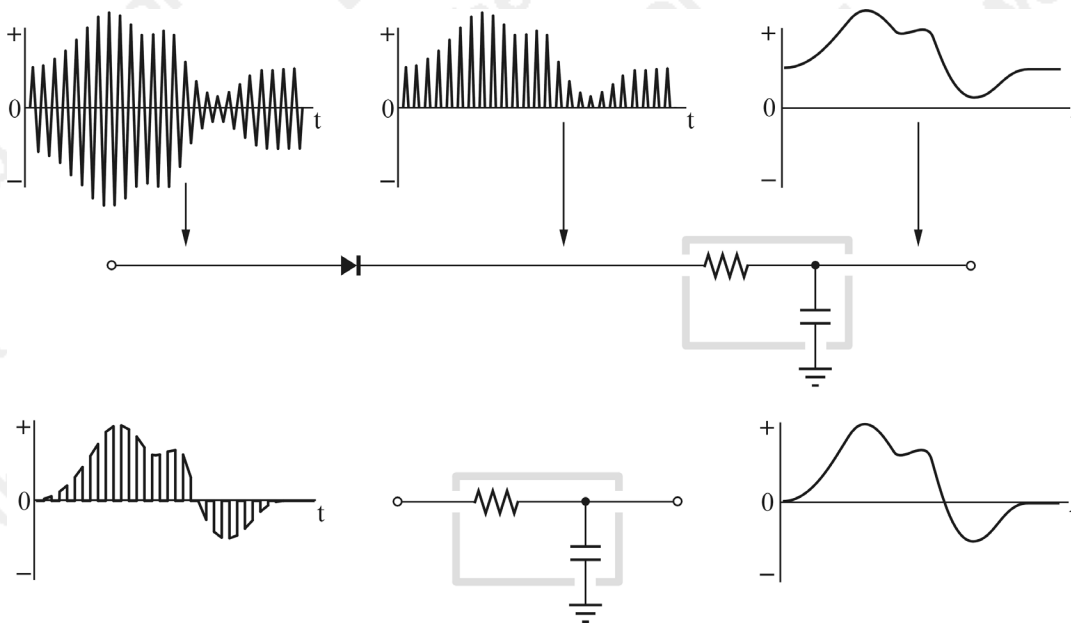


Σχήμα 5.6.13 Ενισχυτής αποκοπής ζώνης συχνοτήτων με φίλτρο δίδυμο T και το αντίστοιχο διάγραμμα Bode.

Ενισχυτής αποκοπής (notch amplifier). Ο ενισχυτής αποκοπής (ζώνης συχνοτήτων) δρα ακριβώς αντίστροφα απ' ό,τι ο συντονισμένος ενισχυτής. Παρουσιάζει σταθερή απολαβή σε ευρεία ζώνη συχνοτήτων, εκτός από μια περιοχή γύρω από τη συχνότητα απόρριψης f_0 (ζώνη αποκοπής), όπου πρακτικά η απολαβή του μηδενίζεται. Κατασκευάζεται με τοποθέτηση του φίλτρου δίδυμο T στην είσοδο του αντιστροφέα ενισχυτή (Σχήμα 5.6.13). Σε σειρά με το φίλτρο τοποθετείται μια αντίσταση R_i , που εξασφαλίζει μια ελάχιστη εμπέδηση στην είσοδο του αντιστροφέα ενισχυτή και επομένως καθορίζει την απολαβή για σήματα με συχνότητες έξω από τη ζώνη αποκοπής του φίλτρου.

Φίλτρα αποκοπής συντονισμένα στα 50 Hz είναι εξαιρετικά χρήσιμα για τη δραστική μείωση του αντίστοιχου θορύβου περιβάλλοντος, που οφείλεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 5.6.14 Απλός τρόπος αποδιαμόρφωσης φέροντος με διαμόρφωση AM και σήματος διαμορφωμένου με τεμαχισμό.

5.6.7 Αποδιαμορφωτές

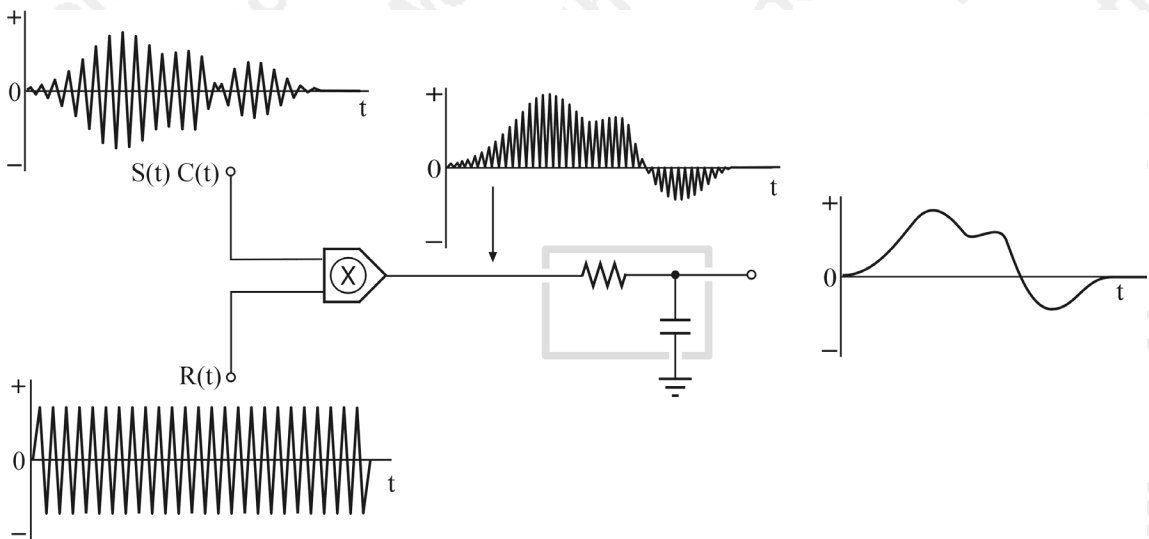
Ως **αποδιαμόρφωση** (ή **φώραση**) (demodulation) ορίζεται η παραλαβή της χαμηλόσυχνης πληροφορίας από το διαμορφωμένο φέρον κύμα. Η αποδιαμόρφωση φέροντος κύματος με διαμόρφωση AM είναι απλή και πραγματοποιείται με ημιανόρθωση (με μια απλή δίοδο) ή πλήρη ανόρθωση (με γέφυρα διόδων) του διαμορφωμένου φέροντος και πέρασμά του μέσα από ένα βαθυπερατό φίλτρο (π.χ. φίλτρο RC

1ης τάξης, σελ. 39). Οι υψίσυχνες συνιστώσες διαρρέουν προς το κοινό και στην έξοδο εμφανίζονται μόνο οι χαμηλόσυχνες συνιστώσες (σήμα).

Εάν το σήμα έχει διαμορφωθεί με τεμαχισμό είναι αρκετό το πέρασμά του από ένα βαθυπερατό φίλτρο. Η αρχή της αποδιαμόρφωσης αυτού του τύπου δείχνεται στο Σχήμα 5.6.14.

Συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση. Η προηγούμενη μέθοδος αποδιαμόρφωσης δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε φέρον με διαμόρφωση DSB. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η **συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση** (synchronous demodulation), που συνίσταται στον πολλαπλασιασμό του διαμορφωμένου φέροντος με ημιτονικό ή τετραγωνικό σήμα (σήμα αναφοράς), το οποίο πρέπει να έχει επακριβώς την ίδια συχνότητα με εκείνη του φέροντος κύματος (f_c) και να βρίσκεται στην ίδια φάση με αυτό.

Το παραγόμενο σήμα οδηγείται σε βαθυπερατό φίλτρο για να απαλλαγεί από τις υψίσυχνες συνιστώσες. Η αρχή της συγχρονισμένης αποδιαμόρφωσης και οι σχετικές κυματομορφές δείχνονται στο Σχήμα 5.6.15.



Σχήμα 5.6.15 Συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση φέροντος κύματος με διαμόρφωση DSB.

Εάν $S(t) = A_S \cos(2\pi f_s t)$ είναι μια από τις χαμηλόσυχνες συνιστώσες του σήματος εισόδου $S(t)$, $C(t) = A_C \cos(2\pi f_c t)$ είναι το φέρον κύμα και $R(t) = A_R \cos(2\pi f_c t)$ το σήμα αναφοράς (της ίδιας συχνότητας και στην ίδια φάση με το φέρον), τότε θα είναι

$$\underbrace{A_S \cos(2\pi f_s t)}_{\text{Φέρον με διαμόρφωση DSB}} \times \underbrace{A_C \cos(2\pi f_c t)}_{\text{Φέρον}} \times \underbrace{A_R \cos(2\pi f_c t)}_{\text{Σήμα αναφοράς}} = A_S A_C A_R \cos(2\pi f_s t) \cos^2(2\pi f_c t) \quad (5.6.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την τριγωνομετρική ταυτότητα $\cos^2 x = (\cos 2x + 1)/2$ και θέτοντας

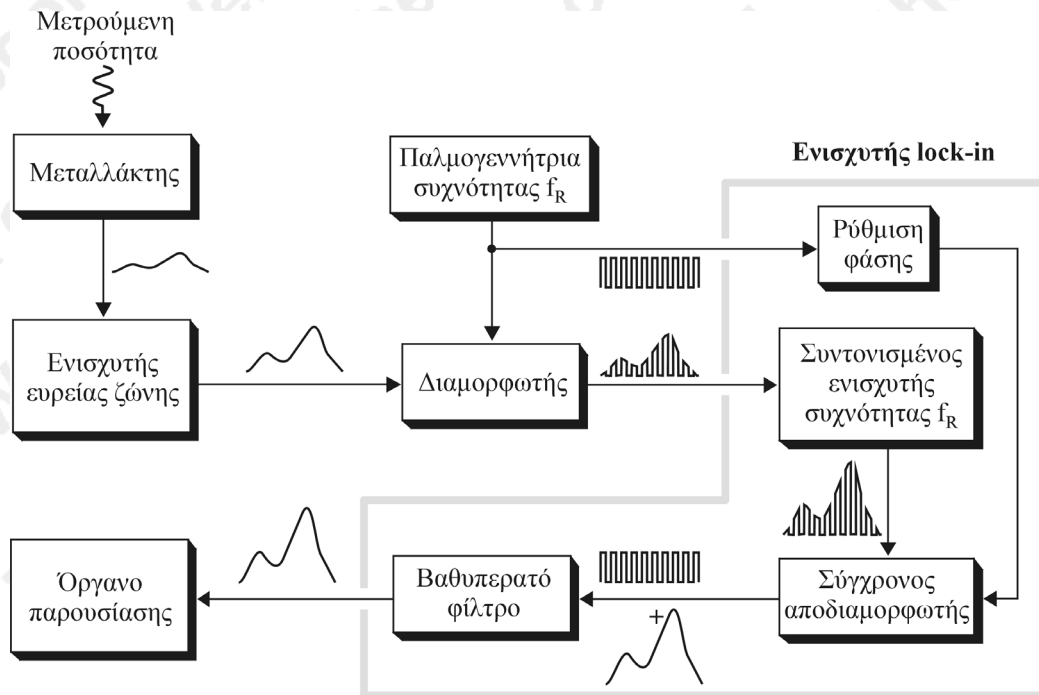
$$K = A_S A_C A_R / 2$$

η Εξίσωση 5.6.5 γίνεται

$$K \cos(2\pi f_s t) [\cos(2\pi f_c t) + 1] = K \cos(2\pi f_s t) \cos(2\pi 2f_c t) + K \cos(2\pi f_s t) = \underbrace{K \cos[2\pi(2f_c - f_s)t] + K \cos[2\pi(2f_c + f_s)t]}_{\text{Υψίσυχνες συνιστώσες}} + \underbrace{K \cos(2\pi f_s t)}_{\text{Χαμηλόσυχνη συνιστώσα}} \quad (5.6.6)$$

Από την Εξίσωση 5.6.6 καταφαίνεται ότι αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού είναι η παραγωγή αθροίσματος δύο υψίσυχων συνιστωσών με συχνότητες $2f_c - f_s$ και $2f_c + f_s$ και μιας χαμηλόσυχης με συχνότητα f_s . Όταν το άθροισμα οδηγηθεί σε βαθυπερατό φίλτρο, οι υψίσυχνες συνιστώσες διαρρέουν προς το κοινό και στην έξοδο εμφανίζεται μόνο η χαμηλόσυχη συνιστώσα.

