

Αξιολόγηση της εφαρμογής του Μετασχηματισμού Hilbert - Huang στην αναγνώριση πρόδρομων σεισμικών φαινομένων μέσω της ανάλυσης σημάτων ευρωπαϊκών σταθμών στη ζώνη VLF

Χ. Σκέμπερης¹, Θ. Α. Ξένος¹, Δ.Ν. Αραμπέλος², Σ. Σπαταλάς²

¹ Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,

² Τμ. Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Περίληψη

Στην εργασία αυτή αξιολογείται η καταλληλότητα της μεθόδου Μετασχηματισμού Hilbert Huang (Empirical Mode Decomposition) στην αναγνώριση πρόδρομων σεισμικών φαινομένων από την ανάλυση σημάτων που προέρχονται από εκπομπές ευρωπαϊκών ραδιοσταθμών στη ζώνη συχνοτήτων VLF. Έτσι, παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων και αναλύσεων λήψεων για περιόδους που έγιναν σεισμοί στον ελληνικό χώρο και διερευνάται η αποδοτικότητα της μεθόδου.

1. Εισαγωγή

Η προσπάθεια πρόβλεψης σεισμών ανάγεται στην αρχαιότητα. Πράγματι, Ο Αναξίμανδρος, ενώ βρισκόταν στη Σπάρτη το 550 π.Χ., προειδοποίησε τους κατοίκους της πόλης για επερχόμενο σεισμό οπότε αυτοί παρέμειναν όλη τη νύχτα έξω από τα σπίτια τους, και έτσι ενώ η πόλη καταστράφηκε αυτοί γλίτωσαν,. Ο Φερεκύδης πάλι, μαθητής του Πυθαγόρα, πρόέβλεψε ένα σεισμό παρατηρώντας τα νερά πηγαδιού ενώ σύμφωνα με το Θουκυδίδη ο βασιλιάς της Σπάρτης Αρχίδαμος ο Β' κατά τον καταστροφικότερο σεισμό που έπληξε τη Σπάρτη το 465 π.Χ. και που είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 20.000 ατόμων, οδήγησε τον λαό του έξω από την πόλη με την δικαιολογία της αφινίδιας επίθεσης από κάποιο εχθρό με αποτέλεσμα να τον σώσει από τις συνέπειες της καταστροφής του κύριου σεισμού που ακολούθησε. Η ενέργεια αυτή του Αρχίδαμου Β' θεωρείται μέχρι σήμερα η αρχαιότερη ιστορική τεκμηρίωση πρόβλεψης σεισμού καθώς και μέτρου αντισεισμικής προστασίας. Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η εντατική έρευνα γύρω από το ζήτημα της μελέτης των πρόδρομων σεισμικών φαινομένων, που βασίζεται σε μετρήσεις στο έδαφος (ground-based experiments) (Molchanov et al. 2004; Molchanov et al. 2005; Liperovsky et al. 2005; Shvets et al. 2004; Rozhnoi et al. 2004; Contadakis et al. 2007; Contadakis et al. 2008, Tsolis and Xenos 2009,2010; Rozhnoi et al. 2009; Biagi et al. 2009), μέσω δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (space-born studies) (Parrot 2006; Hayakawa et al. 2000) ή και συνδυασμού τους (Rozhnoi et al. 2007;

Muto et al. 2008; He et al. 2011) αποτυπώνει την ύπαρξη ιονοσφαιρικών διαταραχών που εμφανίζονται πριν, κατά και μετά την εκδήλωση των σεισμών σε όλα τα ιονοσφαιρικά στρώματα (D, E, F).

Θεωρείται γενικώς αποδεκτό ότι ο μηχανισμός σύνδεσης Λιθόσφαιρας, Κατώτερης Ατμόσφαιρας (Τροπόσφαιρας-Στρατόσφαιρας), Ιονόσφαιρας λειτουργεί είτε με τη γένεση στην περιοχή του επικέντρου Ατμοσφαιρικών Βαρυτικών Κυμάτων στις ακουστικές συχνότητες (Atmospheric Gravity Waves at acoustic frequencies - AGW), κατά την περίοδο προετοιμασίας του σεισμού, τα οποία με τη σειρά τους κινούνται προς τα πάνω, εμπλουτίζουν το περιεχόμενο τύρβης (turbulent content) της ιονόσφαιρας πάνω από αυτό και δημιουργούν Βαρυτικά Κύματα, τα οποία διαδίδονται στον ιονοσφαιρικό κυματοδηγό (Molchanov et al. 2004), είτε μέσω αναθυμιάσεων (exhalation) που με τη σειρά τους προκαλούν μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή σεισμικής προετοιμασίας, οι οποίες εν τέλει προκαλούν εκεί παρατηρήσιμες ιονοσφαιρικές μεταβολές (Pulinets and Ouzounov 2010). Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '80 παρατηρήθηκε (Gokhberg 1989, Molchanov et al. 1998) ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα των ζωνών συχνοτήτων VLF και LF, τα οποία διαδίδονται στον κυματοδηγό που σχηματίζεται από την επιφάνεια της γης αφενός και το κατώτερο στρώμα της ιονόσφαιρας αφετέρου ή των LF που διαδίδονται και μέσω του σφαιρικού ιονοσφαιρικού κυματοδηγού που σχηματίζει το στρώμα D, επηρεάζονται εντονότατα κατά το πλάτος και τη φάση τους από της συνθήκες πλάσματος της κατώτερης ιονόσφαιρας. Αυτή η μη συνήθης ιονοσφαιρική μεταβλητότητα του στρώματος D στη διαδρομή διάδοσής των ηλεκτρο-μαγνητικών κυμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ολοκληρωμένο διαγνωστικό εργαλείο σεισμικής δραστηριότητας. Αυτός είναι και ο λόγος, που η παρακολούθηση της διάδοσης ραδιοσημάτων στις ζώνες VLF και LF θεωρείται σήμερα ως αξιόπιστο διαγνωστικό εργαλείο των ιονοσφαιρικών διαταραχών προ, κατά και μετά την εκδήλωση σεισμού κατά μήκος της διαδρομής διάδοσής τους.

Από την άλλη βέβαια μεριά η ιονόσφαιρα είναι ένα ιδιαίτερος σύνθετο μη γραμμικό σύστημα που εξαρτάται ή/και επηρεάζεται από ένα τεράστιο αριθμό παραγόντων που συνεισφέρουν στη μεταβλητότητά της. Όπως είναι λοιπόν προφανές, αυτό δεν συντελεί στο να προκύπτει πάντα μια καθαρή και σαφής σχέση αιτίου-αποτελέσματος. Επιπλέον, οι παραδοσιακές και ευρύτατα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης των σημάτων (π.χ. μετασχηματισμός Fourier, μέθοδος κυματιδίων κλπ) δεν είναι κατάλληλες για τα μη στάσιμα σήματα που καλούνται να διερευνήσουν, αφού εξ ορισμού έχουν σχεδιαστεί για την ανάλυση στάσιμων σημάτων. Έτσι στην παρούσα εργασία διερευνάται η αποτελεσματικότητα εφαρμογής του μετασχηματισμού Hilbert-Huang στην ανάδειξη ανώμαλων ιονοσφαιρικών διαταραχών και κατά συνέπεια στη διευκόλυνση ανίχνευσης πιθανών διαταραχών που σχετίζονται με σεισμικά φαινόμενα (Huang et al. 1998, 2005). Η μέθοδος αυτή σε σχέση με τις παραδοσιακά χρησιμοποιούμενες μεθόδους ανάλυσης σήματος όπως π.χ. ο μετασχηματισμός Fourier, ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier ή η μέθοδος των Κυματιδίων παρουσιάζει δύο σημαντικότερα πλεονεκτήματα: Πρώτον, είναι απόλυτα εφαρμόσιμη σε μη-γραμμικά και μη-στάσιμα σήματα, αφού βασίζεται στην τοπική χαρακτηριστική κλίμακα χρόνου των δεδομένων. Δεύτερον, είναι

