ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ GNSS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ RAMAN LIDAR

Μ. Τσακίρη[1], Α. Αργυρούλη[2], Α. Παπαγιάννης[2] Γ. Τσακνάκης[2]
1. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχ/κων, ΕΜΠ
2. Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, ΕΜΠ
e-mail: mtsakiri@central.ntua.gr, aargyrouli@gmail.com, apdlidar@central.ntua.gr, gtsaknakis@gmail.com

Περίληψη

Στη εργασία αυτή παρουσιάζεται μια διαδικασία βαθμονόμησης του σφάλματος της υγρής υστέρησης (wet zenith delay, WZD) όπως υπολογίζεται από μετρήσεις GNSS (Global Navigation Satellite Systems) και με τη χρήση μετρήσεων της κατακόρυφης κατανομής των υδρατμών από ένα υπεριώδες σύστημα Raman lidar. Περιγράφονται τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν στη συλλογή των δεδομένων GNSS από γεωδαιτικό δέκτη διπλής συχνότητας και μεγάλης ακρίβειας που είναι τοποθετημένος δίπλα στο μόνιμα εγκατεστημένο Raman lidar στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Οι μετρήσεις και των δύο συστημάτων έγιναν ταυτόχρονα, σε επαναλαμβανόμενα διαστήματα και πραγματοποιήθηκαν σε νυχτερινές ώρες με ανέφελο ουρανό. Περιγράφονται αναλυτικά η επεξεργασία τόσο των δεδομένων GNSS, όσο και των δεδομένων lidar προκειμένου να γίνει η εκτίμηση των τιμών του σφάλματος WZD και στη συνέχεια της εκτίμησης του βροχοποιήσιμου νερού (precipitable water vapor, PWV). Επίσης, γίνεται σύγκριση των εκτιμήσεων του WZD από τα δύο συστήματα και δίνεται η στατιστική αξιολόγησή τους

Abstract

The role of water vapour in the atmosphere is significant for the Earth's climate system. Atmospheric scientists have developed a variety of means to measure the vertical and horizontal distribution of water vapour. In this work two methods are implemented; GNSS (Global Navigation Satellite System) measurements and measurements from a Raman lidar system. The retrieval of wet delays in the troposphere using the above two methods is implemented for a number of days in the area of the university campus of NTUA. The retrieved wet zenith delays (WZD) from the two methods are statistically compared and it was shown that have a very good agreement (R^2=0.86) after corrections. WZDs derived from Raman lidar data can be used for documenting the water vapour heterogeneities and correcting GPS signal propagation delays in clear sky conditions.

Λέξεις-Κλειδιά: GNSS, Raman lidar, βαθμονόμηση, τροπόσφαιρα.

1. Εισαγωγή

Τα δορυφορικά (ηλεκτρομαγνητικά) σήματα των συστημάτων GNSS (Global Navigation Satellite Systems) επηρεάζονται λόγω της διαδρομής τους μέσα στην ατμόσφαιρα και συγκεκριμένα από την τροπόσφαιρα (H<1012 km) και την ιονόσφαιρα (50< H<1000 km), προκαλώντας χρονικές καθυστερήσεις. Αυτό γίνεται λόγω της επιβράδυνσής τους στην ταχύτητα διάδοσης και την καμπυλότητα της τροχιάς από την αλλαγής κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό.

Η τροπόσφαιρα είναι το μεταβλητού πάχους χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας. Η επίδραση της τροπόσφαιρας δημιουργεί το τροποσφαιρικό σφάλμα με αποτέλεσμα τη καθυστέρηση του δορυφορικού σήματος στη διαδρομή του. Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, πίεση και υγρασία, ή όπως αποκαλείται, από τον ξηρό παράγοντα και τον υγρό παράγοντα. Με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων (π.χ. Saastamoinen, 1972) και τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας, υπολογίζεται περίπου το 90% του σφάλματος. Το υπόλοιπο 10% οφείλεται στον υγρό παράγοντα (Wet Zenith Delay, WZD) και είναι δύσκολα μοντελοποιήσιμο (Kaplan & Hegarty, 2006, Leick, 2004).

