



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. 'ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ'

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΑΤΕΡΙΝΑ ΚΑΤΩΠΟΔΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ

ΜΙΚΡΟΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... - 3 -

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - 4 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΜΙΚΡΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ - ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ

ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ - 5 -

1.1. ΜΙΚΡΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ..... - 5 -

1.1.1. Ορισμός των μικρών δορυφόρων - 5 -

1.1.2. Χρήσεις Μικρών Δορυφόρων - 7 -

1.1.3. Εξαρτήματα - 8 -

1.1.4. Χαρακτηριστικά και προϋποθέσεις λειτουργίας ενός μικρού
χαρτογραφικού δορυφόρου - 10 -

1.1.4.1. Επιλογή τροχιάς - 10 -

1.1.4.2. Έλεγχος τροχιάς και προσανατολισμού - 10 -

1.1.4.3. Δέκτες - Αισθητήρες - 11 -

1.1.4.4. Παροχή ενέργειας..... - 12 -

1.1.4.5. Αποστολή δεδομένων στην Γη - 12 -

1.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ - 12 -

1.2.1. Ιστορική αναδρομή..... - 12 -

1.2.2. Συστήματα, λειτουργίες και εφαρμογές..... - 14 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΙΚΡΟΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ..... - 19 -

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... - 19 -

2.2. TOPSAT - 19 -

2.2.1. Σκάφος..... - 21 -

2.2.2. Τροχιά - 24 -

2.2.3. Επικοινωνία - 24 -

2.2.4. Υφιστάμενη κατάσταση της αποστολής - 25 -

2.2.5. Κάμερα - 26 -

2.2.6. Προϊόντα - 29 -

2.3. EROS B (EARTH REMOTE OBSERVATION SATELLITE-B).....	- 31 -
2.3.1. Σκάφος.....	- 32 -
2.3.2. Τροχιά	- 33 -
2.3.3. Επικοινωνία και διανομή προϊόντων.....	- 33 -
2.3.4. Κάμερα.....	- 34 -
2.3.5. Προϊόντα	- 36 -
2.4. ORBVIEW 3.....	- 38 -
2.4.1. Σκάφος.....	- 38 -
2.4.2. Τροχιά	- 39 -
2.4.3. Επικοινωνία και διανομή προϊόντων.....	- 40 -
2.4.4. Υφιστάμενη κατάσταση της αποστολής	- 40 -
2.4.5. Κάμερα.....	- 41 -
2.4.6. Προϊόντα	- 41 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

- 43 -

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 43 -
3.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	- 44 -
3.2.1. 3D Αφινικός Μετασχηματισμός	- 44 -
3.2.2. Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός - DLT	- 44 -
3.2.3. 2D Προβολικός Μετασχηματισμός	- 45 -
3.2.4. 2D Πολυώνυμα	- 45 -
3.2.5. Κλασματικά Πολυώνυμα (Rational Functions Method, RFM)....	- 45 -
3.3. ΑΥΣΤΗΡΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	- 47 -
3.3.1. Φυσικό Μοντέλο του Δέκτη με χρήση τροχιακών δεδομένων ..	- 48 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΥΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥΣ

- 51 -

4.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟ ΤΟΝ EROS-A1.....	- 51 -
4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ORBVIEW-3.....	- 57 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 69 -

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν τα κύρια γενικά χαρακτηριστικά των μικρών δορυφόρων, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους μικρούς οπτικούς χαρτογραφικούς δορυφόρους υψηλής ανάλυσης.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στους μικρούς δορυφόρους και στους οπτικούς χαρτογραφικούς δορυφόρους, παρουσιάζοντας τα γενικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών. Επιπλέον, γίνεται ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των χαρτογραφικών δορυφόρων ώστε να καταλάβει ο αναγνώστης τους ρυθμούς με τους οποίους εξελίσσεται η βιομηχανία των δορυφόρων.

Το δεύτερο κεφάλαιο εξειδικεύεται στην παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών των μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων μέσω της αναλυτικής περιγραφής τριών πολύ γνωστών μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων. Ουσιαστικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή τους, καθώς χωρίς αυτά οι δορυφορικές εικόνες είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν σε χαρτογραφικές εφαρμογές και έτσι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι οποιασδήποτε μετρητικής διαδικασίας μέσω δορυφορικών προϊόντων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένες χαρτογραφικές εφαρμογές των μικρών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης για να γίνει κατανοητή η χρησιμότητά τους, το εύρος των δυνατοτήτων τους και οι ακρίβειες που μπορούν να επιτύχουν.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο συνάγονται ορισμένα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν ύστερα από την όλη ενασχόλησή μας με τους μικρούς δορυφόρους και ιδιαίτερα τους χαρτογραφικούς.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μικροί δορυφόροι δεν είναι κάτι καινούριο στον τομέα των διαστημικών αποστολών. Παρόλα αυτά, η ανάγκη για βασικούς σταθμούς που θα εξυπηρετούσαν τις τηλεπικοινωνίες, σε συνδυασμό με τις επανδρωμένες αποστολές εξερεύνησης του διαστήματος, έχουν αναγκάσει τη βιομηχανία των δορυφόρων να στραφεί σε μεγαλύτερες και δαπανηρότερες αποστολές. Οι μικροί και φτηνοί δορυφόροι ήταν παλιότερα αντικείμενο ενασχόλησης κυρίως ολιγάριθμων επιστημονικών και ερευνητικών ομάδων. Η ανάγκη όμως για μείωση του κόστους και το 'σύνθημα' «μικρότερο, γρηγορότερο, καλύτερο, φθηνότερο» που επικράτησε στην δεκαετία του '90 είχε ως αποτέλεσμα τη στροφή του ενδιαφέροντος της βιομηχανίας στις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα που μπορούν να έχουν οι μικροί δορυφόροι σε υπάρχουσες αλλά και νέες εφαρμογές. Σήμερα, η τεράστια εξέλιξη στο πεδίο των microelectronics και ιδιαίτερα των μικρο-επεξεργαστών, έχουν καταστήσει τους μικρούς δορυφόρους μία συμφέρουσα και αποτελεσματική εναλλακτική επιλογή. Αυτό γιατί αποτελούν οικονομικά συμφέρουσες λύσεις σε μία περίοδο όπου οι χορηγούμενες δαπάνες για την εξερεύνηση του διαστήματος μειώνονται ολοένα και περισσότερο.

Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν και μικροί χαρτογραφικοί δορυφόροι οι οποίοι εξελίχθηκαν και συνεχίζουν να εξελίσσονται παράλληλα με την ανάπτυξη και βελτίωση της τεχνολογίας στον τομέα αυτόν. Δεδομένου ότι οι δορυφορικές εικόνες κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στις χαρτογραφικές, στρατιωτικές, περιβαλλοντικές κ.α. εφαρμογές και ότι η χρήση τους είναι πλέον τόσο διαδεδομένη, η κατασκευή και εκτόξευση χαρτογραφικών δορυφόρων έχει γίνει επιτακτική ανάγκη για πολλούς οργανισμούς και κράτη. Συνεπώς, οι κυβερνήσεις αλλά και οι ιδιωτικές εμπορικές εταιρίες, σε μια προσπάθεια μείωσης τους κόστους κατασκευής, εκτόξευσης και λειτουργίας των χαρτογραφικών συστημάτων, στρέφονται σταδιακά στην λύση των μικρών δορυφόρων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ταχύτερη ανάπτυξη αξιοθαύμαστων συστημάτων με κύρια χαρακτηριστικά την μικρή μάζα, το χαμηλό κόστος, την γρήγορη κατασκευή και την καλύτερη λειτουργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο: ΜΙΚΡΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ - ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

1.1. ΜΙΚΡΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

1.1.1. Ορισμός των μικρών δορυφόρων

Καταρχήν, οφείλουμε να ορίσουμε την έννοια του μικρού δορυφόρου. Λέγοντας μικρός δορυφόρος εννοούμε κάθε δορυφόρο που μετά την είσοδό του σε τροχιά έχει μάζα μικρότερη από 500 kg. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι εμπορικοί δορυφόροι που χρησιμοποιούνται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν μάζα, όταν βρίσκονται σε τροχιά, από 1.000 μέχρι 4.000 kg, ενώ οι νεότερες τάσεις κατευθύνονται προς μία αύξηση της μάζας των διαστημικών σκαφών στα 8.000 με 12.000 kg.







Παρόλα αυτά, σε πολλές άλλες εφαρμογές προτιμάται η χρήση μικρότερων δορυφόρων με ιδιαίτερη έμφαση στην μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής. Το σύνθημα «Γρηγορότεροι, Καλύτεροι, Μικρότεροι, Φθηνότεροι» αντιπροσωπεύει άψογα το νέο πνεύμα που κυριαρχεί στον τομέα των δορυφορικών εφαρμογών και αποστολών. Συγκρίνοντας τα πειραματικά προγράμματα που αφορούν σε μικρούς δορυφόρους με αυτά των συμβατικών διαστημικών σκαφών, τα πρώτα χαρακτηρίζονται από μία ταχύτατη εξέλιξη ώστε τελικά να μπορούμε να μιλάμε για εκτοξεύσεις μικρών δορυφόρων 12 – 36 μήνες μετά την απόφαση κατασκευής τους.

Προκειμένου τα καθιερωμένα συστήματα και μέθοδοι να εφοδιάζονται και εμπλουτίζονται με καινοτόμες και φτηνότερες εναλλακτικές λύσεις χρησιμοποιείται κάθε φορά η τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Με τον τρόπο αυτό οδηγούμαστε στο σχεδιασμό ελαφρύτερων δορυφορικών συστημάτων που καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο. Συνεπώς, οι παραδοσιακές διαδικασίες που συνήθιζαν να ακολουθούνται και οι οποίες έχουν τις ρίζες τους κυρίως σε στρατιωτικές και επανδρωμένες διαστημικές αποστολές, συχνά δεν μπορούν πλέον να δικαιολογηθούν και έτσι υιοθετούνται χαμηλού κόστους λύσεις με σκοπό να ικανοποιήσουν τους απαιτούμενους χαμηλούς προϋπολογισμούς.

Οι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτήν την τάξη δορυφόρων είναι πολλοί. Τέτοιοι είναι οι SmallSat, Cheapsat, MicroSat,

MiniSat, NanoSat και ακόμη PicoSat και FemtoSat! Το US Defence Advanced Research Projects Agency αναφέρεται σε αυτούς ως LightSats, το U.S. Naval Space Command ως SPINSat's (Single Purpose Inexpensive Satellite Systems) και το U.S. Air Force ως TACSat's (Tactical Satellites).

Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχει υιοθετηθεί μία γενική μέθοδος ταξινόμησης των δορυφόρων που σχετίζεται με τη μάζα τους. Η τάξη της μάζας συνήθως αποτελεί ένδειξη του κόστους του δορυφόρου, καθώς επίσης υποδεικνύει την πλατφόρμα εκτόξευσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Για αυτόν το λόγο η μάζα κάθε σκάφους υπολογίζεται πάντοτε συμπεριλαμβάνοντας και τα απαιτούμενα καύσιμα (Wet Mass).

	Όνομα Κατηγορίας	Μάζα	Κόστος	
	Large satellite	>1000kg	\$200M+	
	Medium sized satellite	500-1000kg	\$40-80M	
	Mini satellite	100-500kg	\$20M	Μικροί Δορυφόροι
	Micro satellite	10-100kg	\$10M	
	Nano satellite	1-10kg	\$1M	
	Pico satellite	0.1-1kg	>\$100k	

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των δορυφόρων βάσει μεγέθους

Βάσει της παραπάνω ταξινόμησης, φαίνεται ότι ο όρος 'μικρός δορυφόρος' χρησιμοποιείται για να καλύψει όλα τα σκάφη με μάζα σε τροχιά μικρότερη των 500 kg. Σημειώνεται πάντως, ότι μερικοί στον όρο μικροί δορυφόροι περιλαμβάνουν σκάφη με μάζα μικρότερη των 1000 kg και άλλοι σκάφη με μάζα μικρότερη των 200 kg [3].

Οι μεγάλοι δορυφόροι κατασκευάζονται κυρίως από κυβερνήσεις και μεγάλους ιδιωτικούς οργανισμούς οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να χρηματοδοτούν τέτοιες πολυδάπανες και πολυετείς αποστολές, χωρίς περιορισμούς στη μάζα και κατ' επέκταση στην παροχή ενέργειας. Για παράδειγμα, ο τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος Intelsat 6 κατασκευάστηκε με χρόνο λειτουργίας 10-14 χρόνια, όγκο 6x4x12 m, βάρος 4600 kg και παραγωγή ενέργειας μέσω ηλιακών πάνελ 2600W. Ένας μέτριος μικρός δορυφόρος του σήμερα έχει μάζα 50 kg, διαστάσεις 0.6x0.4x0.3 μέτρα και παράγει ενέργεια μόνο 30 W από μπαταρίες [2].

Παρόλα αυτά, οι μικροί δορυφόροι λειτουργούν και εκτελούν συγκεκριμένες αποστολές ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Το πανεπιστήμιο του Surrey στην Μ. Βρετανία που εξειδικεύεται στην κατασκευή μικρών δορυφόρων ισχυρίζεται ότι το 95% της απόδοσης των μεγάλων δορυφόρων μπορεί να επιτευχθεί από μικρούς δορυφόρους με μόνο 5% του κόστους ή ότι το 70% της απόδοσης αυτών μπορεί να επιτευχθεί με 1% του κόστους τους. (Wei Sun, 2001)

1.1.2. Χρήσεις Μικρών Δορυφόρων

Οι μικροί δορυφόροι χρησιμοποιούνται πλέον σε όλα τα πεδία που παραδοσιακά κάλυπταν οι μεγάλοι δορυφόροι. Τέτοια είναι:

- Οι τηλεπικοινωνίες
- Η εξερεύνηση και συλλογή στοιχείων για πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος
- Η παρακολούθηση μετεωρολογικών φαινομένων
- Η καταγραφή δεδομένων που αφορούν στην παρακολούθηση των ωκεανών και των ακτών, στις καλλιέργειες, στα δάση, στο περιβάλλον, στις χρήσεις γης, στις φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές κ.α.

Οι τελευταίες κατηγορίες που έχουν να κάνουν με την παρατήρηση της Γης εμπεριέχονται στον επιστημονικό κλάδο της τηλεπισκόπησης ο οποίος είναι αρμόδιος για την παρακολούθηση φαινομένων που συμβαίνουν στην επιφάνεια του πλανήτη μας αλλά και για την αναγνώριση και ταξινόμηση της επιφάνειας της Γης σε θεματικές κατηγορίες (χρήσεις γης) μέσω δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών.

Οι εφαρμογές των μικρών δορυφόρων στις μέρες μας έχουν ως εξής (Konecny G., 2004):

Τηλεπικοινωνίες:	69.2%
Επιστήμη:	14.4%
Τεχνολογικές επιδείξεις:	11.0%
Στρατιωτικές εφαρμογές:	2.3%
Εκπαίδευση:	1.7%
Παρακολούθηση της Γης:	1.4%

Αναφερόμενοι σε χαρτογραφικούς δορυφόρους εννοούμε αυτούς που συλλέγουν εικόνες της επιφάνειας της Γης με σκοπό την χαρτογράφησή της. Στον όρο χαρτογράφηση περιλαμβάνονται όλες οι ενέργειες που σχετίζονται με μετρητικές διαδικασίες, δηλαδή εντοπισμός θέσης, υπολογισμός εμβαδών, καταγραφή αριθμού αντικειμένων κ.α. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται συνήθως οι εικόνες που χρησιμοποιούνται να είναι ιδιαίτερα ευκρινείς και να έχουν υψηλή γεωμετρική ανάλυση (εξαρτάται πάντα από την κλίμακα της εφαρμογής). Στις μέρες μας, η χρήση δορυφορικών εικόνων σε χαρτογραφικές εφαρμογές είναι σύνηθες φαινόμενο καθώς τόσο η υψηλή ανάλυση που παρέχεται από τα δορυφορικά συστήματα όσο και η ανάπτυξη εξειδικευμένων λογισμικών προγραμμάτων, σε συνδυασμό με την εξοικείωση των χρηστών, τις καθιστούν συχνά απαραίτητο εργαλείο για την ολοκλήρωση των εφαρμογών.

Αποστολή	Εδαφοψηφίδα	Εκτόξευση
EROS-A1/ Ισραήλ	1.8 m	2000
PROBA/ ESA-Ευρώπη	5 m	2001
Orbview-3/ Η.Π.Α.	1.0 m	2003
FORMOSAT-2/ Ταϊβάν	2 m	2004
DMC+4/ Κίνα	4 m	2005
Topsat/ Μ. Βρετανία	2.5 m	2005
CartoSat-1/ Ινδία	2.5 m	2005
EROS-B/ Ισραήλ	0.82 m	2006
Rapid Eye/ Γερμανία	6.5 m	2008
Diamant-1/ Γερμανία	5 m	προγραμματισμένη

Πίνακας 2. Κυριότερες αποστολές μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων

1.1.3. Εξαρτήματα

Κάθε δορυφόρος που εκτοξεύεται στο διάστημα είναι εξοπλισμένος με τα τεχνολογικά συστήματα που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση της εκάστοτε αποστολής. Έτσι ένας δορυφόρος που ερευνά το διάστημα θα έχει σίγουρα ένα τηλεσκόπιο ικανό να βλέπει σε διαφορετικά μήκη κύματος φωτός. Αντίστοιχα για την παρατήρηση των καιρικών φαινομένων χρειάζονται ειδικές κάμερες που να καταγράφουν και να μετρούν τις κινήσεις των σύννεφων, ενώ όσοι δορυφόροι χρησιμοποιούνται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών κουβαλούν ειδικά εξαρτήματα που τους επιτρέπουν να επιστρέφουν σε κάποιο σημείο της Γης τα σήματα που λαμβάνουν από κάποιο άλλο σημείο.

Επιπλέον οι δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με τα λεγόμενα «υποσυστήματα» που ουσιαστικά χρησιμεύουν στη λειτουργία του ίδιου του δορυφόρου και των οργάνων του. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, τα υποσυστήματα που τροφοδοτούν με ρεύμα τον δορυφόρο, που συντονίζουν τις λειτουργίες των οργάνων και που στέλνουν τα δεδομένα πίσω στη Γη. Το υποσύστημα που εξασφαλίζει το απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα για τη λειτουργία του δορυφόρου και των συστημάτων του απαρτίζεται συνήθως από ηλιακά panel που συλλέγουν ενέργεια από τον Ήλιο [13]. Κατόπιν, η ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες και στη συνέχεια ειδικά συστήματα φροντίζουν για τη διανομή του ρεύματος στα διάφορα όργανα. Τα συστήματα τηλεμετρίας και τηλεδιαχείρισης του δορυφόρου εξυπηρετούν τον έλεγχο του σκάφους από τους επίγειους σταθμούς καθώς επίσης εκτελούν μετρήσεις που έχουν να κάνουν με την ασφάλεια, την προστασία και την σταθερότητα αυτού. Αυτά συνήθως απαρτίζονται από διακόπτες που ελέγχονται μέσω ασύρματων σημάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις υποστηρίζονται ακόμη δυσκολότερες εφαρμογές καθώς ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με ειδικό ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο μπορούν να 'φορτωθούν' εξειδικευμένα λογισμικά ακόμη και όταν ο δορυφόρος είναι σε τροχιά. Όσον αφορά στα συστήματα ελέγχου και καθορισμού της κίνησης των σκαφών, αυτά μπορεί να είναι είτε παθητικά, είτε ενεργητικά. Στην πρώτη περίπτωση δεν απαιτείται κατανάλωση ρεύματος και η σταθεροποίηση του δορυφόρου πραγματοποιείται μέσω μαγνητών και εκμετάλλευσης της βαρύτητας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είτε μέσω συστημάτων περιστροφής και αδρανοποίησης του σώματος του δορυφόρου, είτε μέσω τροχών αντίδρασης στους άξονες περιστροφής του σκάφους (roll, pitch, yaw) η κίνηση και σταθερότητα του δορυφόρου ελέγχεται με ταυτόχρονη κατανάλωση ρεύματος. Τέλος τα συστήματα επικοινωνίας του δορυφόρου με τους επίγειους σταθμούς απαρτίζονται από ένα πομπό, ένα δέκτη και κεραιές και συνήθως η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω S ή X band [3].

Όπως είναι φυσικό στους μικρούς δορυφόρους τα προαναφερθέντα συστήματα και υποσυστήματα επιβάλλεται να έχουν τον μικρότερο δυνατό όγκο και να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερα. Αυτό συμβαίνει διότι όλα αυτά τα εξαρτήματα πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα σκελετό σκάφους πολύ μικρότερο από αυτό των συμβατικών δορυφόρων. Πλεονέκτημα στην

περίπτωση αυτή αποτελεί η σημαντική μείωση του κόστους που προκύπτει για την κατασκευή του δορυφόρου. Ταυτόχρονα, η μείωση του μεγέθους των εξαρτημάτων επιφέρει είτε την αναγκαστική τροποποίησή τους ώστε να αποδίδουν το ίδιο (π.χ. αναδιπλούμενα panel συλλογής ενέργειας), είτε την αναγκαστική μείωση της απόδοσής τους (π.χ. μικρότερες μπαταρίες που συνεπάγονται την αναγκαστική απουσία άλλων συστημάτων για εξοικονόμηση ενέργειας). Όπως και να έχει, δεν γίνεται να μην αναφέρουμε ότι οι επιστήμονες που καλούνται να κατασκευάσουν μικρούς δορυφόρους έχουν κατά καιρούς παρουσιάσει αξιοθαύμαστες λύσεις και ευρεσιτεχνίες ώστε να διατηρήσουν την μάζα των μικρών δορυφόρων σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

1.1.4. Χαρακτηριστικά και προϋποθέσεις λειτουργίας ενός μικρού χαρτογραφικού δορυφόρου

1.1.4.1. Επιλογή τροχιάς

Η επιλογή της τροχιάς είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απόδοση ενός χαρτογραφικού δορυφόρου. Οι σταθερές (geostationary) τροχιές στα 36.000 Km προτιμούνται για τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Για τους χαρτογραφικούς δορυφόρους συνήθως επιλέγονται ηλιοσύγχρονες πολικές τροχιές σε ύψη ανάμεσα στα 400 και 1000 km. Αν οι παρατηρήσεις πρόκειται να γίνουν σε συγκεκριμένη περιοχή της Γης, τότε μπορούν να επιλεχθούν χαμηλότερες επικλίσεις σε συνδυασμό με ελλειπτικές τροχιές (στα 150 με 500 km). Τέτοιες τροχιές όμως, δεν παρέχουν καλές συνθήκες φωτισμού όπως αυτές που απαιτούνται για την φωτογράφιση της επιφάνειας του πλανήτη από τους χαρτογραφικούς δορυφόρους.

1.1.4.2. Έλεγχος τροχιάς και προσανατολισμού

Η τροχιά ενός δορυφόρου ελέγχεται καλύτερα με την ενσωμάτωση στο σκάφος ενός δέκτη GPS. Η θέση του σκάφους αποστέλλεται και παρατηρείται από τους επίγειους σταθμούς. Διορθώσεις στην τροχιά μπορούν να γίνουν μέσω συστημάτων προώθησης με υδροκυάνιο, που όμως προϋποθέτουν την μεταφορά του καυσίμου καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής.

Ο προσανατολισμός του δορυφόρου (στροφές γύρω από τους τρεις άξονες) ελέγχεται πρωτίστως από ένα τριαξονικό γυροσκόπιο. Για υψηλότερες ακρίβειες χρησιμοποιούνται αισθητήρες ηλίου και αστεριών. Μετά την αποστολή και παρακολούθηση των στοιχείων του προσανατολισμού του σκάφους από τους επίγειους σταθμούς, αν χρειάζονται διορθώσεις για την σκόπευση των φωτομηχανών, τα συστήματα προώθησης μπορούν να τις εκτελέσουν. Όταν πρόκειται για μικρότερες διορθώσεις, οι μηχανές μπορούν να επαναπροσανατολιστούν.

1.1.4.3. Δέκτες - Αισθητήρες

Στις χαρτογραφικές αποστολές είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεκτών-αισθητήρων που καταγράφουν την αντανάκλαση της Γης στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι οπτικοί και θερμικοί (παθητικοί) δέκτες συλλέγουν ευαίσθητα στοιχεία τα οποία πρέπει να αποθηκευτούν και να αποσταλούν στην Γη. Επεξεργασία των στοιχείων αυτών είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και επί του σκάφους.

Οι ενεργητικοί δέκτες (όπως τα radar) απαιτούν την ύπαρξη κεραιών για την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών παλμών και την υποδοχή των αντανάκλασεων αυτών στο έδαφος. Οι παθητικοί δέκτες καταλαμβάνουν σαφώς λιγότερη μάζα.

Οι περιορισμοί των δεκτών που χρησιμοποιούν οι μικροί δορυφόροι αναλύονται λεπτομερώς στο (Sandau R., 2004) και αναφέρονται κυρίως στους οπτικούς και θερμικούς αισθητήρες. Τέτοιοι είναι:

- Η χωρική ανάλυση του οπτικού συστήματος, η οποία καθορίζεται και περιορίζεται από την περίθλαση (diffraction limitation).
- Η ευαισθησία των στοιχείων του αισθητήρα που χρειάζονται ελάχιστο χρόνο έκθεσης περίπου 1 msec.
- Η κίνηση της εικόνας, λόγω της πρόσθιας κίνησης του δορυφόρου.

Όταν απαιτείται ανάλυση καλύτερη από 7m, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης. Αυτό μπορεί να γίνει με αισθητήρες που περιέχουν μηχανισμό TDI (Time Delay Integration), οι οποίοι αντί για μία απλή γραμμή καταγραφικών στοιχείων τοποθετημένη εγκάρσια της κίνησης του σκάφους, έχουν έναν αριθμό γραμμών καταγραφικών στοιχείων τοποθετημένες στη διεύθυνση της κίνησης του σκάφους. Τελικά τα καταγεγραμμένα σήματα ισοσταθμίζονται

πριν αποθηκευτούν. Έτσι, οι υψηλής ανάλυσης δέκτες δεν χρειάζονται μόνο μικρότερα καταγραφικά στοιχεία αλλά επιπλέον πρέπει να αντισταθμίζουν την κίνηση του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της λήψης της σκηνής είτε με μηχανισμό TDI, είτε με στροφή του σώματος του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της λήψης.