απολύτως προσαρμόσιμη και εξαρτάται/καθοδηγείται από τα προς επεξεργασία δεδομένα, δεδομένου ότι για την ανάλυση των δεδομένων δεν απαιτεί εκ των προτέρων επιλογή κάποιας βάσης όπως π.χ. το μητρικό κυματίδιο στην ομώνυμη μέθοδο.

2. Μετασχηματισμός Hilbert-Huang

Οι παραδοσιακές τεχνικές φιλτραρίσματος σήματος υλοποιούνται αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας. Στο πεδίο της συχνότητα όμως είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά τεχνική φιλτραρίσματος σε μη-στάσιμα και μη γραμμικά σήματα που προκύπτουν από μη-γραμμικά μέσα. Αυτό, μεταξύ άλλων, οφείλεται στο γεγονός ότι η συχνοτική ανάλυση ενός μη-γραμμικού και μη στάσιμου σήματος γεννά αρμονικές σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων με αποτέλεσμα κάθε φιλτράρισμα στο πεδίο της συχνότητας να εξαλείφει κάποιες από αυτές. Αυτό καταλήγει στην παραμόρφωση των κυματομορφών βασικών ρυθμών που κείνται εκτός του εύρους συχνοτήτων του φίλτρου.

Ένα μέγεθος ιδιαίτερος χρήσιμο στην ανάλυση και επεξεργασία πραγματικών σημάτων είναι η συχνότητα. Είναι προφανές, ότι στην περίπτωση στάσιμου σήματος η συχνότητα λαμβάνει μία τιμή καθ' όλη τη διάρκεια του σήματος και είναι πολύ εύκολο να περιγραφεί από τη συνάρτηση πυκνότητας φάσματος του μετασχηματισμού Fourier. Στην περίπτωση όμως μη στάσιμων σημάτων, η συχνότητα του σήματος είναι συνάρτηση του χρόνου οπότε μπορεί να ορισθεί μόνο τοπικά. Η παράμετρος πλέον που έχει φυσική σημασία είναι η στιγμιαία συχνότητα, η οποία περιγράφει το φασματικό περιεχόμενο του σήματος συναρτήσει του χρόνου και θεωρητικά μπορεί να προσεγγισθεί με τη συχνότητα ενός ημιτονοειδούς σήματος που προσομοιάζει τοπικά προς το προς ανάλυση σήμα στη δεδομένη χρονική στιγμή. Ωστόσο, αν και η έννοια της συχνότητας στα στάσιμα σήματα είναι απολύτως ορισμένη, δεν συμβαίνει το ίδιο στην περίπτωση της μη στασιμότητας, όπως εν προκειμένω. Οι ορισμοί και οι μέθοδοι που προτείνονται στην βιβλιογραφία ποικίλουν ανάλογα κάθε φορά με την εφαρμογή. Ο επικρατέστερος ορισμός στιγμιαίας συχνότητας διατυπώθηκε από τους Carson και Fry¹, σύμφωνα με τον οποίο η στιγμιαία συχνότητα προκύπτει ως ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής φάσης του σήματος. Υπό το πρίσμα αυτό ο Gabor πρότεινε τον υπολογισμό της γωνιακής φάσης κατασκευάζοντας το αναλυτικό σήμα μέσω του μετασχηματισμού Hilbert του πραγματικού προς ανάλυση σήματος. Έτσι, για ένα πραγματικό σήμα $x(t)$, το αναλυτικό σήμα ισούται με:

$$z(t) = x(t) + jH(x(t)), \quad (1)$$

όπου $H(x(t))$ είναι ο μετασχηματισμός Hilbert, ένας ολοκληρωτικός μετασχηματισμός (integral transform) που ουσιαστικά δίνει έμφαση στις τοπικές ιδιότητες του σήματος, αφού αποτελεί συνέλιξη του σήματος με το (t^{-1}) . Έτσι, για ένα πραγματικό λοιπόν σήμα ο μετασχηματισμός Hilbert ορίζεται ως:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} dt, \quad (2)$$

όπου: P η πρωτεύουσα τιμή Cauchy. Συναφώς, η στιγμιαία συχνότητα του σήματος ω προκύπτει από τη σχέση:

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}(\arg z(t)) \quad (3)$$

Ο υπολογισμός όμως της στιγμιαίας συχνότητας, ως παραγώγου της γωνιακής φάσης του αναλυτικού σήματος, έχει νόημα μόνο για σήματα των οποίων το συχνοτικό περιεχόμενο έχει μικρό εύρος, είναι δηλαδή μονοδιάστατα σήματα (monocomponent). Αυτό συνεπάγεται, ότι ο υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας από την παράγωγο της γωνιακής φάσης για ένα πολυδιάστατο σήμα (multicomponent) μπορεί να γίνει μόνο ύστερα από την ανάλυσή του σε μονοδιάστατες συνιστώσες ενώ ακόμη και στην περίπτωση μονοδιάστατων σημάτων οι οποιοσδήποτε dc συνιστώσες, μπορεί να δώσουν λανθασμένα αποτελέσματα για τη στιγμιαία συχνότητα του σήματος. Στην περίπτωση λοιπόν των πολυδιάστατων σημάτων η συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού της στιγμιαίας συχνότητας, συνίσταται στη χρήση του εξελικτικού φάσματος που προκύπτει από τις κατανομές χρόνου-συχνότητας. Έτσι, η στιγμιαία συχνότητα ορίζεται ως η υπό συνθήκη μέση τιμή της συχνότητας στο εξελικτικό φάσμα, υπό την φυσική θεώρηση ότι η στιγμιαία συχνότητα είναι ίση με τη μέση τιμή της συχνότητας του σήματος κάθε χρονική στιγμή. Η υπό συνθήκη (conditional) λοιπόν μέση συχνότητα μιας κατανομής χρόνου-συχνότητας $TFD_x(t, \omega)$, δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \omega \rangle_t = \int \frac{\omega TFD_x(t, \omega)}{P(t)} d\omega, \quad (4)$$

όπου: $P(t)$ η οριακή πυκνότητα φάσματος, που προκύπτει από το ιστόγραμμα των συχνοτήτων στο χρόνο. Στην πράξη ωστόσο η στιγμιαία συχνότητα υπολογίζεται από τα μέγιστα της κατανομής χρόνου-συχνότητας, δεδομένου ότι οι TFD συγκεντρώνουν την ενέργεια του σήματος κατά μήκος της καμπύλης στιγμιαίας συχνότητας (IF law). Έτσι για μια κατανομή $TFD_x(t, \omega)$, η στιγμιαία συχνότητα υπολογίζεται ως:

$$\omega_t = \operatorname{argmax} |TFD_x(t, \omega)|. \quad (5)$$

Ο μετασχηματισμός Hilbert-Huang είναι μια σχετικά νέα μέθοδος που διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Norden Huang το 1996. Η ανάπτυξη του HHT στόχευε σε δύο κύριες κατευθύνσεις:

- i) Η πρώτη αφορούσε στην ανάγκη εξεύρεσης μιας μεθόδου μη γραμμικής ανάλυσης, μη στάσιμων σημάτων, χωρίς την απαίτηση του ορισμού κάποιας συγκεκριμένης βάσης ανάλυσης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με την ανάλυση κυματιδίων.

