

## **ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ**

Σωτήριος Δαλιάνης  
Ερευνητής, Εθνικό  
Μετσόβειο Πολυτεχνείο  
dalias@central.ntua.gr

Ιωάνης Σαρρής  
Ερευνητής, Εθνικό  
Μετσόβειο Πολυτεχνείο  
jsarris@central.ntua.gr

Γεώργιος Καμπουράκης  
Λέκτορας, Εθνικό  
Μετσόβειο Πολυτεχνείο  
gcamb@cs.ntua.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η επεξεργασία σημάτων ήχου στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας αποκλειστικά έχει περιορισμούς οι οποίοι μπορούν να ξεπεραστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας. Στην παρούσα εργασία η πράξη της συνέλιξης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου μελετάται και χρησιμοποιείται για την υλοποίηση χρονικά μεταβαλλόμενων φίλτρων. Μια εφαρμογή φιλτραρίσματος για την προσθήκη χρονικά και συχνοτικά εξαρτημένης τεχνητής αντήχησης σε μουσικό σήμα παρουσιάζεται.*

## **TIME VARYING FILTERING METHODS FOR AUDIO SIGNALS**

Sotirios Dalianis  
Research Engineer,  
National Technical  
Univ. of Athens  
dalias@central.ntua.gr

John Sarris  
Research Scientist,  
National Technical  
Univ. of Athens  
jsarris@central.ntua.gr

George Cambourakis  
Lecturer,  
National Technical  
Univ. of Athens  
gcamb@cs.ntua.gr

### **ABSTRACT**

*Processing of audio signals in the time or frequency domain individually has many limitations, which can be overcome when applying time-frequency analysis. In this paper the operation of time-frequency convolution along the time axis is studied and used to implement time-variable filters. The application of filtering in the time frequency domain for the realisation of time and frequency dependent artificial reverberation is presented.*

## 1. Εισαγωγή

Τα γραμμικά χρονικά αναλλοίωτα (Γ.Χ.Α.) φίλτρα χρησιμοποιούνται ευρέως στην ψηφιακή επεξεργασία του ήχου, σε εφαρμογές όπως η μοντελοποίηση και ισοστάθμιση ακουστικών χώρων και η προσθήκη τεχνητής αντήχησης σε ανηχοϊκό σήμα. Επειδή όμως τα σήματα ήχου είναι μη στάσιμα τα Γ.Χ.Α. φίλτρα αντιμετωπίζουν πολλούς περιορισμούς όταν εφαρμόζονται στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας αποκλειστικά. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη σχεδιασμού φίλτρων στο γενικευμένο πεδίο του χρόνου-συχνότητας και η μελέτη της σχέσης που παρουσιάζεται ανάμεσα σε αυτά τα φίλτρα και τα κλασικά Γ.Χ.Α. φίλτρα.

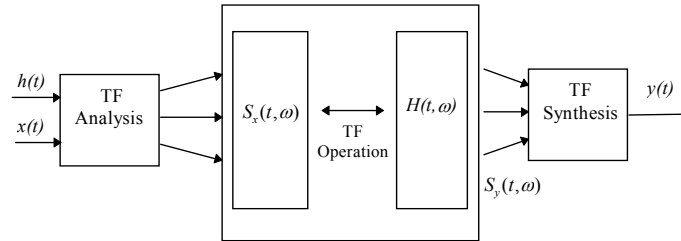
Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μία κλάση γραμμικών χρονικά μεταβαλλόμενων φίλτρων που είναι ισοδύναμα με τα κλασικά Γ.Χ.Α. φίλτρα, αλλά παρέχουν τη δυνατότητα για λεπτομερέστερο φιλτράρισμα. Για την υλοποίηση τέτοιων φίλτρων έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι γραμμικοί και τετραγωνικοί μετασχηματισμοί χρόνου συχνότητας, όπως οι Wigner-Ville, Wavelet, Karhunen-Loeve [1], [2], [3], [4], [5].

Εδώ γίνεται χρήση του μετασχηματισμού Fourier βραχέως χρόνου για την υλοποίηση φίλτρων συνέλιξης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας. Εφαρμογή της μεθόδου φιλτράρισματος που παρουσιάζεται γίνεται για την υλοποίηση χρονικά μεταβαλλόμενης και συχνотικά εξαρτώμενης τεχνητής αντήχησης. Η τεχνητή αντήχηση προστίθεται σε σήματα ήχου ώστε να δίνεται στον ακροατή η αίσθηση ότι η ακρόαση πραγματοποιείται κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες σε συγκεκριμένους χώρους, και συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας φίλτρα στο πεδίο του χρόνου. Φίλτρα πεπερασμένης και άπειρης κρουστικής απόκρισης έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό [6], [7], [8]. Πρόσφατα μοντέλα αντήχησης που βασίζονται σε ψυχοακουστικά κριτήρια έχουν αναπτυχθεί [9].