Ανάλογα αναδημιουργούνται και οι υπόλοιπες χαμηλόσυχνες συνιστώσες του σήματος εισόδου (με συχνότητες από 0 έως f_{max}) και επομένως στην έξοδο του βαθυπερατού φίλτρου εμφανίζεται η συνολική μορφή του σήματος $S(t)$.



Σχήμα 5.6.16 Τμηματικό διάγραμμα μετρητικής διάταξης με ενισχυτή lock-in.

5.6.8 Ενισχυτής lock-in

Ο **ενισχυτής lock-in** (to lock: κλειδώνω) αποτελεί μια τυπική διάταξη, ευρύτατης χρήσης, η οποία είναι κατάλληλη για την ενίσχυση χαμηλόσυχων (σχεδόν σταθερών), αλλά ασθενών σημάτων εξαιρετικά επιβαρυσμένων με λευκό θόρυβο. Η λειτουργία του βασίζεται στη διαμόρφωση, εκλεκτική ενίσχυση, συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση και πέρασμα του σήματος από βαθυπερατό φίλτρο.

Με τον ενισχυτή lock-in περιορίζεται δραστικά ο θόρυβος $1/f$ και μειώνεται κάθε θόρυβος με συνιστώσες συχνοτήτων εκτός της ζώνης ενίσχυσης του συντονισμένου ενισχυτή (λευκός θόρυβος, θόρυβοι περιβάλλοντος, ολίσθηση). Το συνολικό τμηματικό διάγραμμα μετρητικής διάταξης με ενισχυτή lock-in δείχνεται στο Σχήμα 5.6.16. Τυπικά, το τμήμα του ενισχυτή lock-in αποτελείται μόνο από τις μονάδες του συντονισμένου ενισχυτή, της ρύθμισης φάσης, του συγχρονισμένου αποδιαμορφωτή και του βαθυπερατού φίλτρου και έχει δύο εισόδους, μία για το διαμορφωμένο φέρον και μία για το σήμα αναφοράς. Το τελευταίο μπορεί να προέρχεται είτε από παλμογεννήτρια τετραγωνικού σήματος που “τεμαχίζει” το σήμα εισόδου ή από το μηχανικό σύστημα τεμαχισμού, π.χ. μιας οπτικής δέσμης.

Η επιλογή της χρονοσταθεράς (του γινομένου RC, σελ. 43) του βαθυπερατού φίλτρου έχει ιδιαίτερη σημασία. Εάν είναι $RC \gg T_c$ (T_c η περίοδος του φέροντος κύματος ή του τεμαχισμού), τότε το φίλτρο δρα ως ολοκληρωτής και το σήμα εξόδου ουσιαστικά θα αποτελεί τη μέση τιμή εκατοντάδων και χιλιάδων “πακέτων” σήματος, που παράγονται κατά τη συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση. Το γεγονός αυτό

συμβάλλει στη δραστηκότητα απαλλαγή του σήματος από θόρυβο τυχαίου χαρακτήρα, αφού κατά την άθροιση ο θόρυβος αυτός τείνει να “αυτοεξουδετερωθεί”, επειδή έχει μηδενική μέση τιμή. Κατά τη διαδικασία αυτή το σήμα εισόδου (ιδανικά) θα πρέπει να είναι ουσιαστικά σταθερό. Στην πράξη, η επιλογή της χρονοσταθεράς του βαθυπερατού φίλτρου αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ της επιθυμητής λήψης της μέσης τιμή όσο το δυνατόν περισσότερων “πακέτων” σήματος και της πιθανής αλλοίωσης του σήματος λόγω πραγματικής μεταβολής του.

Αρχικά οι ενισχυτές lock-in περιελάμβαναν μόνο τον συντονισμένο ενισχυτή, τη μονάδα του συγχρονισμένου αποδιαμόρφωτη και το βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα ερχόταν ήδη διαμορφωμένο (συνήθως με τεμαχισμό), όπως π.χ. στα φασματοφωτόμετρα διπλής δέσμης. Στην περίπτωση αυτή, η δυσκολία έγκειται στην επίτευξη ακριβούς συγχρονισμού του σήματος αναφοράς με το διαμορφωμένο φέρον, πρώτα ως προς τη συχνότητα και μετά ως προς τη φάση, δηλαδή να “κλειδώσει” το ένα σήμα επάνω στο άλλο, διαδικασία από την οποία προκύπτει και η ονομασία αυτού του συστήματος ενίσχυσης.

Εάν, χάριν απλότητας, το σήμα στην έξοδο του συντονισμένου ενισχυτή θεωρηθεί ως μία από τις ημιτονικές συνιστώσες του ενισχυμένου σήματος και ίσο προς $v_C = A_C \sin(2\pi f_C t)$, τότε εάν πολλαπλασιασθεί με το σήμα αναφοράς $v_R = A_R \sin(2\pi f_R t + \theta)$ και λαμβάνοντας υπόψη ότι: $\sin x \sin y = [\cos(x-y) - \cos(x+y)]/2$, θα είναι

$$v_C v_R = (A_C A_R/2) \{ \cos[2\pi(f_C - f_R)t - \theta] - \cos[2\pi(f_C + f_R)t - \theta] \} \quad (5.6.7)$$

Με το πέρασμα του σήματος από το βαθυπερατό φίλτρο απορρίπτεται η υψίσυχνη συνιστώσα $f_C + f_R$ και εφόσον $f_C = f_R$, θα είναι

$$v_C v_R = (A_C A_R/2) \cos(-\theta) = (A_C A_R/2) \cos(\theta) \quad (5.6.8)$$

Από την Εξίσωση 5.6.8 καταφαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του γινομένου $(v_C v_R)_{\max}$ λαμβάνεται όταν μηδενισθεί η διαφορά φάσης (γωνία θ) των δύο ημιτονικών σημάτων. Η ανάγκη ρύθμισης της φάσης οφείλεται στην εισαγωγή διαφοράς φάσης κατά το στάδιο της ενίσχυσης του διαμορφωμένου σήματος στον συντονισμένο ενισχυτή.

Οι ενισχυτές lock-in χρησιμοποιούνται γενικότερα στην οργανολογία των μετρήσεων και αποτελούν την ιδανική λύση για τη μέτρηση ασθενών σημάτων έντονα “μολυσμένων” με λευκό θόρυβο, ο οποίος καθιστά μη αναγνώσιμη τη γενική κυματομορφή τους γενική κυματομορφή τους ή καθιστά ελάχιστα επαναλήψιμη την ανάγνωση της τιμής τους. Ωστόσο, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δεν είναι κατάλληλοι για ενίσχυση ταχύτατα μεταβαλλόμενων σημάτων.

Στη χημική οργανολογία διατάξεις με ενισχυτές lock-in χρησιμοποιούνται σε όργανα, όπου αναμένεται χειρισμός εξαιρετικά ασθενών σημάτων. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν τα συμβατικού τύπου (διασποράς ακτινοβολίας) φασματομέτρα υπερύθρου, λόγω τόσο των χαμηλών εντάσεων των πηγών ακτινοβολίας όσο και της περιορισμένης ευαισθησίας των χρησιμοποιούμενων ανιχνευτών.

5.6.9 Ολοκληρωτής boxcar

Ο ολοκληρωτής boxcar (boxcar: κλειστό βαγόνι) είναι μια πανίσχυρη διάταξη με την οποία καθίσταται δυνατή η εξαγωγή πληροφορίας από σήματα τα οποία είναι “πνιγμένα” στο θόρυβο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ταχύτατα σήματα (σε αντίθεση με τον ενισχυτή lock-in) τα οποία όμως πρέπει να είναι περιοδικά ή να μπορούν να ληφθούν πολλές φορές (π.χ. το σήμα που προκύπτει με πολλαπλές σαρώσεις κατά τη λήψη ενός φάσματος NMR μπορεί να θεωρηθεί περιοδικό σήμα). Ο θόρυβος πρέπει να έχει τυχαίο χαρακτήρα και μηδενική μέση τιμή, σε όλα τα σημεία της περιόδου του σήματος.

Η αρχή λειτουργίας του ολοκληρωτή boxcar βασίζεται στο ότι όταν πολλαπλές περίοδοι του σήματος προστίθενται η μία στην άλλη (σημείο προς σημείο), τα συστηματικά χαρακτηριστικά του σήματος (δηλαδή το κυρίως σήμα) ενισχύονται, ενώ τα τυχαία (θόρυβος) τείνουν να μηδενισθούν. Εάν το σήμα

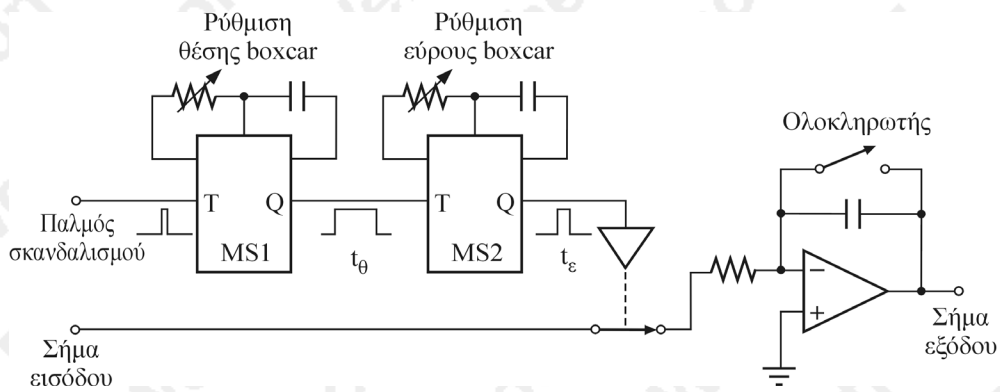
έχει αρχικό λόγο σήματος προς θόρυβο $(S/N)_i$ και αθροισθούν n περίοδοι, το άθροισμα θα έχει λόγο σήματος-προς-θόρυβο, που θα παρέχεται από τη σχέση

$$S/N = \sqrt{n} (S/N)_i \quad (5.6.9)$$

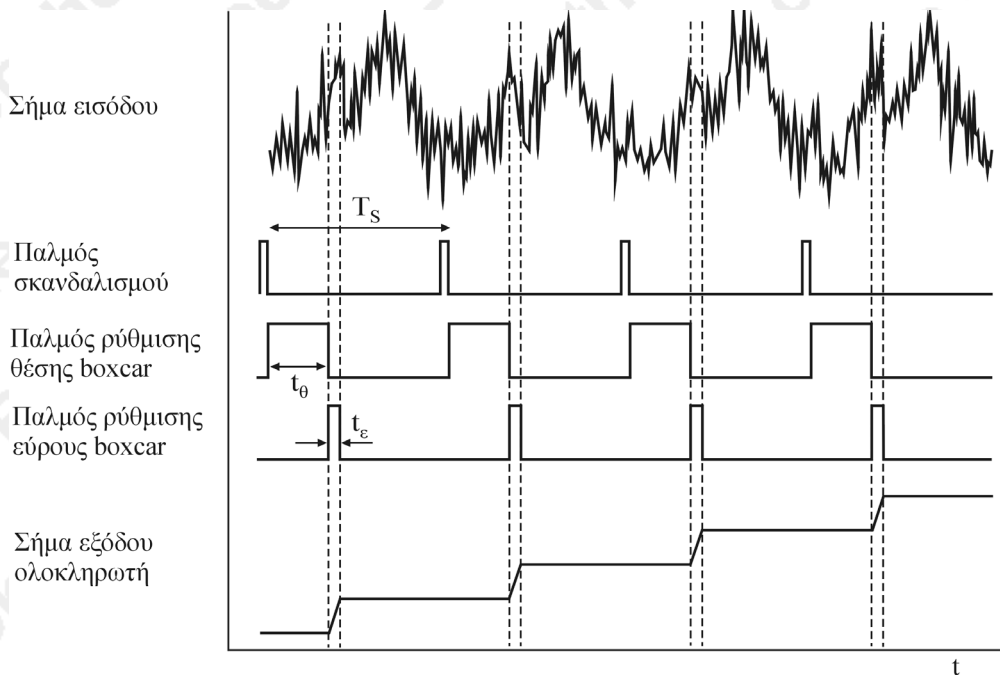
Η Εξίσωση 5.6.9 βασίζεται στο ότι η τυπική απόκλιση των μέσων τιμών ομάδων n μετρήσεων από ένα πληθυσμό με κανονική κατανομή και τυπική απόκλιση σ_x , παρέχεται από τη σχέση

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{n}$$

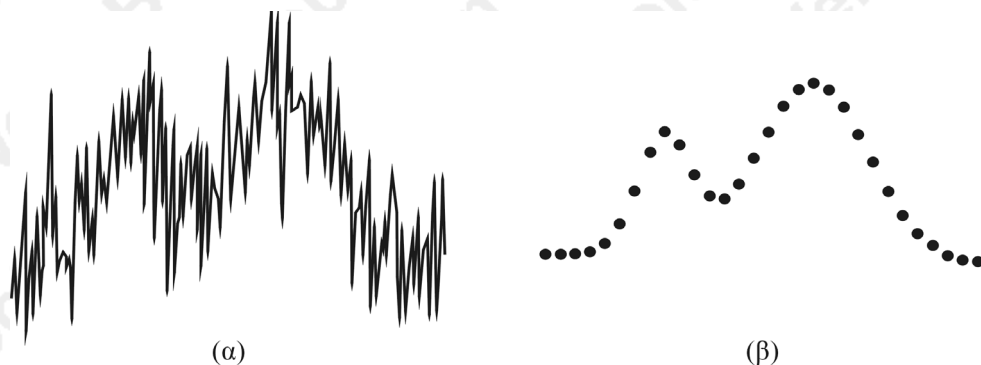
Ένα απλό κύκλωμα ολοκληρωτή boxcar παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.17 και οι τυπικές αλληλουχίες των σημάτων σε διάφορα σημεία του κυκλώματος δείχνονται στο Σχήμα 5.6.18.



