** (Normalized

Difference Vegetation Index, NVDI) να χρησιμοποιείται εκτενώς για την παρακολούθηση της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα με δεδομένα AVHRR (Justice et al., 1991) :

$$NDVI = \frac{z(NIR) - z(R)}{z(NIR) + z(R)} \quad (5.27)$$

Ένας σημαντικός μετασχηματισμός που εφαρμόζεται σε πολυφασματικά δεδομένα είναι ο **μετασχηματισμός των κύριων συνιστωσών** (Principal Component).

Ας υποτεθεί ότι μια εικόνα από τον θεματικό χαρτογράφο TM του Landsat με 7 φασματικές ζώνες καταγραφής δημιουργεί ένα πολυφασματικό χώρο $p = 7$ επτά διαστάσεων. Μερικές φασματικές ζώνες συνήθως συσχετίζονται και παρέχουν παρόμοιες πληροφορίες διότι έχουν παρόμοιες ανακλαστικότητες για παρόμοια εδάφη. Ο μετασχηματισμός των κύριων συνιστωσών έχει ως σκοπό να ελαττώσει τις διαστάσεις των δεδομένων και να συμπίεσει τις πληροφορίες σε λιγότερες φασματικές ζώνες, στις οποίες τα δεδομένα τα οποία προκύπτουν να είναι στατιστικώς ασυσχέτιστα. Αυτές οι νέες ζώνες καλούνται κύριες συνιστώσες και περιέχουν μεγάλο ποσοστό των αρχικών δεδομένων. Στο παράδειγμα του θεματικού χαρτογράφου του Landsat ο μετασχηματισμός των κύριων συνιστωσών συμπίεζει τα δεδομένα που περιέχονται στις 7 φασματικές ζώνες σε 3 κύριες συνιστώσες ο οποίες περιέχουν το 90% των αρχικών πληροφοριών (Σχήμα 5.17).



Σχήμα 5.17 Σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματισμού των κύριων συνιστωσών για μια εικόνα του Landsat.

Τέλος μια σημαντική διαδικασία στους μετασχηματισμούς της εικόνας είναι η διαδικασία της **υπέρθεσης εικόνων από διαφορετικούς αισθητήρες (multisensor data fusion)**. Ένα άριστο παράδειγμα αυτής της τεχνικής είναι ο συνδυασμός πολυφασματικών οπτικών δεδομένων με δεδομένα από εικονοληπτικό Radar. Η εικόνα που προκύπτει, εκμεταλλευόμενη το πλεονέκτημα της καλής χωρικής διαχωριστικής ικανότητας του αισθητήρα του Radar καθώς της καλής φασματικής χωρικής διαχωριστικής ικανότητας του οπτικού αισθητήρα, περιέχει σημαντικές πληροφορίες που από μόνες τους οι αρχικές εικόνες δεν μπορούν να εμφανίσουν.

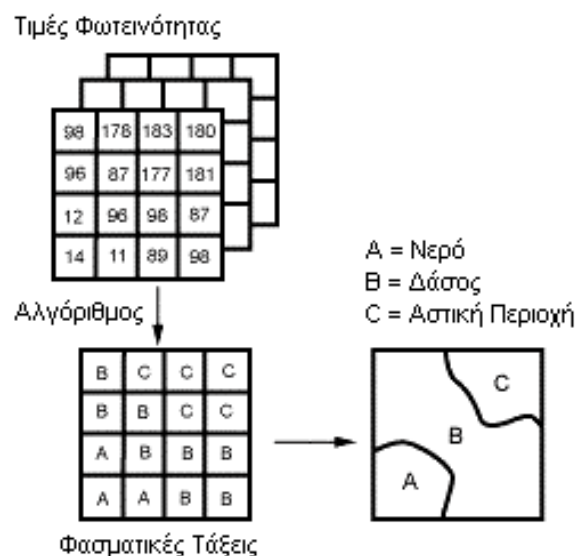
5.9 Ταξινόμηση εικόνας

Η ταξινόμηση ψηφιακής εικόνας είναι η διαδικασία αντιστοίχισης ή τοποθέτησης των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων σε ομάδες που παρουσιάζουν την ίδια μορφή, τις ίδιες ιδιότητες (**τάξεις πληροφορίας, information classes**) όπως υδάτινες μάζες, καλλιέργειες, δάση, αστικές περιοχές. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξέταση κάθε εικονοστοιχείου ξεχωριστά και με την τοποθέτησή του σε μια ομάδα ανάλογα με την τιμή φωτεινότητας του (**τάξεις φασματικές, spectral classes**). Έτσι δημιουργούνται τάξεις εικονοστοιχείων που είναι ομοιόμορφες σε σχέση με τις φασματικές τους τιμές. Οι τάξεις αυτές έχουν κάποια φυσική σημασία από τη στιγμή που θα αντιστοιχηθούν σε τάξεις πληροφορίας.

Πολλές φορές όμως οι φασματικές τάξεις δεν αντιστοιχούν πλήρως στις τάξεις πληροφορίας και η αντιστοιχία είναι πολύπλοκη. Μια δασική περιοχή, για παράδειγμα, μπορεί να αποδώσει πολλές φασματικές οικογένειες εικονοστοιχείων που οφείλονται στην πυκνότητα των φυτών, την ηλικία, το είδος της βλάστησης, τις σκιές και άλλους παράγοντες που μεταβάλλουν τις φασματικές ιδιότητες της δασικής περιοχής, αλλά δεν αλλάζουν το γεγονός ότι το είδος της πληροφορίας είναι "δάσος".

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ταξινόμησης στην ανάλυση ψηφιακών δεδομένων Τηλεπισκόπησης, η **αυτόματη ταξινόμηση** (Unsupervised Classification) και η **καθοδηγούμενη ταξινόμηση** (Supervised Classification).

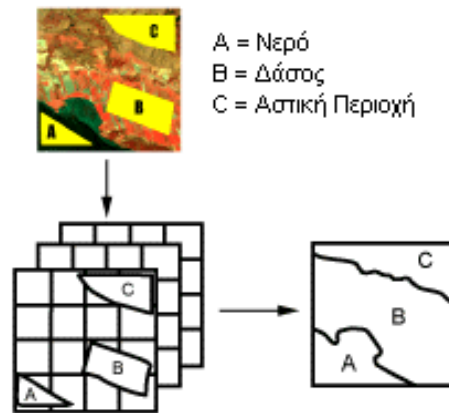
1) Στην αυτόματη ταξινόμηση τα εικονοστοιχεία διαχωρίζονται σε φασματικές τάξεις χωρίς ο χρήστης να γνωρίζει εκ των προτέρων τίποτα για την ύπαρξη ή το είδος της πληροφορίας (δάσος, νερό, αστική περιοχή, κλπ.) που περιέχεται σε κάθε φασματική τάξη. Η ταξινόμηση ξεκινά με την αυθαίρετη επιλογή ενός συνόλου εικονοστοιχείων που θεωρούνται ως κέντρα συγκέντρωσης παρόμοιων τιμών φωτεινότητας. Κατόπιν ο αλγόριθμος ταξινόμησης προσδιορίζει τις αποστάσεις μεταξύ των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων και εκτιμά την “εγγύτητά” τους. Έτσι δημιουργούνται οι πρώτες φασματικές τάξεις καθώς και τα κέντρα τους. Στο επόμενο βήμα όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία προσαρτώνται και ταξινομούνται στην πλησιέστερη και πιο ομοειδή ομάδα εικονοστοιχείων. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας ολοκληρώνεται η ταξινόμηση της εικόνας που παρουσιάζει πλέον ομάδες ή τάξεις ψηφίδων της εικόνας οι οποίες αντιστοιχούν σε εδαφικές καλύψεις.



Σχήμα 5.18 Σχηματική αναπαράσταση αυτόματης ταξινόμησης.

2) Στην καθοδηγούμενη ταξινόμηση απαιτείται η ύπαρξη δειγμάτων γνωστής ταυτότητας στην εικόνα (που συνήθως αναγνωρίζονται από εργασίες πεδίου, από αεροφωτογραφίες, από τοπογραφικούς χάρτες κλπ.) και στη συνέχεια αφού υπολογιστούν τα στατιστικά στοιχεία των γνωστών αυτών δειγμάτων, καταχωρούνται τα υπόλοιπα αταξινομήτα εικονοστοιχεία σε τάξεις. Ο αναλυτής της εικόνας καθορίζει περιοχές για “εκπαίδευση” (training fields) του

αλγόριθμου ταξινόμησης, οι οποίες ευκρινώς απεικονίζουν περιοχές γνωστής εδαφικής κάλυψης.



Σχήμα 5.19 Σχηματική αναπαράσταση καθοδηγούμενης ταξινόμησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ RADAR

6.1 Γενικά

Σε αυτό το Κεφάλαιο εφαρμόζονται μερικές από τις τεχνικές που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, με πραγματικά δεδομένα, ώστε να επιτευχθεί η ανάλυση και η ερμηνεία εικόνας Radar SAR.

Η επεξεργασία περιλαμβάνει γεωμετρικές διορθώσεις, βελτιώσεις της εικόνας Radar και μετασχηματισμούς ώστε να εξαχθούν όσο το δυνατό χρήσιμες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.

Τέλος εξετάζονται τρεις μέθοδοι της υπέρθεσης εικόνας του Radar με πολυφασματική εικόνα από οπτικό αισθητήρα.

Η επεξεργασία έγινε με το πρόγραμμα ERDAS Imagine Software 8.4 σε PC και περιλαμβάνει :

- Γεωμετρική διόρθωση της εικόνας SAR και ένταξη της σε χαρτογραφική προβολή.
- Αξιολόγηση της γεωμετρικής διόρθωσης σε σχέση με το βαθμό πολυωνύμου και τη μέθοδο επαναδειγματοληψίας.
- Ενίσχυση ακμών της εικόνας SAR με φίλτρα υψηλών συχνοτήτων.
- Υπέρθεση της εικόνας SAR με εικόνα από οπτικό αισθητήρα χρησιμοποιώντας τις τρεις πιο δημοφιλείς τεχνικές.
- Ερμηνεία της σύμμικτης εικόνας.

6.2 Πρωτογενή δεδομένα

Οι εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη αποτελούν τμήματα των εικόνων που προέκυψαν από τους δορυφόρους ERS -1 (SAR) και Landsat. (TM).

Η εικόνα από τον ERS -1 παρουσιάζει τμήμα της ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και έχει τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

Όνομα Προϊόντος : ERS -1.SAR.PRI

Παράμετροι αισθητήρα και αποστολής:

- Συχνότητα Radar: 5,3037 GHz
- Μήκος κύματος : 5,6564 cm
- Πόλωση: VV (Vertical – Vertical)
- Τροχιά: Καθοδική
- Γωνία Παρατήρησης: 23⁰
- Απώλεια Δεδομένων: 0
- Καταγραφή: Εκκίνηση: 02-Oct-1994 / 09:11:10
Τερματισμός: 02-Oct-1994 / 09:11:25

Παράμετροι εικόνας και επεξεργασίας:

- Orbit number: 16808
- Frame number: 2835
- Μέγεθος εικόνας: 8000 pixels X 8200 lines
- Διαχωριστική ικανότητα: 12,5 m X 12,5 m (απόσταση X αζιμούθιο)
- Μέγεθος εικόνας: 65 MB
- Image Formats: TIFF, Raw (binary)
- Χαρτογραφική Προβολή: ---
- Ελλειψοειδές Αναφοράς: ---
- Σύστημα αναφοράς: ---

Η εικόνα είναι γεωμετρικά αδιόρθωτη αφού δεν είναι ενταγμένη σε κάποια χαρτογραφική προβολή. Βέβαια έχει υποστεί μία πρωτογενή επεξεργασία (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β) για την γεωμετρική της διόρθωση όσο αφορά την συμπίεση της εγγύτερης περιοχής χωρίς όμως τις απαραίτητες διορθώσεις για την μετατόπιση αναγλύφου ώστε να μειωθούν τα φαινόμενα της αναστροφής και της σμίκρυνσης (Παράγραφος 4.6).

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η παραπάνω εικόνα :



Σχήμα 6.1 Η εικόνα του ERS -1.

Η εικόνα από τον Landsat (TM) παρουσιάζει σχεδόν ολόκληρη την Στερεά Ελλάδα και μεγάλο τμήμα της Πελοποννήσου και έχει τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

Όνομα Προϊόντος : hellas4.img

Παράμετροι αισθητήρα και αποστολής:

- Δορυφόρος: Landsat
- Αισθητήρας: TM
- Χρωματική Σύνθεση: Δίαυλος TM-3 (Red), Δίαυλος TM-2 (Green), Δίαυλος TM-1 (Blue)

Παράμετροι εικόνας και επεξεργασίας:

- Μέγεθος εικόνας: 28169 pixels X 4981 lines
- Διαχωριστική ικανότητα: 30 m X 30 m (απόσταση X αζιμούθιο)
- Μέγεθος εικόνας: 107 MB
- Image Formats: img, ERDAS format
- Χαρτογραφική Προβολή: Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή
- Ελλειψοειδές Αναφοράς: GRS-80
- Σύστημα Αναφοράς: ΕΓΣΑ-87 (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς)

Η εικόνα έχει διορθωθεί γεωμετρικά, ραδιομετρικά και έχει ενταχθεί σε χαρτογραφική προβολή. Θα αποτελέσει την εικόνα αναφοράς ώστε να διορθωθεί η εικόνα Radar (Παράγραφος 5.5.2, Image to Image Rectification), όπως επίσης θα χρησιμοποιηθεί και ως η πολυφασματική εικόνα στην υπέρθεση (Fusion) με την εικόνα του Radar. Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η παραπάνω εικόνα:

Σχήμα 6.2 Η εικόνα Landsat.

6.3 Γεωμετρική διόρθωση εικόνας Radar ERS-1 (SAR)

Θεωρείται η συνάρτηση μετασχηματισμού ως ένα απλό πολυώνυμο πρώτου βαθμού της μορφής :

$$\begin{aligned}x &= a_0 X + a_1 Y + a_2 \\y &= b_0 X + b_1 Y + b_2\end{aligned}\tag{6.1}$$

Οι συντελεστές του πολυωνύμου θα προκύψουν από την αντιστοίχιση των γνωστών **σημείων ελέγχου στο έδαφος** (Ground Control Points, GCPs) της εικόνας του Landsat στην εικόνα του ERS-1. Όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.5.2 η κατανομή των σημείων ελέγχου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχουν GCPs γύρω από τα περιθώρια της εικόνας με κάποια ομοιόμορφη διασπορά σε όλο το τμήμα της εικόνας. Στη συγκεκριμένη εικόνα αυτό πρακτικά κρίθηκε ανέφικτο. Οι περιοχές και πιο συγκεκριμένα τα σημεία που τηρούσαν τις προϋποθέσεις (να διαγράφονται ευκρινώς) ώστε να οριστούν ως GCPs, δεν είχαν ομοιόμορφη κατανομή στην εικόνα του ERS -1. Προτιμήθηκαν να οριστούν σημεία από την εικόνα του Landsat τέτοια ώστε να μπορούν να αντιστοιχηθούν με μεγάλη ακρίβεια στην εικόνα του ERS -1, ανεξαρτήτως της κατανομής, ώστε να περιοριστούν τα μεγάλα σφάλματα.

