ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LASER ΣΤΟΥΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥΣ 3D ΣΑΡΩΤΕΣ

Γ. Δοξαστάκης[1], Γ. Χλούπης[1], Β. Παγούνης[2], Μ. Τσακίρη[3], Μ. Τσιαρδάκη[2]

[1.] Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, ΤΕΙ Αθήνας
[2.] Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, ΤΕΙ Αθήνας
[3.] Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχ/κων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
e-mail: ee06513@teiath.gr, hloupis@teiath.gr, pagounis@teiath.gr, mtsakiri@central.ntua.gr, mtsiardaki@gmail.com

Περίληψη

Οι επίγειοι σαρωτές laser χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύτατο φάσμα επιστημονικών εφαρμογών για τη συλλογή τρισδιάστατων απεικονίσεων του περιβάλλοντα χώρου και των αντικειμένων του. Στο πλαίσιο της δημιουργίας προδιαγραφών βαθμονόμησης προτείνεται στην εργασία αυτή μια διαδικασία πειραματικού ελέγχου του συστήματος καθοδήγησης της ακτινοβολίας laser των επίγειων σαρωτών παλμικού τύπου. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε πρωτότυπη πειραματική διάταξη μέτρησης κατά την οποία, με χρήση αισθητήρων οπτικής ισχύος (φωτοδιόδων) και υψηλής ταχύτητας απόκρισης, καταγράφεται ο παλμός του σαρωτή laser, ενισχύεται και στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Στην εργασία περιγράφονται αναλυτικά ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η τεχνική δοκιμή της πειραματικής διάταξης, τα πειράματα και τα αποτελέσματα των ελέγχων.

Λέξεις-Κλειδιά: επίγειος; σαρωτής laser, έλεγχος συστήματος καθοδήγησης, φωτοδίοδος

Abstract

A terrestrial laser scanner (TLS) defines an instrument for generating 3D coordinates by acquiring high-density point clouds. The main components of a TLS are (a) the laser rangefinder and (b) the laser beam deflection unit (opto-mechanical scanner) and angle measurement system, which are simply called the scanner. In polygonal scanners, the factors influencing their performance include velocity errors mainly due to the inertia of the scanner. This paper examines the velocity errors of a polygonal scanner and specifically the pulsed laser scanner Leica Scanstation 2. A prototype experimental measuring device was developed by using high speed response photodiodes. From repeated point cloud acquisitions the pulse of the laser scanner is recorded, amplified and then processed in real time. The paper describes the design and implementation of the experimental setup and the results of the tested laser scanner.

Keywords: terrestrial laser scanner, laser beam deflection, jitter, photodiodes

1. Εισαγωγή

Οι επίγειοι σαρωτές laser χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύτατο φάσμα επιστημονικών εφαρμογών για τη συλλογή τρισδιάστατων απεικονίσεων του περιβάλλοντα χώρου και των αντικειμένων του. Η εκτεταμένη χρήση τους έχει οδηγήσει στην ανάγκη ελέγχου της ποιότητας των αποτελεσμάτων τους και για το λόγο αυτό είναι προφανής η απαίτηση δημιουργίας πλαισίου προδιαγραφών ελέγχου και βαθμονόμησης τους. Οι επίγειοι σαρωτές βασίζονται στην τεχνολογία LIDAR (LIght Detection And Ranging) κατά την οποία γίνεται προσδιορισμός θέσης αντικειμένου με την αποστολή και λήψη δέσμης laser. Ένας μηχανισμός κατόπτρων εκτρέπει την ακτίνα ώστε να σαρώνεται συνολικά το αντικείμενο με την επιθυμητή πυκνότητα (ανάλυση). Κατά την σάρωση, μέσω της μονάδας εκτροπής της δέσμης, παράγεται αρχείο τρισδιάστατου έγχρωμου και πυκνού νέφους σημείων του αντικειμένου προς αποτύπωση.