Σχήμα 5.6.17 Απλό κύκλωμα ολοκληρωτή boxcar.



Σχήμα 5.6.18 Σήμα εισόδου (θορυβώδες περιοδικό σήμα) και αλληλουχίες σημάτων σε διάφορα σημεία του ολοκληρωτή boxcar του Σχήματος 5.6.17.



Σχήμα 5.6.19 (α) Τυπική περίοδος θορυβώδους σήματος. (β) Απεικόνιση του σήματος μετά από διαδικασία 30 (= m) ολοκληρώσεων boxcar 1000 (= n) περιόδων για κάθε σημείο.

Το όργανο το οποίο παράγει τη θορυβώδη κυματομορφή με περίοδο T_S εκδίδει τον παλμό σκανδαλισμού στην αρχή κάθε νέας περιόδου. Ο παλμός αυτός σκανδαλίζει τον μονοσταθερό MS1, ο οποίος με τη σειρά του εκδίδει παλμό διάρκειας t_θ , που επιλέγεται από τον χειριστή και κυμαίνεται από 0 έως T_S . Με αυτόν τον παλμό επιλέγεται η θέση του boxcar “μέσα” στην περίοδο του σήματος, δηλαδή το σημείο εκείνο (ακριβέστερα: η στενή περιοχή) του οποίου επιζητείται η μέση (πραγματική) τιμή.

Ο παλμός ρύθμισης θέσης σκανδαλίζει τον μονοσταθερό MS2, ο οποίος εκδίδει παλμό διάρκειας t_e , που καθορίζει το εύρος του boxcar. Ο παλμός boxcar κλείνει τον διακόπτη στερεάς κατάστασης και αρχίζει η ολοκλήρωση της περιοχής του θορυβώδους σήματος, που αντιστοιχεί στο εύρος και στη θέση του boxcar. Κατά την επόμενη περίοδο, η ίδια περιοχή ολοκληρώνεται και το αποτέλεσμα προστίθεται στο προηγούμενο, συσσωρευόμενο ως φορτίο στον πυκνωτή του ολοκληρωτή. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται n φορές και σημειώνεται το σήμα εξόδου του ολοκληρωτή, που είναι ανάλογο της μέσης τιμής του θορυβώδους σήματος στη στενή περιοχή του boxcar.

Στη συνέχεια, ο ολοκληρωτής μηδενίζεται με τον διακόπτη επαναφοράς, με ρύθμιση του μονοσταθερού MS1 επιλέγεται η νέα θέση του παλμού boxcar μέσα στην περίοδο του σήματος και η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται. Έτσι, για m θέσεις του boxcar, το σήμα πρέπει να επαναληφθεί συνολικά $n \times m$ φορές.

Όσο περισσότερες θέσεις του boxcar επιλεγούν, τόσο πιστότερη θα είναι η απεικόνιση του περιοδικού σήματος. Όσο μικρότερο είναι το εύρος του παλμού boxcar, τόσο καλύτερη θα είναι η διακριτική ικανότητα της διάταξης και τόσο καλύτερα αναδεικνύεται τυχόν λεπτή υφή του περιοδικού σήματος. Όσο αυξάνει ο αριθμός των αθροίσεων, τόσο περισσότερο απαλλαγμένο θα είναι το απεικονιζόμενο σήμα από τον θόρυβο (Σχήμα 5.6.19).

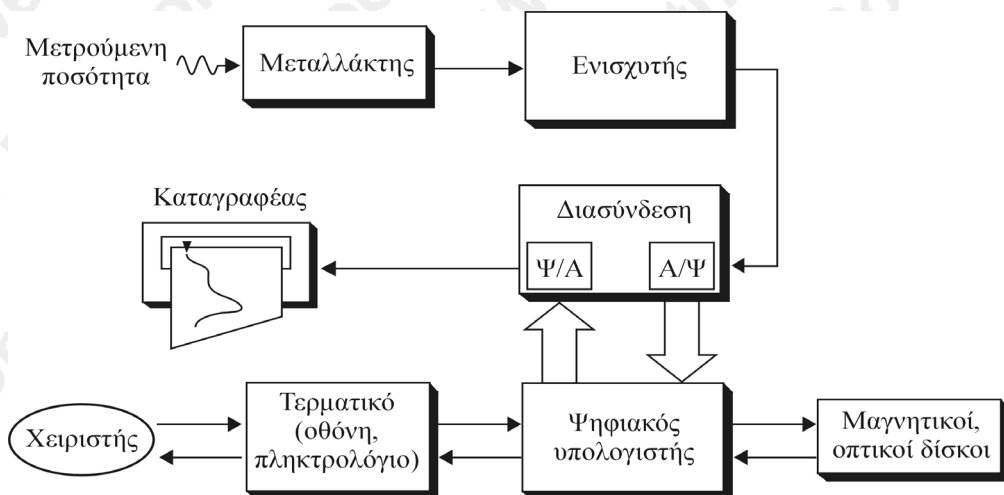
Το απλό κύκλωμα του Σχήματος 5.6.17 αναφέρεται σε ολοκληρωτή boxcar, που ρυθμίζεται “χειροκίνητα” και απαιτεί τη λήψη μετρήσεων σημείο προς σημείο. Τα πλήρη συστήματα ολοκληρωτών boxcar είναι πολύ πιο σύνθετα και επιτρέπουν την αυτόματη καταγραφή της κυματομορφής. Τούτο επιτυγχάνεται με βραδεία μετατόπιση του παλμού boxcar από την αρχή μέχρι το τέλος της περιόδου με συνεχή και βραδεία αύξηση του εύρους του παλμού θέσης t_θ από τιμή 0 έως T_S . Με τον τρόπο αυτό θορυβώδεις κυματομορφές με συντομότατη περίοδο (π.χ. $T_S < 1 \mu s$) καταγράφονται με βραδύ ρυθμό (π.χ. σε μερικά min), πρακτικά απαλλαγμένες από θόρυβο.

5.7 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Η ευρύτατη διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος των ψηφιακών υπολογιστών τους κατέστησε απαραίτητη μονάδα κάθε σύγχρονης μετρητικής διάταξης. Μια από τις πλέον βασικές λειτουργίες των υπολογιστών είναι η επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων με σκοπό την αύξηση του λόγου S/N, μια διαδικασία η οποία ονομάζεται **φιλτράρισμα** (filtering) ή **εξομάλυνση** (smoothing). Η γενική διάταξη εισαγωγής πειραματικών δεδομένων σε υπολογιστή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.1.

Ο μεταλλάκτης παρακολουθεί την εξέλιξη της παρακολουθούμενης φυσικής ή χημικής ποσότητας και στην έξοδό του παρουσιάζει ένα ηλεκτρικό σήμα, που συνδέεται με την ποσότητα αυτή μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς. Το σήμα ενισχύεται και υφίσταται γραμμική τροποποίηση έτσι, ώστε η περιοχή τιμών εξόδου να συμπίπτει κατά το δυνατόν με την περιοχή σήματος εισόδου του αναλογικοψηφιακού (Α/Ψ) μετατροπέα, ώστε να αξιοποιηθεί στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό η διακρισιμότητα του τελευταίου (βλέπε Παράδειγμα 4-3, σελ. 160).

Ο Α/Ψ μετατροπέας είναι επιμέρους τμήμα της μονάδας **διασύνδεσης** (interface) και αποτελεί το συνδετικό κρίκο του “ψηφιακού κόσμου” του υπολογιστή με τον “αναλογικό κόσμο” των μετρούμενων ποσοτήτων. Τα θορυβώδη **ακατέργαστα δεδομένα** (raw data) από την έξοδο του ενισχυτή, ψηφιοποιούνται και εισάγονται στη μνήμη του υπολογιστή. Από εκεί μπορούν να μεταφερθούν σε **μέσα μαζικής αποθήκευσης** (mass storage devices), όπως π.χ. σε μαγνητικούς δίσκους και ταινίες, για μελλοντική επεξεργασία ή απλή αρχειοθέτηση.



Σχήμα 5.7.1 Γενική διάταξη για τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία αναλογικών σημάτων με ψηφιακό υπολογιστή.

Κατάλληλα προγράμματα, η αρχή των οποίων θα περιγραφεί στη συνέχεια, επεξεργάζονται τα θορυβώδη δεδομένα με σκοπό την κατά το δυνατόν αύξηση του λόγου S/N. Επιπλέον, η επεξεργασία μπορεί να επεκταθεί και σε μαθηματική τροποποίηση του σήματος, π.χ. ένα σήμα που αντιπροσωπεύει το φάσμα διαπερατότητας μιας ένωσης, μπορεί να υποστεί λογαρίθμηση για να μετατραπεί σε φάσμα απορρόφησης. Επιπλέον, είναι δυνατός ο υπολογισμός παραγώγων του φάσματος απορρόφησης και η αφαίρεση (διόρθωση) φάσματος υποβάθρου.

Τα **επεξεργασμένα δεδομένα** (processed data) μπορούν να παρουσιασθούν ως αριθμητικές ενδείξεις ή, συνηθέστερα, ως διαγράμματα στην οθόνη του υπολογιστή και σε άλλες μονάδες εξόδου. Π.χ. μπορούν να αναπαραχθούν στην αναλογική τους μορφή με ένα ψηφιακοαναλογικό (Ψ/Α) μετατροπέα και να καταγραφούν σε ένα κοινό αναλογικό καταγραφέα.

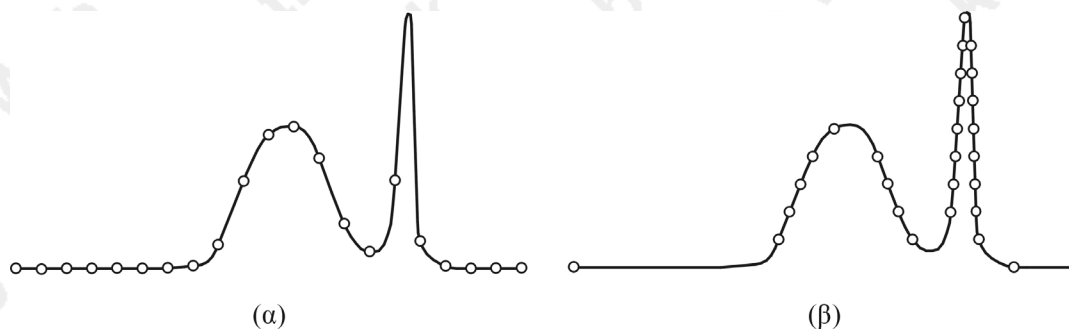
Είναι προφανώς αδύνατη η ταυτόχρονη διαδικασία παραγωγής, επεξεργασίας και αναπαραγωγής του επεξεργασμένου σήματος, όπως θα συνέβαινε, π. χ. με την εισαγωγή του σήματος σε ένα βαθυπερατό

φίλτρο και στη συνέχεια σε μια μονάδα λογαριθμικού ενισχυτή (επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, real time processing). Πολλά προγράμματα επεξεργασίας απαιτούν την εισαγωγή του συνόλου των πειραματικών δεδομένων για να προχωρήσουν σε επεξεργασία τους (π.χ. εκείνα που κάνουν χρήση των μετασχηματισμών Fourier), ενώ άλλα μπορούν να προσεγγίσουν την επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, αλλά στην πραγματικότητα εισάγουν μια καθυστέρηση μεταξύ του σήματος εισόδου (ακατέργαστα δεδομένα) και του σήματος εξόδου (επεξεργασμένα δεδομένα), που εξαρτάται από τη μέθοδο επεξεργασίας και την ταχύτητα του υπολογιστή.