- ii) Η δεύτερη αφορούσε στην απαίτηση ανάπτυξης μιας μεθόδου ανάλυσης πολυδιάστατων σημάτων σε μονοδιάστατες συνιστώσες με κατάλληλα χαρακτηριστικά έτσι ώστε ο υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Hilbert να δίνει φυσικά αποδεκτά αποτελέσματα χωρίς τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν.

Η διαδικασία της ανάλυσης του σήματος σε ενδογενείς δομικές συνιστώσες (IMF), αποτελεί την βάση του μετασχηματισμού Hilbert-Huang και απορρέει από το γεγονός ότι ο υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Hilbert έχει φυσική σημασία μόνο για μονοδιάστατα σήματα χωρίς dc συνιστώσες. Έτσι, θεωρώντας ότι κάθε πραγματικό σήμα αποτελείται από συνιστώσες υψηλής συχνότητας, οι οποίες επιτίθενται σε συνιστώσες χαμηλής συχνότητας, ο HHT υλοποιεί την ανάλυση σε μονοδιάστατες συνιστώσες (IMF), οι οποίες προκύπτουν από το ίδιο το σήμα χωρίς να προκύπτει ανάγκη προκαθορισμού παραμέτρων σχετικών με τη βάση ανάλυσης. Υπό το πρίσμα αυτό ένα σήμα χαρακτηρίζεται ως IMF όταν ισχύουν τα παρακάτω:

- Ο αριθμός των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος είναι ίσος με τον αριθμό των μηδενισμών αυτού, ή διαφέρει το πολύ κατά ένα.
- Σε οποιοδήποτε σημείο, η μέση τιμή που καθορίζεται από την περιβάλλουσα των μεγίστων και την αντίστοιχη των ελαχίστων του σήματος, είναι ίση με το μηδέν.

Το αρχικό σήμα λοιπόν υποβάλλεται σε μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία, γνωστή ως «κοσκίνισμα» (sifting), η οποία ξεκινά με τον εντοπισμό όλων τα τοπικών ακρότατων του σήματος και το διαχωρισμό τους σε μέγιστα και ελάχιστα. Στη συνέχεια, με τη χρησιμοποίηση κάποιας τεχνικής παρεμβολής (συνήθως cubic splines), καθορίζεται η περιβάλλουσα των ελαχίστων και των μεγίστων του σήματος, χρησιμοποιώντας ως σημεία τα ελάχιστα και τα μέγιστα του σήματος αντίστοιχα. Έτσι, αν για ένα οποιοδήποτε τυχαίο σήμα $x(t)$, ορίσουμε την περιβάλλουσα των μεγίστων του σήματος μετά την παρεμβολή ως $E_{\max}(t)$ και των ελαχίστων $E_{\min}(t)$, το άθροισμα:

$$m_1(t) = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2}, \quad (6)$$

δίνει τη μέση τιμή των δύο περιβαλλουσών, η οποία αφαιρείται από το αρχικό σήμα και το υπόλοιπο $h_1(t)$ εξετάζεται στη συνέχεια ως προς την πληρότητα των κριτηρίων IMF. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, το $h_1(t)$ υπόκειται και αυτό στη διαδικασία εντοπισμού των ακροτάτων και αφαίρεσης της μέσης τιμής που προκύπτει από τις δύο περιβάλλουσες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω κ.ο.κ. έως ότου το υπόλοιπο που θα προκύψει να μπορεί να χαρακτηριστεί ως IMF, δηλαδή:

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t), \quad (7)$$

όπου: k ο αριθμός των επαναλήψεων έως ότου προκύψει η πρώτη $IMF_{1k-1}(t) = IMF_1$. Σε κάθε επανάληψη η μέση τιμή των περιβαλλουσών των ακροτάτων, προ-

σεγγίζει όλο και περισσότερο το μηδέν, αυξάνοντας τη συμμετρία του σήματος προκειμένου αυτό να πληροί τα κριτήρια της *IMF*. Η πρώτη ενδογενής δομική συνιστώσα, η οποία και περιέχει τις υψηλότερες συχνότητες, αφαιρείται κατόπιν από το αρχικό σήμα και το υπόλοιπο r_1 που προκύπτει υποβάλλεται εκ νέου στη διαδικασία του «κοσκινίσματος».

Μετά από την ολοκλήρωση της διαδικασίας sifting, το αρχικό σήμα μπορεί να γραφεί ως:

$$x(t) = \sum_{i=1}^k IMF_i + r_i, \quad (8)$$

όπου: το r_i αποτελεί το τελικό υπόλοιπο που είτε είναι μια σταθερά, είτε ένα μονοτονικό σήμα χωρίς ακρότατα. Ο αριθμός των *IMF* που προκύπτουν από το μετασχηματισμό Hilbert-Huang είναι περίπου ίσος με $\log_2 N$, όπου N το πλήθος των δειγμάτων του.

Όπως προαναφέρθηκε, ένα σήμα για να χαρακτηριστεί *IMF*, θα πρέπει να πληροί

- i) το κριτήριο της συμμετρίας ως προς το μηδέν, και
- ii) το κριτήριο του μηδενικού μέσου των περιβαλλουσών που ορίζονται από τα ακρότατα αυτού.

Παρόλα αυτά, όταν η διαδικασία sifting επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι να επιτευχθεί το δεύτερο κριτήριο κυρίως, οδηγεί σε υπερ-ανάλυση του σήματος με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία *IMF* που δεν έχουν φυσική σημασία. Για το λόγο αυτό απαιτείται ένα κριτήριο διακοπής της επαναληπτικής διαδικασίας, όταν ακόμη τα αποτελέσματα του αλγορίθμου είναι αποδεκτά, σχετικά με την εγκυρότητα των παραγόμενων ενδογενών δομικών συναρτήσεων. Το πρώτο κριτήριο διακοπής του αλγορίθμου προτάθηκε από τον Huang⁴, καθ' όμοιο τρόπο προς το κριτήριο σύγκλισης του Cauchy, όπου ο αλγόριθμος διακόπτεται, όταν η τιμή της τυπικής απόκλισης σ μεταξύ των σημάτων δύο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει αρκετά μικρή π.χ. 0,2 έως 0,3. Το κριτήριο αυτό τροποποιημένο εν προκειμένω έχει τη μορφή:

$$\sigma = \frac{\sum_0^T |h_{k-1}(t) - h_{k-1}^2(t)|}{\sum_0^t |h_{k-1}^2(t)|}, \quad (9)$$