Οι σαρωτές laser είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι αισθητήρες με πολλά ηλεκτρονικά, μηχανικά και οπτικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να εισάγουν τα δικά τους σφάλματα στις μετρήσεις. Σύμφωνα με τους Staiger (2005) και Gordon (2005) τα σφάλματα στις μετρήσεις των σαρωτών laser μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: (α) σε αυτά που οφείλονται στο όργανο, (β) σε αυτά που σχετίζονται με το αντικείμενο προς αποτύπωση, (γ) σε αυτά που οφείλονται στο περιβάλλον, και (δ) σε αυτά που οφείλονται στην διαδικασία της γεωαναφοράς.

Τα σφάλματα που οφείλονται στο όργανο κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον Schulz (2007) ως εξής:

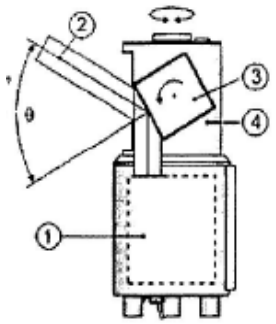
1) Στα εγγενή, τα οποία ενυπάρχουν λόγω του μετρητή αποστάσεων με laser. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στους φυσικούς περιορισμούς του laser, και μπορούν να αντιμετωπισθούν μόνο από τους κατασκευαστές.
2) Στα σφάλματα που αφορούν στην κατασκευή του σαρωτή, συμπεριλαμβανομένων των σφαλμάτων του αποστασιόμετρου laser, της μονάδας εκτροπής της δέσμης laser, του συστήματος μέτρησης γωνίας και των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων του οργάνου. Τα σφάλματα αυτά δυνητικά μπορεί να εκλείψουν ή να μειωθούν με τη βελτίωση του σχεδιασμού του συστήματος, ή από διαδικασίες βαθμονόμησης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί πληθώρα ερευνητικών εργασιών που αφορούν στις προσπάθειες βαθμονόμησης των επίγειων σαρωτών για την μείωση των παραπάνω σφαλμάτων (π.χ. Reshetyuk 2010, Lichti 2007, Schulz 2007, κ.α.). Οι συγγραφείς της εργασίας αυτής έχουν προτείνει τρόπους βαθμονόμησης των επίγειων σαρωτών στο πλαίσιο των διεθνών προδιαγραφών ISO (Tsakiri et al., 2015). Σε συνέχεια της προσπάθειας αυτής και στο πλαίσιο της δημιουργίας επίσημων προδιαγραφών βαθμονόμησης προτείνεται στην εργασία αυτή μια διαδικασία πειραματικού ελέγχου του συστήματος καθοδήγησης της ακτινοβολίας laser των επίγειων σαρωτών παλμικού τύπου. Από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια του μηχανισμού εκτροπής είναι τα σφάλματα στην ταχύτητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γραμμή σάρωσης πολλαπλών επαναλαμβανόμενων σαρώσεων και ο χρόνος συγχρονισμού που αφορά στο χρόνο που χρειάζεται ο σαρωτής να φτάσει στην ταχύτητα πλήρους λειτουργίας από την κατάσταση έναρξης και ο οποίος τυπικά είναι 3-60 sec.

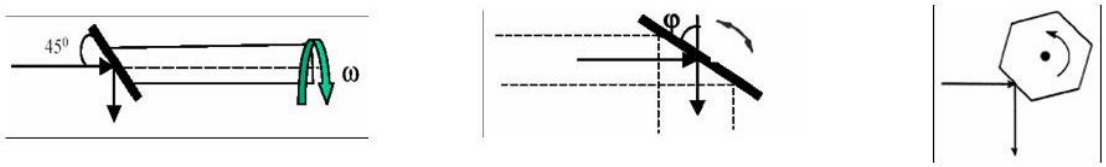
Συγκεκριμένα, η διαδικασία περιλαμβάνει τον έλεγχο της ταχύτητας μεταβολής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στο πλαίσιο του ελέγχου, αναπτύχθηκε πρωτότυπη πειραματική διάταξη μέτρησης με χρήση φωτοδιόδων. Η εργασία περιλαμβάνει 4 ενότητες. Στην ενότητα 2 δίνεται μια θεωρητική περιγραφή των σφαλμάτων που επηρεάζουν τη μονάδα laser με έμφαση στα σφάλματα λόγω αστάθειας (jitter). Στην ενότητα 3 δίνεται η περιγραφή της πρωτότυπης πειραματικής διάταξης με χρήση φωτοδιόδων και περιγράφεται ο πειραματικός έλεγχος για τον σαρωτή Leica Scanstation 2. Ο έλεγχος περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες σαρώσεις με σκοπό την στατιστική ανάλυση της διακύμανσης της ταχύτητας σάρωσης. Στην ίδια ενότητα δίνονται τα αποτελέσματα των ελέγχων ενώ στην ενότητα 4 δίνονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