1.1.4.4. Παροχή ενέργειας

Προκειμένου να μπορούν να εκτελεστούν εργασίες όπως η λήψη, η επεξεργασία, η υποδοχή και η αποστολή των καταγεγραμμένων και βοηθητικών δεδομένων, καθώς επίσης εργασίες που αφορούν στον έλεγχο της λειτουργίας και κίνησης του δορυφόρου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων παροχής ρεύματος. Η κυριότερη πηγή ρεύματος είναι συνήθως οι μπαταρίες (NiCd, NiH ή Li-Ion). Για μεγαλύτερης διάρκειας αποστολές, οι μπαταρίες πρέπει να μπορούν να επαναφορτιστούν μέσω ηλιακής ενέργειας οπότε και χρησιμοποιούνται ηλιακά πάνελ για να την συλλέγουν.

1.1.4.5. Αποστολή δεδομένων στην Γη

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες των δορυφόρων πρέπει να αποστέλλονται στους επίγειους σταθμούς. Η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται την ώρα που ο δορυφόρος έχει επαφή με τον σταθμό, δηλαδή συνήθως σε ένα χρονικό διάστημα δέκα λεπτών. Αυτό συνεπάγεται την επιβολή ενός κατώτατου ορίου ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων. Με μία ταχύτητα της τάξης των 100 Mb/s μπορούν να αποσταλούν μέχρι 60 GB δεδομένων. Στην περίπτωση που απαιτούνται ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης, τότε τα δεδομένα πρέπει να συμπιέζονται πριν την αποστολή (Konecny G., 2004).

1.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

1.2.1. Ιστορική αναδρομή

Οι δορυφορικές εικόνες είναι διαθέσιμες για πολιτικές εφαρμογές από το 1972, οπότε και εκτοξεύτηκε ο πρώτος δορυφόρος Landsat, που αρχικά ονομαζόταν ERTS. Η κύρια εφαρμογή αυτού του τύπου δορυφόρων ήταν η ταξινόμηση των απεικονιζόμενων αντικειμένων, έτσι απαιτούνταν μία καλή φασματική, αλλά όχι υψηλή γεωμετρική ανάλυση. Ο SPOT-1, που εκτοξεύτηκε το 1986, ήταν ο πρώτος πολιτικός δορυφόρος που σχεδιάστηκε

καθάρια για χαρτογραφικούς σκοπούς. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός χαρτογραφικών δορυφόρων, όπως ο IRS και ο MOMS, έχουν αποδείξει τις χαρτογραφικές τους δυνατότητες με παραγωγή εικόνων μεσαίας ανάλυσης. Η εδαφοψηφίδα αυτών των μεσαίας ανάλυσης αισθητήρων είναι της τάξης των 10-20 μέτρων για τον SPOT-4 και 5-15 μέτρα για τον MOMS-2 και τον IRS-1C/D. Παρόλο που αρχικά διεξήχθη μεγάλη και ενθουσιώδης έρευνα πάνω σε αυτούς τους χαρτογραφικούς δορυφόρους, τελικά δεν κατάφεραν να προσελκύσουν το ενδιαφέρον των χρηστών που ασχολούνταν με χαρτογραφήσεις κλίμακας μεγαλύτερης του 1:10.000. Οι δορυφορικές εικόνες μεσαίας ανάλυσης συνήθως δεν έχουν επαρκή χαρακτηριστικά για τέτοιες χαρτογραφικές κλίμακες. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στη χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών σε μικρές κλίμακες, σε θέματα χρήσεων γης και σε περιβαλλοντικές παρατηρήσεις.

Για πολύ καιρό η κυρίαρχη πηγή δεδομένων για χαρτογραφικές εφαρμογές ήταν οι υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες. Όμως, τον Σεπτέμβριο του 1999, η εκτόξευση του δορυφόρου IKONOS εγκαινίασε μια νέα εποχή στις εμπορικά διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης καθώς μπορούσε να συλλέγει εικόνες εδαφοψηφίδας μέχρι 0.82 m.

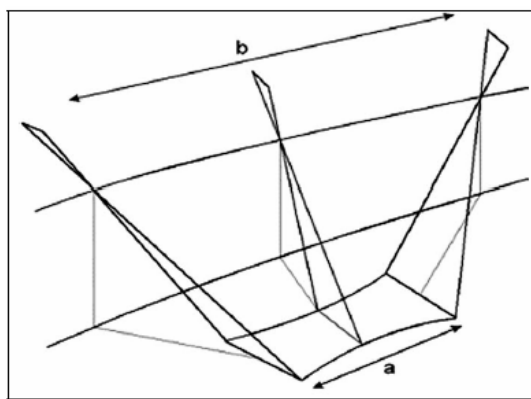
Μετέπειτα δορυφόροι, όπως ο QuickBird-1, ο OrbView-3, ο EROS-A1, και ο FORMOSAT-2, προσφέρουν εικόνες υψηλής ανάλυσης από 0.62- 2 m. Επιπλέον οι Cartosat-2, KOMPSAT-2, EROS-B και Pleiades παρέχουν εικόνες εδαφοψηφίδας από 0.70-1 m. Στο κοντινό μέλλον ο αριθμός των χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης θα αυξηθεί περαιτέρω με τους WorldView-1, World View-2 και GeoEye-1 που θα δίνουν εικόνες ανάλυσης 50 cm.

Στο σημείο αυτό οφείλουμε να επισημάνουμε ότι όταν παρακάτω θα αναφερόμαστε σε χαρτογραφικούς δορυφόρους πολύ υψηλής ανάλυσης θα εννοούμε αυτούς που παρέχουν παγχρωματικές (και όχι πολυφασματικές) εικόνες με γεωμετρική ανάλυση μεγαλύτερη από 5 m. Αυτό σημαίνει ότι η εδαφοψηφίδα, ή ακριβέστερα η απόσταση ανάμεσα στην προβολή των κέντρων δύο γειτονικών εικονοστοιχείων (ground sampling distance -GSD) είναι μικρότερη από 5 m (Tao et al, 2006).

1.2.2. Συστήματα, λειτουργίες και εφαρμογές

Οι δορυφόροι που λαμβάνουν εικόνες της Γης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Σε αυτούς που αντλούν πληροφορίες για τη Γη όπως για παράδειγμα δορυφόροι που παρακολουθούν τα καιρικά φαινόμενα, σε αυτούς που καταγράφουν το έδαφος με κύριο σκοπό την ταξινόμηση των επιφανειών και στους ονομαζόμενους χαρτογραφικούς δορυφόρους. Η δεύτερη ομάδα χειρίζεται εικόνες σε διάφορα μήκη του φάσματος, αλλά δεν χρειάζεται πολύ υψηλή γεωμετρική ανάλυση. Αντιθέτως, οι χαρτογραφικοί δορυφόροι πρέπει να παρέχουν υψηλή έως πολύ υψηλή γεωμετρική ανάλυση αλλά περιορισμένη φασματική ανάλυση έως λήψη μόνο παγχρωματικών εικόνων, ενώ έχουν και τη δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικών ζευγαριών εικόνων είτε αλλάζοντας τη διεύθυνση λήψης της μηχανής, είτε μέσω ενός σταθερού συνδυασμού δύο διευθύνσεων λήψης.

Στην περίπτωση που η κάμερα έχει σταθερό προσανατολισμό αντίθετο με την τροχιά κίνησης του δορυφόρου, για τη λήψη εικόνων εδαφοψηφίδας κάτω των 5 m ο χρόνος λήψης πρέπει να ξεπερνά τα 0.7 ms ώστε να προκύπτουν εικόνες καλής ποιότητας. Κάποιοι δορυφόροι, όπως ο IKONOS και ο QuickBird, είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες TDI (time delay and integration sensors). Αυτοί δεν έχουν μόνο μία γραμμή CCD, αλλά έναν μικρό πίνακα. Το παραγόμενο σήμα των πρώτων στοιχείων CCD μετατίθεται με την ταχύτητα κίνησης της εικόνας στα επόμενα στοιχεία CCD και έτσι η ενέργεια συσσωρεύεται ώστε τελικά να παράγεται μία εικόνα επαρκούς ποιότητας. Άλλοι δορυφόροι όπως ο EROS A και ο TES επιμηκύνουν το χρόνο λήψης μέσω μιας μόνιμης στροφής του δορυφόρου, με αποτέλεσμα να φωτογραφίζουν τη σκηνή από ένα μεγαλύτερο τμήμα της τροχιάς τους.



Εικόνα 1. Επιμήκυνση του χρόνου λήψης κατά παράγοντα b/a μέσω συνεχούς αλλαγής της διεύθυνσης του σώματος του δορυφόρου

Οι MOMS, καθώς και ο αισθητήρας HRS του SPOT 5 έχουν παραπάνω από μία διεύθυνση λήψης στην κατεύθυνση της τροχιάς και έτσι μπορούν να παράγουν στερεοσκοπικά ζευγάρια εικόνων χωρίς μεγάλα διαλείμματα ανάμεσα στις λήψεις. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι δορυφόροι CARTOSAT-1 και ALOS. Οι αισθητήρες που βλέπουν μόνο κατά μήκος της τροχιάς έχουν το μειονέκτημα ότι για την παραγωγή στερεοζευγών απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ανάμεσα στις λήψεις από διαφορετικές θέσεις.

Ο αριθμός των στερεοζευγών που αποκτώνται από τους χαρτογραφικούς δορυφόρους υψηλής ανάλυσης είναι πολύ μικρός. Σύμφωνα με την DigitalGlobe η απόκτηση ενός στερεοζεύγους απαιτεί την εννιαπλάσια χωρητικότητα από μια απλή λήψη αλλά η τιμή του είναι μόνο δύο με τρεις φορές υψηλότερη από τις απλές εικόνες. Συνεπώς, η συλλογή στερεοζευγών δεν είναι ούτε οικονομική ούτε συμφέρουσα για τους πωλητές δορυφορικών εικόνων αν δεν υπάρχει εκ των προτέρων παραγγελία από τον πελάτη. Αυτή η κατάσταση πιθανά να αλλάξει μέσω της ευελιξίας του WorldView. Μία εναλλακτική λύση αποτελεί ο δορυφόρος Cartosat-1 ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μία κάμερα που βλέπει μπροστά κατά 5° και άλλη μία που κοιτάει πίσω κατά 26°. Ο ALOS είναι εξοπλισμένος με τρεις κάμερες και παρέχει επίσης εδαφοψηφίδα 2.5m. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι είναι δυνατή η παραγωγή λεπτομερούς υψομετρικού μοντέλου εδάφους (DEM) από δορυφορικά στερεοζεύγη υψηλής ανάλυσης. Στην περίπτωση αυτόματου εντοπισμού ομόλογων σημείων σε αστική περιοχή το ζευγάρι δεν πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες σύγκλισης μεταξύ των ακτίνων, ενώ η σχέση μεταξύ βάσης και ύψους δεν πρέπει να ξεπερνά το 1:3.

Οι χαρτογραφικοί δορυφόροι υψηλής ανάλυσης είναι εξοπλισμένοι με υπερσύγχρονα συστήματα εντοπισμού θέσης που περιλαμβάνουν GPS, γυροσκόπια και αισθητήρες αστεριών. Με βάση αυτό, ο εντοπισμός θέσης ενός σημείου στο έδαφος μπορεί να επιτευχθεί με απόκλιση της τάξης των 10 μέτρων χωρίς φωτοσταθερά. Οι πληροφορίες που αφορούν στον προσανατολισμό των δορυφορικών εικόνων είναι διαθέσιμες μέσω ρητών συντελεστικών πολυωνύμων (rational polynomial coefficients - RPC) των οποίων η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί εξαιρετικά με τη χρήση λίγων φωτοσταθερών σημείων. Η χρήση των RPC στην αξιοποίηση δορυφορικών

εικόνων έχει υιοθετηθεί ευρέως και είναι αποδεδειγμένα μία ακριβής και οικονομική προσέγγιση στις περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται η αυστηρή γνώση των μαθηματικών μοντέλων των αισθητήρων. Λόγω της απλότητας και γενικότητας που εξασφαλίζει η μέθοδος των RPC, είναι πολύ πιθανό τα επόμενα χρόνια να καθιερωθεί ως κοινώς αποδεκτό μοντέλο προσανατολισμού των αισθητήρων, υπό το πλαίσιο ενός κοινού πρωτοκόλλου ανταλλαγής πληροφοριών.

Συνήθως οι κάμερες των χαρτογραφικών δορυφόρων παρέχουν χαμηλότερη ανάλυση στα πολυφασματικά κανάλια σε σχέση με το παγχρωματικό, με αποτέλεσμα συχνά να απαιτείται ειδική διαδικασία (pan-sharpening) για την δημιουργία έγχρωμων εικόνων αντίστοιχης ανάλυσης. Αν και το ανθρώπινο μάτι δεν είναι τόσο ευαίσθητο στην έγχρωμη πληροφορία όσο στους τόνους του γκρι, συχνά η πληροφορία του χρώματος βοηθάει στην αναγνώριση αντικειμένων. Παράλληλα ο όρος 'παγχρωματικό' δεν είναι τελείως ακριβής. Εξ ορισμού περιλαμβάνει το φάσμα του φωτός που είναι ορατό από το ανθρώπινο μάτι, αλλά όσον αφορά στους αισθητήρες των δορυφόρων συνήθως αυτοί περιλαμβάνουν και το εγγύς υπέρυθρο.

Τέλος, οι παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες μπορούν να παρέχουν πλήθος πληροφοριών που αφορούν στον τομέα της τηλεπισκόπησης και πιο συγκεκριμένα σε εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την υγεία της βλάστησης και με την καταγραφή περιβαλλοντικών στοιχείων. Γενικά, οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης αποτελούν μία εναλλακτική λύση σε σχέση με την παραδοσιακή εναέρια φωτογραμμετρία και όπως όλα δείχνουν καταλαμβάνουν ένα ολοένα και αυξανόμενο μερίδιο στην αγορά των φωτογραμμετρικών εφαρμογών. Οι αεροφωτογραφίες έχουν συνήθως ανάλυση της τάξης των 40 l/mm ή μέγεθος pixel 12μm. Επιπλέον, η σάρωσή τους γίνεται τις περισσότερες φορές στα 20μm (ανάλυση 1.200 dpi). Έτσι, συγκρινόμενες με αυτές, οι υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες με εδαφοψηφίδα 1 m αντιστοιχούν σε αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:50.000, με εδαφοψηφίδα 0.62 m σε κλίμακα 1:31.000 και με εδαφοψηφίδα 0.5 m σε κλίμακα 1:25.000. Αυτό σημαίνει ότι οι υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες εξυπηρετούν πλέον εφαρμογές κλίμακας της παραδοσιακής εναέριας φωτογραμμετρίας και έτσι δημιουργείται ένας σχετικός «ανταγωνισμός» ανάμεσα στις δύο μεθόδους.

Επιπλέον, σε αντίθεση με τις αεροφωτογραφίες που σε μερικές χώρες είναι απόρρητες, οι δορυφορικές εικόνες έχουν το πλεονέκτημα ότι διατίθενται ελεύθερα και χωρίς περιορισμούς σε όλους τους χρήστες.

	Εκτόξευση	Χώρα	GSD pan	GSD ms	Λήψη	Διεύθυνση Λήψης
SPOT 1	1986	Γαλλία	10 m	20 m	60 km	across
SPOT 2	1990	Γαλλία	10 m	20 m	60 km	across
SPOT 3	1993	Γαλλία	10 m	20 m	60 km	across
MOMS 02	1993	Γερμανία	4.5 m	13.5 m	80 km	3 x orbit
IRS-1C	1995	Ινδία	5.8 m	23.5 m	70 km	across
MOMS-2P	1996	Γερμανία	6 m	18 m	105 km	3 x orbit
ADEOS	1996	Ιαπωνία	8 m	16 m	80 km	nadir
IRS-1D	1997	Ινδία	5.8 m	23.5 m	70 km	across
SPOT 4	1998	Γαλλία	10 m	20 m	60 km	across
IKONOS 2	1999	Η.Π.Α.	0.8 m	2.4 m	11 km	free
KITSAT 3	1999	Ν. Κορέα	15 m	15 m	50 km	-
UoSAT 12	1999	Μ. Βρετανία	10 m	30 m	10 km	-
Kompsat 1	1999	Ν. Κορέα	6.6 m	-	17 km	across
EROS A1	2001	Ισραήλ	1.8 m	-	12.6 km	free
QuickBird	2001	Η.Π.Α.	0.6 m	2.4 m	16.8 km	free
TES	2001	Ινδία	1 m	-	8 km	free
SPOT 5	2002	Γαλλία	5 (2.5)m	10 m	60 km	across
OrbView 3	2003	Η.Π.Α.	1 m	4 m	8 km	free
Resourcesat	2003	Ινδία	5.8 m	5.8 m	70 km	across
BilSat	2003	Τουρκία	12 m	28 m	12 km	free
ROCSat	2004	Κίνα	2 m	4 m	24 km	free
Cartosat 1	2005	Ινδία	1 m	2.5 m	27 km	2 x orbit
Kompsat 2	2006	Ν. Κορέα	1 m	4 m	15 km	free
Topsat	2005	Μ. Βρετανία	2.5 m	5 m	15 km	free
ALOS	2006	Ιαπωνία	2.5 m	10 m	70 km	3 x orbit
Resurs DK2	2006	Ρωσία	1 m			
Cartosat 2	2007	Ινδία	0.8m	-	9.6 km	free
China DMC+4	2005	Κίνα	4 m	32 m		free
EROS B	2006	Ισραήλ	0.7 m	-	7 km	free
WorldView	2007	Η.Π.Α.	0.5 m	2 m	16.8 km	free
CBERS 2B	2007	Κίνα-Βραζιλία	2.5 m	20 m		across

Πίνακας 3. Επιτυχώς εκτοξευμένοι χαρτογραφικοί δορυφόροι

Η πρόσβαση στις εικόνες των διάφορων δορυφόρων είναι διαφορετική. Φυσικά όσον αφορά στη διανομή των εικόνων δορυφόρων ιδιωτικών εταιριών όπως ο IKONOS (Geoeye), ο QuickBird (DigitalGlobe), οι SPOT (Spot Image), οι EROS (ImageSat International) και οι OrbView (Geoeye), αυτή γίνεται χωρίς περιορισμούς από ένα μεγάλο και οργανωμένο δίκτυο διανομών.

Πολλά συστήματα υψηλής και πολύ υψηλής ανάλυσης έχουν ανακοινωθεί για το άμεσο μέλλον (Πίνακας 4). Συχνά η εκτόξευση γίνεται

καθυστερημένα σε σχέση με το προβλεπόμενο πλάνο, ενώ συχνά κάποιοι δορυφόροι εξαφανίζονται, καταστρέφονται ή απλά δεν λειτουργούν μετά την εκτόξευσή τους για διάφορους λόγους. Παρόλα αυτά, είναι προφανές ότι στο μέλλον θα υπάρξει ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός δορυφόρων πολύ υψηλής ανάλυσης που θα εκτοξεύονται από περισσότερες χώρες.

	Εκτόξευση	Χώρα	GSD pan	GSD ms	Λήψη	Διεύθυνση Λήψης
Geoeye-1	2008	Η.Π.Α.	0.4 m	1.6 m	15 km	free
RapidEye	2008	Γερμανία	6.5 m	6.5 m	80 km	free
RazakSat	2008	Μαλαισία	2.5 m	5 m		free
THEOS 2	2008	Ταυλάνδη	2 m	15 m	24 km	free
WorldView 2	2008	Η.Π.Α.	0.5 m	1.8 m	16.4 km	free
Cartosat 2A	2008	Ινδία	<1m	-	10 km	free
CBERS-3 + 4	2008-10	Κίνα-Βραζιλία	5 m	20 m	60 km	across
EROS C	2009	Ισραήλ	0.7 m	2.8 m	11 km	free
Pléiades HR	2010	Γαλλία	0.7 m	2.8 m	21 km	free
Geoeye-2	2011	Η.Π.Α.	0.25 m			

Πίνακας 4. Χαρτογραφικοί δορυφόροι υψηλής ανάλυσης που αναμένεται να εκτοξευτούν

Η τάση είναι καλύτερες αναλύσεις, ελαφρύτερα σκάφη και ευκίνητες διευθύνσεις λήψεων ή στερεολήψεις στη διεύθυνση της τροχιάς. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούνται και για στρατιωτικούς και για πολιτικούς σκοπούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι χωρίς την ύπαρξη συμφωνιών με στρατιωτικά όργανα, οι ιδιωτικές εταιρίες θα αδυνατούσαν επιβιώσουν καθώς το μεγαλύτερο μέρος των παραγόμενων εικόνων χρησιμοποιούνται από τα κράτη για στρατιωτικούς σκοπούς (Jacobsen K., 2005)

Έτος \ Μάζα	Έτος				Σύνολο	Ποσοστό επί του συνόλου
	2006	2007	2008	2009		
<200 kg	10	11	12	12	45	54%
200-600 kg	3	9	1	1	14	17%
600-1200 kg	5	5	1	2	13	15%
>1200 kg	4	4	4	0	12	14%
Σύνολο	22	29	18	15	84	100%

Πίνακας 5. Κατανομή των δορυφόρων βάσει της μάζας τους (FAA & COMSTAC, 2006)

	Απαιτήσεις εκτόξευσης			
	Δορυφόροι	Μικροί	Μεσαίοι - Βαρείς	Σύνολο
Τηλεπικοινωνίες	43	5	2	7
Διεθνής Επιστήμη / Άλλο	97	26	22	48
Τηλεπισκόπηση	20	2	12	14
Σύνολο	160	33	36	69

Πίνακας 6. Κατανομή των εκτοξεύσεων του 2006 βάσει της χρήσης των δορυφόρων (FAA & COMSTAC, 2006)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο: ΜΙΚΡΟΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν αναλυτικά τρεις μικροί οπτικοί χαρτογραφικοί δορυφόροι προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες τους. Επιπλέον, σκοπός είναι να καταλάβει ο αναγνώστης τις ομοιότητες και διαφορές που μπορούν να υπάρχουν μεταξύ των συστημάτων.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, αποφασίστηκε να παρουσιαστούν οι μικροί χαρτογραφικοί δορυφόροι πολύ υψηλής ανάλυσης Topsat, Eros B και Orbview-3. Ο Topsat κατασκευάστηκε για να παρουσιάσει τις δυνατότητες που μπορεί να έχει ένας μικρός χαρτογραφικός δορυφόρος με μικρό κόστος κατασκευής και εκτόξευσης, ενώ οι Eros B και Orbview-3 είναι εμπορικοί χαρτογραφικοί δορυφόροι των οποίων τα προϊόντα διατίθενται παγκοσμίως.

2.2. TOPSAT

Ο TopSat είναι ένας δορυφόρος που σχεδιάστηκε ειδικά για να επιδείξει τις δυνατότητες των μικρών δορυφόρων σε υψηλής ανάλυσης και ποιότητας χαρτογραφικές εφαρμογές. Η μάζα του είναι 108 kg και έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει εικόνες ανάλυσης 2,5 m από ύψος 600 km, κατευθειάν σε χρήστες που βρίσκονται κοντά στην φωτογραφιζόμενη περιοχή. Το κόστος του αποτελεί μόνο το 20% του κόστους άλλων δορυφόρων αντίστοιχων δυνατοτήτων.



Εικόνα 2. Εικόνες από την προετοιμασία και την εκτόξευση του μικρού χαρτογραφικού δορυφόρου υψηλής ανάλυσης Topsat

Ο δορυφόρος, έπειτα από κάποιες μικρές καθυστερήσεις, εκτοξεύθηκε επιτυχώς στις 27 Οκτωβρίου 2005 από το κοσμοδρόμιο του Plesetsk στη Βόρεια Ρωσία μέσω ενός 3M πυραύλου και μπήκε αρχικά σε χαμηλή τροχιά

πάνω από τους πόλους. Μετά από την πρώτη περίοδο ελέγχων που απαιτούνται ύστερα από τη εκτόξευση ενός δορυφόρου, ο TopSat ξεκίνησε την κανονική του λειτουργία το Δεκέμβριο του 2005. Μέχρι σήμερα, η κάμερά του έχει καταγράψει πάνω 1500 παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης [29].

Η εκτόξευση του TopSat αποτέλεσε την κορύφωση ενός προγράμματος που ξεκίνησε το 2000 και χρηματοδοτήθηκε από κοινού από το Βρετανικό Υπουργείο Άμυνας και το British National Space Centre (BNSC). Η αποστολή προέκυψε από τη συνεργασία τεσσάρων διαφορετικών ινστιτούτων του Ηνωμένου Βασιλείου. Οι καινοτόμες προσεγγίσεις που υιοθετήθηκαν, όσον αφορά στα κριτήρια και τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν μέσα σε αυτή την ανομοιογενή κοινοπραξία, έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην επίτευξη του ιδιαίτερα χαμηλού κόστους της αποστολής το οποίο ανέρχεται περίπου στα 24 εκ. δολάρια. Η QinetiQ που δημιουργήθηκε σχετικά πρόσφατα από το Defence Evaluation and Research Agency (DERA) της Βρετανικής κυβέρνησης ηγείται της αποστολής καθώς ουσιαστικά λειτουργεί τον δορυφόρο και χειρίζεται τη συλλογή των δεδομένων. Το Rutherford Appleton Laboratory (RAL) σχεδίασε και κατασκεύασε την πρωτοποριακή κάμερα του TopSat, το Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) κατασκεύασε το σώμα του σκάφους και ήταν υπεύθυνο για την εκτόξευσή του, ενώ η Infoterra Ltd είναι υπεύθυνη για την εμπορική αξιοποίηση των δεδομένων. Η αποστολή υποστηρίζεται επίσης από την κυβέρνηση της Μεγάλης Βρετανίας και εμπεριέχεται στο πρόγραμμα MOSAIC (Micro Satellite Applications in Collaboration) (Dewhurst et al, 2005).

