Προσδιορισμός Θέσης με Χρήση Εικονικών Σταθμών Αναφοράς GPS. Εφαρμογή στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης

Χ. ΠΙΚΡΙΔΑΣ
Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ

Α. ΦΩΤΙΟΥ
Καθηγητής ΑΠΘ

Β. ΒΛΑΧΑΚΗΣ
Διπλ. ΑγρονόμοςΤοπογράφος Μηχανικός ΑΠΘ

Περίληψη
Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της τεχνικής του Εικονικού Σταθμού Αναφοράς (Virtual reference Station-VRS) και κατά συνέπεια η δημιουργία των αντίστοιχων δεδομένων GPS. Η μέθοδος VRS βασισμένη σε δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς GPS στοχεύει στη βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης κυρίως σε πραγματικό χρόνο. Αφορά στη δημιουργία πρωτογενών παρατηρήσεων για έναν εικονικό σταθμό ο οποίος μιμείται έναν τοπικό σταθμό αναφοράς GPS πλησίον του δέκτη του χρήστη (θέση πλοήγησης), με συνέπεια τα σφάλματα κλίμακας να ελαχιστοποιούνται σε σχέση μ' έναν απομακρυσμένο σταθμό. Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή των δεδομένων ενός δικτύου μονίμων σταθμών αναφοράς, στο κέντρο ελέγχου, όπου προσδιορίζονται μοντέλα εκτίμησης για τους διάφορους τύπους σφαλμάτων (ιονοσφαιρικά, τροποσφαιρικά, τροχιακά). Στη συνέχεια με μεθόδους παρεμβολής προκύπτουν τα αντίστοιχα σφάλματα στην προσεγγιστική θέση του κινητού δέκτη και δημιουργούνται οι εικονικές παρατηρήσεις. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με πραγματικά δεδομένα σταθμών GPS στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, με τη βοήθεια λογισμικού που αναπτύχθηκε για παρατηρήσεις κώδικα C/A σ' έναν εικονικό σταθμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν αισθητή βελτίωση στην ακρίβεια θέσης σε σχέση με την κλασική μέθοδο του σχετικού προσδιορισμού θέσης με κώδικα (DGPS).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και εφαρμογή των σταδίων ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων GPS, που καταλήγουν στη δημιουργία παρατηρήσεων εικονικού σταθμού αναφοράς. Πρώτος στόχος είναι η αποκωδικοποίηση των μηχανισμών λειτουργίας που κρύβονται πίσω από τη συντομογραφία VRS και πώς επιδρούν στην ακρίβεια προσδιορισμού θέσης. Δεύτερο στόχο αποτελεί η εξέταση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος. Η τεχνική VRS αποτελεί μια πρωτοποριακή μέθοδο δημιουργίας ενός πλασματικού, εικονικού σταθμού GPS, ο οποίος θα λειτουργεί ακριβώς, όπως θα λειτουργούσε ένας υπαρκτός δέκτης GPS, που συλλέγει δεδομένα με τις ίδιες παραμέτρους καταγραφής [5], [13].

Η βασική ιδέα είναι ότι ένας χρήστης δραστηριοποιείται εντός ενός δικτύου μονίμων σταθμών αναφοράς GPS σε αποστάσεις που δεν ξεπερνούν μεταξύ τους τα περίπου 50 Km και οι οποίοι επικοινωνούν με το κέντρο ελέγχου. Κύρια επιδίωξη της μεθόδου είναι η επίτευξη ακρίβειας στον προσδιορισμό θέσης μ' έναν μόνο δέκτη και σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ του κινητού δέκτη και του σταθερού, σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (RTK/DGPS), με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του κόστους των εργασιών.

Η όλη διαδικασία ξεκινά, όταν ο χρήστης, μ' έναν δέκτη βρίσκεται μερικές δεκάδες χιλιόμετρα μακριά από τον κοντινότερο σταθμό αναφοράς και πρόκειται να εφαρμόσει τη μέθοδο RTK/DGPS. Μέσω συνδέσεων αμφίδρομης επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου του δικτύου ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει για την προσεγγιστική του θέση τον Εικονικό Σταθμό Αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας εικονικός σταθερός δέκτης με απολύτως γνωστές συντεταγμένες (προσεγγιστική θέση κινητού από λύση πλοήγησης) λίγα μέτρα μακριά από τον κινητό δέκτη του χρήστη.

Η συνεισφορά του δικτύου των μονίμων σταθμών έγκειται στο γεγονός ότι τα σφάλματα των παρατηρήσεων μπορούν να περιγραφούν μαθηματικά, ειδικά εκείνων που εξαρτώνται από την απόσταση και έτσι είναι δυνατή η εκτίμησή τους σε οποιοδήποτε σημείο εντός του δικτύου με κάποια μέθοδο παρεμβολής. Η πληροφορία που απορρέει από

Υποβλήθηκε: 8.8.2007 Έγινε δεκτή: 30.5.2008

τις παρατηρήσεις του δικτύου διαβιβάζεται στους χρήστες GPS και αυξάνεται η παραγωγικότητα χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια θέσης.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

P_i: Παρατήρηση ψευδοαπόστασης στην i συχνότητα.

Φ_i: Παρατήρηση φάσης στην i συχνότητα.

ρ: Γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

VRS: Εικονικός σταθμός αναφοράς.

A: δέκτης GPS.

sat: δορυφόρος GPS.

c Ταχύτητα του φωτός στο κενό (=299792458 m/s).

$c\delta_A$: σφάλμα χρονομέτρου του δέκτη.

$c\delta^{sat}$: σφάλμα χρονομέτρου του δορυφόρου.

I: Ιονοσφαιρικό σφάλμα.