Σε μετέπειτα μελέτες προτάθηκε ένα πιο ποιοτικό κριτήριο, το οποίο εγγυάται σχεδόν μηδενική μέση τιμή των περιβαλλουσών στο μεγαλύτερο ποσοστό του σήματος, όπου κυριαρχούν χαμηλές σχετικά συχνότητες, επιτρέποντας όμως κάποιες τοπικές διακυμάνσεις της μέσης τιμής σε μια περιοχή γύρω από το μηδέν, στα σημεία όπου το σήμα εμφανίζει πολύ υψηλές συχνότητες. Το κριτήριο αυτό εξασφαλίζει μία πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση του σήματος, παρέχοντας συνιστώσες με σχεδόν μηδενική μέση τιμή και ταυτόχρονα αποκλείοντας την υπερ-ανάλυση του

σήματος. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η διαφορά $\alpha(t) = (E_{\max}(t) - E_{\min}(t))/2$, που ορίζεται και ως ρυθμός πλάτους (mode amplitude). Ακολούθως, ορίζεται η συνάρτηση αξιολόγησης (evaluation function) ως $sx = |m(t)/\alpha(t)|$, όπου $m(t)$ η μέση τιμή των φακέλων των ακροτάτων. Η διαδικασία του sifting συνεχίζεται μέχρις ότου η sx προκύψει μικρότερη από κάποια προκαθορισμένη τιμή T_1 , σε ένα μεγάλο ποσοστό των δειγμάτων του σήματος που είναι επίσης προκαθορισμένο και ισούται με $(1-\alpha)$. Για το υπόλοιπο ποσοστό των δειγμάτων η sx απαιτείται να είναι μικρότερη από κάποια άλλη τιμή T_2 , που συνήθως έχει τάξη μεγέθους δεκαπλάσια από την T_1 . Οι τιμές των T_1, T_2 και α που προτείνονται είναι 0,05, 0,5 και 0,05 αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε το κριτήριο της sx στην εφαρμογή του αλγορίθμου για τον υπολογισμό του *HHT*.

Το φασματικό περιεχόμενο του σήματος μπορεί να υπολογιστεί, εκτελώντας το μετασχηματισμό Hilbert για κάθε μία από τις *IMF* εξαιρώντας το υπόλοιπο, οπότε γράφεται ως:

$$x(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{j \int \omega_j(t) dt} \right\}, \quad (10)$$

όπου: n ο αριθμός των *IMF* χωρίς το υπόλοιπο και $a_j(t)$, το πλάτος των *IMF*.

Η παραπάνω σχέση δίνει το πλάτος και τη συχνότητα κάθε *IMF* ως συνάρτηση του χρόνου και ουσιαστικά φανερώνει ότι ο μετασχηματισμός Hilbert-Huang, αποτελεί γενίκευση του μετασχηματισμού Fourier, ο οποίος απεικονίζει το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος, με σταθερό όμως πλάτος για κάθε αρμονική. Η απεικόνιση της κατανομής χρόνου-συχνότητας, για κάθε *IMF* αποτελεί το φάσμα Hilbert και συνήθως γίνεται σε δύο διαστάσεις (συχνότητα-χρόνος), με το πλάτος του σήματος να απεικονίζεται με χρωματική διαβάθμιση. Επίσης, το άθροισμα του πλάτους για όλα τα σημεία που έχουν ίδια τιμή στιγμιαίας συχνότητας, δίνει το οριακό φάσμα Hilbert (marginal Hilbert spectrum), το οποίο και εκφράζεται μαθηματικά:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt, \quad (11)$$

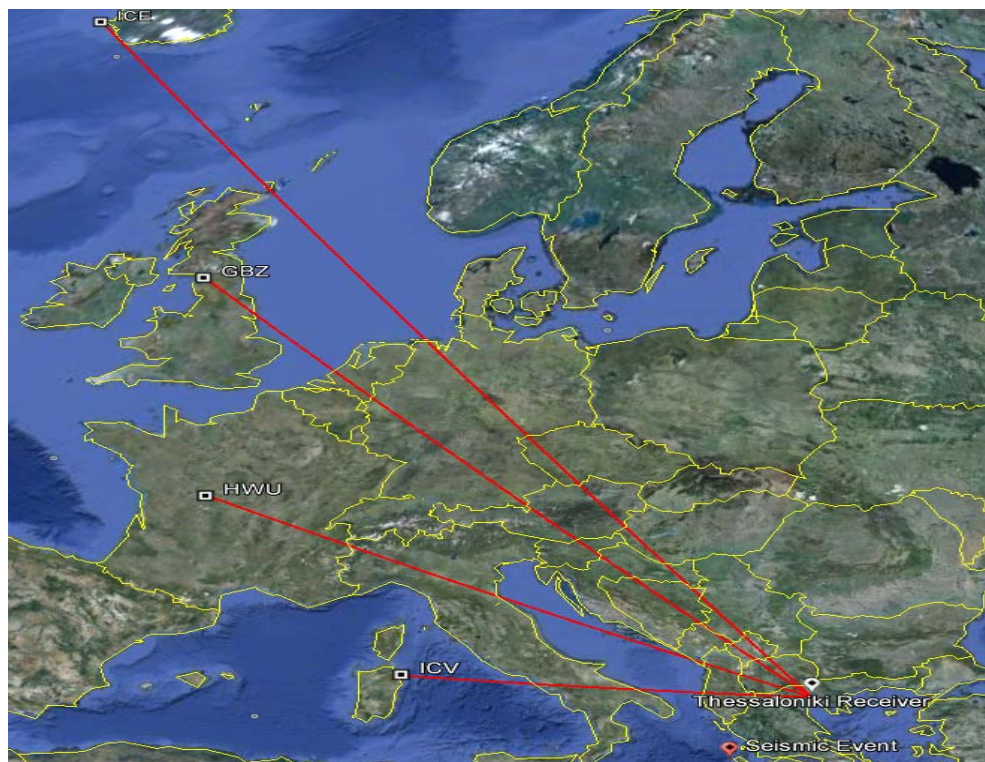
όπου με $H(\omega, t)$ το φάσμα Hilbert.

3. Δεδομένα – Ανάλυση Δεδομένων

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από λήψεις σημάτων VLF, που εκπέμπονται από ευρωπαϊκούς σταθμούς VLF (Πίνακας I, Εικ. 1)). Οι λήψεις, η διάρκεια των οποίων υπερβαίνει το ένα έτος, γίνονται στη Θεσσαλονίκη (40.69N 22.78E). Τα λαμβανόμενα σήματα δειγματοληπτούνται και τα δείγματα αποθηκεύονται για επεξεργασία σε μεταγενέστερο χρόνο.

