

# ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΤΕΜΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ PROBA 3/ASPIICS

**Φώτιος Σταθόπουλος<sup>1</sup>, Sebastien Vives<sup>2</sup>,**

**Luc Dame<sup>3</sup>, Κανάρης Τσίγκανος<sup>4</sup>,**

**<sup>1</sup>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών**

**<sup>2</sup>Εργαστήριο Αστροφυσικής της Μασσαλίας**

**<sup>3</sup>UVSQ (πρώην Υπηρεσία Αερονομίας του Γαλλικού Εθνικού Κέντρου Ερευνών)**

**<sup>4</sup>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής**

**e-mail: fstatho@mobile.ntua.gr**

## Εισαγωγή

Το να θέσουμε δορυφόρους σε σχηματισμό (Formation Flying) είναι μια από τις προκλήσεις που έχουμε να αντιμετωπίσουμε για την επόμενη γενιά των διαστημικών αποστολών. Οι σχηματισμοί αυτοί, δημιουργώντας όργανα μεγάλων διαστάσεων είναι πολλά υποσχόμενοι για το μέλλον των διαστημικών οργάνων/τηλεσκοπίων. Η αποστολή PROBA-3 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ΕΟΔ – ESA) είναι μια αποστολή «επίδειξης τεχνολογίας» για τη δυνατότητα του να θέσουμε δύο δορυφόρους σε σχηματισμό. Οι δύο δορυφόροι θα συστήσουν έναν, μεγάλων διαστάσεων, ηλιακό στεμματογράφο με την ονομασία ASPIICS. Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων θα είναι 150m, όπου ο ένας θα δημιουργεί τη σκιά ενώ ο δεύτερος θα παρατηρεί το στέμμα του ήλιου. Ο στεμματογράφος ASPIICS περιλαμβάνει και μετρολογικά συστήματα τα οποία θα μας επιτρέπουν την εξεύρεση τόσο της διεύθυνσης (absolute pointing) όσο της σχετικής ευθυγράμμισης (relative alignment) του σχηματισμού. Αισθητήρες φωτός (photosensors) γύρω από την κόρη εξόδου του τηλεσκοπίου παρατήρησης μας δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τη διεύθυνση του σχηματισμού μετρώντας την ένταση της παρασκιάς πίσω από τον δορυφόρο που δημιουργεί τη σκιά. Παράλληλα πηγές φωτός (π.χ. LEDs) πάνω σε αυτό το δορυφόρο, στη μεριά που «βλέπει» τον δορυφόρο που παρατηρεί το στέμμα του ήλιου, μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε τη σχετική ευθυγράμμιση του σχηματισμού. Πραγματοποιήσαμε την πλήρη προσομοίωση του συστήματος μετρολογίας και δείξαμε ποιές διορθώσεις πρέπει να εφαρμόζονται σε κάθε διαστημικό σκάφος σε περίπτωση αποκλίσεων του σχηματισμού. Η προσομοίωση αυτή επιβεβαιώθηκε από μοντέλο σε κλίμακα, του στεμματογράφου των δύο δορυφόρων σε σχηματισμό. Η μελέτη αυτή έγινε στα πλαίσια της πρωτοβουλίας του ΕΟΔ: «STARTIGER» μιας νέας προσέγγισης με στόχο την επίδειξη μιας καινοτόμας και πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (έξι μήνες) στο Εργαστήριο Αστροφυσικής της Μασσαλίας (LAM).