6.3.1 Αντιστοίχιση των GCP's στην εικόνα ERS-1 από εικόνα Landsat – Επιλογή Πολυωνύμου

Η σωστή τοποθέτηση των GCP's στην εικόνα αποτελεί παράγοντα μείζονος σημασίας για τη γεωμετρική της διόρθωση. Όσο ακριβέστερη είναι η αντιστοίχιση των σημείων από τον αναλυτή τόσο μικρότερα θα είναι τα σφάλματα στην τελική γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα. Στην αρχή δίνονται τα τρία πρώτα σημεία ελέγχου και μια πρώτη λύση του (6x6) Συστήματος (6.1) θα δώσει του συντελεστές $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3$ δηλαδή του δύο πίνακες μετασχηματισμού (transformation matrix):

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}\tag{6.2}$$

Με την προσθήκη και άλλων σημείων υπολογίζονται εκ νέου οι συντελεστές με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και προκύπτουν στατιστικά σφάλματα. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχικά υπολογισμένη διορθωμένη συντεταγμένη x_1 θα έχει αλλάξει ελάχιστα σε x_1' λόγω του νέου πίνακα μετασχηματισμού που προέκυψε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αντίστοιχα το ίδιο θα ισχύει και για την y_1 . Το υπόλοιπο της αφαίρεσης $x_1' - x_1$ ($X_{Residual}$) αποτελεί την σημαντική ποσότητα η οποία προσδιορίζει το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square, RMS)** για κάθε GCP ως:

$$RMS_n = \sqrt{(x'_n - x_n)^2 - (y'_n - y_n)^2} \quad (6.3)$$

$$RMS_n = \sqrt{X_{residual\ n}^2 - Y_{residual\ n}^2}$$

όπου n ο αριθμός των GCP's. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για όλες τις συντεταγμένες x και y ξεχωριστά δίνεται ως:

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{residual\ n}^2} \quad (6.4)$$

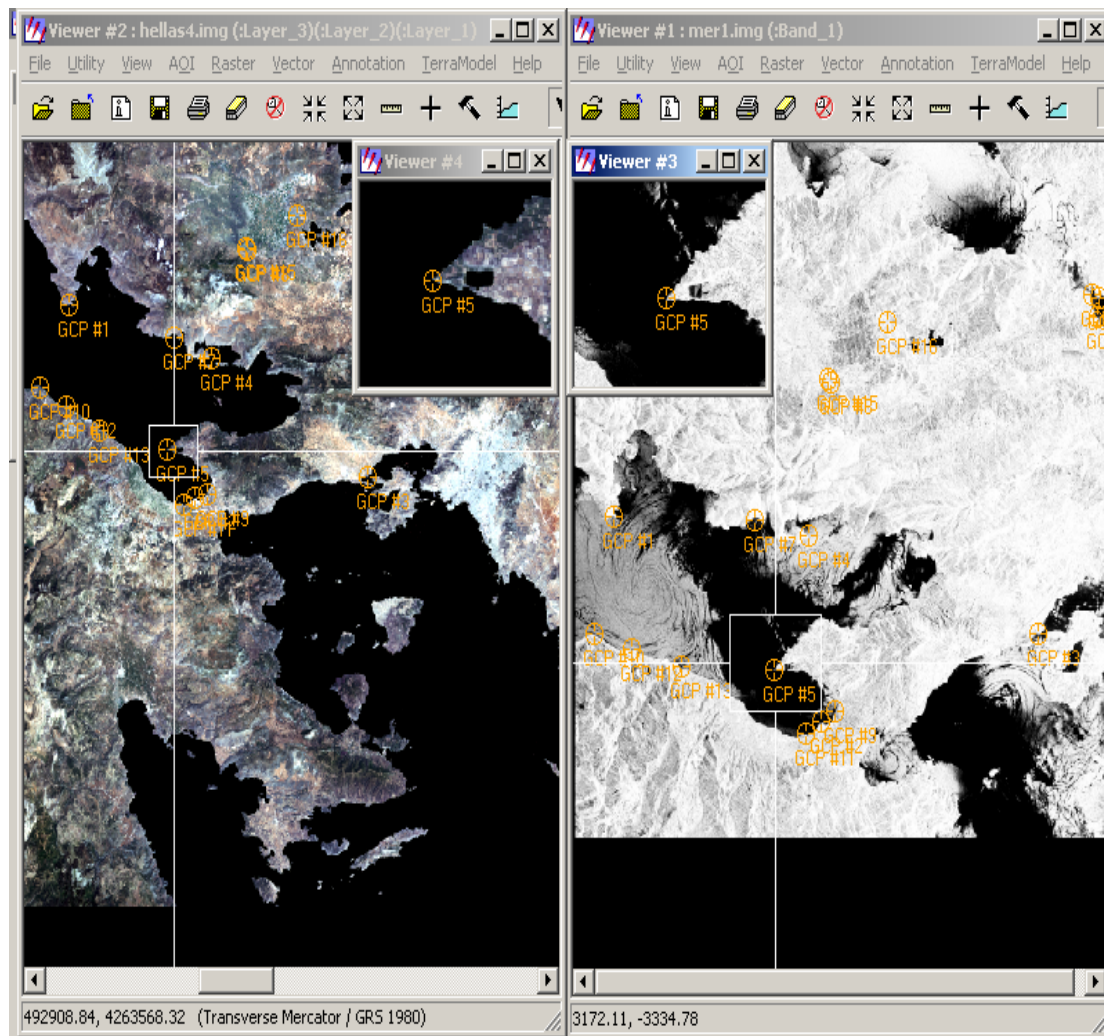
$$R_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{residual\ n}^2} \quad (6.5)$$

Τέλος το ολικό τετραγωνικό σφάλμα **T (total RMS error)** δίνεται από τον τύπο:

$$T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (6.6)$$

Το ολικό τετραγωνικό σφάλμα συνήθως επιλέγεται να έχει τιμή μικρότερη από 2. Στην περίπτωση αυτή τα σημεία απέχουν μεταξύ τους κατά 2 εικονοστοιχεία (Γιαβή, 1995)

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται γραφικά η προσθήκη και η αντιστοίχιση των GCP's από την αριστερή εικόνα του Landsat στην εικόνα του ERS-1.



Σχήμα 6.2 Προσθήκη GCP's από τον αναλυτή.

Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται τα σημεία ελέγχου με X_n , Y_n να είναι οι συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ-87 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α) στην εικόνα του Landsat και με x_n , y_n αριθμοί οι οποίοι αποτελούν “ψευδοσυντεταγμένες” που χρησιμοποιεί το λογισμικό πακέτο ERDAS ώστε να γίνει ο μετασχηματισμός. Οι τιμές για το $R_x = 1,1677$, το $R_y = 1,2549$ και για το ολικό σφάλμα $T = 1,7142$ είναι μικρότερες του 2 και η γεωμετρική διόρθωση θεωρείται ικανοποιητική με πίνακες μετασχηματισμού:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0171864 \\ 0,0779555 \\ -341200 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0780452 \\ -0,0173078 \\ 44659,6 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Πίνακας 6.1 Τα σημεία ελέγχου και τα σφάλματα τους.

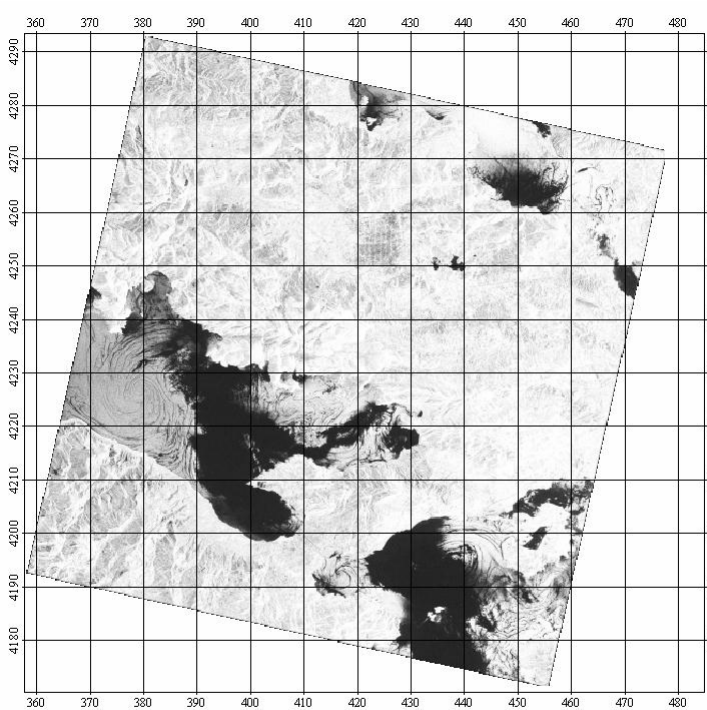
| GCP | X _n | y _n | X _{n(m)} | Y _{n(m)} | X _{res} | Y _{res} | RMS |
|-----|----------------|----------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------|
| 1 | 580,00 | -4403,00 | 375015,00 | 4237665,00 | 2,93 | -2,58 | 3,91 |
| 2 | 3630,50 | -6837,76 | 405661,24 | 4199715,08 | 1,05 | 0,47 | 1,15 |
| 3 | 6830,55 | -5788,70 | 447602,03 | 4203928,83 | 1,35 | 0,72 | 1,53 |
| 4 | 3463,44 | -4641,29 | 409574,12 | 4227009,60 | 1,09 | -0,99 | 1,47 |
| 5 | 2938,80 | -6213,46 | 398876,49 | 4209227,89 | -1,41 | 1,15 | 1,82 |
| 6 | 2672,98 | -4460,12 | 400394,06 | 4231366,39 | -0,32 | -0,29 | 0,44 |
| 7 | 3835,00 | -6713,00 | 408491,92 | 4200676,01 | 0,84 | -0,73 | 1,11 |
| 8 | 3787,70 | -2827,68 | 418449,42 | 4248336,45 | 0,38 | 0,48 | 0,61 |
| 9 | 310,03 | -5788,19 | 367915,55 | 4221511,51 | -1,60 | 1,35 | 2,09 |
| 10 | 3424,39 | -6975,48 | 402735,72 | 4198576,91 | -1,46 | -0,81 | 1,67 |
| 11 | 855,60 | -5979,34 | 374083,79 | 4217686,49 | 0,44 | 0,32 | 0,55 |
| 12 | 1587,52 | -6191,24 | 382425,77 | 4213124,44 | -1,47 | -0,05 | 1,47 |
| 13 | 3746,39 | -2794,51 | 418029,60 | 4248855,78 | -0,06 | 0,58 | 0,58 |
| 14 | 4609,60 | -2106,00 | 430434,50 | 4254972,71 | -1,00 | 2,11 | 2,34 |
| 15 | 7726,17 | -1832,58 | 469244,52 | 4249903,77 | -0,90 | 0,55 | 1,06 |
| 16 | 7634,57 | -1788,00 | 468255,61 | 4250685,88 | -0,02 | -0,06 | 0,06 |
| 17 | 7704,70 | -2059,02 | 468370,67 | 4247145,40 | 0,10 | -3,06 | 3,07 |

Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται η γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα του ERS-1 με χρήση πολυωνύμου 1^{ου} βαθμού χρησιμοποιώντας ως μέθοδο επαναδειγματοληψίας, τη μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.

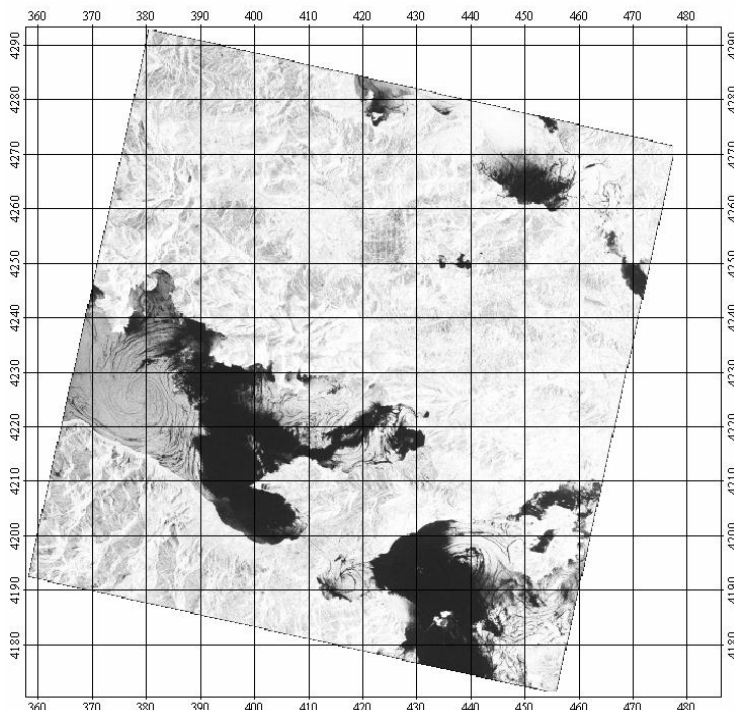
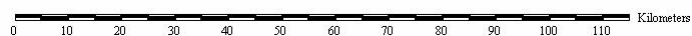
Η εικόνα τώρα είναι ενταγμένη σε εγκάρσια μερκατορική προβολή με ελλειψοειδές το GRS-80 με τα παρακάτω στατιστικά στοιχεία σε σύγκριση με την αδιόρθωτη:

Πίνακας 6.2 Σύγκριση στατιστικών στοιχείων για τις τιμές φωτεινότητας.

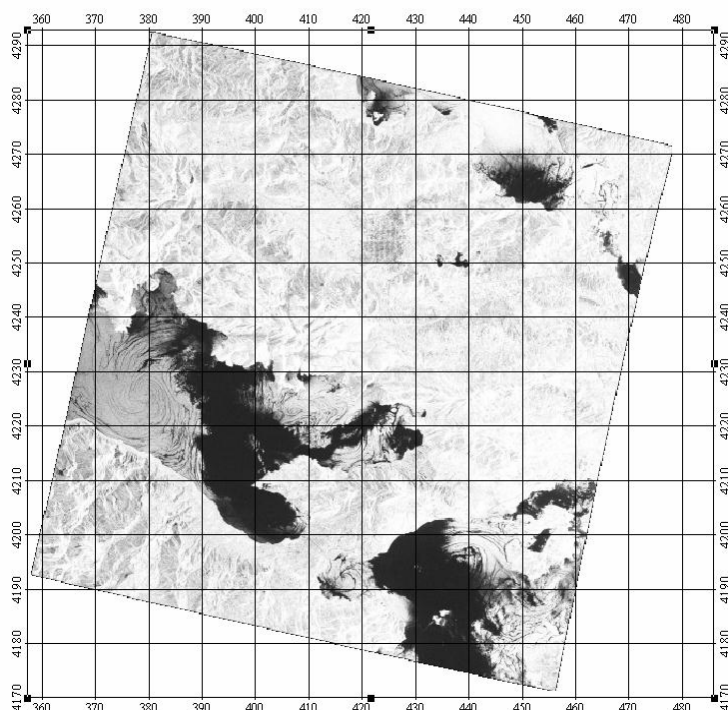
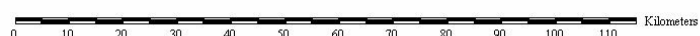
| | Ελάχιστο | Μέγιστο | Μέσος | Διάμεσος | T Απόκλιση |
|------------|----------|---------|---------|----------|------------|
| Αδιόρθωτη | 0 | 255 | 202,386 | 255 | 75,102 |
| Διορθωμένη | 0 | 255 | 203,475 | 255 | 73,771 |



Scale 1:736995



Scale 1:736995



Scale 1:736995



Σχήμα 6.3 Γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες με πολυώνυμα 1ου, 2ου και 3ου βαθμού αντίστοιχα στο ΕΓΣΑ-87. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες χιλιομέτρων (km).

Η διαδικασία της γεωμετρικής διόρθωσης πραγματοποιήθηκε ξανά με την χρήση πολυωνύμου 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού αντίστοιχα. Τα στατιστικά στοιχεία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 6.3 Τα στατιστικά στοιχεία σε σχέση με το βαθμό του πολυωνύμου.

| | Ελάχιστο | Μέγιστο | Μέσος | Διάμεσος | Τ. Απόκλιση |
|------------------------|----------|---------|---------|----------|-------------|
| Αδιόρθωτη | 0 | 255 | 202,386 | 255 | 75,102 |
| 1 ^{ου} Βαθμού | 0 | 255 | 203,475 | 255 | 73,771 |
| 2 ^{ου} Βαθμού | 0 | 255 | 203,777 | 255 | 73,608 |
| 3 ^{ου} Βαθμού | 0 | 255 | 203,907 | 255 | 73,866 |

Είναι φανερό ότι ο βαθμός του πολυωνύμου στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν επηρεάζει την διορθωμένη εικόνα. Δεν φαίνεται να υπάρχει παραμόρφωση των εικόνων με αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου (Σχήμα 6.4). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τελικά η κατανομή των GCP's κρίθηκε ικανοποιητική παρόλο που δεν ήταν αυστηρώς ομοιόμορφη.

6.3.2 Επιλογή μεθόδου επαναδειγματοληψίας

Αφού έχει επιλεγεί ο βαθμός του πολυωνύμου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, πρέπει να καθοριστεί η μέθοδος της επαναδειγματοληψίας. Πρόκειται για απόφαση που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σκοπό για τον οποίο γίνεται η ανάλυση και η γεωμετρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας. Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε σύγκριση του χρησιμοποιούμενου βαθμού πολυωνύμου χρησιμοποιώντας ως μέθοδος επαναδειγματοληψίας, τη μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.

Για να συγκριθούν οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού και διορθώθηκε γεωμετρικά η εικόνα χρησιμοποιώντας και τις τρεις μεθόδους επαναδειγματοληψίας. Τόσο οπτικά όσο και στατιστικά οι διαφορές κρίνονται αμελητέες παρόλο που θεωρητικά η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου θα έπρεπε να είχε αξιοσημείωτες διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο της κυβικής παρεμβολής. Τα στατιστικά αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Για τη συνέχεια της επεξεργασίας θα προτιμηθεί η εικόνα που προέκυψε με τη χρήση πολωνύμου 1^{ου} βαθμού και τη μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.