Ο υπολογισμός της υγρής συνιστώσας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος γίνεται είτε με χρήση εμπειρικών μοντέλων, είτε με ολοκληρωματικές μεθόδους από απευθείας μετρήσεις (π.χ. ραδιοβολίσεις) και με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων καιρού NWM (Numerical Weather Models). Ο δεύτερος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μετρήσεων GNSS και προσδιορισμό των τροποσφαιρικών παραμέτρων κατά τη διαδικασία συνόρθωσης των μετρήσεων GNSS. Μέσω της διαδικασίας αυτής υπολογίζεται η τροποσφαιρική επίδραση από τους δορυφόρους εκπομπής που βρίσκονται στο ζενίθ του σημείου παρατήρησης. Στη συνέχεια, πρέπει να αναχθεί στην αντίστοιχη ζενίθια γωνία δέκτη προς δορυφόρο μέσω μιας συνάρτησης απεικόνισης (mapping function). Η πιο πρόσφατη προταθείσα από τη διεθνή βιβλιογραφία συνάρτηση απεικόνισης είναι η VMF (Vienna Mapping Function), η οποία χρησιμοποιεί αριθμητικά μοντέλα καιρού (NWM). Οι εξελίξεις αυτές επάγουν σημαντική βελτίωση στις επιλύσεις του εντοπισμού θέσης και κυρίως στον προσδιορισμό των υψομέτρων (Boehm et al., 2006, Tesmer et al,. 2007). Ωστόσο, έχει φανεί σε προηγούμενες μελέτες ότι μικρής κλίμακας ανομοιογένειες των υδρατμών δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν σωστά και μπορεί να επηρεάσουν τον προσδιορισμό του υψομέτρου με χρήση μετρήσεων GNSS σε μικρότερες χρονικές κλίμακες (Bock et al., 2001).

Υπό το πρίσμα αυτό, η καλύτερη προσέγγιση συνίσταται στη χρήση ραδιομέτρων (Water Vapour Radiometres) για τη μέτρηση των υδρατμών με υψηλή ακρίβεια με το μειονέκτημα του υψηλού κόστους τους (π.χ. Haefele et al., 2004). Μια εναλλακτική προσέγγιση συνίσταται στη χρήση μετρήσεων της κατακόρυφης κατανομής των υδρατμών από ένα υπεριώδες σύστημα Raman lidar.

Στη εργασία αυτή παρουσιάζεται μια σύγκριση των εκτιμήσεων της κατακόρυφης κατανομής των υδρατμών από μετρήσεις GNSS και από ένα υπεριώδες Raman lidar προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στον καλύτερο υπολογισμό του τροποσφαιρικού σφάλματος που επηρεάζει τον εντοπισμό θέσης. Η δομή της εργασίας είναι η εξής: η

ενότητα 2 παρουσιάζει εν συντομία τις βασικές αρχές των μετρήσεων υδρατμών από το σύστημα Raman lidar. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες συλλογής των δεδομένων GNSS από γεωδαιτικό δέκτη διπλής συχνότητας και μεγάλης ακρίβειας που είναι τοποθετημένος δίπλα στο μόνιμα εγκατεστημένο Raman lidar στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Οι μετρήσεις και των δύο συστημάτων έγιναν ταυτόχρονα, σε επαναλαμβανόμενα διαστήματα, διάρκειας 6-8 ωρών. Στην ενότητα 3 γίνεται επεξήγηση της επεξεργασίας τόσο των δεδομένων GNSS, όσο και των δεδομένων lidar προκειμένου να γίνει η εκτίμηση των τιμών του σφάλματος WZD και στη συνέχεια της κατακόρυφης κατανομής των υδρατμών. Γίνεται σύγκριση των εκτιμήσεων του σφάλματος WZD από τα δύο συστήματα και δίνεται η στατιστική αξιολόγησή τους. Τα συμπεράσματα της εργασίας παρουσιάζονται στην ενότητα 4.

2. Μετρήσεις με χρήση συστήματος Raman lidar

Η τεχνική lidar βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας laser στην ατμόσφαιρα και ακολούθως στην καταγραφή της οπισθοσκέδασής της από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, καθώς και στην μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή της δέσμης laser και τη λήψη του σήματος. Ο χρόνος αυτός προσδιορίζει την απόσταση μεταξύ του εκπομπού και του σκεδαστή.

Τα βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση του φωτός με τη δέσμη laser και τα συστατικά της ατμόσφαιρας είναι: απορρόφηση, φθορισμός, σκέδαση, εξασθένηση, οπισθοσκέδαση, ελαστική σκέδαση (σκέδαση Rayleigh, σκέδαση Mie), μη ελαστική σκέδαση (σκέδαση Raman), αποπόλωση. Εκμεταλλευόμενοι τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις του φωτός με την ύλη υπολογίζεται η κατακόρυφη κατανομή των σωματιδίων κάνοντας τη σύμβαση ότι η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία που καταγράφεται προκύπτει από απλή σκέδαση (Weitkamp, 2005).

Από την άλλη πλευρά, η τεχνική Raman lidar στηρίζεται στη μη ελαστική (ανελαστική) σκέδαση Raman από τα μοριακά συστατικά της ατμόσφαιρας λόγω των περιστροφικών και δονητικών μεταπτώσεων των μορίων. Έτσι, η αλλαγή στο μήκος κύματος της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας οφείλεται στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ της αρχικής και τελικής κατάστασης του συμμετέχοντος μορίου – και είναι χαρακτηριστική για κάθε οπισθοσκεδάζον μόριο (π.χ. ατμοσφαιρικό άζωτο, υδρατμοί, όζον, κλπ.). Έτσι, η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας Raman, χαρακτηρίζει τη συγκέντρωσή του από τα σκεδάζοντα μόρια της ατμόσφαιρας. Η μέθοδος αυτή απαιτεί συστήματα laser μεγαλύτερης ισχύος συγκριτικά με άλλα συμβατικά συστήματα lidar, γιατί το οπτικό σήμα που επιστρέφει είναι εξαιρετικά ασθενές, λόγω της μικρής ενεργούς διατομής της σκέδασης Raman (Weitkamp, 2005).

