



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΕΛΤΣΙΔΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΕΛΤΣΙΔΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Χ. ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
2. Δ. ΑΡΓΙΑΛΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Α. ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Χ. ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
2. Δ. ΑΡΓΙΑΛΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Α. ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής
Ε.Μ.Π.
4. Γ. ΚΑΡΡΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
5. Π. ΠΑΤΙΑΣ, Καθηγητής Α.Π.Θ.
6. Β. ΤΣΙΟΥΚΑΣ, Καθηγητής Α.Π.Θ.
7. Κ. ΚΑΡΑΝΤΖΑΛΟΣ, Επ. Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2016

*Δελτσίδης Παναγιώτης
Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.*

© 2016 – All rights reserved

*«η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων
Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του
συγγραφέα (Ν.5343/1932, Άρθρο 202)»*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΔΕΛΤΣΙΔΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

Διπλωματούχου Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Χ. ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΑΡΓΙΑΛΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. ΚΑΡΡΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. ΠΑΤΙΑΣ
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Β. ΤΣΙΟΥΚΑΣ
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κ. ΚΑΡΑΝΤΖΑΛΟΣ
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Στην αγαπημένη μου σύζυγο Ευγενία
και στον γιο μου Άγγελο*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς:

Τον Καθηγητή Χαράλαμπο Ιωαννίδη, επιβλέποντα της διατριβής μου, για την αδιάλειπτη υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλο το διάστημα της εκπόνησης της διατριβής, που πολλές φορές γινόταν από την οικία του και κατά τη διάρκεια των διακοπών του.

Στον Καθηγητή Γεωργόπουλο Ανδρέα, ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις ουσιώδεις και εποικοδομητικές παρατηρήσεις του, που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της έρευνάς μου.

Στον Καθηγητή Αργιαλά Δημήτριο, ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις επισημάνσεις του, ιδιαίτερα στο θεωρητικό υπόβαθρο, για να μπορέσω να αναπτύξω τη διατριβή μου.

Στον Καθηγητή του Α.Π.Θ. Πατιά Πέτρο για τις υποδείξεις του και την ενημέρωσή μου για τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν από το Α.Π.Θ., για την εκμετάλλευση των δορυφορικών συστημάτων.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής μου επιτροπής: τον Καθηγητή Γεώργιο Καρρά, τον Καθηγητή του Α.Π.Θ. Βασίλειο Τσιούκα καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Καραντζελο, για την πρόθυμη συμμετοχή τους στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τη Γιαβή Βάνα της εταιρείας TotalView καθώς και την European Space Imaging GmbH/Space Imaging Middle East and DigitalGlobe Inc, για τη διάθεση δορυφορικών εικόνων, όπου πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι του νέου γεωμετρικού μοντέλου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τελευταίες γενιές των δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης, υψηλής ανάλυσης, έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν εικόνες με μέγεθος εικονοψηφίδας, μικρότερο από 0.5 m. Οι κάμερες με τις οποίες είναι εφοδιασμένες τα δορυφορικά συστήματα είναι τύπου pushbroom και παρέχουν τα απαραίτητα στοιχεία του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού ώστε να είναι δυνατή η φωτογραμμετρική τους επεξεργασία. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένα νέο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο για τη γεωαναφορά και προσανατολισμό των δορυφορικών εικόνων που έχουν ληφθεί από δορυφορικά συστήματα υψηλής ανάλυσης και βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας. Χρησιμοποιεί τους παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας και τα τροχιακών δεδομένα που παρέχονται από τα δορυφορικά συστήματα με σκοπό να περιγράψει τη σχέση μεταξύ των αντικειμένων του εδάφους με αυτών που απεικονίζονται στις δορυφορικές εικόνες. Ο σκοπός του νέου προτεινόμενου μοντέλου είναι η χρήση λιγότερων φωτοσταθερών σημείων που απαιτείται για τη γεωαναφορά των εικόνων. Το προτεινόμενο μοντέλο έχει εφαρμοστεί και αξιολογηθεί σε στερεοσκοπικές δορυφορικές εικόνες ASTER - VNIR, SPOT -V, EROS - B, QuickBird, WorldView - 2 και εικόνες Pleiades - 1B και τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι συνήθως αρκούν να μετρηθούν 5 φωτοσταθερά σημεία για να επιτευχθεί οριζοντιογραφική ακρίβεια καλλίτερη της μιας εικονοψηφίδας (sup-pixel). Η επίλυση του μοντέλου επιπρόσθετα χρησιμοποιεί συνθήκες δεσμεύσεων που υφίσταντο λόγω της γεωμετρίας των λήψεων των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων αυξάνοντας επιπλέον τον αριθμό παρατηρήσεων με συνέπεια να αυξάνεται η αξιοπιστία της επίλυσης του μοντέλου.

ABSTRACT

The latest generations of high resolution satellites have the ability to acquire image stereopairs, with pixel size less than 0.5m, using pushbroom sensors, and to provide the necessary interior and exterior orientation parameters for photogrammetric processing. This research describes a new rigorous orientation model based on collinearity equations. The model uses the parameters of the interior orientation of the camera and orbital data for establishing a function ground-to-image. The advantages of this model are the use of less unknown parameters than in the normal use of collinearity equations and the use of three observation equations for each measured image point. The mathematical model is described and a selection of the necessary unknown parameters through statistical tests is made. The new model has been evaluated on stereopairs of ASTER-VNIR, Spot-V, EROS-B, QuickBird, WorldView-2 and Pleiades-1B images; results using various set of parameters are given. It is shown that the ground point coordinate accuracies are adequate.

An orbital parameter model can be applied to the pushbroom sensors in order to determine their exterior orientation parameters (Kratky, 1989; Baltsavias and Stallamann, 1996; Toutin, 2004; Poli, 2005). In this research an orbital resection method has been developed to model continuous changing of position and attitude of the linear array sensor by finding the orbital parameters of the satellite during the period of its exposure of the image. A bundle adjustment has been implemented to determine these parameters using GCPs.

The proposed model as mentioned above uses the collinearity equations combined with orbital and attitude data, in order to relate the points in the ECEF (Earth CEntered Fixed) object coordinate system to the corresponding points in the image coordinate system. The relationship between these two coordinate systems is based on:

1. Three rotations, which are combinations of the Keplerian elements or the state vector, referred to the ECEF system, using the transformation parameters between the ECEF and ECI (Earth Centered Inertial) systems.
2. Three rotations (ω , φ , κ) for the additional undefined rotations of the satellite at the time of imaging.
3. The off-nadir viewing angles (α , β) of the linear array sensor, and
4. the correction of scale for each object point, between the two coordinate systems, expressed as a second order surface polynomial.

This model can be implemented on pushbroom sensors (linear array sensors) with narrow Field of View (FOV). The correction of scale, on account of narrow field of view and the significant difference between fly height of the satellite (approx. 450 km - 850 km) and ground elevation can be modelled by a second order surface polynomial. The benefit of this model is that the specific point scale has not been eliminated which allows the use of an additional equation (totally three equations are used, F_x , F_y , F_z) for each measured image point. As a consequence fewer GCPs for the calculation of the unknown's coefficients are needed. Thus the exterior orientation for each linear array CCD may be figured out in order to establish a relationship between image points and ground objects.

The benefit of this model is the usage of three observation equations, instead of two equations, for each measured image point, as the scale factor is not removed from the collinearity equations but is corrected by a second order polynomial surface dependant on dx_i and dt_i quantities. The full model has 24 exterior orientation parameters that all have physical meaning. To estimate the value of these parameters at least eight (8) GCPs are required, in comparison to the usual model of the collinearity equations, where at least nine (9) GCPs are required for the calculation of 18 unknown parameters (Lee et al, 2000). The tests with simulation and real (spaceborn imagery) data proved that in most cases fewer parameters are necessary for the successful application of the proposed model. Images of QuickBird, WorldView-2 and Pleiades-1B satellites were used, whose pixel size (0.64 m, 0.5 m and 0.7 m respectively) covers almost the whole spectrum of the existing optical high resolution satellites.

The impact of the terrain relief on the effectiveness of the proposed model and the accuracy of the calculated ground point coordinates were also checked. Areas with a broad variety of relief were selected and tested. It is proved that the number of the necessary unknown parameters depends on the terrain relief, the accuracy of the state vector (from GPS and IMU) that is boarded on satellite and the knowledge of the sensor's interior orientation. Usually 14 parameters are used if the terrain is mountainous and if the precision of state vector is not very good, as in ASTER images. If the terrain is hilly and the orbital data are very precise the parameters can be reduced to 10. In order to find out which parameters affect the result of the proposed model, statistical criteria are implemented for the determination of the potential value of each unknown parameter of the model.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	16
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	22
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
1.1. Εισαγωγικά στοιχεία	28
1.2. Υπόβαθρο Έρευνας	29
1.3. Δομή της Διατριβής	30
1.4. Πρωτότυπα στοιχεία της Διατριβής	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΓΗΣ	36
2.1. Ψηφιακοί Δέκτες και Αισθητήρες Δορυφορικών Συστημάτων	36
2.1.1. Γραμμικοί Σαρωτές	37
2.1.2. Επιφανειακοί Σαρωτές	39
2.2. Τρόποι Συλλογής Δορυφορικών Εικόνων	40
2.2.1. Whiskbroom Σαρωτές	40
2.2.2. Pushbroom Σαρωτές	42
2.2.3. Σάρωση με Forward Motion Compensation (FMC)	44
2.2.4. Μέθοδοι - Τρόποι Σάρωσης	45
2.3. Τρόποι συλλογής στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων	47
2.3.1. Λήψεις κατά μήκος της ίδιας τροχιάς (Along Track)	47
2.3.2. Λήψεις από Διαδοχικές Τροχιές του Δορυφόρου (AcrossTrack)	49
2.4. Τροχιές Δορυφόρων (Κινήσεις Δορυφόρων)	51
2.4.1. Στοιχεία Τροχιάς	54
2.4.2. Είδη τροχιών	57
2.4.3. Μοντέλα Πρόγνωσης Τροχιάς Δορυφόρων	60
2.5. Συστήματα Αναφοράς	63
2.5.1. Χρόνος Αναφοράς	63
2.5.2. Γεωκεντρικά Συστήματα Συντεταγμένων	66
2.5.2.1. Εσωτερικό-Αδρανειακό Γεωκεντρικό Σύστημα (ECI) ..	66
2.5.2.2. Παγκόσμιο Γεωκεντρικό Σύστημα (Earth Centered Earth Fixed ECEF)	67
2.5.2.3. Μετατροπή από το Εσωτερικό Σύστημα Συντεταγμένων στο Παγκόσμιο Σύστημα Συντεταγμένων	68
2.5.3. Γεωγραφικά Συστήματα Συντεταγμένων	69

2.6. Δορυφορικά Συστήματα Παρατήρησης Γης	72
2.6.1. Υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης	73
2.6.2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ASTER	81
2.6.2.1. Το υποσύστημα στο ορατό (ASTER-VNIR)	82
2.6.3. SPOT V	83
2.6.4. EROS-1A/B	84
2.6.5. QUICKBIRD	85
2.6.6. WorldView	86
2.6.7. Δορυφορικό σύστημα Pleiades	87
2.7. Δορυφορική Φωτογραμμετρία	89
2.7.1. Γεωμετρία λήψης Δορυφορικών Εικόνων από Pushbroom αισθητήρες	89
2.7.2. Σύστημα Αναφοράς των Δορυφορικών Εικόνων	89
2.7.3. Εφημερίδες Δορυφόρων	91
2.7.3.1. Μέθοδοι παρεμβολής για το άνωμα θέσης του Δορυφορικού Συστήματος	92
2.7.3.2. Μέθοδοι παρεμβολής για τις στροφές και κλίσεις του Δορυφορικού Συστήματος	93
2.7.3.3. Προσδιορισμός της χρονικής στιγμής t στη Δορυφορική Εικόνα	94
2.7.3.4. Μετατροπή Κεπλέριων στοιχείων σε διανύσματα θέσης και ταχύτητας	94
2.7.4. Συνθήκη Συγγραμμικότητας σε συνδυασμό με τα κεπλέρια στοιχεία	96
2.7.5. Αεροτριγωνισμός Στερεοσκοπικών Δορυφορικών Εικόνων	99
2.7.6. Στατιστικός Έλεγχος Αποτελεσμάτων	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	103
3.1. Γενικά – ορολογία	103
3.2. Προσεγγιστικά Γεωμετρικά Μοντέλα	104
3.2.1. Μοντέλο 3D Αφινικού Μετασχηματισμού	104
3.2.2. Προβολικός Μετασχηματισμός	105
3.2.3. Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός DLT	106
3.2.4. Κλασματικά Πολυώνυμα (RFM)	106
3.3. Αυστηρά Γεωμετρικά Μοντέλα	108
3.3.1. Άμεση Γεωαναφορά των Δορυφορικών Εικόνων από τα στοιχεία των Δορυφόρων	109
3.3.2. Συνθήκη Συγγραμμικότητας με Προσθήκη Αγνώστων Παραμέτρων	113

3.4. Υπάρχοντα Αυστηρά Γεωμετρικά Μοντέλα	116
3.4.1. Γεωμετρικό Μοντέλο Kratky	116
3.4.2. Δυναμικό Γεωμετρικό Μοντέλο	118
3.4.3. Μοντέλο Dowman-Gugan	120
3.4.4. Μοντέλο Fritsch and Stallmann	122
3.4.5. Μοντέλο Poli	124
3.5. Συμπεράσματα για τα υπάρχοντα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα ..	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΑΥΣΤΗΡΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	127
4.1. Περιγραφή του προτεινόμενου Αυστηρού Γεωμετρικού Μοντέλου	127
4.2. Γεωμετρία λήψης Δορυφορικής Εικόνας – παραδοχές	131
4.2.1. Παράγοντες της Εξίσωσης Παρατήρησης	133
4.2.1.1. Σύστημα Συντεταγμένων Δορυφορικών Εικόνων – Μετρήσεις	133
4.2.1.2. Παράμετροι Εξωτερικού Προσανατολισμού από τα Μεταδεδομένα	135
4.2.1.3. Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού	136
4.2.1.4. Μοντελοποίηση της κλίμακας σημείου	137
4.2.2. Επίλυση του συστήματος	140
4.2.2.1. Γραμμικοποίηση των Εξισώσεων Παρατήρησης	140
4.2.2.2. Επίλυση του μοντέλου για μία δορυφορική εικόνα (φωτογραμμετρική οπισθοτομία)	143
4.2.2.3. Επίλυση του μοντέλου για μπλοκ δορυφορικών εικόνων	144
4.2.2.4. Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις	146
4.2.3. Αξιολόγηση της επίλυσης του μοντέλου	150
4.3. Ανάπτυξη λογισμικού	151
4.3.1. Επιλογή Λογισμικού – χαρακτηριστικά	151
4.3.2. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους	154
4.3.3. Λογισμικό ορθοαναγωγής δορυφορικών εικόνων	156
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	160
5.1. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα ASTER	162
5.1.1. Δορυφορικές Εικόνες	162
5.1.2. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων	163
5.1.2.1. Μετατροπή και Εξαγωγή των Μεταδεδομένων για την Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου	164
5.1.3. Επίλυση του Μοντέλου Γεωαναφοράς σε Ζεύγος Εικόνων	167
5.1.3.1. Αποτελέσματα της Επίλυσης	169

5.1.3.2. Επίλυση του Μοντέλου με Δεσμεύσει	172
5.1.3.3. Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας	173
5.1.4. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων	175
5.2. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα EROS-B	176
5.2.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων	176
5.2.2. Επίλυση του Μοντέλου Γεωαναφοράς σε Ζεύγος Εικόνων	180
5.2.3. Σύνταξη Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας	183
5.2.4. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων	185
5.3. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα SPOT-V	185
5.3.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων	186
5.3.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V	188
5.3.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	191
5.4. Δορυφορικό σύστημα QuickBird	191
5.4.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων	192
5.4.1.1. Μετατροπή των Μεταδεδομένων για την Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου	195
5.4.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε ζεύγος Δορυφορικών Εικόνων QuickBird	196
5.4.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας	197
5.4.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	199
5.5. Δορυφορικό σύστημα WorldView-2	199
5.5.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων WorldView-2	199
5.5.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε Δορυφορικές Εικόνες WorldView-2	199
5.5.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας	204
5.5.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	206
5.6. Δορυφορικό σύστημα PLEIADES 1B	207
5.6.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων Pleiades 1B	208
5.6.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου	209
5.6.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας	211
5.6.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	212
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ	211
6.1 Σύγκριση με Γεωαναφορά από RPCs	213

6.1.1. Γεωαναφορά Δορυφορικών Εικόνων QuickBird, WorldView-2, Pleiades1B	214
6.1.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	216
6.1.2.1. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με ένα φωτοσταθερό σημείο	216
6.1.2.2. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 4 φωτοσταθερά σημεία	217
6.1.2.3. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 6 φωτοσταθερά σημεία	218
6.2. Σύγκριση με αποτελέσματα Γεωαναφοράς με χρήση υπάρχοντος αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου	219
6.2.1. Γεωαναφορά Δορυφορικών εικόνων QuickBird, WorldView II και Pleiades-1B	220
6.2.2. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	222
6.2.2.1. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με ένα φωτοσταθερό σημείο	222
6.2.2.2. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 4 φωτοσταθερά σημεία	223
6.2.2.3. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 6 φωτοσταθερά σημεία	224
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	225
7.1. Συμπεράσματα	225
7.2. Προοπτικές	228
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-«Α» Γραμμικοποιημένες Εξισώσεις Παρατήρησης.....	230
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β» Λογισμικό επιλυσης του μοντελου	235
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	237

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1:	Γραμμικός αισθητήρας τύπου Pushbroom	37
Σχήμα 2.2:	Αισθητήρας πανοραμικού τύπου	37
Σχήμα 2.3:	Whiskbroom αισθητήρας.....	37
Σχήμα 2.4:	Αισθητήρας KODAK KLI-14.404x3 CCDs.....	38
Σχήμα 2.5:	Διάταξη των γραμμικών αισθητήρων του δορ. συστήματος QuickBird	38
Σχήμα 2.6:	Εστιακό επίπεδο με τους γραμμικούς αισθητήρες της κάμερας του IKONOS	39
Σχήμα 2.7:	Επικαλυπτόμενοι (supermode) γραμμικοί αισθητήρες HMA και HMB SPOTV	39
Σχήμα 2.8:	Επιφανειακός αισθητήρας 7000x4000 pixels της κάμερας DMC Z/I Imaging GmbH.....	40
Σχήμα 2.9:	Κάμερα Microsoft UltraCam D με επιφανειακό αισθητήρα 11.500x7500 pixels.....	40
Σχήμα 2.10:	Αρχή λειτουργίας του Whiskbroom αισθητήρα	41
Σχήμα 2.11:	Γεωμετρία λήψης του Pushbroom σαρωτή	43
Σχήμα 2.12:	Αρχή λειτουργία TDI τεχνολογίας	45
Σχήμα 2.13:	Μέθοδοι σάρωσης (α) σύγχρονη, (β) ασύγχρονη.....	46
Σχήμα 2.14:	Τρόποι σάρωσης δορυφόρου - με διακεκομμένη γραμμή η πρώτη γραμμή σάρωσης	47
Σχήμα 2.15:	Σάρωση εικόνων για τη δημιουργία ζώνης κατά το πέρασμα του δορυφόρου με forward και reverse μέθοδο.....	47
Σχήμα 2.16:	Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας με ταυτόχρονη εμπρόσθια, ναδίρ και πίσω λήψη.....	48
Σχήμα 2.17:	Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας από τον δορυφόρο ASTER	48

Σχήμα 2.18: Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας από τον HRS αισθητήρα του SPOTV	49
Σχήμα 2.19: Λήψη στερεοσκοπικών εικόνων από τον δορυφόρο IKONOSII με στροφή του δορυφόρου.....	50
Σχήμα 2.20: Στερεοσκοπική λήψη από διαφορετικές τροχιές με περιστρεφόμενο κάτοπτρο (αριστερά) και με στροφή της κάμερας (δεξιά).....	50
Σχήμα 2.21: Πρώτος νόμος Κέπλερ, κίνηση γης σε ελλειπτική τροχιά.....	52
Σχήμα 2.22: 2ος νόμος Κέπλερ, σε ίσα χρονικά διαστήματα Δt εγγράφονται ίσα εμβαδά $A_1=A_2$	52
Σχήμα 2.23: Απεικόνιση των κεπλέρων στοιχείων επί της τροχιάς του δορυφόρου γύρω από τη γη.	56
Σχήμα 2.24: Ηλιοσύγχρονη τροχιά δορυφόρου γύρω από τη γη.....	58
Σχήμα 2.25: Μετρήσεις αποστάσεων (R), αζιμουθίων (Az) και γωνιών ύψους (δ) δορυφόρου σε δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 από σταθμό ελέγχου με όργανο SLR	61
Σχήμα 2.26: Εσωτερικό-Αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (Earth Centered Inertial, ECI)	67
Σχήμα 2.27: Παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα (Earth Centered Earth Fixed, ECEF).....	68
Σχήμα 2.28: Συσχετισμός των συστημάτων ECI και ECEF. Η γωνία θ_g είναι η απόκλιση μεταξύ των δύο συστημάτων.	69
Σχήμα 2.29: Το γεωγραφικό πλάτους του ΕΕΠ είναι $\alpha=66^\circ$ ενώ το γεωγραφικό πλάτος του γεωκεντρικού συστήματος είναι $\beta=60^\circ$	70
Σχήμα 2.30: Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς N, E, U	71
Σχήμα 2.31: Δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης	72
Σχήμα 2.32: Συλλογή στοιχειώδους επιφάνειας γης (α) στο ναδίρ, (β) με γωνία κλίσης ω	77
Σχήμα 2.33: Υποσύστημα VNIR του δορυφορικού συστήματος ASTER.....	83
Σχήμα 2.34(α): Λήψη εικόνων από HRG	84

Σχήμα 2.34(β): Λήψη εικόνων από HRS	84
Σχήμα 2.35: Εστιακό επίπεδο του δέκτη που φέρεται στο δορυφορικό σύστημα QuickBird.....	86
Σχήμα 2.36: Γεωμετρία λήψης εικόνων από pushbroom κάμερα, που φέρεται σε δορυφορικό σύστημα.....	90
Σχήμα 2.37: Σύστημα αναφοράς δορυφορικών εικόνων.....	90
Σχήμα 3.1: Προσαρμογή κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) σε επίπεδα συντεταγμένων	108
Σχήμα 4.1.: Σχηματική παράσταση της γεωμετρίας λήψης εικόνας από γραμμικό αισθητήρα σε συνεχή χρονικά διαστήματα t_1 , t_2 και t_3 . .	132
Σχήμα 4.2.: Σχηματική αναπαράσταση μετασχηματισμού συντεταγμένων εικόνας (pixels) σε συντεταγμένες αισθητήρα.	134
Σχήμα4.3: Προσδιορισμός της σημειακής κλίμακας S_i του σημείου $P(i,j)$ της δορυφορικής εικόνας.	137
Σχήμα 4.4.: Προσαρμογή επιφάνειας 2 ^{ου} βαθμού (αριστερά) και 1 ^{ου} βαθμού (δεξιά) στη διόρθωση της κλίμακας ds για το δορυφορικό σύστημα ASTER.	139
Σχήμα 4.5.: Προσαρμογή επιφάνειας 2 ^{ου} βαθμού (αριστερά) και 1 ^{ου} βαθμού (δεξιά) στη διόρθωση της κλίμακας ds για το δορυφορικό σύστημα QuickBird.....	139
Σχήμα 4.6α: Γεωμετρία λήψης στερεοζεύγους δορυφορικών εικόνων κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου.	147
Σχήμα 4.6β: Γεωμετρία λήψης στερεοζεύγους δορυφορικών εικόνων κατά πλάτος της τροχιάς του δορυφόρου.	147
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής επίλυσης του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου.....	153
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ορθοαναγωγής δορυφορικής εικόνας με χρήση του αναπτυχθέντος αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου.	158
Σχήμα 5.1α: Ναδιρική εικόνα ASTER (3N).....	163

Σχήμα 5.1β:	Πίσω εικόνα ASTER (3B)	163
Σχήμα 5.2:	Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (O) και σημείων συνδέσεων (\square) μεταξύ του ζεύγους δορ. εικόνων ASTER-VNIR.....	167
Σχήμα 5.3:	Πίνακας σχεδιασμού των παρατηρήσεων σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων ASTER.	168
Σχήμα 5.4:	Ακρίβεια ICPs για επίλυση του μοντέλου με 24 και 12 άγνωστες παραμέτρους.	172
Σχήμα 5.5:	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με βήμα καταγραφής 40m, όπως προέκυψε από την συνταύτιση των σημείων εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο.	174
Σχήμα 5.6:	Ανάγλυφη μορφή ορθοεικόνας ASTER (3N) με εφαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (επιτύπωση ορθοεικόνας στο Ψ.Μ.Ε.).	175
Σχήμα 5.7:	Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων EROS-B στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (κέντρο εικόνων: 40.59deg, 22.98deg).....	177
Σχήμα 5.8:	Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (o) και σημείων σύνδεσης (\square) στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων EROS-B.....	180
Σχήμα 5.9:	Πίνακας σχεδιασμού A για την επίλυση του γεωμετρικού μοντέλου σε στερεοσκοπικές εικόνες EROS-B.	181
Σχήμα 5.10:	Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 10 αγνώστους παραμέτρους, με χρήση 10, 15 και 22 GCPs.....	183
Σχήμα 5.11:	Ορθοδιορθωμένη δορυφορική εικόνα EROS-B, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.73m.	184
Σχήμα 5.12:	Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V στην Κύπρο.	186
Σχήμα 5.13:	Γωνίες ψ_x και ψ_y εκφράζουν τις γωνίες “θέσης” λήψης της κάθε εικονοψηφίδας του αισθητήρα (SPOT SATELLITE GEOMETRY HANDBOOK, Edition 1, 1-15-2002).....	187

Σχήμα 5.14: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (\circ) και σημείων σύνδεσης (\square) στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V	188
Σχήμα 5.15: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 10 άγνωστες παραμέτρους, και έχοντας 10, 15, 21 και 28 GCPs αντίστοιχα.....	190
Σχήμα 5.16: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων QuickBird στον Αγ. Στέφανο Αττικής, με τη θέση των φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου (με πράσινο χρώμα) και των σημείων σύνδεσης (με μπλέ χρώμα)...	192
Σχήμα 5.17: Απεικόνιση της γεωμετρίας λήψης της κάμερας του δορυφορικού συστήματος QuickBird (DigitalGlobe, QB imagery products, Revision 4.1, 1-3-2004).....	194
Σχήμα 5.18: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 14 άγνωστες παραμέτρους με χρήση 5, 7, 9 και 11 GCPs αντίστοιχα.....	197
Σχήμα 5.19: Ορθοεικόνα QuickBird που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.	198
Σχήμα 5.20: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων WorldView-2.	200
Σχήμα 5.21: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων, σημείων ελέγχου και σημείων σύνδεσης στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων WorldView-2.....	202
Σχήμα 5.22: Ακρίβεια επίλυσης του μοντέλου οριζοντιογραφικά (α) και (β), και υψομετρικά (γ) με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 14+1 άγνωστες παραμέτρους.	204
Σχήμα 5.23: Ορθοεικόνα WorldView-2 που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.	205
Σχήμα 5.24: Tri-stereo (α) Forward, (β) Nadir και (γ) Reverse δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B που απεικονίζουν την ευρύτερη περιοχή της Νήσου Αντιπάρου.....	207

- Σχήμα 5.25:** Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (O) και σημείων σύνδεσης(\square) μεταξύ του tri-stereo δορυφορικών εικόνων Pleiades-1B..... 209
- Σχήμα 5.26:** Ακρίβεια επίλυσης του μοντέλου οριζοντιογραφικά (α) και (β) και υψομετρικά (γ) με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 15+1 άγνωστες παραμέτρους. 210
- Σχήμα 5.27:** Ορθοεικόνα (ναδip) Pleiades-1B, που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς. 211

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Κύρια χαρακτηριστικά δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης Μέσης, Υψηλής και Πολύ Υψηλής ανάλυσης.	76
Πίνακας 2.2:	Προγραμματισμός εκτόξευσης νέων δορυφορικών συστημάτων με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά	79
Πίνακας 2.3:	Small satellites συστήματα συλλογής εικόνας, με βάρος <500kg και ανάλυση εικόνας καλύτερη των 10m.	80
Πίνακας 2.4:	Τεχνικά χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ASTER.....	81
Πίνακας 2.5:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος SPOT-V	84
Πίνακας 2.6:	Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων EROS-A, B.....	85
Πίνακας 2.7:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος QuickBird.....	85
Πίνακας 2.8:	Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορ. συστημάτων WorldView -1, 2 και 3	86
Πίνακας 2.9:	Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων Pleiades 1A και 1B (Pleiades imagery user guide, ASTRIUM, October 2012 – V 2.0)	88
Πίνακας 3.1:	Οριζοντιογραφικές ακρίβειες γεωναφοράς δορυφορικών εικόνων χωρίς φωτοσταθερά, εφαρμόζοντας άμεσα τη συνθήκη συγγραμμικότητας, όπως αναφέρονται στα τεχνικά εγχειρίδια των δορυφορικών συστημάτων.....	113
Πίνακας 3.2:	Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Kratky, συμπεριλαμβανομένων όλων των αγνώστων παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού.....	118
Πίνακας 3.3:	Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Kratky με γραμμικά πολυώνυμα.	118

Πίνακας 3.4:	Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Dowman and Gagan με 7 παραμέτρους.....	122
Πίνακας 3.5:	Ακρίβειες του μοντέλου των Fritsch και Stallmann με δεδομένα MOMS T083C.....	123
Πίνακας 3.6:	Ακρίβειες του μοντέλου Poli σε HRS δεδομένα	125
Πίνακας 5.1:	Κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης όπου εφαρμόστηκε το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο.	161
Πίνακας 5.2:	Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας 3N ASTER-VNIR.....	166
Πίνακας 5.3:	Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας 3B ASTER-VNIR.	166
Πίνακας 5.4:	Παράμετροι της γεωαναφοράς της ναδιρικής εικόνας.	169
Πίνακας 5.5:	Επίλυση του μοντέλου σε δορυφορικές εικόνες ASTER.	170
Πίνακας 5.6:	Τιμές του t-test για τις άγνωστες παραμέτρους, για πιθανότητα 95% και βαθμό ελευθερίας 93.....	171
Πίνακας 5.7:	Επίλυση του μοντέλου με τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους.	171
Πίνακας 5.8:	Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις και 25 αγνώστους, μετρώντας 39 φωτοσταθερά σημεία.	173
Πίνακας 5.9:	Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις και τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους, μετρώντας 39 φωτοσταθερά σημεία.	173
Πίνακας 5.10:	Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου με βήμα καταγραφής 0.2244 sec.	179
Πίνακας 5.11:	Επίλυση του πλήρους μοντέλου γεωαναφοράς σε δορυφορικές εικόνες EROS-B.....	182
Πίνακας 5.12:	Επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου με 10 άγνωστες παραμέτρους σε δορυφορικές εικόνες EROS-B.	182

Πίνακας 5.13: Επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V χρησιμοποιώντας 28 φωτοσταθερά σημεία και 15 σημεία ελέγχου	189
Πίνακας 5.14: Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας QuickBird.	195
Πίνακας 5.15: Επίλυση του μοντέλου με 25 άγνωστες παραμέτρους, σε δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 11 φωτοσταθερά σημεία και 6 σημεία ελέγχου.	196
Πίνακας 5.16: Επίλυση του μοντέλου με 25 άγνωστες παραμέτρους, σε δορυφορικές εικόνες WorldView-2 χρησιμοποιώντας 33 και 6 φωτοσταθερά σημεία και 12 σημεία ελέγχου.	203
Πίνακας 5.17: Επίλυση του μοντέλου με 14 (ελάχιστες) άγνωστες παραμέτρους σε δορ. εικόνες WorldView-2 χρησιμοποιώντας 33 και 6 φωτοσταθερά σημεία και 12 σημεία ελέγχου.	203
Πίνακας 5.18: Ακρίβειες στα σημεία ελέγχου (ICPs) χρησιμοποιώντας 24+1 άγνωστες παραμέτρους (α), και 15+1 άγνωστες παραμέτρους (β).	210
Πίνακας 5.19: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird.	215
Πίνακας 5.20: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2.	215
Πίνακας 5.21: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B.	215
Πίνακας 5.22: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird	219
Πίνακας 5.23: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2	219

Πίνακας 5.24: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades	219
---	-----

AKRONYMIA

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
	Advanced Spaceborne Emmission Thermal and Reflection
ASTER	Radiometer
CCD	Charge Coupled Device
DEM	Digital Elevation Model
DLT	Direct Linear Transformation
DMC	Digital Mapping Camera
DTM	Digital Terrain Model
ECEF	Earth Centered Earth Fixed Cartecian frame
ECI	Earth Centered Inertial
ET	Ephemeris Time
FMC	Forward Motion Compensation
FOV	Field of view
GCP	Ground Control Points
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GMT	Greenwich Mean Time
GPS	Global Positioning System
GSD	Groud Sample Distance
HRG	High Resolution Geometric
HRS	High Resolution Stereo
ICP	independent check point
IFOV	Instant Field of view
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ITRF	International Terrestrial Reference System
JD	Julian Day
LASER	Light Amplification by Stimulating Emission of Radiation
MJD	Modified Julian Day
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NORAD	North American Aerospace Defense Command
RAN	Right Ascension Node

RANSAC	RANdom SAmples Consensus
RFM	Rational Function Model
RMS	Root Mean Square
RPC	Rational Polynomial Coefficients
SLR	Satellite Laser Ranging
TAI	International Atomic Time
TDI	Time Delayed Integration
TLE	Two Lines Elements
TP	tie Points
TT	Terrestrial Time
UT	Universal Time
UT1	Universal Time
UTC	Coordinated Universal Time
VNIR	Visible Near Infrared
WGS-84	World Geodetic System of 1984
AT	Atomic Time
ΕΕΠ	Ελλειψοειδές Εκ Περιστροφής
IAA	International Academic of Astronautics
MET	Μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Σήμερα που τα εμπορικά δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης ολοένα και αυξάνουν τη διακριτική ικανότητα τους και παρέχουν τη δυνατότητα στερεοσκοπικών λήψεων, για τη γεωαναφορά των εικόνων καθίσταται απαραίτητη η ανάπτυξη και η εξέλιξη των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων, που να περιγράφουν με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά στοιχεία των δορυφόρων και τις φυσικές ιδιότητες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της λήψης των εικόνων, με δεδομένο ότι αυτή πραγματοποιείται σε διάστημα μερικών δευτερολέπτων. Οι δορυφορικές εικόνες, που συλλέγονται από τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης, χρήζουν πλέον αντιμετώπισης και επεξεργασίας όμοιας με αυτή των αεροφωτογραφιών. Εφαρμόζονται και πραγματοποιούνται όλες οι φωτογραμμετρικές διεργασίες, όπως η αποκατάσταση του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, η παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους, η σύνταξη φωτογραμμετρικών διαγραμμάτων, η παραγωγή ορθοεικόνων και γενικά όλες εκείνες οι διεργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή γεωχωρικών δεδομένων. Τα περισσότερα συστήματα παρατήρησης γης για την λήψη των δορυφορικών εικόνων χρησιμοποιούν κάμερες με σταθερούς γραμμικούς αισθητήρες, που φέρονται είτε από διαστημικές εξέδρες είτε από δορυφορικά συστήματα που έχουν κατασκευαστεί για τον παραπάνω σκοπό. Προσφέρουν παγχρωματικές και πολυφασματικές εικόνες με χωρική ανάλυση που φθάνει τα μερικά εκατοστά.

Τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν στερεοσκοπικές εικόνες κατά μήκος της τροχιάς της κίνησης του

δορυφόρου, έχοντας κάμερα που διαθέτει σταθερής κατασκευής τηλεσκόπια τοποθετημένα σε σταθερή γωνία (π.χ. ASTER-VINR 27.7°, SPOT-V-HRS 40°) ή εκτελώντας κατάλληλο ελιγμό του τηλεσκοπίου συλλέγοντας στερεοσκοπικές εικόνες αρχικώς με στρεφόμενο το τηλεσκόπιο εμπρός (forward) και μετά προς τα πίσω (Reverse). Τέτοια δορυφορικά συστήματα είναι τα EROS, QuickBird, WorldView, GeoEye, Pleiades κ.α.

1.2. Υπόβαθρο Έρευνας

Για τη γεωαναφορά των εικόνων που έχουν συλλεχθεί από σταθερούς γραμμικούς αισθητήρες (pushbroom), συνήθως, χρησιμοποιούνται γεωμετρικά μοντέλα τα οποία μπορεί να είναι αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα (rigorous models), όπως για παράδειγμα των V. Kratky το 1989, που εφαρμόζεται σε μία ή στέρεο εικόνες και σε δέκτες όπως αυτών των δορυφόρων SPOT, Landsat, J-ERS 1 και MOMS-2 (Baltsavias et al., 1992), των Dowman-Gugan (Gugan, 1987), των Fritschand-Stallmann (Fritsch and Stallmann, 2000), της Poli (Poli, 2004) και πολλών άλλων. Όλα τα παραπάνω αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα περιγράφουν τη γεωμετρία λήψης των δορυφορικών εικόνων εφαρμόζοντας τη συνθήκη συγγραμμικότητας ως ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει καλύτερα την προβολική γεωμετρία.

Σε αντίθεση με τις αεροφωτογραφίες, όπου η γεωμετρία της λήψης της εικόνας γίνεται σε μία χρονική στιγμή, έχοντας σταθερά τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού σε όλη την εικόνα, οι δορυφορικές εικόνες αποτελούνται από ένα σύνολο γραμμών που η κάθε μία έχει διαφορετικά στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού. Βέβαια, μεταξύ των γειτονικών γραμμών υπάρχει μεγάλη συσχέτιση των παραμέτρων των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού, που συνήθως μπορούν να μοντελοποιηθούν με απλά γραμμικά ή δευτέρου βαθμού πολυώνυμα συναρτήσεως του χρόνου λήψης. Τα περισσότερα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα που παρέχουν εικόνες μεγάλης διακριτικής ικανότητας (<2 m) δίνουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα (Εφημερίδες, στροφές, κάμερα κ.α.) για την εφαρμογή των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων, είτε άμεσα με την εφαρμογή της συνθήκης

συγγραμμικότητας, είτε έμμεσα προσθέτοντας επιπρόσθετες άγνωστες παραμέτρους στη συνθήκη της συγγραμμικότητας, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας τους. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα και αφορούν την έμμεση εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας περιλαμβάνουν 18 έως 26 άγνωστες παραμέτρους (σε πλήρη ανάπτυξη) για κάθε εικόνα, που συνεπάγεται ότι για τον προσδιορισμό τους απαιτούνται κατ' ελάχιστον 9 έως 13 φωτοσταθερά σημεία. Αρκετές παραλλαγές των παραπάνω μοντέλων έχουν αναπτυχθεί, εξετάζοντας τη σημαντικότητα των παραμέτρων, με σκοπό να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια με το δυνατόν λιγότερες άγνωστες παραμέτρους.

Εναλλακτικές προσεγγίσεις για τη γεωαναφορά και τον προσανατολισμό των δορυφορικών εικόνων βασίζονται στα προσεγγιστικά μοντέλα (Toutin, 2004), περιγράφοντας τη σχέση μεταξύ της εικόνας και των συντεταγμένων εδάφους του αντικειμένου και το αντίστροφο, μέσω 2Δ ή 3Δ πολυωνύμων ή με κλασματικά πολυώνυμα, συνήθως 3ης τάξης (Rational Function Model – RFM, ή αλλιώς Rational Polynomial Coefficients - RPC). Τα παραπάνω προσεγγιστικά μοντέλα δύναται να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την γεωαναφορά των εικόνων αλλά και για την εξαγωγή γεωχωρικών πληροφοριών από μία εικόνα ή στερεοσκοπικό ζεύγος δορυφορικών εικόνων χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη γνώση των στοιχείων του αισθητήρα, της κάμερας και της τροχιάς του δορυφόρου.

1.3. Δομή της Διατριβής

Το αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός αυστηρού γεωμετρικού μαθηματικού μοντέλου για τη γεωαναφορά και προσανατολισμό των δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης, οι οποίες έχουν συλλεχθεί από γραμμικούς αισθητήρες (pushbroom), όταν δίνονται τα τεχνικά στοιχεία του δέκτη και του δορυφόρου, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως η φωτογραμμετρική διαδικασία. Το μοντέλο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ευέλικτο και να μπορεί να εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος αισθητήρων και

ιδιαίτερα αυτών των σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων, που παρέχουν μεγάλη χωρική ανάλυση και τη δυνατότητα στερεοσκοπικών λήψεων.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα είδη των αισθητήρων, που φέρουν σήμερα τα περισσότερα σύγχρονα (οπτικά) δορυφορικά συστήματα, καθώς και οι διάφοροι τρόποι και τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη συλλογή των εικόνων. Ανάλογα με την τεχνολογία συλλογής των εικόνων κατατάσσονται σε δέκτες που πραγματοποιούν σάρωση με οπτικομηχανικό σαρωτή, έχοντας ένα μοναδικό στοιχείο αισθητήρα που επιτρέπει την καταγραφή της ακτινοβολίας ενός στοιχείου της επιφάνειας της γης (Ground pixel) και τους γραμμικούς αισθητήρες, που είναι εξοπλισμένοι συνήθως με έναν ή περισσότερους γραμμικούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εστιακό επίπεδο του φακού και δεν χρησιμοποιούν περιστρεφόμενα συστήματα κατόπτρων αλλά τα οπτικά τους είναι σταθερά και σαρώνουν λωρίδα σταθερού πλάτους. Επίσης, περιγράφονται οι τρόποι συλλογής των στερεοσκοπικών εικόνων, οι οποίες πραγματοποιούνται είτε κατά την κίνηση του δορυφόρου είτε από διαφορετικές τροχιές. Κατόπιν αναλύονται τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου καθώς και τα μοντέλα πρόγνωσης, που έχουν αναπτυχθεί, έτσι ώστε να γίνει απολύτως κατανοητή η κίνηση των δορυφορικών συστημάτων. Τα δορυφορικά συστήματα τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν με την προϋπόθεση να γίνεται η εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων, καλύπτοντας ταυτόχρονα ένα ευρύ φάσμα χωρικών αναλύσεων. Αυτά τα δορυφορικά συστήματα είναι τα ASTER-VNIR, SPOT-V, EROS-B, QuickBird, WorldView-1 & 2 και Pleiades-1B, τα οποία έχουν μέγεθος εικονοψηφίδας επί του εδάφους 15m, 5m (ή 2.5m) , 0.7m, 0.64m, 0.5m και 0.5m αντίστοιχα. Τέλος, περιγράφονται τα βασικά στοιχεία της εφαρμογής της συνθήκης συγγραμμικότητας συνδυαζόμενη με τα κεπλέρια στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται επισκόπηση στα υφιστάμενα προσεγγιστικά και αυστηρά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σήμερα. Εξετάστηκε το αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο του Kratky, των Dowman-Gugan (Gugan, 1987), των Fritschand & Stallmann (Fritsch and Stallmann, 2000) και

της Poli (Poli, 2004), παραθέτοντας αναλυτικά τις ακρίβειες και τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή τους.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται το νέο γεωμετρικό μοντέλο που προτείνεται και αναλύεται λεπτομερώς η μαθηματική του έκφραση καθώς και οι διάφορες παραλλαγές του σχετικά με τη χρήση σε στερεοσκοπικά ζεύγη δορυφορικών εικόνων. Το νέο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, που περιγράφει καλύτερα την προβολική γεωμετρία της κάθε γραμμής σάρωσης από pushbroom αισθητήρα, συνδυάζοντας τροχιακά δεδομένα (εφημερίδες) και δεδομένα στροφών του δορυφόρου με σκοπό να συσχετίσει τα σημεία του αντικειμένου, που αναφέρονται στο ECEF (Earth Centered Fixed) σύστημα συντεταγμένων, με τα αντίστοιχα σημεία που απεικονίζονται στη δορυφορική εικόνα. Στην πλήρη ανάπτυξή του, περιγράφεται από 24 άγνωστες παραμέτρους.

Το νέο αυστηρό μοντέλο εφαρμόζεται είτε για τη γεωναφορά μίας δορυφορικής εικόνας (φωτογραμμετρική οπισθοτομία) είτε για των προσανατολισμό ζεύγους ή μπλοκ δορυφορικών εικόνων (αεροτριγωνισμός), προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης.

Τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα, εφαρμόζουν με κλασικό τρόπο τη συνθήκη συγγραμμικότητας. Δηλαδή, απαλείφεται η σημειακή κλίμακα του κάθε σημείου παρατήρησης με αποτέλεσμα για κάθε παρατηρούμενο σημείο επί των εικόνων, δημιουργούνται δύο εξισώσεις παρατήρησης (εικονοσυντεταγμένων), αντί των τριών, που περιγράφονται από τη συνθήκη συγγραμμικότητας. Το νέο μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν απαλείφει τον σημειακό συντελεστή κλίμακας αλλά τον μοντελοποιεί ως μία συνάρτηση επιφάνειας 2^{ου} βαθμού με στόχο για κάθε παρατηρούμενο σημείο να δημιουργούνται τρεις εξισώσεις παρατήρησης, αντί των δύο που δημιουργούνται με την κλασική εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας.

Το πλεονέκτημα του νέου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου που προτείνεται είναι ότι για κάθε σημείο δημιουργούνται 3 εξισώσεις παρατηρήσεων και

απαιτούνται 8 φωτοσταθερά σημεία για την επίλυσή του και επιπλέον η δυνατότητα εφαρμογής του σε στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων, οι οποίες έχουν ληφθεί κατά μήκος ή κατά πλάτος της τροχιάς κίνησης του δορυφόρου. Χρησιμοποιούνται επιπλέον εξισώσεις παρατηρήσεων, που προκύπτουν από τη γεωμετρία λήψης των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων, μειώνοντας περισσότερο τον αριθμό των απαιτούμενων φωτοσταθερών σημείων.

Το προτεινόμενο μοντέλο σε πλήρη ανάπτυξη, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, περιγράφεται από 24 άγνωστες παραμέτρους, που όλες έχουν φυσική σημασία. Είναι αυστηρό μοντέλο, διότι περιγράφει με μαθηματική και γεωμετρική σχέση την ανάπλαση της οπτικής δέσμης, όπως αυτή ήταν κατά τη στιγμή της λήψης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμετρία της λήψης των εικόνων όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά-ιδιότητες του δέκτη.

Η αξιολόγηση της επίλυσης πραγματοποιείται με στατιστικές μεθόδους και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνουν σε ανεξάρτητα σημεία ελέγχου, που εντοπίζονται στην εικόνα και στο έδαφος χωρίς να συμμετέχουν στην επίλυση του μοντέλου.

Για την επίλυση του νέου γεωμετρικού μοντέλου αναπτύχθηκαν λογισμικά, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα διενέργειας παρατηρήσεων επί των δορυφορικών εικόνων, επίλυσης του μοντέλου, παραγωγής το υψομετρικού μοντέλου εδάφους και σύνταξης ορθοδιορθωμένης εικόνας αναφερόμενης στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS-84.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση - αποτίμηση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, μέσω των λογισμικών που αναπτύχθηκαν, σε δορυφορικές εικόνες που συλλέχθηκαν από τα δορυφορικά συστήματα ASTER-VNIR, SPOT-V(HRG), EROS-B, QUICKBIRD, WORLDVIEW-II και PLEIADES-1B. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποδεικνύεται ότι αρκούν μόνο 14 ή 15 άγνωστες παράμετροι του μοντέλου, από τις συνολικά 24 που περιλαμβάνονται στο μοντέλο, για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, δηλαδή την επίτευξη οριζοντιογραφικής ακρίβειας καλλίτερης της μιας εικονοψηφίδας. Η επίλυση του μοντέλου

χρησιμοποιεί συνθήκες δεσμεύσεων, που υφίσταντο λόγω της γεωμετρίας των λήψεων του ζεύγους των δορυφορικών εικόνων, αυξάνοντας επιπλέον τον αριθμό παρατηρήσεων για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου. Επίσης, παρατηρείται ότι με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών σημείων δεν σημειώνεται σημαντική βελτίωση της ακρίβειας επίλυσης του μοντέλου. Ο αριθμός των φωτοσταθερών που προσδιορίστηκε ως επαρκής για εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, στον προσανατολισμό των εικόνων υψηλής διακριτικής ικανότητας (0.5m), είναι τα 5 φωτοσταθερά σημεία.

Πραγματοποιήθηκε, επίσης, σύγκριση της ακρίβειας της γεωαναφοράς των δορυφορικών εικόνων, που προκύπτει από την επίλυση μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς και της επίλυσης που προκύπτει με τη χρήση των κλασματικών πολυωνύμων (RPCs), μετρώντας αντίστοιχα 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε στα δορυφορικά συστήματα QuickBird, WorldView-1 και Pleiades 1B, τα οποία διαθέτουν στοιχεία που περιλαμβάνουν τους συντελεστές των κλασματικών πολυωνύμων και στοιχεία που αφορούν στην εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων, όπως στοιχεία της κάμερας, εφημερίδες τροχιάς κ.α. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

1.4. Πρωτότυπα στοιχεία της Διατριβής

Ο κυρίως ερευνητικός στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός νέου, αυστηρού, γεωμετρικού μοντέλου για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, ιδιαιτέρως των εικόνων με μεγάλη διακριτική ικανότητα (5m έως 0.5m), που να απαιτεί για την επίλυσή του λιγότερα φωτοσταθερά σημεία, από αυτά που απαιτούν τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα, επιτυγχάνοντας ακρίβειες καλύτερες της μιας εικονοψηφίδας. Το νέο αναπτυχθέν μοντέλο εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος δορυφορικών συστημάτων, που συλλέγουν μονο- και στερεο- εικόνες, κατά μήκος ή κατά πλάτος της κίνησης του δορυφόρου.

Είναι η πρώτη φορά που αναπτύσσεται ένα αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας και για κάθε παρατηρούμενο σημείο σε μία εικόνα προκύπτουν 3 εξισώσεις παρατηρήσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν εξαλείφεται η σημειακή κλίμακα σε κάθε παρατηρούμενο σημείο, αλλά μοντελοποιείται ως επιφάνεια 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού και κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε ζεύγη δορυφορικών εικόνων εισάγονται στην επίλυση επιπλέον παρατηρήσεις, που προκύπτουν από τις δεσμεύσεις που υφίστανται λόγω της γεωμετρίας της λήψης των εικόνων.

Το πλεονέκτημα του αναπτυχθέντος μοντέλου είναι ότι επιτυγχάνονται ακρίβειες για τη γεωναφορά των δορυφορικών εικόνων καλλίτερες της μιας εικονοψηφίδας (subpixel) με χρήση λιγότερων φωτοσταθερών σε σύγκριση με τα μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα, αφού η προσθήκη μιας επιπλέον εξίσωσης παρατήρησης για κάθε σημείο έχει ως συνέπεια την απαίτηση για λιγότερα φωτοσταθερά σημεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

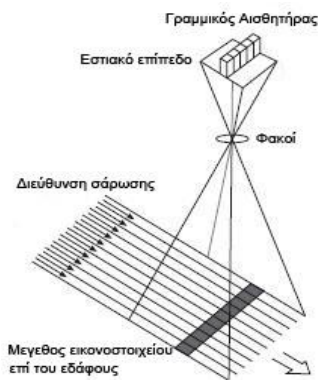
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΓΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τέσσερα βασικά στοιχεία που προσδιορίζουν τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης της γης. Το πρώτο αφορά τους αισθητήρες που καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και την αποτυπώνουν σε μία δισδιάστατη εικόνα. Το δεύτερο στοιχείο είναι ο τρόπος με τον οποίο συλλέγουν την παραπάνω πληροφορία. Το τρίτο είναι οι τροχιές και τα συστήματα συντεταγμένων των δορυφορικών συστημάτων και το τέταρτο είναι η φωτογραμμετρική αξιοποίηση των παραγόμενων δορυφορικών εικόνων.

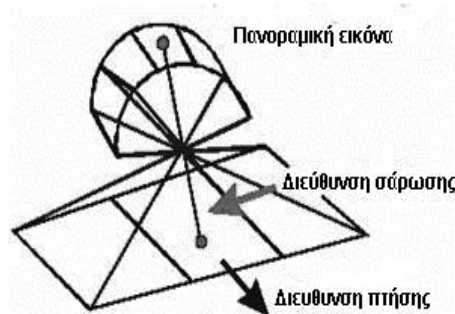
2.1. Ψηφιακοί Δέκτες και Αισθητήρες Δορυφορικών Συστημάτων

Σε αντίθεση με τις απλές αναλογικές φωτογραμμετρικές μηχανές, όπου όλη η εικόνα (frame) δημιουργείται σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή, οι ψηφιακοί δορυφορικοί δέκτες αποτυπώνουν σταδιακά διακριτά μέρη της εικόνας (framelets) σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα framelets συνήθως δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους και η ένωση τους δίνει την συνολική εικόνα. Κάθε framelet έχει την ίδια προβολική γεωμετρία έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η συνθήκη συγγραμμικότητας για κάθε ένα από αυτά που συνιστούν ολόκληρη την εικόνα. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας επί των εικόνων. Τέτοιοι είναι ο τύπος του αισθητήρα, το μέσο ή την πλατφόρμα που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας (σε δορυφόρο ή αεροπλάνο) και οι διαθέσιμες συμπληρωματικές πληροφορίες που συνοδεύουν την κάμερα (στοιχεία τροχιάς δορυφόρου, στοιχεία κάμερας κ.α.) Γενικά υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι σαρωτών οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα εικόνας, εξαρτώμενα από τον χρόνο. Ο πρώτος τύπος είναι ο γραμμικός σαρωτής (linear array), που συλλέγει δεδομένα εικόνας

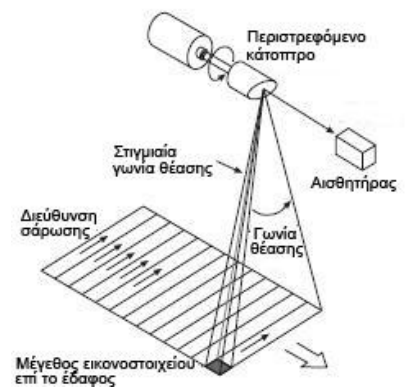
γραμμή-γραμμή (framelets), με διεύθυνση των γραμμών σάρωσης κάθετα προς την κίνηση του δορυφόρου (Σχήμα 2.1, Pushbroom). Ο δεύτερος τύπος είναι ο πανοραμικός αισθητήρας (panoramic), ο οποίος εν αντιθέσει με τον γραμμικό σαρωτή συλλέγει δεδομένα (framelets) μετακινώντας τον γραμμικό αισθητήρα κάθετα στην κατεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου και έχει συνήθως μεγαλύτερη επιφάνεια γραμμικών αισθητήρων (Σχήμα 2.2). Ο τρίτος τύπος σαρωτή είναι ένα είδος υβριδικού σαρωτή μεταξύ γραμμικού και πανοραμικού, ονομάζεται whiskbroom και συνήθως έχει πολύ μικρό μήκος αισθητήρα και συλλέγει πολύ μικρή επιφάνεια δεδομένων με περιστρεφόμενο σύστημα κατόπτρων, με φορά κάθετα στην κίνηση της κάμερας (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.1: Γραμμικός αισθητήρας τύπου Pushbroom



Σχήμα 2.2: Αισθητήρας πανοραμικού τύπου.

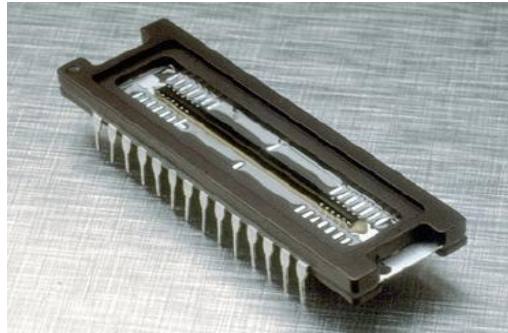


Σχήμα 2.3: Whiskbroom αισθητήρας

2.1.1. Γραμμικοί Σαρωτές

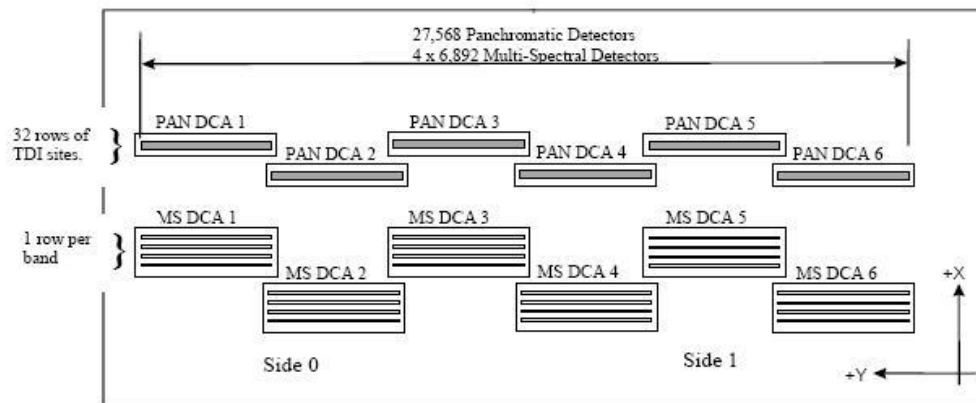
Οι γραμμικοί σαρωτές αποτελούνται, συνήθως, από ένα ή περισσότερους γραμμικούς αισθητήρες, που το μήκος τους ποικίλει ανάλογα με το επιθυμητό πλάτος σάρωσης και από τη δυνατότητα κατασκευής ενιαίου γραμμικού αισθητήρα. Ο αισθητήρας μπορεί να συντίθεται από περισσότερους επιμέρους γραμμικούς αισθητήρες. Ανάλογα με το σχεδιασμό και κατασκευή των γραμμικών αισθητήρων έχουμε τους παρακάτω τύπους γραμμικών αισθητήρων:

- α) ενιαίου μήκους γραμμικοί αισθητήρες, οι οποίοι σήμερα μπορεί να αποτελούνται από περισσότερα των 14.000 ενεργών στοιχείων (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4: Αισθητήρας KODAK KLI-14.404x3 CCDs
(Πηγή: Manual of Kodak Image Sensor Solution KLI-14403)

β) γραμμικοί αισθητήρες που το συνολικό τους μήκος προκύπτει με συνένωση επιμέρους γραμμικών αισθητήρων οι οποίοι έχουν πολύ μικρή επικάλυψη μεταξύ τους, όπως ο αισθητήρας του δορυφορικού συστήματος QuickBird (Liedtke, 2002) που έχει 6 γραμμικούς αισθητήρες σε σειρά με συνολικά 27.568 παγχρωματικά φωτοευαίσθητα στοιχεία και 6 γραμμικούς αισθητήρες με συνολικά 6.892 πολυφασματικά φωτοευαίσθητα στοιχεία (Σχήμα 2.5). Ομοίως, ο αισθητήρας του δορυφορικού συστήματος IKONOS, που αποτελείται από επιμέρους γραμμικούς αισθητήρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6

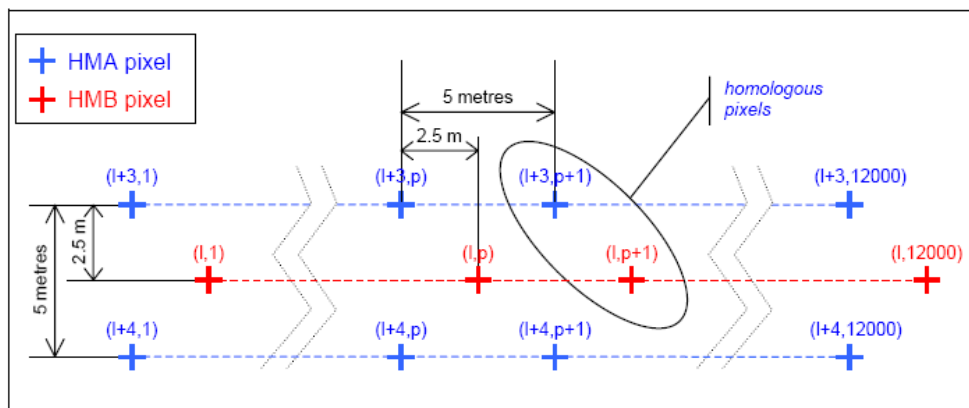


Σχήμα 2.5: Διάταξη των γραμμικών αισθητήρων του δορ. συστήματος QuickBird (Liedtke, 2002)



Σχήμα 2.6: Εστιακό επίπεδο με τους γραμμικούς αισθητήρες της κάμερας του IKONOS

γ) γραμμικοί αισθητήρες που αποτελούν συνδυασμό δύο γραμμικών αισθητήρων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι παράλληλα μεταξύ τους και ο ένας είναι μετακινημένος σε σχέση με τον άλλο κατά μισό φωτοευαίσθητο σημείο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Με την παραπάνω μεθοδολογία αυξάνεται η ανάλυση της εικόνας. Εφαρμόζεται στο δορυφορικό σύστημα SPOT-V που από 5 m GSD (Ground Sample Distance), που συλλέγει δεδομένα, δίνει τελική εικόνα με 2.5 m GSD (Σχήμα 2.7).

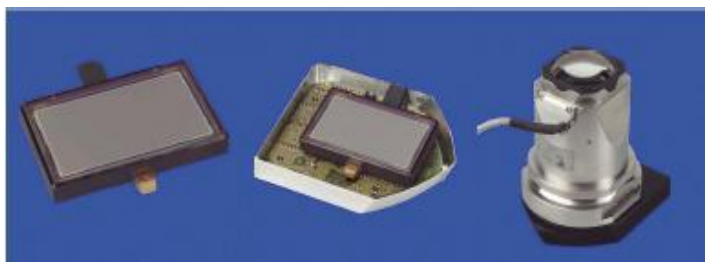


Σχήμα 2.7: Επικαλυπτόμενοι (supermode) γραμμικοί αισθητήρες HMA και HMB SPOTV (SPOT Geometry HandBook , 2002)

2.1.2. Επιφανειακοί Σαρωτές

Αντίθετα με τους γραμμικούς σαρωτές, οι επιφανειακοί σαρωτές αποτελούνται συνήθως από περισσότερα CCDs και συλλέγουν εικόνες (σε δύο διαστάσεις). Οι κάμερες που φέρονται σε πλατφόρμες δορυφόρων, συνήθως δεν είναι

εξοπλισμένες με επιφανειακούς αισθητήρες, ενώ αντίθετα αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε κάμερες που φέρονται από αεροσκάφη (Linder, 2005). Ένα παράδειγμα κάμερας εξοπλισμένης με επιφανειακούς αισθητήρες είναι η DMC (Z/Imaging) και η κάμερα UltraCamD (Vexcel), όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.8 και 2.9.



Σχήμα 2.8: Επιφανειακός αισθητήρας 7000x4000 pixels της κάμερας DMC Z/I Imaging GmbH



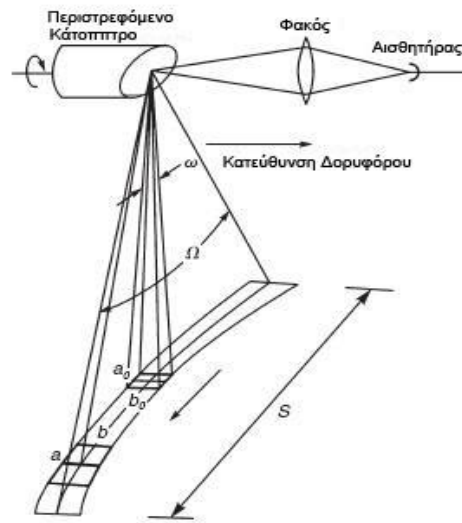
Σχήμα 2.9: Κάμερα Microsoft UltraCam D με επιφανειακό αισθητήρα 11.500x7500 pixels

2.2. Τρόποι Συλλογής Δορυφορικών Εικόνων

Ανάλογα με τον τύπο του σαρωτή, τη μεθοδολογία και τη διαδικασία συλλογής των δορυφορικών εικόνων, διακρίνουμε αρκετούς τρόπους συλλογής δορυφορικών εικόνων, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1. Whiskbroom Σαρωτές

Οι σαρωτές τύπου Whiskbroom διαθέτουν ένα οπτικομηχανικό σαρωτή, που περιέχει ένα μοναδικό στοιχείο αισθητήρα ο οποίος επιτρέπει την καταγραφή της ακτινοβολίας ενός στοιχείου της επιφάνειας της γης (Groundpixel). Υπάρχει ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο το οποίο σαρώνει τη γήινη επιφάνεια, έτσι ώστε μία ολόκληρη γραμμή εδάφους να καταγράφεται από τον αισθητήρα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η επόμενη σάρωση, καθώς κινείται προς τα εμπρός ο δορυφόρος, πραγματοποιείται για την αμέσως γειτονική γραμμή εδάφους (Konecny, 2003). Η τελική δορυφορική εικόνα είναι η ένωση όλων αυτών των γραμμών σαρώσεως του εδάφους. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται η μεθοδολογία σάρωσης ενός Whiskbroom αισθητήρα.



Σχήμα 2.10: Αρχή λειτουργίας του Whiskbroom αισθητήρα (Konecny, 2003)

Το μέγεθος της εικονοψηφίδας επί του εδάφους b_0 (Ground Pixel Size) προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$b_0 = \frac{\omega \cdot h}{\cos^2 \alpha} \quad \text{Εξ. 2.1}$$

2.1

όπου:

ω : γωνία όρασης ενός στοιχείου επί του εδάφους (Field of view, FOV)

h : ύψος πτήσης δορυφόρου

α : γωνία σάρωσης από το ναδίρ.

Το πλάτος σάρωσης S του αισθητήρα προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$S = 2 \cdot h \cdot \text{tg} \frac{\Omega}{2} \quad \text{Εξ. 2.2}$$

όπου:

h : ύψος πτήσης δορυφόρου

Ω : γωνία σάρωσης του σαρωτή.

Η συχνότητα σάρωσης των γραμμών ν προσδιορίζεται από την εξίσωση 2.3 και δίνεται συναρτήσει της ταχύτητας του δορυφόρου.

$$v = \frac{v_g}{\omega \cdot h}$$

Εξ.