Πίνακας 6.4 Τα στατιστικά στοιχεία για τις τιμές φωτεινότητας σε σχέση με τη μέθοδο επαναδειγματοληψίας.

| Μέθοδος | Ελάχιστο | Μέγιστο | Μέσος | Διάμεσος | Τ. Απόκλιση |
|---------------------------------------|----------|---------|---------|----------|-------------|
| Πλησιέστερου Γειτονικού Σημείου | 0 | 255 | 203,475 | 255 | 73,771 |
| Διγραμμική Παρεμβολή | 0 | 255 | 203,201 | 241 | 71,569 |
| Κυβική Παρεμβολή | 0 | 255 | 203,054 | 244 | 73,066 |

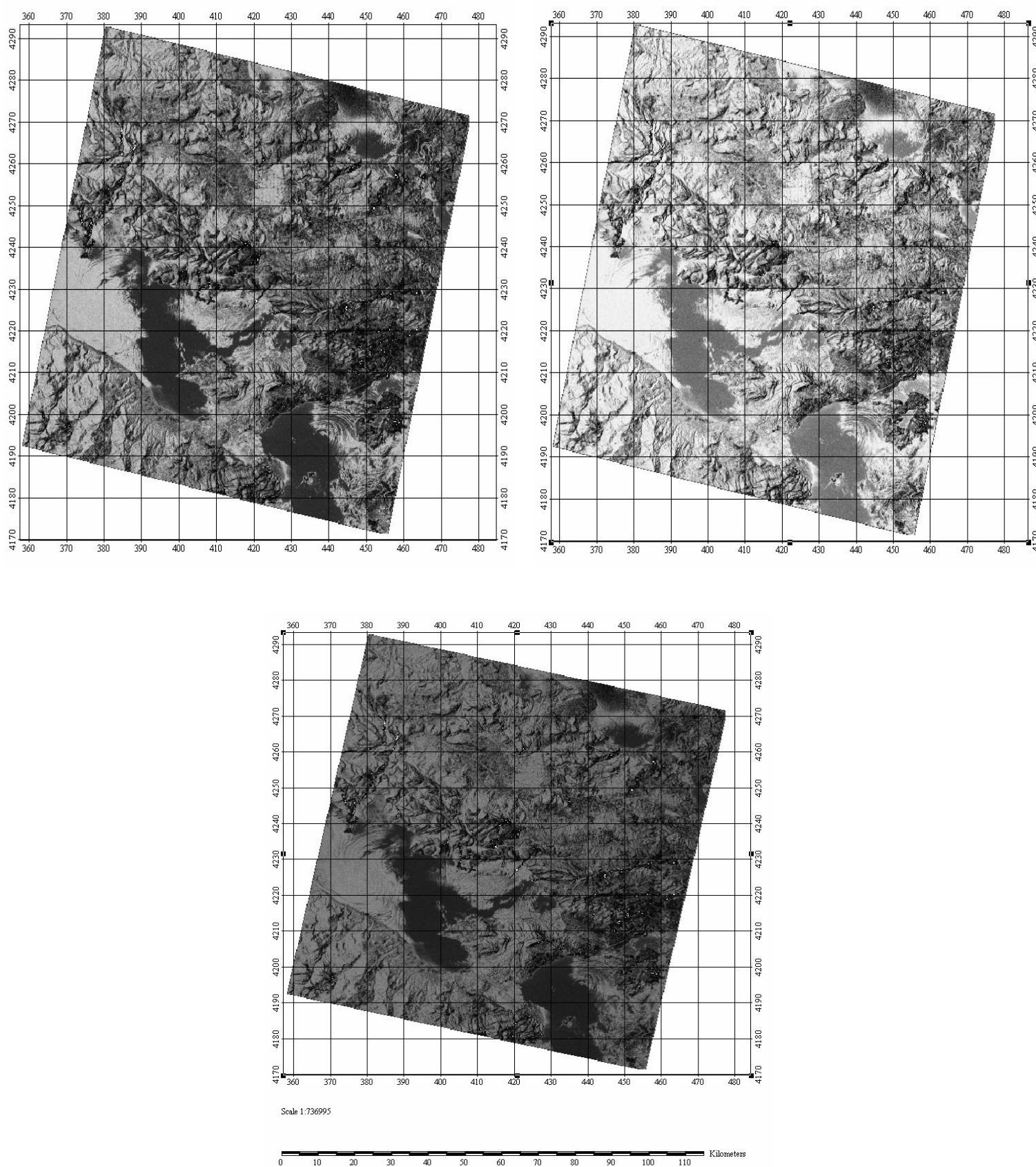
6.4 Βελτίωση της εικόνας ERS -1

Η βελτίωση της εικόνας έχει ως στόχο να κάνει κάποια χαρακτηριστικά της εικόνας πιο ευδιάκριτα ώστε να τονιστούν επιλεγμένες λεπτομέρειες της εικόνας, όπως διαφορές στη βλάστηση ή στο έδαφος, ώστε να επιτευχθεί ταχύτερη και ακριβέστερη ερμηνεία σε σχέση με την αρχική εικόνα.

Για τον σκοπό αυτό έγινε ενίσχυση των ακμών της εικόνας χρησιμοποιώντας το φίλτρο Sobel με μέγεθος μάσκας (3x3), το φίλτρο Kirsch (3x3) και ένα φίλτρο που χρησιμοποιεί εξ'ορισμού το λογισμικό. Παρακάτω φαίνονται οι μάσκες που χρησιμοποιήθηκαν :

$$W_{SOBEL} = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ +0 & +0 & +0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad W_{KIRSCH} = \begin{bmatrix} +5 & +5 & +5 \\ -3 & +0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Στο Σχήμα 6.5 φαίνονται οι τρεις εικόνες στις οποίες εφαρμόστηκαν τα τρία παραπάνω φίλτρα. Η ενίσχυση των ακμών είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της εμφάνισης των ακτογραμμών, του οδικού δικτύου και κάθε απότομης μεταβολής του επιπέδου του γκρι.



Σχήμα 6.4 Ενίσχυση ακμών με φίλτρα. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες χιλιομέτρων (km).

6.5 Υπέρθεση εικόνων

Η ψηφιακή ενσωμάτωση (υπέρθεση ή σύμμιξη, **fusion**) των δεδομένων που προκύπτουν από τα εικονοληπτικά Radar με τα δεδομένα που προκύπτουν από οπτικά εικονοληπτικά συστήματα είναι μια νέα τάση στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης.

Συνήθως ένα εικονοληπτικό σύστημα Radar, (στη συγκεκριμένη περίπτωση το ERS -1, 12,5 x 12,5 m) έχει καλύτερη χωρική διαχωριστική ικανότητα σε σχέση με τη φασματική του διαχωριστική ικανότητα. Από την άλλη η φασματική διαχωριστική ικανότητα του οπτικού συστήματος (Landsat TM) είναι υψηλή και η χωρική διαχωριστική του ικανότητα (30 x 30 m) χαμηλότερη από του Radar.

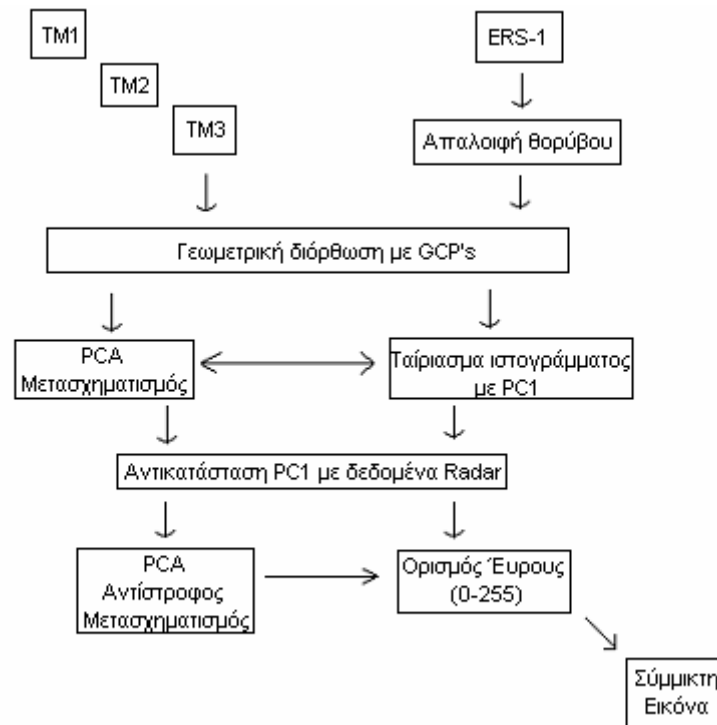
Έτσι η ψηφιακή ενσωμάτωση των στοιχείων Radar με τα οπτικά στοιχεία, παρέχει μια νέα εικόνα που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο αισθητήρων, με τα οπτικά δεδομένα να απεικονίζουν τη φυσικοχημική σύνθεση της επιφάνειας και τα δεδομένα Radar να παρέχουν τις μορφολογικές πληροφορίες της επιφάνειας. Ο συνδυασμός των πληροφοριών που προκύπτουν από την ψηφιακή ενσωμάτωση, συνήθως δεν μπορούν να αποσπαστούν από κάθε εικόνα ξεχωριστά, και είναι σημαντικές διότι διευκολύνουν την ερμηνεία της εικόνας.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται η υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τρεις τεχνικές συνδυασμού δεδομένων, πρόκειται για τους μετασχηματισμούς (PCT), (IHST) και (Brovey).

6.5.1 Ο μετασχηματισμός PCT (Principal Component Transformation)

Η μεθοδολογία που ακολουθείται περιλαμβάνει 6 βήματα τα οποία είναι : 1) Απαλοιφή στιγμάτων (speckles) από την εικόνα ERS-1 2) Γεωμετρική εγγραφή των δύο εικόνων με σημεία ελέγχου (image to image rectification) 3) Μετασχηματισμός κύριων συνιστωσών στην εικόνα του Landsat 4) Ταίριασμα ιστογράμματος του ERS -1 με την πρώτη κύρια συνιστώσα 5) Αντικατάσταση της πρώτης κύριας συνιστώσας με τα δεδομένα του Radar που προέκυψαν από το βήμα 4 και εφαρμογή Αντίστροφου Μετασχηματισμού κύριων

συνιστωσών 6) Ορισμός δυναμικού εύρους φωτεινότητας από 0 - 255. Το κάθε βήμα του μετασχηματισμού περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω και φαίνεται στο Σχήμα 6.6 (Schowengardt, 1997).



Σχήμα 6.5 Σχηματικό διάγραμμα της υπέρθεσης εικόνων, (PCT).

- 1) Οι κηλιδώσεις του Radar συνήθως απομακρύνονται χρησιμοποιώντας το φίλτρο της μέση τιμής, το φίλτρο της διαμέσου τιμής, το φίλτρο Lee-Sigma και άλλα φίλτρα ανάλογα με την περίπτωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εικόνα του ERS -1 δεν περιέχει κηλιδώσεις ή στίγματα (speckles) λόγω της πρωτογενούς προεπεξεργασίας που έγινε από τον προμηθευτή.
- 2) Η γεωμετρική εγγραφή των δύο εικόνων παρατέθηκε στην παράγραφο 6.3. Ως τελική διορθωμένη εικόνα θα χρησιμοποιηθεί αυτή που προέκυψε από το πολυώνυμο μετασχηματισμού 1^{ου} βαθμού με μέθοδο επαναδειγματοληψίας τη μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.
- 3) Με τον μετασχηματισμό των κύριων συνιστωσών θα προκύψουν 3 συνιστώσες.

- 4) Το σχήμα του ιστογράμματος της εικόνας του ERS-1 $F_x(x)$ μετατρέπεται και εξισώνεται στο ιστόγραμμα $F_y(y)$ της πρώτης κύριας συνιστώσας και την αντικαθιστά ώστε να εμπεριέχει τα δεδομένα του Radar χωρίς όμως να υπάρχει απώλεια των φασματικών ταυτοτήτων της εικόνας που θα προκύψει. Μαθηματικά αυτό επιτυγχάνεται από τον παρακάτω τύπο (Talaat M. Ramadan, 2002) :

$$DN_e = \frac{(DN_{Highres} - Min(DN_{Highres})) \cdot (Max(P_e) - Min(P_e))}{Max(DN_{Highres}) - Min(DN_{Highres})} + Min(P_e) \quad (6.8)$$

όπου DN_e = Η τιμή της φωτεινότητας των δεδομένων του Radar στην πρώτη κύρια συνιστώσα.

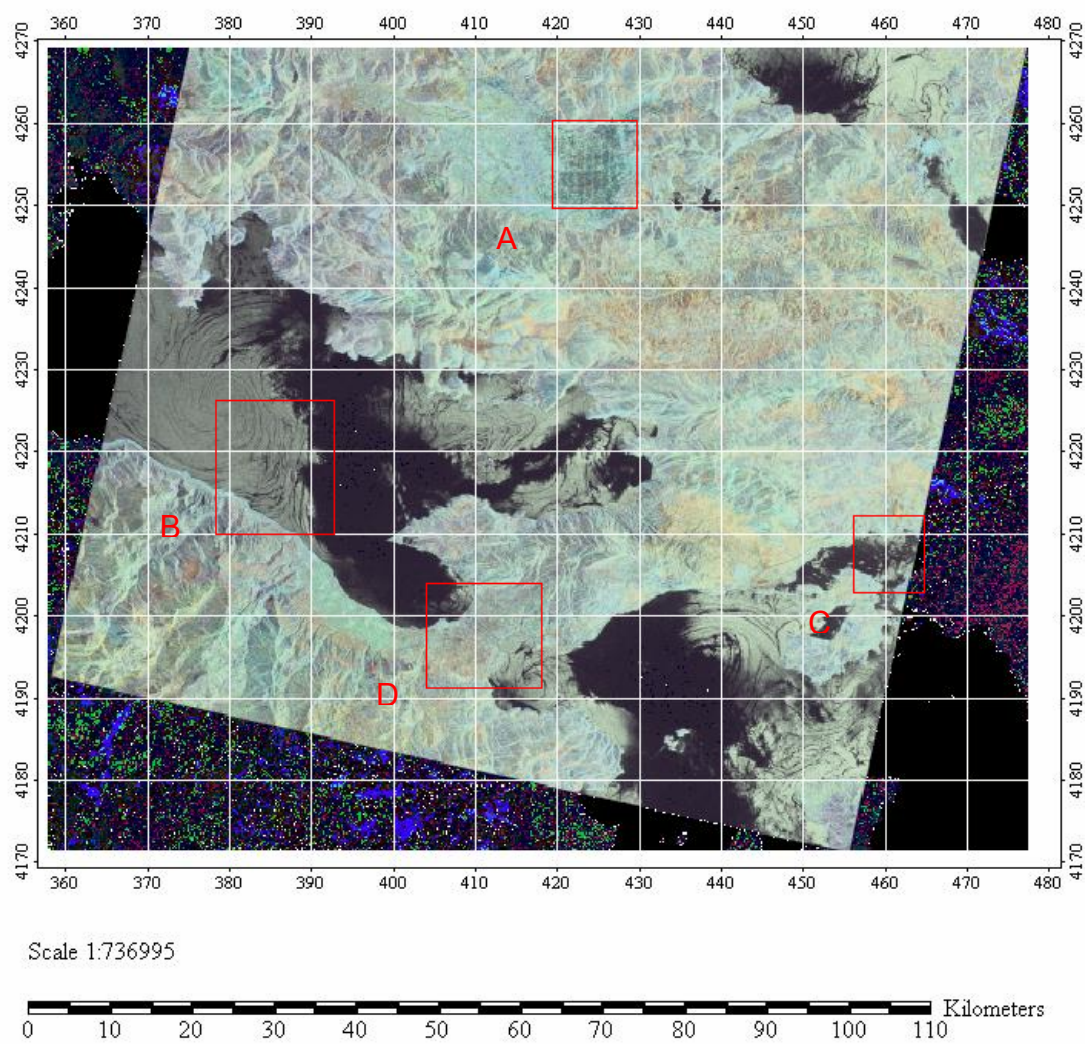
$DN_{Highres}$ = Η τιμή της φωτεινότητας των αρχικών δεδομένων Radar.

P_e = Η τιμή της φωτεινότητας της πρώτης συνιστώσας.

- 5) Ο Αντίστροφος μετασχηματισμός γίνεται χρησιμοποιώντας τις τρεις κύριες συνιστώσες που προέκυψαν, δηλαδή την πρώτη με τα ενσωματωμένα δεδομένα του Radar, τη δεύτερη και την τρίτη.
- 6) Για την δημιουργία της 8 - bit έγχρωμης σύμμικτης εικόνας, τα δεδομένα θα πρέπει να έχουν εύρος φωτεινότητας που θα κυμαίνεται από 0 έως 255.

Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η εικόνα που προέκυψε από τον μετασχηματισμό (PCT) και στο 6.8 φαίνεται η ίδια εικόνα με συντεταγμένες. Ο συνδυασμός των φασματικών πληροφοριών του Landsat σε συνδυασμό με την καλή χωρική διαχωριστική ικανότητα του ERS-1 βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της εικόνας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εικόνα που προέκυψε έχει μικρότερες διαστάσεις από την αρχική ERS -1 και πιο συγκεκριμένα λείπει ένα τμήμα στη βόρεια περιοχή της σύμμικτης φωτογραφίας. Αυτό συμβαίνει διότι τα εικονοστοιχεία αυτά δεν υπάρχουν στην εικόνα του Landsat και λαμβάνουν την τιμή μηδέν στη σύμμικτη εικόνα κατά το μετασχηματισμό.

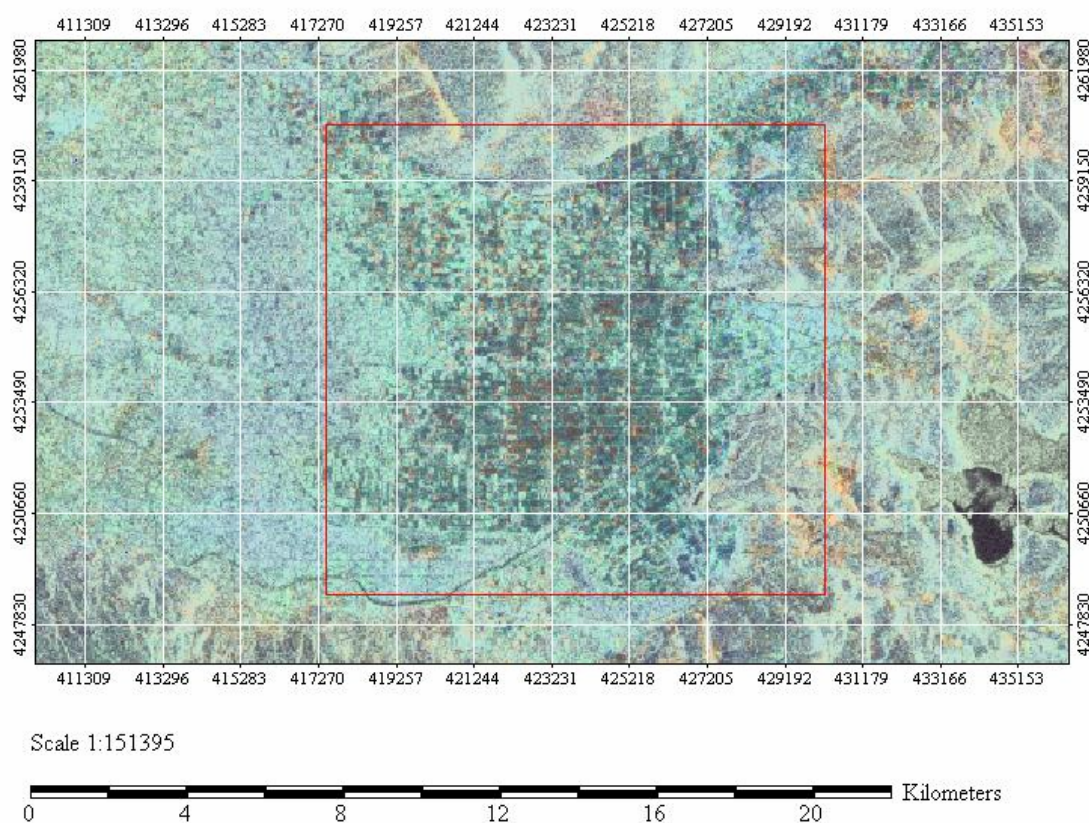
Σχήμα 6.6 Η σύμμικτη εικόνα ERS-1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό PCT.



