

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΔΙΕΘΝΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ISO

Τσακίρη Μ.¹, Αραμπατζή Ο.¹, Παγούνης Β.², Σταθάς Δ.¹, Ανδριτσάνος Β.²

¹Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχ/κων, ΕΜΠ

²Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας

e-mail: mtsakiri@central.ntua.gr, arabazti@survey.ntua.gr, mail@pagounis.gr
stathas@survey.ntua.gr, vdandri@ateiath.gr

Περίληψη

Κατά την τελευταία δεκαετία η εκτεταμένη χρήση των επίγειων σαρωτών laser, οι οποίοι εστιάζουν στη συλλογή τρισδιάστατων απεικονίσεων του περιβάλλοντα χώρου σε ένα ευρύτατο φάσμα επιστημονικών περιοχών, έχει οδηγήσει σε ανάγκη ελέγχου της ποιότητας των αποτελεσμάτων τους. Για το λόγο αυτό είναι προφανής η απαίτηση δημιουργίας πλαισίου προδιαγραφών ελέγχου και βαθμονόμησης τους στο πλαίσιο των διεθνών προτύπων ISO. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μια διαδικασία βαθμονόμησης των επίγειων σαρωτών laser του τύπου TOF (time-of-flight) βάσει των διεθνών προτύπων ISO, ως προσπάθεια θέσπισης συγκεκριμένων διεθνών προτύπων ελέγχου και βαθμονόμησης για τα όργανα αυτού του τύπου. Συγκεκριμένα, ελέγχονται οι διαδικασίες προσδιορισμού μηκών και διευθύνσεων στα όργανα αυτά βάσει των αντίστοιχων διεθνών προδιαγραφών για τα συγκεκριμένα μεγέθη.

Abstract

In the last decade the extensive use of terrestrial laser scanners in a versatile range of applications has led to the need to determine widely accepted quality control specifications in order to check field procedures and results. For this reason it is important to create a framework of control and calibration standards in the context of international standards ISO. This article presents a procedure for terrestrial laser scanner calibration based on the international standards ISO. Specifically, simplified test procedures are proposed to check the linear and angular measurements in the laser scanner instruments based on the official specified procedures for testing geodetic and surveying instruments.

Λέξεις-Κλειδιά: επίγειος σαρωτής laser, βαθμονόμηση, προδιαγραφές ISO

1. Εισαγωγή

Η διαδικασία της βαθμονόμησης οργάνων προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα προτύπων. Τυποποιημένες ρουτίνες βαθμονόμησης υπάρχουν για τα παραδοσιακά γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά όργανα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σειρά των προτύπων ISO "Οπτική και όργανα οπτικής - διαδικασίες για τη δοκιμή πεδίων γεωδαιτικών και τοπογραφικών οργάνων "[ISO-17123-(1-8)].

Στο πλαίσιο χρήσης των επίγειων σαρωτών laser, η στατιστική αξιολόγηση της ακρίβειας των οργάνων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων. Ο βασικός λόγος είναι ότι οι σαρωτές laser κατασκευάζονται με εντελώς διαφορετικό τρόπο

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

συγκριτικά με αντίστοιχα γεωδαιτικά όργανα όπως είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (total station) παρότι και τα δύο συστήματα βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. 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. Η κατανόηση αυτών των σφαλμάτων απαιτεί καλή γνώση του σχεδιασμού του σαρωτή, δηλαδή λεπτομερείς πληροφορίες που δεν είναι συνήθως διαθέσιμες από τους κατασκευαστές. Επίσης, οι σαρωτές laser κατασκευάζονται ανά παραγγελία και επομένως δεν γίνεται μαζική παραγωγή, η ακρίβειά τους μπορεί να διαφοροποιείται μεταξύ των οργάνων της ίδιας σειράς, και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την βαθμονόμηση και τη φροντίδα που έχει ληφθεί στο χειρισμό του, εφεξής της κατασκευής του (Boehler & Marbs, 2003). Το γεγονός αυτό καθιστά περίπλοκη την ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών βαθμονόμησης για τους σαρωτές και οι χρήστες αναγκάζονται, όταν απαιτείται, να απευθύνονται στον κατασκευαστή για την εκ νέου βαθμονόμηση του οργάνου. Άλλος λόγος αποτελεί η δυσκολία κατανόησης των κριτηρίων ποιότητας που χρησιμοποιούν οι διάφοροι κατασκευαστές ώστε να προσδιορίσουν την απόδοση των επίγειων σαρωτών laser, όπως η ορθότητα, η ακρίβεια και η ανάλυση του οργάνου. Επειδή δεν υπάρχει σύμβαση ως προς το μέτρο της απόδοσης του σαρωτή και μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της, αυτό καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο για τους χρήστες να συγκρίνουν αντικειμενικά τους σαρωτές των διαφορετικών εμπορικών εταιρειών και, κατά συνέπεια, να επιλέξουν το σαρωτή που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες τους.