5.7.1 Δειγματοληψία σήματος - Θεώρημα Nyquist

Ένα αναλογικό σήμα εισάγεται στον υπολογιστή υπό τη μορφή **διακριτών** σημείων (discrete) ή **δειγμάτων** (samples). Ο τρόπος συλλογής δειγμάτων είναι καθοριστικός για την πιστή παραλαβή του συνόλου των χρήσιμων πληροφοριών, που εμπεριέχονται στο σήμα.

Δύο διαφορετικοί τρόποι συλλογής δειγμάτων ενός αναλογικού σήματος (π.χ. του σήματος εξόδου ενός αεριοχρωματογράφου) δείχνονται στο Σχήμα 5.7.2. Με τον πρώτο τρόπο τα δείγματα συλλέγονται ως χρονικώς ισοαπέχοντα σημεία, ενώ με τον δεύτερο τα δείγματα συλλέγονται, εφόσον το αναλογικό σήμα υποστεί μια καθορισμένη (απολύτως) μεταβολή.



Σχήμα 5.7.2 Τρόποι δειγματοληψίας αναλογικού σήματος: (α) Ως χρονικώς ισοαπέχοντα σημεία, (β) μετά από καθορισμένη (απολύτως) μεταβολή σήματος.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο πιο απλός (Σχήμα 5.7.2α). Το πρόγραμμα συλλογής δειγμάτων καθοδηγείται συνήθως από το σύστημα **χρονιζόμενων διακοπών** (timed interrupts) του υπολογιστή και η εισαγωγή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγάλη συχνότητα (π.χ. 20 kHz), ενώ ο υπολογιστής παράλληλα μπορεί να εκτελεί και κάποια άλλη εργασία. Οι τιμές των δειγμάτων μπορούν να περνούν απ' ευθείας στη μνήμη του υπολογιστή με την τεχνική της **άμεσης προσπέλασης μνήμης** (direct memory access, DMA), (σελ. 228), οπότε η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίζεται κυρίως από τον χρόνο ψηφιοποίησης του αναλογικού σήματος και μπορεί να φθάσει τα 100 kHz με τους συνηθισμένους τύπους προσωπικών υπολογιστών. Η χρονική θέση κάθε δείγματος είναι γνωστή, αφού ισοαπέχουν χρονικώς και ο αριθμός τους, όπως και ο συνολικός χρόνος συλλογής είναι επακριβώς γνωστοί.

Κατά τη λήψη χρονικώς ισοαπεχόντων δειγμάτων απαιτείται προσεκτική επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας. Έτσι, στο Σχήμα 5.7.2α, ενώ η πλατειά κορυφή αποδίδεται πιστά από τα συλλεγόμενα δείγματα, η οξεία κορυφή έχει ουσιαστικά χαθεί, αφού η κορυφή της ουσιαστικά εμφανίστηκε στο ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών δειγματοληψιών. Προφανώς, ο μόνος τρόπος πιστής απεικόνισης είναι η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας, γεγονός που οδηγεί σε αποθήκευση υπερβολικού αριθμού τιμών δειγμάτων και κατάληψη μνήμης από δείγματα περιοχών, όπου ενδεχομένως δεν υπάρχει χρήσιμη πληροφορία (π.χ. περιοχή γραμμής βάσης).

Η δεύτερη τεχνική (Σχήμα 5.7.2β) είναι πιο σύνθετη και απαιτεί συνεχή απασχόληση του υπολογιστή κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, επειδή πρέπει να εξετάζεται το κατά πόσο επήλθε η απαιτούμενη

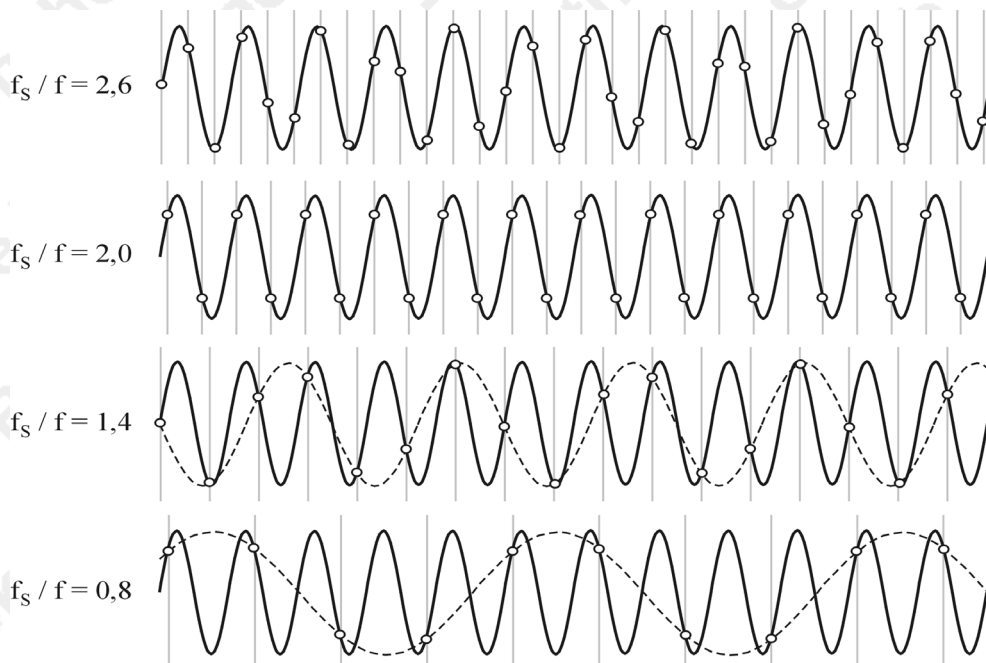
μεταβολή για να καταχωρισθεί η τιμή ενός νέου δείγματος. Το γεγονός αυτό μειώνει τη δυνατότητα ταχείας δειγματοληψίας, οπότε το όποιο όφελος αυτοαναιρείται ιδιαίτερα για σήματα που περιέχουν οξύτερες κορυφές (π.χ. φάσματα ατομικής εκπομπής ή απορρόφησης). Επιπλέον, με κάθε δείγμα πρέπει να καταχωρίζεται και ο αντίστοιχος χρόνος γεγονός που αυξάνει τη συνολικά απαιτούμενη μνήμη. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται πλέον σπάνια.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι επεξεργασίας και εξομάλυνσης των σημάτων διαχειρίζονται σήματα, δείγματα των οποίων έχουν ληφθεί ως χρονικώς ισοαπέχοντα διάκριτα σημεία. Το ερώτημα, στην περίπτωση αυτή, είναι: Ποια είναι η μικρότερη επιτρεπόμενη συχνότητα δειγματοληψίας ενός σήματος, που δεν επιφέρει απώλεια ή αλλοίωση της πληροφορίας; Απάντηση παρέχεται από το **θεώρημα δειγματοληψίας** του Nyquist. (Nyquist sampling theorem), του οποίου μια απλή διατύπωση είναι η ακόλουθη:

Η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας ενός σήματος, που δεν εισάγει παραμόρφωση στην υπάρχουσα πληροφορία σε αυτό, είναι διπλάσια από τη συχνότητα της πλέον υψίσυχνης συνιστώσας του.

Εάν f_s είναι η **συχνότητα δειγματοληψίας** (sampling frequency), η **κρίσιμη συχνότητα** (critical frequency) ή **συχνότητα Nyquist** (f_N) είναι η συχνότητα $f_s/2$. Κάθε ημιτονική συνιστώσα του σήματος με συχνότητα μεγαλύτερη από την κρίσιμη (π.χ. $f = f_N + \Delta f$) χάνεται και επιπλέον (ίσως και το χειρότερο) εισάγεται, με **αναδίπλωση** (folding) ως προς τη συχνότητα f_N , στο “εκ δειγματοληψίας” σήμα ως **ψευδής χαμηλόσυχη ημιτονική συνιστώσα** με συχνότητα $f' = f_N - \Delta f$. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως aliasing (alias: ψευδώνυμο, παραπλανητική πληροφορία), που θα μπορούσε να αποδοθεί ως **αλλοίωση**.

Το αποτέλεσμα της αλλοίωσης παρουσιάζεται παραστατικά στο Σχήμα 5.7.3. Λαμβάνονται δείγματα από ένα ημιτονικό σήμα συχνότητας f σε συχνότητες $f_s = 2,6f, 2,0f, 1,4f$ και $0,8f$. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις, επειδή $f_N = f_s/2 \geq f$ δεν εισάγονται ψευδείς συνιστώσες, αφού το αρχικό ημιτονικό σήμα είναι το πλέον χαμηλόσυχο, το οποίο μπορεί να προσαρμοσθεί στα δείγματα. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, στα δείγματα μπορούν να προσαρμοσθούν πλέον χαμηλόσυχα ημιτονικά σήματα (διακεκομμένες γραμμές), που θα αποτελέσουν και τις ψευδείς συνιστώσες στο “εκ δειγματοληψίας” σήμα.



Σχήμα 5.7.3 Δειγματοληψία ημιτονικού σήματος συχνότητας f σε διαφορετικές συχνότητες f_s . Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζεται η δημιουργούμενη ψευδής συνιστώσα στις περιπτώσεις που είναι $f_s/f < 2$.

Ο γενική εξίσωση για τον υπολογισμό των δημιουργούμενων **ψευδών συχνοτήτων** (alias frequencies), λόγω χαμηλότερης συχνότητας δειγματοληψίας από την απαιτούμενη (subsampling), είναι:

$$\text{Ψευδής συχνότητα: } f' = |f - k f_s| \quad (5.7.1)$$

όπου f είναι η πραγματική συχνότητα ημιτονικού σήματος (ή της ημιτονικής συνιστώσας ενός σήματος), και f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας. k είναι ο μικρότερος ακέραιος αριθμός που φέρει το γινόμενο $k f_s$ πλησιέστερα στην τιμή f .

Έτσι, στην τρίτη περίπτωση ($f_s/f = 1,4$) του Σχήματος 5.7.3, η δημιουργούμενη ψευδής συχνότητα είναι: $|f - 1 \times 1,4f| = 0,4f$, ενώ στην τέταρτη περίπτωση ($f_s/f = 0,8$) δημιουργείται η ψευδής συχνότητα $|f - 1 \times 0,8f| = 0,2f$. Να σημειωθεί ότι τα πλάτη των επιμέρους συνιστωσών δεν έχουν καμιά επίδραση στο φαινόμενο και διατηρούνται αναλλοίωτα στις συνιστώσες ψευδών συχνοτήτων.



Παράδειγμα 5-6. Ένα σήμα αποτελείται από 4 ημιτονικές συνιστώσες (τα πλάτη τους μπορεί να διαφέρουν) με συχνότητες: $f_1 = 30$ Hz, $f_2 = 60$ Hz, $f_3 = 115$ Hz και $f_4 = 295$ Hz και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι $f_s = 100$ Hz. Να εκτιμηθεί η σύνθεση του “εκ δειγματοληψίας” προκύπτοντος σήματος.