2.3

όπου:

v_g : ταχύτητα δορυφόρου στο έδαφος

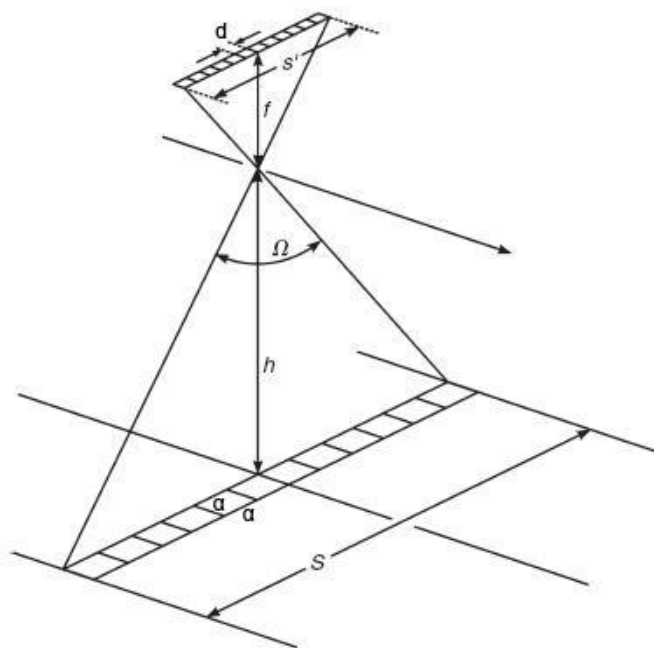
ω : γωνία όρασης ενός στοιχείου στο έδαφος (Field of view, FOV)

h : ύψος πτήσης δορυφόρου.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους καμερών είναι ότι έχουν σχετικώς απλά οπτικά συστήματα και καταγράφουν αρκετά ομοιόμορφα την εικόνα. Τα μειονεκτήματά τους είναι ότι η εικόνα που δημιουργείται δεν έχει άμεση μετρητική δυνατότητα, διότι η γεωμετρία της δημιουργούμενης εικόνας είναι περίπλοκη (Ames, 2004). Οι σαρωτές Whiskbroom δεν χρησιμοποιούνται για φωτογραμμετρική επεξεργασία, λόγω της πολύ μεγάλης δυσκολίας βαθμονόμησης τους.

2.2.2. Pushbroom Σαρωτές

Οι σαρωτές τύπου Pushbroom είναι εξοπλισμένοι συνήθως με έναν ή περισσότερους γραμμικούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εστιακό επίπεδο του φακού. Δεν χρησιμοποιούν περιστρεφόμενα συστήματα κατόπτρων αλλά τα οπτικά τους είναι σταθερά και σαρώνουν λωρίδα εδάφους σταθερού πλάτους, που το εύρος της εξαρτάται από το μήκος του αισθητήρα, το ύψος του δορυφόρου και την εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας (Sandau, 2004). Οι σαρωτές Pushbroom έχουν προσανατολισμένο το γραμμικό αισθητήρα κάθετα στην κίνηση του δορυφόρου (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11: Γεωμετρία λήψης του Pushbroom σαρωτή

Η διάσταση d του κάθε φωτοστοιχείου του αισθητήρα αποτυπώνει μία στοιχειώδη επιφάνεια εδάφους με διάσταση α και προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha = \frac{h}{f} \cdot d$$

Εξ. 2.4

όπου:

h : Ύψος πτήσης δορυφόρου

f : Εστιακή απόσταση φακού.

Το χρονικό διάστημα Δt που απαιτείται για την σάρωση δύο γειτονικών γραμμών εξαρτάται από την ταχύτητα του δορυφόρου επί του εδάφους:

$$\Delta t = \frac{\alpha}{v_g}$$

Εξ. 2.5

όπου:

α : μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος

v_g : ταχύτητα δορυφόρου επί του εδάφους.

Το πλάτος της λωρίδας σάρωσης S προσδιορίζεται βάσει του τύπου

$$S = \frac{h}{f} \cdot s' = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \frac{\Omega}{2}$$

Εξ. 2.6

όπου:

h : Ύψος πτήσης δορυφόρου

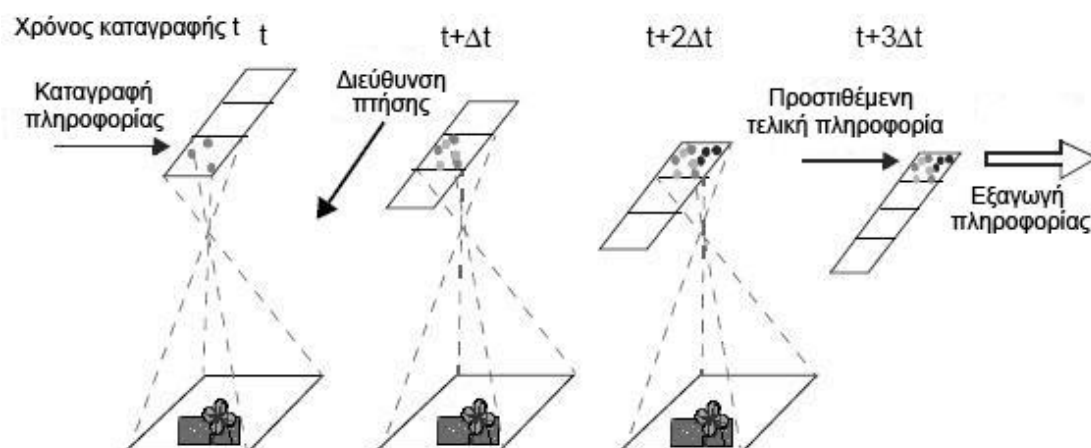
f : Εστιακή απόσταση φακού

s' : Μήκος του γραμμικού αισθητήρα

Ω : Γωνία σάρωσης του σαρωτή.

2.2.3. Σάρωση με Forward Motion Compensation (FMC)

Η ταχύτητα του δορυφόρου, καθώς περιστρέφεται γύρω από τη γη, είναι αρκετά μεγάλη και αν την προβάλλουμε στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης των 7Km/sec. Συνέπεια του παραπάνω είναι να εμφανίζεται το φαινόμενο «γλιστρήματος της εικόνας» κατά την καταγραφή της από τον αισθητήρα, λόγω του μεγάλου χρόνου ολοκλήρωσης της καταγραφής του αισθητήρα συναρτήσει της μεγάλης επιφανειακής ταχύτητας του εδάφους. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με την εμπρόσθια κίνηση του αισθητήρα γνωστό ως FMC (Forward Motion Compensation). Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι υλοποίησης της μεθοδολογίας FMC, ο μηχανικός τρόπος και ο ψηφιακός. Με τον μηχανικό τρόπο κινείται μηχανικά προς τα εμπρός, αντίθετα με την κίνηση του αισθητήρα, όλο το εστιακό επίπεδο κατά τη διάρκεια της καταγραφής της ακτινοβολίας. Ο δεύτερος τρόπος είναι ψηφιακός και ονομάζεται TDI (Time Delayed Integration) και χρησιμοποιείται σε κάμερες με γραμμικούς αισθητήρες που φέρονται από δορυφορικά συστήματα. Η αρχή λειτουργίας της παραπάνω τεχνολογίας βασίζεται στην πολλαπλή έκθεση του ίδιου αντικειμένου (Schroberetal, 2002). Κάθε TDI αισθητήρας είναι ένα είδος επιφανειακού αισθητήρα ο οποίος περιέχει αρκετούς γραμμικούς αισθητήρες (stages), που καταγράφουν σε χρονικό διάστημα Δt το ίδιο αντικείμενο. Το σήμα που καταγράφεται από κάθε επιμέρους γραμμικό αισθητήρα προστίθεται ή πολλαπλασιάζεται και μεταφέρεται σε ένα ή δύο καταγραφείς σήματος όπου και δημιουργείται η τελική πληροφορία (Σχήμα 2.12).



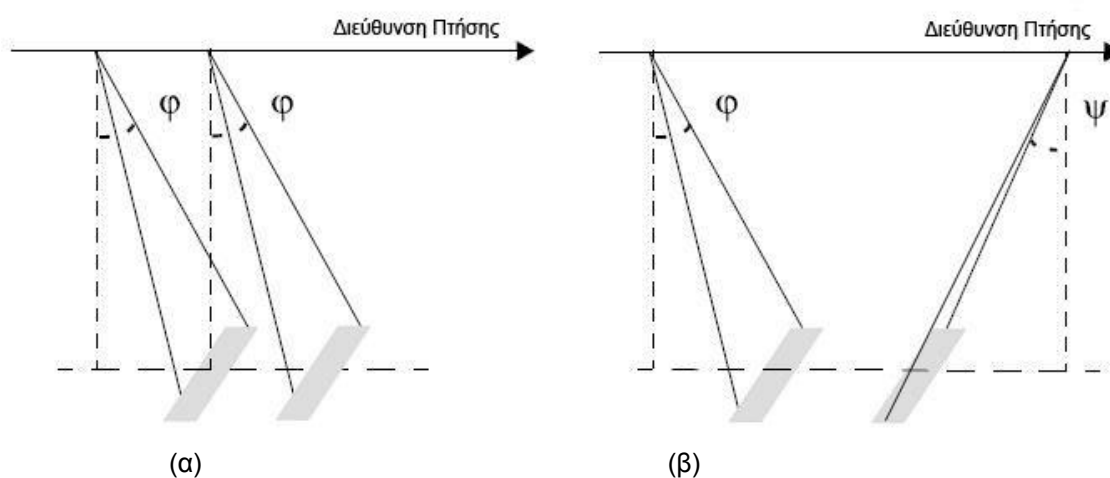
Σχήμα 2.12 : Αρχή λειτουργία TDI τεχνολογίας (Schroberetal, 2002)

Ο αισθητήρας του δορυφορικού συστήματος WorldView διαθέτει την τεχνολογία TDI με συνολικά 64 γραμμικούς αισθητήρες (stages) ενώ οι IKONOS και QuickBird διαθέτουν 32 αισθητήρες (Baltsavias, 2008). Δηλαδή, το ίδιο αντικείμενο καταγράφεται σε μικρό χρονικό διάστημα πολλές φορές και ο αριθμός των ενεργών stages προγραμματίζονται από το σταθμό εδάφους. Συνήθως για τον IKONOS χρησιμοποιούνταν 13 stages. Η χρήση πολλών stages συνήθως οδηγούν στον κορεσμό της εικόνας (saturation). Η τελική εικόνα δίνεται με την άθροιση ή πολλαπλασιασμό των επιμέρους stage σε ένα ή δύο καταγραφείς (registers).

2.2.4. Μέθοδοι - Τρόποι Σάρωσης

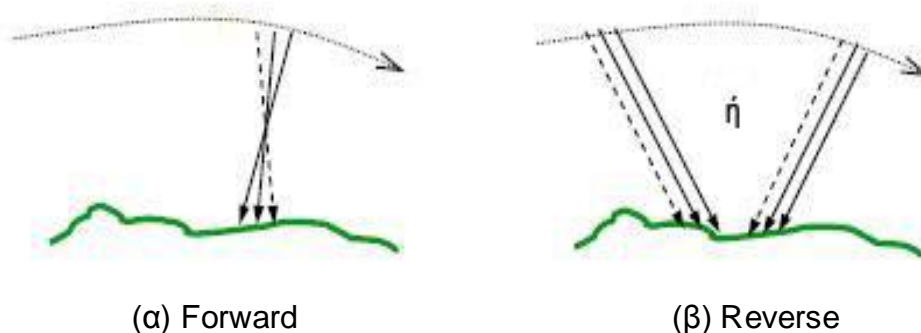
Τα δορυφορικά συστήματα τα οποία δίνουν εικόνες υψηλής ανάλυσης, συνήθως είναι εξοπλισμένα με οπτικά συστήματα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τους άξονες της κάμερας με γωνίες λήψης ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν οι εικόνες. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος WorldView έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα προς όλες τις κατευθύνσεις με γωνία έως και 45° από το ναδίρ (DigitalGlobe, WorldView-1 Features, 2008). Η σάρωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές μεθόδους. Πρώτη μέθοδος είναι η σύγχρονη σάρωση, όπου η ταχύτητα του δορυφόρου συμπίπτει με την ταχύτητα σάρωσης. Η κάθε γραμμή σάρωσης σαρώνεται με την ίδια γωνία θέασης (Σχήμα 2.13α). Τα πλεονεκτήματα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι οι

εικόνες έχουν σταθερή γεωμετρία και εφαρμόζεται με ακρίβεια η συνθήκη συγγραμμικότητας σε κάθε γραμμή σάρωσης. Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται ασύγχρονη μέθοδος, όπου η ταχύτητα του δορυφόρου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα σάρωσης (Chien, 2002). Αυτό επιτυγχάνεται με σταθερή περιστροφή των οπτικών συστημάτων με μία σταθερή γωνιακή ταχύτητα (Σχήμα 2.13β). Τα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι «φωτίζεται» για περισσότερο χρονικό διάστημα το τμήμα της επιφάνειας που σαρώνεται από τον αισθητήρα με αποτέλεσμα να δημιουργείται εικόνα με καλή ραδιομετρική ανάλυση.



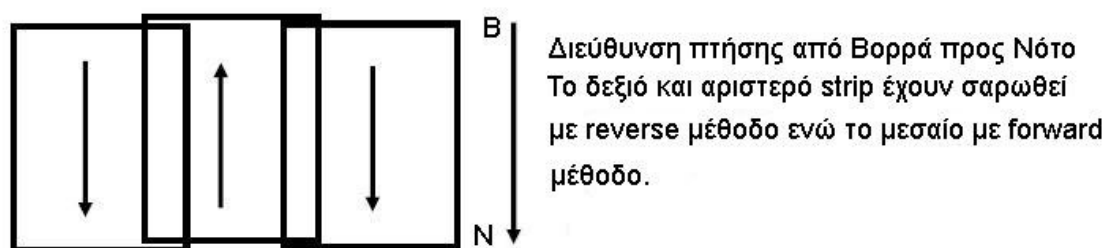
Σχήμα 2.13: Μέθοδοι σάρωσης (α) σύγχρονη, (β) ασύγχρονη

Τα δορυφορικά συστήματα υψηλής ανάλυσης έχουν επίσης και δύο διαφορετικούς τρόπους συλλογής δεδομένων. Ο πρώτος τρόπος είναι με σάρωση του εδάφους με διεύθυνση από βορρά προς νότο (Σχήμα 2.14α), κατά την κάθοδο του δορυφόρου από βορρά προς νότο, ο οποίος ονομάζεται «αντίθετη σάρωση» (Reverse). Ο δεύτερος τρόπος είναι η σάρωση με διεύθυνση από νότο προς βορρά (Σχήμα 2.14β), κατά την κάθοδο του δορυφόρου από βορρά προς νότο και ονομάζεται «εμπρόσθιος» (Forward).



Σχήμα 2.14: Τρόποι σάρωσης δορυφόρου - με διακεκομμένη γραμμή η πρώτη γραμμή σάρωσης (Baltsavias, 2008)

Τα πλεονεκτήματα του Forward τρόπου σάρωσης είναι ότι μπορεί ο δορυφόρος κατά την πορεία της τροχιάς του (AlongTrack) να συλλέξει περισσότερες εικόνες σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, εξοικονομώντας χρόνο που θα απαιτείτο, για παράδειγμα, για να γυρίσει όλος ο δορυφόρος και να συλλέξει γειτονικές εικόνες ώστε να δημιουργηθεί ζώνη (strip) εικόνων (Σχήμα 2.15). Ο δορυφόρος περιστρέφεται αργά με σχεδόν σταθερή γωνιακή ταχύτητα.



Σχήμα 2.15: Σάρωση εικόνων για τη δημιουργία ζώνης κατά το πέρασμα του δορυφόρου με forward και reverse μέθοδο.

2.3. Τρόποι συλλογής στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων

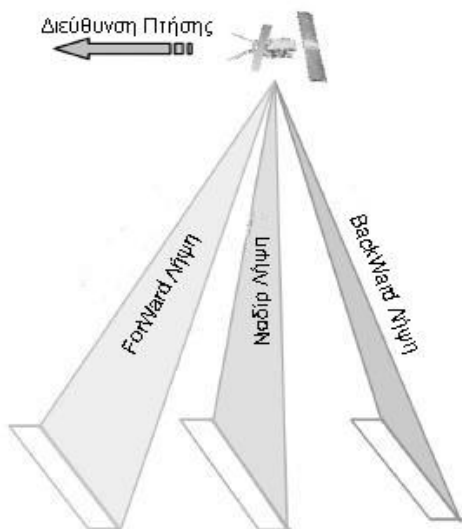
Η λήψη στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων από τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης γίνεται με τις παρακάτω δύο μεθοδολογίες.

2.3.1. Λήψεις κατά μήκος της ίδιας τροχιάς (Along Track)

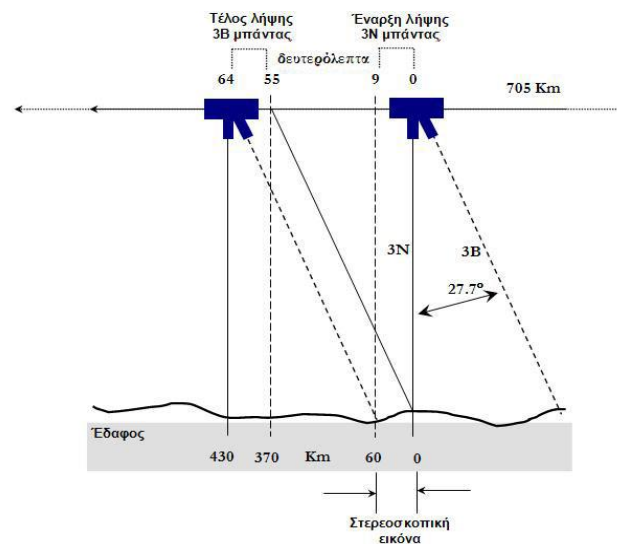
Τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης μπορούν να συλλέγουν στερεοσκοπικές δορυφορικές εικόνες κατά το πέρασμα της ίδιας τροχιάς.

Μπορούν να λαμβάνουν εικόνες για την ίδια περιοχή με διαφορά μερικών δευτερολέπτων από δύο διαφορετικά σημεία λήψης. Αναλόγως της κατασκευής και λειτουργίας της κάμερας του δορυφόρου, υπάρχουν αρκετές τεχνικές για λήψη στερεοσκοπικών εικόνων. Παράδειγμα, η φωτομηχανή μπορεί να έχει τρεις αισθητήρες με τρία ξεχωριστά οπτικά συστήματα και κατά την κίνηση του δορυφόρου να γίνεται ταυτόχρονη λήψη εμπρός (forward), κατακόρυφη (Nadir) και οπίσθια (Backward) (Σχήμα 2.16).

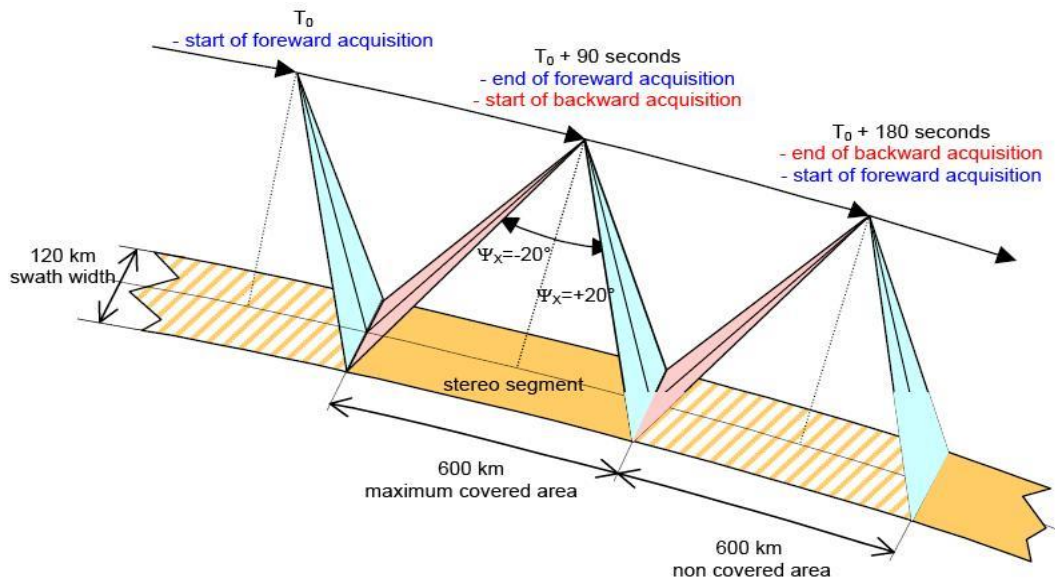
Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές αυτής της μεθοδολογίας, όπως η δυνατότητα της κάμερας του δορυφορικού συστήματος ASTER, που κάνει ταυτόχρονη λήψη από το ναδίρ και πίσω με γωνία 27.7° με 0.6 αναλογία βάση προς ύψος (ASTER User handbook, version 2) (Σχήμα 2.17). Επίσης το δορυφορικό σύστημα SPOT-V διαθέτει εκτός των άλλων κάμερα (HRS) με δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης από εμπρός και πίσω, που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 40° και αναλογία βάση προς ύψος ίση με 0.84 ($+20^\circ$, -20° από ναδίρ) (Σχήμα 2.18). Υπάρχουν αρκετά δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούν την παραπάνω μεθοδολογία. Ενδεικτικά αναφέρονται, το σύστημα ALOS, που διαθέτει τρία οπτικά συστήματα, και το σύστημα MODIS.



Σχήμα 2.16: Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας με ταυτόχρονη εμπρός, ναδίρ και πίσω λήψη



Σχήμα 2.17: Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας από τον δορυφόρο ASTER

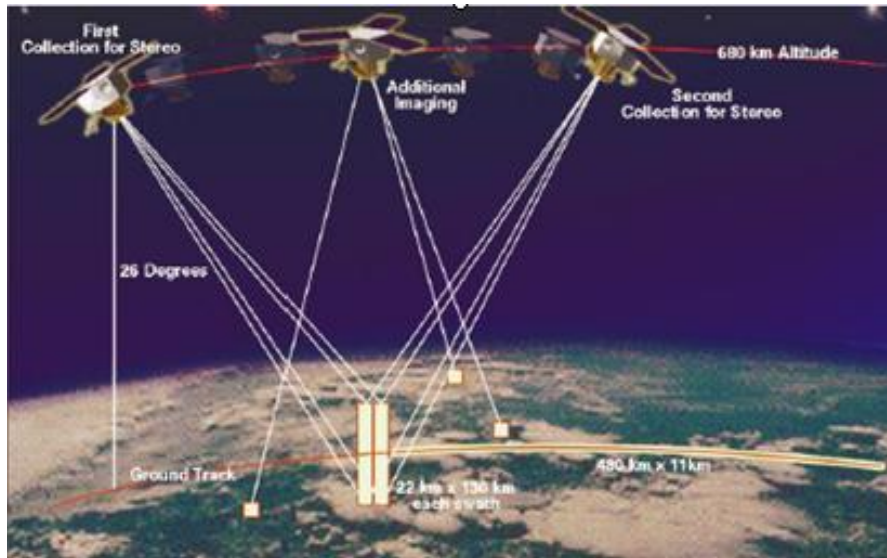


Σχήμα 2.18: Λήψη στερεοσκοπικής εικόνας από τον HRSαισθητήρα του SPOTV
(Πηγή: SPOT SATELLITE GEOMETRY HANDBOOK, revision 1, 2002)

Εκτός της μεθοδολογίας λήψης στερεοσκοπικών εικόνων με κατάλληλη κατασκευή καμερών με δύο ή περισσότερα οπτικά συστήματα, υπάρχουν δορυφορικά συστήματα που διαθέτουν μία μόνο κάμερα με δυνατότητα περιστροφής της γύρω από τους άξονές της (Jacobsen, 1998). Η συλλογή στερεοσκοπικών εικόνων γίνεται με τη συλλογή της πρώτης εικόνας με το οπτικό σύστημα στραμμένο εμπρός, ενώ η δεύτερη εικόνα συλλέγεται μετά από μικρό χρονικό διάστημα με το σύστημα στραμμένο προς τα πίσω ώστε να συλλέγεται η ίδια εικόνα από διαφορετικό σημείο λήψης (Σχήμα 2.19). Ο λόγος βάση προς ύψος σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να κυμαίνεται από 0.6 έως 1.5, και καθορίζεται από τον σταθμό εδάφους του δορυφόρου, ενώ εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζονται οι στερεοσκοπικές εικόνες. Δορυφορικά συστήματα που συλλέγουν στερεοσκοπικές εικόνες με την παραπάνω μεθοδολογία διαθέτουν οι δορυφόροι EROS-A/B, IKONOS, QuickBird, WorldView κ.α.

Όλα τα νέα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα υψηλής ανάλυσης, για τη λήψη στερεοσκοπικών εικόνων χρησιμοποιούν την μεθοδολογία λήψης από την ίδια τροχιά με πολύ μικρή χρονική διαφορά, η οποία είναι της τάξης μερικών δευτερολέπτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι και οι δύο εικόνες συλλέγονται με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες φωτισμού, με

αποτέλεσμα ραδιομετρικά ομοιόμορφες εικόνες (Sandau, 2004). Επιπλέον πλεονέκτημα της λήψης των στερεοσκοπικών εικόνων κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου είναι ότι τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των δύο εικόνων μεταβάλλονται ομαλά.



Σχήμα 2.19: Λήψη στερεοσκοπικών εικόνων από τον δορυφόρο IKONOSII με στροφή του δορυφόρου (Πηγή: Space Imaging, 2001)

2.3.2. Λήψεις από Διαδοχικές Τροχιές του Δορυφόρου (AcrossTrack)

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο μπορούν τα δορυφορικά συστήματα να συλλέξουν στερεοσκοπικές εικόνες είναι η λήψη της ίδιας περιοχής από διαφορετικές τροχιές. Τέτοια μεθοδολογία συνήθως χρησιμοποιούν τα παλαιότερα δορυφορικά συστήματα, όπως ο SPOT-IV, IRS κ.α (Kasser, 2002). Η συλλογή των εικόνων γίνεται είτε με στροφή κατόπτρων (Σχήμα 2.20α) με διεύθυνση κάθετη στην κίνηση του δορυφόρου, είτε στρέφοντας ολόκληρη την κάμερα προς την περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 2.20β). Και στις δύο περιπτώσεις η συλλογή των στερεοσκοπικών εικόνων γίνεται ως εξής: η πρώτη εικόνα συλλέγεται κατά την έλευση του δορυφόρου από την περιοχή ενδιαφέροντος και η δεύτερη εικόνα, για την ίδια περιοχή, συλλέγεται από την έλευση του δορυφόρου από την γειτονική τροχιά ή από την παρεπόμενη (Σχήμα 2.20β). Η σχέση του λόγου βάσης προς ύψος δίνεται από τη σχέση

$$\tan(\alpha_1) + \tan(-\alpha_2) = \frac{B}{H}$$

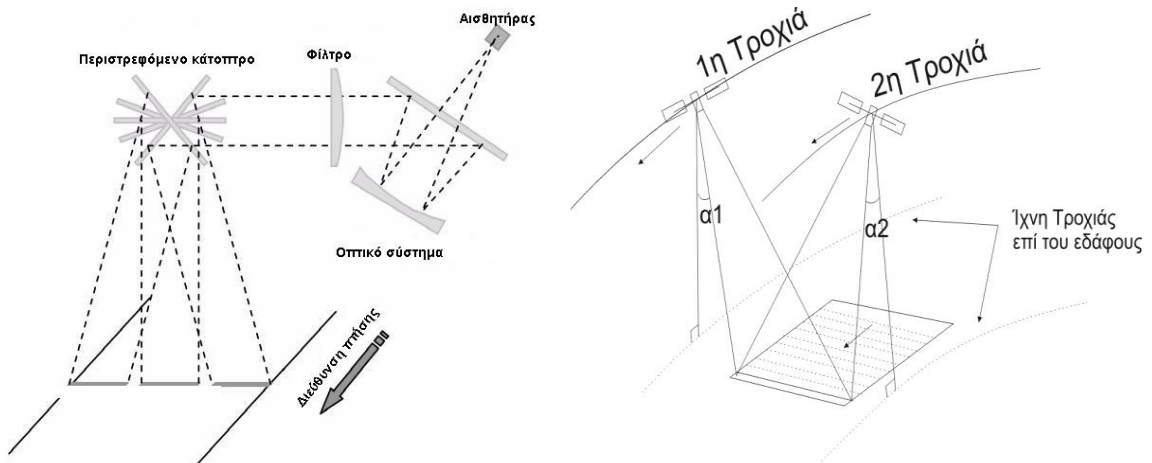
Εξ. 2.7

όπου:

α_1, α_2 : γωνίες θέασης του δορυφόρου από την τροχιά 1 και 2 αντίστοιχα (συνήθως της τάξης των 30°)

B: Η βάση λήψης των στερεοσκοπικών εικόνων

H: Ύψος πτήσης του δορυφόρου.



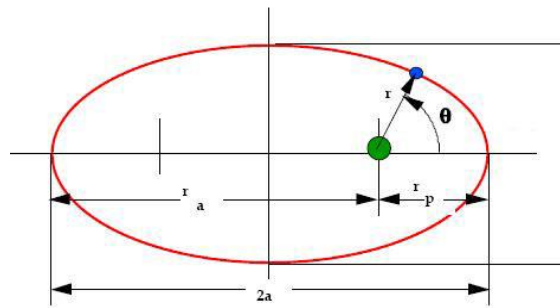
Σχήμα 2.20: Στερεοσκοπική λήψη από διαφορετικές τροχιές με περιστρεφόμενο κάτοπτρο (αριστερά) και με στροφή της κάμερας (δεξιά)

2.4. Τροχιές Δορυφόρων (Κινήσεις Δορυφόρων)

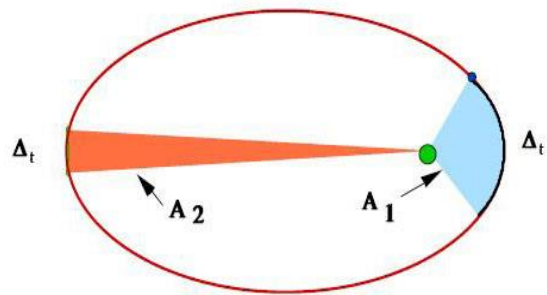
Τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης ή οι τηλεπισκοπικοί δορυφόροι (Remote Sensing Satellites) όπως ονομάζονται, ανήκουν στην κατηγορία των χαμηλών τροχιών από την επιφάνεια της γης (Low Earth Orbits) και το ύψος της τροχιάς τους από την επιφάνεια της γης κυμαίνεται από 300-1500Km (Carperou, 2005). Τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης έχουν σχεδιαστεί να συλλέγουν εικόνες υψηλής ευκρίνειας σε διάφορα μέρη του φάσματος. Η διακριτική ικανότητα του δορυφόρου εξαρτάται από τα οπτικά συστήματα της κάμερας και από το ύψος πτήσης του. Κάτω από το επίπεδο των 300Km μικραίνει κατά πολλή η διάρκεια ζωής του δορυφόρου εξαιτίας της ατμοσφαιρικής τριβής (Schenk, 1999). Σήμερα η μέγιστη διακριτική ικανότητα των δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης για εμπορικούς σκοπούς είναι 0.31m (WorldView-III, DigitalGlobe, 2014).

Από πολύ νωρίς είχαν αρχίσει οι έρευνες για την επεξήγηση της κίνησης των ουράνιων σωμάτων. Ο Κοπέρνικος, ο Κέπλερ και ο Γαλιλαίος είναι αυτοί που έθεσαν τις θεμελιώδεις εξισώσεις για την κίνηση των ουράνιων σωμάτων. Ο Κέπλερ διατύπωσε τους παρακάτω τρεις νόμους:

- **1^{ος} Νόμος:** Οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά και ο ήλιος βρίσκεται σε μία από τις δύο εστίες (1609) (Σχήμα 2.21)
- **2^{ος} Νόμος:** Η κίνηση ενός πλανήτη επί της ελλειπτικής τροχιάς εγγράφει ίσα εμβαδά σε ίσους χρόνους (1609) (Σχήμα 2.22)



Σχήμα 2.21: Πρώτος νόμος Κέπλερ, κίνηση γης σε ελλειπτική τροχιά



Σχήμα 2.22: 2ος νόμος Κέπλερ, σε ίσα χρονικά διαστήματα Δt εγγράφονται ίσα εμβαδά $A_1=A_2$

- **3^{ος} Νόμος:** Ο μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς υψωμένος στην τρίτη δύναμη είναι ανάλογος με το τετράγωνο της περιόδου της τροχιάς (1619) (Εξ. 2.8)

$$T^2 = \left(\frac{4 \cdot \pi^2}{\mu} \right) \cdot a^3 \quad \text{Εξ. 2.8}$$

όπου:

T : Η περίοδος της τροχιάς

μ : Η σταθερά βαρύτητας της γης $\cong 1.4077 \times 10^{16} \text{ft}^3/\text{sec}^2$ ($3.986 \times 10^5 \text{Km}^3/\text{sec}^2$)

a : Ο μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς

Οι παραπάνω τρεις νόμοι του Κέπλερ οδήγησαν αργότερα τον Newton (1666) να διατυπώσει τον παγκόσμιο τύπο βαρύτητας:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Εξ. 2.8

όπου:

F : Η δύναμη με την οποία έλκονται τα δύο σώματα

G: Παγκόσμια σταθερά βαρύτητας

M, m : Οι μάζες των δύο σωμάτων

r: Η απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων

Η εξίσωση 2.8 αποτέλεσε την αρχή για την δημιουργία τεχνικών δορυφόρων οι οποίοι περιστρέφονται γύρω από τη γη. Ο πρώτος τεχνικός δορυφόρος, που τέθηκε σε τροχιά γύρω από γη ήταν ο Sputnik το 1957 από την πρώην Ε.Σ.Σ.Δ. Η εξίσωση 2.8 θα μπορούσε να περιγράψει αρκετά καλά την κίνηση ενός τεχνητού δορυφόρου γύρω από τη γη αν η γη να ήταν εντελώς σφαιρική, είχε ομοιόμορφη πυκνότητα, δεν υπήρχαν ατμοσφαιρικές ή υδάτινες ή άλλες εξωτερικές δυνάμεις που διαταράσσουν την τροχιά του δορυφόρου. Οι εξωτερικές δυνάμεις που επιδρούν και διαταράσσουν την τροχιά ενός τεχνητού δορυφόρου είναι αρκετές και πολλές φορές δεν μπορούν να συνυπολογιστούν. Συνέπεια των παραπάνω είναι η μαθηματική μοντελοποίηση της τροχιάς του δορυφόρου να καθίσταται πολύπλοκη. Ενδεικτικοί εξωτερικοί παράγοντες που διαταράσσουν την τροχιά του δορυφόρου είναι οι παρακάτω:

- Η επιπλάτυση της γης που αποκλίνει από το ιδεατό σφαιρικό σχήμα
- Οι παλίρροιες των ωκεανών
- Η ατμοσφαιρική αντίσταση
- Ο ηλιακός άνεμος
- Το γήινο πεδίο βαρύτητας
- Οι δυνάμεις που ασκούνται από άλλα ουράνια σώματα

Η επίδραση όλων των παραπάνω παραγόντων οδήγησαν στον ορισμό μιας «εφαπτομενικής τροχιάς» (osculating orbit) η οποία περιγράφει με αρκετή ακρίβεια την κίνηση του δορυφόρου (Carderou, 2005). Για τον καθορισμό της «εφαπτομενικής τροχιάς» απαιτούνται τα στοιχεία της «εφαπτομενικής

τροχιάς» (osculating orbit elements), τα οποία θα αναφερθούν αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

2.4.1. Στοιχεία Τροχιάς

Η θέση του δορυφόρου επί της τροχιάς προσδιορίζεται με ακρίβεια εάν γνωρίζουμε το άνωσμα θέσης του δορυφόρου ($\vec{R}[X(t), Y(t), Z(t)]$) και το άνωσμα της ταχύτητας αυτού ($\vec{V}[V_x(t), V_y(t), V_z(t)]$) σε κάποια χρονική στιγμή t . Εξαιτίας των διαφόρων εξωτερικών δυνάμεων που ενεργούν στον δορυφόρο η εξίσωση 2.8 δεν είναι αρκετή για την περιγραφή της κίνησης του δορυφόρου. Η ανάγκη να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του δορυφόρου επί της τροχιάς σε κάποιο χρονική στιγμή οδήγησε στην ανάπτυξη περισσότερο πολύπλοκων μοντέλων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη όλους του εξωγενείς παράγοντες.

Το πρώτο μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι το μοντέλο των King-Hele (1964) και Kaula (1966), το οποίο εξηγεί την κίνηση των τεχνητών δορυφόρων γύρω από τη γη. Τα τροχιακά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου είναι γνωστά ως κεπλέρια στοιχεία (keplerian elements). Τα βασικά κεπλέρια στοιχεία είναι τα παρακάτω:

(1) Η **Εποχή t (Epoch)**. Είναι το χρονικό στιγμιότυπο της τροχιάς που αναφέρονται τα κεπλέρια στοιχεία.

(2) Η γωνία **Κλίσης του τροχιακού επιπέδου I (Orbital Inclination)**. Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τροχιακού επιπέδου και του επιπέδου του ισημερινού της γης και παίρνει τιμές από 0° έως 180° . Οι κλίσεις των τροχιακών επιπέδων που είναι κοντά στις 0° ονομάζονται ισημερινές τροχιές (Equatorial Orbits), διότι η προβολή της τροχιάς τους στην επιφάνεια της γης συμπίπτει με τον ισημερινό, ενώ όταν είναι κοντά στις 90° ονομάζονται πολικές τροχιές (Polar Orbits), διότι οι τροχιές τους διέρχονται από τους πόλους της γης (Σχήμα 2.23).

(3) Η γωνία **Ανάβασης Ω (Right Ascension ή Longitude of Ascending Node)**. Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα που κείται στο επίπεδο του ισημερινού και ορίζεται από το κέντρο μάζας της γης με διεύθυνση την εαρινή ισημερία (Aries) και του σημείου όπου η τροχιά του δορυφόρου κατά την ανάβασή του (από νότο προς βορρά) τέμνει το επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 2.23). Οι τιμές που παίρνει η γωνία ανάβασης είναι από 0° έως 360° .

(4) Η **Γωνία από το περίγειο ω (Argument of Perigee)**. Η γωνία αυτή σχηματίζεται μεταξύ του σημείου που τέμνεται η τροχιά του δορυφόρου με το επίπεδο του ισημερινού της γης και του περιγείου σημείου. Η γωνία αυτή κείται επί του τροχιακού επιπέδου και μπορεί να πάρει τιμές από 0° έως 360° (Σχήμα 2.23). Το περίγειο σημείο είναι εκείνο το σημείο της τροχιάς όπου ο δορυφόρος είναι κοντινότερα στη γη.

(5) Η **Εκκεντρότητα e (Eccentricity)**. Η εκκεντρότητα μας δίνει το σχήμα της τροχιάς και πολλές φορές δίνεται και ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης ως κεπλέριο στοιχείο. Η τροχιά του δορυφόρου γύρω από τη γη είναι ελλειπτική και η εκκεντρότητα καθορίζεται από την εξίσωση 2.9

$$e = \sqrt{\left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)}$$

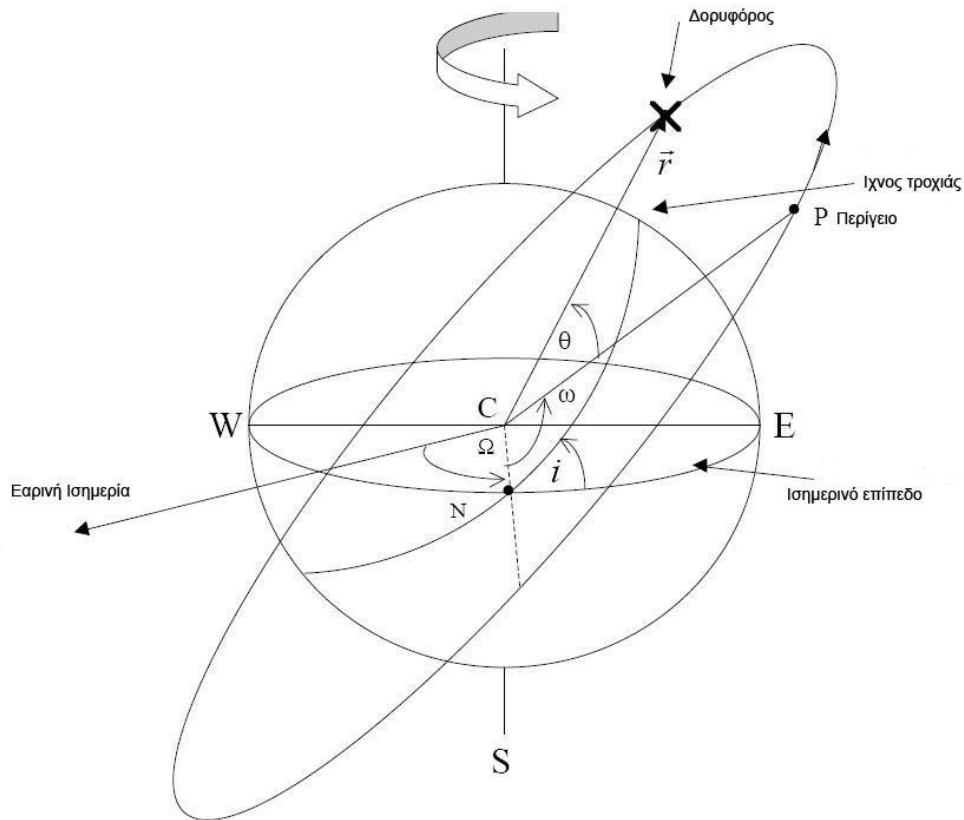
Εξ. 2.9

όπου:

e: Η εκκεντρότητα της έλλειψης

a: Ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης

b: Η μικρός ημιάξονας της έλλειψης.



Σχήμα 2.23: Απεικόνιση των κεπλέριων στοιχείων επί της τροχιάς του δορυφόρου γύρω από τη γη.

(6) Η **Μέση κίνηση (Mean Motion)** του δορυφόρου, που εκφράζεται σε περιστροφές γύρω από τη γη ανά ημέρα (revolution per day). Τα πρώτα πέντε κεπλέρια στοιχεία (που αναπτύχθηκαν παραπάνω) καθορίζουν το τροχιακό επίπεδο του δορυφόρου, τον προσανατολισμό της έλλειψης ως προς το τροχιακό επίπεδο και το σχήμα της έλλειψης. Αυτό το κεπλέριο στοιχείο (**Μέση κίνηση** του δορυφόρου) καθορίζει το χρόνο περιστροφής του δορυφόρου γύρω από τη γη, που όταν η τροχιά είναι σχεδόν κυκλική ($e \cong 0$) η ταχύτητα του δορυφόρου είναι σχεδόν σταθερή, ενώ αντίθετα εάν η τροχιά είναι ελλειπτική ($e > 0$) η ταχύτητα του δορυφόρου είναι μεγαλύτερη όταν βρίσκεται στο περίγειο και μικρότερη όταν είναι στο απόγειο.

(7) Η **Μέση ανωμαλία M (Mean Anomaly)** μας δίνει τη θέση του δορυφόρου επί της τροχιάς για κάποια χρονική στιγμή t και είναι γωνιακό μέγεθος. Η μέση ανωμαλία είναι η γωνία που διαγράφεται επί του τροχιακού επιπέδου με

αφετηρία το σημείο του περιγείου έως τη θέση του δορυφόρου επί της τροχιάς και εκφράζεται σε μοίρες από 0° έως 360° .

(8) **Αντίσταση αέρα (drag)**. Η αντίσταση του ατμοσφαιρικού αέρα επιδρά στην μείωση της ταχύτητας του δορυφόρου και στον εξαναγκασμό του σε ελικοειδή κίνηση προς την επιφάνεια της γης. Το στοιχείο αυτό εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της μέσης ανωμαλίας εξαιτίας της αντίστασης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλων εξωγενών παραγόντων. Η αντίσταση αέρα εκφράζεται με μονάδες περιστροφής γύρω από τη γη ανά ημέρα (revolution per day) και οι τιμές που παίρνει είναι της τάξης των 10^{-4} όταν πρόκειται για δορυφόρους που βρίσκονται κοντά στη γη και 10^{-7} όταν βρίσκονται μακριά από τη γη.

Υπάρχουν και άλλα στοιχεία που περιγράφουν την κίνηση των δορυφόρων τα οποία δεν είναι απαραίτητα για τον καθορισμό της τροχιάς, απλώς μας δίνουν επιπρόσθετες ποιοτικές πληροφορίες για τη θέση και την τροχιά των δορυφόρων ή απαιτούνται για άλλες εφαρμογές, όπως για φωτογραμμετρική χρήση, τα οποία θα αναλυθούν διεξοδικά στις επόμενες ενότητες. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε την Εποχική επαναληπτικότητα (Epoch revolution), που μας δίνει τον αριθμό των επαναληπτικών τροχιών που έχουν πραγματοποιηθεί από την εκτόξευση του δορυφόρου, τις γωνίες στροφής του δορυφόρου σε σχέση με το τροχιακό επίπεδο (attitudes), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσανατολισμό του δορυφόρου αλλά και για φωτογραμμετρική χρήση.

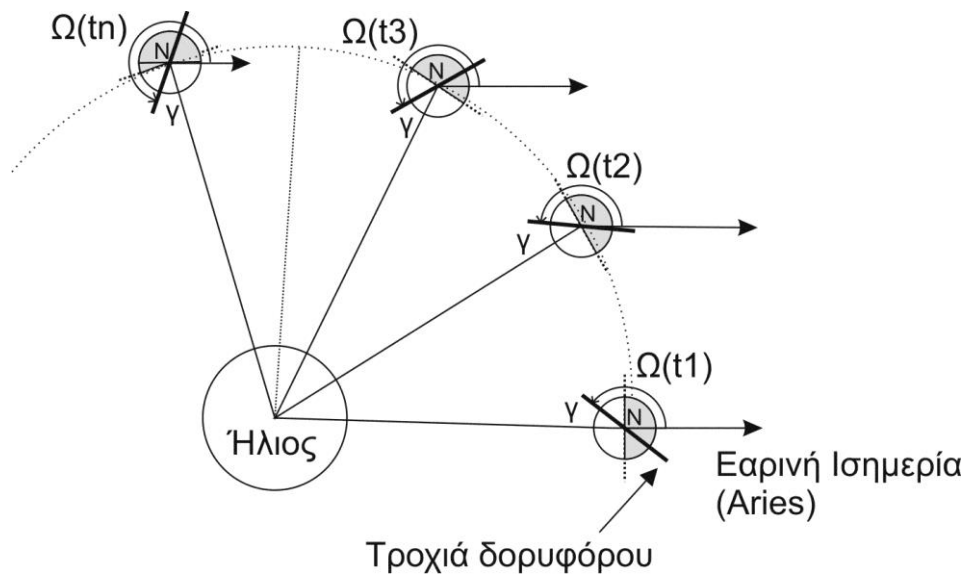
2.4.2. Είδη τροχιών

Αναλόγως της τιμής της κλίσης του τροχιακού επιπέδου με τον ισημερινό (inclination i) οι τροχιές χαρακτηρίζονται (Capderou, 2005):

- **ισημερινού τροχιακού επιπέδου**, αν η γωνία $i=0^\circ$
- **πολικές**, εάν η τιμή είναι $i=90^\circ$.

Αν η γωνία είναι $i>90^\circ$ τότε η τροχιά ονομάζεται **αντίρροπη (retrograde)** ενώ εάν η γωνία είναι $i<90^\circ$ τότε ονομάζεται **ομόρροπη (prograde)**.

Οι δορυφόροι παρατήρησης γης συνήθως τίθενται σε αντίρροπη τροχιά. Ο λόγος είναι ότι κατά την συλλογή της εικόνας από το δορυφόρο θα πρέπει να εξασφαλίζεται ο φωτισμός της περιοχής από τον ήλιο υπό ορισμένη γωνία. Η γωνία γ (Σχήμα 2.24), που σχηματίζεται μεταξύ του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου και του ήλιου, θα πρέπει να παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ο δορυφόρος διέρχεται από το ίδιο σημείο την ίδια ώρα. Τέτοιου είδους τροχιές ονομάζονται ηλιοσύγχρονες. Για την επίτευξη ηλιοσύγχρονης τροχιάς απαιτείται η γωνία (i) του τροχιακού επιπέδου να είναι μεγαλύτερη από 90° , ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας ($\dot{\Omega}$) να είναι θετικός και η περίοδος του δορυφόρου να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της αστρικής ημέρας. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας το δορυφόρο σε κατάλληλο ύψος από την επιφάνεια της γης λαμβάνοντας υπόψη ότι η γωνία γ μεταξύ του τροχιακού επιπέδου και ήλιου πρέπει να είναι σταθερή. Δηλαδή, η γωνία Ω (Σχήμα 2.24) θα πρέπει να έχει ρυθμό μεταβολής περίπου 1 μοίρα/ημέρα.



Σχήμα 2.24: Ηλιοσύγχρονη τροχιά δορυφόρου γύρω από τη γη

Για να προσδιορίσουμε την γωνία κλίσης (i), έτσι ώστε η τροχιά του δορυφόρου να είναι ηλιοσύγχρονη, χρησιμοποιείται η εξίσωση 2.11, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.10:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{2 \cdot \pi}{365.24} \text{rad} \cdot \text{year}^{-1} \approx 1^\circ \text{day}^{-1} = 1.99 \cdot 10^{-7} \text{rad} \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{Εξ. 2.10}$$

Επομένως, εάν θέλουμε να θέσουμε ένα δορυφόρο σε ηλιοσύγχρονη τροχιά σε ύψος πτήσης $h_t=450\text{km}$ (QuickBird), θα έχουμε:

$$\cos(i) = -\frac{2 \cdot \frac{d\Omega}{dt} \cdot a^2}{3 \cdot j_2 \cdot a_e^2 \cdot \sqrt{\frac{GM}{a^3}}} \quad (\text{για } e \approx 0, e_{\text{QuickBird}} = 0.0001170) \quad \text{Εξ. 2.11}$$

όπου:

a_e : ακτίνα της γης στον ισημερινό, $a_e = 6378\text{Km}$

a : ακτίνα της τροχιάς του δορυφόρου, $a = a_e + h_t = 6378\text{Km} + 450\text{Km} = 6828\text{km}$

j_2 : σταθερά που προσομοιώνει το βαρυτικό πεδίο της γης (η πλήρης ανάπτυξη γίνεται με σφαιρικές αρμονικές, εδώ θα θεωρείται ίσο με 1082.63×10^{-6})

GM : σταθερά ίση με $398600 \text{ Km}^3\text{sec}^{-2}$.

Τα παραπάνω μας οδηγούν σε: $\cos(i) = -0.1255 \Leftrightarrow i = 1.6966\text{rad} \Leftrightarrow i = 97.2^\circ$

Επομένως, εάν ο δορυφόρος τοποθετηθεί σε τροχιά με ύψος 450km από την επιφάνεια της γης, με γωνία τροχιακού επιπέδου $i=97.2^\circ$, η τροχιά του δορυφόρου θα είναι ηλιοσύγχρονη.

Η μεταβολή της γωνίας θ (Σχήμα 2.23) ή η πραγματική ανωμαλία (True Anomaly) καθορίζει την περίοδο του δορυφόρου. Καθορίζει, δηλαδή, το χρόνο που χρειάζεται για να κάνει μία πλήρη περιστροφή ο δορυφόρος γύρω από τη γη. Προσεγγιστικά για τροχιές που είναι σχεδόν κυκλικές ($e \approx 0$) ισχύει:

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \approx \frac{G \cdot M}{r^3} \quad \text{Εξ. 2.12}$$

και η περίοδος του δορυφόρου υπολογίζεται από την εξίσωση 2.13:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{d\theta}{dt}} \Rightarrow T = 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{G \cdot M}{r^3}\right]^{-1/2} \quad \text{Εξ. 2.13}$$

Επομένως, εάν ο δορυφόρος τεθεί σε τροχιά με ύψος 450km (QuickBird) από την επιφάνεια της γης η περίοδος θα είναι:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{398600}{6828^3} \right]^{-1/2} \Rightarrow T = 5615 \text{ sec} \Rightarrow T = 93.5 \text{ min}$$

Άρα, ο δορυφόρος σε 93.5 λεπτά κάνει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τη γη.

2.4.3. Μοντέλα Πρόγνωσης Τροχιάς Δορυφόρων

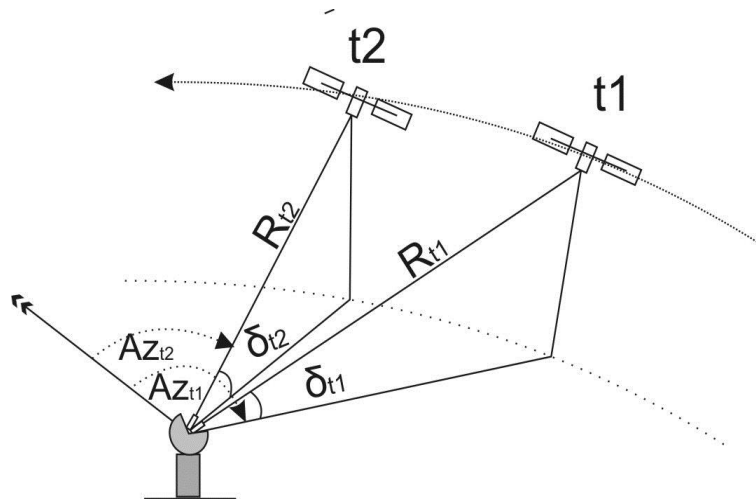
Εξαιτίας της ανάγκης να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του δορυφόρου σε κάποια χρονική στιγμή t , έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που περιγράφουν με ακρίβεια την κίνηση και την τροχιά του δορυφόρου. Μερικές από τις ανάγκες είναι να μπορεί να καθορισθεί η «ανατολή» του δορυφόρου, ο οποίος θα εμφανισθεί στον ορίζοντα και το αζιμουθιο από το σημείο που βρισκόμαστε ή που βρίσκεται ο σταθμός ελέγχου, για να γίνεται η παρακολούθηση της τροχιάς του. Η παρακολούθηση του δορυφόρου γίνεται με συνεχή υπολογισμό, συναρτήσεως του χρόνου, του αζιμουθίου και της κατακόρυφης γωνίας μεταξύ του σημείου αναφοράς (π.χ δορυφορική κεραία) και του δορυφόρου. Εξαιτίας των εξωγενών δυνάμεων, που ασκούνται στο δορυφόρο (βαρυτικό πεδίο γης, ηλιακός άνεμος, ατμόσφαιρα κ.α.), τα τροχιακά δεδομένα είναι δυναμικά και μεταβάλλονται σε λίγες ημέρες ή εβδομάδες, αναλόγως τον δορυφόρο. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια των στοιχείων της τροχιάς των δορυφόρων επαναπροσδιορίζονται συνεχώς τα τροχιακά στοιχεία (Capderou, 2005).

Τα τροχιακά στοιχεία προσδιορίζονται με συνεχείς παρατηρήσεις των αποστάσεων με Laser, μεταξύ των μόνιμων σταθμών και των δορυφόρων. Η μέτρηση των αποστάσεων γίνεται από ειδικά όργανα τα οποία ονομάζονται SLR (Satellite Laser Ranging). Τα SLR όργανα προσδιορίζουν με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση μεταξύ δορυφορικού σταθμού (δορυφορική κεραία) και δορυφόρου, μετρώντας τον χρόνο που απαιτείται να διανύσει ένας παλμός Laser από το σταθμό στον δορυφόρο και αντίστροφα. Τα σύγχρονα SLR όργανα εκπέμπουν «πράσινο» Laser (green laser) με μήκος κύματος 532nm με ένα εξαιρετικά μικρό παλμό της τάξης των 30-200ps με ρυθμό επανάληψης 5-10Hz. Η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η απόστασης

(R) από SLR συσκευές, είναι της τάξης των μερικών εκατοστών. Σήμερα υπάρχουν πάνω από 40 σταθμοί παρακολούθησης δορυφόρων με LASER, όπως: GFZ-1, Lageos1, TOPEX/Poseidon, ERS-2 καθώς επίσης και οι δορυφόροι GPS-35 και GPS-36 με ακρίβεια στην μέτρηση αποστάσεων της τάξης του 1cm (SatelliteOrbits, 2001). Πέρα των μετρήσεων με συσκευές LASER πραγματοποιούνται μετρήσεις και με συσκευές Doppler και RADAR. Γενικά υπάρχουν πολλές και διαφορετικές τεχνικές παρακολούθησης δορυφόρων (Satellite Tracking Methods).

Για τον προσδιορισμό των τροχιακών στοιχείων απαιτούνται τουλάχιστον έξι ανεξάρτητες μετρήσεις. Η μεθοδολογία προσδιορισμού των τροχιακών στοιχείων είναι η εξής:

- Από έξι (6) ανεξάρτητες μετρήσεις (R_{t1} , Az_{t1} , δ_{t1} και R_{t2} , Az_{t2} , δ_{t2}) (Σχήμα 2.25), οι οποίες πραγματοποιούνται κατά ελάχιστο σε δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 , προσδιορίζονται στο σύστημα αναφοράς του σταθμού οι καρτεσιανές συντεταγμένες της θέσης του δορυφόρου (X_{t1}, Y_{t1}, Z_{t1} και X_{t2}, Y_{t2}, Z_{t2}).
- Υπολογίζονται τα τροχιακά στοιχεία (a , e , I , Ω , ω , M) λαμβάνοντας υπόψη τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.8.3.4.



Σχήμα 2.25: Μετρήσεις αποστάσεων (R), αζιμουθίων (Az) και γωνιών ύψους (δ) δορυφόρου σε δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 από σταθμό ελέγχου με όργανο SLR (Oliver, 1961).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα τροχιακά ή κεπλέρια στοιχεία είναι δυναμικά στοιχεία, που μεταβάλλονται σε λίγες ημέρες ή εβδομάδες. Ιδιαίτερα για τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης, τα οποία βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της γης (έως 700km), απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς του δορυφόρου, τόσο για τις φωτογραμμετρικές-τηλεπισκοπικές εφαρμογές, όσο και για διάφορες εφαρμογές γεωγραφικών πληροφοριών. Έτσι, γίνονται συνεχείς παρατηρήσεις-μετρήσεις των δορυφόρων και προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια τα κεπλέρια στοιχεία τους. Στη συνέχεια εισάγονται σε μοντέλα πρόγνωσης τροχιάς δορυφόρων, όπου προσδιορίζεται το διάνυσμα θέσης και το διάνυσμα της ταχύτητας των δορυφόρων.

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα πρόγνωσης τροχιάς των δορυφόρων, τα οποία ως στοιχεία εισόδου χρησιμοποιούν τα τροχιακά στοιχεία. Σήμερα υπάρχουν δύο τύποι διάθεσης των τροχιακών στοιχείων, οι οποίοι είναι παρόμοιοι. Ο πρώτος ονομάζεται T-bus τροχιακά στοιχεία και ο δεύτερος TLE (Two Lines Elements by NORAD). Ο πρώτος τύπος αφορά σε δορυφόρους που έχουν πολικές τροχιές (διέρχονται από το Β. και Ν. Πόλο) και διαχωρίζεται σε TBUS-1, εάν τα τροχιακά δεδομένα περιγράφουν την κίνηση του δορυφόρου από νότο προς βορρά (κατά την διάρκεια της νύχτας), και TBUS-2, εάν περιγράφει την κίνηση του δορυφόρου κατά την κάθοδο από βορρά προς νότο (κατά την διάρκεια της ημέρας). Ο δεύτερος τύπος δεδομένων περιέχει τροχιακά δεδομένα σε αρχείο text, που για κάθε δορυφόρο περιέχει δύο γραμμές με πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα τροχιάς του (Satellite Orbits, 2001). Το μοντέλο πρόγνωσης τροχιάς δορυφόρου που χρησιμοποιείται για δορυφόρους που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της γης είναι το SGP4 (Hoots et al., 1980). Στο παραπάνω μοντέλο εισάγουμε τα τροχιακά στοιχεία, που διαβάζουμε από το αρχείο TLE, και για οποιοδήποτε χρονικό σημείο t μας δίνει τη θέση $P(X,Y,Z)$ του δορυφόρου και την ταχύτητά του $V(V_x, V_y, V_z)$.

Ένα παράδειγμα με τροχιακά δεδομένα σε μορφή TLE του δορυφόρου WorldView-III φαίνεται παρακάτω:

```

WORLDVIEW-3 (WV-3)
1 40115U 14048A 14324.45567405 .00001976 00000-0 23710-3 0 3317
2 40115 97.9767 34.6242 0001963 74.9590 285.1851 14.85185028 14649

```

Ενδεικτικά: στη δεύτερη γραμμή και δεύτερη στήλη αναφέρεται η κλίση του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου (97.9767deg), στην τρίτη στήλη η γωνία ανόδου (RAN=34.6242deg) κ.ο.κ. Αναλυτικά η επεξήγηση του αρχείου TLE δίνεται στη διεύθυνση <http://celestrak.com/columns/v04n03/index.asp#FAQ01> Εισάγοντας στο μοντέλο SGP4 τα τροχιακά δεδομένα που αναφέρονται παραπάνω υπολογίζουμε τις θέσεις και τις ταχύτητες του δορυφόρου.

Η θέση του δορυφόρου δίνεται στο εσωτερικό αδρανειακό γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς (ECI, Earth Centered Inertial). Τα συστήματα αναφοράς στα οποία αναφέρονται τα τροχιακά δεδομένα καθώς επίσης και η θέση του δορυφόρου περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.5. Συστήματα Αναφοράς

2.5.1. Χρόνος Αναφοράς

Ο χρόνος είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα για την εκτέλεση των αστρονομικών, φυσικών και γεωδαιτικών εργασιών. Όλες οι φυσικές θεωρίες, οι μέθοδοι παρατήρησης και οι λειτουργίες των μετρητικών συσκευών, που περιγράφονται παραπάνω, απαιτούν ένα ενιαίο χρονικό σύστημα αναφοράς (πλαίσιο), το οποίο να είναι αυστηρά καθορισμένο και να επαναπροσδιορίζεται συνεχώς (Satellite Orbits, 2001). Ο χρόνος παραδοσιακά μετριέται σε ημέρες των 86.400 δευτερολέπτων και ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για μία πλήρη περιστροφή γύρω από τη γη (ηλιακή ημέρα). Εξαιτίας της περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο, η γωνία ανόδου (Ω) της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο μεταβάλλεται περίπου 1 μοίρα/ημέρα έτσι ώστε ο χρόνος περιστροφής επιμηκύνεται κατά 4 λεπτά περίπου από το χρόνο περιστροφής της γης. Ορίζεται επομένως η αστρική ημέρα η οποία έχει $24^h 56^m 4.09^{sec}$ και είναι ο χρόνος περιστροφής μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων ενός μεσημβρινού από την εαρινή ισημερία.

Με βάση τη σχέση της γωνία ανόδου (Ω) του ηλίου, η οποία προκύπτει από παρατηρήσεις, ορίστηκε το 1925 ο Greenwich Mean Time ή Universal Time

(UT) για αστρονομικούς και άλλους σκοπούς. Εξαιτίας όμως του κλονισμού του άξονα της γης και των υπολοίπων διαταραχών της τροχιάς της γης ορίσθηκε νέος χρόνος αναφοράς το 1960, που ονομάζεται Ephemeris Time (ET) και βασίζεται αποκλειστικά στην κίνηση του ηλιακού συστήματος. Αργότερα με την εισαγωγή ατομικών ωρολογίων εισήχθη το σύστημα Atomic Time (AT), το οποίο είναι ένα σύστημα χρόνου, που είναι αρκετά πιο εύχρηστο και απαλλαγμένο από τις αδυναμίες των δυναμικών μοντέλων. Σήμερα τα συστήματα χρόνου που χρησιμοποιούνται για τις τροχιές των δορυφόρων είναι τα ακόλουθα:

- **Terrestrial Time (TT)**: είναι το θεμελιώδες και μοναδικό χρονικό σύστημα, το οποίο μετριέται σε ιδεατό ρολόι επάνω στην επιφάνεια του γεωειδούς. Οι μονάδες μέτρησης είναι οι ημέρες των 86.400 δευτερολέπτων.
- **International Atomic Time (TAI)**: είναι σύστημα χρόνου αρκετά πρακτικό, με μεγάλη σταθερότητα και βασίζεται σε ατομικά ρολόγια. Συμφωνεί με τον TT χρόνο με μία σταθερή απόκλιση 32,184 δευτερολέπτων.
- **GPS Time** σύστημα χρόνου το οποίο είναι παρόμοιο με το TAI, με τη διαφορά ότι έχουν διαφορετική απόκλιση χρόνου 19 δευτερολέπτων και η μέτρηση γίνεται με άλλου είδους ατομικά ρολόγια.
- **Greenwich Mean Sidereal Time (GMST)**, είναι η χρονική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού που διέρχεται από το Greenwich και της εαρινής ισημερίας (vernal equinox).
- **Universal Time (UT1)**: ο μέσος ηλιακός χρόνος ο οποίος εξάγεται από το GMST σύστημα.
- **Coordinated Universal Time (UTC)**: είναι συνδεδεμένος με το χρονικό σύστημα TAI με μία απόκλιση ακέραιων δευτερολέπτων, η οποία ενημερώνεται έτσι ώστε να συγκλίνουν τα χρονικά συστήματα UTC και UT1.

Οι αστρονομικοί υπολογισμοί και ιδιαίτερα οι υπολογισμοί για τον καθορισμό των τροχιών των δορυφορικών συστημάτων απαιτούν συστήματα που ο χρόνος να είναι συνεχής και να μην εξαρτάται από εξωγενείς παράγοντες. Για

να είναι δυνατόν να βρεθεί με ακρίβεια το χρονικό διάστημα δυο χρονικών στιγμών ο χρόνος θα πρέπει να είναι ενιαίος και συνεχής. Για τους παραπάνω λόγους εισήχθη η Ιουλιανή μέρα (Julian Day, JD) . Η JD είναι ο αριθμός των ημερών από το μεσημέρι της 1 Ιανουαρίου 4.713 Π.Χ. περιλαμβάνοντας κλάσμα ημερών. Παρέχει μία συνέχεια στο χρόνο για την υλοποίηση όλων των εφαρμογών και επιπλέον είναι πάντα θετικός. Λόγω του μεγάλου αριθμού ημερών σήμερα (πάνω από δύο εκατομμύρια) και επειδή είναι περισσότερο επιθυμητό να ξεκινάει η μέτρηση του χρόνου από τα μεσάνυχτα, δημιουργήθηκε η Τροποποιημένη Ιουλιανή ημέρα (Modified Julian Day, MJD) η οποία ορίζεται:

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2.400.000,5 \quad \text{Εξ. 2.14}$$

Για παράδειγμα η 12^η ώρα τις 1 Ιανουαρίου 2015 στο σύστημα MJD είναι:

$$\text{MJD}(12^{\text{η}} \text{ώρα: } 1 \text{ Ιανουαρίου } 2015) = 57023$$

Πολλές φορές για τους υπολογισμούς και μετατροπές των εφημερίδων των δορυφόρων απαιτείται η μετατροπή από GMST στον Παγκόσμιο χρόνο (UT1) ή στο Terrestrial Time. Ο παγκόσμιος χρόνος (UT1) καθορίζεται ως μία συνάρτηση του αστρικού χρόνου και εξαρτάται από την περιστροφή της γης. Για μία οποιαδήποτε ημέρα στις 0h UT1 δίνεται η στιγμιαία τιμή του GMST από την εξίσωση 2.15:

$$\text{GMST}(0^{\text{h}} \text{UT1}) = 24110^{\text{S}}.54841 + 8640184^{\text{S}}.812866 \cdot T_u + 0^{\text{S}}.093104 \cdot T_u^2 - 6.2 \times 10^{-6} \cdot T_u^3 \quad \text{Εξ. 2.15}$$

όπου:

$$T_u = \frac{\text{JD}(0^{\text{h}} \text{UT1}) - 2451545}{36525} \quad \text{Εξ. 2.16}$$

Για οποιαδήποτε ώρα της ημέρας η εξίσωση 2.15 γενικεύεται και παίρνει την μορφή που φαίνεται στην εξίσωση 2.17:

$$\text{GMST} = 24110^{\text{S}}.54841 + 8640184^{\text{S}}.812866 \cdot T_u + 1.002737909350795 \cdot \text{UT1} - 0^{\text{S}}.093104 \cdot T_u^2 - 6.2 \times 10^{-6} \cdot T_u^3 \quad \text{Εξ. 2.17}$$

2.17

όπου:

$$T_u = \frac{JD(UT1) - 2451545}{36525} \quad \text{Εξ. 2.18}$$

Η διαφορά μεταξύ του Universal Time (UT1) και του Terrestrial Time (TT) ή του Atomic Time (AT) μπορεί να καθοριστεί αναδρομικά. Στο τέλος του 20^{ου} αιώνα ήταν περίπου 65 δευτερόλεπτα και αυξάνει περίπου με 0.5 έως 1 δευτερόλεπτο το έτος.