Στην πραγματικότητα, το ίδιο πρόβλημα αυτό προϋπήρχε ήδη στη δεκαετία του 1990 για τις συσκευές laser range imaging, τους προκατόχους των σύγχρονων επίγειων σαρωτών laser (Paakkari, 1994). Στη συνέχεια, λόγω του έντονου ανταγωνισμού μεταξύ των κατασκευαστών, ο σχεδιασμός των επίγειων σαρωτών laser αποτελεί πατέντα της κάθε εταιρείας και κάθε κατασκευαστής χρησιμοποιεί δικές του διαδικασίες βαθμονόμησης. Κατά συνέπεια, η γνώση σχετικά με τα αναμενόμενα συστηματικά σφάλματα των οργάνων αυτών είναι πολύ περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, τυποποιημένες διαδικασίες βαθμονόμησης για σαρωτές laser δεν υπάρχουν και ίσως είναι δύσκολο να αναπτυχθούν ώστε να ισχύουν για όλους τους τύπους των οργάνων αυτών. Η ανάγκη για ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών βαθμονόμησης έχει ήδη ξεκινήσει από το 2003 στις ΗΠΑ από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST). Μία προσπάθεια αξιολόγησης της ακρίβειας παρόμοιων συστημάτων που βασίζονται στη αρχή μέτρησης του τριγωνισμού αναπτύχθηκε στη Γερμανία το 2002 (Beraldin, 2004).

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί προσπάθειες βαθμονόμησης συγκεκριμένων οργάνων. Για παράδειγμα, στους Rietdorf et al. (2004) προτάθηκε μια διαδικασία βαθμονόμησης με τη χρήση ενός πεδίου ελέγχου επίπεδων επιφανειών προκειμένου να εκτιμηθεί στατιστικά ένα σύνολο παραμέτρων. Το μειονέκτημα της διαδικασίας βρίσκεται στις περιορισμένες διαστάσεις του πεδίου δοκιμής που αφορούσαν μόνο μερικά μέτρα. Παρόμοιες διαδικασίες βαθμονόμησης έγιναν από τους Reshetyuk (2006β) και Lichti et al. (2005α), οι οποίοι έλεγξαν σε εσωτερικούς χώρους βαθμονόμησης και με τη χρήση διαφόρων ειδών στόχων (επίπεδων χρώματος μαύρου-άσπρου και ανακλαστικών) παραμέτρους που σχετίζονται με τα γωνιακά και γραμμικά σφάλματα. Στους Kersten et al. (2004) μελετήθηκε η βαθμονόμηση του συστήματος σε εσωτερικό πεδίο ελέγχου

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

χρησιμοποιώντας επίπεδους και σφαιρικούς στόχους και παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική απόκλιση των μετρημένων αποστάσεων μεταξύ τους. Διαπιστώθηκε ότι, σε διαδικασίες βαθμονόμησης, πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο τα υλικά, γιατί μπορεί να προκαλέσουν σημαντικό θόρυβο στις μετρήσεις αλλά επίσης και ο συνδυασμός του σαρωτή laser (δηλαδή το μήκος κύματος του φωτός laser) με τα υλικά π.χ. Bohler et al., 2003, Reshetyuk, 2006α, Κοσμάς & Τσακίρη 2007. Οι σημαντικότερες προσπάθειες που έχουν γίνει για τη δημιουργία απλών και σύντομων χρονικά πειραμάτων που αφορούν στη διαδικασία ελέγχου στο πεδίο των σαρωτών σύμφωνα με τις προδιαγραφές ISO καταγράφονται στους Rothweiler & Schmid (2007) και Gottwald (2008).

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος της αυτο-βαθμονόμησης (self-calibration) φαίνεται να είναι μια δημοφιλής προσέγγιση βαθμονόμησης για τους σαρωτές laser. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στη φωτογραμμετρία και θεωρείται ως μια από τις πιο ισχυρές τεχνικές βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα, επιτρέπει τον προσδιορισμό όλων των συστηματικών σφαλμάτων (παράμετροι βαθμονόμησης) ενός αισθητήρα ταυτόχρονα με όλες τις άλλες παραμέτρους του συστήματος (Gruen & Beyer 2001). Ένας αριθμός ερευνητών έχουν δημοσιεύσει αποτελέσματα σχετικά με την επιτυχή χρήση της τεχνικής αυτής σε σαρωτές laser με σκοπό την εκτίμηση των συστηματικών σφαλμάτων. Η σωστή χρήση αυτής της προσέγγισης προϋποθέτει ότι οι εκτιμώμενες παράμετροι να μην είναι συσχετιζόμενες σε μεγάλο βαθμό και κατά συνέπεια μη προσδιορίσιμες (π.χ. Lichti & Franke 2005, Amiri Parian & Gruen 2005, Lichti & Licht 2006, Lichti 2007, Parian 2007). Επίσης, σημειώνεται ότι η πλειοψηφία των δημοσιευμένων πειραμάτων για τη μέθοδο της αυτο-βαθμονόμησης έχουν γίνει χρησιμοποιώντας κυρίως σαρωτές διαφοράς φάσης και λιγότερο παλμικούς σαρωτές (Reshetyuk, 2009). Ωστόσο, είναι εξίσου σημαντικό να διερευνηθούν τα συστηματικά σφάλματα στους παλμικούς σαρωτές και το άρθρο αυτό προτίθεται να συνεισφέρει σε αυτό το κενό.