2. Σφάλματα στη μονάδα εκτροπής της δέσμης laser και στο σύστημα μέτρησης γωνίας

Η συλλογή υψηλής πυκνότητας σημείων νέφους επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού του αποστασιόμετρου laser (rangefinder) και της μονάδας εκτροπής της δέσμης (Σχήμα 1α). Στο Σχήμα 1α δίνεται σχηματικά η δομή ενός επίγειου σαρωτή με περιστρεφόμενο κάτοπτρο όπου το 1 αντιστοιχεί στη μονάδα αποστασιόμετρου laser, το 2 είναι η διάταξη εκτροπής της δέσμης, το 3 είναι το περιστρεφόμενο κάτοπτρο και το 4 είναι η οπτική κεφαλή που επίσης είναι περιστρεφόμενη (Sahba et al., 2006). Η εκτροπή της ακτίνας σε μία διεύθυνση επιτυγχάνεται με διάφορες οπτικομηχανικές διατάξεις, όπως περιστρεφόμενα με σταθερή ταχύτητα επίπεδα ή πολυγωνικά κάτοπτρα, ταλαντούμενα κάτοπτρα ή πρίσματα (Σχήμα 1β). Για την εκτροπή της ακτινοβολίας σε δύο διευθύνσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν διπλά κάτοπτρα κινούμενα σε διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους ή να συνδυασθούν οι παραπάνω διατάξεις με μηχανική περιστροφή της κεφαλής του σαρωτή. Η ταυτόχρονη εκτροπή της ακτίνας σε δύο διευθύνσεις είναι επίσης δυνατή με διάθλασή της από ζεύγος κυκλικών σφηνοειδών πρισμάτων (optical wedges). Η χρήση περιστρεφόμενου ή πολυγωνικού κατόπτρου με σταθερή ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα τη σάρωση του αντικειμένου κατά παράλληλες γραμμές που είναι ο συνηθέστερος τύπος επίγειου παλμικού σαρωτή.



Σχήμα 1α. Δομή επίγειου σαρωτή laser με περιστρεφόμενο κάτοπτρο
(πηγή: Sahba et al., 2006)



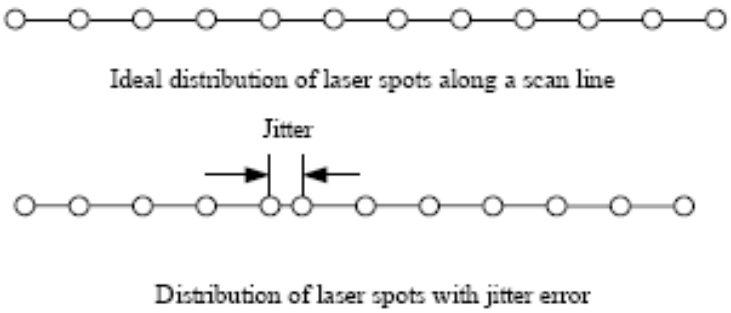
(α) Περιστρεφόμενο (β) Ταλαντούμενο (γ) Πολυγωνικό

Σχήμα 1β. Οπτικές διατάξεις σάρωσης

Ωστόσο, η εγγενής κίνηση του κατόπτρου σαρώσεως προκαλεί προβλήματα τα οποία είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και να διορθωθούν. Για σαρωτή laser που βρίσκεται σε μια σταθερή θέση, ο χρόνος επιτάχυνσης που απαιτείται για το κάτοπτρο από την έναρξη έως ότου επιτευχθεί σταθερή ταχύτητα σάρωσης μπορεί να οδηγήσει σε σειρά μετρήσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε λανθασμένα σημεία στη σαρωμένη εικόνα.