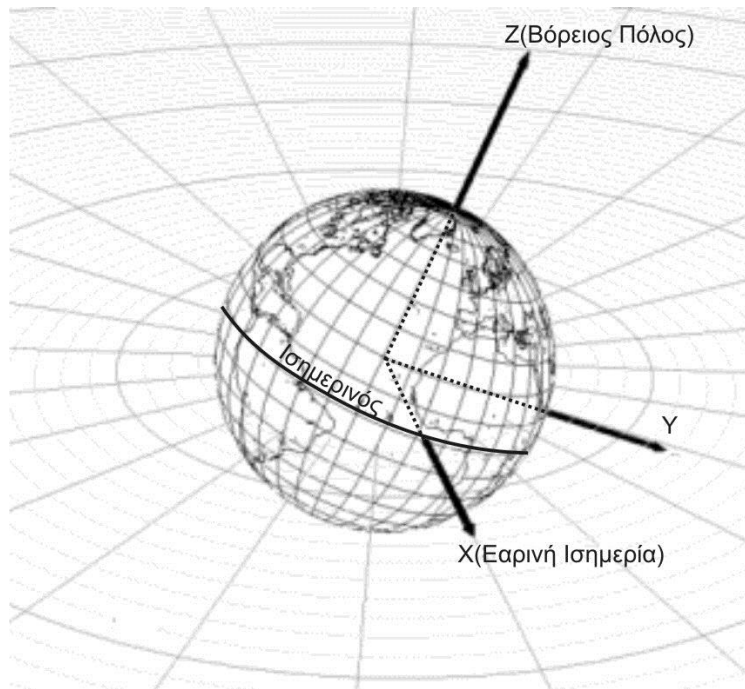
2.5.2. Γεωκεντρικά Συστήματα Συντεταγμένων

Για τον προσδιορισμό της θέσης των δορυφόρων απαραίτητο είναι να καθορισθεί το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Τα συστήματα αναφοράς, που έχουν ορισθεί σήμερα, είναι τρισσορθώνια καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων με κέντρο το κέντρο μάζας της γης. Διακρίνονται σε συστήματα που είναι σταθερά και δεν περιστρέφονται κατά την περιστροφή της γης και αυτά που ακολουθούν την περιστροφή της.

2.5.2.1. Εσωτερικό-Αδρανειακό Γεωκεντρικό Σύστημα (ECI)

Το εσωτερικό-αδρανειακό σύστημα είναι ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που υλοποιείται από ένα τρισσορθώνιο σύστημα αξόνων X,Y,Z. Το κέντρο του συστήματος προσαρμόζεται στο κέντρο της γης, ο άξονας Z συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής και έχει κατεύθυνση προς το βόρειο πόλο, ο άξονας X κείται στο ισημερινό επίπεδο της γης και έχει κατεύθυνση προς την εαρινή ισημερία και ο άξονας Y υλοποιεί το δεξιόστροφο τρισσορθώνιο σύστημα αναφοράς (Σχήμα 2.26)

Το εσωτερικό-αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων είναι σταθερό κατά την περιστροφή της γης και χρησιμοποιείται για να δίνει τις συντεταγμένες τις θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου σε κάποια χρονική στιγμή ανεξάρτητα από την περιστροφή της γης.

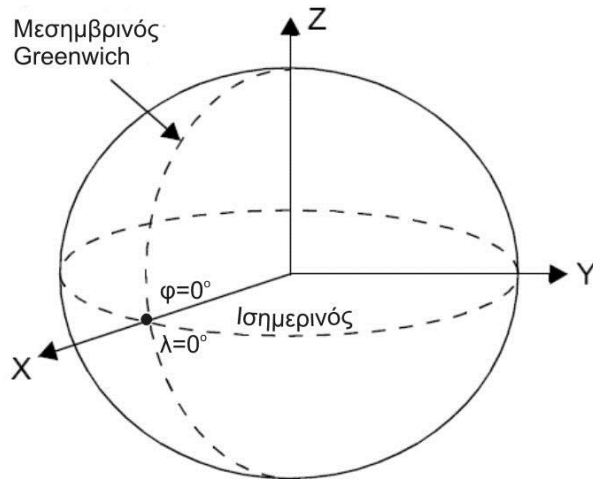


Σχήμα 2.26: Εσωτερικό-Αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (Earth Centered Inertial, ECI)

2.5.2.2. Παγκόσμιο Γεωκεντρικό Σύστημα (Earth Centered Earth Fixed ECEF)

Το παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα είναι ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που υλοποιείται από ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων X, Y, Z του οποίου το κέντρο συμπίπτει με το κέντρο μάζας της γης. Ο άξονας Z είναι παράλληλος με τον άξονα περιστροφής της γης με κατεύθυνση το βόρειο πόλο ενώ ο άξονας X κείται επί του ισημερινού επιπέδου και διέρχεται από το σημείο τομής μεταξύ του ισημερινού και του μεσημβρινού που διέρχεται από το αστροσκοπείο του Greenwich. Ο άξονας Y υλοποιεί το κανονικό δεξιόστροφο ορθοκανονικό σύστημα (Σχήμα 2.27).

Το παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα περιστρέφεται μαζί με τη γη έτσι ώστε οποιοδήποτε σημείο στην επιφάνεια της γης σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα να έχει τις ίδιες συντεταγμένες.



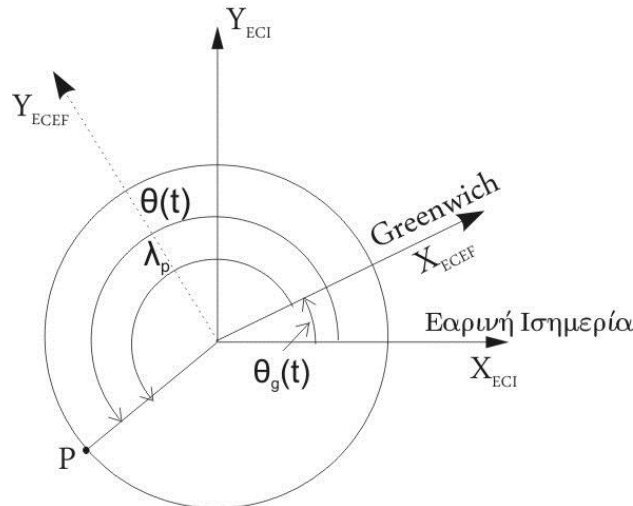
Σχήμα 2.27: Παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα (Earth Centered Earth Fixed, ECEF)

2.5.2.3. Μετατροπή από το Εσωτερικό Σύστημα Συντεταγμένων στο Παγκόσμιο Σύστημα Συντεταγμένων

Οι περισσότερες εξισώσεις κίνησης των δορυφόρων και τα μοντέλα πρόγνωσης των τροχιών των δορυφόρων μας δίνουν τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου στο ECI σύστημα συντεταγμένων. Οι μετρήσεις όμως για τον προσδιορισμό της θέσης των δορυφόρων πραγματοποιούνται από την επιφάνεια της γης, όπου οι θέσεις τους προσδιορίζονται στο ECEF σύστημα συντεταγμένων. Συνεπώς, για να συσχετίσουμε τις παρατηρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια της γης με τον υπολογισμό της θέσης του δορυφόρου είναι απαραίτητη η διασύνδεση του εσωτερικού-αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Για τη μετατροπή από το ECI σύστημα συντεταγμένων στο ECEF, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δύο τρισσορθογώνια καρτεσιανά συστήματα έχουν κοινό τον άξονα Z και τους άξονες τους X και Y να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (επίπεδο του ισημερινού), απαιτείται να γνωρίζουμε για οποιαδήποτε χρονική στιγμή την γωνία μεταξύ των αξόνων X των δύο συστημάτων.

Επειδή η αφετηρία του ECI συστήματος είναι η εαρινή ισημερία ενώ του ECEF ο μεσημβρινός του Greenwich, θα πρέπει να γνωρίζουμε για οποιαδήποτε χρονική στιγμή την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο αφετηριών.



Σχήμα 2.28: Συσχετισμός των συστημάτων ECI και ECEF. Η γωνία θ_g είναι η απόκλιση μεταξύ των δύο συστημάτων.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.28 ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων του σημείου P από το σύστημα ECI στο ECEF γίνεται με την εξίσωση 2.19.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECEF} = M(\theta_g(t)) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECI} \quad \text{Εξ. 2.19}$$

όπου η γωνία $\theta(t)$ ισούται:

$$\theta(t) = \lambda_p + \theta_g(t) \quad \text{Εξ. 2.20}$$

Η γωνία $\theta_g(t)$ εξαρτάται από το χρόνο και μπορούμε να την υπολογίσουμε από την εξίσωση 2.21

$$\theta_g(t) = \theta_g(0^h) + \omega_e \cdot \Delta t \quad \text{Εξ. 2.21}$$

όπου:

$\theta_g(0^h)$: η τιμή της γωνίας στις 0^h (μεσάνυχτα) σε παγκόσμιο χρόνο (UT1) της συγκεκριμένης ημέρας που αναφέρεται ο χρόνος t .

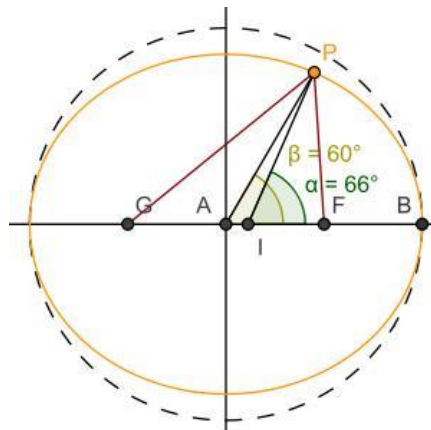
ω_e : η γωνιακή ταχύτητα της περιστροφής της γης και είναι ίση με $7.29211510 \times 10^{-5}$ radians/second

Δt : το χρονικό διάστημα από την 0^h έως τον χρόνο t .

Η γωνία $\theta_g(0^h)$ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μέσου αστρικού χρόνου (GMST) με τον παγκόσμιο χρόνο (UT1) και προσδιορίζεται από τις εξισώσεις 2.15 και 2.17.

2.5.3. Γεωγραφικά Συστήματα Συντεταγμένων

Οι συντεταγμένες των σημείων στην επιφάνεια της γης συνήθως αναφέρονται με γεωγραφικό πλάτος (φ) και μήκος (λ) και με υψόμετρο (h), από το ελλειψοειδές εκ περιστροφής (ΕΕΠ) ή από το γεωειδές. Το γεωγραφικό πλάτος του ΕΕΠ δεν συμπίπτει με το γεωγραφικό πλάτος του γεωκεντρικού συστήματος (Σχήμα 2.29).



Σχήμα 2.29: Το γεωγραφικό πλάτος του ΕΕΠ είναι $\alpha=66^\circ$ ενώ το γεωγραφικό πλάτος του γεωκεντρικού συστήματος είναι $\beta=60^\circ$.

Οι μετατροπές των συντεταγμένων από γεωγραφικές (φ, λ) σε καρτεσιανές του γεωκεντρικού συστήματος (X, Y, Z) γίνονται με τις εξισώσεις 2.22.

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda) \\ Y &= (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda) \\ Z &= [(1 - e^2) \cdot N + h] \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad \text{Εξ. 2.22}$$

όπου:

a, e : ο μεγάλος ημιάξονας και η εκκεντρότητα του ΕΕΠ

φ, λ, h : το γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο από το ΕΕΠ.

Αντίστροφα, ο προσδιορισμός των γεωγραφικών συντεταγμένων (φ, λ, h) από τις καρτεσιανές (X, Y, Z) δίνεται από τις εξισώσεις 2.23.

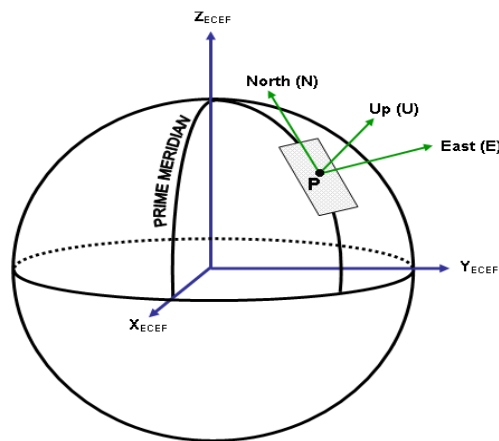
$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z + e^2 \cdot N \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

Εξ. 2.23

$$h = \frac{Z}{\sin(\varphi)} - (1 - e^2) \cdot N$$

Εκτός των άλλων γεωγραφικών συστημάτων που ορίζονται από Datum και ΕΕΠ, πολλές φορές χρησιμοποιούνται και τοποκεντρικά συστήματα αναφοράς, που ορίζουν ένα τοπικό επίπεδο αναφοράς (North, East, Up,) το οποίο προσαρμόζεται σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο P στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30: Τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς N, E, U

Τα παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούνται για την μετατροπή των γεωγραφικών ή καρτεσιανών συντεταγμένων σε επιπεδομετρικές (N, E, U) συντεταγμένες χωρίς να απαιτείται κάποιο προβολικό σύστημα με σκοπό να απλουστεύονται οι υπολογισμοί. Πολλές φορές τα τυπικά σφάλματα των γεωγραφικών ή των καρτεσιανών συντεταγμένων μετατρέπονται σε επιπεδομετρικά για καλύτερη αίσθηση των σφαλμάτων.

Η μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων, που αναφέρονται σε κάποιο γεωκεντρικό σύστημα (ECEF), στο τοποκεντρικό σύστημα, γίνεται με την εξίσωση 2.24.

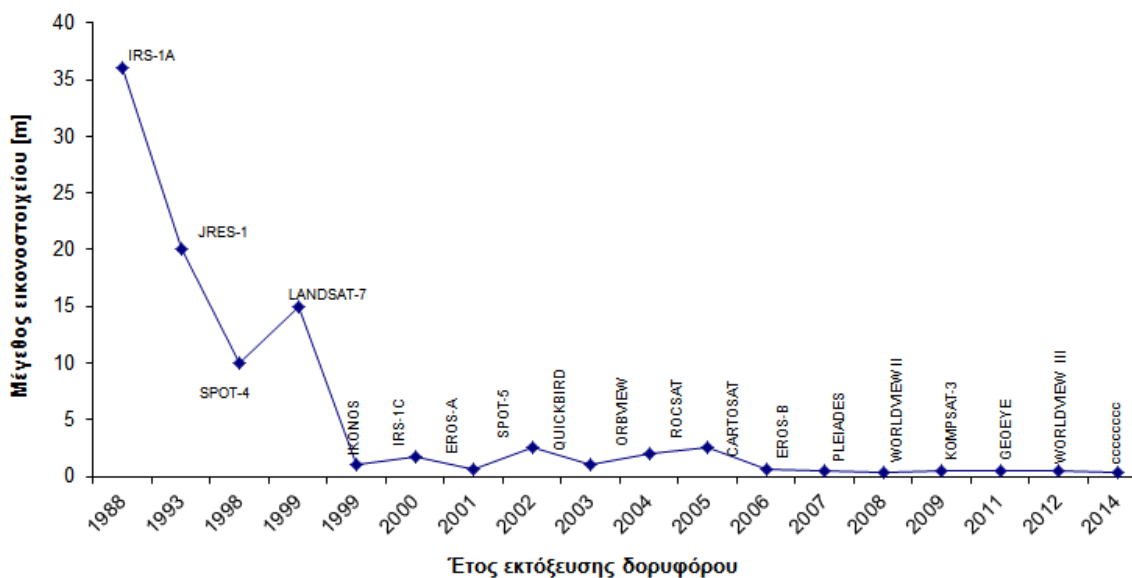
$$\begin{bmatrix} dE \\ dN \\ dU \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\varphi) \cdot \cos(\lambda) & -\sin(\varphi) \cdot \sin(\lambda) & \cos(\varphi) \\ \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda) & \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda) & \sin(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix}_{ECEF} \quad \text{Εξ. 2.24}$$

όπου:

φ, λ : οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου P (Σχήμα 2.30).

2.6. Δορυφορικά Συστήματα Παρατήρησης Γης

Το πρώτο δορυφορικό σύστημα παρατήρησης γης, που τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη γη, ήταν η σειρά LANDSAT (1972) από τη NASA. Από τότε έχουν κατασκευαστεί και τεθεί σε τροχιά γύρω από τη γη σειρά δορυφόρων παρατήρησης γης, όπως οι SPOT, IRS, IKONOS, QUICKBIRD, WORLDVIEW κ.α., οι οποίοι συλλέγουν εικόνες από την επιφάνεια της γης και καταγράφουν μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η διακριτική ικανότητα των δορυφορικών εικόνων αυξάνει συνεχώς χρόνο με το χρόνο. Σήμερα η διακριτική ικανότητα των εμπορικών δορυφορικών συστημάτων φτάνει στα 0.31m στο παγχρωματικό κανάλι και 1.24m στο πολυφασματικό, από το δορυφόρο WORLDVIEW III. Στο Σχήμα 2.31 παρατηρούμε την τάση της μείωσης του μεγέθους της εικονοψηφίδας (αύξηση της διακριτικής ικανότητας), που αποτυπώνεται από τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης την τελευταία δεκαετία.



Σχήμα 2.31: Δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης

2.6.1. Υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης

Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 30 ενεργά δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης. Τα περισσότερα είναι τοποθετημένα σε ηλιοσύγχρονες τροχιές ($i=92^\circ$ έως 98.7°) και σε τροχιακά επίπεδα από 450km έως 860km πάνω από την επιφάνεια της γης. Τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης, αναλόγως του μεγέθους της εικονοψηφίδας που συλλέγουν, κατατάσσονται σε α) *Πολύ Χαμηλής ανάλυσης* (>50m), β) *Χαμηλής ανάλυσης* (μεταξύ 20m και 50m), γ) *Μέσης ανάλυσης* (μεταξύ 5m και 20m), δ) *Υψηλής Ανάλυσης* (μεταξύ 1m και 5m) και ε) *Πολύ Υψηλής Ανάλυσης* (<1m). Ο καθορισμός του μεγέθους της εικονοψηφίδας με το οποίο κατηγοριοποιείται ένα δορυφορικό σύστημα είναι δυναμικό μέγεθος και εξαρτάται από την τεχνολογική ανάπτυξη των αισθητήρων. Παράδειγμα, πριν από δέκα πέντε χρόνια υψηλής ανάλυσης θεωρούνταν οι εικόνες με μέγεθος εικονοψηφίδας 10m. Σήμερα υψηλής ανάλυσης θεωρούνται οι εικόνες με μέγεθος εικονοψηφίδας μικρότερης των 5m. Στον Πίνακα 2.1 δίνονται μερικά από τα δορυφορικά συστήματα τα οποία έχουν τεθεί σε τροχιά την τελευταία δεκαετία και είναι δορυφορικά συστήματα *Μέσης* έως *Πολύ Υψηλής Ανάλυσης*. Η κατάταξη τους έχει γίνει με βάση το χρόνο εκτόξευσης.

Δορυφορικό Σύστημα	Ημερομηνία Εκτόξευσης	Ύψος Τροχιάς (Km)	Κλίση Τροχιακού επιπέδου (deg)	Περίοδος Τροχιάς (min)	Κανάλια Σάρωσης	Μήκος Κύματος (μm)	Μέγεθος Εικονοστοιχείου (m)	Πλάτος Εικόνας (pixels)	Πλάτος Σάρωσης (Km)	Εσπική Απόσταση Κάμερας (m)	Γωνία Θέασης (deg)	Δυνατότητα Στέρεο
IKONOS II	24/9/1999	680	98.1	98	PAN	0.45-0.9	1	13500	11	10	±60	NAI
					BLUE	0.45-0.53	4					
					GREEN	0.52-0.61	4					
					RED	0.64-0.72	4					
					NIR	0.77-0.88	4					
TERRA (ASTER) VNIR	18/12/1999	750	98.2	98.8	1a	0.52-0.6	15	4100	60	0.329	±24	NAI
					2a	0.63-0.69	15					
					3N	0.78-0.86	15					
					3B	0.78-0.86	15					
EROS-A1	5/12/2000	480	97.3	94-96	PAN	0.5-0.9	1.8	7800	14	3.5	±45	NAI
QUICKBIRD 2	18/10/2001	450	97.2	93.6	PAN	0.45-0.9	0.6	2700	16	8.8	±30	NAI
					BLUE	0.45-0.52	2.4					
					GREEN	0.52-0.6	2.4					
					RED	0.63-0.69	2.4					
					NIR	0.76-0.9	2.4					
SPOT V (HRG)	4/5/2002	832	98.7	101	PAN	0.49-0.69	5	12000	60	1.082	±27	NAI
					GREEN	0.49-0.61	10	6000				
					RED	0.61-0.68	10	6000				
					NIR	0.79-0.89	10	6000				
					SWIR	1.580-1.750	20	3000				
ORBVIEW 3	26/6/2003	480	97.3	92.5	PAN	0.5-0.9	1	8000	8	2.82	±45	NAI
					BLUE	0.45-0.52	4					
					GREEN	0.52-0.6	4					
					RED	0.625-0.69	4					
					NIR	0.76-0.9	4					
ROCSAT-2	20/5/2004	891	98.99	102.8	PAN	0.45-0.9	2	12000	24	2.896	±45	NAI
					BLUE	0.45-0.52	8					
					GREEN	0.52-0.6	8					
					RED	0.63-0.69	8					
					NIR	0.76-0.9	8					

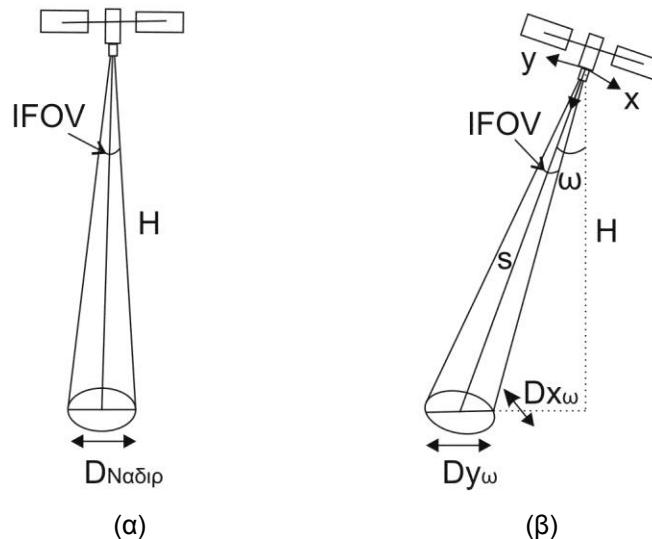
IRS-P5 CARTOSAT-1	5/5/2005	618	98.87	97	PAN	0.5-0.85	2.5	12288	30	1.98	±26	NAI
ALOS(PRISM)	24/1/2006	692	98.3	98.7	PAN	0.52-0.72	2.5	14000	35	2	±24	NAI
EROS-B	25/4/2006	500	97.2	94.6	PAN	0.5-0.9	0.7	10147	7	5		NAI
KOMPSAT-2	28/6/2006	685	98.13	98	PAN	0.5-0.9	1	15			±45	NAI
					BLUE	0.45-0.52	4					
					GREEN	0.52-0.6	4					
					RED	0.63-0.69	4					
					NIR	0.76-0.9	4					
WORLDVIEW 1	18/9/2007	696		94.6	PAN	0.5-0.9	0.5	35170	17.6	7.949	±45	NAI
CARTOSAT-2A	28/4/2008	635	97.94	97.4	PAN	0.5-0.85	0.8		9.6		±45	NAI
GEOEYE 1	6/9/2008	681			PAN	0.45-0.8	0.41	35000	15.2	13.3	±60	NAI
					BLUE	0.45-0.51	1.65					
					GREEN	0.51-0.58	1.65					
					RED	0.655-0.69	1.65					
					NIR	0.78-0.92	1.65					
THEOS	1/10/2008	822	98.7	101.4	PAN	0.45-0.9	2	11000	22	±30	NAI	
					BLUE	0.45-0.52	15	6000	90			
					GREEN	0.53-0.6	15					
					RED	0.62-0.69	15					
					NIR	0.77-0.9	15					
WORLDVIEW 2	8/10/2009	770	97.8	100.2	PAN	0.45-0.8	0.46			35000	16.4	13.3
					BLUE	0.4-0.51	2.8					
					GREEN	0.51-0.58	2.8					
					RED	0.63-0.69	2.8					
					YELLOW	0.585-0.625	2.8					
					R.E.	0.705-0.745	2.8					
					C.B.	0.4-0.45	2.8					
					NIR1	0.77-0.895	2.8					
					NIR2	0.860-1.040	2.8					
							9300					
CARTOSAT-2B	12/7/2010	637	97.71	97.44	PAN	0.5-0.85	0.8	12288	9.6	5.6	±26	NAI
PLEIADES-HR	17/12/2011	700	98.13	98.5	PAN	0.48-0.82	0.5	30000	20	12.905	±47	NAI
					BLUE	0.45-0.53	2.8					
					GREEN	0.51-0.59	2.8					
					RED	0.62-0.7	2.8					
					NIR	0.775-0.915	2.8					

KOMPSAT-3	17/5/2012	694	98.2	98.5	PAN	0.45-0.9	0.7	24000	16.8		±45	NAI
					BLUE	0.45-0.52	2.8					
					GREEN	0.52-0.6	2.8					
					RED	0.63-0.69	2.8					
					NIR	0.76-0.9	2.8					
WORLDVIEW 3	13/8/2014	617	98	97	PAN	0.45-0.8	0.31	42000			±45	NAI
					BLUE	0.45-0.51	1.24					
					GREEN	0.51-0.58	1.24					
					YELLOW	0.585-0.625	1.24					
					RED	0.63-0.69	1.24					
					REDEDGE	0.705-0.745	1.24					
					NIR IR-1	0.770-0.895	1.24					
					NIR IR-2	0.866-1.040	1.24					
KOMPSAT-3A	25/3/2015	528	97.5	95.2	PAN	0.45-0.9	0.55	21800			±45	NAI
					BLUE	0.45-0.52	2.2					
					GREEN	0.52-0.6	2.2					
					RED	0.63-0.69	2.2					
					NIR	0.76-0.9	2.2					

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης Μέσης, Υψηλής και Πολύ Υψηλής ανάλυσης.

Τα παραπάνω δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούν κάμερες τύπου PushBroom και η ανάλυση της εικόνας εξαρτάται από την εστιακή απόσταση του συστήματος φακών, από το μέγεθος του φωτοστοιχείου του αισθητήρα και από το ύψος πτήσης. Το μέγεθος της εικονοψηφίδας στο έδαφος συναρτήσκει του ύψους πτήσης και της εστιακής απόστασης της κάμερας του δορυφόρου προσδιορίζεται από την εξίσωση 2.4. Μία άλλη σημαντική παράμετρος για τους PushBroom αισθητήρες είναι η στιγμιαία γωνία θέασης (IFOV, Instant Field of View). Η στιγμιαία γωνία θέασης είναι η ελάχιστη κωνική γωνία με την οποία μπορεί ο αισθητήρας να συλλέξει μία στοιχειώδη επιφάνεια της γης. Το ελάχιστο μέγεθος της επιφάνειας, που συλλέγει ο αισθητήρας, καθορίζει τη χωρική ανάλυση της εικόνας η οποία καταγράφεται σε ένα pixel (Vosikis, 2003). Η γωνία αυτή για τα δορυφορικά συστήματα παίρνει τιμές μικρότερες των $100\mu\text{rad}$ ή 0.0057deg ($\sim 21\text{sec}$).

Η σχέση μεταξύ της στιγμιαίας γωνίας θέασης (IFOV) και του μεγέθους της εικονοψηφίδας που μπορεί να συλλέξει ο αισθητήρας φαίνεται στο σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.32: Συλλογή στοιχειώδους επιφάνειας γης (α) στο ναδίρ, (β) με γωνία κλίσης ω .

Οι εξισώσεις 2.29-2.31 περιγράφουν τη σχέση μεταξύ της στιγμιαίας γωνίας θέασης (IFOV) και της στοιχειώδους επιφάνειας με διάσταση D (Wang, 1990):

$$D_{\text{Ναδῖρ}} = 2 \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\text{IFOV}}{2}\right) \quad \text{Εξ. 2.29}$$

$$D_{y_{\omega}} = \frac{D_{\text{Ναδῖρ}}}{\cos(\omega)} \text{ στην κάθετη κατεύθυνση του δορυφόρου} \quad \text{Εξ. 2.30}$$

$$D_{x_{\omega}} = \frac{D_{\text{Ναδῖρ}}}{\cos^2(\omega)} \text{ κατά την κατεύθυνση του δορυφόρου (Σχήμα 3.32β)} \quad \text{Εξ. 2.31}$$

όπου:

$D_{\text{Ναδῖρ}}$: Το μέγεθος της στοιχειώδους επιφάνειας γης όταν η λήψη γίνεται από το ναδῖρ

$D_{y_{\omega}}$: Το μέγεθος της στοιχειώδους επιφάνειας γης κατά την κάθετη διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου σε γωνία ω από το ναδῖρ.

$D_{x_{\omega}}$: Το μέγεθος της στοιχειώδους επιφάνειας γης κατά την διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου σε γωνία ω από το ναδῖρ.

H : Το ύψος πτήσης του δορυφόρου

ω : Η γωνία κλίσης του δορυφόρου από το Ναδῖρ.

IFOV: Η στιγμιαία γωνία θέασης, που προσδιορίζεται όπως παρακάτω:

$$\text{IFOV} = 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{d}{2 \cdot f}\right) \cong \frac{d}{f} \quad \text{Εξ. 2.32}$$

όπου:

d : Η διάσταση του φωτοστοιχείου του αισθητήρα

f : Η εστιακή απόσταση της κάμερας του δορυφόρου.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 2.29 και 2.32 παρατηρούμε ότι το μέγεθος της στοιχειώδους επιφάνειας της γης, που μπορεί να συλλέξει ο αισθητήρας, εξαρτάται από την εστιακή απόσταση των φακών, από τη διάσταση του φωτοστοιχείου του αισθητήρα και από το ύψος πτήσεως του δορυφόρου (Zhang, 2002). Συγκεκριμένα, το μέγεθος της στοιχειώδους επιφάνειας της γης μικραίνει, και κατ' επέκταση αυξάνει η χωρική ανάλυση της εικόνας, όταν η εστιακή απόσταση μεγαλώνει, η διάσταση του φωτοστοιχείου μικραίνει και το ύψος

πτήσης του δορυφόρου είναι χαμηλό. Τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης τίθενται σε τροχιά λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους αλλά και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από την κίνηση των δορυφόρων στο διάστημα. Παράδειγμα, το μικρό ύψος πτήσης του δορυφόρου (κάτω των 450km) μικραίνει την διάρκεια ζωής του, λόγω των μεγάλων αντιστάσεων που δημιουργούνται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Επίσης, εάν η εστιακή απόσταση είναι μεγάλη το πλάτος σάρωσης μειώνεται με αποτέλεσμα να συλλέγονται εικόνες με πολύ μικρό πλάτος.

Οι οίκοι των δορυφορικών συστημάτων βελτιώνουν συνεχώς τις δυνατότητες λήψης εικόνων και προβαίνουν είτε στην αναβάθμιση των παλαιότερων με σύγχρονους (SPOT-1, 2, 4, 5 και 6) είτε εκτοξεύοντας νέους δορυφόρους, όπου λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παραπάνω παράγοντες που επηρεάζουν την λήψη εικόνων και συνεκτιμώνται αναλόγως των επιδιωκόμενων στόχων. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης που έχουν προγραμματισθεί να εκτοξευθούν στο εγγύς μέλλον με τις τεχνικές τους δυνατότητες όπως έχουν ανακοινώσει οι αντίστοιχοι οίκοι δορυφορικών συστημάτων.

Δορυφορικό Σύστημα	Ημερομηνία Εκτόξευσης	Ύψος Τροχιάς (Km)	Μέγεθος Εικονοπηφίδας PAN/MS (m)	Πλάτος Σάρωσης (Km)
FORMOSAT-5	2016	720	2/4	24
WORLDVIEW-4	2016	681	0.34/1.20	14.5
ALOS-3	2016	618	0.8	50

Πίνακας 2.2: Προγραμματισμός εκτόξευσης νέων δορυφορικών συστημάτων με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά (Πηγή: http://www.itc.nl/research/products/sensordb/launch_schedule.aspx).

Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης των δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης έχουν κατασκευαστεί μικρά σε όγκο και βάρος δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης τα οποία ονομάζονται small satellites.

Η κατηγοριοποίησή τους σύμφωνα με το International Academic of Astronautics (IAA) (Sandau, 2006) αναλόγως του βάρους γίνεται όπως παρακάτω:

- Mini satellites για βάρος μικρότερο των 1000Kgr
- Micro satellites για βάρος μικρότερο των 100Kgr
- Nano satellites για βάρος μικρότερο των 10Kgr
- Pico satellites για βάρος μικρότερο του 1Kgr.

Τα παραπάνω δορυφορικά συστήματα είναι προσανατολισμένα για την παρακολούθηση ορισμένων φυσικών φαινομένων ή διαφόρων εφαρμογών τηλεπισκόπησης. Η τάση των νέων δορυφορικών συστημάτων είναι να ελαχιστοποιούνται μεγέθη των ηλεκτροπτικών συστημάτων που διαθέτουν, έτσι ώστε να είναι ελαφρύτερα, να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και το κόστος κατασκευής, εκτόξευσης και συντήρησης να μειώνεται αρκετά. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται κάποια small satellites συστήματα παρατήρησης γης.

Δορυφορικό Σύστημα	Ημερομηνία Εκτόξευσης	Βάρος (Kg)	Μέγεθος Εικονοψηφίδας pan/ms (m)
Earth observation-1 NASA	2000		10
PROBA/ESA	2001	94	5
EKOSAT-IR/Germany, Israel, Korea	2004	200	5
TOPSAT/UK	2005	120	2.8/5.6
Beijing-1/China	2005	166	4
MACSat/ Korea, Malaysia	2009	190	2.5
MSMI/ South Africa	2009	230	2.7/4.6
DST/ Germany	2012	100	1

Πίνακας 2.3: Small satellites συστήματα συλλογής εικόνας, με βάρος <500kg και ανάλυση εικόνας καλύτερη των 10m.

Παρακάτω θα αναφερθούν μερικά αντιπροσωπευτικά δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης γης, τα οποία έχουν τη δυνατότητα συλλογής στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων και είναι κατάλληλα για φωτογραμμετρική επεξεργασία.

2.6.2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ASTER

Το δορυφορικό σύστημα ASTER (Advanced Spaceborne Emission Thermal and Reflection Radiometer) είναι ένα δορυφορικό σύστημα που διαθέτει πολυφασματικό αισθητήρα και εκτοξεύτηκε από τη NASA το Δεκέμβριο του 1999. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4.

Τύπος Τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη
Μέσος άξονας περιστροφής	7078 Km
Χρόνος διέλευσης από τον ισημερινό	10:30
Ύψος πτήσης	705 Km
Κλίση τροχιακού επιπέδου	98.2 deg
Περίοδος επισκεψιμότητας	16 ημέρες
Περίοδος τροχιάς	98.88 min
Βάρος Δορυφόρου	5,040 Kgr

Πίνακας 2.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφορικού συστήματος ASTER

Ο δορυφόρος ASTER αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- 1) το σύστημα στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο (VNIR), το οποίο έχει 3 μπάντες με μέγεθος εικονοψηφίδας 15m, που διαθέτει και πίσω τηλεσκόπιο για δυνατότητα λήψης στερεοσκοπικής εικόνας,
- 2) το σύστημα στο υπέρυθρο, το οποίο καταγράφει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε 6 μπάντες με χωρική ανάλυση 30m

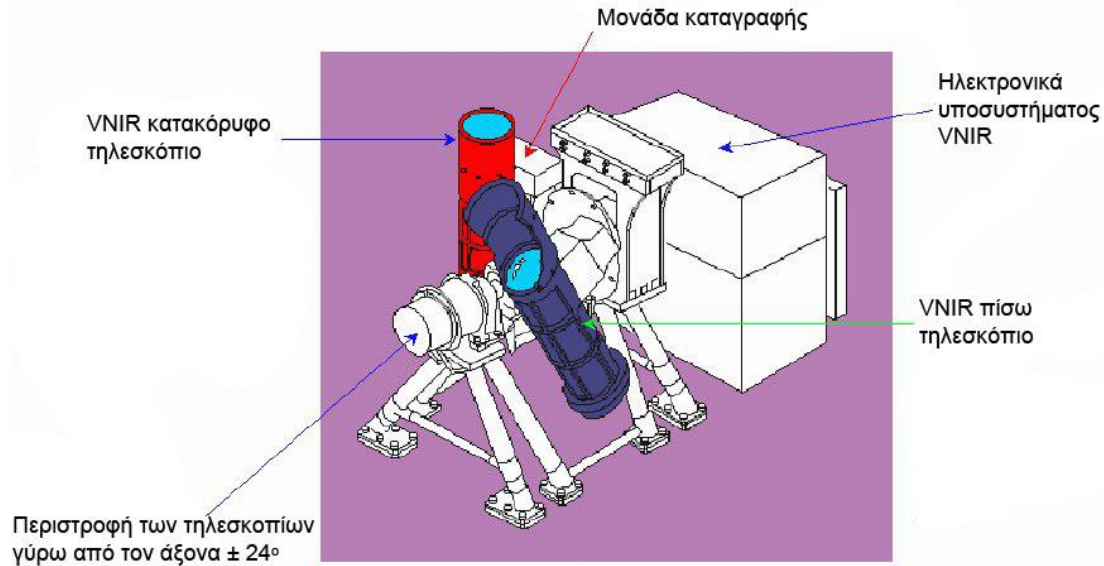
- 3) το σύστημα στο θερμικό υπέρυθρο, το οποίο έχει 5 μπάντες με χωρική ανάλυση 90m.

Το κάθε σύστημα λειτουργεί σε διαφορετικό φάσμα.

2.6.2.1. Το υποσύστημα στο ορατό (ASTER-VNIR)

Το υποσύστημα του ASTER στο ορατό, αποτελείται από δύο ανεξάρτητα τηλεσκόπια, κατασκευασμένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τις ακτινικές διαστροφές των φακών και είναι προσανατολισμένα κατά τρόπο ώστε το ένα τηλεσκόπιο να λαμβάνει κατακόρυφες εικόνες και το άλλο να λαμβάνει πίσω και πλάγιες εικόνες, κατά την κίνηση του δορυφόρου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.33. Οι αισθητήρες της κάθε μπάντας αποτελούνται από μία μόνο γραμμή και περιέχουν 5.000 στοιχεία (CCD's), από τα οποία μόνο 4.100 χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της εικόνας. Η στιγμιαία γωνία θέασης (IFOV) για την κατακόρυφη λήψη είναι 21.3 μrad , ενώ για την πίσω 18.6 μrad . Το μέγεθος του στοιχείου του αισθητήρα είναι 7 μm . Από τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την εστιακή απόσταση των τηλεσκοπίων:

$$f_{nadir} = \frac{0.007\text{mm}}{0.0000213} \Rightarrow f = 328.6\text{mm} \quad f_{back} = \frac{0.007\text{mm}}{0.0000186\text{rad}} \Rightarrow f = 376.344\text{mm}$$



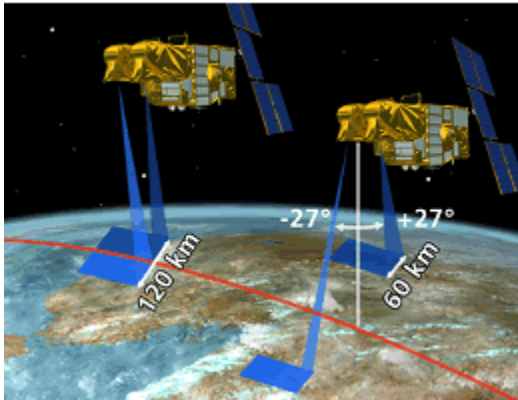
Σχήμα 2.33 : Υποσύστημα VNIR του δορυφορικού συστήματος ASTER

2.6.3. SPOT V

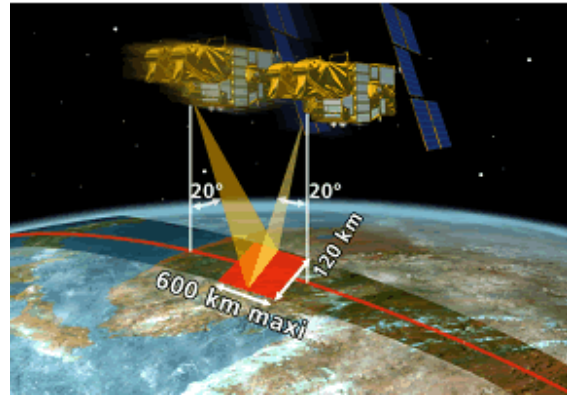
Το δορυφορικό σύστημα SPOT-V εκτοξεύθηκε και τέθηκε σε τροχιά στις 4 Μαΐου 2002, από τις CNES και SPOTIMAGE. Διαθέτει 2 δέκτες HRG (High Resolution Geometric), αποτελούμενους από 12.000 στοιχεία (CCD's), που βρίσκονται σε μία γραμμή, με δυνατότητα λήψης εικόνας με μέγεθος εικονοψηφίδας 5m (ή 2.5m με την τεχνολογία supermode) στο παγχρωματικό φάσμα και 10m στο πολυφασματικό. Επίσης, διαθέτει ξεχωριστό σύστημα λήψης στερεοσκοπικών εικόνων από το δέκτη HRS (High Resolution Stereoscopic), που αποτελείται από 12.000 στοιχεία (CCD's) που βρίσκονται σε μία γραμμή, με ταυτόχρονη λήψη δύο εικόνων (εμπρός και πίσω), με μέγεθος εικονοψηφίδας 10x5 m, κατά την κίνηση του δορυφόρου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5 και στο Σχήμα 2.34 φαίνεται η γεωμετρία λήψης των HRG και HRS δεκτών του δορυφόρου SPOT-V.

Τύπος Τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη
Ύψος Πτήσης	822 Km
Περίοδος επισκεψιμότητας	26 ημέρες
Εύρος Θέασης (FOV) HRG	4°
Πλάτος σάρωσης HRG	60 Km
Πλευρική γωνία λήψης	±27°
Εύρος Θέασης (FOV)HRS	8°
Πλάτος σάρωσης HRS	80 Km

Πίνακας 2.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος SPOT-V.



Σχήμα 2.34(α): Λήψη εικόνων από HRG



Σχήμα 2.34(β): Λήψη εικόνων από HRS

2.6.4. EROS-1A/B

Η Image Sat International N.V. κατασκεύασε το δορυφορικό σύστημα παρατήρησης γης EROS. Στις 5 Δεκεμβρίου 2000 έγινε η επιτυχής εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου EROS-A και στις 25 Απριλίου 2006 έγινε η εκτόξευση και του δεύτερου δορυφόρου EROS-B. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6.

Ο δέκτης του δορυφορικού συστήματος EROS-A πραγματοποιεί ασύγχρονη σάρωση για τη συλλογή (μόνο παγχρωματικών) εικόνων, δηλαδή η φαινομενική ταχύτητα του δορυφόρου ως προς το έδαφος είναι διαφορετική από την ταχύτητα σάρωσης με σκοπό τον περισσότερο «φωτισμό» της γραμμής σάρωσης του

εδάφους και αυτό επιτυγχάνεται με αργή στροφή προς τα πίσω του δορυφόρου. Ο δέκτης του δορυφορικού συστήματος EROS-A αποτελείται από 7043 ενεργά στοιχεία (CCD's). Αντίθετα, ο δέκτης του δορυφορικού συστήματος EROS-B χρησιμοποιεί την τεχνολογία TDI αντί της ασύγχρονης σάρωσης.

	EROS-A	EROS-B
Τύπος Τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη	Ηλιοσύγχρονη
Ύψος Πτήσης	510 Km	510 Km
Χρόνος διέλευσης από τον ισημερινό	9:45	13:45
Τύπος δέκτη	Pushbroom	Pushbroom
Δέκτης	CCD	CCD-TDI
Μέγεθος εικονοψηφίδας	1.9 m	0.7 m
Πλάτος σάρωσης	14 Km	7 Km
Πλευρική γωνία λήψης	$\pm 40^\circ$	$\pm 40^\circ$

Πίνακας 2.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων EROS-A, B.

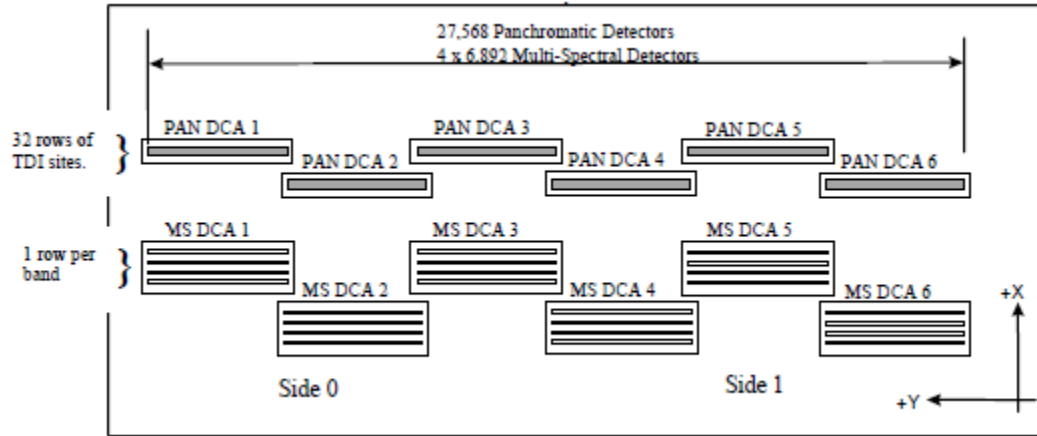
2.6.5. QUICKBIRD

Το δορυφορικό σύστημα QuickBird εκτοξεύτηκε από την DiditalGlobe στις 18 Οκτωβρίου 2001, με δυνατότητα συλλογής παγχρωματικών, και πολυφασματικών εικόνων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου συνοψίζονται στον Πίνακα 2.7.

Τύπος Τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη, κλίση 97.2°
Ύψος Πτήσης	450 Km
Χρόνος διέλευσης από τον ισημερινό	10:30
Τύπος δέκτη	Pushbroom
Δέκτης	CCD-TDI
Μέγεθος εικονοψηφίδας	0.6m (P), 2.44 (M)
Πλάτος σάρωσης	16.5 Km
Πλευρική γωνία λήψης	$\pm 45^\circ$

Πίνακας 2.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος QuickBird.

Ο δέκτης που φέρεται από το δορυφορικό σύστημα QuickBird αποτελείται συνολικά από 27.568 παγχρωματικά στοιχεία και 6.892 πολυφασματικά στοιχεία (CCD's), τα οποία περιέχονται σε 6 επιμέρους CCD (Σχήμα 2.35).



Σχήμα 2.35: Εστιακό επίπεδο του δέκτη που φέρεται στο δορυφορικό σύστημα QuickBird

2.6.6. WorldView

Το δορυφορικό σύστημα WorldView-1 εκτοξεύθηκε και τέθηκε σε τροχιά στις 18 Σεπτεμβρίου 2007, από την εταιρεία Digital Globe. Στις 8 Οκτωβρίου 2009 εκτοξεύθηκε το δορυφορικό σύστημα WorldView-2 και στις 13 Αυγούστου 2014 το δορυφορικό σύστημα WorldView-3. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων WorldView περιγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.8.

	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
Τύπος Τροχιάς	Ηλιοσύγχρονη	Ηλιοσύγχρονη	Ηλιοσύγχρονη
Ύψος Πτήσης	496 Km	770 Km	617 Km
Χρόνος διέλευσης από τον ισημερινό	10:30	10:30	10:30
Περίοδος τροχιάς	94.6 min	100 min	97 min
Δέκτης	1 Pan	1 Pan, 8 Mult.	1 Pan, 8 Mult VNIR, 8 SWIR, 12 CAVIS
Μέγεθος εικονομηφίδας	0.5 m	0.46 m (P), 1.84m (M)	0.31m (P), 1.38m (M), 4.10m (S), 30m CAVIS
Πλάτος σάρωσης	17.7 Km	16.4 Km	26.6 Km
Πλευρική γωνία λήψης	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$

Πίνακας 2.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορ. συστημάτων WorldView -1, 2 και 3

Τα δορυφορικά συστήματα WorldView έχουν τη δυνατότητα συλλογής εικόνων μήκους 200Km σε χρονικό διάστημα 10 δευτερολέπτων. Μπορούν να συλλέξουν μεγάλες λωρίδες εδάφους (360Km x 16.4Km) ή μεγάλες επιφάνειες (112Km x 138Km). Η δυνατότητα συλλογής στερεοσκοπικών εικόνων επιφάνειας είναι 112Km x 63Km.

2.6.7. Δορυφορικό σύστημα Pleiades

Το δορυφορικό σύστημα Pleiades (1A και 1B) είναι ένα σύστημα παρατήρησης γης πολύ υψηλής ανάλυσης έχοντας δυνατότητα λήψης εικόνων με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.5m. Το σύστημα Pleiades 1A εκτοξεύτηκε και τέθηκε σε τροχιά στις 16-12-2011 και ακολούθησε το σύστημα 1B στα τέλη του 2012. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των ως άνω δορυφορικών συστημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9.

Number of Satellites	2 -- Pléiades 1A and Pléiades 1B
Launch	Pléiades 1A: 16 th December 2012; <i>Pléiades 1B</i> : Q4 2012
Altitude	694km
Type	Sun-synchronous, 10:30 AM descending node
Period	98.79 minutes
Inclination	98.2°
Cycle	26 days
Optical System	The telescope is a Korsch type combination with 65cm aperture diameter, focal length of 12.905m, f/20, TMA optics
Spectral Bands	Pan: 0.47-0.83 μm ; Blue = 0.43-0.55 μm , Green = 0.50-0.62 μm , Red = 0.59-0.71 μm , Near Infrared = 0.74-0.94 μm (NIR)
Detectors	Panchromatic array assembly: 5 x 6000 (30,000 cross-track) pixels Multispectral array assembly: 5 x 1500 (7500 in cross-track) pixels Each pixel having a size of 13 μm in Panchromatic
Ground Sampling Distance (nadir)	Panchromatic: 0.7m; Multispectral: 2.8m
Product Resolution	Panchromatic: 0.5m; Multispectral: 2.0m
Swath Width	20km at nadir
Dynamic Range at Acquisition	12 bits per pixel
NIIRS Class	6
Viewing Angle	Standard: +/- 30°; Maximum: +/- 47°
Revisit Frequency, using Both Pléiades 1A & 1B	<ul style="list-style-type: none"> with +/- 30° viewing angle, 1.3 days and better above 40° latitude, 1.7 days at equator; with +/- 45° viewing angle, daily revisit of any point on the globe
Pointing Agility	Roll of 60° within 25 seconds; Pitch of 60° within 25 seconds; 200km in 11 seconds including stabilization time
Acquisition Capability	450 segments/day (up to 600) – relying on the two main receiving stations, Toulouse (France) and Kiruna
Location Accuracy at Nadir	Performance (Oct. 2012): 8.5m CE90 with refined attitude data
Onboard Storage	600 GB (Solid State Mass Memory)
Instrument TM Link Rate	The output rate is nominally of 465 MB/sec, on three individual channels of 155 MB/sec each
Mission Lifetime	Minimum of 5 years with an estimated life of more than 10 years ¹

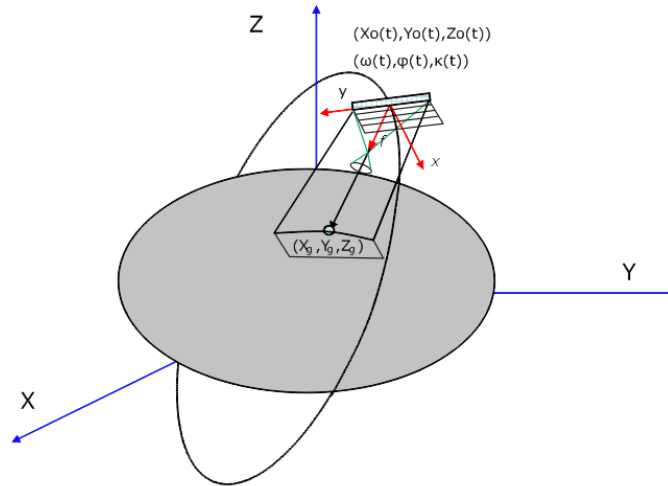
Πίνακας 2.9: Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων Pleiades 1A και 1B
(Pleiades imagery user guide, ASTRIUM, October 2012 – V 2.0)

2.7. Δορυφορική Φωτογραμμετρία

Η δορυφορική φωτογραμμετρία έχει μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις κλασικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες, στις οποίες χρησιμοποιούνται αεροφωτογραφίες. Οι διαφοροποιήσεις αφορούν περισσότερο στις συνθήκες λήψης των εικόνων. Οι δορυφορικές εικόνες συλλέγονται από φωτομηχανές σε δορυφορικά συστήματα τα οποία βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη (Jacobsen, 1998). Η συνήθης απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της γης είναι από 400 έως 800km, σε αντίθεση με το αεροπλάνο που η απόσταση λήψης είναι μέχρι 7km. Τα συστήματα των φακών της μηχανής είναι σχεδιασμένα κατά τέτοιο τρόπο (συνήθως είναι τηλεσκόπια τύπου Korsch με εστιακή απόσταση μεγαλύτερη των 10m) ώστε να επιτρέπουν τη λήψη εικόνας σε απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης (Morring, 2013). Οι προσανατολισμοί (εσωτερικός, σχετικός και εξωτερικός) των δορυφορικών εικόνων γίνονται παρόμοια με αυτούς που εκτελούνται στην κλασική ψηφιακή φωτογραμμετρία με χρήση ψηφιακών μηχανών τύπου pushbroom.

2.7.1. Γεωμετρία λήψης Δορυφορικών Εικόνων από Pushbroom αισθητήρες

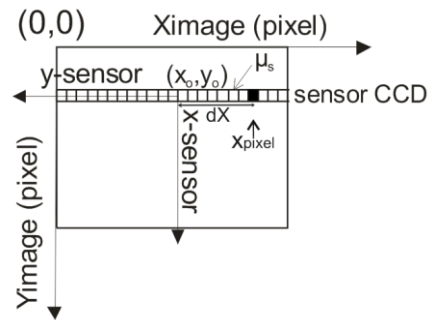
Οι δορυφορικές εικόνες, από τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης, συλλέγονται συνήθως από Pushbroom αισθητήρες. Οι αισθητήρες pushbroom είναι γραμμικοί αισθητήρες (γραμμικά CCDs) εξοπλισμένοι με συστήματα φακών (τηλεφακούς) σταθερής εστιακής απόστασης (από 0.5 έως 13.3m) και η εικόνα που συλλέγεται είναι αποτέλεσμα μιας ακολουθίας γραμμών (εικόνων), που η κάθε γραμμή χαρακτηρίζεται από διαφορετικά στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού ($X_o(t_i)$, $Y_o(t_i)$, $Z_o(t_i)$, $\omega(t_i)$, $\varphi(t_i)$, $\kappa(t_i)$). Ως αποτέλεσμα, η συνθήκη συγγραμμικότητας να ισχύει για κάθε γραμμή λήψης ως συνάρτηση του χρόνου (Poli, 2004). Η γεωμετρία λήψης των δορυφορικών εικόνων περιγράφεται στο Σχήμα 2.36.



Σχήμα 2.36: Γεωμετρία λήψης εικόνων από pushbroom κάμερα, που φέρεται σε δορυφορικό σύστημα

2.7.2. Σύστημα Αναφοράς των Δορυφορικών Εικόνων

Οι συντεταγμένες θέσης ενός σημείου επί της δορυφορικής εικόνας προσδιορίζονται από τη γραμμή και τη στήλη των εικονοψηφίδων (pixels) που βρίσκεται το σημείο. Ως αφετηρία λαμβάνεται η πάνω αριστερή γωνία της δορυφορικής εικόνας (Σχήμα 2.37).



Σχήμα 2.37: Σύστημα αναφοράς δορυφορικών εικόνων

Στην περίπτωση των CCDs pushbroom γραμμικών αισθητήρων η κάθε γραμμή που συλλέγεται βρίσκεται στο εστιακό επίπεδο του φακού και το σύστημα αναφοράς (της σαρωμένης γραμμής) υλοποιείται με τον y -άξονα να κείται κατά

μήκος της γραμμής του CCD, τον x-άξονα κάθετο στην κίνηση του δορυφόρου (ή και αντίστροφα) και τον z-άξονα με διεύθυνση προς τη γη, ώστε να υλοποιείται το δεξιόστροφο ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς (Fritsch, 2000). Το σημείο αρχής των αξόνων ταυτίζεται με το προβολικό κέντρο των φακών που αποτυπώνεται στη γραμμή σάρωσης. Η μετατροπή των συντεταγμένων από το σύστημα της εικόνας (pixels) στο σύστημα της κάμερας γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση 2.33.

$$y_{\text{sensor}} = dX \cdot \mu_s \quad \text{Εξ. 2.33}$$

όπου:

$$dX = \left[\left(\frac{\text{SensorColumn}}{2} \right) - X_{\text{pixel}} \right] \quad \text{Εξ. 2.34}$$

μ_s : το μέγεθος του φατνίου του αισθητήρα

2.7.3. Εφημερίδες Δορυφόρων

Οι εφημερίδες των δορυφόρων είναι πίνακες, που δίνουν τη θέση του δορυφόρου στο διάστημα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η θέση του μπορεί να προσδιορίζεται είτε στο εσωτερικό αδρανειακό σύστημα ECI (Neto, 1992) είτε στο γεωκεντρικό παγκόσμιο σύστημα (ECEF), όπως το WGS-86, ITRF κ.α. Για τη γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων με εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων (Rigorous Models), όπως η εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας, απαιτείται η γνώση της θέσης του δορυφόρου και οι στροφές γύρω από τους άξονες κίνησης του δορυφόρου. Το άνυσμα θέσης του δορυφόρου ($\vec{R}[X(t), Y(t), Z(t)]$) και το άνυσμα της ταχύτητάς του ($\vec{V}[V_x(t), V_y(t), V_z(t)]$) σε δεδομένη χρονική στιγμή t , δίνεται μέσω των εφημερίδων των δορυφορικών συστημάτων. Από πολλά δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης, δίνονται επίσης και τα στοιχεία στροφών των αξόνων κίνησης των δορυφόρων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, με τη μορφή Roll(t), Pitch(t), Yaw(t) με τις αντίστοιχες ταχύτητές τους ως προς τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα. Πολλές φορές τα στοιχεία των εφημερίδων δίνονται σε μορφή Κεπλέριων στοιχείων (2.5.2) από τα οποία μπορούμε να υπολογίσουμε το άνυσμα θέσης και το άνυσμα ταχύτητας του δορυφόρου (2.8.3.3).

2.7.3.1. Μέθοδοι παρεμβολής για το άνωσμα θέσης του Δορυφορικού Συστήματος

Όπως έχει προαναφερθεί, τα στοιχεία της θέσης P και της ταχύτητας V του δορυφορικού συστήματος, επί της τροχιάς του, δίνονται σε τακτά διακριτά χρονικά διαστήματα μέσω των εφημερίδων. Για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου σε τυχαία χρονική στιγμή t , η οποία προσδιορίζεται μεταξύ του χρονικού διαστήματος $[t_i \dots t_j]$, εφαρμόζονται μέθοδοι παρεμβολής. Συνήθως εφαρμόζονται δύο τύποι παρεμβολών για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου σε τυχαία χρονική στιγμή t_0 (όπου $t_i < t_0 < t_j$): η παρεμβολή Lagrangian ή η προσαρμογή πολυωνύμων 2^{ου} ή μεγαλύτερου βαθμού στις τιμές που δίνονται από τις εφημερίδες (Crippa and Forlani, 1990), όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.35.

$$\vec{P}_{x,y,z}(t) = A_{x,y,z} \cdot t^3 + B_{x,y,z} \cdot t^2 + C_{x,y,z} \cdot t + D_{x,y,z} \quad \text{Εξ. 2.35}$$

Στη συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα παρεμβολής Lagrangian στις τιμές θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου, χρησιμοποιώντας 4 τιμές θέσης και ταχύτητας πριν (t_1, t_2, t_3, t_4) και 4 τιμές μετά (t_5, t_6, t_7, t_8) από τη χρονική στιγμή t , που ζητείται η παρεμβολή. Η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου δίνονται από τις εξισώσεις 2.36α και 2.36β.

$$\vec{P}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{P}(t_j) \times \prod_{i=1}^8 (t-t_i)}{\prod_{i=1}^8 (t_j-t_i)} \quad \text{Εξ. 2.36α}$$

$$\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{V}(t_j) \times \prod_{i=1}^8 (t-t_i)}{\prod_{i=1}^8 (t_j-t_i)} \quad \text{Εξ. 2.36β}$$

όπου:

$\vec{P}(t)$: Το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου τη χρονική στιγμή t

$\vec{V}(t)$: Το διάνυσμα ταχύτητας του δορυφόρου τη χρονική στιγμή t .

2.7.3.2. Μέθοδοι παρεμβολής για τις στροφές και κλίσεις του Δορυφορικού Συστήματος

Όμοια, με τις εφημερίδες των δορυφόρων, που περιγράφεται η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου ανά τακτά χρονικά διαστήματα, περιγράφονται και οι γωνίες στροφής των αξόνων Rx, Ry, Rz (Roll, Pitch, Yaw) του δορυφόρου είτε προς το αδρανειακό σύστημα του δορυφόρου είτε άμεσα ως προς το γεωκεντρικό σύστημα της γης. Τα δορυφορικά συστήματα είναι εφοδιασμένα με αδρανειακά συστήματα INS (Inertial Navigation System), τα οποία αποτελούνται από μονάδες καταγραφής (IMU, Inertial Measurement Unit) οι οποίες μέσω των αισθητήρων και των γυροσκοπικών συστημάτων που διαθέτουν μπορούν να προσδιορίζουν το ρυθμό μεταβολής των στροφών των αξόνων ως προς το επίπεδο αναφοράς του, της κίνησης του δορυφόρου και τις στροφές ως προς αυτό. Έτσι, τα δορυφορικά συστήματα εφοδιασμένα με συσκευές GPS και INS δίνουν σε τακτά χρονικά διαστήματα τη θέση τους, την ταχύτητά τους καθώς και τις γωνίες στροφής των αξόνων ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς (Cramer, 1999), που μπορεί να είναι είτε το σύστημα αναφοράς της τροχιάς του δορυφόρου είτε το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς της γης (WGS-84, ITRF κ.α.) Οι μέθοδοι παρεμβολής, που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό σε τυχαία χρονική στιγμή t των γωνιών στροφής, είναι όμοιες με αυτές που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας των δορυφόρων. Εξαιτίας όμως των πολύ μικρών μεταβολών τους, σε σχέση με το χρόνο, συνήθως χρησιμοποιείται η γραμμική παρεμβολή, δηλαδή η παρεμβολή Lagrangian για μία τιμή πριν τη χρονική στιγμή t και μία μετά (Εξ. 2.37).

$$\alpha_x(t) = \alpha_x(t_i) + (\alpha_x(t_{i+1}) - \alpha_x(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}$$

$$\alpha_y(t) = \alpha_y(t_i) + (\alpha_y(t_{i+1}) - \alpha_y(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}$$

$$\alpha_z(t) = \alpha_z(t_i) + (\alpha_z(t_{i+1}) - \alpha_z(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Εξ. 2.37

όπου:

t_i : η χρονική στιγμή πριν τη στιγμή t που γίνεται η παρεμβολή, όπου $t_i < t < t_{i+1}$

$\alpha_x(t)$: η στροφή γύρω από τον άξονα X κατά τη χρονική στιγμή t

$\alpha_y(t)$: η στροφή γύρω από τον άξονα Y κατά τη χρονική στιγμή t

$\alpha_z(t)$: η στροφή γύρω από τον άξονα Z κατά τη χρονική στιγμή t .

2.7.3.3. Προσδιορισμός της χρονικής στιγμής t στη Δορυφορική Εικόνα

Ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής t_i , που αντιστοιχεί σε κάποια γραμμή σάρωσης (l_i) της δορυφορικής εικόνας, γίνεται με γραμμική παρεμβολή σε σχέση με τη χρονική στιγμή t_0 , που αντιστοιχεί στην πρώτη γραμμή σάρωσης της εικόνας (l_0) και του ρυθμού σάρωσης της εικόνας (Δs), και δίνεται από την εξίσωση 2.38.

$$t_i = t_0 + (l_i - l_0) \cdot \Delta s \quad \text{Εξ. 2.38}$$

όπου:

t_i : η χρονική στιγμή σάρωσης της l_i γραμμής της εικόνας

t_0 : η χρονική στιγμή σάρωσης της πρώτης γραμμής της εικόνας

l_0 : η πρώτη γραμμή της εικόνας

l_i : η i γραμμή της εικόνας

Δs : ρυθμός σάρωσης της εικόνας.