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση απλών πειραματικών δοκιμών ως μια διαδικασία βαθμονόμησης όπου ελέγχεται ο προσδιορισμός μηκών και διευθύνσεων στα όργανα αυτά βάσει των επίσημων διεθνών προδιαγραφών των αντίστοιχων μεγεθών. Στην ενότητα 2 της εργασίας γίνεται συνοπτική επεξήγηση των σφαλμάτων των σαρωτών. Στην ενότητα 3 περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες ελέγχου. Όπως σε κάθε διαδικασία διακρίβωσης, ο έλεγχος αφορά τόσο την εσωτερική όσο και την εξωτερική ακρίβεια των μετρήσεων. Οι μετρήσεις γίνονται με χρήση ειδικών ανακλαστικών στόχων και σε πεδίο ελέγχου. Τα συμπεράσματα της εργασίας δίνονται στην ενότητα 4.

2. Ταξινόμηση των σφαλμάτων στους επίγειους σαρωτές laser

Όπως και σε οποιαδήποτε γεωδαιτική μέτρηση, οι μετρήσεις των σαρωτών laser υπόκεινται σε σφάλματα που προκαλούνται από διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της συλλογής των μετρήσεων.

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

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

οφείλονται στο περιβάλλον, και (δ) σε αυτά που οφείλονται στην διαδικασία της γεωαναφοράς. Σύμφωνα με τους Lichti & Gordon (2004) οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εσωτερικούς παράγοντες που έχουν να κάνουν με την εσωτερική γεωμετρία και τις κατασκευαστικές ατέλειες της συσκευής λήψης και εξωτερικούς παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις και τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που απεικονίζονται. Τέλος, μια άλλη κατηγοριοποίηση μπορεί να βασιστεί στα πρωτογενή μεγέθη των σαρωτών, και διακρίνεται ως εξής: (α) σφάλματα στις μετρήσεις μήκους, και (β) σφάλματα στις μετρήσεις διευθύνσεων (οριζόντιες διευθύνσεις και κατακόρυφες γωνίες).

Επειδή ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να προτείνει μια απλή διαδικασία ελέγχου των επίγειων σαρωτών, θα υιοθετηθεί η τελευταία κατηγοριοποίηση και τα πειράματα που περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους αναφέρονται σε αυτή τη διάκριση. Δεδομένου ότι τα όργανα αυτά είναι τα μόνα για τα οποία δεν υπάρχουν ISO προδιαγραφές σχετικά με τη διαδικασία βαθμονόμησής τους, τα προτεινόμενα πειράματα βασίζονται στα θεμελιώδη γεωδαιτικά μεγέθη μήκους και γωνίας, για τα οποία υπάρχουν ISO προδιαγραφές που αφορούν τα αντίστοιχα όργανα μέτρησής τους.

Συνοπτικά, το αποτέλεσμα της σάρωσης είναι τρισδιάστατες συντεταγμένες σημείων στο χώρο οι οποίες προκύπτουν βάσει μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών. Η βασική μονάδα ενός επίγειου σαρωτή laser είναι το σύστημα μέτρησης αποστάσεων. Το σύστημα μέτρησης αποστάσεων ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, καθορίζει το εύρος μέτρησης της απόστασης, την ανάλυση, την ακρίβεια των μετρήσεων απόστασης και την απόδοση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων απόστασης. Οι οπτικές μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων που χρησιμοποιούνται στους επίγειους σαρωτές laser διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: μέθοδος παλμού (TOF), συμβολομετρία και μέθοδος τριγωνισμού (Bosch & Lescure, 1995). Οι μέθοδοι TOF βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται για ένα παλμό που εκπέμπεται από το σαρωτή laser να ταξιδέψει μέχρι να συναντήσει μια επιφάνεια και να επιστρέψει στο όργανο. Σε ότι αφορά στο σύστημα μέτρησης γωνιών, οι τιμές των γωνιών δεν δίνονται άμεσα αλλά προκύπτουν με βάση τα υποστηριζόμενα στοιχεία μέτρησης των καρτεσιανών συντεταγμένων. Επιπλέον, το σύστημα μέτρησης της απόστασης δεν έχει καμία επίδραση στο σύστημα μέτρησης των γωνιών, επειδή οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες γωνίες δεν αλλάζουν όταν οι αποστάσεις μέτρησης διαφοροποιούνται. Η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης γωνιών μπορεί να αξιολογηθεί τόσο ως προς την εσωτερική όσο και την εξωτερική ακρίβεια. Συγκεκριμένα, η εσωτερική ακρίβεια περιγράφεται ως η εκτίμηση της εγγύτητας επαναλαμβανόμενων γωνιακών μετρήσεων προς το τοπικό σύστημα του σαρωτή και αξιολογείται από επανειλημμένες μετρήσεις προς ένα στόχο και η εξωτερική ακρίβεια της γωνίας του συστήματος μέτρησης ορίζεται ως η απόκλιση των μετρήσεων που αποκτήθηκαν σε σχέση με κάποιες ονομαστικές τιμές γωνίας.

3. Πειραματικοί έλεγχοι

Οι σαρωτές laser αποτελούν τα μόνα γεωδαιτικά συστήματα μέτρησης για τα οποία δεν υπάρχουν επίσημες τυποποιημένες μέθοδοι βαθμονόμησής τους. Σύμφωνα με τη βασική

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

φιλοσοφία του ISO 17123 προτύπου, γίνεται προσπάθεια ώστε τα πειράματα που αναπτύσσονται να είναι ανεξάρτητα από την αρχή λειτουργίας του οργάνου, να μη γίνεται χρήση άλλων συστημάτων αναφοράς (π.χ. total station) και η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων και η αξιολόγησή των αποτελεσμάτων να έχουν μικρή χρονική διάρκεια (Gottwald, 2008). Οι τρεις πειραματικοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά.