Σχήμα 6.7 Ο χάρτης της σύμπτυξης εικόνας στο ΕΓΣΑ-87. Στις κόκκινες περιοχές σημειώνονται κάποιες ενδιαφέρουσες περιοχές προς ερμηνεία. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες χιλιομέτρων (km).

6.5.2 Ερμηνεία σύμμικτης PCT εικόνας (ERS-1 / Landsat TM)

Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται το τμήμα (Α) της σύμμικτης εικόνας. Η τοπογραφία της περιοχής είναι ομαλή σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, πληροφορία η οποία προκύπτει από τις πληροφορίες του ERS - 1. Επίσης παρατηρείται μια ακολουθία επαναλαμβανόμενων τόνων και υφών με συγκεκριμένη δομή. Το τμήμα της εικόνας έχει εμπλουτιστεί και από τα φασματικά χαρακτηριστικά της εικόνας του Landsat στους διαύλους Red – Green – Blue, ώστε να απεικονίζεται όσο αυτό είναι δυνατό η πραγματικότητα. Η περιοχή είναι πολύ πιθανό να απεικονίζει αγροτικές καλλιέργειες, αγροτεμάχια και διάφορα είδη βλάστησης.

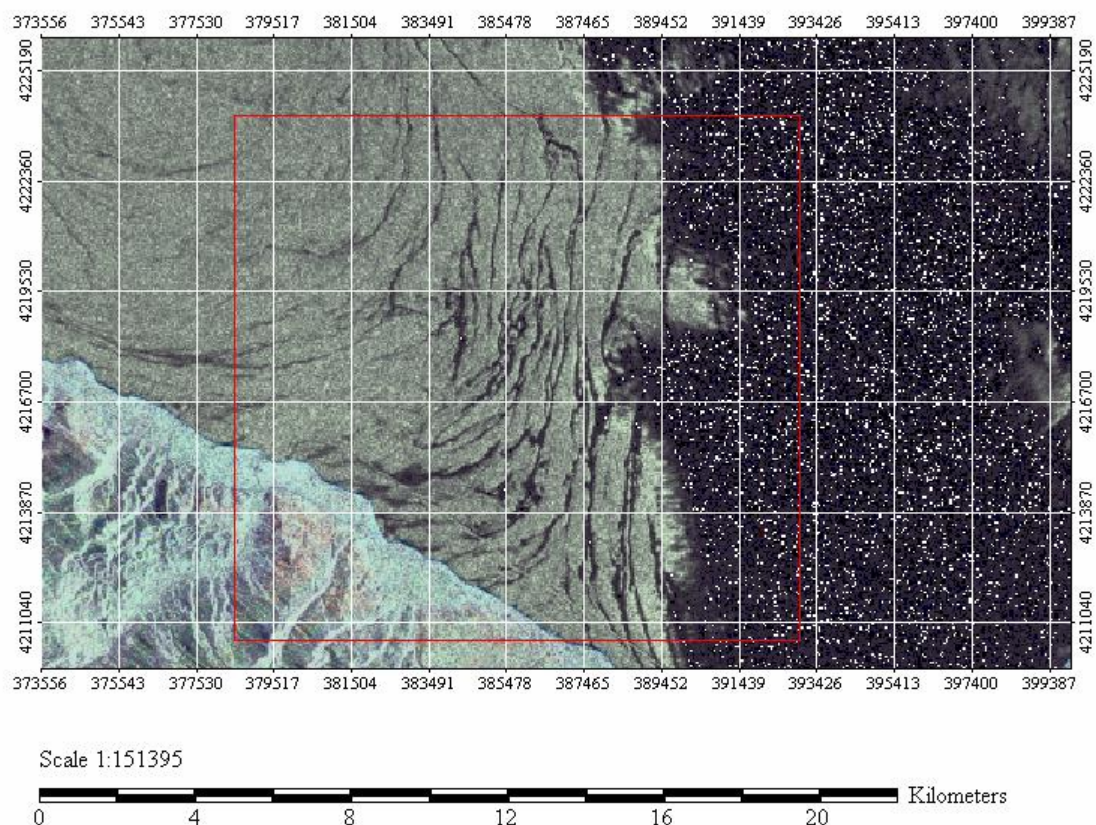


Σχήμα 6.8 Τμήμα (Α) : Διάφορα είδη βλάστησης, αγροτική περιοχή. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες μέτρων (m).

Στο τμήμα (Β) καθώς και σε άλλα αντίστοιχα τμήματα της εικόνας με την ίδια υφή και τόνο παρουσιάζεται το φαινόμενο του συντονισμού Bragg. Παρατηρούνται έντονοι και ελικοειδής κυματισμοί, καμπυλοειδής σχηματισμοί. Έτσι παρόλο που οι υδάτινες μάζες αποτελούν στόχους κατοπτρικής ανάκλασης με μηδενική επιστροφή σήματος, στα συγκεκριμένα τμήματα οι

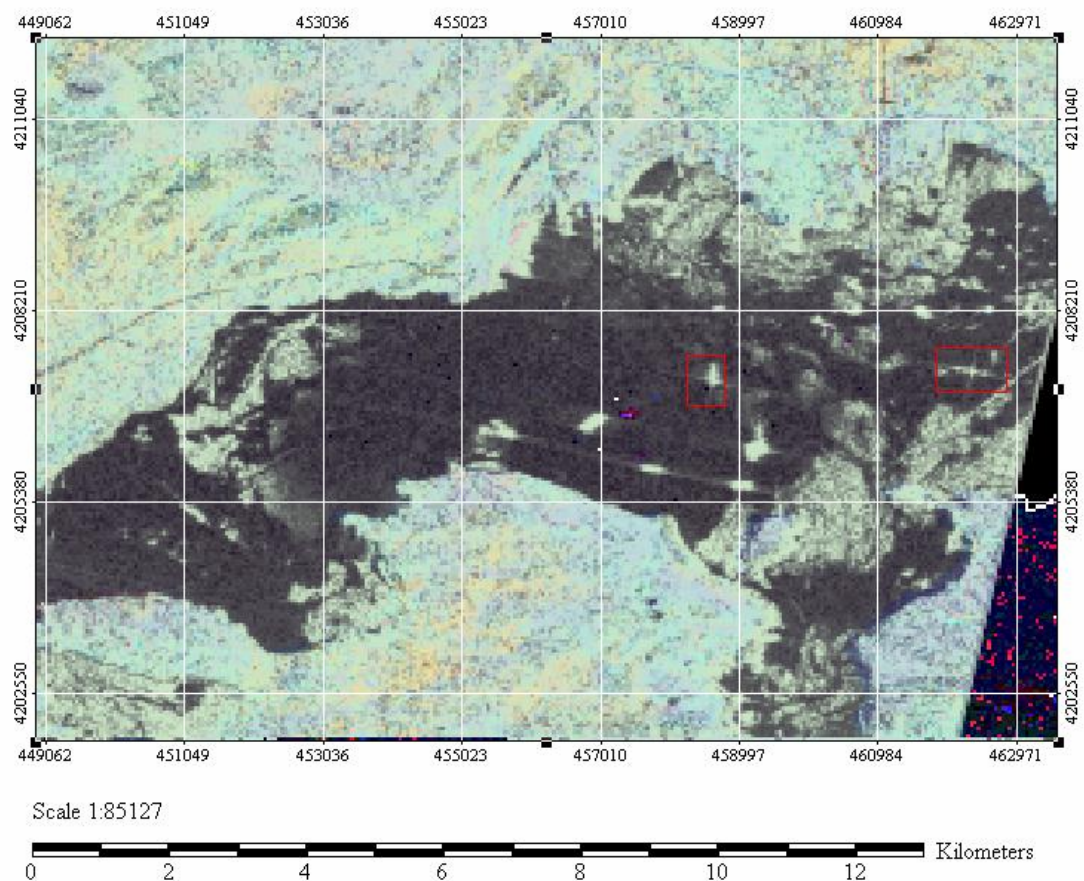
σκεδαστές (επαναλαμβανόμενα κύματα) λόγω της πιθανής ακέραιας πολλαπλάσιας απόστασης, σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, που απέχουν, ενισχύουν (γκρι περιοχές) ή απαλείφουν (μαύρες περιοχές) την ακτινοβολία του Radar. Πληροφορία η οποία εάν διατίθετο μόνο η φωτογραφία του Landsat, δεν θα ήταν εξαχθείσα.

Τα κύματα που παρουσιάζονται είτε είναι κύματα επιφανείας είτε εσωτερικά (Παράγραφος 4.10, Ωκεανογραφία).



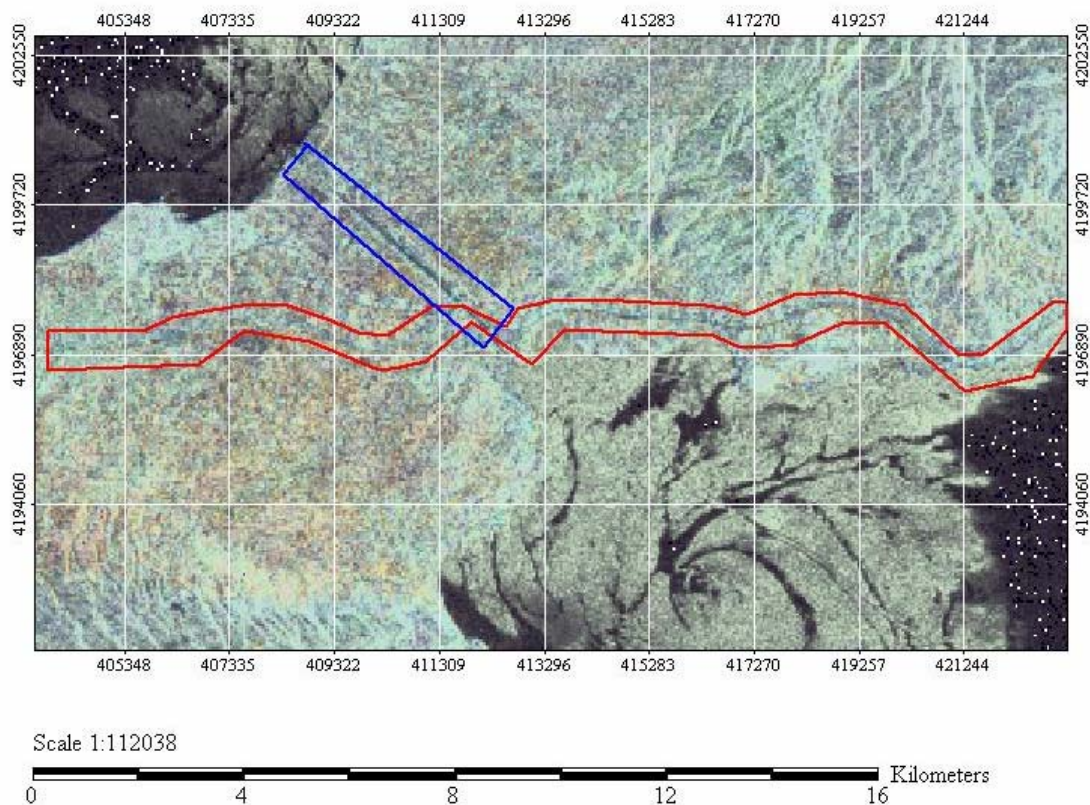
Σχήμα 6.9 Τμήμα (B) : Κύματα επιφανείας, εσωτερικά κύματα. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες μέτρων (m).

Στο τμήμα (C) της εικόνας παρατηρούνται μικροί στόχοι οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή επιστροφή σήματος σε σχέση με άλλους γειτονικούς στόχους μεγαλύτερων διαστάσεων. Πρόκειται πιθανόν για μεταλλικούς στόχους και πιο συγκεκριμένα για πλωτά μέσα (π.χ πλοία) τα οποία λόγω μεταλλικού συντονισμού παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα.



Σχήμα 6.10 Τμήμα (C) : Μεταλλικός συντονισμός σε πλωτά μέσα. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες μέτρων (m).

Στο τμήμα (D) της εικόνας παρατηρούνται δύο στόχοι χαμηλής ανακλαστικότητας σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Ο ένας (στο μπλε πλαίσιο) έχει μεγαλύτερο πλάτος και συνδέει δύο υδάτινα τμήματα, ενώ ο άλλος (στο κόκκινο πλαίσιο) έχει καμπυλοειδής μορφή και μικρότερο πλάτος. Πρόκειται για τον ισθμό της Κορίνθου με το οδικό δίκτυο που συνδέει την Στερεά Ελλάδα με την Πελοπόννησο.



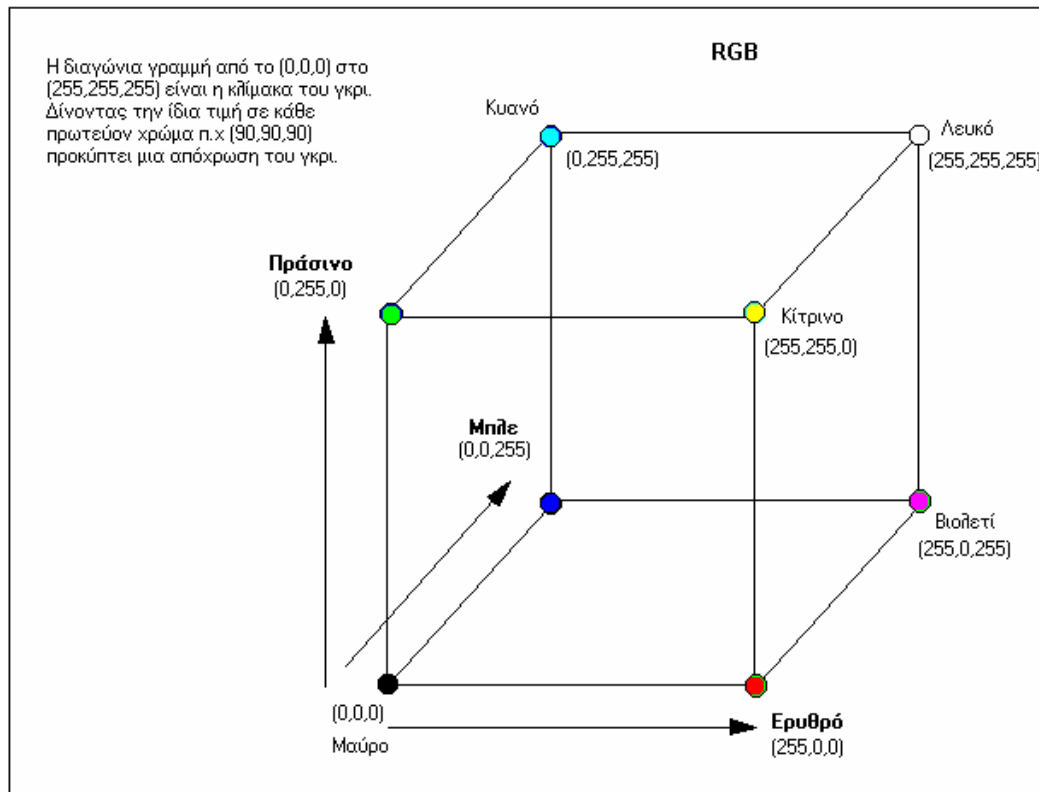
Σχήμα 6.11 Το τμήμα (D) : Ο ισθμός της Κορίνθου και το οδικό δίκτυο. Οι συντεταγμένες είναι σε μονάδες μέτρων (m).

6.5.3 Ο μετασχηματισμός IHST (Intensity, Hue, Saturation)

Η αίσθηση του χρώματος στον ανθρώπινο εγκέφαλο σχετίζεται με την αντίληψη των τριών κυρίαρχων χρωμάτων του φωτός (ερυθρό, πράσινο, ιώδες). Η άποψη ότι, τα υπόλοιπα χρώματα δημιουργούνται από τους διάφορους συνδυασμούς των τριών κύριων χρωμάτων είναι αυτή που τείνει να επικρατήσει σήμερα. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της προσέγγισης αυτής. Το σύστημα αρχίζει από την ακμή “μαύρο” και οι άξονες του είναι μαύρο-ερυθρό, μαύρο-πράσινο και μαύρο-ιώδες (μπλε).

Το σύστημα αυτό ονομάζεται **RGB** (Red-Green-Blue) και είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται, εκτός των άλλων και στις οθόνες των τηλεοράσεων (Mather, 1987). Ο συνδυασμός αυτών των χρωμάτων

χρησιμοποιείται στην πολυφασματική εικόνα του Landsat με κάθε χρώμα να αντιστοιχεί σε κάθε δίαυλο.