Στη διάταξη Raman-lidar του ΕΜΠ ως πηγή laser χρησιμοποιείται ένα παλμικό laser στερεάς κατάστασης Nd:YAG, το οποίο αρχικά εκπέμπει ακτινοβολία στα 1064 nm με ενέργεια 850 mJ/παλμό, με επαναληπτικότητα 10 Hz. Η χρήση κρυστάλλων KDP επιτρέπει την παραγωγή της $2^{ης}$ και της $3^{ης}$ αρμονικής συχνότητας του laser (532 nm και 355 nm, αντίστοιχα), με ενέργεια ανά παλμό της τάξης των 240 και 350 mJ, αντίστοιχα. Η συλλεγόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από ένα οπτικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 300 mm,

διαχωρίζεται οπτικά με χρήση διχρωϊκών κατόπτρων και φίλτρων συμβολής και ανιχνεύεται από φωτοπολλαπλασιαστές-PMT (355-407-532-607 nm) και φωτοδίοδο χιονοστιβάδας-APD (1064 nm). Τα σήματα εξόδου από τους PMT και APD ψηφιοποιούνται από πολυκαναλικούς ψηφιοποιητές (12-bit) και καταγράφονται από έναν κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (Kokkalis et al., 2012).

Εικόνα 1. Το σύστημα Raman-lidar του ΕΜΠ

3. Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε εξ'ολοκλήρου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, όπου είναι μόνιμα εγκατεστημένο το σύστημα Raman-lidar του ΕΜΠ (κτίριο Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών-ΣΕΜΦΕ). Στο δώμα του κτιρίου και πολύ κοντά στη θέση όπου εξέχει ο οπτικός άξονας του κυρίως τηλεσκοπίου του συστήματος, τοποθετήθηκε γεωδαιτικός δέκτης GNSS, διπλής συχνότητας προκειμένου να συλλέξει δεδομένα την ίδια χρονική περίοδο με το lidar (Εικ. 2). Το συγκεκριμένο πεδίο έχει ανοιχτό ορίζοντα χωρίς σημαντικά εμπόδια, μεγάλου ύψους. Οι δέκτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι Leica 1200+ και Trimble R8 GNSS/R6/5800 με τις αντίστοιχες γεωδαιτικές τους κεραίες.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές ημέρες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Ο χρόνος έναρξης και λήξης αναφέρεται σε χρόνο UTC (Coordinated Universal Time). Οι μετρήσεις GNSS είχαν μέση διάρκεια 12 hr για κάθε ημέρα παρατήρησης και οι μετρήσεις του Raman-lidar είχαν αντίστοιχα μέση διάρκεια 2-4 hr. Να σημειωθεί ότι για όλες τις ημέρες του παρακάτω πίνακα έγιναν μετρήσεις και με τα δύο συστήματα. Ωστόσο για τις ημέρες που υπήρχε νεφοκάλυψη οι μετρήσεις με το Raman-lidar δεν χρησιμοποιήθηκαν στη σύγκριση και αυτό δηλώνεται στον παρακάτω πίνακα με την ένδειξη N/A.

Πίνακας 1. Ημερολόγιο συλλογής δεδομένων

Τεχνική	Ημερομηνία	Έναρξη (hh:mm:ss)	Λήξη (hh:mm:ss)
GNSS	02/11/2015 (DOY 306)	12:36:20	22:00:00
Raman-lidar		16:41:00	18:40:00
GNSS	15/11/2015 (DOY 319)	12:19:00	18:12:50
Raman-lidar		N/A	N/A
GNSS	19/11/2015 (DOY 323)	12:15:00	21:10:00
Raman-lidar		15:56:00	17:56:00
GNSS	02/02/2016 (DOY 033)	15:33:00	0:55:15
Raman-lidar		16:33:00	18:36:00
GNSS	03/02/2016 (DOY 034)	15:10:00	0:34:00
Raman-lidar		16:36:00	18:36:00
GNSS	16/02/2016 (DOY 047)	11:05:00	20:21:00
Raman-lidar		N/A	N/A
GNSS	18/02/2016 (DOY 049)	11:48:00	21:03:00
Raman-lidar		N/A	N/A
GNSS	19/02/2016 (DOY 050)	16:51:00	23:59:45
Raman-lidar		20:23:00	21:38:00
GNSS	02/03/2016 (DOY 062	14:57:15	01:18:45
Raman-lidar		16:52:30	18:56:32