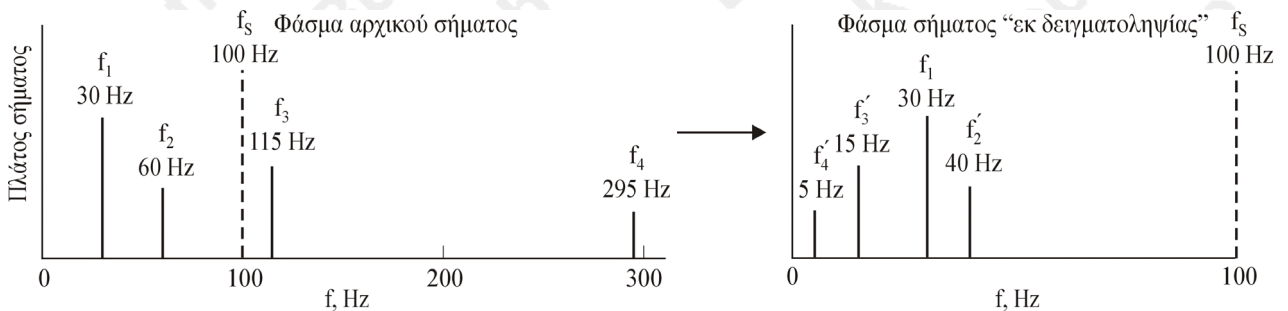
Λύση. Η συχνότητα Nyquist είναι $f_N = f_s/2 = 50$ Hz. Η συχνότητα $f_1 = 30$ Hz είναι μικρότερη από τη συχνότητα Nyquist και επομένως θα εμφανισθεί αναλλοίωτη στο προκύπτον “εκ δειγματοληψίας” σήμα. Όλες οι άλλες συνιστώσες είναι μεγαλύτερες από τη συχνότητα Nyquist και αναμένεται ότι θα εκδηλωθούν ως συνιστώσες ψευδών συχνοτήτων. Με βάση την Εξίσωση 5.7.1:

H $f_2 = 60$ Hz θα δημιουργήσει την ψευδή συχνότητα: $f_2' = |60 - 1 \times 100| = 40$ Hz

H $f_3 = 115$ Hz θα δημιουργήσει την ψευδή συχνότητα: $f_3' = |115 - 1 \times 100| = 15$ Hz

H $f_4 = 295$ Hz θα δημιουργήσει την ψευδή συχνότητα: $f_4' = |295 - 3 \times 100| = 5$ Hz

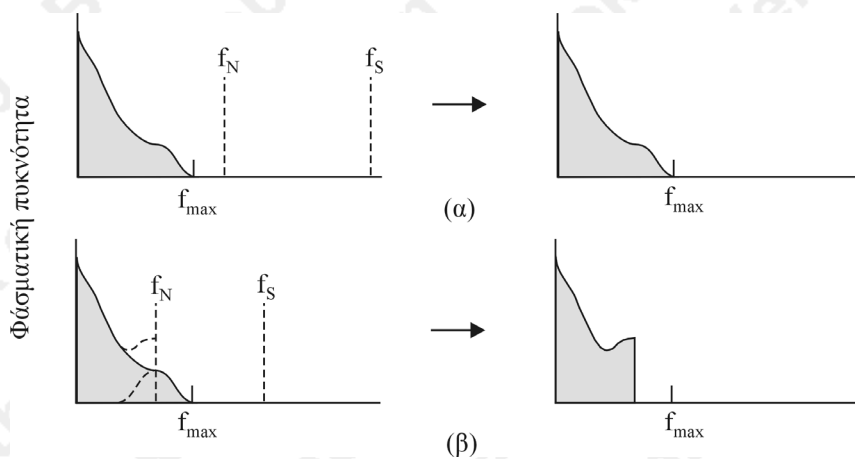
Στο παρακάτω σχήμα δείχνεται η αλλοίωση του φάσματος συχνοτήτων:



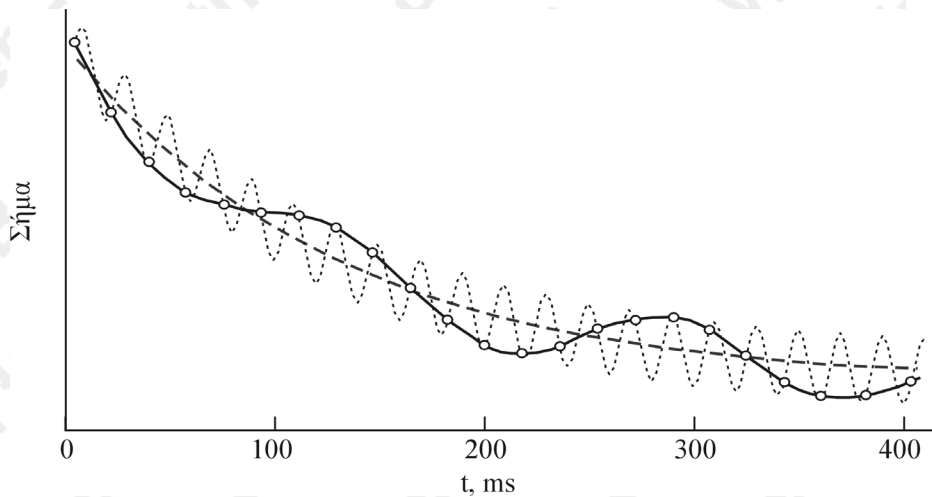
Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το “εκ δειγματοληψίας” σήμα δεν περιέχει συνιστώσες μεγαλύτερες από τη συχνότητα Nyquist $f_s/2 = 50$ Hz.



Προβλήματα από την εμφάνιση ψευδών συχνοτήτων και αντιμετώπισή τους. Η επίδραση της συχνότητας δειγματοληψίας στο φάσμα συχνοτήτων ενός σήματος το οποίο αποτελείται από απειρία συχνοτήτων, δείχνεται στο Σχήμα 5.7.4. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 5.7.4α) η κρίσιμη συχνότητα f_N είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα του σήματος (f_{max}) και δεν αλλοιώνεται το φάσμα συχνοτήτων του “εκ δειγματοληψίας” σήματος. Στη δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 5.7.4β), επειδή $f_{max} > f_N$, οι συχνότητες του σήματος που είναι μεγαλύτερες από την κρίσιμη f_N χάνονται και προστίθενται με αναδίπλωση στις ήδη υπάρχουσες συχνότητες. Το αποτέλεσμα είναι η αλλοίωση του φάσματος συχνοτήτων του καταχωρισμένου σήματος και επομένως της παρεχόμενης από το σήμα πληροφορίας.



Σχήμα 5.7.4 Επίδραση της συχνότητας δειγματοληψίας στο φάσμα συχνοτήτων ενός σήματος: (α) Ορθή επιλογή συχνότητας δειγματοληψίας ($f_N = f_s/2 \geq f_{\max}$), (β) κακή επιλογή ($f_N = f_s/2 < f_{\max}$) με αποτέλεσμα αλλοίωση του φάσματος συχνοτήτων του σήματος και επομένως των πληροφοριών του σήματος.



Σχήμα 5.7.5 Φαινομενική χαμηλόσυχη διακύμανση εκθετικά αποσβενόμενου σήματος μολυσμένου με περιοδικό σήμα 50 Hz (διάστικτη καμπύλη) ως αποτέλεσμα δειγματοληψίας σε παραπλήσια συχνότητα (55 Hz).

Η επίδραση της φασματικής αλλοίωσης είναι σημαντική σε περιπτώσεις δειγματοληψίας σημάτων “μολυσμένων” με θόρυβο που εμφανίζει κάποια περιοδικότητα με συνηθέστερη περίπτωση τον θόρυβο περιβάλλοντος των 50 Hz (ή 60 Hz σε άλλες χώρες), που οφείλεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο Σχήμα 5.7.5 απεικονίζεται το αποτέλεσμα δειγματοληψίας εκθετικά αποσβενόμενου σήματος μολυσμένου με τον θόρυβο αυτό. Η δειγματοληψία πραγματοποιείται σε παραπλήσια συχνότητα (55 Hz) με αποτέλεσμα πλήρη και “παραπλανητική” παραμόρφωση του αναμενόμενου σήματος “εκ δειγματοληψίας”.

Από τα προηγούμενα γίνεται σαφές ότι η παρουσία μιας “περίεργης” χαμηλόσυχνης περιοδικότητας σε σήματα “εκ δειγματοληψίας”, που θα έπρεπε να είναι σταθερά ή έστω να μεταβάλλονται αργά (π.χ. γραμμική βάση ενός χρωματογραφήματος), είναι σχεδόν πάντοτε ασφαλής ένδειξη μόλυνσης του σήματος από τον περιοδικό θόρυβο των 50 Hz του ηλεκτρικού δικτύου, που εκδηλώνεται ως μια χαμηλόσυχη ψευδής συχνότητα. Στο Παράδειγμα 5-7 είναι χαρακτηριστικό το ότι η υψίσυχη συνιστώσα των 295 Hz εμφανίζεται πλέον ως μια χαμηλόσυχη συνιστώσα των 5 Hz.

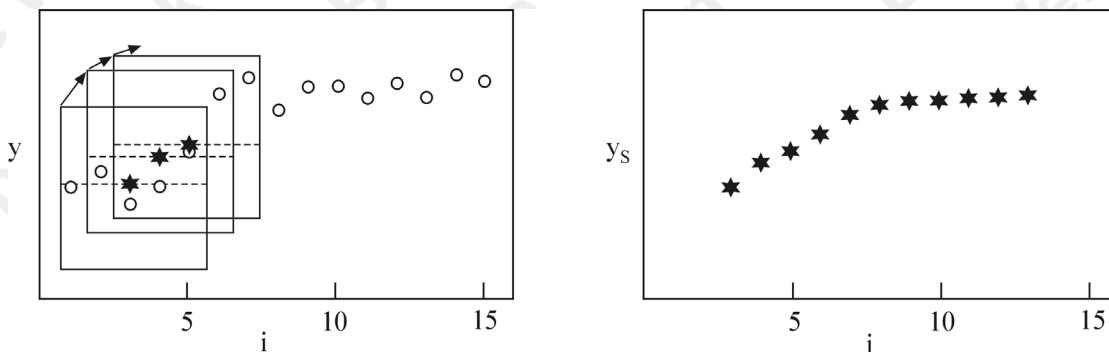
Στις περιπτώσεις αυτές η λύση του προβλήματος θα πρέπει να είναι μια από τις ακόλουθες ή συνδυασμός τους: (1) θωράκιση έναντι του περιοδικού θορύβου και χρήση διαφορικών ενισχυτών με υψηλό

CMRR, (2) αποκοπή του περιοδικού θορύβου με κατάλληλα φίλτρα (σελ. 192) πριν από τη δειγματοληψία του σήματος, (3) σε περίπτωση που ο περιοδικός θόρυβος είναι ισχυρότατος και οι δυνατότητες πλήρους απομάκρυνσής του περιορισμένες, θα πρέπει να εξετασθεί η δυνατότητα δειγματοληψίας του σήματος σε πλήρη συγχρονισμό (“σε φάση”) με τον περιοδικό θόρυβο.

Γενικά, η ορθή δειγματοληψία ενός σήματος προϋποθέτει τις ακόλουθες ενέργειες:

1. Με φασματική ανάλυση του σήματος καθορίζεται το ανώτερο όριο (f_{\max}) χρήσιμων συχνοτήτων του.
2. Το σήμα διέρχεται από βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής f_{\max} . Έτσι απομακρύνονται οι άχρηστες υψίσυχνες συνιστώσες με συχνότητα μεγαλύτερη από f_{\max} , που θα μπορούσαν να “μολύνουν” το επιθυμητό σήμα με αναδίπλωση κατά το στάδιο της δειγματοληψίας. Το φίλτρο που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό είναι γνωστό ως **αντιαλλοιωτικό φίλτρο** (anti-aliasing filter).
3. Πραγματοποιείται δειγματοληψία με συχνότητα ίση ή μεγαλύτερη από $2f_{\max}$.

Παρατήρηση. Θα πρέπει να ληφθεί υπ’όψη ότι σε όλα τα βαθυπερατά φίλτρα οι συνιστώσες με συχνότητες μεγαλύτερες από f_{\max} αποκόπτονται σταδιακά σε μια μεταβατική περιοχή συχνοτήτων. Στην πράξη, για να αποφευχθεί η αλλοίωση του σήματος με ψευδείς συχνοτήτες από τις συνιστώσες που βρίσκονται στη μεταβατική περιοχή, ενδείκνυται η συχνότητα δειγματοληψίας f_s να είναι αρκετά μεγαλύτερη από $2f_{\max}$. Τυπικά θα πρέπει να είναι $f_s = 3f_{\max}$ έως $4f_{\max}$, ανάλογα με το εύρος της μεταβατικής περιοχής συχνοτήτων, που με τη σειρά του εξαρτάται από την κλίση (ή ταχύτητα μείωσης) του χρησιμοποιούμενου βαθυπερατού φίλτρου (σελ. 41).



Σχήμα 5.7.6 Αρχή εξομαλύνσεων δεδομένων με τη μέθοδο της κινούμενης μέσης τιμής: (ο) αρχικά δεδομένα, (*) εξομαλυμένα δεδομένα. Μέγεθος φίλτρου: $2m+1 = 5$.