3.1 Ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων (1^{ος} έλεγχος)

Ο πρώτος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορά στην ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων. Σκοπός του ελέγχου αυτού είναι να διαπιστωθούν αποκλίσεις της μετρούμενης απόστασης σε σχέση με την ανάλυση σάρωσης και την απόσταση σε δύο ίδιους σαρωτές του ίδιου έτους κατασκευής.

Ο έλεγχος μέτρησης της απόστασης πραγματοποιήθηκε στο εσωτερικό πεδίο ελέγχου του Ε.Μ.Π. (κτήριο Λαμπαδαρίου), για δύο σαρωτές παλμού ScanStation2 της Leica Geosystems. Το μήκος του πεδίου ελέγχου είναι περίπου 52m και κατά μήκος του υπάρχουν μόνιμες βάσεις εφοδιασμένες με διάταξη εξαναγκασμένης κέντρωσης (Εικόνα 1α).



(α)



(β)

Εικόνα 1. (α) Πεδίο ελέγχου Ε.Μ.Π., (β) εξαναγκασμένες κεντρώσεις σφαιρικών στόχων

Οι αποστάσεις μεταξύ των μόνιμων βάσεων με εξαναγκασμένη κέντρωση (Εικόνα 1β) έχουν μετρηθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους με σύρματα invar, με το E.D.M. υψηλής ακριβείας KERN Mekometer 3000 και πρόσφατα με το total station ακριβείας Leica TDM 5000 (Αλεξίου, 2011). Ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στις διεθνείς προδιαγραφές για τα όργανα μέτρησης αποστάσεων με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (E.D.M.) (Πρότυπο ISO 17123-4 σε εσωτερική βάση). Για την πραγματοποίηση του ελέγχου μετρήθηκαν πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το σαρωτή, όλες εντός του εύρους των 50m σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή (Leica Geosystems ScanStation2), σε τρεις διαφορετικές αναλύσεις σάρωσης. Η μέτρηση των αποστάσεων έγινε σε σφαιρικούς στόχους (Cyra Sphere Target). Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκαν οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ των σφαιρών «σφ»

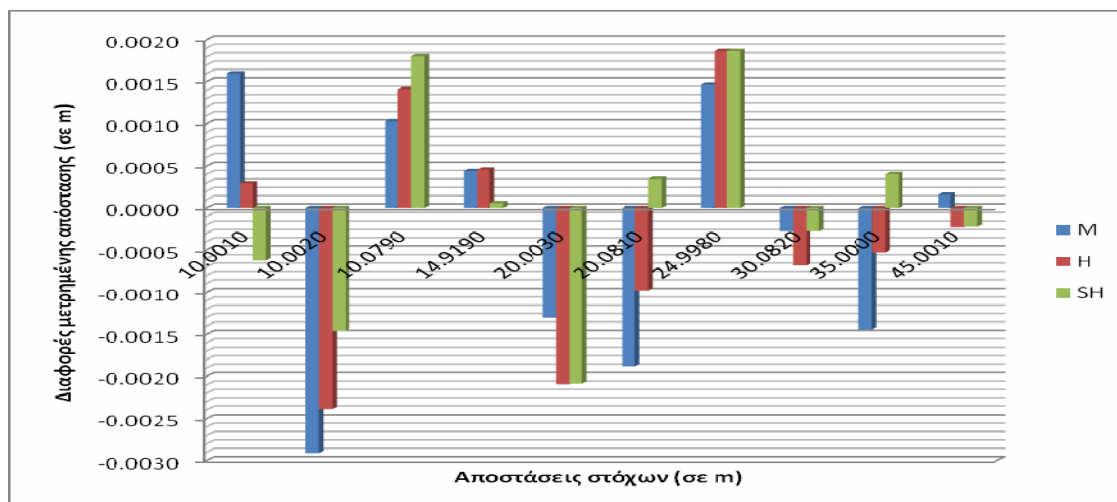
Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

(Πίνακας 1). Επίσης, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) και χρησιμοποιήθηκαν για τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις στη μέτρηση των αποστάσεων, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η θερμοκρασία στο πεδίο ελέγχου ήταν σχεδόν σταθερή, με εύρος $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν από το ίδιο σημείο με τη χρήση τρίποδα βαρέως τύπου (βιομηχανικός τρίποδας).