Εικόνα 2. Θέση του γεωδαιτικού δέκτη GNSS

3.1 Επεξεργασία δεδομένων GNSS

Η επίλυση των παρατηρήσεων GNSS έγινε με την τεχνική του ακριβούς απόλυτου προσδιορισμού θέσης (Precise Point Positioning, PPP) και με χρήση του λογισμικού GIPSY v.6.3 (Zumberge et al., 1997). Χρησιμοποιήθηκαν εφημερίδες ακριβείας και διορθώσεις των δορυφορικών χρονομέτρων από την IGS (International GNSS Service). Ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό θέσης έγινε και ο προσδιορισμός των τροποσφαιρικών παραμέτρων (π.χ. WZD). Η γωνία αποκοπής στις μετρήσεις ήταν ίση με 7 μοίρες και το a priori τυπικό σφάλμα των παρατηρήσεων φάσης ήταν 10 mm.

Η τροποσφαιρική επίδραση ενός σήματος υπολογίζεται από τα διάφορα μοντέλα, αρχικά ως ίση με αυτή που προέρχεται από δορυφόρους εκπομπής που βρίσκονται στο ζενίθ του σημείου παρατήρησης και στη συνέχεια ανάγεται στην αντίστοιχη ζενίθια γωνία δέκτη προς

δορυφόρο μέσω μιας συνάρτησης απεικόνισης (mapping function). Μια από τις πιο γνωστές και ακριβείς συναρτήσεις απεικόνισης η οποία χρησιμοποιεί αριθμητικά μοντέλα καιρού (Numerical Weather Models) είναι η VMF (Vienna Mapping Function) η οποία χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση των δεδομένων της εργασίας αυτής (Boehm et al., 2006).

Για την μοντελοποίηση της υγρής υστέρησης λόγω τροπόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε φίλτρο Kalman (random walk με χρονική περιορισμό 5 min και σταθερή τιμή απόκλισης στο ZWD ίση με 500 mm και a priori τυπικό σφάλμα 0.5mm/√h), όπως αναφέρεται στον Kouba (2008).

Για την εκτίμηση του βροχοποιήσιμου νερού (Precipitable Water Vapour, PWV) από την υγρή υστέρηση (ZWD) εφαρμόζεται η διαδικασία των Bevis et al. (1992). Συγκεκριμένα, η υγρή υστέρηση μετατρέπεται σε PWV με χρήση του παράγοντα Π, ο οποίος είναι αδιάστατος, δηλαδή :

$$PWV = ZWD \cdot \Pi \qquad (1)$$

όπου

$$\Pi^{-1} = 10^{-6}\ \rho R_V \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2\right) \qquad (2)$$

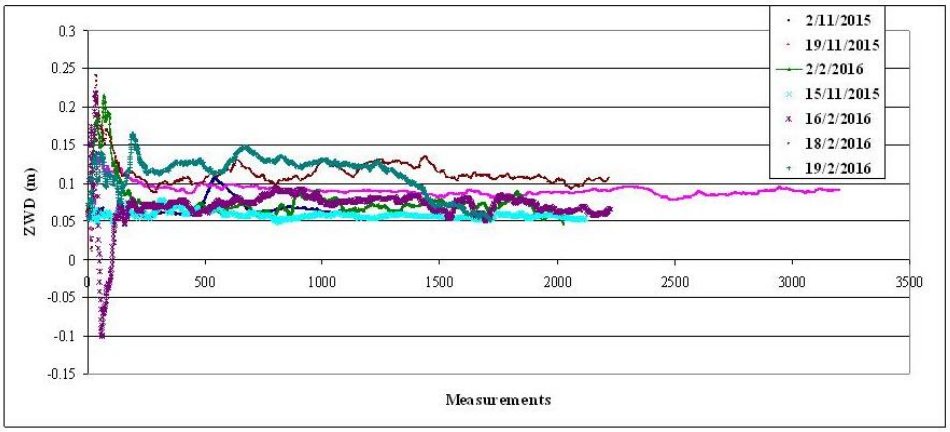
k'_2, k_3 είναι φυσικές σταθερές, ρ είναι η πυκνότητα του υγροποιημένου νερού, Rv είναι η σταθερά των υδρατμών νερού και Tm είναι η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας όπως ορίζεται από τους Askne and Nordius (1987). Σε πολλές χώρες η τιμή της παραμέτρου T_m ορίζεται από μεγάλο αριθμό ραδιοβολίσεων.

Στην Εικόνα 3 δίνεται η εκτίμηση του σφάλματος ZWD ανά ημέρα παρατήρησης. Παρατηρείται ότι οι πρώτες εποχές (περίπου 150-200) σε όλες τις ημέρες παρατηρήσεων εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις, που οφείλεται, κυρίως, στην συμπεριφορά του φίλτρου Kalman προκειμένου να επιτευχθεί σύγκλιση και σταθεροποίησή του. Η μέση τιμή των εκτιμήσεων της ZWD και το τυπικό της σφάλμα (σε m) για καθεμία σειρά παροσυιάζονται στον Πίνακα 2.

