

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟ ΚΟΛΠΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΚΕΔΑΣΤΩΝ

Ηλίας Π.¹, Κοντοές Χ.¹, Παπουτσίης Ι.², Κώτσος Ι.²

¹ Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ινστιτούτο Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης

² Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Περίληψη

Η τεχνική των Σταθερών Σκεδαστών (ΣΣ - Permanent Scatterers - PS), που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Μιλάνου, είναι μία προσέγγιση, η οποία ελαχιστοποιεί τα ανεπιθύμητα στοιχεία θορύβου που παρουσιάζει η κλασική διαφορική συμβολομετρία με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (DInSAR). Τέτοια στοιχεία οφείλονται κυρίως στη χωρική και χρονική αποσυσχέτιση, στην καθυστέρηση του σήματος λόγω των ατμοσφαιρικών και των τροποσφαιρικών μεταβολών, στα σφάλματα τροχιών καθώς και στα τοπογραφικά σφάλματα (σχετιζόμενα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους). Η προσέγγιση της τεχνικής των ΣΣ είναι κατάλληλη για τη μέτρηση των σχεδόν κατακόρυφων παραμορφώσεων της τάξης του ενός χιλιοστού το χρόνο και αξιοποιεί μεγάλο όγκο δεδομένων SAR με την απαίτηση για διαθεσιμότητα φυσικών και/ή τεχνητών Σταθερών Σκεδαστών. Σε αυτή τη μελέτη, περιγράφεται η εφαρμογή της τεχνικής των ΣΣ, ονομαζόμενη PerSePHONE (Permanent Scatterers Project Held by the Observatory, National, of Hellas). Η ανάπτυξη της στηρίχθηκε σε μια σειρά από αλγοριθμικές τροποποιήσεις καθώς και σε νέες μεθόδους για την επιλογή των Υποψήφιων Σταθερών Σκεδαστών. Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται στην βόρεια περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου.

SMALL SCALE SURFACE DEFORMATION DETECTION OF THE GULF OF CORINTH (HELLAS) USING PERMANENT SCATTERERS TECHNIQUE

Elias P.¹, Kontoes C.¹, Papoutsis I.², Kotsis I.²

¹ National Observatory of Athens, Institute for Space Applications and Remote Sensing

² National Technical University of Athens, Department of Rural and Surveying Engineering

Abstract

The Permanent Scatterers (PS) technique, invented by the Politecnico di Milano research team, is an approach that minimises the undesirable noise components in the classic InSAR technique, such as spatial and temporal decorrelations, signal delay due to tropospheric and ionospheric disturbances, orbital errors as well as topographical errors. This approach is suitable for the measurement of near vertical displacements of the order of ~1 mm per year. It exploits almost all of the available SAR interferometric data over an area and requires availability of natural and/or artificial permanent scatterers. In this study we describe the implementation of the PS technique, called PerSePHONE (Permanent Scatterers Project Held by the Observatory, National, of Hellas). Its development has been based on a number of algorithmic adaptations, as well as new approaches in PS candidate selection. An example of this implementation is shown for the case of the Corinth Rift area (Hellas).

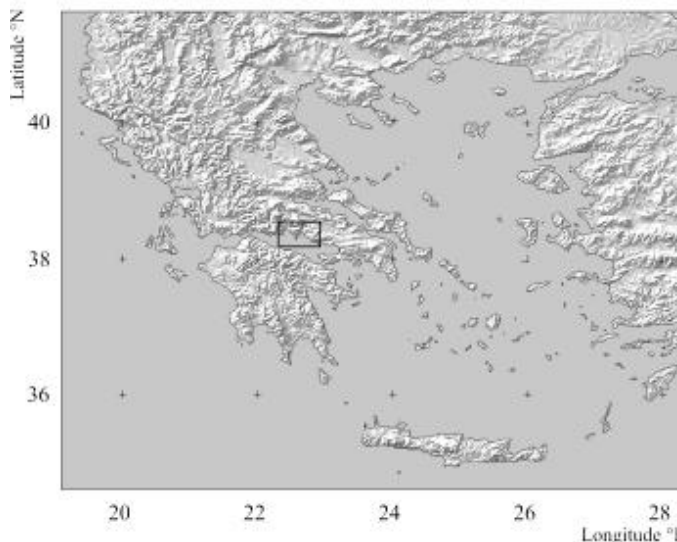
Λέξεις κλειδιά: γραμμική παραμόρφωση, διαφορική συμβολομετρία με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, σταθεροί σκεδαστές.

Key words: linear deformation, SAR interferometry, permanent scatterers.

1. Εισαγωγή

Η διαδεδομένη τεχνική της διαφορικής συμβολομετρίας με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar - DInSAR) έχει προσφέρει σημαντικό όγκο αξιόπιστων μετρήσεων της παραμόρφωσης του εδάφους. Αυτές οι μετρήσεις πάσχουν από ανεπιθύμητες συσιστώσες λόγω της χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης, της καθυστέρησης του σήματος λόγω των τροποσφαιρικών και ιονοσφαιρικών επιδράσεων, των σφαλμάτων τροχιών καθώς και των τοπογραφικών σφαλμάτων (σχετιζόμενα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους). Η πιο ελπιδοφόρα προσέγγιση για τον περιορισμό αυτών των προβλημάτων είναι η επονομαζόμενη τεχνική των Σταθερών Σκεδαστών (ΣΣ - Permanent Scatterers - PS), από την ομάδα POLIMI (Ferretti et al., 2001). Αυτή η τεχνική αξιοποιεί μεγάλο όγκο δεδομένων SAR, σχηματίζοντας μια σειρά από συμβολομετρικά ζευγάρια με μία επιλεγμένη κύρια (master) εικόνα, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων με μεγάλη χρονική και γεωμετρική γραμμή βάσης. Επιπλέον, η τεχνική απαιτεί τη διαθεσιμότητα φυσικών και/ή σταθερών σκεδαστών. Η μέθοδος των ΣΣ είναι ιδανική για τη μέτρηση των παραμορφώσεων μικρής κλίμακας στο έδαφος, που οφείλονται σε προσεισμική δραστηριότητα, καθιζήσεις σε αστικές περιοχές, βαθμιαία κατολίθωση κοντά σε ρήγματα καθώς και σε μετατοπίσεις από ενεργά ρήγματα και ηφαιστεια. Το βασικό κίνητρο για την εφαρμογή της τεχνικής των ΣΣ αποτέλεσε η μελέτη μιας γεωφυσικά ενεργής περιοχής, όπως είναι ο Κορινθιακός Κόλπος.