5.7.2 Μέθοδος κινούμενης μέσης τιμής

Η μέθοδος της **κινούμενης μέσης τιμής** (moving average) είναι η απλούστερη διαδικασία εξομαλύνσης ενός θορυβώδους σήματος καταχωρισμένου στη μνήμη υπολογιστή. Η αρχή της μεθόδου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.6. Τα N δείγματα $(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_N, x_N)$ αποτελούν ισοαπέχοντα σημεία του αρχικού σήματος, δηλαδή ισχύει πάντοτε:

$$x_{i+1} - x_i = \text{σταθερό} \quad (5.7.1)$$

Τα δείγματα μπορεί να είναι τιμές απορρόφησης μιας ένωσης σε τακτά μήκη κύματος (π.χ. ανά 1 nm) ή τιμές pH κατά την ογκομέτρηση μιας βάσης μετά από τακτές προσθήκες πρότυπου διαλύματος οξέος (π.χ. ανά 0,010 mL).

Οι τιμές μιας ομάδας $2m+1$ διαδοχικών σημείων $(y_{k-m}, y_{k-m+1}, \dots, y_k, \dots, y_{k+m-1}, y_{k+m})$ αθροίζονται και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Η μέση τιμή καταχωρίζεται ως **εξομαλυμένη τιμή** (smoothed value) $(y_k)_s$ του κεντρικού σημείου της ομάδας, δηλαδή ισχύει γενικά η σχέση

$$(y_k)_s = \frac{\sum_{i=-m}^m y_{k+i}}{2m+1} \quad (5.7.2)$$

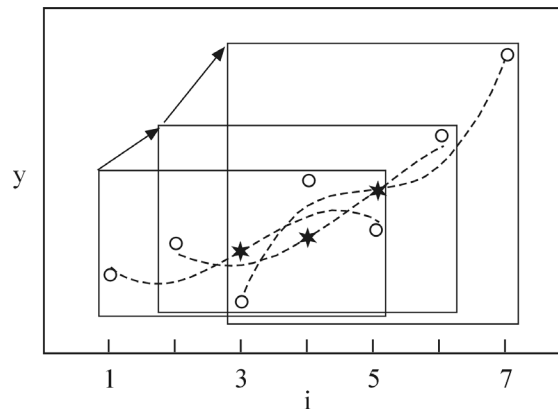
Η διαδικασία αρχίζει από το σημείο $i = m + 1$ με υπολογισμό της τιμής $(y_{m+1})_s$ και επαναλαμβάνεται έως και το σημείο $i = N - m$ με υπολογισμό της τιμής $(y_{N-m})_s$. Τελικά θα έχουν ληφθεί συνολικά $N - 2m$ εξομαλυμένα σημεία: $(y_{m+1})_s, (y_{m+2})_s, \dots, (y_{N-m-1})_s, (y_{N-m})_s$.

Ο αριθμός των σημείων $2m+1$ ονομάζεται **μέγεθος του φίλτρου** (filter size). Η όλη διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί στα ήδη εξομαλυμένα σημεία (πολλαπλά “περάσματα” του σήματος από το φίλτρο), ώστε να επιτευχθεί ακόμη εντονότερη εξομάλυνση του σήματος. Όσες περισσότερες φορές “περάσει” το σήμα μέσα από το φίλτρο, ή (ισοδύναμα) όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του φίλτρου, τόσο εντονότερη είναι η εξομάλυνση, αλλά αυξάνει και ο κίνδυνος να χαθεί μαζί με τον θόρυβο και ενδεχομένως χρήσιμη λεπτή υφή του σήματος.

5.7.3 Πολυωνμική εξομάλυνση - Μέθοδος Savitzky-Golay

Η πολυωνμική εξομάλυνση (polynomial smoothing), βασίζεται στην προσαρμογή ενός πολυωνύμου 2ου ή μεγαλύτερου βαθμού με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων σε κάθε ομάδα $2m+1$ διαδοχικών σημείων. Ως εξομαλυμένη τιμή που αντιστοιχεί στο κεντρικό σημείο της ομάδας λαμβάνεται η τιμή που υπολογίζεται από το πολυώνυμο (θεωρητική τιμή). Να σημειωθεί ότι και η μέθοδος της κινούμενης μέσης τιμής ισοδυναμεί με προσαρμογή πολυωνύμου μηδενικού βαθμού στην ομάδα των διαδοχικών σημείων.

Στο Σχήμα 5.7.7 δείχνεται παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου. Υπολογίζονται οι συντελεστές $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ και β_3 ενός τριτοβάθμιου πολυωνύμου στο οποίο προσαρμόζονται τα σημεία με $i = 1$ έως 5. Η “εξομαλυμένη” τιμή του κεντρικού σημείου ($i = 3$) της ομάδας θα είναι: $(y_3)_s = \beta_0 + \beta_1 x_3 + \beta_2 x_3^2 + \beta_3 x_3^3$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα σημεία με $i = 2$ έως 6, υπολογίζεται η νέα ομάδα συντελεστών πολυωνύμου και στη συνέχεια το σημείο $(y_4)_s$ κ.ο.κ.



Σχήμα 5.7.7 Πολυωνμική εξομάλυνση. (ο) αρχικά δεδομένα, (*) εξομαλυμένα δεδομένα. Μέγεθος φίλτρου: $2m+1 = 5$. Με διακεκομμένες γραμμές δείχνεται η γραφική παράσταση του τριτοβάθμιου πολυωνύμου στο οποίο προσαρμόζονται τα εκάστοτε 5 σημεία

Οι Savitzky και Golay έδειξαν ότι η διαδικασία υπολογισμού μιας νέας ομάδας συντελεστών πολυωνύμου μετά από κάθε μετατόπιση με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων, μπορεί να αντικατασταθεί με μια μαθηματικά ισοδύναμη, αλλά υπολογιστικά κατά πολύ απλούστερη διαδικασία (*Anal. Chem.*, **1964**, *36*, 1627). Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην άθροιση των $2m+1$ διαδοχικών τιμών κάθε ομάδας, αφού προηγουμένως πολλαπλασιασθούν με καθορισμένη ομάδα ακέραιων **συντελεστών βάρους** (weight coefficients) $(a_{-m}, a_{-m+1}, \dots, a_0, \dots, a_{m-1}, a_m)$ και διαίρεση του αθροίσματος με ένα επίσης ακέραιο συντελεστή κανονικοποίησης N_F . Έτσι, η εξομαλυμένη τιμή του σημείου y_k θα παρέχεται από τη σχέση

$$(y_k)_s = \frac{\sum_{i=-m}^m a_i y_{k+i}}{N_F} \quad (5.7.3)$$

Πίνακας 5.7.1 Τυπικοί συντελεστές πολυωνυμικών φίλτρων για εξομάλυνση τιμών και υπολογισμό 1ης και 2ης παραγώγου με τη μέθοδο Savitzky-Golay

k	2m+1:	13	11	9	7	5
Τιμές a_k για απλή εξομάλυνση (πολυώνυμο 2ου/3ου βαθμού)						
-6		-11				
-5		0	-36			
-4		9	9	-21		
-3		16	44	14	-2	
-2		21	69	39	3	-3
-1		24	84	54	6	12
0		25	89	59	7	17
1		24	84	54	6	12
2		21	69	39	3	-3
3		16	44	14	-2	
4		9	9	-21		
5		0	-36			
6		-11				
	$N_F :$	143	429	231	21	35
Τιμές a_k για υπολογισμό 1ης παραγώγου (πολυώνυμο 2ου βαθμού)						
-6		-6				
-5		-5	-5			
-4		-4	-4	-4		
-3		-3	-3	-3	-3	
-2		-2	-2	-2	-2	-2
-1		-1	-1	-1	-1	-1
0		0	0	0	0	0
1		1	1	1	1	1
2		2	2	2	2	2
3		3	3	3	3	
4		4	4	4		
5		5	5			
6		6				
	$N_F :$	182	110	60	28	10
Τιμές a_k για υπολογισμό 2ης παραγώγου (πολυώνυμο 2ου/3ου βαθμού)						
-6		22				
-5		11	15			
-4		2	6	28		
-3		-5	-1	7	5	
-2		-10	-6	-8	0	2
-1		-13	-9	-17	-3	-1
0		-14	-10	-20	-4	-2
1		-13	-9	-17	-3	-1
2		-10	-6	-8	0	2
3		-5	-1	7	5	
4		2	6	28		
5		11	15			
6		22				
	$N_F :$	1001	429	462	42	7

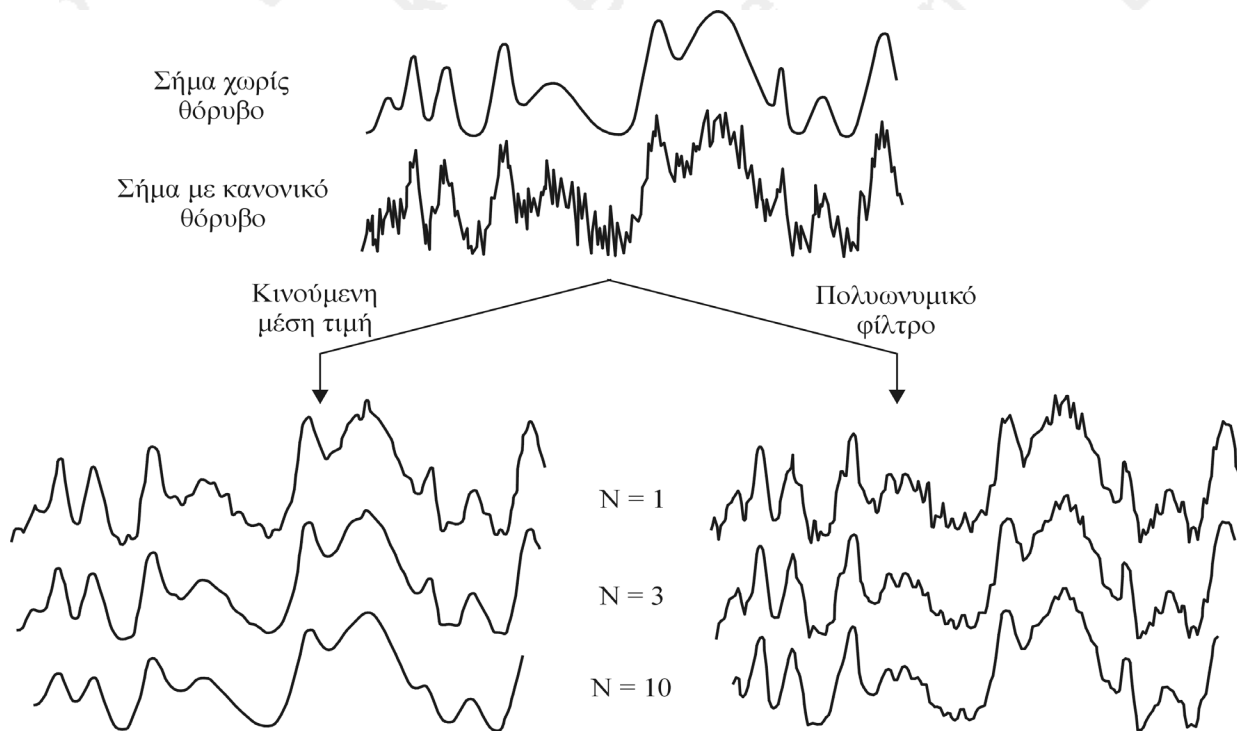
Οι Savitzky-Golay υπελόγισαν τους απαιτούμενους ακέραιους συντελεστές βάρους και συντελεστές κανονικοποίησης για διάφορους βαθμούς πολωνύμου προσαρμογής και για διάφορα μεγέθη ομάδων σημείων.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός του πολωνύμου, τόσο περισσότερο διατηρείται η λεπτή υφή του σήματος (παρακολουθούνται πιστότερα οι τυχόν διακυμάνσεις), ενώ όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της ομάδας δεδομένων, τόσο εντονότερη είναι η εξομάλυνση. Απόσπασμα από τους πίνακες ομάδων συντελεστών βάρους από το άρθρο των Savitzky-Golay παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7.1.

Η όλη διαδικασία ισοδυναμεί με πέρασμα του σήματος μέσω μιας μονάδας, της οποίας η συνάρτηση κρουστικής απόκρισης (σελ. 8) περιγράφεται από τους χρησιμοποιούμενους συντελεστές βάρους. Στην ουσία με την Εξίσωση 5.7.3 εφαρμόζεται έμμεσα η Εξίσωση 1.5.6. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος συχνά αναφέρεται και ως **πολωνυμική συνέλιξη ελάχιστων τετραγώνων** (polynomial least-squares convolution) και οι συντελεστές βάρους ως **παράγοντες συνέλιξης** (convoluting factors).