T: Τροποσφαιρικό σφάλμα.

λ_i: Μήκος κύματος στην i συχνότητα.

N_i: Αρχική ασάφεια φάσης στην i συχνότητα.

e: Τυχαίο σφάλμα, θόρυβος.

$\tilde{P}^{sat}_{VRS}$: προσεγγιστική εικονική ψευδοαπόσταση.

$\tilde{\rho}^{sat}_{VRS}$: προσεγγιστική εικονική γεωμετρική απόσταση.

P^{sat}_{VRS}: εικονική ψευδοαπόσταση.

ρ^{sat}_{VRS}: εικονική γεωμετρική απόσταση.

RTK: Real Time Kinematic-Κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο.

DGPS: Differential GPS – Διαφορικό GPS με κώδικα

3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Η μέθοδος του σχετικού στατικού προσδιορισμού θέσης και του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο ή εκ των υστέρων αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια μια καθιερωμένη μέθοδο σημαντικής βελτίωσης της ακρίβειας θέσης σε σχέση με τον απόλυτο προσδιορισμό. Η τεχνική RTK είναι μία ειδική μορφή σχετικού προσδιορισμού, που απαιτεί τον ένα δέκτη τοποθετημένο σε γνωστό σημείο αναφοράς, ο οποίος διαβιβάζει τις μετρήσεις ή τις διορθώσεις των μετρήσεων σ' έναν κινούμενο δέκτη (rover) μέσω κάποιου είδους σύνδεσης όπως, π.χ., VHF, κινητή τηλεφωνία, κ.ά.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου DGPS ή και RTK το μήκος της βάσης περιορίζεται στα μερικά χιλιόμετρα, π.χ., συνήθως στην πράξη δεν ξεπερνάει τα 10-15 km [3], [17]. Καθώς αυξάνεται η απόσταση του κινητού από τον σταθερό δέκτη, ο προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο καθίσταται επισφαλής, διότι η υπόθεση ότι τα σφάλματα λόγω ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας, καθώς και τα σφάλματα τροχιάς των δορυφόρων συμπεριφέρονται όμοια και στα δύο άκρα της βάσης δεν ισχύει από κάποια απόσταση και μετά. Το σφάλμα κλίμακας της βάσης αυξάνεται, καθώς μεγαλώνει η απόσταση από το σταθερό δέκτη. Ο περιορισμός της απόστασης στις τεχνικές του κλασικού RTK ή DGPS οφείλεται όχι μόνο στα συστηματικά σφάλματα αλλά και στις δυνατότητες επιλογής των διαθέσιμων λύσεων επικοινωνίας για τη μετάδοση των απαραίτητων δεδομένων στον χρήστη, π.χ. περιορισμός της εμβέλειας των συσκευών ραδιοζεύξης.

Οι παραπάνω λόγοι σε συνδυασμό με τη μικρή διάρκεια παρατήρησης μειώνουν την ικανότητα επίλυσης της ακέραιας ασάφειας φάσης και κατά συνέπεια μειώνουν την τελική ακρίβεια θέσης.

Η χρήση ενός δικτύου μόνιμων σταθμών αναφοράς GPS αντί του μεμονωμένου σταθμού αναφοράς επιτρέπει τη μαθηματική έκφραση όλων των συστηματικών σφαλμάτων στην εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος. Το δίκτυο αυτό με τη σειρά του επιτρέπει σ' έναν χρήστη,, που δραστηριοποιείται εντός του δικτύου,, να αυξήσει την απόσταση στην οποία βρίσκεται ο κινητός δέκτης από τον σταθμό αναφοράς.

Οι σταθμοί αναφοράς πρέπει να συνιστούν ένα πυκνό δίκτυο για να μπορούν να αναλύονται και να προτυποποιούνται τα συστηματικά σφάλματα για κάθε δορυφόρο με μια ακρίβεια, που καθιστά δυνατή την επίλυση των ασαφειών φάσης. Οι υπολογιζόμενες εκτιμήσεις των σφαλμάτων χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν οι παρατηρήσεις των εικονικών σταθμών αναφοράς σε οποιαδήποτε θέση μέσα στην περιοχή του δικτύου.

Η απόσταση μεταξύ των σταθμών αναφοράς πρέπει να είναι της τάξης των 50-100 km, αλλά εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του δικτύου και το επίπεδο της ιονοσφαιρικής δραστηριότητας [8],[10],[12]. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός

υπηρεσιών δικτύων μονίμων σταθμών αναφοράς GPS με διαφορετική δομή και λειτουργία. Μπορούμε να διακρίνουμε τις υπηρεσίες αυτές σε παγκόσμιο, εθνικό και περιφερειακό επίπεδο σε συνδυασμό με το δημόσιο ή εμπορικό χαρακτήρα. Το σημαντικότερο παγκόσμιο δίκτυο διατηρείται από τη διεθνή υπηρεσία IGS (International GPS Service). Στην Ευρώπη το αντίστοιχο δίκτυο μονίμων σταθμών, που ονομάζεται EPN (Euref Permanent Network), αποτελείται σήμερα από περίπου 200 μόνιμους σταθμούς GPS με συνεχή αύξηση. Σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες όπως π.χ. στη Γερμανία, την Αυστρία, το Βέλγιο, την Ελβετία, τη Σουηδία και την Ολλανδία λειτουργούν εδώ και μερικά χρόνια, σε κρατικό επίπεδο, δίκτυα μονίμων σταθμών GPS που εξυπηρετούν και την εφαρμογή της τεχνικής του VRS. Στην Ελλάδα βρίσκεται σε εξέλιξη η ίδρυση αντίστοιχου δικτύου με την ονομασία HEPOS (Hellenic Positioning System) εποπτευόμενο από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφήσεων Ελλάδας [4].

4. ΕΙΚΟΝΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ – VRS

Η έννοια Εικονικός Σταθμός Αναφοράς βασίζεται στην ύπαρξη ενός δικτύου σταθμών αναφοράς GPS συνδεδεμένο μ' ένα κέντρο ελέγχου. Ένας υπολογιστής στο κέντρο ελέγχου συγκεντρώνει συνεχώς δεδομένα από όλους τους δέκτες των μονίμων σταθμών. Ο χρήστης GPS λειτουργεί μέσα σε ένα τέτοιο μόνιμο ή προσωρινά ενεργό δίκτυο σταθμών GPS διαθέτοντας κατ' ελάχιστον ένα δέκτη με δυνατότητα επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου.

Η τεχνική του VRS επιτρέπει στον χρήστη με τον κινητό δέκτη να έχει πρόσβαση στα δεδομένα ενός μη υπαρκτού – εικονικού σταθμού αναφοράς, που βρίσκεται πλησίον του, μέσα στην περιοχή του δικτύου. Επίσης, η τεχνική του VRS, είναι αρκετά ευέλικτη, επειδή επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιούν έναν συνηθισμένο δέκτη χωρίς να απαιτείται αλλαγή στο λογισμικό του για τη διαχείριση των δεδομένων VRS.

Στόχος της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η δημιουργία περισσότερο αξιόπιστων διορθώσεων των παρατηρήσεων GPS, η βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού και η μείωση του χρόνου "έναρξης – initialization" κατά την εκκίνηση της κινηματικής διαδικασίας. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι απαραίτητη μια ασφαλής σύνδεση για τη μετάδοση των δεδομένων VRS από το κέντρο ελέγχου προς στον χρήστη και αντιστρόφως. Οι διορθώσεις για τις παρατηρήσεις του σταθμού VRS διαβιβάζονται στον χρήστη σε μορφή πρωτοκόλλου RTCM, όπως και στην περίπτωση της κλασικής τεχνικής RTK/DGPS. Η επικοινωνία συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση κινητών τηλεφώνων (GSM-Global System for Mobile Communication) και στο μέλλον με τη χρήση UMTS (Universal Mobile Telecommunications Service) υπηρεσία, που αναφέρεται στην τρίτης γενιάς κινητή τηλεφωνία.

4.1 Στάδια δημιουργίας παρατηρήσεων στον εικονικό σταθμό αναφοράς

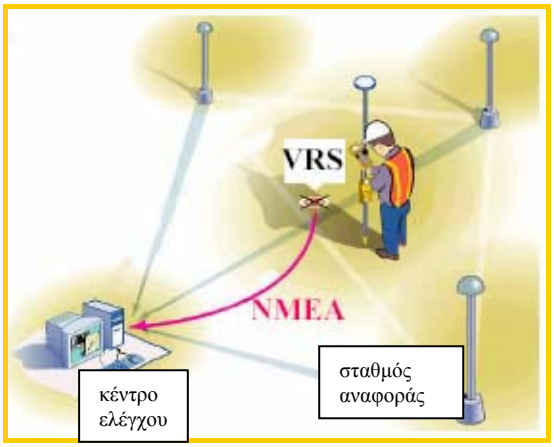
Η εφαρμογή της τεχνικής VRS σ' ένα λειτουργικό δίκτυο σταθμών GPS ακολουθεί τα εξής βήματα [2],[5],[6],[9],[13],[14], [15] [16],[17],[18]:

- Σε πρώτη φάση δεδομένα από το δίκτυο των μονίμων σταθμών αναφοράς μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου. Απαιτούνται τουλάχιστον τρεις σταθμοί αναφοράς, οι οποίοι επικοινωνούν με τον κεντρικό σταθμό ελέγχου του δικτύου.
- Στη συνέχεια, οι παρατηρήσεις των μονίμων σταθμών χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν τα σφάλματα των χρονομέτρων των δεκτών και των δορυφόρων, της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας [7]. Ακολουθεί η επίλυση των ασαφειών φάσης για τις βάσεις του δικτύου, εφόσον θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική RTK (χρήση φάσεων) και όλα τα συστηματικά σφάλματα είναι πλέον γνωστά με ακρίβεια μερικών εκατοστών για τις παρατηρήσεις των μονίμων σταθμών.
- Γίνεται η εκτίμηση των τυχαίων σφαλμάτων, στα οποία περιέχεται και ο θόρυβος e_{VRS}^{sat} από τα εναπομείναντα συστηματικά σφάλματα (ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα, τροχιά) με ακρίβεια εκατοστού στη συχνότητα i για τον εικονικό σταθμό σύμφωνα με την εξίσωση παρατήρησης

$$e_A^{sat} = \Phi_i - \rho_A^{sat} - c\delta_A + c\delta^{sat} + I_A^{sat} - T_A^{sat} - \lambda N_i \qquad (4.1)$$

όπου i=1,2.

- Τα "χωρικά" συσχετισμένα σφάλματα εκφράζονται ανά εποχή και ανά δορυφόρο συνήθως μέσω γραμμικών μαθηματικών μοντέλων.
- Στη συνέχεια, ο χρήστης που βρίσκεται στο πεδίο, εκπέμπει την προσεγγιστική του θέση με μήνυμα NMEA (National Marine Electronics Association) στο κέντρο ελέγχου. Τα μοντέλα εκτίμησης των τυχαίων σφαλμάτων χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί το σφάλμα για την προσεγγιστική θέση του κινητού δέκτη, η οποία αποτελεί και τη θέση του Εικονικού Σταθμού Αναφοράς (σχήμα 1).