Πίνακας 1

Συχνότητα (Hz)	Σταθμός	Θέση	Χώρα	ΓΠ/ΓΜ
19.580	GBZ	Anthorn	UK	54.912, -3.277
20.270	ICV	Tavolara	Italy	40.923, 9.731
23.400	DHO	Rhauderfehn	Germany	53.082, 7.616
37.500	ICE	Keflavik	Iceland	63.959, -22.542



Εικ. 1 Χάρτης όπου φαίνονται οι πομποί και ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκαν, οι ραδιοζεύξεις (με κόκκινο) και το επίκεντρο του σεισμού και η ζώνη προετοιμασίας του σεισμού(με κόκκινο)

Ο δέκτης που έχει κατασκευαστεί από την Elettronika Srl, αποτελεί μέρος του εξοπλισμού του International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors (INFREP) (Biagi et al. 2011) (<http://beta.fisica.uniba.it/infrep/>).

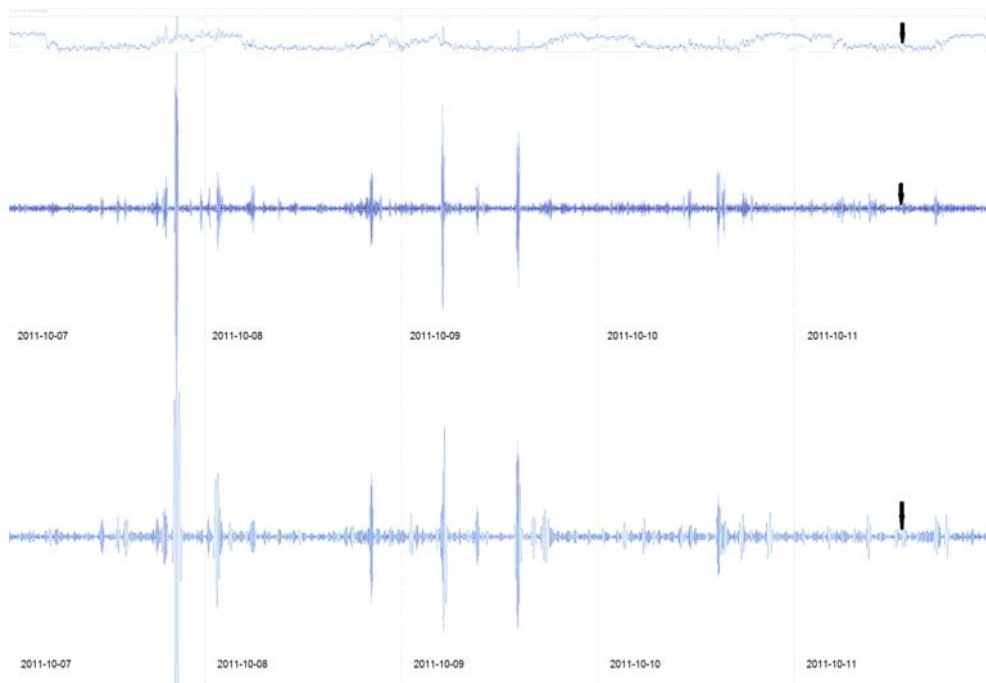
Ως παράδειγμα εφαρμογής της διαδικασίας θα αναλυθεί ο σεισμός της 11^{ης} Οκτωβρίου 2011, που έλαβε χώρα στο Ιόνιο (38.20N, 20.23E, $M_w = 4$). Το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη, σύμφωνα με τις παραδοσιακές μεθόδους των σεισμολόγων, σεισμική δραστηριότητα πριν από τον κύριο σεισμό, καθιστά αυτό το

παράδειγμα ιδιαίτερος κατάλληλο για την ανάδειξη των δυνατοτήτων της μεθόδου ανάλυσης αναφορικά με ανίχνευση πρόδρομων σεισμικών φαινομένων δεδομένου ότι οι δείκτες kr και Ar δεν αποκάλυψαν κάποιες ασυνήθεις διαταραχές μεγίστου αυτών αφού το μέγιστο του kr ήταν 2 το δε αντίστοιχο μέσο του Ar 3 (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/>).

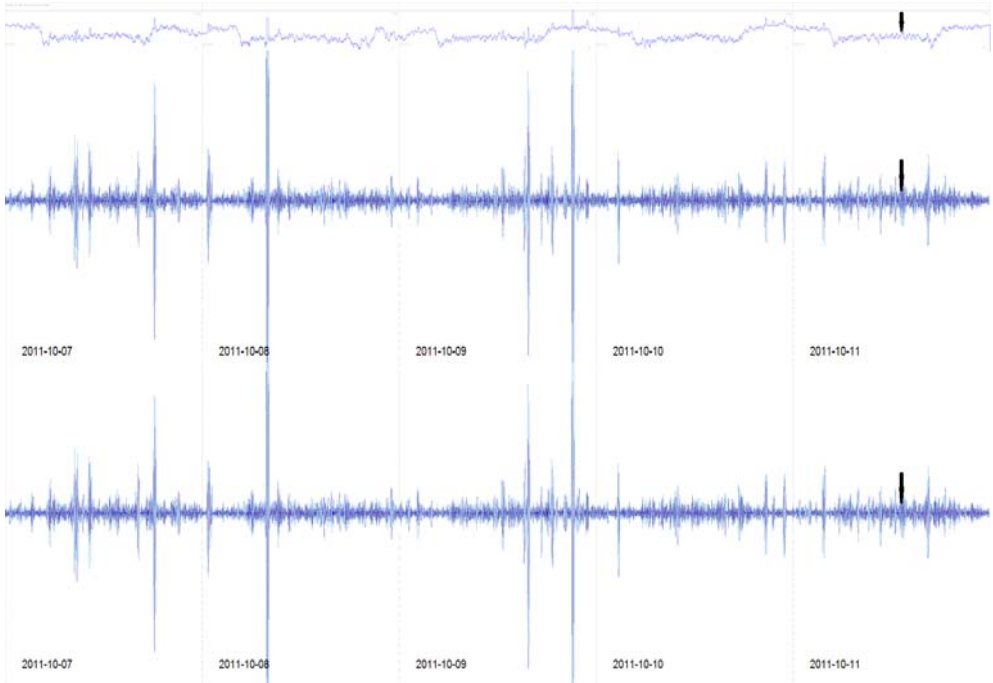
Η απόσταση epicέντρου του σεισμού και Θεσσαλονίκης ήταν 300 Km. Κατά την περίοδο αυτή δεν παρατηρήθηκε άλλη αξιόλογη ιονοσφαιρική δραστηριότητα, που θα μπορούσε να προκαλέσει διαταραχές οιοδήποτε τύπου.

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

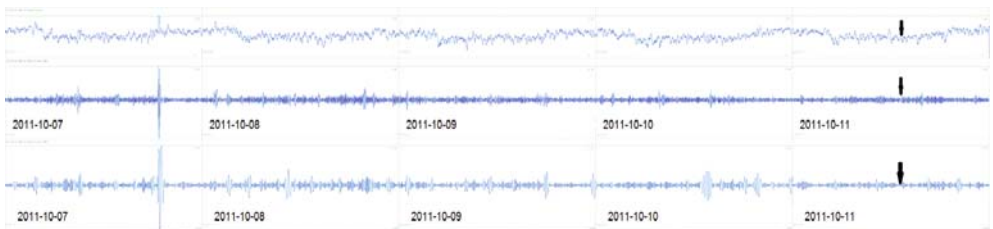
Όπως προαναφέρθηκε, στη Θεσσαλονίκη παρακολουθούνται τέσσερις πομποί VLF. Τα σήματα που λήφθηκαν από τους πομπούς GBZ, ICV, HWU και ICE συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα τυπικά σήματα αποκαλύπτουν διαταραχές κατά τις προηγούμενες ημέρες μέχρι κάποιες ώρες πριν από την εκδήλωση του σεισμού (Εικ. 2, 3, 4, 5).



