

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ****Πάνος Ψιμούλης και Στάθης Στείρος**

Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωδαιτικών Εφαρμογών

Τμήμα Πολ. Μηχ., Πανεπιστήμιο Πατρών

Πάτρα

email: ppsimo@upatras.gr; stiros@upatras.gr

**Περίληψη**

Ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός (RTS) είναι ένα νέο γεωδαιτικό όργανο με δυνατότητα αυτόματης παρακολούθησης κινούμενου στόχου (ανακλαστήρα) και καταγραφή με υψηλή συχνότητα (5-8Hz) και ακρίβεια καλύτερη από χιλιοστό. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα μιας από τις πρώτες εφαρμογές που έχουν γίνει διεθνώς στη μέτρηση ταλαντώσεων σχετικά δύσκαμπτων (κύρια ιδιοσυχνότητα >1Hz) μεταλλικών κατασκευών με RTS. Πρόκειται για πεζογέφυρα συνολικού μήκους 62m και κεντρικό άνοιγμα μήκους 41m. Η δικτυωτή μεταλλική αυτή γέφυρα βρίσκεται στην Αθήνα, στην Εθνική Οδό Αθηνών-Λαμίας. Για την διεξαγωγή της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν δύο RTS καθώς και GPS-επιταχυνσιογράφος, ώστε να υπάρχει ανεξάρτητος έλεγχος και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Οι ανακλαστήρες και οι άλλοι σένσορες τοποθετήθηκαν στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος της γέφυρας. Τα RTS τοποθετήθηκαν σε σταθερό έδαφος για να καταγράψουν τις ταλαντώσεις της γέφυρας που προκλήθηκαν από ποικίλου τύπου βηματισμούς και συντονισμένα άλματα περίπου 10 φοιτητών του Τμήματος μας. Η προκαταρκτική επεξεργασία και φασματική ανάλυση των μετρήσεων έδειξε ότι η δυναμική κατακόρυφη ταλάντωση της γέφυρας είχε εύρος 4-5mm ενώ η κύρια συχνότητα που εντοπίστηκε ήταν 4.3 Hz. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν από τις ανεξάρτητες μετρήσεις των υπόλοιπων οργάνων και είναι συμβατά με τις εκτιμήσεις του μελετητή του έργου κ. Γ. Σεκάρα, τον οποίο και ευχαριστούμε θερμά για την συνεργασία και βοήθειά του.

**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η εξέλιξη των γεωδαιτικών οργάνων και κυρίως του GPS έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση του, στην παρακολούθηση των μετακινήσεων εύκαμπτων κατασκευών με στόχο των προσδιορισμό των μετακινήσεων και των κύριων ιδιοσυχνοτήτων (Ogaja et al., 2003; Roberts et al., 2004; Brownjohn et al., 2004; Li et al., 2006). Οι εφαρμογές του εστιάζονται σε κατασκευές εύκαμπτες όπως καλωδιωτές γέφυρες (Roberts et al., 2004), ψηλά κτίρια (Li et al., 2006), δηλαδή σε κατασκευές που χαρακτηρίζονται από κύριες ιδιοσυχνότητες <1Hz. Όσο αφορά τις δύσκαμπτες κατασκευές, η παρακολούθησή τους στηρίζεται σε επιταχυνσιογράφους και σένσορες καταγραφών τάσεων-παραμορφώσεων (μηκυνσιόμετρα κλπ.).