Σχήμα 1. *Αρχή λειτουργίας VRS.*
Figure 1. *Basic operation of the VRS technique.*

4.2 Μαθηματικό μοντέλο VRS

Η αλγοριθμική διαδικασία της τεχνικής VRS μπορεί να περιγραφεί απλά ως εξής [16]:

Στην προσεγγιστική θέση του χρήστη, που είναι και η θέση του εικονικού σταθμού, 'μετατοπίζονται' οι παρατηρήσεις του κοντινότερου μόνιμου σταθμού αναφοράς. Έστω (X_A, Y_A, Z_A) η θέση του κοντινότερου μόνιμου σταθμού αναφοράς, γνωστή με υψηλή ακρίβεια, και $(X_{VRS}, Y_{VRS}, Z_{VRS})$ η θέση του εικονικού σταθμού αναφοράς η οποία θεωρείται ως απολύτως γνωστή. Το ζητούμενο είναι η θέση του κινητού δέκτη.

Μία πρώτη προσέγγιση της γεωμετρικής απόστασης μεταξύ VRS και δορυφόρου δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{\rho}_{VRS}^{sat} = \sqrt{(X^{sat} - X_{VRS})^2 + (Y^{sat} - Y_{VRS})^2 + (Z^{sat} - Z_{VRS})^2} \qquad (4.2)$$

Η προσέγγιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θέση του δορυφόρου διαφέρει, διότι ο χρόνος διαδρομής του σήματος αλλάζει λόγω της 'αλλαγής' της θέσης του δέκτη από το μόνιμο στον Εικονικό Σταθμό Αναφοράς. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η περιστροφή της γης κατά τη διάρκεια της διαδρομής του σήματος από τον δορυφόρο στον δέκτη. Επομένως, λόγω της μη διορθωμένης δορυφορικής θέσης για τον VRS, η γεωμετρική απόσταση (4.2) υπολογίζεται με ακρίβεια της τάξης του μέτρου. Χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική απόσταση (4.2) μια προσεγγιστική ψευδοαπόσταση μπορεί να παραχθεί για τη θέση του Εικονικού Σταθμού Αναφοράς, με ακρίβεια μέτρου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tilde{P}_{VRS}^{sat} = P_A^{sat} + (\tilde{\rho}_{VRS}^{sat} - \rho_A^{sat}) \qquad (4.3)$$

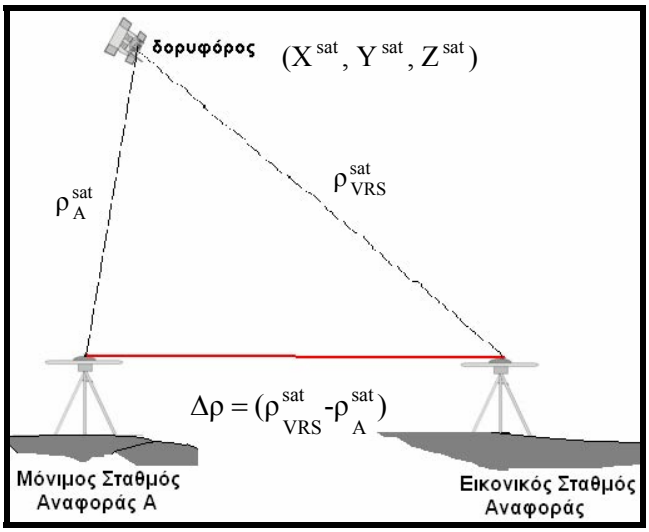
Η προσεγγιστική ψευδοαπόσταση (4.3) είναι ικανοποιητική για τον εκ νέου καθορισμό της ακριβούς δορυφορικής θέσης με βάση τον γνωστό τυποποιημένο αλγόριθμο [3],[7],[17] για την εκτίμηση της τροχιάς και για τη γήινη περιστροφή. Μετά από αυτή τη διαδικασία η γεωμετρική απόσταση ρ_{VRS}^{sat} είναι διαθέσιμη (σχήμα 2).

Η διαφορά των γεωμετρικών αποστάσεων (σχήμα 2)

$$\Delta\rho = (\rho_{VRS}^{sat} - \rho_A^{sat}) \qquad (4.4)$$

προστίθεται σε όλες τις παρατηρήσεις του κοντινότερου μόνιμου σταθμού, οι οποίες μετατοπίζονται στην εικονική θέση.

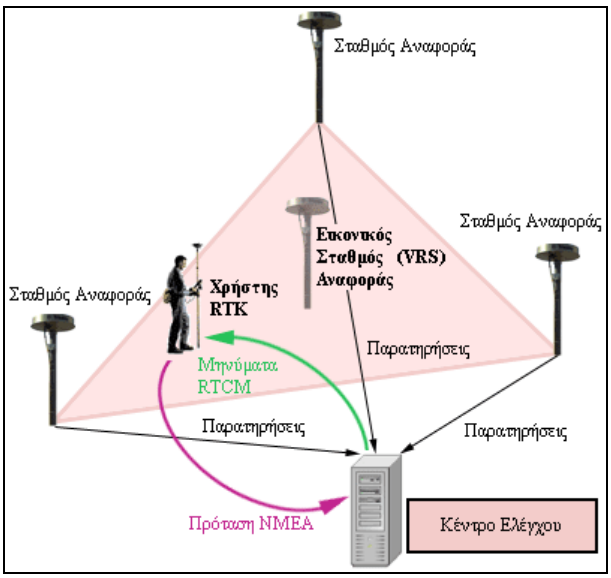
Οι τελικές ψευδοαποστάσεις του VRS προς κάθε δορυφόρο προκύπτουν, αν στις ήδη υπολογισμένες γεωμετρικές αποστάσεις προστεθούν τα αντίστοιχα σφάλματα, που έχουν, ήδη, υπολογιστεί από τα μοντέλα "πρόγνωσης" για τη θέση του εικονικού σταθμού αναφοράς.