Εικ. 2. Σταθμός ICE Keflavik, Iceland: Διαγράμματα σημάτων και IMF1 και IMF2 που λήφθηκαν από 7-10-2011 έως 11-10-2011 (Το μαύρο βέλος δείχνει την χρονική στιγμή του σεισμικού φαινομένου).



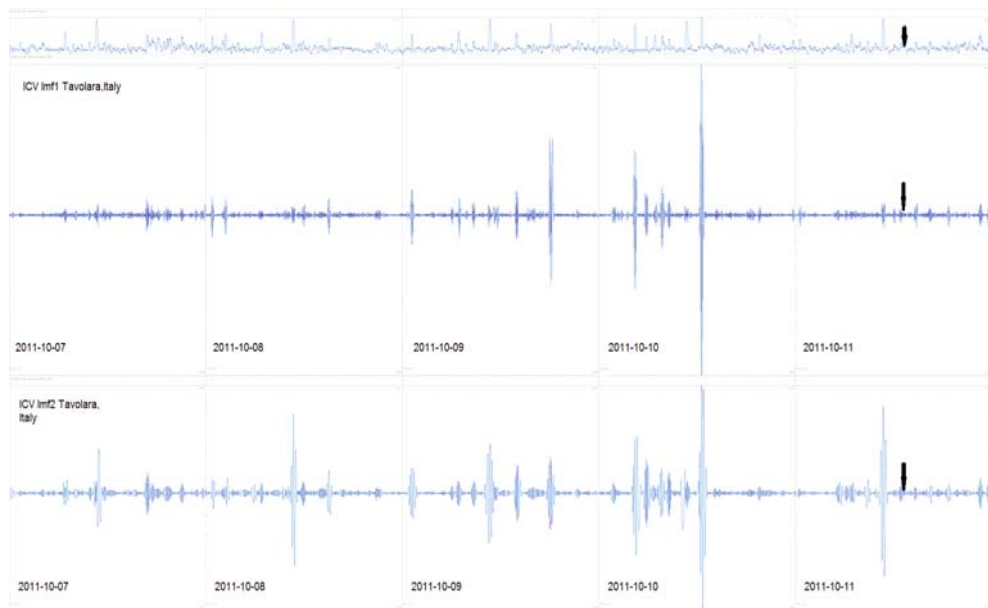
Εικ. 3. Σταθμός GBZ Anthorn, Μεγάλη Βρετανία: Διαγράμματα σημάτων και IMF1 και IMF2 που λήφθηκαν από 7-10-2011 έως 11-10-2011 (Το μαύρο βέλος δείχνει την χρονική στιγμή του σεισμικού φαινομένου).



Εικ. 4. Σταθμός HWU LeBlanc, Γαλλία: Διαγράμματα σημάτων και IMF1 και IMF2 που λήφθηκαν από 7-10-2011 έως 11-10-2011 (Το μαύρο βέλος δείχνει την χρονική στιγμή του σεισμικού φαινομένου).

Όπως διακρίνεται στα σήματα που λήφθηκαν, αναγνωρίζονται εύκολα με την χρήση της μεθόδου Εμπειρικής Αποδόμησης Ρυθμών (EMD) διαταραχές μερικές μέρες πριν από την εκδήλωση του σεισμού.

Όπως παρατηρείται από τα προαναφερθέντα διαγράμματα, η επεξεργασία των σημάτων με την μέθοδο EMD και η αποδόμησή του στις IMF επιτείνει τις διαφοροποιήσεις που προκαλούνται λόγω των αποτελεσμάτων σεισμικών διαταραχών στην ιονόσφαιρα και παρέχει καλύτερη εποπτεία τους



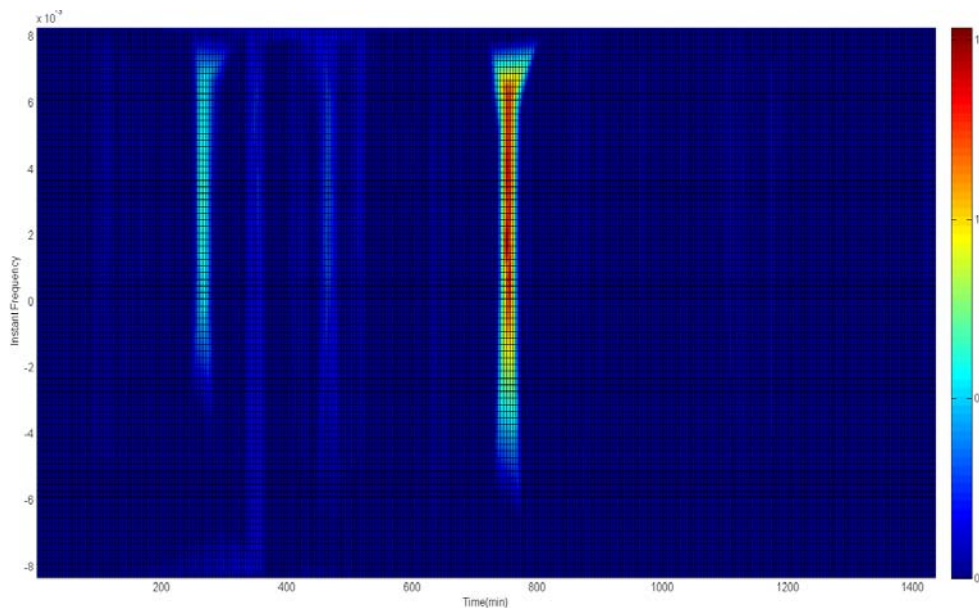
Εικ. 5. Σταθμός ICV Tavolara, Ιταλία: Διαγράμματα σημάτων και IMF1 και IMF2 που λήφθηκαν από 7-10-2011 έως 11-10-2011 (Το μαύρο βέλος δείχνει την χρονική στιγμή του σεισμικού φαινομένου).

Επιπλέον, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επεξεργασία του σήματος με την προαναφερθείσα μέθοδο αφαιρεί από αυτό εξωτερικές και ασυσχέτιστες προς τις διαταραχές πληροφορίες. Συνεπώς, μπορεί να παράσχει μια κοινή βάση εξέτασης των διαγραμμάτων από σταθμούς διαφορετικών χαρακτηριστικών δίδοντας σειρές δεδομένων που μπορούν να τύχουν επεξεργασίας ευκολότερα.