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που παρέχει η μέθοδος Savitzky-Golay, το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί και **σημαντικότερο από την εξομάλυνση σημάτων**, είναι ότι με κατάλληλη ομάδα συντελεστών βάρους, είναι δυνατός ο υπολογισμός των εξομαλυμένων σημείων όχι μόνο του σήματος, αλλά και των παραγώγων του εξομαλυμένου σήματος οποιασδήποτε τάξης. Στον Πίνακα 5.7.1 περιλαμβάνονται και συντελεστές βάρους που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της 1ης και της 2ης παραγώγου του σήματος.

Σύγκριση των μεθόδων κινούμενης μέσης τιμής και πολωνυμικού φίλτρου. Ένα υποθετικό σήμα (π.χ. φάσμα IR), η θορυβώδης μορφή του και η εξομάλυνση του με τις δύο μεθόδους δείχνονται στο Σχήμα 5.7.8. Το αρχικό θορυβώδες φάσμα αποτελείται από 640 σημεία και το μέγεθος $(2m+1)$ και των δύο φίλτρων είναι 7. Πραγματοποιούνται 1, 3 και 10 διελεύσεις του σήματος μέσα από το κάθε φίλτρο. Αντιληπτή είναι η αυξανόμενη απώλεια ακραίων σημείων του φάσματος, όσο αυξάνει ο αριθμός των περασμάτων (με κάθε πέρασμα χάνονται 3 σημεία στην αρχή και 3 σημεία στο τέλος του φάσματος).



Σχήμα 5.7.8 Σύγκριση των μεθόδων κινούμενης μέσης τιμής και πολωνυμικού φίλτρου. Η εξομάλυνση του θορυβώδους σήματος γίνεται με 1, 3 και 10 περάσματα μέσω φίλτρων 7 σημείων.

Φαινομενικά, η εξομάλυνση με τη μέθοδο κινούμενης μέσης τιμής είναι καλύτερη, ωστόσο προσεκτική παρατήρηση δείχνει ότι το φάσμα τείνει να “ισοπεδωθεί”, όσο αυξάνει ο αριθμός των περασμάτων. Όλα τα σημεία τείνουν να αποκτήσουν την ίδια μέση τιμή. Ταχύτερη “ισοπέδωση” υφίστανται οι στενές κορυφές και τα στενά βυθίσματα. Το γεγονός αυτό προκαλεί έντονη αλλοίωση της ποσοτικής πληροφορίας (π.χ. σχέση ύψους κορυφών), που εμπεριέχεται στο φάσμα. Αντίθετα, με τη μέθοδο του πολυωνυμικού φίλτρου οι κορυφές διατηρούν τη σχέση των υψών τους και το φάσμα τείνει να σταθεροποιηθεί σε μια μορφή, όσο και αν συνεχισθούν τα περάσματα του σήματος από το φίλτρο. Με τη μέθοδο αυτή παρατηρείται μια λεπτή υφή, που είναι ανύπαρκτη στο αθόρυβο (κανονικό) φάσμα και οφείλεται στον “σεβασμό” του φίλτρου στην αρχική πληροφορία.

Δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός, ότι και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην επεξεργασία δειγμάτων που πάρθηκαν μία και μόνη φορά, χωρίς να υπάρχει εισόδος επιπλέον πληροφορίας για να επέλθει περαιτέρω βελτίωση της μορφής.



Παράδειγμα 5-7. Με τη μέθοδο Savitzky-Golay να υπολογισθούν οι εξομαλυμένες τιμές, όπως και οι τιμές της πρώτης και δεύτερης παραγώγου φάσματος απορρόφησης, που αποτελείται από τα ακόλουθα 40 ακατέργαστα ισοαπέχοντα σημεία. Να χρησιμοποιηθούν φίλτρα μεγέθους 7 σημείων.

i	A	i	A	i	A	i	A	i	A
1	0,151	9	0,291	17	0,264	25	0,092	33	0,368
2	0,172	10	0,289	18	0,204	26	0,071	34	0,351
3	0,133	11	0,281	19	0,191	27	0,150	35	0,368
4	0,150	12	0,303	20	0,187	28	0,401	36	0,101
5	0,201	13	0,281	21	0,081	29	0,407	37	0,125
6	0,285	14	0,317	22	0,092	30	0,411	38	0,105
7	0,301	15	0,302	23	0,051	31	0,386	39	0,121
8	0,260	16	0,251	24	0,071	32	0,351	40	0,113

Λύση. Το μέγεθος του φίλτρου ($2m + 1$) είναι 7, επομένως: $m = 3$. Οι υπολογισμοί της εξομαλυμένης τιμής (y_i)_s, της 1ης παραγώγου (y_i)' και της 2ης παραγώγου (y_i)'' θα αρχίσουν από το σημείο $i = m + 1 = 4$. Χρησιμοποιείται η Εξίσωση 5.7.3 και οι συντελεστές, που δίνονται στον Πίνακα 5.7.1:

$$(y_4)_s = [(-2) \times 0,151 + 3 \times 0,172 + 6 \times 0,133 + 7 \times 0,150 + 6 \times 0,201 + 3 \times 0,285 + (-2) \times 0,301] / 21 = 0,1677$$

$$(y_4)' = [(-3) \times 0,151 + (-2) \times 0,172 + (-1) \times 0,133 + 0 \times 0,150 + 1 \times 0,201 + 2 \times 0,285 + 3 \times 0,301] / 28 = 0,0266$$

$$(y_4)'' = [5 \times 0,151 + 0 \times 0,172 + (-3) \times 0,133 + (-4) \times 0,150 + (-3) \times 0,201 + 0 \times 0,285 + 5 \times 0,301] / 42 = 0,0157$$

για το επόμενο σημείο ($i = 5$) θα είναι

$$(y_5)_s = [(-2) \times 0,172 + 3 \times 0,133 + 6 \times 0,150 + 7 \times 0,201 + 6 \times 0,285 + 3 \times 0,301 + (-2) \times 0,260] / 21 = 0,2121$$

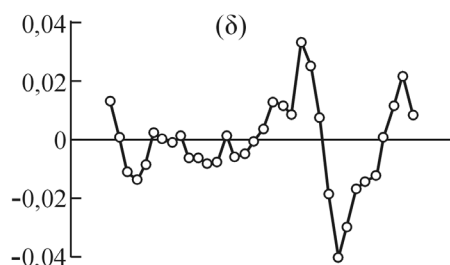
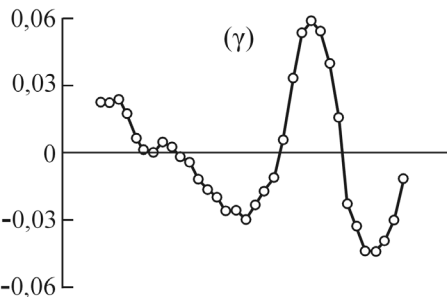
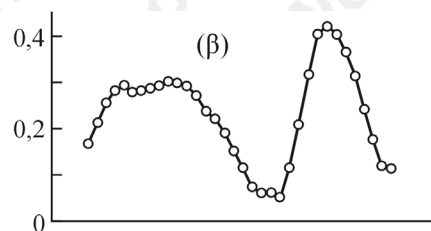
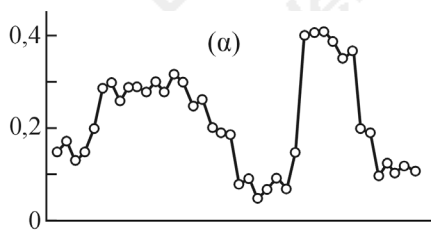
$$(y_5)' = [(-3) \times 0,172 + (-2) \times 0,133 + (-1) \times 0,150 + 0 \times 0,201 + 1 \times 0,285 + 2 \times 0,301 + 3 \times 0,260] / 28 = 0,0262$$

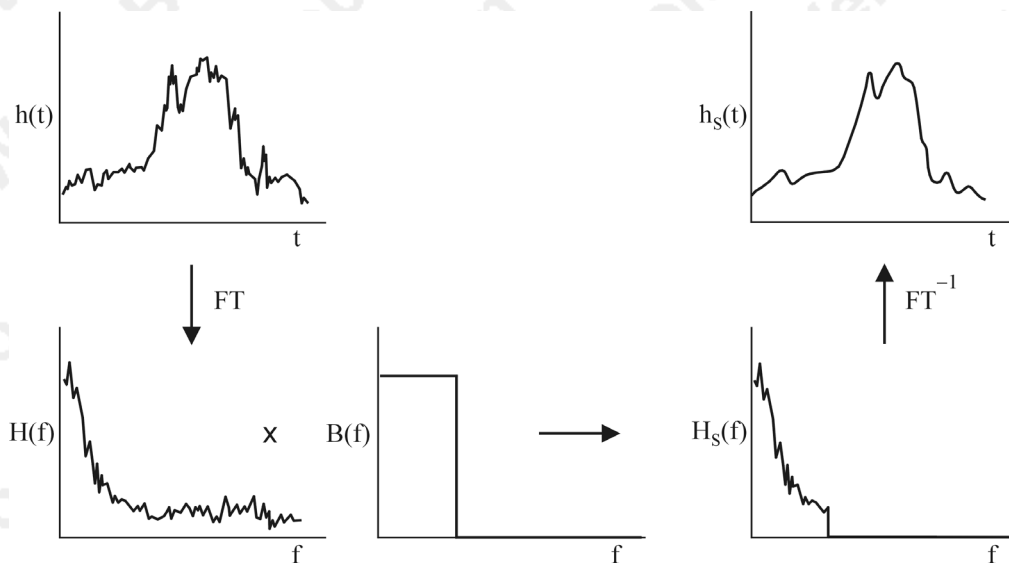
$$(y_5)'' = [5 \times 0,172 + 0 \times 0,133 + (-3) \times 0,150 + (-4) \times 0,201 + (-3) \times 0,285 + 0 \times 0,301 + 5 \times 0,260] / 42 = 0,0012$$

Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται μέχρι και το σημείο με a/a 37 ($= N - m$). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών και οι αντίστοιχες διαγραμματικές παραστάσεις: (α) του αρχικού φάσματος, (β) του φάσματος μετά την εξομάλυνση, (γ) της 1ης παραγώγου και (δ) της 2ης παραγώγου του είναι τα ακόλουθα:

i	y_i	$(y_i)_s$	$(y_i)'$	$(y_i)''$	i	y_i	$(y_i)_s$	$(y_i)'$	$(y_i)''$
1	0,151	-	-	-	21	0,081	0,1153	-0,0347	0,0003
2	0,172	-	-	-	22	0,092	0,0780	-0,0201	0,0155
3	0,133	-	-	-	23	0,051	0,0631	0,0125	0,0144
4	0,150	0,1677	0,0266	0,0157	24	0,069	0,0651	0,0074	0,0107
5	0,201	0,2121	0,0262	0,0012	25	0,092	0,0524	0,0402	0,0399
6	0,285	0,2566	0,0284	-0,0125	26	0,071	0,1163	0,0639	0,0305
7	0,301	0,2845	0,0204	-0,0153	27	0,150	0,2104	0,0709	0,0091
8	0,260	0,2919	0,0085	0,0097	28	0,401	0,3161	0,0650	-0,0211
9	0,291	0,2810	0,0015	0,0031	29	0,407	0,4041	0,0471	-0,0466
10	0,289	0,2848	0,0006	0,0009	30	0,411	0,4215	0,0190	-0,0341
11	0,281	0,3027	-0,0021	-0,0068	31	0,386	0,3995	-0,0264	-0,0194
12	0,303	0,2917	0,0032	0,0016	32	0,350	0,3627	-0,0389	-0,0161
13	0,281	0,3027	-0,0021	-0,0068	33	0,368	0,3136	-0,0525	-0,0134
14	0,317	0,2995	-0,0048	-0,0070	34	0,201	0,2422	-0,0521	0,0018
15	0,302	0,2925	-0,0142	-0,0090	35	0,190	0,1767	-0,0472	0,0145
16	0,251	0,2749	-0,0191	-0,0081	36	0,101	0,1208	-0,0356	0,0261
17	0,264	0,2404	-0,0235	0,0024	37	0,125	0,1152	-0,0144	0,0105
18	0,204	0,2241	-0,0309	-0,0063	38	0,105	-	-	-
19	0,191	0,1920	-0,0307	-0,0053	39	0,121	-	-	-
20	0,187	0,1523	-0,0347	0,0003	40	0,111	-	-	-

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το αρχικό σήμα (α), η εξομαλυμένη μορφή του (β), η πρώτη (γ) και η δεύτερη (δ) παράγωγός του.





