



Τ.Ε.Ι. ΑΘΗΝΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ
ΚΑΙ
ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ**



ΜΑΥΡΑΓΑΝΗ ΚΑΤΕΡΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΠΕΤΣΑ ΕΛΛΗ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΪΟΣ 2008

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την καθηγήτρια Έλλη Πέτσα για την κατανόηση που μου έδειξε και την υποστήριξή της για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Αδριανό Ρετάλη για την πολύτιμη βοήθειά του στην ανεύρεση πληροφοριών για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Πρόλογος

Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας μου άνοιξε ένα καινούργιο παράθυρο γνώσεων όσον αφορά τις δορυφορικές εικόνες και την φωτογραμμετρική τους επεξεργασία.

Τα τελευταία χρόνια έχουν σχεδιασθεί και τεθεί σε τροχιά δορυφόροι με αισθητήρες που προσφέρουν ανάλυση καλύτερη του 1 m και δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε αφετηρία για την προτίμηση, σε αρκετές περιπτώσεις, των δορυφορικών εικόνων έναντι των ψηφιακών αεροφωτογραφιών για την εξαγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων υψηλής ποιότητας.

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων απαιτεί, εκτός των τεχνικών χαρακτηριστικών τους, και γνώση για την γεωμετρία λήψης των εικόνων που συλλέγει ο δορυφόρος. Γι' αυτό αναλύονται στην συνέχεια και τα γεωμετρικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη γεωμετρική επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων.

Σκοπός και Διάρθρωση της Εργασίας

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατά το δυνατόν αναλυτικότερη παρουσίαση εμπορικών δορυφόρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Αυτό αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους όσο και τα σχετικά γεωμετρικά μοντέλα επεξεργασίας αλλά και τις υπάρχουσες εφαρμογές.

Έτσι, στη συνέχεια περιγράφονται και αναλύονται:

- ◆ Τα χαρακτηριστικά επτά εμπορικών δορυφόρων και οι εφαρμογές των προϊόντων τους (Κεφάλαιο 2^ο).
- ◆ Τα γεωμετρικά μοντέλα των δορυφορικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων (Κεφάλαιο 3^ο).
- ◆ Εφαρμογές των γεωμετρικών μοντέλων και αποτελέσματα από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων IKONOS και Quick-Bird (Κεφάλαιο 4^ο).
- ◆ Τέλος, το 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά.....	6
1.2 Δορυφορικοί Αισθητήρες.....	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

2.1 SPOT-5.....	9
2.2 EROS - A και EROS - B	14
2.2.1 EROS - A	14
2.2.2 EROS - B	14
2.3 KOMPSAT - 1 & 2.....	17
2.3.1 KOMPSAT-1.....	17
2.3.2 KOMPSAT-2.....	19
2.4 FORMOSAT-2.....	22
2.5 ORBVVIEW-3	24
2.6 IKONOS	27
2.7 Quick-Bird	32
2.8 Δορυφορικές Εικόνες και Αεροφωτογραφίες.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

3.1 Ακριβές Γεωμετρικό Μοντέλο.....	37
3.2 Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο	39
3.2.1 Πολυώνυμα Προσαρμογής	39
3.2.2 Πίνακας Αναφοράς Διορθώσεων	40
3.2.3 Κλάσματα Πολυωνυμικής Μορφής	40
3.2.4 Βελτίωση Γεωμετρικής Ακρίβειας Πολυωνυμικών Κλασμάτων	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 Εφαρμογές Μοντέλων Συνόρθωσης σε Δορυφορικές Εικόνες IKONOS και Quick-Bird.....	47
4.2 Γεωμετρική Επεξεργασία Εικόνων του IKONOS.....	51
4.2.1 Επεξεργασία Εικόνων Επιπέδου ‘Geo’	51
4.2.2 Επεξεργασία Εικόνων ‘Reference’, ‘Precision’ και ‘Pro’	54

4.3 Επεξεργασία δορυφορικών εικόνων Quick-Bird.....	56
4.4 Γεωμετρική Ακρίβεια Ορθοφωτογραφιών από Δορυφορικές Εικόνες IKONOS και Quick-Bird.....	59
4.5 Εξαγωγή Κτιρίων από Στερεοσκοπικές Εικόνες του IKONOS.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
Βιβλιογραφία	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ο πρώτος δορυφόρος που εκτοξεύθηκε στο διάστημα ήταν ο σοβιετικός Sputnik 1 που τέθηκε σε τροχιά στις 4 Οκτωβρίου του 1957. Μετά από διάστημα 18 ημερών η λειτουργία του τερματίστηκε λόγω εκφόρτισης της μπαταρίας του. Από τότε μέχρι σήμερα έχει εκτοξευτεί με επιτυχία ένας αρκετά μεγάλος αριθμός δορυφόρων. Έτσι, στα χρόνια που ακολούθησαν, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι δορυφόροι άρχισαν να συμμετέχουν στην παρατήρηση της γήινης επιφάνειας μέσω των δορυφορικών εικόνων.

Τα τελευταία χρόνια, ύστερα από μια σημαντική προσπάθεια για να σχεδιαστούν και να τεθούν σε τροχιά δορυφορικοί αισθητήρες για χαρτογραφικούς σκοπούς ακόμη και μεγάλης κλίμακας και με χαμηλό κόστος, διατίθενται πλέον δορυφορικά δεδομένα ανάλυσης καλύτερης του 1 m. Η ανάλυση αυτή αποτελούσε, κατά κάποιον τρόπο, ένα ψυχολογικό όριο για να προτιμώνται, γενικά, οι αεροφωτογραφίες έναντι των δορυφορικών εικόνων για χαρτογραφικές εργασίες μέσης κλίμακας. Σήμερα όμως, σημαντικό μέρος χαρτογραφικών εργασιών που παραδοσιακά ολοκληρωνόταν με αεροφωτογραφήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με χρήση δορυφορικών εικόνων. Επομένως, η φωτογραμμετρική επεξεργασία δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης για την παραγωγή τυπικών φωτογραμμετρικών προϊόντων – όπως: ψηφιακά μοντέλα εδάφους, ορθοφωτογραφίες και φωτογραμμετρικές αποδόσεις από στερεοσκοπική παρατήρηση – αποτελεί μια πραγματικότητα στον τομέα των γεωεπιστημών.

Η επεξεργασία, όμως, των δορυφορικών εικόνων απαιτεί τη γεωμετρική τους διόρθωση. Η διόρθωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο συνδέει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός σημείου στο έδαφος με τις αντίστοιχες συντεταγμένες στο επίπεδο της εικόνας. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται “μοντέλο του αισθητήρα” (sensor model). Υπάρχουν δύο βασικά είδη μοντέλων, τα φυσικά ή αλλιώς ακριβή γεωμετρικά μοντέλα (physical ή rigorous sensor models) και τα γενικευμένα μοντέλα (generalized sensor models). Τα φυσικά γεωμετρικά μοντέλα είναι αρκετά ακριβή διότι προσομοιάζουν επακριβώς την λειτουργία του αισθητήρα κατά την χρονική στιγμή της λήψης. Για εμπορικούς σκοπούς όμως, η γεωμετρία λήψης των δορυφόρων δεν είναι πάντοτε διαθέσιμη. Γι’ αυτόν τον λόγο άρχισαν να χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα γενικευμένα μοντέλα, τα οποία είναι ανεξάρτητα από τον αισθητήρα και βασίζονται σε κλασματικά πολυώνυμα. Η προσέγγιση, λοιπόν, του γεωμετρικού μοντέλου με τη χρήση κλασμάτων πολυωνμικής μορφής ονομάζεται μέθοδος των “κλασματικών συναρτήσεων” (rational functions).

1.2 Δορυφορικοί Αισθητήρες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται επτά εμπορικοί δορυφόροι υψηλής ανάλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Τα δορυφορικά τους συστήματα έχουν τη δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης. Δηλαδή οι αισθητήρες τους συλλέγουν εικόνες με επικάλυψη για τη δημιουργία στερεοσκοπικών μοντέλων. Η συλλογή των επικαλυπτόμενων εικόνων μπορεί να γίνει παράλληλα ή κάθετα προς τη διεύθυνση της πτήσης. Οι αντίστοιχοι αγγλικοί όροι που χρησιμοποιούνται είναι λήψεις “along-track” (κατά μήκος της τροχιάς) και “across-track” (κάθετα στην

τροχιά). Κατά την διεύθυνση along-track ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ της λήψης των στερεοζευγών είναι βέβαια μικρότερος. Επομένως, η along-track λήψη υπερτερεί έναντι της across-track. Στην along-track διεύθυνση οι λήψεις μπορούν να γίνουν είτε ταυτόχρονα, αν η ταχύτητα του δορυφόρου και ο ρυθμός λήψης των εικόνων συμβαδίζουν, είτε ασύγχρονα, αν η ταχύτητα του δορυφόρου είναι μεγαλύτερη από το ρυθμό λήψης των εικόνων.

Αναλύονται στην συνέχεια τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων των δορυφόρων και η δυνατότητά τους να συλλέγουν εικόνες με πλάγιες λήψεις, γεγονός που βοηθάει στην αύξηση της συχνότητας επανεπίσκεψης μιας περιοχής και έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη απόκτηση των δεδομένων. Επίσης, εξετάζεται το φασματικό εύρος των δορυφορικών εικόνων, η ικανότητά τους να συλλέγουν παγχρωματικά ή πολυφασματικά δεδομένα, δηλαδή ασπρόμαυρες, έγχρωμες ή και άλλες εικόνες. Οι παγχρωματικές εικόνες έχουν καλύτερη ανάλυση από τις αντίστοιχες πολυφασματικές. Βέβαια, λόγω της ταυτόχρονης συλλογής παγχρωματικών και πολυφασματικών δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα στον επίγειο σταθμό του δορυφόρου να παραχθούν έγχρωμες εικόνες οι οποίες θα συνδυάζουν την μεγαλύτερη ακρίβεια των παγχρωματικών δεδομένων και το χρώμα (και όλη την πληροφορία που αυτό δίνει) των πολυφασματικών δεδομένων με μικρότερη ανάλυση. Ο όρος που χρησιμοποιείται για αυτή τη διαδικασία είναι “μίξη αναλύσεων” (resolution merge) και η εικόνα που δημιουργείται ονομάζεται “pan-sharpened”. Ακόμη, εξετάζεται η χωρική ανάλυση, δηλαδή το μέγεθος της κάθε εικονομηφίδας (pixel) στο έδαφος, η ραδιομετρική ανάλυση, δηλαδή ο αριθμός των διαβαθμίσεων του γκριζου ή του χρώματος σε μια εικόνα, το φασματικό εύρος των εικόνων (αν είναι ασπρόμαυρες ή έγχρωμες) και η γεωμετρική ακρίβεια των προϊόντων των δορυφόρων που αναφέρονται παρακάτω. Η γεωμετρική ακρίβεια αφορά την αξιοπιστία της εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας και ως μέτρο της χρησιμοποιείται συνήθως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προκύπτει από τα εξαγόμενα μεγέθη συγκρινόμενα με αντίστοιχα υψηλότερης ακρίβειας.

Ο τρόπος συλλογής και οι γωνίες λήψης στερεοσκοπικών δορυφορικών δεδομένων ποικίλλουν ανά αισθητήρα. Επίσης, η συχνότητα επανεπίσκεψης μιας περιοχής, η χωρική ανάλυση, η ραδιομετρική ανάλυση, η γεωμετρική ακρίβεια των εικόνων και η περιοχή απεικόνισης είναι και αυτά διαφορετικά για κάθε δορυφόρο.

Κάποια γενικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων, οι οποίοι θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, εμφανίζονται στους δύο παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 1: Γενικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων που θα παρουσιαστούν

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΙ				
	SPOT-5	EROS-A1	EROS-B1	KOMPSAT-1 (αισθητήραςEOC)	KOMPSAT-2
Ημερομηνία Εκτόξευσης	Μάιος 2002	Δεκέμβριος 2000	Απρίλιος 2006	Δεκέμβριος 1999	Ιούλιος 2006
Υψόμετρο	822 km	480-600 km	500 km	685 km	685 km

Γωνία Κλίσης		98.7°	97.4°	97.4°	98.13°	98.13°
Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	2.5 m	1.8 m	0.7 m	6.6 m	1 m
	πολυφασματικό	10 & 20 m	-	-	-	4 m
Ραδιομετρική Ανάλυση		8 bit	11 bit	10 bit	8 bit	10 bit
Ζώνη Απεικόνισης		60x60 km	13.5x13.5 km	7x7 km	17x17 km	15x15 km
Συχνότητα Επανεπίσκεψης		1 έως 4 ημέρες	2 έως 4 ημέρες	έως 1 ημέρα	ημερήσια	1 έως 3 ημέρες
Γωνία θέασης		±27°	± 45 °	± 45 °	± 45 °	± 30 °

Πίνακας 2: Γενικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων που θα παρουσιαστούν

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ			
		FORMOSAT-2	ORBVVIEW-3	IKONOS	Quic k-Bird
Ημερομηνία Εκτόξευσης		Μάιος 2004	Ιούνιος 2003	Σεπτέμβριος 1999	Οκτώβριος 2001
Υψόμετρο		891 km	470 km	681 km	450 km
Γωνία Κλίσης		98.99°	97.3°	98.1°	97.2°
Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	2 m	1 m	1 m	0.72 m
	πολυφασματικό	8 m	4 m	4 m	2.88 m
Ραδιομετρική Ανάλυση		8 bit	11 bit	11 bit	11 bit
Ζώνη απεικόνισης		24x24 km	8x8 km	11x11 km	16.5x16.5 km
Συχνότητα Επανεπίσκεψης		ημερήσια	έως 3 ημέρες	1 έως 3 ημέρες	1 έως 3.5 ημέρες
Γωνία θέασης		± 45 °	± 50 °	±26°	±25°

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

2.1 SPOT-5



Το πρόγραμμα δορυφόρων SPOT (Système Pour l' Observation de la Terre) αναπτύχθηκε από τον κρατικό οργανισμό διαστημικών ερευνών της Γαλλίας. Ο πρώτος δορυφόρος, ο SPOT-1, τέθηκε σε τροχιά το 1986. Κατόπιν εκτοξεύθηκαν επιτυχώς ακόμη τέσσερις δορυφόροι: ο SPOT-2 το 1990, ο SPOT-3 το 1993, ο SPOT-4 το 1998 και, τέλος, ο SPOT-5 τον Μάιο του 2002.

Εικόνα 1 : Ο Δορυφόρος SPOT-5

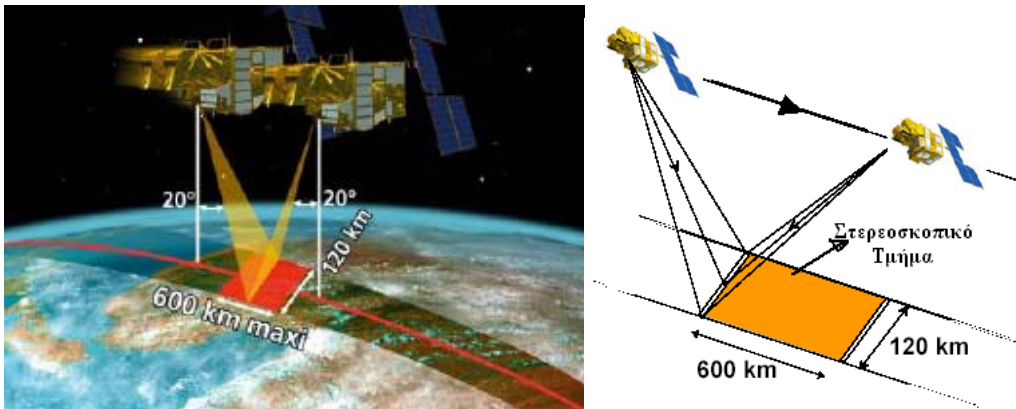
Ο SPOT-5 ανήκει στην εταιρία Spot Image, έχει γραμμικούς αισθητήρες CCD, με μετατόπιση 0.5 pixel μεταξύ τους, και είναι εξοπλισμένος με δύο όργανα υψηλής ανάλυσης, που επιδέχονται συγχρονισμό αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το όργανο υψηλής στερεοσκοπικής ανάλυσης HRS (High Resolution Stereoscopic), που παρέχει στερεοζεύγη υψηλής ακρίβειας, και το όργανο υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας HRG, που παρέχει προϊόντα υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας. Ακόμη, οι παγχρωματικές εικόνες που συλλέγουν τα όργανα του δορυφόρου έχουν χωρική ανάλυση 2.5 m και προκύπτουν από το συνδυασμό δυο εικόνων με ανάλυση 5 m. Στα πολυφασματικά κανάλια: 0.50 - 0.59 μm , 0.61 - 0.68 μm και 0.79 - 0.89 μm η χωρική ανάλυση είναι 10 m, ενώ στο 1.58 - 1.73 μm είναι 20 m. Η ραδιομετρική ανάλυση των εικόνων του είναι 8 bit και η οριζοντιογραφική ακρίβεια που προσφέρει ο SPOT-5, κατά την Spot Image, είναι στα 10 m και υψομετρικά στα 5 m.

ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΕΥΡΟΣ		ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΠΑΓΧΡΩΜΑΤΙΚΟ	0.48 - 0.71 μm	2.5 και 5 m
ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	0.50- 0.59 μm (πράσινο)	10 m
	0.61- 0.68 μm (κόκκινο)	10 m
	0.79 - 0.89 μm (εγγύς υπέρυθρο)	10 m
	1.58 - 1.73 μm (μέσο υπέρυθρο)	20 m

Πίνακας 3 : Χωρική και Φασματική Ανάλυση SPOT-5.

Ικανότητα πλάγιας παρατήρησης

Ο δορυφόρος κινείται σε υψόμετρο 822 km από τον ισημερινό, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, με γωνία κλίσης 98.7° . Έχει την ικανότητα πλάγιας παρατήρησης, δηλαδή, οι αισθητήρες του έχουν τη δυνατότητα να στρέφονται κατά $\pm 27^\circ$ από το ναδίρ (off-nadir) και να συλλέγουν εικόνες. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία θέασης. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρέχει παγκόσμια κάλυψη μεταξύ 87° βόρειου γεωγραφικού πλάτους και 87° νότιου γεωγραφικού πλάτους. Αυτό του επιτρέπει την απεικόνιση οποιασδήποτε περιοχής εντός μιας ζώνης 900 km. Η πλάγια παρακολούθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αύξηση της συχνότητας παρακολούθησης ενός σημείου κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου κύκλου. Το χρονικό διάστημα επανέπισκεψης μιας περιοχής ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Συνήθως κυμαίνεται από 1 έως 4 ημέρες. Στον ισημερινό, για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί να απεικονισθεί 7 φορές κατά τη διάρκεια του ίδιου τροχιακού κύκλου, ο οποίος διαρκεί 26 ημέρες. Ενώ στο γεωγραφικό πλάτος των 45° μια περιοχή μπορεί να απεικονισθεί 11 φορές κατά τη διάρκεια του τροχιακού κύκλου. Γενικά, οποιοδήποτε σημείο στο 95% της γης μπορεί να απεικονισθεί κάθε μέρα από έναν από τους δορυφόρους του SPOT.



Εικόνα 2: Πλάγια Στερεοσκοπική Παρατήρηση του SPOT-5

Δυνατότητα λήψης στερεοζευγών

Το υψηλής στερεοσκοπικής ανάλυσης όργανο HRS (High Resolution Stereoscopic) που διαθέτει ο SPOT-5 έχει την ικανότητα να αποκτά δυο εικόνες σχεδόν ταυτόχρονα. Οι λήψεις γίνονται μια πριν και μια μετά από το πέρασμα του δορυφόρου, με αποτέλεσμα την σχεδόν στιγμιαία απόκτηση στερεοζευγών κατά την διεύθυνση along-track. Το τηλεσκόπιο με κατεύθυνση προς τα εμπρός αποκτά εικόνες του εδάφους με οπτική γωνία 20° μπροστά από την κατακόρυφο. Μετά από ένα λεπτό και 30 δευτερόλεπτα το τηλεσκόπιο με κατεύθυνση προς τα πίσω κάνει λήψεις για την ίδια περιοχή υπό γωνία 20° πίσω από την κατακόρυφο, καλύπτοντας έτσι μια εκτεταμένη περιοχή στο έδαφος με εύρος 72.000 τετραγωνικών km ($600 \text{ km} \times 120 \text{ km}$) και ζώνη πλάτους 120 km. Τα προϊόντα από το όργανο HRS είναι κατάλληλα για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους με ακρίβεια μέχρι 10 m.

Οι διαφορές του οργάνου υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας HRG από το HRS είναι ότι οι λήψεις του γίνονται κατά την διεύθυνση across-track και οι εικόνες του καλύπτουν

στο έδαφος έκταση 60 km x 60 km μέχρι 80 km, ανάλογα με τη γωνία λήψης.