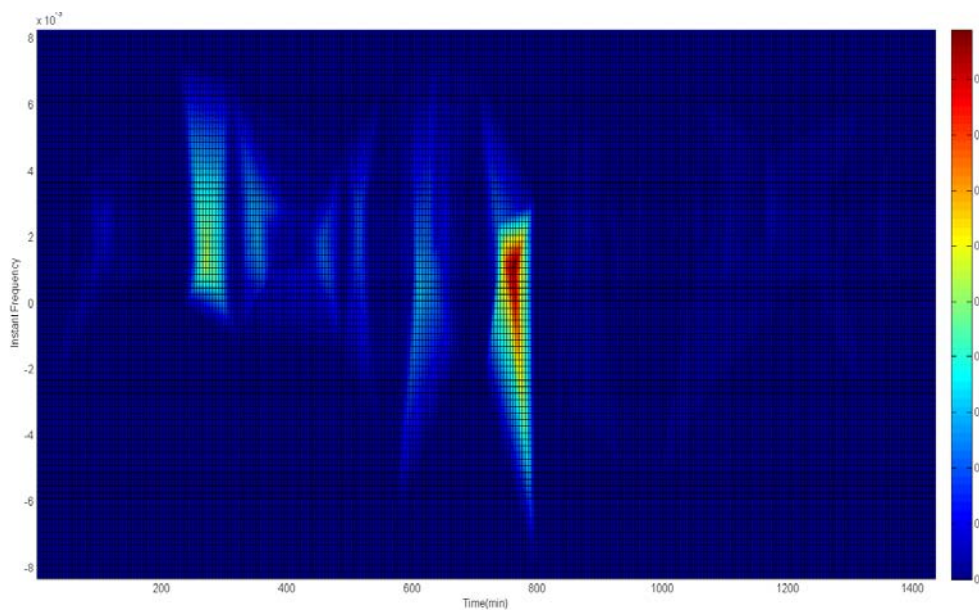
Στα διαγράμματα για τους σταθμούς GBZ και ICE μπορούν να εντοπιστούν σταθερές διαταραχές τις προηγούμενες 4 ημέρες από την εκδήλωση του σεισμικού φαινομένου. Στον σταθμό HWU δεν διακρίνονται σημαντικές διαταραχές ενώ τα διαγράμματα του σταθμού ICV παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Σε αυτόν τον σταθμό κατά τις προηγούμενες ημέρες επικρατεί σχετική ηρεμία και παρατηρούνται εντονότερες διαταραχές μέρα με τη μέρα όσο πλησιάζει η ημέρα του σεισμού, με κλιμάκωση στις 10-10-2011.

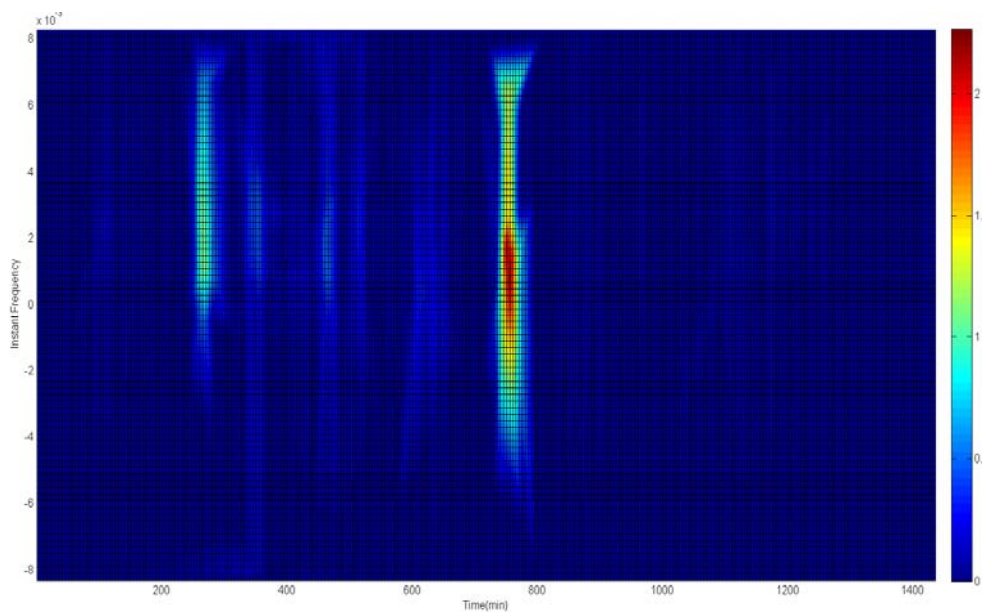
Για την συγκεκριμένη ημέρα έχουν σχεδιαστεί και τα φάσματα Hilbert (εικ. 6, 7, 8, 9) που παρουσιάζουν με μεγαλύτερη ευκρίνεια τις εν λόγω διαταραχές.



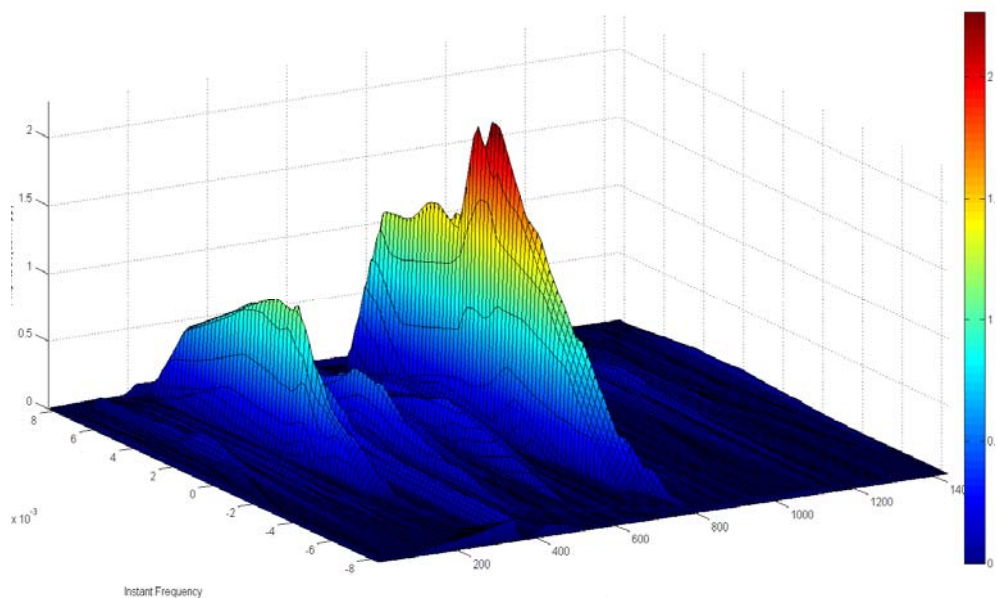
Εικ. 6. Σταθμός ICV Tavorara, Ιταλία: Φάσμα Hilbert της Imf1 για τις 2011-10-10



Εικ. 7. Σταθμός ICV Tavorara, Ιταλία: Φάσμα Hilbert της Imf2 για τις 2011-10-10



Εικ. 8. Σταθμός ICV Tivolara, Ιταλία: Συνολικό φάσμα Hilbert των δύο imf για τις 2011-10-10



Εικ. 9. Σταθμός ICV Tivolara, Ιταλία: Συνολικό φάσμα Hilbert των δύο imf για τις 2011-10-10 (side view)