2.7.3.4. Μετατροπή Κεπλέριων στοιχείων σε διανύσματα θέσης και ταχύτητας

Τα κεπλέρια στοιχεία ($i, \Omega, \omega, e, \alpha, f$), όπως αναλυτικά αναφέρονται στην παράγραφο 2.5.2, δίνουν τη θέση του δορυφόρου, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, επί της τροχιάς του γύρω από τη γη (Jovanovic et al., 1999). Πολλές φορές είναι αναγκαίο να είναι γνωστά τα διανύσματα θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου, εκφρασμένα σε κάποιο σύστημα αναφοράς, που μπορεί να είναι είτε το εσωτερικό-αδρανειακό σύστημα (ECI) είτε το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ECEF). Η μετατροπή των κεπλέριων στοιχείων ($i, \Omega, \omega, e, \alpha, f$) σε διάνυσμα

θέσεως (\vec{P}) και ταχύτητας (\vec{V}) του δορυφόρου γίνονται σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.39.

$$r = \frac{\alpha \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos(f)} \quad \text{Εξ. 2.39α}$$

$$\vec{q}_1 = \begin{bmatrix} r \cdot \cos(f) \\ r \cdot \sin(f) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.39β}$$

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{\alpha^3}} \quad \mu = 3.986005E + 05 \quad \text{Εξ. 2.39γ}$$

$$\vec{q}_2 = \frac{n \cdot a}{\sqrt{1 - e^2}} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(f) \\ e + \cos(f) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.39δ}$$

Από την εξίσωση:

$$\vec{q}_1 = [R(\omega) \cdot R(i) \cdot R(\Omega)] \cdot \vec{P} \Leftrightarrow \vec{P} = [R(\omega) \cdot R(i) \cdot R(\Omega)]^{-1} \cdot \vec{q}_1 \quad \text{Εξ. 2.40}$$

$$\vec{V} = [R(\omega) \cdot R(i) \cdot R(\Omega)]^{-1} \cdot \vec{q}_2 \quad \text{Εξ. 2.41}$$

Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί και η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή να εξαχθούν τα κεπλέρια στοιχεία (i, Ω, ω, e, α, f) από το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου (\vec{P}) και από το διάνυσμα ταχύτητας (\vec{V}) τα οποία πρέπει να αναφέρονται στο εσωτερικό αδρανειακό σύστημα (ECI)

$$r = |\vec{X}|, \quad v = |\vec{V}| \quad \text{Εξ. 2.42α}$$

$$H = \vec{X} \times \vec{V} \Rightarrow H = \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix}, \quad h = |H| \quad \text{Εξ. 2.42β}$$

$$\Omega = \tan^{-1} \left(\frac{h_x}{-h_y} \right) \quad \text{Εξ. 2.42γ}$$

$$i = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{h_x^2 + h_y^2}}{h_z} \right) \quad \text{Εξ. 2.42δ}$$

$$R_1(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & \sin(i) \\ 0 & -\sin(i) & \cos(i) \end{bmatrix}, R_3(\Omega) = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & \sin(\Omega) & 0 \\ -\sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.42ε}$$

$$P = R_1(i) \cdot R_3(\Omega) \cdot X = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.42στ}$$

$$\omega + f = \tan^{-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad \text{Εξ. 2.42ζ}$$

$$\alpha = \frac{r}{2 - (r \cdot n^2 / \mu)}, \quad e = \sqrt{1 - h^2 / \mu \cdot a} \quad \text{Εξ. 2.42η}$$

$$r \cdot v_r = X \cdot V \quad \text{Εξ. 2.42θ}$$

$$\sin(E) = \frac{r \cdot v_r}{e \cdot \sqrt{\mu \cdot a}}, \quad \cos(E) = \frac{(\alpha - r)}{a \cdot e} \quad \text{Εξ. 2.42ι}$$

$$f = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - e^2} \cdot \sin(E)}{\cos(E) - e} \right) \quad \text{Εξ. 2.43}$$

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(E)}{\cos(E)} \right) \quad \text{Εξ. 2.44}$$

$$M = E - e \cdot \sin(E) \quad \text{Εξ. 2.45}$$

$$\omega = (\omega + f) - f \quad \text{Εξ. 2.46}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προσδιορίζονται τα στοιχεία Ω , l , ω , f , α , e (Kasser, 2002).

2.7.4. Συνθήκη Συγγραμμικότητας σε συνδυασμό με τα κεπλέρια στοιχεία

Η συνθήκη συγγραμμικότητας είναι η σχέση που συνδέει σημεία επάνω στη φωτογραφία ή στη δορυφορική εικόνα με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος. Εάν στη συνθήκη συγγραμμικότητας εφαρμοστούν τα στοιχεία της κάμερας του δορυφόρου και τα τροχιακά δεδομένα του (κεπλέρια στοιχεία) είναι δυνατόν να δομηθεί μία συνάρτηση, που να περιγράφει με αναλυτικό τρόπο την αντιστοιχία

μεταξύ σημείων των δορυφορικών εικόνων και του εδάφους (Valadan and Sadeghian, 2003). Μέσω των εφημερίδων των δορυφόρων παρατήρησης γης, δίνονται συνήθως η θέση και η ταχύτητά του δορυφόρου σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία αναφέρονται λίγο πριν και λίγο μετά από το χρόνο λήψης της εικόνας. Μετατρέποντας τα στοιχεία αυτά σε κελπέρια στοιχεία, όπως αναλυτικά περιγράφεται παραπάνω, δύναται να εφαρμοστεί η συνθήκη συγγραμμικότητας σε δορυφορικές εικόνες, που έχουν ληφθεί από Pushbroom αισθητήρες (Εξ. 2.47).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \cdot M_t \cdot M_a \cdot M_b \cdot \left[\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECEF} - \left[M_b^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \right] \right] \quad \text{Εξ. 2.47}$$

όπου:

λ : συντελεστής κλίμακας

$$M_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}, \text{ πίνακας στροφής του τηλεσκοπίου της}$$

κάμερας στο σύστημα της κάμερας. Πολλές φορές δίνεται μέσω της γωνίας «θέασης» α , όπως στο σύστημα SPOT-V, είτε με μορφή γωνιών α , β , γ (Euler) ή q_1 , q_2 , q_3 , q_4 (Quaternion) όπως στα δορυφορικά συστήματα QuickBird και WorldView

$$M_t = M_z(\gamma) \cdot M_y(\beta) \cdot M_x(\alpha) \quad \text{Εξ. 2.48}$$

$M_\alpha = M_{\Delta K} \cdot M_{\Delta \varphi} \cdot M_{\Delta \omega}$, πίνακας στροφής του συστήματος αξόνων του σώματος δορυφόρου (αδρανειακό) στο σύστημα της κάμερας. Οι διορθώσεις των γωνιών μπορούν να μοντελοποιηθούν με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού:

$$\begin{aligned} \Delta \omega &= \delta \omega_0 + \delta \omega_1 \cdot \Delta t + \delta \omega_2 \cdot \Delta t^2 \\ \Delta \varphi &= \delta \varphi_0 + \delta \varphi_1 \cdot \Delta t + \delta \varphi_2 \cdot \Delta t^2 \\ \Delta \kappa &= \delta \kappa_0 + \delta \kappa_1 \cdot \Delta t + \delta \kappa_2 \cdot \Delta t^2 \end{aligned} \quad \text{Εξ. 2.49}$$

με Δt το χρονικό διάστημα λήψης από την πρώτη γραμμή λήψης έως το σημείο t ($\Delta t = t_i - t_0$)

$M_b = M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$, πίνακας στροφής από το σύστημα ECI στο σώμα του δορυφόρου, όπου οι επιμέρους στροφές των αξόνων είναι:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) & 0 \\ -\sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

όπου $\alpha_1 = \Omega - \omega_e \cdot t$ (Ω : η γωνία ανάβασης, ω_e = ρυθμός περιστροφής της γης, t ο χρόνος από το σημείο ανάβασης του δορυφόρου)

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ 0 & -\sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix},$$

όπου $\alpha_2 = i - 90^\circ$ (i : η κλίση του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου)

$$M_3 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3) & 0 & -\sin(\alpha_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha_3) & 0 & \cos(\alpha_3) \end{bmatrix},$$

όπου $\alpha_3 = \omega + f + 90^\circ$ (ω : γωνία από το περίγειο, f : πραγματική ανωμαλία κίνησης η οποία υπολογίζεται από την Εξ. 2.43)

$R_s = a \cdot (1 - e \cdot \cos(E))$, διάνυσμα θέσης του δορυφόρου,

όπου a ο ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς, e η εκκεντρότητα της έλλειψης και E η μέση ανωμαλία, που δίνεται από την Εξ. 2.44.

Το διάνυσμα θέσεως του δορυφόρου συνήθως διορθώνεται από το διάνυσμα $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ Η διόρθωση μοντελοποιείται με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού ως προς το χρόνο:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \delta X_0 + \delta X_1 \cdot \Delta t + \delta X_2 \cdot \Delta t^2 \\ \Delta Y &= \delta Y_0 + \delta Y_1 \cdot \Delta t + \delta Y_2 \cdot \Delta t^2 \\ \Delta Z &= \delta Z_0 + \delta Z_1 \cdot \Delta t + \delta Z_2 \cdot \Delta t^2 \end{aligned} \quad \text{Εξ. 2.50}$$

Επομένως, η συνθήκη συγγραμμικότητας, εάν απαλειφθεί η κλίμακα λ , παίρνει τη μορφή που περιγράφεται στις εξισώσεις 2.51 (Bethel, 2013):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} 0 &= -f \frac{U}{W} \\ y &= -f \frac{V}{W} \end{aligned} \quad \begin{aligned} F_x &= f \frac{U}{W} \\ F_y &= y + f \frac{V}{W} \end{aligned}$$

Εξ. 2.51

2.7.5. Αεροτριγωνισμός Στερεοσκοπικών Δορυφορικών Εικόνων

Για τη διαδικασία προσδιορισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων, με ταυτόχρονο προσδιορισμό των συντεταγμένων, στο γεωδαιτικό σύστημα, των ομόλογων παρατηρούμενων σημείων μεταξύ των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων, απαιτείται η μέτρηση φωτοσταθερών σημείων και η εφαρμογή της Μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων (MET) είτε τη διαδικασία των έμμεσων παρατηρήσεων είτε με τη μικτή ή γενική μέθοδο. Η παραπάνω διαδικασία καλείται, επίσης, αεροτριγωνισμός ενώ η διαδικασία προσδιορισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού μίας μόνο δορυφορικής εικόνας ονομάζεται δορυφορική φωτογραμμετρική οπισθοτομία.

Οι εξισώσεις παρατηρήσεων εκφράζονται με τη συνθήκη συγγραμμικότητας, όπως περιγράφονται στις εξισώσεις 2.52.

$$F_x = f \cdot \frac{r_{11}(t) \cdot [X_g - X_o(t)] + r_{12}(t) \cdot [Y_g - Y_o(t)] + r_{13}(t) \cdot [Z_g - Z_o(t)]}{r_{31}(t) \cdot [X_g - X_o(t)] + r_{32}(t) \cdot [Y_g - Y_o(t)] + r_{33}(t) \cdot [Z_g - Z_o(t)]} = 0$$

$$F_y = f \cdot \frac{r_{21}(t) \cdot [X_g - X_o(t)] + r_{22}(t) \cdot [Y_g - Y_o(t)] + r_{23}(t) \cdot [Z_g - Z_o(t)]}{r_{31}(t) \cdot [X_g - X_o(t)] + r_{32}(t) \cdot [Y_g - Y_o(t)] + r_{33}(t) \cdot [Z_g - Z_o(t)]} = y - y_o$$

Εξ. 2.52

Οι παραπάνω σχέσεις (Εξ. 2.52) δεν είναι γραμμικές, οπότε υπολογίζεται ο ιακωβιανός πίνακας. Εάν οι διορθώσεις των στροφών $\omega(t)$, $\varphi(t)$, $\kappa(t)$ και οι διορθώσεις των συντεταγμένων $X_o(t)$, $Y_o(t)$, $Z_o(t)$ του προβολικού κέντρου της κάμερας του δορυφόρου μοντελοποιηθούν ως πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού, οι

άγνωστες παράμετροι θα είναι 18 (από 3 άγνωστες παραμέτρους για τις γωνίες $\omega(t)$, $\varphi(t)$, $\kappa(t)$ και από 3 άγνωστες παραμέτροι για τις συντεταγμένες $X_o(t)$, $Y_o(t)$, $Z_o(t)$). Στις παραπάνω άγνωστες παραμέτρους θα μπορούσαν επιπλέον να συμπεριληφθούν και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού ($\chi_o, \gamma_o, f, \kappa_i$).

2.7.6. Στατιστικός Έλεγχος Αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση της λύσης, που προκύπτει από την εφαρμογή της MET, χρησιμοποιούνται διάφορα στατιστικά εργαλεία, όπως η εσωτερική και εξωτερική αξιοπιστία της συνόρθωσης, η εύρεση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, η συσχέτιση μεταξύ των αγνώστων παραμέτρων, τα τεστ σημαντικότητας της κάθε παραμέτρου αλλά και ο εντοπισμός των χονδροειδών σφαλμάτων παρατήρησης. Τα εργαλεία αυτά παρέχουν τη δυνατότητα να γνωρίζουμε την ακρίβεια και την ορθότητα των λύσεων του μοντέλου, που έχει επιλυθεί με τη MET.

Σύμφωνα με τη μέθοδο ελέγχου παρατηρήσεων του Baarda, είναι δυνατόν πριν γίνουν οι παρατηρήσεις να υπολογιστούν τα ελάχιστα χονδροειδή σφάλματα που μπορούν να προκαλέσουν απόρριψη των παρατηρήσεων. Τα σφάλματα αυτά σύμφωνα με τον Baarda εκφράζουν την εσωτερική αξιοπιστία:

$$|\nabla_o l_i| = \delta_o \cdot \sigma_{li} \cdot \sqrt{\frac{1}{r_i}} \quad \text{Εξ. 2.53}$$

όπου:

$$r_i = \frac{\sigma_{li}^2}{\sigma_{li}^2} = 1 - \frac{\sigma_{li}^2}{\sigma_{li}^2} \quad \text{Εξ. 2.54}$$

Το δ_o είναι καθαρός αριθμός και εξαρτάται από τις πιθανότητες α_o και β_o που έχουν επιλεγεί για τα λάθη τύπου I (απόρριψη σωστής μέτρησης) και II (αποδοχή λανθασμένης μέτρησης στους a-posteriori στατιστικούς ελέγχους). Για την παράμετρο r_i ισχύει:

$$0 < r_i < 1$$

και ονομάζεται αριθμός πλεονασμού.

Σύμφωνα, πάλι, με τον Baarda, ως εξωτερική αξιοπιστία (ευαισθησία) θεωρείται η επίδραση των χονδροειδών σφαλμάτων των παρατηρήσεων που δεν προκαλούν την απόρριψή τους. Ως μέτρο της εσωτερικής αξιοπιστίας θεωρείται το μέγεθος:

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{r_i}} = \frac{\sigma_{li}^2}{\sigma_{ui}^2} \quad \text{Εξ. 2.55}$$

και ως μέτρο εξωτερικής αξιοπιστίας το μέγεθος:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{r_i} - 1} = \frac{\sigma_{li}^2}{\sigma_{ui}^2} \quad \text{Εξ. 2.56}$$

Για τα παραπάνω ισχύει: $\tau^2 - \gamma^2 = 1$.

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των σημείων ελέγχου, που μπορεί να είναι είτε οριζοντιογραφικά (συντεταγμένες Χ,Υ) είτε υψομετρικά (Η) σημεία, είναι ένα μέγεθος που δίνει την ακρίβεια της λύσης του μοντέλου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δίνεται από την εξίσωση 2.57.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum u^2}{n}} \quad \text{Εξ. 2.57}$$

όπου: n είναι ο αριθμός των σημείων και u το σφάλμα μεταξύ του υπολογισμένου σημείου και του σημείου αναφοράς.

Όμως, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων δεν είναι πάντα αξιόπιστη μέθοδος για επίλυση πολύπλοκων μοντέλων, λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζει ο πίνακας $(A^T A)$ ή $(J^T J)$, όταν κάποιος από τους αγνώστους παραμέτρους του συστήματος έχουν υψηλή συσχέτιση, γεγονός που συνεπάγεται τη συσχέτιση των στηλών του πίνακα $(A^T A)$ ή $(J^T J)$. Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι μικρές μεταβολές των ποσοτήτων των τιμών του πίνακα $(A^T A)$ ή $(J^T J)$ προκαλούν πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τη λύση του συστήματος.

Για να ελέγξουμε τον πίνακα $(A^T A)$ ή $(J^T J)$, εάν και σε ποιο βαθμό τα στοιχεία του συσχετίζονται μεταξύ τους, χρησιμοποιείται η εξίσωση 2.58.

$$cn(N) = \sqrt{\frac{\lambda_{max}(N)}{\lambda_{min}(N)}} \quad \text{Εξ. 2.58}$$

όπου: λ_{\max} και λ_{\min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των ιδιοτιμών του πίνακα N . Εάν $cn(N) = 1$ τότε ο πίνακας παρουσιάζει πολύ χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων του, ενώ εάν η τιμή είναι πολύ μεγαλύτερη του 1 τότε ο πίνακας παρουσιάζει πολύ υψηλό βαθμό συσχέτισης.

Κατά την επίλυση ενός μοντέλου, όπου περιγράφεται από X_m άγνωστες παραμέτρους, απαιτείται να εντοπίζονται, ποιες από αυτές τις παραμέτρους είναι σημαντικές για τη λύση του συστήματος και ποιές δεν επηρεάζουν καθόλου τη λύση. Μετά την επίλυση του μοντέλου με τη MET και υπολογίζοντας τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των αγνώστων παραμέτρων, εφαρμόζεται το τεστ σημαντικότητας, που δείχνει, για κάποια πιθανότητα $t_{\alpha/2, n}$, αν η άγνωστη παράμετρος που προσδιορίστηκε είναι σημαντική για τη λύση.

$$\sigma_{X_m} = \widehat{\sigma}_o \cdot \sqrt{V_{X_m}} \quad \text{Εξ. 2.59}$$

όπου: σ_{X_m} είναι η τυπική απόκλιση της άγνωστης παραμέτρου,

$\widehat{\sigma}_o$ η a-posteriori τυπική απόκλιση και

V_{X_m} το διαγώνιο στοιχείου του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας που αναφέρεται στη μεταβλητή X_m .

$$t = \frac{|X_m|}{\sigma_{X_m}} > t_{\alpha/2, n} \quad \text{Εξ. 2.60}$$

Χρησιμοποιώντας την κατανομή student εξετάζεται για ποια πιθανότητα η παράμετρος X_m είναι σημαντική για την επίλυση του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

3.1. Γενικά – ορολογία

Με τον όρο γεωαναφορά (georeference) ή γεωκωδικοποίηση (geocodic) ή γεωμετρική διόρθωση (geocorrection) δορυφορικής εικόνας εννοείται ο προσδιορισμός των σχέσεων μεταξύ των συντεταγμένων της εικόνας και του εδάφους, οι οποίες συνήθως αναφέρονται σε κάποιο γεωγραφικό ή προβολικό σύστημα συντεταγμένων (Toutin, 2004). Μέσω αυτών των σχέσεων, οι μετρήσεις ή οι παρατηρήσεις σημείων των δορυφορικών εικόνων αναφέρονται σε μετρήσεις επί του εδάφους. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε δύο διαστάσεις (x, y ή ϕ, λ), εάν πρόκειται για μονοεικονική παρατήρηση δορυφορικής εικόνας, ή σε τρεις διαστάσεις (x, y, z ή ϕ, λ, h), εάν πρόκειται για στερεοσκοπική παρατήρηση. Συνήθως η μαθηματική συνάρτηση, που περιγράφει τη σχέση των συντεταγμένων της εικόνας και του εδάφους, είναι ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων του εδάφους προς τις συντεταγμένες εικόνας (ground to image) και είναι της μορφής:

$$x_{image} = F_x(X_g, Y_g, Z_g)$$

$$y_{image} = F_y(X_g, Y_g, Z_g)$$

Η μαθηματική σχέση μεταξύ των συντεταγμένων εδάφους και των συντεταγμένων της δορυφορικής εικόνας μπορεί να περιγράψει είτε ένα αυστηρό μοντέλο μετασχηματισμού (Rigorous Model) είτε ένα προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο. Το αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο περιγράφει πλήρως τη γεωμετρία της λήψης της εικόνας, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φυσικές ιδιότητες και συνθήκες

που λαμβάνουν χώρα κατά τη λήψη. Τα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα προσομοιώνουν κατά το δυνατόν τη γεωμετρία της λήψης της εικόνας με μαθηματικές σχέσεις.

3.2. Προσεγγιστικά Γεωμετρικά Μοντέλα

Υπάρχουν αρκετά μαθηματικά μοντέλα για τη γεωμετρική διόρθωση ή γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων. Συνήθως τα προσεγγιστικά μοντέλα είναι απλές μαθηματικές σχέσεις, εύκολες στη χρήση τους και δεν απαιτείται η γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δέκτη, του τηλεσκοπίου, του δορυφόρου και γενικά όλων των παραμέτρων της λήψης των εικόνων (Toutin, 2004).

3.2.1. Μοντέλο 3D Αφινικού Μετασχηματισμού

Το μοντέλο του τρισδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού περιγράφει τη σχέση μεταξύ των συντεταγμένων του εδάφους και των συντεταγμένων της δορυφορικής εικόνας, όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.1 (Toutin, 2004) :

$$P_{3D}(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

Εξ. 3.1

όπου:

x, y : εικονοσυντεταγμένες εικόνας

X, Y, Z : συντεταγμένες φωτοσταθερών

m, n, p : βαθμός πολυωνύμων

a_{ijk} : συντελεστές του πολυωνύμου που προσδιορίζονται με τη MET.

Συνήθως χρησιμοποιούνται πολυώνυμα πρώτου έως τρίτου βαθμού για ικανοποιητικά αποτελέσματα (Tao and Hu, 2001). Επίσης, παραλλαγή του δισδιάστατου μετασχηματισμού, λαμβάνοντας υπ' όψη το ανάγλυφο του εδάφους (Pala and Pons, 1995), δίνεται από τις εξισώσεις 3.2.

$$\begin{aligned}x &= a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z + a_5XZ + a_6YZ \\y &= b_1 + b_2X + b_3Y + b_4Z + b_5XZ + b_6YZ\end{aligned}$$

Εξ. 3.2

3.2.2. Προβολικός Μετασχηματισμός

Η μαθηματική σχέση του προβολικού μετασχηματισμού περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.3 (Yamakawa and Fraser, 2004).

$$\begin{aligned}x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8\end{aligned}$$

Εξ. 3.3

Η εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου για εικόνες που έχουν ληφθεί από γραμμικούς δέκτες (Linear Array) με εστιακή απόσταση f μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.4.

$$y_a^0 = \frac{1}{1 - \frac{y \cdot \tan \omega}{f}} \cdot y$$

Εξ. 3.4

$$y_a = \left(1 - \frac{\Delta Z_{scaled}}{\cos \omega}\right) y_a^0$$

όπου:

y : εικονοσυντεταγμένη κατά τον άξονα y

y_a : εικονοσυντεταγμένη αφινικού-προβολικού μετασχηματισμού χωρίς ή με διόρθωση λόγω υψομέτρου

f : εστιακή απόσταση

ω : στροφή ως προς τον άξονα x .

3.2.3. Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός DLT

Ο μετασχηματισμός DLT μεταξύ των συντεταγμένων εδάφους και συντεταγμένων εικόνας είναι μία γραμμική συνάρτηση (Mikhail et al., 2001). Ο παραπάνω μετασχηματισμός χρησιμοποιείται, πολλές φορές, στην επίγεια φωτογραμμετρία για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμές των αγνώστων παραμέτρων της συνθήκης συγγραμμικότητας. Η μαθηματική μορφή δίνεται από τις εξισώσεις 3.5.

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1} \quad y = \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1} \quad \text{Εξ. 3.5}$$

3.2.4. Κλασματικά Πολυώνυμα (RFM)

Το μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων εκτελεί μετασχηματισμό των συντεταγμένων, που αναφέρονται στο έδαφος, στις συντεταγμένες εικόνας μέσω των κλασματικών τρισδιάστατων πολυωνύμων. Οι εξισώσεις του μοντέλου περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.6.

$$x_{ij} = \frac{P_i^1(\varphi, \lambda, H)_j}{P_i^2(\varphi, \lambda, H)_j} \quad y_{ij} = \frac{P_i^3(\varphi, \lambda, H)_j}{P_i^4(\varphi, \lambda, H)_j} \quad \text{Εξ. 3.6}$$

όπου:

- x_{ij}, y_{ij} : οι κανονικοποιημένες τιμές των συντεταγμένων εικόνας
 φ, λ, H : οι κανονικοποιημένες συντεταγμένες του γεωγραφικού πλάτους, μήκους και υψομέτρου αντίστοιχα
 $\varphi = (\text{Latitude} - \text{LAT_OFF})/\text{LAT_SCALE}$
 $\lambda = (\text{Longitude} - \text{LONG_OFF})/\text{LONG_SCALE}$
 $H = (\text{Height} - \text{HEIGHT_OFF})/\text{HEIGHT_SCALE}$
 $y = (\text{ROW} - \text{LINE_OFF})/\text{LINE_SCALE}$
 $x = (\text{Column} - \text{SAMPLE_OFF})/\text{SAMPLE_SCALE}$

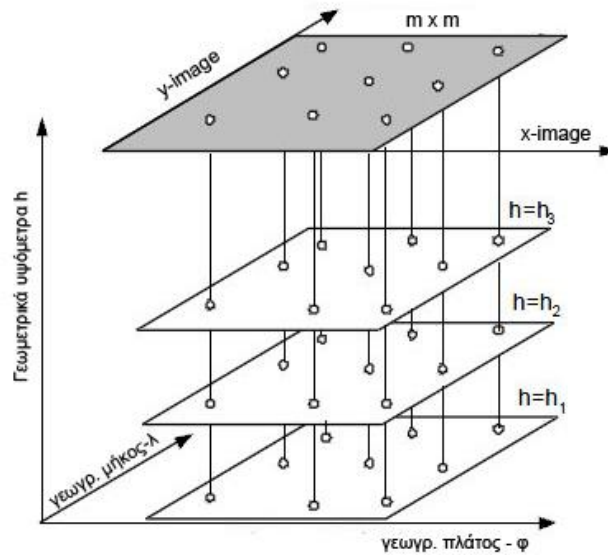
Το κάθε πολυώνυμο περιγράφεται από 20 συντελεστές με τη μορφή:

$$P(\varphi, \lambda, H) = C_1 + C_2\lambda + C_3\varphi + C_4H + C_5\lambda\varphi + C_6\lambda H + C_7\varphi H + C_8\lambda^2 + C_9\varphi^2 + C_{10}H^2 + C_{11}\varphi^2 H + C_{12}\lambda^3 + C_{13}\lambda\varphi^2 + C_{14}\lambda H^2 + C_{15}\lambda^2\varphi + C_{16}\varphi + C_{17}\varphi H^2 + C_{18}\lambda^2 H + C_{19}\varphi\lambda H + C_{20}H^3$$

Σημαντικό κατά την εφαρμογή των κλασματικών πολυωνύμων είναι ότι το εύρος των κανονικοποιημένων τιμών των συντεταγμένων ρυθμίζεται έτσι ώστε τόσο οι εικονοσυντεταγμένες όσο και οι συντεταγμένες του εδάφους να κυμαίνονται από -1 έως +1. Έτσι, επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων λόγω της αριθμητικής αστάθειας κατά την επίλυση του μοντέλου.

Οι περισσότεροι δορυφορικοί οίκοι δίνουν τους συντελεστές των πολυωνύμων ($20 \times 4 = 80$) σε μορφή μεταδεδομένων, που συνοδεύουν τη δορυφορική εικόνα καθώς και τις παραμέτρους για την κανονικοποίηση των μεταβλητών. Έτσι, επιτυγχάνεται η αντικατάσταση του μοντέλου της κάμερας του δορυφόρου από ένα απλό μαθηματικό μοντέλο, χωρίς να απαιτείται η γνώση όλων των παραμέτρων της λήψης (στοιχεία κάμερας, προσανατολισμού κ.α.), και το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί απλά, γρήγορα και με ικανοποιητική ακρίβεια. Για τον υπολογισμό των συντελεστών των πολυωνύμων (συνολικά 80) απαιτείται η μέτρηση τουλάχιστον 40 φωτοσταθερών σημείων στο έδαφος, δεδομένου ότι με τη μέτρηση κάθε φωτοσταθερού σημείου δημιουργούνται δύο εξισώσεις παρατήρησης, σύμφωνα με τις Εξ. 3.6. Όμως, επειδή έτσι καθίσταται δυσχερής η διαδικασία γεωαναφοράς της δορυφορικής εικόνας, οι συντελεστές των πολυωνύμων προσδιορίζονται από τους οίκους που διαχειρίζονται τα δορυφορικά συστήματα, εφαρμόζοντας το φυσικό ακριβές γεωμετρικό μοντέλο (Dial and Grodecki, 2001). Με τον τρόπο αυτόν προσδιορίζονται, μέσω του φυσικού αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου, για ένα πλέγμα σημείων $m \times n$ της εικόνας και για διάφορα επίπεδα υψομέτρων Z , οι αντίστοιχες συντεταγμένες φ, λ του εδάφους (Σχήμα 3.1). Έχοντας προσδιορίσει n -πλέγματα συντεταγμένων φ, λ σε συγκεκριμένα υψόμετρα ή προσδιορίζονται οι συντελεστές των πολυωνύμων. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για τη βελτίωση των κλασματικών πολυωνύμων, έτσι ώστε μετρώντας ελάχιστα φωτοσταθερά σημεία

να επιτυγχάνεται, σχεδόν, η ίδια ακρίβεια με αυτή του αυστηρού φυσικού γεωμετρικού μοντέλου.



Σχήμα 3.1: Προσαρμογή κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) σε επίπεδα συντεταγμένων (Dial and Grodecki, 2001)

3.3. Αυστηρά Γεωμετρικά Μοντέλα

Τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα (Rigorous Models) περιγράφουν κατά το δυνατόν όλες τις φυσικές ιδιότητες του δέκτη και του δορυφόρου, όπως αυτές λαμβάνουν χώρα και συντελούν κατά τη διάρκεια λήψης των δορυφορικών εικόνων. Οι περισσότεροι δέκτες είναι γραμμικοί (2.2.1) και τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα βασίζονται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, κατάλληλα διαμορφωμένη και προσαρμοσμένη, έτσι ώστε να περιγράφεται με ακρίβεια η γεωμετρία της λήψης των εικόνων. Πολλά αυστηρά μοντέλα είναι διαμορφωμένα κατά τρόπο τέτοιο ώστε να περιγράφουν συγκεκριμένους δέκτες και άλλα που μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερους δέκτες.

3.3.1. Άμεση Γεωαναφορά των Δορυφορικών Εικόνων από τα στοιχεία των Δορυφόρων

Η γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας τη συνθήκη συγγραμμικότητας, η οποία συσχετίζει τα σημεία της εικόνας με τα αντίστοιχα σημεία των αντικειμένων, που αναφέρονται σε κάποιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς. Οι ενδιάμεσες μετατροπές, που απαιτούνται από ένα σύστημα συντεταγμένων σε κάποιο άλλο, εξαρτώνται από το είδος του δορυφόρου και από τα δεδομένα που μας παρέχει. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τυπικές μετατροπές που απαιτούνται για τη γεωαναφορά δορυφορικής εικόνας:

- Μετατροπή από το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα (Εξ. 2.33 και 2.34)
- Μετατροπή από το σύστημα του αισθητήρα-κάμερας στο σύστημα πλοήγησης του δορυφόρου (NBR) και περιγράφεται με την παρακάτω σχέση (Εξ. 3.7):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{NBR} = Mq \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ y_s \\ f \end{bmatrix}_{cam} \quad \text{Εξ. 3.7}$$

- Μετατροπή από το σύστημα πλοήγησης του δορυφόρου (NBR) στο σύστημα τροχιάς του δορυφόρου (orbit)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{orbit} = M_{yaw} \cdot M_{pitch} \cdot M_{roll} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{NBR} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

- Μετατροπή από το σύστημα τροχιάς (orbit) στο ECI σύστημα (§ 2.6.2.1)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECI} = T_x \cdot T_y \cdot T_z \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{orbit}$$

$$T_x = T_y \times T_z \quad \text{Εξ. 3.9}$$

$$T_y = \text{unit}(-R \times V)$$

$$T_z = \text{unit}(-R)$$

Όπου: R και V η θέση και η ταχύτητα του δορυφόρου επί της τροχιάς του.

- Μετατροπή από το ECI στο ECEF, σύμφωνα με την εξίσωση 2.19.

Γενικά η εφαρμογή της συνθήκη συγγραμμικότητας σε δορυφορικές εικόνες, που έχουν ληφθεί από pushbroom γραμμικούς αισθητήρες, φαίνεται στην εξίσωση 3.10.

$$\begin{bmatrix} 0 - \chi_o \\ y_i - y_o \\ -f \end{bmatrix} = S_i \cdot M_q \cdot M_b(t) \cdot \left[\begin{bmatrix} Xg_i \\ Yg_i \\ Zg_i \end{bmatrix}_{ECEF} - \left[M_b^T(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R_s(t) \end{bmatrix} \right] \right] \quad \text{Εξ. 3.10}$$

όπου:

y_i : συντεταγμένες επί του άξονα y στο σύστημα της κάμερας του δορυφόρου. Η κίνηση του δορυφόρου γίνεται κατά τον άξονα του x με τη γραμμή σάρωσης κάθετη στην τροχιά του

f : εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας του δορυφόρου

t : χρονική στιγμή λήψης της i γραμμής

Xg_i, Yg_i, Zg_i : συντεταγμένες στο σύστημα ECEF

S_i : συντελεστής κλίμακας

M_q : πίνακας στροφής του τηλεσκοπίου της μηχανής στο σύστημα της κάμερας ή στο σώμα του δορυφόρου. Πολλές φορές δίνεται είτε ως γωνία θέασης (α), είτε με μορφή γωνιών στο χώρο ω, φ, κ (*Euler*) ή q_1, q_2, q_3, q_0 (Quaternion) όπως στα δορυφορικά συστήματα QuickBird και WorldView

$M_b(t_i)$: πίνακας στροφής από το σύστημα ECEF στο σώμα-κάμερα του δορυφόρου ή από το σύστημα ECI στο σώμα του δορυφόρου. Στην πρώτη περίπτωση ο πίνακας στροφής M_b δίνεται από την εξίσωση 3.11

$$M_b(t) = M_k(t) \cdot M_\varphi(t) \cdot M_\omega(t) \quad \text{Εξ. 3.11}$$

όπου:

$$M_k(t) = \begin{bmatrix} \cos k(t) & \sin k(t) & 0 \\ -\sin k(t) & \cos k(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{\varphi(t)} = \begin{bmatrix} \cos\varphi(t) & 0 & -\sin\varphi(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi(t) & 0 & \cos\varphi(t) \end{bmatrix}$$

$$M_{\omega(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega(t) & \sin\omega(t) \\ 0 & -\sin\omega(t) & \cos\omega(t) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$M_{b(t)} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \sin\kappa + \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \sin\omega \cdot \sin\kappa - \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa \\ -\cos\varphi \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa & \sin\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega \cdot \cos\varphi & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{bmatrix}$$

Οι γωνίες (Euler) κ , φ , ω είναι οι γωνίες στροφής κατά τους άξονες Z, Y, X αντίστοιχα κατά το χρόνο λήψης t .

Ο πίνακας στροφής M_b μπορεί να περιγραφεί ως διάνυσμα που αναλύεται στους άξονες $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ με τη μορφή q_1, q_2, q_3, q_0 (Quaternion) όπως παρακάτω:

$$\vec{q} = q_1 \cdot \vec{i} + q_2 \cdot \vec{j} + q_3 \cdot \vec{k} + q_0$$

$$M_b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 + q_0 \cdot q_3) & 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 - q_0 \cdot q_2); \\ 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 - q_0 \cdot q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 + q_0 \cdot q_1); \\ 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 + q_0 \cdot q_2) & 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 - q_0 \cdot q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

Εξ. 3.12

όπου: $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$.

Η μετατροπή των στοιχείων του πίνακα στροφής M_b από Quaternion σε γωνίες κ , φ και ω (Euler) γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.13.

$$\omega = \text{atan} \left[\frac{M_b(2,3)}{M_b(3,3)} \right], \quad \varphi = \text{asin} [(-M_b(1,3))], \quad \kappa = \text{atan} \left[\frac{M_b(1,2)}{M_b(1,1)} \right] \quad \text{Εξ. 3.13}$$

Στη δεύτερη περίπτωση, που ο πίνακας στροφής M_b αναφέρεται στη στροφή από το σύστημα ECI στο σύστημα σώμα-κάμερα, διαμορφώνεται σύμφωνα με την εξίσωση 3.14.

$$M_b = M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \quad \text{Εξ. 3.14}$$

όπου:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) & 0 \\ -\sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{με } \alpha_1 = \Omega - \omega_e \cdot t$$

(Ω : η γωνία ανάβασης, ω_e = ρυθμός περιστροφής της γης, t ο χρόνος από το σημείο ανάβασης του δορυφόρου)

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ 0 & -\sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \quad \text{με } \alpha_2 = i - 90^\circ$$

(i : η κλίση του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου)

$$M_3 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_3) & 0 & -\sin(\alpha_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha_3) & 0 & \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} \quad \text{με } \alpha_3 = \omega + fp + 90^\circ$$

(ω : γωνία από το περίγειο, fp : πραγματική ανωμαλία κίνησης η οποία υπολογίζεται από την Εξ. 2.43)

Το διάνυσμα θέσεως του δορυφόρου μπορεί να δίνεται είτε απευθείας μέσω των μεταδεδομένων, που συνοδεύουν την δορυφορική εικόνα με μορφή $[X, Y, Z]$ σε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, είτε μπορεί να προσδιοριστεί ως διάνυσμα από τα στοιχεία των εφημερίδων του, ήτοι: $R_s = a \cdot (1 - e \cdot \cos(E))$, όπου: a ο ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς, e η εκκεντρότητα της έλλειψης και E η μέση ανωμαλία που δίνεται από την Εξ. 2.44.

Η οριζοντιογραφική ακρίβεια, που επιτυγχάνεται κατά τη γεωαναφορά δορυφορικής εικόνας, εφαρμόζοντας άμεσα τη συνθήκη συγγραμμικότητας όπως περιγράφεται παραπάνω, εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων που συνοδεύουν την εικόνα. Τα δεδομένα αφορούν στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας του δορυφόρου (σταθερά της μηχανής, πρωτεύον σημείο, διαστροφή φακών), κλίση τηλεσκοπίου, στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, όπως η ακριβής θέση του δορυφόρου σε σχέση με το χρόνο λήψης της εικόνας καθώς και οι στροφές μεταξύ του συστήματος αναφοράς και του συστήματος του δορυφόρου. Στον Πίνακα 3.1 δίνονται οι

οριζοντιογραφικές ακρίβειες, που επιτυγχάνονται κατά τη γεωαναφορά διάφορων δορυφορικών εικόνων, εφαρμόζοντας τη συνθήκη συγγραμμικότητας, χωρίς να μετρηθεί κανένα φωτοσταθερό σημείο και με την προϋπόθεση ναδερικής λήψης της εικόνας και ομαλού εδαφους

Δορυφορικό Σύστημα	Οριζοντιογραφική ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (CE90)
GeoEye-1	< 3m
WorldView-2	< 3.5m
WorldView-1	< 4m
QuickBird	< 23m
EROS-B	< 50m
SPOT-V	< 63m

Πίνακας 3.1 : Οριζοντιογραφικές ακρίβειες γεωαναφοράς δορυφορικών εικόνων χωρίς φωτοσταθερά, εφαρμόζοντας άμεσα τη συνθήκη συγγραμμικότητας, όπως αναφέρονται στα τεχνικά εγχειρίδια των δορυφορικών συστημάτων.

3.3.2. Συνθήκη Συγγραμμικότητας με Προσθήκη Αγνώστων Παραμέτρων

Όπως αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο, η ακρίβεια της γεωμετρικής διόρθωσης της δορυφορικής εικόνας εξαρτάται από την ακρίβεια του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού. Για τη βελτίωση της ακρίβειας, εφαρμόζεται η συνθήκη συγγραμμικότητας με προσθήκη παραμέτρων-διορθώσεων, οι οποίες υπολογίζονται με χρήση φωτοσταθερών σημείων στο έδαφος (GCPs) ή σημείων σύνδεσης (TPs) μεταξύ των δορυφορικών εικόνων. Η επίλυση των αγνώστων παραμέτρων-διορθώσεων γίνεται μέσω συνόρθωσης με MET, όπου οι εξισώσεις παρατήρησης δημιουργούνται από την μέτρηση των φωτοσταθερών σημείων και των σημείων σύνδεσης. Συνήθως, κατά την εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας οι άγνωστες παράμετροι, που

προστίθενται, διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις παραμέτρους-διορθώσεις που αφορούν στον εσωτερικό προσανατολισμό και στις παραμέτρους που αφορούν στον εξωτερικό προσανατολισμό. Στις παραμέτρους που αφορούν στον εσωτερικό προσανατολισμό, δηλαδή την εσωτερική γεωμετρία της κάμερας του δορυφόρου, περιλαμβάνονται η διόρθωση της σταθεράς της μηχανής του τηλεσκοπίου της κάμερας ($f + df$), οι διορθώσεις του πρωτεύοντος σημείου ($x_o + dx, y_o + dy$) και οι διορθώσεις που αφορούν στις διαστροφές των φακών. Οι παράμετροι-διορθώσεις που αφορούν στον εξωτερικό προσανατολισμό είναι διορθώσεις των γωνιών ($\omega + d\omega, \varphi + d\varphi, \kappa + d\kappa$) των στροφών μεταξύ των συστημάτων καθώς και διορθώσεις σχετικά με τη θέση του σημείου λήψης - προβολικού κέντρου ($X_o + dX_o, Y_o + dY_o, Z_o + dZ_o$). Οι διορθώσεις τόσο των γωνιών όσο και των θέσεων του σημείου λήψης, μοντελοποιούνται ως γραμμικά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού συναρτήσεως του χρόνου λήψης της εικόνας. Επομένως, η συνθήκη συγγραμμικότητας με προσθήκη παραμέτρων-διορθώσεων για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, οι οποίες έχουν ληφθεί από pushbroom γραμμικούς αισθητήρες, περιγράφεται από την εξίσωση 3.15.

$$\begin{bmatrix} x_o + dx_o \\ y_i + y_o + dy_o \\ -f + df \end{bmatrix} = \lambda_i \cdot M_q \cdot M_b(t) \cdot M_{ab}(t) \cdot \begin{bmatrix} X_{gi} - [Xo(t) + dXo(t)] \\ Y_{gi} - [Yo(t) + dYo(t)] \\ Z_{gi} - [Zo(t) + dZo(t)] \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 3.15}$$

όπου:

y_i :	εικονοσυντεταγμένη της δορυφορικής εικόνας
x_o, y_o :	συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου
dx_o, dy_o :	διορθώσεις των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου
f :	εστιακή απόσταση του φακού της μηχανής
df :	διόρθωση της εστιακής απόστασης της μηχανής
λ_i :	συντελεστής κλίμακας στο σημείο i
M_t :	πίνακας στροφής της κάμερας

$M_b(t)$: πίνακας στροφής του γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς ως προς το σύστημα της κάμερας. Εξαρτάται από το χρόνο λήψης t και έχει τη μορφή: $M_b(t) = M_k(t) \cdot M_\varphi(t) \cdot M_\omega(t)$

$M_{ab}(t)$: διορθώσεις του παραπάνω πίνακα στροφής όπου οι διορθώσεις των γωνιών μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού (Εξ. 3.16)

$$M_{ab}(t) = \begin{bmatrix} \cos(dk(t)) & \sin(dk(t)) & 0 \\ -\sin(dk(t)) & \cos(dk(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(d\varphi(t)) & 0 & -\sin(d\varphi(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(d\varphi(t)) & 0 & \cos(d\varphi(t)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(d\omega(t)) & \sin(d\omega(t)) \\ 0 & -\sin(d\omega(t)) & \cos(d\omega(t)) \end{bmatrix}$$

$$d\omega(t) = \omega_o + \omega_1 \cdot t + \omega_2 \cdot t^2$$

$$d\varphi(t) = \varphi_o + \varphi_1 \cdot t + \varphi_2 \cdot t^2$$

Εξ. 3.16

$$dk(t) = k_o + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2$$

X_{gi}, Y_{gi}, Z_{gi} : συντεταγμένες του σημείου i στο έδαφος

$X_o(t), Y_o(t), Z_o(t)$: συντεταγμένες του σημείου λήψης

$dX_o(t), dY_o(t), dZ_o(t)$: διορθώσεις των συντεταγμένων του σημείου λήψης, οι οποίες μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα 2ου βαθμού (Εξ. 3.17)

$$dX_o(t) = X_o + X_1 \cdot t + X_2 \cdot t^2$$

$$dY_o(t) = Y_o + Y_1 \cdot t + Y_2 \cdot t^2$$

Εξ. 3.17

$$dZ_o(t) = Z_o + Z_1 \cdot t + Z_2 \cdot t^2$$

Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι προσθέτοντας στη συνθήκη συγγραμμικότητας διάφορες παραμέτρους, οι οποίες αφορούν είτε στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού είτε στα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια της γεωαναφοράς της δορυφορικής εικόνας, σε επίπεδα πολύ μικρότερα του μεγέθους της εικονοψηφίδας. Το μεγάλο πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι οι άγνωστες παράμετροι, που προστίθενται στην επίλυση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου που βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, έχουν φυσική υπόσταση και περιγράφουν κάποιο φυσικό μέγεθος, που λαμβάνει χώρα κατά τη λήψη της εικόνας, σε αντίθεση με τα

προσεγγιστικά μοντέλα, όπου οι άγνωστες παράμετροι έχουν μόνο μαθηματική έννοια και χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση σφαλμάτων.

3.4. Υπάρχοντα Αυστηρά Γεωμετρικά Μοντέλα

Για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, που έχουν ληφθεί από γραμμικούς δέκτες τύπου pushbroom, έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου που βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας. Οι πρώτες στερεοσκοπικές δορυφορικές εικόνες του συστήματος SPOT-1, το οποίο τέθηκε σε τροχιά στις 22-2-1986, με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 10m, ήταν το έναυσμα για τη φωτογραμμετρική αξιοποίηση γενικότερα των δορυφορικών εικόνων. Παρακάτω γίνεται μία γενική επισκόπηση των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων, που αναπτύχθηκαν και σηματοδότησαν την περαιτέρω ανάπτυξη της ψηφιακής δορυφορικής φωτογραμμετρίας.

3.4.1. Γεωμετρικό Μοντέλο Kratky

Αυτό το γεωμετρικό μοντέλο αναπτύχθηκε, και ενσωματώθηκε στο λογισμικό SPOTCHECK+, στο Canada Center of Mapping από τον V. Kratky το 1989. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε μονή ή στέρεο εικόνες και σε δέκτες όπως αυτούς των δορυφόρων SPOT, Landsat, J-ERS 1 και MOMS-2 (Baltsavias et al.,1992), αλλά και σε άλλα δορυφορικά συστήματα που έχουν παρόμοια γεωμετρία λήψης. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του δορυφόρου, όπως τα χαρακτηριστικά του δέκτη και την κίνηση του δορυφόρου. Οι εφημερίδες του δορυφόρου δεν είναι απαραίτητες αλλά για κάποιους δέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικά. Ο συνολικός αριθμός των αγνώστων παραμέτρων για την επίλυση του μοντέλου είναι 26 και περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

- 12 απαραίτητες παράμετροι, που αναφέρονται στα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού $(X, Y, Z)_o$ του προβολικού κέντρου και $(\kappa, \varphi, \omega)_o$ των γωνιών στροφής του δορυφόρου
- 12 επιπρόσθετες παράμετροι, που περιγράφουν τον ρυθμό μεταβολής των γωνιών στροφής του δορυφόρου και μοντελοποιούνται ως γραμμικά ή $2^{ου}$ βαθμού πολυώνυμα
- 2 παράμετροι, που αναφέρονται στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, ο πρώτος περιγράφει διορθώσεις στην κλίμακα κατά μήκος του CCD αισθητήρα και ο δεύτερος διόρθωση Δf της εστιακής απόστασης του φακού.

Αν οι παράμετροι που περιγράφουν τον ρυθμό μεταβολής των γωνιών στροφής του δορυφόρου μοντελοποιηθούν ως γραμμικά πολυώνυμα, τότε ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων περιορίζεται στους 22.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω γεωμετρικού μοντέλου δείχνουν ότι, συνήθως, κατά τη συνόρθωση για την επίλυση των αγνώστων παραμέτρων χρειάζονται 3-6 επαναλήψεις. Απαιτούνται το ελάχιστο 5-9 φωτοσταθερά σημεία, που ο αριθμός αυτός εξαρτάται από τον βαθμό του πολυωνύμου που περιγράφει το ρυθμό μεταβολής των γωνιών στροφής του δορυφόρου (Kratky, 1989).

Η εφαρμογή του μοντέλου σε τρία ανεξάρτητα ζεύγη δορυφορικών εικόνων SPOT-1, που λήφθηκαν τον Αύγουστο 1987, με γωνίες θέασης $+27.89^\circ$ και $+7.31^\circ$, λόγο βάση-προς-ύψος (B/H) ίσο με 0.4 και μετρημένα 9 φωτοσταθερά σημεία, χρησιμοποιώντας $2^{ου}$ βαθμού πολυώνυμα τόσο για τη θέση του προβολικού κέντρου όσο και των γωνιών στροφής, έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

$\hat{\sigma} = 6.4\mu m, 2^{ou}$ βαθμού πολυώνυμα			
Σημεία	RMS X	RMS Y	RMS Z
9-Φωτοσταθερά	2.4m	2.4m	8.2m
63-Σημεία ελέγχου	5.1m	6.2m	13.3m

Πίνακας 3.2. Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Kratky, συμπεριλαμβανομένων όλων των αγνώστων παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού (Kratky, 1989).

Χρησιμοποιώντας 6 φωτοσταθερά σημεία και λαμβάνοντας ως παραμέτρους γραμμικά πολυώνυμα (αντί 2^{ou} βαθμού), που περιγράφουν το ρυθμό μεταβολής των γωνιών στροφής, η επίλυση έδωσε παρόμοια αποτελέσματα (Πίνακας 3.3).

$\hat{\sigma} = 8\mu m, Γραμμικά$ πολυώνυμα			
Σημεία	RMS X	RMS Y	RMS Z
6-Φωτοσταθερά	3.2m	0.8m	10.7m
65-Σημεία ελέγχου	4.9m	6.3m	12.2m

Πίνακας 3.3: Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Kratky με γραμμικά πολυώνυμα (Kratky, 1989).

3.4.2. Δυναμικό Γεωμετρικό Μοντέλο

Στο τέλος της δεκαετίας του 1980 οι Παρασχάκης και Πατιάς (1989) παρουσίασαν ένα γεωμετρικό μοντέλο αναγωγής στερεοζεύγους δορυφορικών εικόνες που είναι δυναμικό, με την έννοια ότι θεωρεί τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της κάθε ψηφίδας ως συνάρτηση του χρόνου. Το μοντέλο αυτό περιορίζει στο ελάχιστο τον αριθμό των αναγκαίων φωτοσταθερών σημείων και λύνει το πρόβλημα της συσχέτισης των αγνώστων παραμέτρων, ενώ χρησιμοποιεί τα πρωτογενή δεδομένα, δηλαδή εικόνες που έχουν υποστεί μόνο ραδιομετρικές διορθώσεις. Ως άγνωστες παράμετροι δεν θεωρούνται τα 6 στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε ψηφίδας, αλλά οι διαφορές τους από τα αντίστοιχα μιας αρχικής ψηφίδας, αποφεύγοντας προβλήματα συσχέτισης μεταξύ των αγνώστων παραμέτρων. Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε τόσο σε εικόνες Landsat όσο και σε εικόνες SPOT, με διαφοροποίηση των εξισώσεων παρατήρησης (Γεωργούλα et al, 1991).

Για την ανάπτυξη του παραπάνω μοντέλου έγιναν διάφορες παραδοχές, οι οποίες δεν επηρεάζουν την τελική ακρίβεια:

- Η τροχιά του δορυφόρου θεωρείται κανονική, ενώ οι επιδράσεις άλλων ουράνιων σωμάτων καθώς και της γήινης ατμόσφαιρας θεωρούνται αμελητέες. Η παραδοχή αυτή δεν είναι απολύτως αυστηρή, καθώς το μοντέλο χρησιμοποιεί ως άγνωστες παραμέτρους τα 4 από τα 6 στοιχεία του Kepler, τα οποία καθορίζουν την τροχιά του δορυφόρου.
- Οι άγνωστες γωνίες στροφής ω , ϕ , κ μεταβάλλονται γραμμικά με το χρόνο. Η μεταβολή αυτή θεωρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της λήψης της εικόνας.
- Στην περίπτωση μηχανικά κινητού σαρωτή, όπως στον Landsat, θεωρείται ότι η ταχύτητα σάρωσης παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της λήψης.
- Το γήινο σύστημα (X,Y,Z) αναφέρεται στο χρόνο t_0 της λήψης της ψηφίδας (i,i)
- Η τροχιά του δορυφόρου θεωρείται κυκλική.

Τα συστήματα αναφοράς των διαφόρων μεγεθών, που υπεισέρχονται στο μοντέλο είναι:

α) το γήινο σύστημα (X,Y,Z),

β) το αδρανειακό (U,V,W),

γ) το σύστημα τροχιάς του δορυφόρου (x_s, y_s, z_s),

δ) το σύστημα της δορυφορικής πλατφόρμας (x_s', y_s', z_s') και

ε) το σύστημα του σαρωτή.

Τα στοιχεία του πίνακα στροφής R είναι συνάρτηση των παραμέτρων:

θ : Η γωνία στροφής μεταξύ του γήινου συστήματος αναφοράς και του αδρανειακού.

I : Η κλίση του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου.

ω : Το όρισμα του περιγείου του δορυφόρου.

T : Ο χρόνος του δορυφόρου στο περίγειο.

ω, φ, κ : Οι γνωστές γωνίες στροφής.

θ_s, ψ_s : Η ζενίθια γωνία και αζιμούθιο μεταξύ του συστήματος της πλατφόρμας και του συστήματος του σαρωτή.

Για την επίλυση του μοντέλου σε στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων, ως άγνωστες παράμετροι θεωρούνται τα στοιχεία ω, Ω, i, T της τροχιάς του δορυφόρου, οι στροφές ω, φ, κ και οι ταχύτητες μεταβολής τους $\dot{\omega}, \dot{\varphi}, \dot{\kappa}$. Για την επίλυση του μοντέλου απαιτούνται, το ελάχιστο, 5 φωτοσταθερά σημεία.

Γενικά το μοντέλο εφαρμόζεται σε διάφορες δορυφορικές εικόνες και ανάλογα με τη διακριτική ικανότητα των δορυφορικών δεδομένων και την επιθυμητή τελική ακρίβεια το μοντέλο έχει τη δυνατότητα παραπέρα επέκτασης. Για παράδειγμα, σφάλματα λόγω μη κανονικότητας της τροχιάς, μη γραμμικής μεταβολής των $\dot{\omega}, \dot{\varphi}, \dot{\kappa}$ με το χρόνο, μπορούν εύκολα να ληφθούν υπ' όψη με την προσθήκη παραμέτρων με βάση τη γενική πρακτική της Φωτογραμμετρίας, π.χ. με τη χρήση ορθογωνίων πολυωνύμων.

3.4.3. Μοντέλο Dowman-Gugan

Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο University College London το 1987. Το μοντέλο αντιμετωπίζει τον προσανατολισμό των εικόνων με σύστημα αναφοράς το γεωκεντρικό σύστημα και το επίπεδο προβολής με σκοπό να αποφευχθούν τα σφάλματα που δημιουργούνται εξαιτίας της καμπυλότητας της γης αλλά και των προβολικών συντεταγμένων. Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού.

Οι εξισώσεις του μοντέλου περιλαμβάνουν 18 άγνωστες παραμέτρους, αλλά δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα για την επίλυση του μοντέλου εξαιτίας της υψηλής συσχέτισης που παρουσιάζουν μεταξύ τους, που οδηγεί σε ασταθή λύση. Παρατηρήθηκε ότι στους γραμμικούς αισθητήρες οι μεταβολές των γωνιών ω και φ είναι πάρα πολύ μικρές (Gugan, 1987) και επομένως θα μπορούσαν να

περιγραφούν με μία σταθερή ποσότητα αντί να περιγράφονται με πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού. Αποτέλεσμα είναι να αφαιρεθούν 4 άγνωστες παράμετροι και συνολικά το μοντέλο να έχει 14 άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα.

$$\begin{aligned}
 X_0(t) &= X_o + a_1 \cdot t + b_1 \cdot t^2 & \omega(t) &= \omega_o \\
 Y_0(t) &= Y_o + a_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 & \varphi(t) &= \varphi_o \\
 Z_0(t) &= Z_o + a_3 \cdot t + b_3 \cdot t^2 & k(t) &= k_o + a_6 \cdot t + b_6 \cdot t^2
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 3.18}$$

Επίσης, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη θέση του δορυφόρου επί της τροχιάς του, η οποία δύναται να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Επομένως, ο εξωτερικός προσανατολισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει των τροχιακών παραμέτρων (στοιχεία Kepler), όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.8.4. Γίνεται η παραδοχή ότι 6 από τα στοιχεία έχουν πολύ μικρή επίδραση στην επίλυση του μοντέλου. Αυτά είναι ο μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς (a) και τα στοιχεία του περιγείου, λόγω της πολύ μικρής εκκεντρότητας της τροχιάς. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση του δορυφόρου είναι η γωνία ανόδου (Ω) και η γωνία fp (true anomaly), οι οποίες μοντελοποιούνται από ένα γραμμικό πολυώνυμο:

$$\begin{aligned}
 fp &= f_o + f_1 \cdot t \\
 \Omega &= \Omega_o + \Omega_1 \cdot t
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 3.19}$$

Έτσι, το μοντέλο για την επίλυση του εξωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιεί 4 παραμέτρους (f_o, Ω_o, i, a), οπότε απαιτούνται 2 φωτοσταθερά για να επιλυθεί. Εξαιτίας όμως των διαταραχών της κίνησης του δορυφόρου ο καθορισμός της ακριβούς θέσης επί της τροχιάς δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί, γι' αυτό εισάγονται στο μοντέλο επιπλέον παράμετροι, που αφορούν στις στροφές και τη θέση του δορυφόρου, οπότε οι άγνωστες παράμετροι αυξάνονται σε 10 για κάθε εικόνα.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε στερεοσκοπικές εικόνες SPOT level 1A, στο πλαίσιο του Preliminary Evaluation Programme for SPOT, σε περιοχή της νότιας Γαλλίας (Aix-en-Provence) και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.

7-παράμετροι, 10-Φωτοσταθερά σημεία			
Σημεία	RMS X	RMS Y	RMS Z
20-Σημεία ελέγχου (x,y)	17.7m	17.7m	-
62-Σημεία ελέγχου (H, B/H=0.73)	-	-	5.4m
53-Σημεία ελέγχου (H, B/H=0.32)			8m

Πίνακας 3.4: Ακρίβειες επίλυσης του μοντέλου Dowman and Gagan (Gagan, 1987) με 7 παραμέτρους

3.4.4. Μοντέλο Fritsch and Stallmann

Το μοντέλο παρουσιάστηκε το 2000 και αποτελεί επέκταση του μοντέλου που αναπτύχθηκε από τον V. Kratky. Η γεωμετρική λύση συνδυάζει την κλασική φωτογραμμετρική επίλυση με επιπρόσθετες δεσμεύσεις, που προκύπτουν μεταξύ των σχέσεων των γνωστών παραμέτρων θέτοντας ως παραδοχή ότι ο δορυφόρος εκτελεί ελλειπτική τροχιά. Οι γωνίες στροφής του δορυφόρου μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα γραμμικά ή δευτέρου βαθμού. Οι εφημερίδες του δορυφόρου δεν είναι απαραίτητες. Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού υπολογίζονται ως άγνωστες παράμετροι από την εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας (Fritsch and Stallmann, 2000). Η θέση του δέκτη προσδιορίζεται από τα στοιχεία της τροχιάς του δορυφόρου (κεπλέρια στοιχεία), οι γωνίες στροφής μοντελοποιούνται ως απλά γραμμικά ή 2^{ου} βαθμού πολυώνυμα και ως στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού προσδιορίζονται η διόρθωση της εστιακής απόστασης του φακού και η διόρθωση του πρωτεύοντος σημείου.

Οι παραδοχές, που γίνονται για την εφαρμογή του μοντέλου, είναι:

- Η κίνηση του δορυφόρου γίνεται σε ελλειπτική τροχιά (σχεδόν κυκλική).
- Κατά μήκος της τροχιάς το διάνυσμα με αρχή το προβολικό κέντρο κατευθύνεται πάντα προς το κέντρο της γης.
- Οι γραμμές σάρωσης πραγματοποιούνται από pushbroom με σταθερό ρυθμό σάρωσης.
- Η κάθε γραμμή σάρωσης έχει διαφορετικό εξωτερικό προσανατολισμό, που εξαρτάται από τον χρόνο.
- Υπάρχει συσχέτιση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού μεταξύ των γειτονικών γραμμών σάρωσης.
- Λόγω της πολύ μικρής στιγμιαίας γωνίας θέασης της κάμερας οι οπτικές ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες.
- Εισάγονται εξισώσεις δεσμεύσεων μεταξύ των στοιχείων θέσης της τροχιάς.

Για την εξακρίβωση της ακρίβειας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι στερεοσκοπικές δορυφορικές εικόνες του δορυφορικού συστήματος MOMS-2P, οι οποίες λήφθηκαν κατά μήκος της τροχιάς. Κατά την επίλυση χρησιμοποιήθηκαν αρκετές παραλλαγές του μοντέλου και οι επιτευχθείσες ακρίβειες των διαφόρων επιλύσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5.

Τροχιά	Έκδοση Μοντέλου	GCPs	Σημεία ελέγχου	RMS X	RMS Y	RMS Z
S (sort)	L (linear)	9	35	14.5	12.7	12.2
S (sort)	Q (quadratic)	9	35	11.8	13.5	13.1
L (long)	L (linear)	10	24	11.1	13.6	13.4
L (long)	Q (quadratic)	10	24	11.2	11.4	13.7
L (long)	L (linear)	15	20	10.4	14.1	13.0
L (long)	Q (quadratic)	15	20	10.1	10.5	13.8

Πίνακας 3.5: Ακρίβειες του μοντέλου των Fritsch και Stallmann με δεδομένα MOMS T083C

(Fritsch and Stallmann, 2000)

3.4.5. Μοντέλο Poli

Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής στο *Institute of Geodesy and Photogrammetry*, ΕΤΗ, στη Ζυρίχη. Είναι ένα γενικό αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε δορυφορικού δέκτης αλλά και σε δέκτης που τοποθετούνται σε αεροσκάφη. Επιπρόσθετα, μπορεί να εφαρμοστεί σε εικόνες που έχουν ληφθεί κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου και σε δέκτης με πολλαπλά συστήματα φακών.

Η συνθήκη συγγραμμικότητας περιγράφει την προβολική γεωμετρία της κάθε γραμμής σάρωσης. Η θέση και οι στροφές του δορυφόρου μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα $2^{\text{ου}}$ βαθμού εξαρτώμενα από τον χρόνο. Το μήκος της τροχιάς, που έχει διανύσει ο δέκτης για τη λήψη των εικόνων, διαιρείται σε τμήματα αναλόγως με τον αριθμό και τη διασπορά των φωτοσταθερών σημείων. Το κάθε τμήμα διαφοροποιείται και τα στοιχεία της θέσης και των στροφών του δέκτη περιγράφονται από διαφορετικά πολυώνυμα $2^{\text{ου}}$ βαθμού.

Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων, οι εφημερίδες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αρχικών τιμών των αγνώστων παραμέτρων. Επίσης, απαραίτητα είναι τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού του δέκτη καθώς και η γεωμετρία λήψης, που παρέχονται είτε άμεσα από το δορυφόρο (μέσω των μεταδεδομένων που συνοδεύουν την δορυφορική εικόνα) είτε από τη βιβλιογραφία.

Μια δοκιμή για την εξακρίβωση της ακρίβειας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-5 –HRS, σε περιοχή της Βαυαρίας και Αυστρίας. Τα στοιχεία των εφημερίδων των δορυφόρων (θέσεις, ταχύτητες σε ίσα χρονικά διαστήματα) χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού του μοντέλου. Τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

GCPs+Check Points	RMS E(m)	RMS N(m)	RMS h(m)
8+31	3.68	6.52	4.75
16+25	3.46	6.22	3.75
41+0	3.24	5.52	3.68

Πίνακας 3.6 : Ακρίβειες του μοντέλου Poli σε HRS δεδομένα (Poli, 2004)

3.5. Συμπεράσματα για τα υπάρχοντα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα

Όλα τα παραπάνω αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα περιγράφουν τη γεωμετρία λήψης των δορυφορικών εικόνων εφαρμόζοντας τη συνθήκη συγγραμμικότητας, ως ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει καλύτερα την προβολική γεωμετρία. Σε αντίθεση με τις αεροφωτογραφίες, όπου η γεωμετρία της λήψης της εικόνας γίνεται σε μία χρονική στιγμή έχοντας σταθερά τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού σε όλη την εικόνα, οι δορυφορικές εικόνες αποτελούνται από ένα σύνολο γραμμών, που η κάθε μία έχει διαφορετικά στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού. Βέβαια, μεταξύ των γειτονικών γραμμών υπάρχει μεγάλη συσχέτιση των παραμέτρων των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού, που συνήθως μπορούν να μοντελοποιηθούν με απλά γραμμικά ή δευτέρου βαθμού πολυώνυμα ως συνάρτηση του χρόνου λήψης. Οι παραδοχές που γίνονται για την εφαρμογή των μοντέλων είναι:

- Ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών, που συνθέτουν τη δορυφορική εικόνα, είναι σταθερός.
- Η κίνηση του δορυφόρου, για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η λήψη της εικόνας, είναι ομαλή (χωρίς διαταραχές) και η μεταβολή της θέσης του και των στροφών στους άξονες κίνησης μπορούν να περιγραφούν από απλά πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού.
- Η κάθε γραμμή σάρωσης έχει διαφορετικό εξωτερικό προσανατολισμό και εξαρτάται από τον χρόνο.

- Υπάρχει συσχέτιση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού μεταξύ των γειτονικών γραμμών σάρωσης.
- Λόγω της πολύ μικρής στιγμιαίας γωνίας θέασης της κάμερας, οι οπτικές ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες.
- Τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας είναι απαραίτητα για την εφαρμογή των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων.

Τα περισσότερα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα που παρέχουν εικόνες μεγάλης διακριτικής ικανότητας (<2m) δίνουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα (εφημερίδες, στροφές, κάμερα κ.α.) για την εφαρμογή των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων είτε με απλή εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας είτε προσθέτοντας άγνωστες παραμέτρους σε αυτήν με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα και αφορούν στην εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας με προσθήκη αγνώστων παραμέτρων, περιλαμβάνουν από 18 έως 26 άγνωστες παραμέτρους (σε πλήρη ανάπτυξη) για κάθε εικόνα, γεγονός που συνεπάγεται ότι για τον προσδιορισμό τους απαιτούνται κατ' ελάχιστον 9 έως 13 φωτοσταθερά σημεία (δεδομένου ότι κάθε μέτρηση δημιουργεί 2 εξισώσεις παρατήρησης από την εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας). Αρκετές παραλλαγές των παραπάνω μοντέλων έχουν αναπτυχθεί, εξετάζοντας τη σημαντικότητα των παραμέτρων, με σκοπό να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια με όσο το δυνατόν λιγότερες άγνωστες παραμέτρους (Weseretal, 2008).