Πίνακας 1. Αποστάσεις αναφοράς μεταξύ στόχων

σφ ₁	σφ ₂	σφ ₃	σφ ₄	σφ ₅
10.001m		10.079m		
	10.002m		14.919m	
20.003m				
	20.081m			
		24.998m		
30.082m				
	35.000m			
45.001m				



Διάγραμμα 1. Διαφορές μετρημένης απόστασης στόχων των δύο σαρωτών για τρεις αναλύσεις σάρωσης

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές σαρώσεις για κάθε απόσταση και με τους δύο σαρωτές. Η πρώτη σάρωση «M» έγινε με μέση ανάλυση $10 \times 10 \text{mm}$, η δεύτερη «H» με υψηλή ανάλυση $6 \times 6 \text{mm}$ και τέλος, η τρίτη «SH» με πολύ υψηλή ανάλυση $1 \times 1 \text{mm}$. Οι συντεταγμένες του κέντρου των στόχων υπολογίστηκαν χειροκίνητα με την εισαγωγή vertex (κέντρο σφαίρας) μέσω του λογισμικού Cyclone (Leica Geosystems Cyclone Software). Οι διαφορές στην απόσταση και για τις τρεις αναλύσεις σάρωσης μεταξύ των δύο σαρωτών δίνονται στο Διάγραμμα 1. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές διαφορών μέτρησης της απόστασης και για τους δύο σαρωτές εμφανίζονται στη μέση ανάλυση σάρωσης όπως και το μέγιστο εύρος των διαφορών αυτών (Πίνακας 2).

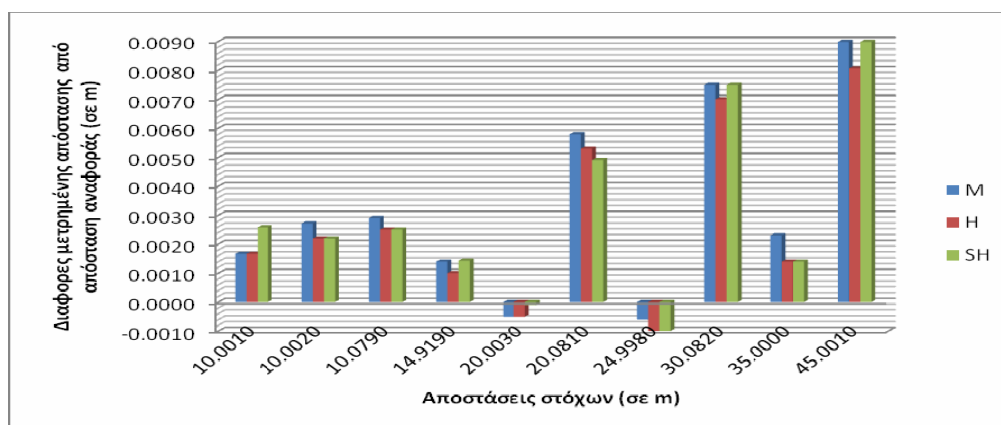
Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

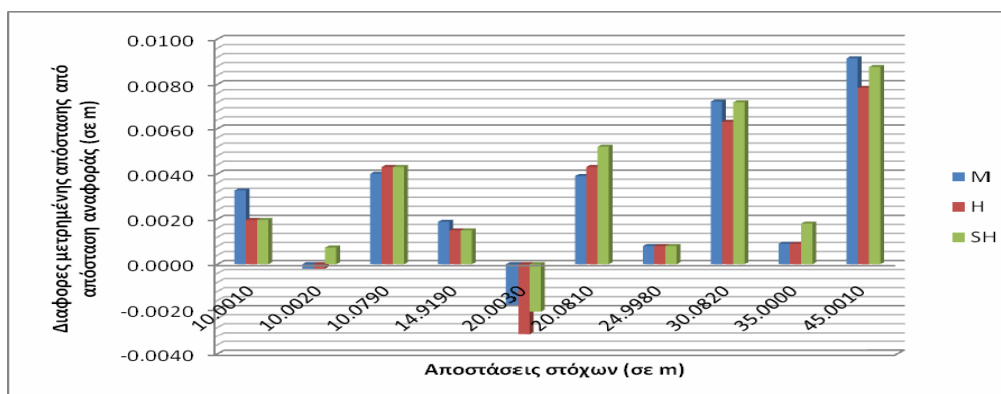
Πίνακας 2. Βασικά στατιστικά στοιχεία διαφορών των δύο σαρωτών για τρεις αναλύσεις σάρωσης

	Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)	Μέση Τιμή (m)	Τυπική Απόκλιση (m)
M	-0.0029	0.0016	0.0045	0.0045	0.0015
H	-0.0024	0.0019	0.0043	0.0043	0.0014
SH	-0.0021	0.0016	0.0040	0.0040	0.0012

Η διακύμανση αυτών των διαφορών βρίσκεται εντός της ακρίβειας του κατασκευαστή (4mm), επομένως οι διαφορές αυτές θα μπορούσαν να αξιολογηθούν ως τυχαίος θόρυβος των μετρήσεων (Reshetyuk, 2009).



Διάγραμμα 2. Διαφορές μετρημένης απόστασης από απόσταση αναφοράς για το σαρωτή 1



Διάγραμμα 3. Διαφορές μετρημένης απόστασης από απόσταση αναφοράς για το σαρωτή 2

Οι διαφορές της μετρημένης απόστασης από απόσταση αναφοράς για κάθε σαρωτή δίνονται στα Διαγράμματα 2 και 3 και τα βασικά στατιστικά στοιχεία για κάθε σαρωτή δίνονται στους πίνακες 3 και 4. Στους πίνακες 3 και 4 η Μέση Τιμή και Τυπική απόκλιση (στήλες 5 και 6 αντίστοιχα) αναφέρονται στις διαφορές των μετρημένων μεγεθών από τις αντίστοιχες αποστάσεις αναφοράς. Όπως διαπιστώνεται, τα αποτελέσματα και των δύο

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

σαρωτών που ελέγχθηκαν, βρίσκονται εντός του θορύβου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (1.96 x 4 mm) και για τις τρεις αναλύσεις σάρωσης (M, H, SH).