Σύμφωνα με τον Marshall (2004) τα βασικότερα σφάλματα των σαρωτών με πολυγωνικά κάτοπτρα είναι α) ατέλειες των περιστρεφόμενων κατόπτρων, β) σφάλματα ταχύτητας, γ) ανισορροπία της μονάδας εκτροπής της δέσμης, και δ) ο συγχρονισμός που αφορά τον ακριβή συγχρονισμό του οριζόντιου κατόπτρου, του κάθετου κατόπτρου και του αποστασιόμετρου και είναι απαραίτητος για τον ακριβή υπολογισμό των τρισδιάστατων καρτεσιανών συντεταγμένων. Στην εργασία αυτή θα διερευνηθούν δύο σφάλματα και συγκεκριμένα της ταχύτητας και του συγχρονισμού.

Τα σφάλματα λόγω ταχύτητας διακρίνονται στην α) «αστάθεια» (jitter) που λόγω της διακύμανσης υψηλής συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα την τοποθέτηση του ίχνους laser κατά μήκος της γραμμής σάρωσης κατά τυχαία ή επαναλαμβανόμενη μορφή (Σχήμα 2), και β) τη διακύμανση της ταχύτητας εντός της γραμμής σάρωσης σε επαναλαμβανόμενες σαρώσεις. Στο Σχήμα 2, οι γραμμές σάρωσης τοποθετούνται παράλληλες μόνο για οπτικούς λόγους.



Σχήμα 2. Η «αστάθεια» προκαλεί πρόβλημα κατανομής των σημείων στο ίχνος της γραμμής σάρωσης (πηγή: Marshall, 2004)

Μερικές αιτίες για τα σφάλματα λόγω της ταχύτητας είναι τα παρακάτω (Reshetyuk, 2006):

- Η αδράνεια του σαρωτή (η οποία εξαρτάται από το βάρος του πολυγωνικού κατόπτρου) και η γωνιακή ταχύτητα. Είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί σταθερότητα όταν τα κάτοπτρα είναι ελαφριά και περιστρέφονται σε μικρότερες ταχύτητες.

- Σταθερότητα του ηλεκτρονικού οδηγού.

- Συμπεριφορά οδόντωσης του κινητήρα (motor cogging) κατά την οποία προκαλείται συνεχής ταλάντωση του κινητήρα

- Παραλλαγές στην επιπεδότητα, η οποία προκαλεί μικρές αποκλίσεις στη γωνία.

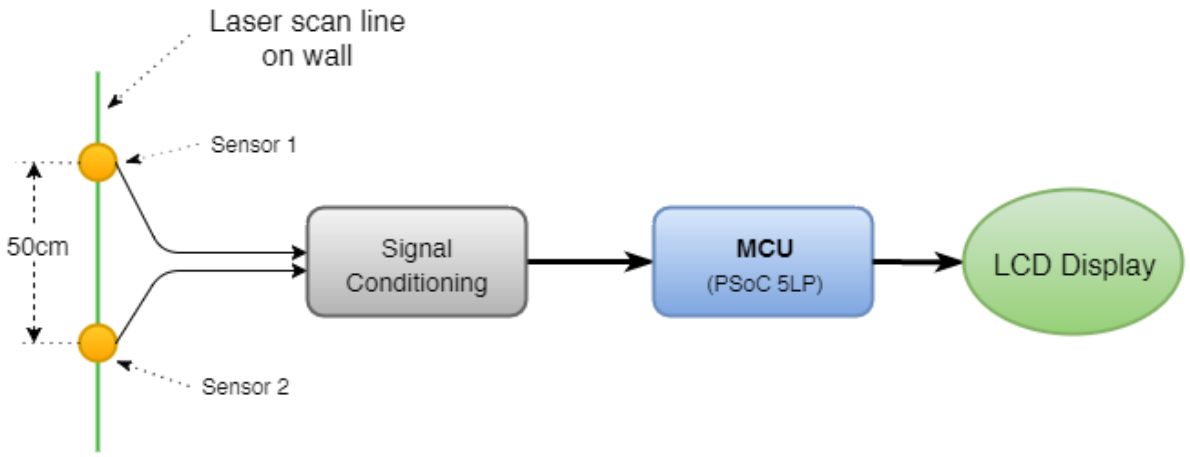
- Παραλλαγές στην ακτίνα.