Την τελευταία πενταετία ένα νέο γεωδαιτικό όργανο, ο Ρομποτικός Γεωδαιτικός Σταθμός ή Ρομποτικός Θεοδόλιχος (RTS) εισήχθη στην παρακολούθηση μετακινήσεων κτιρίων και εδάφους κυρίως κατά την διάρκεια κατασκευής σηράγγων και ορυχείων. Το RTS είναι όμοιο με το κοινό θεοδόλιχο με κύριο επιπρόσθετο χαρακτηριστικό την δυνατότητα εντοπισμού στόχων καθώς και την παρακολούθηση και ταυτόχρονη καταγραφή πιθανής κίνησης. Η λειτουργία του στηρίζεται σε μία δέσμη laser η εκπέμπεται, ανακλάται στο ανακλαστήρα και επανέρχεται στο ρομποτικό θεοδόλιχο ο οποίος στην συνέχεια με την βοήθεια ενός εσωτερικού Η/Υ υπολογίζει τις πολικές συντεταγμένες του στόχου σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Το RTS, χάρη στη λειτουργία αλλά και την υψηλή συχνότητα καταγραφής (μέχρι 6-8 Hz) αρχίζει πλέον να εφαρμόζεται στην παρακολούθηση δυναμικών μετακινήσεων κατασκευών όπως γέφυρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σιδηροδρομική γέφυρα Γοργοποτάμου (Psimoulis and Stiros, 2007).

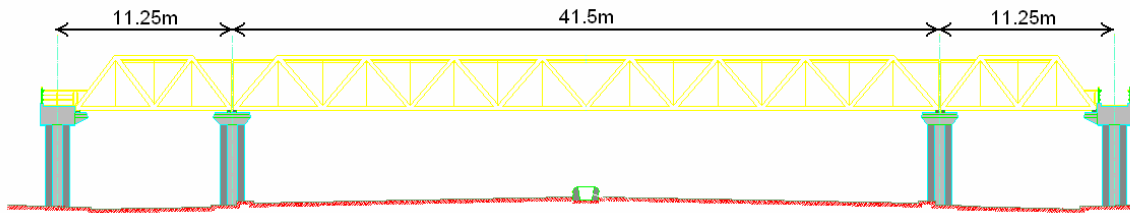
Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια καταγραφής της κίνησης μίας σχετικά δύσκαμπτης γέφυρας, η οποία αποτελεί κομμάτι μία γενικότερης έρευνας που γίνεται στο Εραστήριο Γεωδαισίας του Πανεπιστημίου Πατρών με στόχο την διερεύνηση της ακρίβειας των GPS-RTS και την εφαρμογή τους στην παρακολούθηση κατασκευών (Nickitopoulou et al., 2006; Psimoulis and Stiros, 2007; 2008; Psimoulis et al., 2008). Πρόκειται για μία μεταλλική δικτυωτή πεζογέφυρα μήκους 62m που βρίσκεται στην Αθήνα και με βάση τον σχεδιασμό της, η ελάχιστη κύρια κατακόρυφη ιδιοσυχνότητα δεν προβλέπεται να είναι μικρότερη από 3 Hz. Στόχος των μετρήσεων ήταν να προσδιοριστούν οι συχνότητες και το εύρος της κίνησης της γέφυρας. Για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εκτός από το RTS χρησιμοποιήθηκαν δέκτες GPS με συχνότητα καταγραφής 10 Hz και επιταχυνσιογράφος, ώστε τα αποτελέσματα να συγκρίνονται με αυτά ανεξάρτητων μετρήσεων και να ελέγχονται για την ορθότητά τους.

## 2. ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ ΕΘΝΙΚΗΣ ΟΔΟΥ ΑΘΗΝΩΝ-ΛΑΜΙΑΣ

Η μεταλλική πεζογέφυρα βρίσκεται στην εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας (κοντά στη διασταύρωση με την οδό Π. Ράλλη). Η γέφυρα έχει συνολικό μήκος 62m και αποτελείται από τέσσερις πυλώνες οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία δημιουργούν τρία δικτυωτά μεταλλικά ανοίγματα (σχ.1, 2): δύο ακριανά (μήκους 11.25m) και ένα κεντρικό (μήκους 41.5m). Η γέφυρα σχεδιάστηκε με βάση τον κανονισμό του EC-1, EC-3 και στόχο να εμφανίζει ιδιοσυχνότητες μεγαλύτερες από 3 Hz και μέγιστο βέλος κάμψης 3cm.