## 2. Χρονικά μεταβαλλόμενα φίλτρα

Η πράξη του φιλτράρισματος στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Το σήμα εισόδου και η απόκριση του συστήματος αναλύονται στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας, φιλτράρονται μέσω μίας μονοδιάστατης ή διδιάστατης πράξης και το αποτέλεσμα μετασχηματίζεται στο πεδίο του χρόνου. Η απόκριση του συστήματος στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας αναπαρίσταται μέσω της διδιάστατης συνάρτησης μεταφοράς [10].

Το αποτέλεσμα του φιλτράρισματος μετασχηματίζεται από το πεδίο του χρόνου-συχνότητας στο πεδίο του χρόνου. Πρέπει λοιπόν να αντιστοιχεί στην κατανομή χρόνου-συχνότητας κάποιου πραγματικού σήματος. Αυτό δεν ισχύει πάντα γιατί ακόμα και αν οι μετασχηματισμοί του σήματος εισόδου και της απόκρισης του συστήματος είναι έγκυροι, σημαντικό μέρος της πληροφορίας απαραίτητο για τον αντίστροφο μετασχηματισμό μπορεί να καταστραφεί κατά το φιλτράρισμα [11]. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να επιλέξουμε να συνθέσουμε ένα σήμα εξόδου του οποίου η κατανομή προσεγγίζει την υπάρχουσα σύμφωνα με κάποιο κριτήριο [3].



Σχήμα 2.1 Φιλτράρισμα στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας

### 2.1 Φίλτρα συνέλιξης (Convolution filters)

Η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου μεταξύ ενός σήματος εισόδου και της απόκρισης Γ.Χ.Α. συστήματος είναι ισοδύναμη με τη συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου, αν η κατανομή χρόνου-συχνότητας που χρησιμοποιείται έχει την ιδιότητα της συνέλιξης. Η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου ορίζεται ως:

$$S_y(t, \omega) = \int_0^t M(t-t', \omega) S_x(t', \omega) dt' \quad (2.1)$$

όπου  $M$  είναι η διδιάστατη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος και  $S_x$ ,  $S_y$  είναι η αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας του σήματος εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου είναι ισοδύναμη με το φιλτράρισμα του σήματος στο πεδίο του χρόνου για κάθε συχνότητα. Άρα το σύστημα ενεργεί σαν φίλτρο σε bandlimited στοιχεία της κατανομής χρόνου-συχνότητας του σήματος εισόδου, και μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας υπέρθεση bandlimited και χρονικά μεταβαλλόμενων φίλτρων. Αν η κατανομή χρόνου-συχνότητας που χρησιμοποιείται έχει την ιδιότητα της συνέλιξης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και οι κατανομές του σήματος εισόδου και της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος είναι έγκυρες τότε η προκύπτουσα κατανομή αντιστοιχεί σε πραγματικό σήμα.

### 3. Υλοποίηση χρονικά μεταβαλλόμενων φίλτρων

Ο μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των φίλτρων στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας. Το φιλτράρισμα στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας απαιτεί την εκτίμηση των κατανομών του σήματος εισόδου και, της απόκρισης του συστήματος και τον αντίστροφο μετασχηματισμό του αποτελέσματος και είναι πράξη υπολογιστικά ακριβή.

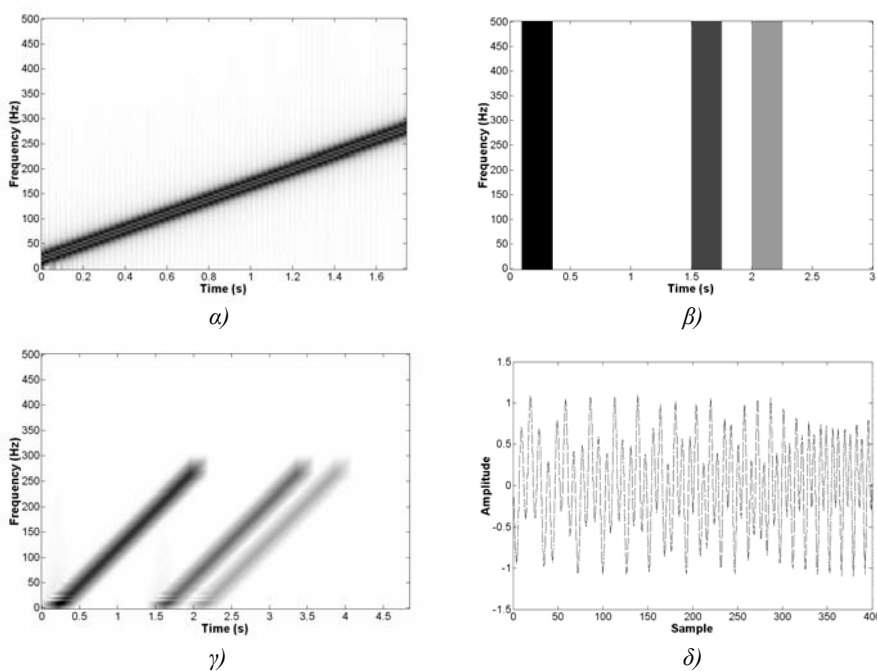
Για την επιτάχυνση των υπολογισμών εφαρμόστηκε ένας αναδρομικός αλγόριθμος υπολογισμού του μετασχηματισμού Fourier βραχέως χρόνου [12]. Ο συγκεκρι-