Η περιοχή μελέτης του Κορινθιακού Κόλπου (καλύπτει ~3350 km² και εκτείνεται βορειοδυτικά από 22°04'E, 38°38'N μέχρι νοτιοανατολικά 22°57'E, 38°14'N), η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 1, έχει αναγνωριστεί σαν περιοχή μείζονος σημασίας εξαιτίας της έντονης γεωφυσικής δραστηριότητας που παρουσιάζει. Είναι μια από τις ηφαιστειακές περιοχές με τον υψηλότερο ρυθμό μετακίνησης σε παγκόσμιο επίπεδο και έχει παράγει μια σειρά από σεισμούς με μέγεθος μεγαλύτερο από 5.8: στις Αλκυονίδες (Φεβρουάριος 1981, M=6.7), στο Αίγιο (Ιούνιος 1995, Mw=6.1) και στο Γαλαξίδι (Νοέμβριος 1992, Mw=5.8). Επιπλέον, μετρήσεις από προγράμματα και μόνιμους δέκτες GPS έχουν αναδείξει την ύπαρξη οριζόντιας μετακίνησης από βορρά προς νότο της τάξης του 1.5 εκατοστού το χρόνο (Briole et al., 2000). Αυτός ο μηχανισμός διάσπασης συχνά οδηγεί σε υποθαλάσσιες κατακρημνίσεις και σε καταστροφικά τσουνάμι. Στη στεριά το ίδιο σύστημα προκαλεί κατολισθήσεις.



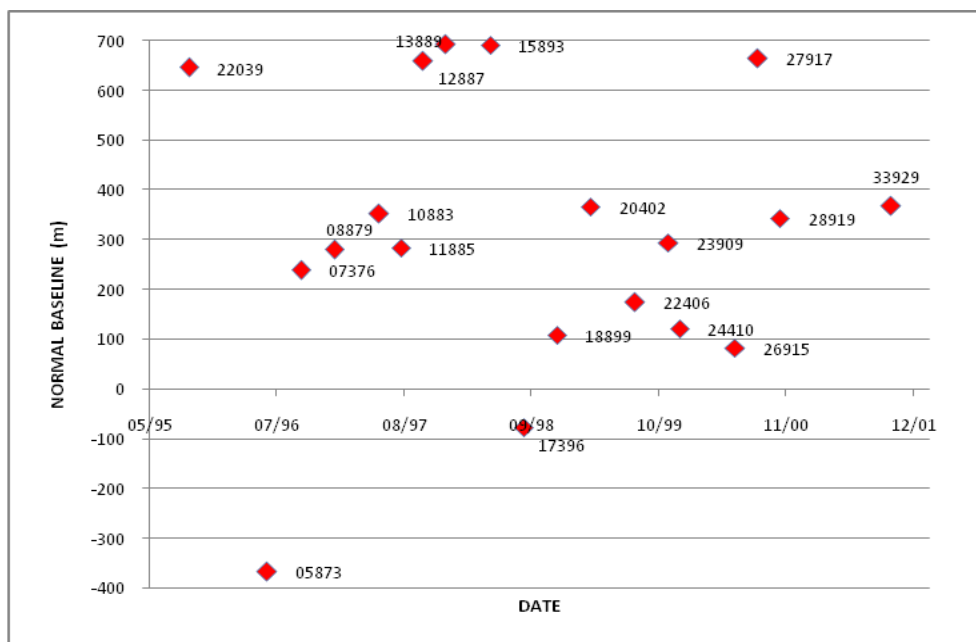
Σχήμα 1. Τοποθεσία της υπό μελέτης περιοχής στην Ελλάδα. Εστιάζεται στο βορειοανατολικό μέρος του Κορινθιακού Κόλπου

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι τα περισσότερα από τα παραπάνω φαινόμενα στην υπό μελέτη περιοχή παρακολουθούνται εδώ και μία δεκαετία στο πλαίσιο αρκετών εθνικών και ευρωπαϊκών προγραμμάτων με χρήση μόνιμων δεκτών GPS, επιτόπιων παρατηρήσεων καθώς και με χρήση κλασσικής διαφορικής συμβολομετρίας (Avallone, 2003; Briole et al., 2000). Αυτές οι τεχνικές παρουσιάζουν περιορισμούς στην εκτίμηση των κατακόρυφων ρυθμών μετακίνησης (~23° από το ζενίθ) με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι περιορισμοί αυτοί αντιπετωπίζονται μέσω της τεχνικής των ΣΣ.