## Abstract

Formation Flying is now considered to be one of the most promising and effective approach to deploy the forthcoming generation of very large instruments in space. PROBA-3 is a technology mission devoted to the in-orbit demonstration of formation flying techniques and technologies. In PROBA 3 two satellites will implement a giant coronagraph (called ASPIICS) that will both demonstrate and exploit the capabilities and performances of formation flying. ASPIICS satellites are separated by 150m, one hosting the external occulting disk and the other the optical part of the coronagraph. ASPIICS will incorporate metrology units which will allow determining both the absolute pointing and the relative alignment of the formation. Photosensors located around the

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

entrance pupil of the coronagraph will determine the absolute positioning of the instrument by sensing the penumbra behind the occulting disk. Light sources located on the rear-side of the occulting disk will allow verifying the alignment of the formation. We carried out a complete numerical simulation of the metrology system and showed how corrections are derived from the measurements to be applied to each spacecraft in case of misalignments. This simulation was validated by a scaled model of the coronagraph developed at Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. This study has been conducted in the framework of an ESA "STARTIGER" Initiative, a novel approach aimed at demonstrating the feasibility of a new and promising technology on a very short time scale (six months study).

*Λέξεις-Κλειδιά: ηλιακός στεμματογράφος PROBA 3/ASPIICS, δορυφόροι σε σχηματισμό (formation flying)*

## 1. Εισαγωγή

Η πτήση σε σχηματισμό (Formation Flying) την οποία ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) για πρώτη φορά θα εφαρμόσει στην αποστολή PROBA 3, δίνει την δυνατότητα της δημιουργίας ενός μεγάλων διαστάσεων ηλιακού στεμματογράφου. Ο στεμματογράφος, με την ονομασία ASPIICS (Association de Satellites Pour l'Imagerie et l'Interferometrie de la Couronne Solaire), επιλέχθηκε για την αποστολή PROBA 3 τον Ιανουάριο του 2009 [1]. Τα κύρια πλεονεκτήματα που προσδίδει η πτήση σε σχηματισμό είναι: 1) μεγαλύτερες διαστάσεις για το στεμματογράφο, που ακολούθως βελτιώνουν την χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) και ελαχιστοποιούν την παρεμβολή σκεδαζόμενου φωτός και 2) δυνατότητα συνεχούς παρατήρησης του ηλιακού στέμματος. Η αποστολή PROBA-3/ASPIICS αποτελείται από δύο δορυφόρους σε απόσταση 150m μεταξύ τους, ενός που αποτελεί το δίσκο αποκοπής (Occulter spacecraft – O-S/C) και του δεύτερου που φέρει το όργανο της παρατήρησης – τηλεσκόπιο (Coronagraph spacecraft – C-S/C). Ο στεμματογράφος ASPIICS παράλληλα με την παρατήρηση του ήλιακού στέμματος, θα χρησιμοποιηθεί για την συνεχή καταγραφή και προσδιορισμό της θέσης των δύο δορυφόρων στο χώρο, μέσω δύο μετρολογικών συστημάτων: του Shadow Position Sensor (SPS) και του Occulter Position Sensor (OPS). Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε τη μετρολογία των συστημάτων της αποστολής PROBA 3, συνδιάζοντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών των παραπάνω συστημάτων, SPS και OPS. Η μελέτη αυτή διεξήχθη στα πλαίσια της πρωτοβουλίας της ESA "STARTIGER", που αποτελεί καινοτόμο προσέγγιση νέων και πολλά υποσχόμενων τεχνολογιών (σε αυτή την περίπτωση την εφαρμογή πτήσης σε σχηματισμό για την μελέτη του ηλιακού στέμματος [2, 3]) σε περιορισμένο χρονικό διάστημα (έξι μήνες).

## 2. Συστήματα αξόνων

Σε αυτό το κεφάλαιο ορίζουμε τους άξονες αναφοράς, σύμφωνα με τους οποίους ευθυγραμμίζουμε το σχηματισμό (και τους δύο δορυφόρους) ως προς τον ήλιο, αλλά και τους δύο δορυφόρους μεταξύ τους. Έστω  $O_s$  το κέντρο του ήλιου,  $O_{eo}$  το κέντρο του δίσκου αποκοπής,  $O_P$  το κέντρο της κόρης εξόδου του τηλεσκοπίου,  $O_{io}$  το κέντρο του εσωτερικού δίσκου αποκοπής (ο οποίος βρίσκεται μέσα στο τηλεσκόπιο), and  $ISD$  (Inter-