μένος αλγόριθμος παρέχει και μία απλή διαδικασία σύνθεσης. Για την υλοποίηση του αναδρομικού αλγόριθμου χρησιμοποιήθηκε συστοιχία φίλτρων [13].

Για τη μελέτη της ισοδυναμίας των χρονικά μεταβαλλόμενων φίλτρων συνέλιξης με τα Γ.Χ.Α. φίλτρα θεωρούμε το ακόλουθο παράδειγμα. Το σήμα εισόδου είναι μη στάσιμο και η συχνότητά του μεταβάλλεται γραμμικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (α). Η κρουστική απόκριση του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$h(t) = \delta(t) + 0.7\delta(t - 1.5) + 0.4\delta(t - 2) \quad (3.1)$$

Δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ότι το σύστημα προσθέτει δύο ανακλάσεις μειωμένου πλάτους στο σήμα εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (β). Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας, εφαρμόζοντας την πράξη της συνέλιξης ως προς τη μεταβλητή του χρόνου, φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (γ). Στο Σχήμα 3.1 (δ) φαίνεται η λεπτομερής σύγκριση ενός τμήματος του σήματος εισόδου με το αποτέλεσμα της κλασικής συνέλιξης στο πεδίο του χρόνου. Το σφάλμα που προκύπτει είναι πολύ μικρό και περιθωρικό.



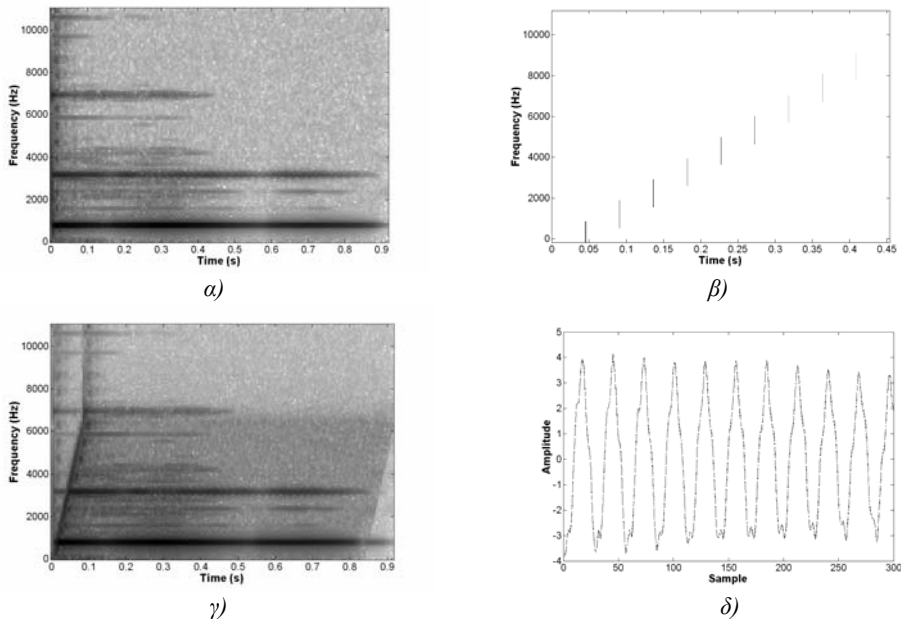
Σχήμα 3.1 Συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου. Ανάλυση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας του σήματος εισόδου (α), της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος (β), του αποτελέσματος (γ) και σύγκριση στο πεδίο του χρόνου του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα της κλασικής συνέλιξης (δ).