Ο Topsat σχεδιάστηκε για να ικανοποιήσει τρεις αντικειμενικούς στόχους που είναι ζωτικής σημασίας για το μέλλον των μικρών δορυφόρων:

- Να αυξήσει τις πωλήσεις των μικρών δορυφόρων και να καθιερώσει - διατηρήσει την ύπαρξη μιας ανταγωνιστικής κατασκευαστικής βάσης δορυφόρων στην Μεγάλη Βρετανία.
- Να επιδείξει και να υποστηρίξει τη χρήση φτηνών δορυφόρων στην παροχή δεδομένων σε χρήστες, βάσει των αναγκών τους.
- Να υποστηρίξει την ανάπτυξη νέων αγορών για εικόνες και πληροφορίες χαμηλού κόστους, υψηλής ποιότητας και απόλυτης χρονικής εγκυρότητας.

Ο δορυφόρος έχει τη δυνατότητα καταγραφής εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης, παρόλο το μικρό του μέγεθος, χάρη στον πρωτοποριακό σχεδιασμό της κάμερας και στο ευέλικτο και ακριβές σύστημα ελέγχου του σκάφους που διαθέτει (Brooks P., 2001)

2.2.1. Σκάφος

Η δομή του σκάφους, που κατασκεύασε το Surrey Satellite Technology Limited (SSTL), βασίζεται στο βελτιωμένο όχημα μικροδορυφόρου που ονομάζεται MicroSat-150 και παρέχει αξιοθαύμαστες διευκολύνσεις όσον αφορά στον όγκο του, καθώς επίσης έχει μεγαλύτερες δυνατότητες δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος από την ηλιακή ενέργεια. Ο σχεδιασμός της κάμερας του TopSat είχε πολύ μεγάλη επίδραση στο σχεδιασμό του σκάφους και έτσι το σώμα του δορυφόρου είναι πολύ διαφορετικό από άλλα σκάφη που είχε κατασκευάσει το SSTL. Το μέγεθος και η μάζα του δορυφόρου, καθώς και οι απαιτήσεις για σταθερότητα στη δομή και την θερμοκρασία του σκάφους είχαν εμφανείς επιπτώσεις στο σχεδιασμό του. Τα επικλινή panel και η εξωτερική επένδυση του σκάφους είναι αξιοσημείωτα. Επιπλέον αλλαγές παρατηρούνται και στο εσωτερικό του δορυφόρου όπως τα προηγμένα συστήματα καθορισμού του υψομέτρου και ελέγχου που εξασφαλίζουν ακριβέστατη σκόπευση, ευκίνητους ελιγμούς και περιστροφικούς ελιγμούς αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης του δορυφόρου (FMC - Forward Motion Compensation) (Cawthorne et al, 2005, Levett et al, 2006, Baxter et al, 2006, [31])

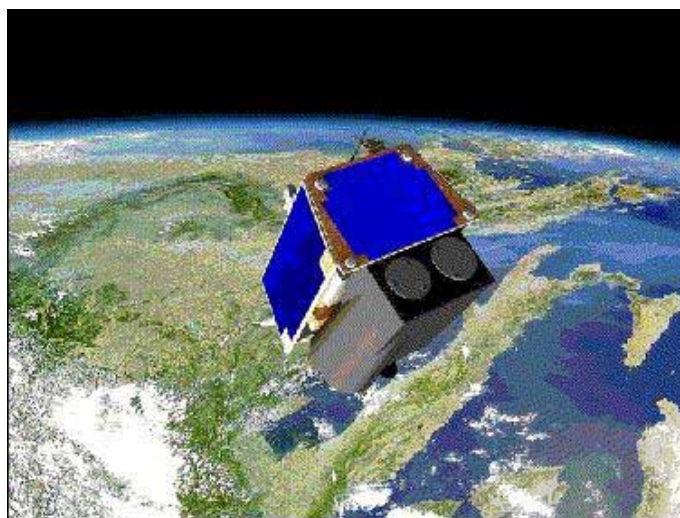


Εικόνα 3. Τα εσωτερικά συστήματα του δορυφόρου TopSat

Το μεγαλύτερο μέρος του σώματος του δορυφόρου είναι φτιαγμένο από αλουμίνιο, στη μορφή μηχανικών τμημάτων και κυψελοειδών panel. Το εσωτερικό χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πλήθους μικρο-δίσκων που συνιστούν τα κύρια όργανα ανοχής του βάρους, καθώς και από κάποια

επιπλέον τμήματα που χρησιμεύουν στο να παρέχουν περαιτέρω σταθερότητα. Τρία αυτοβασταζόμενα ηλιακά panel είναι τοποθετημένα στο εξωτερικό. Τέλος, πολλά συστήματα όπως ο δέκτης των VHF, η μπαταρία, το γυροσκόπιο από οπτικές ίνες και ο αισθητήρας οριζοντίωσης σε σχέση με τη Γη είναι στεγασμένα σε διαφορετικά τμήματα ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνσή τους.

Ο Topsat είναι εφοδιασμένος με σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης των στροφών του σκάφους και στους τρεις άξονες. Ουσιαστικά ο προσανατολισμός του δορυφόρου ελέγχεται από τροχούς αντίδρασης, ενώ η ορμή μηδενίζεται μέσω μαγνητικών ζευγών στροφορμής. Ο συνδυασμός των δύο συστημάτων παρέχει επιπλέον στο σκάφος την δυνατότητα στόχευσης $\pm 30^\circ$ (για να αυξάνεται η διαθεσιμότητα των στόχων και ο ρυθμός επανεπίσκεψης). Οι κλίσεις του σκάφους προσδιορίζονται μέσω αισθητήρων Γης και Ήλιου. Ταυτόχρονα, η ύπαρξη ενός υψηλής ακρίβειας, τριαξονικού γυροσκοπίου από οπτικές ίνες επιτρέπει να γίνονται ελιγμοί ώστε να αντισταθμίζονται pitch περιστροφές και κινήσεις εκτός τροχιάς. Η σταθερότητα του προσανατολισμού του σκάφους είναι της τάξης των 0.002° κατά τη διάρκεια των λήψεων (1.5 s), ενώ η ακρίβεια του ελέγχου είναι $\pm 0.2^\circ$ με γνώση $\pm 0.1^\circ$ και για τους τρεις άξονες (Price M. E., 2002, Dungate et al, 2002, Brooks P., 2001, Wallace and Parker, 2001, Wicks et al, 2001, Cawley S., 2003, Laycock et al, 2004, Dungate et al, 2004).

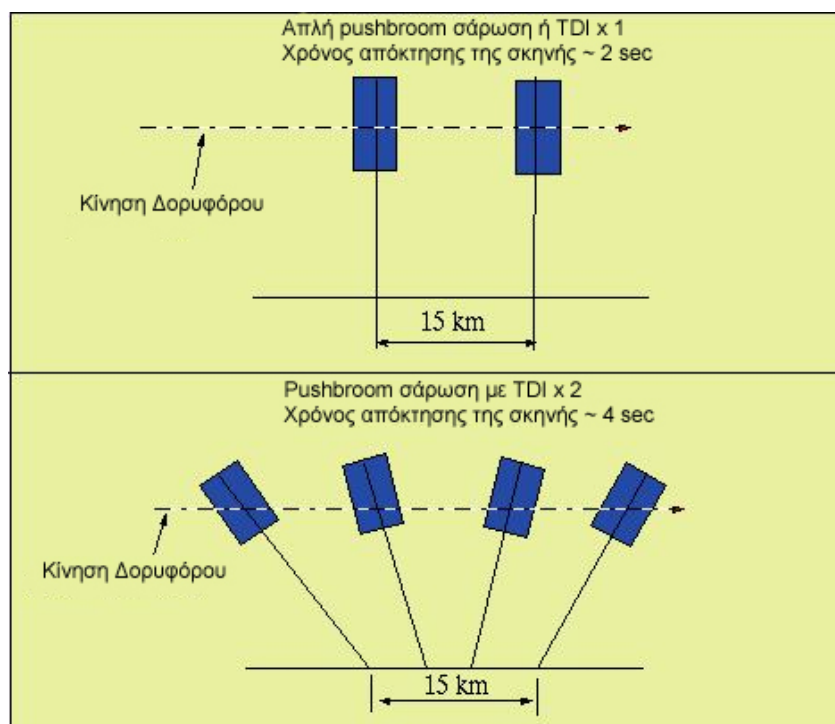


Εικόνα 4. Ο Topsat σε τροχιά γύρω από τη Γη

Η πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα υποστήριξης μηχανισμού TDI (Time Delay Integration), κατά τον οποίο το σκάφος ελίσσεται ώστε η κάμερα να

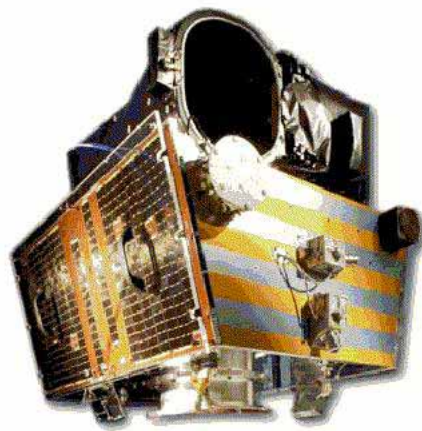
‘βλέπει’ τον στόχο της για περισσότερο χρόνο (αντίστοιχο με το να αυξάνουμε τον χρόνο έκθεσης κατά τη διαδικασία της σάρωσης). Κατά τη διάρκεια των TDI παρατηρήσεων η στροφή pitch του σκάφους αλλάζει έτσι ώστε να κοιτάει τον στόχο για περισσότερη ώρα. Στην αρχή της λήψης η κάμερα κοιτάει μπροστά προς τον στόχο, ενώ στο τέλος της λήψης κοιτάει προς τα πίσω. Ο Topsat έχει τη δυνατότητα για x8 TDI, με αποτέλεσμα η κάμερα να κοιτάει το στόχο για χρονικό διάστημα 8 φορές μεγαλύτερο από μία απλή pushbroom λήψη. Συνήθως η λειτουργία αυτή φτάνει μέχρι x2 έως x4 TDI. Όσον αφορά στη συνοχή της εικόνας, δύο ADCS (Attitude Determination and Control Subsystem) μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα:

- Ικανότητα roll περιστροφής του σκάφους ώστε να φωτογραφίζει στόχους μέχρι 30° εκτός τροχιάς.
- Ικανότητα pitch περιστροφής (μέχρι $\pm 20^\circ$) ώστε να υποστηρίζεται η λειτουργία IMC (Image Motion Compensation), κατά την οποία ο γραμμικός αισθητήρας σαρώνει τη Γη με ένα ρυθμό μικρότερο από την τροχιακή ταχύτητα του δορυφόρου. Αυτή η ταχύτητα σχετίζεται με την λειτουργία TDI όταν αυτή παίρνει την τιμή 1. Όταν έχουμε ότι $TDI = \infty$ σημαίνει ότι το σκάφος στοχεύει σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία καθ’ όλη τη διάρκεια της λήψης [6].



Εικόνα 5. Η κίνηση του δορυφόρου κατά τη διάρκεια λήψεων με λειτουργία TDI

Ο καθορισμός της τροχιάς και ο συγχρονισμός των ρολογιών γίνεται μέσω ενός δέκτη GPS. Τα τρία panel που βρίσκονται στο εξωτερικό του σκάφους παρέχουν κατά μέσο όρο ηλιακή ενέργεια μεγέθους 55 W. Η NiCd μπαταρία αποτελείται από 20 κελιά όπου το καθένα έχει χωρητικότητα 4 Ah. Τα υποσυστήματα διαχείρισης των δεδομένων και διακυβέρνησης του σκάφους λειτουργούν μέσω ενός επεξεργαστή ο οποίος εξασφαλίζει τον ημιαυτόνομο έλεγχο του δορυφόρου. Ο σχεδιασμένος χρόνος ζωής του Topsat είναι 1 χρόνος παρόλο που στο σχέδιο δεν υπάρχουν περιοριστικοί παράγοντες (π.χ. καύσιμα).



Εικόνα 6. Το σκάφος του Topsat πλήρως συναρμολογημένο

2.2.2. Τροχιά

Η τροχιά του TopSat είναι ηλιοσύγχρονη, το ύψος της είναι 686 km, έχει επίκλιση 98°, περίοδο 98.5 λεπτά, περνάει από τον ισημερινό στις 10:30 τοπική ώρα, ενώ μπορεί να επανεπισκέπτεται ένα στόχο κάθε 4 μέρες.

2.2.3. Επικοινωνία

Ο TopSat μπορεί να αποθηκεύει στη μνήμη του μέχρι τέσσερις πλήρεις και ασυμπιεστές σκηνές (2 Gbit). Η αποστολή των δεδομένων γίνεται μέσω S-band με ταχύτητες μέχρι 10 Mbit/s. Η QinetiQ λειτουργεί το κέντρο λειτουργίας του δορυφόρου και το επίγειο τμήμα διαχείρισης των δεδομένων. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα X-band σύνδεσης για αποστολή των δεδομένων σε κινητούς επίγειους σταθμούς με ταχύτητα μέχρι 10 Mbit/s (QPSK modulation). Η αποστολή των δεδομένων στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται μέσα σε λίγα λεπτά από τη λήψη των εικόνων [22].



Εικόνα 7. Ο κινητός επίγειος σταθμός υποδοχής των δεδομένων του TopSat

Η δυνατότητα αυτή ενσωματώθηκε στον TopSat για λόγους επίδειξης, αφού όπως είπαμε παραπάνω ο δορυφόρος σχεδιάστηκε για να επιδείξει τις ικανότητες που μπορεί να έχει ένας μικρός δορυφόρος. Η επίδειξη πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2007, κατά την οποία αφού διατάχθηκε η λήψη μιας εικόνας, αυτή λήφθηκε, στάλθηκε και επεξεργάστηκε από τον κινητό σταθμό με ένα μόνο πέρασμα του δορυφόρου πάνω από αυτόν, σε διάρκεια 37 λεπτών.

Η QinetiQ λειτουργεί 2 σταθερούς σταθμούς. Ο ένας βρίσκεται στο δυτικό Freugh της Σκωτίας και ο άλλος στο πανεπιστήμιο Τηλεπισκόπησης του Bradford (Bradford University Remote Sensing - BURS) στην Αγγλία. Για τον εντοπισμό του δορυφόρου από τους κινητούς επίγειους σταθμούς χρησιμοποιούνται σήματα S-band.

Παγχρωμ. & πολυφασμ. εικόνες που παρέχει η RALCam1	2.8 m GSD (παγχρ.), 5.6 m GSD (πολυφασμ.)
Πλάτος λήψης	15 km για παγχρ., 10 km για πολυφασμ.
Ποιότητα εικόνας	Απαιτείται αντιστάθμιση πρόσθιας κίνησης (FMC - Forward Motion Compensation)
Αποθηκευτική δυνατότητα δεδομένων	~300 Mbit (ίσο με 4 σκηνές)
Αποστολή δεδομένων	X-band στα 11 Mbit/s
Ποσότητα σκηνών που αποκτά	5 σκηνές/ημέρα
Αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος	Μπαταρία NiCd
Δυνατότητα σκόπευσης του σκάφους	$\pm 30^\circ$ σε δύο άξονες (κατά μήκος και εγκάρσια)
Σύστημα προώθησης	Κανένα
Μάζα και ενέργεια σκάφους	115 kg, 55 W

Πίνακας 7. Επισκόπηση των κυριότερων χαρακτηριστικών του TopSat

2.2.4. Υφιστάμενη κατάσταση της αποστολής

Ο TopSat λειτουργεί πλήρως από το 2007. Μέσω του πλεονεκτήματος του μικρού μεγέθους και κόστους, άνοιξε τον δρόμο για την εκτόξευση

δορυφόρων με χρήση απλών και μικρών οχημάτων εκτόξευσης. Αυτό σημαίνει ότι μειώνεται το κόστος εκτόξευσης των δορυφόρων που λαμβάνουν εικόνες και επομένως μειώνεται η τιμή των διατιθέμενων εικόνων με αποτέλεσμα αυτές να είναι πιο προσιτές στους αγοραστές.

Στο μεταξύ ο TopSat πρόκειται στο μέλλον να επιδείξει και άλλες δυνατότητες που μπορούν να παρέχουν τα συστήματά του όσον αφορά στην μείωση του χρόνου λήψης των εικόνων αλλά και στην ποιότητα αυτών (Baxter and Levett, 2007). Μελλοντικά σχέδια της εταιρίας για τον δεύτερο χρόνο λειτουργίας του δορυφόρου αναφέρουν ακόμη έναν αριθμό επιδείξεων που έχουν να κάνουν με χρήση πειραματικών λογισμικών.

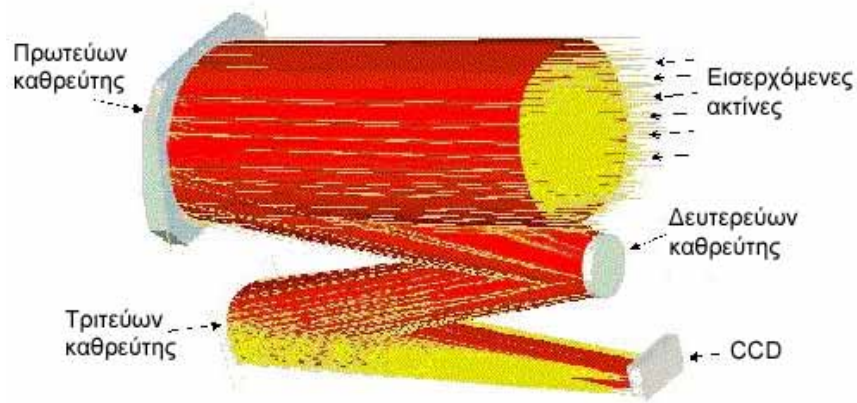
Τα κύρια επιτεύγματα του TopSat μέχρι τώρα είναι:

- καταρχήν το γεγονός ότι απέδειξε ότι είναι εφικτό να κατασκευαστεί και να εκτοξευτεί ένα εμπορικός δορυφόρος λήψης εικόνων υψηλής ανάλυσης με μικρό κόστος
- δεύτερον ότι απέδειξε πως μπορεί να υπάρξει, με μικρό ρίσκο, ένα πλήρως λειτουργικό και χαμηλού κόστους ηλεκτρο-οπτικό σύστημα
- επιπλέον έδειξε ότι γίνεται να έχουμε υψηλής ανάλυσης εικόνες σε ένα προσιτό για τους αγοραστές κόστος
- και τέλος αποτελεί ένα πλήρως λειτουργικό και ευκίνητο σύστημα που μπορεί κάλλιστα να αντεπεξέρχεται στον σκοπό της φωτογράφισης [6].

2.2.5. Κάμερα

Παρόλη την μεγάλη ανάγκη που υπάρχει στις μέρες μας για φθηνές εικόνες υψηλής ανάλυσης και συνεπώς για οικονομικές εναέριες μηχανές που να μπορούν να τις παράγουν, το υψηλό κόστος αυτών των οργάνων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την πτώση των τιμών που θα μπορούσε να υπάρξει στο εμπόριο των δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης.

Η RAL συνεργάστηκε με την QinetiQ στην ανάπτυξη ενός προσαρμοζόμενου σχεδίου για μία συμπαγή και οικονομική κάμερα που να παρέχει εδαφοψηφίδα 2.5 μέτρων. Το σχέδιο των δύο εταιριών μπορεί να κατασκευάζεται σε διάφορες κλίμακες ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις διάφορων αποστολών, καθώς επίσης με περαιτέρω εξέλιξη μπορεί να φτάσει να δίνει εδαφοψηφίδα 1 μέτρου.



Εικόνα 8. Σχέδιο του οπτικού συστήματος του Toposat [30]

Το σύστημα περιλαμβάνει ένα push-broom σαρωτή που στηρίζεται στο συνδυασμό τριών καθρεφτών εκτός του άξονα του τηλεσκοπίου, και στου οποίου το εστιακό επίπεδο είναι προσαρμοσμένος ένας μακρύς, γραμμικός CCD (Charge Coupled Device) ανιχνευτής. Προκειμένου να μειωθεί το κόστος, το σύστημα είναι τόσο συμπαγές ώστε να μπορεί να μεταφερθεί μέσα σε ένα μικρό δορυφόρο της τάξης των 100 με 200 kg.

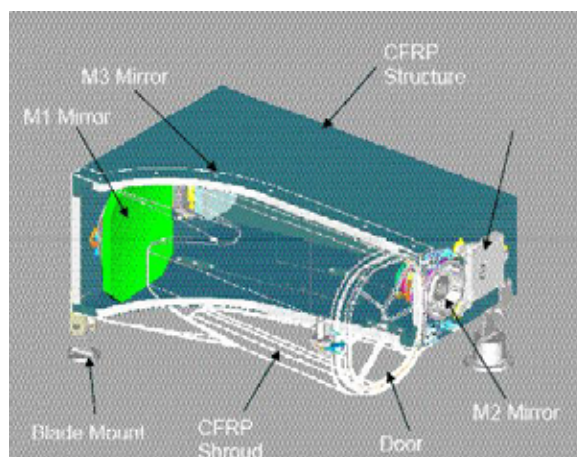
Για να επιτευχθεί τέτοιας τάξης ανάλυση εικόνων από το διάστημα απαιτείται ιδιαίτερα ακριβής παράταξη των οπτικών συστημάτων καθώς και πολύ μεγάλη σταθερότητα στις υποστηρικτικές δομές των οπτικών εξαρτημάτων. Στην τοποθέτηση των εξαρτημάτων χρειάζεται να υπάρχει ακρίβεια της τάξης των 10 μικρών, ενώ αυτή πρέπει να διατηρηθεί καθ' όλο το διάστημα της εκτόξευσης αλλά και της λειτουργίας του δορυφόρου στο διάστημα.



Εικόνα 9. Βασική δομή του εξωτερικού του οπτικού συστήματος

Η βασική δομή των οργάνων είναι κατασκευασμένη από φύλλα ανθρακικών ινών και κυανιούχων εστέρων ώστε να σχηματίζουν μία ελαφριά και άκαμπτη υποστήριξη για τα οπτικά εξαρτήματα. Το μέγεθος και το είδος του ανιχνευτή CCD μπορεί να επιλεγεί ανάμεσα από μία σειρά

διαθέσιμων διατάξεων (arrays) ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής.



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση της οπτικής κάμερας RALCam 1

Το άμεσο οπτικό πεδίο του οπτικού συστήματος είναι $\pm 1.2^\circ \times \pm 0.35^\circ$. Όσον αφορά στη διάταξη των ανιχνευτών CCD που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αυτή μπορεί να είναι μήκους μέχρι 70 mm [6]. Οι βασικές παράμετροι του συστήματος της μηχανής λήψης εικόνων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Εστιακή απόσταση (mm)	1680
Προβολή της απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο γειτονικών εικονοστοιχείων (GSD) (m)	2.5 (από 600 km ύψος)
Μέγεθος Pixel CCD (μm)	7
Διάμετρος οπής (mm)	200
Οπτικό πεδίο	$\pm 1.2^\circ \times \pm 0.35^\circ$
Οπτικό πεδίο στο εστιακό επίπεδο	$\pm 35 \text{ mm} \times \pm 10 \text{ mm}$
Πλάτος λήψης (λωρίδας) *	15 km στο παγχρωματικό, 10 km στο πολυφασματικό
Μέγιστο μήκος σκηνής	Περίπου 30 km
Ταχύτητα εδάφους (km/s)	6.908 (από 600 km ύψος)
Χρόνος για διανύσει 2.5m (ms)	0.362
Μέγεθος οργάνου (mm)	677 x 600 x 300
Μάζα οργάνου	32 kg
Φασματικό εύρος παγχρωματικού καναλιού	0.5-0.7 μm
Φασματικό εύρος πολυφασματικών καναλιών	0.4-0.5 , 0.5-0.6 και 0.6-0.7 μm
Παγχρωματικός αισθητήρας	Kodak array 6000 στοιχείων
Πολυφασματικός αισθητήρας	Kodak array 3x 2000 στοιχεία
Θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής RALCam1	15 $^\circ$ C \pm 5 $^\circ$ C (η θερμοκρασία ρυθμίζεται με θερμική μόνωση)
Κατανάλωση ρεύματος	30 W σε λειτουργία, 10W σε κατάσταση αναμονής

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά του συστήματος της κάμερας του Topsat

*Σημείωση σχετικά με το πλάτος λήψης (Swath width): Οι αρχικές προδιαγραφές για τον Topsat καθόριζαν το πλάτος λήψης στα 15 km για τις παγχρωματικές λήψεις και στα 10 km για τις πολυφασματικές, δεδομένου ότι το ύψους τροχιάς θα ήταν 600 km. Επειδή όμως το πραγματικό ύψος της τροχιάς είναι 686 km, το πλάτος λήψης είναι ελαφρώς διαφορετικό (δηλαδή μεγαλύτερο). Το οπτικό πεδίο της μηχανής είναι στην πραγματικότητα μεγαλύτερο από την επιφάνεια λήψης (π.χ. δεν αποτυπώνεται το πλήρες οπτικό πεδίο στο εστιακό επίπεδο επειδή η τεχνολογία της μηχανής του Topsat χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους επίδειξης, οπότε δεν χρησιμοποιείται το πλήρες οπτικό πεδίο). Από την άλλη, η RAL υποστηρίζει ότι το πλάτος λήψης της μηχανής είναι 25 km, το οποίο αντιστοιχεί μόνο στο πλήρες εστιακό επίπεδο [6].

2.2.6. Προϊόντα

Όπως προαναφέρθηκε, υπεύθυνη για την εμπορική αξιοποίηση και διάθεση των προϊόντων του Topsat είναι η Infoterra Ltd. Παρ' όλα αυτά, ύστερα από μια σύντομη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον δικτυακό τόπο της εταιρείας, δεν φαίνεται να διαθέτει ή να πουλάει τα προϊόντα του δορυφόρου. Από την άλλη, βρέθηκε ότι η Infoterra Ltd διαθέτει δωρεάν εικόνες του Topsat σε συμβεβλημένα πανεπιστήμια της Μ. Βρετανίας. Έτσι αν κάποιος ερευνητής ανήκει σε ένα από αυτά τα πανεπιστήμια, μπορεί να παραγγείλει είτε παγχρωματικές, είτε πολυφασματικές εικόνες χωρίς κόστος. Πιο συγκεκριμένα τα παρεχόμενα προϊόντα είναι:

1. Πολυφασματικές εικόνες – Ανάλυση στο Ναδύρ: 5.7m, Μέγεθος Σκηνής: 18 x 12km, κανάλια: RGB
2. Παγχρωματικές εικόνες – Ανάλυση στο Ναδύρ: 2.9m, Μέγεθος Σκηνής: 17 x 17km, κανάλια: 500 – 700nm

Διευκρινίζεται πάντως ότι αν κάποιος θέλει ορθοδιορθωμένες παγχρωματικές εικόνες, το κόστος τους ανέρχεται στις 300 λίρες Αγγλίας ανά εικόνα. Η ορθοδιόρθωση μπορεί να γίνει μόνο μέσω παραγγελίας, καθώς το μοντέλο της μηχανής δεν έχει δοθεί στη δημοσιότητα. Ακόμη, φαίνεται ότι τα προϊόντα θα διατίθενται στα πανεπιστήμια δωρεάν μέχρι τον Φεβρουάριο του 2008, καθώς οι υπεύθυνοι λειτουργίας του δορυφόρου

πρόκειται να επανεξετάσουν την μέχρι τότε πορεία της συμφωνίας τους με αυτά για να αποφασίσουν τη συνέχισή της [33].