Σχήμα 1: Μεταλλική πεζογέφυρα Εθνικής οδού Αθηνών-Λαμίας.



Σχ. 2: Όψη μεταλλικής πεζογέφυρας. Η γέφυρα είναι συμμετρική και αποτελείται από τρία ανοίγματα: δύο ακριανά μήκους 11.25m και ένα κεντρικό μήκους 41.5m.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στόχος της μελέτης ήταν να προσδιοριστεί η κατακόρυφη μετακίνηση του κεντρικού ανοίγματος και οι αντίστοιχες συχνότητες. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν οι δέκτες GPS, οι ανακλαστήρες και ο επιταχυνσιογράφος στη μέση του κεντρικού ανοίγματος, όπου προβλεπόταν η μεγαλύτερη μετακίνηση. Παράλληλα είχαν εγκατασταθεί σε σταθερές θέσεις δέκτες GPS (σταθμοί αναφοράς) και RTS ώστε να καταγράφεται η κινηματική της γέφυρας από ανεξάρτητα όργανα και ως προς ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς από αυτό της γέφυρας. Η ανάλυση των μετρήσεων όλων των οργάνων στηρίχθηκε στα παρακάτω βήματα:

- α) Μετασχηματισμό των μετρήσεων όλων των οργάνων στο κοινό σύστημα αναφοράς της γέφυρας
- β) εντοπισμό των τμημάτων διέγερσης
- γ) στατιστική και φασματική ανάλυση των χρονοσειρών των καταγραφών των διαφόρων οργάνων
- δ) σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων οργάνων.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων του ενός RTS, καθώς και κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από προκαταρκτική ανάλυση και αφορούν τις κατακόρυφες κινήσεις της γέφυρας.

### 4. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στις 2 Δεκεμβρίου 2007 με ευνοϊκές καιρικές συνθήκες (ηλιοφάνεια με άπνοια) ώστε να μην επηρεάζεται η απόδοση των γεωδαιτικών οργάνων. Στη μέση του κεντρικού ανοίγματος και στο πάνω μέρος του δικτύωματος με τη βοήθεια κατάλληλου άκαμπτου στηρίγματος τοποθετήθηκαν ο δέκτης GPS και ο ανακλαστήρας. Ίδια διάταξη οργάνων τοποθετήθηκε σε γειτονική θέση (2m) ώστε να καταγράφεται η ίδια κίνηση και από άλλα όργανα. Παράλληλα, ο επιταχυνσιογράφος τοποθετήθηκε στην κουπαστή της γέφυρας. Το μειονέκτημα της τοποθέτησης του σε διαφορετική θέση από τα άλλα όργανα δεν αποτέλεσε πρόβλημα καθώς μελετήθηκε η κατακόρυφη απόκριση που δεν διέφερε πρακτικά ανάμεσα στις δύο θέσεις.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων 10 άτομα (με μέσο όρο βάρους περίπου 80 κιλά) διέγειραν ρυθμικά με διάφορους τρόπους (βάδισμα, τρέξιμο, άλματα) την γέφυρα. Συνολικά καταγράφησαν από τα RTS, τα GPS και τον επιταχυνσιογράφο 10 διεγέρσεις.