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα νέο γεωμετρικό αυστηρό μοντέλο, που αναπτύχθηκε με σκοπό την εύρεση των στοιχείων του εξωτερικού και εσωτερικού προσανατολισμού και εφαρμόζεται σε μία εικόνα ή σε ζεύγος στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΟΥ ΑΥΣΤΗΡΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1. Περιγραφή του προτεινόμενου Αυστηρού Γεωμετρικού Μοντέλου

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται ένα νέο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο γεωαναφοράς των δορυφορικών εικόνων, οι οποίες συλλέγονται από γραμμικούς δέκτες *rushbroom* που φέρονται από τα δορυφορικά συστήματα. Το νέο μοντέλο είναι «αυστηρό» διότι περιγράφει με μαθηματική και γεωμετρική σχέση την ανάπτυξη της οπτικής δέσμης, όπως αυτή ήταν κατά τη στιγμή της λήψης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμετρία της λήψης των εικόνων όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά-ιδιότητες του δέκτη. Είναι «νέο» διότι εφαρμόζει τη συνθήκη συγγραμμικότητας στην πλήρη ανάπτυξή της, σε σχέση με τα μοντέλα που μέχρι τώρα έχουν αναπτυχθεί και τα οποία περιγράφουν τη συνθήκη συγγραμμικότητας με δύο εξισώσεις παρατήρησης. Το νέο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για τη γεωαναφορά μιας εικόνας ή στερεοζεύγους ή για τη γεωαναφορά ενός μπλοκ δορυφορικών εικόνων, εκτελώντας συνόρθωση (MET) των παρατηρήσεων για τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων (αεροτριγωνισμός). Επιπρόσθετα, για τη γεωαναφορά των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων το μοντέλο επιλύεται θέτοντας δεσμεύσεις, που αφορούν στη θέση και στη γεωμετρία λήψης των εικόνων από το δορυφόρο.

Τα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα (§ 3.4), εφαρμόζουν με κλασικό τρόπο τη συνθήκη συγγραμμικότητας. Δηλαδή, απαλείφεται σε αυτήν η σημειακή κλίμακα του κάθε σημείου παρατήρησης, με αποτέλεσμα για κάθε παρατήρηση εικονοσυντεταγμένων να δημιουργούνται δύο εξισώσεις παρατήρησης. Η μορφή αυτή της συνθήκης συγγραμμικότητας είναι,

βεβαίως, ισοδύναμη με την αρχική μορφή της, που περιγράφεται από τις τρεις εξισώσεις (Εξ. 2.47). Το νέο μοντέλο που αναπτύχθηκε, αξιοποιεί και τις τρεις εξισώσεις της συνθήκης, καθώς σε αυτό δεν απαλείφεται ο σημειακός συντελεστής κλίμακας αλλά μοντελοποιείται ως μία συνάρτηση επιφάνειας επιπέδου ή 2^{ου} βαθμού. Έτσι, για κάθε παρατηρούμενο σημείο δημιουργούνται τρεις εξισώσεις παρατήρησης F_x , F_y , F_z (Εξ. 4.1) αντί για δύο, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερα φωτοσταθερά σημεία για τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων.

Το νέο προτεινόμενο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, που περιγράφει καλύτερα την προβολική γεωμετρία της κάθε γραμμής σάρωσης από pushbroom αισθητήρα, συνδυάζοντας τροχιακά δεδομένα (εφημερίδες) και δεδομένα στροφών του δορυφόρου, με σκοπό να συσχετίσει τα σημεία του αντικειμένου που αναφέρονται στο ECEF σύστημα συντεταγμένων (§ 2.6.2.2) με τα αντίστοιχα σημεία που απεικονίζονται στη δορυφορική εικόνα.

Η μαθηματική περιγραφή του νέου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου δίνεται από την εξίσωση 4.1.

$$\begin{bmatrix} -x_o \\ y_s - y_o \\ f + df \end{bmatrix} = \frac{1}{[S_i(t_i) + ds(dy_i, dt)]} \cdot M_q \cdot M_{ab}(dt) \cdot M_b(t_i) \cdot \begin{bmatrix} Xg_i - (X_o(t_i) + dX_o(dt)) \\ Yg_i - (Y_o(t_i) + dY_o(dt)) \\ Zg_i - (Z_o(t_i) + dZ_o(dt)) \end{bmatrix}$$

Εξ. 4.1

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o \\ y_i + y_o \\ f + df \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

όπου:

$dt = t_{fl} - t_i$: t_i η χρονική στιγμή στο σημείο i και t_{fl} η χρονική στιγμή της πρώτης σαρωμένης γραμμής της εικόνας

y_s : συντεταγμένη στον άξονα y του σημείου i στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα

x_o, y_o : συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

$$dy_i = y_s - y_o$$

f, df : εστιακή απόσταση της μηχανής και η διόρθωσή της

$S_i(t_i)$: σημειακή κλίμακα του σημείου i

$ds(dy_i, dt)$: διόρθωση κλίμακας του σημείου i (επιφάνεια 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού), που εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$ds(dy_i, dt) = m_5 \cdot dt^2 + m_4 \cdot dy^2 + m_3 \cdot dt + m_2 \cdot dy + m_1 \cdot dt \cdot dy + m_o \quad \text{Εξ. 4.2}$$

Mq : πίνακας στροφής του φακού της κάμερας (pointing Angle)

$Mb(t_i)$: πίνακας στροφής των $\omega(t_i), \varphi(t_i), \kappa(t_i)$ του γεωκεντρικού συστήματος αναφοράς ως προς το σύστημα της κάμερας. Εξαρτάται από τον χρόνο t

$Mdb(dt)$: Διόρθωση του παραπάνω πίνακα στροφής με γραμμικά πολυώνυμα 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού, σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.3

$$d\omega(dt) = \omega_o + \omega_1 \cdot dt + \omega_2 \cdot dt^2$$

$$d\varphi(dt) = \varphi_o + \varphi_1 \cdot dt + \varphi_2 \cdot dt^2 \quad \text{Εξ. 4.3}$$

$$dk(dt) = k_o + k_1 \cdot dt + k_2 \cdot dt^2$$

Xg_i, Yg_i, Zg_i : συντεταγμένες σημείου εδάφους στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς

$Xo(t_i), Yo(t_i), Zo(t_i)$: συντεταγμένες του σημείου λήψης στο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς κατά τη χρονική στιγμή t_i

$dXo(dt), dYo(dt), dZo(dt)$: διορθώσεις των συντεταγμένων του σημείου λήψης, μοντελοποιημένες ως γραμμικά πολυώνυμα 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού, σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.4

$$dX_o(dt) = X_o + X_1 \cdot dt + X_2 \cdot dt^2$$

$$dY_o(dt) = Y_o + Y_1 \cdot dt + Y_2 \cdot dt^2 \quad \text{Εξ. 4.4}$$

$$dZ_o(dt) = Z_o + Z_1 \cdot dt + Z_2 \cdot dt^2$$

Η πλήρης ανάπτυξη του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων και των αγνώστων παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, περιλαμβάνει 27 άγνωστες παραμέτρους. Τρεις παράμετροι (x_0, y_0, df) αφορούν σε στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, εννέα παράμετροι αφορούν στις διορθώσεις των στροφών του δορυφόρου ($\omega_0, \omega_1, \omega_2, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$), εννέα παράμετροι στη διόρθωση της θέσης του δορυφόρου ($X_0, X_1, X_2, Y_0, Y_1, Y_2, Z_0, Z_1, Z_2$) και έξι παράμετροι περιγράφουν την 2^{ου} βαθμού επιφάνεια διόρθωσης της κλίμακας ($m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$). Επίσης, μπορούν να προστεθούν και επιπλέον παράμετροι, που αφορούν στις διορθώσεις της διαστροφής των φακών, αλλά κάτι τέτοιο θα επιβάρυνε το μοντέλο με επιπλέον άγνωστες παραμέτρους, όταν τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, όπως τα Quickbird και WorldView-1,2,3 δίνουν εικόνες με σχεδόν μηδενικές διαστροφές φακών.

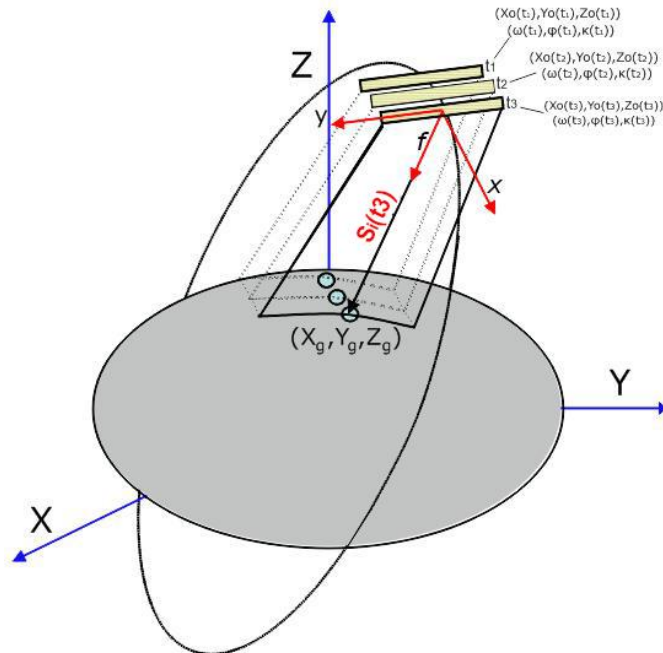
Το παραπάνω μοντέλο (Εξ. 4.1) εφαρμόζεται σε γραμμικούς pushbroom αισθητήρες με πολύ μικρό στιγμιαίο εύρος πεδίου όρασης (IFOV), της τάξης των 25 μrad . Η διόρθωση της σημειακής κλίμακας του σημείου, δεδομένου του μικρού εύρους του πεδίου όρασης αλλά και της σημαντικής διαφοράς μεταξύ του ύψους πτήσης του δορυφόρου (450 ~ 850Km) και του υψομέτρου του αντικειμένου, μοντελοποιείται ως μία επιφάνεια πρώτου ή δευτέρου βαθμού, αναλόγως της ακρίβειας αλλά και της τοπογραφίας του εδάφους, με σκοπό το σχηματισμό τριών εξισώσεων παρατήρησης (F_x, F_y, F_z) για κάθε παρατηρούμενο σημείο. Τροχιακά δεδομένα, σχετικά με τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου, είναι απαραίτητα για την επίλυση του προτεινόμενου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου, διότι χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού. Τα παραπάνω δεδομένα είτε δίνονται ως μεταδεδομένα, που συνοδεύουν τις δορυφορικές εικόνες (ASTER, SPOT, EROS, QuickBird, WorldView κ.α.), είτε μπορούν να προσδιορισθούν από μοντέλα πρόβλεψης τροχιάς (§ 2.5.4).

Επίσης, για την εφαρμογή του νέου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου (Εξ. 4.1) γεωαναφοράς των δορυφορικών εικόνων, είναι απαραίτητη η γνώση της

εστιακής απόσταση των φακών της κάμερας του δορυφόρου. Η ακρίβεια με την οποία δίνονται, τόσο η εστιακή απόσταση των φακών όσο και τα υπόλοιπα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού (πρωτεύον σημείο, διαστρόφη φακών, μέγεθος εικονοψηφίδας του αισθητήρα κ.α.) είναι συνδεδεμένη άμεσα με τον αριθμό των αγνώστων παραμέτρων κατά την επίλυση της Εξ. 4.1. Παρακάτω αναλύεται εκτενέστερα η εφαρμογή του νέου αυστηρού μοντέλου για τη γεωμετρική διόρθωση - γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων.

4.2. Γεωμετρία λήψης Δορυφορικής Εικόνας - παραδοχές

Η λήψη της δορυφορικής εικόνας πραγματοποιείται από την κάμερα του δορυφορικού συστήματος, το οποίο κινείται σε καθορισμένη τροχιά γύρω από τη γη. Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η συλλογή της εικόνας από κάμερες τύπου pushbroom γίνεται από γραμμικούς αισθητήρες οι οποίοι είναι διατεταγμένοι κάθετα στην κίνηση του δορυφόρου. Η κάθε γραμμή της εικόνας, που συλλέγεται και απεικονίζεται στο γραμμικό αισθητήρα (framelet), ακολουθεί τη γεωμετρία της κεντρικής προβολής και μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας. Η τελική εικόνα, που συλλέγεται σε καθορισμένο χρονικό διάστημα t , αποτελείται από τη συνένωση των επί μέρους γραμμών. Στο Σχήμα 4.1 δίνεται σχηματική παράσταση της γεωμετρίας λήψης της εικόνας, που απεικονίζεται σε γραμμικό αισθητήρα pushbroom σε συνεχείς χρονικές στιγμές t_1 , t_2 και t_3 .



Σχήμα 4.1. : Σχηματική παράσταση της γεωμετρίας λήψης εικόνας από γραμμικό αισθητήρα σε συνεχή χρονικά διαστήματα t_1 , t_2 και t_3 .

Για την εφαρμογή του νέου γεωμετρικού μοντέλου γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών, για το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας, είναι σταθερός.
- Η κίνηση του δορυφόρου, για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η λήψη της εικόνας, είναι ομαλή (χωρίς διαταραχές) και η μεταβολή της θέσης και της ταχύτητάς του μπορεί να περιγραφεί από πολυώνυμο $2^{ου}$ ή μεγαλύτερου βαθμού.
- Η κάθε γραμμή σάρωσης έχει διαφορετικό εξωτερικό προσανατολισμό και εξαρτάται από τον χρόνο.
- Υπάρχει συσχέτιση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού μεταξύ των γειτονικών γραμμών.
- Απαιτείται η γνώση της εστιακής απόστασης των φακών της κάμερας.
- Η δορυφορική εικόνα βρίσκεται στην πρωτότυπη μορφή της (raw data), όπως έχει συλλεχθεί από τον αισθητήρα χωρίς να έχει γίνει καμία γεωμετρική επεξεργασία (1A product).

Γενικά, για την εφαρμογή του μοντέλου θα πρέπει να είναι γνωστά όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας του δορυφόρου αλλά και του αισθητήρα, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει πλήρης μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας της λήψης. Όπως αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο, η εξίσωση 4.1 διαμορφώνεται αναλόγως του τύπου του δορυφόρου που έχει συλλέξει την εικόνα και του είδους των μεταδεδομένων που παρέχονται.

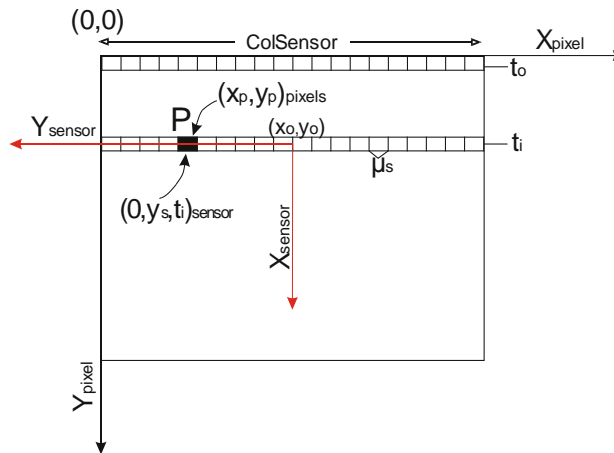
4.2.1. Παράγοντες της Εξίσωσης Παρατήρησης

Παρακάτω αναπτύσσονται οι εξισώσεις παρατήρησης, που προκύπτουν από την εφαρμογή του νέου γεωμετρικού μοντέλου, εφαρμόζοντας παρατηρήσεις τόσο των φωτοσταθερών σημείων (GCPs), όσο και σημείων σύνδεσης, δηλαδή μετρήσεων που πραγματοποιούνται μεταξύ των ομόλογων σημείων των δορυφορικών εικόνων (Tie Points), εάν πρόκειται για στερεοσκοπικές εικόνες.

4.2.1.1. Σύστημα Συντεταγμένων Δορυφορικών Εικόνων - Μετρήσεις

Το σύστημα αναφοράς των δορυφορικών εικόνων, οι οποίες είναι ψηφιακές απεικονίσεις, εξαρτάται από το είδος του αισθητήρα που έχει συλλέξει την εικόνα. Οι ψηφιακές εικόνες που έχουν συλλεχθεί από pushbroom γραμμικούς αισθητήρες, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, είναι αποτέλεσμα σύνθεσης επιμέρους γραμμών σάρωσης, που η κάθε μία έχει συλλεχθεί με διαφορετικά στοιχεία γεωμετρικής προβολικής απεικόνισης. Επειδή οι δορυφορικές εικόνες έχουν κανονικοποιημένη μορφή, δηλαδή απεικονίζονται με μορφή πίνακα εικονοψηφίδων (pixels) διαστάσεων r -γραμμών επί c -στηλών, η θέση της κάθε εικονοψηφίδας στο σύστημα της εικόνας δίνεται με τη μορφή των συντεταγμένων (r_i, c_j) όπου καθορίζεται η θέση του στον πίνακα. Για να μετασχηματίσουμε τις συντεταγμένες από το σύστημα της εικόνας στο σύστημα του αισθητήρα, προκειμένου να εισαχθούν στην εξίσωση 4.1, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα καθορίζονται ποιες είναι οι γραμμές σάρωσης της εικόνας. Συνήθως οι γραμμές σάρωσης των δορυφορικών εικόνων υλοποιούνται κατά την

οριζόντια διεύθυνση της εικόνας και συλλέγονται κατά την κάθετη σε αυτά κίνηση του δορυφόρου. Στην παράγραφο 2.3.8 περιγράφονται πλήρως οι μαθηματικές σχέσεις (Εξ. 2.33 και 2.34) καθώς και η διαδικασία μετατροπής των εικονοσυντεταγμένων από το σύστημα της εικόνας στο σύστημα του αισθητήρα (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. : Σχηματική αναπαράσταση μετασχηματισμού συντεταγμένων εικόνας (pixels) σε συντεταγμένες αισθητήρα.

Επομένως, μετρώντας στη δορυφορική εικόνα ένα σημείο P με συντεταγμένες (x_p, y_p) , εκφρασμένες σε pixels, αυτές μετατρέπονται σε συντεταγμένες του αισθητήρα $(0, y_s, t_i)$ και εισάγονται στην εξίσωση 4.1 σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$t_i = t_0 + y_p \cdot \Delta s \quad \text{Εξ. 4.5}$$

$$y_s = x_p \cdot \left(\frac{\text{ColSensor}}{2} - x_p \right) \cdot \mu_s \quad \text{Εξ. 4.6}$$

όπου:

t_i : η χρονική στιγμή σάρωσης στη θέση y_p

t_0 : η χρονική στιγμή σάρωσης της πρώτης γραμμής της εικόνας ($x_p=0$)

x_p, y_p : συντεταγμένες του σημείου P στην εικόνα (σε pixel)

Δs : ρυθμός σάρωσης της εικόνας

ColSensor: το πλάτος του αισθητήρα (CCD)

μ_s : το μέγεθος του φατνίου του αισθητήρα.

4.2.1.2. Παράμετροι Εξωτερικού Προσανατολισμού από τα Μεταδεδομένα

Τα στοιχεία της τροχιάς, στην οποία κινείται το δορυφορικό σύστημα, δίνονται με τη μορφή διανυσμάτων θέσης είτε στο εσωτερικό αδρανειακό σύστημα (ECI) είτε σε κάποιο γεωδαιτικό γεωκεντρικό σύστημα (ECEF). Εάν οι συντεταγμένες θέσης του δορυφόρου αναφέρονται στο αδρανειακό σύστημα απαιτείται η μετατροπή τους στο γεωδαιτικό γεωκεντρικό σύστημα, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.2.3. Συνήθως τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης δίνουν τη θέση και την ταχύτητα του δορυφόρου στο παγκόσμιο γεωκεντρικό σύστημα WGS-84 ή στο ITRF. Επίσης, παρέχουν τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού σε τακτά διακριτά χρονικά διαστήματα, της τάξης των 0.02 sec, οπότε είναι γνωστά για χρονικό διάστημα λίγο πριν από τη λήψη της πρώτης γραμμής και λίγο μετά της τελευταίας. Τα στοιχεία αυτά προσδιορίζονται από τους δέκτες GPS και από τα αδρανειακά συστήματα (IMU), που φέρουν το δορυφορικό σύστημα, με ακρίβειες που εξαρτάται από το είδος του δορυφορικού συστήματος, όπως αυτά αναφέρονται στην παράγραφο 3.3.1 και συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1. Ο προσδιορισμός της θέσης και των στροφών της κάμερας κατά τη χρονική στιγμή της λήψης της εικόνας-γραμμής, γίνεται με παρεμβολή στις τιμές των θέσεων και των στροφών του δορυφόρου, που μας δίνονται από τα συνοδευτικά αρχεία της δορυφορικής εικόνας (μεταδεδομένα). Για την εφαρμογή της εξίσωσης 4.1 χρησιμοποιείται πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ου} βαθμού, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.8.3. Δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή t_i προσδιορίζεται η θέση του δορυφόρου από τις εξισώσεις 4.7.

$$\begin{aligned} X_o(t_i) &= A_x \cdot t_i^3 + B_x \cdot t_i^2 + C_x \cdot t_i + D_x \\ Y_o(t_i) &= A_y \cdot t_i^3 + B_y \cdot t_i^2 + C_y \cdot t_i + D_y \\ Z_o(t_i) &= A_z \cdot t_i^3 + B_z \cdot t_i^2 + C_z \cdot t_i + D_z \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.7}$$

Ομοίως, για τον προσδιορισμό των στροφών γύρω από τους άξονες κίνησης της κάμερας κατά τη χρονική στιγμή t_i εφαρμόζονται οι εξισώσεις 4.8.

$$\begin{aligned}
\omega(t_i) &= A_\omega \cdot t_i^3 + B_\omega \cdot t_i^2 + C_\omega \cdot t_i + D_\omega \\
\varphi(t_i) &= A_\varphi \cdot t_i^3 + B_\varphi \cdot t_i^2 + C_\varphi \cdot t_i + D_\varphi \\
\kappa(t_i) &= A_\kappa \cdot t_i^3 + B_\kappa \cdot t_i^2 + C_\kappa \cdot t_i + D_\kappa
\end{aligned}
\tag{Εξ. 4.8}$$

4.2.1.3. Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού

Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού αφορούν στη διόρθωση της σταθεράς της κάμερας του δορυφόρου (df), τις συντεταγμένες x_o , y_o του πρωτεύοντος σημείου, τους συντελεστές του μοντέλου διόρθωσης της ακτινικής και της εφαπτομενικής διαστροφής των φακών, καθώς και τη διόρθωση λόγω κλίμακας, που στο γραμμικό σαρωτή έχει νόημα μόνο κατά τη διεύθυνση του αισθητήρα: $dy_s = S_y \cdot \bar{y}_p$

Οι εξισώσεις παρατήρησης του νέου γεωμετρικού μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας του δορυφόρου, παίρνουν τη μορφή της εξίσωσης 4.9.

$$\begin{bmatrix} x_{cam} + \delta\chi \\ y_{cam} + \delta y \\ f + df \end{bmatrix} = \frac{1}{[S_i(t_i) + ds(dy_i, dt)]} \cdot M_q \cdot M_{ab}(dt) \cdot M_b(t_i) \cdot \begin{bmatrix} Xg_i - (X_o(t_i) + dX_o(dt)) \\ Yg_i - (Y_o(t_i) + dY_o(dt)) \\ Zg_i - (Z_o(t_i) + dZ_o(dt)) \end{bmatrix}$$

Εξ. 4.9

όπου οι διορθώσεις ($\delta\chi$, δy) μοντελοποιούνται σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.10, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού.

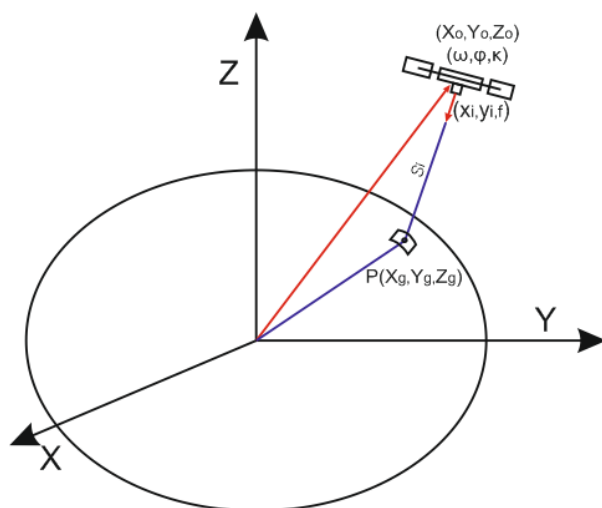
$$\begin{aligned}
\delta\chi &= -\frac{df}{f} \cdot \bar{x}_p + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \cdot \bar{x}_p + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot \bar{x}_p^2) + 2 \cdot p_2 \cdot \bar{x}_p \cdot \bar{y}_p \\
\delta y &= -\frac{df}{f} \cdot \bar{y}_p + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \cdot \bar{y}_p + 2 \cdot p_1 \cdot \bar{x}_p \cdot \bar{y}_p + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot \bar{y}_p^2) + S_y \cdot \bar{y}_p
\end{aligned}$$

Εξ. 4.10

4.2.1.4. Μοντελοποίηση της κλίμακας σημείου

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, η συνθήκη συγγραμμικότητας (Εξ. 4.1 ή Εξ. 4.9) εφαρμόζεται χωρίς να γίνεται η απαλοιφή της σημειακής κλίμακας. Αντ' αυτού προσδιορίζεται η κλίμακα για κάθε σημείο της εικόνας και συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση η διόρθωσή της. Η διόρθωση της σημειακής κλίμακας έχει διαπιστωθεί, όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο, ότι μοντελοποιείται ικανοποιητικά ως επιφάνεια 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού και εξαρτάται από το ανάγλυφο του εδάφους. Για παράδειγμα, εάν στη δορυφορική εικόνα αποτυπώνεται έδαφος με μεγάλες υψομετρικές διαφορές (χαράδρες, καταπτώσεις κ.α.) τότε η διόρθωση μοντελοποιείται ως επιφάνεια 2^{ου} βαθμού.

Για τη διερεύνηση της μοντελοποίησης της διόρθωσης της σημειακής κλίμακας, εφαρμόστηκε η γεωαναφορά ζευγών δορυφορικών εικόνων με χρήση των στοιχείων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, που συνοδεύουν τις εικόνες (μεταδεδομένα), και προσδιορίστηκε για διάφορα σημεία των εικόνων $P(i,j)$ η κλίμακα S_i . Η γεωαναφορά αυτή πραγματοποιήθηκε σε ζεύγη δορυφορικών εικόνων ASTER, SPOT-5, EROS-1,2A, QUICKBIRD, WORLDVIEW-1,2 και Pleiades, με εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας.



Σχήμα 4.3: Προσδιορισμός της σημειακής κλίμακας S_i του σημείου $P(i,j)$ της δορυφορικής εικόνας.

$$\begin{aligned} X_g &= X_o - (S_i) \cdot M_1 \cdot [x_i, y_i, f] \\ Y_g &= Y_o - (S_i) \cdot M_2 \cdot [x_i, y_i, f] \\ Z_g &= Z_o - (S_i) \cdot M_3 \cdot [x_i, y_i, f] \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.10}$$

$$\frac{X_g^2 + Y_g^2}{a^2} + \frac{Z_g^2}{(b + h_{DTM})^2} = 1 \quad \text{Εξ. 4.11}$$

όπου:

X_g, Y_g, Z_g : οι γεωκεντρικές συντεταγμένες του σημείου $P(i, j)$

X_o, Y_o, Z_o : η θέση του προβολικού κέντρου

S_i : η κλίμακα του σημείου i

M_i : οι πίνακες στροφών κατά τους άξονες X, Y, Z

x_i, y_i : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου $P(i, j)$ στη δορυφορική εικόνα

f : εστιακή απόσταση των φακών της κάμερας του δορυφόρου

a, b : μικρός και μεγάλος ημιάξονας του ελλειψοειδούς που αναφέρονται
οι συντεταγμένες X_g, Y_g, Z_g

h_{DTM} : γεωμετρικό υψόμετρο (από ψηφιακό μοντέλο εδάφους) στο σημείο
 $P(i, j)$

Από τις σχέσεις 4.10 και 4.11 προσδιορίζεται για κάθε σημείο $P(i, j)$ της δορυφορικής εικόνας η σημειακή κλίμακα S_i . Προσδιορίζοντας, αντίστοιχα, την κλίμακα S'_i με εφαρμογή της συνθήκη συγγραμμικότητας (§ 3.3.2), θεωρώντας γνωστές τις γεωκεντρικές συντεταγμένες των σημείων $P'(i, j)$, προκύπτουν οι διαφορές μεταξύ των σημειακών κλιμάκων (Εξ. 4.12).

$$ds(dy_i, dt) = S'_i(t_i) - S_i(t_i) \quad \text{Εξ. 4.12}$$

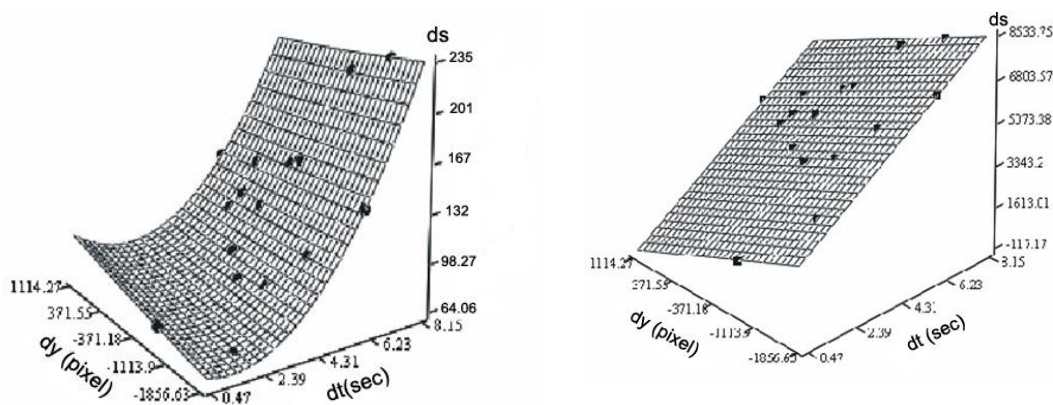
όπου:

$dt = t_{fl} - t_i$, με t_i τη χρονική στιγμή στο σημείο i και t_{fl} τη χρονική στιγμή της
πρώτης σαρωμένης γραμμής της εικόνας

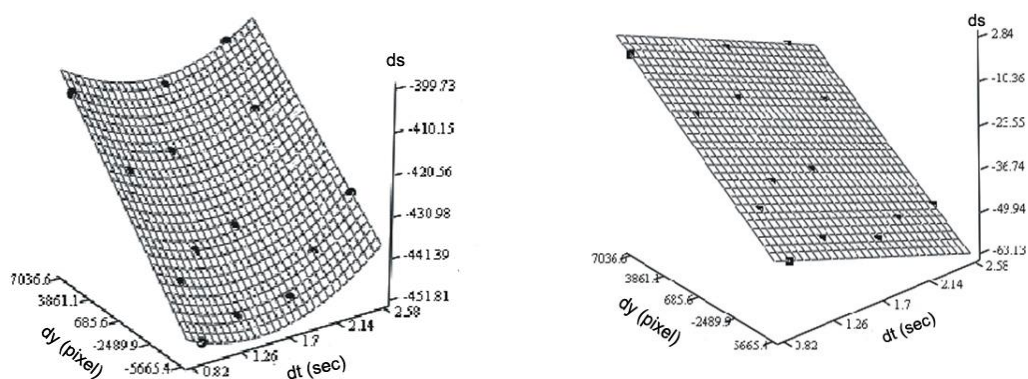
$dy_i = y_o - y_s$, y_s η εικονοσυντεταγμένη του σημείου i στο σύστημα
συντεταγμένων του αισθητήρα

y_o : συντεταγμένη του πρωτεύοντος σημείου.

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις 4.10, 4.11 και 4.12 σε ζεύγη δορυφορικών εικόνων, όπου έγινε η εφαρμογή του νέου γεωμετρικού μοντέλου (κεφάλαιο 5), προσδιορίστηκε ότι η διόρθωση της κλίμακας $ds(dy_i, dt)$ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση που περιγράφει επιφάνεια 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού (εξίσωση 4.2). Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται με γραφικές απεικονίσεις τα αποτελέσματα από τη διερεύνηση της μοντελοποίησης της διόρθωσης της κλίμακας $ds(dy_i, dt)$, που πραγματοποιήθηκαν για τα δορυφορικά συστήματα ASTER και QuickBird, χρησιμοποιώντας 16 και 14 φωτοσταθερά αντίστοιχα, όπου προσδιορίστηκαν οι τιμές ds , σύμφωνα με την εξίσωση 4.12.



Σχήμα 4.4. : Προσαρμογή επιφάνειας 2^{ου} βαθμού (αριστερά) και 1^{ου} βαθμού (δεξιά) στη διόρθωση της κλίμακας ds για το δορυφορικό σύστημα ASTER.



Σχήμα 4.5. : Προσαρμογή επιφάνειας 2^{ου} βαθμού (αριστερά) και 1^{ου} βαθμού (δεξιά) στη διόρθωση της κλίμακας ds για το δορυφορικό σύστημα QuickBird.

4.2.2. Επίλυση του συστήματος

Η επίλυση του μοντέλου γεωαναφοράς πραγματοποιείται με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (M.E.T) χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων είτε τη γενική συνθήκη ή των μικτών εξισώσεων. Οι μετρούμενες ή παρατηρούμενες ποσότητες είναι οι εικονοσυντεταγμένες, εκφρασμένες είτε σε pixels είτε στο σύστημα αναφοράς του αισθητήρα του δορυφόρου. Η μέθοδος που θα επιλεγεί για την επίλυση του μοντέλου εξαρτάται από τα διαθέσιμα στοιχεία. Για παράδειγμα, εάν είναι γνωστή η γεωδαιτική ακρίβεια προσδιορισμού των φωτοσταθερών σημείων, τότε εκτός από την μέτρηση των αντίστοιχων εικονοσυντεταγμένων (με τα σφάλματά τους), πρέπει κατά την επίλυση του μοντέλου να ληφθούν υπόψη και τα σφάλματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών σημείων, επομένως θα πρέπει η επίλυση του μοντέλου να γίνει με τη μέθοδο των μικτών εξισώσεων. Οι εξισώσεις παρατηρήσεων του μοντέλου δεν είναι γραμμικές, ως εκ τούτου για την επίλυση του μοντέλου απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γραμμικοποίησή τους.

4.2.2.1. Γραμμικοποίηση των Εξισώσεων Παρατήρησης

Κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου οι παρατηρήσεις ή οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται είναι εικονοσυντεταγμένες εκφρασμένες σε pixels ή στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα και αφορούν είτε φωτοσταθερά σημεία (GCPs), είτε σημεία σύνδεσης μεταξύ των δορυφορικών εικόνων (TPs), είτε ανεξάρτητα σημεία ελέγχου (ICPs). Οι εξισώσεις παρατηρήσεων του μοντέλου (Εξ. 4.1 ή 4.9) διαμορφώνονται όπως παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{bmatrix} = \frac{1}{[S_i(t_i) + ds(dy_i, dt)]} \cdot M_q \cdot M_{ab}(dt) \cdot M_b(t_i) \cdot \begin{bmatrix} Xg_i - (X_o(t_i) + dX_o(dt)) \\ Yg_i - (Y_o(t_i) + dY_o(dt)) \\ Zg_i - (Z_o(t_i) + dZ_o(dt)) \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 4.13}$$

Για κάθε παρατήρηση, δημιουργούνται τρεις (3) εξισώσεις παρατήρησης Fx, Fy, Fz . Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων Fx, Fy, Fz γύρω από αρχικές τιμές

γίνεται χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα, κατά τον πρώτο όρο, της σειράς Taylor ως προς τις αγνώστους παραμέτρους του μοντέλου. Προσδιορίζονται οι Ιακωβιανοί πίνακες J_x , J_y , J_z με στοιχεία τις μερικές παραγώγους ως προς τις 27 παραμέτρους (Εξ. 4.14).

$$\begin{aligned}
 J_{k,1} &= \frac{\partial F_k}{\partial X_0}, J_{k,2} = \frac{\partial F_k}{\partial X_1}, J_{k,3} = \frac{\partial F_k}{\partial ZX_2} \\
 J_{k,4} &= \frac{\partial F_k}{\partial Y_0}, J_{k,5} = \frac{\partial F_k}{\partial Y_1}, J_{k,6} = \frac{\partial F_k}{\partial Y_2} \\
 J_{k,7} &= \frac{\partial F_k}{\partial Z_0}, J_{k,8} = \frac{\partial F_k}{\partial Z_1}, J_{k,9} = \frac{\partial F_k}{\partial Z_2} \\
 J_{k,10} &= \frac{\partial F_k}{\partial \omega_0}, J_{k,11} = \frac{\partial F_k}{\partial \omega_1}, J_{k,12} = \frac{\partial F_k}{\partial \omega_2} \\
 J_{k,13} &= \frac{\partial F_k}{\partial \varphi_0}, J_{k,14} = \frac{\partial F_k}{\partial \varphi_1}, J_{k,15} = \frac{\partial F_k}{\partial \varphi_2} \\
 J_{k,16} &= \frac{\partial F_k}{\partial \kappa_0}, J_{k,17} = \frac{\partial F_k}{\partial \kappa_1}, J_{k,18} = \frac{\partial F_k}{\partial \kappa_2} \\
 J_{k,19} &= \frac{\partial F_k}{\partial m_5}, J_{k,20} = \frac{\partial F_k}{\partial m_4}, J_{k,21} = \frac{\partial F_k}{\partial m_3}, J_{k,22} = \frac{\partial F_k}{\partial m_2}, J_{k,23} = \frac{\partial F_k}{\partial m_1}, J_{k,24} = \frac{\partial F_k}{\partial m_0} \\
 J_{k,25} &= \frac{\partial F_k}{\partial f}, J_{k,26} = \frac{\partial F_k}{\partial x_0}, J_{k,27} = \frac{\partial F_k}{\partial y_0}
 \end{aligned} \tag{Εξ. 4.14}$$

όπου: $k = X, Y, Z$.

Αναλυτικά οι γραμμικοποιημένες σχέσεις παραθέτονται στο Παράρτημα «Α».

Ο πίνακας βαρών P των παρατηρήσεων αλλά και των υπολοίπων παραμέτρων διαμορφώνεται:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{x_1}^2} & 0 & 0 & & & \\ 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{y_1}^2} & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{f_1}^2} & & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ & & & & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{x_n}^2} & 0 & 0 \\ 0 & & \dots & 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{y_n}^2} & 0 & \\ & & & 0 & 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{f_n}^2} & \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad P = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{x_1}^2} & 0 & 0 & & & & \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{f_n}^2} & & & 0 & 0 \\ 0 & & & \ddots & 0 & & \\ 0 & & 0 & & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{x_{gn}}^2} & & \\ & & 0 & & & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{y_{gn}}^2} & 0 \\ & & 0 & & & 0 & \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{z_{gn}}^2} \end{bmatrix}$$

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου με μικτές εξισώσεις παρατηρήσεων ο πίνακας B ορίζεται:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x_i} & \frac{\partial u_x}{\partial y_i} & \frac{\partial u_x}{\partial f} & \frac{\partial u_x}{\partial X g_i} & \frac{\partial u_x}{\partial Y g_i} & \frac{\partial u_x}{\partial Z g_i} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x_i} & \frac{\partial u_y}{\partial y_i} & \frac{\partial u_y}{\partial f} & \frac{\partial u_y}{\partial X g_i} & \frac{\partial u_y}{\partial Y g_i} & \frac{\partial u_y}{\partial Z g_i} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x_i} & \frac{\partial u_z}{\partial y_i} & \frac{\partial u_z}{\partial f} & \frac{\partial u_z}{\partial X g_i} & \frac{\partial u_z}{\partial Y g_i} & \frac{\partial u_z}{\partial Z g_i} \end{bmatrix}$$

όπου: $i = 1 \dots n$ ο αριθμός των μετρούμενων σημείων.

Οι συναρτήσεις (u_x, u_y, u_z) ορίζονται:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o \\ y_i + y_o \\ f + df \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Σχηματίζοντας τους πίνακες σχεδιασμού των παρατηρήσεων του μοντέλου και εφαρμόζοντας τη Μ.Ε.Τ προσδιορίζονται οι άγνωστες παράμετροι.

4.2.2.2. Επίλυση του μοντέλου για μία δορυφορική εικόνα (φωτογραμμετρική οπισθοτομία)

Η εφαρμογή του μοντέλου, σε πλήρη ανάπτυξη (24 παράμετροι), μη συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού (df, x_0, y_0), για τη γεωαναφορά μίας δορυφορικής εικόνας απαιτεί τη μέτρηση τουλάχιστον 8 φωτοσταθερών σημείων. Στην πράξη, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου σε διάφορες δορυφορικές εικόνες (κεφάλαιο 5), 14 ή 15 παράμετροι είναι αρκετές για να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μετρώντας n φωτοσταθερά σημεία κατασκευάζουμε τον πίνακα σχεδιασμού J (ιακωβιανός πίνακας), τον πίνακα βαρών P και τον πίνακα των υπολοίπων w . Ως αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων m θέτουμε το μηδέν. Οι διαστάσεις των πινάκων του συστήματος είναι:

$$J = (3 \cdot n \times 24), \quad B = (3 \cdot n \times 6 \cdot n), \quad P = (6 \cdot n \times 6 \cdot n), \quad w = (3 \cdot n)$$

Το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου $x(m)$, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των μικτών εξισώσεων, προκύπτει από την εξίσωση 4.15.

$$\begin{aligned} M &= B \cdot P^{-1} \cdot B^T \\ N &= J^T \cdot M^{-1} \cdot J \\ u &= J^T \cdot M^{-1} \cdot w \\ x(m) &= -N^{-1} \cdot u \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.15}$$

Για την εύρεση υπολοίπων V και της a-posteriori τυπικής απόκλισης $\hat{\sigma}_o$ εφαρμόζονται οι εξισώσεις 4.16.

$$\begin{aligned} V &= P^{-1} \cdot B^T \cdot M^{-1} \cdot (w - J \cdot x) \\ \hat{\sigma}_o &= \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{3 \cdot n - m}} \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.16}$$

Η επαναληπτική διαδικασία εκτελείται έως ότου η διαφορά των τιμών των αγνώστων παραμέτρων που προκύπτουν από τις διαδοχικές λύσεις γίνει μικρότερη από μία τιμή κατωφλίου μ .

$$|x(m)_i - x(m)_{i-1}| < \mu$$

Η τιμή κατωφλίου ορίζεται: $\mu = 0.0001 \cdot (u^T \cdot u)$

Κατόπιν, εκτελείται τεστ σημαντικότητας (με κατανομή student) των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου (§ 2.7.6) εφαρμόζοντας την εξίσωση 2.60 για τη διερεύνηση, για συγκεκριμένη πιθανότητα, του βαθμού επηρεασμού της λύσης του συστήματος από την άγνωστη παράμετρο. Έτσι, εντοπίζονται και απαλείφονται από το σύστημα άγνωστες παράμετροι που δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λύση, με αποτέλεσμα να απλοποιείται το μοντέλο και να απαιτείται να προσδιοριστούν λιγότερες παράμετροι (άρα και φωτοσταθερά) για την επίλυσή του.

4.2.2.3. Επίλυση του μοντέλου για μπλοκ δορυφορικών εικόνων

Η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς των δορυφορικών εικόνων μπορεί να γίνει σε στερεοζεύγη δορυφορικών εικόνων ή σε μπλοκ δορυφορικών εικόνων. Στην περίπτωση αυτή εκτός των μετρήσεων των φωτοσταθερών σημείων (GCPs) πραγματοποιούνται και μετρήσεις ομόλογων σημείων μεταξύ των εικόνων (Tie Points) αυξάνοντας τον αριθμό των παρατηρήσεων. Το σύστημα που προκύπτει συνορθώνεται ενιαία, προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τα στοιχεία των αγνώστων παραμέτρων της κάθε εικόνας καθώς και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των ομόλογων σημείων (αεροτριγωνισμός).

Οι αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων m για κάθε εικόνα θεωρούνται ως μηδενικές ενώ ως αρχικές τιμές των γεωδαιτικών συντεταγμένων των ομόλογων σημείων σύνδεσης λαμβάνονται οι συντεταγμένες που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου (φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία) στο οποίο έχουμε

θέσει την τιμή μηδέν στις άγνωστες παραμέτρους. Οι συντεταγμένες των ομόλογων σημείων σύνδεσης, που έχουν μετρηθεί στην εικόνα I και στην εικόνα II προσδιορίζονται από τις εξισώσεις 4.17.

$$\begin{aligned} X_o^I - (S_i^I) \cdot M_1^I \cdot [x_i^I, y_i^I, f] &= X_o^{II} - (S_i^{II}) \cdot M_1^{II} \cdot [x_i^{II}, y_i^{II}, f] \\ Y_o^I - (S_i^I) \cdot M_2^I \cdot [x_i^I, y_i^I, f] &= Y_o^{II} - (S_i^{II}) \cdot M_2^{II} \cdot [x_i^{II}, y_i^{II}, f] \\ Z_o^I - (S_i^I) \cdot M_3^I \cdot [x_i^I, y_i^I, f] &= Z_o^{II} - (S_i^{II}) \cdot M_3^{II} \cdot [x_i^{II}, y_i^{II}, f] \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.17}$$

όπου:

X_o^I, Y_o^I, Z_o^I : η θέση του προβολικού κέντρου στην εικόνα I τη χρονική στιγμή t

$X_o^{II}, Y_o^{II}, Z_o^{II}$: η θέση του προβολικού κέντρου στην εικόνα II τη χρονική στιγμή t

x_i^I, y_i^I : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου σύνδεσης στην εικόνα I

x_i^{II}, y_i^{II} : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου σύνδεσης στην εικόνα II

M_i^I : οι πίνακες στροφών γύρω από τους άξονες X, Y, Z της εικόνας I

M_i^{II} : οι πίνακες στροφών γύρω από τους άξονες X, Y, Z της εικόνας II

S_i^I, S_i^{II} : οι σημειακές κλίμακες του σημείου σύνδεσης στις εικόνες I και II αντίστοιχα.

f : η εστιακή απόσταση των φακών της κάμερας του δορυφόρου.

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 4.17, εφαρμόζοντας τη Μ.Ε.Τ, προσδιορίζονται οι κλίμακες S_i^I και S_i^{II} .

Μετρώντας n φωτοσταθερά σημεία, k σημεία συνδέσεως σε l δορυφορικές εικόνες, με πλήρη ανάπτυξη του μοντέλου (m -παραμέτροι/εικόνα), οι διαστάσεις των πινάκων σχεδιασμού J , βαρών P και υπολοίπων w διαμορφώνονται όπως παρακάτω:

$$J = [[l \cdot 3 \cdot (n + k)] \times [m \cdot l + 3 \cdot k]]$$

$$P = [[l \cdot 3 \cdot (n + k)] \times [l \cdot 3 \cdot (n + k)]]$$

$$w = [l \cdot 3 \cdot (n + k)]$$

Εφαρμόζοντας την μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων η επίλυση του μοντέλου προκύπτει από την εξίσωση 4.18.

$$x = (J^T \cdot P \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot P \cdot w \quad \text{Εξ. 4.18}$$

Στην επίλυση του μοντέλου ο κανονικός πίνακας $J^T \cdot P \cdot J$ (N) λόγω των μεγάλων διαστάσεων αλλά και της ιδιαιτερότητάς του να περιέχει στοιχεία είτε μηδενικά είτε με τιμή που πλησιάζει στο μηδέν. Για την αντιστροφή του χρησιμοποιείται η τεχνική παραγοντοποίησης ενός πίνακα σε πίνακες L και U (Horncroftetal, 1971). Επομένως η λύση του συστήματος προκύπτει από τις εξισώσεις 4.19.

$$\begin{aligned} N &= L \cdot U \\ x &= N^{-1} \cdot J^T \cdot P \cdot w \\ y &= L^{-1} \cdot J^T \cdot P \cdot w \\ x &= U^{-1} \cdot y \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.19}$$

όπου: x το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου.

Για την εύρεση των υπολοίπων V και της a-posteriori τυπικής απόκλισης $\hat{\sigma}_o$ εφαρμόζονται οι εξισώσεις 4.20.

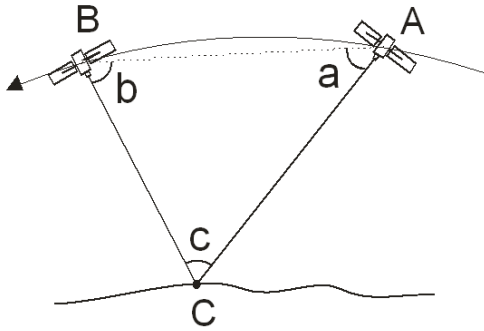
$$\begin{aligned} V &= J \cdot x - w \\ \hat{\sigma}_o &= \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{i \cdot 3 \cdot n - (i \cdot m + 3 \cdot c)}} \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.20}$$

όπου:

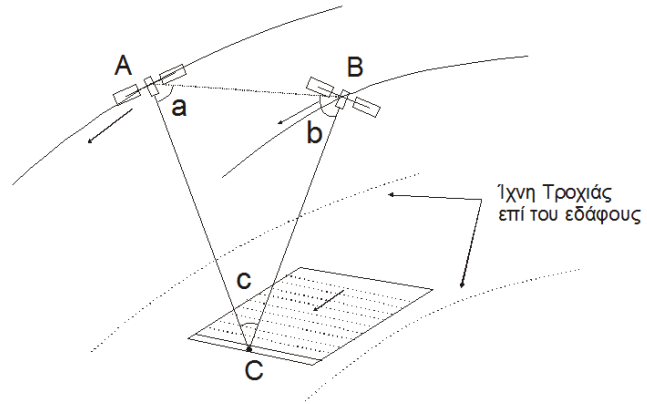
- i : ο αριθμός των δορυφορικών εικόνων
- n : αριθμός των φωτοσταθερών σημείων (GCPs)
- m : οι άγνωστοι παράμετροι του μοντέλου για κάθε εικόνα
- c : ο αριθμός των μετρημένων σημείων σύνδεσης (TPs).

4.2.2.4. Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις

Για την επίλυση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, που αφορά σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων οι οποίες έχουν ληφθεί κατά μήκος ή κατά πλάτος της τροχιάς κίνησης του δορυφόρου, χρησιμοποιούνται επιπλέον εξισώσεις παρατηρήσεων, που προκύπτουν από τη γεωμετρία λήψης των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων.



Σχήμα 4.6α: Γεωμετρία λήψης στερεοζεύγους δορυφορικών εικόνων κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου.



Σχήμα 4.6β: Γεωμετρία λήψης στερεοζεύγους δορυφορικών εικόνων κατά πλάτος της τροχιάς του δορυφόρου.

Οι άγνωστες παράμετροι του συστήματος δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή, το μοντέλο των εξισώσεων των παρατηρήσεων δεν αποτελεί σύνολο θεμελιωδών παραμέτρων περιγραφής του. Εάν το σύστημα έχει k πλεονάζουσες παραμέτρους τότε το μαθηματικό μοντέλο πρέπει να συμπληρωθεί με k εξισώσεις δεσμεύσεων. Για κάθε παρατήρηση-μέτρηση φωτοσταθερού σημείου και σημείου σύνδεσης, το οποίο περιέχεται σε δύο δορυφορικές εικόνες, εκτός από τις τρεις (3) εξισώσεις παρατήρησης, που προκύπτουν από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου (Εξ. 4.1), προκύπτει μία επιπλέον εξίσωση δεσμεύσης, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση 4.21.

$$h(x_m) = \hat{a} + \hat{b} + \hat{c} - \pi = 0 \quad \text{Εξ. 4.21}$$

Οι γωνίες \hat{a} , \hat{b} , \hat{c} προσδιορίζονται από τις εξισώσεις 4.22.

$$\hat{a} = \arccos \left[\frac{\overline{AB} \cdot \overline{AC}}{|\overline{AB}| \cdot |\overline{AC}|} \right], \hat{b} = \arccos \left[\frac{\overline{BA} \cdot \overline{BC}}{|\overline{BA}| \cdot |\overline{BC}|} \right], \hat{c} = \arccos \left[\frac{\overline{CA} \cdot \overline{CB}}{|\overline{CA}| \cdot |\overline{CB}|} \right]$$

$$\text{Εξ. 4.22}$$

Τα διανύσματα ορίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.23.

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{AB} &= (X_o^B - X_o^A, Y_o^B - Y_o^A, Z_o^B - Z_o^A) \\
 \overrightarrow{AC} &= (X_g^C - X_o^A, Y_g^C - Y_o^A, Z_g^C - Z_o^A) \\
 \overrightarrow{BA} &= (X_o^A - X_o^B, Y_o^A - Y_o^B, Z_o^A - Z_o^B) \\
 \overrightarrow{BC} &= (X_g^C - X_o^B, Y_g^C - Y_o^B, Z_g^C - Z_o^B) \\
 \overrightarrow{CA} &= (X_o^A - X_g^C, Y_o^A - Y_g^C, Z_o^A - Z_g^C) \\
 \overrightarrow{CB} &= (X_o^B - X_g^C, Y_o^B - Y_g^C, Z_o^B - Z_g^C)
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 4.23}$$

όπου:

(X_o^A, Y_o^A, Z_o^A) : οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της εικόνας A τη χρονική στιγμή t

(X_o^B, Y_o^B, Z_o^B) : οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της εικόνας B τη χρονική στιγμή t

(X_g^C, Y_g^C, Z_g^C) : οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου C.

Οι άγνωστες παράμετροι, που περιέχονται στην εξίσωση παρατήρησης που προκύπτει από την παραπάνω δέσμευση (Εξ. 4.21) είναι οι παράμετροι του μοντέλου που αναφέρονται στο σύστημα εξισώσεων 4.4. Αναλυτικά, συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.4 και 4.7, οι θέσεις των προβολικών κέντρων της εικόνας A και της εικόνας B μπορούν να περιγραφούν από τις εξισώσεις 4.24 και 4.25 αντιστοίχως.

$$\begin{aligned}
 X_o^A &= X_o^A(t_i) + dX_o^A(dt_i) \Rightarrow X_o^A = X_o^A(t_i) + X_o^A + X_1^A \cdot dt_i + X_2^A \cdot dt_i^2 \\
 Y_o^A &= Y_o^A(t_i) + dY_o^A(dt_i) \Rightarrow Y_o^A = Y_o^A(t_i) + Y_o^A + Y_1^A \cdot dt_i + Y_2^A \cdot dt_i^2 \\
 Z_o^A &= Z_o^A(t_i) + dZ_o^A(dt_i) \Rightarrow Z_o^A = Z_o^A(t_i) + Z_o^A + Z_1^A \cdot dt_i + Z_2^A \cdot dt_i^2
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 4.24}$$

$$\begin{aligned}
 X_o^B &= X_o^B(t_j) + dX_o^B(dt_{II}) \Rightarrow X_o^B = X_o^B(t_j) + X_o^B + X_1^B \cdot dt_{II} + X_2^B \cdot dt_{II}^2 \\
 Y_o^B &= Y_o^B(t_j) + dY_o^B(dt_{II}) \Rightarrow Y_o^B = Y_o^B(t_j) + Y_o^B + Y_1^B \cdot dt_{II} + Y_2^B \cdot dt_{II}^2 \\
 Z_o^B &= Z_o^B(t_j) + dZ_o^B(dt_{II}) \Rightarrow Z_o^B = Z_o^B(t_j) + Z_o^B + Z_1^B \cdot dt_{II} + Z_2^B \cdot dt_{II}^2
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 4.25}$$

Η επίλυση του μοντέλου πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμεύσεις και επιλύεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$w = A \cdot x_t + v$$

$$H \cdot x_m = z$$

όπου :

$$H = \frac{\partial h}{\partial x_m}, \quad z = -h(x_m^o)$$

x_m^o : αρχικές προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων.

Από την εφαρμογή του κριτηρίου των ελαχίστων τετραγώνων με βάρη, προκύπτουν οι κανονικές εξισώσεις 4.26.

$$\begin{bmatrix} A^T \cdot P \cdot A & H^T \\ H & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T \cdot P \cdot b \\ z \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 4.26}$$

όπου: k είναι το βοηθητικό διάνυσμα διαστάσεων $K \times 1$ (συντελεστές Lagrange).

Η λύση πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα προσδιορίζεται οι άγνωστες παράμετροι x_t χωρίς τις δεσμεύσεις:

$$x_t = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot w$$

και στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται η λύση με δεσμεύσεις:

$$S = H \cdot N^{-1} \cdot H^T$$

$$x = x_t + N^{-1} \cdot H^T \cdot S^{-1} \cdot (z - H \cdot x_t)$$

$$V_x = N^{-1} - N^{-1} \cdot H^T \cdot S^{-1} \cdot H \cdot N^{-1}$$

$$\hat{\sigma}_o = \sqrt{\frac{v^T \cdot P \cdot v}{n - m + k}}$$

Με την παραπάνω παραλλαγή της επίλυσης του μοντέλου, το σύστημα συμπληρώνεται με k εξισώσεις δεσμεύσεων, έτσι ώστε ο παραμετρικός βαθμός r του συστήματος να είναι ίσος με τις ανεξάρτητες παραμέτρους m ($r+k=m$).

4.2.3. Αξιολόγηση της επίλυσης του μοντέλου

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας της επίλυσης του μοντέλου, είτε αυτό έχει εφαρμοστεί σε μία είτε σε περισσότερες δορυφορικές εικόνες, απαιτείται η μέτρηση ανεξάρτητων σημείων ελέγχου (ICPs), τα οποία προσδιορίζονται στις εικόνες και στο έδαφος. Τα ανεξάρτητα σημεία ελέγχου δεν συμμετέχουν στην επίλυση του μοντέλου αλλά εφόσον αυτό επιλυθεί προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τους με εφαρμογή του μοντέλου. Έπειτα, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των γεωδαιτικών συντεταγμένων που προσδιορίστηκαν βάσει του μοντέλου με αυτές που προσδιορίστηκαν με επίγειες μεθόδους (π.χ. με μετρήσεις GPS). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα προσδιορίζεται από την εξίσωση 2.57. Η ακρίβεια της επίλυσης οριζοντιογραφικά εκφράζεται ως κυκλικό σφάλμα με πιθανότητα, που συνήθως είναι 90% ή 95% (CE90 ή CE95), ακολουθώντας την κατανομή Gauss.

$$d = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, \quad \text{όπου: } u_x = X_{ICP} - X_{MODEL}, \quad u_y = Y_{ICP} - Y_{MODEL}$$

$$RMS_{Hor} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{k}}, \quad \kappa: \text{ο αριθμός των σημείων ICP} \quad \text{Εξ. 4.27}$$

$$RMS_{Hor(CE90)} = 1.5175 \cdot RMS_{Hor}$$

$$RMS_{Hor(CE95)} = 1.7308 \cdot RMS_{Hor} \quad \text{Εξ. 4.28}$$

Ομοίως, για τον προσδιορισμό της υψομετρικής ακρίβειας υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα:

$$u_z = Z_{ICP} - Z_{MODEL}$$

$$RMS_{Ver} = \sqrt{\frac{\sum u_z^2}{k}}, \quad \kappa: \text{αριθμός ICP σημείων} \quad \text{Εξ. 4.29}$$

$$RMS_{Ver(LE90)} = 1.6449 \cdot RMS_{Hor} \quad \text{Εξ. 4.30}$$

4.3. Ανάπτυξη λογισμικού

Για την επίλυση του μοντέλου, αλλά και την εφαρμογή του σε διάφορους τύπους δορυφορικών εικόνων, αναπτύχθηκαν ειδικά λογισμικά. Ειδικότερα, αναπτύχθηκε λογισμικό για:

- την επίλυση του μοντέλου
- τον προσδιορισμό του υψομετρικού μοντέλου εδάφους και
- την ορθοδιόρθωση των δορυφορικών εικόνων.

Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MatLab για την εκτέλεση των παραπάνω εργασιών σε συνδυασμό με τη γλώσσα προγραμματισμού VB.Net και VBA για Autocad και ArcGis για την επεξεργασία των εικόνων.

Αναλόγως του δορυφορικού συστήματος το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να παραμετροποιείται κατάλληλα για την επεξεργασία των μεταδεδομένων των δορυφορικών εικόνων, προκειμένου να μετασχηματιστούν σε κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορούν να εισαχθούν ως παράμετροι στο μαθηματικό μοντέλο, όπως καθορίζεται και περιγράφεται στην εξίσωση 4.1 ή 4.9.

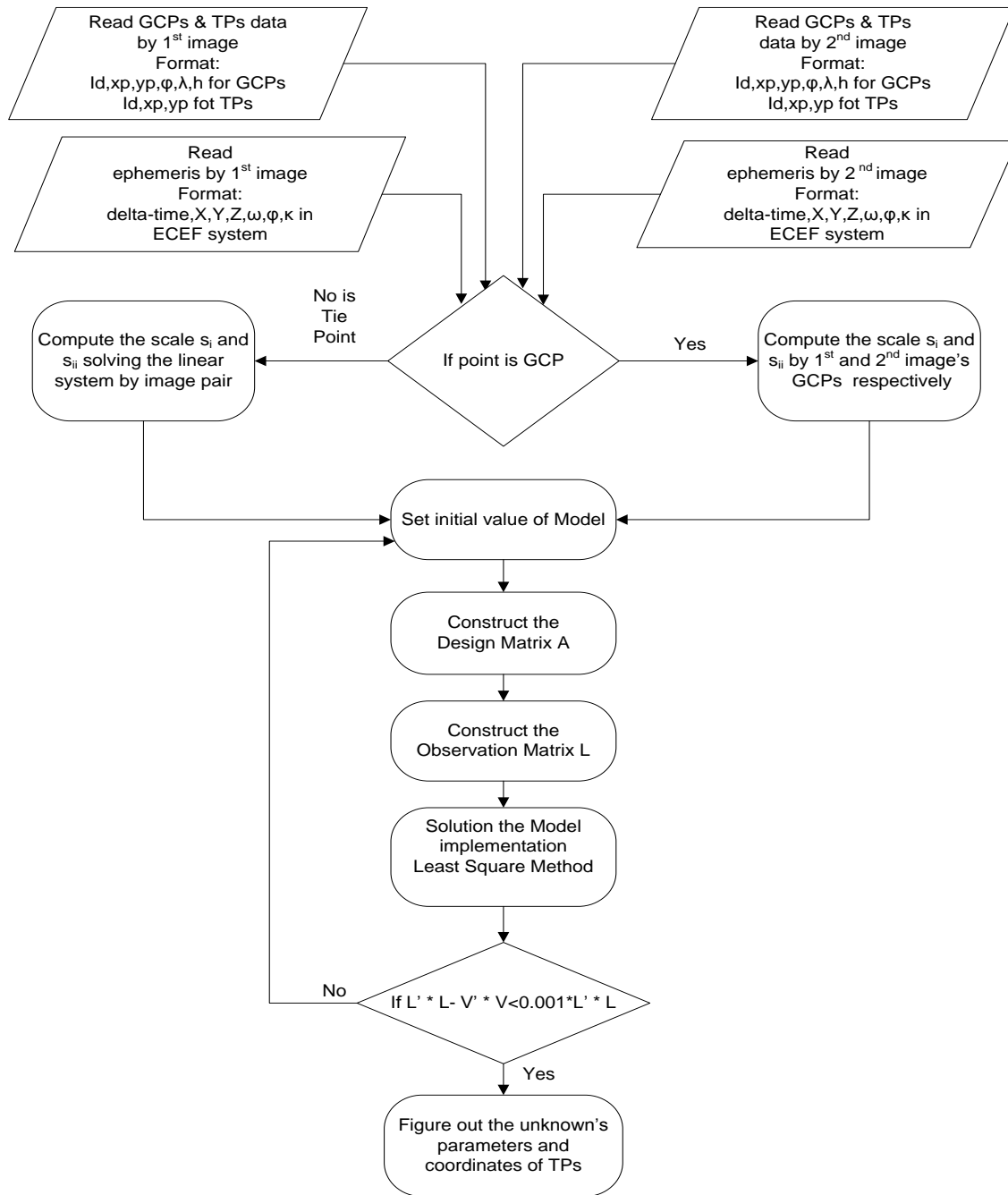
4.3.1. Επιλογή Λογισμικού - χαρακτηριστικά

Για την μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων επί των δορυφορικών εικόνων αναπτύχθηκε λογισμικό σε γλώσσα VBA για Autocad (DelSat4Cad) με το οποίο εισάγουμε τις δορυφορικές εικόνες σε περιβάλλον Autocad και δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιούνται μετρήσεις φωτοσταθερών σημείων, σημείων σύνδεσης και σημείων ελέγχου, όπου αποθηκεύονται σε αρχεία ASCII (Text Files) ξεχωριστά για κάθε εικόνα. Η ακρίβεια των μετρήσεων των εικονοσυντεταγμένων είναι της τάξης της υπο-εικονοψηφίδας (sub-pixel).

Για την αλγεβρική επίλυση του μοντέλου, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού MatLab, ο οποίος έχει τη δυνατότητα αναλόγως με τον τύπο

του δορυφορικού συστήματος που χρησιμοποιείται, να προσαρμόζεται σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα, της κάμερας και του δορυφορικού συστήματος. Το λογισμικό μπορεί να εφαρμοσθεί για τα δορυφορικά συστήματα ASTER, SPOT-V, EROS-B, QuickBird, WorldView και PLEIADES. Επιλέχτηκε η παραπάνω γλώσσα προγραμματισμού γιατί αποτελεί μία γλώσσα υψηλού επιπέδου και παράλληλα αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα διαχείρισης διαφόρων μαθηματικών πράξεων αλλά και ψηφιδωτών (raster) δεδομένων.

Ο αλγόριθμος επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου με χρήση του κώδικα, που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MatLab, περιγράφεται στο Σχήμα 4.7, όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της επίλυσης του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου που εφαρμόζεται σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής επίλυσης του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου.

4.3.2. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους από ζεύγος δορυφορικών εικόνων, με χρήση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, γίνεται με ειδικό λογισμικό, που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού MatLab, όπου έχει τη δυνατότητα να εκτελεί ανάγνωση ASCII αρχείων που περιέχουν εικονοσυντεταγμένες ομόλογων σημείων μεταξύ του στερεοζεύγους των δορυφορικών εικόνων και, εισάγοντας τις προσδιορισμένες (από την επίλυση του μοντέλου) παραμέτρους εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού του μοντέλου, υπολογίζεται το υψόμετρο για κάθε σημείο.