2.3. EROS B (EARTH REMOTE OBSERVATION SATELLITE-B)



Εικόνα 11. Το σκάφος του μικρού χαρτογραφικού δορυφόρου υψηλής ανάλυσης EROS B

Το 1998 η ImageSat International (Ισραήλ) εκτόξευσε τον πρώτο μη Αμερικανικό μικρό χαρτογραφικό δορυφόρο πολύ υψηλής ανάλυσης ως μέρος του προγράμματος EROS (Earth Remote Observation Satellite), αλλά δυστυχώς αυτός καταστράφηκε κατά την εκτόξευση. Η ομάδα των EROS αποτελούνταν αρχικά από δύο διαφορετικούς τύπους δορυφόρων που λέγονταν EROS-A και EROS-B αντίστοιχα, και οι οποίοι είχαν σχεδιαστεί για να αποτελούν συστήματα παρατήρησης της Γης με γρήγορη σκόπευση τοποθεσιών, ικανότητα να συλλέγουν ναδρικές εικόνες ανάλυσης καλύτερης από 1 m, καθώς και να πραγματοποιούν πλάγιες λήψεις.

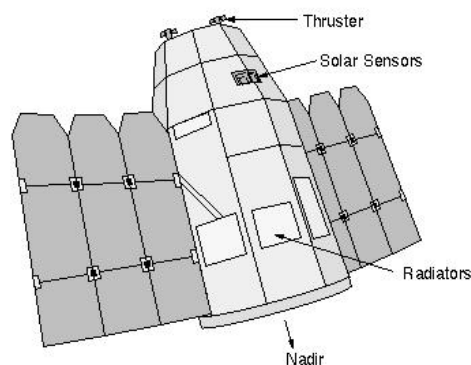
Δύο χρόνια αργότερα, στις 5 Δεκεμβρίου του 2000, ο EROS-A1 εκτοξεύτηκε επιτυχώς από το Ρωσικό κοσμοδρόμιο Svobodny, της Σιβηρίας [Bar-Lev et al., 2001]. Μετέπειτα, ο EROS-A2, αντίγραφο του EROS-A1 και αρχικά σχεδιασμένος να εκτοξευτεί στο τέλος του 2001, ακυρώθηκε για χάρη της γενιάς δορυφόρων EROS-B. Ο αρχικός σχεδιασμός της εταιρείας έλεγε πως θα εκτοξευτεί μια ομάδα έξι δορυφόρων EROS-B (EROS-B1 - EROS-B6), αλλά στη συνέχεια αρκέστηκαν μόνο σε έναν περιμένοντας να ολοκληρωθεί η επόμενη γενιά των δορυφόρων EROS-C, που προγραμματίζεται να είναι έτοιμοι το 2009 (Gianinetto M., 2006).

Στις 2:47 (ώρα Σιβηρίας) στις 25 Απριλίου του 2006 η ImageSat εκτόξευσε τον δεύτερο δορυφόρο υψηλής ανάλυσης της ισραηλινής οικογένειας των EROS. Η εκτόξευση πραγματοποιήθηκε στο κοσμοδρόμιο Svobodni της Σιβηρίας μέσω του τετραώροφου πυραύλου εκτόξευσης Start1. Αφού πέρασαν οι πρώτες μέρες που απαιτούνται για τον πλήρη έλεγχο της λειτουργίας ενός δορυφόρου, στις 30 Απριλίου ο EROS B ξεκίνησε να λειτουργεί κανονικά παρέχοντας τις πρώτες του εικόνες. Ο δορυφόρος αναμένεται να παραμείνει σε λειτουργία για 10 χρόνια, δηλαδή

μέχρι το 2016 (συνήθως ο χρόνος λειτουργίας αντίστοιχων δορυφόρων είναι 5-7 χρόνια) [15].

2.3.1. Σκάφος

Λίγο ελαφρύτερος και παρόμοιος στην εμφάνιση με τον EROS A1, ο EROS B ζυγίζει 290 kg και έχει αρκετά καλύτερες δυνατότητές από τον πρώτο όπως μεγαλύτερη CCD/TDI κάμερα, παγχρωματική ανάλυση 0.70 m σε ύψος περίπου 500 km, μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο δεδομένων, βελτιωμένη ακρίβεια στόχευσης και πολύ γρηγορότερη μεταφορά δεδομένων.



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της δομής του σκάφους του EROS B

Η δομή του σκάφους του EROS-B είναι ίδια με αυτή του EROS-A1, βασίζεται στην πλατφόρμα Ofeq του Ισραηλινού Υπουργείου Άμυνας και σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την Israel Aircraft Industries Ltd. (IAI/MBT). Οι διαστάσεις του είναι 2.3 m ύψος και 4 m πλάτος. Ο δορυφόρος μπορεί να περιστρέφεται γύρω και από τους 3 άξονες, ενώ σε συνδυασμό με τον ελαφρύ σχεδιασμό του εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η ευκινησία του. Το σώμα του δορυφόρου μπορεί να αποκλίνει από το Ναδίρ κατά $\pm 45^\circ$ προς όλες τις διευθύνσεις υποστηρίζοντας έτσι το ημερήσιο πρόγραμμα λήψεων εικόνων. Το ύψος του εντοπίζεται και ελέγχεται όπως ακριβώς και στον EROS-A1. Επιπλέον, ο EROS-B έχει και αισθητήρα αστεριών. Παρόλο που η ονομαστική διάρκεια ζωής και μάζα του δορυφόρου είναι 6 χρόνια και 290 kg αντίστοιχα, με επιπλέον καύσιμα (μέχρι 60 kg) ο χρόνος λειτουργίας του αυξάνεται στα 10 χρόνια έχοντας ως αποτέλεσμα η μάζα του δορυφόρου την ώρα της εκτόξευσης να είναι 350 kg [4].

2.3.2. Τροχιά

Η τροχιά του είναι κυκλική ηλιοσύγχρονη ώστε να εξασφαλίζεται ο καλός φωτισμός των εικόνων. Το μέσο ύψος της τροχιάς είναι 500 km, ενώ υπάρχει μία κλίση 97.4°. Μετά την εκτόξευση του EROS B η ImageSat Int. δημιούργησε μία ομάδα δύο δορυφόρων υψηλής ανάλυσης σε τροχιά. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται ότι πήρε το προβάδισμα από τις δύο άλλες πρωτοπόρους εταιρίες στον χώρο -την American Digital Globe και την GeoEye-. Οι τροχιές των δύο δορυφόρων έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ηλιοσύγχρονες και να βρίσκονται μεταξύ τους στο ίδιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος επανεπίσκεψης ενός τόπου [4]. Ουσιαστικά ο EROS A1 παραδίδει εικόνες το πρωί ενώ ο EROS B το απόγευμα. Οι δύο δορυφόροι περιστρέφονται γύρω από τη Γη 15 φορές τη μέρα. Επιπλέον, η ικανότητα απόκλισης του σώματος του δορυφόρου από το Ναδίρ κατά $\pm 45^\circ$ και συνεπώς οι πλάγιες λήψεις που μπορεί να παρέχει εξασφαλίζουν τελικά την απεικόνιση οποιουδήποτε μέρους στη Γη 2-3 φορές την εβδομάδα. Έτσι αυξάνεται η πιθανότητα, η συχνότητα και η ποιότητα των απεικονίσεων ενός στόχου. Οι άλλες ανταγωνίστριες εταιρίες αδυνατούν να παρέχουν αντίστοιχες υπηρεσίες σήμερα. Το μειονέκτημα της αδυναμίας των δύο ισραηλινών δορυφόρων να παρέχουν φασματικές εικόνες αντισταθμίζεται από τις χαμηλές τους τιμές.

2.3.3. Επικοινωνία και διανομή προϊόντων

Για την διανομή των εικόνων EROS και την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχει ιδρυθεί ένα παγκόσμιο δίκτυο 12 σταθμών που είναι εγκατεστημένοι στην Ευρώπη, την Ασία, την Αφρική και τη Νότιο Αμερική. Ταυτόχρονα, οι δύο δορυφόροι εξυπηρετούν και εμπορικούς και στρατιωτικούς-αμυντικούς σκοπούς. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι το στρατιωτικό τμήμα του Ισραήλ χρησιμοποιεί τις εικόνες των EROS για παρακολούθηση των τεκταινόμενων στη Μέση Ανατολή και το Ιράν και για το λόγο αυτό ο EROS-B χαρακτηρίζεται ως κατασκοπικός δορυφόρος.

Οι εικόνες μεταδίδονται στους σταθμούς υποδοχής στη Γη μέσω X-band με ταχύτητα 280 Mbit/s, χρησιμοποιώντας έναν πομπό 1.5 W και μία από τις δύο υπάρχουσες κεραιές. Όταν ο δορυφόρος εισέρχεται στην περιοχή του σταθμού υποδοχής κατευθύνει την κεραία του προς την κεραία του σταθμού ώστε να καταστήσει δυνατή την μεταξύ τους επικοινωνία. Ο

σταθμός λαμβάνει τα δεδομένα από τον δορυφόρο, τα επεξεργάζεται και αποθηκεύει τις εικόνες που προκύπτουν σε ένα τοπικό αρχειοφυλάκειο [12]. Η διαδικασία φωτογράφισης του δορυφόρου προκαθορίζεται και ελέγχεται από τα κέντρα ελέγχου αυτού. Η παρακολούθηση και λειτουργία των EROS πραγματοποιείται μέσω S-Band (TT&C) από τον κεντρικό σταθμό ελέγχου που βρίσκεται τοποθετημένος στο IAI/MBT του Ισραήλ (3 με 4 περάσματα ανά ημέρα και ανά δορυφόρο γίνονται στο πεδίο ορατότητας αυτού του σταθμού). Η ταχύτητα του S-band είναι είτε 2.5 είτε 15 kbit/s και επιλέγεται κάθε φορά από τον σταθμό [4].

2.3.4. Κάμερα

Η παγχρωματική κάμερα PIC-2 (Panchromatic Imaging Camera-2) σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την ισραηλινή EIOp (Electro Optical Industries), μια θυγατρική εταιρία της Elbit Systems Ltd. Ο μηχανισμός λήψης εικόνων του EROS-B χρησιμοποιεί την τεχνολογία CCD σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό TDI (Time Delay Integration) στο εστιακό του επίπεδο. Στην κάμερα υπάρχει ένα τηλεσκόπιο Cassegrain με οπή 50 cm, εστιακή απόσταση 5 m και οπτικό πεδίο 1.5°. Η PIC-2 είναι πολύ γερά ενσωματωμένη στο σκάφος και κοιτάει προς το Ναδίρ, επιτρέποντας έτσι οι στοχεύσεις των λήψεων να γίνονται κατόπιν περιστροφής ολόκληρου του σώματος του δορυφόρου μέσω γυροσκοπικών τροχών.

Η διάταξη του CCD pushbroom αισθητήρα παρέχει 10.000 pixels ανά γραμμή και ένα σύνολο 96 γραμμών για παρατηρήσεις με επιλέξιμες λειτουργίες TDI (2 CCD πίνακες σε κάθε γραμμή). Η pushbroom σάρωση διατίθεται μόνο για παγχρωματικές λήψεις σε φασματικό εύρος από 0.5 μέχρι 0.9 μm . Η εδαφοψηφίδα είναι 0.70 m και το πλάτος λήψης είναι 14 km στο Ναδίρ. Ο EROS B μπορεί να λαμβάνει είτε απλές εικόνες (frame: 7x7 km), είτε λωρίδες (swath: 7 km πλάτος και μέχρι 190 km μήκος), είτε στερεοσκοπικά ζεύγη εικόνων. Τα δεδομένα έχουν ραδιομετρική ανάλυση 10 bit, ενώ υπάρχουν δύο καταγραφείς εικόνων μεγέθους μέχρι 120 Gb, καθώς και ειδικός εξοπλισμός μεταφοράς (downlink) δεδομένων στη Γη ταχύτητας 450 Mbit/sec [4].

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μικροί Οπτικοί Χαρτογραφικοί Δορυφόροι Υψηλής Ανάλυσης

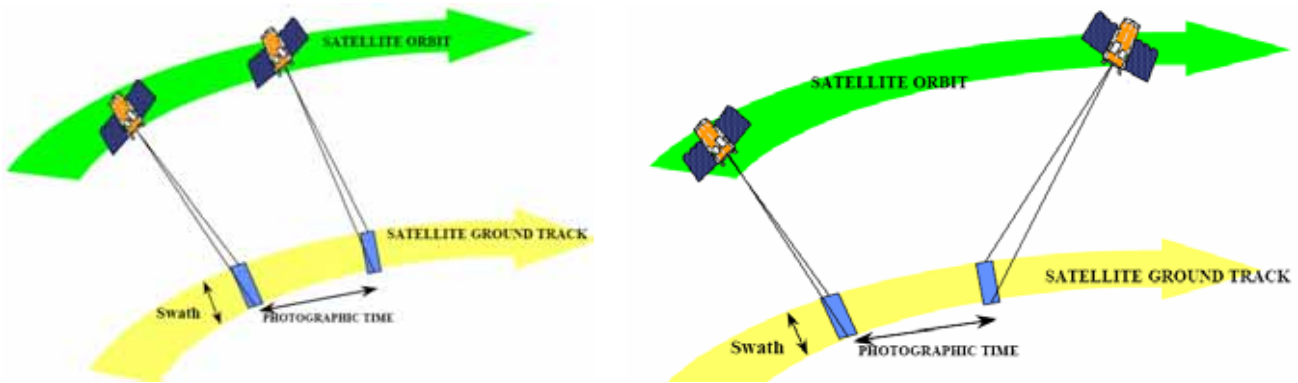
Κυκλική ηλιοσύγχρονη τροχιά	~ 500 km
GSD (Ground Sampling Distance)	0.70 m Παγχρωματικό
Πλάτος λήψης	14 km
Τύπος σάρωσης	Ασύγχρονη pushbroom ή σύγχρονη pushbroom, Μέγιστη ταχύτητα σάρωσης 2400 γραμμές/sec
Φασματικό εύρος λήψεων	0.5-0.9 μ m
Ποσοτικοποίηση δεδομένων	10 bit
Ταχύτητα αποστολής δεδομένων	280 Mbit/s
Είδος αισθητήρα	CCD-TDI, Επιλέξιμο 1,4,8,16,32,48,96
Φως ηλίου για τις λήψεις	Ο ήλιος πρέπει να σχηματίζει γωνία πάνω από 10° με τον ορίζοντα

Πίνακας 9. Επισκόπηση των κυριότερων παραμέτρων λήψης του EROS B

Γενικά, οι συμβατικοί δορυφόροι είναι σχεδιασμένοι να λαμβάνουν εικόνες σε λειτουργία συγχρονισμού. Στην περίπτωση αυτή, η ταχύτητα σάρωσης είναι ίση με την ταχύτητα του δορυφόρου στο έδαφος, η οποία εξαρτάται από το ύψος της τροχιάς. Αυτός ο τύπος λήψεων λαμβάνει συνήθως εικόνες κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου (π.χ. ο ASTER), ή παράλληλα με αυτή μέσω κατόπτρων (π.χ. ο SPOT). Οι EROS-A1 και B έχουν μία μοναδική λειτουργία ασύγχρονης pushbroom σάρωσης για την απόκτηση εικόνων κατά την οποία η ταχύτητα σάρωσης είναι διαφορετική από την ταχύτητα του σκάφους στο έδαφος. Συνεπώς, κατά μήκος της τροχιάς, ο δορυφόρος στοχεύει προς τα πίσω με μια αυξανόμενη κλίση, ώστε να πραγματοποιήσει τη φωτογράφιση του εδάφους (Petrie, 1999). Επιπλέον, η δυνατότητα της συνεχούς αλλαγής των pitch και yaw στροφών κατά τη διάρκεια των λήψεων επιτρέπει την απόκτηση στερεοζευγών με ένα πέρασμα του δορυφόρου.

Από την άλλη, οι ασύγχρονες λήψεις έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη γεωμετρία των εικόνων. Το σχήμα των σκηνών είναι ιδιαίτερα διαστρεβλωμένο και η χωρική ανάλυση αλλάζει συνεχώς, ακόμα και τοπικά, λόγω της μεταβολής της γωνίας λήψης (Toutin, 2004a).

Ο μηχανισμός λήψεων του EROS-B μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους. Σε λειτουργία συγχρονισμού το σκάφος διατηρεί ένα σταθερό σημείο στόχευσης πάνω στην επιφάνεια της Γης, ενώ σε λειτουργία μη συγχρονισμού πραγματοποιούνται τα παραπάνω.



Εικόνα 13. (α) Συμβατική λήψη εικόνων σε λειτουργία συγχρονισμού, (β) Λήψη εικόνων σε λειτουργία μη συγχρονισμού από τους δορυφόρους EROS

2.3.5. Προϊόντα

Η ImageSat International παρέχει διάφορους τύπους παγχρωματικών εικονιστικών προϊόντων που προέρχονται από τους δορυφόρους EROS A και EROS B, τα οποία χαρακτηρίζονται από:

A) Την τεχνική λήψης – ο τρόπος κατά τον οποίο χρησιμοποιείται το σκάφος για να αποκτήσει την εικονιστική πληροφορία, είτε

B) Το επίπεδο επεξεργασίας των προϊόντων – ο βαθμός της επεξεργασίας στον οποίο υποβάλλονται τα εικονιστικά προϊόντα στο έδαφος μετά την απόκτηση και υποδοχή τους στους επίγειους σταθμούς.

Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο, προκύπτουν τα εξής προϊόντα για ναδρικές εικόνες και ύψος τροχιάς 500 km [8]:

Παγχρωματικές εικόνες	Διαστάσεις	Επισημάνσεις
Βασική εικόνα	7 km x 7 km	0.7 μέτρα GSD στο Ναδίρ
Συνεχής λωρίδα Εικόνων	7 km x μέχρι 190 km	
Στερεοζεύγος	7 km x 7 km	Δύο επικαλυπτόμενες εικόνες που έχουν ληφθεί σε ένα πέρασμα του δορυφόρου με συμμετρικές ή διαφορετικές γωνίες λήψης.

Πίνακας 10. Προϊόντα του EROS B σύμφωνα με την τεχνική λήψης

Αντίστοιχα, σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο έχουμε:

Βαθμός επεξεργασίας	Επωνυμία επεξεργασίας	Επισημάνσεις
Ραδιομετρική διόρθωση	Επίπεδο 1A	Εικόνες Raw σε format 10 bit που έχουν διορθωθεί με βάση τα γνωστά χαρακτηριστικά της μηχανής, ως προς την αντίδρασή της στην ακτινοβολία (παρέχονται πάντα και σε format TIFF στα 16bit).

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μικροί Οπτικοί Χαρτογραφικοί Δορυφόροι Υψηλής Ανάλυσης

Γεωμετρική διόρθωση	Επίπεδο 1B	Γεωμετρικές διορθώσεις που βασίζονται στη γνώση του αισθητήρα ή της εφημερίδας δορυφόρου εφαρμόζονται ώστε να αποκαταστήσουν στρεβλώσεις που οφείλονται στο οπτικό σύστημα της μηχανής ή στην σάρωση. Τα προϊόντα του επιπέδου 1B είναι και ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένα και παρέχονται σε GeoTIFF format των 16 bit (επίσης μπορούν να χορηγηθούν σε format GeoTiff 8Bit, Tiff 16bit, Tiff 8bit και RAW)
Ορθοαναγωγή & άλλα επιπρόσθετα προϊόντα		Σύμφωνα με την εκάστοτε παραγγελία

Πίνακας 11. Προϊόντα του EROS B σύμφωνα με το επίπεδο επεξεργασίας

2.4. ORBVIEW 3

Ο OrbView-3 είναι ένας μικρός δορυφόρος λήψης εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης που παρέχει εδαφοψηφίδα 1 m σε παγχρωματικές εικόνες. Εκτοξεύτηκε στις 26 Ιουνίου του 2003 στις 3:05 (τοπική ώρα) από την βάση Vandenberg Air Force Base στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Η εκτόξευση πραγματοποιήθηκε μέσω ενός πυραύλου Pegasus της Orbital Sciences Corporation. Περίπου 10 λεπτά μετά την αρχική πυροδότηση του πυραύλου στις 2:55, ο δορυφόρος αποσυνδέθηκε από τον Pegasus και μπήκε στη σχεδιασμένη του τροχιά. 1 ώρα και 13 λεπτά μετά την αποσύνδεση υπήρξε η πρώτη επικοινωνία του δορυφόρου με τον τερματικό σταθμό της ιδιοκτήτριας εταιρίας OrbImage στο Point Barrow της Αλάσκας, υποδεικνύοντας ότι τα βασικά συστήματα του δορυφόρου λειτουργούσαν όπως έπρεπε. Ύστερα από μερικές μέρες ο OrbView-3 μπήκε στην τελική του τροχιά σε ύψος 470 km και ολοκληρώθηκε ο έλεγχος λειτουργίας όλων των υποσυστημάτων του [16]. Ο χρόνος λειτουργίας του δορυφόρου υπολογιζόταν στα 7 χρόνια (βλ. 2.4.4.), δηλαδή μέχρι το 2010, ενώ το κόστος του ανέρχεται στα 40 εκατομμύρια δολάρια.

Αρχική ιδιοκτήτρια του δορυφόρου ήταν η OrbImage (η οποία έχει εκτοξεύσει και τους OrbView 1 και 2), αλλά τον Φεβρουάριο του 2006 ανακοινώθηκε η συγχώνευσή της με την Space Imaging (ιδιοκτήτρια του δορυφόρου IKONOS). Η νέα εταιρία ονομάστηκε GeoEye και αποτελεί ίσως τη μεγαλύτερη εταιρία στο χώρο των χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης [32].

2.4.1. Σκάφος

Το σκάφος του OrbView-3 είναι βασισμένο στο δοκιμασμένο σχέδιο του OSC LeoStar. Το σώμα του έχει σχεδιαστεί από το STEP (Space Technology Experiment Program) και αποτελείται από 12 πλευρικές, οριζόντιες, κυψελωτές επιφάνειες και αλουμινένια φύλλα ή κυψελωτά πλευρικά panel που ενισχύουν την κατασκευή και παρέχουν προστασία του εσωτερικού εξοπλισμού από την ακτινοβολία. Η δομή του σκάφους χωρίζεται σε τρία μέρη (προώθηση, πυρήνας και εξωτερικό), καθένα από τα οποία είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να μπορεί εύκολα να συνδεθεί με τα υπόλοιπα κατά την τελική συναρμολόγηση και για γρήγορους ελέγχους.



Εικόνα 14. Το σκάφος του Orbview-3

Το σώμα του δορυφόρου είναι ένας κύλινδρος διαμέτρου 1.2 m και μήκους 1.9 m. Ένα ηλιακό panel είναι προσαρτημένο στην «πάνω» μεριά του κυλίνδρου. Ο OrbView-3 μπορεί να περιστρέφεται και να παραμένει σταθερός και κατά τους τρεις άξονες παρέχοντας έτσι ακρίβεια στόχευσης μικρότερη από 100 δεύτερα του τόξου. Η ακρίβεια στόχευσης μετά την επεξεργασία κάποιων προϊόντων επιτρέπει τον εντοπισμό των εικονοστοιχείων με ακρίβεια ± 12 m. Το υποσύστημα ελέγχου του υψομέτρου χρησιμοποιεί ειδικό γυροσκόπιο, αισθητήρα αστεριών και ηλίου, καθώς και μαγνητόμετρο για καθορισμό του υψομέτρου. Επιπλέον, τέσσερις τροχοί αντίδρασης (οι τρεις πάντα ενεργοί και ο ένας εφεδρικός) και προωθητικοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για όλες τις άλλες λειτουργίες κίνησης. Το σκάφος έχει την ικανότητα να στοχεύει $\pm 50^\circ$ κατά μήκος και εγκάρσια της διεύθυνσης τροχιάς αυξάνοντας έτσι το πεδίο όρασης για όλες τις παρατηρήσεις. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του δορυφόρου καθώς με ένα μόνο πέρασμα διάρκειας 10 λεπτών μπορεί να καταγράψει περιοχές εμβαδού μέχρι 20000 km² (μονοσκοπικές παρατηρήσεις ανάλυσης 1 μέτρου) ή 7200 km² (στερεοσκοπικές παρατηρήσεις ανάλυσης 1 μέτρου).

Η μάζα του είναι περίπου 304 kg (μάζα εκτόξευσης 360 kg), ενώ η διάρκεια ζωής του είναι 5 χρόνια ([18], [19], [20]).

2.4.2. Τροχιά

Η τροχιά του OrbView-3 είναι ηλιοσύγχρονη, το ύψος της είναι 470 km, έχει επίκληση 97.25°, περίοδο 92.5 λεπτά, περνάει από τον ισημερινό

στις 10:30 τοπική ώρα, ενώ μπορεί να επανεπισκέπτεται ένα στόχο κάθε 1-5 μέρες (εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος).

2.4.3. Επικοινωνία και διανομή προϊόντων

Ο δορυφόρος έχει αποθηκευτική δυνατότητα 32 Gbit (η αποθήκευση στο σκάφος είναι διαθέσιμη για πελάτες που απαιτούν εικόνες από περιοχές όπου δεν υπάρχουν σταθμοί αποδοχής των δεδομένων). Η αποστολή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο γίνεται μέσω X-band με μέγιστη ταχύτητα 150 Mbit/s. Για λειτουργίες ελέγχου του δορυφόρου χρησιμοποιούνται κανάλια UHF.