Πίνακας 4 : Προδιαγραφές των οργάνων HRG και HRS

Όργανο	HRS	HRG
Διεύθυνση Λήψης	along-track	across-track
Χρόνος ανάμεσα σε 2 λήψεις	90 δευτερόλεπτα	ποικίλλει
Ζώνη απεικόνισης	600 km x 120 km	60 km x 60 km-80 km
Ζώνη Πλάτους	120 km	60 km
RMS *	μικρότερο από 15 m	μικρότερο από 50 m

* Η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS), δηλαδή της απόλυτης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης, είναι χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου και για επίπεδο έδαφος.

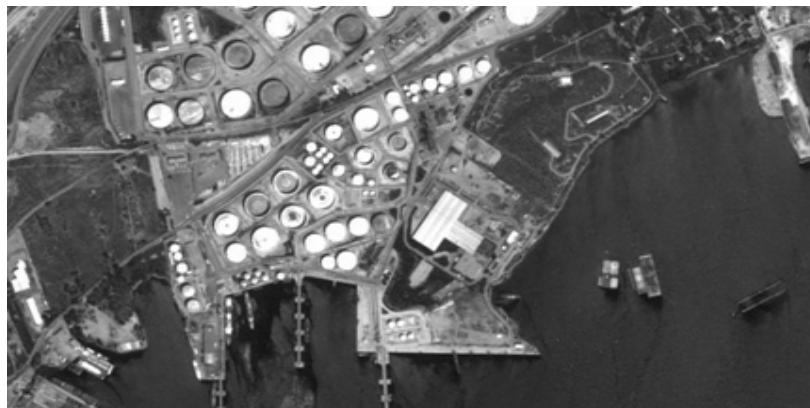
Πίνακας 5 : Χαρακτηριστικά του δορυφόρου SPOT-5

Ημερομηνία Εκτόξευσης	Μάιος 2002
Υψόμετρο	822 km
Γωνία Κλίσης	98.7°
Ταχύτητα	7.4 kps
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	1 έως 4 ημέρες
Περίοδος Τροχιάς	101.4 λεπτά
Τροχιακός κύκλος	26 μέρες
Γωνία θέασης	± 27°
Ραδιομετρική Ανάλυση	8 bit
* Ωρα διάβασης από τον Ισημερινό	10:30 π.μ.

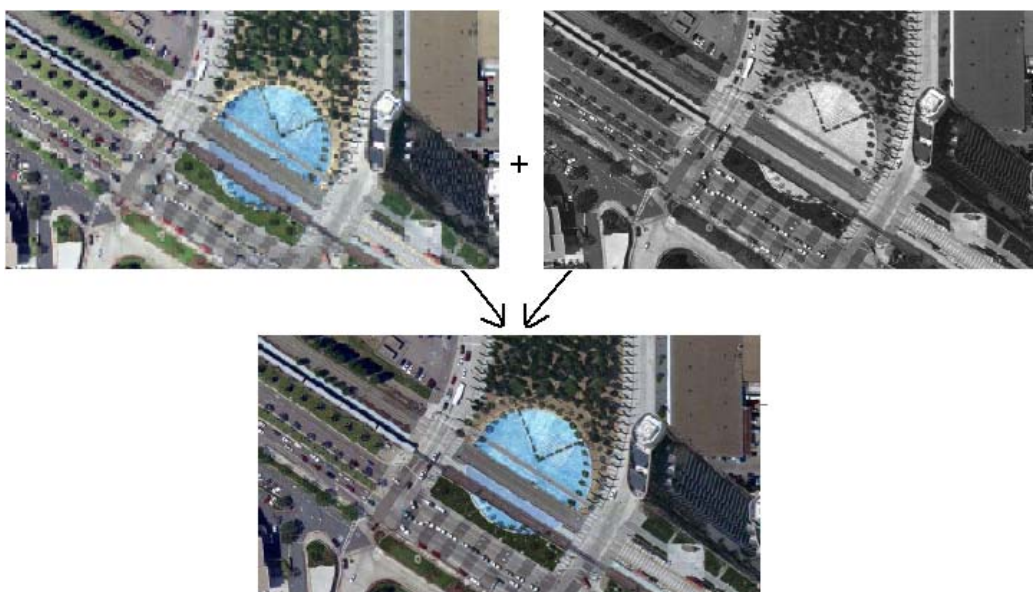
* Καθώς η τροχιά του είναι ηλιοσύγχρονη, ο δορυφόρος κάθε μέρα περνάει από ένα καθορισμένο γεωγραφικό πλάτος την ίδια τοπική ώρα. Στην περίπτωση του SPOT-5 το καθορισμένο γεωγραφικό πλάτος είναι ο Ισημερινός και η τοπική ώρα διάβασής του από αυτόν είναι στις 10:30 π.μ.

Στις δορυφορικές εικόνες υπάρχει η δυνατότητα της συγχώνευσης μιας παγχρωματικής εικόνας με την αντίστοιχη πολυφασματική, που έχει μικρότερη ανάλυση. Έχουμε έτσι την υπέρθεση των έγχρωμων καναλιών στη γεωμετρική ανάλυση του παγχρωματικού. Δηλαδή το αποτέλεσμα είναι μια καινούργια εικόνα pan-sharpened, η οποία θα συνδυάζει την μεγαλύτερη χωρική ανάλυση της παγχρωματικής με τις πληροφορίες

από την έγχρωμη πολυφασματική εικόνα. Δίνεται ένα παράδειγμα στην Εικ. 4.



Εικόνα 3 : Παγχρωματική εικόνα του SPOT-5 με χωρική ανάλυση 2.5 m.



Εικόνα 4: Δημιουργία μίας εικόνας pan-sharpened.

Αποθήκευση δεδομένων και μεταφορά στο έδαφος

Οι δορυφόροι SPOT μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα στο έδαφος ανάλογα με το αν το αεροσκάφος είναι ή όχι μέσα στην εμβέλεια του σταθμού που τα δέχεται. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις όπου ο δορυφόρος, καθώς κινείται κατά μήκος της τροχιάς του, μπορεί να μεταβιβάσει δεδομένα στο έδαφος:

- Η πρώτη περίπτωση είναι όταν ο δορυφόρος είναι μέσα στην εμβέλεια ενός σταθμού που μπορεί να δεχτεί τα δεδομένα. Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται Direct Receiving Station (DRS). Σε αυτήν την περίπτωση τα προϊόντα εικόνας μπορούν να μεταδίδονται, ταυτόχρονα, σε πραγματικό χρόνο και από τον δορυφόρο αλλά και από το DRS, που είναι κατάλληλα προγραμματισμένο.

- Η δεύτερη περίπτωση είναι όταν ο δορυφόρος δεν είναι μέσα στην εμβέλεια ενός σταθμού DRS του SPOT. Τότε τα δεδομένα της εικόνας αποθηκεύονται σε ενσωματωμένα στο δορυφόρο καταγραφικά συστήματα.
- Τέλος, όταν ο δορυφόρος είναι στην εμβέλεια ενός κεντρικού σταθμού μπορούμε να προγραμματίσουμε τον δορυφόρο είτε να “κατεβάσει” τα δεδομένα εικόνας σε πραγματικό χρόνο ή να αναπαραγάγει και να μεταδώσει τα δεδομένα που έχει ήδη καταγράψει νωρίτερα, μέσω των ενσωματωμένων καταγραφικών συστημάτων του.



Εικόνα 5: Εικόνα pan-sharpened του SPOT-5 με ανάλυση 2.5 m.

Εφαρμογές

Οι δορυφορικές εικόνες του SPOT-5 είναι κατάλληλες για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών και άρα την διόρθωση των εκτροπών λόγω αναγλύφου που έχουν οι εικόνες. Επίσης είναι χρήσιμες για την παραγωγή διάφορων προϊόντων, όπως χάρτες κλίσεως, χάρτες ορατότητας, χάρτες ορισμού ορίων και άλλα είδη χαρτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως γεωμορφολογία, μελέτες διάβρωσης, υδρολογική αξιολόγηση του εδάφους, μελέτες για τεχνικά έργα, περιβαλλοντικές μελέτες, προσομοιώσεις πτήσεων αλλά και ως υπόβαθρο για εργασίες GIS. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εφαρμογές που αφορούν την άμυνα, όπως στην ασφάλεια των πτήσεων, σε προσομοιώσεις πτήσεων, στον προγραμματισμό δοκιμαστικών πτήσεων και στην ακρίβεια στόχευσης. Γενικά, η ταυτόχρονη απόκτηση στερεοζευγών υψηλής ακρίβειας, ακόμη και την ίδια ημέρα, είναι μεγάλο πλεονέκτημα για την ποιότητα και την ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, αφού η αυτοματοποιημένη διαδικασία συνταύτισης (matching) γίνεται ευκολότερη από το γεγονός ότι οι ραδιομετρικές παράμετροι των εικόνων είναι πρακτικά ταυτόσημες. Επιπλέον, η στερεοσκοπική δυνατότητα του SPOT-5 επιτρέπει την σύνθεση τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50.000.

2.2 EROS - A και B



Εικόνα 6 : Ο Δορυφόρος EROS

Οι δορυφόροι EROS (Earth Resources Observation Satellite) ανήκουν στην εταιρία ImageSat. Είναι δορυφόροι υψηλής ανάλυσης, με υψηλή συχνότητα επανεπίσκεψης. Τα δεδομένα που παρέχουν είναι μόνο στο παγχρωματικό. Έχουν γραμμικούς αισθητήρες CCD, οι οποίοι διαθέτουν μεγάλη ευκινησία στην απόκτηση εικόνων σε κάποιες ιδιαίτερες περιοχές.

2.2.1 EROS-A

Ο EROS-A εκτοξεύθηκε τον Δεκέμβριο του 2000. Περιφέρεται γύρω από τη γη σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 480 έως 600 km, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, με γωνία κλίσης 97.4° . Οι παγχρωματικές εικόνες που συλλέγει έχουν χωρική ανάλυση 1.8 m και ραδιομετρική ανάλυση 11 bit. Η έκταση που καλύπτει στο έδαφος μια εικόνα του EROS-A έχει μέγεθος 13.5 km x 13.5 km και ζώνη πλάτους 13.5 km.

2.2.2 EROS-B

Ο EROS-B εκτοξεύθηκε τον Απρίλιο του 2006. Το όχημα εκτόξευσής του ήταν βασισμένο σε ένα μετατροπέα ICBM, όπου έφερε τον δορυφόρο σε ηλιοσύγχρονη τροχιά σε υψόμετρο 500 km. Μια πλήρη περιφορά του γύρω από τη Γη διαρκεί 94.7 λεπτά. Η ζώνη απεικόνισης που καλύπτει είναι 7 km x 7 km, που είναι μικρότερη από τον EROS-A, όμως έχει μεγαλύτερη χωρική ανάλυση που φτάνει τα 0.7 m στο ναδίρ και κάθε κάθε εικονοσηφίδα του διαβαθμίζεται σε ανάλυση 10 bit.

Ημερήσια Συχνότητα Επανεπίσκεψης

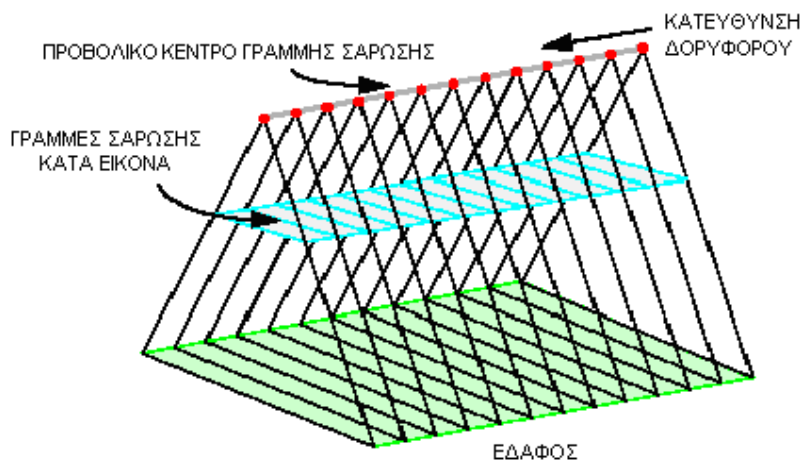
Η συχνότητα επανεπίσκεψης συνήθως κυμαίνεται στις δυο με τέσσερις ημέρες. Μπορεί να μειωθεί, όμως, στη μία ημέρα με τον συνδυασμό των δυο δορυφόρων.

Λήψεις Along-track και Across-track

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των εικόνων έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν στερεοζεύγη και στην διεύθυνση along-track και στην across-track, με γωνία θέασης που φτάνει τις $\pm 45^\circ$ (off-nadir).

Αισθητήρες Τύπου “Pushbroom”

Η γεωμετρία των συστημάτων των EROS - A και B βασίζεται στη δημιουργία της εικόνας κατά την τροχιά του αισθητήρα. Έτσι κατά την κίνηση του δορυφόρου δημιουργούνται, για την περίπτωση των γραμμικών αισθητήρων, προβολικά κέντρα τόσα όσα και οι γραμμές μιας εικόνας. Οι αισθητήρες που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται Pushbroom. Συνήθως, οι περισσότεροι δορυφόροι έχουν αισθητήρες τέτοιου τύπου.



Εικόνα 7: Αισθητήρας τύπου Pushbroom

Γενικά, οι δορυφόροι EROS σχεδιάστηκαν για την απεικόνιση της Γης σε διάφορες ταχύτητες σάρωσης. Αυτό τους δίνει αρκετή ευελιξία στην προσαρμογή των μεταβλητών ή εποχιακών συνθηκών φωτισμού και στη χρήση των πολλαπλών επιλογών σάρωσης και επίγειας δειγματοληψίας με σκοπό την βελτίωση των προϊόντων τους.

Πίνακας 6 : Χαρακτηριστικά των δορυφόρων EROS-A και EROS-B

Δορυφόρος	EROS-A	EROS-B
Ημερομηνία Εκτόξευσης	Δεκέμβριος 2000	Απρίλιος 2006
Υψόμετρο	480 km	600 km
Γωνία Κλίσης	97.4°	97.4°
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	2 έως 4 ημέρες	έως 1 ημέρα
Χωρική Ανάλυση	1.8 m	0.7 m
Ραδιομετρική Ανάλυση	11 bit	10 bit
Γωνία θέασης	± 45°	± 45°
Ζώνη Πλάτους	13.5 km	7 km
Ζώνη απεικόνισης	13.5 km x 13.5 km	7 km x 7 km
Τύπος αισθητήρα	CCD	CCD



Εικόνα 8: Παγχρωματική εικόνα του EROS-A με χωρική ανάλυση 1.8 m.



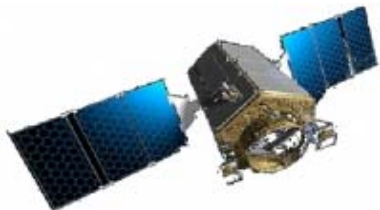
Εικόνα 9: Παγχρωματική εικόνα του EROS-B με χωρική ανάλυση 0.7 m.

Εφαρμογές

Τα προϊόντα των δορυφόρων EROS μπορούν να έχουν ποικίλες εφαρμογές στην εθνική ασφάλεια ενός κράτους και τη στρατιωτική του άμυνα με τη συλλογή πληροφοριών, και ακόμα στη χαρτογράφηση διάφορων περιοχών, στον αστικό σχεδιασμό και τον προγραμματισμό υποδομής του μέσα από πληροφορίες για τα οδικά δίκτυα, τα δίκτυα ηλεκτρισμού και ύδατος ή τις εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών. Επίσης, τα δεδομένα του δορυφόρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η χαρτογράφηση ακτών και ο έλεγχος διάβρωσης τους, η διαχείριση των φυσικών πόρων μέσα από την παρακολούθηση των αλλαγών τους, η ωκεανογραφία, η γε-

ωλογία ή και η παρακολούθηση καταστροφών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

2.3 KOMPSAT – 1 και 2



Εικόνα 10: Ο Δορυφόρος KOMPSAT

Έχουν εκτοξευθεί δυο δορυφόροι KOMPSAT (Korean Multipurpose Satellite): ο KOMPSAT-1, τον Δεκέμβριο του 1999 και ο KOMPSAT-2 τον Ιούλιο του 2006. Οι δορυφόροι αυτοί συνέβαλαν στην ανάπτυξη της Κορέας, που συνειδητοποιώντας τη σημασία της υψηλής τεχνολογίας, και ιδιαίτερα της τεχνολογίας του διαστήματος, ίδρυσε το 1995 έναν εθνικό οργανισμό διαστημικής ανάπτυξης.

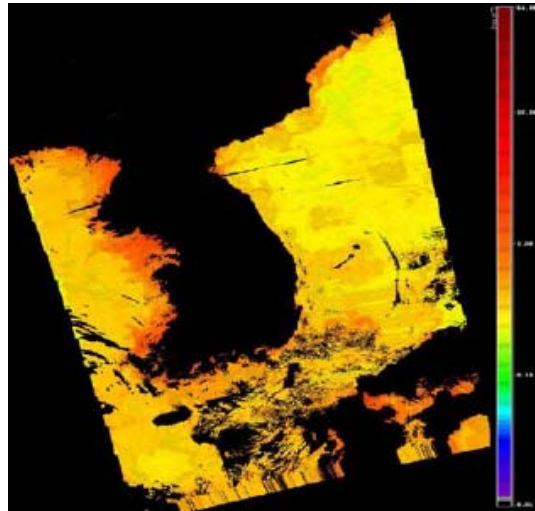
2.3.1 KOMPSAT-1

Ο KOMPSAT-1 εκτοξεύθηκε στις 20 Δεκεμβρίου του 1999 από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg των Η.Π.Α. Ο δορυφόρος αυτός είναι προϊόν ενός κοινού σχεδίου ανάπτυξης μεταξύ του Κορεάτικου Αεροδιαστημικού Ινστιτούτου Ερευνών (KARI) και της TRW Inc. Ο φυσικός αισθητήρας του δορυφόρου SPS (Space Physics Sensor) αποτελείται από δύο όργανα, έναν ανιχνευτή σωματιδίων υψηλής ενέργειας και έναν αισθητήρα ιονοσφαιρικής μέτρησης, τους OSMI (Ocean Scanning Multispectral Imager) και EOC (Electro Optical Camera), αντίστοιχα. Ο αντικειμενικός σκοπός του OSMI είναι να παρέχει μετρήσεις για τη βιολογική ωκεανογραφία. Συλλέγει δεδομένα σε έξι φασματικές ζώνες με χωρική ανάλυση 1 km και ζώνη πλάτους 800 km. Τα δεδομένα του παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατανομή και τη διακύμανση της οργανικής ύλης και του φυτοπλαγκτού.

Πίνακας 7 : Χαρακτηριστικά του αισθητήρα OSMI του KOMPSAT-1.

Χωρική Ανάλυση	1 km
Φασματική Ανάλυση	(0.4-0.9 μm)
Ραδιομετρική Ανάλυση	11 bit
Ζώνη Πλάτους	800 km
Τροχιακός Κύκλος	Ημερήσιος

Ένα δείγμα από τις εικόνες που συλλέγει ο OSMI δίνεται παρακάτω (Εικόνα 11) και δείχνει την κατανομή του φυτοπλαγκτού γύρω από τη Κορέα.



Εικόνα 11: Κατανομή του φυτοπλαγκτού από εικόνα του αισθητήρα OSMI.

Από την άλλη μεριά, ο αισθητήρας EOC παρέχει με την κάμερά του παγχρωματικές εικόνες με καλύτερη χωρική ανάλυση 6.6 m, ραδιομετρική ανάλυση 8 bit, ενώ έχει ζώνη πλάτους 17 km. Χρησιμοποιεί σαρωτές pushbroom για τη λήψη των στεροζευγών και έχει την ικανότητα σάρωσης cross-track, με γωνία θέασης μέχρι $\pm 45^\circ$.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα EOC του KOMPSAT-1

Χωρική Ανάλυση	6.6 m
Φασματική Ανάλυση	0.51 – 0.73 μm
Ραδιομετρική Ανάλυση	8 bit
Ζώνη Πλάτους	17 km
Περιοχή Απεικόνισης	17 km x 17 km
Τροχιακός Κύκλος	28 ημέρες
Γωνία Θέασης	$\pm 45^\circ$

Το διαστημικό ινστιτούτο ερευνών της Κορέας συνεργάζεται με ευρωπαϊκά κέντρα ερευνών, όπως της Αυστρίας. Μέσα από αυτή τη συνεργασία προέκυψαν εικόνες από διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις και χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες εφαρμογές. Ένα δείγμα από τις εικόνες που συλλέγει ο αισθητήρας EOC του KOMPSAT-1 παρουσιάζεται παρακάτω. Η περιοχή που απεικονίζεται είναι από την πόλη της Βιέννης στην Αυστρία. Είναι εμφανές ότι η χωρική ανάλυση επιτρέπει την αναγνώριση των οικοδομικών τετραγώνων και των κυριότερων δρόμων.

Εφαρμογές

Τα προϊόντα του KOMPSAT-1 έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές εφαρμο-

γές, όπως είναι η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μέσω των στερεοσκοπικών εικόνων, η χαρτογραφική κάλυψη αστικών περιοχών, ο εντοπισμός μεταβολών και η ανάλυση υφής (texture analysis).