Σε αυτή τη μελέτη περιγράφεται η εφαρμογή της τεχνικής των ΣΣ, ονομαζόμενη PerSePHONE (Permanent Scatterers Project Held by the Observatory, National, of Hellas), η οποία αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

2. Προεπεξεργασία δεδομένων

Κατά τη επιλογή του χρονικού διαστήματος κάλυψης των υπό επεξεργασία δεδομένων αποφεύχθηκε η παρουσία ισχυρών μη γραμμικών φαινομένων, όπως είναι ο σεισμός του Αιγίου τον Ιούνιο του 1995. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση της τεχνικής των ΣΣ για ομοιόμορφη κατανομή των ημερομηνιών λήψης των εικόνων και των κάθετων γραμμών βάσης στα συμβολομετρικά ζευγάρια, η σκηνή ERS-1 που ελήφθη στις 19 Ιουνίου το 1995 (τροχιά 20536, track 007 και frame 283), επιλέχθηκε να είναι η κοινή master σκηνή για τη δημιουργία συμβολογραφημάτων. Συνεπώς, το σετ δεδομένων αποτελείται από 2 ERS-1 (20536 και 22039) και 18 σκηνές ERS-2, οι οποίες εκτείνονται χρονικά σε διάστημα 6½ ετών, από 19 Ιουνίου 1995 μέχρι 16 Οκτωβρίου 2001 (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Κάθετες γραμμές βάσης συναρτήσει των ημερομηνιών λήψης των σκηνών. Οι ετικέτες στα σημεία δείχνουν τον αριθμό τροχιάς κάθε σκηνής.

Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση των ΣΣ, ορισμένα απαραίτητα στάδια προεπεξεργασίας των δεδομένων έπρεπε να λάβουν χώρα. Αυτά σχετίζονται με την εστίαση της

εικόνας, 'κόψιμο' της στην περιοχή ενδιαφέροντος και αναπλήρωση για τη μηδενική απόκλιση Doppler. Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό βήμα αποτελεί η ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων πλάτους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ετεροσυσχέτισης για την κοινή εγγραφή των εικόνων. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της εξομοίωσης των ιστογραμμάτων των εικόνων πλάτους.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη έκδοση του λογισμικού CNES DIAPASON (CNES, 1996) για την παραγωγή των συμβολομετρικών φάσεων και άλλων απαραίτητων υποπροϊόντων για την επεξεργασία των ΣΣ. Τα 19 συμβολογραφήματα είχαν μέγεθος κελιού της τάξης των 4m στο αζιμούθιο και 20m στην κατεύθυνση δορυφόρου - σκηνής (range) και δημιουργήθηκαν από σκηνές single look χωρίς να εφαρμόσουν τεχνικές εξομάλυνσης των pixels. Επισημαίνεται επίσης, πως τα αρχεία με τις ακριβείς τροχιές των δορυφόρων παρήχθησαν από το Delft Institute και ότι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ- Digital Elevation Model - DEM) δημιουργήθηκε από ψηφιοποίηση ισοϋψών των 20m από τοπογραφικούς χάρτες 1:50000, με εκτιμώμενη ακρίβεια $\pm 10m$. Τα κομμάτια του ΨΜΕ χωρίς υψομετρική πληροφορία καλύφθηκαν με επαναδειγματοληψία δεδομένων SRTM-3.

3. Μεταβολή της φάσης στην συμβολομετρία επαναλαμβανόμενου περάσματος

Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας SAR μεταβάλλει την φάση του λόγω 1) της σχετικής θέσης δορυφόρου - σκεδαστή, 2) πιθανές χρονικές μεταβολές του στόχου και 3) ατμοσφαιρικές μεταβολές. Έχοντας $K+1$ SAR εικόνες από την ίδια περιοχή, η φάση του εικονοστοιχείου

$$x = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}, \text{ (όπου } \xi \text{ και } \eta \text{ το αζιμούθιο και το range στην διεύθυνση δορυφόρου-σκεδαστή)}$$

της k εστιασμένης SAR λήψης είναι το άθροισμα διαφόρων συνιστωσών:

$$\psi_k(x) = \frac{4\pi}{\lambda} r_k(x) + \sigma_k(x) + a_k(x) \quad (1)$$

όπου r είναι η απόσταση δορυφόρου-στόχου, σ είναι η φάση ανάκλασης του σκεδαστή και a είναι η συμβολή της ατμόσφαιρας στην φάση. Θεωρώντας μία από τις $K+1$ εικόνες ως την master λήψη, m . Η διαφορά φάσης κάποιας slave εικόνας k ως προς την master είναι :

$$\phi_k(x) = \psi_k(x) - \psi_m(x) = \frac{4\pi}{\lambda} [r_k(x) - r_m(x)] + [\sigma_k(x) - \sigma_m(x)] + [a_k(x) - a_m(x)] \quad (2)$$

Στην συμβολομετρία επαναλαμβανόμενου περάσματος η απόσταση r_k μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως :

$$r_k = r_m + \Delta r_k + \Delta \mu_k \quad (3)$$

όπου Δr_k είναι η διακύμανση της απόστασης λόγω των διαφορετικών θέσεων του δορυφόρου και $\Delta \mu_k$ είναι η πιθανή μετακίνηση του στόχου στην Διεύθυνση της γραμμής Στόχου-Δορυφόρου - ΔΣΔ (line of sight - LOS), στην χρονική απόσταση μεταξύ των δύο περασμάτων. Η τάξη μεγέθους της πρώτης συνιστώσας είναι συνήθως δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα, ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί σε χιλιοστομετρική παραμόρφωση του εδάφους.