Σχήμα 6.12 Το κυβικό σύστημα απεικόνισης των χρωμάτων RGB.

Ένα άλλο μοντέλο αντίληψης των χρωμάτων είναι αυτό της έντασης – απόχρωσης – κορεσμού (Intensity – Hue – Saturation, IHS). Στις εφαρμογές Τηλεπισκόπησης η ένταση παριστάνει τη τιμή φωτεινότητας, η ευαισθησία της οποίας εξαρτάται από τη ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα του δέκτη. Η απόχρωση παριστάνει το κυρίαρχο μήκος κύματος του κάθε χρώματος ενώ ο κορεσμός αναφέρεται στην καθαρότητα, δηλαδή εάν έχει αναμείξεις άλλων χρωμάτων, του χρώματος.

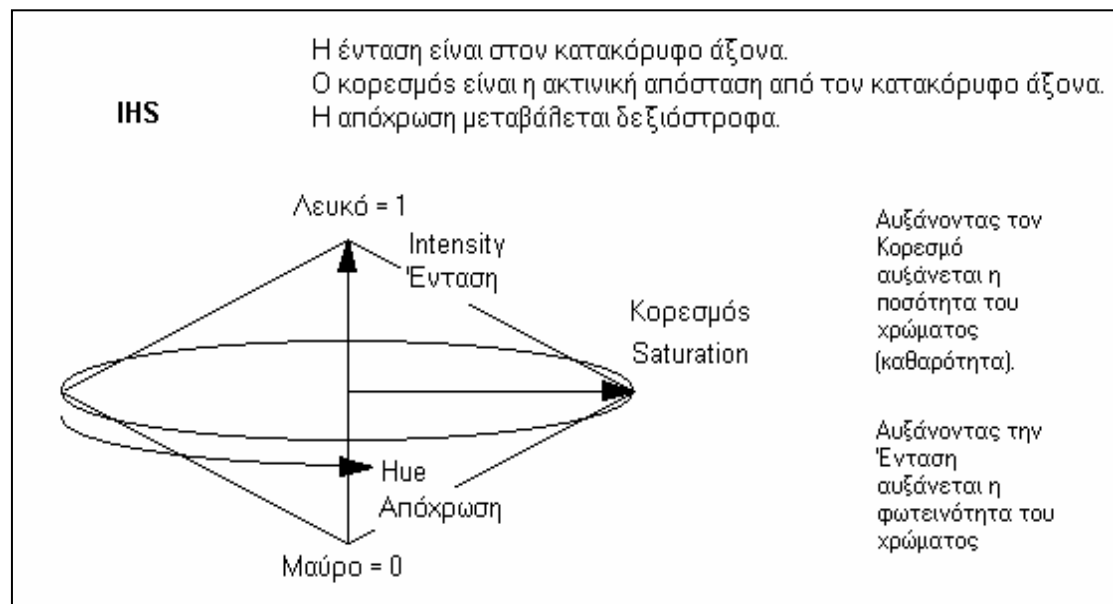
Το μοντέλο **IHS** μπορεί να περιγραφεί γραφικά με ένα διπλό κώνο (Σχήμα 6.14). Ο διπλός αυτός κώνος αποτελείται από κύκλους απόχρωσης για διαφορετικές τιμές έντασης. Σε όλους τους κύκλους, οι αποχρώσεις τοποθετούνται σε τέλεια φασματική ακολουθία με τις κύριες αποχρώσεις να βρίσκονται στην περιφέρεια του κύκλου.

Κάθε απόχρωση ορίζεται από την γωνιακή της απόσταση, δεξιόστροφα από το ιώδες. Η κλίμακα των τόνων του γκρι βρίσκεται κατά μήκος του κάθετου

άξονα με την ένταση (I) να κυμαίνεται από μηδέν (μαύρο) στο κάτω άκρο του διπλού κώνου έως λευκό στο πάνω μέρος του διπλού κώνου. Ενδιάμεσα κάθε κύκλου απόχρωσης ο κορεσμός (S) κυμαίνεται από μηδέν (0) στον κάθετο άξονα μέχρι μονάδα (1,0) στην περιφέρεια του κύκλου.

Η ανθρώπινη όραση είναι, γενικά, ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές διαφόρων κατασκευών και σε σχετικά μεγάλες μεταβολές των χρωμάτων. Αυτό σημαίνει πως λεπτομερείς πληροφορίες πρέπει να εμφανίζονται σαν ένταση ενώ λιγότερο ακριβείς πληροφορίες να αντιπροσωπεύονται με κάποιο χρώμα.

Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται και η χρησιμότητα του μετασχηματισμού IHS.

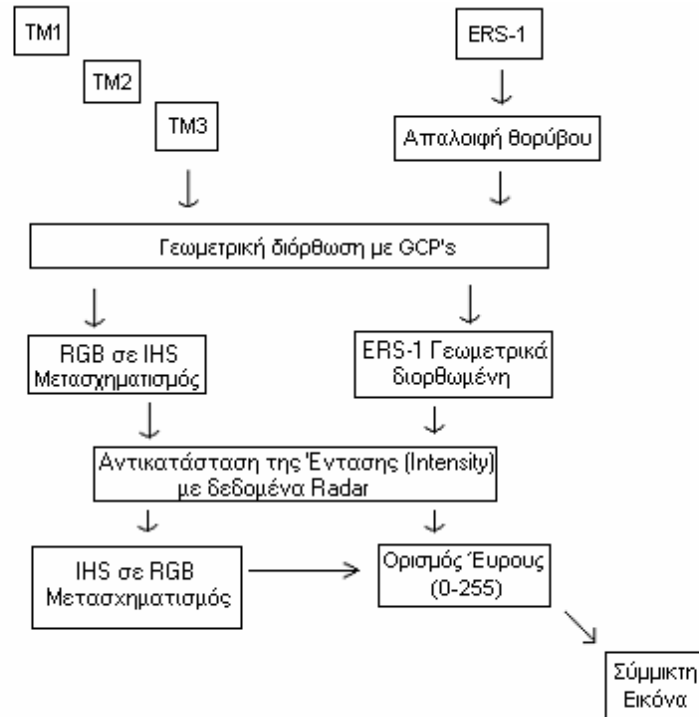


Σχήμα 6.13 Το κωνικό σύστημα απεικόνισης IHS.

Ο μετασχηματισμός IHST στηρίζεται στη μετάβαση από το κυβικό σύστημα RGB στο κωνικό σύστημα απεικόνισης των χρωμάτων IHS (Mather, 1987). Από τις τιμές RGB μπορούν να ληφθούν οι τιμές στο σύστημα IHS (Παράρτημα Γ).

Η μεθοδολογία που ακολουθείται περιλαμβάνει 5 βήματα τα οποία είναι : 1) Απαλοιφή στιγμάτων (speckles) από την εικόνα ERS - 1 2) Γεωμετρική εγγραφή των δύο εικόνων με σημεία ελέγχου (image to image rectification) 3) Μετασχηματισμός RGB σε IHS στην εικόνα του Landsat 4) Αντικατάσταση της έντασης (Intensity) της εικόνας Landsat με τα δεδομένα του Radar και

εφαρμογή Αντίστροφου Μετασχηματισμού IHS σε RGB 5) Ορισμός δυναμικού εύρους φωτεινότητας από 0 - 255. Το κάθε βήμα του μετασχηματισμού φαίνεται στο Σχήμα 6.15 (Schowengerdt, 1997).



Σχήμα 6.14 Σχηματικό διάγραμμα της υπέρθεσης εικόνων, (IHST).

Μια **παραλλαγή** της μεθόδου IHST επιτυγχάνεται στο 4^ο στάδιο, όταν αντί της αντικατάστασης της **εντάσεως** με τα δεδομένα Radar, αντικατασταθεί ο **κορεσμός** της πολυφασματικής εικόνας του Landsat.

Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η σύμμικτη εικόνα από τον μετασχηματισμό IHST και στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η σύμμικτη εικόνα από την παραλλαγή του μετασχηματισμού IHST.

Σχήμα 6.15 Η σύμμικτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό IHST.

Σχήμα 6.16 Η σύμμεκτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με την παραλλαγή του μετασχηματισμού IHST.

6.5.4 Ο μετασχηματισμός Brovey

Κατά τον μετασχηματισμό Brovey η τιμή φωτεινότητας κάθε εικονοστοιχείου ενός διαύλου του Landsat διαιρείται με το άθροισμα των τιμών φωτεινότητας του ίδιου εικονοστοιχείου, σε όλους του δίαυλους. Το αποτέλεσμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη τιμή φωτεινότητας της εικόνας του ERS - 1.

Έτσι στην περίπτωση της συγκεκριμένης εικόνας του Landsat με τους τρεις δίαυλους TM1, TM2 και TM3 ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται κατά τον μετασχηματισμό Brovey είναι σχηματικά :

Πίνακας 6.5 Ο μετασχηματισμός Brovey.

| Χρώμα | Δίαυλος | Σχέση |
|---------|---------|---|
| Ερυθρό | TM3 | $\frac{DN_{TM3}}{(DN_{TM3} + DN_{TM2} + DN_{TM1})} DN_{ERS1}$ |
| Πράσινο | TM2 | $\frac{DN_{TM2}}{(DN_{TM3} + DN_{TM2} + DN_{TM1})} DN_{ERS1}$ |
| Ιώδες | TM1 | $\frac{DN_{TM1}}{(DN_{TM3} + DN_{TM2} + DN_{TM1})} DN_{ERS1}$ |

Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται η σύμμικτη εικόνα με τον μετασχηματισμό Brovey χρησιμοποιώντας τους τρεις δίαυλους TM1, TM2 και TM3.

Σχήμα 6.17 Η σύμμικτη εικόνα ERS - 1 / Landsat TM με τον μετασχηματισμό Brovey.

6.6 Σύγκριση και αξιολόγηση των μετασχηματισμών

Δεν υπάρχει γενικός κανόνας για την αξιολόγηση των μετασχηματισμών. Ο κάθε μετασχηματισμός αποδίδει ανάλογα με την εφαρμογή αλλά και την περιοχή για την οποία εφαρμόζεται.

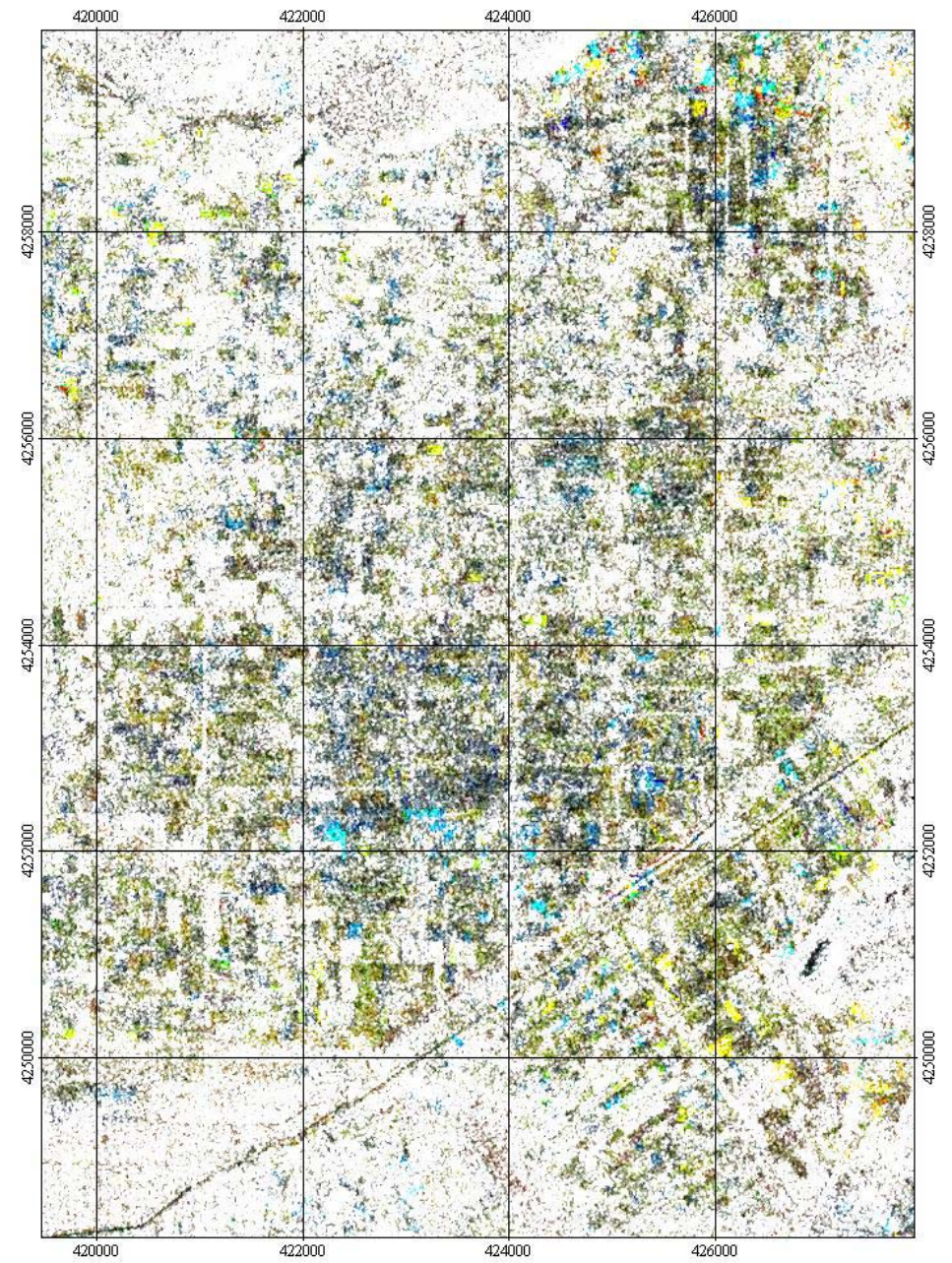
Μπορούν όμως να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα εξετάζοντας τους αλγόριθμους κάθε μετασχηματισμού.

- Ο μετασχηματισμός PCT έχει το πλεονέκτημα ότι διατηρεί σε μεγάλο βαθμό στην τελική σύμμικτη εικόνα τις φασματικές υπογραφές της πολυφασματικής εικόνας (Landsat TM). Κύριο μειονέκτημα του, είναι ό,τι είναι ο πιο αργός υπολογιστικά σε σχέση με τους άλλους δύο.
- Το πλεονέκτημα του μετασχηματισμού IHST στηρίζεται στο γεγονός ότι η ανθρώπινη όραση είναι, γενικά, ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές διαφόρων κατασκευών και σε σχετικά μεγάλες μεταβολές των χρωμάτων. Αυτό σημαίνει πως λεπτομερείς πληροφορίες πρέπει να εμφανίζονται σαν ένταση ενώ λιγότερο ακριβείς πληροφορίες να αντιπροσωπεύονται με κάποιο χρώμα. Το μειονέκτημα του είναι ό,τι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στους 3 δίαυλους TM1, TM2, TM3, (R, G, B).
- Ο μετασχηματισμός Brovey είναι ο πιο γρήγορος υπολογιστικά. Πλεονεκτεί στο γεγονός ότι αυξάνει την αντίθεση της τελικής εικόνας στα άκρα του ιστογράμματος της. Μειονέκτημα του μετασχηματισμού είναι ό,τι δεν διατηρεί τις φασματικές υπογραφές της πολυφασματικής εικόνας (Landsat TM).

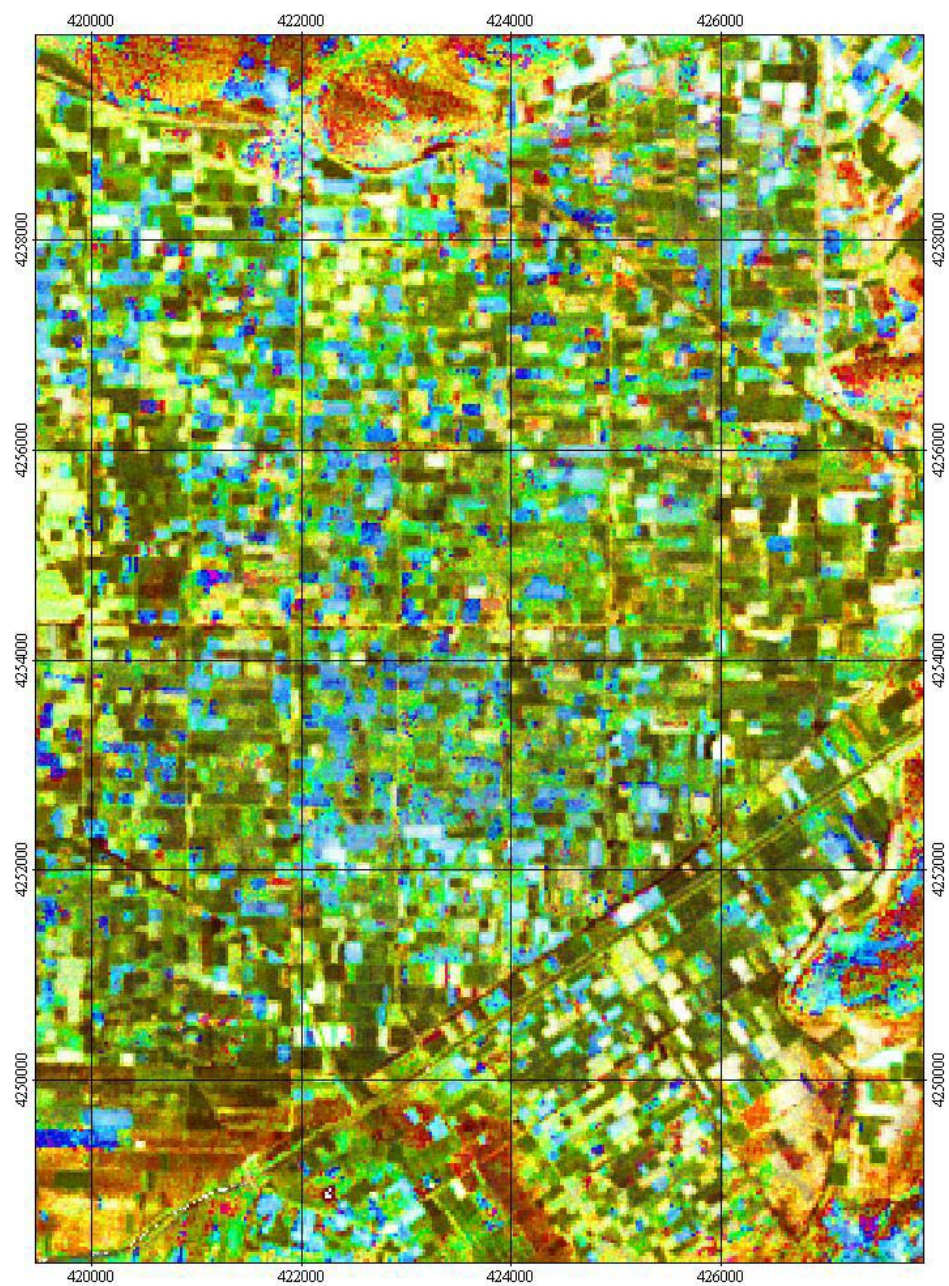
Παρακάτω φαίνονται τμήματα από τις σύμμικτες εικόνες που έχουν προκύψει από τους μετασχηματισμούς.