Εικόνα 12: Παγχρωματική εικόνα του αισθητήρα EOC του KOMPSAT-1 με χωρική ανάλυση 6.6 m από περιοχή του κέντρου της Βιέννης.

Επίσης τα δεδομένα του KOMPSAT-1 είναι χρήσιμα και στην ανάλυση αντικειμένων, όπου η ταξινόμησή τους γίνεται με βάση τις πληροφορίες από την φασματική ανάλυση και την ανάλυση της υφής αλλά και από το σχήμα των αντικειμένων.

2.3.2 KOMPSAT-2



Εικόνα 13: Ο Δορυφόρος KOMPSAT-2

Στις 28 Ιουλίου του 2006 εκτοξεύθηκε από το Plesetsk Cosmodrome της Ρωσίας και ο KOMPSAT-2. Το όχημα εκτόξευσης (Rockot / Breeze-KM) ήταν βασισμένο σε ένα μετατροπέα SS- 19 ICBM, που έφερε τον δορυφόρο σε μια ηλιοσύγχρονη τροχιά σε ύψος 685 km. Ο αισθητήρας του αποτελεί προϊόν μιάς συνεργασίας ανάμεσα στο διαστημικό ινστιτούτο ερευνών της Κορέας (KARI) και την ELOP Ltd του Ισραήλ. Βέβαια, το KARI συνεργάζεται και με ευρωπαϊκά κέντρα ερευνών, όπως της Αυστρίας και της Γερμανίας.

Με προδιαγραφές παρόμοιες με τον IKONOS, ο KOMPSAT-2 παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης οι οποίες είναι κατάλληλες για την παρατήρηση της Γης. Έχει τη δυνατότητα να συλλέγει στερεοσκοπικά δεδομένα ταυτόχρονα στο παγχρωματικό και σε τέσσερις πολυφασματικές ζώνες με χωρική ανάλυση 1 m και 4 m, αντίστοιχα. Καλύπτει στο έδαφος ζώνη πλάτους 15 km και κάθε εικονοψίδα του διαθαμίζεται σε κλίμακα 10 bit. Ο τροχιακός κύκλος του δορυφόρου είναι 28 ημέρες, οι οποίες μπορούν να μειωθούν σε μια με τρεις χάρη στην ικανότητά του να συλλέγει εικόνες και με πλάγιες λήψεις υπό γωνία θέασης $\pm 30^\circ$.

Πίνακας 9 : Χαρακτηριστικά του KOMPSAT-2

Χωρική Ανάλυση	1 m (παγχρωματικό)
	4 m (πολυφασματικό)
Φασματική Ανάλυση	0.5-0.9 μm (παγχρωματικό)
	0.45-0.52 μm (Μπλε)
	0.52-0.60 μm (Πράσινο)
	0.63-0.69 μm (Κόκκινο)
	0.76-0.90 μm (Εγγύς Υπέρυθρο)
Ραδιομετρική Ανάλυση	10 bit
Ζώνη Απεικόνισης	15 km x 15 km
Τροχιακός Κύκλος	28 ημέρες
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	1 έως 3 ημέρες
Γωνία Θέασης	$\pm 30^\circ$



Εικόνες 14 και 15: Παγχρωματική εικόνα με χωρική ανάλυση 1 m και πολυφασματική εικόνα με ανάλυση 4 m.

Ο σταθμός που λαμβάνει τα δεδομένα του KOMPSAT-2 είναι εγκαταστημένος στο Ινστιτούτο Ερευνών της Κορέας KARI. Στο μέλλον όμως, το “κατέβασμά” και η συλ-

λογή των δεδομένων θα μπορεί να γίνεται και στην Ευρώπη αλλά και στις άλλες ηπείρους, χωρίς την ανάμειξη του κεντρικού σταθμού του δορυφόρου στη Κορέα. Τα προϊόντα του KOMPSAT-2 διατίθενται σε τρία επίπεδα επεξεργασίας (1^A, 2^A και Ortho). Η διανομή τους στις Ηνωμένες Πολιτείες και στη Μέση Ανατολή πραγματοποιείται από την εταιρία KAI Image Inc. Για τον υπόλοιπο κόσμο τη διανομή την έχει αναλάβει η SPOT IMAGE



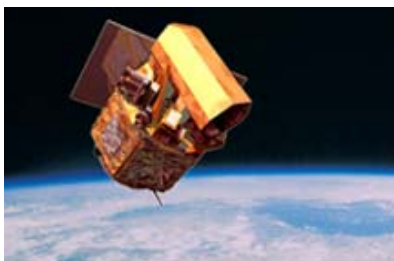
Εικόνες 16,17 και 18: Παγχρωματική εικόνα χωρικής ανάλυσης 1 m και η αντίστοιχη πολυφασματική με ανάλυση 4 m. Δεξιά, μια εικόνα pan-sharpened που συνδυάζει τη χωρική ανάλυση του 1 m στο παγχρωματικό με τα τέσσερα πολυφασματικά κανάλια.

Εφαρμογές

Ο KOMPSAT-2 προσφέρει εύκολη πρόσβαση σε μεγάλης κλίμακας δορυφορικά χαρτογραφικά προϊόντα. Η κάλυψη και η υψηλή χωρική ανάλυση των εικόνων του χρησιμεύουν στην αναγνώριση διάφορων φυσικών πόρων και στη δημιουργία χαρτών με περισσότερες λεπτομέρειες, σε κλίμακα από 1: 5.000 έως 1: 2.000. Οι παγχρωματικές εικόνες του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση επιφανειών, τον εντοπισμό και την αναγνώριση αντικειμένων με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, και τη συλλογή πληροφοριών για ευπαθείς περιοχές, ενώ τα πολυφασματικά δεδομένα μπορούν να έχουν εφαρμογή στη χαρτογράφηση υδάτινων πόρων και δασικών εκτάσεων.

Γενικά, οι προδιαγραφές του KOMPSAT-2 επιτρέπουν ποικίλες εφαρμογές. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τοπογραφικών χαρτών, για περιβαλλοντικούς σκοπούς, με τη παρακολούθηση και τον διαχωρισμό γεωργικών και δασικών εκτάσεων. Για παράδειγμα, τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους υψηλής ανάλυσης που δημιουργούνται από τις στερεοσκοπικές εικόνες μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και των γεωργικών εκτάσεων. Άλλες χρήσεις των δεδομένων του υψηλής ανάλυσης είναι ο πολεοδομικός σχεδιασμός, με τη χρήση της τρισδιάστατης απεικόνισης και ο έλεγχος της ανεξέλεγκτης εξάπλωσης των αστικών πόλεων ή και στρατιωτικοί σκοποί, με την συλλογή πληροφοριών για στρατηγικές επιχειρήσεις και την αναγνώριση αντικειμένων. Τέλος, μια ακόμη σημαντική εφαρμογή είναι η παρακολούθηση μεγάλων καταστροφών μέσω των δορυφορικών εικόνων του.

2.4 FORMOSAT-2



Εικόνα 20 : Ο Δορυφόρος FORMOSAT-2

Ο FORMOSAT-2 είναι ο πρώτος δορυφόρος υψηλής ανάλυσης με ημερήσια συχνότητα επανεπίσκεψης. Υπεύθυνος γι' αυτόν είναι ο Εθνικός Διαστημικός Οργανισμός NSPO (National Space Organization) της Ταϊβάν. Εκτοξεύθηκε τον Μάιο του 2004 και κινείται σε υψόμετρο 891 km, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, με γωνία κλίσης 98.99°. Για μια πλήρη περιφορά του περί τη Γη απαιτούνται 98 λεπτά. Έχει τη δυνατότητα να συλλέγει ταυτόχρονα δεδομένα στο παγχρωματικό με χωρική ανάλυση 2 m και σε τέσσερα πολυφασματικά κανάλια με ανάλυση 8 m. Οι εικονοψηφίδες του διαβαθμίζονται σε 10 bit, ενώ το φασματικό του εύρος φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 10 : Φασματικό εύρος FORMOSAT-2

ΠΑΓΧΡΩΜΑΤΙΚΟ	0.45- 0.9 μm
ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	0.45- 0.52 μm (μπλε)
	0.52- 0.60 μm (πράσινο)
	0.63- 0.69 μm (κόκκινο)
	0.76- 0.90 μm (εγγύς υπέρυθρο)

Στερεοσκοπικές Λήψεις Along-track και Across-track

Ο FORMOSAT-2 έχει τη δυνατότητα στερεοσκοπικών λήψεων κατά την διεύθυνση along-track και την across-track, με γωνία θέασης μέχρι και $\pm 45^\circ$ από το ναδίρ, ενώ οι εικόνες που συλλέγει καλύπτουν στο έδαφος έκταση 24 km x 24 km.

Πίνακας 11: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του FORMOSAT-2

Δορυφόρος	FORMOSAT-2
Ημερομηνία Εκτόξευσης	Μάιος 2004
Υψόμετρο	891 km
Γωνία Κλίσης	98.99°
Περίοδος Τροχιάς	103 λεπτά

* Ώρα διάβασης από τον Ισημερινό		9:30 π.μ
Συχνότητα Επανεπίσκεψης		ημερήσια
Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	8 m
	πολυφασματικό	2 m
Ραδιομετρική Ανάλυση		8 bit
Γωνία θέασης		$\pm 45^\circ$
Ζώνη Πλάτους		24 km
Ζώνη απεικόνισης		24 x 24 km

* Ο FORMOSAT-2 περνάει από τον Ισημερινό μία ώρα νωρίτερα από τους άλλους δορυφόρους. Το γεγονός αυτό συμβάλλει στην απόκτηση περισσότερων εικόνων στις περιοχές αυτές.

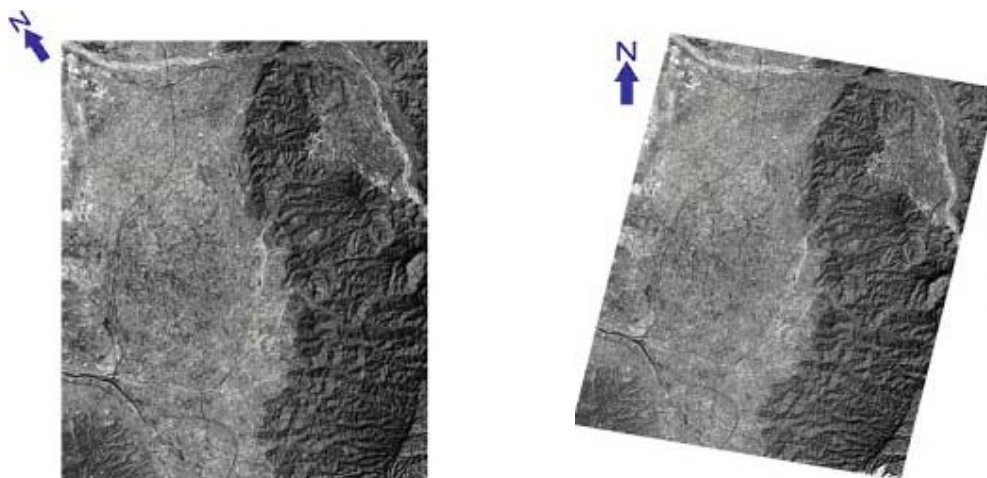


Εικόνα 21: Πολυφασματική εικόνα με χωρική ανάλυση 8 m.

Τα προϊόντα του FORMOSAT-2 έχουν 3 επίπεδα επεξεργασίας (1^A , 2^A , Ortho). Στο πρώτο επίπεδο τα προϊόντα έχουν υποστεί ραδιομετρική βαθμονόμηση. Στο δεύτερο επίπεδο έχουν υποστεί και γεωμετρική αναγωγή. Ακόμη, τα προϊόντα έχουν γεωαναφορά και είναι προσανατολισμένα σε σχέση με την διεύθυνση του Βορρά. Την διανομή τους έχει αναλάβει η SPOT IMAGE. Ένα δείγμα τους παρουσιάζεται παρακάτω στις Εικόνες 22 και 23.

Εφαρμογές

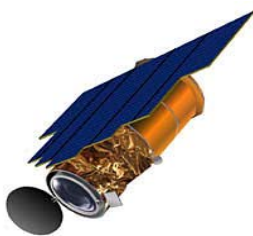
Σκοπός του FORMOSAT-2 είναι να συλλέγει τηλεσκοπικές εικόνες, κυρίως από την Ταϊβάν αλλά και για ολόκληρη τη Γη από χερσαίες και ωκεάνιες περιοχές.



Εικόνες 22 και 23 : Προϊόντα του FORMOSAT-2 με επίπεδα επεξεργασίας 1^Α και 2^Α.

Οι εικόνες του δορυφόρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η αναγνώριση στρατιωτικών, ναυτικών και αεροπορικών βάσεων, για την προστασία του περιβάλλοντος, την πρόληψη καταστροφών και την αναζήτηση φυσικών πόρων. Σε αντίθεση με τους άλλους δορυφόρους υψηλής ανάλυσης, ο FORMOSAT-2 διατηρεί τις ίδιες οπτικές παραμέτρους όλη την ώρα, έτσι ο αριθμός των εικόνων που θα αποκτηθούν είναι γνωστός και η ποιότητα των εικόνων είναι ιδανική για την λεπτομερή παρατήρηση αλλαγών. Επομένως, τα προϊόντα του είναι ιδανικά για την ενημέρωση χωρικών βάσεων δεδομένων, για παρακολούθηση των αλλαγών στις χρήσεις γης και την επίδραση των πλημμυρών. Ακόμη, οι πολυφασματικές εικόνες του μπορούν να παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τη χαρτογράφηση των υδάτινων πόρων, για το διαχωρισμό ανάμεσα στις ξερές εκτάσεις και τη βλάστηση, γιά τη χαρτογράφηση των δασών και την αναγνώριση των καλλιεργειών.

2.5 ORBVIEW-3



Εικόνα 24: Ο Δορυφόρος OrbView-3

Έως σήμερα έχουν εκτοξευθεί από την εταιρία OrbImage τρεις δορυφόροι OrbView. Το 1995 εκτοξεύθηκε ο OrbView-1, το 1997 ο OrbView-2 και τον Ιούνιο του 2003 ο OrbView-3 από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg των Η.Π.Α. Είναι ένας δορυφόρος με αισθητήρα υψηλής ανάλυσης, όπως ο IKONOS και ο Quick-Bird, μόνο που τα προϊόντα του έχουν χαμηλότερο κόστος, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι υ-

στερεί σε ακρίβεια. Οι γραμμικοί αισθητήρες του είναι τύπου CCD με μετατόπιση 0.5 pixel μεταξύ τους. Οι στερεοσκοπικές εικόνες που συλλέγει έχουν χωρική ανάλυση 1 m στο παγχρωματικό και 4 m στο πολυφασματικό. Βρίσκεται σε υψόμετρο 470 km, με γωνία κλίσης 97.3° και κινείται με ταχύτητα 7 km/sec. Η συχνότητα επανεπίσκεψής του είναι έως 3 ημέρες αλλά μπορεί να φτάσει τις 1.5 και 0.9 ημέρες για περιοχές με γεωγραφικό πλάτος 30° και 60°, αντίστοιχα. Ακόμη έχει δυνατότητα λήψης στερεοζευγών κατά την διεύθυνση along-track.

Ζώνη Απεικόνισης & Ακρίβεια

Η περιοχή που καλύπτει στο έδαφος μια εικόνα του ORBVIEW-3 έχει έκταση 8 x 8 χιλιόμετρα και ζώνη πλάτους 8 χιλιόμετρα στο ναδίρ που φτάνει τα 9.5 χιλιόμετρα με γωνία 25 μοίρες από το ναδίρ. Η ακρίβεια που έχει, κατά την OrbImage, είναι 2 μέτρα οριζοντιογραφικά και 3 μέτρα υψομετρικά, με τη χρήση φωτοσταθερών και 13 μέτρα οριζοντιογραφικά και 8 μέτρα υψομετρικά, χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών.

Πίνακας 12 : Παρουσίαση του ORBVIEW-3

Δορυφόρος		ORBVIEW-3
Ημερομηνία Εκτόξευσης		Ιούνιος 2003
Υψόμετρο		470 km
Γωνία Κλίσης		97.24°
Συχνότητα Επανεπίσκεψης		έως 3 ημέρες
Ταχύτητα		7 km/sec
Ωρα διάβασης από τον Ισημερινό		10:30 π.μ
Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	1 m
	πολυφασματικό	4 m
Ραδιομετρική Ανάλυση		11 bit
Γωνία θέασης		± 50 °
Ζώνη Πλάτους		8 km (nadir)
		9.5 km (25° off – nadir)
Ζώνη Απεικόνισης		8 x 8 km

Ραδιομετρική & Φασματική Ανάλυση

Οι εικονοψηφίδες του διαβαθμίζονται σε ραδιομετρική κλίμακας 11 bit. Το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13 : Φασματική Ανάλυση ORBVIEW-3

ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΕΥΡΟΣ	ΠΑΓΧΡΩΜΑΤΙΚΟ	0.45-0.90 μm
	ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	0.45-0.52 μm (μπλε)
		0.52-0.60 μm (πράσινο)
		0.63-0.69 μm (κόκκινο)
		0.76-0.90 μm (εγγύς υπέρυθρο)

Η OrbImage διαθέτει τα προϊόντα του OrbView-3 σε τρεις κατηγορίες. Στα BASIC™ που έχουν υποστεί μία τυπική επεξεργασία, στα ORTHO™ τα οποία είναι εικονιστικά δεδομένα έτοιμα για εισαγωγή σε GIS και στα ψηφιακά προϊόντα που είναι χρήσιμα για τη δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων, όπως χάρτες εξαγωγής χαρακτηριστικών που είναι χρήσιμοι για συγκεκριμένες εφαρμογές χρηστών.



Εικόνα 25: Εικόνα pan-sharpened με χωρική ανάλυση 1 m που προκύπτει από συνδυασμό πολυφασματικής εικόνας χωρικής ανάλυσης 4 m με την αντίστοιχη παγχρωματική ανάλυσης 1 m.

Τα προϊόντα του OrbView-3 μπορούν να μεταφερθούν στο έδαφος, σε πραγματικό χρόνο, σε έναν επίγειο σταθμό. Τέτοιοι σταθμοί υπάρχουν σε διάφορα μέρη του κόσμου, αλλά ο κεντρικός βρίσκεται στις Η.Π.Α. Οι αγοραστές μπορούν να προμηθευτούν τα δεδομένα του OrbView-3 είτε απευθείας, μέσω ενός δικού τους επίγειου σταθμού, είτε να παραγγείλουν μέσω Internet από το δίκτυο εξυπηρέτησης της OrbImage ξεχωριστές εικόνες είτε να αγοράσουν εικόνες από τους περιφερειακούς διανομείς της εταιρίας.



Εικόνα 26: Εικόνα pan-sharpened ανάλυσης 1 m.

Εφαρμογές

Στις εικόνες με ανάλυση 1 m μπορούμε να διακρίνουμε σπίτια και αυτοκίνητα, οπότε μπορούμε να φτιάξουμε υψηλής ακρίβειας ψηφιακούς χάρτες και φωτορραλιστικές προσομοιώσεις πτήσεων (3-D fly-through scenes). Οι πολυφασματικές εικόνες ανάλυσης 4 m παρέχουν έγχρωμες και υπέρυθρες πληροφορίες για τον επιπλέον χαρακτηρισμό πόλεων, αγροτικών περιοχών και μη ανεπτυγμένων εκτάσεων. Γενικά, τα προϊόντα του OrbView-3 μπορούν να βρουν εφαρμογές στην εκτίμηση περιβαλλοντικών αλλαγών, τον έλεγχο βιότοπων για τις περιβαλλοντικές οργανώσεις, τις τηλεπικοινωνίες, τον αστικό σχεδιασμό πόλεων, την ανεύρεση φυσικών πόρων, όπως πετρέλαιο και φυσικό αέριο, την εθνική ασφάλεια, τη γεωργία, τη δασονομία και τη χαρτογράφηση ιδιαίτερων περιοχών.

2.6 IKONOS



Εικόνα 27: Ο Δορυφόρος IKONOS

Ο IKONOS ήταν ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος στον κόσμο, που διέθετε εικόνες με τόσο υψηλή χωρική ανάλυση και ανήκει στην εταιρία SpacelImaging. Η πρώτη επιτυχημένη εκτόξευσή του έγινε τον Σεπτέμβριο του 1999 από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg των Η.Π.Α. Κινείται σε υψόμετρο 680 km, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά, με γωνία κλίσης 98° . Είναι εξοπλισμένος με δυο καταγραφικά συστήματα που λειτουργούν ταυτόχρονα. Το πρώτο καταγράφει στο παγχρωματικό με χωρική ανάλυση 1 m, ενώ το δεύτερο καταγράφει σε τέσσερα πολυφασματικά κανάλια με χωρική ανάλυση 4 m. Η ταχύτητα με την οποία κινείται είναι 7.5 km/ sec και για μια πλήρη περιφορά περί τη Γη απαιτούνται 98 λεπτά. Η εφημερίδα του δορυφόρου ενημερώνε-

ται μέσω δεδομένων που προέρχονται από ένα ενσωματωμένο σε αυτόν GPS, όπου, στη συνέχεια, αυτά υφίστανται μετεπεξεργασία στο γραφείο με ένα ειδικό λογισμικό. Η θέση του στο χώρο προσδιορίζεται από τα ενσωματωμένα “star trackers” και τα γυροσκοπία.