Το κέντρο λειτουργίας της ORBIMAGE (ORBIMAGE Operations Center -OOC) βρίσκεται στο Dulles, στη Βιρτζίνια και παρέχει όλες τις υπηρεσίες. Το OOC καθορίζει τις «εργασίες» που πρέπει να εκτελέσει ο δορυφόρος και επομένως τις εντολές που λαμβάνει. Οι εντολές αποστέλλονται σε αυτόν μέσω δύο επίγειων σταθμών. Ο πρώτος βρίσκεται στο Point Barrow της Αλάσκα και ο δεύτερος στο Dulles της Βιρτζίνια. Σε αυτούς του σταθμούς «κατεβαίνουν» και όλα τα τηλεμετρικά και εικονιστικά δεδομένα του δορυφόρου, ενώ στη συνέχεια στέλνονται πίσω στο OOC για επεξεργασία, και διανομή. Εκεί τα εικονιστικά δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία, αρχειοθετούνται και διανέμονται στους πελάτες. Παράλληλα, η ORBIMAGE μέσω franchise δίνει το δικαίωμα σε διάφορους τοπικούς διανομείς και χονδρέμπορους να γίνουν επίσημοι αντιπρόσωποι της και να παρέχουν όλες τις προαναφερόμενες υπηρεσίες (υποδοχή δεδομένων, αρχειοθέτηση, παραγωγή προϊόντων, διανομή, παραγγελίες για λήψη εικόνων κλπ) [5].

2.4.4. Υφιστάμενη κατάσταση της αποστολής

Ο OrbView-3 λειτουργούσε κανονικά μέχρι τον Μάρτιο του 2007. Στις 4 Μαρτίου όμως η κάμερά του άρχισε να υπολειτουργεί. Παρ' όλες τις προσπάθειες για επανάκτηση των λειτουργιών παρατήρησης, φαινόταν ότι οι πιθανότητες επιτυχίας ήταν μικρές (Parks C., 2007). Στις 8 Μαρτίου η GeoEye εξήγγειλε ότι προβλήματα στα ηλεκτρονικά συστήματα της κάμερας του δορυφόρου τον κατέστησαν ανίκανο να λαμβάνει αξιοποιήσιμες εικόνες από τις 4 του μήνα. Πρόσθεσαν ακόμη ότι δεν υπήρχαν αρκετές πληροφορίες για να καθορίσουν τί θα μπορούσε να γίνει για να επιλυθεί το πρόβλημα ή πόσο καιρό θα πάρει κάτι τέτοιο [26]. Στις 23 Απριλίου του

2007 η εταιρία ανακοίνωσε το οριστικό τέλος του OrbView-3, παρόλο που η λειτουργία του είχε σχεδιαστεί να λήξει σε 3 χρόνια (Space News, April 30, 2007).

2.4.5. Κάμερα

Η κάμερα OHRIS (OrbView High Resolution Imaging System) της ORBIMAGE σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την Northrop Grumman, Baltimore, MD. Ο αντικειμενικός στόχος είναι να παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης σε εμπορική βάση. Η OHRIS είναι ένα οπτικομηχανικό όργανο τύπου whiskbroom βασισμένο σε ένα τηλεσκόπιο με τρεις καθρέφτες οπής 45 εκατοστών. Το ονομαστικό μέγεθος κάθε σκηνής είναι 8 km x 8 km με ανάλυση 1 m (παγχρωματική) και 4 m (πολυφασματική) στο Ναδίρ. Τα αρχικά δεδομένα παράγονται στα 11 bit και συμπιέζονται στα 2 bits/pixel. Η μάζα της μηχανής είναι 66 kg.

Ο έλεγχος της έκθεσης παρέχεται από 16 διαφορετικούς τρόπους παγχρωματικών λήψεων. Η κάμερα μπορεί να λάβει εντολή να σαρώσει σε ταχύτητες 5000 γραμμές ανά λεπτό (lines per second - lps), σε 2500 lps, 1000 lps ή 500 lps (Kohm K., 2004).

Τύπος αισθητήρα	Body-scanning whiskbroom imager	
Τρόπος λήψεων	Παγχρωματικός (Pan)	Πολυφασματικός (MS)
Χωρική ανάλυση	1 m	4 m
Φασματικά Κανάλια	1	4 MS
Φασματικό εύρος	Pan: 450 - 900 nm	MS1: 450-520 nm (blue) MS2: 520-600 nm (green) MS3: 625-695 nm (red) MS4: 760-900 nm (NIR)
Μέγεθος αισθητήρα (σε γραμμική διάταξη)	8000 pixels	2000 x 4
Μέγεθος εικονοστοιχείων του αισθητήρα	6.0 μm x 5.4 μm (πλάτος x μήκος)	
Πλάτος λήψης	8 km	
Ποσοτικοποίηση των δεδομένων	11 bit (συμπιεσμένα σε 2 bit/pixel κατά την αποστολή)	

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά της κάμερας OHRIS του δορυφόρου Orbview-3

2.4.6. Προϊόντα

Η GeoEye παρέχει μέσω των αρχικών εικόνων του OrbView-3 μια ποικιλία προϊόντων υψηλής ανάλυσης. Αρχικά υπάρχουν τα δεδομένα OrbView BASIC™ που χρησιμεύουν σε αυτούς που θέλουν να τα επεξεργαστούν μόνοι τους και να έχουν τον έλεγχο της όλης διαδικασίας. Τα OrbView ORTHO™ χρησιμεύουν σε αυτούς που ενδιαφέρονται για

προϊόντα έτοιμα για εισαγωγή σε GIS συστήματα και άλλες μετρητικές εφαρμογές. Τέλος, το 2004 η GeoEye άρχισε να παρέχει ψηφιακά δεδομένα εδάφους τα οποία χρησιμεύουν σε οργανισμούς που ενδιαφέρονται να δημιουργήσουν τρισδιάστατα δεδομένα, ενώ βελτίωσε προϊόντα όπως θεματικούς χάρτες και χάρτες εξαγωγής χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες εφαρμογές απλών χρηστών [17].

Όνομα Προϊόντος	Τύπος	Φασματικά κανάλια	GSD	Ακρίβεια CE/LE 90%	Περιγραφή προϊόντος
OrbView BASIC™	Γρήγορο (απλό ή στέρεο)	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤60m/60m ≤65m/65m	Προϊόντα ραδιομετρικά διορθωμένα που περιέχουν τηλεμετρικά στοιχεία (δεδομένα τροχιάς και υψομέτρου) και rational functions
	Βελτιωμένο (απλό ή στέρεο)	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤25m/44m ≤37m/51m	Περιέχει τηλεμετρικά δεδομένα του δορυφόρου, επεξεργασμένα δεδομένα GPS και αρκετά μεταδεδομένα ώστε να πραγματοποιηθεί ακριβής φωτογραμμετρικός τριγωνισμός
	1:50K (απλό ή στέρεο)	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤25m/8m ≤30m/12m	Ακρίβεια ίση με αυτή χαρτογραφικών προϊόντων κλίμακας 1:50.000. Γεωαναφορά βάσει σημείων σύνδεσης
	1:24K (απλό ή στέρεο)	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤12m/5m ≤15m/10m	Ακρίβεια ίση με αυτή χαρτογραφικών προϊόντων κλίμακας 1:24.000. Γεωαναφορά μέσω σημείων σύνδεσης και επίγειων σημείων ελέγχου
OrbView GEO™	Γρήγορο	Παγχρ. Πολυφασμ. Στέρεο (Παγχ.)	1.0m 4.0m 1.0m	≤60m/60m ≤65m/65m ≤60m/60m	Επανασύσταση της εικόνας σε χαρτογραφική προβολή, ανηγμένη μέσω δεδομένων τροχιάς
	Βελτιωμένο	Παγχρ. Πολυφασμ. Στέρεο (Παγχ.)	1.0m 4.0m 1.0m	≤25m/44m ≤37m/51m ≤25m/44m	Ίδιο με το παραπάνω προϊόν αλλά επιπλέον περιλαμβάνει μεταδεδομένα θέσης, από την επεξεργασία των μετρήσεων GPS και INS του δορυφόρου
	1:50K	Παγχρ. Πολυφασμ. Στέρεο (Παγχ.)	1.0m 4.0m 1.0m	≤25m/8m ≤30m/12m ≤25m/8m	Προϊόν με γεωαναφορά, από πολλές εικόνες ή μέσω επίγειων σημείων
	1:24K	Παγχρ. Πολυφασμ. Στέρεο (Παγχ.)	1.0m 4.0m 1.0m	≤12m/5m ≤15m/10m ≤12m/5m	Προϊόν με γεωαναφορά από επίγεια φωτοσταθερά σημεία
OrbView ORTHO™	1:50K	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤25m ≤30m	Ορθοανηγμένες εικόνες
	1:24K	Παγχρ. Πολυφασμ.	1.0m 4.0m	≤12m ≤15m	Ορθοανηγμένες εικόνες

Πίνακας 13. Προϊόντα του Orbview-3 [17]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό ο αριθμός των χαρτογραφικών δορυφόρων πολύ υψηλής ανάλυσης μεγαλώνει συνεχώς. Προκειμένου όμως να έχουμε τη μέγιστη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει μια εικόνα πολύ υψηλής ανάλυσης πρέπει να υπάρχουν τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα που να περιγράφουν τη διαδικασία λήψης των σκηνών. Η τροχιά του δορυφόρου, η θέση του, οι γωνιακές του κλίσεις και ο εσωτερικός προσανατολισμός της κάμερας είναι στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται στο γεωμετρικό μοντέλο προσανατολισμού, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ακρίβεια με τη χρήση του μικρότερου δυνατού αριθμού φωτοσταθερών (GCPs). Δυστυχώς, κάποιες εταιρίες λειτουργίας δορυφόρων υψηλής ανάλυσης δεν δημοσιοποιούν ορισμένα από τα στοιχεία αυτά με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη ανάγκη για ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων.

Όταν μιλάμε για γεωμετρικά μοντέλα προσανατολισμού δορυφορικών εικόνων εννοούμε τις μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να συνδέσουμε τις εικονοσυντεταγμένες των δορυφορικών εικόνων με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του εδάφους. Για τον προσανατολισμό ή τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι με ποικίλους βαθμούς ακρίβειας που βασίζονται είτε στην αυστηρή περιγραφή της γεωμετρίας των δεκτών [Toutin, 1995; Chen and Teo, 2002; Poli, 2004; Toutin, 2004b], είτε στο μοντέλο των rational function [Dowman and Tao, 2002; Fraser et al., 2002; Tao et al., 2004; Zhizhong Xu, 2004], είτε στον άμεσο γραμμικό μετασχηματισμό (DLT) [Fraser et al., 2001], είτε στον αφινικό μετασχηματισμό [Shi and Shaker, 2003], είτε σε συνδυασμένα μοντέλα [Gianinetto et al., 2004a]. Όλες αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα προσεγγιστικά μοντέλα (γνωστά και ως εμπειρικά, μη παραμετρικά ή γενικά μοντέλα) και στα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα (γνωστά και ως παραμετρικά, φυσικά ή τροχιακά μοντέλα).

3.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα προσεγγιστικά μοντέλα προσανατολισμού δορυφορικών εικόνων πραγματοποιούν το μετασχηματισμό ανάμεσα στο χώρο της εικόνας και το χώρο του αντικειμένου με γενικευμένες σχέσεις και βασίζονται σε υπολογιστικές στατιστικές μεθόδους. Με αυτά δεν μοντελοποιείται η φυσική διαδικασία λήψης και επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη παράμετροι που έχουν να κάνουν με την κίνηση του δορυφόρου κατά την λήψη της σκηνής, τις παραμέτρους της μηχανής κ.α. Αυτή η προσέγγιση, δηλαδή, δεν απαιτεί καμία a priori γνώση του μοντέλου της μηχανής, της εφημερίδας του δορυφόρου ή του προβολικού συστήματος αναφοράς [Poli, 2004]. Τέτοια μοντέλα είναι: ο 3D Αφινικός Μετασχηματισμός, ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (DLT), ο 2D Προβολικός Μετασχηματισμός, τα 2D Πολυώνυμα και τα Κλασματικά Πολυώνυμα (Rational Functions). Από αυτά, τα πρώτα δύο συχνά αναφέρονται και ως μοντέλα απλής μορφής (simple models), ενώ τα Κλασματικά Πολυώνυμα είναι το προσεγγιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται πιο συχνά καθώς είναι ρητές συναρτήσεις που περιέχουν όλη την πληροφορία για τον προσανατολισμό των εικόνων και δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Στην ουσία όλα τα υπόλοιπα προσεγγιστικά μοντέλα αποτελούν εξειδικευμένες μορφές των Rational Functions.

3.2.1. 3D Αφινικός Μετασχηματισμός

Στον μετασχηματισμό αυτό χρησιμοποιούνται οκτώ συντελεστές για να προσδιορίσουν τη σχέση ανάμεσα στο χώρο του αντικειμένου και την εικόνα:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 Y + \alpha_3 Z, \quad y = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z$$

3.2.2. Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός - DLT

Στον μετασχηματισμό αυτό χρησιμοποιούνται ένδεκα γραμμικές παράμετροι για να προσδιορίσουν τη σχέση ανάμεσα στον τρισδιάστατο χώρο του αντικειμένου και τον δισδιάστατο χώρο της εικόνας:

$$x = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 Y + \alpha_3 Z}{1 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z}, \quad y = \frac{b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z}{1 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z}$$

3.2.3. 2D Προβολικός Μετασχηματισμός

Στον προβολικό μετασχηματισμό οκτώ παράμετροι ορίζουν τη σχέση ανάμεσα στο επίπεδο του αντικειμένου και το επίπεδο της εικόνας:

$$x = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 Y}{1 + c_1 X + c_2 Y}, \quad y = \frac{b_0 + b_1 X + b_2 Y}{1 + c_1 X + c_2 Y}$$

3.2.4. 2D Πολυώνυμα

Το μοντέλο αυτό περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στην εικόνα και το χώρο του αντικειμένου ανεξάρτητα από τη γεωμετρία της μηχανής:

$$X = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \alpha_{i,j} x^i y^j, \quad Y = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} b_{i,j} x^i y^j$$

3.2.5. Κλασματικά Πολυώνυμα (Rational Functions Method, RFM)

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η συντεταγμένη μιας εικόνας ορίζεται από το λόγο δύο πολυωνυμικών συναρτήσεων, στις οποίες και οι εικονοσυντεταγμένες (x, y) και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες (X, Y, Z) είναι κανονικοποιημένες:

$$x_n = \frac{P1(X, Y, Z)}{P2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

(1)

$$y_n = \frac{P3(X, Y, Z)}{P4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

(2)

Η κανονικοποίηση γίνεται συνήθως μεταξύ των τιμών -1 έως 1 ή από -0,5 έως 0,5 και πραγματοποιείται για λόγους σταθερότητας της συνόρθωσης. Οι κανονικοποιημένες εικονοσυντεταγμένες προκύπτουν από τους ακόλουθους τύπους, όπου τα scale και offset αναφέρονται για κάθε εικόνα και βρίσκονται στο αρχείο metadata.txt που συνοδεύει τις εικόνες.

$$x_n = \frac{X - X_{\text{offset}}}{X_{\text{scale}}} \quad \text{και} \quad y_n = \frac{Y - Y_{\text{offset}}}{Y_{\text{scale}}}$$

Βέβαια η κανονικοποίηση πραγματοποιείται και για τις γεωδαιτικές συντεταγμένες κατ' αναλογία με τις εικονοσυντεταγμένες και συγκεκριμένα:

$$X_n = \frac{X - X_{\text{offset}}}{X_{\text{scale}}} \quad (3), \quad Y_n = \frac{Y - Y_{\text{offset}}}{Y_{\text{scale}}} \quad (4), \quad Z_n = \frac{Z - Z_{\text{offset}}}{Z_{\text{scale}}} \quad (5)$$

Σε παράδειγμα ρητών συναρτήσεων με 80 όρους τα P1,P2,P3,P4 των σχέσεων (1) και (2) γίνονται:

$$P1(X, Y, Z) = a_1 + a_2 Y + a_3 X + a_4 Z + a_5 YX + a_6 YZ + a_7 XZ + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} Z^2 + a_{11} XY + a_{12} Y^3 + a_{13} YX^2 + a_{14} YZ^2 + a_{15} Y^2 X + a_{16} X^3 + a_{17} XZ^2 + a_{18} Y^2 Z + a_{19} X^2 Z + a_{20} Z^3$$

$$P2(X, Y, Z) = 1 + b_2 Y + b_3 X + b_4 Z + b_5 YX + b_6 YZ + b_7 XZ + b_8 Y^2 + b_9 X^2 + b_{10} Z^2 + b_{11} XY + b_{12} Y^3 + b_{13} YX^2 + b_{14} YZ^2 + b_{15} Y^2 X + b_{16} X^3 + b_{17} XZ^2 + b_{18} Y^2 Z + b_{19} X^2 Z + b_{20} Z^3$$

$$P3(X, Y, Z) = c_1 + c_2 Y + c_3 X + c_4 Z + c_5 YX + c_6 YZ + c_7 XZ + c_8 Y^2 + c_9 X^2 + c_{10} Z^2 + c_{11} XY + c_{12} Y^3 + c_{13} YX^2 + c_{14} YZ^2 + c_{15} Y^2 X + c_{16} X^3 + c_{17} XZ^2 + c_{18} Y^2 Z + c_{19} X^2 Z + c_{20} Z^3$$

$$P4(X, Y, Z) = 1 + d_2 Y + d_3 X + d_4 Z + d_5 YX + d_6 YZ + d_7 XZ + d_8 Y^2 + d_9 X^2 + d_{10} Z^2 + d_{11} XY + d_{12} Y^3 + d_{13} YX^2 + d_{14} YZ^2 + d_{15} Y^2 X + d_{16} X^3 + d_{17} XZ^2 + d_{18} Y^2 Z + d_{19} X^2 Z + d_{20} Z^3$$

όπου τα X, Y, Z είναι οι κανονικοποιημένες γεωδαιτικές συντεταγμένες που προκύπτουν από τις σχέσεις (3), (4) και (5). (Κατσιγιάννης, 2005)

Ο υπολογισμός των άγνωστων συντελεστών (RPCs) στη μέθοδο των Rational Functions μπορεί να γίνει είτε με χρήση φωτοσταθερών σημείων, όπου όμως απαιτείται η γνώση των γεωδαιτικών συντεταγμένων μεγάλου αριθμού σημείων, είτε από την εταιρεία παροχής των δορυφορικών εικόνων. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε συχνά την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια προσανατολισμού των εικόνων, ενώ είναι απαραίτητη η μέτρηση ενός φωτοσταθερού στην απεικονιζόμενη περιοχή και ο επανα-υπολογισμός των άγνωστων συντελεστών με κατάλληλο λογισμικό.

Όπως έχει αποδειχθεί και σε προηγούμενη έρευνα [Chmiel et al., 2004; Tao et al., 2004], η RFM μπορεί να προσεγγίσει το ακριβές μοντέλο της μηχανής χωρίς ιδιαίτερη απώλεια στην ακρίβεια αν οι συντελεστές έχουν υπολογιστεί σωστά. Το πιο κρίσιμο σημείο κατά τον υπολογισμό των RPCs είναι η έντονη εξάρτηση της λύσης από τον αριθμό και τη διάταξη των φωτοσταθερών σημείων, ενώ όταν χρησιμοποιούνται συναρτήσεις

μεγαλύτερου βαθμού (συνήθως $3^{ου}$) η υπερπαραμετροποίηση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη συνόρθωση του συστήματος με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και την εμφάνιση ανεπιθύμητων παραμορφώσεων στην εικόνα [Gianinetto et al., 2004a]. Επειδή η RFM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση ανεξάρτητη από το ανάγλυφο του εδάφους, πράγμα που την καθιστά μια ασφαλή εναλλακτική μέθοδο σε σχέση με το φυσικό μοντέλο του δέκτη, όλες οι εταιρείες πώλησης δορυφορικών εικόνων παρέχουν προκαθορισμένα RPCs για κάθε εικόνα που αγοράζεται. Δυστυχώς, σύμφωνα με δηλώσεις των εταιρειών αυτών, τα προκαθορισμένα RPCs δεν είναι κατάλληλα για ακριβή ορθοαναγωγή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για περιοχές με έντονο ανάγλυφο, ενώ επιπλέον δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ορθοαναγωγή τμήματος της εικόνας καθώς πρέπει να εφαρμόζονται σε ολόκληρη την σκηνή.

Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι αυτή της βελτιστοποίησης των RPCs και ο αυτο-υπολογισμός των RPCs (RPCs refinement και RPCs selfcomputation). Η πρώτη προσέγγιση προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τα προκαθορισμένα RPCs μέσω της χρήσης μερικών GCPs [Tao et al., 2004], όμως ακόμα και τότε τα αποτελέσματα μπορεί να είναι μη ικανοποιητικά σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, ενώ και πάλι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε τμήμα της εικόνας. Η δεύτερη προσέγγιση έγκειται στον υπολογισμό των RPCs μέσω της χρήσης πολλών φωτοσταθερών σημείων. Δυστυχώς, αν δεν υπάρχει μεγάλος αριθμός GCPs (μερικές εκατοντάδες) με κανονική οριζοντιογραφική και υψομετρική κατανομή για να χρησιμοποιηθούν, η προσέγγιση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή λύση [Tao et al., 2004], ενώ κακή διάταξη των σημείων μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παραμορφώσεις στη διορθωμένη εικόνα [Gianinetto et al., 2004a].

3.3. ΑΥΣΤΗΡΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα αυστηρά μαθηματικά μοντέλα καθορίζουν το φυσικό μοντέλο του δέκτη και περιέχουν αλγόριθμους που γενικά βασίζονται στη γνωστή φωτογραμμετρική εξίσωση της συγγραμμικότητας και οι οποίοι περιγράφουν την ακριβή γεωμετρία της μηχανής του δορυφόρου. Έτσι, δεδομένων των παραμέτρων του προσανατολισμού και των εικονοσυντεταγμένων, μπορούμε να υπολογίσουμε για κάθε pixel της εικόνας τις αντίστοιχες

γεωδαιτικές συντεταγμένες του εδάφους [Wolf and Dewitt, 2000; Mikhail et al., 2001]. Όλα τα φυσικά μοντέλα εξαρτώνται από τον εκάστοτε δέκτη γιατί περιγράφουν την γεωμετρία αυτού και τις διαστροφές κατά την ώρα της λήψης [Toutin, 2003] και επομένως για τη λύση τους απαιτείται η γνώση του μοντέλου της μηχανής, η εφημερίδα του δορυφόρου και κάποια GCPs. Βέβαια, το μοντέλο της μηχανής είναι συνήθως γνωστό μόνο στην εταιρεία εκμετάλλευσης του δορυφόρου με αποτέλεσμα το ευρύ κοινό να μην μπορεί να λύσει το φυσικό μοντέλο.

3.3.1. Φυσικό Μοντέλο του Δέκτη με χρήση τροχιακών δεδομένων

Ένα μοντέλο τροχιακών παραμέτρων μπορεί να εφαρμοστεί σε εικόνες που συλλέγονται με pushbroom τεχνική, προκειμένου να προσδιοριστούν τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού τους. Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι οπισθοτομίας προκειμένου να μοντελοποιήσουν τη συνεχώς μεταβαλλόμενη θέση, καθώς και τις μεταβαλλόμενες στροφές του σώματος του αισθητήρα, βρίσκοντας τις τροχιακές παραμέτρους του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της έκθεσης για την απόκτηση της εικόνας. Στη συνέχεια ακολουθεί συνόρθωση με τη μέθοδο των δεσμών και χρήση σημείων επίγειου ελέγχου, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ανωτέρω παράμετροι.

Οι γνωστές εξισώσεις συγγραμικότητας συνδέουν τη θέση ενός σημείου στο χώρο του αντικειμένου, με το προβολικό κέντρο και με τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες του. Για τους δορυφόρους, η παραπάνω σύνδεση βασίζεται σε τρεις στροφές οι οποίες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα κεπλέρια στοιχεία και αποσκοπούν στο να προσδιοριστεί το μέγεθος της έλλειψης πάνω στην οποία κινείται ο δορυφόρος, η θέση του σε αυτήν, καθώς και οι τρεις στροφές ω , ϕ , κ (roll, pitch, yaw) που αφορούν τις στροφές του δορυφόρου κατά τη διάρκεια απόκτησης των εικόνων. Επίσης, χρησιμοποιούνται δύο πίνακες στροφής για τη γωνία α που σχηματίζεται κατά μήκος της τροχιάς λήψης, και τη γωνία β που σχηματίζεται μεταξύ της τροχιάς και της εγκάρσιας σε αυτή στροφή της κάμερας.

Τα κεπλέρια στοιχεία είναι τα μεγέθη εκείνα που προσδιορίζουν τη θέση και το μέγεθος της έλλειψης πάνω στην οποία κινείται ο δορυφόρος

αλλά παράλληλα προσδιορίζουν και τη θέση του σε αυτήν. Ακολουθώς γίνεται μία μικρή αναφορά στα στοιχεία αυτά:

- 1) Η ορθή αναφορά Ω . Η γωνία αυτή σχηματίζεται από το σημείο τομής του τροχιακού επιπέδου με το επίπεδο του ισημερινού κατά την ανάδυση του δορυφόρου από το νότιο στο βόρειο ημισφαίριο και του σημείου της εαρινής ισημερίας και μετράται στο επίπεδο του ισημερινού.
- 2) Η κλίση i . Είναι η γωνία που σχηματίζει το τροχιακό επίπεδο με το επίπεδο του ισημερινού.
- 3) Μέτρο του περιγείου ω . Περίγειο είναι το σημείο της εγγύτερης προσέγγισης του δορυφόρου στο κέντρο της Γης. Μέτρο του περιγείου είναι η γωνία που ορίζουν οι επιβατικές ακτίνες στο σημείο ανάδυσης και στο περίγειο. Μετράται στο επίπεδο της τροχιάς.
- 4) Το μήκος a του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης, πάνω στην οποία κινείται ο δορυφόρος
- 5) Η εκκεντρότητα e της έλλειψης.
- 6) Η αληθής ανωμαλία f , είναι μία γωνία που βοηθά στην εύρεση της θέσης του δορυφόρου στο τροχιακό επίπεδο.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι τα δύο πρώτα κεπλέρια στοιχεία, δηλαδή η ορθή αναφορά και η κλίση, προσανατολίζουν το τροχιακό επίπεδο στο χώρο. Το μέτρο του περιγείου προσδιορίζει τη θέση του περιγείου στο τροχιακό επίπεδο. Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα και η εκκεντρότητα ορίζουν την έλλειψη πάνω στην οποία κινείται ο δορυφόρος. Άρα, αφού μέσω αυτών των στοιχείων έχει προσδιοριστεί η θέση του δορυφόρου κατά τη στιγμή της λήψης, μπορεί να γίνει ένας παραλληλισμός με τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της κλασικής φωτογραμμετρίας, όπου δίνουν τη θέση και τις στροφές της κάμερας κατά τη λήψη, οπότε μπορεί να ειπωθεί ότι τα κεπλέρια στοιχεία δίνουν τον εξωτερικό προσανατολισμό για τις δορυφορικές εικόνες (Κατσιγιάννης, 2005).