Η συμβολομετρική φάση $\phi_k(x)$ είναι μια σύνθεση από αρκετές συνιστώσες οι οποίες εξαρτώνται από την γεωμετρία των λήψεων (θέσεις του δορυφόρου και τοπογραφία), μετακίνηση του εδάφους, μεταβολές στις παραμέτρους σκέδασης (λόγω των χρονικών και χωρικών μη συσχετίσεων) καθώς και τις ατμοσφαιρικές ανομοιογένειες.

$$\phi_k(\underline{x}) = \phi_{rk}(\underline{x}) + \phi_{\mu k}(\underline{x}) + \phi_{\alpha k}(\underline{x}) + \phi_{\sigma k}(\underline{x})$$

$$\text{όπου: } \phi_{rk}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_k(\underline{x})$$

$$\phi_{\mu k}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \mu_k(\underline{x})$$

$$\phi_{\alpha k}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (\alpha_k(\underline{x}) - \alpha_m(\underline{x}))$$

$$\phi_{\sigma k}(\underline{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (\sigma_k(\underline{x}) - \sigma_m(\underline{x}))$$

3.1 Προσδιορισμός του προβλήματος

Έστω $\frac{\Delta\phi}{\lambda}$ η $[K \times H]$ μήτρα των συμβολομετρικών φάσεων $\phi_k(\underline{x})$ των H το πλήθος θεωρούμενων Υποψήφιων ΣΣ (ΥΣΣ). Έχουμε :

$$\underline{\Delta\phi} = \underline{\alpha} \mathbf{1}^T + p_\xi \underline{\xi}^T + p_\eta \underline{\eta}^T + \underline{B} \underline{\Delta q}^T + \underline{T} \underline{v}^T + E \quad (5)$$

όπου:

- $\underline{a}[K \times 1]$ οι σταθεροί όροι των τιμών φάσης.
- $\underline{p}_\xi[K \times 1]$ και $\underline{p}_\eta[K \times 1]$ οι τιμές κλίσης των γραμμικών συνιστωσών, κατά μήκος τουαζιμουθίου $\underline{\xi}[K \times 1]$ και του slant range $\underline{\eta}[K \times 1]$ λόγω ατμοσφαιρικών και τροχιακών επιδράσεων.
- $\underline{B}[K \times 1]$ η κανονική γραμμή βάσης ως προς την master. Για μεγάλες περιοχές ο \underline{B} δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερός και η μήτρα $\underline{B}[K \times 1]$ πρέπει να γίνει μήτρα $\underline{B}[K \times H]$. Εν τούτοις για λόγους απλότητας χρησιμοποιείται η απλή έκφραση.
- $\underline{\Delta q}[H \times 1]$ το σφάλμα του ΨΜΕ.
- $\underline{T}[K \times 1]$ το χρονικό διάστημα μεταξύ της κάθε slave και της master.
- $\underline{v}[H \times 1]$ την ταχύτητα στην slant range διάσταση.

- $E[K \times 1]$ οι υπόλοιπες συνιστώσες οι οποίες περιλαμβάνουν ατμοσφαιρικές επιδράσεις (εκτός από σταθερές και γραμμικές συνιστώσες), θόρυβο στην φάση λόγω χρονικών και χωρικών μη συσχέτιστων καθώς και επιδράσεις πιθανής μη γραμμικής μετακίνησης του στόχου.

Η επίλυση του προβλήματος θα ήταν γραμμική αν οι ξεδιπλωμένες (μετά από επίλυση των ακέραιων ασαφειών) τιμές της μήτρας φάσης Φ ήταν διαθέσιμες. Έχουμε $H \cdot K$ εξισώσεις και $3K + 2$ αγνώστους : $\underline{a}, \underline{p}_\xi, \underline{p}_\eta, \underline{\Delta q}, \underline{v}$. Δεδομένα είναι τα : $\underline{\Delta\Phi}, \underline{\xi}, \underline{\eta}, \underline{B}, \underline{T}$.

Επιλύοντας την εξίσωση 5 μπορούμε να πάρουμε την τοπική τοπογραφία, το πεδίο ταχύτητας καθώς και την συμβολή των σταθερών και γραμμικών όρων. Πρακτικά έχουμε ένα κάνουμε με ένα μη γραμμικό σύστημα (οι τιμές φάσης είναι modulo 2π), το οποίο επιλύεται μέσω διαδοχικών προσεγγίσεων. Για την αφετηρία των επαναλήψεων θα χρησιμοποιηθούν οι αρχικοί ΥΣΣ. Συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης 5 είναι:

1. Ο SNR είναι υψηλός (οι ΥΣΣ δεν επηρεάζονται πολύ από την χρονική μη συσχέτιση).
2. Το μοντέλο σταθερής ταχύτητας παραμόρφωσης του στόχου ισχύει.
3. Η εικόνα ατμοσφαιρικής διαταραχής - ΕΑΔ (atmospheric phase screen - APS) μπορεί να προσεγγιστεί με ράμπα φάσης.

Η τελευταία συνθήκη ισχύει (σαν μιας πρώτης τάξης προσέγγιση) εάν η περιοχή ενδιαφέροντος είναι μικρή (5x5Km) καθώς η υπόθεση γραμμικής παραμόρφωσης χρησιμοποιείται συχνά στα γεωφυσικά μοντέλα. Σε περίπτωση μη γραμμικής παραμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο πολύπλοκες μέθοδοι.

3.2 Επιλογή των ΥΣΣ

Για την επιλογή των ΥΣΣ αναλύθηκε ένα μεγάλο πλήθος εικόνων πλάτους SAR για εικονοστοιχεία τα οποία παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά συν τω χρόνω. Στην πραγματικότητα καθώς η σταθερότητα της φάσης μπορεί να προσδιορίζεται μόνο μετά την εκτίμηση και την αφαίρεση των διαφόρων συνιστωσών της φάσης, οι απόλυτες τιμές είναι σχεδόν ανεπηρέαστες στα πιο πολλά φαινόμενα που συμβάλουν στις τιμές της φάσης (ΕΑΔ, σφάλματα ΨΜΕ, παραμορφώσεις εδάφους, σφάλματα τροχιάς, κ.α.). Λόγω του ότι αναζητούνται στόχοι οι οποίοι επηρεάζονται ελάχιστα από χρονικές και χωρικές μη συσχέτισεις, τα εικονοστοιχεία τα οποία παρουσιάζουν μια αρκετά σταθερή σειρά τιμών πλάτους (παρά τις υψηλές χρονικές και χωρικές τιμές διασποράς) θα επιλεγούν ως ΥΣΣ. Μια προσέγγιση της σταθερότητας της φάσης (για υψηλό SNR) είναι :