#### 4. Παράδειγμα τεχνητής αντήχησης

Η αναδρομική υλοποίηση του μετασχηματισμού Fourier βραχέως χρόνου χρησιμοποιήθηκε για να προστεθεί χρονικά εξαρτημένη αντήχηση σε σήμα ήχου. Το σήμα ήχου που χρησιμοποιήθηκε είναι το γνωστό 'Ding.wav' των MS Windows. Για την προσθήκη χρονικά και συχνοτικά μεταβαλλόμενης αντήχησης χρησιμοποιήθηκε η πράξη της συνέλιξης ως προς τη μεταβλητή του χρόνου στο πεδίο του χρόνου συχνότητας, η οποία υλοποιήθηκε ως το διακριτό άθροισμα της σχέσης 4.1.

$$RDFS_y(n, m) = \sum_{n'=0}^{n-1} RDFS_x(n - n', m) RDFS_h(n', m) \quad (4.1)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος σχεδιάστηκε στο πεδίο του χρόνου συχνότητας, ώστε το σύστημα να προσθέτει ανακλάσεις στο σήμα. Η χρονική στιγμή της κάθε ανάκλασης και η έντασή της είναι συνάρτηση της συχνότητας. Η ανάλυση του σήματος εισόδου και η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος στο πεδίο του χρόνου συχνότητας φαίνονται στο Σχήμα 4.1 (α) και (β) αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος στο πεδίο του χρόνου συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 4.1 (γ). Στο Σχήμα 4.1 (δ) φαίνεται η λεπτομερής σύγκριση ενός τμήματος του σήματος εξόδου στο πεδίο του χρόνου με το αποτέλεσμα της κλασικής συνέλιξης. Το σφάλμα που προκύπτει είναι πολύ μικρό και εμφανίζεται περιοδικό.



Σχήμα 4.1 Συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας ως προς τη μεταβλητή του χρόνου. Ανάλυση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας του σήματος εισόδου (α), της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος (β), του αποτελέσματος (γ) και σύγκριση στο πεδίο του χρόνου του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα της κλασικής συνέλιξης (δ).

### **Συμπέρασμα**

Στην συγκεκριμένη εργασία γενικεύτηκε η έννοια του φιλτραρίσματος από το πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας στο γενικευμένο πεδίο του χρόνου-συχνότητας. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε βασίζεται στη μη-παραμετρική ανάλυση και γενικεύει την έννοια της συνέλιξης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας. Η γενίκευση παρέχει τη δυνατότητα για λεπτομερέστερο φιλτράρισμα σε σχέση με την κλασική θεωρία, αλλά για την υλοποίηση των φίλτρων απαιτείται σημαντικά περισσότερος υπολογιστικός χρόνος. Για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου έγινε χρήση ενός αναδρομικού αλγόριθμου για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier βραχέως χρόνου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την πρόσθεση χρονικά εξαρτημένης τεχνητής αντήχησης σε σήμα ήχου με επιτυχία.

### **Αναφορές**

- [1] Hlawatsch F., Boudreaux Bartels G.F., 1992, «Linear and Quadratic Time Frequency Signal Representations», IEEE, SP Magazine, 21-67, 9(2)
- [2] Hlawatsch F., Kozek W., 1994, «Time Frequency Projection Filters and Time Frequency Signal Expansions», IEEE Transactions on Signal Processing, 3321-3334, 42(12)
- [3] Jeong J., Williams W.J., 1992, «Time-Varying Filters and Signal Synthesis», Time- Frequency Signal Analysis Methods and Applications, (B.Boashash, Ed) Melbourne: Longman Chesire Ltd.
- [4] Kozec W., Hlawatsch F., 1992, «A Comparative Study of Linear and Nonlinear Time-Frequency Filters», Proceedings IEEE International Symposium Time-Frequency Time-Scale Analysis, Victoria, Canada, 163-166
- [5] Farkash S., Raz S., 1990, «Time-Variant Filtering Via the Gabor Expansion», Signal Processing V: Theories and Applications, New York:Elsevier 1990, 509-512
- [6] Schroeder M. R., 1962, «Natural Sounding Artificial Reverberation», Journal of the Audio Eng. Soc., 219-223, 10(3)
- [7] Reilly A., McGrath D., 1995, «Convolution Processing for Realistic Reverberation», AES 98<sup>th</sup> Convention, Paris
- [8] Dattorro J., 1997, «Effect Design: Part 1 Reverberator and Other Filters», Journal of the Audio Eng. Soc., 660-685, 45(9)
- [9] Karjalainen M., Jarvelainen H., 2001, «More About This Reverberation Science: Perceptually Good Late Reverberation», AES 111<sup>th</sup> Convention, New York
- [10] Dalianis, S.A., Hammond, J.K., White, P.R., Cambourakis G.E., 1998, «Simulation and Identification of Nonstationary Systems using Linear Time-Frequency Methods», Journal of Vibration and Control, SAGE Publications Inc., 3:1, 75-91, 4(1)
- [11] Cohen L., 1992, «A Primer of Time Frequency Analysis», Time Frequency Signal Analysis, chapter 17, Wiley Halsted press
- [12] Pappoulis A., 1977, «Signal Analysis», McGraw Hill
- [13] Sarris J.C., Dalianis S.A., Cambourakis G.E., 2002, «Non-stationary filtering methods for audio signals», AES 21<sup>st</sup> International Conference, St. Petersburg, Russia