Φασματική Ανάλυση

Πίνακας 14: Φασματικό εύρος ΙΚΟΝΟΣ

ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΠΑΓΧΡΩΜΑΤΙΚΟ	0.5-0.9 μm
	ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	0.45-0.52 μm (μπλε)
		0.52-0.60 μm (πράσινο)
		0.63-0.69 μm (κόκκινο)
		0.76-0.90 μm (εγγύς υπέρυθρο)

Ραδιομετρική Ανάλυση

Η ραδιομετρική ανάλυση των εικόνων είναι 11-bit. Με την ανάλυση αυτή μπορούμε να έχουμε περισσότερες πληροφορίες, αφού κάποιες λεπτομέρειες είναι πιο ευδιάκριτες σε σύγκριση με την τυπική ανάλυση των 8-bit.

Χωρική Ανάλυση

Η χωρική ανάλυση του αισθητήρα στο ναδίρ είναι 0.82 m για τις παγχρωματικές εικόνες και 3.28 m για τις πολυφασματικές εικόνες. Με γωνία θέασης 26° από το ναδίρ το μέγεθος της εικονοψηφίδας είναι 1 m στις παγχρωματικές εικόνες και 4 m στις πολυφασματικές.

Πίνακας 15: Χωρική Ανάλυση ΙΚΟΝΟΣ

Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	0.82 m (nadir)
		1 m (off-nadir)
	πολυφασματικό	3.28 m (nadir)
		4 m (off-nadir)

Συχνότητα Επανεπίσκεψης

Η συχνότητα επανεπίσκεψης του δορυφόρου κυμαίνεται σε μια έως τρεις ημέρες. Για παράδειγμα, στο γεωγραφικό πλάτος των 40° η συχνότητα επανεπίσκεψης είναι 2.9 ημέρες με γεωμετρική ανάλυση 1 m (μέγεθος εδαφοψηφίδας 1 m) και 1.5 ημέρες με εδαφοψηφίδα 1.5 m. Ο χρόνος επανεπίσκεψης είναι μικρότερος για τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και μεγαλύτερος για τις περιοχές που βρίσκονται κοντά στον Ισημερινό.

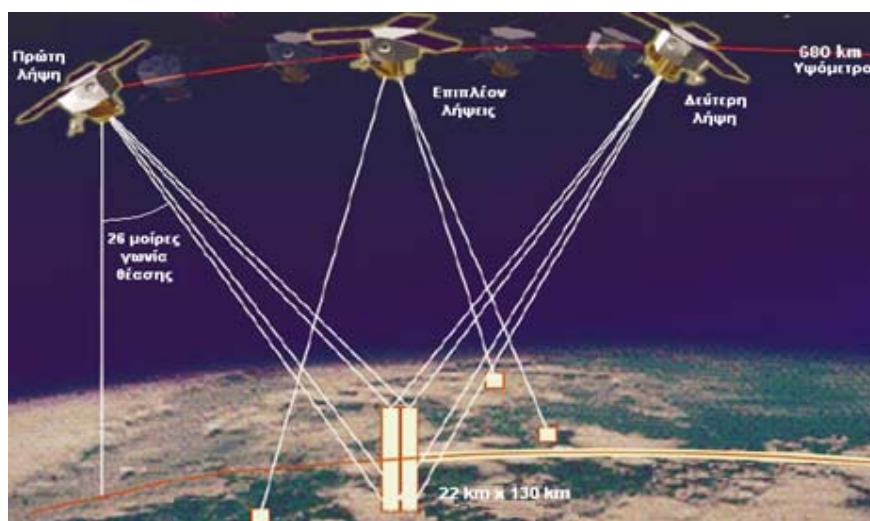
Ακρίβεια

Η μετρική ακρίβεια, σύμφωνα με την SpaceImaging, χωρίς σημεία επίγειου ελέγχου, δηλαδή χωρίς φωτοσταθερά, είναι 12 m οριζοντιογραφικά και 10 m υψομετρικά για διάστημα εμπιστοσύνης 90%. Ενώ με τη χρήση φωτοσταθερών η ακρίβεια είναι 2 m οριζοντιογραφικά και 3 m υψομετρικά, επίσης για διάστημα εμπιστοσύνης 90%.

Χαρακτηριστικά του Αισθητήρα

Ο IKONOS είναι αρκετά “ευκίνητος”. Από τότε που εκτοξεύθηκε έχει συλλέξει εικόνες από ολόκληρη τη Γη και, εκτός από την υψηλή χωρική και ραδιομετρική ανάλυση, έχει υψηλή ακρίβεια στη γεωμετρία του αισθητήρα. Οι αισθητήρες του, οι οποίοι είναι τύπου “whisk-broom”, μπορούν να στρέφονται κάθετα αλλά και κατά μήκος της τροχιάς του, σε οποιαδήποτε γωνία, για να πάρουν μια εικόνα. Δηλαδή έχει τη δυνατότητα να κάνει λήψεις τόσο στην διεύθυνση along-track όσο και στην across-track.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την απόκτηση στερεοζευγών είναι η εξής: καθώς ο δορυφόρος κινείται, ο αισθητήρας του, που έχει κατεύθυνση προς τα εμπρός, συλλέγει το πρώτο τμήμα του στερεοζεύγους. Μετά από λίγα δευτερόλεπτα, αφού έχει αποκτηθεί η πρώτη εικόνα, ο δορυφόρος κάνει λήψεις για την ίδια περιοχή αλλά με κατεύθυνση προς τα πίσω. Έτσι, τα στερεοζεύγη που συλλέγει δημιουργούνται ταυτόχρονα στο ίδιο “πέρασμα”, δηλαδή στην ίδια τροχιά, με αποτέλεσμα να εξαλείφονται οι πιθανότητες διαφορετικής φωτεινότητας και μεταβολών της γήινης επιφάνειας στο ζεύγος. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα στερεοσκοπικών λήψεων in-track, που καλύπτουν έκταση 22 km x 130 km στο έδαφος. Η ζώνη απεικόνισης, για 1 m εδαφοψηφίδα και σε κατακόρυφη λήψη, καλύπτει 11.3 km και 13.8 km με γωνία θέασης 26° (off-nadir). Ακόμη, κάθε λωρίδα αντιστοιχεί σε 11 km πλάτος x 100 km έως 1000 km μήκος, και κάθε εικόνα IKONOS καλύπτει 11 km x 11 km στο έδαφος.



Εικόνα 28: Λήψη στερεοζευγών από τον IKONOS.

Πίνακας 16: Τεχνικές Προδιαγραφές του IKONOS

Δορυφόρος	IKONOS
Ημερομηνία Εκτόξευσης	Σεπτέμβριος 1999
Υψόμετρο	680 km
Γωνία Κλίσης	98.1°(ηλιοσύγχρονη τροχιά)
Ταχύτητα	7.5 km/sec
Περίοδος Τροχιάς	98 min
Ζώνη Πλάτους	11.3 km στο ναδίρ και 13.8 km στις 26° off-nadir
Ζώνη απεικόνισης	11 km x 11 km
Γωνία θέασης	±26°
Ωρα διάβασης από Ισημερινό	10:30 π.μ
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	1 έως 3 μέρες
Ραδιομετρική Ανάλυση	11 bit

Η SpaceImaging διαθέτει τα προϊόντα του IKONOS σε 5 διαφορετικά επίπεδα, ανάλογα με τη γεωμετρική ακρίβεια που έχουν. Οι διαφορετικές ακρίβειες των δεδομένων εξαρτώνται από το επίπεδο επεξεργασίας και τους φωτογραμμετρικούς μετασχηματισμούς που έχουν υποστεί από την εταιρία. Για παράδειγμα, τα προϊόντα με επίπεδο επεξεργασίας ‘Geo’ είναι γεωμετρικά διορθωμένα και αντιστοιχούν σε ορθοφωτογραφίες με χρήση των “εξωτερικών προσανατολισμών” από τα τροχιακά δεδομένα και με ψηφιακό μοντέλο εδάφους το μέσο υψόμετρο της περιοχής. Αντίθετα, τα δεδομένα επιπέδου επεξεργασίας ‘Precision Plus’ προκύπτουν από φωτογραμμετρική επεξεργασία με χρήση των τροχιακών δεδομένων, φωτοσταθερών, σημείων ελέγχου και ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Επίσης, ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας κυμαίνεται και το κόστος (τα υψηλότερης ακρίβειας προϊόντα κοστίζουν περισσότερο από τα χαμηλότερης). Τα επίπεδα αυτά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 16: Προϊόντα IKONOS

IKONOS	
Προϊόντα	Ακρίβεια RMS (m)
‘Geo’	25 m
‘Reference’	11.8 m
‘Pro’	4.8 m
‘Precision’	1.9 m
‘Precision Plus’	0.9 m

Λόγω της ταυτόχρονης συλλογής παγχρωματικών και πολυφασματικών δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα να παραχθούν στον επίγειο σταθμό του δορυφόρου έγχρωμες εικόνες ανάλυση με 1 m. Οι εικόνες αυτές συνδυάζουν την ακρίβεια 1 m των παγχρωματικών δεδομένων και το χρώμα (και όλη την πληροφορία αυτό που δίνει) των πολυφασματικών δεδομένων ανάλυσης 4 m.



Εικόνα 29: Εικόνα pan-sharpened του IKONOS με ανάλυση 1 m.



Εικόνα 30: Εικόνα pan-sharpened του IKONOS με ανάλυση 1 m.



Εικόνες 31, 32: Εικόνες IKONOS pan-sharpened 1 m (ΟΑΚΑ πριν και μετά το 2004).

Εφαρμογές

Οι δορυφορικές εικόνες του IKONOS μπορούν να έχουν εφαρμογές στη κτηματογράφιση και στην αποτύπωση αστικών περιοχών. Είναι ιδανικές για την “ανίχνευση μεταβολών” (change detection), την αναγνώριση αντικειμένων, την παρακολούθηση καταστροφών και την ενημέρωση δασικών και αγροτικών κτηματολογίων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους και τη χαρτογράφηση περιοχών, αφού πληρούν τις προδιαγραφές ακριβείας για τη σύνθεση τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:2.500. Ακόμη, τα προϊόντα του IKONOS μπορούν να αποκτηθούν εύκολα και γρήγορα, σε λογικό κόστος, γεγονός που τα κάνει χρήσιμα για τα προγράμματα ανάπτυξης των αστικών περιοχών.

2.7 Quick-Bird



Εικόνα 33: Ο Δορυφόρος Quick-Bird

Ο δορυφόρος Quick-Bird εκτοξεύθηκε τον Οκτώβριο του 2001, επίσης από τη βάση της Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg των Η.Π.Α. Το όχημα εκτόξευσης του ήταν ένα Boeing Delta II. Ο Quick-Bird ανήκει στην εταιρία Digital Globe. Οι στερεοσκοπικές εικόνες που προσφέρει έχουν την μεγαλύτερη χωρική ανάλυση από όλους τους εμπορικούς δορυφόρους που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή, και φτάνει τα 0.61 m στο παγχρωματικό. Ο δορυφόρος κινείται σε υψόμετρο 450 km, σε ηλιοσύγχρονη τροχιά και με γωνία κλίσης 98°. Η ταχύτητά του είναι 7.1 km/ sec. Για μια πλήρη περιφορά περί τη Γη απαιτούνται 93.4 min και η συχνότητα επανέπίσκεψης του κυμαίνεται από 1 έως 3.5 ημέρες, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος.

Χωρική & Ραδιομετρική Ανάλυση

Η χωρική ανάλυση του Quick-Bird είναι 61 cm για τις παγχρωματικές εικόνες και 2.44 m για τις πολυφασματικές στο nadir. Με γωνία θέασης 25° off-nadir το μέγεθος της εικονοψηφίδας είναι 72 cm στις παγχρωματικές εικόνες και 2.88 m στις πολυφασματικές. Ακόμη, η ραδιομετρική διαβάθμιση των απεικονίσεων του Quick-Bird είναι 11 bit.

Φασματική Ανάλυση

Πίνακας 17: Φασματικό Εύρος Quick-Bird

	ΠΑΓΧΡΩΜΑΤΙΚΟ	0.5-0.9 μm
ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	Μπλε	0.45-0.52 μm
	Πράσινο	0.52-0.60 μm
	Κόκκινο	0.63-0.69 μm
	Εγγύς Υπέρυθρο	0.76-0.90 μm

Χαρακτηριστικά του Αισθητήρα

Οι γραμμικοί αισθητήρες CCD που έχει ο Quick-Bird είναι τύπου pushbroom. Δηλαδή η εικόνα δημιουργείται κατά τη διεύθυνση της κίνησης. Ακόμη, ο αισθητήρας του διαθέτει ενσωματωμένο GPS και τρία “star trackers” για τον προσδιορισμό της θέσης του στο χώρο. Έχει τη δυνατότητα να παρέχει εικόνες με στερεοσκοπική γεωμετρία και να συλλέγει στερεοζεύγη κατά τις διευθύνσεις along-track και across-track, με γωνία θέασης $\pm 25^\circ$. Η ζώνη απεικόνισης στο έδαφος έχει έκταση 16.5 km x 16.5 km, με ζώνη πλάτους 16.5 km που μπορεί να φτάσει τα 19 km στην διεύθυνση across-track, και το μέγεθος κάθε λωρίδας του αντιστοιχεί σε 16.5 km κατά πλάτος x 165 km κατά μήκος.

Πίνακας 18: Παρουσίαση του Quick-Bird

Δορυφόρος	Quick-Bird
Ημερομηνία Εκτόξευσης	Οκτώβριος 2001
Όχημα Εκτόξευσης	Boeing Delta II
Περιοχή Εκτόξευσης	Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Vandenberg, Η.Π.Α
Υψόμετρο	450 km
Γωνία Κλίσης	97.2°(ηλιοσύγχρονη τροχιά)
Περίοδος Τροχιάς	93.5 min
Ώρα διάβασης από τον Ισημερινό	10:30 π.μ.
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	1 έως 3.5 ημέρες (ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος)
Ταχύτητα	7.1 km/sec

Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	0.61 m (nadir)
		2.44 m (off-nadir)
	πολυφασματικό	0.72 m (nadir)
		2.88 m (off-nadir)
Ραδιομετρική Ανάλυση		11-bit
Γωνία θέασης		±25°
Μετρική Ακρίβεια		23 m και 17 m γραμμικό σφάλμα (χωρίς φωτοσταθερά)
Ζώνη Πλάτους		16.5 km (ναδίρ)
Ζώνη Απεικόνισης		16.5 km x 16.5 km

Η εταιρία Digital Globe διαθέτει τα προϊόντα του Quick-Bird σε 3 επίπεδα επεξεργασίας. Στα δύο πρώτα επίπεδα ‘basic’ και ‘standard’ οι εικόνες έχουν ακρίβεια (RMS) 14 m. Το τρίτο επίπεδο είναι ορθοφωτογραφίες, σε διάφορες κλίμακες, που η ακρίβειά τους εξαρτάται και από την ποιότητα των φωτοσταθερών. Το κόστος των προϊόντων είναι ανάλογο με το επίπεδο επεξεργασίας.

Πίνακας 19: Επίπεδα Επεξεργασίας του Quick-Bird

Quick-Bird	
Προϊόντα	Ακρίβεια RMS (m)
‘basic’	14 m
‘standard’	14 m
‘Orthorectified’ (1: 25.000)	7.7 m
‘Orthorectified’ (1: 12.000)	6.2 m





Εικόνες 34, 35: Εικόνες pan-sharpened του Quick-Bird ανάλυσης 72 cm.



Εικόνα 36: Σύγκριση ανάμεσα σε μία παγχρωματική εικόνα του SPOT-5 χωρικής ανάλυσης 2.5 m και σε μία εικόνα pan-sharpened του Quick-Bird χωρικής ανάλυσης 61 cm.

Πλεονεκτήματα του Quick-Bird

Ο Quick-Bird έχει:

- ✓ τη καλύτερη ανάλυση από όλους τους εμπορικούς δορυφόρους (0.61 m)
- ✓ ικανότητα επαναλαμβανόμενης παρακολούθησης προκαθορισμένων περιοχών
- ✓ δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων (128 Gbit) για γρηγορότερη συλλογή μεγαλύτερου αριθμού εικόνων από ολόκληρη τη Γη

- ✓ σταθερή πλατφόρμα για μεγαλύτερη ακρίβεια γεωεντοπισμού (23 m) και για τη δημιουργία χαρτών απομακρυσμένων περιοχών χωρίς τη χρήση επίγειων φωτοσταθερών σημείων
- ✓ μεγαλύτερο εύρος εικόνων για την αναγνώριση αντικειμένων, αφού ακόμα και στις εικόνες που θα αποκτηθούν με χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού δεν αλλοιώνεται η ποιότητα τους.

Εφαρμογές

Η έκταση που καλύπτουν οι εικόνες που συλλέγει ετησίως ο Quick-Bird είναι πάνω από 75 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα. Από την αρχή τα προϊόντα του είχαν απήχηση στη δημιουργία χαρτών μεγάλης κλίμακας, όπου χρησιμοποιούνται υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες. Επομένως, τα δεδομένα που συλλέγει, λόγω υψηλής χωρικής ανάλυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση διάφορων περιοχών, για στρατιωτικούς σκοπούς στην ανίχνευση αντικειμένων και στην ανάλυση της εικόνας. Επίσης μπορούν να έχουν εφαρμογή για περιβαλλοντικούς σκοπούς στον εντοπισμό αλλαγών, τη θεματική χαρτογράφηση βιοτόπων, τη γεωργία και τη δασολομία, καθώς και την παρακολούθηση φυσικών καταστροφών.

2.8 Δορυφορικές Εικόνες και Αεροφωτογραφίες

Ύστερα από την παρουσίαση των παραπάνω δορυφόρων και την περιγραφή των χαρακτηριστικών του καθενός, στον επόμενο Πίνακα 20 γίνεται μιά σύγκριση των δορυφορικών εικόνων σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες.

Πίνακας 20: Σύγκριση Δορυφορικών Εικόνων και Αεροφωτογραφιών

Δορυφορικές εικόνες	Ψηφιακές Αεροφωτογραφίες
<ul style="list-style-type: none"> • Κάλυψη μεγάλης περιοχής • Ραδιομετρική σταθερότητα • Απόκτηση δεδομένων σε χώρους όπου απαγορεύονται οι πτήσεις • Διαχρονική καταγραφή περιοχών μέσω της επαναληπτικότητας του δορυφόρου • Σταθερή τροχιά σε συγκεκριμένο ύψος • Σταθερή γεωμετρική ανάλυση • Η διαθεσιμότητα εξαρτάται από τον καιρό • Η στερεοσκοπική απεικόνιση απαιτεί επιπλέον κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Σχέδιο πτήσης ανάλογα με τις ανάγκες • Δεν εξαρτάται απόλυτα από τον καιρό (δυνατότητα πτήσης κάτω από τα σύννεφα) • Η γεωμετρική ανάλυση κυμαίνεται από 0.05 έως 1 m στο παγχρωματικό και 0.1 έως 2 m στο πολυφασματικό • Η ραδιομετρία της εικόνας δεν είναι σταθερή • Η στερεοσκοπική απεικόνιση δεν απαιτεί επιπλέον κόστος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Μέσα από την παρουσίαση των προαναφερθέντων δορυφόρων έχει γίνει αντιληπτό ότι κάθε δορυφορικό σύστημα έχει μοναδική γεωμετρία. Επομένως, για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των δορυφορικών εικόνων και την εξαγωγή αξιόπιστης μετρητικής πληροφορίας, με ενιαία ακρίβεια, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός γεωμετρικού-μαθηματικού μοντέλου. Το μοντέλο αυτό συνδέει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός σημείου στο έδαφος με τις αντίστοιχες συντεταγμένες στο επίπεδο της εικόνας και ονομάζεται μοντέλο του αισθητήρα (sensor model). Όπως έχει αναφερθεί, υπάρχουν δύο είδη μοντέλων, τα φυσικά ή ακριβή μοντέλα (physical ή rigorous sensor model) και τα προσεγγιστικά ή γενικευμένα μοντέλα (generalized sensor model).