Σχήμα 2. Υπολογισμός της γεωμετρικής απόστασης και της ψευδοαπόστασης για τον εικονικό σταθμό αναφοράς.

Figure 2. Computation of the precise geometric range and pseudorange for the VRS.

Με αυτόν τον τρόπο έχει δημιουργηθεί ένας εικονικός σταθμός αναφοράς στην προσεγγιστική θέση του χρήστη. Τώρα πλέον διορθώσεις RTCM παράγονται για λογαριασμό του VRS, ο οποίος 'βρίσκεται' μόλις λίγα μέτρα μακριά από τον κινητό δέκτη. Το κέντρο στέλνει στον χρήστη τις διορθώσεις αυτές μέσω π.χ. κινητής τηλεφωνίας (σχήμα 3).



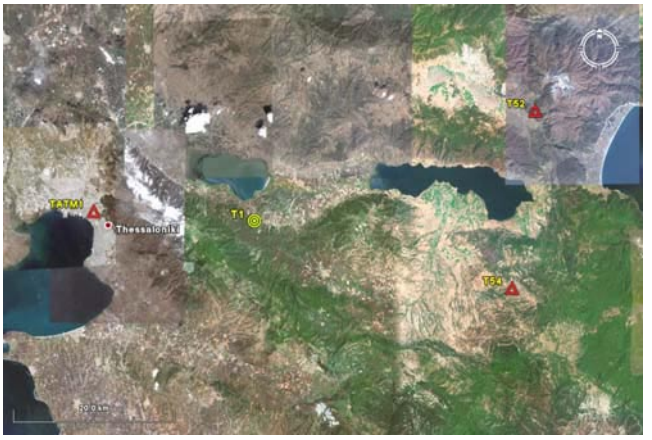
Σχήμα 3. *Μέτρηση, αποστολή και λήψη μηνυμάτων NMEA και RTCM για τη θέση του VRS προς και από το κέντρο ελέγχου στον χρήστη.*

Figure 3. *Measure, transmission, and reception of NMEA and RTCM messages for VRS between central control station and GPS user.*

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥVRS ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Με σκοπό τη χρήση της τεχνικής του VRS συντάχθηκε κατάλληλο λογισμικό με την ονομασία '*3VRS*', σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic [1], για τη δημιουργία παρατηρήσεων κώδικα στη θέση ενός εικονικού σταθμού αξιοποιώντας τις αντίστοιχες παρατηρήσεις των μονίμων σταθμών του δικτύου. Το λογισμικό ακολουθεί από 'μηδενική βάση' όλα τα στάδια επεξεργασίας της τεχνικής του VRS, μέσα από ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη.

Για να εφαρμοστεί η τεχνική του εικονικού σταθμού αναφοράς ιδρύθηκε ένα προσωρινό δίκτυο μόνιμων σταθμών αποτελούμενο από τρία σημεία με τις ονομασίες TATM1, T52 και T54 στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων είναι της τάξης των 52Km (TATM1-T54), 55Km (TATM1-T52) και 20 Km (T52-T54). Σε όλα τα σημεία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δέκτες δύο συχνοτήτων του TATM/ΑΠΘ (Leica system 500). Εντός της περιοχής που ορίζουν τα τρία σημεία, πραγματοποιήθηκε κινηματική εφαρμογή χρησιμοποιώντας, επίσης, δέκτη δύο συχνοτήτων. Η θέση για την οποία υπολογίστηκαν οι παρατηρήσεις του εικονικού σταθμού, ήταν η λύση πλοήγησης, που προέκυψε για την πρώτη εποχή καταγραφής και ονομάστηκε T1 (σχήμα 4).



Σχήμα 4. *Οι θέσεις των μόνιμων σταθμών του δικτύου GPS και του εικονικού σταθμού αναφοράς.*

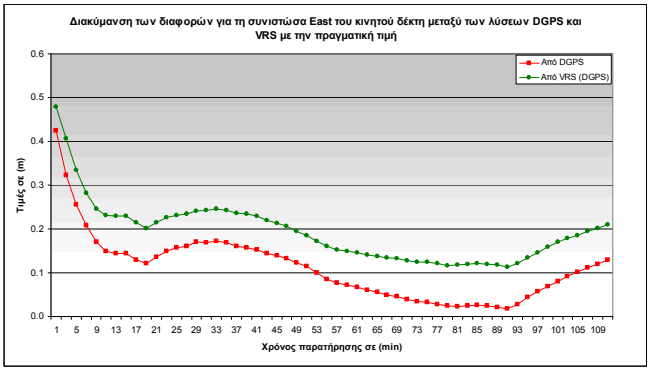
Figure 4. *Locations of GPS permanent stations and virtual reference station.*

Η απόσταση του σημείου T1 από τον κοντινότερο μόνιμο σταθμό (TATM1) είναι περίπου 20 Km, ενώ από τον πιο απομακρυσμένο (T52) απέχει 36.5 Km. Οι τρεις βάσεις GPS του δικτύου (TAM1-T52, TATM1-T54 και T54-T52), πριν από την εφαρμογή της τεχνικής VRS,, μετρήθηκαν με την στατική μέθοδο και επιλύθηκαν επιτυχώς χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις φάσης και στις δύο φέρουσες συχνότητες (L_1,L_2). Ακολούθησε η συνόρθωση του δικτύου, ώστε να προκύψουν υψηλής ακρίβειας συντεταγμένες για τις θέσεις των σταθμών αναφοράς [11]. Για λόγους σύγκρισης, αντίστοιχα ακριβείς συντεταγμένες για όλα τα σημεία της κινηματικής 'αλυσίδας' που μετρήθηκαν, προέκυψαν από τη χρήση των παρατηρήσεων φάσης έχοντας ως σημείο αναφοράς (reference point) τον πλησιέστερο μόνιμο σταθμό (TATM1). Η επίλυση των ασαφειών φάσης ήταν επιτυχής και στις δύο φέρουσες συχνότητες, σύμφωνα με τα στατιστικά κριτήρια που χρησιμοποιεί το λογισμικό επεξεργασίας του κατασκευαστή, με αποτέλεσμα η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης των σημείων να είναι της τάξης των μερικών εκατοστών λύση η οποία θα θεωρείται ως η 'πραγματική' για τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν.