$$\sigma_v \cong \frac{\sigma_{A_K}}{m_{A_K}} \equiv D_A \quad (6)$$

όπου D_A ο δείκτης διασποράς ($\Delta\Delta$), σ_v η διασπορά της φάσης, σ_{A_K} η τυπική απόκλιση A_K οι τιμές πλάτους των σκηνών και m_{A_K} η μέση τιμή τους. Ο δείκτης διασποράς είναι ένα μέτρο της σταθερότητας της φάσης, τουλάχιστον για τιμές υψηλού SNR. Έτσι υπολογίστηκε ο δείκτης διασποράς της οικογένειας με την χρήση των τιμών πλάτους των οποία τα ιστογράμματα ταυτίστηκαν πρώτα (με προσαρμογή ιστογράμματος - histogram matching αντί με την χρήση του παράγοντα βαθμονόμησης K των δορυφόρων ERS, όπως στο (Ferretti *et al.*, 2001)), χωρίς να λαμβάνεται η θάλασσα έτσι ώστε να ταιριάζουν ραδιομετρικά. Επίσης οι περιοχές στις οποίες υπήρχε μεγάλη πιθανότητα για εμφάνιση του φαινομένου επικάλυψης

και σκίασης θεωρήθηκαν εξ' ορισμού ως έχοντες υψηλό δείκτη διασποράς. Μετά από εξέταση διαφόρων κατωφλίων με κριτήρια την χαρτογραφική επιβεβαίωση και την αποφυγή των προαναφερθέντων φαινομένων επιλέχθηκε ένα κατώφλι για τον δείκτη διασποράς έτσι ώστε τα εικονοστοιχεία με μικρότερη τιμή (από το κατώφλι) να χαρακτηρισθούν ως ΥΣΣ πρώτης προσέγγισης (ΥΣΣ¹). Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε περιοχές υπολογισμού έτσι ώστε να ισχύει η συνθήκη της ΕΑΔ της §3.1.

3.3 Επίλυση του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το μη γραμμικό (λόγω modulo 2π) σύστημα επιλύεται με ελάχιστα τετράγωνα, μέσω διαδοχικών προσεγγίσεων. Έτσι τα σφάλματα του ΨΜΕ Δ_q και οι ταχύτητες ν υπολογίζονται με αφετηρία μικρών χρονικών και χωρικών γραμμών βάσης και έπεται βελτίωση της ακρίβειας των καθώς λαβαίνει χώρα καλύτερη εκτίμηση και αφαίρεση των γραμμικών όρων. Λόγω του ότι το σύστημα είναι αυστηρά μη γραμμικό, η σύγκλιση δεν είναι σίγουρη και εξαρτάται από τους εξής παράγοντες (Ferretti *et al.*, 2001):

1. Την χωρική και χρονική κατανομή των λήψεων. Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη. Χωρικά και χρονικά κενά πρέπει να αποφεύγονται.
2. Το σφάλμα του ΨΜΕ. Το Δ_q πρέπει να συμβάλει σε μικρό βαθμό για μεγάλες χωρικές γραμμές βάσης.
3. Οι διαστάσεις της περιοχής υπολογισμού. Η ΕΑΔ και οι τροχιακοί κροσσοί πρέπει να προσεγγίζονται ικανοποιητικά με συνιστώσες γραμμικών φάσεων.
4. Η μετακίνηση του στόχου πρέπει να είναι αρκετά αργή και να αποφευχθεί το φαινόμενο της αλίσιας και να προσεγγίζεται ικανοποιητικά από ένα μοντέλο σταθερής ταχύτητας. Η ταχύτητα πρέπει να συμβάλει σε μικρό βαθμό στην φάση για μικρές χρονικές γραμμές βάσης.

3.4 Εκτίμηση της Εικόνας Ατμοσφαιρικής Διαταραχής και Ενιαία Συνοχή Φάσης (ΕΣΦ)

Με το πέρας της σύγκλισης του αλγορίθμου λαμβάνουμε μια σχετικά ακριβής εκτίμηση του σφάλματος του ΨΜΕ, $\hat{\Delta}q$, των ταχυτήτων στην $\Delta\Sigma$, $\hat{\nu}$, καθώς και των κλήσεων και των σταθερών όρων των γραμμικών συνιστωσών της ΕΑΔ (\hat{a} , \hat{p}_ξ , \hat{p}_η). Τα υπόλοιπα της φάσης από το μοντέλο σταθερής ταχύτητας οφείλονται σε ατμοσφαιρικές διαταραχές διαφορετικές από την ράμπα φάσης και σε θόρυβο (κυρίως λόγω της χρονικής και χωρικής μη συσχέτισης).

$$\underline{E}' = (\underline{\Delta\Phi} - \underline{\Delta\hat{\Phi}}) = \underline{\Delta\Phi} - (\hat{a}\underline{1}^T + \hat{p}_\xi \underline{\xi}^T + \hat{p}_\eta \underline{\eta}^T + \underline{b}\underline{\Delta\hat{q}}^T + \underline{T}\underline{\hat{\nu}}^T) = E'_{atmo} + E'_n \quad (7)$$

Για το φιλτράρισμα του E'_{noise} και για την εκτίμηση των ατμοσφαιρικών διαταραχών χρησιμοποιήθηκε η ισχυρή χωρική συσχέτιση της τελευταίας. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκε παρεμβολή και επαναδειγματοληψία με την μέθοδο Kriging σε ανομοιόμορφο κানাβο (Williams *et al.*, 1998).