3.1 Ακριβές Γεωμετρικό Μοντέλο

Τα φυσικά ή ακριβή γεωμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να αναπλάσουν την φυσική γεωμετρία της εικόνας και συνδέουν το σύστημα της εικόνας με το γεωδαιτικό σύστημα. Πρέπει να συνδυάζουν τις φωτογραμμετρικές αρχές του φωτοτριγωνισμού με την μέθοδο της δέσμης και να δέχονται επιπλέον δεσμεύσεις από γνωστές εξισώσεις ή στοιχεία τροχιάς. Σκοπός τους είναι να περιλαμβάνουν όλες τις τυχόν διαφοροποιήσεις των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού για ολόκληρο το εύρος μιας εικόνας, γι' αυτό και είναι ακριβή, επειδή δηλαδή προσομοιάζουν επακριβώς την λειτουργία του αισθητήρα κατά την χρονική στιγμή της λήψης. Η δημιουργία, όμως, ενός φυσικού μοντέλου προϋποθέτει ακριβή γνώση της γεωμετρίας του αισθητήρα και της τροχιάς του δορυφόρου. Γι' αυτόν τον λόγο, το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει κάποιες φυσικές παραμέτρους, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε αισθητήρα και περιγράφουν τη γεωμετρία του. Οι παράμετροι αυτές είναι η διαστρόφη του φακού, η εκτροπή λόγω αναγλύφου, η καμπυλότητα της γης, η ατμοσφαιρική διάθλαση, το μέγεθος του pixel και οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού. Οπότε τα φυσικά μοντέλα μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκα, οπότε χωρίς την γνώση των παραπάνω παραμέτρων, που δεν είναι πάντα διαθέσιμοι, ειδικά για τους εμπορικούς δορυφόρους, θα είναι δύσκολο να αποκτήσουμε ένα ακριβές γεωμετρικό μοντέλο. Ακόμη, εξαρτώνται από τον αισθητήρα τους, δηλαδή διαφορετικοί τύποι αισθητήρων απαιτούν διαφορετικά μοντέλα, και με την διαρκώς αυξανόμενη διαθεσιμότητα και την εκτεταμένη χρήση διαφορετικών τύπων δορυφορικών αισθητήρων (όπως Frame, Pushbroom, Whiskbroom, Panoramic και SAR) από πρακτική άποψη δεν είναι εύκολο για τους χρήστες να αλλάζουν λογισμικό ή να προσθέτουν τα καινούργια μοντέλα στο ήδη υπάρχον σύστημα για την επεξεργασία των νέων δεδομένων.

Επομένως, τα ακριβή φυσικά μοντέλα έχουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα :

- Συνήθως το μοντέλο ενός δέκτη και τα φυσικά χαρακτηριστικά του είναι άγνωστα, και αυτό γίνεται σκόπιμα από τους κατασκευαστές τους.
- Το ακριβές μοντέλο είναι πολύπλοκο και η εφαρμογή του απαιτεί διαφορετικούς φωτογραμμετρικούς αλγορίθμους ανά δέκτη.
- Το φωτογραμμετρικό μοντέλο που εφαρμόζεται στα υπάρχοντα ημι-αναλυτικά, αναλυτικά και, κυρίως σήμερα, ψηφιακά φωτογραμμετρικά συστήματα είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί για κάθε επιπλέον δέκτη.

- Η δημιουργία κατάλληλου λογισμικού συνόρθωσης τριγωνισμού πολλαπλών δορυφορικών δεκτών και η χρήση των φυσικών μοντέλων για εξαγωγή συντεταγμένων θέσης είναι πολύπλοκη.
- Η αυστηρή μοντελοποίηση όλων των φυσικών παραμέτρων και των χαρακτηριστικών ενός δορυφορικού συστήματος δεν είναι δυνατή και πρέπει να γίνονται παραδοχές.

Εξισώσεις Συγγραμμικότητας

Οι μετασχηματισμοί που εκτελούνται για το ακριβές φυσικό γεωμετρικό μοντέλο του αισθητήρα εκφράζονται γενικά από τη συνθήκη συγγραμμικότητας. Επομένως για ένα σημείο με γεωδαιτικές συντεταγμένες X, Y, Z και εικονοσυντεταγμένες x, y , το πιο γνωστό μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για να συνδέσει τα σημεία της εικόνας με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος εκφράζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις συγγραμμικότητας:

$$x - x_o = -c \frac{a_{11}(X - X_o) + a_{12}(Y - Y_o) + a_{13}(Z - Z_o)}{a_{31}(X - X_o) + a_{32}(Y - Y_o) + a_{33}(Z - Z_o)} \quad (1\alpha)$$

$$y - y_o = -c \frac{a_{21}(X - X_o) + a_{22}(Y - Y_o) + a_{23}(Z - Z_o)}{a_{31}(X - X_o) + a_{32}(Y - Y_o) + a_{33}(Z - Z_o)} \quad (1\beta)$$

όπου X_o, Y_o, Z_o είναι οι συντεταγμένες του σημείου λήψης στο γεωδαιτικό σύστημα, c η σταθερά της μηχανής λήψης, x_o, y_o οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της εικόνας και τα a_{ij} είναι τα στοιχεία του πίνακα στροφής \mathbf{A} . Τα c, x_o, y_o είναι οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού και οι $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa$ είναι οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού. Επιπλέον οι εικονοσυντεταγμένες x, y είναι διορθωμένες από τη διαστροφή του φακού (ακτινική και έκκεντρη διαστροφή). Αν όχι, τότε συμπεριλαμβάνονται και διορθώνονται από τις παραπάνω εξισώσεις.

Οι εξισώσεις (1α) και (1β) εφαρμόζονται στους γραμμικούς αισθητήρες, όπου κάθε γραμμή σάρωσης έχει δικές της παραμέτρους για τον εξωτερικό προσανατολισμό. Οι παράμετροι αυτές αλλάζουν για κάθε γραμμή σάρωσης της εικόνας. Οι αλλαγές αυτές συχνά μοντελοποιούνται με πολυώνυμα. Η επίλυση των πολυωνυμικών συντελεστών του εξωτερικού προσανατολισμού με φωτογραμμετρική συνόρθωση μειώνει αρκετά, σε σύγκριση με τον ακριβή υπολογισμό των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε γραμμή σάρωσης, τον απαιτούμενο αριθμό φωτοσταθερών και μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη υπολογιστική ταχύτητα. Οι αντίστροφες εξισώσεις συγγραμμικότητας, όπου οι γεωδαιτικές συντεταγμένες X και Y εκφράζονται συναρτήσει των εικονοσυντεταγμένων x, y της εικόνας έχουν τη μορφή:

$$X - X_o = (Z - Z_o) \frac{a_{11}(x - x_o) + a_{21}(y - y_o) - a_{31}f}{a_{13}(x - x_o) + a_{23}(y - y_o) - a_{33}f}$$

$$Y - Y_o = (Z - Z_o) \frac{a_{12}(x - x_o) + a_{22}(y - y_o) - a_{32}f}{a_{13}(x - x_o) + a_{23}(y - y_o) - a_{33}f}$$

Έτσι, ένα ακριβές φυσικό γεωμετρικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί τα φυσικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα και τη φυσική γεωμετρία της εικόνας. Γι' αυτό το λόγο προτιμάται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, αφού μέσα από την μοντελοποίηση και τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μπορεί να επιτευχθεί η υψηλή ακρίβεια που απαιτείται για την χαρτογράφηση διάφορων περιοχών αλλά και για άλλες εφαρμογές. Ωστόσο, ένα τέτοιο μοντέλο είναι σχετικά πολύπλοκο, απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και αρκετές φορές το μοντέλο του αισθητήρα καθώς και οι φυσικές του παράμετροι δεν είναι διαθέσιμα (για εμπορικούς σκοπούς, όπως είπαμε).

3.2 Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο

Τα προσεγγιστικά γεωμετρικά μοντέλα συνήθως χρησιμοποιούνται για την δυναμική εξαγωγή θέσεως (real-time loop). Οι παράμετροι και οι συντελεστές τους υπολογίζονται συνήθως κατά τη διάρκεια της αναλυτικής επίλυσης τριγωνισμού δορυφορικών εικόνων με χρήση του ακριβούς μοντέλου.

Η επιλογή ενός προσεγγιστικού μοντέλου για τον δυναμικό προσδιορισμό θέσης πραγματοποιείται ανάλογα την ζητούμενη ακρίβεια και την εφαρμογή. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μοντέλα:

- ✓ Πολυώνυμα Προσαρμογής
- ✓ Πίνακας Αναφοράς Διορθώσεων (Look-Up Tables)
- ✓ Κλάσματα Πολυωνυμικής Μορφής (Rational Functions)

3.2.1 Πολυώνυμα Προσαρμογής

Ένας από τους πιο απλούς τρόπους για δυναμική προσέγγιση της γεωμετρίας ενός δέκτη είναι η χρήση πολυωνύμων. Οι συντεταγμένες κάθε σημείου στην εικόνα, σε στήλες και γραμμές, συνδέεται με τις γεωδαιτικές τιμές του στο χρησιμοποιούμενο εξωτερικό σύστημα. Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιούνται δυο σχέσεις πολυωνύμων για να συνδέσουν το σύστημα της εικόνας με εκείνο του εδάφους. Τα πολυώνυμα αυτά έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} x &= f_1(X, Y, Z) \quad \text{ή} \quad g_1(\varphi, \lambda, H) \\ y &= f_2(X, Y, Z) \quad \text{ή} \quad g_2(\varphi, \lambda, H) \end{aligned}$$

όπου x και y είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου σε στήλες και γραμμές. Τα X, Y, Z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες ενός σημείου σε ένα προβολικό σύστημα. Τα φ, λ, H είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες ενός σημείου σε ένα σύστημα αναφοράς και f, g είναι οι πολυωνυμικές συναρτήσεις.

Πολλαπλά πολυώνυμα χρησιμοποιούνται συνήθως ανά τμήματα εικόνας ή σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη μεταβολή αναγλύφου. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού βαθμού πολυώνυμα ώστε να μοντελοποιήσουν τα παραπάνω. Μια τέ-

τοια προσέγγιση απαιτεί την ύπαρξη σημαντικού αριθμού φωτοσταθερών σημείων, με ιδανική κατανομή οριζοντιογραφικά και υψομετρικά ώστε να είναι η όλη διαδικασία αξιόπιστη και ελεγχόμενη. Η χρήση πολυωνύμων υψηλού βαθμού μπορεί να δώσει ικανοποιητικά στατιστικά μεγέθη προσαρμογής, αλλά ταυτόχρονα να υπάρχουν μέγιστα σφάλματα μοντελοποίησης μεταξύ των φωτοσταθερών σημείων, και το κυριότερο σε περιοχές που δεν είναι εύκολο να προβλεφθούν. Η χρήση πολυωνύμων χαμηλής τάξης γενικά παρουσιάζει μικρή ακρίβεια προσαρμογής και δεν μπορεί να μοντελοποιήσει ταυτόχρονα τον τρόπο δημιουργίας μιας εικόνας και τα χαρακτηριστικά του δέκτη και τις αποκλίσεις του. Από την άλλη πλευρά, όμως, τα πολυώνυμα προσαρμογής είναι απλά στη σύλληψη και την εφαρμογή, χαρακτηριστικά που μπορούν να δώσουν άμεση απάντηση όταν η πηγή προέλευσης της εικόνας είναι άγνωστη και ο χρόνος παράδοσης είναι πιεστικός.

3.2.2 Πίνακας Αναφοράς Διορθώσεων

Ένας άλλος τρόπος γεωμετρικής μοντελοποίησης δεκτών είναι η χρήση πινάκων αναφοράς διορθώσεων για τις εικονοσυντεταγμένες. Οι διορθώσεις αυτές προκύπτουν από τη θεώρηση των γενικευμένων εξισώσεων συγγραμμικότητας με πρόσθετες παραμέτρους που περιγράφουν το στοχαστικό μοντέλο της γεωμετρίας του δέκτη. Οι διορθώσεις αυτές γενικά διαφέρουν λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του δέκτη, του τρόπου δημιουργίας της εικόνας και του αναγλύφου της περιοχής. Με αυτή τη θεώρηση δημιουργούνται κάρναβοι διορθώσεων σε διαφορετικά υψομετρικά επίπεδα. Οι κάρναβοι αυτοί δημιουργούνται για το μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο της περιοχής. Επιπλέον, δημιουργούνται κάρναβοι διορθώσεων ξεχωριστά για τις εξισώσεις των στηλών και των γραμμών. Οι τελικές διορθώσεις είναι στο σύστημα της εικόνας και προκύπτουν με πολλαπλή παρεμβολή σε κάθε πίνακα διορθώσεων.

3.2.3. Κλάσματα Πολυωνυμικής Μορφής

Σε ένα γενικευμένο προσεγγιστικό γεωμετρικό μοντέλο οι μετασχηματισμοί που συνδέουν το σύστημα της εικόνας με το γεωδαιτικό σύστημα μπορεί να αποτελούνται από κάποιες γενικές συναρτήσεις, με τη μορφή πολυωνύμων, έτσι ώστε να μην χρειάζεται η μοντελοποίηση της φυσικής γεωμετρίας της εικόνας. Μια, λοιπόν, εναλλακτική μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση συντελεστών κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (Rational Function Coefficients - RFCs), ως ένα προσεγγιστικό γεωμετρικό μοντέλο αντί του φυσικού μοντέλου του αισθητήρα. Η μέθοδος αυτή άρχισε να προσελκύει το ενδιαφέρον στον τομέα της Τηλεπισκόπησης και της Φωτογραμμετρίας μετά την εμφάνιση εμπορικών δορυφόρων που παρέχουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Βασίζεται σε πολυώνυμα ή λόγους πολυωνύμων που είναι ανεξάρτητα από τους δορυφόρους και τις συσκευές λήψης των δεδομένων και είναι ευκολότερα στην εφαρμογή λόγω της απλότητας τους. Γενικά, τα πολυώνυμα κλασματικής μορφής αντικαθιστούν τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων. Μπορούν να είναι οποιουδήποτε βαθμού, αλλά τυπικά χρησιμοποιούνται κλάσματα μέχρι και τρίτου βαθμού, και έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \quad (1\alpha)$$

$$y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \quad (1\beta)$$

όπου x, y είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου σε στήλες και γραμμές, τα X, Y, Z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες ενός σημείου σε ένα προβολικό σύστημα και τα P_1, P_2, P_3, P_4 είναι οι πολυωνμικές συναρτήσεις.

Τα πολυώνυμα P_i ($i = 1, 2, 3, 4$) έχουν γενική μορφή:

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

Συνήθως ο βαθμός των πολυωνύμων έχει κάποιους περιορισμούς, όπως ότι $0 \leq m_1 \leq 3$, $0 \leq m_2 \leq 3$, $0 \leq m_3 \leq 3$ και $m_1 + m_2 + m_3 \leq 3$. Έτσι το πολυώνυμο $P(X, Y, Z)$ έχει είκοσι όρους, μέχρι τρίτου βαθμού:

$$\begin{aligned} P(X, Y, Z) = & a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 XY + a_6 XZ + a_7 Y^2 \\ & + a_8 YZ + a_9 Z^2 + a_{10} X^3 + a_{11} X^2 Y + a_{12} X^2 Z + a_{13} XY^2 + a_{14} XYZ \\ & + a_{15} XZ^2 + a_{16} Y^3 + a_{17} Y^2 Z + a_{18} YZ^2 + a_{19} Z^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Αν αντικαταστήσουμε τα πολυώνυμα της Εξ. (1α, 1β) με αυτά από την Εξ. 2 και απαλείψουμε τον πρώτο συντελεστή στον παρονομαστή, τα κλάσματα πολυωνυμικής μορφής (Rational Functions) γίνονται:

$$\begin{aligned} x &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_{18} \ a_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(1 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ \dots \ b_{18} \ b_{19})^T} \\ y &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_{18} \ c_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(1 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ \dots \ d_{18} \ d_{19})^T} \end{aligned}$$

όπου a_i, b_i, c_i, d_i είναι οι συντελεστές των πολυωνύμων.

Η προσέγγιση με τη μέθοδο των RFs απαιτεί τουλάχιστον 39 φωτοσταθερά, αφού στο κάθε κλάσμα των παραπάνω πολυωνύμων υπάρχουν 39 όροι, 20 στον αριθμητή και 19 στον παρονομαστή (συν τη σταθερά 1). Είναι δυνατό να επιλέξει κάποιος τους όρους που θα χρησιμοποιήσει στην κλασματική μορφή με τρόπο τέτοιο ώστε να διαθέτει διαφορετικού βαθμού πολυώνυμο σε αριθμητή και παρονομαστή για την έκφραση των στηλών και των γραμμών μιας εικόνας. Κάποιοι όροι μπορούν να παραληφθούν από την κλασματική έκφραση.

Ακόμη, δεν είναι ασυνήθιστο το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται,

ειδικότερα αν επρόκειτο για χαρτογραφική προβολή, να διαθέτει πολύ μεγάλες τιμές συντεταγμένων. Σε αυτή την περίπτωση, η ύπαρξη υψηλού βαθμού πολωνύμου είναι πιθανό να δημιουργήσει αριθμητική αστάθεια. Λόγω αυτών των ενδεχομένων, εφαρμόζονται τεχνικές αριθμητικής κανονικοποίησης.

Με δεδομένη τη γεωδαιτική συντεταγμένη Z , η αντίστροφη μορφή των RFs εκφράζεται από τη μορφή:

$$X = \frac{P_5(x, y, Z)}{P_6(x, y, Z)} \quad (3\alpha)$$

$$Y = \frac{P_7(x, y, Z)}{P_8(x, y, Z)} \quad (3\beta)$$

Στην αγγλική ορολογία οι Εξ. (3^α, 3^β) αποκαλούνται ‘*downward RF*’, και αντίστοιχα οι Εξ. (1^α, 1^β) ‘*upward RF*’.

Συνήθως, το μοντέλο των RF δημιουργείται με βάση το ακριβές μοντέλο του αισθητήρα. Μετά από τη συνόρθωση της δέσμης, που θα έχει εκτελεστεί για το ακριβές γεωμετρικό μοντέλο, έχουμε πολλά σημεία, ομοιόμορφα κατανεμημένα στην εικόνα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά. Αυτά τα φωτοσταθερά δημιουργούνται με βάση το πλήρες μέγεθος της εικόνας και το εύρος των μεταβολών στα υψόμετρα. Το εύρος των μεταβολών στα υψόμετρα είναι κατανεμημένο σε διάφορες κατηγορίες. Έπειτα, τα RFCs υπολογίζονται από τη συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων με βάση τα πραγματικά φωτοσταθερά. Από την άλλη, αν είναι διαθέσιμος επαρκής αριθμός φωτοσταθερών, τα RFCs μπορούν να επιλυθούν απευθείας με τα φωτοσταθερά χωρίς τη γνώση του ακριβούς γεωμετρικού μοντέλου.

Πλεονεκτήματα

Γενικά, τα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή ενός προσεγγιστικού γεωμετρικού μοντέλου με τη χρήση κλασμάτων πολωνυμικής μορφής είναι τα ακόλουθα:

- Είναι ανεξάρτητα από τον αισθητήρα του δορυφόρου και με τη χρήση τους μπορούν να γίνουν υπολογισμοί σε πραγματικό χρόνο.
- Δεν απαιτείται γνώση της γεωμετρίας του αισθητήρα, άρα μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικούς τύπους αισθητήρων.
- Υποστηρίζουν συντεταγμένες οποιουδήποτε γεωδαιτικού συστήματος.
- Διατηρείται η υπάρχουσα ρουτίνα παραγωγής στα φωτογραμμετρικά συστήματα.
- Διατηρείται η ακρίβεια του δέκτη (με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων ανά δκτη), αφού η προβολικότητα της απεικόνισης μπορεί να διατηρείται.
- Υπάρχει δυνατότητα χρήσης του ίδιου βαθμού κλασματικών πολωνύμων για έναν δέκτη.

Μειονεκτήματα

Όμως, από την άλλη μεριά, τα κλάσματα πολωνυμικής μορφής δεν παύουν να είναι

μια μαθηματική έκφραση που προσπαθεί να προσομοιάσει ένα φυσικό μοντέλο. Έτσι, το φυσικό μοντέλο μοντελοποιείται, με μαθηματικούς όρους, ‘στα τυφλά’. Άλλο πρόβλημα μπορεί να είναι η χρήση όρων που έχουν υψηλό βαθμό συσχέτισης και η εισαγωγή αριθμού παραμέτρων που δεν συνεισφέρουν στην μοντελοποίηση της γεωμετρίας και μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια στη λύση. Τέλος, η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων είναι απαραίτητο να γίνει με χρήση κατάλληλου πεδίου ελέγχου και στατιστικούς ελέγχους για τους όρους που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν ανά δέκτη. Επομένως, η προσέγγιση αυτή συγκεντρώνει και τα εξής μειονεκτήματα:

- Δεν μπορεί να μοντελοποιεί τοπικές παραμορφώσεις στην εικόνα (χαρακτηριστικό σε δέκτες που χρησιμοποιούν επιφανειακούς ψηφιακούς αισθητήρες).
- Οι όροι δεν έχουν φυσική σημασία, καθιστώντας έτσι δύσκολη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- Μπορούν να εισάγουν θόρυβο, λόγω της μίας επιπλέον συνόρθωσης.
- Μπορεί να μηδενιστεί ο παρονομαστής, αν οι τιμές του εκτείνονται από αρνητική σε θετική τιμή.
- Η χρήση όρων χωρίς στατιστικούς ελέγχους μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα λόγω υψηλών συσχετίσεων.
- Η ακρίβεια της μεθόδου μειώνεται αν η εικόνα είναι πολύ μεγάλη ή έχει υψηλό βαθμό διαστροφών.