Η διάρκεια των μετρήσεων με την κινηματική διαδικασία ήταν 1^h51^{min} (111min) με γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων (cut off angle) ίση με 15^0. Ο αριθμός των παρατηρούμενων δορυφόρων σ' όλη τη διάρκεια κυμαίνονταν από επτά έως δέκα, ενώ ο δείκτης GDOP δεν ξεπέρασε την τιμή τέσσερα.

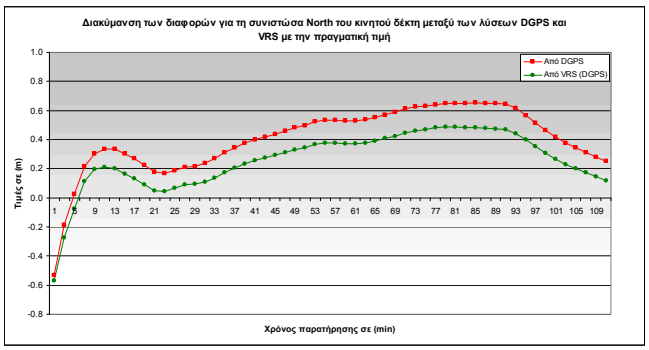
Για να ελεγχθεί τόσο η αξιοπιστία, όσο και η αποτελεσματικότητα της τεχνικής του VRS με τη χρήση του λογισμικού '3VRS' που συντάχθηκε, τα ίδια δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη χρήση παρατηρήσεων κώδικα C/A (DGPS), κρατώντας ως σημείο αναφοράς το TATM1. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας την τεχνική του VRS με πλησιέστερο σταθμό το σημείο TATM1, δημιουργήθηκαν οι εικονικές παρατηρήσεις για τη λύση πλοήγησης που προέκυψε για την πρώτη εποχή του κινητού δέκτη, που βρισκόταν στο σημείο T1. Ακολούθησε νέα επίλυση της κινηματικής "αλυσίδας", χρησιμοποιώντας τις ψευδοαποστάσεις του κώδικα C/A από τον εικονικό σταθμό αναφοράς.

Μία ολοκληρωμένη σύγκριση όλων των προηγούμενων λύσεων, DGPS και VRS(DGPS), παρουσιάζεται γραφικά στα σχήματα 5, 6 και 7, όπου αποδίδεται η διακύμανση της διαφοράς κάθε συνιστώσας (E,N,U) σε σχέση με την 'πραγματική' της τιμή, που προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων φάσης.



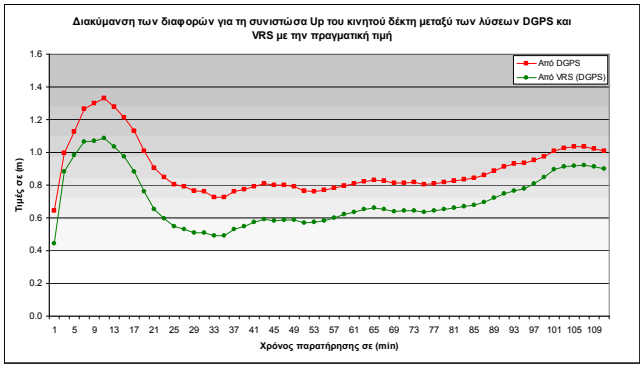
Σχήμα 5. *Διακύμανση των διαφορών κατά τη συνιστώσα E (East) μεταξύ της κάθε λύσης DGPS και VRS (DGPS) με τη λύση που προέκυψε από μετρήσεις φάσης σε m*

Figure 5. *Variation of differences for E(East) component between eachone of DGPS and VRS (DGPS) solutions with the phase solution in m*



Σχήμα 6. *Διακύμανση των διαφορών κατά τη συνιστώσα N(North) μεταξύ της κάθε λύσης DGPS και VRS (DGPS) με τη λύση που προέκυψε από μετρήσεις φάσης σε m*

Figure 6. *Variation of differences for N(North) component between eachone of DGPS and VRS (DGPS) solutions with the phase solution in m*



Σχήμα 7. *Διακύμανση των διαφορών για τη συνιστώσα U(Up) μεταξύ της κάθε λύσης DGPS και VRS (DGPS) με τη λύση που προέκυψε από μετρήσεις φάσης σε m*

Figure 7. *Variation of differences for U(Up) component between eachone of DGPS and VRS (DGPS) solutions with phase solution in m*

Από τα αντίστοιχα σχήματα (Σχ.5, Σχ.6, Σχ.7) φαίνεται εν γένει ότι οι δύο λύσεις (DGPS, VRS(DGPS)) δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και διαφέρουν σε αναμενόμενο εύρος ως προς τη λύση των φάσεων.