Η μορφή των εξισώσεων ενός μοντέλου τροχιακών παραμέτρων είναι συνήθως η ακόλουθη:

$$\begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = SR \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}, \text{ όπου}$$

$$R = R_2(\alpha)R_1(\beta)R_3(\kappa)R_2(\phi)R_1(\omega)R_2((f + \omega_p) - \pi/2)R_1(\pi/2 - i)R_3(\Omega - \pi) \text{ και}$$

S: ο παράγοντας της κλίμακας

α, β : οι γωνίες της διεύθυνσης σκόπευσης κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς

x_i, y_i : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου i

x_0, y_0 : οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

X_i, Y_i, Z_i : οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου i

X_0, Y_0, Z_0 : οι γεωδαιτικές συντεταγμένες της θέσης του προοπτικού κέντρου του αισθητήρα

c : η εστιακή απόσταση του συστήματος λήψης

R_j : καθορίζει τη στροφή γύρω από τον άξονα j , όπου $j=1,2,3$

Λόγω της δυναμικής γεωμετρίας των αισθητήρων σε μορφή γραμμικών πινάκων, οι παράμετροι που αφορούν στη θέση και τις στροφές ενός τέτοιου αισθητήρα αντιμετωπίζονται ως εξαρτώμενες από το χρόνο. Το μόνο διαθέσιμο μέσο για τη μέτρηση του χρόνου είναι οι συντεταγμένες του δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς του. Έτσι οι βασικές συνιστώσες της δυναμικής κίνησης, η κίνηση του δορυφόρου σε τροχιά και η περιστροφή της Γης μοντελοποιούνται ως γραμμικές γωνιακές μεταβολές των f και Ω συναρτήσει του χρόνου, οριζόμενες ως f_1 και Ω_1 . Συνεπώς:

$$f_i = f_0 + f_1 x,$$

$$\Omega_i = \Omega_0 + \Omega_1 x$$

Όπου

f_i και Ω_i : η αληθής ανωμαλία και η ορθή αναφορά κάθε γραμμής i

f_0 και Ω_0 : η αληθής ανωμαλία και η ορθή αναφορά σύμφωνα με μια γραμμή αναφοράς, για παράδειγμα την κεντρική γραμμή της σκηνής

f_1 και Ω_1 : οι αρχικές τιμές για τα f_i και Ω_i

Κατά τον προσανατολισμό μιας pushbroom εικόνας η θέση στο διάστημα του δορυφόρου και του αισθητήρα, καθώς και οι στροφές του σώματος του σκάφους, προσδιορίζονται από εννέα παραμέτρους: ($f_0, \Omega_0, \alpha, \beta, f_1, \Omega_1, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0$). Θεωρώντας τις στροφές μιας γραμμής σάρωσης ως αναφορά, οι παράμετροι ω, φ και κ των άλλων γραμμών μπορούν να μοντελοποιηθούν από ένα απλό πολυώνυμο βασιζόμενο στις κατά μήκος (x) εικονοσυντεταγμένες όπως παρακάτω:

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 x + \omega_2 x^2$$

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1 x + \varphi_2 x^2$$

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_1 x + \kappa_2 x^2$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^Ο: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΥΣ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο εφαρμογές που ερευνούν τις χαρτογραφικές δυνατότητες των μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης EROS-A1 και Orbview-3 αντίστοιχα.

Στο πρώτο άρθρο ερευνάται η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στον προσανατολισμό εικόνων του EROS-A1 με χρήση ενός τροχιακού μοντέλου. Η εργασία αυτή επιλέχθηκε να παρουσιαστεί καταρχήν για να καταλάβει ο αναγνώστης πώς λειτουργούν και πώς μπορούν να παραλλάσσονται τα τροχιακά μοντέλα προσανατολισμού δορυφορικών εικόνων, αλλά και για να παρουσιαστεί η τάξη μεγέθους των ακριβειών που μπορούν να έχουν.

Στη δεύτερη εργασία γίνεται αναφορά σε διάφορες παραμέτρους που πρέπει να έχει υπόψη του ο χρήστης μιας δορυφορικής εικόνας, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση ανάμεσα στη χαρτογράφιση που μπορεί να προκύψει από εικόνες του Orbview-3 και του IKONOS. Δεδομένου ότι οι δύο δορυφόροι (ο πρώτος βάρους 304 kg, ενώ ο δεύτερος βάρους 728kg) έχουν παρόμοιες δυνατότητες και λειτουργούνται από την ίδια εταιρεία, το άρθρο αυτό επισημαίνει κάποιους πολύ σημαντικούς παράγοντες, πέρα από την χωρική ανάλυση, που μπορούν να επηρεάσουν έντονα τα αποτελέσματα μιας χαρτογραφικής εφαρμογής.

4.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟ ΤΟΝ EROS-A1

Οι Torbjörn Westin and Jörgen Forsgren στην εργασία τους «Orthorectification of EROS A1 images» περιγράφουν την ανάπτυξη μιας μεθόδου για την γεωμετρική διόρθωση εικόνων του μικρού χαρτογραφικού δορυφόρου EROS A1. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα αυστηρό τροχιακό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της υπό εξέταση μεθόδου αποδεικνύουν την δυνατότητα να ορθοδιορθωθούν σκηνές του παραπάνω δορυφόρου με ακρίβεια υπο-pixel.

Εισαγωγή

Ο δορυφόρος EROS A1 εκτοξεύτηκε στις 5 Δεκεμβρίου 2000 και είναι ο πρώτος από μια σειρά 6 μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης που σκοπεύει να εκτοξεύσει η ImageSat International. Ο

δορυφόρος παράγει εικόνες ανάλυσης 1.8 m, ενώ μπορεί να δουλεύει σε μία λειτουργία επαναδειγματοληψίας που καθιστά την τελική ανάλυση σε μέγεθος της τάξης του 1 m.

Η NA30 κάμερα του δορυφόρου είναι σαρωτής pushbroom με δύο CCD διατάξεις που περιλαμβάνει 7800 ανιχνευτές (detectors) στο εστιακό της επίπεδο. Οι ανιχνευτές είναι ευαίσθητοι σε φασματικό εύρος 0.5 – 0.9 μm και έχουν ραδιομετρική ανάλυση 11 bit.

Η κάμερα είναι γερά συνδεδεμένη στο σκελετό του σκάφους και έτσι η σκόπευση πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ελέγχου του προσανατολισμού του δορυφόρου που στρίβει ολόκληρο το σώμα του. Ο αισθητήρας σαρώνει ασύγχρονα, δίνοντας τη δυνατότητα στο δορυφόρο να κινείται γρηγορότερα ως προς το έδαφος σε σχέση με την ταχύτητα φωτογράφισης. Ο δορυφόρος στρίβει με σταθερή ταχύτητα προς τα πίσω, ώστε να επιτυγχάνεται μικρότερη ταχύτητα λήψης καθώς οι ανιχνευτές παρατηρούν μια περιοχή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο ο αισθητήρας λαμβάνει περισσότερο φως οπότε βελτιώνεται η αντίθεση (contrast) και η αναλογία σήματος προς θόρυβο.

Το πλάτος λήψης είναι 12.5 km. Ο δορυφόρος μπορεί να στρίβει μέχρι 45 μοίρες προς οποιαδήποτε διεύθυνση, παρέχοντας τη δυνατότητα να κάνει λήψεις πολλών διαφορετικών περιοχών κατά τη διάρκεια ενός μόνο περάσματος. Αυτή η ικανότητα επιτρέπει επίσης τη λήψη στερεοζευγών στο ίδιο πέρασμα. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας του EROS A1 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Τροχιά	480 km, κυκλική, ηλιοσύγχρονη
Οπτικό πεδίο (IFOV)	1.8 m
Πλάτος λήψης	12.5 km
Σάρωση	Ασύγχρονη (μέχρι 750 γραμμές/sec)
Τύπος αισθητήρα	CCD
Φασματικά κανάλια	Παγχρωματικά, 0.5-0.9 μm
Ποσοτικοποίηση	11 bits
Εικονοστοιχεία ανά Γραμμή	7043
S/N	>2048/2
Ταχύτητα αποστολής δεδομένων	70 Mbits/sec

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά της κάμερας του EROS A1

Γεωμετρικό μοντέλο

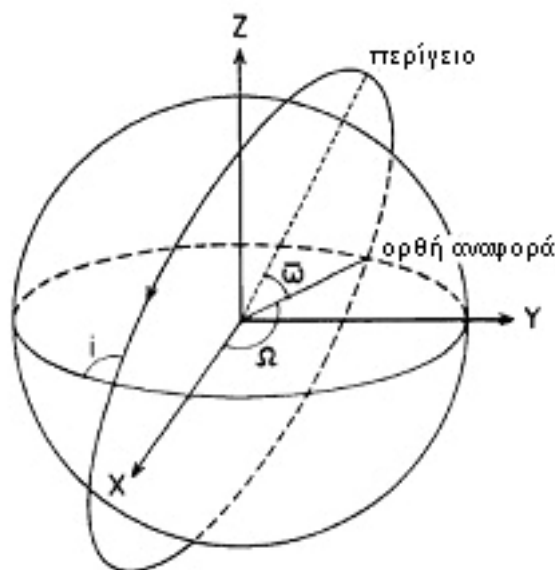
Οι σκηνές του EROS A1 είναι διαθέσιμες σε δύο format. Σε A1 raw δεδομένα και σε 1B δεδομένα διορθωμένα από το σύστημα. Το μοντέλο που αναπτύσσεται εδώ έχει εφαρμογή μόνο στον πρώτο τύπο δεδομένων διότι

μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τη θέση των εικονοστοιχείων με το εστιακό επίπεδο της μηχανής.

Το γεωμετρικό μοντέλο που επιλέχθηκε να μοντελοποιήσει τις σκηνές του EROS A1 μπορεί να διαιρεθεί σε ξεχωριστά μέρη. Ο εξωτερικός προσανατολισμός περιλαμβάνει ένα μοντέλο της τροχιάς του δορυφόρου και ένα μοντέλο για τις εναλλαγές των στροφών του σώματός του. Ο εσωτερικός προσανατολισμός περιλαμβάνει το μοντέλο του αισθητήρα σάρωσης. Αυτό το μοντέλο έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε έναν αριθμό διαφορετικών δορυφορικών αισθητήρων (Westin T., 1990, Westin T., 1996, Westin T., 1999, Westin T., 2000).

Μοντέλο της τροχιάς του δορυφόρου

Το μοντέλο της τροχιάς βασίζεται στις έξι Κεπλέρειες παραμέτρους (a , e , i , Ω , ω , f). Αυτές, μαζί με το σταθερό σε κάθε ζώνη δευτέρου βαθμού συστατικό (J_2) της βαρυτικής δυνατότητας της Γης, είναι ικανές να περιγράψουν την κίνηση του δορυφόρου με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια για τις απαιτήσεις στις διορθώσεις των εικόνων του EROS A1.



Εικόνα 15. Παράμετροι της τροχιάς του δορυφόρου

Μοντέλο του προσανατολισμού του σώματος του δορυφόρου

Οι μετρήσεις που αφορούν στον προσανατολισμό του σκάφους γίνονται μέσω γυροσκοπίου που είναι τοποθετημένο στο σκάφος, και είναι διαθέσιμες σε μορφή χρονικά εξαρτώμενων πολυωνύμων τρίτου βαθμού για τις στροφές roll, pitch και yaw. Επιπλέον διορθώσεις στις γωνίες

μοντελοποιούνται μέσω δευτεροβάθμιων πολυωνύμων συναρτήσεων του χρόνου:

$$\text{roll} = \text{roll}_{,\text{εστρημένο}}(t) + a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$$

$$\text{pitch} = \text{pitch}_{,\text{εστρημένο}}(t) + b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2$$

$$\text{yaw} = \text{yaw}_{,\text{εστρημένο}}(t) + c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2$$

όπου οι συντελεστές a_i , b_i και c_i πρέπει να καθοριστούν. Θεωρείται ότι τα δευτεροβάθμια πολυώνυμα θα είναι επαρκή για την μοντελοποίηση των σφαλμάτων στις στροφές του σώματος του δορυφόρου στο χρονικό διάστημα απόκτησης μιας πλήρους σκηνής.

Μοντέλο του pushbroom σαρωτή

Το βασικό μοντέλο σάρωσης είναι ένα διάνυσμα που περιγράφει τις οπτικές ακτίνες, το οποίο ξεκινάει από τους ανιχνευτές στο εστιακό επίπεδο, περνάει από το οπτικό κέντρο του τηλεσκοπίου και καταλήγει στο σημείο του εδάφους. Το διάνυσμα αυτό είναι κάθετο στον roll άξονα του σκάφους. Μια ελαφριά απόκλιση από αυτήν την καθετότητα λαμβάνεται υπόψη μέσω του πίνακα ευθυγράμμισης του σώματος της μηχανής που είναι διαθέσιμος στα μεταδεδομένα κάθε σκηνής.

Συνόρθωση των παραμέτρων του μοντέλου

Προκειμένου να επιτευχθεί ένα υψηλής ακρίβειας μοντέλο για κάθε σκηνή, οι παράμετροι του μοντέλου πρέπει να υπολογιστούν και βελτιστοποιηθούν με χρήση επίγειων σημείων ελέγχου. Η συνόρθωση των παραμέτρων γίνεται με τη μέθοδο που αναπτύσσεται στο (Westin T., 1990). Είναι μια συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων με δυνατότητα χρήσης βαρών στις παραμέτρους. Τα βάρη χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν ποιες παράμετροι πρόκειται να συμμετέχουν στη συνόρθωση.

Μόνον οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού συνορθώνονται. Από τις έξι κεplέρεις παραμέτρους, οι δύο παραμένουν σταθερές. Λόγω της πολύ μικρής εκκεντρότητας της τροχιάς, η εκκεντρότητα και το περίγειο μπορούν να κρατηθούν σταθερά χωρίς ιδιαίτερη μείωση της ακρίβειας. Από τις εννιά παραμέτρους του προανατολισμού του σκάφους, μπορούν να συνορθώνονται διαφορετικές υπο-ομάδες. Επειδή υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ της σταθερότητας

και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων, αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν αποφασίζεται ποιες από τις παραμέτρους θα κρατηθούν σταθερές.

Η μέθοδος συνόρθωσης απαιτεί *a priori* τιμές για τις παραμέτρους. Ένας αριθμός εφημερίδων παρέχεται μαζί με κάθε raw σκηνή του EROS. Μία από αυτές χρησιμοποιείται για να δοθούν αρχικές τιμές στο μοντέλο της τροχιάς. Οι παράμετροι του προσανατολισμού του δορυφόρου παίρνουν αρχικές τιμές μηδέν. Η αρχική θέση που υπολογίζεται από τα μεταδεδομένα είναι κάπως ανακριβής, συνήθως απέχει μέχρι και 1 km από την αληθή θέση, αλλά ακόμα και έτσι είναι αρκετά κοντά ώστε να μπορέσει τελικά να συγκλίνει με τη μέθοδο.

Αξιολόγηση της ακρίβειας

Η απόδοση της μεθόδου αξιολογήθηκε σε επτά σκηνές του EROS A1 από τρεις διαφορετικές τοποθεσίες της νότιας Ελβετίας.

Σκηνή	Περιοχή	Ημερομηνία
1	Στοκχόλμη	09-05-2001
2	Στοκχόλμη	14-06-2001
3	Στοκχόλμη	24-07-2001
4	Στοκχόλμη	31-07-2001
5	Orebro	28-06-2001
6	Orebro	09-07-2001
7	Hyssne	08-05-2001

Πίνακας 15. Στοιχεία για τις επτά σκηνές που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή

Τα φωτοσταθερά σημεία στις περιοχές των σκηνών μετρήθηκαν από ψηφιακές ορθοανηγμένες αεροφωτογραφίες με εδαφοψηφίδα 1 m και οριζοντιογραφική ακρίβεια 1-1.5 m. Τα υψόμετρα προέκυψαν από παρεμβολή σε DTM καννάβου 50 m με εκτιμώμενη ακρίβεια 2 m στις κορυφές του καννάβου. Ως γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ελβετικό RT90.

Στη συνέχεια τα σημεία ελέγχου εντοπίστηκαν στις σκηνές με οριζοντιογραφική ακρίβεια 0.25 εικονοστοιχείων. Κατά μέσο όρο, 26 σημεία μπορούσαν να μετρηθούν σε κάθε σκηνή. Σε όλες τις περιπτώσεις τα σημεία ελέγχου είχαν καλή κατανομή σε όλη την επιφάνεια της σκηνής.

Τα μετρημένα φωτοσταθερά χρησιμοποιήθηκαν στην συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων των παραμέτρων του μοντέλου για κάθε σκηνή. Καθώς μόνο 11 ελεύθερες παράμετροι του μοντέλου συνορθώθηκαν, η συνόρθωση κατέληξε στη λύση ενός πολύ σταθερού συστήματος (ήδη από τα πρώτα έξι φωτοσταθερά το σύστημα ξεκινάει να συγκλίνει). Αυτό

σημαίνει ότι τα εναπομένοντα σφάλματα στα μοντέλα μετά τη συνόρθωση δίνουν μια πολύ καλή εκτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου. Τα αποτελέσματα των συνορθώσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σκηνή	Αριθμός φωτοσταθερών	rms x (m)	rms y (m)
1	30	1.3	1.4
2	21	1.6	1.7
3	13	1.5	1.5
4	22	1.8	1.4
5	30	1.7	2.4
6	30	1.6	1.6
7	33	1.3	1.9
<i>M.O.</i>		<i>1.5</i>	<i>1.7</i>

Πίνακας 16. Αποτελέσματα συνορθώσεων για τις επτά σκηνές

Προκειμένου να έχουμε μια ανεξάρτητη επαλήθευση των τελικών ακριβειών υπό κανονικότερες συνθήκες (συνήθως έχουμε λιγότερα μετρημένα σημεία ελέγχου), η πρώτη σκηνή συνορθώθηκε με χρήση μόνο 9 σημείων ελέγχου. Το σφάλμα rms στην τελική ορθοδιορθωμένη σκηνή αξιολογήθηκε με χρήση 21 σημείων ελέγχου (checkpoints), που ήταν ανεξάρτητα από τα φωτοσταθερά σημεία. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σκηνή	Αρ. φωτοσταθερών	Αρ. σημ. ελέγχου	rms x (m)	rms y (m)
1	9	21	1.7	1.8

Πίνακας 17. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με χρήση 9 φωτοσταθερών και 21 σημείων ελέγχου

Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του μοντέλου του αισθητήρα EROS έδειξαν ότι οι σκηνές του EROS A1 μπορούν να διορθωθούν με ακρίβεια μικρότερη από 1 pixel. Το γεγονός ότι και οι επτά σκηνές που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή έδωσαν εναπομένον rms ίσο ή μικρότερο από 1 εικονοστοιχείο (εκτός από τη διεύθυνση y στη σκηνή 5) αποδεικνύει την σταθερότητα της μεθόδου. Επίσης αποδείχτηκε ότι ακρίβεια μικρότερη ενός εικονοστοιχείου μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση μόνο 9 φωτοσταθερών στη συνόρθωση. Συνεπώς, αυτό σημαίνει ότι το παρουσιαζόμενο μοντέλο για τον EROS A1 μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί σε αληθινές συνθήκες παραγωγής.

4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ORBVIEW-3

Οι H.Toran, G. Büyüksalih και K. Jacobsen στην εργασία τους «Information contents of Orbview-3 for topographic mapping» ερευνούν τις δυνατότητες του μικρού οπτικού χαρτογραφικού δορυφόρου υψηλής ανάλυσης Orbview-3 όσον αφορά σε χαρτογραφικές εφαρμογές. Η πολύ υψηλή ονομαστική χωρική ανάλυση του δορυφόρου υποδεικνύει την πιθανότητα χρησιμοποίησης των σκηνών του σε χαρτογραφικές εφαρμογές κλίμακας μέχρι 1:10.000. Επειδή όμως για τον Orbview-3 το μέγεθος της προβολής ενός pixel στο έδαφος δεν είναι το ίδιο με την προβολή της απόστασης ανάμεσα σε δύο γειτονικά pixel (ground sampling distance-GSD), κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση, όσον αφορά στην αναγνώριση αντικειμένων, με τον δορυφόρο IKONOS που έχει την ίδια GSD. Βέβαια, δεδομένου ότι η φυσική GSD του IKONOS είναι 0.82 m για λήψεις στο ναδίρ, αλλά συνήθως οι σκηνές του διανέμονται με GSD 1 m –ίδια με την ονομαστική ανάλυση του Orbview-3- καθιστούν τις σκηνές του πρώτου πιθανά καλύτερες ποιοτικά και χωρικά από του δεύτερου.

Εισαγωγή

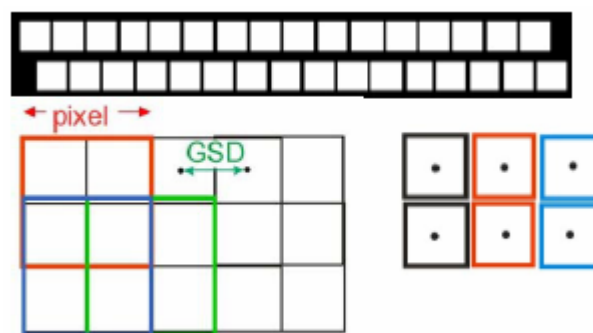
Στις χαρτογραφικές εφαρμογές από δορυφορικές εικόνες σημασία δεν έχει μόνο η γεωμετρική ακρίβεια αλλά και το «περιεχόμενο» της κάθε σκηνής. Η γεωμετρική ακρίβεια των εικόνων υψηλής ανάλυσης σπάνια αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στη χαρτογράφηση καθώς τα σαφώς ορισμένα σημεία μπορούν να εντοπιστούν στην εικόνα με ακρίβεια καλύτερη από 1 GSD.

Οι τοπογραφικοί χάρτες πρέπει να έχουν γεωμετρική ακρίβεια όση η διακριτική ικανότητα του ματιού, δηλαδή 0.25 mm. Αυτό σημαίνει ότι με 1 m ανάλυση, που αντιστοιχεί και σε απόκλιση 1 m των συντεταγμένων των αντικειμένων, μπορεί να παραχθεί χάρτης κλίμακας 1:4.000. Η κλίμακα αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη απ' ότι απαιτεί το αντικείμενο της χαρτογράφησης (Toran et al, 2004). Οι χάρτες μεγάλης κλίμακας δείχνουν περισσότερα αντικείμενα από ότι οι χάρτες μικρής κλίμακας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απαιτούμενη GSD στην κλίμακα του χάρτη είναι περίπου από 0.5 μέχρι 1 mm. Αυτό σημαίνει ότι για την παραγωγή ενός χάρτη 1:10.000 απαιτείται GSD από 0.5 μέχρι 1 m. Το μέγεθος της GSD εξαρτάται από την

ποιότητα της εικόνας, την περιοχή της εφαρμογής καθώς και τις περιεχόμενες πληροφορίες του χάρτη. Μια πυκνά δομημένη περιοχή στις Η.Π.Α. με πλατείς και ίσιους δρόμους και με κτίρια που έχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους δεν απαιτεί την ίδια ανάλυση με μια πυκνοδομημένη περιοχή στην Ινδία που έχει μικρούς και κυρτούς δρόμους και κτίρια χωρίς απόσταση μεταξύ τους (Jacobsen, 2002). Οι υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες έχουν συνήθως πολύ καλή ποιότητα και έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις 0.1 mm GSD στο χάρτη αντιστοιχεί επαρκώς σε κλίμακα 1:10.000 για τον IKONOS που έχει GSD 1 m, και σε κλίμακα μέχρι 1:5.000 για τον Quickbird που έχει GSD 0.62 m (Passini and Jacobsen, 2004; Toran et al, 2004).

Ονομαστικό και πραγματικό μέγεθος pixel

Η GSD δεν είναι υποχρεωτικό να έχει πάντα το ίδιο μέγεθος με την προβολή του pixel στο έδαφος. Ο Orbview-3 χρησιμοποιεί κλιμακωτές γραμμές CCD δηλαδή δύο γραμμές CCD μετατεθειμένες στη διεύθυνση των γραμμών κατά μισό pixel (εικόνα 16). Το μέγεθος του pixel προβαλλόμενο στο έδαφος για σκόπευση στο ναδίρ είναι 2 m αλλά τα γειτονικά εικονοστοιχεία 'επικαλύπτονται' κατά 50% και στις δύο διευθύνσεις όπως φαίνεται στο κάτω αριστερό τμήμα της εικόνας 16. Αυτό οδηγεί σε ονομαστική GSD 1 m. Όμως αυτή η υπερ-δειγματοληπτική GSD δεν είναι το ίδιο με προβαλλόμενο μέγεθος εικονοστοιχείου 1 m χωρίς υπερ-δειγματοληψία, που οδηγεί επίσης σε GSD 1 m.