Για τον προσδιορισμό των ομόλογων σημείων, σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων *I* και *II*, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SURF (Bayetal., 2006), με εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC (RANdom SAmple Consensus) για την απόρριψη των άκυρων ομολογιών. Βασίζεται στη γεωμετρική σχέση μεταξύ των εικόνων (Fishleretal, 1981), όπου και αποθηκεύονται σε αρχείο ASCII, υπό μορφή: *κωδικός σημείου, x_i, y_i, x_{ii}, y_{ii}*. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας αλγορίθμους πύκνωσης σημείων (dense matching), όπως αυτοί που δίνονται στα λογισμικά PCIgeomatica, ERDAS κ.α., αναλόγως του μεγέθους της εικονοψηφίδας, δημιουργείται πλήθος ομολόγων σημείων και, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο, δημιουργείται το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους. Το λογισμικό υπολογίζει την ακρίβεια με την οποία έχει προσδιοριστεί το υψόμετρο συγκρίνοντάς το με διάφορα σημεία ελέγχου (ICPs).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια επεξεργασίας, που εκτελεί το λογισμικό για τον προσδιορισμό του υψομέτρου ενός σημείου:

- Ανάγνωση των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των δύο δορυφορικών εικόνων, όπως έχουν προσδιοριστεί από τον αεροτριγωνισμό με εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου.

- Ανάγνωση του αρχείου ASCII των ομόλογων σημείων, που προσδιορίστηκαν με τον αλγόριθμο SURF και πύκνωση τους εφαρμόζοντας αλγορίθμους πύκνωσης σημείων (dense matching).
- Προσδιορισμός της σημειακής κλίμακας, S_i^I και S_i^II , για κάθε σημείο στις εικόνες I και II , επιλύοντας το σύστημα εξισώσεων 4.17.
- Προσδιορισμός των γεωκεντρικών συντεταγμένων X, Y, Z του σημείου, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας, έχοντας έξι (6) εξισώσεις παρατήρησης (3 εξισώσεις που προκύπτουν από την εικόνα I και 3 από την εικόνα II), με τρεις αγνώστους παραμέτρους (X, Y, Z).
- Μετασχηματισμός των γεωκεντρικών συντεταγμένων σε γεωγραφικές και κατόπιν σε προβολικές. Το υπολογιζόμενο υψόμετρο είναι γεωμετρικό υψόμετρο και μπορεί να μετατραπεί σε ορθομετρικό εφαρμόζοντας κάποιο μοντέλο αποχής γεωειδούς.

Εκτελώντας τα παραπάνω βήματα για όλα τα ομόλογα σημεία προσδιορίζονται οι θέσεις και τα υψόμετρα των σημείων. Όσο περισσότερα και πυκνότερα ομόλογα σημεία προσδιορίζονται τόσο καλύτερο και πιο αξιόπιστο είναι το υψομετρικό μοντέλο που παράγεται.

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, που παράγεται από την εφαρμογή του μοντέλου, συγκρίνεται με κάποιο ψηφιακό μοντέλο αναφοράς, το οποίο έχει προκύψει είτε από τοπογραφικούς χάρτες είτε από επίγειες παρατηρήσεις είτε με φωτογραμμετρική διαδικασία από ζεύγη αεροφωτογραφιών μεγάλων κλιμάκων. Για πιθανότητα 90% η ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους δίνεται από την εξίσωση 4.31.

$$RMS_H (CE90\%) = 1.644 \cdot \sqrt{\frac{\sum (H_i - H_{ref})^2}{n}} \quad \text{Εξ. 4.31}$$

όπου:

H_i το υψόμετρο που προκύπτει εφαρμόζοντας για το σημείο i το προτεινόμενο μοντέλο

H_{ref} το αντίστοιχο υψόμετρο του υψομετρικού μοντέλου αναφοράς που αντιστοιχεί στην ίδια θέση
 n ο αριθμός των σημείων.

4.3.3. Λογισμικό ορθοαναγωγής δορυφορικών εικόνων

Η ορθοαναγωγή ή ορθοδιόρθωση των δορυφορικών εικόνων με χρήση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου αποτελεί το τρίτο στάδιο της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Αναπτύχθηκε λογισμικό σε γλώσσα VB.NET, το οποίο έχει τη δυνατότητα να εκτελεί ορθοαναγωγή δορυφορικών εικόνων με χρήση του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου. Το λογισμικό αυτό έχει τη δυνατότητα εισαγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε μορφή ακανόνιστων τριγώνων (TIN) ή κανονικοποιημένου καννάβου (GRID), το οποίο προσδιορίζεται είτε με τον τρόπο που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.2 είτε από εξωτερική πηγή. Το παραγόμενο προϊόν είναι ορθοδιορθωμένη δορυφορική εικόνα (Raster σε μορφή Tiff ή jpg), η οποία συνοδεύεται από αρχείο γεωαναφοράς.

Τα στάδια του αλγορίθμου για την ορθοαναγωγή των εικόνων είναι:

- i. Ανάγνωση των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των δύο δορυφορικών εικόνων, όπως έχουν προσδιοριστεί από τον αεροτριγωνισμό με εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.
- ii. Εισαγωγή και ανάγνωση του υψομετρικού μοντέλου εδάφους.
- iii. Για κάθε γραμμή i σάρωσης της εικόνας (από τον γραμμικό αισθητήρα του δέκτη), που πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή t_i και αντιστοιχεί στις εικονοσυντεταγμένες x_j, y_j του σημείου j , ισχύουν οι εξισώσεις 4.32 και 4.33.

$$\begin{aligned} Xg &= (S_j + ds_j) \cdot M_1 \cdot [x_j, y_j, f] \\ Yg &= (S_j + ds_j) \cdot M_2 \cdot [x_j, y_j, f] \\ Zg &= (S_j + ds_j) \cdot M_3 \cdot [x_j, y_j, f] \end{aligned} \quad \text{Εξ. 4.32}$$

και

$$\frac{X_g^2 + Y_g^2}{a^2} + \frac{Z_g^2}{(b + h_m)^2} = 1$$

Εξ. 4.33

όπου:

X_g, Y_g, Z_g : οι γεωκεντρικές συντεταγμένες του σημείου j

S_j : η κλίμακα του σημείου j

ds_j : η διόρθωση της κλίμακας του σημείου j

M_1, M_2, M_3 : οι πίνακες στροφών γύρω από τους άξονες X, Y, Z

x_j, y_j : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου j στη δορυφορική εικόνα

f : η εστιακή απόσταση των φακών της κάμερας του δορυφόρου

a, b : ο μικρός και μεγάλος ημιάξονας του ελλειψοειδούς, όπου αναφέρονται οι συντεταγμένες X_g, Y_g, Z_g

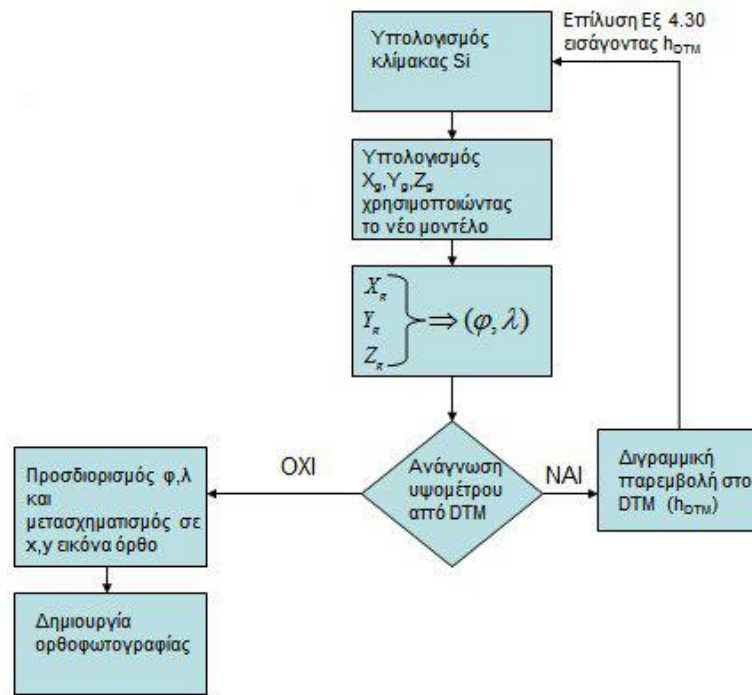
h_m : το μέσο γεωμετρικό υψόμετρο της περιοχής, το οποίο είτε προσδιορίζεται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είτε εισάγεται χειροκίνητα στο λογισμικό.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 4.32 στην εξίσωση 4.33 προσδιορίζεται η τιμή της σημειακής κλίμακας S_j και κατόπιν από τις εξισώσεις 4.32 προσδιορίζονται οι γεωκεντρικές συντεταγμένες X_g, Y_g, Z_g και, στη συνέχεια, οι γεωγραφικές φ, λ, h . Αναλόγως του συστήματος συντεταγμένων, που αναφέρεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, γνωρίζοντας τη γεωγραφική θέση του σημείου, μπορούμε να προσδιορίσουμε (συνήθως με διγραμμική παρεμβολή) το υψόμετρο h_{DTM} .

Επαναλαμβάνοντας την επίλυση της εξίσωσης 4.33, θέτοντας αντί του μέσου υψομέτρου h_m το υψόμετρο που προσδιορίζεται από το υψομετρικό μοντέλο εδάφους h_{DTM} (Εξ. 4.32), υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι γεωδαιτικές συντεταγμένες.

$$\frac{X_g^2 + Y_g^2}{a^2} + \frac{Z_g^2}{(b + h_{DTM})^2} = 1 \quad \text{Εξ. 4.34}$$

Το διάγραμμα ροής για την ορθοαναγωγή των δορυφορικών εικόνων, με εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ορθοαναγωγής δορυφορικής εικόνας με χρήση του αναπτυχθέντος αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου.

- iv. Για τη δημιουργία της εικόνας (raster), το λογισμικό υπολογίζει τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων που βρίσκονται στις «γωνίες» της εικόνας και, κατόπιν, προσδιορίζει τα ελάχιστα και μέγιστα X, Y (Low Left, Upper Right) των σημείων της εικόνας, με σκοπό την οριοθέτηση της εικόνας σε παραλληλόγραμμο πλαίσιο.
- v. Για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες και, αναλόγως της θέσης τους, τοποθετούνται οι αντίστοιχες εικονοψηφίδες (pixels) εντός του παραλληλογράμμου πλαισίου, που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο βήμα.

vi. Για τη βελτίωση της οπτικοποίησης της εικόνας εκτελείται επαναδειγματοληψία της εικόνας με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής.

Συνοψίζοντας, η εκτέλεση όλων των σταδίων, που απαιτούνται από την κλασική ψηφιακή δορυφορική φωτογραμμετρία, με σκοπό την παραγωγή ως τελικού προϊόντος μιας ορθοδιορθωμένης εικόνας, επιτυγχάνεται με τα επιμέρους λογισμικά, που αναπτύχθηκαν και περιγράφονται παραπάνω. Τα λογισμικά αυτά στις επιλύσεις τους περιλαμβάνουν το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο γεωαναφοράς, με σκοπό την αξιολόγησή του σε διάφορα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή και η αξιολόγηση - αποτίμηση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, μέσω των λογισμικών, που έχουν αναπτυχθεί, σε δορυφορικές εικόνες των συστημάτων ASTER-VNIR, SPOT-V (HRG), EROS, QUICKBIRD, WORLDVIEW και PLEIADES.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το νέο προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο για την γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, όπως αυτό παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4, εφαρμόστηκε σε διάφορους τύπους αισθητήρων δορυφορικών συστημάτων. Η εφαρμογή και η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στα δορυφορικά συστήματα ASTER (VNIR sensor), EROS-A και B, SPOT-V, QuickBird, WorldView-2 και Pleiades-1B. Αυτά τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης διαθέτουν γραμμικούς αισθητήρες pushbroom και παρέχουν αναλυτικά όλα τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με την κάμερα και την κίνηση του δορυφόρου. Το εύρος της διακριτικής ικανότητας επί του εδάφους των παραπάνω δορυφορικών συστημάτων κυμαίνεται από 15m (VNIR-ASTER) έως 0.5m (WorldView-2, Pleiades), καλύπτοντας σχεδόν όλα τα δορυφορικά συστήματα παρατήρησης γης (χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ανάλυσης), που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα.

Στα παραπάνω δορυφορικά συστήματα πραγματοποιήθηκε πλήρης φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων, που περιελάμβανε την επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και τη σύνταξη των ορθοδιορθωμένων εικόνων. Για τα δορυφορικά συστήματα QuickBird, WorldView-2 και Pleiades, τα οποία είναι συστήματα υψηλής διακριτικής ικανότητας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των επιλύσεων του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου με αυτή που προκύπτει από τη χρήση των κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) χρησιμοποιώντας το λογισμικό ERDAS 2014.

Στον Πίνακα 5.1 αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων, στα οποία εφαρμόστηκε το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	Ανάλυση Εικόνας			Σύγχρονη Σαρωση	
	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή	ΝΑΙ	ΌΧΙ
ASTER/VNIR	X			X	
SPOT-V		X		X	
EROS-A		X			X
EROS-B			X	X	
QUICKBIRD			X	X	
WORLDVIEW-2			X	X	
PLEIADES			X	X	

Πίνακας 5.1.: Κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων παρατήρησης γης όπου εφαρμόστηκε το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο.

Η εφαρμογή και η αξιολόγηση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τα παρακάτω στάδια:

- Προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, με μετατροπή από το format που δίνονται (.dim, .jp2, .hdf κ.α.) σε μορφή Tiff, ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή της στο λογισμικό εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου.
- Ανάγνωση και προεπεξεργασία των μεταδεδομένων, που συνοδεύουν τις δορυφορικές εικόνες και αφορούν στα στοιχεία της κάμερας και της κίνησης του δορυφόρου, σε μορφή που απαιτούνται για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου.
- Επίλυση του μοντέλου γεωαναφοράς, αρχικά με όλες τις άγνωστες παραμέτρους και στη συνέχεια με τις σημαντικότερες, που προσδιορίζονται βάσει της πρώτης επίλυσης.
- Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2.4.

- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους από τα ζεύγη των δορυφορικών εικόνων, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SURF για τον προσδιορισμό των ομόλογων σημείων, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.2.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τα στατιστικά κριτήρια που δίνονται στην παράγραφο 4.2.3.
- Επιπρόσθετα, για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B, επίλυση της γεωαναφοράς με χρήση των κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) και εισαγωγή 1, 4 και 6 φωτοσταθερών σημείων, και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τη συνόρθωση του προτεινόμενου μοντέλου με αντίστοιχο αριθμό φωτοσταθερών σημείων.

5.1. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα ASTER

5.1.1. Δορυφορικές Εικόνες

Το δορυφορικό σύστημα ASTER περιγράφεται στην § 2.7.2., ως προς τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των αισθητήρων που διαθέτει. Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε ζεύγος εικόνων ASTER, οι οποίες συλλέχτηκαν από το *ορατό υποσύστημα (VNIR)* που διαθέτει ο παραπάνω δορυφόρος και το οποίο αποτελείται από δύο ανεξάρτητα τηλεσκόπια, κατασκευασμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ένα τηλεσκόπιο να λαμβάνει ναδρικές εικόνες και το άλλο να λαμβάνει εικόνες κεκλιμένες προς τα πίσω.

Το χρησιμοποιηθέν ζεύγος δορυφορικών εικόνων ASTER (3N, 3B) απεικονίζει την ευρύτερη περιοχή της Αττικής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το υψόμετρο του εδάφους στην περιοχή κυμαίνεται από 0 έως 1.400m. Το ζεύγος των εικόνων λήφθηκε στις 7-4-2004 και οι εικόνες αποτελούν προϊόντα επεξεργασίας επιπέδου L1A από την 3N band (Ναδύρ) και 3B band (πίσω) αντίστοιχα του αισθητήρα VNIR. Το επίπεδο L1A επεξεργασίας των εικόνων είναι το επίπεδο

όπου οι ψηφιακές εικόνες απεικονίζονται όπως έχουν συλλεχθεί από τον αισθητήρα (row data) και έχουν εφαρμοστεί σε αυτές μόνο ραδιομετρικές επεξεργασίες, διατηρώντας αναλλοίωτη τη γεωμετρία και το σχήμα τους (*ASTER User Handbook version 2*).



Σχήμα 5.1α: Ναδιρική εικόνα ASTER (3N)



Σχήμα 5.1β: Πίσω εικόνα ASTER (3B)

5.1.2. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων

Οι δορυφορικές εικόνες 3N και 3B ASTER (VNIR) παρέχονται με διαμόρφωση HDF (Hierarchical Data Format). Το αρχείο που συνοδεύει τις εικόνες και περιέχει τα μεταδεδομένα βρίσκεται σε μορφή ASCII, με κατάληξη επιθέματος του αρχείου ως .met. Μεταξύ άλλων στοιχείων, που περιέχονται στα μεταδεδομένα των εικόνων και είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του νέου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου, είναι αυτά που αφορούν τον αισθητήρα VNIR και αναφέρονται παρακάτω:

- Ο αριθμός των εικονοψηφίδων (pixels) που συλλέγει ο γραμμικός αισθητήρας κατά τη σάρωση της εικόνας, που για την εικόνα 3N είναι 4100 pixels και για την εικόνα 3B είναι 5000 pixels.

- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα, ίσο με 7μm.
- Οι εστιακές αποστάσεις του ναδιρικού τηλεσκοπίου, 329mm, και του προς τα πίσω τηλεσκοπίου, 376mm (όπως υπολογίστηκε στην § 2.7.2.1).
- Η γωνία θέασης του δορυφόρου (Pointing Angle), ίση με -7.621999 deg, καθώς και η γωνιακή κλίση του πλάγιου τηλεσκοπίου ως προς το κάθετο, που δίδεται ίση με -27.6 deg.
- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής, που είναι 2004.3.21 και 33385.6137146sec, καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας, που δίδεται ίσος με 0.0021990 sec/line.
- Οι εφημερίδες του δορυφόρου, που αφορούν στις θέσεις ($\vec{R}[X(t),Y(t),Z(t)]$) και τις ταχύτητες ($\vec{V}[V_x(t),V_y(t),V_z(t)]$) του δορυφόρου σε διάφορες χρονικές στιγμές στο χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η λήψη των εικόνων. Ο χρόνος αναφέρεται σε Ιουλιανή μέρα (§ 2.6.1) και οι θέσεις του δορυφόρου στο E.C.I. σύστημα συντεταγμένων (§ 2.6.2.1). Συνολικά δίνονται 29 θέσεις και ταχύτητες, αντίστοιχα, του δορυφόρου συστήματος.

5.1.2.1. Μετατροπή και Εξαγωγή των Μεταδεδομένων για την Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου

Η μετατροπή στο E.C.E.F., και συγκεκριμένα στο WGS-84, των συντεταγμένων θέσης του δορυφόρου (εφημερίδες) που βρίσκονται στο ECI σύστημα συντεταγμένων, πραγματοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση 2.19. Ο χρόνος που αναφέρονται οι εφημερίδες, από την Ιουλιανή μέρα μετατρέπεται αντίστοιχα σε χρόνο U.T.C, σύμφωνα με την εξίσωση 2.17.

Επίσης, προσδιορίζονται οι γωνίες Euler (ω , φ , κ) μεταξύ του συστήματος της τροχιάς του δορυφόρου και του γεωκεντρικού συστήματος συντεταγμένων (WGS-84) εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 5.1.

$$\varphi = \sin^{-1}[M_b(3,1)] \quad \omega = \tan^{-1} \left[\frac{-M_b(3,2)}{\cos(\varphi)} \right] \quad \kappa = \tan^{-1} \left[\frac{-M_b(2,1)}{\frac{\cos(\varphi)}{-M_b(1,1)}} \right] \quad \text{Εξ. 5.1}$$

$$M_b = M_{orb} \cdot (M_{yaw} \cdot M_{pitch} \cdot M_{roll})$$

$$M_{orb} = [T_x, T_y, T_z]$$

$$T_y = \frac{\vec{R} \times \vec{V}}{|\vec{R} \times \vec{V}|}, \quad T_z = \frac{-\vec{R}}{|\vec{R}|}, \quad T_x = T_y \times T_z$$

όπου:

$M_{yaw}, M_{pitch}, M_{roll}$: Πίνακες στροφής των γωνιών a_{yaw} , a_{pitch} , a_{roll} οι οποίες αναφέρονται ως γωνίες στροφής μεταξύ του συστήματος του δορυφόρου και της τροχιάς και περιέχονται στα μεταδεδομένα των εικόνων

\vec{R}, \vec{V} : Το άνωσμα θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου εκφρασμένα στο ECI σύστημα συντεταγμένων.

Ο χρόνος, που αναφέρονται τόσο οι θέσεις του δορυφόρου όσο και οι γωνίες στροφής, εκφράζεται ως η διαφορά του χρόνου μεταξύ της σάρωσης της πρώτης γραμμής της εικόνας t_f και του χρόνου σάρωσης της γραμμής t_i ($dt = t_f - t_i$). Η χρονική στιγμή για κάθε παρατήρηση προσδιορίζεται από την εξίσωση 4.5. Για τον προσδιορισμό της θέσης και των γωνιών του δορυφόρου, που αντιστοιχεί σε κάποιο χρονικό διάστημα dt_i , πραγματοποιείται παρεμβολή, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.3.1. και πραγματοποιείται με τις εξισώσεις 4.7 και 4.8.

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι θέσεις και οι γωνίες στροφής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (λίγο πριν και λίγο μετά) τη λήψη της ναδρικής εικόνας (3N) στο WGS-84 σύστημα συντεταγμένων. Ομοίως, στον Πίνακα 5.3 δίνονται οι θέσεις και οι γωνίες στροφής για την πίσω εικόνα (3B).

dt	X[m]	Y[m]	Z[m]	ω [deg]	ϕ [deg]	κ [deg]
-0.73447	5058249.056	2347393.865	4357889.938	2.647508	5.48697	-0.463798
0.145134	5062533.544	2347669.946	4352777.344	2.646969	5.486105	-0.464154
1.024733	5066813.655	2347943.429	4347661.05	2.646429	5.48524	-0.464486
1.904334	5071089.468	2348214.311	4342540.955	2.645888	5.484376	-0.464834
2.783934	5075361.106	2348482.639	4337416.902	2.645346	5.483511	-0.465191
3.663532	5079628.524	2348748.438	4332288.781	2.6448	5.482643	-0.465542
4.543133	5083891.815	2349011.492	4327156.624	2.644262	5.481777	-0.465872
5.422731	5088150.345	2349272.183	4322021.206	2.643718	5.480913	-0.466258
6.302331	5092404.404	2349530.184	4316882.193	2.643172	5.480049	-0.466582
7.181931	5096654.011	2349785.579	4311739.523	2.642626	5.479185	-0.466943
8.06153	5100899.237	2350038.415	4306593.066	2.642078	5.47832	-0.467309
8.94113	5105140.169	2350288.709	4301442.664	2.641527	5.477454	-0.467664
9.820729	5109377.015	2350536.469	4296288.197	2.640978	5.47659	-0.468021

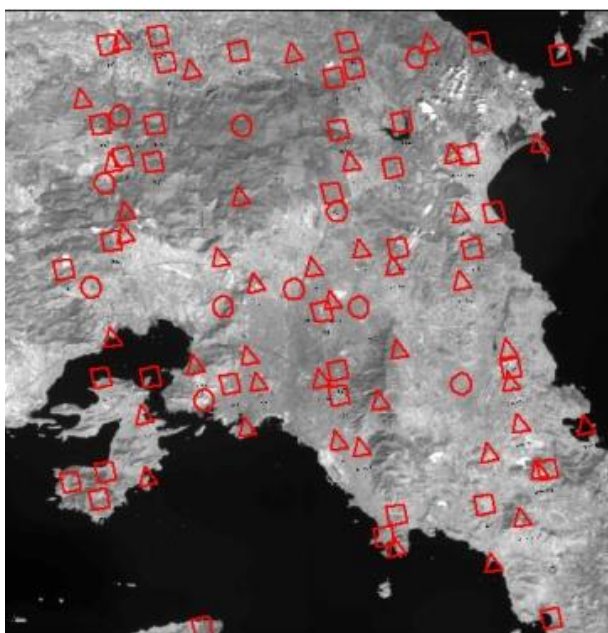
Πίνακας 5.2: Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας 3N ASTER-VNIR.

dt	X[m]	Y[m]	Z[m]	ω [deg]	ϕ [deg]	κ [deg]
-0.811431	5311520.269	2359526.299	4039236.398	2.612908	5.434443	-0.486843
0.06817	5315532.961	2359645.645	4033900.283	2.61231	5.433587	-0.487259
0.947769	5319540.937	2359762.485	4028560.712	2.611711	5.43273	-0.487676
1.827369	5323544.192	2359876.728	4023217.908	2.611111	5.431874	-0.488083
2.706967	5327542.744	2359988.441	4017871.829	2.61051	5.431017	-0.488508
3.586567	5331536.648	2360097.608	4012522.259	2.609907	5.430161	-0.488931
4.466167	5335525.99	2360204.219	4007169.062	2.609304	5.429305	-0.489338
5.345767	5339510.934	2360308.28	4001812.245	2.6087	5.42845	-0.489765
6.225367	5343491.515	2360409.877	3996451.597	2.608094	5.427594	-0.490183
7.104965	5347467.408	2360508.812	3991087.554	2.607487	5.426738	-0.490599
7.984566	5351438.428	2360605.167	3985720.381	2.60688	5.425883	-0.491018
8.864165	5355404.721	2360699	3980349.811	2.606271	5.425028	-0.491458
9.743764	5359366.384	2360790.321	3974975.848	2.605661	5.424173	-0.491889
10.623364	5363323.497	2360879.112	3969598.396	2.60505	5.423318	-0.492302
11.502963	5367276.131	2360965.306	3964217.179	2.604438	5.422463	-0.49274
12.382563	5371224.245	2361049.051	3958832.34	2.603824	5.421608	-0.493164

Πίνακας 5.3: Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας 3B ASTER-VNIR.

5.1.3. Επίλυση του Μοντέλου Γεωαναφοράς σε Ζεύγος Εικόνων

Για την επίλυση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν, συνολικά, 39 φωτοσταθερά σημεία και 13 σημεία ελέγχου. Τα παραπάνω σημεία πάρθηκαν από τα τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:5.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ), με οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια 1.5m και 3m, αντίστοιχα. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν 41 παρατηρήσεις σημείων σύνδεσης μεταξύ των στερεοσκοπικών δορυφορικών εικόνων. Η κατανομή των φωτοσταθερών σημείων, των σημείων ελέγχου και των σημείων σύνδεσης φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



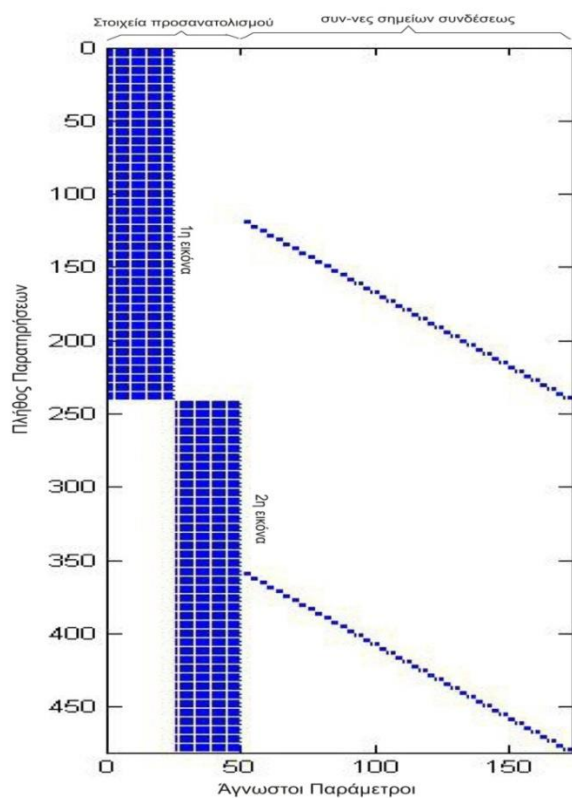
Σχήμα 5.2: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (O) και σημείων συνδέσεων (\square) μεταξύ του ζεύγους δορ. εικόνων ASTER-VNIR.

Από τις εξισώσεις παρατήρησης, που προκύπτουν από την μέτρηση των σημείων στο στοστερεοσκοπικό ζεύγος των δορυφορικών εικόνων εφαρμόζοντας τη γραμμικοποιημένη εξίσωση 4.13, προκύπτει ο πίνακας σχεδιασμού A , με διαστάσεις $[2 \cdot 3 \cdot (39 + 41), 25 + 25 + (3 \cdot 41)]$, καθώς πρόκειται για: **2** δορυφορικές εικόνες, **3** εξισώσεις παρατήρησης για κάθε σημείο, **39** φωτοσταθερά σημεία και **41** σημεία σύνδεσης.

Οι στήλες του πίνακα εκφράζουν το σύνολο των αγνώστων παραμέτρων των δύο δορυφορικών εικόνων. Για κάθε εικόνα αντιστοιχούν 25 άγνωστες παράμετροι καθώς και οι άγνωστες γεωδαιτικές συντεταγμένες (X, Y, H), τρεις για κάθε σημείο σύνδεσης. Οι άγνωστες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε εικόνα είναι:

- η παράμετρος (df), που αφορά στη διόρθωση της εστιακής απόστασης του φακού της κάμερας
- εννέα παράμετροι, που αφορούν στις διορθώσεις των στροφών του δορυφόρου ($\omega_0, \omega_1, \omega_2, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$)
- εννέα παράμετροι για τη διόρθωση της θέσης του δορυφόρου ($X_0, X_1, X_2, Y_0, Y_1, Y_2, Z_0, Z_1, Z_2$) και
- έξι παράμετροι, που περιγράφουν την επιφάνεια 2^{ου} βαθμού για τη διόρθωση της κλίμακας ($m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$).

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η μορφή του πίνακα σχεδιασμού A, διαστάσεων 480x173, εφαρμόζοντας της εξίσωση 4.14.



Σχήμα 5.3: Πίνακας σχεδιασμού των παρατηρήσεων σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων ASTER.

5.1.3.1. Αποτελέσματα της Επίλυσης

Με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και μετρώντας 39 φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 41 σημεία σύνδεσης (Tie Points) και 13 σημεία ελέγχου (ICPs), επιλύεται το γεωμετρικό μοντέλο περιλαμβάνοντας όλες τις άγνωστες παραμέτρους, δηλαδή 25 παραμέτρους για κάθε εικόνα. Στον Πίνακα 5.4 δίνονται οι προσδιοριζόμενες τιμές των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου γεωαναφοράς της ναυτικής εικόνας, ενώ στον Πίνακα 5.4 δίνονται οι ακρίβειες από τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων.

dXo[m]	27199
dX1[m/sec]	10201
dX2[m/sec ²]	-75.159
dYo[m]	-3192.9
dY1[m/sec]	4734.5
dY2[m/sec ²]	-1066.3
dZo[m]	-33031
dZ1[m/sec]	-15444
dZ2[m/sec ²]	671.67
dωo[rad]	0.010086
dω1[rad/sec]	-0.0047348
dω2[rad/sec ²]	0.0015277

dφo[rad]	-0.061905
dφ1[rad/sec]	-0.025835
dφ2[rad/sec ²]	0.00090677
dκo[rad]	-0.020382
dκ1[rad/sec]	0.0059543
dκ2[rad/sec ²]	-0.0003251
m5[rad]	0.00040358
m4[rad]	-9.38E-06
m3[rad]	4.335
m2[rad]	-1.859
m1[rad]	0.0013212
m0[rad]	1306

Πίνακας 5.4: Παράμετροι της γεωαναφοράς της ναυτικής εικόνας.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων= 24, Calibrated parameters (x ₀ ,y ₀ ,df) : df							
σ = 1.03 pixels Standard deviation							
Εικονοσυντεταγμένες		GCPs Ground Control Points			ICPs Independent Control Points		
RMS _x (pixel)	RMS _y (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.95	0.94	15.423	15.526	18.317	16.521	6.236	20.156

Πίνακας 5.5: Επίλυση του μοντέλου σε δορυφορικές εικόνες ASTER.

Για την αξιολόγηση της σημαντικότητας των αγνώστων παραμέτρων που συμμετείχαν στην επίλυση του μοντέλου, διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 2.7.6. Από την εφαρμογή του τεστ σημαντικότητας t-test με κατανομή t, για πιθανότητα 95% και βαθμό ελευθερίας 93, προκύπτει:

$$t(95\%, 93) = 1.98 \quad \text{Εξ. 5.2}$$

Για κάθε άγνωστη παράμετρο του μοντέλου προσδιορίζεται η τιμή t σύμφωνα με την εξίσωση 5.3.

$$t = \frac{X_i}{\widehat{\sigma}_{X_i}} \quad \text{Εξ. 5.3}$$

όπου:

X_i : η άγνωστη παράμετρος και

σ_{X_i} : η a-posteriori τυπική απόκλιση της παραμέτρου, που προκύπτει από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας.

Για τις αγνώστους παραμέτρους, που προσδιορίστηκαν για το συγκεκριμένο ζεύγος δορυφορικών εικόνων ASTER, οι τιμές του t-test δίνονται στον Πίνακα 5.6.

Άγνωστοι Παράμετροι	t-parameter	Άγνωστοι Παράμετροι	t-parameter
<u>dXo</u>	21.44761029	<u>dφo</u>	1.375104459
dX1	2.382801107	dφ1	6.277106768
dX2	2.719300886	dφ2	3.461687118
<u>dYo</u>	2.686300404	dκo	3.997305357
dY1	1.500343379	dκ1	0.127740055
dY2	1.281042856	dκ2	0.879492614
<u>dZo</u>	25.29512986	m5	1.80295785
dZ1	6.048387818	m4	2.843988238
dZ2	3.684308078	m3	1.860607904
<u>dωo</u>	1.526944848	m2	1.599940727
dω1	1.241977023	m1	1.01136398
dω2	0.965231688	<u>mo</u>	3.323622381

Πίνακας 5.6: Τιμές του t-test για τις άγνωστες παραμέτρους, για πιθανότητα 95% και βαθμό ελευθερίας 93.

Σύμφωνα με την εξίσωση 5.2, οι άγνωστες παράμετροι οι οποίες παρουσιάζουν τιμές t μικρότερες από 1.98 δεν επηρεάζουν τη λύση του μοντέλου για πιθανότητα 95%, συνεπώς, μπορούν να απαλειφθούν από το μοντέλο. Με βάση τα παραπάνω παρατηρείται ότι μόνο οι εξής 12 παράμετροι είναι σημαντικοί για την επίλυση του μοντέλου:

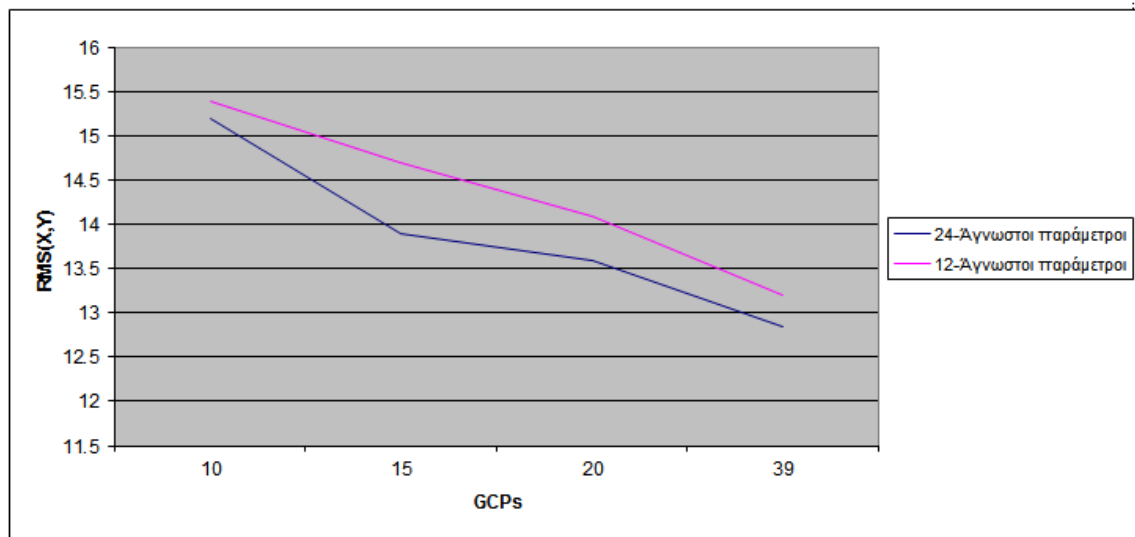
$dXo, dX1, dX2, dYo, dZo, dZ1, dZ2, dφ1, dφ2, dκo, m4, mo$

Οι ακρίβειες, που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου με αυτές τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους (12), φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

Number of unknown parameters = 12, Calibrated parameters (df)							
σ= 0.97 pixels							
Image points		10 GCPs			13 ICPs		
RMS x (pixel)	RMS y (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.85	0.93	12.34	13.67	14.34	14.45	14.67	15.35

Πίνακας 5.7: Επίλυση του μοντέλου με τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους.

Στο Σχήμα 5.4 δίνεται η ακρίβεια του μοντέλου, όπως προκύπτει από τους ελέγχους στα σημεία ελέγχου (ICPs), για τις επίλυσεις με 24 και 12 άγνωστες παραμέτρους, χρησιμοποιώντας κάθε φορά 10, 15, 20 και 39 φωτοσταθερά.



Σχήμα 5.4: Ακρίβεια ICPs για επίλυση του μοντέλου με 24 και 12 άγνωστες παραμέτρους.

Από την παρατήρηση του Σχήματος 5.4 προκύπτει ότι χρησιμοποιώντας τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους του μοντέλου επιτυγχάνεται, σχεδόν, η ίδια ακρίβεια με αυτή από την επίλυση του πλήρους μοντέλου. Επίσης, συμπεραίνεται ότι η αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών σημείων δεν βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου.

5.1.3.2. Επίλυση του Μοντέλου με Δεσμεύσεις

Η επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις, όπως αναλυτικά περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2.4, πραγματοποιείται με τη συμπλήρωση των εξισώσεων παρατήρησης των k πλεοναζουσών παραμέτρων (Εξ. 4.26). Τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου φαίνονται στους Πίνακες 5.8 και 5.9.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων = 25							
$\sigma = 1.03$ pixels Standard deviation							
Image points		GCPs Residuals			ICPs Residuals		
RMSx (pixel)	RMSy (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.87	0.91	14.386	14.241	17.445	15.987	12.412	18.375

Πίνακας 5.8: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις και 25 αγνώστους, μετρώντας 39 φωτοσταθερά σημεία.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων = 12							
$\sigma = 0.93$ pixels Standard deviation							
Image points		GCPs Residuals			ICPs Residuals		
RMSx (pixel)	RMSy (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.91	0.98	15.238	13.309	18.250	14.832	13.541	17.831

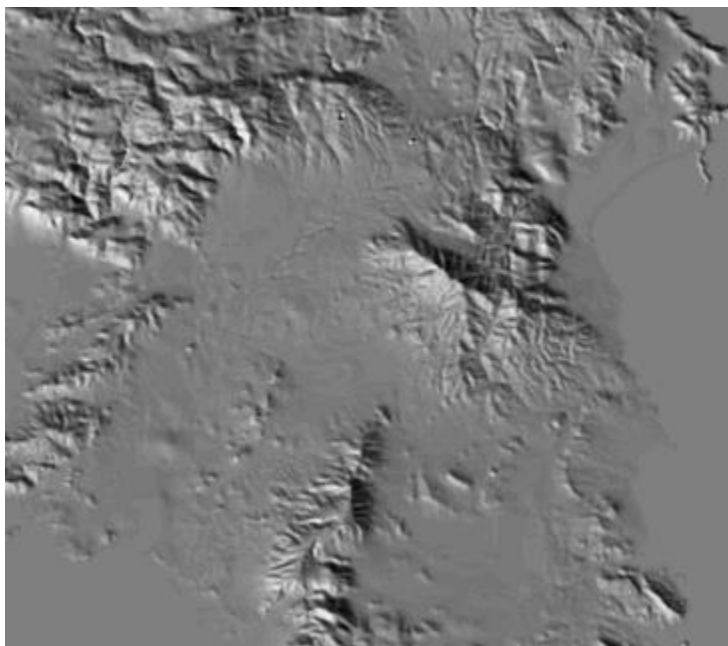
Πίνακας 5.9: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις και τις ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους, μετρώντας 39 φωτοσταθερά σημεία.

Επιλύοντας το μοντέλο με την επιβολή των δεσμεύσεων, παρατηρείται βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου κατά τη διεύθυνση Y, αλλά μεγαλύτερο σφάλμα κατά τη διεύθυνση Z. Αυτό, πιθανώς, οφείλεται στη συσχέτιση των παραμέτρων του μοντέλου.

5.1.3.3. Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας

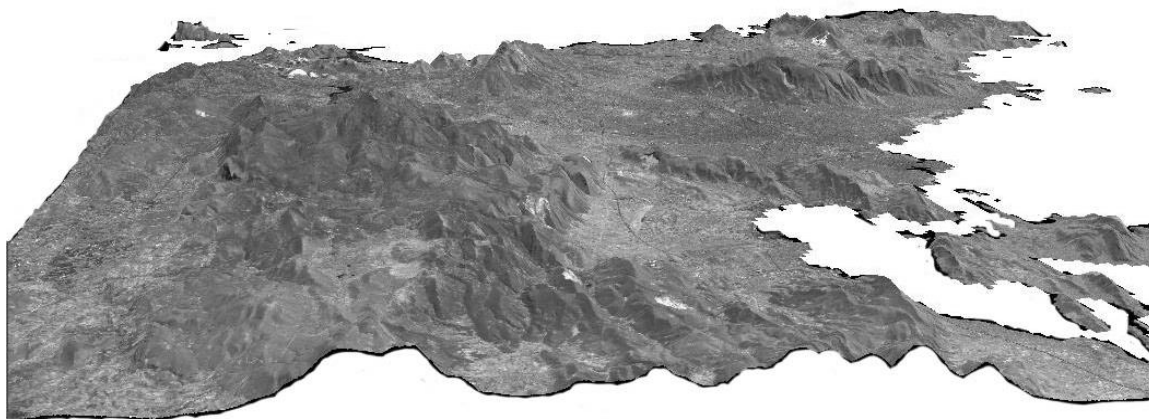
Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SURF, εξήχθησαν 352.000 ομόλογα σημεία στο στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων και, μετά την πύκνωσή τους, προσδιορίστηκαν 2.250.000 σημεία. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.2, προσδιορίστηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Ψ.Μ.Ε) με βήμα καταγραφής 40m (Σχήμα 5.5). Η ακρίβεια του

υψομετρικού μοντέλου εδάφους, για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%, σύμφωνα με την εξίσωση 4.30, υπολογίσθηκε σε 40.35m, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο αναφοράς, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Ε.Κ.Χ.Α. Α.Ε., που έχει βήμα καταγραφής 5m και υψομετρική ακρίβεια 3.92m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Σχήμα 5.5: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με βήμα καταγραφής 40m, όπως προέκυψε από την συνταύτιση των σημείων εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο.

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό, που έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού VB.NET, πραγματοποιήθηκε ορθοαναγωγή των δορυφορικών εικόνων, με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.3. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται τρισδιάστατα το ανάγλυφο της περιοχής με επιτύπωση της ορθοανηγμένης ναδιρικής δορυφορικής εικόνας.



Σχήμα 5.6: Ανάγλυφη μορφή ορθοεικόνας ASTER (3N) με εφαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (επιτύπωση ορθοεικόνας στο Ψ.Μ.Ε.).

5.1.4. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων

Από την εφαρμογή του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου στο ζεύγος των δορυφορικών εικόνων ASTER-VNIR (3N,3B), παρατηρείται ότι επιτυγχάνονται ακρίβειες καλύτερες του μεγέθους της εικονοψηφίδας (15m), με χρήση μόνο 12 αγνώστων παραμέτρων, αντί των 24 που περιγράφουν σε πλήρη ανάπτυξη το μοντέλο. Συνέπεια των παραπάνω είναι, ότι για τη γεωμετρική διόρθωση των εικόνων ASTER-VNIR (3N, 3B) απαιτούνται κατ' ελάχιστο μόνο 4 φωτοσταθερά σημεία για να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια. Επίσης, η επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις δίνει ελάχιστα καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την απλή επίλυση του μοντέλου.

Η σχετική ακρίβεια που επιτυγχάνεται από την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (συνταύτιση 2.250.000 σημείων), με εφαρμογή του προτεινομένου μοντέλου γεωαναφοράς, είναι της τάξης των $\pm 40\text{m}$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% (LE90) από το ψηφιακό μοντέλο αναφοράς (απόλυτη ακρίβεια $\leq 3,92\text{m}$ για LE95%). Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά όταν το μέγεθος της εικονοψηφίδας είναι 15m.

5.2. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα EROS-B

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες των αισθητήρων του δορυφορικού συστήματος EROS περιγράφονται στην § 2.7.4. Η εφαρμογή του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε ζεύγος εικόνων EROS-B, οι οποίες συλλέχτηκαν από το δορυφορικό σύστημα EROS-B1, από την κάμερα NA50, στις 16-7-2008, με μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.7m. Το επίπεδο επεξεργασίας των εικόνων είναι Level 1A, δηλαδή είναι εικόνες όπως λήφθηκαν από τον δορυφόρο με ραδιομετρική μόνο διόρθωση και χωρίς να γίνει οποιαδήποτε γεωμετρική επεξεργασία. Οι εικόνες απεικονίζουν την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Σχήμα 5.7). Τα υψόμετρα του εδάφους στην περιοχή κυμαίνονται από 0 έως 400m περίπου.

5.2.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων

Το στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων EROS-B δίδεται σε διαμόρφωση αρχείου εικόνας τύπου GEO-TIFF 2.1 (Tagged Image File Format), με βάθος χρώματος 16 bit (EROS Metadata specifications v3, March 7, 2010). Τα συνοδευτικά αρχεία των εικόνων (Metadata) είναι σε μορφή ASCII με κατάληξη .pass (pass-file) και .tqr (time-Quaternions-Rvector). Το πρώτο αρχείο (.pass) περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή του αναπτυχθέντος αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου, που είναι:

- Ο αριθμός των ενεργών εικονοψηφίδων (pixels), που συλλέγει ο γραμμικός αισθητήρας κατά τη σάρωση της εικόνας, καθώς και η θέση του κεντρικού pixel.
- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα, που είναι ίσο με 11.0055μm.



Σχήμα 5.7: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων EROS-B στην περιοχή της Θεσσαλονίκης
(κέντρο εικόνων: 40.59deg, 22.98deg)

- Η εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας, ίση με 8250 mm.
- Οι γωνίες στροφής $\rho\eta\iota(t)$, $\theta\epsilon\tau\alpha(t)$, $\rho\sigma\iota(t)$ του φακού ως προς το σύστημα της κάμερας (γωνίες θέασης) σε συνάρτηση με το χρόνο σάρωσης της εικόνας που δίνονται σε μορφή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού.
- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής, καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας.

Το αρχείο TQR περιέχει δεδομένα που καθορίζουν γεωμετρικά την οπτική ακτίνα (line-of-sing), που απεικονίζεται στο σύστημα της κάμερας για κάθε γραμμή σάρωσης. Συγκεκριμένα, το αρχείο περιέχει τόσες εγγραφές όσος είναι ο αριθμός των γραμμών (σάρωσης) της εικόνας. Η κάθε εγγραφή, που αντιστοιχεί σε μια γραμμή σάρωσης, έχει την παρακάτω μορφή και δίνει τα στοιχεία που αναφέρονται:

Time (MJD), TypeDatum (WGS84), Q1, Q2, Q3, Q4 (συντελεστές quaternion), X, Y, Z (καρτεσιανές συντεταγμένες)

Για την άμεση γεωαναφορά της εικόνας (pixel to ground) η κάθε εικονοψηφίδα μετατρέπεται στο σύστημα της κάμερας εφαρμόζοντας τους συντελεστές για κάθε στροφή ($\phi(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$) και από το σύστημα της κάμερας στο γεωκεντρικό σύστημα με την εφαρμογή του πίνακα στροφής που δίδεται για κάθε γραμμή (υπό μορφή quaternion).

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου είναι απαραίτητο τα στοιχεία που αναφέρονται στο αρχείο TQR, και συγκεκριμένα οι γωνίες στροφής οι οποίες είναι υπό μορφή πολυωνύμων quaternion, να μετασχηματιστούν σε γωνίες Euler (ω , ϕ , κ) σύμφωνα με τις σχέσεις 3.12 και 3.13.

Ο χρόνος της πρώτης γραμμή ορίζεται ως η αφετηρία $t_{l=1} = 0$ και η κάθε γραμμή σάρωσης εκφράζεται χρονικά ως η χρονική διαφορά από την πρώτη (Εξ. 5.4).

$$t_{line-i} = TimeIntervalPerLine \cdot Line \quad \text{Εξ. 5.4}$$

όπου:

TimeIntervalPerLine: ο ρυθμός σάρωσης της κάμερας και δίνεται ίσος με
0.0004133 line/sec

Line: η τρέχουσα γραμμή σάρωσης.

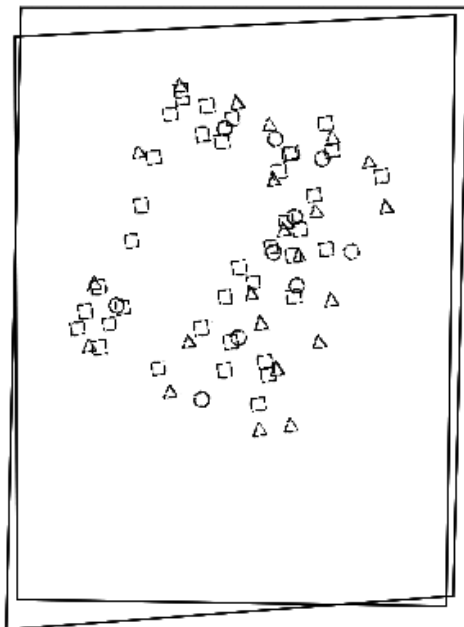
Εκτελώντας όλους τους παραπάνω μετασχηματισμούς μετατρέπονται τα στοιχεία των εφημερίδων σε μορφή κατάλληλη για την επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10.

Time (sec)	X [m]	Y [m]	Z [m]	ω (rad)	ϕ (rad)	K (rad)
0	4888764.96	1984507.299	4414241.798	-0.62316361	0.87170291	3.322954765
0.251968	4890048.766	1984577.71	4412795.552	-0.625516192	0.875023035	3.324678943
0.503936	4891332.197	1984647.919	4411348.963	-0.627885193	0.878337414	3.326417603
0.755904	4892615.251	1984717.928	4409902.031	-0.630270769	0.881645952	3.328170915
1.007872	4893897.93	1984787.736	4408454.756	-0.63267308	0.884948551	3.329939052
1.25984	4895180.232	1984857.343	4407007.138	-0.635092286	0.888245114	3.331722188
1.511808	4896462.158	1984926.75	4405559.178	-0.637528548	0.891535544	3.333520497
1.763776	4897743.707	1984995.956	4404110.875	-0.639982031	0.894819744	3.335334155
2.015744	4899024.88	1985064.961	4402662.23	-0.642452899	0.898097614	3.337163341
2.267712	4900305.677	1985133.765	4401213.243	-0.644941317	0.901369058	3.339008234
2.51968	4901586.096	1985202.369	4399763.914	-0.647447453	0.904633977	3.340869013
2.771648	4902866.139	1985270.772	4398314.243	-0.649971474	0.907892271	3.34274586
3.023616	4904145.805	1985338.975	4396864.229	-0.65251355	0.911143843	3.344638958
.....
22.92909	5004039.306	1990093.604	4281242.542	-0.926126275	1.137902725	3.562422023
23.18106	5005288.477	1990145.782	4279765.547	-0.930701776	1.140276324	3.566247834
23.43302	5006537.262	1990197.761	4278288.22	-0.93530862	1.14263464	3.570104291
23.68499	5007785.662	1990249.54	4276810.56	-0.939946838	1.144977576	3.573991437
23.93696	5009033.676	1990301.118	4275332.568	-0.94461645	1.147305032	3.577909308
24.18893	5010281.305	1990352.497	4273854.244	-0.94931747	1.149616914	3.581857931
24.4409	5011528.548	1990403.676	4272375.587	-0.954049901	1.151913125	3.585837323
24.69286	5012775.404	1990454.656	4270896.598	-0.958813737	1.154193571	3.589847494
24.91727	5013885.561	1990499.891	4269579.095	-0.963082955	1.156211245	3.593444963

Πίνακας 5.10: Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου με βήμα καταγραφής 0.2244 sec.

5.2.2. Επίλυση του Μοντέλου Γεωαναφοράς σε Ζεύγος Εικόνων

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς στο στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων EROS-B, μετρήθηκαν 22 φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 10 σημεία ελέγχου (ICPs) και 39 σημεία σύνδεσης (TPs). Η κατανομή των σημείων φαίνεται στο Σχήμα 5.8.

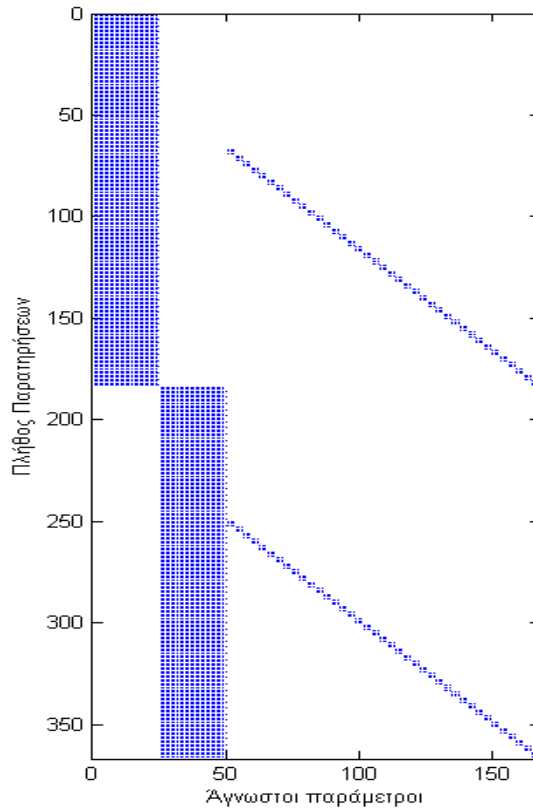


Σχήμα 5.8: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (\circ) και σημείων σύνδεσης (\square) στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων EROS-B.

Τόσο τα φωτοσταθερά σημεία όσο και τα ανεξάρτητα σημεία ελέγχου μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ως χάρτες αναφοράς τους ορθοφωτοχάρτες της ΕΚΧΑ Α.Ε., με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.20m στο έδαφος. Το υψόμετρο των σημείων πάρθηκε με παρεμβολή από το, υψηλής ανάλυσης, ψηφιακό μοντέλο εδάφους, που υπάρχει για την περιοχή μελέτης και έχει προκύψει από δεδομένα LIDAR, με βήμα καταγραφής του υψομέτρου ανά 1m. Τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων μετρήθηκαν χειροκίνητα με ακρίβεια καλύτερη της μιας εικονοψηφίδας (sub-pixel).

Ο πίνακας σχεδιασμού A, που προκύπτει εφαρμόζοντας τη γραμμικοποιημένη εξίσωση 4.13, έχει διαστάσεις $[2 \cdot 3 \cdot (22 + 39), 25 + 25 + (3 \cdot 39)] = [366, 167]$, καθώς αναφέρεται σε: 2 δορυφορικές εικόνες, 3 εξισώσεις παρατήρησης ανά σημείο, 22 φωτοσταθερά σημεία, 39 σημεία σύνδεσης και 25 άγνωστες παράμετρος του μοντέλου για κάθε εικόνα (Σχήμα 5.9). Οι άγνωστες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε εικόνα είναι:

- η παράμετρος (df), που αφορά στη διόρθωση της εστιακής απόστασης του φακού της κάμερας,
- εννέα παράμετροι, που αφορούν στις διορθώσεις των στροφών του δορυφόρου ($\omega_0, \omega_1, \omega_2, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$),
- εννέα παράμετροι για τη διόρθωση της θέσης του δορυφόρου ($X_0, X_1, X_2, Y_0, Y_1, Y_2, Z_0, Z_1, Z_2$) και
- έξι παράμετροι, που περιγράφουν την 2^{ου} βαθμού επιφάνεια διόρθωσης της κλίμακας ($m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$).



Σχήμα 5.9: Πίνακας σχεδιασμού A για την επίλυση του γεωμετρικού μοντέλου σε στερεοσκοπικές εικόνες EROS-B.

Τα αποτελέσματα, από την επίλυση με τις παραπάνω άγνωστες παραμέτρους του μοντέλου (25 για κάθε εικόνα), φαίνονται στον Πίνακα 5.11.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων 25							
$\hat{\sigma} = 1.25$ pixels Standard deviation							
Image points		22 GCPs Residuals			10 ICPs Residuals		
RMSx (pixel)	RMSy (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.91	0.88	0.66	0.64	1.3	0.66	0.67	1.6

Πίνακας 5.11: Επίλυση του πλήρους μοντέλου γεωαναφοράς σε δορυφορικές εικόνες EROS-B.

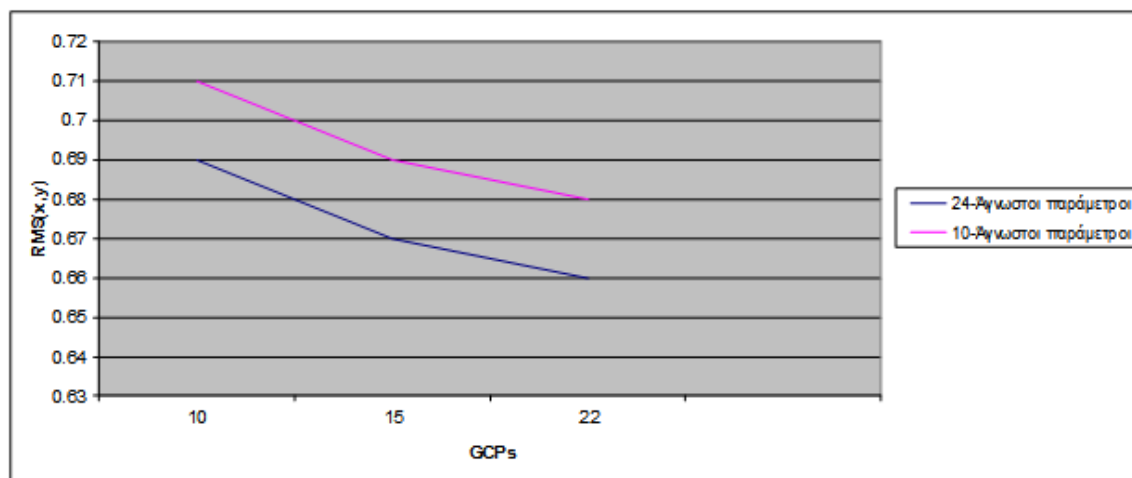
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το t-test για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας κάθε άγνωστης παραμέτρου και του επηρεασμού της επίλυσης του μοντέλου. Προκύπτει ότι μόνο 10 άγνωστες παράμετροι για κάθε εικόνα είναι στατιστικά σημαντικές και αυτές είναι οι $X_0, X_1, Y_0, Z_0, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0, m_0, m_2, m_3$. Επιλύοντας εκ νέου το γεωμετρικό μοντέλο, μόνο με τις 10 αυτές άγνωστες παραμέτρους, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 5.12.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων 10							
$\hat{\sigma} = 1.25$ pixels Standard deviation							
Image points		22 GCPs Residuals			10 ICPs Residuals		
RMSx (pixel)	RMSy (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.95	0.90	0.70	0.66	1.6	0.69	0.67	1.8

Πίνακας 5.12: Επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου με 10 άγνωστες παραμέτρους σε δορυφορικές εικόνες EROS-B.

Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η ακρίβεια της επίλυσης του μοντέλου χρησιμοποιώντας 10, 15 και 22 φωτοσταθερά, με χρήση 24 και 10 αγνώστων παραμέτρων για κάθε εικόνα. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τις

δεσμεύσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.2.4, με τη συμπλήρωση των εξισώσεων παρατήρησης των k πλεοναζουσών παραμέτρων.



Σχήμα 5.10: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 10 αγνώστους παραμέτρους, με χρήση 10, 15 και 22 GCPs.

5.2.3. Σύνταξη Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας

Για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προσδιορίστηκαν, με τον αλγόριθμο SURF, περίπου 678.000 ομόλογα σημεία στο στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων, και με την μετέπειτα πύκνωσή τους 3.200.000 σημεία. Το υψόμετρο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.2.

Η ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου εδάφους, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναφοράς το μοντέλο της Ε.Κ.Χ.Α. Α.Ε. (με βήμα καταγραφής 5m), προσδιορίστηκε ότι είναι 3.5m για πιθανότητα 90%. Η ακρίβεια αυτή θεωρείται ικανοποιητική, δεδομένου ότι το Ψηφιακό Μοντέλο αναφοράς εξήχθη από αεροφωτογραφίες με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.50m περίπου. Επίσης, παρατηρώντας την ακρίβεια του υψομέτρου, που προσδιορίζεται από τα σημεία ελέγχου (περίπου 1.6m), προκύπτει ότι είναι σχεδόν η ίδια με την ακρίβεια που προκύπτει από τη σύγκριση με το υψομετρικό μοντέλο αναφοράς.

Για τη δημιουργία των ορθοεικόνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό, που έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού VB.NET, εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.3. Τα εξαγόμενα αρχεία έχουν το μορφότυπο εικόνας Tiff και συνοδεύονται από αρχεία γεωαναφοράς tfw. Στο Σχήμα 5.11 δίνεται η ορθοδιορθωμένη εικόνα EROS-B.



Σχήμα 5.11: Ορθοδιορθωμένη δορυφορική εικόνα EROS-B, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.73m.

Επιτυπώνοντας τα σημεία ελέγχου (ICPs) επί της ορθοδιορθωμένης εικόνας, προσδιορίζεται η οριζοντιογραφική ακρίβεια, σύμφωνα με την εξίσωση 5.5.

$$d = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, \quad \text{όπου: } u_x = X_{ICP} - X_{ορθο}, \quad u_y = Y_{ICP} - Y_{ορθο}$$

$$RMS_{Hor} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{k}}, \quad \text{κ: αριθμός ICP σημείων} \quad \text{Εξ. 5.5}$$

όπου:

X_{ICP}, Y_{ICP} : οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου (ICPs)

$X_{ορθο}, Y_{ορθο}$: οι συντεταγμένες που προσδιορίζονται στη γεωαναφερμένη εικόνα.

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η οριζοντιογραφική ακρίβεια δίνεται από την εξίσωση 5.6.

$$RMS_{Hor(CE95)} = 1.7308 \cdot RMS_{Hor} \quad \text{Εξ. 5.6}$$

και για τα 10 σημεία ελέγχου προκύπτει: $RMS_{Hor(CE95)} = 1.33m$.

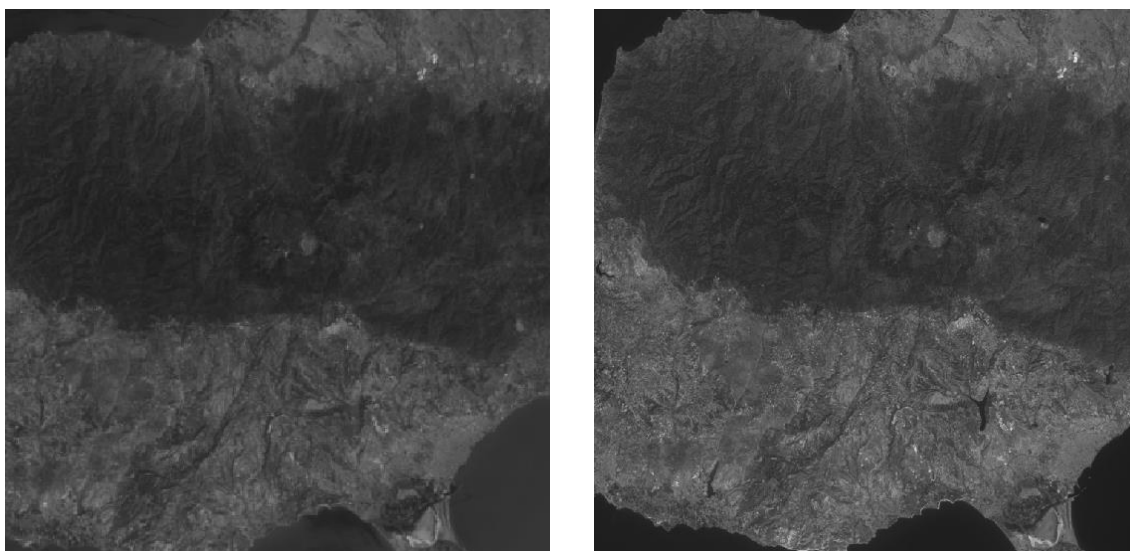
5.2.4. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων

Από την επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς παρατηρείται ότι για την επίτευξη ακρίβειας καλύτερης της μιας εικονοψηφίδας της δορυφορικής εικόνας (στις εικόνες EROS-B είναι 0.73m), αρκεί να ληφθούν υπόψη μόνο 10 άγνωστες παράμετροι για κάθε εικόνα, αντί των 24 που περιγράφουν σε πλήρη ανάπτυξη το γεωμετρικό μοντέλο. Η ακρίβεια αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών που χρησιμοποιούνται. Ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου, που απαιτείται να προσδιοριστούν για κάθε εικόνα, εξαρτάται από την ακρίβεια των εφημερίδων που περιέχουν τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού (μεταδεδομένα εικόνων). Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων EROS-B δίδονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε γραμμής σάρωσης, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα κατά την επίλυση του μοντέλου να χρησιμοποιούνται λιγότερες άγνωστες παράμετροι και να επιτυγχάνεται ακρίβεια καλύτερη της μιας εικονοψηφίδας (subpixel).

5.3. Εφαρμογή στο Δορυφορικό σύστημα SPOT-V

Το δορυφορικό σύστημα παρατήρησης γης SPOT-V έχει τεθεί σε τροχιά στις 4-5-2002. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 2.7.3. Διαθέτει 2 δέκτες HRG «υψηλής γεωμετρικής ανάλυσης», οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν εικόνες με μέγεθος εικονοψηφίδας 5m στο παγχρωματικό φάσμα. Με την τεχνολογία supermode (παράγραφο 2.2.1.γ) επιτυγχάνεται ο συνδυασμός των δύο αισθητήρων και η τελική εικόνα που παράγεται έχει μέγεθος εικονοψηφίδας 2.5m. Για την εφαρμογή του

προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V, που φαίνεται στο Σχήμα 5.12, με επίπεδο επεξεργασίας 1A (Level 1A), οι οποίες λήφθηκαν από διαφορετικές τροχιές (across track) στις 23-8-2004 και στις 24-8-2004 και καταλαμβάνει ευρεία περιοχή στην Κύπρο. Η διακύμανση του υψομέτρου του εδάφους είναι μεταξύ του 0 και 1940m.