Η μέση τιμή της εκτιμώμενης ατμοσφαιρικής συνιστώσας ΕΑΔ στα διαφορικά συμβολογραφήματα :

$$APS_{master}^T = \frac{1}{K} \left\{ \underline{1}^T \cdot \left(\hat{E}_{atmo} + \hat{p}_{\xi} \xi^T + \hat{p}_{\eta} \eta^T \right) \right\} \quad (8)$$

είναι μια εκτίμηση της συμβολής στην φάση της master σκηνής. Η ακριβεία της εξαρτάται από το πλήθος των σκηνών, την πυκνότητα των ΥΣΣ και την αξιοπιστία της $\hat{\Delta\Phi}$. Η μήτρα των ΕΑΔ των slave λήψεων $APS_{slaves}[HxK]$ υπολογίζεται από την ΕΑΔ της master $APS_{master}[Hx1]$ ως εξής :

$$APS_{slaves} = \left(\hat{E}_{atmo} + \hat{p}_{\xi} \xi^T + \hat{p}_{\eta} \eta^T \right) - \underline{1} \cdot APS_{master}^T \quad (9)$$

Από τις εκτιμώμενες ποσότητες, η φάση κάθε slave σκηνής μετατρέπεται ως να είχε ληφθεί από την τροχιά της master σκηνής, χωρίς την μετακίνηση του εδάφους και των ατμοσφαιρικών διαταραχών. Οι νέες φάσεις είναι:

$$\underline{\zeta} = \underline{\Psi} - \left(APS + b\hat{\Delta q}^T + T\hat{v}^T \right) = \underline{1}\underline{\psi}_m^T + \underline{E}'' \quad (10)$$

όπου :

- $\underline{\Psi}[K \times H]$ περιέχει τις φάσεις των H το πλήθος ΥΣΣ όπως φαίνονται από τις K slave σκηνές.
- $\underline{\psi}_m^T[K \times H]$ περιέχει τις φάσεις των H το πλήθος ΥΣΣ όπως φαίνονται από την master σκηνή, αντισταθμισμένες για την ΕΑΔ της master.
- $APS[K \times H]$ Περιέχει την εκτιμημένη ΕΑΔ της κάθε slave σκηνής.
- $\underline{E}''[K \times H]$ είναι η μήτρα των υπολοίπων.

Η ενιαία συνοχή φάσης (ΕΣΦ) αποτελεί ένα μέτρο της διασποράς των φάσεων των νέων slave φάσεων ως προς τις τιμές της master σκηνής. Η τιμή της κυμαίνεται στο διάστημα $[0, 1]$. Όσο πλησιάζει την τιμή 1 η διασπορά της φάσης μειώνεται. Υπολογίστηκε ως :

$$|\gamma_h| \equiv \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \exp(j\underline{\zeta}_{kh}) \right| \quad (11)$$

και αποτελεί το ένα από τα δύο κριτήρια για την επιλογή των ΣΚ από τους ΥΣΣ, όπως θα δούμε παρακάτω.

3.5 Επιλογή των ΣΣ με χρήση της σταθερότητας της φάσης.

Μέχρι εδώ έχουν εκτιμηθεί η ταχύτητα κατά την ΔΣΔ και τα σφάλματα του ΨΜΕ για H το πλήθος εικονοστοιχεία των σκηνών τα οποία επιλέχθηκαν βάσει του δείκτη διάχυσης του πλάτους DA. Λόγω των περιορισμών που επιβάλλει αυτή η μέθοδος, ορισμένοι σκεδαστές θα πρέπει να αφαιρεθούν. Οπότε η επιλογή αυτή θα γίνει με ανάλυση της χρονοσειράς των τιμών φάσης των μέχρι τώρα ΥΣΣ.

Στην παρούσα φάση, έχοντας δηλαδή εκτιμηθεί και αφαιρεθεί η ΕΑΔ θα υπολογισθούν οι τελικές ταχύτητες των στόχων (στην ΔΣΔ) και τα σφάλματα του ΨΜΕ, χρησιμοποιώντας ένα περιοδόγραμμα, με ακανόνιστη δειγματοληψία σε δύο διαστάσεις, στην γραμμή βάσης του χώρου και του χρόνου. Στην ουσία οι δυο άγνωστοι υπολογίζονται μεγιστοποιώντας την συνοχή της φάσης γ κάθε εικονοστοιχείου :

$$\arg \max_{\Delta q, v} \left\{ |\gamma| = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j\varphi_k} \cdot e^{-j(C_q B_k \cdot \Delta q + C_v T_k \cdot v)} \right| \right\} \quad (12)$$

όπου φ_k είναι η τιμή φάσης του διαφορικού συμβολογραφήματος k μετά την αφαίρεση της ΕΑΔ.

Η μέγιστη συνοχή της φάσης (ΜΣΦ), $\max(|\gamma|)$, αποτελεί ένα δεύτερο κριτήριο για την επιλογή των ΣΣ από τους ΥΣΣ.