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

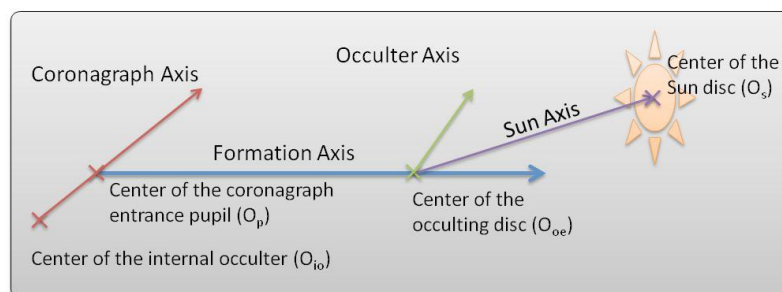
Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

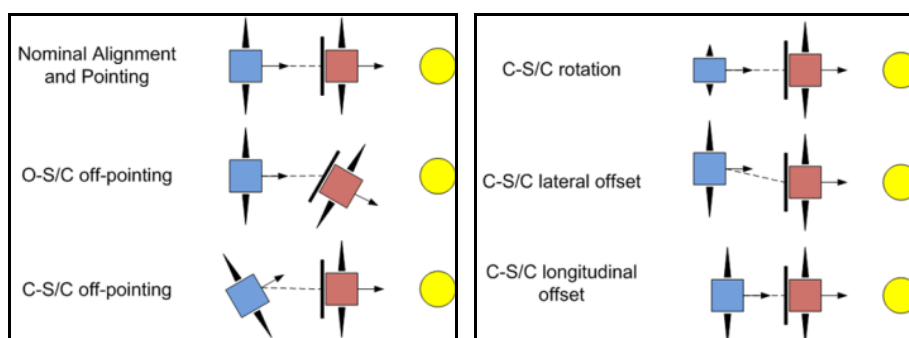
Satellite Distance) η απόσταση μεταξύ του σημείου  $O_{eo}$  και του σημείου  $O_p$ . Στην Εικόνα 1 υπάρχει αναπαράσταση των αξόνων:

- Ο άξονας του S-S/C ορίζεται ως ο άξονας που ενώνει το κέντρο της κόρης εξόδου του τηλεσκοπίου  $O_p$  και το κέντρο του εσωτερικού δίσκου αποκοπής  $O_{io}$ ;
- Ο άξονας του σχηματισμού ορίζεται από το κέντρο του τηλεσκοπίου  $O_p$  και το κέντρο του δίσκου αποκοπής  $O_{eo}$ ;
- Ο άξονας του δίσκου αποκοπής είναι ο άξονας που περνάει από το κέντρο του δίσκου αποκοπής  $O_{eo}$  και είναι κάθετος στο δίσκο;
- Ο άξονας του ήλιου ορίζεται από το κέντρο του δίσκου αποκοπής  $O_{eo}$  και το κέντρο του ήλιου.

Κάθε δορυφόρος έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, θεωρώντας τέσσερις διαφορετικές κινήσεις: πλάγιες μετατοπίσεις (έστω ως προς τους άξονες x- και y-); διαμήκειες μετατοπίσεις (ως προς τον άξονα z-); κλίσεις (ως προς τους άξονες x- και y-); και περιστροφές (ως προς τον άξονα z-), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Τέσσερις διαφορετικές κινήσεις μεταφράζεται σε 16 καταστάσεις για κάθε δορυφόρο άρα σε 256 διαφορετικές καταστάσεις για τον σχηματισμό. Ο αριθμός των καταστάσεων μπορεί να μειωθεί στις 32 παραθέτοντας τις παρακάτω δύο υποθέσεις: (i) πλάγιες και διαμήκειες μετατοπίσεις των ενός δορυφόρου έχει αντίστοιχα αποτελέσματα με αντίστοιχη μετατόπιση του άλλου δορυφόρου; (ii) μικρές κλίσεις του O-S/C (δίσκος αποκοπής) θεωρούνται αμελητέες. Απαλείφοντας όλες τις παρόμοιες περιπτώσεις, απομένουν και οι 4 διαφορετικές κινήσεις για το C-S/C, δηλ. 16 πιθανές καταστάσεις, αλλά μόνο δύο πιθανές καταστάσεις για το O-S/C, δηλ. 2 πιθανές καταστάσεις (κανονική θέση και περιστροφή ως προς τον άξονα z).