Τα σφάλματα λόγω συγχρονισμού αφορούν στο χρόνο που παίρνει τον σαρωτή να φτάσει στην ταχύτητα λειτουργίας από το χρόνο έναρξης του, τυπικά από 3-60sec.

Γενικά, οι επίγειοι σαρωτές laser είναι ευαίσθητοι σε κραδασμούς και τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούν είναι ογκώδη και δαπανηρά και, ως εγγενώς μηχανικά μέρη, έχουν φθορές ως αποτέλεσμα της ταχύτητα σάρωσης και επομένως απαιτείται τακτική βαθμονόμηση των συστημάτων αυτών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται στον Stutz (2005) ότι η απόδοση των σαρωτών με πολυγωνικά κάτοπτρα, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διατήρηση μια ακριβούς διαδρομής της δέσμης εκτροπής, είναι επιρρεπής σε κατασκευαστικές ανοχές.

3. Πειραματική διάταξη και μετρήσεις

Για την παρατήρηση των σφαλμάτων στην ταχύτητα του ίχνους laser κατά μήκους της γραμμής σάρωσης σε μια επίπεδη επιφάνεια κατασκευάζεται ένα πρωτότυπο μετρητικό σύστημα το οποίο πραγματοποιεί την μέτρηση της ταχύτητας του ίχνους μέσω δύο αισθητήρων οπτικής ισχύος (φωτοδιόδων). Το λειτουργικό διάγραμμα της διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.