Σχήμα 5.12: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V στην Κύπρο.

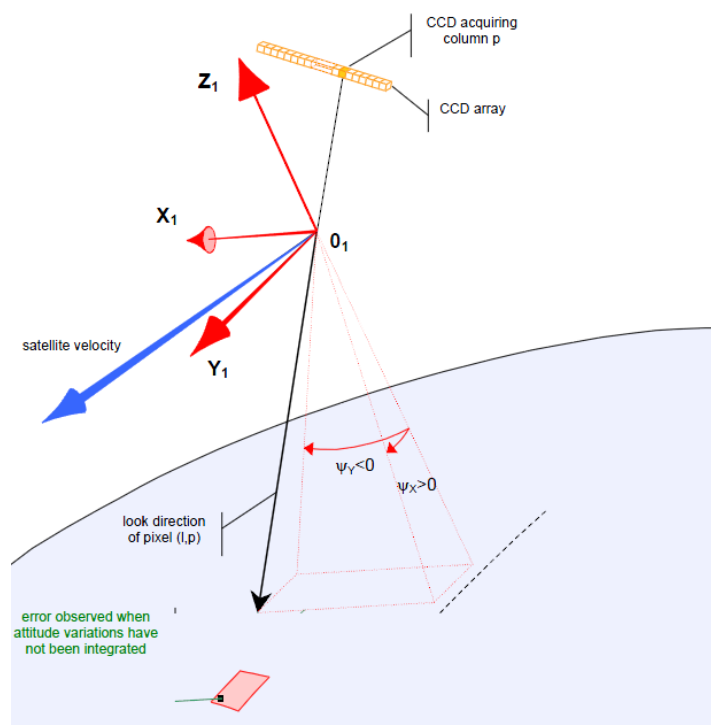
5.3.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων

Στο ζεύγος των δορυφορικών εικόνων SPOT-V, έχει πραγματοποιηθεί ραδιομετρική διόρθωση (L1A), χωρίς καμία γεωμετρική επεξεργασία. Τα μεταδεδομένα (Metadata), που τις συνοδεύουν, περιέχονται σε αρχείο τύπου .DIM (Dimap), το οποίο βρίσκεται σε μορφή XMLv.1. Στο παραπάνω XML αρχείο περιέχονται πληθώρα στοιχείων, τα οποία περιγράφουν τόσο την τροχιά όσο και τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων του δορυφόρου. Οι εγγραφές στο παραπάνω αρχείο ανέρχονται, συνήθως, σε 122.000, δίνοντας πολύ μεγάλο όγκο πληροφοριών. Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου τα στοιχεία που είναι απαραίτητα να εξαχθούν από το αρχείο DIM, είναι:

- Ο αριθμός των εικονοψηφίδων (pixels), που συλλέγει ο γραμμικός αισθητήρας κατά τη σάρωση της εικόνας.

- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα, που είναι ίσο με 6.5 μ m.
- Η εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας, που είναι ίση με 1082mm.
- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής, καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας.
- Οι γωνίες «θέασης» ψ_x , ψ_y , για κάθε εικονοψηφίδα του αισθητήρα, δηλαδή συνολικά 12.000 γωνίες. Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζεται η γεωμετρία των γωνιών αυτών.
- Οι εφημερίδες του δορυφόρου, για διακριτά χρονικά διαστήματα των 30sec, λίγο πριν και λίγο μετά τη λήψη, δηλαδή η θέση X,Y,Z του δορυφόρου στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84 και οι γωνίες στροφής ω , ϕ , κ του σώματος του δορυφόρου προς το τρισσορθόγωνιο σύστημα αναφοράς WGS-84.

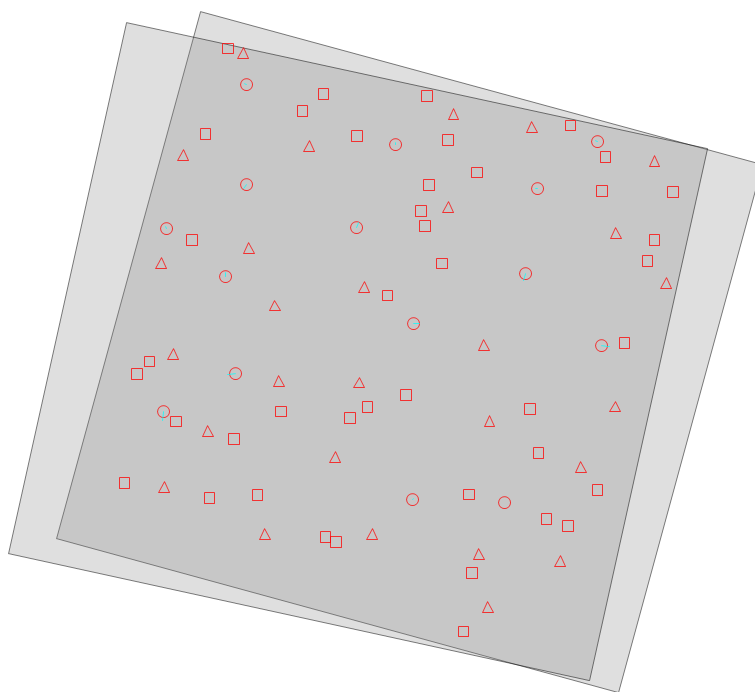
Τα παραπάνω στοιχεία μετατρέπονται κατάλληλα και εισάγονται ως παράμετροι στην επίλυση του προτεινόμενου αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου.



Σχήμα 5.13: Γωνίες ψ_x και ψ_y εκφράζουν τις γωνίες “θέσης” λήψης της κάθε εικονοψηφίδας του αισθητήρα (SPOT SATELLITE GEOMETRY HANDBOOK, Edition 1, 1-15-2002).

5.3.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V

Η εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου σε στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V, πραγματοποιήθηκε μετρώντας 28 φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 15 σημεία ελέγχου (ICPs) και 43 σημεία σύνδεσης (TPs). Η κατανομή των σημείων φαίνεται στο Σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.14: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (ο) και σημείων σύνδεσης (\square) στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V.

Τα φωτοσταθερά σημεία και τα ανεξάρτητα σημεία ελέγχου μετρήθηκαν από ορθοφωτοχάρτες κλίμακας 1:5.000. Το υψόμετρο των σημείων προσδιορίστηκε από τις ισοϋψείς καμπύλες, ισοδιάστασης 5 μέτρων, που απεικονίζονται επί των παραπάνω διαγραμμάτων. Τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων μετρήθηκαν με αυτοματοποιημένο τρόπο με ακρίβεια καλύτερη της μιας εικονοψηφίδας (sub-pixel).

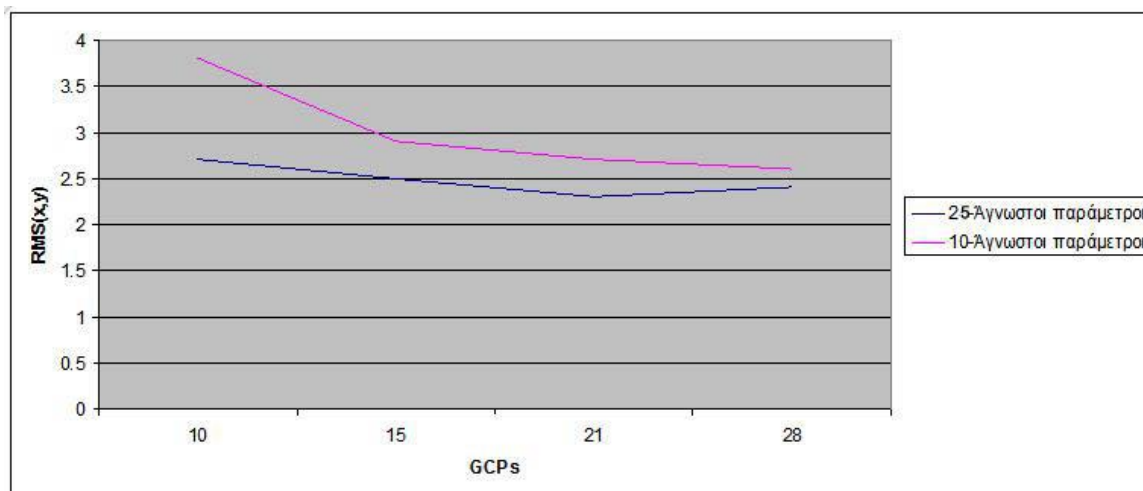
Ο πίνακας σχεδιασμού του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο, έχει διαστάσεις $[2 \cdot 3 \cdot (28 + 43) + 25 + 25 + (3 \cdot 43)] = [426, 179]$, για 28 φωτοσταθερά σημεία και 43 σημεία σύνδεσης.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης με τις 25 άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα ($df, \omega_o, \omega_1, \omega_2, \varphi_o, \varphi_1, \varphi_2, \kappa_o, \kappa_1, \kappa_2, X_o, X_1, X_2, Y_o, Y_1, Y_2, Z_o, Z_1, Z_2, m_o, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13.

Αριθμός αγνώστων παραμέτρων = 25							
$\hat{\sigma} = 1.6$ pixels Standard deviation							
Συν/νες εικόνας		Αριθμός GCPs 28			Αριθμός ICPs 10		
RMS _x (pixel)	RMS _y (pixel)	RMS _X (m)	RMS _Y (m)	RMS _Z (m)	RMS _X (m)	RMS _Y (m)	RMS _Z (m)
0.96	0.85	2.4	2.2	8	2.5	2.2	8.5

Πίνακας 5.13: Επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου σε ζεύγος δορυφορικών εικόνων SPOT-V χρησιμοποιώντας 28 φωτοσταθερά σημεία και 15 σημεία ελέγχου

Εφαρμόζοντας τον στατιστικό έλεγχο t-test για πιθανότητα 90%, για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας κάθε παραμέτρου και το βαθμό επηρεασμού στην επίλυση του μοντέλου, προσδιορίζονται ως στατιστικά σημαντικοί 10 άγνωστες παράμετροι για κάθε εικόνα. Οι παράμετροι αυτοί είναι: $X_o, X_1, Y_o, Z_o, Z_1, \omega_o, \varphi_o, \kappa_o, m_o, m_1$. Στο Σχήμα 5.15 δίνεται διάγραμμα με την ακρίβεια του μοντέλου χρησιμοποιώντας 10, 15, 21 και 28 φωτοσταθερά σημεία και αντίστοιχα όλες (25) ή μόνο οι στατιστικά σημαντικές (10) άγνωστες παράμετροι για κάθε εικόνα. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμεύσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.2.4 με τη συμπλήρωση των εξισώσεων παρατήρησης των k πλεοναζουσών παραμέτρων (Εξ. 4.26). Τα αποτελέσματα της επίλυσης αποτυπώνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.15.



Σχήμα 5.15: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 10 άγνωστες παραμέτρους, και έχοντας 10, 15, 21 και 28 GCPs αντίστοιχα.

Από το ζεύγος των γεωαναφερμένων δορυφορικών εικόνων προσδιορίστηκαν, με τον αλγόριθμο SURF, περίπου 785.000 ομόλογα σημεία, με χρήση του λογισμικού PCI Geomatica έγινε πύκνωση των σημείων (προσδιορίστηκαν 3.600.000 σημεία) και δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Το υψόμετρο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.2. Η ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου εδάφους, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναφοράς το ψηφιακό μοντέλο που έχει παραχθεί από τις ισοϋψείς καμπύλες διαγραμμάτων με βήμα 5m, προσδιορίστηκε (εξίσωση 4.28) ίσο με 25.5m για πιθανότητα 90%.

Τέλος, χρησιμοποιώντας το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί, δημιουργήθηκαν ορθοεικόνες με εξαγόμενα αρχεία σε μορφότυπο εικόνας Tiff που συνοδεύονται από αρχεία γεωαναφοράς tfw. Επιτυπώνοντας τα σημεία ελέγχου (ICPs) επί της ορθοδιορθωμένης γεωαναφερμένης δορυφορικής εικόνας, προσδιορίζεται η οριζοντιογραφική ακρίβεια, η οποία, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6, προσδιορίστηκε:

$$RMS_{Hor(CE95)} = 6.21m$$

5.3.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

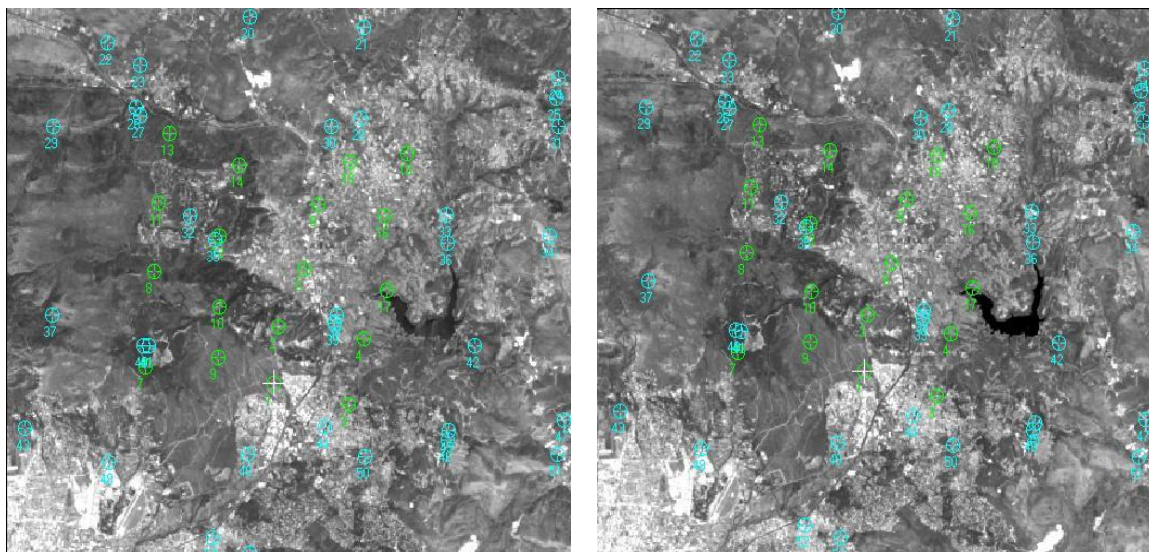
Από την επίλυση του μοντέλου συμπεραίνεται ότι για τη επίτευξη υπο-ψηφιδικής (sub-pixel) ακρίβειας από δορυφορικές εικόνες SPOT-V, αρκεί η εφαρμογή του μοντέλου γεωαναφοράς με μόνο 10 άγνωστες παράμετροι για κάθε εικόνα αντί των 24 που περιγράφουν την πλήρη ανάπτυξη του μοντέλου. Η ακρίβεια της επίλυσης του μοντέλου, αρχικά, αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών, αλλά σταθεροποιείται έπειτα από ένα συγκεκριμένο αριθμό φωτοσταθερών και συγκεκριμένα παρουσιάζεται να σταθεροποιείται μετά τη χρήση 20 φωτοσταθερών σημείων (Σχήμα 5.15). Οι εφημερίδες, που συνοδεύουν τις εικόνες, δίνονται με χρονικό διάστημα των 30 δευτερολέπτων, επομένως για τον προσδιορισμό των τιμών στο μεταξύ τους διάστημα, προτιμότερο είναι να χρησιμοποιείται η μέθοδος παρεμβολής Lagrangian (Εξ. 2.36α) χρησιμοποιώντας 2 τιμές θέσεις αντί του πολυωνύμου 3^{ου} βαθμού που προσαρμόζεται σε όλο το χρονικό διάστημα της λήψης (Εξ. 2.35).

5.4. Δορυφορικό σύστημα QuickBird

Το δορυφορικό σύστημα QuickBird τέθηκε σε τροχιά από τη DigitalGlobe στις 18-10-2001. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 2.7.5. Το δορυφορικό σύστημα έχει τη δυνατότητα να συλλέγει στερεοσκοπικές εικόνες κατά μήκος της τροχιάς του εξασφαλίζοντας έτσι τις ίδιες συνθήκες λήψης των δύο εικόνων. Ο δέκτης του συστήματος συλλέγει στο παγχρωματικό φάσμα εικόνες με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.6m στο έδαφος και στο πολυφασματικό με μέγεθος 2.44m, καθιστώντας το παραπάνω δορυφορικό σύστημα ένα υψηλής διακριτικής ικανότητας σύστημα και ως εκ τούτου απαιτούνται ακριβή μοντέλα για τη γεωμετρική διόρθωση των εικόνων που συλλέγει. Για την εφαρμογή και αξιολόγηση του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ζεύγος παγχρωματικών εικόνων QuickBird, που συλλέχθηκαν στις 31-7-2005, με επίπεδο επεξεργασίας LV1B (έχει

πραγματοποιηθεί μόνο ραδιομετρική επεξεργασία), που απεικονίζουν την περιοχή του Αγ. Στεφάνου, Αττικής με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.61m στο ναδίρ (Σχήμα 5.16). Οι εικόνες καταλαμβάνουν έκταση 16x16Km και η μορφολογία του εδάφους είναι λοφώδης με διακύμανση του υψομέτρου από 300m έως 1000m.

Μετρήθηκαν επίγεια 11 φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 6 σημεία ελέγχου (ICPs), με δέκτες GPS L1, L2 με οριζοντιογραφική ακρίβεια 2cm και υψομετρική 5cm. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν 33 σημεία σύνδεσης (TPs), που προσδιορίστηκαν αυτόματα με χρήση του λογισμικού ERDAS, με υπο-ψηφιδική ακρίβεια. Η κατανομή των σημείων φαίνεται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων QuickBird στον Αγ. Στέφανο Αττικής, με τη θέση των φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου (με πράσινο χρώμα) και των σημείων σύνδεσης (με μπλέ χρώμα).

5.4.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων

Οι δορυφορικές εικόνες συνοδεύονται από αρχεία μεταδεδομένων (Image Support Data) και περιλαμβάνουν: αρχεία εφημερίδων με τις θέσεις του δορυφόρου, τις γωνίες των αξόνων κίνησης καθώς και όλα τα στοιχεία σχετικά με την κάμερα και τον αισθητήρα του δορυφόρου. Συγκεκριμένα, τα αρχεία των

μεταδεδομένων, που συνοδεύουν το ζεύγος των δορυφορικών εικόνων και για κάθε εικόνα ξεχωριστά, είναι:

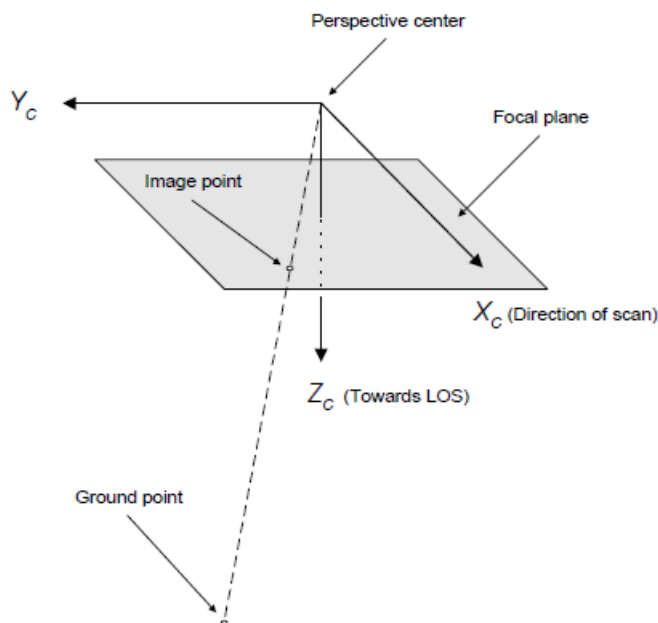
- Αρχείο με επέκταση επιθέματος .ATT (<όνομα δορ. εικόνας.ATT), το οποίο περιέχει τις γωνίες στροφής και το ρυθμό μεταβολής των αξόνων κίνησης του δορυφόρου ως προς το γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84, εκφρασμένες σε γωνίες quaternions (q_0, q_1, q_2, q_3, q_4), που δίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα των 0.02 δευτερολέπτων. Επίσης, δίνεται ο ακριβής χρόνος έναρξης των παρατηρήσεων που αναφέρεται λίγο πριν τη σάρωση της πρώτης γραμμής σάρωσης.
- Αρχείο με επέκταση επιθέματος .EPH (<όνομα δορ. εικόνας.EPH), το οποίο περιέχει τις θέσεις του δορυφόρου εκφρασμένες στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84 ανά χρονικό διάστημα 0.02 δευτερολέπτων. Επίσης, δίνεται ο ακριβής χρόνος έναρξης των παρατηρήσεων που αναφέρεται λίγο πριν τη σάρωση της πρώτης γραμμής σάρωσης.
- Αρχείο με επέκταση επιθέματος .GEO (<όνομα δορ. εικόνας.GEO), το οποίο περιέχει στοιχεία που αφορούν στην κάμερα του δέκτη, όπως η εστιακή απόσταση του φακού, το πρωτεύον σημείο, η γωνία λήψης του φακού σε σχέση με τον αισθητήρα καθώς και η διαστρόφη των φακών.
- Αρχείο με επέκταση επιθέματος .IMD (<όνομα δορ. εικόνας.IMD), που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία σχετικά με τη λήψη των εικόνων.

Επίσης, υπάρχουν και άλλα συνοδευτικά αρχεία, όπως αρχεία με επέκταση .STE (πληροφορίες για το ζεύγος των εικόνων), .RPB (συντελεστές των πολυωνυμικών διορθώσεων), .TIL (περιοχή απεικόνισης) κ.α., τα οποία παρέχουν γενικές πληροφορίες σχετικά για τις εικόνες.

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου τα στοιχεία, που είναι απαραίτητα να εξαχθούν από τα παραπάνω συνοδευτικά αρχεία, είναι:

- οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου x_0, y_0 , που δίνεται σε mm και είναι $x_0 = 9.5468$ (detOriginX) και $y_0 = 164.02772$ (detOriginY) αντίστοιχα.
- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα (detPitch), που είναι ίσο με 0.01191396mm.

- Η εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας, που είναι ίση με 8836.202 mm.
- Η γωνία θέασης του φακού της κάμερας σε σχέση με το εστιακό επίπεδο (PointingAngle), η οποία περιγράφεται με στοιχεία quaternions. Η γεωμετρία της λήψης της κάμερας του δορυφόρου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Απεικόνιση της γεωμετρίας λήψης της κάμερας του δορυφορικού συστήματος QuickBird (DigitalGlobe, QB imagery products, Revision 4.1, 1-3-2004).

Όλα τα παραπάνω στοιχεία περιγράφονται στο συνοδευτικό αρχείο με επέκταση .GEO. Επίσης, για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται:

- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής (firstLineTime = 2005-07-31T09:28:04.494421Z), καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας (avgLineRate = 6900.00persec). Τα στοιχεία αυτά τα αντλούνται από το αρχείο .IMD.
- Οι εφημερίδες του δορυφόρου, που παρέχουν τη θέση του $X(t), Y(t), Z(t)$ στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84 συναρτήσει του χρόνου και τις γωνίες στροφής $\omega(t), \phi(t), \kappa(t)$ του σώματος του δορυφόρου προς το τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς WGS-84. Τα παραπάνω στοιχεία παρέχονται από το δορυφόρο μέσω των συνοδευτικών αρχείων με επεκτάσεις .EPH και .ATT αντίστοιχα.

5.4.1.1. Μετατροπή των Μεταδεδομένων για την Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου

Η μετατροπή των στοιχείων των γωνιών (attitudes) από τη μορφή quaternions (q_0, q_1, q_2, q_3), που δίνονται, σε γωνίες Euler (ω, φ, κ), πραγματοποιείται εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 3.7 και 3.8.

Ο χρόνος στον οποίο αναφέρονται οι θέσεις του δορυφόρου και οι γωνίες στροφής εκφράζεται ως η διαφορά του χρόνου μεταξύ του χρόνου σάρωσης της πρώτης γραμμής της εικόνας t_f και του χρόνου σάρωσης της γραμμής t_i ($dt = t_f - t_i$). Η χρονική στιγμή για κάθε παρατήρηση προσδιορίζεται από την εξίσωση 4.5. Για τον προσδιορισμό της θέσης και των γωνιών του δορυφόρου, που αντιστοιχεί σε κάποιο χρονικό διάστημα dt_i πραγματοποιείται παρεμβολή, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.1.1. και πραγματοποιείται από τις εξισώσεις 4.7 και 4.8. Στον Πίνακα 5.14 φαίνονται οι θέσεις και οι γωνίες στροφής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, λίγο πριν και λίγο μετά τη λήψη της πρώτης εικόνας, στο σύστημα συντεταγμένων WGS-84.

Dt (sec)	X[m]	Y[m]	Z[m]	ω (deg)	φ (deg)	κ (deg)
-0.03724	4761086.144	2150512	4386296	2.889192	-0.34996	-0.52202
-0.01724	4761188.207	2150522	4386180	2.889207	-0.35007	-0.52202
0.002759	4761290.267	2150532	4386065	2.889223	-0.35017	-0.52201
0.022759	4761392.325	2150542	4385950	2.889238	-0.35027	-0.522
0.042759	4761494.381	2150552	4385834	2.889254	-0.35037	-0.52199
0.062759	4761596.434	2150562	4385719	2.889269	-0.35047	-0.52199
0.082759	4761698.485	2150572	4385604	2.889285	-0.35058	-0.52198
0.102759	4761800.533	2150582	4385488	2.8893	-0.35068	-0.52197
0.122759	4761902.579	2150592	4385373	2.889316	-0.35078	-0.52196
0.142759	4762004.623	2150602	4385257	2.889331	-0.35088	-0.52196
0.162759	4762106.665	2150612	4385142	2.889347	-0.35099	-0.52195
0.182759	4762208.704	2150622	4385027	2.889363	-0.35109	-0.52194
.....

Πίνακας 5.14: Οι θέσεις και οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά το χρονικό διάστημα λήψης της εικόνας QuickBird.

5.4.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε ζεύγος Δορυφορικών Εικόνων QuickBird

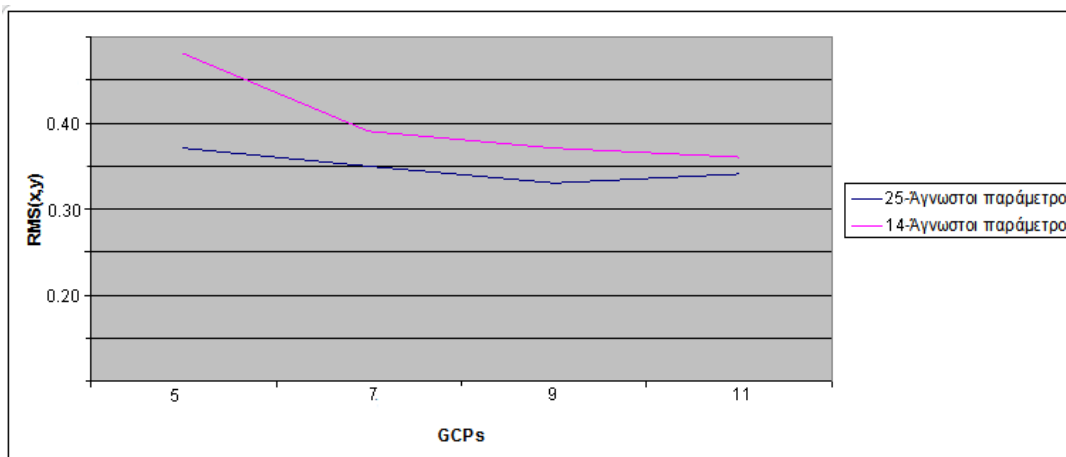
Ο πίνακας σχεδιασμού του συστήματος που προκύπτει, εφαρμόζοντας το αναπτυχθέν γεωμετρικό μοντέλο, έχει διαστάσεις $[2 \cdot 3 \cdot (11 + 33), 25 + 25 + (3 \cdot 33)] = [264, 149]$, με χρήση 11 φωτοσταθερών και 33 σημείων σύνδεσης. Τα αποτελέσματα της επίλυσης του πλήρους γεωμετρικού μοντέλου, δηλαδή με 25 άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα, δίνονται στον Πίνακα 5.15.

Number of unknown parameters = 24, Calibrated parameters (x ₀ ,y ₀) : No, df: Yes Number of GCPs=11, ICPs=6							
$\hat{\sigma} = 0.58$ pixels Standard deviation							
Image points		GCPs Residuals			ICPs Residuals		
RMS _x (pixel)	RMS _y (pixel)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)	RMS_X (m)	RMS_Y (m)	RMS_Z (m)
0.49	0.51	0.31	0.33	1.3	0.53	0.57	1.5

Πίνακας 5.15: Επίλυση του μοντέλου με 25 άγνωστες παραμέτρους, σε δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 11 φωτοσταθερά σημεία και 6 σημεία ελέγχου.

Μετά την επίλυση του μοντέλου με εφαρμογή όλων των αγνώστων παραμέτρων, εφαρμόζεται στατιστικός έλεγχος με χρήση t-test για πιθανότητα 90%, για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας κάθε άγνωστης παραμέτρου και εξετάζεται πόσο επηρεάζει την επίλυση του μοντέλου. Από το τεστ σημαντικότητας προσδιορίζονται ως στατιστικά σημαντικοί, οι εξής 14 άγνωστες παράμετροι, για κάθε εικόνα: $X_0, X_1, Y_0, Y_1, Z_0, Z_1, \omega_0, \omega_1, \varphi_0, \varphi_1, \kappa_0, m_0, m_1, m_2$.

Στο Σχήμα 5.18 παρατηρούμε την ακρίβεια που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας 5, 7, 9 και 11 φωτοσταθερά σημεία με εφαρμογή του πλήρους μοντέλων των 25 παραμέτρων και του μοντέλου με μόνο 14 άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμεύσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.2.4 με τη συμπλήρωση των εξισώσεων παρατήρησης των k πλεοναζουσών παραμέτρων (Εξ. 4.26).

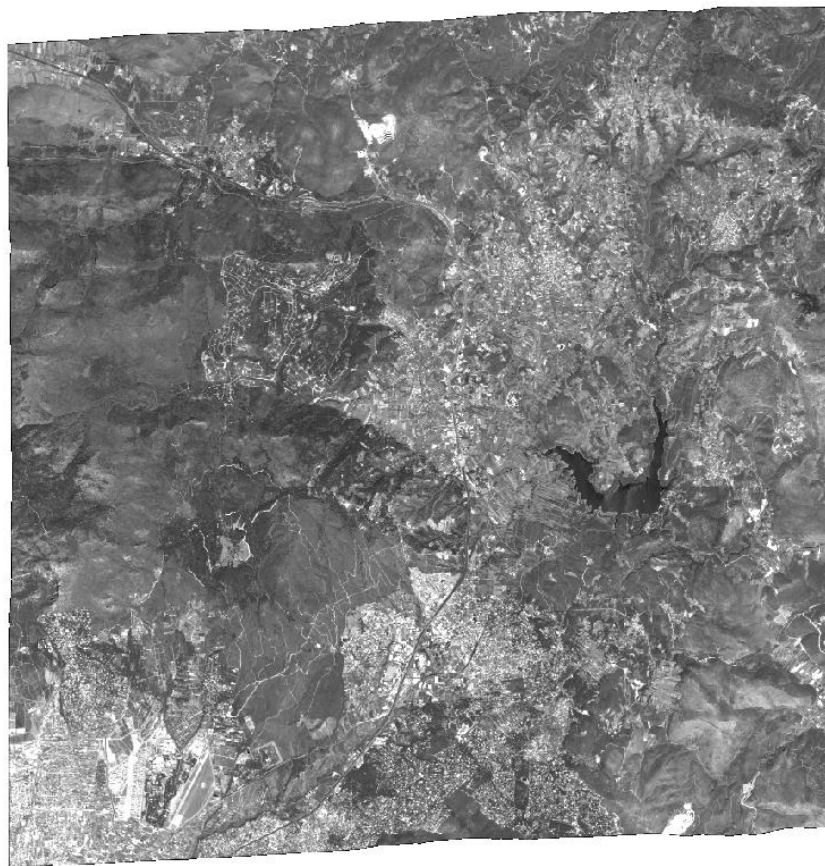


Σχήμα 5.18: Επίλυση του μοντέλου με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 14 άγνωστες παραμέτρους με χρήση 5, 7, 9 και 11 GCPs αντίστοιχα.

5.4.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας

Για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προσδιορίστηκαν περίπου 1500x1500 ομόλογα σημεία στο στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ERDAS, με βήμα καταγραφής υψομέτρου 5m. Το υψόμετρο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στην παράγραφο 4.3.2. Η ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου εδάφους, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναφοράς το ψηφιακό μοντέλο που έχει παραχθεί φωτογραμμετρικά από αεροφωτογραφίες (με βήμα καταγραφής 5m) και υψομετρικής ακρίβειας 2m περίπου, προσδιορίστηκε ίσο με 2.8m για πιθανότητα 90%, σύμφωνα με την εξίσωση 4.28.

Από κάθε δορυφορική εικόνα παράχθηκε ορθοεικόνα (Σχήμα 5.19), εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.3. Τα εξαγόμενα αρχεία έχουν το μορφότυπο εικόνας Tiff και συνοδεύονται από αρχεία γεωαναφοράς tfw.



Σχήμα 5.19: Ορθοεικόνα QuickBird που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.

Ο προσδιορισμός της οριζοντιογραφικής ακρίβειας της παραγόμενης ορθοεικόνας, έγινε με επιτύπωση των σημείων ελέγχου στην ορθοεικόνα και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που επιτεύχθηκαν από τη γεωαναφορά των εικόνων από το λογισμικό ERDAS, χρησιμοποιώντας το ίδιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τα ίδια φωτοσταθερά, με τα ίδια σημεία ελέγχου. Το λογισμικό ERDAS (LPS)v9.3 χρησιμοποιεί για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων QuickBird, γεωμετρικό μοντέλο το οποίο στηρίζεται στην κλασική εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας, όπως αναφέρεται στη Εξ. 3.9. Τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6, είναι:

- με πλήρη ανάπτυξη των παραμέτρων, του προτεινόμενου μοντέλου:

$$RMS_{Hor(CE95)} = 1.3m$$

- Με εφαρμογή του λογισμικού ERDAS, με πλήρη ανάπτυξη των παραμέτρων όπως προσδιορίζονται στην Εξ. 3.9: $RMS_{Hor(CE95)} = 1.5m$

5.4.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

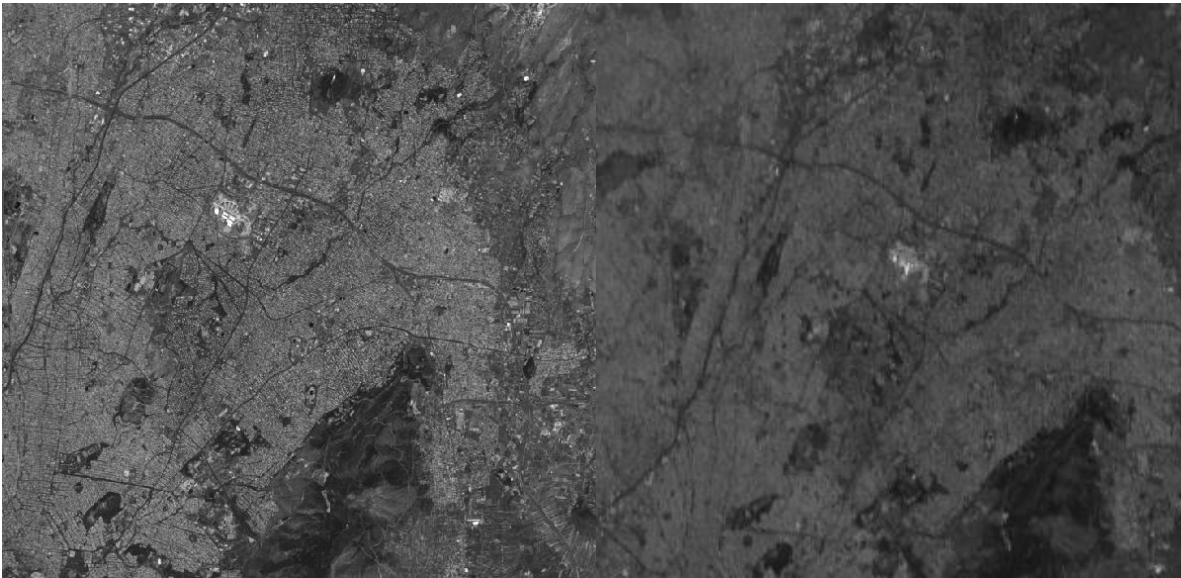
Από την επίλυση του μοντέλου παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται ακρίβεια καλύτερη της μιας εικονοψηφίδας της δορυφορικής εικόνας (0.61m), λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις 14 άγνωστες παραμέτρους. Οι σημαντικές παράμετροι των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού, που επαρκούν για την επίλυση του μοντέλου, είναι οι όροι 1^{ου} βαθμού (γραμμική μεταβολή) των γραμμικών και γωνιακών παραμέτρων (θέσης και στροφών). Η ακρίβεια της επίλυσης του μοντέλου αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των φωτοσταθερών, αλλά σταθεροποιείται γρήγορα, συγκεκριμένα για περισσότερα από 7 φωτοσταθερά σημεία (Σχήμα 5.18).

Οι εφημερίδες που συνοδεύουν τις εικόνες δίνονται με χρονικό διάστημα των 0,02 δευτερολέπτων, επομένως είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ως μέθοδος παρεμβολής πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού, που προσαρμόζεται σε όλο το χρονικό διάστημα της λήψης (Εξ. 2.35). Συγκρινόμενη η ακρίβεια της γεωαναφερμένης εικόνας, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο, με αυτή που προσδιορίζεται από την κλασική χρήση του γεωμετρικού μοντέλου (που χρησιμοποιεί το λογισμικό ERDAS) δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα.

5.5. Δορυφορικό σύστημα WorldView-2

Το δορυφορικό σύστημα WorldView-2 τέθηκε σε τροχιά στις 8-10-2009 από τη DigitalGlobe, όπως και το δορυφορικό σύστημα QuickBird. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 2.7.6. Ο δέκτης του συστήματος έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα σε 8 κανάλια με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.46m στο έδαφος στο παγχρωματικό φάσμα και 1.84m στο πολυφασματικό. Για την εφαρμογή και αξιολόγηση του προτεινόμενου

γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς, χρησιμοποιήθηκε το ζεύγος παγχρωματικών εικόνων WorldView-2, οι οποίες λήφθηκαν στις 4-5-2010 με product order id 10EUSI-1344-01_I002356_ST02-P005751. Οι εικόνες απεικονίζουν προάστιο της Αττικής, με ημιορεινό έδαφος και διακύμανση του υψομέτρου περίπου 700m (από 100 έως 800m). Οι εικόνες αποτελούν προϊόν Stereo Imagery (Stereo 1B), με μέγεθος εικονοψηφίδας από 0.55m για τη *ναδρική* εικόνα και 0.86m για την «*πίσω*» εικόνα.



Σχήμα 5.20: Στερεοζεύγος δορυφορικών εικόνων WorldView-2.

Οι δορυφορικές εικόνες WorldView-2 συνοδεύονται από ένα σετ αρχείων μεταδεδομένων, όμοια με αυτά που συνοδεύουν τις εικόνες QuickBird (ImageSupportData), και περιλαμβάνουν αρχεία εφημερίδων με τις θέσεις του δορυφόρου, τις γωνίες των αξόνων κίνησης καθώς και όλα τα στοιχεία σχετικά με τον αισθητήρα του δορυφόρου. Τα αρχεία των μεταδεδομένων, που συνοδεύουν το ζεύγος των δορυφορικών εικόνων και για κάθε εικόνα ξεχωριστά, είναι τα αρχεία .ATT, .EPH, .GEO, IMD, RBP. Η μορφοποίηση των αρχείων των μεταδεδομένων είναι πανομοιότυπη με τα αρχεία των μεταδεδομένων που συνοδεύουν τις εικόνες QuickBird.

5.5.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων WorldView-2

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, από το συνοδευτικό αρχείο μεταδεδομένων με επέκταση .GEO, εξάγονται τα παρακάτω:

- Το πρωτεύον σημείο, που έχει συντεταγμένες: $x_0 = -0.259$ (detOriginX) και $y_0 = 140.72769$ (detOriginY).
- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα (detPitch), που είναι ίσο με 0.008mm.
- Η εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας, που είναι ίση με 13246.139mm.
- Η γωνία θέασης του φακού της κάμερας σε σχέση με το εστιακό επίπεδο (Pointing Angle) η οποία περιγράφεται με στοιχεία Quaternions. Η μετατροπή των στοιχείων των γωνιών (attitudes) από τη μορφή quaternions (q_0, q_1, q_2, q_3) σε γωνίες Euler (ω, ϕ, κ) πραγματοποιείται εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 3.7 και 3.8.

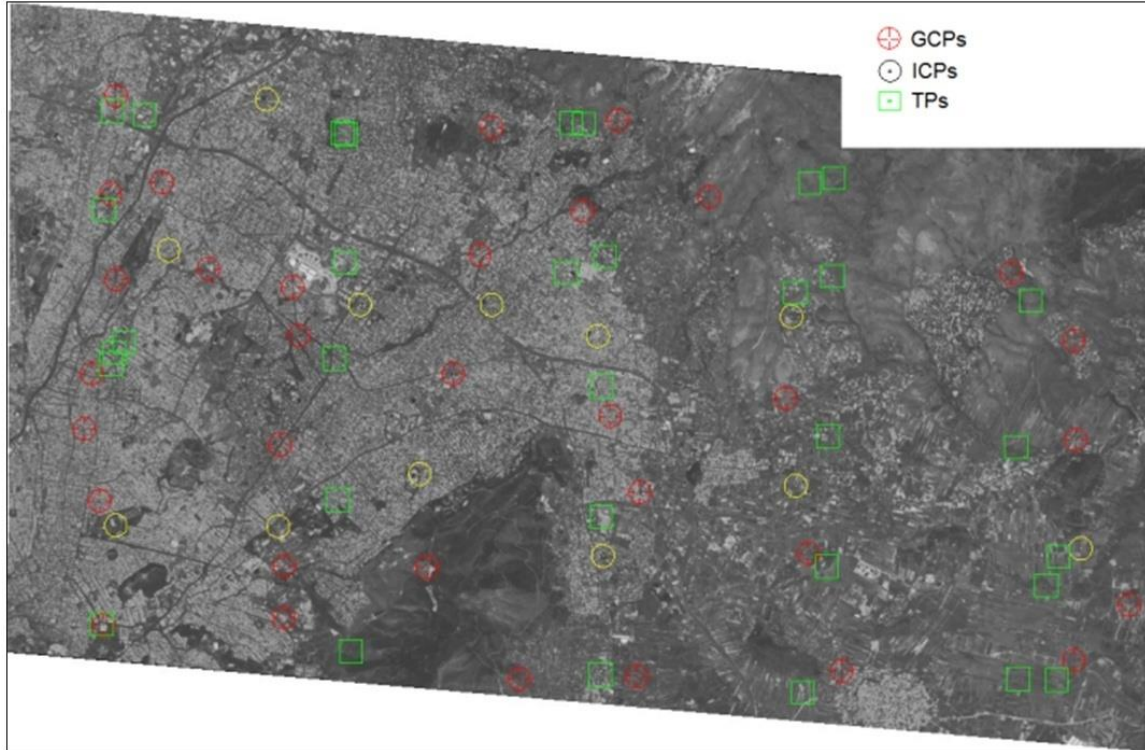
Επίσης, για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται:

- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής (firstLineTime = 2010-05-04T09:07:21.081775Z) καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας (avgLineRate = 20000 per sec). Τα στοιχεία αυτά αντλούνται από το αρχείο .IMD.
- Οι εφημερίδες του δορυφόρου, η θέση του $X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$ στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84 συναρτήσει του χρόνου, και οι γωνίες στροφής $\omega(t), \phi(t), \kappa(t)$ του σώματος του δορυφόρου προς το τρισορθογώνιο σύστημα αναφοράς WGS-84.

5.5.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου σε Δορυφορικές Εικόνες WorldView-2

Η εφαρμογή του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου στο στερεοζεύγος των δορυφορικών εικόνων WorldView-2, πραγματοποιήθηκε μετρώντας 33

φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 12 σημεία ελέγχου (ICPs) και 33 σημεία συνδέσεως (TPs). Η κατανομή των σημείων φαίνεται στο Σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων, σημείων ελέγχου και σημείων σύνδεσης στο ζεύγος δορυφορικών εικόνων WorldView-2.

Τα φωτοσταθερά και τα ανεξάρτητα σημεία ελέγχου μετρήθηκαν επίγεια με δέκτες GPS L1, L2 και πραγματοποιήθηκε επίλυση στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ-87, με οριζοντιογραφική ακρίβεια 1cm και υψομετρική 3cm. Τα σημεία σύνδεσης μετρήθηκαν με αυτοματοποιημένο τρόπο με το λογισμικό ERDAS, με ακρίβεια καλύτερη της μιας εικονοψηφίδας (sub-pixel).

Ο πίνακας σχεδιασμού του συστήματος, εφαρμόζοντας το αναπτυχθέν γεωμετρικό μοντέλο, έχει διαστάσεις $[2 \cdot 3 \cdot (33 + 33), 25 + 25 + (3 \cdot 33)] = [396, 149]$, για τα 33 φωτοσταθερά και 33 σημεία σύνδεσης.

Η επίλυση του γεωμετρικού μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις άγνωστες παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή 25 για κάθε εικόνα, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.16.

Άγνωστες Παράμετροι: 24 parameters + df				
Εικόνα	1^η εικόνα		2^η εικόνα	
Αριθμός GCPs	33	6	33	6
rms x (pixel)	0.75	0.88	0.87	0.92
rms y (pixel)	0.51	0.73	0.81	0.88
ICPs results				
rms X (m)	0.41	0.49	0.77	0.80
rms Y (m)	0.28	0.39	0.69	0.76
rms Z (m)	0.88	0.91	1.01	1.12

Πίνακας 5.16: Επίλυση του μοντέλου με 25 άγνωστες παραμέτρους, σε δορυφορικές εικόνες WorldView-2 χρησιμοποιώντας 33 και 6 φωτοσταθερά σημεία και 12 σημεία ελέγχου.

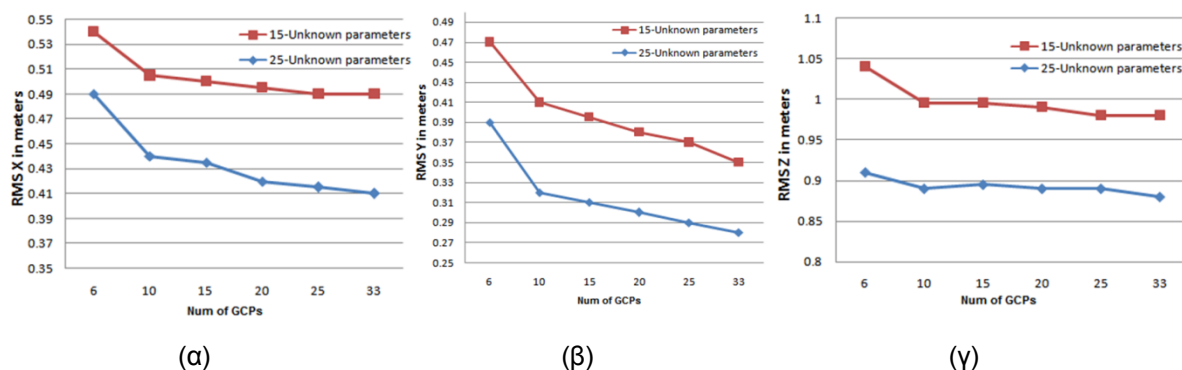
Εφαρμόζοντας τον στατιστικό έλεγχο t-test για πιθανότητα 90%, για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας κάθε άγνωστης παραμέτρου, προσδιορίστηκαν 14 άγνωστες παράμετροι ως στατιστικά σημαντικές για κάθε εικόνα και αυτές είναι: $X_0, X_1, Y_0, Y_1, Z_0, Z_1, \omega_0, \omega_1, \varphi_0, \varphi_1, \kappa_0, m_0, m_1, m_2$. Στον Πίνακα 5.17 δίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου διατηρώντας αυτές τις 14 άγνωστες παραμέτρους.

Άγνωστες Παράμετροι: 14 parameters + df				
Εικόνα	1^η εικόνα		2^η εικόνα	
Αριθμός GCPs	33	6	33	6
rms x (pixel)	0.88	0.97	0.92	1.05
rms y (pixel)	0.65	0.86	0.87	0.93
ICPs results				
rms X (m)	0.49	0.54	0.85	0.91
rms Y (m)	0.35	0.47	0.74	0.80
rms Z (m)	0.98	1.04	1.16	1.20

Πίνακας 5.17: Επίλυση του μοντέλου με 14 (ελάχιστες) άγνωστες παραμέτρους σε δορ. εικόνες WorldView-2 χρησιμοποιώντας 33 και 6 φωτοσταθερά σημεία και 12 σημεία ελέγχου.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου σύμφωνα με την Εξ. 4.25, χρησιμοποιώντας 5, 10, 15, 20, 25 και 33 φωτοσταθερά σημεία, 24+1 και 14+1

άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα παρουσιάζονται στο διάγραμμα (α) του Σχήματος 5.22 (Deltsidis and Ioannidis, 2011). Επίσης, επίλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμεύσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.2.2.4 με τη συμπλήρωση των εξισώσεων παρατήρησης των k πλεοναζουσών παραμέτρων (Εξ. 4.26) και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στα διαγράμματα (β) και (γ) του Σχήματος 5.22.

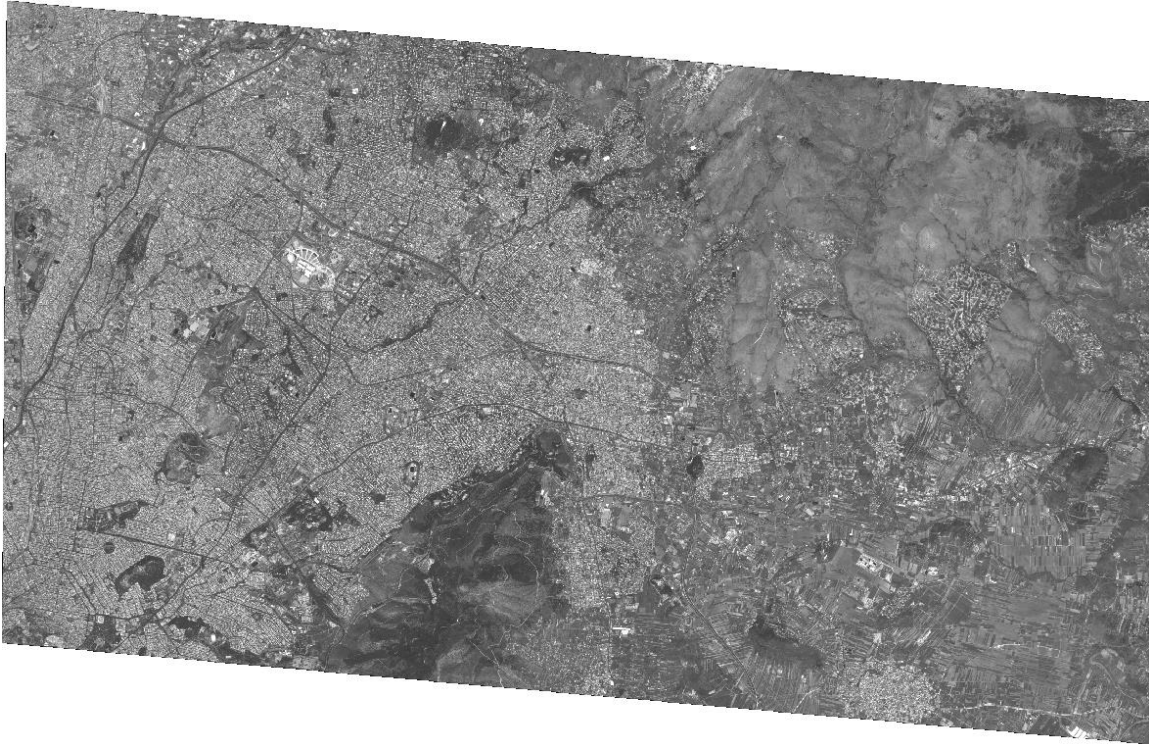


Σχήμα 5.22: Ακρίβεια επίλυσης του μοντέλου οριζοντιογραφικά (α) και (β), και υψομετρικά (γ) με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 14+1 άγνωστες παραμέτρους.

5.5.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους προσδιορίστηκε με μέτρηση περίπου 3000 x 3000 ομόλογων σημείων μεταξύ των δορυφορικών εικόνων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ERDAS, με βήμα καταγραφής υψομέτρου 5m. Η ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου εδάφους, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναφοράς το ψηφιακό μοντέλο που έχει παραχθεί από LIDAR για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (με βήμα καταγραφής 1m) και υψομετρική ακρίβεια 80cm περίπου, προσδιορίστηκε ίση με 2.1m, για πιθανότητα 90%.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ορθοαναγωγή των δορυφορικών εικόνων με εξαγόμενα αρχεία εικόνας με μορφότυπο Tiff, που συνοδεύονται από αρχεία γεωαναφοράς tfw. Στο Σχήμα 5.23 δίνεται η ορθοδιορθωμένη ναδιρική εικόνα μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς.



Σχήμα 5.23: Ορθοεικόνα WorldView-2 που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.

Εκτός της αξιολόγησης με τα σημεία ελέγχου, η οριζοντιογραφική ακρίβεια της γεωαναφερμένης δορυφορικής εικόνας προσδιορίσθηκε μετά από σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη γεωαναφορά των εικόνων με χρήση του λογισμικού ERDAS 2014, χρησιμοποιώντας τα ίδια: ψηφιακό μοντέλο εδάφους, φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου. Το λογισμικό ERDAS 2014 χρησιμοποιεί για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων WorldView-2, γεωμετρικό μοντέλο που στηρίζεται στην κλασική εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας, όπως αναφέρεται στη Εξ. 3.9.

Τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6, είναι:

- με το προτεινόμενο μοντέλο σε πλήρη ανάπτυξη (με 24 παραμέτρους):
 $RMS_{Hor(CE95)} = 1.0m$
- με εφαρμογή του λογισμικού ERDAS, με πλήρη ανάπτυξη των παραμέτρων όπως προσδιορίζονται στην Εξ. 3.9: $RMS_{Hor(CE95)} = 1.2m$

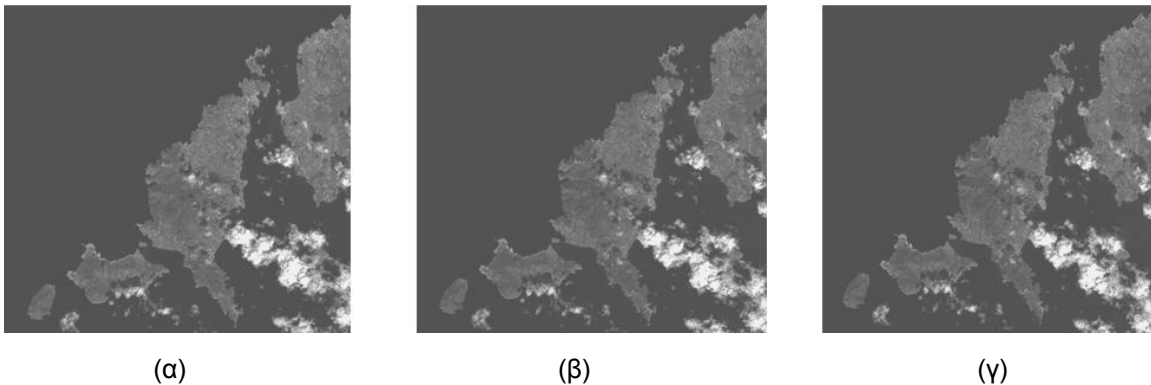
5.5.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών, συνοψίζονται στα εξής:

- Σχεδόν σε όλες τις επιλύσεις του μοντέλου (με 25 και με 15 άγνωστες παραμέτρους) έχουν επιτευχθεί υπο-ψηφιδικές ακρίβειες κατά x και y .
- Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με τη χρήση του πλήρους μοντέλου και με τον μέγιστο αριθμού των φωτοσταθερών. Ωστόσο, με χρήση μόνο 15 παραμέτρων, οι ακρίβειες σε X και Y παραμένουν καλύτερες από 0.5m και στο Z καλύτερη από 1m για τη ναδρική εικόνα. Η ακρίβεια είναι χειρότερη κυρίως για τα X και Y για την "πίσω" εικόνα, της οποίας η γωνία λήψης είναι πολύ μεγάλη (περίπου -37.6 deg) έχοντας μέγεθος εικονοψηφίδας στο έδαφος 0.86m.
- Οι σημαντικές παράμετροι των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού, που επαρκούν για την επίλυση του μοντέλου είναι οι όροι $1^{\text{ου}}$ βαθμού του πολυωνύμου (γραμμικοί) για τις γραμμικές και τις γωνιακές παραμέτρους (θέσης και στροφών), όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στην εφαρμογή του μοντέλου στις δορυφορικές εικόνες QuickBird.
- Ο περιορισμός του αριθμού των φωτοσταθερών δεν έχει καμία ή έχει πολύ μικρή επίδραση στην ακρίβεια, όπως προκύπτει από τους ελέγχους με τα σημεία ελέγχου. Στο Σχήμα 5.22 (α), (β) και (γ) διαφαίνεται ότι η επιτυγχανόμενη ακρίβεια είναι ανεξάρτητη του αριθμού των GCPsμ όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα από 6 φωτοσταθερά σημεία. Η ακρίβεια ως προς τον Y -άξονα φαίνεται να μεταβάλλεται-διορθώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό, σε σχέση με την ακρίβεια ως προς το X -άξονα, μεταβαίνοντας από τα 6 στα 10 φωτοσταθερά, όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη ακρίβεια.

5.6. Δορυφορικό σύστημα PLEIADES 1B

Το δορυφορικό σύστημα Pleiades 1A τέθηκε σε τροχιά στις 16-12-2011, ενώ το σύστημα 1B περί τέλος 2012, από την εταιρεία ASTRIUM. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 2.7.7. Ο δέκτης του συστήματος έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα σε 4 κανάλια με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.7m στο έδαφος για το παγχρωματικό φάσμα και 2.8m για το πολυφασματικό. Το τελικό προϊόν που διατίθεται, έπειτα από επεξεργασία (επαναδειγματοληψία) έχει μέγεθος εικονοψηφίδας 0.5m στο παγχρωματικό φάσμα και 2m στο πολυφασματικό. Για την εφαρμογή και αξιολόγηση του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το τριπλό στέρεο (tri-stereo) παγχρωματικών εικόνων 1B, οι οποίες λήφθηκαν στις 9-4-2013 και απεικονίζουν τη νήσο Αντίπαρο (N 37.07 deg και E 25.1 deg), με ημιορεινό έδαφος και με διακύμανση του υψομέτρου από 0 έως 300m (Σχήμα 5.24). Οι εικόνες αποτελούν προϊόν tri-Stereo, παγχρωματικές με μέγεθος εικονοψηφίδας από 0.50m συνοδευόμενες από τα αρχεία μεταδεδομένων DIM.xml και RPC_xml.



Σχήμα 5.24: Tri-stereo (α) Forward, (β) Nadir και (γ) Reverse δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B που απεικονίζουν την ευρύτερη περιοχή της Νήσου Αντιπάρου.

5.6.1. Μεταδεδομένα Δορυφορικών Εικόνων Pleiades 1B

Τα αρχεία μεταδεδομένων Dim και RPC δίνονται σε μορφή XML. Το αρχείο DIM περιλαμβάνει πλήθος στοιχείων, που αφορούν στη λήψη και την κίνηση του δορυφόρου. Το αρχείο RPC περιλαμβάνει τους συντελεστές των πολυωνύμων των RPCs τα οποία χρησιμοποιούνται για την άμεση γεωναφορά της εικόνας όπως αναλυτικά περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.4.

Όλα τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για την εφαρμογή του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου εξάγονται από το αρχείο DIM_xml, για κάθε εικόνα και συνοψίζονται στα εξής:

- Το πρωτεύον σημείο x_0, y_0 το οποίο δίνεται σε μονάδα m και είναι `<DETECTOR_SIZE_COL>13e-06` και `<DETECTOR_SIZE_ROW>13e-06`.
- Το μέγεθος της εικονοψηφίδας του αισθητήρα, που είναι ίσο με `<DETECTOR_SIZE_COL>13e-06` και `<DETECTOR_SIZE_ROW>13e-06`.
- Η εστιακή απόσταση του φακού της κάμερας, που είναι ίση με 12.9μ `<FOCAL_LENGTH>12.9`.
- Η γωνία θέασης του φακού της κάμερας σε σχέση με το εστιακό επίπεδο (PointingAngle), η οποία περιγράφεται με πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού.

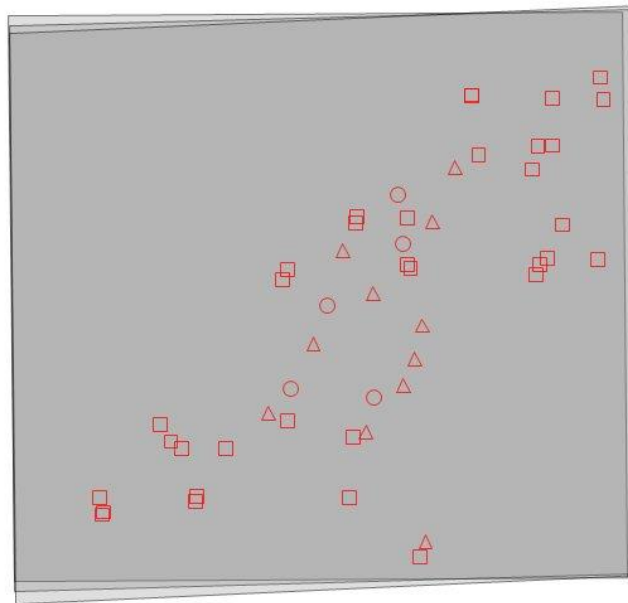
Επίσης, για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται:

- Η χρονική στιγμή έναρξης της σάρωσης της πρώτης γραμμής (`<START>2013-04-09T09:12:39.9730000Z`) καθώς και ο ρυθμός σάρωσης των γραμμών της εικόνας (`<LINE_PERIOD>0.0735persec`).
- Οι θέσεις $X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$ στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων WGS-84 συναρτήσει του χρόνου καθώς και οι γωνίες στροφής $\omega(t), \varphi(t), \kappa(t)$ του σώματος του δορυφόρου προς το τρισσορθόγωνιο πλαίσιο αναφοράς WGS-84. Οι γωνίες στροφής του δορυφόρου κατά τη διάρκεια της λήψης δίνονται υπό μορφή quaternion και μετατρέπονται σε γωνίες Euler (ω, φ, κ)

εφαρμόζοντας την εξίσωση Εξ 5.1. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία εισάγονται άμεσα από το αρχείο DIM.

5.6.2. Εφαρμογή του Γεωμετρικού Μοντέλου

Η εφαρμογή του αναπτυχθέντος γεωμετρικού μοντέλου στο tri-stereo των δορυφορικών εικόνων Pleiades, πραγματοποιήθηκε με 12 φωτοσταθερά σημεία (GCPs), 6 σημεία ελέγχου (ICPs) και 40 σημεία σύνδεσης (TPs). Οι συντεταγμένες (στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ-87) των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου αποτελούν στοιχεία της εργασίας (Ιωάννου, 2013) και είχαν μετρηθεί επίγεια με δέκτες GPS και ακρίβεια καλύτερη των 2cm. Η κατανομή των σημείων φαίνεται στο Σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.25: Κατανομή φωτοσταθερών σημείων (Δ), σημείων ελέγχου (Ο) και σημείων σύνδεσης(□) μεταξύ του tri-stereo δορυφορικών εικόνων Pleiades-1B.

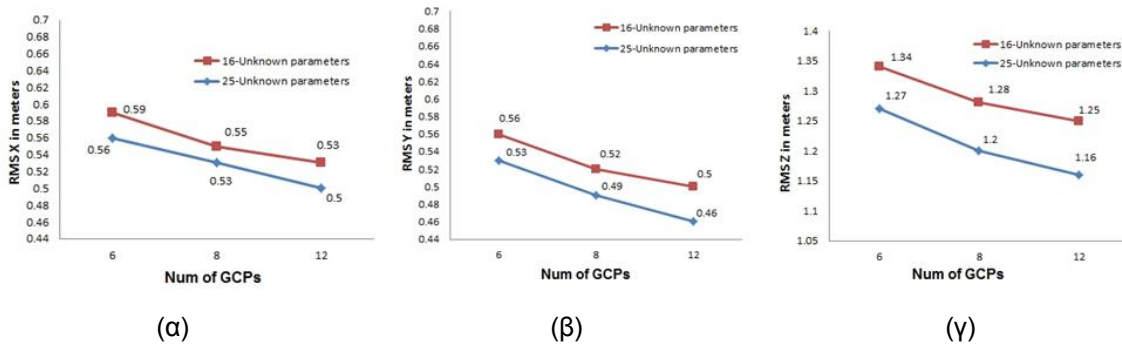
Ο πίνακας σχεδιασμού των εξισώσεων παρατήρησης, που προκύπτει εφαρμόζοντας το αναπτυχθέν γεωμετρικό μοντέλο, έχει διαστάσεις: $[3 \cdot 3 \cdot (12 + 40), 25 + 25 + 25 + (3 \cdot 40)] = [372, 195]$, για 12 φωτοσταθερά και 40 σημεία σύνδεσης σε 3 δορυφορικές εικόνες.

Επιλύθηκε το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο, με όλες τις άγνωστες παραμέτρους (25 για κάθε εικόνα) και στη συνέχεια εφαρμόστηκε το τεστ σημαντικότητας t-test για πιθανότητα 90%, ώστε να προσδιορισθούν οι στατιστικά σημαντικές παράμετροι και οι οποίες προέκυψαν 15 για κάθε εικόνα (Deltisidis and Ioannidis, 2014). Οι παράμετροι αυτές είναι: $X_0, X_1, Y_0, Y_1, Z_0, Z_1, \omega_0, \omega_1, \varphi_0, \varphi_1, \kappa_0, \kappa_1, m_0, m_1, m_2$. Στον Πίνακα 5.18 δίνονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου και για τις δύο περιπτώσεις (α) και (β).

Εικόνα	RMSx [pixel]		RMSy [pixel]		RMSX [m]		RMSY [m]		RMSZ [m]	
	(α)	(β)	(α)	(β)	(α)	(β)	(α)	(β)	(α)	(β)
1 ^η	0.97	1.00	0.88	0.95	0.49	0.50	0.44	0.48	1.16	1.25
2 ^η	1.00	1.10	0.98	1.02	0.50	0.55	0.49	0.51	1.25	1.29
3 ^η	1.02	1.15	1.00	1.06	0.51	0.58	0.50	0.53	1.35	1.34

Πίνακας 5.18: Ακρίβειες στα σημεία ελέγχου (ICPs) χρησιμοποιώντας 24+1 άγνωστες παραμέτρους (α), και 15+1 άγνωστες παραμέτρους (β).