Εικόνα 1. Ορισμός των αξόνων του συστήματος.



Εικόνα 2. Όλες οι πιθανές καταστάσεις του συστήματος των δορυφόρων (αριστερά ο C-S/C, στη μέση ο O-S/C, δεξιά ο ήλιος)

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος  
 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
 Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
 Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

### 3. Μετρολογικά Συστήματα

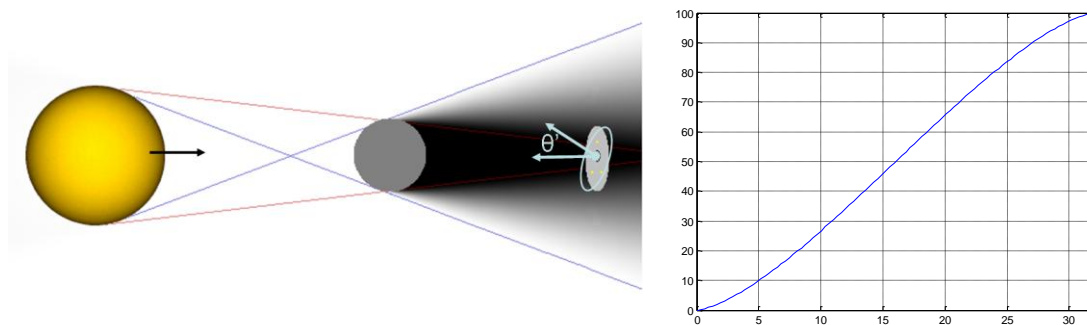
Οι δύο αισθητήρες που παρουσιάσαμε παραπάνω ο SPS (Shadow Positioning Sensor) και ο OPS (Occulter Positioning Sensor) θα υπολογίζουν και θα επαληθεύουν την θέση και τον προσανατολισμό τόσο των δύο δορυφόρων όσο και του συστήματος συνολικά, δηλαδή του οργάνου, ως προς τον άξονα του ήλιου. Ακολουθεί η μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας των μετρολογικών μονάδων. Πλήρης περιγραφή του συστήματος υπάρχει στις παραπομπές [1] και [4].

#### 3.1 Shadow Positioning Sensor (SPS)

Το σύστημα SPS μας δείχνει την απόλυτη θέση του συστήματος στο χώρο με αναφορά τον ήλιο και μπορεί να προσδιοριστεί από την σχετική θέση του C-S/C ως προς τον άξονα του ήλιου και τη θέση του O-S/C.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 αριστερά, ο δίσκος αποκοπής (O-S/C) προβάλλει τη σκιά και την παρασκιά στο επίπεδο του τηλεσκοπίου (C-S/C) και στους αισθητήρες έντασης του φωτός που βρίσκονται σε αυτό το επίπεδο, και μέσα στην παρασκιά. Γνωρίζοντας τα επίπεδα της παρασκιάς, τα θεωρητικά επίπεδα της οποίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 (δεξιά) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση του C-S/C ως προς τον ήλιο αλλά και το δίσκο αποκοπής.

Από την Εικόνα 3 (δεξιά) βλέπουμε πως η παρασκιά έχει μια συγκεκριμένη φωτεινότητα η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του ηλιακού δίσκου που αποκρύπτει ο δίσκος αποκοπής. Έχοντας υποθέσει πως ο δίσκος αποκοπής είναι στην κανονική θέση (είτε έχει περιστραφεί ως προς τον άξονα του ήλιου) η φωτεινότητα της παρασκιάς μπορεί να παρασταθεί σε κυκλικούς κώνους με άξονα τον άξονα του ήλιου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 3. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Παρουσίαση της σκιάς και η παρασκιάς πίσω από το δίσκο αποκοπής. Τα βέλη στο δορυφόρο-τηλεσκόπιο δείχνουν πιθανές κλίσεις του ενλόγω δορυφόρου.