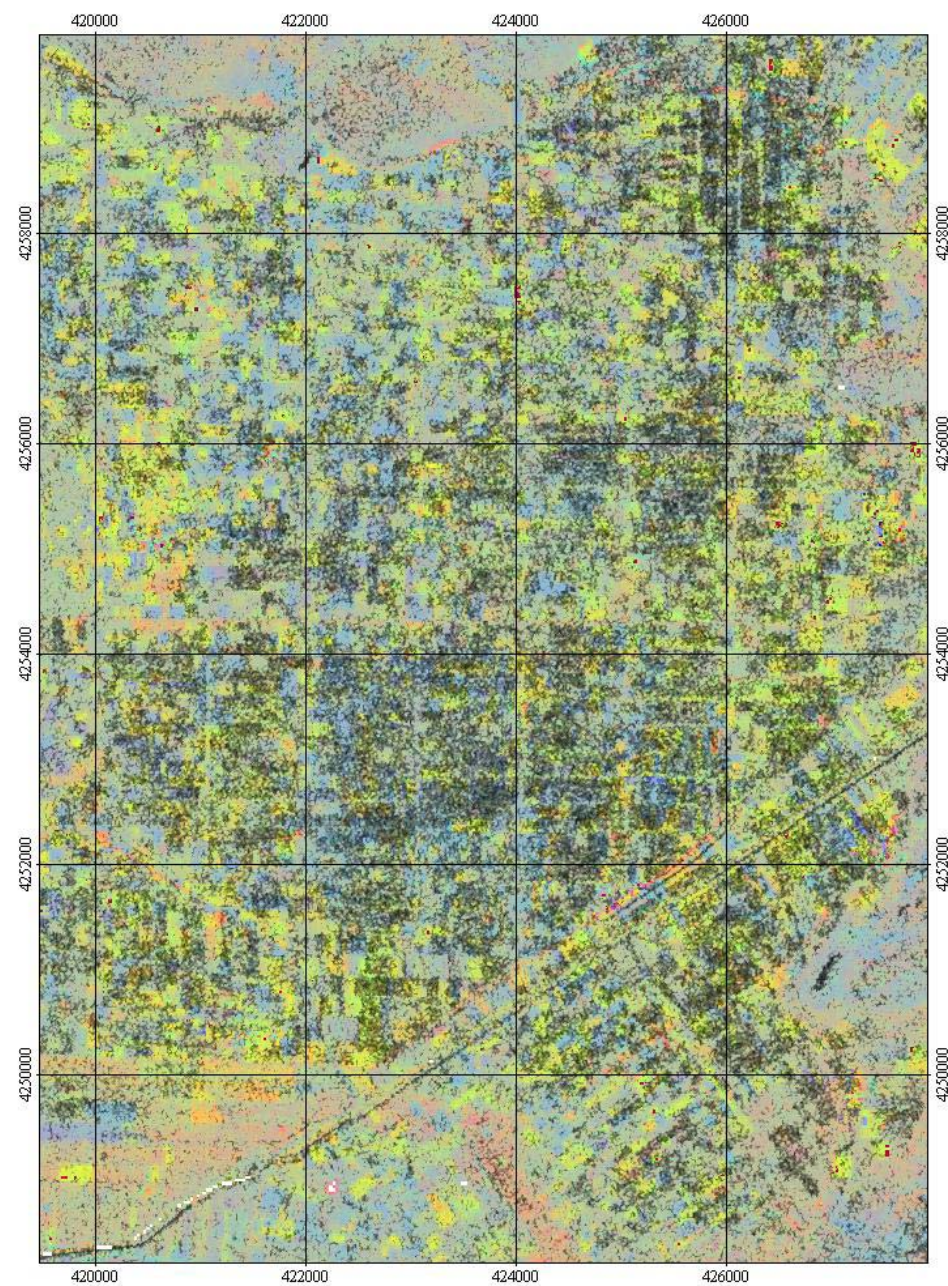
PCT



IHST (Intensity)

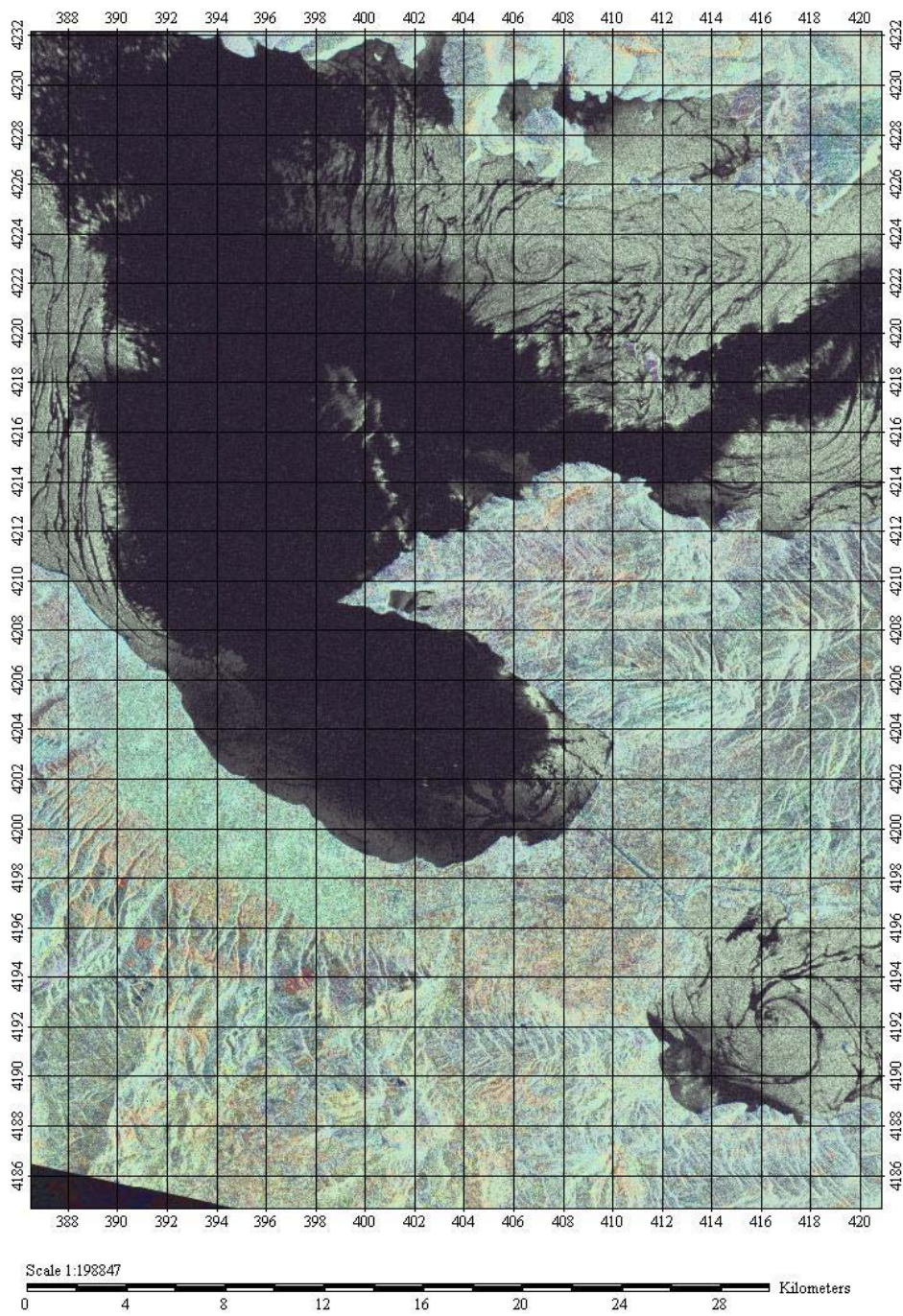


IHST (Saturation)