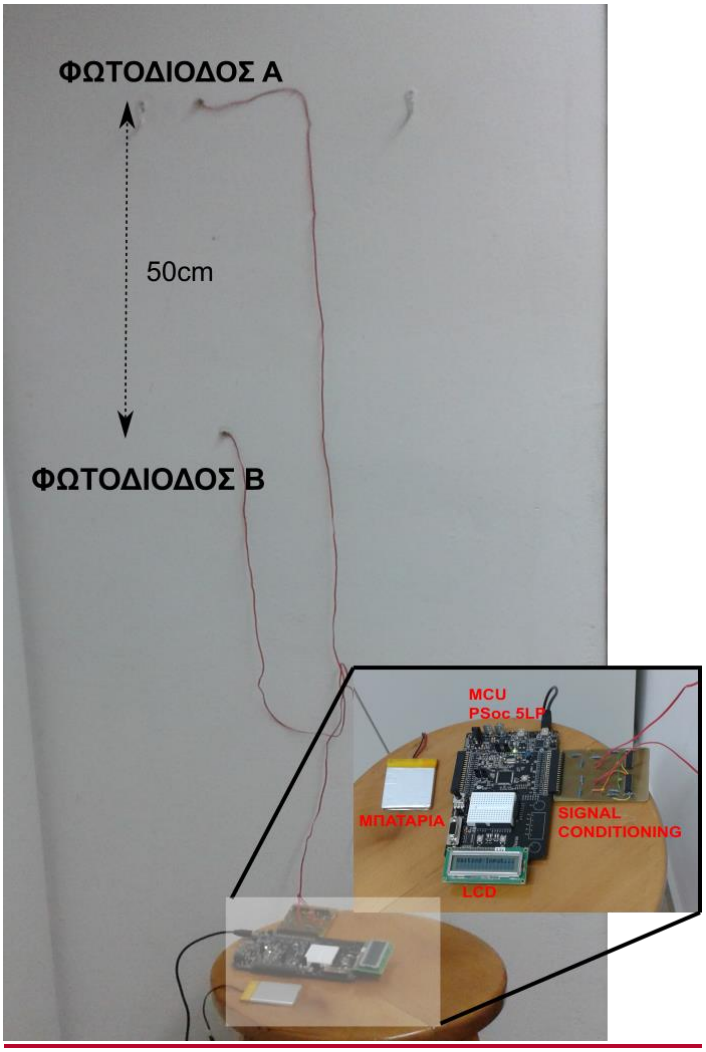


Σχήμα 3. Λειτουργικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην μέτρηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ της διέγερσης των δύο αισθητήρων. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας το σήμα ρεύματος κάθε φωτοδιόδου το οποίο μετά από ενίσχυση, με τη βοήθεια του υποσυστήματος κανονικοποίησης σήματος (signal conditioning), συγκρίνεται με μια τιμή που ανταποκρίνεται στην ένταση του ίχνους laser . Έχοντας μετατρέψει το σήμα της δέσμης σε παλμούς αυτοί εισάγονται στο υποσύστημα επεξεργασίας το οποίο υλοποιείται με χρήση προγραμματιζόμενου συστήματος επί ολοκληρωμένου κυκλώματος (Programmable System on Chip) PSoC 5LP το οποίο περιλαμβάνει μονάδα επεξεργασίας και προγραμματιζόμενα ψηφιακά περιφερειακά. Η μέτρηση του χρόνου μεταξύ των δυο θετικών ακμών των παλμών πραγματοποιείται με την χρήση ενός μετρητή 16-bit στην συχνότητα 1MHz. Με τις τιμές αυτές, ο χρόνος δύναται να μετρηθεί με ακρίβεια 1us. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας στην συνέχεια, εμφανίζεται στον χρήστη στην οθόνη LCD και καθώς η απόσταση μεταξύ φωτοδιόδων είναι σταθερή στα 50cm, είναι εύκολος ο προσδιορισμός της ταχύτητας ίχνους.

Ιδιαίτερη πρόνοια έχει ληφθεί ώστε ο χρόνος που καταγράφεται να είναι αυτός ο οποίος αντιστοιχεί σε μία τροχιά της δέσμης laser. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική διότι το πάχος της δέσμης laser είναι πολύ μικρότερο από την ενεργή επιφάνεια των φωτοδιόδων και έτσι υπάρχει πάντα η πιθανότητα η δέσμη να καταγράφεται για παραπάνω από μία φορές σε κάθε φωτοδίοδο.

Οι ταχύτατοι αλγόριθμοι υπολογισμού συγκρίνουν την οπτική ισχύ σε κάθε φωτοδίοδο και διατηρούν ως έγκυρα τα ίχνη που δημιούργησαν τη μέγιστη διέγερση στη φωτοδίοδο (γεγονός που ερμηνεύεται ότι η δέσμη laser ανιχνεύθηκε προς το κέντρο της ενεργού επιφανείας της φωτοδιόδου). Η πειραματική διάταξη σε πλήρη ανάπτυξη απεικονίζεται στο Σχήμα 4.