Είναι φανερό ότι οι δύο αντίστοιχες καμπύλες των διαφορών διατηρούν μια συστηματική διαφορά μεταξύ τους για όλη τη διάρκεια των παρατηρήσεων και ότι η ακρίβεια στη θέση με την τεχνική VRS είναι καλύτερη .

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές των διαφορών ανά συνιστώσα και συνολικά για τη θέση.

Με βάση και τις τιμές των πινάκων 1 και 2 γίνεται φανερή η βελτίωση κατά περίπου 20 cm στην ακρίβεια προσδιορισμού θέσης, που επιφέρει η τεχνική VRS σε σχέση με την κλασική τεχνική DGPS.

Πίνακας 1. *Χαρακτηριστικές τιμές των διαφορών ανά συνιστώσα και θέση μεταξύ της λύσης DGPS και της λύσης που προέκυψε από τις μετρήσεις φάσης.*

Table 1. *Characteristic values of differences for each component and position between DGPS and phase solution.*

Διαφορά ανά Συνιστώσα	Μέγιστη τιμή (m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)
ΔN	0.65	0.02	0.42
ΔE	0.42	0.01	0.11
ΔU	1.33	0.64	0.89
ΔS (θέση)	1.38	0.79	1.02

Πίνακας 2. *Χαρακτηριστικές τιμές των διαφορών ανά συνιστώσα και θέση μεταξύ της λύσης VRS(DGPS) και της λύσης που προέκυψε από τις μετρήσεις φάσης.*

Table 2. *Characteristic values of differences for each component and position between VRS(DGPS) and phase solution.*

Διαφορά ανά Συνιστώσα	Μέγιστη τιμή (m)	Ελάχιστη τιμή (m)	Μέση τιμή (m)
ΔN	0.57	0.04	0.29
ΔE	0.47	0.11	0.19
ΔU	1.08	0.44	0.71
ΔS (θέση)	1.13	0.56	0.81

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της πρωτοποριακής τεχνικής των εικονικών σταθμών GPS με τη χρήση του συνταχθέντος προγράμματος '*3VRS*' βελτίωσε αισθητά την ακρίβεια θέσης, έως και 20 cm, σε σχέση με την κλασική τεχνική DGPS. Η βελτίωση αυτή προκύπτει ακόμη και για παρατηρήσεις λίγων εποχών.

Τα παραπάνω συμπεράσματα προέκυψαν μόνον από την επεξεργασία παρατηρήσεων κώδικα (C/A) στη συχνότητα L_1, η συλλογή των οποίων προϋποθέτει χαμηλού κόστους εξοπλισμό και, συνεπώς, προτίμηση της συγκεκριμένης τεχνικής του VRS με κώδικα σε περισσότερες εφαρμογές, που μέχρι τελευταία ήταν δυσκολότερη λόγω του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής σε κάθε σημείο.

Επιπλέον η ακρίβεια θέσης που επιτυγχάνεται, καλύτερη του ενός μέτρου με κώδικα, δίνει προβάδισμα στην τεχνική του VRS σε σχέση με τα συστήματα εκπομπής των αντίστοιχων διορθώσεων που γίνονται με τη βοήθεια γεωστάσιμων δορυφόρων, όπως π.χ. με τα συστήματα EGNOS και WAAS.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων VRS και με παρατηρήσεις φάσης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βλαχάκης Β.: *Ανάπτυξη λογισμικού GPS για τη δημιουργία παρατηρήσεων εικονικού σταθμού αναφοράς (VRS) με χρήση κώδικα.* Διπλωματική εργασία, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη, 2007.
2. Ζεϊμπέκη Κ.: *Προσδιορισμός θέσης με χρήση εικονικών σταθμών αναφοράς GPS.* Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΜΔΕ Γεωπληροφορικής Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη, 2004.
3. Hofmann-Wellenhof B., H.Lichtenegger and J.Collins.: *Global Positioning System. Theory and Practice* fourth revised edition, Spinger-Verlag, New York, 1997.
4. Κτηματολόγιο Α.Ε.: Τεχνικές προδιαγραφές για την προμήθεια, εγκατάσταση και συντήρηση του πλήρους λειτουργικού και έτοιμου προς χρήση Ελληνικού Συστήματος Εντοπισμού – HEPOS, Αθήνα, 2005.
5. Landau H., Vollath U., Chen X.: Virtual Reference Station Systems. *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, No. 2: pp.137-143, 2002.
6. Marel H. van der.: Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. 1938-1947. *11th Int. Tech. Meeting of the Satellite Div. of the U.S. Institute of Navigation*, Nashville, Tennessee, USA, 15-18 September, pp. 49-58, 1998.
7. Papageorgiou D., C. Pikridas, A. Fotiou and K. Katsambalos.: An Educational - Purpose software Package for GPS Baseline Determination using Code Measurements. *Proceedings of FIG 27th Working Week "The Olympic Spirit in Surveying"*, Athens, Greece, 22 - 27 May, 2004.
8. Πικριδάς Χ. και Φωτίου Α.: Μελέτη της Ιονοσφαιρικής Επίδρασης στον Σχετικό Προσδιορισμό Θέσης με το Σύστημα GPS: Εφαρμογή στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης από Δεδομένα Μόνιμου Σταθμού GPS. *Τεχνικά Χρονικά. Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ*, Ι, τεύχος 1-2, σελ. 57-65, 2003.
9. Retscher G.: Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks. *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 1, No. 1: pp.40-47, 2002.
10. Rizos C., Han S.: *Reference Station Network Based RTK Systems - Concepts and Progress*, 2003.
11. Ρωσσικόπουλος Δ.: *Τοπογραφικά Δίκτυα και Υπολογισμοί*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη,1999.
12. Seeber G.: *Real-Time Satellite Positioning on the Centimeter Level in the 21st Century using Permanent Reference Stations*, Nordic Geodetic Summer School, Fevik, Norway, 2000.
13. Vollath U., Buecherl A., Landau H., Pagels Ch., Wagner B.: Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Salt Lake City, Utah, USA, September 2000.
14. Vollath U., Deking A., Landau H., Pagels Ch.: Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Banff, Canada, June 2001.
15. Wanninger L.: The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Solar Maximum Conditions, *Proceedings of ION GPS 99*, Nashville TN, USA, pp.1419-1427, 1999.
16. Wanninger L.: Virtual Reference Stations for Centimeter - Level Kinematic Positioning. *Proceedings of ION GPS 2002*, Portland, Oregon, USA, pp.1400-1407, 2002.
17. Φωτίου Α., Χ. Πικριδάς.: *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2006.
18. Φωτίου Α.: *Γεωμετρική Γεωδαισία. Θεωρία και Πράξη*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2007.