Πίνακας 3. Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης από απόσταση αναφοράς για το σαρωτή 1

	Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)	Μέση Τιμή (m)	Τυπική Απόκλιση (m)
M	-0.0006	0.0090	0.0096	0.0032	0.0032
H	-0.0010	0.0081	0.0091	0.0028	0.0031
SH	-0.0010	0.0090	0.0010	0.0030	0.0032

Πίνακας 4. Βασικά στατιστικά διαφορών μετρημένης απόστασης από απόσταση αναφοράς για το σαρωτή 2

	Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)	Εύρος (m)	Μέση Τιμή (m)	Τυπική Απόκλιση (m)
M	-0.0018	0.0091	0.0109	0.0029	0.0034
H	-0.0031	0.0078	0.0109	0.0025	0.0032
SH	-0.0021	0.0088	0.0109	0.0030	0.0033

3.2 Μεταβολή της απόστασης σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας του σαρωτή (drift) (2^{ος} έλεγχος)

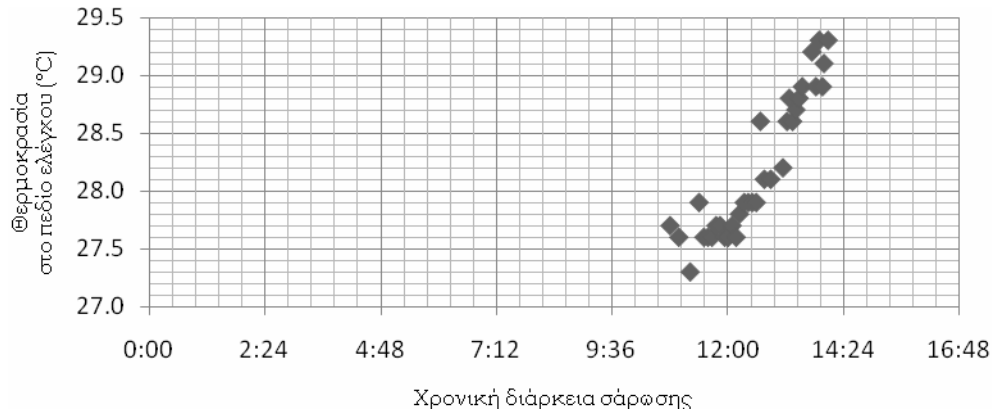
Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε σε έναν από τους σαρωτές Leica ScanStation2. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε εσωτερικό χώρο και πιο συγκεκριμένα στους χώρους του Εργαστηρίου Γεωδαισίας-Τοπογραφίας του Τ.Ε.Ι. Αθήνας. Σαρώθηκε ο σφαιρικός στόχος της Cyra, σε απόσταση περίπου 20m από το σαρωτή, για διάστημα λίγων ωρών και με χρονικό βήμα 5min, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Υπολογίστηκε η απόσταση από το κέντρο του στόχου για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Οι συντεταγμένες του κέντρου του στόχου υπολογίστηκαν χειροκίνητα με την εισαγωγή vertex (κέντρο σφαίρας) μέσω του λογισμικού Cyclone μετά από σάρωση του στόχου σε αναλύσεις 1x1cm και 1x1mm. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε καταγραφή των ατμοσφαιρικών συνθηκών και η θερμοκρασία στο πεδίο ελέγχου κυμάνθηκε από 27.5 έως 29.5°C (Διάγραμμα 4).

Πίνακας 5. Δεδομένα πειράματος

Σαρωτής	Στόχος	Ανάλυση σάρωσης (mm)	Χρονικό βήμα (λεπτά)	Συνολικός Χρόνος σάρωσης (ώρες)
Leica ScanStation2	Σφαιρικός	10 (υψηλή - H)	5	3:10
Leica ScanStation2	Σφαιρικός	1 (πολύ υψηλή - SH))	5	3:10

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



Διάγραμμα 4. Μεταβολές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της σάρωσης

Υπολογίστηκαν οι διαφορές στην απόσταση και για τις δύο αναλύσεις σάρωσης (H και SH) σε σχέση με το χρόνο (Διαγράμματα 5 και 6).



Διάγραμμα 5. Μεταβολές απόστασης για υψηλή ανάλυση (H) κατά τη διάρκεια της σάρωσης



Διάγραμμα 6. Μεταβολές απόστασης για πολύ υψηλή ανάλυση (SH) κατά τη διάρκεια της σάρωσης

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα, δεν υπάρχει συσχέτιση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι μεταβολές λόγω drift της απόστασης καθ' όλη τη διάρκεια των σαρώσεων κυμαίνονται σε ένα εύρος 2.4mm για την υψηλή ανάλυση και 1.4mm για την πολύ υψηλή ανάλυση. Η διακύμανση αυτή της απόστασης είναι μικρότερη της ακρίβειας του κατασκευαστή ($\pm 4\text{mm}$), επομένως οι μεταβολές αυτές θα μπορούσαν να ληφθούν υπ' όψιν μόνο σε εφαρμογές πολύ υψηλής ακρίβειας (Amann, 2001).