### 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Το πρώτο βήμα της επεξεργασίας των μετρήσεων ήταν να μετασχηματιστούν οι μετρήσεις όλων των οργάνων σε κοινό σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο x- άξονας ήταν ο άξονας



*Σχήμα 3: Αριστερά: Η διάταξη των δεκτών GPS (πάνω από τη δοκό) και των ανακλαστήρων (κάτω από τη δοκό) σε δύο γειτονικές θέσεις στο πάνω μέρος του δικτύματος, στη μέση του κεντρικού ανοίγματος. Δεξιά: Ένα από τα δύο RTS που χρησιμοποιήθηκαν στοχεύει έναν από τους ανακλαστήρες και καταγράφει την κίνηση της γέφυρας.*

της γέφυρας, y-άξονας εγκάρσια στη γέφυρα και z-άξονας ο κατακόρυφος άξονας της γέφυρας. Ως αρχή των αξόνων θεωρήθηκε η θέση ισορροπίας του κάθε δέκτη/ανακλαστήρα που προέκυψε με βάση τις καταγραφές σε περιόδους ηρεμίας. Με το μετασχηματισμό αυτό όλες οι μετρήσεις ήταν συγκρίσιμες.

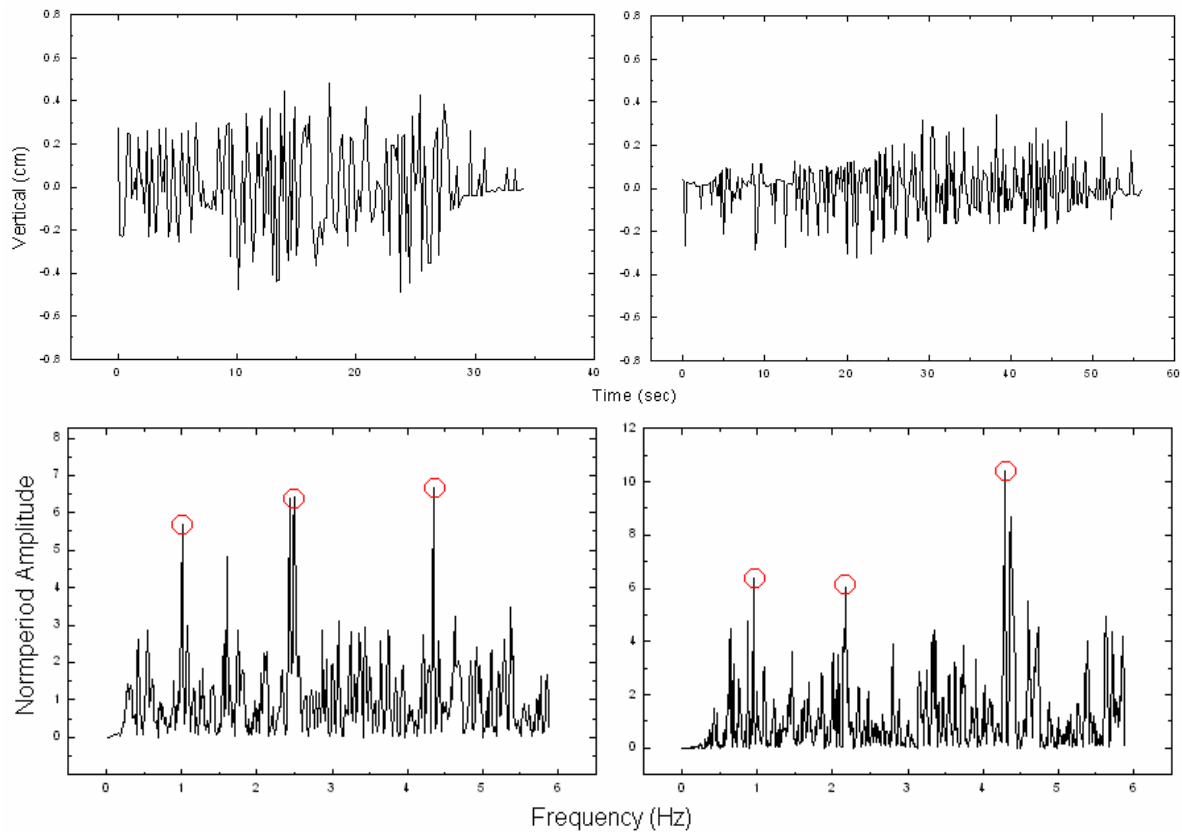
Το επόμενο βήμα ήταν να συσχετιστούν και να απομονωθούν τα τμήματα των καταγραφών των οργάνων που αντιστοιχούσαν στις περιόδους των διεγέρσεων. Στην συνέχεια με χρήση της τεχνικής του κινούμενου μέσου όρου (moving average) ομαλοποιήθηκαν οι χρονοσειρές και η αρχική χρονοσειρά διαχωρίστηκε στην ημιστατική απόκριση και στην δυναμική που προκλήθηκαν από την διεγερση. Με την μέθοδο αυτή ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της ημιστατικής μετακίνησης και του εύρους ταλάντωσης της γέφυρας.

Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αποτελεί η φασματική ανάλυση. Για την φασματική ανάλυση δεν ήταν δυνατή η χρήση μεθόδων όπως η FFT, καθώς τα δεδομένα των χρονοσειρών του RTS δεν ήταν ισαπέχοντα και ήταν περιορισμένα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας NORMPERIOD (Pytharouli and Stiros, 2008) ο οποίος στηρίζεται στο περιοδόγραμμα του Lomb και τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων, και έχει την δυνατότητα ανάλυσης μικρών χρονοσειρών με μη ισαπέχοντα δεδομένα.

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικές χρονοσειρές του RTS που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικού τύπου διεγέρσεις (τρεξιμο και άλματα) και οι αντίστοιχες φασματικές αναλύσεις.

## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την στατιστική και φασματική ανάλυση των χρονοσειρών του RTS συνάγεται ότι η κατακόρυφη δυναμική απόκριση της γέφυρας ήταν περίπου  $\pm 4-5\text{mm}$ . Όσον αφορά την φασματική ανάλυση προέκυψαν οι συχνότητες 1Hz, η οποία πιθανότατα αντιστοιχεί στη συχνότητα διεγερσης, καθώς και οι συχνότητες 2.4 και 4.3 Hz, οι οποίες πιθανότατα αντιστοιχούν σε ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Να σημειωθεί ότι οι συχνότητες αυτές



Σχημα 4: Στο πάνω μέρος παρουσιάζεται η κατακόρυφη δυναμική απόκριση της γέφυρας όπως προκύπτει από την ανάλυση των χρονοσειρών του RTS για δύο διαφορετικές διεγέρσεις (η αριστερή αφορά άλματα και η δεξιά τρέξιμο). Το μέγιστο εύρος της δυναμικής απόκρισης είναι  $\pm 4-5\text{mm}$ . Στο κάτω μέρος παρουσιάζονται τα αντίστοιχα φασματά που προέκυψαν με χρήση του κώδικα NORMPERIOD. Εκτιμήθηκαν κύριες συχνότητες 1Hz (συχνότητα διέγερσης), 2.4Hz και 4.3 Hz (πιθανή κύρια ιδιοσυχνότητα).

εμφανίστηκαν και στις φασματικές αναλύσεις του GPS και του επιταχυνσιογράφου και στις άλλες διεγέρσεις που δεν εξετάζονται στο παρόν.

Από τις συχνότητες αυτές σε όλες τις περιπτώσεις ιδιαίτερη έντονη είναι η παρουσία της συχνότητας των 4.3 Hz στις φασματικές αναλύσεις και των τριών οργάνων. Αυτό πιθανότατα σημαίνει ότι η συχνότητα αυτή είναι και η κύρια κατακόρυφη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Η εκτίμηση αυτή είναι σύμφωνη με την μελέτη που προέβλεπε συχνότητα  $>3\text{Hz}$  (Γ. Σεκάρας, αδημ. στοιχεία)

Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της ανάλυσης μας μετρήσεων του RTS που εκτέθηκαν σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ανεξάρτητες μετρήσεις αποδεικνύουν ότι το RTS είναι αξιόπιστο και ακριβές για την καταγραφή δυναμικής απόκρισης ακόμα και δύσκαμπτων κατασκευών. Η δε συνδυασμένη χρήση του με άλλα όργανα (GPS, επιταχυνσιογράφο) κάνει την εφαρμογή του ακόμα πιο αξιόπιστη και αποδοτική.