3.2.4 Βελτίωση Γεωμετρικής Ακρίβειας των Πολυωνυμικών Κλασμάτων

Η μέθοδος των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (RFC), αν και δεν περιγράφει ακριβώς τις παραμέτρους του αισθητήρα, χρησιμοποιείται γιατί η εφαρμογή της είναι απλή και γρήγορη. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους και ορθοφωτογραφιών. Όμως μέσα από εφαρμογές που έχουν γίνει, βρέθηκε ότι υπάρχουν κάποια συστηματικά σφάλματα που επηρεάζουν την γεωμετρική ακρίβεια, γι’ αυτό και στη συνέχεια παρουσιάζονται τρόποι που βοηθούν στη βελτίωση της.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να βελτιώσει κανείς την ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων που θα πάρει με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής. Στην πρώτη μπορούμε να βελτιώσουμε τις τιμές των πολυωνύμων κλασματικής μορφής με βάση κάποιον μεγάλο αριθμό φωτοσταθερών (περισσότερα από 39 φωτοσταθερά που απαιτούνται για τα τρίτου βαθμού πολυώνυμα που χρησιμοποιούμε). Αυτή η μέθοδος θεωρητικά μπορεί να εφαρμοστεί, αλλά στην πράξη σπάνια είναι διαθέσιμος ένας τόσο μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών. Η δεύτερη προσέγγιση για τη βελτίωση των υπολογιζόμενων γεωδαιτικών συντεταγμένων είναι να χρησιμοποιηθεί ένα πολυώνυμο διόρθωσης, στο σύστημα της εικόνας είτε στο γεωδαιτικό σύστημα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί λιγότερα φωτοσταθερά από τη πρώτη, και είναι αποδοτικότερη και πιο απλή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τέσσερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ακρίβειας του γεωδαιτικού συστήματος και του συστήματος της εικόνας. Τα μοντέλα αυτά είναι:

- 1) Μετάθεση
- 2) Κλίμακα και μετάθεση

- 3) Αφινικός μετασχηματισμός
- 4) Πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού.

Ο έλεγχος για την ακρίβεια των μοντέλων γίνεται με τα φωτοσταθερά σημεία και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS), που για κάθε μοντέλο υπολογίζεται με βάση τις διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα από τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής και τις γνωστές συντεταγμένες των σημείων.

Ακόμη και με τη συνόρθωση ελάχιστων τετράγωνων και τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων φωτοσταθερών, περισσότερων από τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό, μπορούμε να πάρουμε βελτιωμένες τιμές για τις παραμέτρους του μετασχηματισμού. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό βελτιωμένων συντεταγμένων και για τα άλλα σημεία.

Γεωδαιτικό Σύστημα

Στο γεωδαιτικό σύστημα, για κάθε μοντέλο συνόρθωσης δημιουργούνται τρεις εξισώσεις. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μοντέλα αυτά και οι εξισώσεις τους, καθώς και ο απαιτούμενος ελάχιστος αριθμός φωτοσταθερών για κάθε μοντέλο.

Πίνακας 21: Μοντέλα συνόρθωσης για το Γεωδαιτικό Σύστημα

Γεωδαιτικό Σύστημα		
Μοντέλα συνόρθωσης		Αριθμός Φωτοσταθερών
Μετάθεση	$X' = X + a_0, Y' = Y + b_0, Z' = Z + c_0$	1
Μετάθεση και Κλίμακα	$X' = a_0 + a_1 X$ $Y' = b_0 + b_1 Y$ $Z' = c_0 + c_1 Z$	2
Αφινικός Μετασχηματισμός	$X' = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z$ $Y' = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z$ $Z' = c_0 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z$	4
Πολυώνυμο 2 ^{ου} Βαθμού	$X' = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 XY$ $+ a_5 XZ + a_6 YZ + a_7 X^2 + a_8 Y^2 + a_9 Z^2$ $Y' = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 XY$ $+ b_5 XZ + b_6 YZ + b_7 X^2 + b_8 Y^2 + b_9 Z^2$ $Z' = c_0 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4 XY$ $+ c_5 XZ + c_6 YZ + c_7 X^2 + c_8 Y^2 + c_9 Z^2$	10

όπου X, Y, Z είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες που έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο

των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής. Οι συντεταγμένες X' , Y' και Z' είναι οι νέες διορθωμένες συντεταγμένες των γνωστών φωτοσταθερών.

Στο πρώτο μοντέλο μετασχηματισμού απαιτείται η χρήση τουλάχιστον ενός φωτοσταθερού, δηλαδή και για να επιτευχθούν οι καλύτερες τιμές των συντεταγμένων X' , Y' , Z' προστίθεται ένα διάνυσμα μετάθεσης a_0 , b_0 και c_0 στις γεωδαιτικές συντεταγμένες X , Y , Z , αντίστοιχα.. Στο δεύτερο μοντέλο χρησιμοποιούνται τρεις επιπλέον σταθεροί όροι (συντελεστές κλίμακας), τα a_1 , b_1 , c_1 , που συμβάλλουν στη διόρθωση της μη ομοιογενούς παραμόρφωσης (παραμορφώσεις κλίμακας). Στο τρίτο μοντέλο έχουμε έναν αφινικό μετασχηματισμό και στο τέταρτο μοντέλο έναν πολυωνυμικό μετασχηματισμό δευτέρου βαθμού.

Σύστημα Εικόνας

Στο σύστημα της εικόνας τα μοντέλα που δημιουργούνται είναι πιο απλά αφού παραλείπονται οι παράμετροι της τρίτης διάστασης και έτσι για κάθε μοντέλο έχουμε δυο εξισώσεις. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μοντέλα συνόρθωσης, η μορφή των εξισώσεων και ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός φωτοσταθερών για κάθε μοντέλο.

Πίνακας 22: Μοντέλα συνόρθωσης για το Σύστημα της Εικόνας

Σύστημα Εικόνας		
Μοντέλα συνόρθωσης		Αριθμός Φωτοσταθερών
Μετάθεση	$x' = x + a_0, y' = y + b_0$	1
Μετάθεση και Κλίμακα	$x' = a_0 + a_1x$ $y' = b_0 + b_1y$	2
Αφινικός Μετασχηματισμός	$x' = a_0 + a_1x + a_2y$ $y' = b_0 + b_1y + b_2y$	3
Πολυώνυμα 2 ^{ου} Βαθμού	$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$ $y' = b_0 + b_1y + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$	6

όπου x , y είναι οι εικονοσυντεταγμένες και x' , y' οι διορθωμένες τιμές των εικονοσυντεταγμένων που έχουν βελτιωθεί λόγω της χρήσης των παραπάνω μοντέλων.

Τα μοντέλα συνόρθωσης για το σύστημα της εικόνας είναι παρόμοια με εκείνα του γεωδαιτικού συστήματος. Στο πρώτο μοντέλο μετασχηματισμού για να επιτευχθούν καλύτερες τιμές για τις συντεταγμένες x' , y' προσθέτουμε τα διανύσματα μετάθεσης a_0 και b_0 στις συντεταγμένες της εικόνας x και y , αντίστοιχα. Στο δεύτερο μοντέλο χρησιμοποιούνται ακόμη δυο συντελεστές κλίμακας a_1 και b_1 για τη διόρθωση της μη ενιαίας κλίμακας. Τέλος, στο τρίτο και τέταρτο μοντέλο έχουμε, αντίστοιχα, έναν αφινικό μετασχηματισμό και έναν πολυωνυμικό μετασχηματισμό δευτέρου βαθμού.

Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται εφαρμογές των τεσσάρων μοντέλων συνόθωσης σε δορυφορικές εικόνες του IKONOS και του Quick-Bird. Το κάθε μοντέλο χρησιμοποιεί τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό φωτοσταθερών. Η επιπλέον χρήση φωτοσταθερών γίνεται για τη βελτίωση της ακρίβειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

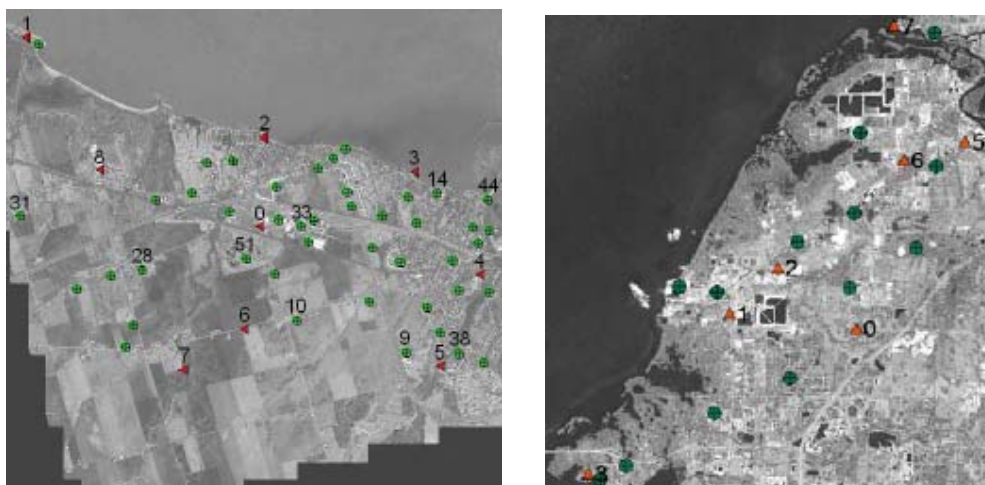
4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 Εφαρμογές Μοντέλων Συνόρθωσης σε Δορυφορικές Εικόνες IKONOS και Quick-Bird

Δεδομένα

Η συλλογή των παγχρωματικών στερεοσκοπικών εικόνων του IKONOS χωρικής ανάλυσης 1 m, που παρουσιάζεται εδώ, έγινε τον Μάιο του 2002 σε περιοχή του Οχάιο των Η.Π.Α. Η συλλογή των παγχρωματικών στερεοσκοπικών εικόνων του Quick-Bird, χωρικής ανάλυσης 61 cm, έγινε τον Σεπτέμβριο του 2003 στην Φλόριντα των Η.Π.Α. Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν αποκτήθηκαν με τη χρήση GPS και η ακρίβεια των φωτοσταθερών αυτών, μετά από φωτογραμμετρικό τριγωνισμό αεροφωτογραφίων των παραπάνω περιοχών, είναι 6 cm οριζοντιογραφικά και 9 cm υψομετρικά. Η ακρίβεια των σημείων ελέγχου εκτιμάται στο 0.5 m.

Οι εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου μετρήθηκαν χειροκίνητα. Οι γωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων υπολογίστηκαν φωτογραμμετρικά με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (RFCs). Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο εικόνες (Εικ. 37, 38), μια από τον IKONOS και μια του Quick-Bird που δείχνουν τη κατανομή των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου, και ο Πίνακας 23 που δείχνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, για τις εικόνες του Quick-Bird, που υπολογίστηκε με βάση τις τιμές από τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής και τα μετρημένα φωτοσταθερά.



Εικόνες 37, 38: Κατανομή φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου στις εικόνες του IKONOS και του Quick-Bird, αντίστοιχα.

Πίνακας 23: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα στις παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες του Quick-Bird

RMS	X	Y	Z
Παγχρωματικές Εικόνες	8.846 m	8.738 m	12.667 m
Πολυφασματικές Εικόνες	8.594 m	7.498 m	32.296 m

Αποτελέσματα

Στους τέσσερις επόμενους πίνακες, δύο για το γεωδαιτικό σύστημα και δύο για το σύστημα της εικόνας, έχουμε τις βελτιωμένες τιμές των φωτοσταθερών. Είναι εμφανής η βελτίωση της ακρίβειας που επιτεύχθηκε στις στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS και του Quick-Bird με τη χρήση των μοντέλων συνόρθωσης. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται ακόμη η μέθοδος συνόρθωσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε μέθοδο, ο αριθμός των φωτοσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν, ποιά είναι τα φωτοσταθερά αυτά και πώς είναι κατανεμημένα στις εικόνες.

Πίνακας 24: Ακρίβεια φωτοσταθερών στο γεωδαιτικό σύστημα για τις εικόνες του IKONOS

Μοντέλο	Αρ. Φ	Κατανομή Φωτοσταθ.		RMS σε (m)			Μέγιστη Διαφορά(m)		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Μετάθεση	1	1		1.000	0.733	2.264	3.424	2.079	4.606
Μετάθεση και Κλίμακα	2	along-track	3-9	1.118	0.693	2.187	3.859	1.816	5.524
		cross-track	3-8	1.032	0.822	2.222	3.673	2.867	5.984
	4	1-3-5-7		1.192	0.626	2.008	3.824	1.650	4.943
	6	0-2-4-5-6-8		1.068	0.712	1.941	3.926	2.034	4.639
Αφινικός Μετασχηματισμός	4	1-3-5-7		1.525	0.645	3.217	4.871	1.488	5.850
	6	1-3-4-5-7-8		1.179	0.736	1.678	4.498	2.098	4.195

Πίνακας 25: Ακρίβεια φωτοσταθερών στο γεωδαιτικό σύστημα για τις εικόνες του Quick-Bird

Μοντέλο	Αρ. Φ	Κατανομή Φωτοσταθ.		RMS σε (m)			Μέγιστη Διαφορά(m)		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Μετάθεση	1	1		0.437	0.631	0.815	0.719	1.003	1.361
Μετάθεση και Κλίμακα	2	along-track	2-7	0.843	1.152	1.131	1.283	2.286	1.553
		cross-track	3-6	0.308	1.071	0.912	0.383	1.384	1.328
	4	0-3-5-7		0.272	0.612	0.523	0.396	0.724	0.650
	6	5-6-3-7-2-0		0.447	0.243	0.624	0.447	0.243	0.624
Αφινικός Μετασχηματισμός	4	0-3-5-7		0.206	0.794	0.809	0.308	1.130	0.955
	6	5-6-3-7-2-0		0.280	0.570	0.429	0.280	0.570	0.429

Πίνακας 26: Ακρίβεια φωτοσταθερών στο σύστημα της εικόνας για τις εικόνες του IKONOS

Μοντέλο	Αρ. Φ	Κατανομή Φωτοσταθ.		RMS σε (m)			Μέγιστη Διαφορά(m)		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Μετάθεση	1	5		1.365	0.631	1.355	3.702	1.530	3.219
Μετάθεση και Κλίμακα	2	along-track	1-3	1.202	1.214	2.855	3.856	2.577	7.786
		cross-track	5-1	1.318	0.653	1.272	4.099	1.385	2.821
	4	2-3-5-6		1.366	0.658	1.163	4.017	1.531	2.757
	6	1-3-4-5-7-8		1.350	0.651	1.233	4.225	1.448	2.872
Αφινικός Μετασχηματισμός	4	1-3-5-7		1.373	0.500	1.288	3.888	1.170	3.006
	6	1-3-4-5-7-8		1.431	0.597	1.137	4.230	1.502	2.787
Πολυώνυμα 2 ^{ον} Βαθμού	6	0-2-3-4-6-8		1.524	1.287	1.537	5.915	5.167	4.505

Πίνακας 27: Ακρίβεια φωτοσταθερών στο σύστημα της εικόνας για τις εικόνες του Quick-Bird

Μοντέλο	Αρ. Φ	Κατανομή Φωτοσταθ.		RMS σε (m)			Μέγιστη Διαφορά(m)		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Μετάθεση	1	1		0.619	0.669	0.425	0.983	0.960	0.726
Μετάθεση και Κλίμακα	2	along-track	1-7	0.942	0.689	0.494	1.396	1.266	0.811
		cross-track	3-6	0.555	1.045	0.445	0.943	1.357	0.735
	4	0-3-5-7		0.291	0.591	0.378	0.398	0.700	0.585
	6	5-6-3-7-2-0		0.451	0.241	0.175	0.451	0.241	0.175
Αφινικός Μετασχηματισμός	4	0-3-5-7		0.284	0.789	0.362	0.327	0.895	0.539
	6	5-6-3-7-2-0		0.401	0.463	0.174	0.401	0.463	0.174
Πολύωνυμα 2 ^{ου} Βαθμού	6	5-6-3-7-1-0		0.530	0.706	0.342	0.530	0.706	0.342

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Μετάθεση

Το μοντέλο αυτό προσφέρει έναν απλό τρόπο για τη βελτίωση της ακρίβειας του γεωδαιτικού συστήματος και του συστήματος της εικόνας, με τη χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού. Για τις εικόνες του IKONOS το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μικρότερο από 1 m οριζοντιογραφικά και 2.5 m υψομετρικά, ενώ για τις εικόνες του Quick-Bird το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μικρότερο από 1 m οριζοντιογραφικά και 1.2 m υψομετρικά. Γενικά, η ακρίβεια δεν έχει άμεση σχέση με τη θέση των φωτοσταθερών που χρησιμοποιήθηκαν. Όμως, στη συγκεκριμένη περίπτωση η ποιότητα του φωτοσταθερού παίζει ρόλο αφού χρησιμοποιείτε μόνο ένα.

Μετάθεση και Κλίμακα

Για αυτό το μοντέλο απαιτούνται τουλάχιστον δύο φωτοσταθερά. Στο γεωδαιτικό σύστημα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ελαφρώς μικρότερο όταν τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιούνται είναι κατανομημένα κατά την διεύθυνση cross-track. Για μεγαλύτερη βελτίωση των αποτελεσμάτων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερα φωτοσταθερά, ομοιόμορφα κατανομημένα. Στις εικόνες του Quick-Bird με τη χρήση τεσσάρων φωτοσταθερών το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, στο γεωδαιτικό και στο σύστημα της εικόνας, είναι μικρότερο από 62 cm οριζοντιογραφικά και 53 cm υψομετρικά, ενώ με τη χρήση 6 φωτοσταθερών παίρνουμε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

Αφινικός Μετασχηματισμός

Στο γεωδαιτικό σύστημα οι επιπλέον παράμετροι του αφινικού μετασχηματισμού και

τα φωτοσταθερά δεν επιφέρουν βελτίωση των αποτελεσμάτων σε σχέση με το μοντέλο μετάθεσης και κλίμακας. Από την άλλη μεριά, στο σύστημα της εικόνας με τη χρήση 6 φωτοσταθερών έχουμε βελτίωση των τιμών, ιδιαίτερα υψομετρικά. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τις εικόνες του Quick-Bird είναι μικρότερο από 50 cm οριζοντιογραφικά και 20 cm υψομετρικά.

Πολύωνυμο 2^ο Βαθμού

Η προσθήκη των παραμέτρων από το πολύωνυμο δευτέρου βαθμού απαιτεί τη χρήση αρκετών φωτοσταθερών και η εφαρμογή του μοντέλου αυτού στο σύστημα της εικόνας δεν δίνει σημαντικά βελτιωμένες τιμές σε σύγκριση με τα άλλα τρία μοντέλα. Γενικά, τα υψηλού βαθμού πολύωνυμα είναι ευαίσθητα, απαιτούν μεγάλο αριθμό φωτοσταθερών και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα απέναντι στα άλλα μοντέλα.

4.2 Γεωμετρική Επεξεργασία Εικόνων του IKONOS

4.2.1 Επεξεργασία Εικόνων Επιπέδου ‘Geo’

Έως σήμερα έχουν γίνει διάφορες έρευνες για την ακρίβεια των προϊόντων IKONOS. Οι εφαρμογές, λοιπόν, που έγιναν για την αξιολόγηση της ακρίβειας των παγχρωματικών στερεοσκοπικών εικόνων του IKONOS, με χωρική ανάλυση 1 m και με επίπεδο επεξεργασίας ‘Geo’, έδειξαν ότι η εφικτή ακρίβεια φτάνει τα 40 - 50 cm οριζοντιογραφικά και τα 60 - 80 cm υψομετρικά. Η παραπάνω ακρίβεια επιτεύχθηκε με τη χρήση μοντέλου κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (RFC), με 78 παραμέτρους για κάθε εικόνα και στη συνέχεια εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού, με χρήση 4 μόνο φωτοσταθερών σωστά κατανομημένων στην εικόνα για τη βελτίωση του συστηματικού σφάλματος που εμφανίζεται στις γεωδαιτικές συντεταγμένες. Ακόμη, η αξιολόγηση των προϊόντων επίπεδου επεξεργασίας ‘Geo’ του IKONOS έδειξε ότι η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους και μιας ορθοφωτογραφίας κυμαίνεται μεταξύ 1 με 2 m. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα IKONOS, το γεωμετρικό μοντέλο, τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων του και η ακρίβεια των προϊόντων του.

Δεδομένα

Στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS, επιπέδου επεξεργασίας ‘Geo’, που αποκτήθηκαν στις 19 Μαρτίου του 2001. Η περιοχή απεικόνισης είναι από τη λίμνη Ίρι στο Οχάιο των Η.Π.Α και έχει έκταση 11 km x 11 km. Τα δυο στερεοζεύγη των εικόνων έχουν 8796 x 7900 pixel το πρώτο και 8708 x 7480 pixel το δεύτερο. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν 10 σημεία ελέγχου υψηλής ακρίβειας, που αποκτήθηκαν από GPS, 57 φωτοσταθερά και 12 στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες της περιοχής. Η ακρίβεια των φωτοσταθερών ύστερα από τον αεροτριγωνισμό και τη συνόρθωση εκτιμάται στα 0.3 m οριζοντιογραφικά και τα 0.5 m υψομετρικά.