ΔΕΞΙΑ: Κατανομή της φωτεινότητας της παρασκιάς για απόσταση 150m από τον δίσκο αποκοπής. Ο άξονας x- παρουσιάζει τη γωνία μεταξύ του άξονα του ήλιου και του άξονα του συστήματος των δορυφόρων σε arcmins; ο άξονας y- είναι το ποσοστό (%) της ληφθείσας ποσότητας/φωτεινότητας ηλιακού φωτός.

Κάθε κώνος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο βαθμό φωτεινότητας και ορίζεται από ένα μοναδικό ζεύγος χαρακτηριστικών αριθμών: τη γωνία του κώνου και τη θέση της Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

κορυφής του κώνου πάνω στον άξονα του ήλιου. Από τη θέση της κορυφής γνωρίζουμε και την κατεύθυνση του κώνου. Ο μαθηματικός τύπος που ορίζεται είναι:

$$x^2 + y^2 = \tan^2(\varphi_i) \cdot (z + d_{\varphi_i})^2 \quad (1)$$

Ορίζοντας το γεωμετρικό πρόβλημα, θέλουμε να βρούμε το γεωμετρικό τόπο ενός επιπέδου (του επιπέδου του τηλεσκοπίου - C-S/C) μέσα σε ορισμένο αριθμό ομόκεντρων κώνων. Αντικαθιστώντας στον τύπο (1) τις θέσεις του κάθε αισθητήρα πάνω στο επίπεδο του τηλεσκοπίου ( $x_i, y_i$ ) καθώς και αντίστοιχες για κάθε αισθητήρα μετρήσεις για τη γωνία ( $\varphi_i$ ) και θέση της κορυφής του κώνου ( $d_i$ ) καταλήγουμε στον τύπο:

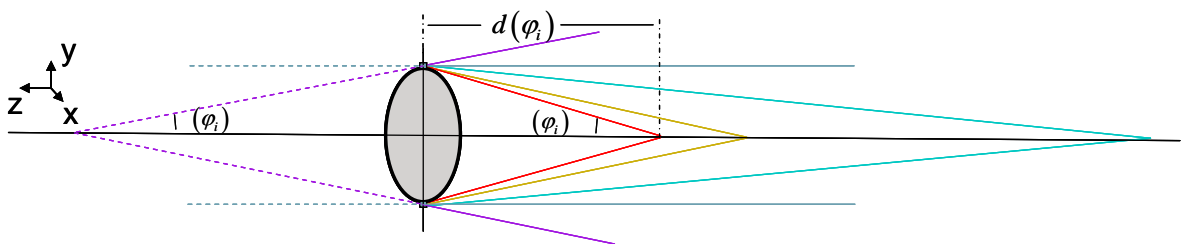
$$\begin{aligned} (x_i \cdot \cos \gamma - y_i \cdot \sin \gamma + x_0)^2 + ((x_i \cdot \sin \gamma + y_i \cdot \cos \gamma) \cdot \cos \theta + y_0)^2 = \\ = \tan^2(\varphi_i) \cdot ((x_i \cdot \sin \gamma + y_i \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \theta + z_0 + d_{\varphi_i})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Το αποτέλεσμα που καταλήγουμε μας προσδιορίζει τις μετατοπίσεις ( $x_0, y_0, z_0$ ), την κλίση ( $\theta$ ), αλλά και τη γωνία περιστροφής ( $\gamma$ ) του δορυφόρου που φέρει το τηλεσκόπιο ως προς το δορυφόρο – δίσκο αποκοπής αλλά και τον ήλιο. Τουλάχιστον μετρήσεις από πέντε (5) αισθητήρες χρειάζονται για τον παραπάνω υπολογισμό.