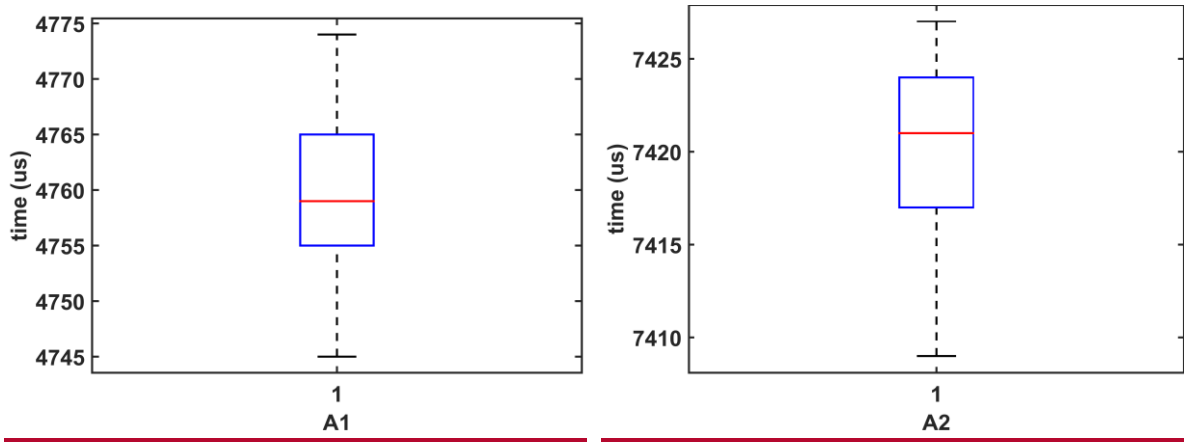
Σχήμα 4. Πλήρης ανάπτυξη πειραματικής διάταξης

3.1 Αποτελέσματα

Για την εκτίμηση της βαθμού αστάθειας (jitter) ελήφθησαν 50 επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (σε δύο ομάδες). Για την εκτίμηση της διακύμανσης της ταχύτητας σάρωσης πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες μετρήσεων όπου η απόσταση μεταξύ των φωτοδιόδων ήταν σταθερή στα 50cm αλλά οι μετρήσεις ελήφθησαν σε διαφορετικά διαστήματα της γραμμής σάρωσης.

Ειδικότερα για γραμμή σάρωσης 2.5m, στην πρώτη ομάδα μετρήσεων (A1), οι φωτοδίοδοι ήταν τοποθετημένες σε αποστάσεις 60cm και 110cm από την έναρξη της σάρωσης, ενώ στη δεύτερη ομάδα μετρήσεων (A2) οι φωτοδίοδοι ήταν τοποθετημένες σε αποστάσεις 130cm και 180cm αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα για την εκτίμηση του βαθμού αστάθειας και σφαλμάτων λόγω συγχρονισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και συνοπτικά υπό της μορφή θηκογράμματος, στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Θηκόγραμμα του δείγματος των τιμών της ομάδας A1 (αριστερά) και A2 (δεξιά)

Πίνακας 1. Μέτρα θέσης και διασποράς δειγμάτων

	Ομάδα μετρήσεων A1 (us)	Ομάδα μετρήσεων A2 (us)
Μέση τιμή	4759.5	7419.98
Τυπικό σφάλμα	0.937321412	0.618417995
Διάμεσος	4759	7421
Κορυφή	4758	7424
Τυπική απόκλιση	6.627863263	4.372875578
Διακύμανση	43.92857143	19.12204082
Εύρος	29	18
Μέγιστο	4745	7409
Ελάχιστο	4774	7427

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

i. η ύπαρξη του jitter είναι αδιαμφισβήτητη καθόσον φαίνεται και στις δύο ομάδες μετρήσεων να υπάρχει αξιοσημείωτο εύρος τιμών (A1 – 29us, A2 – 18us).