5. Συμπεράσματα

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορούμε αβίαστα να συμπεράνουμε ότι η επεξεργασία του σήματος με τη μέθοδο EMD και η αποδόμησή του στις IMF, μπορεί να κάνει εμφανέστερα τα ίχνη εμφάνισης των αποτελεσμάτων των διαταραχών που σχετίζονται με τα σεισμικά φαινόμενα. Επιπλέον, η επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος με τη μέθοδο EMD καταστέλλει τις εξωτερικές επιπρόσθετες μη σχετικές πληροφορίες. Μπορεί συνεπώς να παράσχει χρονοσειρές δεδομένων άμεσα χρησιμοποιήσιμες από ένα αυτόματο σύστημα ανίχνευσης πρόδρομων σεισμικών-ιονοσφαιρικών φαινομένων

Βιβλιογραφία

- Biagi P.F., Maggipinto T, Righetti F., Loiacono D., Schiavulli L., Ligonzo T., Ermini A., Moldovan I. A., Moldovan A. S., Buyuksarac A., Silva H. G., Bezzeghoud M., Contadakis M. E., 2011, *The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: setting up and natural/man-made disturbances*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 333–341, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/333/2011/
- Biagi P.F., Castellana, L., Maggipinto, T., Loiacono, D., Sciaivulli, L., Ligonzo, T., Fiore, M., Suciu, E., and Ermini, A., 2009, *A pre seismic radio anomaly revealed in the area where the Abruzzo earthquake (M=6.3) occurred on 6 April 2009*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1551-1556
- Contadakis, M.E., Arabelos, D., Asteriadis, G. Spatalas, S. Pikridas, C., 2007, *TEC variations over the Mediterranean during the seismic activity of 20th October, in the area of eastern Aegean*, Geophysical Research Abstracts vol. 9, General Assembly of EGU (European Geosciences Union), Vienna, Austria, 15 - 20 April 2007.
- Contadakis, M.E., Arabelos, D.N., Asteriadis, G., Spatalas, S.D., Pikridas, C., 2008, *TEC variations over the Mediteranean during the seismic activity period of the last quarter of 2005 in the area of Greece*, Nat. Hazards and Earth Syst. Sci., 8, 1267-1276
- Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I. and Miachkin V. I., 1979, *Estimation of the size of Earthquake Preparation Zones* , Pure and Applied Geophysics Volume 117, Number 5, pp. 1025-1044
- Flandrin, P., Rilling, G., and Goncalves, P., 2004a, *Empirical Mode Decomposition as a filter bank*, IEEE Signal Proc. Lett., 11(2), 112–114,
- Flandrin, P., Goncalves, P., and Rilling, G., 2004b, *Detrending and denoising with Empirical Mode Decompositions*, Eusipco, 12th European Signal Processing Conference, Vienna, Austria, 6–10 September 2004
- Gabor D., 1946, *Theory of communications*, Proc IEE, v. 93(III), pp. 429-457
- Gokhberg M.B., Gufeld, I.L., Rozhnoi, A.A., Marenko, V.F., Yampolshy, V.S., and Ponomarev, E.A., 1989, *Study of sismic influence on the ionosphere by superlong wave probing of the Earth-ionosphere waveguide*, Phys. Earth Planet. Inter., 57, 64-67
- Hayakawa, M., Molchanov, O.A., Kodama, T., Afonin, V.V., Akentieva, O.A., 2000, *Plasma density variations observed on a satellite possibly related to seismicity*, Adv. Space Res. Lab., 26 (8), 1277-1280

- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. L., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H., 1998, *The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*, P. Roy. Soc. Lond. A Mat., 454, 903–995
- Huang, N. E. and Attoh-Okine, N. O., 2005, *The Hilbert-Huang transform in engineering*, Taylor & Francis
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Vasil'eva N.E., Alimov O., 2005, *On Es-spread effects in the ionosphere before earthquakes*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 5, No. 1, 59-62
- Molchanov O., Biagi P.F., Hayakawa M., Lutikov A., Yunga S., Iudin D., Andreevsky S., Rozhnoi A., Surkov V., Chebrov V., Gordeev E., Schekotov A., Fedorov E., 2004, *Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 4, 5/6, 757-767
- Molchanov O., Schekotov A., Solovieva M., Fedorov E., Gladyshev V., Gordeev E., Chebrov V., Saltykov D., Sinitsin V.I., Hattori K., Hayakawa M., 2005, *Near seismic effects in ULF fields and seismo-acoustic emission: statistics and explanation*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 5, 1-10
- Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Ondoh, T., and Kawai, E., 1998, *Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake*, Phys. Earth Planet In., 105, 239-248
- Muto, M., Yoshida, T., Horie, M., Hayakawa, M., Parrot, M., Molchanov, O.A., 2008, *Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 135-141.
- Parrot, M., Berthelier, J.J., Leberton, J.P., Sauvaud, J.A., Santolik, O. and Blecki, J., 2006, *Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions*, Phys. Chem. Earth, 31, 486-495.
- Pulinets, S. A., Gaivoronska, T. B., Leyva Contreras, A., and Ciruolo, L., 2004, *Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 4, 697–702, <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/4/697/2004/>.
- Pulinets, S., Ouzounov, D., 2010, *Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model. A unified concept for earthquake precursors validation*, Journal of Asian Earth Sciences doi: 10.1016/j.jseaes.2010.03.05.
- Rilling G, Flandrin P and Concalves P., 2003, *On empirical mode decomposition and its algorithms*, IEEE-EURASIP Workshop on nonlinear signal and image processing, NSIP-03
- Rozhnoi, A., Molchanov, O., Solovieva, M., Gladyshev, V., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., Lefevre, F., Biagi, P. F., Castellana, L., and Hayakawa, M., 2007, *Possible seismo-ionosphere perturbations revealed by VLF signals collected on ground and on a satellite*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 617–624
- Rozhnoi, A., Solovieva M., Molchanov, O., Schwingenschuh, K., Boudjada, M.Y., Biagi, P.F., Maggipinto, T., Castellana, L., Hayakawa, M., 2009, *Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1727-1732
- Rozhnoi, A., Solovieva M.S., Molchanov, O.A. and Hayakawa, M., 2004, *Middle latitude LF (40kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geo-*

- magnetic conditions*, Phys. Chem. Earth, 29, 589-598
- Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A, Ando, Y. , 2004, *A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding*, Phys. & Chem. of the Earth, 29, 627-637
- Tsolis, G. S. and Xenos, T. D., 2009, *Seismo-ionospheric coupling correlation analysis of earthquakes in Greece, using empirical mode decomposition*, Nonlin. Processes Geophys., 16, 123–130, <http://www.nonlin-processes-geophys.net/16/123/2009/>
- Tsolis, G.S. and Xenos, T.D. , 2010 , *A qualitative study of the seismo-ionospheric precursors prior to the 6 April 2009 earthquake in L'Aquila, Italy*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 133–137, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/133/2010/.
- Zhao Y, Atlas LE and Marks RJ, 1990, *The use of Cone-Shaped Kernels for generalized time-frequency representation of nonstationary signals*, IEEE, Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, v. 38, No 7, 1084-1091
- Zhao Z., Pan M., Chen Y., 2004, *Instantaneous frequency estimate for non stationary signal*, Intelligent Control and Automation, WCICA 2004, 5th World Congress, v. 4, pp. 3641-3643