Στην περίπτωση που δεν λάβουμε υπόψιν τις υποθέσεις της παραγράφου 2, και θεωρήσουμε πως οι κλίσεις του δορυφόρου – δίσκου αποκοπής δεν είναι αμελητέες, για τον υπολογισμό του κώνου, ο οποίος πλέον δεν είναι κανονικός αλλά ελλειπτικός χρησιμοποιούμε αντί του τύπου (1), τον γενικό τύπο:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2} \quad (3)$$

Η μαθηματική προσομοίωση ωστόσο έδειξε πως οι υποθέσεις της παραγράφου 2 είναι έγκυρες, και μπορούμε να θεωρούμε τον δορυφόρο – δίσκο αποκοπής σταθερό στην κανονική θέση.



Εικόνα 4. Γεωμετρική ανάλυση της κατανομής της φωτεινότητας της παρασκιάς.

### 3.2 Occulter Position Sensor (OPS)

Ο δευτερος αισθητήρας του οργάνου, ο Occulter Position Sensor (OPS), έχει σκοπό την ευθυγράμμιση των δύο δορυφόρων ως προς τον άξονα του σχηματισμού. Ο OPS χρησιμοποιεί απευθείας το επιστημονικό όργανο παρατήρησης (το τηλεσκόπιο) ώστε να απεικονίσει τις πηγές φωτός (π.χ. LED) που βρίσκονται στο πίσω μέρος του δίσκου αποκοπής, και προς το τηλεσκόπιο. Κατα την παρατήρηση οι πηγές φωτός θα βρίσκονται μέσα στη σκιά του ηλιακού δίσκου, άρα θα μπορούν να διακριθούν.

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Τουλάχιστον τρεις πηγές φωτός είναι απαραίτητες [4], σχηματίζοντας τριγωνικό σχηματισμό. Με την ακριβή παρατήρηση της μετακίνησης και αλλαγής της διάταξης των φωτεινών πηγών, όπως απεικονίζονται στο οπτικό πεδίο του τηλεσκοπίου, μπορούμε να ανακτήσουμε τη σχετική θέση των δύο δορυφόρων.

Συγκρίνοντας το σχετικό μέγεθος του ανακατασκευασένου σε τρεις διαστάσεις (3D) μοντέλου διάταξης των φωτεινών πηγών (π.χ. τριγώνου), σε σχέση με το αντίστοιχο στην αρχική θέση μπορούμε να υπολογίσουμε τις διαμήκεις μετατοπίσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν τη διαφορά αυτή, χρησιμοποιώντας κάποιο από τα κέντρα της διάταξης (π.χ. βαρύκεντρο του τριγώνου) μπορούμε να υπολογίσουμε τις πλάγιες μετατοπίσεις, αλλά και την περιστροφή ως προς αυτό το σημείο. Τέλος από τη μεταβολή του σχήματος του τριγώνου μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση του ενός δορυφόρου ως προς τον άλλο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε το φαινόμενο «μόχλευσης» που παρατηρείται όταν ο δορυφόρος που φέρει το τηλεσκόπιο έχει κλίση ως προς τον άξονα του σχηματισμού (Εικόνα 5). Τότε στην εικόνα της παρατήρησης φαίνεται πως υπάρχει πλάγια μετατόπιση, ενώ στην ουσία αυτό παρατηρείται λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης της παρατήρησης.

Οι μαθηματικοί τύποι για της μετατοπίσεις που προκύπτουν είναι:

$$x_0 = \frac{x_{dc}}{\kappa} + x_{lev}; y_0 = \frac{y_{dc}}{\kappa} - y_{lev}; z_0 = \frac{(\kappa - 1)}{\kappa} \cdot ISD + z_{lev} \quad (4)$$

όπου  $\kappa$  είναι ο δείκτης αναλογίας μεταξύ του μεγέθους της διάταξης που παρατηρούμε και της αρχικής διάταξης,  $(x_{dc}, y_{dc})$  είναι η πλάγια μετατόπιση του κέντρου του σχηματισμού,  $(x_{lev}, y_{lev}, z_{lev})$  είναι η μετατόπιση λόγω μόχλευσης, και  $ISD$  η αρχική απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων.