3.3 Ακρίβεια μέτρησης διευθύνσεων (3^{ος} έλεγχος)

Ο έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης διευθύνσεων βασίστηκε στη διαδικασία που περιγράφεται στις διεθνείς προδιαγραφές ISO/DIS 12857-2 για τα όργανα μέτρησης γωνιών (θεοδολίχων και total stations). Για την πραγματοποίηση του ελέγχου διαμορφώθηκε κατάλληλο πεδίο μετρήσεων. Το πεδίο ελέγχου υλοποιήθηκε πληρώντας τα παρακάτω κριτήρια (Gottwald, 2008):

- Η απόσταση των στόχων από το σαρωτή βρίσκονταν εντός του εύρους της ελάχιστης και μέγιστης απόστασης που μπορεί να μετρήσει ο σαρωτής.
- Οι στόχοι ήταν κατανεμημένοι πάνω από τον ορίζοντα.
- Ένας στόχος βρίσκονταν σε πολύ διαφορετικό ύψος από τους υπολοίπους (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο στόχος 5).

Πίνακας 6. Αποστάσεις οργάνου – στόχων

Στόχος	Απόσταση (m)
1	66.87
2	12.71
3	73.27
4	100.47
5	36.45

Η υλοποίηση του έγινε με τη χρήση πέντε σφαιρικών στόχων (cyra sphere targets) που τοποθετήθηκαν περιμετρικά του σαρωτή. Οι στόχοι κατανεμήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματίζουν σχεδόν κανονικό πεντάγωνο, ενώ οι αποστάσεις των στόχων από το σημείο στάσης του σαρωτή φαίνονται στον Πίνακα 6. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων, όπου κάθε σειρά περιλαμβάνει τρία πλήρη σετ παρατηρήσεων. Το πρώτο σετ αποτελείται από τη σάρωση των στόχων (1, 2, 3, 4, 5) και ολοκληρώνεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως (5, 4, 3, 2, 1). Τα δύο υπόλοιπα σετ παρατηρήσεων πραγματοποιούνται με την ίδια διαδικασία με χρονική καθυστέρηση 5 λεπτών μεταξύ τους. Όλες οι σαρώσεις των στόχων πραγματοποιήθηκαν με τη μέγιστη ανάλυση 1x1 mm.

Κατόπιν πραγματοποιήθηκε αυτόματη μοντελοποίηση των στόχων και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους για όλα τα σετ και όλες τις σειρές μετρήσεων. Υπολογίστηκαν οι γωνίες διεύθυνσης για κάθε στόχο και οι μέσοι όροι των διευθύνσεων για κάθε σετ μετρήσεων. Τέλος υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στους κανονισμούς ISO/DIS 12857-2 το τυπικό σφάλμα για τη μέτρηση διευθύνσεων σε κάθε

Τσακίρη Μ., Αραπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

σετ παρατηρήσεων και το τελικό σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων κατά ISO/DIS 12857-2 (Πίνακας 7).

Πίνακας 6. Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων κατά ISO/DIS 12857-2

Σετ παρατηρήσεων	Τυπικό σφάλμα S_i (cc)
1 ^ο	± 18 cc
2 ^ο	± 24 cc
3 ^ο	± 21 cc
4 ^ο	± 26 cc
Τελικό S_o: $S_o = \pm \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	± 22.5 cc

Η ακρίβεια που δίνουν οι κατασκευαστές για τον προσδιορισμό διευθύνσεων είναι ± 38 cc (± 3.8 mgon). Στα 4 σετ παρατηρήσεων, ο βαθμός ελευθερίας με τον οποίο προσδιορίζεται το αντίστοιχο a posteriori S_{oi} είναι 8. Τα αποτελέσματα και για τα 4 σετ, περνούν το test X^2 , για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

$$\frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} \leq \frac{X_{95\%}^2}{r} \rightarrow \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} \leq \frac{15.5}{8} \rightarrow \frac{S_{o,i}}{38^{cc}} \leq 1.9$$

Είναι φανερό ότι τόσο τα επιμέρους S_{oi} όσο και το τελικό S_o που υπολογίστηκε με βάση τη διαδικασία του ISO/DIS 12857-2 για γωνιομετρικά όργανα, είναι μέσα στο θόρυβο της μέτρησης. Επιπλέον, στην απόσταση των 100m, το $S_o = \pm 22.5$ cc αντιστοιχεί σε γραμμική μετατόπιση ± 3.5 mm, αποτέλεσμα συμβατό με την γραμμική ακρίβεια που δίνουν οι κατασκευαστές των ± 4 mm.

4. Συμπεράσματα

Η ακρίβεια των επίγειων σαρωτών laser, περιορίζεται όπως και σε όλα τα γεωδαιτικά όργανα, από αριθμό συστηματικών σφαλμάτων και ο μόνος τρόπος αξιολόγησης της αξιοπιστίας των μετρήσεων είναι μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης. Παρόλο που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία πολλοί τρόποι βαθμονόμησης των σαρωτών laser, η εφαρμογή τους δεν είναι πάντα εύκολη διότι δεν ακολουθείται τυποποιημένη διαδικασία ελέγχου δεδομένης της έλλειψης πρότυπων προδιαγραφών ISO για τα όργανα αυτά. Ο βασικός στόχος της εργασίας αυτής ήταν η χρήση απλών πειραματικών δοκιμών ως μια διαδικασία βαθμονόμησης όπου ελέγχεται ο προσδιορισμός μηκών και γωνιών βάσει των επίσημων διεθνών προδιαγραφών ISO για τα αντίστοιχα μεγέθη. Οι δοκιμές της ακρίβειας των μετρήσεων απόστασης σε σχέση με τις αποστάσεις αναφοράς έδειξαν σαφώς ότι τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές ακρίβειας του κατασκευαστή. Αντίστοιχα, οι δοκιμές ακρίβειας για τον προσδιορισμό γωνιακών σφαλμάτων έδωσαν αποτελέσματα συμβατά με τη ακρίβεια του κατασκευαστή.