## 7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στον κ. Γ. Σεκάρα, μελετητή του έργου, για την συνεργασία και για τις χρήσιμες πληροφορίες του για τον σχεδιασμό της γέφυρας. Ευχαριστούμε επίσης τους

φοιτητές του Τμήματος που συμμετείχαν στο πείραμα, και ιδιαίτερα τον κ. Α. Θεοδώρου για τη συμβολή του στην επεξεργασία των δεδομένων.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ogaja, C. ,Wang, J. and Rizos, C.. “Detection of wind-induced response by wavelet transformed GPS solutions”, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 129, No. 6, 2003, pp. 99-104.
- [2] Roberts, G., Meng, X. and Dodson, A.. “Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges”, *Journal of Surveying Engineering*, Vol 130, No 2, 2004, pp. 65-72
- [3] Bronwjohn, J., Rizos, C., Tan, G.H. and Pan, T.C.. “Real-time long-term monitoring of static and dynamic displacement of a Office Tower, combining RTK GPS and accelerometer data”, Proc. of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, U.K., 28 June-1 July, 2004. Internet address: <http://www.fig.net/nottingham/>
- [4] Li, X., Ge, L., Ambikairajah, E., Rizos, C., Tamura, Y. and Yoshida, A. «Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system», *GPS Solutions*, Vol 10, 2006, pp. 233-247.
- [5] Nickitopoulou, A., Protopsalti, K. and Stiros, S.. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 10, 2006, pp. 1471-1482.
- [6] Psimoulis, P. and Stiros, S. «Measurement of Deflections and of Oscillation Frequencies of Engineering Structures using Robotic Theodolites (RTS)», *Engineering Structures*, Vol/ 29, No 12, 2007, pp. 3312-3324
- [7] Psimoulis, P. and Stiros, S. «Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the determination of the parameters of oscillation of major structures», *Computer Aided Civil Infrastructure Engineering* (in press)
- [8] Psimoulis, P., Pytharouli, S, Karabalis, D. and Stiros, S. «Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures», *Journal of Sound and Vibration* (in press).
- [9] Pytharouli, S., Stiros, S. Spectral analysis of unevenly spaced or discontinuous data using the “Normperiod” code, *Computers and Structures*, Vol. 86, 2008, 190-196

## GEODETIC MONITORING OF OSCILLATIONS OF STEEL PEDESTRIAN BRIDGE

**Panos Psimoulis and Stathis Stiros**

Lab. of Geodesy and Geodetic Applications  
Dept. of Civil Engineering, Patras University  
Patras

email: ppsimo@upatras.gr; stiros@upatras.gr

### SUMMARY

Robotic Total Station (RTS) is a new geodetic instrument which permits to track a reflector fixed on a moving object at a distance of a few hundred meters and record its changing coordinates with a high recording frequency (5-8Hz) and high precision (<1mm). At this study are presenting the preliminary results of one of the first global attempts in RTS monitoring oscillations of relatively rigid structure (basic modal frequency <1Hz). The structure is steel pedestrian bridge 62m long, with main central span of 41m, which is in Athens. For the bridge monitoring were used two RTS, GPS and accelerometers, in order to be independent measurements for the certification of the results. The reflectors were set in the middle of the central span and the RTS were set on stable ground, which monitored the response caused by different type of excitations which were made by 10 students of our department. The preliminary statistical and spectral analysis showed a dynamic response of 4-5mm and a major frequency of 4.3 Hz. These results were certified by the independent measurements and are compatible with the study of Mr. G. Sekara, the project engineer, which is thanked for his cooperation and help.