4. Μεθοδολογία

Η ανάπτυξη του αλγόριθμου PerSePHONE βασίστηκε σε ένα πλήθος προσαρμογών για την επιλογή των ΣΣ και ΥΣΣ. Η περιοχή μελέτης διαιρέθηκε σε 800 υποπεριοχές υπολογισμού, διαστάσεων 500 εικονοστοιχείων στο αξιμούθιο και 100 εικονοστοιχείων στο range, καλύπτοντας μια περιοχή $\sim 4\text{Km}^2$. Περίπου 200,000 στόχοι οι οποίοι είχαν $\Delta d < 0.33$ αναγνωρίστηκαν σε όλες τις περιοχές υπολογισμού (§3.1, §3.2) ως μια πρώτη επιλογή των ΥΣΣ (υποδηλώνεται ως ΥΣΣ(1)), όπου ο δείκτης δείχνει το σετ των ΥΣΣ το οποίο εξάγεται από το πρώτο διαδοχικό βήμα βελτιστοποίησης, όπως περιγράφεται παρακάτω και κυμαίνεται από την τιμή 1 έως το ολικό πλήθος των βημάτων βελτιστοποίησης, n). Η συμμετοχή της ΕΑΔ υπολογίστηκε χωριστά σε κάθε περιοχή υπολογισμού μέσω της επίλυσης ενός μη γραμμικού συστήματος, με χρήση ενός επαναληπτικού αλγόριθμου (§3.1, §3.2), εφ' όσον οι συμβολομετρικές τιμές φάσης είναι γνωστές μόνο ως modulo-2π. Η επιλογή των ΥΣΣ ενισχύθηκε αναγνωρίζοντας και αφαιρώντας εκείνους τους ΥΣΣ οι οποίοι αποτρέπουν την σύγκλιση του αλγορίθμου, είτε λόγω χαμηλής ακρίβειας του αντίστοιχου ΨΜΕ (το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τους συμβολομετρικούς υπολογισμούς) είτε λόγω του γεγονότος ότι η κίνησή τους οδηγεί σε αλίσια και δεν μπορεί να προσεγγιστεί με το μοντέλο σταθερής ταχύτητας (§3.3). Στη συνέχεια υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση των τιμών διόρθωσης των αγνώστων (ταχύτητας και σφάλματα του ΨΜΕ) σε κάθε προκεχωρημένο βήμα επανάληψης. Αυτή η ποσότητα χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο για τη διατήρηση των ΥΣΣ (από τους ΥΣΣ(1)), οι οποίοι παρουσιάζουν χαμηλή διασπορά των τιμών διόρθωσης στα προκεχωρημένα βήματα των επαναλήψεων. Το προκύπτον σετ ΥΣΣ (ΥΣΣ(2)) εισήχθη ξανά στον επαναληπτικό αλγόριθμο και η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλήφθηκε έως ότου είτε ο αλγόριθμος συγκλίνει είτε το πλήθος των ΥΣΣ(n) γίνει μικρότερο από μια ελάχιστη τιμή κατωφλίου. Η τιμή αυτή τέθηκε 20. Ο αλγόριθμος τελικά συγκλίνει εάν, εκτός από τους προαναφερθέντες παράγοντες, η χωροχρονική κατανομή των σκηνών είναι ομοιόμορφη και οι διαστάσεις κάθε περιοχής υπολογισμού είναι αρκετά μικρές, έτσι ώστε η ΕΑΔ και οι τροχιακοί κροσσοί συμβολής να προσεγγίζονται ικανοποιητικά από συνιστώσες γραμμικής φάσης (§3.3). Επιπλέον, οι μη γραμμικές ατμοσφαιρικές κατανομές χαμηλής συχνότητας απομονώθηκαν από τα κατάλοιπα της φάσης (η τιμή της φάσης μετά την αφαίρεση της ΕΑΔ), χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο Kriging (§3.4) και προστέθηκαν στην ΕΑΔ. Με το τέλος της σύγκλισης, 56 περιοχές υπολογισμού ικανοποιούσαν τους προαναφερθέντες παράγοντες και συμμετείχαν περαιτέρω στους υπολογισμούς. Ένα πλήθος 1599 ΥΣΣ διατηρήθηκαν, έχοντας πυκνότητα ~ 28.5 ΥΣΣ ανά περιοχή υπολογισμού ή ~ 6 ΥΣΣ ανά Km^2 . Αυτή η τιμή είναι χαμηλή σε σύγκριση με τις αστικές περιοχές. Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες περιοχές υπολογισμού με μεγάλο πλήθος ΥΣΣ(n) είχαν πυκνότητα έως και 22 ΥΣΣ ανά Km^2 .

Στη συνέχεια για το βήμα της επιλογής των ΣΣ το πρώτο κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ΕΣΦ (§3.4), η οποία αντιστοιχεί στη σταθερότητα της τιμής της φάσης (απουσία της ΕΑΔ, των σφαλμάτων της τροχιάς, της εκτίμησης των ρυθμών παραμόρφωσης και του ΨΜΕ) κάθε στόχου διαμέσου όλων των σκηνών.

Μετά την αφαίρεση της ΕΑΔ και των σφαλμάτων τροχιάς από κάθε συμβολομετρικό ζεύγари, ο υπολογισμός των τελικών ταχυτήτων και σφαλμάτων του ΨΜΕ θεωρείται ως ένα