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθός Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Βιβλιογραφία

- Αλεξίου, Α. «Εφαρμογή του Προτύπου ISO 17123-4 σε εσωτερική βάση. Δημιουργία ελέυκτης εξωτερικής βάσης μετρολογικού ελέγχου μηκών», Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Αθήνα, 2011.
- Amann, M-Ch., Bosch. T., Lescure. M., Myllyl, R., Riox, M. «Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement». Opt Eng 40 (1): 10 11-19, 2001.
- Amiri Parian, J. «Sensor Modelling, Calibration and Point Positioning with Terrestrial Panoramic Cameras». PhD dissertation, Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich), 2007.
- Amiri Parian, J. and Gruen, A., “Integrated laser scanner and intensity image calibration and accuracy assessment”. Proc. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”, Enschede, the Netherlands, 2005, September, 12 – 14.
- Beraldin, J.-A. “Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry – The Last Decade and Beyond”. Proc. XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey, July 12 – 23.
- Bohler, W., Bordas Vicent, M. and Marbs, A. “Investigating Laser Scanner Accuracy”, in 'The International Archives of ISPRS, Vol XXXIV (Part 5 / C 15), 2003, pp 696-701.
- Boehler, W. and Marbs, A. “Investigating Laser Scanner Accuracy”. Proc. XIXth CIPA Symposium at Antalya, 2003, Turkey, 30 Sept. – 4 Oct.
- Gottwald, R., “Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) – A Contribution to a Future ISO Standard”, Proc. FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden 14-19 June 2008
- Gordon, S.J. “Structural Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanners”. PhD thesis, 2005, Curtin University of Technology, Department of Spatial Sciences, Australia
- Gruen, A., Beyer, H.A. « System Calibration Through Self-Calibration». In: Gruen A, Huang ThS (eds.) Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Springer, Berlin, 2001, pp 163 – 193
- Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K., and Acevedo Pardo, C., “Terrestrial Laserscanning System Mensi GS100 - Accuracy Tests, Experiences and Projects at the Hamburg University of Applied Sciences”, Proc. 'The International Archives of the ISPRS', Vol XXXIV (Part 5 / W 16), 2004.
- Κοσμάς Χ, Μ Τσακίρη, Κ Τοκμακίδης, Κ Ανδρίτσος «Επίδραση της ανακλαστικότητας στις μετρήσεις σαρωτών Laser». Πρακτικά «Metrologia 2007», Θεσσαλονίκη, 2007, 19-20 Οκτώβρ.
- Lichti, D. «Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system». ISPRS J Photogramm and Remote Sens 61: 307 – 324, 2007.
- Lichti, D. D. and Gordon, S. J., “Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording”. Proc. of FIG Working Week. Athens, 2004, 22 – 27/05.
- Lichti, D.D. and Franke, J. “Self-Calibration of the IQSun 880 Laser Scanner”. Proc. 'Optical 3-D Measurement Techniques VII' (A Gruen and H Kahmen eds), Vol I, 2005, Vienna, Austria, pp 112-121.
- Lichti, D.D., Gordon, S.J. and Tipdecho, T., “Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks”, J. Surveying Engineering, Vol 131, No 4, 2005, pp 135-142.
- Lichti. D.D., Licht, M.G. «Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment». In: Proc. of ISPRS Commission V Symposium, 2007, Dresden, Germany, 25 – 27 September.
- Paakkari, J., “Evaluating the performance of optical 3-D measurement system”s. Surveying Science in Finland, 1994, Vol. 12, No. 1, pp. 3 – 12.
- Reshetyuk, Y., “Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning”. PhD thesis, 2009, Royal Institute of Technology (KTH), Dep. of Transport and Economics, Division of Geodesy, Sweden.
- Reshetyuk, Y., “Investigation of the Influence of Surface Reflectance on the Measurements with the Terrestrial Laser Scanner Leica HDS3000”, in 'Zeitschrift fur Vermessungswesen (ZfV)', Vol. 131, No. 2, 2006a, p. 96-103.
- Reshetyuk, Y., “Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering”. Proc. '3rd IAG & 12th FIG Symposium', 2006b, Baden (Austria).
- Rietdorf, A., Gielsdorf, R. and Grundig, L. “A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners”. Proc. 'INGEO 2004 and FIG Conf. on Engineering Surveying', 2004, Bratislava, Slovakia.
- Staiger, R., “The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS)”. In Proc. of FIG Working Week and GSDI-8, 2005, Cairo, Egypt, April 16 – 21.

Τσακίρη Μ., Αραμπατζή Ο., Παγούνης Β., Σταθάς Δ., Ανδριτσάνος Β.
Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των προδιαγραφών ISO