Εικόνα 5. Δύο περιπτώσεις που έχουμε ίδια παρατήρηση των φωτεινών πηγών. Στην αριστερή εικόνα παρατηρούμε την περίπτωση της «μόχλευσης».

#### 4. Αποτελέσματα (συνδιάζοντας τα συστήματα SPS και OPS)

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε τη λειτουργία των αισθητήρων SPS και OPS. Ο συνδιασμός των υπολογισμών και από τα δύο συστήματα αποτελεί κομβικό σημείο για τον υπολογισμό της θέσης και της κλίσης των δορυφόρων, που μας οδηγεί στον προσδιορισμό των απαραίτητων διορθώσεων για την ευθυγράμμιση του οργάνου. Ο SPS υπολογίζει την θέση και κλίση των δορυφόρων ως προς τον ήλιο, δηλαδή της απόλυτης θέσης τους στον χώρο. Ωστόσο ο SPS δεν μπορεί να υπολογίσει τη σχετική θέση των δορυφόρων. Κύριο πρόβλημα σε αυτό είναι η κυκλική συμμετρία γύρω από τον άξονα

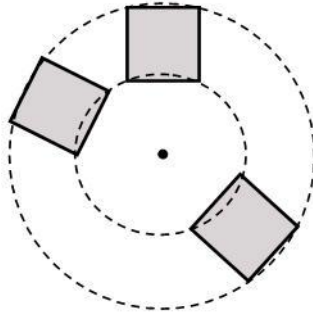
Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

του ήλιου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Αυτή την πληροφορία τη λαμβάνουμε από το OPS, που προσδιορίζει την σχετική θέση των δορυφόρων μεταξύ τους. Επίσης αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τον προσανατολισμό του σχηματισμού των δορυφόρων ως προς τον άξονα του ήλιου. Για αυτή την παρατήρηση χρειάζεται αναφορά δε σημείο εκτός του συστήματος.

Οι πληροφορίες από τα συστήματα OPS και SPS είναι αλληλοσυμπληρώμενες σε επιμέρους σημεία που το κάθε σύστημα ξεχωριστά δεν μπορεί να καλύψει αλλά και επιβεβαιώνουν τις επικαλυπτόμενες πληροφορίες και υπολογισμούς.



Εικόνα 6. Κυκλική συμμετρία γύρω από τον άξονα του ήλιου. Οι αισθητήρες φωτός στις γωνίες του τετραγώνου (δηλ. δορυφόρου την παρασκιά) και στις τρεις θέσεις έχουν ίδιες μετρήσεις. Ο υπολογισμός της σωστής θέσης προέρχεται από το συνδιασμό των αποτελεσμάτων από τα συστήματα SPS και OPS.

## 5. Σενάρια πιθανών καταστάσεων

Ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων για το σύστημα των δορυφόρων μπορεί να μειωθεί στις 32 σύμφωνα με τις υποθέσεις του κεφαλαίου II. Στην πραγματικότητα όμως μπορούν να μειωθούν περισσότερο, στις 16 καταστάσεις.

Υποθέτουμε όπως παραπάνω πως ο δίσκος αποκοπής βρίσκεται στη σωστή θέση (κάθετα στον άξονα του ήλιου) άρα πως μόνο ο δορυφόρος που φέρει το τηλεσκόπιο μπορεί να μετακινηθεί. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μόνο 16 καταστάσεις. Όταν παρατηρείτε μετατόπιση και τα δύο συστήματα (OPS και SPS) μπορούν να το μετρήσουν. Σε περίπτωση κλίσης, αν και τα δύο συστήματα το παρατηρούν, ο OPS έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, άρα τον χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό ενώ ο SPS επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα. Σε περίπτωση που έχουμε και μετατόπιση και κλίση, χρησιμοποιούμε τον SPS για την μετατόπιση και αφού την αφαιρέσουμε από τη μέτρηση τον OPS για τον υπολογισμό της κλίσης.