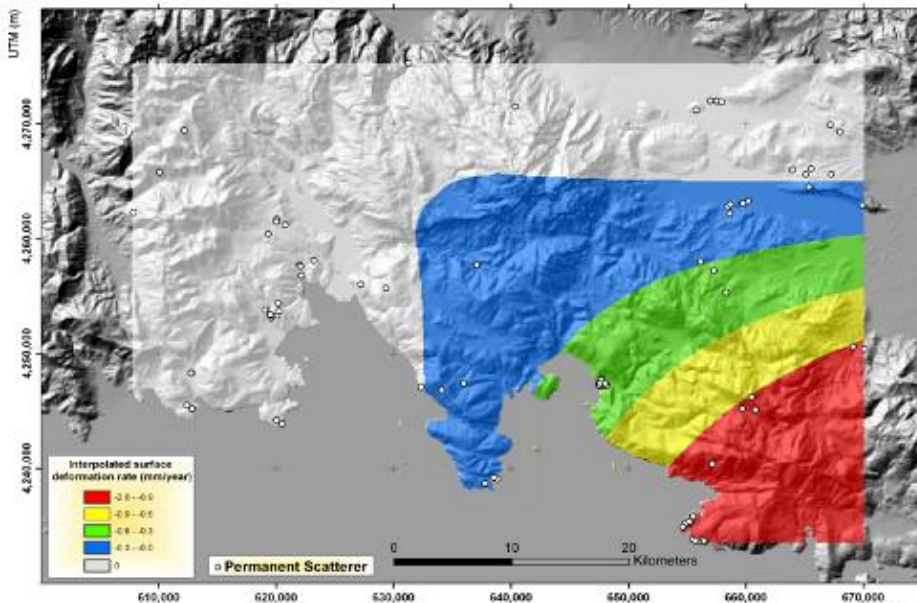
μη γραμμικό ανάστροφο πρόβλημα, το οποίο επιλύεται μέσω της σάρωσης ενός δισδιάστατου παραμετρικού χώρου (η ταχύτητα και το σφάλμα του ΨΜΕ) και μεγιστοποιώντας το δείκτη συσχέτισης, ο οποίος στην περίπτωση μας είναι η ΣΦ. Αυτός ο δείκτης αντιστοιχεί στη σταθερότητα της φάσης του στόχου, η οποία φάση προκύπτει από τις τελικές ταχύτητες παραμόρφωσης και σφαλμάτων του ΨΜΕ μετά από την αφαίρεση της ΕΑΔ από τις τιμές φάσης της διαφορικής συμβολομετρίας. Η ΜΣΦ κάθε στόχου χρησιμοποιήθηκε ως ένα δεύτερο κριτήριο για την επιλογή των ΣΣ (§3.5.) Με την εφαρμογή κατωφλίων στα κριτήρια ΕΣΦ και ΜΣΦ με τιμές 0.2 και 0.69 αντίστοιχα, προκύπτει ένα πλήθος 107 ΣΣ σε 49 περιοχές υπολογισμού.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο κώδικας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και εκτελέστηκε με τη χρήση του Matlab Distributed Computing Engine, για παράλληλη επεξεργασία των περιοχών υπολογισμού.

Η αναφερθείσα τεχνική ΣΣ μαζί με τις προσαρμογές και τις υφιστάμενες δυνατότητες επεξεργασίας για παραγωγή συμβολογραφημάτων (χρησιμοποιώντας το CNES DIAPASON) καθώς και προβολή σε κοινό χαρτογραφικό σύστημα, ενοποιήθηκαν σε μία κοινή αλυσίδα επεξεργασίας.

5. Αποτελέσματα

Επειδή η πυκνότητα των ΣΣ ήταν μικρή, η χρήση μια επιφάνειας παρεμβολής κρίθηκε απαραίτητη. Ένα πλήθος τέτοιων επιφανειών υπολογίστηκαν για την εκτίμηση του πεδίου του ρυθμού παραμόρφωσης. Αυτή η 'trial and error' διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα μια διγραμμική επιφάνεια με εξίσωση $\zeta = a + \beta x + \gamma y + \delta xy$, όπου ζ είναι η υπολογισθείσα επιφάνεια και a , β , γ και δ είναι οι παράμετροι οι οποίες εξήχθησαν από το σετ των ΣΣ (Σχήμα 3). Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (rms) μεταξύ των τιμών των ΣΣ και της διγραμμικής επιφάνειας είναι 1.1mm ανά έτος. Μια τάση καθίζησης ~2mm ανά έτος του ΝΔ της περιοχής μελέτης είναι εμφανής.



Σχήμα 3. Οι Σταθεροί Σκεδαστές και η διγραμμική επιφάνεια

6. Συμπεράσματα

Λόγω των συνθηκών κάλυψης (υψηλή βλάστηση, έλλειψη αστικών και βραχώδων περιοχών) καθώς και της υψηλής νεφοκάλυψης και βροχώπτωσης, η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου θεωρείται μια ιδιαίτερη και απαιτητική περίπτωση για εφαρμογή της τεχνικής των ΣΣ.

Παρ' όλα αυτά η παρούσα ανάλυση ανέδειξε περιοχές με ικανοποιητικό αριθμό ΣΣ (για τον υπολογισμό επιφάνειας παρεμβολής) και συνέστησε μια τάση καθίζησης. Η αναφορά (Stefatos *et al.*, 2002), η οποία δηλώνει ότι το βόρειο τμήμα του Κορινθιακού κόλπου φαίνεται να υπόκειται μιας περιφεριακής καθίζησης, επιβεβαιώνει το συμπέρασμα της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

Avallone A., 2003: Analyse de dix ans de deformation du rift de Corinthe (Grece) par geodesie spatiale, These de Doctorat, IPGP.

Briole P., A. Rigo, H. Lyon-Caen, J. Ruegg, K. Papazissi, K. Mitsakaki, 2000: Active deformation of the Corinth rift, Greece: Results from repeated Global Positioning System surveys between 1990 and 1995. *J. Geophys. Res.* 105, 25605–25625.

Colesanti C., A. Ferretti, N Fabrizio, C. Prati, and F. Rocca, 2003: SAR Monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* vol. 41, No. 7, 1685-1701.

Crosetto M., M. Castillo, and R. Arbiol, 2003: Urban subsidence monitoring using radar interferometry: algorithms and validation. *Photogrammetric Engineering & remote sensing.* vol. 6, No. 7, 775-783.

Ferretti A., C. Prati, and F. Rocca, 2001: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,* vol. 39, No. 1, 8–19.

Stefatos A., G. Papatheodorou, G. Ferentinos, M. Leeder, and R. Collier, 2002: Seismic reflection imaging of active offshore faults in the Gulf of Corinth: their seismotectonic significance. *Basin Research.* 14, 487-502.

Tarantola A., 1987: Inverse Problem Theory. Methods for data fitting model parameter estimation. **Εκδόσεις** Elsevier Science Ltd.

Williams S., S. Bock, and P. Pang, 1998: Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *J. Geophys. Res.* vol. 103, No. B11, 27051-27067.

CNES, 1996: Philosophie et mode d'emploi de la chaine logicielle interferometrique DIAPASON.