Χ. Πικριδάς
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας,
ΑΠΘ, 541 24 Θεσσαλονίκη, ΤΘΠ 432.
Α. Φωτίου
Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας,
ΑΠΘ, 541 24 Θεσσαλονίκη, ΤΘΠ 473.
Β. Βλαχάκης,
Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός, ΑΠΘ,
Αμαλίας 17, 546 40 Θεσσαλονίκη.

Extended summary

Positioning Using Virtual Reference Stations. Application in the Broader Area of Thessaloniki

CH. PIKRIDAS
Assistant Professor, A.U.TH

A. FOTIOU
Professor, A.U.TH

V. VLACHAKIS
Rural and Surveying Engineer, A.U.TH

Abstract
The main goal of the present paper is the study of the Virtual Reference Station technique. It is based on a network of permanent reference stations and aims at the improvement of the position accuracy when running in RTK or DGPS mode, usually for baselines more than 10 km. The method is based on the creation of GPS raw data for a virtual reference station that imitates a local GPS reference station at the user's approximate position. Consequently, the systematic errors are reduced much more effectively than by using a remote permanent reference station. This can be achieved by the proper processing of data from several reference GPS stations in a central control station. Then, through interpolation at the user's approximate position, the VRS data are created. Software using C/A code data was developed in order to test the effectiveness of the method. For this purpose, three GPS stations formed a network established in the wider Thessaloniki area. VRS data were created almost 20Km away from the nearest permanent station and three types of solutions were derived and compared with each other. The results show an improvement in the positional accuracy when the VRS technique is applied.

1. INTRODUCTION

Recent developments in differential GPS services have focused mainly on the reduction of the number of permanent reference stations required to cover a certain area and on the extension of baseline lengths between reference and rover. The most advanced technique nowadays involves virtual reference station networks. The name of this method arises from the fact that artificial observations for a nonexistent 'virtual' GPS station are created using the real observations of a multiple reference station network.

The central concept is that a user is activated inside a network of permanent reference stations that are connected with a central control station. The user receiver transmits its navigated position to the central station. The communication is usually performed with cellular phones (GSM) and in future with the Universal Mobile Telecommunication Service. The contribution of the network is the knowledge of the error behavior, specifically of those errors that are distance dependent. Thus, ionospheric and tropospheric refraction and orbit errors are better modeled and can be interpolated at any position inside the network. The artificial observations for the user's approximate location are created and then transferred in RTCM format back to the user (rover station). On the rover side, standard RTK or DGPS algorithms are used to obtain the correct position. The result is an increase in baseline lengths and the reduction of initialization times.

A GPS network was established and the VRS method was tested with C/A code data using appropriate software developed for the purpose. The results of an analysis showed a positional accuracy always of the order of one meter or better.

Submitted: Aug. 8, 2007 Accepted: May 30, 2008

2. APPLICATION OF VRS TECHNIQUE IN THE BROADER AREA OF THESSALONIKI

In order to test the accuracy achieved by the virtual reference station concept, a test network, consisting of three dual frequency GPS receivers, was temporarily established in the wider Thessaloniki area. The network was first measured and adjusted in order to determine accurate coordinates. Inside the area (triangle) of the three permanent stations a dual frequency rover receiver was also activated to perform a kinematic chain of about 2 hours' duration. The survey took place almost 20 Km away from the closest station. User friendly VRS software

called "3VRS" was developed and artificial C/A code observations were created for the first navigated position of the rover receiver using the data of the closest station. Investigating the effectiveness of the VRS technique three different solutions were derived.

- Phase solution with fix ambiguities.
- DGPS solution, post process.
- DGPS solution using VRS data.

The results from the comparisons between the various solutions show a precision for the North and East components better than 0.5 m and about 1.4 m for the Up component. Therefore our tests prove that an accuracy increment for this kind of baseline lengths can be obtained when the VRS method is applied.

3. CONCLUSIONS

Using the VRS station concept with our developed software named "3VRS" similar accuracies can be achieved at distances of up to 20 Km from the nearest reference station as for short baselines in the single station concept. This can also be done with few epochs. Therefore, the distances between the reference stations in a permanent GPS network can be enlarged, resulting in large cost savings for their establishment and maintenance.

In addition, VRS applications, using code data, can be used more often for such kinds of application, resulting in much lower equipment cost. The obtained positional accuracy, of the order of 20 cm, was found to be much better than the accuracy provided by Wide Area Augmentation Systems.

Algorithm development in order to create artificial phase observations for a VRS station may be the next step of the present study.

Ch.Pikridas
Assistant Professor, School of Rural and Surveying Engineering, Department of Geodesy and Surveying, A.U.TH.
A. Fotiou
Professor, School of Rural and Surveying Engineering, Department of Geodesy and Surveying, A.U.TH.
V. Vlachakis
Rural and Surveying Engineering, A.U.TH.