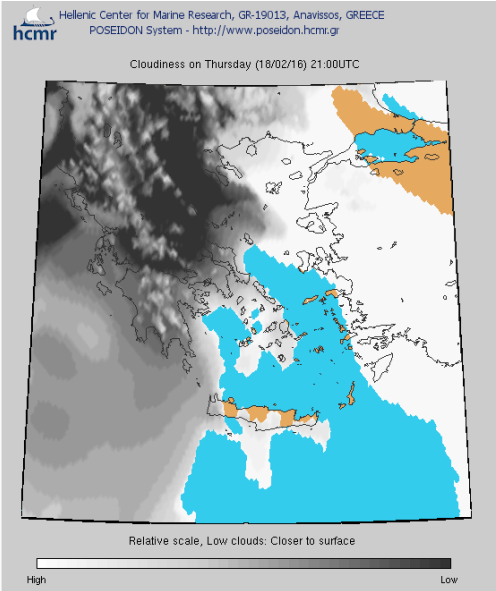
Πίνακας 2. Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα των εκτιμώμενων τιμών ZWD (Μετρήσεις GNSS και Raman lidar)

Ημερομηνία	**Μέση τιμή (m)**		**Τυπικό σφάλμα (m)**	
	GNSS	**Raman Lidar**	**GNSS**	**Raman Lidar**
02 /11/2015	0.0954	0.0898	0.0035	0.0032
15 /11/2015	0.0582	N/A	0.0047	N/A
19/11/2015	0.0896	0.1041	0.0082	0.0066
02/02/2016	0.0760	N/A	0.0023	N/A
03/02/2016	0.0863	0.1037	0.0021	0.00198
16/02/2016	0.0707	N/A	0.0024	N/A
18/02/2016	0.1123	N/A	0.0180	N/A
19/02/2016	0.1125	0.1302	0.0241	0.0023
02/03/2016	0.0805	0.1042	0.0081	0.0054

Οι εκτιμώμενες τιμές της υγρής υστέρησης ZWD για την ημερομηνία 18/02/2016 (και παρομοίως για τις 19/02/2016) παρατηρείται ότι είναι υψηλότερες (της τάξης των 40 cm) από τις προηγούμενες ημέρες, καθόσον υπήρχε έντονη νεφοκάλυψη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως φαίνεται και στην Εικ. 4.



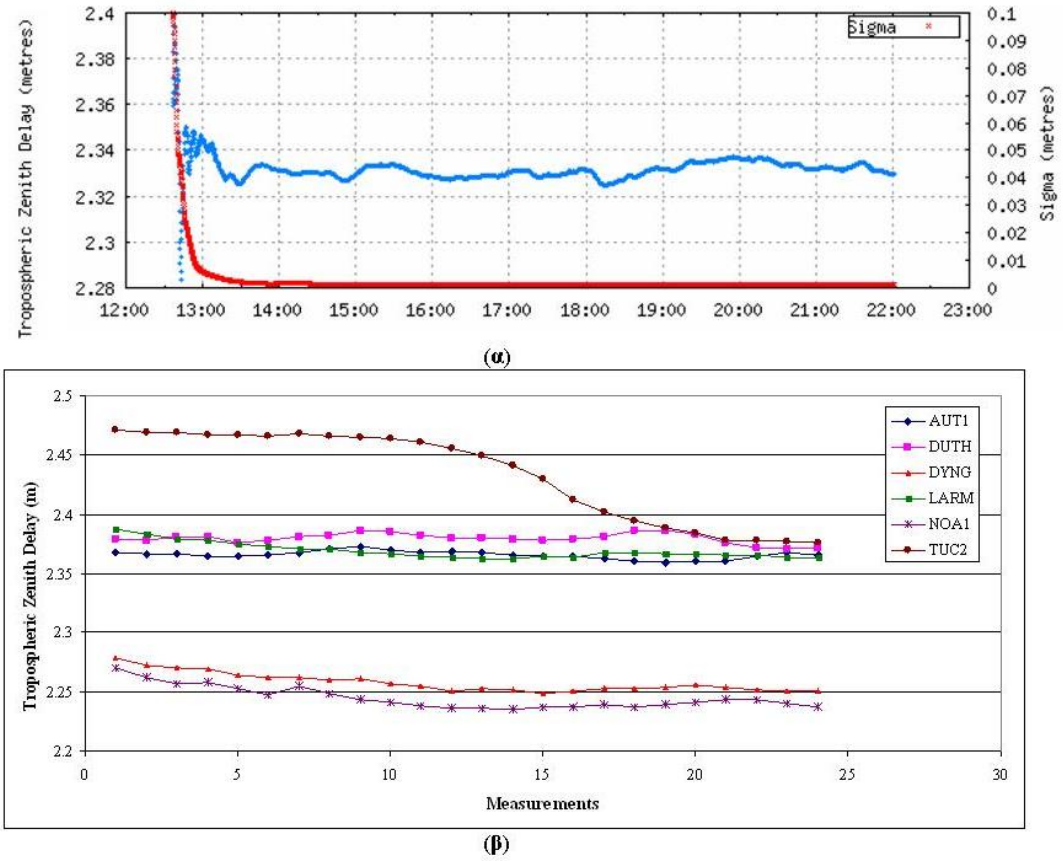
Εικόνα 3. Μέτρηση της υγρής υστέρησης ZWD ανά ημέρα παρατήρησης με τον δέκτη GNSS