Γεωμετρικό Μοντέλο

Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων του IKONOS δίνεται σε κλασματική πολυωνυμική μορφή (RPC). Το

μοντέλο αυτό συνδέει το σύστημα της εικόνας με το γεωδαιτικό σύστημα και η προσέγγισή του προκύπτει από την προσαρμογή των παρακάτω πολυωνύμων στο φυσικό μοντέλο του αισθητήρα. Τα πολυώνυμα έχουν την ακόλουθη μορφή:

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

όπου :

$$\begin{aligned} P(X, Y, Z) = & a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + a_6XZ + a_7Y^2 \\ & + a_8YZ + a_9Z^2 + a_{10}X^3 + a_{11}X^2Y + a_{12}X^2Z + a_{13}XY^2 + a_{14}XYZ \\ & + a_{15}XZ^2 + a_{16}Y^3 + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 + a_{19}Z^3 \end{aligned}$$

Επομένως τα πολυώνυμα έχουν 78 παραμέτρους και παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} x &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_{18} \ a_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(1 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ \dots \ b_{18} \ b_{19})^T} \\ y &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_{18} \ c_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ YZ^2Z^3)(1 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ \dots \ d_{18} \ d_{19})^T} \end{aligned}$$

Τα x, y είναι οι συντεταγμένες κάθε σημείου στην εικόνα σε στήλες και γραμμές. Τα X, Y, Z είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες κάθε σημείου στο γεωδαιτικό σύστημα WGS84. Τα X, Y αντιπροσωπεύουν το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, σε μοίρες, του κάθε σημείου και το Z είναι το ύψος του ελλειψοειδούς, που μετριέται σε μέτρα.

Έτσι, με τις παραπάνω σχέσεις από τις συντεταγμένες των σημείων στην εικόνα μπορούν να υπολογιστούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων. Όμως, στις συντεταγμένες αυτές παρατηρείται ένα συστηματικό γραμμικό σφάλμα, που μπορεί να βελτιωθεί με εφαρμογή ενός αφινικού μετασχηματισμού. Οι εξισώσεις του αφινικού μετασχηματισμού έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} X &= a_o + a_1X_{RF} + a_2Y_{RF} + a_3Z_{RF} \\ Y &= b_o + b_1X_{RF} + b_2Y_{RF} + b_3Z_{RF} \\ Z &= c_o + c_1X_{RF} + c_2Y_{RF} + c_3Z_{RF} \end{aligned}$$

όπου X, Y, Z οι βελτιωμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες και X_{RF}, Y_{RF}, Z_{RF} οι γεωδαιτικές συντεταγμένες που υπολογίστηκαν από τα κλάσματα πολυωνυμικής μορφής.

Αποτελέσματα

Η συνόρθωση έγινε με ελάχιστα τετράγωνα και για την πραγματοποίησή της χρησιμοποιήθηκαν 9 ομοιόμορφα καταναμημένα φωτοσταθερά για το πρώτο στερεοζεύγος και 8 για το δεύτερο. Για τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιή-

θηκαν 44 σημεία ελέγχου στο πρώτο στερεοζεύγος και 49 στο δεύτερο. Ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός φωτοσταθερών για τον αφινικό μετασχηματισμό είναι 4. Στον Πίνακα 28 παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) για τις βελτιωμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες μετά τη διαδικασία συνόρθωσης με ελάχιστα τετράγωνα και τον αφινικό μετασχηματισμό.

Πίνακας 28: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) για τις βελτιωμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες

RMS		
X	Y	Z
1.2 m	0.9 m	1.6 m

Η ακρίβεια των φωτοσταθερών που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των κλασμάτων πολωνυμικής μορφής παρουσίαζε ένα συστηματικό σφάλμα της τάξης των 14 m. Οι επόμενοι Πίνακες δείχνουν την βελτίωση της ακρίβειας των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου για τις στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS ανάλυσης 1 m ύστερα από την εφαρμογή του αφινικού μετασχηματισμού.

Πίνακας 29: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Φωτοσταθερών

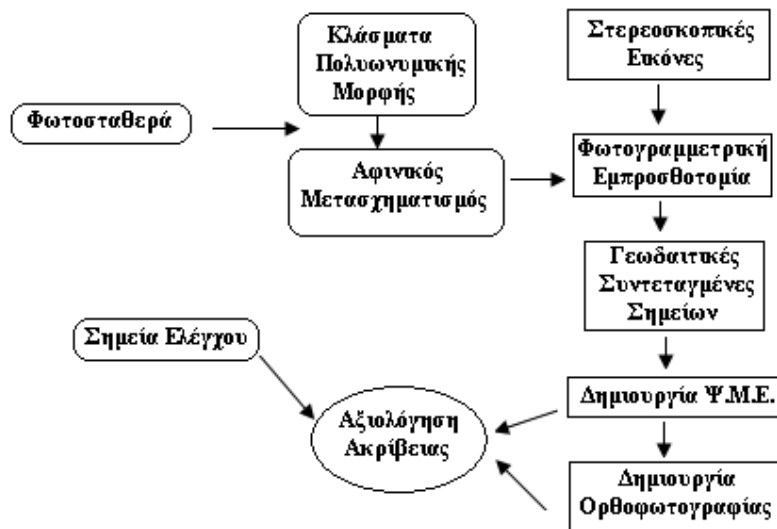
RMS Φωτοσταθερών σε (m)			
Στερεοζεύγος	X	Y	Z
1	0.638	0.483	1.054
2	0.453	0.609	0.976

Πίνακας 30 : Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Σημείων Ελέγχου

RMS Σημείων Ελέγχου σε (m)			
Στερεοζεύγος	X	Y	Z
1	1.342	1.051	1.632
2	0.991	0.787	1.513

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και Ορθοφωτογραφία

Με βάση τις βελτιωμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες, που προέκυψαν από τη μέθοδο των κλασμάτων πολωνυμικής μορφής και τον αφινικό μετασχηματισμό, δημιουργήθηκε αυτόματα το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) σε κλίμακα 1 m. Η παραγωγή των ορθοφωτογραφιών έγινε με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η ακρίβεια των προϊόντων αυτών εκτιμάται ότι είναι καλύτερη από 2 m οριζοντιογραφικά, για τις ορθοφωτογραφίες, και περίπου 3 m υψομετρικά, για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.



Εικόνα 39: Δημιουργία ΨΜΕ και ορθοφωτογραφίας

Πίνακας 31: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα σημείων ΨΜΕ και ορθοφωτογραφιών

RMS σε (m)			
Στερεοζεύγος	X	Y	Z
1	1.889	1.217	3.219
2	1.581	1.446	2.934

Παρατηρήσεις

Το μοντέλο συνόρθωσης του αφινικού μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της ακρίβειας των προϊόντων του IKONOS εφαρμόστηκε σε επίπεδη περιοχή χωρίς ιδιαίτερες διαφορές στη μορφολογία του εδάφους. Είναι πιθανόν λοιπόν να μην έχουμε τα ίδια αποτελέσματα σε μια ορεινή περιοχή, με μεγαλύτερες διαφορές στο ανάγλυφο και να χρειαστούμε ένα διαφορετικό μοντέλο συνόρθωσης.

4.2.2 Επεξεργασία Εικόνων Επιπέδου ‘Reference’, ‘Precision’ και ‘Pro’

Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων δημιουργήθηκε με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (RFC). Για τον έλεγχο του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκαν στερεοσκοπικές εικόνες IKONOS με επίπεδα επεξεργασίας ‘Reference’, ‘Precision’ και ‘Pro’. Η συλλογή των εικόνων έγινε κατά την ίδια τροχιά, τον Μάιο του 2000. Ακόμη, έχουν υποστεί διορθώσεις λόγω της εσωτερικής γεωμετρίας του αισθητήρα, της καμπυλότητας της Γης και ραδιομετρικές διορθώσεις.

Στην περιοχή των εικόνων διατέθηκαν 10 φυσικά σημεία προσδιορισμένα με GPS. Τα φωτοσταθερά αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των παραμέτρων του

‘Precision’. Για την περίπτωση του ‘Reference’ και του ‘Pro’ τα 7 από αυτά θεωρήθηκαν ως πλήρη φωτοσταθέρα και τα 3 ως πλήρη σημεία ελέγχου, με τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις τους να συμμετέχουν στην επίλυση. Η κατανομή των σημείων που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει το σύνολο του μοντέλου και μετρήθηκαν επιπλέον 10 σημεία σύνδεσης για το ‘Reference’. Στην περίπτωση του ‘Precision’ δεν παρατηρήθηκαν φωτοσταθερά ή σημεία σύνδεσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αξιολόγηση της γεωμετρικής ακρίβειας των στερεοσκοπικών δεδομένων, που έγινε με βάση το διαθέσιμο δίκτυο σημείων.

Αποτελέσματα

Εικόνες με Επίπεδο Επεξεργασίας ‘Reference’

Με την εφαρμογή της μεθόδου των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής στις εικόνες με επίπεδο επεξεργασίας ‘Reference’ έχουμε τα εξής αποτελέσματα (Πίνακας 32).

Πίνακας 32: Ακρίβεια εικόνων με επίπεδο ‘Reference’

	X(m)	Y(m)	Z(m)	XY(m)	Αριθμός σημείων ελέγχου
RMS	5.59	3.48	4.02	6.58	10
Μέση διαφορά	5.22	2.82	2.67	-	
Μέγιστη διαφορά	7.11	5.83	5.58	-	

Στις παραπάνω τιμές παρατηρείται σημαντικό συστηματικό σφάλμα. Για την βελτίωσή του έγινε συνόρθωση με ελάχιστα τετράγωνα, όπου μέσω του ειδικού λογισμικού ImageStation της Z/I Imaging σκοπεύθηκαν φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου με κατάλληλο βάρος. Μετά από αυτήν τη διαδικασία το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μειώθηκε στο 1.50 m υψομετρικά και οριζοντιογραφικά, και το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους της συνόρθωσης είναι μικρότερο από την μονάδα.

Πίνακας 33: Βελτιωμένη ακρίβεια εικόνων επιπέδου ‘Reference’

	X(m)	Y(m)	Z(m)	XY(m)	Αριθμός σημείων ελέγχου
RMS	0.94	1.19	1.48	1.51	10
Μέση διαφορά	-0.24	-0.24	-0.28	-	
Μέγιστη διαφορά	-2.12	-1.98	-2.28	-	

Εικόνες με Επίπεδο Επεξεργασίας ‘Precision’

Με την εφαρμογή της μεθόδου των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής στις εικόνες με επίπεδο επεξεργασίας ‘Precision’ έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα, όπου παρατηρείται συστηματικό σφάλμα 0.71 m κατά τον άξονα των τετμημένων:

Πίνακας 34: Η ακρίβεια των εικόνων με επίπεδο Precision

	X(m)	Y(m)	Z(m)	XY(m)	Αριθμός σημείων ελέγχου
RMS	1.38	1.13	0.91	1.79	10
Μέση διαφορά	0.71	0.22	0.17	-	
Μέγιστη διαφορά	1.68	-1.84	1.75	-	

Οι τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, που προκύπτουν από τις εικόνες με επίπεδο ‘Reference’ ύστερα από τη προσθήκη φωτοσταθερών και τη συνόρθωση μέσω του λογισμικού ImageStation της Z/I Imaging, είναι πρακτικά ισοδύναμες με τιμές που παίρνουμε από τις εικόνες με επίπεδο επεξεργασίας ‘Precision’.

Εικόνες με Επίπεδο Επεξεργασίας ‘Pro’

Για τη συνόρθωση, μέσω του λογισμικού ImageStation, των εικόνων με επίπεδο επεξεργασίας ‘Pro’ σκοπεύθηκαν 7 φωτοσταθερά και 3 σημεία ελέγχου με κατάλληλο βάρος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα φωτοσταθερά είναι καλύτερο από 0.70 m οριζοντιογραφικά και 0.40 m υψομετρικά, το μεγαλύτερο υπόλοιπο της επίλυσης είναι καλύτερο από 1.50 m υψομετρικά και οριζοντιογραφικά, και το τυπικό σφάλμα της μονάδα βάρους της συνόρθωσης είναι μικρότερο από την μονάδα.

Γενικά, η συνόρθωση με ελάχιστα τετράγωνα που πραγματοποιήθηκε στις παραπάνω περιπτώσεις περιλαμβάνει διορθώσεις κατά τη διεύθυνση των γραμμών και των στηλών της εικόνας. Οι διορθώσεις αυτές είναι αντίστοιχες του επιπέδου επεξεργασίας των εικόνων που χρησιμοποιούνται και επηρεάζουν την εσωτερική γεωμετρία της εικόνας.

4.3 Επεξεργασία δορυφορικών εικόνων Quick-Bird

Γεωμετρικό Μοντέλο

Για την φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων του Quick-Bird χρησιμοποιήθηκε ένα ακριβές γεωμετρικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό προσεγγίζει το φυσικό μοντέλο του αισθητήρα περιέχοντας δεσμεύσεις για τον τρόπο συλλογής της εικόνας ως προς το χρόνο και συνδέει ως γραμμικά εξαρτώμενους από το χρόνο τους εξωτερικούς πρ-

σανατολισμούς κάθε γραμμής σάρωσης της εικόνας. Εκφράζεται από τις εξισώσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι:

- ◆ της θέσης στο χώρο
- ◆ των στροφών στο χώρο
- ◆ της πρώτης παραγώγου των παραπάνω στοιχείων ως προς το χρόνο

Το παραπάνω γεωμετρικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παγχρωματικά και πολυφασματικά δεδομένα, με κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων, για μια ή και περισσότερες εικόνες.

Επίσης, όπως σε μια τυπική φωτογραμμετρική επεξεργασία, έτσι και εδώ οι φωτογραμμετρικοί προσανατολισμοί περιλαμβάνουν τη μέτρηση:

- ✓ φωτοσταθερών
- ✓ σημείων σύνδεσης
- ✓ σημείων ελέγχου

Για όλα τα μετρημένα μεγέθη καθώς και για τα τροχιακά δεδομένα είναι δυνατός ο καθορισμός κατάλληλου βάρους.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η συνόρθωση με ελάχιστα τετράγωνα όπου υπολογίζονται οι 12 παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου, οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης και των σημείων ελέγχου. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν τα στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών για κάθε εικόνα και χρησιμοποιούνται για φωτογραμμετρικές διαδικασίες, όπως η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από στερεοσκοπικά μοντέλα και η δημιουργία ορθοφωτογραφιών.

Χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα:

Για τον έλεγχο του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν στερεοσκοπικές παγχρωματικές εικόνες του Quick-Bird από περιοχή της πολιτείας Ουάσιγκτον των Η.Π.Α. Οι λήψεις των εικόνων έχουν γίνει κατά την ίδια τροχιά, τον Αύγουστο του 2002, με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακόλουθου πίνακα. Το επίπεδο επεξεργασίας των εικόνων είναι 'Basic', δηλαδή έχουν υποστεί διορθώσεις λόγω της εσωτερικής γεωμετρίας του αισθητήρα καθώς και ραδιομετρικές διορθώσεις.

Πίνακας 35 : Χαρακτηριστικά των εικόνων του Quick-Bird

Εικόνα		«Αριστερή»	«Δεξιά»
Γωνία Θέασης	in-track	26° 4649	-27° 1236
	cross-track	9° 0866	6° 57116
Μέσο μέγεθος pixel	κατά τη διεύθυνση των στηλών	0.78 m	0.81 m
	κατά τη διεύθυνση των γραμμών	0.73 m	0.70 m

Στην περιοχή που απεικονίζει το στερεοσκοπικό μοντέλο του Quick-Bird διατέθηκαν 45 φυσικά σημεία προσδιορισμένα με μεθόδους διαφορικού GPS. Τα 14 από αυτά θεωρήθηκαν ως πλήρη φωτοσταθέρα, τα 12 ως πλήρη σημεία ελέγχου, με τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις τους να συμμετέχουν στην επίλυση, και τα υπόλοιπα 19 ως πλήρη σημεία ελέγχου που δεν παρατηρήθηκαν κατά το στάδιο των προσανατολισμών. Η κατανομή των σημείων που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει το σύνολο του μοντέλου και επιπρόσθετα μετρήθηκαν και 16 σημεία σύνδεσης.

Αποτελέσματα

Κατά τη φωτογραμμετρική συνόρθωση για τον υπολογισμό των προσανατολισμών χρησιμοποιήθηκαν φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις, γεωδαιτικές τιμές φωτοσταθερών, σημείων ελέγχου και προσεγγιστικά τροχιακά δεδομένα (ephemeris data) με κατάλληλο βάρος. Τα στατιστικά μεγέθη της επίλυσης έδειξαν ότι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα φωτοσταθερά είναι καλύτερο από 0.80 m οριζοντιογραφικά και 0.50 m υψομετρικά.

Επιπλέον, τα στατιστικά μεγέθη αυτά επαληθεύονται με μια σειρά ισοδύναμης ακρίβειας σημείων ελέγχου. Το μεγαλύτερο υπόλοιπο της επίλυσης είναι καλύτερο από 1.50 m υψομετρικά και οριζοντιογραφικά. Το τυπικό σφάλμα της μονάδα βάρους της συνόρθωσης του τριγωνισμού των δορυφορικών εικόνων του Quick-Bird είναι λίγο μεγαλύτερο από την μονάδα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το σχετικά μεγάλο βαθμό ελευθερίας δηλώνει την αξιοπιστία της επίλυσης και της αρχικής εκτίμησης του βάρους των μετρήσεων και των πρόσθετων παρατηρήσεων. Τα εναπομένοντα σφάλματα της συνόρθωσης δεν ακολουθούν κάποιο συστηματικό πρότυπο.

Τα φωτογραμμετρικά προϊόντα που δημιουργήθηκαν είναι :

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους
- ορθοφωτογραφίες

Το **ψηφιακό μοντέλο εδάφους** δημιουργήθηκε αυτόματα σε κανάβο 50 m και ελέγχθηκε χειροκίνητα για ύπαρξη χονδροειδών σφαλμάτων. Δεν έγινε μοντελοποίηση του μέσω γραμμών αλλαγής κλίσης, ανθρώπινων κατασκευών και τοπικών μεταβολών. Για την εξακρίβωση της γεωμετρικής ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους πραγματοποιήθηκε αντιπαραβολή με τον αριθμό των γνωστών σημείων εδάφους που εμφανίζονται στην περιοχή. Η διαφορά μεταξύ του μέγιστου υπολοίπου της επίλυσης του αεροτριγωνισμού και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μπορεί να αιτιολογηθεί από τη μη μοντελοποίηση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και λόγω του μεγέθους του κανάβου που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 36: Γεωμετρικός Έλεγχος ΨΜΕ

Γεωμετρικός Έλεγχος Ψ.Μ.Ε.				
Αριθμός Σημ.Ελέγχου	RMS	Ελάχιστη Διαφορά	Μέση Διαφορά	Μέγιστη Διαφορά
30	1.135 m	0.022 m	0.949 m	2.830 m

Η παραγωγή των **ορθοφωτογραφιών** έγινε με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ελέγχθηκαν γεωμετρικά σε αντιπαραβολή με τα σημεία εδάφους με γνωστή θέση. Το μέγεθος του pixel που επιλέχθηκε ήταν 0.80 m και διατηρήθηκε το ραδιομετρικό εύρος της αρχικής εικόνας. Ο έλεγχος που έγινε έδειξε ότι οι ορθοφωτογραφίες που παράχθηκαν με φωτογραμμετρική διαδικασία έχουν γεωμετρική ακρίβεια 1.20 m. Το γεγονός ότι μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι της ίδιας τάξης δηλώνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη διασπορά σφαλμάτων. Το μέγεθος του μέσου σφάλματος και κατά τους δυο άξονες δηλώνει ότι δεν υπάρχει κάποιο συστηματικό σφάλμα ή ότι αυτό είναι μικρό. Το μέγιστο σφάλμα που παρατηρήθηκε στον άξονα των τεταγμένων μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους δεν έχουν μοντελοποιηθεί γεωμορφολογικά τοπικές μεταβολές του αναγλύφου.

Πίνακας 37: Γεωμετρικός έλεγχος ορθοφωτογραφιών

Γεωμετρικός έλεγχος ορθοφωτογραφιών σε (m)	
Αριθμός σημείων ελέγχου	30
RMS σφάλμα κατά XY	1.21
Ελάχιστο σφάλμα κατά X	0.20
Μέγιστο σφάλμα κατά X	1.56
Ελάχιστο σφάλμα κατά Y	0.00
Μέγιστο σφάλμα κατά Y	2.35
Μέσο σφάλμα κατά X	-0.22
Μέσο σφάλμα κατά Y	-0.27
Μέσο σφάλμα κατά XY σε απόλυτη τιμή	1.11

Η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου, η επεξεργασία των δεδομένων και ο έλεγχος των προϊόντων έγινε στο παράδειγμα αυτό από την εταιρία Z/I Imaging Ελλάς, με χρήση του λογισμικού ImageStation.