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου, χρησιμοποιώντας 6, 8 και 12 φωτοσταθερά σημεία με 24+1 και 14+1 άγνωστες παραμέτρους για κάθε εικόνα, παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5.26.

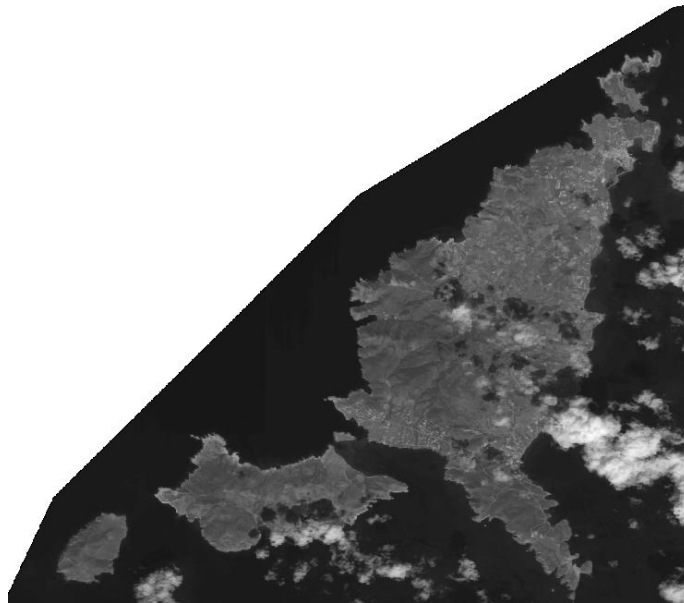


Σχήμα 5.26: Ακρίβεια επίλυσης του μοντέλου οριζοντιογραφικά (α) και (β) και υψομετρικά (γ) με δεσμεύσεις εφαρμόζοντας 24+1 και 15+1 άγνωστες παραμέτρους.

5.6.2.1. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και Ορθοεικόνας

Για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προσδιορίστηκαν 12.000x12.000 ομόλογα σημεία στην τριπλέτα των δορυφορικών εικόνων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCIGeomatica, με βήμα καταγραφής υψομέτρου 5m. Η ακρίβεια του υψομετρικού μοντέλου εδάφους, έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναφοράς το ψηφιακό μοντέλο που έχει παραχθεί, από την Ε.Κ.Χ.Α. Α.Ε., φωτογραμμετρικά από αεροφωτογραφίες (με βήμα καταγραφής 5m), προσδιορίστηκε ίση με 2.4m για πιθανότητα 90% .

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.3. συνετέθησαν οι ορθοεικόνες με μορφότυπο Tiff. Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζεται η ορθοδιορθωμένη ναδρική εικόνα, με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς.



Σχήμα 5.27: Ορθοεικόνα (ναδρ) Pleiades-1B, που συντάχθηκε με την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου γεωαναφοράς.

Για τον προσδιορισμό της οριζοντιογραφικής ακρίβειας των ορθοεικόνων με χρήση του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε επιτύπωση των σημείων ελέγχου επί των γεωαναφερμένων εικόνων και συγκρίθηκαν τα

αποτελέσματα με αυτά που επιτεύχθηκαν από τη γεωαναφορά των εικόνων μέσω του λογισμικού ERDAS 2014, χρησιμοποιώντας το ίδιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου. Τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6, είναι:

- με το προτεινόμενο μοντέλο σε πλήρη ανάπτυξη (25 παράμετροι):

$$RMS_{Hor(CE95)} = 1.4m$$
- με εφαρμογή του λογισμικού ERDAS, με πλήρη ανάπτυξη των παραμέτρων όπως προσδιορίζονται στην Εξ. 3.9: $RMS_{Hor(CE95)} = 1.5m$

5.6.3. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Το βασικό συμπέρασμα από την εφαρμογή του προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου στις δορυφορικές εικόνες Pleiades είναι ότι αρκούν 15 +1 άγνωστες παράμετροι. Μετρώντας 6 φωτοσταθερά σημεία, επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια στην επίλυση του μοντέλου. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι της τάξης της εικονοψηφίδας οριζοντιογραφικά ενώ υψομετρικά είναι περίπου 2.6 pixels. Επίσης, παρατηρείται ότι αυξανόμενου του αριθμού των φωτοσταθερών δεν επέρχεται μεγάλη βελτίωση στα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου (ακρίβειες γεωαναφοράς).

Η ακρίβεια των γεωαναφερμένων εικόνων εφαρμόζοντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο είναι ελαφρώς καλύτερη από αυτή που επιτυγχάνεται από την κλασική χρήση του γεωμετρικού μοντέλου (που χρησιμοποιεί το λογισμικό ERDAS 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑΣ

6.1 Σύγκριση με Γεωαναφορά από RPCs

Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς έγινε σύγκριση της ακρίβειας που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αυτού του μοντέλου και της ακρίβειας που επιτυγχάνεται με τη χρήση των κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) και ελάχιστων φωτοσταθερών σημείων. Η σύγκριση αυτή επιλέχθηκε γιατί η χρήση κλασματικών πολυωνύμων αποτελεί τη συνηθέστερη και ευκολότερη μέθοδο γεωαναφοράς δορυφορικών εικόνων. Χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B, καθώς για αυτές παρέχονται τόσο τα στοιχεία που αφορούν στην εφαρμογή ενός αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου (όπως στοιχεία της κάμερας, εφημερίδες κ.α.), όσο και οι συντελεστές των κλασματικών πολυωνύμων των εικόνων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γεωμετρική διόρθωσή τους, χωρίς να απαιτείται γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών των δορυφορικών συστημάτων.

Για τις ανάγκες της σύγκρισης μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς και της χρήσης κλασματικών πολυωνύμων (RPCs), έγιναν επιλύσεις με 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία. Με ένα φωτοσταθερό είναι δυνατόν να απορροφηθούν συστηματικά σφάλματα μετάθεσης της εικόνας (shift). Τέσσερα φωτοσταθερά (υπερ)επαρκούν για την απορρόφηση και σφάλματος στροφής, ενώ έξι φωτοσταθερά είναι τα ελάχιστα για την επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου με 15 άγνωστες παραμέτρους που, όπως διαπιστώθηκε παραπάνω, συνήθως επαρκούν για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας.

6.1.1. Γεωαναφορά Δορυφορικών Εικόνων QuickBird, WorldView-2, Pleiades1B

Οι δορυφορικές εικόνες QuickBird και WorldView-2, εκτός των αρχείων που τις συνοδεύουν και αφορούν τα στοιχεία της κάμερας, της τροχιάς του δορυφόρου κ.α., παρέχουν και το αρχείο .RPB, που περιέχει τους συντελεστές (80 συνολικά) των κλασματικών πολυωνύμων. Οι δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B, συνοδεύονται, μεταξύ άλλων, και από το αρχείο RPC_<imagenam>.XML, το οποίο περιέχει τους (80) συντελεστές του κλασματικού πολυωνύμου για κάθε εικόνα.

Η επίλυση των μοντέλων, για τη γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων, με τη χρήση των RPCs και του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, πραγματοποιήθηκε αρχικά με ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, το οποίο και στις δύο επιλύσεις ήταν το ίδιο. Το φωτοσταθερό σημείο, επιλέχθηκε να είναι περίπου στη μέση του στερεοσκοπικού μοντέλου των εικόνων και τα σφάλματα (RMS) υπολογίστηκαν από τα ίδια σημεία ελέγχου, που χρησιμοποιηθήκαν για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου. Η επίλυση με ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, για το μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων πραγματοποιήθηκε με απλή μετακίνηση της εικόνας (shift). Στο προτεινόμενο μοντέλο προσδιορίστηκαν τρεις άγνωστες παράμετροι, που περιγράφουν τη θέση και τη διόρθωση της κλίμακας (X_o, Y_o, m_o), όπως περιγράφονται στις Εξ. 4.2 και 4.4.

Στη συνέχεια, έγιναν επιλύσεις με 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία. Τα φωτοσταθερά επιλέχθηκε να βρίσκονται όσο το δυνατόν περιμετρικά του κάθε στερεομοντέλου των δορυφορικών εικόνων. Η επίλυση των κλασματικών πολυωνύμων πραγματοποιήθηκε με επαναπροσδιορισμό και διόρθωση των πολυωνύμων 1^{ου} βαθμού (Dial and Grodecki, 2001), ενώ η επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιήθηκε, αναλόγως του αριθμού των φωτοσταθερών (4 ή 6), προσδιορίζοντας τους πρώτους όρους (X_o, Y_o, Z_o) των άγνωστων παραμέτρων της γραμμικής διόρθωσης της θέσης και τους όρους m_3, m_2, m_o διόρθωσης της

κλίμακας. Στους Πίνακες 5.19, 5.20 και 5.21 δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B αντίστοιχα, με χρήση των RPCs και του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, με 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με RPCs	9.15	1.02	10.75	1.83	1.01	3.25	1.1	0.98	1.96
Επίλυση με νέο μοντέλο	3.24	4.12	7.74	0.97	1.17	2.14	0.62	0.83	1.99

Πίνακας 5.19: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με RPCs	1.18	1.65	9.73	0.62	0.85	2.12	0.54	0.61	1.79
Επίλυση με νέο μοντέλο	2.08	2.56	13.5	0.56	0.59	3.31	0.54	0.47	1.04

Πίνακας 5.20: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με RPCs	1.71	2.01	16.38	0.85	0.97	1.82	0.75	0.66	1.58
Επίλυση με νέο μοντέλο	2.25	0.68	3.5	0.63	0.77	1.41	0.56	0.59	1.25

Πίνακας 5.21: Σφάλματα επιλύσεων με RPCs και με το προτεινόμενο μοντέλο γεωαναφοράς, για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B.

6.1.2. Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων

6.1.2.1. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με ένα φωτοσταθερό σημείο

Όπως έχει αναφερθεί, το δορυφορικό σύστημα QuickBird είναι από τα παλαιότερα δορυφορικά συστήματα υψηλής ευκρίνειας (τέθηκε σε λειτουργία στις 18-10-2001). Χρησιμοποιώντας ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, το σφάλμα που προκύπτει με την επίλυση των κλασματικών πολυωνύμων (RPCs) είναι περίπου 9m ως προς τον άξονα X και 1m ως προς τον άξονα Y. Το υψομετρικό σφάλμα προσδιορίζεται περίπου στα 11m. Το σφάλμα που προκύπτει αντίστοιχα, εφαρμόζοντας το προτεινόμενο μοντέλο είναι πολύ λιγότερο ως προς τον άξονα X (περίπου 3m), αλλά μεγαλύτερο στον άξονα Y (4m). Το σφάλμα στον υπολογισμό των υψομέτρων είναι περίπου 8m, μικρότερο από της επίλυσης με RPCs. Γενικά, οι επιτυγχανόμενες ακρίβειες με οποιοδήποτε μοντέλο γεωαναφοράς δεν είναι ικανοποιητικές, δηλαδή ένα (1) φωτοσταθερό σημείο δεν είναι αρκετό για τη γεωαναφορά δορυφορικής εικόνας QuickBird.

Η γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων WorldView-2, με χρήση ενός φωτοσταθερού σημείου, εφαρμόζοντας τα κλασματικά πολυώνυμα δίνει καλύτερες, αλλά όχι ικανοποιητικές (στα Z τα σφάλματα είναι περίπου 10m), ακρίβειες από το προτεινόμενο μοντέλο. Αυτό, πιθανώς, συμβαίνει διότι οι συντελεστές των RPCs των δορυφορικών εικόνων WorldView-2 έχουν προσδιορισθεί-διορθωθεί με χρήση (από τον πάροχο των εικόνων) φωτοσταθερών σημείων. Το γεγονός αυτό ενισχύεται από την επίλυση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου, με χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού σημείου, που δίνει, επίσης, μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με την χρήση των RPCs.

Η επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς σε δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B, με χρήση ενός φωτοσταθερού σημείου, δίνει καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη χρήση των RPCs, ιδιαίτερα στον προσδιορισμό του υψομέτρου. Με χρήση των RPCs το σφάλμα στα υψόμετρα είναι ιδιαίτερα υψηλό, της τάξης των

16m, ενώ με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου περιορίζεται στα 3.5m. Πάντως, η χρήση ενός μόνον φωτοσταθερού σημείου ούτε σε αυτές τις δορυφορικές εικόνες επαρκεί για ακριβή γεωαναφορά (με απομένοντα σφάλματα της τάξης 1-2 pixels).

6.1.2.2. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 4 φωτοσταθερά σημεία

Για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 4 φωτοσταθερά σημεία, παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου αυξάνεται η ακρίβεια ως προς τον άξονα X και του υψομέτρου Z, ενώ είναι ίδια ως προς τον άξονα Y, σε σύγκριση με την επίλυση των κλασματικών πολυωνύμων. Επίσης, είναι σημαντικό ότι με το προτεινόμενο μοντέλο οι επιτυγχανόμενες ακρίβειες είναι της τάξης των 1-1.5 pixel οριζοντιογραφικά και των 2.5 pixels υψομετρικά, δηλαδή ικανοποιητικές για σημαντικό αριθμό εφαρμογών.

Για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2, χρησιμοποιώντας 4 φωτοσταθερά σημεία, παρατηρείται ότι οι ακρίβειες από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου οριζοντιογραφικά είναι καλύτερες (της τάξης του 1 pixel) από τις αντίστοιχες που προκύπτουν με τη χρήση των RPCs, ενώ υψομετρικά είναι ελαφρώς χειρότερες (της τάξης των 6 pixels).

Για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades, οι επιλύσεις με 4 φωτοσταθερά σημεία και χρήση του προτεινόμενου μοντέλου δίνουν και στους 3 άξονες (X,Y,Z) καλύτερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα των επιλύσεων με RPCs. Συγκεκριμένα, με το προτεινόμενο μοντέλο επιτυγχάνονται ακρίβειες της τάξης του 1-1.5 pixel οριζοντιογραφικά και 3 pixels υψομετρικά.

Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι επαρκούν τέσσερα (4) φωτοσταθερά σημεία για τη γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με το προτεινόμενο μοντέλο, για τον προσδιορισμό οριζοντιογραφικών συντεταγμένων εδάφους με ικανοποιητική ακρίβεια (της τάξης των 1.5 pixel στις εικόνες). Αντίστοιχες ακρίβειες δεν

μπορούν να επιτευχθούν με χρήση των κλασματικών πολυωνύμων για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων.

6.1.2.3. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 6 φωτοσταθερά σημεία

Για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 6 φωτοσταθερά σημεία παρατηρείται ότι η επίλυση με το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο δίνει οριζοντιογραφικά μικρότερα σφάλματα και υψομετρικά ίδιου μεγέθους σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από την επίλυση με κλασματικά πολυώνυμα. Σε όλες τις περιπτώσεις τα σφάλματα είναι μειωμένα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες επιλύσεις με 1 ή 4 φωτοσταθερά σημεία. Με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου η επιτυγχανόμενη ακρίβεια με χρήση 6 φωτοσταθερών είναι, ήδη, της τάξης του 1 pixel.

Τόσο για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2 όσο και για Pleiades, με τη χρήση 6 φωτοσταθερών σημείων οι ακρίβειες βελτιώνονται σε σύγκριση με τις επιλύσεις με χρήση 4 φωτοσταθερών, ιδιαίτερα στα υψόμετρα. Η βελτίωση είναι μεγαλύτερη όταν η γεωαναφορά γίνεται με εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, οπότε επιτυγχάνονται ακρίβειες της τάξης του 1 pixel οριζοντιογραφικά και των 2 pixels υψομετρικά, απολύτως ικανοποιητικές για τις περισσότερες εφαρμογές.

Συμπερασματικά, με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου και δεδομένα έξι (6) μόνον φωτοσταθερά σημεία, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων με ακρίβεια καλύτερη από την αντίστοιχη με χρήση RPCs, τουλάχιστον οριζοντιογραφικά.

6.2. Σύγκριση με αποτελέσματα Γεωαναφοράς με χρήση υπάρχοντος αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου

Μια επόμενη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, έγινε με σύγκριση των ακριβειών από την εφαρμογή αυτού του μοντέλου και των ακριβειών από την επίλυση με γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B με χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky. Η επιλογή για τη σύγκριση με το μοντέλο του Kratky έγινε γιατί το μοντέλο αυτό, με διάφορες παραλλαγές, χρησιμοποιείται από το σύνολο των εμπορικών λογισμικών, στην περίπτωση που επιλέγεται η εφαρμογή φυσικού μοντέλου για τη γεωαναφορά των εικόνων. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.4.1, το αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Kratky (Kratky,1989), λαμβάνει υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του δορυφόρου (όπως τα χαρακτηριστικά του δέκτη και την κίνηση του δορυφόρου), εφαρμόζοντας την κλασική μορφή της συνθήκης συγγραμμικότητας. Ο συνολικός αριθμός των αγνώστων παραμέτρων για την επίλυση του μοντέλου είναι 26, από τις οποίες 12 παράμετροι αναφέρονται στα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, δηλαδή (X_0, Y_0, Z_0) του προβολικού κέντρου και $(\kappa_0, \varphi_0, \omega_0)$ των γωνιών στροφής του δορυφόρου, 12 παράμετροι περιγράφουν τον ρυθμό μεταβολής των γωνιών στροφής του δορυφόρου και μοντελοποιούνται ως πολυώνυμα γραμμικά ή 2^{ου} βαθμού και 2 παράμετροι αναφέρονται στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού.

Για την πραγματοποίηση των συγκρίσεων αναπτύχθηκε λογισμικό, σε περιβάλλον προγραμματισμού MatLab, το οποίο επιλύει τη γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων εφαρμόζοντας το μαθηματικό μοντέλο που προτάθηκε από τον Kratky (αναπτύσσεται στην § 3.4.1.) Στα επόμενα παρουσιάζεται η ακρίβεια, που επιτυγχάνεται για τη γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων με χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky και του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, χρησιμοποιώντας 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία.

6.2.1. Γεωαναφορά Δορυφορικών εικόνων QuickBird, WorldView II και Pleiades-1B

Τα δορυφορικά συστήματα QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, συνοδεύονται από αρχεία μεταδεδομένων (στοιχεία κάμερας, εφημερίδες, κλίσεις κ.α.), που επιτρέπουν την εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων για τη γεωαναφορά τους. Η επίλυση των μοντέλων, για τη γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων, με τη χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky και του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, πραγματοποιήθηκε αρχικά με ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, το οποίο επιλέχθηκε να είναι περίπου στη μέση του στερεοσκοπικού μοντέλου των εικόνων (ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την αντίστοιχη επίλυση με τα RPCs των μοντέλων) και τα σφάλματα (RMS) υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τα ίδια σημεία ελέγχου. Η επίλυση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky πραγματοποιήθηκε με τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων (X_o, Y_o) , ενώ στο προτεινόμενο μοντέλο προσδιορίστηκαν οι τρεις άγνωστες παράμετροι που περιγράφουν τη θέση και τη διόρθωση της κλίμακας (X_o, Y_o, m_o) .

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία. Τα φωτοσταθερά επιλέχθηκε να βρίσκονται όσο το δυνατόν περιμετρικά του κάθε στερεομοντέλου των δορυφορικών εικόνων. Η επίλυση του αυστηρού μοντέλου Kratky πραγματοποιήθηκε, αναλόγως του αριθμού των φωτοσταθερών (4 ή 6), με προσδιορισμό των πρώτων όρων των γραμμικών διορθώσεων, που αφορούν τη θέση και τις στροφές του δορυφόρου, ενώ η επίλυση του προτεινόμενου μοντέλο πραγματοποιήθηκε, αντίστοιχα, προσδιορίζοντας τους πρώτους όρους (X_o, Y_o, Z_o) των αγνώστων παραμέτρων της γραμμικής διόρθωσης της θέσης και τους όρους m_3, m_2, m_o διόρθωσης της κλίμακας. Τα συμπεράσματα για κάθε δορυφορικό σύστημα παρατίθενται παρακάτω.

Στους Πίνακες 5.22, 5.23 και 5.24 δίνονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, WorldView-2 και Pleiades 1B αντίστοιχα, με χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky και του προτεινόμενου μοντέλου γεωαναφοράς, με 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με μοντέλο Kratky	2.58	5.02	8.20	1.36	2.95	2.58	0.84	1.03	1.82
Επίλυση με νέο μοντέλο	3.24	4.12	7.74	0.97	1.17	2.14	0.62	0.83	1.99

Πίνακας 5.22: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με μοντέλο Kratky	2.47	2.63	26.63	0.73	0.83	2.00	0.64	0.50	1.60
Επίλυση με νέο μοντέλο	2.08	2.56	13.50	0.56	0.59	3.31	0.54	0.47	1.04

Πίνακας 5.23: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2.

	Αριθμός GCPs: 1			Αριθμός GCPs: 4			Αριθμός GCPs: 6		
	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
Επίλυση με μοντέλο Kratky	2.33	5.33	16.38	0.92	0.98	3.39	0.64	0.61	1.33
Επίλυση με νέο μοντέλο	2.25	0.68	3.50	0.63	0.77	1.41	0.56	0.59	1.25

Πίνακας 5.24: Σφάλματα επιλύσεων γεωαναφοράς με το μοντέλο Kratky και με το προτεινόμενο μοντέλο, για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades 1B.

6.2.2. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

6.2.2.1. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με ένα φωτοσταθερό σημείο

Συγκρίνοντας τις ακρίβειες, που επιτυγχάνονται για το δορυφορικό σύστημα QuickBird, από την εφαρμογή του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky και του προτεινόμενου μοντέλου, χρησιμοποιώντας ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, παρατηρούμε ότι:

- χρησιμοποιώντας το αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο Kratky προκύπτουν τα σφάλματα που είναι 2.33m κατά τον άξονα X, 5.33m κατά τον άξονα Y και 16.38m στα υψόμετρα
- τα αντίστοιχα σφάλματα από την εφαρμογή του νέου προτεινόμενου μοντέλου είναι 2.25m στον άξονα του X, 0.60m κατά τον άξονα του Y και 3.5m στα υψόμετρα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, με μέτρηση ενός μόνο φωτοσταθερού σημείου, προκύπτουν μεγάλα σφάλματα όταν η γεωαναφορά γίνεται με το μοντέλο Kratky. Χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο επιτυγχάνονται σημαντικά καλύτερες ακρίβειες στους άξονες Y και (ιδιαίτερα) Z. Όμως, και πάλι, οι ακρίβειες εξακολουθούν να μην είναι ικανοποιητικές για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων QuickBird.

Για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων WorldView 2 η χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky δίνει, περίπου, τα ίδια οριζοντιογραφικά σφάλματα με αυτά που προκύπτουν επί την εφαρμογή του νέου προτεινόμενου μοντέλου. Αντίθετα, στα υψόμετρα παρατηρείται μείωση του σφάλματος κατά, περίπου, 50% με την χρήση του νέου προτεινόμενου μοντέλου. Πάντως, και για τις εικόνες αυτού του δορυφόρου, δεν προκύπτουν ικανοποιητικές ακρίβειες με χρήση ενός μόνο φωτοσταθερού, ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου μοντέλου.

Η επίλυση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων Pleiades 1B, δίνει σφάλματα 2.33m κατά τον άξονα του X, 5.33m στον άξονα του Y και 16.38m στον προσδιορισμό των υψομέτρων. Αντίστοιχα, η επίλυση του νέου προτεινόμενου μοντέλου δίνει σφάλματα 2.25m στον άξονα του X, 0.68m στον άξονα του Y και 3.5m στον προσδιορισμό του υψομέτρου. Παρατηρείται ότι η χρήση του νέου προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου, μετρώντας ένα μόνο φωτοσταθερό σημείο, δίνει πολύ μικρότερα σφάλματα κατά τον άξονα του Y και στον προσδιορισμό των υψομέτρων σε σύγκριση με την επίλυση του μοντέλου Kratky.

6.2.2.2. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 4 φωτοσταθερά σημεία

Για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 4 φωτοσταθερά σημεία, παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου αυξάνεται η ακρίβεια ως προς τον άξονα X και τον άξονα του Y, ενώ είναι ίδια ως προς το υψόμετρο, σε σύγκριση με την επίλυση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky.

Για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2, χρησιμοποιώντας 4 φωτοσταθερά σημεία, παρατηρείται ότι οι ακρίβειες από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου οριζοντιογραφικά είναι καλύτερες (της τάξης του 1 pixel) από τις αντίστοιχες που προκύπτουν με τη χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky, ενώ υψομετρικά είναι ελαφρώς χειρότερες.

Για τις δορυφορικές εικόνες Pleiades, οι επιλύσεις με 4 φωτοσταθερά σημεία και χρήση του προτεινόμενου μοντέλου δίνουν και στους 3 άξονες (X,Y,Z) καλύτερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα των επιλύσεων με τη χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι μετρώντας 4 φωτοσταθερά σημεία για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων QuickBird, WorldView 2 και Pleiades

1B, το νέο προτεινόμενο μοντέλο δίνει πολύ μικρότερα οριζοντιογραφικά σφάλματα (της τάξης των 10~30cm), σε σύγκριση με τη χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky.

6.2.2.3. Γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων με 6 φωτοσταθερά σημεία

Για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, χρησιμοποιώντας 6 φωτοσταθερά σημεία, παρατηρείται ότι η επίλυση με το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο δίνει οριζοντιογραφικά μικρότερα σφάλματα και υψομετρικά ίδιου μεγέθους σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από την επίλυση με χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου Kratky. Σε όλες τις περιπτώσεις τα σφάλματα είναι μειωμένα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες επιλύσεις με 1 ή 4 φωτοσταθερά σημεία. Με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου η επιτυγχανόμενη ακρίβεια με χρήση 6 φωτοσταθερών είναι της τάξης του 1 pixel.

Τόσο για τις δορυφορικές εικόνες WorldView-2 όσο και για Pleiades, με τη χρήση 6 φωτοσταθερών σημείων, οι ακρίβειες βελτιώνονται σε σύγκριση με τις επιλύσεις με χρήση 4 φωτοσταθερών, ιδιαίτερα στα υψόμετρα. Η βελτίωση είναι μεγαλύτερη όταν η γεωαναφορά γίνεται με εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, οπότε επιτυγχάνονται ακρίβειες της τάξης του 1 pixel οριζοντιογραφικά και των 2 pixels υψομετρικά, απολύτως ικανοποιητικές για τις περισσότερες εφαρμογές.

Συμπερασματικά, με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου και με δεδομένα έξι (6) μόνον φωτοσταθερά σημεία, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων με υψηλή ακρίβεια, τουλάχιστον οριζοντιογραφικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

7.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή έχει διερευνηθεί και εφαρμοστεί ένα νέο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο για τη γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, οι οποίες συλλέγονται από γραμμικούς αισθητήρες pushbroom. Η ολοένα αυξανόμενη διακριτική ικανότητα των δορυφορικών εικόνων αλλά και η δυνατότητα για φωτογραμμετρική επεξεργασία, παρέχοντας όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων και των δορυφορικών συστημάτων, καθιστά απολύτως απαραίτητη την εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων βάσει των οποίων θα παραχθούν φωτογραμμετρικά προϊόντα (D.T.M., ορθοεικόνες, φωτογραμμετρικά διαγράμματα κ.α.) Σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, που βασίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις, αλλά λίγα από αυτά είναι αυστηρά γεωμετρικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρεία κατηγορία αισθητήρων pushbroom. Τα περισσότερα αυστηρά μοντέλα, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, βασίζονται στην εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας εξαλείφοντας την κλίμακα που περιέχεται σε αυτή, με αποτέλεσμα για κάθε παρατήρηση να δημιουργούνται 2 εξισώσεις παρατήρησης για την επίλυση των 18 αγνώστων παραμέτρων, που συνήθως περιλαμβάνονται στην κλασική εφαρμογή της εξίσωσης.

Αποδείχθηκε, ότι το προτεινόμενο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο, που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή, μπορεί να εφαρμοστεί για τον προσανατολισμό των γραμμικών σαρωτών, με την προϋπόθεση να παρέχονται τα απαραίτητα γεωμετρικά στοιχεία του αισθητήρα καθώς και οι παράμετροι

λήψης των εικόνων. Το αυστηρό μοντέλο έχει ως στόχο την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της δορυφορικής εικόνας και των συντεταγμένων του εδάφους, περιγράφοντας και λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φυσικές ιδιότητες που συντελούνται κατά τη στιγμή της λήψης. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα τέτοιο μοντέλο μελετήθηκαν (Κεφάλαιο 2) οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υπαρχόντων δορυφορικών συστημάτων καθώς και τα υφιστάμενα αυστηρά γεωμετρικά μοντέλα (Κεφάλαιο 3).

Το προτεινόμενο μοντέλο, που περιγράφεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιεί τις εξισώσεις συγγραμμικότητας σε συνδυασμό με τα τροχιακά δεδομένα. Εφαρμόζεται σε γραμμικούς αισθητήρες pushbroom (αισθητήρες με γραμμική διάταξη) με στενό οπτικό πεδίο (FOV). Λόγω του στενού οπτικού πεδίου του οπτικού συστήματος των δορυφορικών συστημάτων και εξαιτίας της σημαντικής διαφοράς μεταξύ του ύψους της τροχιάς του δορυφόρου (600 km περίπου από την επιφάνεια της γης) και του υψομέτρου του εδάφους, ο συντελεστής της κλίμακας, που περιλαμβάνεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως επιφάνεια $2^{\text{ου}}$ βαθμού.

Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι η σημειακή κλίμακα δεν εξαλείφεται αλλά μοντελοποιείται και διορθώνεται από πολυώνυμο $2^{\text{ου}}$ βαθμού, με αποτέλεσμα το σχηματισμό, για κάθε παρατηρούμενο σημείο, 3 εξισώσεων παρατήρησης σε κάθε εικόνα, αντί των 2 που σχηματίζονται από την κλασική χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας. Ως εκ τούτου, προστίθεται μία επιπλέον εξίσωση παρατήρησης για κάθε σημείο και απαιτούνται λιγότερα φωτοσταθερά σημεία για τον προσδιορισμό των συντελεστών των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου, μειώνοντας το κόστος του προσδιορισμού των φωτοσταθερών για τη γεωαναφορά της εικόνας σε σχέση με την μέχρι τώρα εφαρμογή των αυστηρών γεωμετρικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί. Το μοντέλο σε πλήρη ανάπτυξη περιλαμβάνει 24 άγνωστες παραμέτρους και υπάρχει η δυνατότητα κατά την επίλυση να πραγματοποιείται και βαθμονόμηση του αισθητήρα. Συνήθως, όπως αποδεικνύεται στο Κεφάλαιο 5, από τη χρήση του προτεινόμενου γεωμετρικού

μοντέλου σε διάφορες δορυφορικές εικόνες, αρκούν 14 ή 15 άγνωστες παράμετροι του μοντέλου για να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια, μειώνοντας το χρόνο επεξεργασίας της επίλυσης του μοντέλου και να επιτευχθεί οριζοντιογραφική ακρίβεια καλλίτερη της μιας εικονοψηφίδας. Η επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιεί συνθήκες δεσμεύσεων, που υφίσταντο λόγω της γεωμετρίας των λήψεων του ζεύγους των δορυφορικών εικόνων, αυξάνοντας επιπλέον τον αριθμό παρατηρήσεων για αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης του μοντέλου. Τέλος, στην εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου σε εικόνες μεγάλης χωρικής ανάλυσης, όπως οι εικόνες WorldView-2 και Pleiades-1B με μέγεθος εικονοψηφίδας 0.5m, όσο αυξάνεται ο αριθμός των φωτοσταθερών, πέρα των έξι (6), δεν παρατηρείται βελτίωση της ακρίβειας της επίλυσης. Επομένως συμπεραίνεται ότι 6 φωτοσταθερά σημεία είναι αρκετά για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων γεωαναφοράς της εικόνας.

Συγκρίνοντας την ακρίβεια της γεωαναφοράς της εικόνας που επιτυγχάνεται με τη χρήση του αυστηρού γεωμετρικού μοντέλου σε σχέση με αυτή των κλασματικών πολυωνύμων, χρησιμοποιώντας 1, 4 και 6 φωτοσταθερά σημεία, συμπεραίνεται ότι η χρήση ενός και μόνο φωτοσταθερού σημείου δεν επαρκεί για την ικανοποιητική ακρίβεια της γεωαναφοράς της εικόνας, είτε χρησιμοποιώντας το νέο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο, είτε το μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων. Χρησιμοποιώντας περισσότερα των 4 φωτοσταθερών σημείων, επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη χρήση των κλασματικών πολυωνύμων.

Το μαθηματικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί και επιλύεται σε περιβάλλον MATLAB. Οι παρατηρήσεις των εικονοσυντεταγμένων πραγματοποιούνται σε περιβάλλον Autocad και ArcGIS, έχοντας αναπτυχθεί πρόγραμμα σε VBA (Visual Basic Applications), ως add-in εφαρμογή, που διαμορφώνεται αναλόγως του τύπου του δορυφορικού συστήματος ώστε να εξάγει από τα αρχεία των μεταδεδομένων, που συνοδεύουν τις εικόνες, τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για την

εφαρμογή του μοντέλου. Κατόπιν το λογισμικό διαβάζει τα αρχεία των εικονοσυντεταγμένων, των φωτοσταθερών σημείων, των σημείων ελέγχου και των σημείων σύνδεσης (για στερεοσκοπικές εικόνες) και επιλύει το μαθηματικό μοντέλο προσδιορίζοντας αφενός τους συντελεστές των αγνώστων παραμέτρων και αφετέρου τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης. Το λογισμικό χρησιμοποιεί ως γεωδαιτικό σύστημα το WGS-84.

Η εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε δορυφορικές εικόνες που καλύπτουν όλο το φάσμα με τις διακριτικές ικανότητες των δορυφορικών συστημάτων. Όπως αναλυτικά παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5, το μοντέλο εφαρμόστηκε στο δορυφορικό σύστημα ASTER-VINR (15m), SPOT-V (5m), EROS-B (0.7m), QuickBird (0.6m), WorldView-2 (0.5m) και Pleiades (0.5m) επιτυγχάνοντας ακρίβειες της τάξης της εικονοψηφίδας, με χρήση των ελαχίστων φωτοσταθερών σημείων που απαιτούνται για την επίλυση του μοντέλου.

7.2. Προοπτικές

Περαιτέρω έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά με την εφαρμογή του μοντέλου σε δέκτες για τους οποίους δεν δίνονται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού και τα στοιχεία τροχιάς του δορυφορικού συστήματος. Μπορεί να διερευνηθεί η δυνατότητα «εξαγωγής» των απαραίτητων στοιχείων, που απαιτούνται για τη λύση του νέου προτεινόμενου γεωμετρικού μοντέλου από τις εξισώσεις των κλασματικών πολυωνύμων, που συνήθως δίνονται και συνοδεύουν τις δορυφορικές εικόνες (IKONOS, GeoEye) χωρίς να παρέχονται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού και τα στοιχεία τροχιάς του δορυφόρου.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης του υπολογισμού της θέσης του δορυφόρου με βάση τα κεπλέρια στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη τις ταλαντώσεις της τροχιάς. Για την εφαρμογή του νέου γεωμετρικού μοντέλου γίνεται η παραδοχή (§ 4.2) ότι η κίνηση του δορυφόρου για το χρονικό διάστημα που

διαρκεί η λήψη της εικόνας, είναι ομαλή (χωρίς διαταραχές) και η μεταβολή της θέσης και της ταχύτητάς του μπορεί να περιγραφεί από πολυώνυμα 2^{ου} ή μεγαλύτερου βαθμού. Στην πραγματικότητα η κίνηση του δορυφόρου παρουσιάζει ταλαντώσεις και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βαρύτητα της γης, επομένως θα μπορούσε να μελετηθεί και το μοντέλο να λαμβάνει υπόψη όλες τις δυνάμεις που επιδρούν στην κίνηση του δορυφόρου.

Η αναβάθμιση του λογισμικού επεξεργασίας κάθε δορυφορικής εικόνας, που είναι ιδιαίτερα μεγάλου μεγέθους (περίπου 1GB), αποτελεί μια αναμενόμενη μελλοντική εξέλιξη. Επίσης, θα μπορούσε το λογισμικό να εκτελεί μία αρχική προσωρινή επίλυση εξετάζοντας αυτόματα τον συντελεστή συσχέτισης και σημαντικότητας της κάθε άγνωστης παραμέτρου, ώστε αυτή να εξαλείφεται και να μην συμμετέχει τελικώς στην επίλυση του μοντέλου. Γενικά, υπάρχει η δυνατότητα σύνταξης λογισμικού σε γλώσσα υψηλού επιπέδου για την πραγματοποίηση όλων των φωτογραμμετρικών διεργασιών όπως:

- διόρθωση εσωτερικού προσανατολισμού και απεικόνιση των δορυφορικών εικόνων σε γραφικό περιβάλλον,
- εντοπισμό και πύκνωση ομόλογων σημείων μεταξύ των δορυφορικών εικόνων (με αυτόματη συνταύτιση),
- αυτοματοποιημένη επίλυση του μοντέλου, δηλαδή αυτόματο εντοπισμό και απομάκρυνση των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου που επηρεάζουν ελάχιστα ή καθόλου την επίλυση και τελική συνόρθωση του μοντέλου γεωαναφοράς, κ.α.

Τέλος, παρά τις πολλές δοκιμές και ελέγχους που έχουν γίνει στο προτεινόμενο αυστηρό γεωμετρικό μοντέλο σε διάφορα είδη δορυφορικών εικόνων, κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή του μοντέλου και σε άλλα είδη δορυφορικών εικόνων και ιδιαίτερα σε μεγάλα μπλοκ εικόνων, για να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου σε περισσότερες των δύο ή τριών εικόνων, που έχει δοκιμασθεί μέχρι σήμερα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-«Α»

Γραμμικοποιημένες Εξισώσεις Παρατήρησης

Ως προς τη συνάρτηση F

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial X_0} = -G_0 * R(1,1) - G_1 * R(2,1) - G_2 * R(3,1)$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial X_1} = - (G_0 * R(1,1) + G_1 * R(2,1) + G_2 * R(3,1)) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial X_2} = - (G_0 * R(1,1) + G_1 * R(2,1) + G_2 * R(3,1)) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Y_0} = -G_0 * R(1,2) - G_1 * R(2,2) - G_2 * R(3,2)$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Y_1} = - (G_0 * R(1,2) + G_1 * R(2,2) + G_2 * R(3,2)) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Y_2} = - (G_0 * R(1,2) + G_1 * R(2,2) + G_2 * R(3,2)) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Z_0} = -G_0 * R(1,3) - G_1 * R(2,3) - G_2 * R(3,3)$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Z_1} = - (G_0 * R(1,3) + G_1 * R(2,3) + G_2 * R(3,3)) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial Z_2} = - (G_0 * R(1,3) + G_1 * R(2,3) + G_2 * R(3,3)) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \omega_0} = (W_0 * R(2,1) + W_1 * R(3,1)) * H_0 + (W_0 * R(2,2) + W_1 * R(3,2)) * H_1 + (W_0 * R(2,3) + W_1 * R(3,3)) * H_2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \omega_1} = ((W_0 * R(2,1) + W_1 * R(3,1)) * H_0 + (W_0 * R(2,2) + W_1 * R(3,2)) * H_1 + (W_0 * R(2,3) + W_1 * R(3,3)) * H_2) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \omega_2} = ((W_0 * R(2,1) + W_1 * R(3,1)) * H_0 + (W_0 * R(2,2) + W_1 * R(3,2)) * H_1 + (W_0 * R(2,3) + W_1 * R(3,3)) * H_2) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \varphi_0} = (F_0 * R(1,1) + F_1 * R(2,1) + F_2 * R(3,1)) * H_0 + (F_0 * R(1,2) + F_1 * R(2,2) + F_2 * R(3,2)) * H_1 + (F_0 * R(1,3) + F_1 * R(2,3) + F_2 * R(3,3)) * H_2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \varphi_1} = ((F_0 * R(1,1) + F_1 * R(2,1) + F_2 * R(3,1)) * H_0 + (F_0 * R(1,2) + F_1 * R(2,2) + F_2 * R(3,2)) * H_1 + (F_0 * R(1,3) + F_1 * R(2,3) + F_2 * R(3,3)) * H_2) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \varphi_2} = ((F_0 * R(1,1) + F_1 * R(2,1) + F_2 * R(3,1)) * H_0 + (F_0 * R(1,2) + F_1 * R(2,2) + F_2 * R(3,2)) * H_1 + (F_0 * R(1,3) + F_1 * R(2,3) + F_2 * R(3,3)) * H_2) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \kappa_0} = (K_0 * R(1,1) + K_1 * R(2,1) + K_2 * R(3,1)) * H_0 + (K_0 * R(1,2) + K_1 * R(2,2) + K_2 * R(3,2)) * H_1 + (K_0 * R(1,3) + K_1 * R(2,3) + K_2 * R(3,3)) * H_2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \kappa_1} = ((K_0 * R(1,1) + K_1 * R(2,1) + K_2 * R(3,1)) * H_0 + (K_0 * R(1,2) + K_1 * R(2,2) + K_2 * R(3,2)) * H_1 + (K_0 * R(1,3) + K_1 * R(2,3) + K_2 * R(3,3)) * H_2) * t$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial \kappa_2} = ((K_0 * R(1,1) + K_1 * R(2,1) + K_2 * R(3,1)) * H_0 + (K_0 * R(1,2) + K_1 * R(2,2) + K_2 * R(3,2)) * H_1 + (K_0 * R(1,3) + K_1 * R(2,3) + K_2 * R(3,3)) * H_2) * t^2$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_5} = Mg * t^2, \quad \frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_4} = Mg * dx^2, \quad \frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_3} = Mg * t, \quad \frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_2} = Mg * dx,$$

$$\frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_1} = Mg * dx * t, \quad \frac{\partial F_{x,y,z}}{\partial m_0} = Mg$$

Όπου:

mom=m1 (Om);
mphi=m2 (Phi);
mk=m3 (Kappa);

R=mk*mphi*mom;

q11=Mq(1,1); q12=Mq(1,2); q13=Mq(1,3); `Mqπίνακαςστροφής τηλεσκοπίου
q21=Mq(2,1); q22=Mq(2,2); q23=Mq(2,3);
q31=Mq(3,1); q32=Mq(3,2); q33=Mq(3,3);

dx=(nss-x); `nss: χοιουαισθητήρα, x μέτρηση σε pixel
S=dm0*t^2+dm1*dx^2+dm2*t+dm3*dx+dm4*t*dx+dm5

W=dw0+dw1*t+dw2*t^2, F=df0+df1*t+df2*t^2, K=dk0+dk1*t+dk2*t^2

H0=Xg-X0-dx0-dx1*t-dx2*t^2, H1=Yg-Y0-dy0-dy1*t-dy2*t^2, H2=Zg-Z0-dz0-dz1*t-dz2*t^2;

Για τη συνάρτηση F_x οι τιμές είναι:

$$G_0 = (q_{11}/(r+S)) * \cos(K) * \cos(F) - (q_{12}/(r+S)) * \sin(K) * \cos(F) + (q_{13}/(r+S)) * \sin(F)$$

$$G_1 = (q_{11}/(r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q_{13}/(r+S)) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$G2 = (q_{11}/(r+S)) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{13}/(r+S)) * \cos(F) * \cos(W);$$

$$W0 = (q_{11}/(r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (-\cos(K) * \sin(W) - \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q_{13}/(r+S)) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$W1 = (q_{11}/(r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q_{13}/(r+S)) * \cos(F) * \sin(W);$$

$$F0 = (-q_{11}/(r+S)) * \cos(K) * \sin(F) + (q_{12}/(r+S)) * \sin(K) * \sin(F) + (q_{13}/(r+S)) * \cos(F)$$

$$F1 = (q_{11}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \sin(W)) - (q_{12}/(r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \sin(W) + (q_{13}/(r+S)) * \sin(F) * \sin(W)$$

$$F2 = (-q_{11}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \cos(W)) + (q_{12}/(r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \cos(W) - (q_{13}/(r+S)) * \sin(F) * \cos(W)$$

$$K0 = (-q_{11}/(r+S)) * \sin(K) * \cos(F) - (q_{12}/(r+S)) * \cos(K) * \cos(F)$$

$$K1 = (q_{11}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (-\sin(K) * \cos(W) - \cos(K) * \sin(F) * \sin(W))$$

$$K2 = (q_{11}/(r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{12}/(r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W))$$

$$M0 = (-q_{11}/(r+S)^2) * \cos(K) * \cos(F) + (q_{12}/(r+S)^2) * \sin(K) * \cos(F) - (q_{13}/(r+S)^2) * \sin(F)$$

$$M1 = (-q_{11}/(r+S)^2) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q_{12}/(r+S)^2) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q_{13}/(r+S)^2) * \cos(F) * \sin(W);$$

$$M2 = (-q_{11}/(r+S)^2) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q_{12}/(r+S)^2) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q_{13}/(r+S)^2) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$Mg = (M0 * R(1,1) + M1 * R(2,1) + M2 * R(3,1)) * H0 + (M0 * R(1,2) + M1 * R(2,2) + M2 * R(3,2)) * H1 + (M0 * R(1,3) + M1 * R(2,3) + M2 * R(3,3)) * H2$$

Για τη συνάρτηση Fy είναι:

$$G0 = (q_{21}/(r+S)) * \cos(K) * \cos(F) - (q_{22}/(r+S)) * \sin(K) * \cos(F) + (q_{23}/(r+S)) * \sin(F)$$

$$G1 = (q_{21}/(r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q_{22}/(r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q_{23}/(r+S)) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$G2 = (q_{21}/(r+S)) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{22}/(r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q_{23}/(r+S)) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$W0 = (q21 / (r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q22 / (r+S)) * (-\cos(K) * \sin(W) - \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q23 / (r+S)) * \cos(F) * \cos(W);$$

$$W1 = (q21 / (r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q22 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q23 / (r+S)) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$F0 = (-q21 / (r+S)) * \cos(K) * \sin(F) + (q22 / (r+S)) * \sin(K) * \sin(F) + (q23 / (r+S)) * \cos(F);$$

$$F1 = (q21 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \sin(W)) - (q22 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \sin(W) + (q23 / (r+S)) * \sin(F) * \sin(W)$$

$$F2 = (-q21 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \cos(W)) + (q22 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \cos(W) - (q23 / (r+S)) * \sin(F) * \cos(W)$$

$$K0 = (-q21 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) - (q22 / (r+S)) * \cos(K) * \cos(F)$$

$$K1 = (q21 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q22 / (r+S)) * (-\sin(K) * \cos(W) - \cos(K) * \sin(F) * \sin(W))$$

$$K2 = (q21 / (r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q22 / (r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W))$$

$$M0 = (-q21 / (r+S)^2) * \cos(K) * \cos(F) + (q22 / (r+S)^2) * \sin(K) * \cos(F) - (q23 / (r+S)^2) * \sin(F)$$

$$M1 = (-q21 / (r+S)^2) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q22 / (r+S)^2) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q23 / (r+S)^2) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$M2 = (-q21 / (r+S)^2) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q22 / (r+S)^2) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q23 / (r+S)^2) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$Mg = (M0 * R(1, 1) + M1 * R(2, 1) + M2 * R(3, 1)) * H0 + (M0 * R(1, 2) + M1 * R(2, 2) + M2 * R(3, 2)) * H1 + (M0 * R(1, 3) + M1 * R(2, 3) + M2 * R(3, 3)) * H2$$

Για τη συνάρτηση Fz είναι:

$$G0 = (q31 / (r+S)) * \cos(K) * \cos(F) - (q32 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) + (q33 / (r+S)) * \sin(F)$$

$$G1 = (q31 / (r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q32 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q33 / (r+S)) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$G2 = (q31 / (r+S)) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q32 / (r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q33 / (r+S)) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$W0 = (q31 / (r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q32 / (r+S)) * (-\cos(K) * \sin(W) - \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q33 / (r+S)) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$W1 = (q31 / (r+S)) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q32 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q33 / (r+S)) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$F0 = (-q31 / (r+S)) * \cos(K) * \sin(F) + (q32 / (r+S)) * \sin(K) * \sin(F) + (q33 / (r+S)) * \cos(F)$$

$$F1 = (q31 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \sin(W)) - (q32 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \sin(W) + (q33 / (r+S)) * \sin(F) * \sin(W)$$

$$F2 = (-q31 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(F) * \cos(W)) + (q32 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) * \cos(W) - (q33 / (r+S)) * \sin(F) * \cos(W)$$

$$K0 = (-q31 / (r+S)) * \sin(K) * \cos(F) - (q32 / (r+S)) * \cos(K) * \cos(F)$$

$$K1 = (q31 / (r+S)) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q32 / (r+S)) * (-\sin(K) * \cos(W) - \cos(K) * \sin(F) * \sin(W))$$

$$K2 = (q31 / (r+S)) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) + (q32 / (r+S)) * (-\sin(K) * \sin(W) + \cos(K) * \sin(F) * \cos(W))$$

$$M0 = (-q31 / (r+S)^2) * \cos(K) * \cos(F) + (q32 / (r+S)^2) * \sin(K) * \cos(F) - (q33 / (r+S)^2) * \sin(F)$$

$$M1 = (-q31 / (r+S)^2) * (\sin(K) * \cos(W) + \cos(K) * \sin(F) * \sin(W)) - (q32 / (r+S)^2) * (\cos(K) * \cos(W) - \sin(K) * \sin(F) * \sin(W)) + (q33 / (r+S)^2) * \cos(F) * \sin(W)$$

$$M2 = (-q31 / (r+S)^2) * (\sin(K) * \sin(W) - \cos(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q32 / (r+S)^2) * (\cos(K) * \sin(W) + \sin(K) * \sin(F) * \cos(W)) - (q33 / (r+S)^2) * \cos(F) * \cos(W)$$

$$Mg = (M0 * R(1, 1) + M1 * R(2, 1) + M2 * R(3, 1)) * H0 + (M0 * R(1, 2) + M1 * R(2, 2) + M2 * R(3, 2)) * H1 + (M0 * R(1, 3) + M1 * R(2, 3) + M2 * R(3, 3)) * H2$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β»

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί για την επίλυση του μοντέλου αποτελείται από τέσσερις (4) επιμέρους εφαρμογές.

Η πρώτη εργάζεται σε περιβάλλον Autocad (Autodesk) ως add-in εφαρμογή όπου έχει τη δυνατότητα να εισάγει τις εικόνες στο σχεδιαστικό περιβάλλον και να εκτελούνται οι παρατηρήσεις των εικονοσυντεταγμένων καθορίζοντας για κάθε μία εάν είναι φωτοσταθερό σημείου, η σημείο ελέγχου, ή σημείο συνδέσεως. Για την μέτρηση των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να εισάγει χάρτες αναφοράς (με γεωαναφορά) και ψηφιακό μοντέλο εδάφους έτσι ώστε μετρώντας τα ομόλογα σημεία επί του χάρτη να γίνεται και αυτόματη ανάγνωση του υψομέτρου. Ειδικά για τις εικόνες QuickBird και WorldView 1,2 έχει αναπτυχθεί λογισμικό σε περιβάλλον ArcGIS το οποίο εισάγοντας τις παραπάνω εικόνες γίνεται αυτόματη ανάγνωση των μεταδεδομένων τους. Οι παραπάνω παρατηρήσεις αποθηκεύονται σε αρχεία ASCII.

Η δεύτερη εφαρμογή εκτελεί τη μαθηματική επίλυση του μοντέλου και έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB, όπου έχει τη δυνατότητα να διαβάζει τα ASCII αρχεία των μετρήσεων και να προσδιορίζει τους αγνώστους παραμέτρους του μοντέλου καθώς και την επίλυση των συντεταγμένων των σημείων συνδέσεως. Κατά την επίλυση μας δίνεται η στατιστική ανάλυση της ακρίβειας της επίλυσης λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία ελέγχου. Επίσης προσδιορίζεται η σημαντικότητα της κάθε άγνωστης παραμέτρου που επηρεάζει την επίλυση του μοντέλου έτσι ώστε κατά την επανάληψη της επίλυσης παραλείπουμε αυτούς με μικρή σημαντικότητα. Οι συντελεστές του μοντέλου που προσδιορίζονται για κάθε εικόνα αποθηκεύονται σε αρχεία ASCII καθώς επίσης και οι γεωδαιτικές

συντεταγμένες των σημείων συνδέσεως. Ο αλγόριθμος που ακολουθεί το πρόγραμμα για την επίλυση του μοντέλου περιγράφεται στη παράγραφο 4.3.1.

Η τρίτη εφαρμογή έχει επίσης αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB και ως σκοπό έχει να εκτελεί εμπροσθοτομίες μεταξύ των ομολόγων σημείων (tie points) εφαρμόζοντας το μοντέλο με τους συντελεστές που έχουν προσδιορισθεί με την 2^η εφαρμογή. Τα ομόλογα σημεία διαβάζονται από αρχείο τα οποία είτε έχουν προσδιορισθεί χειρονακτικά μέσω της 1^{ης} εφαρμογής είτε από εξωτερικό πρόγραμμα που εκτελεί συνταύτιση σημείων. Στη δεύτερη περίπτωση, έχοντας ομόλογα σημεία τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα μπορεί να προσδιορισθεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής που καλύπτουν στερεοσκοπικά οι δορυφορικές εικόνες. Ο αλγόριθμος που ακολουθεί το πρόγραμμα για τον προσδιορισμό του ψηφιακού μοντέλου εδάφους περιγράφεται στη παράγραφο 4.3.2.

Τέλος η 4^η εφαρμογή η οποία έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB έχει τη δυνατότητα να διαβάζει την εικόνα και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και να εκτελεί ορθοαναγωγή της εικόνας λαμβάνοντας υπόψη την επίλυση του μοντέλου. Ο αλγόριθμος που ακολουθεί το πρόγραμμα για την ορθοαναγωγή των δορυφορικών εικόνων περιγράφεται στη παράγραφο 4.3.3.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrams, M., Hook, S., 2002. ASTER User HandBook. http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf (τελευταία επίσκεψη: Μάιος 2014).
- AmesRemote, 2004. <http://www.amesremote.com> (τελευταία επίσκεψη: Απρίλιος 2015).
- Baltsavias, E., Stallmann, D., 1992. Metric Information Extraction from SPOT Images and the Role of Polynomial Mapping Functions. IAPRS, Vol. 29, Part B4, Washington, pp. 358 - 364.
- Baltsavias, E., Stallmann, D., 1993. SPOT Stereo Matching for DTM Generation. Paper presented at the Conference "Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision", Orlando, USA. Proceedings of SPIE, Vol. 1944, pp. 152 - 163.
- Baltsavias, E., Stallmann, D., 1996. Geometric potential of MOMS-02/D2 data for point positioning, DTM and orthoimage. IAPRS, Vol. 31, Part B4, Vienna, pp. 110-116.
- Baltsavias, E., Pateraki, M., Zhang, L., 2001. Radiometric and Geometric Evaluation of IKONOS Geo Images and their use for 3D building modelling. Proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2001", Hannover, Germany (CDROM).
- Bar-Lev, M., Shcherbina, L., Levin, V., 2001. EROS system- Satellite orbit and constellation design. Proceedings of 22nd Asian Conference on Remote Sensing 2001, Singapore, Part 2, pp. 1153-1158.
- Bay, H., Tuytelaars, T., van Gool, L., 2006. Speeded-Up Robust Features (SURF). Proceedings of 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria.
- Bethel J. 2013. https://engineering.purdue.edu/~bethel/photo2_13.htm, CE 603 Notes, 2013, Purdue University - School of Civil Engineering (τελευταία επίσκεψη: Μάρτιος 2015).

- Capderou, M., 2005. Satellite Orbits and Missions, Chapter 1. Springer, France pp. 10-38.
- Chen, L., Wu, Y., 2000. Image Geometric Simulation And Orientation Modeling For Rocsat-2. Proceedings of ACRS, Taipei, Taiwan (CDROM).
- Chen, L.C., Teo, T.A., 2002. Rigorous generation of digital orthophoto from EROS A high resolution satellite images. ISPRS, Vol. 34, Part B4, Ottawa, pp. 620-625.
- Cramer, M., 1999. Direct Geocoding: is Aerial Triangulation Obsolete. Proceedings of Photogrammetric Week 1999, Fritsch/Spiller (eds), Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 59-70.
- Crippa, B., Forlani, G., 1990. Il calcolo con gli elementi finiti. Ricerche di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria, Vol. 6., Citta'Studi ed., Milano.
- Deltsidis, P., Ioannidis, C., 2011. Orthorectification of world view 2 stereo pair using a new rigorous orientation model. Proceeding of ISPRS Hannover Workshop, Commision IV, WG IV/2, pp. 85-90.
- Deltsidis, P., Ioannidis C., 2014. Georeferencing of pleiades stereo pair images using a new rigorous orientation model. Proceedings of 5th GEOBIA, Thessaliniki, Greece.
- Dowman, I.J., Michalis, P., 2003. Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. Proceedings of ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2003", Hannover, Germany (CDROM).
- GlobalGlobe, 2010. WhitePaper, "The Benefits of the 8 spectral Bands of WorldView-2".
- Greslou, D., de Lussy, F., Montel, J., 2008. Light aberration effect in HR geometric model. ISPRS, Vol XXXVII, Part B1, Beijing, pp. 859-864
- Greslou, D., de Lussy, F., 2012. Geometric calibration of Pleiades location model. Proceedings of XXXVI ISPRS Congress, Vol. XXXIX-B1, pp. 519-523.
- Eisenbeiss, H., Baltsavias, E., Pateraki, M., Zhang, L., 2004. Potential of Ikonos and Quick-bird imagery for accurate 3D point positioning, orthoimage and DSM generation. IAPRS, Vol. 35, Part B3, Istanbul, pp. 522-528.

- ERDAS Imagine, 2014. <http://www.hexagongeospatial.com/Homepage.aspx> (Τελευταία επίσκεψη: Μάιος 2014).
- Fischler, M., Bolles, R., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24(6), pp. 381-395.
- Francoise, L., Kubic, P., Greslou, D., Pascal, V., 2005. Pleiades-HR image system products and quality Pleiades-HR IMAGE system products and geometric accuracy. *Proceedings of ISPRS, Hannover, Germany (CDROM)*.
- Fraser, C.S., Hanley, H.B., Yamakawa, T., 2001. Sub-metre geopositioning with IKONOS GEO imagery. *Proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2001", Hannover, Germany (CDROM)*.
- Fritsch, D., Stallmann, D., 2000. Rigorous photogrammetric modelling processing of high resolution satellite imagery. *IAPRS, Vol. 33, Part B1, Amsterdam*, pp. 313-321.
- Γεωργούλα Ο., Παρασχάκης Ι., Πατιάς Π., 1991, Εξαγωγή Τρισδιάστατης Μετρητικής Πληροφορίας από Δορυφορικές Εικόνες, *Eratosthenes, Vol 27*, pp. 41-60.
- Grodecki, J., Dial J., 2001. IKONOS Geometric Accuracy. *Proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2001", Hannover, Germany (CDROM)*.
- Grodecki, J., Dial, G., 2003. Block Adjustment of High- Resolution Satellite Images Described by Rational Functions. *PE&RS, Vol. 69(1)*, pp. 59-70.
- Gugan, D.J., Dowman, I.J., 1988. Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery. *Photogrammetric Record, Vol. 12(72)*, pp. 787-796.
- Hattori, S., Ono, T., Fraser, C. S., Hasegawa, H., 2000. Orientation of high-resolution satellite images based on affine projection. *IAPRS, Vol. 33, Part B1, Amsterdam*, pp. 359-366.
- Ιωάννου, Μ.Τ., 2013. Μετρητική και Οικονομική Αξιολόγηση Απεικονίσεων Geoeye-1 για την Παραγωγή Ορθοφωτογραφιών Μεγάλης Κλίμακας. Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

- Jacobsen, K., 1998. Geometric calibration of space remote sensing cameras for efficient processing. IAPRS, Vol. 32, Part 1, pp. 33-43.
- Jacobsen, K. 2004. DEM Generation by SPOT HRSC. IAPRS. Vol. 35, Part B1, Istanbul, Turkey, p. 439-444.
- Jacobsen, K., Konecny, G., Wegmann, H., 1998. High Resolution Sensor Test Comparison with SPOT, KFA1000, KVR1000, IRS-1C and DPA in Lower Saxony. IAPRS, Vol. 32, Part 4, Stuttgart, pp. 260-269.
- Jacobsen, K., Passini, R., 2003. Accuracy of digital orthophotos from high resolution space imagery. Proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from Space 2003", Hannover, Germany (CDROM).
- Jovanovic, V.M., Lewicki, S.A., Smyth, M.M., Zong, J., Korechoff, R.P., 1999. MISR Level 1 Georectification and Registration Algorithm Theoretical Basis. JPL report, code JPL D-11532, Rev. D.
- Kasser, M., Egels, Y., 2002. Digital photogrammetry, Taylor & Francis.
- Kocaman, S., 2003. GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery. Internal Report, ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry.
- Kocaman, S., 2005. Investigations on the triangulation accuracy of Starimager imagery. Proceedings of ASPRS Annual Meeting 2005, Baltimore, Maryland, USA (CDROM).
- Konecny, G., 2003. Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems - Chapter 2. Taylor & Francis, London.
- Kraus, K., 1993. Photogrammetry, Volume 1- Fundamentals and Standard Processes. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Lee, C., Theiss, H.J., Bethel, J.S., Mikhail, E.M., 2000. Rigorous mathematical modeling of airborne pushbroom imaging systems. PE&RS, Vol. 66(4), pp. 385-392.
- Li, R., Zhou, G., 1999. Experimental study on ground point determination from high resolution airborne and satellite imagery. Proceedings of ASPRS Annual Conference, Portland, Oregon, USA, pp. 88-97.
- Linder, W., 2005. Digital Photogrammetry - Chapter 1. Springer, Germany.

- Madani, M., Wang, Y., Tsuno, K., Morita, K., 2004. Stereo measurement on image station with Starimager - airborne three-line scanner - imagery. IAPRS, Vol. 35, Part B2, Istanbul, pp. 223-228.
- Michalis, P., Dowman, I., 2004. A rigorous model and DEM generation for Spot 5/HRS. IAPRS, Vol. 35, Part B1, Istanbul, pp. 410-415.
- Neto, F.A., 1992. A model for the orientation of along-track satellite stereopairs. IAPRS, Vol. 29, Part B4, Washington D.C., pp. 315-320.
- Okamoto, A., 1981. Orientation and construction of models, Part III: Mathematical basis of the orientation problem of one-dimensional central-perspective photographs. PE&RS, Vol. 47(12), pp. 1739-1752.
- Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H., Ono, T., 1998. An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery. ISPRS, Vol. 32, Part 4, pp. 457-462.
- O'Neil, M., Dowman, I., 1991. A new camera model for the orientation of the SPOT data and its application to the OEEPE test of triangulation of SPOT data. OEEPE Publication, Issue 26, pp. 153-163.
- Otto, G.P., Chau, T.K.W., 1988. A "Region-Growing" Algorithm for Matching of Terrain Images. Proceedings of 4th Alvey Vision Club, University of Manchester, UK (CDROM).
- Panem, C., Bignalet-Cazalet, F., Baillarin, S., 2012. Pleiades-HR system products performance after in-orbit commissioning phase. Proceedings of XXII ISPRS Congress, Vol. XXXIX-B1, pp. 567-572.
- Παρασχάκης Ι., Πατιάς Π., 1989, Αυτόματη Ενημέρωση της Οριζοντιογραφικής πληροφορίας των Χαρτών με τη Χρήση Δορυφορικών Εικόνων, Eratosthenes, Vol 25, pp 117-136.
- Pateraki, M., Baltsavias, E., Recke, U., 2004. Experiences on Automatic Image Matching for DSM Generation with ADS 40 Pushbroom Sensor Data. IAPRS, Vol. 35, Part B2, Istanbul, pp. 402-407.
- Poli, D., Seiz., G., Baltsavias, E., 2000. Cloud-top height estimation from satellite stereopairs for weather forecasting and climate change analysis. IAPRS, Vol. 33, Part B7/3, Amsterdam, pp.1162-1169.

- Poli, D., 2001. Direct georeferencing of multi-line images with a general sensor model. Proceedings of ISPRS Workshop "High resolution mapping from space 2001", 18-21 September, Hannover, Germany (CDROM).
- Poli, D., 2002a. Indirect georeferencing of airborne multi-line array sensors: a simulated case study. ISPRS, Vol. 34, Part 3A, Graz, pp. 246-251.
- Poli, D., 2002b. General model for airborne and spaceborne linear array sensors. IAPRS, Denver, Vol. 34, Part B1, pp.177-182.
- Poli, D., Zhang, L., Grün, A., 2004. SPOT-5/HRS stereo images orientation and automated DSM generation. IAPRS Vol. 34, Part B1, Istanbul, pp. 421-432.
- Sandau, R., 2004. High resolution mapping with small satellites. ISPRS, Vol 35, Instabul, pp. 535-540.
- Schenk, A.F., 1999. Digital Photogrammetry, 1st Edition. Vol I, Laurerville, OH, U.S.A.
- SPOT Satellite Geometry Handbook, 2002. Reference S-NT-73-12-SI, Edition 1, Revision 0, Date 2002-01-15.
- Toutin, 2002. Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric model. PE&RS, Vol. 69(1), pp. 43-51.
- Toutin, T., Chénier, R., Carbonneau, Y., 2002. 3D models for high resolution images: examples with Quickbird, Ikonos and Eros. IAPRS, Vol. 34(4), Ottawa, Canada, pp. 547-551.
- Toutin, T., 2004. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and Quickbird. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42(10), pp. 2121-2129.
- Toutin, T., Cheng, P., 2001. DEM generation with ASTER stereo data. Earth Observation Magazine, No. 10, pp. 10-13.
- Toutin, T., 2004. Review Paper: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. International Journal of Remote Sensing, 25(10), pp.1893-1924.
- Toutin, T., Briand, P., Chénier, R., 2004. DTM generation from SPOT HRS in-track stereo images. IAPRS, Vol. 35, Part B1, Istanbul, pp. 416-420.

- Valadan, M.J., Sadeghian, S., 2003. Rigorous and Non-rigorous Photogrammetric Processing of Ikonos Geo Image. Proceeding of ISPRS Hannover Workshop , WG I/2.
- Vozikis, G., Fraser, C., Jansa, J., 2003. Alternative sensor orientation models for high resolution satellite imagery. Band 12 "Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation", Bochum (2003), pp. 179- 186.
- Wang, Z., 1990. Principles of Photogrammetry (with Remote Sensing). Publishing House of Surveying and Mapping, Beijing, China.
- WorldView-1, Product Quick Reference Guide, Ed. 4.7.8 version 1.2, <https://www.digitalglobe.com>
- Zhang, L., Feiner, J., Louy, O., Grün, A., Schmid, W., 2002. Photo-textured Digital Terrain Models as a Basis for Regional and Local Planning. ISPRS, Vol. 34, Part 5/W3, Kunming, China.
- Zhang, L., Grün, A., 2003. Automatic DSM Generation from StarImager (SI) Data. Proceedings of Optical 3-D Measurement Techniques, Zurich, pp. 93-105.