Εικόνα 4. Νεφοκάλυψη για 18/02/2016, 21:00 UTC (poseidon.hcmr.gr)

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εκτίμησης του συνολικού τροποσφαιρικού σφάλματος (TZD) για την ημέρα 16/02/2016. Συγκεκριμένα, στην Εικ. 5(α) φαίνεται η εκτίμηση του σφάλματος και η αντίστοιχη αβεβαιότητά της (σε m), όπως έχει προκύψει από τα δεδομένα GNSS στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (ΕΜΠ). Στην Εικ. 5(β) παρουσιάζεται η εκτίμηση του ίδιου σφάλματος από μετρήσεις των μόνιμων GNSS σταθμών της Ελλάδας που ανήκουν στο δίκτυο EUREF (European Reference Frame Permanent Network), και συγκεκριμένα των σταθμών AUT1 (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης), DYNG (ΕΜΠ, Διόνυσος), DUTH (Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη), LARM (Λάρισα), NOA1 (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθήνας), TUC2 (Πολυτεχνική Σχολή, Χανιά). Τα

αποτελέσματα των δεδομένων ΕΜΠ παρουσιάζουν οπτικά ομοιότητες με τα αποτελέσματα των σταθμών DUTH, LARM, AUT1 και με τις διαφορές τους να κυμαίνονται στα 3-5cm. Παρόλο που οι σταθμοί DYNG, NOA1 βρίσκονται στην Αθήνα, οι εκτιμήσεις σους παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφορές με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων στο ΕΜΠ (διαφορές της τάξης των 10 cm). Οι διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι η επίλυση των δεδομένων στο ΕΜΠ έγινε με την τεχνική PPP, ενώ για τις εκτιμήσεις της Εικ. 5(β) έγινε επίλυση μετρήσεων δικτύου με τεχνικές σχετικού εντοπισμού θέσης.



Εικόνα 5. Υπολογισμός σφάλματος TZD(m) για 02/11/2015 από (α) μετρήσεις GNSS ΕΜΠ (β) μετρήσεις σταθμών EUREF

3.2 Επεξεργασία δεδομένων Raman lidar

Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία από το ατμοσφαιρικό άζωτο και τους υδρατμούς, που ανιχνεύεται στα 387 και 407 nm, χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της κατακόρυφης κατανομής του λόγου ανάμειξης μάζας των υδρατμών m(z) στην τροπόσφαιρα (Mamouri et al., 2007):

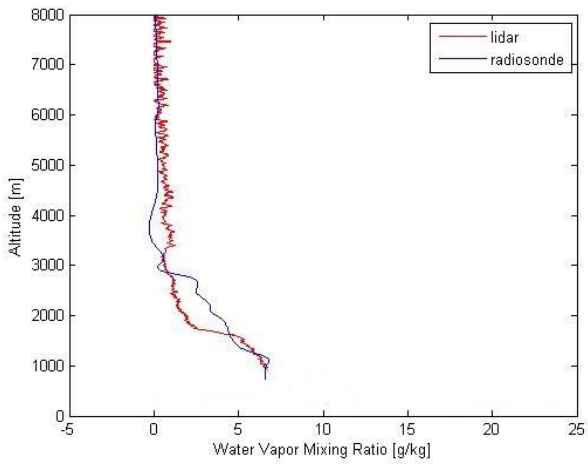
$$m(z) = K_m \frac{P_{\lambda_{H_2O}}(Z)}{P_{\lambda_{N_2}}(Z)} \times \frac{\exp\{-\int_o^z [\alpha^{aer}_{\lambda_{N_2}}(\xi) + \alpha^{mol}_{\lambda_{N_2}}(\xi)]d\xi\}}{\exp\{-\int_o^z [\alpha^{aer}_{\lambda_{H_2O}}(\xi) + \alpha^{mol}_{\lambda_{H_2O}}(\xi)]d\xi\}} \quad (3)$$

όπου, K_α είναι η σταθερά του συστήματος Raman lidar, $P_{\lambda H2O}$ και $P_{\lambda N2}$ είναι τα ανιχνευόμενα σήματα lidar στα 407 και 387 nm, αντίστοιχα, και $a_{\lambda N2}$ και $a_{\lambda H2O}$ είναι οι συντελεστές εξασθένησης της ατμόσφαιρας στα 407 και 387 nm, αντίστοιχα από τα αιωρούμενα σωματίδια (aer) και τα μόρια (mol).