4.4 Γεωμετρική Ακρίβεια Ορθοφωτογραφιών από Δορυφορικές Εικόνες

IKONOS και Quick-Bird

Η επιτροπή επιστημονικών ερευνών της Πολωνίας (Committee of Scientific Research of Poland) διεξήγαγε μια μελέτη για την αξιολόγηση της ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών που παράγονται από εικόνες του IKONOS και του Quick-Bird. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την έρευνα αυτή.

Δεδομένα

Οι στερεοσκοπικές παγχρωματικές εικόνες του IKONOS και του Quick-Bird αναφέ-

ρονται σε μια επίπεδη και μία ορεινή περιοχή της Πολωνίας. Για τη δημιουργία των ορθοφωτογραφιών χρησιμοποιήθηκαν παραμετρικά μοντέλα (parametrical model - PM) αλλά και προσεγγιστικά, με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής (RPC). Τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν αποκτήθηκαν με χρήση GPS και έχουν ακρίβεια εκατοστού.

Πίνακας 38: Χαρακτηριστικά των εικόνων IKONOS και Quick-Bird

Χαρακτηριστικά	ΔΟΥΥΦΟΡΟΙ			
	IKONOS		Quick-Bird	
Περιοχή	Πεδινή	Ορεινή	Πεδινή	Ορεινή
Ημερομηνία Απόκτησης	Μάιος 2003	Οκτώβριος 2003	Ιούνιος 2003	Ιούνιος 2003
Επίπεδο Επεξεργασίας	Basic	Basic	Geo Ortho Kit	Geo Ortho Kit
Χωρική Ανάλυση	0.61 m	0.61 m	1 m	1 m
Ραδιομετρική Ανάλυση	11 bit	11 bit	11 bit	11 bit
Ζώνη απεικόνισης	16 x 16 km	16 x 16 km	11 x 17 km	11 x 11 km
Γωνία Θέασης	5 °	12 °	7 °	14 °

Η μέθοδος των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής έχει αναλυθεί σε προηγούμενες εφαρμογές. Από την άλλη μεριά, ένα παραμετρικό μοντέλο περιγράφει τις ακριβείς σχέσεις ανάμεσα στο έδαφος και τις εικόνες και βασίζεται στο μοντέλο του αισθητήρα. Επομένως οι όροι του έχουν ακριβή γεωμετρική σημασία και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το μοντέλο αυτό είναι οι εξισώσεις συγγραμμικότητας. Ακόμη τα παραμετρικά μοντέλα είναι λιγότερο ευαίσθητα στην κατανομή των σημείων.

Στους επόμενους Πίνακες παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για κάθε γεωμετρικό μοντέλο και για την αντίστοιχη περιοχή μελέτης. Για τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής χρησιμοποιήθηκαν 10 φωτοσταθερά. Από την άλλη μεριά, ο αριθμός των σημείων ελέγχου για κάθε ένα παραμετρικό μοντέλο ποικίλλει. Για τις εικόνες του IKONOS χρησιμοποιήθηκαν 35 σημεία ελέγχου στη πεδινή περιοχή και 27 στην ορεινή. Για τις εικόνες του Quick-Bird χρησιμοποιήθηκαν 17 σημεία ελέγχου στη πεδινή περιοχή και 91 στην ορεινή. Οι τιμές του Z θεωρήθηκαν γνωστές και ελήφθησαν από τα φωτοσταθερά που μετρήθηκαν με GPS και από δυο ψηφιακά μοντέλα εδάφους με ακρίβεια 5 - 7 m το ένα και 1 - 3 m το άλλο.

Πίνακας 39: Ακρίβεια IKONOS (με τιμές του Z από τα φωτοσταθερά)

Περιοχή Απεικόνισης	Γεωμετρικό Μοντέλο	RMS σε m		Μέγιστη Διαφορά σε m	
		X	Y	X	Y
Επίπεδη	Παραμετρικό Μοντέλο	0.96	0.84	1.77	2.02
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	0.89	0.86	2.00	2.40
Ορεινή	Παραμετρικό Μοντέλο	0.85	1.22	1.62	3.23
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	1.03	1.20	2.92	2.05

Πίνακας 40: Ακρίβεια Quick-Bird (με τιμές του Z από τα φωτοσταθερά)

Περιοχή Απεικόνισης	Γεωμετρικό Μοντέλο	RMS σε m		Μέγιστη Διαφορά σε m	
		X	Y	X	Y
Επίπεδη	Παραμετρικό Μοντέλο	0.94	0.64	2.25	1.44
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	1.31	1.05	3.93	1.94
Ορεινή	Παραμετρικό Μοντέλο	1.22	1.00	5.89	3.03
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	2.75	1.51	6.47	3.21

Πίνακας 41: Ακρίβεια IKONOS και Quick-Bird για την ορεινή περιοχή με τιμές του Z από τα ΨΜΕ

Δορυφόρος	Γεωμετρικό Μοντέλο	RMS σε m		Μέγιστη Διαφορά σε m	
		X	Y	X	Y
IKONOS	Παραμετρικό Μοντέλο	1.44	0.95	2.94	2.09
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	0.90	0.83	2.90	2.68
Quick Bird	Παραμετρικό Μοντέλο	1.05	1.94	3.45	6.08
	Προσεγγιστικό Γεωμετρικό Μοντέλο (RF)	2.70	1.52	5.84	3.14

Παρατηρήσεις

Με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής, για τις επίπεδες περιοχές με τη χρήση, για τις τιμές του Z, των σημείων που μετρήθηκαν με GPS ή του ΨΜΕ, η ακρίβεια (RMS) για τις εικόνες του IKONOS φτάνει το 1.5 m ανεξάρτητα από τον αριθμό των φωτοσταθερών. Ακόμη και με τη χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού παρέχεται ικανοποιητική ακρίβεια. Από την άλλη μεριά, το παραμετρικό γεωμετρικό μοντέλο απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον 9 φωτοσταθερών, χωρίς να παρέχει ιδιαίτερα καλύτερη ακρίβεια. Για τις εικόνες του Quick-Bird και τις ίδιες συνθήκες, η ακρίβεια με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής φτάνει τα 2 m, με τη χρήση τουλάχιστον 2 φωτοσταθερών. Ενώ για το παραμετρικό μοντέλο και με τη χρήση 8 φωτοσταθερών η ακρίβεια που μπορούμε να έχουμε φτάνει το 1 m.

Για τις ορεινές περιοχές στις εικόνες του IKONOS η ακρίβεια με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής κυμαίνεται πάλι στο 1.5 m καθώς και για το παραμετρικό μοντέλο, με τη χρήση 7 φωτοσταθερών. Στις εικόνες του Quick-Bird η ακρίβεια είναι πάνω από 3 m, με τη χρήση τουλάχιστον 2 φωτοσταθερών, με τη μέθοδο των κλασμάτων πολυωνυμικής μορφής. Αλλά για το παραμετρικό γεωμετρικό μοντέλο η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί στο διπλάσιο, με τη χρήση τουλάχιστον 9 φωτοσταθερών.

4.5 Εξαγωγή Κτιρίων από Στερεοσκοπικές Εικόνες IKONOS

Δεδομένα

Η συλλογή των εικόνων έγινε τον Μάρτιο και τον Ιούλιο του 2000 στην περιοχή της Μελβούρνης, στην Αυστραλία. Ακόμη, οι στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS που χρησιμοποιήθηκαν στην ακόλουθη εφαρμογή έχουν επίπεδο επεξεργασίας ‘Geo’.

Πίνακας 42: Χαρακτηριστικά των εικόνων του IKONOS

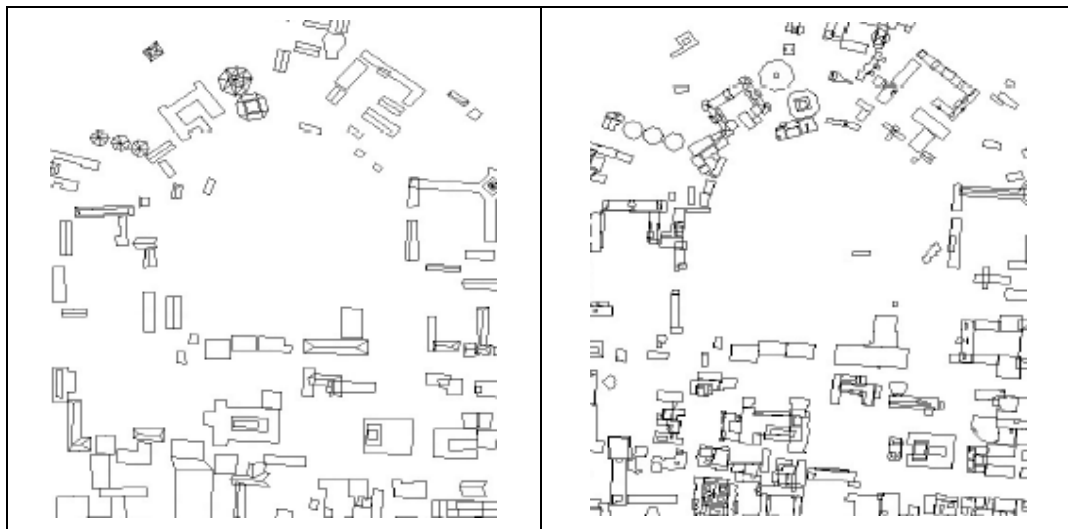
Εικόνα		«Αριστερή»	«Δεξιά»
Χωρική Ανάλυση	παγχρωματικό	1 m	1 m
	πολυφασματικό	4 m	4 m
Nominal Collection Azimuth		136.7°	71.9°
Nominal Collection Elevation		61.4°	60.7°

Χρησιμοποιήθηκαν (ως σημεία ελέγχου) 19 γωνίες από τις σκεπές των κτιρίων της Πανεπιστημιούπολης της Μελβούρνης. Τα σημεία αυτά, τα οποία είναι αναγνωρίσιμα στις εικόνες, αποκτήθηκαν με ακριβείς τοπογραφικές εργασίες με GPS και η ακρίβεια τους είναι 0.7 m οριζοντιογραφικά και 0.6 m υψομετρικά.

Ακόμη, για την αξιολόγηση του τρισδιάστατου μοντέλου, που δημιουργήθηκε από τις στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS, χρησιμοποιήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής που δημιουργήθηκε από αεροφωτογραφία της πανεπιστημιούπολης σε κλίμακα 1:15.000.

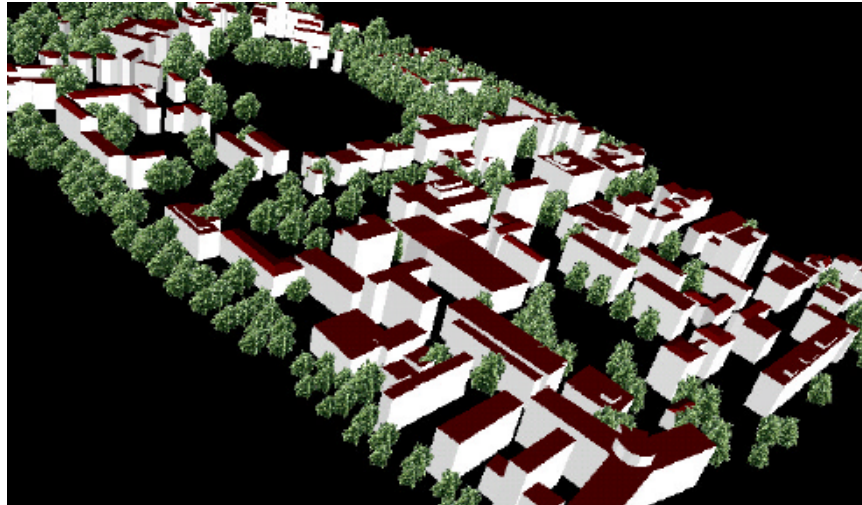
Αποτελέσματα

Για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων αρχικά, με τη χρήση ειδικών προγραμμάτων, μετρήθηκαν χειροκίνητα τα κτίρια της Πανεπιστημιούπολης, στη συνέχεια έγινε η σχεδιάσή τους (Εικόνες 40, 41) και στο τέλος έχουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση των κτιρίων (Εικόνα 42).

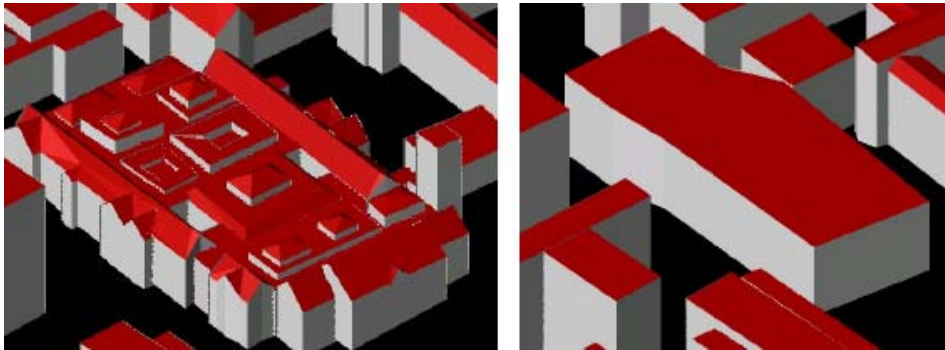


Εικόνες 40, 41: Τα σχέδια των κτιρίων της Πανεπιστημιούπολης της Μελβούρνης που δημιουργήθηκαν αριστερά από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:15.000 και δεξιά από στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS.

Τα αποτελέσματα από αυτές τις επεξεργασίες έδειξαν ότι στις εικόνες του IKONOS αρκετά σημεία από τα κτίρια δεν φαίνονταν και κατ' επέκταση δεν μετρήθηκαν. Έτσι, όπως φαίνεται και στις επόμενες εικόνες, το 15% των κτιρίων του μοντέλου που δημιουργήθηκε μέσω των αεροφωτογραφιών δεν απεικονίζονται στο μοντέλο που προέλυσε από τις εικόνες του IKONOS, αφού τα κτίρια δεν ήταν εμφανή στις εικόνες και δεν μετρήθηκαν. Επίσης, κάποια κτίρια με πιο περίπλοκη κατασκευή απεικονίζονται πιο απλουστευμένα, έχοντας μία γενικευμένη μορφή με αποκλίσεις από το πραγματικό τους σχήμα και μέγεθος.



Εικόνα 42: Τρισδιάστατο Μοντέλο της Πανεπιστημιούπολης της Μελούρνης από τις στερεοσκοπικές εικόνες του IKONOS.



Εικόνες 43, 44: Σύγκριση της 3D απεικόνισης ενός κτιρίου προερχόμενου από αεροφωτογραφίες (αριστερά) και εικόνες του IKONOS (δεξιά).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την εκτόξευση εμπορικών δορυφόρων με υψηλή χωρική ανάλυση, οι δορυφορικές εικόνες άρχισαν να κερδίζουν έδαφος, σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες, στον τομέα της Φωτογραμμετρίας και της Τηλεπισκόπησης, αφού έχουν μεγάλο εύρος απεικόνισης και σταθερή γεωμετρική και ραδιομετρική ανάλυση.

Τα υψηλής ανάλυσης προϊόντα που παρέχουν άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως στον πολεοδομικό σχεδιασμό, τη χαρτογράφηση απομακρυσμένων περιοχών, τη γεωργία, την παρακολούθηση καταστροφών και για περιβαλλοντικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς.

Οι ψηφιακές στερεοσκοπικές δορυφορικές εικόνες όχι μόνο μπορούν να παρέχουν υψηλής ποιότητας δεδομένα αλλά μας δίνουν και τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε αυτά τα δεδομένα, όπου μέσα από την εφαρμογή παραδοσιακών φωτογραμμετρικών διαδικασιών μπορούμε να πάρουμε ψηφιακά μοντέλα εδάφους, ορθοφωτογραφίες, γενικά ακριβείς οριζοντιογραφικές και υψομετρικές πληροφορίες για χαρτογραφικούς και τοπογραφικούς σκοπούς. Οι τελευταίας γενιάς δορυφόροι έχουν ανοίξει νέους δρόμους στην παρατήρηση της γης και στην ψηφιακή χαρτογράφηση.

Όμως παρ' όλο που η ανάλυση των δορυφόρων απεικονίσεων υνεχώς αυξάνει, η ανάλυση αυτή παραμένει ακόμα σχετικά περιορισμένη (όχι κάτω των 50 cm) απέναντι στην ανάλυση που μπορούν να επιδείξουν οι ψηφιακές αεροφωτογραφίες. Επιπλέον, ακόμα και στην ίδια ανάλυση, οι δορυφορικές απεικονίσεις δεν είναι ποιοτικά εφάμιλλες των από αέρα λήψεων λόγω της πολύ μεγάλης διαφοράς στην απόσταση λήψης. Έτσι, προς το παρόν τουλάχιστον, παραμένουν κλίμακες απόδοσης και εφαρμογές που μπορούν να αντιμετωπιστούν φωτογραμμετρικά μόνο μέσω ψηφιακών αεροφωτογραφιών.

Βιβλιογραφία

Baltsavias E., Pateraki M., Zhang L., 2001. Radiometric and geometric evaluation of Ikonos Geo Images and their use for 3D building modelling. *Proc. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001"*, Hannover, 19-21 Sept.

Baudoin A., Schroeder M., Valorge C., Bernard M., Rudowski V., 2004. The HRS-SAP initiative: A scientific assessment of the high resolution stereoscopic instrument on board of SPOT 5 by ISPRS investigators. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, July 12-23.

Büyüksalih G., Akcin H., Jacobsen K., 2006. Geometry of Orbview-3 images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-1/W41

Γεωργίου Η., Μαυρέλλης Γ., Σαντριβανόπουλος Σ., 2000. Παραγωγή χαρτών με δορυφορικά δεδομένα των οποίων η ακριβής γεωμετρία λήψης δεν είναι γνωστή. *6^ο Εθνικό Συνέδριο Χαρτογραφίας ΧΕΕ*, Αθήνα.

Δελτσίδης Π., 2005. Δορυφορική Φωτογραμμετρία, Γ. Υ. Σ.

Di K., Ma R., Li R., 2002. Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, τεύχος Απριλίου.

Di K., Ma R., Li R., 2003. Geometric processing of Ikonos stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, τεύχος Αυγούστου.

Grodecki J., Dial G., 2001. Ikonos geometric accuracy. *Proc. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001"*, Hannover, 19-21 Sept.

Κομζιά Β., 2005. *Δορυφόροι Υψηλής Χωρικής Ανάλυσης*. Εργασία στο μάθημα 'Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι', Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Γεωπληροφορική, ΕΜΠ.

Kressler F. P., Kim Y. S., Schiller C., Steinnocher K., 2006. KOMPSAT-1 and KOMPSAT -2 from a European perspective. Second International Workshop 'The Future of Remote Sensing', Antwerp 17 - 18 October.

Lemmens M., 2006. Product survey on high-resolution satellite imagery. *GIM International*, τεύχος Απριλίου.

Niu X., Wang J., Di K., Lee J.-D., Li R., 2004. Geometric modelling and photogrammetric processing of high resolution satellite imagery. *Proceedings of ASPRS Annual Conference*, Denver, Colorado, May 23-28.

Tao, C. V., Hu, Y., 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, τεύχος Δεκεμβρίου.

Τουρνάς Ε., 2002. Γεωμετρική Διόρθωση Δορυφορικών Εικόνων Ikonos. 2^ο Συνέδριο Hellas GI, Αθήνα.

Toutin T., 2003. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), pp. 1893-1924.

Wolniewicz W., 2004. Assessment of geometric accuracy of VHR satellite images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35(B1).

Ιστοσελίδες

http://en.wikipedia.org/wiki/EROS_%28satellite%29

www.spotimage.fr/web/en/1155-kompsat-2-images.php

<http://www.spotimage.fr/web/en/167-satellite-image-spot-formosat-2-kompsat-2>

<http://www.spotimage.com>

<http://www.eurockot.com/alist.asp?cnt=20040664&main=3&subm=34>

<http://www.eurockot.com/alist.asp?cnt=20040704&main=5>

http://www.terralink.co.nz/products_services/satellite/quickbird_satellite_images/

http://www.terralink.co.nz/products_services/satellite/eros_satellite_images/

<http://www.geoserve.nl/Gallery.htm>

http://www.terralink.co.nz/products_services/satellite/ikonos_satellite_images/

http://www.terralink.co.nz/products_services/satellite/spot_satellite_images/

<http://www.spotimage.fr/web/944-images-formosat-2.php>

<http://www.digitalglobe.com/>

http://www.digitalglobe.com/file.php/515/QuickBird_Datasheet_web.pdf

<http://www.digitalglobe.com/index.php/85/QuickBird>

www.geog.ucsb.edu

www.crisp.nus.edu.sg

www.earth.esa.int

www.geoinformation.gr

www.n2yo.com

www.spatialmapping.com

www.pcigeomatics.com

www.vladimirkush.com