ii. Η διακύμανση στην ταχύτητα αποδεικνύεται άμεσα με εξαιρετικά μεγάλες διαφορές (Μέση ταχύτητα ομάδας A1 : 0.5m/4759.5μs=105.05m/s ενώ η Μέση ταχύτητα ομάδας A2: 0.5m/7419.98μs = 67.39m/s). Ιδιαίτερα πρέπει να τονιστεί ότι η ταχύτητα σάρωσης φαίνεται ότι είναι η μέγιστη στην αρχή της γραμμής σάρωσης και λαμβάνει μικρότερες τιμές καθώς αναπτύσσεται η δέσμη και πλησιάζει προς το τέλος της γραμμής σάρωσης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει μια προκαταρκτική κίνηση του κατόπτρου, το οποίο επιταχύνει προς μία μέγιστη ταχύτητα. Κατά τη διάρκεια αυτής της επιταχυνόμενης κίνησης δεν γίνεται καμία δειγματοληψία σημείων. Η δειγματοληψία ξεκινά όταν έχει φθάσει το κάτοπτρο την μέγιστη ταχύτητα. Από εκείνη τη χρονική στιγμή και μετά, η ταχύτητα σάρωσης μειώνεται (προφανώς ελεγχόμενα) ώστε να φθάσει μια τελική τιμή ταχύτητας διακοπής, στο τέλος της γραμμής σάρωσης. Από μηχανικής πλευράς, η προσέγγιση αυτή είναι ενδεδειγμένη διότι αν ακολουθούνταν η αντίστροφη διαδικασία (αυξανόμενη ταχύτητα μέχρι το τέλος της σάρωσης) τότε η απότομη επιβράδυνση στο τέλος της σάρωσης θα ισοδυναμούσε με συνθήκες κρούσης, γεγονός που θα καταπονούσε (και θα κατάστρεφε) ανεπανόρθωτα τα εμπλεκόμενα μηχανικά μέρη.

4. Συμπεράσματα

Στη εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για την εκτίμηση του βαθμού αστάθειας (jitter) σε παλμικούς σαρωτές με πολυγωνικά κάτοπτρα. Χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πειραματική διάταξη η οποία υλοποιήθηκε με χρήση προγραμματιζόμενου συστήματος επί ολοκληρωμένου κυκλώματος και αισθητήρων οπτικής ισχύος (φωτοδιόδους) προκειμένου να διατηρηθεί το κόστος υλοποίησης χαμηλό.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι για τον υπό έλεγχο επίγειο σαρωτή εκτιμήθηκε σφάλμα αστάθειας (jitter) με εύρος τιμών από 18-29us. Επίσης φάνηκε ότι η ταχύτητα σάρωσης είναι η μέγιστη στην αρχή της γραμμής σάρωσης και λαμβάνει μικρότερες τιμές καθώς αναπτύσσεται η δέσμη και πλησιάζει προς το τέλος της γραμμής σάρωσης.

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή είναι οικονομική και ευέλικτη καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε χώρο ελέγχου για τον σαρωτή. Η ίδια διάταξη ή με μικρές τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και άλλων σφαλμάτων των επίγειων σαρωτών ή και άλλων οπτικομηχανικών οργάνων όπως είναι οι γεωδαιτικοί σταθμοί (total station).

Βιβλιογραφία

Gordon S.J. "Structural Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanners". PhD Thesis, 2005, Curtin University of Technology, Department of Spatial Sciences, Australia.

Lichti, D. D. "Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system" ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61 (5): 307-324, 2007.

Marshall GF (ed) "Handbook of Optical and Laser Scanning" Marcel Dekker Inc., New York, 2004.

Reshetyuk, Y., "A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners" ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (5), 2010, 445–456.

Reshetyuk Y. "Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning", PhD Thesis, Department of Transport and Economics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2009.

Sahba, K.; Alameh, K. E. and Smith, C. "A Proposed Motionless Laser Scanning Architecture for Perimeter Security", In: Proc. 40th ICCST2006, pp. 9-16, ISBN: 1-4244-0174-7, October 17 2006, Lexington, KY,.

Schulz T. "Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy" PhD Thesis, DISS. ETH NO. 17036, ETH Zurich University, Switzerland, 2007.

Staiger R., "The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS)", In Proc. of FIG Working Week and GSDI-8, 2005, Cairo, Egypt, April 16 – 21.

Stutz, G. "Guiding Light", SPIE's Magazine, 2005, vol. 5:25-27.

Tsakiri M., Pagounis V., Arabatzi, O. "Evaluation of a pulsed terrestrial laser scanner based on ISO standards", Surf. Topogr.: Metrol. Prop. 3 (2015) 015006 doi:10.1088/2051-672X/3/1/015006.