Η υγρή υστέρηση (ZWD) ZWD προκύπτει από την αναλογία ανάμειξης μάζας των υδρατμών $m(z)=r_{H2O}$ που ανακτήθηκε από το σύστημα Raman lidar με βάση τη σχέση (Bosser et al. 2010):

$$\mathrm{ZWD} = \int \frac{r_{\mathrm{H_2O}}(z)}{\varepsilon + r_{\mathrm{H_2O}}(z)} \frac{P(z)}{T(z)} \cdot \left(k_2' + \frac{k_3}{T(z)}\right) \mathrm{d}s \quad (4)$$

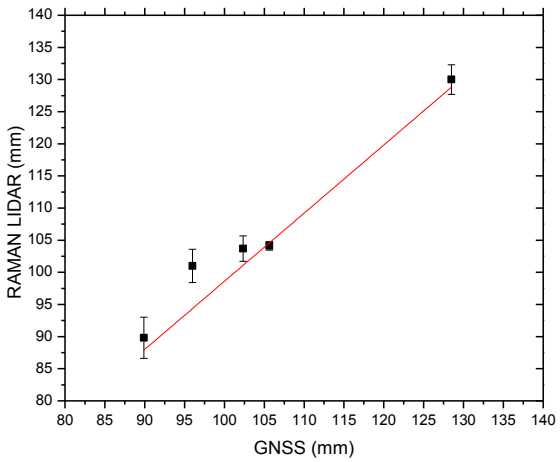
όπου P(z) και T(z) είναι αντίστοιχα η πίεση και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στο ύψος z, και k'_2 = 16,52 K hPa^{-1}και k3=377,6 K^2 hPa^{-1}, είναι σταθερές διαθλαστικότητας της ατμόσφαιρας στις συχνότητες του GPS (Davis et al., 1985), αντίστοιχα. Τέλος, ε = 0.622 είναι ο λόγος της μοριακής μάζας του ξηρού αέρα προς αυτής των υδρατμών. Επιπλέον, η τιμή της συνολικής ποσότητας του βροχοποιήσιμου νερού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πάλι τη σχέση (1). Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάκτησης της αναλογίας ανάμειξης μάζας των υδρατμών από μετρήσεις ραδιοβόλισης και Raman lidar στις 19 02 2016.



Εικόνα 6. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάκτησης της αναλογίας ανάμειξης μάζας των υδρατμών από μετρήσεις ραδιοβόλισης και Raman lidar (19 02 2016)

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των δεδομένων της υγρής υστέρησης (ZWD) όπως καταγράφηκαν από τις τεχνικές GNSS και Raman lidar, έδειξε ότι η τεχνική GNSS υποεκτιμά την υγρή υστέρηση περίπου κατά 16 mm.



Εικόνα 7. Συσχέτιση των μετρήσεων της υγρής υστέρησης (ZWD) όπως μετρήθηκε με τις τεχνικές GNSS και Raman lidar, ύστερα από διόρθωση των δεδομένων GNSS με τη σταθερή τιμή διόρθωσης των 16 mm

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η συσχέτιση (R^2=0.86) των μετρήσεων της υγρής υστέρησης (ZWD) όπως μετρήθηκε με τις τεχνικές GNSS και Raman lidar, ύστερα από διόρθωση των δεδομένων GNSS με τη σταθερή τιμή διόρθωσης των 16 mm και απόρριψης της μέτρησης Raman lidar στις 02/02/2016 (λόγω μικρής νέφωσης και υψηλού σωματιδιακού φόρτου στην κατώτερη τροπόσφαιρα). Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθόσον τα δύο συστήματα συλλέγουν μετρήσεις με μικρές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, το σύστημα Raman-lidar παρέχει μετρήσεις κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, ενώ η κεραία GPS συλλέγει δεδομένα μέσα σε ένα κώνο από το ζενίθ μέχρι τη γωνία αποκοπής που ορίζει ο χρήστης (εδώ είχε οριστεί στις 7 μοίρες). Επίσης, υπάρχουν σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν τις εκτιμήσεις ZWD από μετρήσεις GNSS, όπως πολλαπλών διαδρομών (multipath) και λόγω του κέντρου φάσεως της κεραίας (phase centre variations), παρότι ήταν γεωδαιτική αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων.

Περαιτέρω σφάλματα μπορεί να σχετίζεται με την επεξεργασία των δεδομένων GNSS και συγκεκριμένα με το τροποσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Ειδικά, το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις υψηλής συχνότητας δεν μπορούν να εκτιμηθούν σωστά, μπορεί να υποδηλώνει ότι το μοντέλο Kalman (random walk) που χρησιμοποιήθηκε με χρονική περιορισμό 5 min και σταθερή τιμή απόκλισης στο ZWD ίση με 500 mm και a priori τυπικό σφάλμα 0.5 mm/√h είναι κάπως απαισιόδοξο. Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στα αποτελέσματα όταν μεταβλήθηκαν οι a priori τιμές. Αυτό συνάδει και με τα αποτελέσματα των Bosser et al. (2010). Η ρύθμιση των παραπάνω παραμέτρων του στοχαστικού μοντέλου της τροποσφαιρικής καθυστέρησης δεν είναι απλή υπόθεση και

επηρεάζεται από την παρουσία και άλλων σφαλμάτων που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν (π.χ. multipath).