Σε περίπτωση που υποθέσουμε πως ο δίσκος αποκοπής έχει κλίση ως προς τον άξονα του ήλιου, τότε έχουμε 16 καταστάσεις ακόμα. Τα συστήματα OPS και SPS θεωρητικά μπορούν να υπολογίσουν τις μεταβολές. Στην πραγματικότητα η διακριτική ικανότητα των συστημάτων είναι περίπου 20 arcmin.

Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο SPS δεν μπορεί να δώσει αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει όταν κάποιος αισθητήρας είναι είτε στον ήλιο (ένδειξη 100% φωτεινότητα του ήλιου) είτε στην σκιά (ένδειξη 0% φωτεινότητα). Εφόσον στην παρασκιά βρίσκονται λιγότεροι από 5 αισθητήρες, όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας της έλλειψης, τότε δεν μπορεί

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

να δώσει αποτέλεσμα. Ωστόσο έστω και με αυτές ή και λιγότερες μετρήσεις, έχουμε ένδειξη για τη θέση του δορυφόρου. Εφόσον έχουμε μετρήσεις από τη σκιά, μπορούμε να μετακινήσουμε το δορυφόρο ώστε να φέρουμε κάποιο αισθητήρα από τη σκιά στην παρασκιά. Αντίθετα αν έχουμε μετρήσεις από αισθητήρες που βρίσκονται στο φως του ήλιου, τότε θα πρέπει να κλείσουμε την κόρη του τηλεσκοπίου και να καθοδηγήσουμε το δορυφόρο με άλλα συστήματα.

## 6. Επίλογος

Η εργασία ολοκληρώθηκε στα πλαίσια της πρωτοβουλίας STARTIGER του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τη θέση και τη διεύθυνση τόσο των δύο δορυφόρων ξεχωριστά όσο και του συστήματος που σχηματίζουν σε πτήση σε σχηματισμό (formation flying) στην αποστολή PROBA 3, μέσω των αισθητήρων του οργάνου ASPIICS: του Occulter Position Sensor (OPS) και του Shadow Position Sensor (SPS).

## Ευχαριστίες

Το έργο υποστηρίχθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και χρηματοδοτήθηκε στα πλαίσια της πρωτοβουλίας STARTIGER "Toward a New Generation of Formation Flying Coronagraph".

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν ειλικρινώς τα μέλη της ομάδας ASPIICS Startiger, η βοήθεια των οποίων υπήρξε καταλυτική για την επιτυχή έκβαση της εργασίας.

## Βιβλιογραφία

- [1] P. Lamy, L. Damé, S. Vives, A. Zhukov, and the ASPIICS Team, "ASPIICS: a giant coronagraph for the ESA/PROBA-3 Formation Flying Mission", in SPIE Space Telescopes and Astronomical Instrumentation 2010, Proc. SPIE 7731-44.
- [2] S. Vives, L. Damé, P. Lamy, A. Antonopoulos, W. Bon, G. Capobianco, et al., "Demonstrator of the Formation Flying Solar Coronagraph ASPIICS/PROBA-3", in SPIE Space Telescopes and Astronomical Instrumentation 2010, Proc. SPIE 7731-152.
- [3] S. Vives, L. Damé, P. Lamy, A. Antonopoulos, G. Burton, G. Capobianco et al., "The STARTIGER's Demonstrators: Toward a New Generation of Formation Flying Coronagraphs".
- [4] F. Stathopoulos, A. Antonopoulos, S. Vives, and L. Damé, "Simulation of the Metrology of the PROBA-3/ ASPIICS Formation Flying Solar Coronagraph", in SPIE Space Telescopes and Astronomical Instrumentation 2010, Proc. SPIE 7731-149.

Φώτιος Σταθόπουλος, Sebastien Vives, Luc Dame, Κανάρης Τσίγκανος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Μαθηματική Μοντελοποίηση της Μετρολογίας του Ηλιακού Στεμματογράφου PROBA 3/ASPIICS

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012