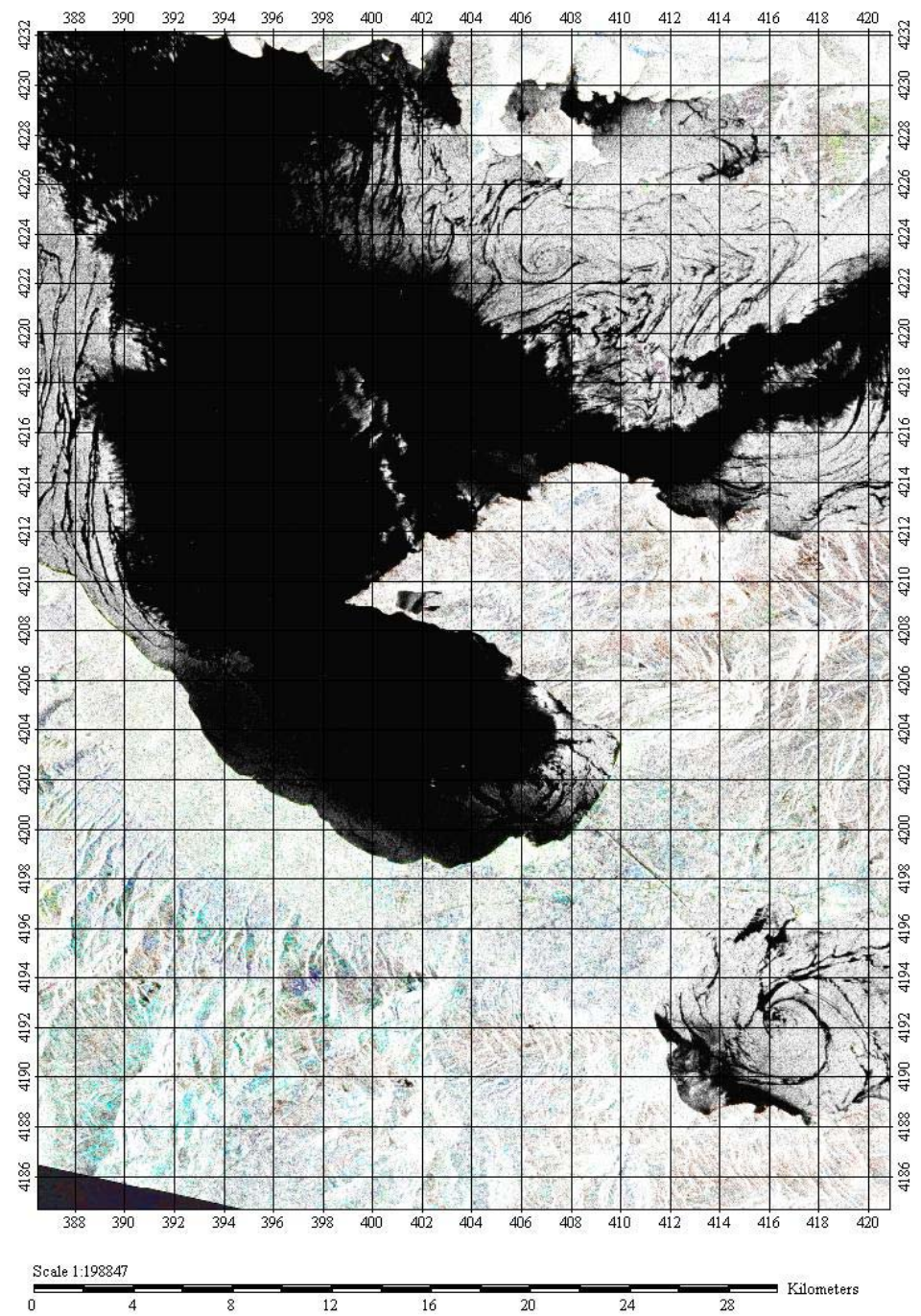


Scale 1:48914
0 1 2 3 4 5 6 7 Kilometers

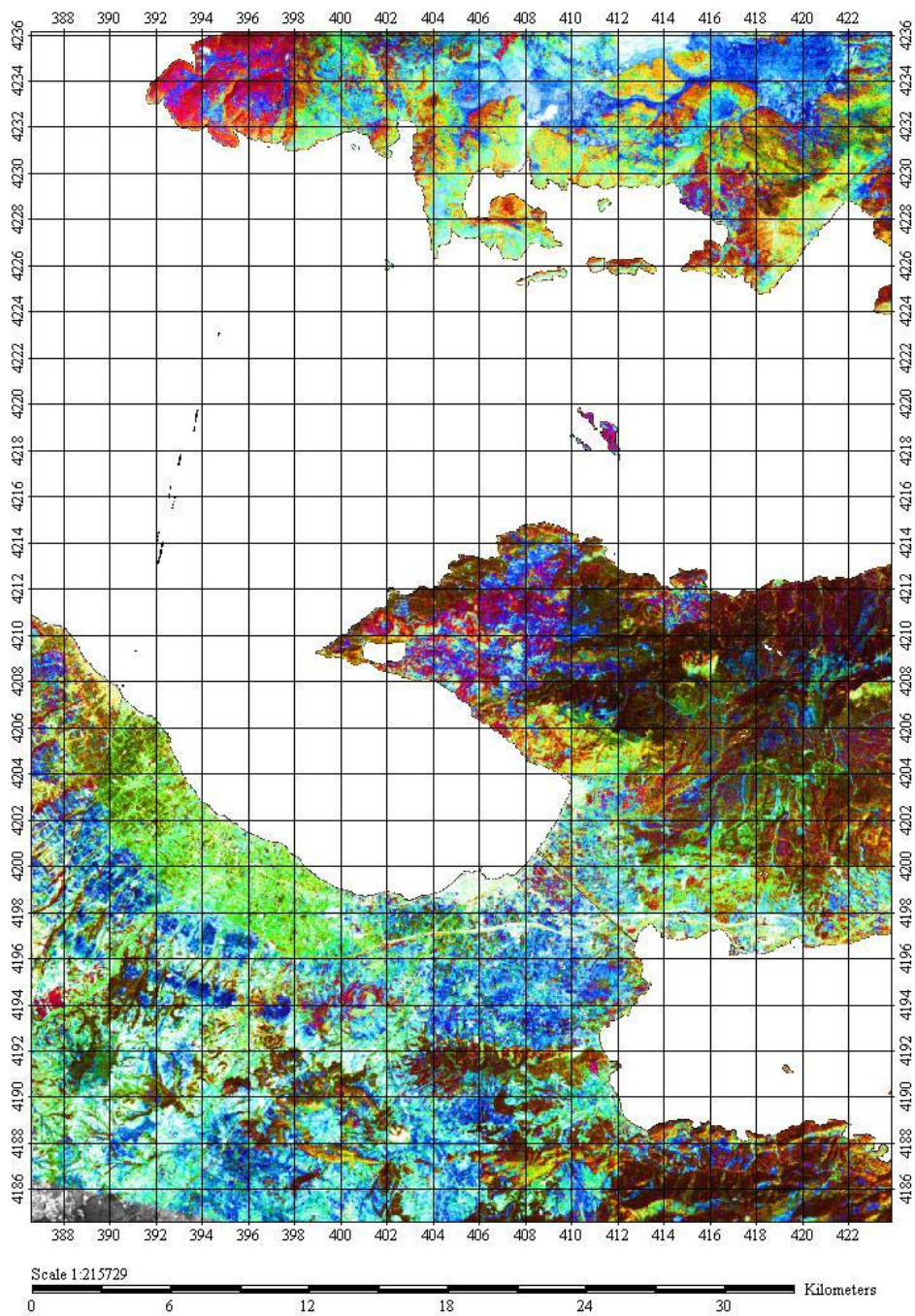
Brovey



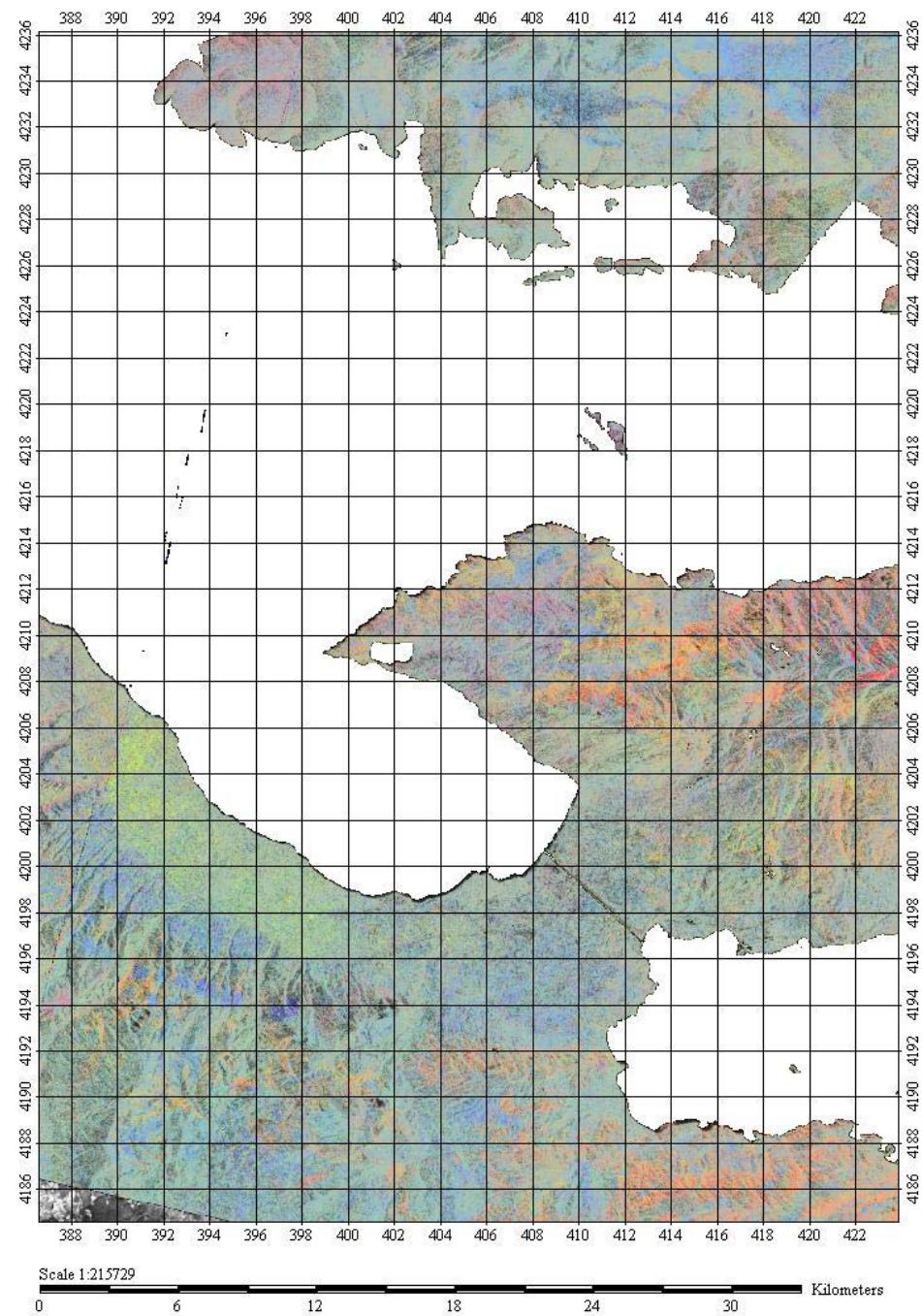
PCT



IHST (Intensity)



IHST (Saturation)



Brovey

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο να παρουσιάσει το ενεργό εικονοληπτικό σύστημα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar) ως ένα χρήσιμο εργαλείο συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική έγινε μία πρώτη προσέγγιση στην επεξεργασία εικόνων από το συγκεκριμένο εικονοληπτικό σύστημα, περιλαμβάνοντας γεωμετρικές, ραδιομετρικές διορθώσεις καθώς και την τεχνική της υπέρθεσης εικόνων με άλλο εικονοληπτικό σύστημα.

Από την παραπάνω μελέτη τα συμπεράσματα που προκύπτουν, είναι :

1. Το Radar (SAR) είναι ένα ενεργό εικονοληπτικό σύστημα κατάλληλο για την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων με βραχύχρονες εξελίξεις, όπου απαιτούνται επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις ανεξάρτητα από τις συνθήκες “οπτικής ορατότητας”.
2. Η αναγκαιότητα των γεωμετρικών διορθώσεων των δορυφορικών εικόνων είναι εμφανής από την μεταβολή που έχουν αυτές όταν διορθωθούν.
3. Όταν γίνεται γεωμετρική διόρθωση με βάση σημεία ελέγχου (GCP's) θα πρέπει αυτά να έχουν ομοιόμορφη κατανομή στην ως προς διόρθωση εικόνα, και η αντιστοίχιση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατότερο ακριβής.
4. Δεν στάθηκε δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων όσο αναφορά για την επιλογή του βαθμού του πολυωνύμου όσο και για την βέλτιστη μέθοδο επαναδειγματοληψίας.
5. Η τεχνική της υπέρθεσης εικόνων από διαφορετικούς αισθητήρες, έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα ταυτόχρονης μελέτης, αξιολόγησης και ερμηνείας πολλών, διαφορετικού είδους, πληροφοριών.

7.2 Προτάσεις

Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

1. Στην παρούσα εργασία θα ήταν χρήσιμο να υπήρχε στην διάθεση του αναλυτή και άλλες φωτογραφίες (SAR) από την ίδια περιοχή με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλωσης της ακτινοβολίας, ώστε να διαφανεί η σημαντικότητα της εφαρμογής της πολωσιμετρίας.
2. Ομοίως θα ήταν χρήσιμο να υπήρχε και η ίδια φωτογραφία από τον ERS -1 αλλά σε διαφορετικό χρόνο λήψης, ώστε από το ζευγάρι των δύο εικόνων να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας.
3. Φωτογραφίες από άλλα συστήματα (SAR) με διαφορετικά μήκη κύματος της μικροκυματικής ακτινοβολίας θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για την υπό εξέταση περιοχή και θα ολοκλήρωνε την ερμηνεία.
4. Για την υπέρθεση των δορυφορικών εικόνων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές υπέρθεσης που έχουν αναπτυχθεί ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.
5. Οι εικόνες που προέκυψαν από τους μετασχηματισμούς της υπέρθεσης, θα μπορούσαν να ερμηνευθούν καλύτερα με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της ταξινόμησης σε κάθε μία ξεχωριστά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Campbell J. B. (1987), *“Introduction to Remote Sensing”*, the Guildford Press, New York.

Cracknell A.P & Hayes L.W.B., *“Introduction to Remote Sensing”*.

Curlander, J.C. & R. N. McDonough (1991), *“Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing”*, John Wiley & Sons, New York.

Curran, P. J. (1985), *“Principles of Remote Sensing”*, Longman and New York.

Fitch, J.P. (1988), *“Synthetic Aperture Radar”*, Springer-Verlag, New York,.

Forster B. (2002), *“Radar Remote Sensing Short Course”*, Course Notes, Technical University of Crete, Greece.

Ganas Athanasios (2002), *“ Monitoring of Nisyros Volcano using ERS Repeat-Pass Interferometry”*, Final Report, ESA Project A0-3 201.

Jensen, J. R. (1995), *“Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective”*, Prentice Hall, N.J., 2nd Edition, USA.

Kovaly, J.J. (1976), *“Synthetic Aperture Radar”*, Artech House Inc., Norwood MA.

Leberl, F. (1990), *“Radargrammetric Image Processing”*, Artech House, Boston Mass.

Madsen & Zebker, H.A. (1999), *“Synthetic aperture radar interferometry: Principles and Applications in Manual of Remote Sensing”*, Vol III, Artech House.

Manual of Remote Sensing (1998), “ *Volume III: Principles and Applications of Imaging Radars*”, Henderson, F.M (editor-in-chief), Third Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Virginia, USA.

Moik, T. G. (1980), “*Digital Processing of Remotely - Sensed Images*”, NASA, Washington, USA.

Oliver Chris & Shaun Quegan (1998), “*Understanding Synthetic Aperture Radar Images*”, Artech House, Norwood, MA USA.

Olmsted, C. (1993), “*The Scientist Synthetic Aperture Radar User’s Guide*”, Fairbanks, Alaska.

Richards, J. A. (1993), “*Remote Sensing Digital Image Analysis, And Introduction*”, Springer - Verlag, Berlin.

Sabins Floyd F. (1987), “*Remote Sensing / Principles and Interpretation*”, W. H. Freeman and Company, 2nd Edition, New York.

Schowengerdt Robert A. (1997), “*Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*”, Academic press, New York, 2nd Edition.

Talaat M. Ramadan and Hoda M. Onsi (2002), “*Use of ERS SAR and Landsat TM Images for Geological Mapping and Mineral Exploration of Sol Hamid Area*”, Egypt

Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung (1986), “*Microwave Remote Sensing, Volume III*”, Artech House Inc., Norwood MA.

University of New South Wales (1991), “*Microwave Remote Sensing*”, Course Notes, Centre for Remote Sensing.

Yang Qinghua, Li Zhizhong (2001), "Application Of Radar Image in Land – Use Dynamic Monitoring in Beijing", Paper, Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.

Βέης (1989), *"Έκθεση προς τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας"*.

Μερτίκα Π. Στέλιος (1999), *"Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας"*, Εκδόσεις ΙΩΝ.

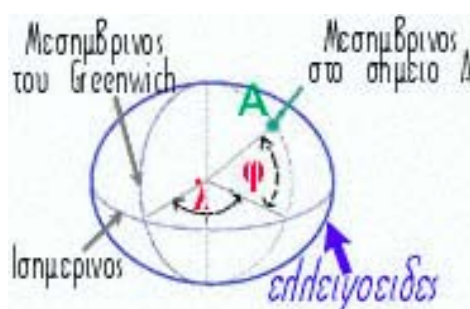
Τριπολιτσιώτης Αχιλλέας (1998), *"Μελέτη και αξιολόγηση γεωμετρικών διορθώσεων δορυφορικών εικόνων"*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΡΟΒΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Φυσική Γήινη Επιφάνεια και Ελλειψοειδές

Ο όρος *Φυσική Γήινη Επιφάνεια* χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επιφάνεια του γήινου πλανήτη. Το σχήμα της επιφάνειας αυτής έχει κατά ιστορικούς καιρούς περιγραφεί γεωμετρικά ως *επίπεδο*, *σφαίρα*, *σφαιροειδές* και *ελλειψοειδές*. Η πιο σύγχρονη θεώρηση για το σχήμα της γης χρησιμοποιεί την έννοια του *γεωειδούς*, το οποίο είναι μια σύνθετη επιφάνεια που περιγράφεται μόνον με αναλυτικούς / μαθηματικούς τύπους.

Στην πράξη, για την αποφυγή πολύπλοκων πράξεων (και των σφαλμάτων που απορρέουν από αυτές) το πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο σχήμα είναι το *ελλειψοειδές εκ περιστροφής*. Ένα σημείο πάνω στο ελλειψοειδές μπορεί να ορισθεί από τις γεωγραφικές συντεταγμένες, γνωστές ως *γεωγραφικό μήκος* (λ) και *γεωγραφικό πλάτος* (φ), τα οποία είναι γωνιακά μεγέθη και αναφέρονται στο νοητό κέντρο του ελλειψοειδούς. Το γεωγραφικό πλάτος και μήκος μετριοούνται σε μοίρες.

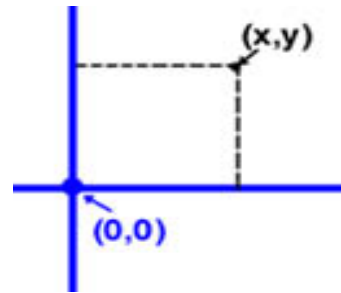
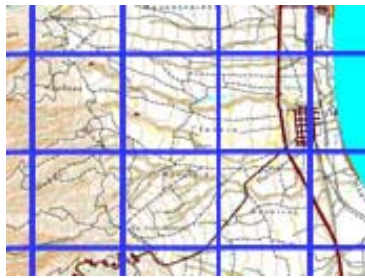


Σχήμα Α.1 Οι γεωγραφικές συντεταγμένες ενός σημείου στο ελλειψοειδές.

Χάρτης και επίπεδο

Ένας χάρτης στην γνωστή και συμβατική του μορφή είναι επίπεδος (*δισδιάστατη επιφάνεια*). Ένα σημείο πάνω στο επίπεδο μπορεί να χαρακτηριστεί μοναδικά από τις *καρτεσιανές συντεταγμένες του*, δηλ. την απόσταση του από την τομή των αξόνων Χ,Υ (ή σε ορισμένες περιπτώσεις Ε, Ν από τις αγγλικές λέξεις East, North).

Συνήθως, σαν άξονας τετμημένων (Υ) θεωρείται η διεύθυνση του Βορρά (η οποία ταυτίζεται με την διεύθυνση του μεσημβρινού). Οι καρτεσιανές συντεταγμένες συνήθως μετριοούνται σε μέτρα.



Σχήμα Α.2 Ο χαρτογραφικός κάρναβος και οι καρτεσιανές συντεταγμένες x, y ενός σημείου στο χάρτη.

Η απεικόνιση και η παραμόρφωση.

Το γεωμετρικό-μαθηματικό πρόβλημα που συναντάται είναι η απεικόνιση της γης (όλης ή μέρους της) σε ένα χάρτη ή με άλλα λόγια η απεικόνιση του ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο. Οποιαδήποτε λύση και αν δοθεί, θα καταλήξει στην παραμόρφωση των σχημάτων στο ελλειψοειδές, αφού αυτό είναι μια *μη αναπτυσσόμενη επιφάνεια*.

Για αυτόν τον λόγο, η διαδικασία απεικόνισης (δηλ. η συνάρτηση) του ελλειψοειδούς στο επίπεδο πρέπει να παρέχει πληροφορία για το πόσο παραμορφώνονται τα μεγέθη (διαστάσεις, γωνίες και εμβαδόν) ενός σχήματος στο ελλειψοειδές όταν απεικονίζεται στο επίπεδο.

Προβολικό Σύστημα - Ο Συνδετικός Κρίκος.

Προβολικό σύστημα ή και απλά *προβολή* ονομάζεται ένα σύστημα που επιτρέπει την απεικόνιση του ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο. Το σύστημα αυτό ορίζεται από μια σειρά συναρτήσεων, που μεταξύ άλλων πληροφοριών, παρέχουν και το βαθμό παραμόρφωσης των σχημάτων όταν απεικονίζονται στο ελλειψοειδές.

Έτσι, κάθε σημείο του ελλειψοειδούς αντιστοιχεί σε ένα σημείο του επιπέδου και αντίστροφα (*αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία*). Η μαθηματική σχέση που συνδέει τα σημεία στο ελλειψοειδές με τα σημεία στο επίπεδο του χάρτη, χρησιμοποιείται για την μετατροπή από γεωγραφικές σε *καρτεσιανές συντεταγμένες* και αντίστροφα.

Για να ορισθεί και να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ένα προβολικό σύστημα χρειάζονται :

- μαθηματικές σχέσεις που να συνδέουν αμφιμονοσήμαντα τις θέσεις σημείων στο ελλειψοειδές με αυτές που τους αντιστοιχούν στο επίπεδο.
- μαθηματικές σχέσεις που να παρέχουν τον βαθμό παραμόρφωσης των μεγεθών επί του ελλειψοειδούς.

Μια προβολή μπορεί να παραμορφώνει όλες ή μερικές από τις ιδιότητες ενός σχήματος του ελλειψοειδούς (διαστάσεις, μορφή και εμβαδά). Το σίγουρο είναι ότι τουλάχιστον ένα από τα παραπάνω μεγέθη θα παραμορφωθεί κατά την εφαρμογή της προβολής. Οι προβολές που διατηρούν κάποια από τα παραπάνω μεγέθη (δηλ. δεν τα παραμορφώνουν) έχουν και ιδιαίτερο όνομα ανάλογα με το ποια χαρακτηριστικά διατηρούν. Πιο συγκεκριμένα:

- Μια **ισαπέχουσα** προβολή διατηρεί ανέπαφες τις διαστάσεις, και πιο συγκεκριμένα τις αποστάσεις από κάποια σημεία.
- Μια **σύμμορφη** προβολή διατηρεί την μορφή (δηλ. τις γωνίες) των σχημάτων.
- Μια **ισοδύναμη** προβολή διατηρεί το εμβαδό των σχημάτων.

Μια προβολή χρησιμοποιεί μια γεωμετρική επιφάνεια, η οποία οφείλει να είναι αναπτυσκόμενη. Αναλόγως του είδους της επιφάνειας που χρησιμοποιείται, μια προβολή μπορεί να χαρακτηριστεί ως:

- **Κυλινδρική**, όταν η επιφάνεια προβολής είναι ένας *κύλινδρος*
- **Αξιμουθιακή ή επίπεδη**, όταν η επιφάνεια προβολής είναι ένα *επίπεδο*
- **Κωνική**, όταν η επιφάνεια προβολής είναι ένας *κώνος*.

Τα προβολικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα είναι η αξιμουθιακή ισαπέχουσα προβολή του HATT, τα δύο συστήματα Εγκάρσιας Μερκατορικής Προβολής (TM3 και UTM) και το τρίτο και πλέον πρόσφατο σύστημα Εγκάρσιας Μερκατορικής Προβολής (ΕΓΣΑ'87).