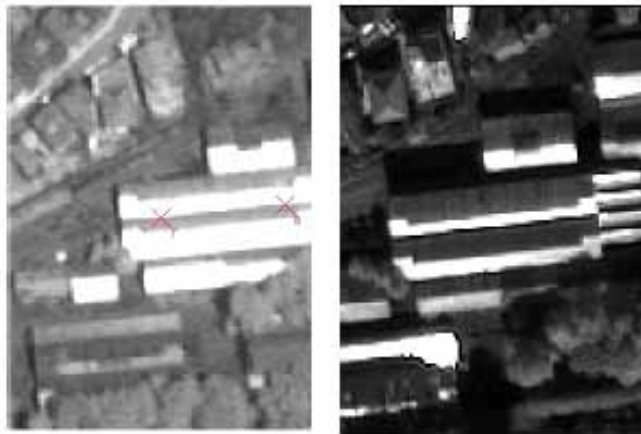


Εικόνα 16. Πάνω: κλιμακωτές γραμμές CCD

Κάτω: υπερ-δειγματοληπτικά και υπο-δειγματοληπτικά εικονοστοιχεία

Η πραγματική GSD μπορεί να προσδιοριστεί μέσω ανάλυσης ακμών. Μια έντονη ακμή στο χώρο του αντικειμένου (ξαφνική αλλαγή στον τόνο

του γκρι –βλ. εικόνα 17, η ακμή που καθορίζεται από τα δύο επισημασμένα σημεία) παρουσιάζεται στην εικόνα με την ομαλή μεταβολή των τόνων του γκρι. Η «έκταση» σε εικονοστοιχεία που καταλαμβάνει η απότομη μεταβολή των τόνων του γκρι σε μια εικόνα είναι συνάρτηση της ποιότητας της λήψης. Η διαφοροποίηση των τιμών του γκρι επηρεάζει την ακρίβεια προσδιορισμού ενός σημείου και επομένως δείχνει την πραγματική ανάλυση της εικόνας. Η ανάλυση ακμών για τον Orbview-3 έδειξε ότι η έντονη μεταβολή των τόνων πραγματοποιείται σε 1 GSD. Θεωρητικά, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο δορυφόρος δεν είναι εξοπλισμένος με σύστημα αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης TDI, θα έπρεπε η πραγματική ανάλυση να είναι στα 1.2 GSD αλλά αυτό μπορεί να βελτιώνεται με αύξηση της αντίθεσης ή βελτίωση των ακμών.



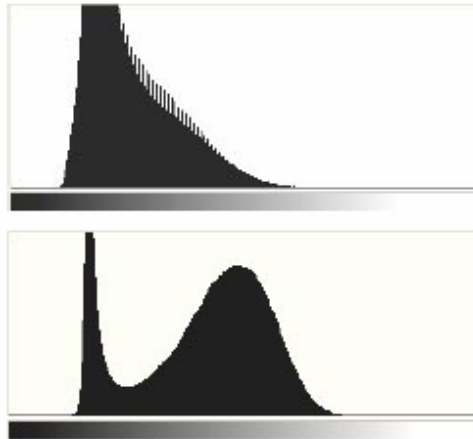
Εικόνα 17. Δεξιά: Orbview-3

Αριστερά :IKONOS

Οπτική ανάλυση

Το περιεχόμενο κάθε εικόνας πρέπει να ελέγχεται χειροκίνητα. Παρά το γεγονός ότι ιδιαίτερες συνθήκες κατά τη διάρκεια των λήψεων που προκαλούνται από την ατμόσφαιρα ή την ανύψωση του Ήλιου μπορούν να επηρεάσουν το περιεχόμενο και την ποιότητα της εικόνας, το πρώτο δεν παύει να υποδεικνύει τη σχέση ανάμεσα στην πιθανή κλίμακα χαρτογράφησης και τη διαθέσιμη εικόνα. Παρακάτω ερευνάται ένα ζευγάρι Orbview-3 στην περιοχή Zonguldak της Τουρκίας με μέση GSD 1.07 m.

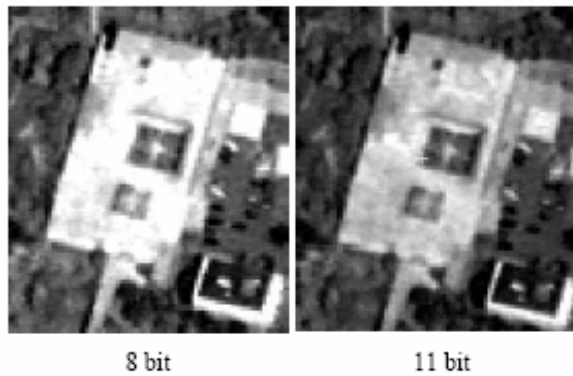
Οι εικόνες του Orbview-3 έχουν σχεδόν το ίδιο εύρος τιμών του γκρι με αυτές του IKONOS. Τα ιστογράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω δεν είναι ίδια λόγω των κάπως διαφορετικών εκτάσεων που απεικονίζονται στις εικόνες.



Εικόνα 18. Ιστόγραμμα του IKONOS (πάνω), του Orbview-3 (κάτω)

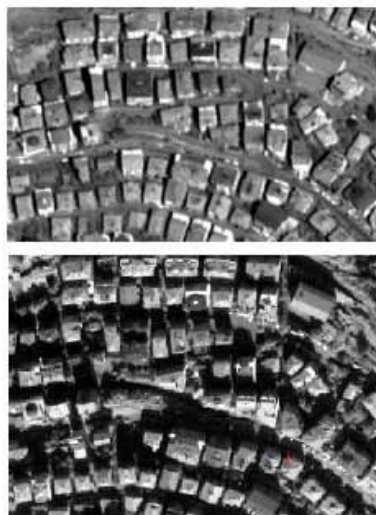
Μια σύγκριση ανάμεσα στις λεπτομέρειες των σκηνών του Orbview-3 και του IKONOS στην εικόνα 17 δείχνει ότι δεν υπάρχουν έντονες διαφορές μεταξύ τους. Η ακμή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ακμών (ανάμεσα στα σημεία 7 και 8 στην εικόνα χ) έχει παρόμοια μορφή και στις δύο σκηνές. Παρόλο που στη σκηνή του IKONOS μπορεί κανείς να αναγνωρίσει περισσότερες λεπτομέρειες, αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω της διαφορετικής ανύψωσης του Ήλιου στις δύο περιπτώσεις. Από την άλλη, στο κάτω αριστερό τμήμα της σκηνής του IKONOS παρουσιάζεται μια διεύρυνση των πολύ φωτεινών τμημάτων (blooming effect).

Επιπλέον, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η ραδιομετρική ανάλυση. Ο Orbview-3, όπως και ο IKONOS και ο Quickbird, έχουν ονομαστική ραδιομετρική ανάλυση 11 bit (2048 διαφορετικές τιμές του γκρι), αλλά το χρησιμοποιούμενο εύρος των τιμών του γκρι δεν πιάνει ολόκληρη την γκάμα, με αποτέλεσμα μια μεταβολή από τα 11 bit στα 8 bit να μην επιφέρει ιδιαίτερες απώλειες στην πληροφορία. Όπως φαίνεται στην εικόνα 19, μόνο σε ορισμένες κρίσιμες περιοχές μπορεί να εντοπιστούν διαφορές ανάμεσα στην αρχική εικόνα των 11 bit και σε αυτή των 8 bit. Πάνω στην φωτεινή οροφή μπορούν να ξεχωρίσουν περισσότερες λεπτομέρειες στην εικόνα των 11 bit. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε διαδικασίες αυτόματης εύρεσης ομόλογων σημείων. Σε χαρτογραφικούς σκοπούς είναι μάλλον ασήμαντο, καθώς και στις δύο περιπτώσεις είναι εφικτή η αναγνώριση του κτιρίου και των απαιτούμενων λεπτομερειών.



Εικόνα 19. Εικόνες του Orbview-3 με διαφορετική ραδιομετρική ανάλυση

Οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των λήψεων μπορεί να διαφέρουν. Ομίχλη, σύννεφα ή καπνός μπορεί να μειώσουν την αντίθεση των εικόνων. Παρόλο που μπορεί κανείς να βελτιώσει την αντίθεση μιας εικόνας, αυτό δεν οδηγεί στην ίδια ποιότητα εικόνας που θα είχε αν επικρατούσαν ιδανικές συνθήκες λήψης. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην εικόνα 20, η ανύψωση του Ήλιου και το αζιμούθιο του δορυφόρου είναι ιδιαίτερα σημαντικά όσον αφορά στην αναγνώριση των αντικειμένων. Αν, για παράδειγμα, οι δρόμοι βρίσκονται στη σκιά, τότε μπορεί να προκληθούν σφάλματα κατά την αναγνώριση των ορίων τους. Οι χρησιμοποιούμενες εικόνες του Orbview-3 έχουν ληφθεί με τον Ήλιο σε γωνία ανύψωσης 63° , οπότε οι σκιές δεν είναι τόσο μακριές όσο στην εικόνα του IKONOS που η γωνία ανύψωσης του Ήλιου είναι 41° (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Εικόνα του Orbview-3 με 63° (πάνω) και του IKONOS με 41° ανύψωση του Ήλιου (κάτω)

Οι στενοί δρόμοι, τα ψηλά κτίρια και η κλίση του εδάφους στα βόρεια προκαλούν προβλήματα στην περιοχή του Zonguldak. Μερικές φορές όμως, οι σκιές μπορεί να βοηθήσουν στην αναγνώριση των αντικειμένων.

Για παράδειγμα, ένα ελικοδρόμιο με την πρώτη ματιά έδειχνε σαν να ήταν στέγη. Η απώλεια σκιάς όμως φανερώνει ότι βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο με το περιβάλλον λιβάδι.

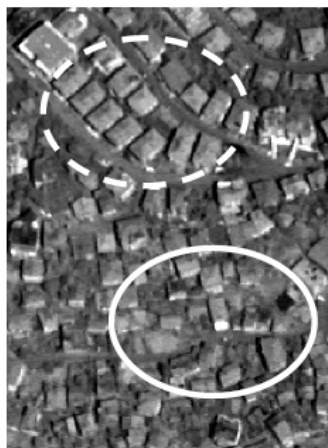
Η εικόνα 21 παρουσιάζει την επίδραση της τρίτης διάστασης. Η απεικονιζόμενη τέντα φαίνεται διαφορετική στις δύο εικόνες που αποτελούν το στερεοζεύγος, με αποτέλεσμα να απαιτείται κάποια γνώση για την αναγνώριση του αντικειμένου.



Αζιμούθιο δορυφ. 38° Αζιμούθιο δορυφ. 163°

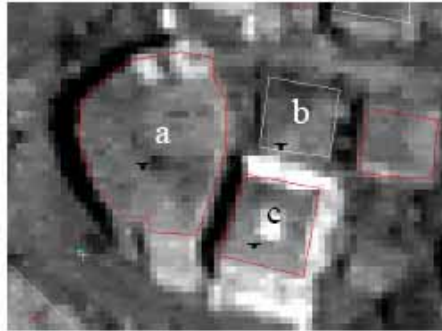
Εικόνα 21. Απεικόνιση μιας τέντας από διαφορετικές διευθύνσεις όπου και στις δύο περιπτώσεις η ανύψωση του δορυφόρου είναι 72°

Η ερμηνεία μιας εικόνας επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αντίθεσή της αλλά όταν πρόκειται για ερμηνεία αντικειμένων αυτή διαφέρει ανάλογα με το αντικείμενο. Οι οργανωμένα δομημένες περιοχές με μεγαλύτερα, σωστά παρατεταγμένα κτίρια μπορούν να χαρτογραφηθούν ευκολότερα απ' ό τι οι μη συστηματοποιημένα δομημένες περιοχές με μικρότερα και μη κανονικού σχήματος κτίρια. Επιπλέον, οι περιοχές με αυθαίρετη δόμηση στο Zonguldak βρίσκονται πάνω σε πλαγιές με αποτέλεσμα να φαίνονται αρκετά διαφορετικές από κάποιες διευθύνσεις (εικόνα 22).



Εικόνα 22. Οργανωμένα (διακεκομμένη έλλειψη) και μη οργανωμένα (συνεχής έλλειψη) δομημένες περιοχές που φαίνονται στην σκηνή του Orbview-3

Επίσης, δεν έχουν όλα τα κτίρια ορθογώνιο σχήμα. Ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες κλίσεις οι πλευρές των κτιρίων μπορεί να μην είναι παράλληλες. Στην εικόνα 23 φαίνεται ένα μη συμμετρικό κτίριο (a), ένα ορθογώνιο κτίριο (c) και ένα όχι και τόσο ψηλό κτίριο που δεν αναγνωρίζεται εύκολα λόγω σκιών (b). Το κτίριο (b) δεν είχε αναγνωριστεί αρχικά κυρίως λόγω της απώλειας αντίθεσης από τις σκιές.



Εικόνα 23. ένα μη συμμετρικό (a), ένα μη αναγνωρίσιμο (b) και ένα κοινό (c) κτίριο από την εικόνα του Orbview-3

Οι πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες έχουν συνήθως μικρότερη γεωμετρική ανάλυση απ' ό τι οι παγχρωματικές που παράγονται από τον ίδιο αισθητήρα. Από την άλλη, η ύπαρξη χρώματος βοηθάει στη διαδικασία αναγνώρισης των αντικειμένων. Τα προϊόντα pan-sharpened του IKONOS που βασίζονται στο κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB), έχουν την ίδια γεωμετρική ανάλυση με τις παγχρωματικές εικόνες, ενώ συνδυάζουν το πλεονέκτημα του χρώματος (εικόνες 24 και 25). Ο Orbview-3 δεν μπορεί να πραγματοποιήσει παγχρωματικές και έγχρωμες λήψεις την ίδια στιγμή όπως ο IKONOS και ο Quickbird με αποτέλεσμα να μην μπορεί να παράγει αντίστοιχα προϊόντα με αυτά του IKONOS.



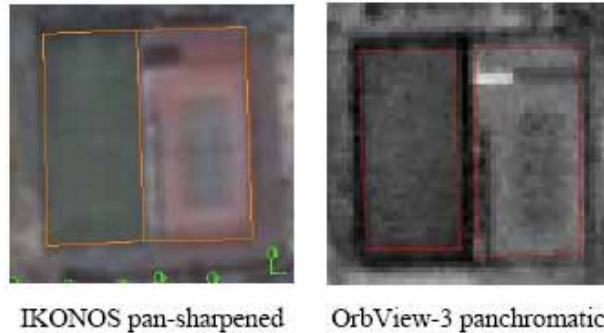
OrbView-3 panchromatic



IKONOS pan-sharpened

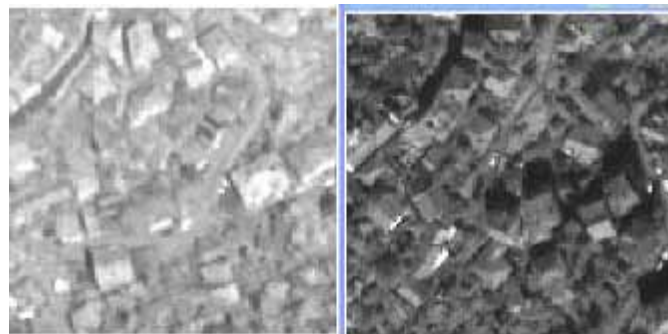
Εικόνα 24. Επιπλέον πληροφορία μέσω του χρώματος σε εικόνες με ίδια γεωμετρική ανάλυση

Η πληροφορία του χρώματος υποστηρίζει την ταξινόμηση των εδαφών βάσει χρήσης. Στην εικόνα 25 παρουσιάζονται δύο χώροι άθλησης με γρασίδι και τσιμέντο σε pan-sharpened και παγχρωματική εικόνα. Το πλεονέκτημα του χρώματος είναι προφανές. Λόγω της έλλειψης δυνατότητας ταυτόχρονης λήψης έγχρωμων και παγχρωματικών δεδομένων, ο Orbview-3 δεν μπορεί να παρέχει αυτό το πλεονέκτημα.

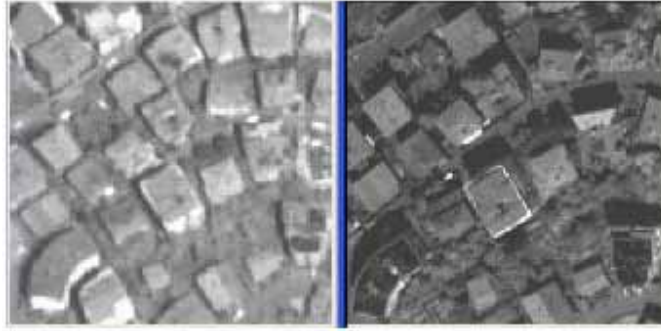


Εικόνα 25. Τα ίδια αντικείμενα απεικονισμένα σε pan-sharpened και παγχρωματική εικόνα

Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα αποτελέσματα χαρτογράφησης-ψηφιοποίησης βασισμένης σε παγχρωματικά δεδομένα από τον Orbview-3 και σε pan-sharpened και παγχρωματικά δεδομένα από τον IKONOS. Φυσικά η pan-sharpened εικόνα παρέχει πλεονεκτήματα όσον αφορά στην αναγνώριση των αντικειμένων, αλλά μια σύγκριση με την ψηφιοποίηση που προέκυψε από τα παγχρωματικά δεδομένα του ίδιου δορυφόρου φανερώνει πως τα αποτελέσματα του χρώματος είναι μόνο ελαφρώς καλύτερα. Ιδιαίτερα σε περιοχές με μικρή αντίθεση, ορισμένα επιπλέον αντικείμενα μπορούν να αναγνωριστούν με τη βοήθεια του χρώματος, αλλά το πλεονέκτημα είναι περιορισμένο. Η βασική διαφορά ανάμεσα στη χαρτογράφηση με παγχρωματικές εικόνες του Orbview-3 και με pan-sharpened εικόνες του IKONOS φαίνεται πως εξακολουθεί να είναι η ελαφρώς καλύτερη ποιότητα εικόνων του IKONOS.



Εικόνα 26. Αυθαίρετα δομημένη περιοχή σε παγχρωματική εικόνα του Orbview-3 (αριστερά) και του IKONOS (δεξιά)



Εικόνα 27. Οργανωμένα δομημένη περιοχή σε παγχρωματική εικόνα του Orbview-3 (αριστερά) και του IKONOS (δεξιά)

Στην εικόνα 26 παρουσιάζονται οι διαφορές ανάμεσα σε παγχρωματικές εικόνες του Orbview-3 και του IKONOS σε δύσκολη περιοχή με αυθαίρετη δόμηση. Εκεί, αρκετά κτίρια έχουν εντοπιστεί αλλά δεν ήταν δυνατή η ψηφιοποίησή τους στην εικόνα του Orbview-3, ενώ έχουν ψηφιοποιηθεί στην εικόνα του IKONOS. Στην περιοχή με οργανωμένη δόμηση (εικόνα 27) δεν υπάρχουν εμφανείς διαφορές στην ταυτοποίηση των αντικειμένων. Το μόνο που φαίνεται να υπάρχει είναι μια επιρροή από την διαφορετική ανύψωση του Ήλιου. Η ποιοτική διαφορά ανάμεσα στις δύο εικόνες, παρόλο που είναι περιορισμένη, είναι υπαρκτή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υπερ-δειγματοληψία των εικόνων του Orbview-3 που ενώ έχει μέγεθος προβολής pixel 2 m, έχει GSD 1m.

Το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης σε ένα τμήμα των διαθέσιμων εικόνων παρουσιάζεται στην εικόνα 28. Μικρές διαφορές στην χαρτογράφηση εμφανίζονται κυρίως στα μικρότερα κτίρια στο κάτω κεντρικό τμήμα της εικόνας. Πέρα από τις διαφορές που εμφανίζονται λόγω των διαφορετικών χρονικών στιγμών των λήψεων (2002 από τον IKONOS και 2005 από τον Orbview-3), στην εικόνα του IKONOS έχουν ψηφιοποιηθεί περισσότερες λεπτομέρειες. Επισημαίνεται ότι με τον IKONOS έχουν αναγνωριστεί όλα τα κτίρια και οι δρόμοι (είτε φαρδιοί, είτε στενοί). Βέβαια, κάποιοι δρόμοι δεν ήταν εφικτό να ψηφιοποιηθούν λόγω επίδρασης των σκιών στην ran-sharpened εικόνα. Στον πίνακα 18 δίνεται μια περίληψη των αντικειμένων που αναγνωρίστηκαν. Σε αυτόν αναδεικνύονται οι διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στη χαρτογράφηση με εικόνες του Orbview-3 και τις ran-sharpened εικόνες του IKONOS. Παρατηρούμε ότι οι διαφορές περιορίζονται σε μικρά αντικείμενα και αυτό σημαίνει ότι οι εικόνες του Orbview-3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:10.000.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μικροί Οπτικοί Χαρτογραφικοί Δορυφόροι Υψηλής Ανάλυσης

Αντικείμενο	Εικόνα	Εντοπισμός			Αναγνώριση		
		***	**	*	***	**	*
Μεγάλα ανεξάρτητα κτίρια	OV-3	√			√		
	IKO	√			√		
Μικρά ανεξάρτητα κτίρια	OV-3	√				√	
	IKO	√			√		
Φαρδιοί δρόμοι	OV-3	√			√		
	IKO	√			√		
Στενοί δρόμοι	OV-3	√				√	
	IKO	√			√		
Χώροι άθλησης	OV-3		√			√	
	IKO	√			√		
Νεκροταφεία	OV-3		√			√	
	IKO	√			√		
Ακτογραμμή	OV-3	√			√		
	IKO	√			√		
Όρια δρόμων	OV-3		√			√	
	IKO	√			√		
Τοιχία	OV-3		√				√
	IKO		√			√	
Πεζοδρόμια	OV-3		√			√	
	IKO	√			√		
Μονοπάτια	OV-3		√				√
	IKO		√			√	
Πισίνες	OV-3			√			√
	IKO	√			√		
Λιβάδια	OV-3		√			√	
	IKO	√			√		

*** = χωρίς προβλήματα , ** = μέτρια , * = δύσκολη

Πίνακας 18. Εντοπισμός και αναγνώριση αντικειμένων χρησιμοποιώντας την παγχρωματική εικόνα του Orbview-3 και την pan-sharpened εικόνα του IKONOS



Αριστερά: Αποτελέσματα ψηφιοποίησης στην παγχρωματική εικόνα από τον Orbview-3. Τα κτίρια που αναγνωρίστηκαν αλλά δεν ψηφιοποιήθηκαν παρουσιάζονται με ένα σταυρό
Δεξιά: Αποτελέσματα ψηφιοποίησης στην παγχρωματική εικόνα από τον IKONOS



Αποτελέσματα ψηφιοποίησης στην pan-sharpened εικόνα από τον IKONOS

Εικόνα 28. Αποτελέσματα ψηφιοποίησης από την παγχρωματική εικόνα του Orbview-3 και την παγχρωματική και pan-sharpened εικόνα του IKONOS.

Συμπεράσματα

Οι υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες με GSD 1 m μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:10.000. Δεν υπάρχει πρόβλημα όσον αφορά στη γεωμετρική ακρίβεια της χαρτογράφησης. Οι διαφορές και περιορισμοί στη χαρτογράφηση προκύπτουν από το περιεχόμενο των εικόνων. Λόγω της ιδιαίτερης παραγωγής εικόνων με την υπερ-δειγματοληψία των pixel από τον Orbview-3, οι εικόνες του είναι ελαφρώς χειρότερες ποιοτικά σε σχέση με τις

παγχρωματικές σκηνές του IKONOS. Επιπλέον, ο IKONOS έχει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης λήψης παγχρωματικών και έγχρωμων εικόνων με αποτέλεσμα να μπορεί να παράγει pan-sharpened εικόνες που προσφέρουν ορισμένες διευκολύνσεις στην αναγνώριση αντικειμένων. Όμως, και οι δύο δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παραγωγή χαρτών κλίμακας 1:10.000. Η χαρτογράφηση σε κλίμακα 1:5.000 δεν πρέπει να γίνεται με εικόνες του Orbview-3, ενώ και οι εικόνες του IKONOS έχουν κάποιους περιορισμούς για τόσο μεγάλη κλίμακα. Τέλος, η χρήση των αρχικών σκηνών στα 11 bit δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την αναγνώριση των αντικειμένων με αποτέλεσμα να επιτρέπεται μείωση στη ραδιομετρική ανάλυση των σκηνών στα 8 bit.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν αναλυτικά ο ορισμός, τα χαρακτηριστικά, τα περιεχόμενα, οι δυνατότητες και οι εφαρμογές των μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων. Κλείνοντας, οφείλουμε να συνάγουμε κάποια βασικά συμπεράσματα και να επισημάνουμε ορισμένα σημαντικά στοιχεία που αφορούν στα πλεονεκτήματα, στους περιορισμούς και στις μελλοντικές δυνατότητες των μικρών δορυφόρων γενικά, καθώς και στη σύγκριση των μικρών οπτικών χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης με τους αντίστοιχους μεσαίους και μεγάλους.

Έτσι, όσον αφορά στα πλεονεκτήματα των μικρών δορυφόρων αξίζει να επισημανθούν τα ακόλουθα:

1. Έχουν μικρό χρόνο κατασκευής που κυμαίνεται από 1 μέχρι 3 χρόνια.
2. Το κόστος κατασκευής τους κυμαίνεται από 10 μέχρι 300 k\$/kg, με αποτέλεσμα το τελικό κόστος του δορυφόρου να είναι από 1 μέχρι 30 εκατομμύρια δολάρια.
3. Το κόστος εκτόξευσης μειώνεται σημαντικά λόγω του μικρού όγκου και βάρους τους.
4. Δεδομένου του μειωμένου χρόνου και κόστους κατασκευής δίνεται η δυνατότητα στους επιστήμονες να δοκιμάζουν γρήγορα νέες τεχνολογίες χωρίς να διακινδυνεύουν την επιτυχία μιας μεγάλης και δαπανηρής αποστολής.
5. Δίνεται η δυνατότητα εκτόξευσης πολλών μικρών δορυφόρων με το ίδιο κόστος που θα είχε μια μεγάλη αποστολή. Έτσι, έχουμε συχνότερες επανεπισκέψεις σε ένα τόπο και μοιρασμένο ρίσκο αποστολής, καθώς η απώλεια ενός από τους πολλούς μικρούς δορυφόρους δεν συνεπάγεται το τέλος της αποστολής.
6. Η σταδιακή εκτόξευση πολλών μικρών δορυφόρων μειώνει τις δυσκολίες χρηματοδότησης της αποστολής αφού και αυτή μπορεί να γίνει σταδιακά.
7. Προσφέρουν ιδιαίτερη ευελιξία όσον αφορά στο σχεδιασμό και στην κατασκευή τους καθώς έχουν σαφή διαχωρισμό των συστημάτων και σαφή κατανομή των λειτουργιών τους.
8. Λόγω του ότι η συνδεσμολογία των συστημάτων που περιέχει ένας μικρός δορυφόρος είναι λιγότερο περίπλοκη από αυτήν ενός μεγάλου, γίνεται ευκολότερα η αντικατάσταση χαλασμένων

εξαρτημάτων και η αντιμετώπιση απρόβλεπτων προβλημάτων είτε στη Γη, είτε μετά την εκτόξευση.