Επειδή, οι μικρής κλίμακας ανομοιογένειες των υδρατμών δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν σωστά με χρήση μετρήσεων GNSS και επηρεάζεται έτσι ο προσδιορισμός των υψομέτρων για σύντομης χρονικής διάρκειας μετρήσεις (3-6 hr), τότε έχει προταθεί να χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις ZWD όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις Raman-lidar κατά την επεξεργασία των δεδομένων GNSS (Bosser et al., 2010). Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές υπολογισμού υψομέτρων σε γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές (π.χ. δίκτυα παρακολούθησης κατακόρυφων μετακινήσεων τεχνικών έργων).

4. Συμπεράσματα

Στη εργασία αυτή παρουσιάστηκε η μεθοδολογία υπολογισμού του σφάλματος της υγρής υστέρησης (WZD) από πειραματικά δεδομένα μετρήσεων GNSS και μετρήσεων από ένα υπεριώδες σύστημα Raman lidar. Τα αποτελέσματα ελήφθησαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε βραχύ χρονικό διάστημα (της τάξης των 4 hr), κυρίως για το σύστημα Raman lidar, και επομένως, θα πρέπει να θεωρηθεί ως μελέτη περίπτωσης δεδομένου ότι δεν έγινε στατιστικά σημαντική χρονοσειρά μετρήσεων. Η χρήση των μετρήσεων Raman lidar αποτελεί μια ακριβέστερη προσέγγιση συγκριτικά με τη χρήση τεχνικών μικροκυμάτων, αλλά περιορίζεται με σαφείς προϋποθέσεις ανέφελου ουρανού και κυρίως νυχτερινών παρατηρήσεων. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι η τεχνική GNSS υποεκτιμά την υγρή υστέρηση περίπου κατά 16 mm, ενώ η τεχνική Raman lidar την υπερεκτιμά κατά ~10 % (λόγω ύπαρξης νεφών, αλλά και υψηλού σωματιδιακού φόρτου).

Βιβλιογραφία

Askne J. and Nordius H., “Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data” Radio Science 22(3):379–386, 1987.

Bevis M., Bussinger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. “GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System”, J. Geophys. Res. 97(D14):15787–15801, 1992.

Bock O., Tarniewicz J., Thom C. J., Pelos J. “Effect of small-scale atmospheric inhomogeneity on positioning accuracy with GPS”. Geophys. Res. Lett. 28(11):2289–2292, 2001.

Boehm J., Werl B., Schuh, H. “Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data” J. Geophys. Res. 111:B05406, 2006 doi:10.1029/2005JB003629.

Bosser P., Bock O., Thom C. Pelos J., Willis P., “A case study of using Raman lidar measurements in high-accuracy GPS applications”, J. Geod. 84:251-265, 2010.

Haefele P., Martin L., Becker M., Brockmann E., Morland J, Nyeki S., Malttzler C, Kirchner M. “ Impact of radio water vapor measurements on troposphere and height estimates by GPS. Proc. 17th Int. Technical Meeting of ION, 21-24 Sept., 2004, Long Beach, CA, USA.

Kaplan, E., Hegarty, C. J. “Understanding GPS, Principles and Applications” Artech House Inc., Norwood Ma, USA, 2006.

Kokkalis, P., A. Papayannis, R. E. Mamouri, G. Tsaknakis, V. Amiridis “The EOLE lidar system of the National Technical University of Athens” Proc. 26th Int. Laser Radar Conference (26th ILRC), 25-29 June 2012, Porto Heli, Greece, pp629-632.

Kouba J. “Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)”. J Geod 82:193–205, 2008, doi:10.1007/s00190-007-0170-0.

Leick, A. “GPS Satellite Surveying” 3d Edition, 2004, John Wiley & Sons Inc., N J, USA.

Mamouri R.E., Papayannis A., Tsaknakis G. and Amiridis V. “ 6-month ground-based water vapour Raman lidar measurements over Athens, Greece and system validation”, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, **9**, 3546-3548, 2006.

Saastamoinen J. “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites” in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B.H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington, D.C., 1972.

Tesmer V., Boehm J., Heinkelmann R., Schuh H., “Effect of different tropospheric mapping functions on the TRF, CRF and position time-series estimated from VLBI”, J Geodesy 81:409–421, 2007.

Weitkamp C. “Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere”, 2005 Springer, pp 456.

Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb F.H. “Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks”. J. Geophys. Res., 102(B3):5005-5017, 1997.