Πίνακας Α.1 Το προβολικό σύστημα HATT.

| Προβολικό σύστημα HATT | |
|--------------------------------------|---|
| Όνομα προβολικού συστήματος: | Ισαπέχουσα Αζιμουθιακή προβολή του HATT |
| Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum): | Ελληνικό, με αφετηρία το Αστεροσκοπείο Αθηνών ($\lambda_0 = 23^\circ 42' 58''.815$) |
| Ελλειψοειδές αναφοράς: | Bessel |
| Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a: | 6377397,155 m |
| Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1/f): | 1/299.1528128 |
| Διαστάσεις φύλλων χάρτη: | $30^\circ \times 30^\circ$ |
| Αριθμός φύλλων χάρτη: | 189 |

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ένα επίπεδο αναφοράς, το οποίο εφάπτεται σε ένα σημείο του ελλειψοειδούς το οποίο ονομάζεται *κέντρο φύλλου χάρτου* (Κ.Φ.Χ.). Έτσι ορίζονται 130 σφαιροειδή τραπέζια μεγέθους $30' \times 30'$ για την κάλυψη του Ελλαδικού χώρου. Κάθε τραπέζιο έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, με την αρχή των αξόνων το Κ.Φ.Χ.

Η προβολή αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι οι παραμορφώσεις των γωνιών, των αζιμουθίων καθώς και των εμβαδών διατηρούνται μικρές (αμελητέες) μέσα στο ίδιο Φ.Χ. και αυξάνονται ανάλογα με την απόσταση από το Κ.Φ.Χ., ενώ οι αποστάσεις που αναφέρονται στο κέντρο και προς οποιοδήποτε σημείο του ίδιου Φ.Χ. *δεν παραμορφώνονται* (για αυτό και η προβολή ονομάζεται ισαπέχουσα). Για τυχαίες αποστάσεις και στα άκρα ενός φύλλου HATT (όπου η απόσταση από το κέντρο του είναι περίπου 34 km) η παραμόρφωση των αποστάσεων είναι της τάξης του 1,000005 km, με άλλα λόγια δεν απαιτείται ο υπολογισμός της παραμόρφωσης για αποστάσεις που δεν ξεπερνούν το 1 km. Με την επιλογή πολλαπλών κέντρων αποφεύγονται οι αναγωγές και οι διορθώσεις των γεωμετρικών μεγεθών.

Αρκετά συχνά απαιτούνται περισσότερα του ενός Φ.Χ. για την κάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής όπου απαιτείται η μετατροπή των συντεταγμένων σε ένα ενιαίο Φ.Χ. (*αλλαγή κέντρου φύλλου χάρτου*). Στην περίπτωση αυτή οι παραμορφώσεις των γεωμετρικών μεγεθών αυξάνονται οπότε και απαιτείται η

αναγωγή τους στα πραγματικά πάνω στο ελλειψοειδές. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στην διανομή των χαρτών της Γ.Υ.Σ. 1: 100.000 , 1: 50.000 και 1:5.000 οι οποίοι καλύπτουν συστηματικά όλη την επιφάνεια της χώρας.

Γενικά τείνει να καταργηθεί σαν σύστημα αναφοράς γεωδαιτικών και τοπογραφικών μετρήσεων (για τους προαναφερθέντες λόγους) και να αντικατασταθεί από το ΕΓΣΑ-87.

Πίνακας Α.2 Το προβολικό σύστημα TM3⁰.

| Προβολικό σύστημα 3 μοιρών (ΕΜΠ3 ⁰ ή TM3 ⁰) | |
|--|--|
| Όνομα προβολικού συστήματος: | Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή 3 μοιρών (Transverse Mercator 3 ⁰) |
| Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum): | Ελληνικό, με αφετηρία το Αστεροσκοπείο Αθηνών (λο = 23°42' 58".815) |
| Ελλειψοειδές αναφοράς: | Bessel |
| Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a: | 6377397,155 m |
| Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1 / f): | 1/299.1528128 |
| Συντελεστής κλίμακας Κο | 0.9999 |
| Διαστάσεις ζωνών: | 3 ⁰ μήκος |
| Αριθμός ζωνών κάλυψης του Ελλαδικού χώρου: | 3 |

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. Ο γεωγραφικός χώρος που καταλαμβάνει η Ελλάδα έχει χωριστεί σε ζώνες μήκους 3⁰, τα άκρα των οποίων διαφέρουν κατά 1⁰ 30' από τον κεντρικό μεσημβρινό (Αστεροσκοπείο Αθηνών). Για τον κ.μ. θεωρείται λο = 0⁰, ενώ για τους δύο εκατέρωθεν θεωρείται λο = -3⁰ και λο = +3⁰. Για να αποφευχθούν αρνητικές τιμές ο κ.μ. έχει τετμημένη 200000 m. Η αρχή των συντεταγμένων θεωρείται η τομή του κ.μ. με τον παράλληλο φ = 34⁰. Οι ζώνες που προκύπτουν είναι συνολικά 3 για όλη την Ελλάδα.

Πίνακας Α.3 Το προβολικό σύστημα ΕΜΠ (U.T.M.).

| Προβολικό σύστημα Ε.Μ.Π. (U.T.M.) | |
|--|--|
| Όνομα προβολικού συστήματος: | Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή - Universal Transverse Mercator) |
| Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum): | E.D.50 , με αφετηρία το Potsdam |
| Ελλειψοειδές αναφοράς: | Hayford |
| Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a: | 6378388,155 m |
| Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1/f): | 1/297 |
| Συντελεστής κλίμακας K_0 | 0,9996 |
| Διαστάσεις ζωνών: | 6° σε γεωγραφικό μήκος |
| Αριθμός ζωνών κάλυψης του Ελλαδικού χώρου: | 2 (4η και 5η ζώνη, με κ.μ. $\lambda = 21^\circ$ και $\lambda = 27^\circ$ αντίστοιχα) |

Η γή χωρίζεται σε 60 ζώνες, γεωγραφικού μήκους 6°. Η μέγιστη διαφορά μέσα στην ίδια ζώνη δεν υπερβαίνει τις 3°. Η πρώτη ζώνη ξεκινά από τον μεσημβρινό του Greenwich. Η Ελλάδα καταλαμβάνει τις ζώνες 4 και 5 αφού τα γεωγραφικά μήκη των άκρων της Ελλάδας είναι $\lambda = 19^\circ$ έως $\lambda = 28^\circ$ περίπου. Το σύστημα χρησιμοποιεί συντελεστή κλίμακας 0,9996 οπότε οι παραμορφώσεις μέσα σε κάθε ζώνη δεν υπερβαίνουν το 1:2500.

Για να αποφευχθούν αρνητικές συντεταγμένες η τιμή των τετμημένων των κεντρικών μεσημβρινών είναι 500000 m. Η αρχή των τεταγμένων είναι η τομή του κεντρικού μεσημβρινού με τον ισημερινό. Το σύστημα χρησιμοποιεί το διεθνές ελλειψοειδές του Hayford. Η προβολή είναι σύμμορφη, και σχηματικά αντιστοιχεί στην απεικόνιση του ελλειψοειδούς με την βοήθεια ενός κυλίνδρου (ελλειπτικής διατομής) που εφάπτεται στον μεσημβρινό της ζώνης. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται παγκοσμίως και έχει υιοθετηθεί κυρίως από τις στρατιωτικές υπηρεσίες των χωρών.

Πίνακας Α.4 Το προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ-87.

| Προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ-87 | |
|--------------------------------------|---|
| Όνομα προβολικού συστήματος: | Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87 |
| Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (Datum): | ΕΓΣΑ- 87 με αφετηρία το μετατεθειμένο γεώκεντρο, βάθρο Διονύσου |
| Ελλειψοειδές αναφοράς: | GRS'80 |
| Μεγάλος ημιάξονας ελλειψοειδούς a: | 6378137,000 m |
| Επιπλάτυνση ελλειψοειδούς (1/f): | 1/298.25722101 |
| Συντελεστής κλίμακας K_0 | 0,9996 |

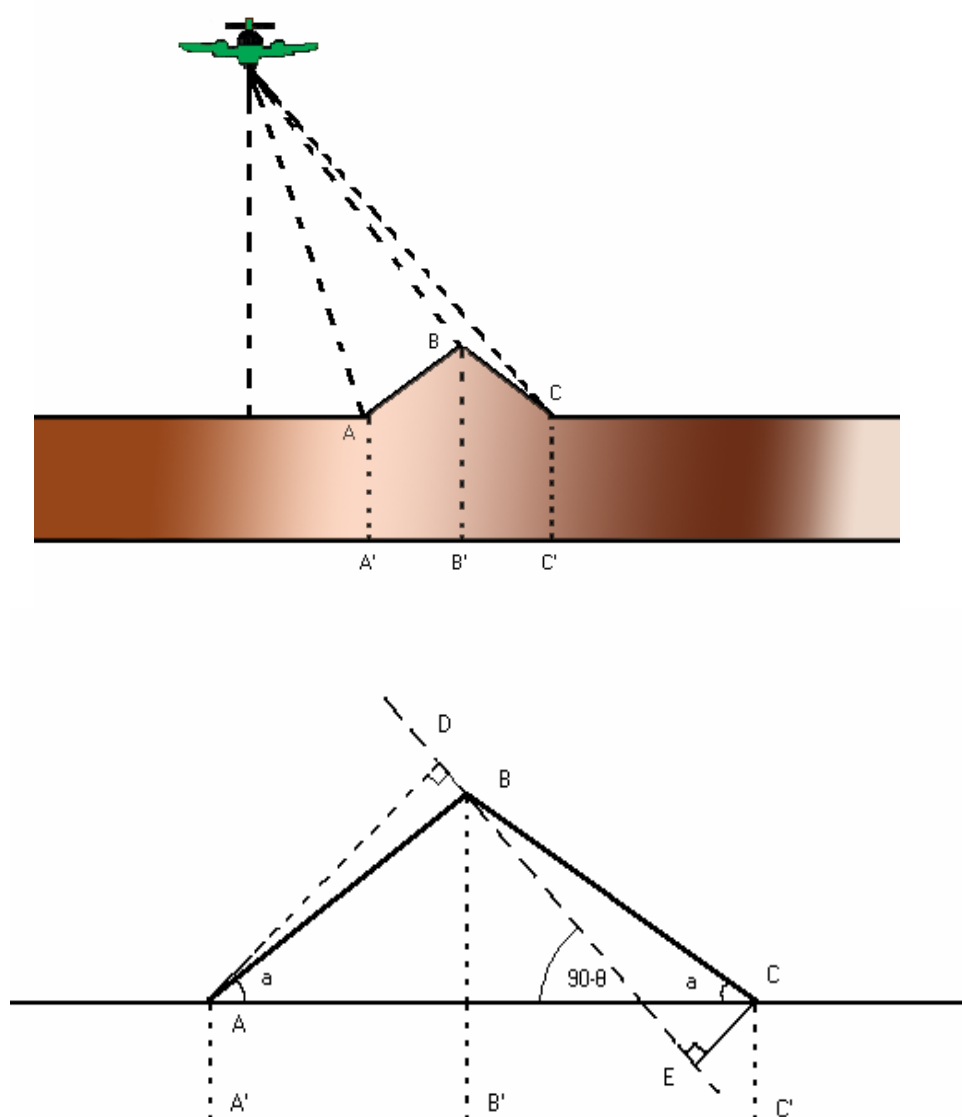
Είναι το πλέον πρόσφατο προβολικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα, και είναι προϊόν συνεργασίας του Εργαστηρίου Ανώτερης Γεωδαισίας του Τμήματος Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ., της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού και του ΟΚΧΕ. Θεωρείται μια ενιαία ζώνη για όλη την χώρα με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda_0 = 24^0$ και χρησιμοποιείται ενιαίος συντελεστής κλίμακας 0,9996.

Οι παραμορφώσεις με αυτόν τον τρόπο μπορούν να φτάσουν μέχρι και 1:1.000 στα άκρα της χώρας (δηλ. 1 m σε απόσταση 1 km.). Για να αποφευχθούν αρνητικές τιμές ο κεντρικός μεσημβρινός έχει ως τετμημένη 500000 m. Αρχή των τεταγμένων θεωρείται ο ισημερινός ($\varphi = 0^0$) Το σύστημα χρησιμοποιείται για την σύνταξη του Εθνικού Κτηματολογίου καθώς έχει υιοθετηθεί από τον ΟΚΧΕ Γενικά, τείνει να γίνει το επίσημο προβολικό σύστημα για την Ελλάδα καθώς προσφέρει ενιαία αναφορά για το σύνολο της χώρας. Έχει ήδη υιοθετηθεί από τις περισσότερες δημόσιες υπηρεσίες και οργανισμούς καθώς και ιδιωτικές εταιρείες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ SAR

Στην παράγραφο 4.6 εξετάστηκαν οι γεωμετρικές παραμορφώσεις της συμπίεσης της εγγύτερης περιοχής καθώς και των γεωμετρικών παραμορφώσεων λόγω μετατόπισης αναγλύφου. Το πρώτο είδος της παραμόρφωσης διορθώνεται με την ανομοιομόρφη μεταβολή της ταχύτητας σάρωσης της φωτεινής κηλίδας κατά μήκος της γραμμής σάρωσης.

Για τις παραμορφώσεις που οφείλονται στην μετατόπιση αναγλύφου (αναστροφή, σμίκρυνση) ας θεωρηθεί το παρακάτω Σχήμα Β.1 :



Σχήμα Β.1 Επιπτώσεις στη γεωμετρία της εικόνας Radar από το ανάγλυφο.

Από τη γεωμετρία του Σχήματος Β.1 προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\text{Γωνία BAD} = \theta - \alpha$$

$$\text{Γωνία CBE} = 90^0 - (\alpha + \theta)$$

$$AB = A'B' / \cos \alpha$$

$BD = (A'B' / \cos \alpha) \sin(\theta - \alpha)$ και η ισοδύναμη απόσταση στο έδαφος είναι :

$$B'D' = (A'B' / \cos \alpha \sin \theta) \sin(\theta - \alpha)$$

Η διαφορά $A'B' - B'D' = A'B' (1 - (\sin(\theta - \alpha) / \cos \alpha \sin \theta))$ αποτελεί το κριτήριο της σφοδρότητας των γεωμετρικών παραμορφώσεων σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης για τον μπροστινό λόφο.

Ομοίως για τον πίσω λόφο ισχύει:

$$B'C' - B'D' = B'C' (1 - (\sin(\theta + \alpha) / \cos \alpha \sin \theta))$$

Για τον μπροστινό λόφο, εάν $\alpha = \theta$ το σημείο Α θα ταυτίζεται με το Β, εάν $\alpha < \theta$ θα υπάρχει το φαινόμενο της σμίκρυνσης και τέλος εάν $\alpha > \theta$ θα παρατηρείται το φαινόμενο της αναστροφής.

Για τον πίσω λόφο, εάν $\alpha + \theta > 90^0$ τότε θα βρίσκεται υπό ολική σκίαση. Στην περίπτωση που $\alpha + \theta < 90^0$ θα παρατηρείται το φαινόμενο της επιμήκυνσης.

Για την γεωμετρική διόρθωση και την ένταξη σε μια χαρτογραφική προβολή μιας εικόνας SAR, όλα τα παραπάνω φαινόμενα θα πρέπει να αφαιρεθούν και στη συνέχεια με πίνακες μετασχηματισμού που θα προκύψουν από επίγεια σημεία ελέγχου, να γίνει η ένταξη σε χαρτογραφική προβολή.

Βέβαια σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιείται ο πολυωνυμικός μετασχηματισμός χωρίς να έχει γίνει η αφαίρεση των παραπάνω παραμορφώσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μιας εικόνας που πράγματι είναι ενταγμένη σε χαρτογραφική προβολή (κλίμακα, συντεταγμένες) αλλά με όλες τις παραμορφώσεις να παραμένουν. Έτσι στα σημεία με έντονο

ανάγλυφο τα αριθμητικά σφάλματα από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Παράγραφος 6.3.1) θα αυξάνουν, αλλά θα μειώνονται ταυτόχρονα από την εγγύτερη περιοχή στην απώτερη περιοχή.

Στην περίπτωση που είναι αναγκαίο να αφαιρεθούν οι γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω μετατόπισης αναγλύφου απαιτούνται πληροφορίες για το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Εάν είναι γνωστά τα υψόμετρα των επίγειων σημείων ελέγχου τότε η διόρθωση λόγω μετατόπισης αναγλύφου επιτυγχάνεται για κάθε σημείο από τον παρακάτω τύπο :

$$\frac{\Delta H}{Gr} Z \quad (B.1)$$

όπου Z είναι το ύψος της πλατφόρμας από το εκάστοτε ελλειψοειδές, ΔH το ύψος του επίγειου σημείου ελέγχου και Gr η απόσταση στο έδαφος από το ναδίρ στο σημείο ελέγχου. Βέβαια όλα τα υπόλοιπα σημεία των οποίων δεν είναι γνωστό το υψόμετρο θα παρουσιάζουν ακόμα τις γεωμετρικές παραμορφώσεις.

Για ολοσχερής διόρθωση απαιτείται ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων της περιοχής (DEM, Digital Elevation Model), το οποίο θεωρητικά δίνει τη δυνατότητα της γεωμετρικής διόρθωσης κάθε σημείου για το τοπικό του ανάγλυφο.

Τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων μπορούν να παραχθούν από την τεχνική της συμβολομετρίας (Παράγραφος 4.11.2).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Μετασχηματισμός RGB σε IHS

intensity = max (r, g, b)

m = min (r, g, b)

range = intensity - m

if intensity \neq 0 then saturation = range / intensity else saturation = 0

if s \neq 0 then

r1 = (intensity - r) / range

g1 = (intensity - g) / range

b1 = (intensity - b) / range

if intensity = r then if m = g then hue = 5 + b1 else hue = 1 - g1

if intensity = g then if m = b then hue = 1 + r1 else hue = 3 - b1

if m = r then hue = 3 + g1 else hue = 5 - r1

hue = hue * 60

else

hue = undefined

endif s \neq 0

end