9. Το μέγεθος, ο χρόνος κατασκευής και το κόστος ενός μικρού δορυφόρου αποτελούν ιδανικές λύσεις για τα πανεπιστήμια καθώς δίνουν την ευκαιρία σε φοιτητές να μάθουν και να εξοικειωθούν με τα υποσυστήματα των δορυφόρων αλλά και τα στάδια κατασκευής τους. Επιπλέον δίνουν την ευκαιρία σε λιγότερο εύπορα κράτη να εκτοξεύσουν τους δικούς τους δορυφόρους και να εξοικειωθούν με την δορυφορική τεχνολογία και εφαρμογές.
10. Για την κατασκευή ενός μικρού δορυφόρου αρκεί η ενασχόληση μόνο μιας μικρής ομάδας μηχανικών που εκτελεί όλα τα στάδια με αποτέλεσμα να ξεπερνιούνται ευκολότερα προβλήματα που έχουν να κάνουν με την έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού αλλά και τη μετάδοση της γνώσης.

Πέρα, όμως, από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι μικροί δορυφόροι, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που είτε καθυστερούν την εξέλιξή τους, είτε τους καθιστούν ακατάλληλους για συγκεκριμένες αποστολές, είτε υποβαθμίζουν τις λειτουργίες τους. Τέτοιοι είναι:

1. Για την κατασκευή ενός αποδοτικού μικρού δορυφόρου η τεχνολογία πρέπει να βρίσκεται σε τέτοιο σημείο ώστε να μπορούν να παραχθούν όργανα και εξαρτήματα που να είναι αρκετά μικρά σε μέγεθος και αρκετά γερά σε κατασκευή και συνδεσμολογία ώστε να χωράνε στο αεροσκάφος και να λειτουργούν σωστά.
2. Σε ορισμένες περιπτώσεις απλοί νόμοι της φυσικής περιορίζουν την περαιτέρω σμίκρυνση κάποιων οργάνων με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός του αεροσκάφους να εξαρτάται και να περιορίζεται από το μέγεθος ορισμένων εξαρτημάτων.
3. Κάποιες φορές προτιμάται να "θυσιάζονται" κάποιες λειτουργίες που θα καθιστούσαν τον δορυφόρο ακόμη καλύτερο (όπως καλύτερη επικοινωνία, μεγαλύτερη αποθηκευτική μνήμη, περισσότερα συστήματα ελέγχου του προσανατολισμού και της τροχιάς, μικρότερη παροχή ρεύματος κ.α.) προκειμένου να έχουμε μικρότερο μέγεθος πλατφόρμας και επομένως μικρότερο κόστος.

4. Οι μικροί δορυφόροι δεν μπορούν να εκτελέσουν όλες τις αποστολές για τις οποίες πιθανά απαιτούνται μεγαλύτερα και βαρύτερα σκάφη, περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα και λιγότερες δονήσεις
5. Συνήθως οι μικροί δορυφόροι κουβαλούν μικρές έως μηδαμινές ποσότητες καυσίμων με αποτέλεσμα να είναι λιγότεροι ευκίνητοι και ευέλικτοι από τους μεγάλους, καθώς το παραπάνω γεγονός περιορίζει έως και απαγορεύει μεταβολές στη τροχιά.
6. Οι μικροί δορυφόροι απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό και προγραμματισμό τους διότι το μικρό τους μέγεθος συνεπάγεται τον εξ' αρχής καθορισμό των περιεχόμενων τους και της θέσης τους.
7. Το πραγματικό κόστος ενός μικρού δορυφόρου πρέπει να περιλαμβάνει και το κόστος της έρευνας που έχει διεξαχθεί για να κατορθώσουν οι επιστήμονες να μειώσουν τη μάζα και τον όγκο των οργάνων του.
8. Το κόστος των μικρών δορυφόρων μπορεί να είναι σχετικά υψηλό όταν αυτοί κατασκευάζονται για πολύπλοκες και απαιτητικές αποστολές.

Αναφερόμενοι αποκλειστικά στους μικρούς οπτικούς χαρτογραφικούς δορυφόρους υψηλής ανάλυσης, οφείλουμε αρχικά να επισημάνουμε ότι κατόπιν της ενασχόλησής μας με αυτούς φαίνεται ότι ανταγωνίζονται επάξια τους μεγαλύτερους χαρτογραφικούς δορυφόρους τουλάχιστον σε θέματα ανάλυσης και ποιότητας των σκηνών, ελέγχου του προσανατολισμού και της τροχιάς του σκάφους και διανομής των προϊόντων. Βέβαια, λόγω του περιορισμού του μεγέθους οι μικροί δορυφόροι δεν μπορούν να συνδυάσουν την ποικιλία και την ποιότητα των λειτουργιών των μεγάλων, αλλά από την άλλη αξίζει να επισημανθεί ότι στις μέρες μας όλα τα απαραίτητα συστήματα για χαρτογραφικές εφαρμογές έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς, αν και όχι συνδυασμένα, σε μικρά σκάφη.

Οι περιπτώσεις των εμπορικών μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων EROS και OrbView-3 αποδεικνύουν ότι και οι μεγάλες εταιρίες του κλάδου μπορούν να επενδύσουν σε μικρά σκάφη που παράγουν προϊόντα υψηλής ανάλυσης και ποιότητας και που εξυπηρετούν πλήρως τους σκοπούς για

τους οποίους δημιουργήθηκαν. Ταυτόχρονα, ο Topsat αποτελεί απόδειξη του γεγονότος ότι εικόνες υψηλής ανάλυσης μπορούν να παράγονται από ένα δορυφόρο ιδιαίτερα χαμηλού κόστους. Αν οι εταιρείες παροχής δορυφορικών χαρτογραφικών δεδομένων στραφούν σε μικρότερα και φθηνότερα σκάφη, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών των προϊόντων, πράγμα που θα ικανοποιήσει τους χρήστες και θα βοηθήσει την εξάπλωση της χρήσης των δορυφορικών δεδομένων.

Επιπλέον, από το τέταρτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας προκύπτει ότι οι μικροί εμπορικοί χαρτογραφικοί δορυφόροι υψηλής ανάλυσης μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν σε χαρτογραφικές εφαρμογές κλίμακας μέχρι 1:10.000, ενώ με χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων οι σκηνές τους μπορούν να προσανατολιστούν με ακρίβεια καλύτερη από 1 pixel. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται στην περίπτωση των προσανατολισμών των σκηνών των μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων είναι ότι, με εξαίρεση τους διάσημους εμπορικούς δορυφορικούς, τα μοντέλα των μηχανών και τα υπόλοιπα στοιχεία που απαιτούνται για την εφαρμογή αυστηρών μαθηματικών μοντέλων προσανατολισμού δορυφορικών εικόνων δεν δίνονται στη δημοσιότητα. Αυτό συμβαίνει είτε γιατί το σύστημα της μηχανής είναι πολύ περίπλοκο, είτε γιατί έχει κατασκευαστεί από ερασιτεχνικές ομάδες, είτε γιατί τα προϊόντα δεν χρησιμοποιούνται ευρέως. Συνεπώς, παρά τις λίγες εξαιρέσεις, οι περισσότερες σκηνές των μικρών χαρτογραφικών δορυφόρων προσανατολίζονται με χρήση προσεγγιστικών μαθηματικών μοντέλων. Παρόλο που τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ικανοποιητικά, η έλλειψη στοιχείων καθιστά αδύνατη την εφαρμογή αυστηρών τροχιακών μοντέλων που δίνουν σαφώς καλύτερα και ασφαλέστερα αποτελέσματα.

Τέλος, παρατηρώντας τον πίνακα 19, στον οποίο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των κυριότερων οπτικών χαρτογραφικών δορυφόρων ανάλυσης μέχρι 6.5 m, μπορεί κανείς να διακρίνει ότι οι μικροί δορυφόροι (μάζα σκάφους μικρότερη από 500 kg) είναι 7, ενώ οι μεγαλύτεροι είναι 13. Οι μικροί δορυφόροι αποτελούν έτσι το 35% των χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης. Επιπλέον, είναι προφανές ότι οι μικροί δορυφόροι έχουν πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε ρεύμα για τη λειτουργία τους. Όσον αφορά στο ύψος της τροχιάς φαίνεται ότι οι μικροί δεν ξεπερνούν το ύψος των 686 km, ενώ υπάρχουν μεγάλοι δορυφόροι που το

ύψος της τροχιάς τους φτάνει τα 888 km. Αυτό φανερώνει πιθανά ότι τα τηλεσκόπια των μικρών δορυφόρων είναι μικρότερα και επομένως για να επιτύχουν την επιθυμητή χωρική ανάλυση απαιτείται μικρότερο ύψος τροχιάς.

Δορυφόρος	Χώρα	Εκτόξευση	Μάζα (kg)	Όγκος (m)	Ρεύμα (KW)	Τροχιά Ύψος-Επίκλ.-Περίοδος	Ανάλυση Pan-MS (m)	Πλάτος λήψης (km)
GeoEye-1	Η.Π.Α.	2008	1955	4.3x2.7	3.86	684km/98°/98min	0.41/1.64	15
WorldView-1	Η.Π.Α.	18-09-07	2500	3.6x2.5	3.2	496km/97.2°/94.6min	0.5/-	16
QuickBird-2	Η.Π.Α.	18-10-01	641		1.5	450km/98°	0.6/2.5	16
EROS B	Ισραήλ	25-04-06	350	1.2x2.3		500km/97.4°/94.7min	0.7/-	7
Pleiades-1&2	Γαλλία	2009-10	1000		1.5	695km/98.2°/	0.7/2.8	20
IKONOS-2	Η.Π.Α.	24-09-99	817	1.8x1.6	1.5	681km/98.1°/98min	1.0/4.0	11
OrbView-3	Η.Π.Α.	26-06-03	360	1.2x1.9		470km/97.25°/92.5min	1.0/4.0	8
Resurs DK-1	Ρωσία	16-06-06	6650	7.4 ύψος		350-610km/70°/	1.0/3.0	28
KOMPSAT-2	Κορέα	28-07-06	800	1.85x2.6	0.95	685km/98.13°/98.4min	1.0/4.0	15
Cartosat-1	Ινδία	04-05-05	1560	2.4x2.7	1.1	618km/97.8°/97min	2.5/-	30
EROS A1	Ισραήλ	05-12-00	260	1.2x2.3	0.45	500km/97.4°/94.7min	1.8/-	14
FormoSat	Ταϊβάν	20-04-04	746	1.6x2.4	0.69	888km/99.14°/102.9min	2.0/8.0	24
THEOS	Γαλλία	2008	750	2.1x2.1x2.4	0.98	822km/98.7°/101.4min	2.0/15	22, 90
SPOT-5	Γαλλία	04-05-02	3030	3.4x3.1x6.0	2.4	832km/98.7°/101.4min	2.5/10	120
Topsat	Ην. Βασίλειο	27-10-05	115		0.055	686km/98°/98.5min	2.5/5.0	10, 15
ALOS	Ιαπωνία	24-01-06	4000	6.4x3.4x4.3	7	692km/98.16°/98.5min	2.5/10	35, 70
RazakSat	Μαλαισία	2008	190	1.2x1.2	0.33	685km/7.5°-9°	2.5/5.0	
Beijing-1	Κίνα	27-10-05	166	0.9x0.77x0.91	0.05	686km/98.8°/97.7min	4.0/32	600
RapidEye A,B,C,D,E	Γερμανία	2008	150	0.8x0.9x1.1	0.1	630km/98°/96.7min	-/6.5	78
KOMPSAT-1	Κορέα	20-12-99	510	1.33x2.33	0.63	685km/98.13°/98.4min	6.6/-	17

Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά των κυριότερων οπτικών χαρτογραφικών δορυφόρων υψηλής ανάλυσης

Από όλα τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι οι μικροί χαρτογραφικοί δορυφόροι διαδραματίζουν ήδη ένα σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία των δορυφορικών δεδομένων. Δεδομένου ότι το κύριο πλεονέκτημα των μικρών δορυφόρων είναι η μείωση του κόστους των αποστολών, μπορεί να πει κανείς με σιγουριά ότι η έρευνα στον τομέα αυτό θα συνεχιστεί ώστε να κατασκευαστούν ακόμη φθηνότερα, μικρότερα και καλύτερα σκάφη. Με την πάροδο του χρόνου η τεχνολογία θα εξελισσεται, η επιστημονική γνώση θα διευρύνεται και έτσι οι μικροί δορυφόροι θα μπορούν να εξυπηρετήσουν νέες, απαιτητικότερες και πολυπλοκότερες αποστολές. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι οι μικροί δορυφόροι μπορούν να αντικαταστήσουν τους μεγάλους. Αντίθετα, οι μικροί δορυφόροι πρέπει να νοούνται ως συμπλήρωμα των μεγάλων. Σκοπός της ύπαρξής τους είναι να διεκπεραιώνουν μικρότερες αποστολές από άποψη χρόνου, παρατηρήσεων και εξειδίκευσης. Αυτό που είναι σίγουρο, είναι ότι στο μέλλον θα αυξηθεί και ο αριθμός και οι ικανότητες των μικρών δορυφόρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bar-Lev M., Shcherbina L., Levin V., 2001: "EROS system - satellite orbit and constellation design", 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, on-line proceedings.

Baxter E., Laycock J., Levett W. A., 2006: "TopSat: High quality imager from a low cost satellite", Proceedings of the 4S Symposium: 'Small Satellite Systems and Services,' Chia Laguna Sardinia, Italy, Sept. 25-29, ESA SP-618

Baxter E., Levett B., 2007: "TopSat: Lessons Learned from Small Satellite Mission", Proceedings of the 6th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany, April 23 – 26.

Brooks P., 2001: "TopSat - High Resolution Imaging From a Small Satellite", Proceedings of the 3rd International Symposium of the IAA, Berlin, April 2-6, pp. 319-322

Cawley S., 2003: "TOPSAT: Low-Cost High Resolution Imagery from Space", 4th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany, April 7-11.

Cawthorne A., Da Silva Curiel A., Sweeting M., 2005: "The Next Generation DMC Small Satellite Platform for High-Resolution Imaging", Proceedings of the 56th IAC, Fukuoda, Japan, Oct. 17-21, IAC-05-B5.4.01

Chen L. C., Teo T. A., 2002: "Rigorous generation of orthophotos from EROS-A high resolution satellite images", The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(B4): 620 - 625.

Chmiel J., Kay S., Spruyt P., 2004: "Orthorectification and geometric quality assessment of very high spatial resolution satellite imagery for common agricultural policy purposes", The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B4): 1019 - 1024.

Dewhurst J.P., Laycock, J., Levett, W., Yates, C., 2005: "TopSat - High resolution imaging from a low cost satellite", QinetiQ, Farnborough, Hants UK

Dial G., Grodecki J., 2002: "IKONOS Accuracy without Ground Control", Proceedings of ISPRS Commission I Mid-Term Symposium, Denver, pp.10-15.

Dowman I., Tao V., 2002: "An update on the use of rational functions for photogrammetric restitution", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 7(3): 26-29.

Dungate D. G., Liddle D., Cropp A., Levett W., Price M., Steyn H., 2002: "TOPSAT Imaging Mode ADCS Design", 5th International ESA Conference on Guidance Navigation and Control Systems, Frascati, Italy, Oct. 22-25

Dungate D. G., Morgan C., Hardacre S., Liddle D., Cropp A., Levett W., Price M., Steyn H., 2004: "Platform Control for Space-Based Imaging: The TopSat Mission", Proceedings of the 4S Symposium: Small Satellites, Systems and Services, Sept. 20-24, La Rochelle, France

Fraser C. S., Baltasavias E., Gruen A., 2002: "Processing of IKONOS imagery for submetre 3D positioning and building extraction", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(3): 177-194.

Fraser C. S., Hanley H. B., Yamakawa T., 2001: "Submeter geopositioning with IKONOS Geo imagery", *Proceedings of Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space (ISPRS)*, Hannover, unpaginated CD-ROM.

Gianinetto M., 2006: "Geocoding Simulation of EROS-B Synchronous Imagery and Comparison to EROS-A1 Asynchronous Data", *Italian Journal of Remote Sensing*, 36, 81-92.

Gianinetto M., Scaioni M., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F., 2004: "Satellite images geometric correction based on non-parametric algorithms and self-extracted GCPs", *IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Proceedings*, Anchorage, Alaska, unpaginated CD-ROM.

Greenway P., Tosh I., Morris N., 2004: "Development of the TopSat Camera", *Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics*, March 30-April 2, Toulouse, France, ESA SP-554

Jacobsen K., 2002: "Mapping with IKONOS Images", *EARSel Symposium*, Prague.

Jacobsen K., 2005: "Geometry of satellite images – calibration and mathematical models", *Korean Society of Remote Sensing (Hrsg.): ISPRS international conference*. Jeju, S. 182-185

Jacobsen K., 2005: "Use of Very High Resolution Satellite Imagery", *Tagung der Polnischen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*. Warschau, 11 S., CD

Jacobsen K., Büyüksalih, G., Topan, H., 2005: "Geometric Models for the Orientation of High Resolution Optical Satellite Sensors", *Hannover Workshop 2005* – βλ. <http://www:ipi.uni-hannover.de>

Kohm K., 2004: " Modulation Transfer Function Measurement Method and Results from the OrbView-3 High Resolution Imaging Satellite", *Proceedings of ISPRS 2004*, Istanbul, Turkey, July 12-23.

Konecny G., 2004: "Small Satellites - A Tool for Earth Observation?", *IntArchPhRS*, Band XXXV, Teil B4. Istanbul, S. 580-582 .

Laycock J., Van der Zel V., Morris N., Park G., Levett W., 2004: "High Resolution Optical Imaging with the Low Cost TopSat Small Satellite", *Proceedings of IAC 2004*, Vancouver, Canada, Oct. 4-8, IAC-04-IAA.4.11.4

Levett W.A., Laycock J., Baxter E., 2006: "The TopSat Demonstrator: Opening the way for high quality and timely imagery from an affordable constellation", *Proceedings of the 57th IAC/IAF/IAA (International Astronautical Congress)*, Valencia, Spain, Oct. 2-6, IAC-06-B5.4.08

Mikhail E. M., Bethel J. S., McGlone J. C., 2001: "Introduction to modern photogrammetry", *John Wiley & Sons*, New York.

Mulawa D., 2004: "On-Orbit Geometric Calibration of the OrbView-3 High Resolution Imaging Satellite", *Proceedings of ISPRS 2004*, Istanbul, Turkey, July 12-23.

Parks C., 2007: "Hope Fades for Recovery of GeoEye's OrbView-3 Satellite", Space News, March 26, p. 4

Passini R., Jacobsen K., 2004: "Accuracy of Digital Orthophotography from High Resolution Space Images", URISA, Charlotte 2004, Feb. 25-27, pp 25-27.

Petrie G., 1999: "Another High-resolution Space Imagery Provider - West Indian Space Takes up the Challenge", Geoinformatics, 2(7): 6-9.

Poli D., 2004: "Orientation of satellite and airborne imagery from multi-line pushbroom sensors with a rigorous sensor model", The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B1): 130-135.

Price M. E., 2002: "TopSat - A Small Satellite Approach to High Resolution Optical Imaging", Proceedings of SPIE, Vol 4814, SPIE Annual Meeting: Remote Sensing and Space Technology, July 7-11, Seattle, WA

Sadeghian S., Valadan Zoj M.J., 2004: "Comparative Tests of Mathematical Models for Accuracy Potential of Point Measurements in IKONOS Geo Image", ISPRS, Commission III, WG III/I.

Sandau R., 2004: "High resolution mapping with small satellites", XXth ISPRS Congress, Commission IV, 12-23 July, Istanbul, Turkey.

Shi W., Shaker A., 2003: "Analysis of terrain elevation effects on Ikonos imagery rectification accuracy by using non-rigorous models", Photogram. Eng. Remote Sensing, 69(2): 1359-1366.

Space News, 2007: "GeoEye Formally Abandons OrbView-3 Recovery Effort", April 30, p. 8

Tao C. V., Hu Y., Jiang W., 2004: "Photogrammetric exploitation of Ikonos imagery for mapping applications", Int. J. Remote Sensing, 25(14), 2833-2853.

Tao V., Jacobsen K., Jensen J., Sohn G., 2006: "Mapping from high-resolution satellite imagery", PE&RS 72, Nr. 5, S. 529-530 .

Topan H., Büyüksalih G., Jacobsen K., 2004: "Comparison of Information Contents of High Resolution Space Images", ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 35, Part B4, pp. 583-588, Istanbul, Turkey.

Topan H., Büyüksalih G., Jacobsen K., 2006: "Information Contents of ORBVIEW-3 for Topographic Mapping", IntArchPhRS, Band XXXVI-1/W41. Ankara, 6 S.,CD

Toutin T., 1995: "Multi-source data integration with an integrated and unified geometric modelling", EARSeL Journal Advances in Remote Sensing, 4: 118-129.

Toutin T., 2003: "Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric modelling", Photogram. Eng. Remote Sensing, 69: 43-51.

Toutin T., 2004a: "Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II and QuickBird", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 42(10): 2121-2129.

Toutin T., 2004b: "Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods", *Int. J. Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924.

Wallace K. M., Parker I., 2001: "The Topsat Satellite", *IGARSS*, Sydney, Australia, July 9-13.

Wei Sun, 2001: *IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation*, Berlin, April 2-6

Westin T., 1990: "Precision rectification of SPOT imagery", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 56, No 2, pp. 247-253.

Westin T., 1996: "Photogrammetric Potential of JERS-1 OPS", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B4, Vienna, pp. 937-942.

Westin T., 1999: "Geometric rectification of European historical archives of Landsat 1-3 MSS imagery", *Proceedings of the ISPRS workshop "Sensors and mapping from space"*, Hannover, Germany, September 27-30.

Westin T., 2000: "Geometric modelling of imagery from the MSU-SK conical scanner", *Bulletin SFPT*, no 159, pp 55-58, 2000.

Wicks A., Jason S., Harrison J., 2001: "An EO Constellation based on the TopSat Microsatellite: Global Daily Revisit at 2.5 meters", *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Aug. 13-16, Logan, UT, SSC01-I-6

Wolf P., Dewitt B., 2000: "Elements of Photogrammetry", McGraw Hill, New York.

Zhizhong Xu J., 2004: "The Rational Function Model (RFM) in Photogrammetric Mapping: Method and Accuracy", *Department of Earth and Space Science & Engineering*, York University, Ontario.

Federal Aviation Administration and the Commercial Space Transportation Advisory Committee (COMSTAC), 2006: "2006 NGSO Commercial Space Transportation Forecast"

Κατσιγιάννης Α., 2005: Διπλωματική Εργασία «Διερεύνηση Διαδικασιών Σύνταξης Ορθοανηγμένων Εικόνων από Δορυφορικές Εικόνες Υψηλής Ανάλυσης», Σ.Α.Τ.Μ.-Ε.Μ.Π

ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

- [1] http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=9819&page=32
- [2] <http://centaur.sstl.co.uk/SSHPI/index.html>
- [3] http://centaur.sstl.co.uk/SSHPI/sshp_technology.html
- [4] http://directory.eoportal.org/pres_EROSBEarthRemoteObservationSatelliteB.html
- [5] http://directory.eoportal.org/pres_OrbView3.html
- [6] http://directory.eoportal.org/pres_TopSat.html
- [7] <http://geoeye.mediaroom.com/index.php?s=43&item=107>
- [8] <http://imagesat.pionet.com/default.asp?catid={C3D29751-3734-49AB-8A20-587CE65D05A0}>
- [9] <http://shr.aas.org/geotech/currentsensors.shtml#top>
- [10] <http://shr.aas.org/geotech/newsensors.shtml>
- [11] http://www.aboutspace.com/spaceneWS/archive07/ov3lost_0326.html

- [12] <http://www.apogee.com.au/products/Satellites/EROS.html>
- [13] <http://www.bnsc.gov.uk/content.aspx?nid=5957>
- [14] <http://www.defenseindustrydaily.com/uk-launches-advanced-topsat-microsatellite-experiment-01415/#more>
- [15] <http://www.defense-update.com/directory/erosB.htm>
- [16] <http://www.directionsmag.com/press.releases/?industry=64>
- [17] <http://www.geoeye.com/products/imagery/orbview3/default.htm>
- [18] http://www.orbimage.com/corp/orbimage_system/ov3/
- [19] http://www.orbital.com/NewsInfo/Publications/OV3_Fact.pdf
- [20] <http://www.orbital.com/SatellitesSpace/LEO/OV3/>
- [21] <http://www.orbitaloptics.com/space-missions/top-sat.php>
- [22] <http://www.qinetiq.com/home/commercial/space/topsat.html>
- [23] http://www.scanex.com/en/news/News_Preview.asp?id=n2006-04-26-06-40-58-234114197
- [24] <http://www.scitech.ac.uk/PMC/PRel/Arch/CCLRC/2005/20051018a.aspx>
- [25] <http://www.sovzond.ru/en/satellites/usa/1432.html>
- [26] <http://www.spacetoday.net/Summary/3691>
- [27] <http://www.sstd.rl.ac.uk/Topsat/>
- [28] <http://www.sstd.rl.ac.uk/Topsat/Index.htm>
- [29] <http://www.sstd.rl.ac.uk/Topsat/Launch.htm>
- [30] http://www.sstd.rl.ac.uk/Topsat/Technical_Information.htm
- [31] <http://www.sstl.co.uk/index.php?loc=114>
- [32] M. O'Connell, "GeoEye Overview GIS Capabilities for Civil Government Agencies," 2006, URL: <http://www.nesdis.noaa.gov/space/library/workshops/2006-10-19/oconnell.ppt>
- [33] <http://www.landmap.ac.uk/index.html>