Σχήμα 5.7.9 Αρχή μεθόδου βελτίωσης του λόγου S/N μέσω μετασχηματισμού Fourier.

5.7.4 Εξομάλυνση μέσω μετασχηματισμών Fourier

Κάθε συνάρτηση του τύπου $I = a(t)$, με ορθό μετασχηματισμό Fourier μετασχηματίζεται σε φασματική συνάρτηση του τύπου $I = A(f)$ (σελ. 170). Στα σύνθετα σήματα ο μετασχηματισμός εκτελείται μόνο με υπολογιστή και συνήθως με έναν αλγόριθμο επεξεργασίας, που είναι γνωστός ως **ταχύς μετασχηματισμός Fourier** (Fast Fourier Transform, FFT).

Μια χρήσιμη ιδιότητα των μετασχηματισμών Fourier περιγράφεται από την ακόλουθη αντιστοιχία:

$$a(t) = b(t) * c(t) \Leftrightarrow F\{a(t)\} = F\{b(t)\} \times F\{c(t)\}$$

ή

$$a(t) = b(t) * c(t) \Leftrightarrow A(f) = B(f) \times C(f)$$

δηλαδή, η συνέλιξη δύο συναρτήσεων (σελ. 8) αντιστοιχεί με πολλαπλασιασμό των μετασχηματισμένων κατά Fourier μορφών τους, όπως π.χ. ο πολλαπλασιασμός δύο αριθμών αντιστοιχεί με πρόσθεση των λογαρίθμων τους.

Στην προκειμένη περίπτωση η μαθηματικά δυσχερής συνέλιξη δύο συναρτήσεων χρόνου (θορυβώδες σήμα-κρουστική απόκριση φίλτρου) αντιστοιχεί σε απλό πολλαπλασιασμό (σημείο προς σημείο) των ισοδύναμων συναρτήσεων συχνοτήτων (φάσμα συχνοτήτων του σήματος-φασματική απόκριση φίλτρου). Γραφική απεικόνιση της φασματικής απόκρισης του φίλτρου παρέχει το αντίστοιχο διάγραμμα Bode.

Με βάση τα παραπάνω, το σήμα μπορεί να απαλλαγεί από ανεπιθύμητες συνιστώσες με την ακόλουθη αλληλουχία μαθηματικών διεργασιών, που παραστατικά απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.9. Η όλη διαδικασία ισοδυναμεί με πέρασμα του σήματος μέσω φίλτρου με την επιθυμητή φασματική απόκριση.

1. Το σήμα $h(t)$ μετασχηματίζεται με ορθό μετασχηματισμό Fourier (FT) στην αντίστοιχη φασματική συνάρτηση $H(f)$.
2. Η φασματική συνάρτηση $H(f)$ πολλαπλασιάζεται σημείο προς σημείο με τη φασματική συνάρτηση του επιθυμητού φίλτρου $B(f)$. Η συνάρτηση $B(f)$ μπορεί να είναι ορισμένη κατά τμήματα, π.χ. σε μια περιοχή συχνοτήτων να έχει τιμή 1 και να αφήνει αναλλοίωτο το φάσμα $H(f)$ και σε άλλη περιοχή την τιμή 0 και να αποκόπτει πλήρως τις συνιστώσες του φάσματος στις περιοχές αυτές. Είναι προφανές ότι αντίθετα με ό,τι ισχύει στα φίλτρα υλισμικού, το διάγραμμα Bode του “λογισμικού φίλ-

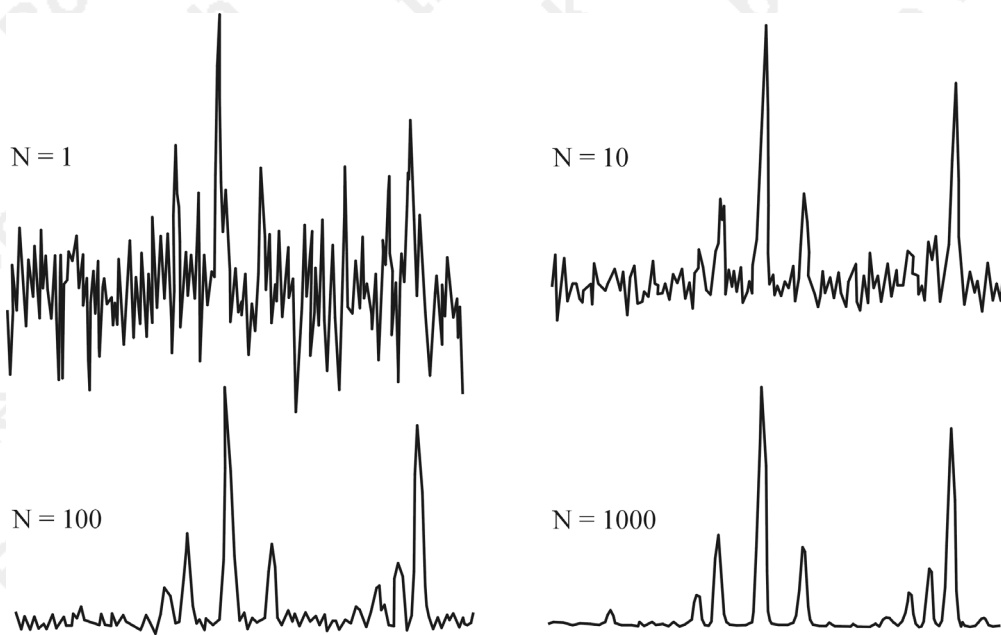
τρον” είναι τελείως “εύπλαστο”, αφού ουσιαστικά μπορεί να του δοθεί οποιαδήποτε επιθυμητή μορφή.

3. Η επεξεργασμένη φασματική συνάρτηση $H_S(f)$ υπόκειται σε αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (FT^{-1}) και λαμβάνεται η εξομαλυσμένη συνάρτηση $h_S(t)$, δηλαδή η εξομαλυσμένη μορφή του αρχικού σήματος.

Η μέθοδος εξομάλυνσης με μετασχηματισμό Fourier έχει ευρύτατες εφαρμογές και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη χημική οργανολογία, όπου εφαρμόζεται κυρίως στις φασματοσκοπίες υπεράυθρου και NMR.

Γενικά σχόλια για την εξομάλυνση σημάτων. Θα πρέπει με έμφαση να τονισθεί ότι η εξομάλυνση των σημάτων μέσω μετασχηματισμού Fourier, αλλά και με τις τεχνικές της κινούμενης μέσης τιμής και Savitzky-Golay, έχει περισσότερο “διακοσμητικό” χαρακτήρα στη μορφή των σημάτων και δεν προσφέρει απολύτως καμία νέα πληροφορία. Αντίθετα, η εξομάλυνση είναι μια διαδικασία που μπορεί να αποκρύψει χρήσιμες πληροφορίες από ένα σήμα. Ωστόσο, το γενικό πλεονέκτημα των φίλτρων λογισμικού έναντι των φίλτρων υλισμικού είναι ότι τα “ακατέργαστα” δεδομένα παραμένουν στη διάθεσή μας για επιπλέον δοκιμές άλλων φίλτρων διαφορετικού μεγέθους και μορφής, φασματική ανάλυση Fourier κ.λπ. Αντίθετα, ένα φίλτρο υλισμικού (π.χ. ένα βαθυπερατό φίλτρο R-C) δημιουργεί εξ αρχής ένα “στερημένο” από ενδεχόμενη πληροφόρηση σήμα, το οποίο δεν επιδέχεται πλέον άλλη επεξεργασία ή διερεύνηση.

Η πραγματική βελτίωση του λόγου S/N ενός σήματος πραγματοποιείται με επέμβαση στις πηγές του σήματος και του θορύβου και στη συνέχεια με τη χρήση ενισχυτών boxcar, lock-in, ως και με την εφαρμογή τεχνικών όπως η μέση μορφή σήματος που περιγράφεται στη συνέχεια.



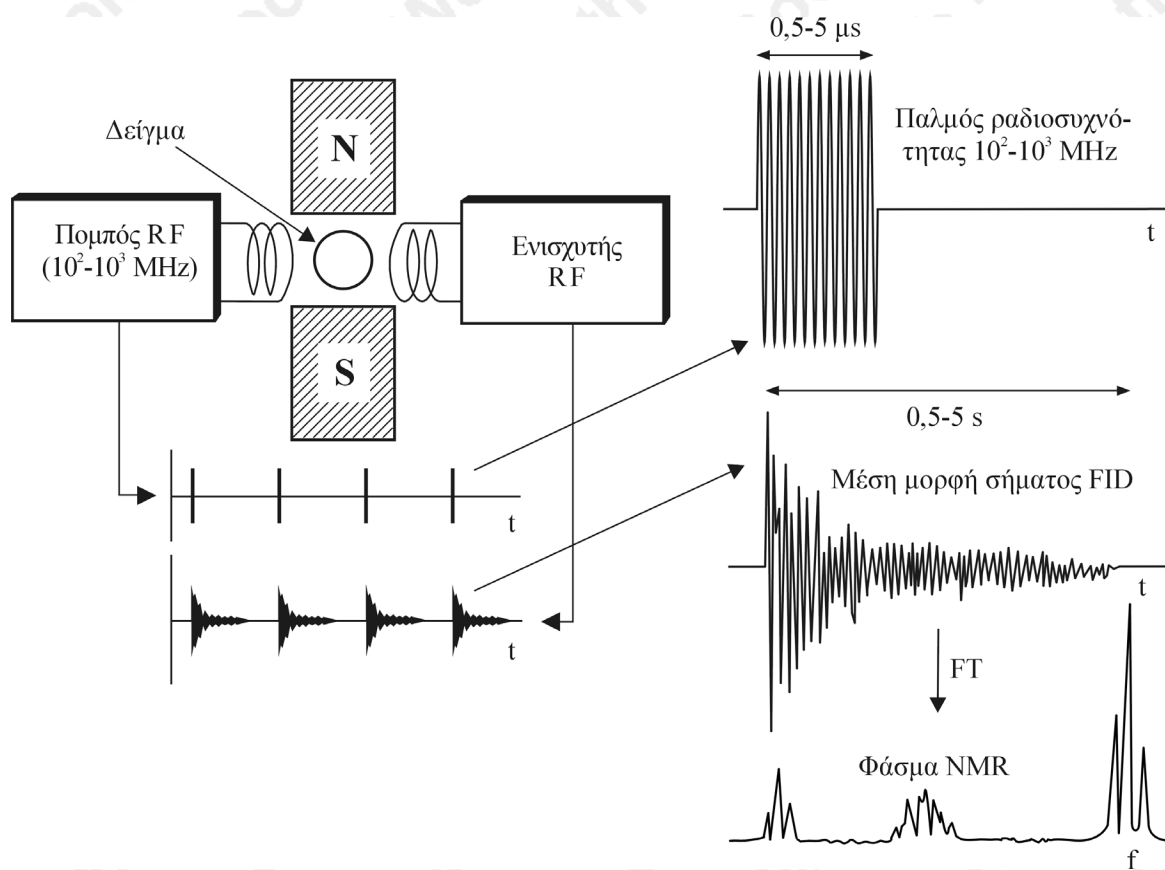
Σχήμα 5.7.10 Σήμα μολυσμένο με κανονικό θόρυβο (N=1) και η μορφή του μέσου σήματος μετά από 10, 100 και 1000 σαρώσεις.

5.7.5 Μέσες μορφές σημάτων

Η μέθοδος της **μέσης μορφής σήματος** (ensemble average) αντιστοιχεί με την επεξεργασία του σήματος με ολοκληρωτή boxcar (σελ. 195) και πρέπει να ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή της (περιοδικό ή επαναλήψιμο σήμα, μηδενική μέση τιμή θορύβου).

Μετά τη ψηφιοποίηση, η τιμή κάθε πειραματικού σημείου αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή. Με τη λήψη της επόμενης περιόδου του σήματος, κάθε νέα τιμή προστίθεται στην αντίστοιχη τιμή της προηγούμενης περιόδου. Η διαδικασία πραγματοποιείται στο σύνολο των πειραματικών σημείων, που απαρτίζουν το σήμα και επαναλαμβάνεται όσες φορές ζητηθεί. Τελικά, υπολογίζεται η μέση τιμή κάθε σημείου και το σύνολο των μέσων τιμών αποτελούν την εξομαλυμένη πλέον μέση μορφή σήματος. Όπως και στον ολοκληρωτή boxcar, έτσι και εδώ ισχύει η Εξίσωση 5.6.9.

Η μέθοδος της μέσης τιμής συνόλων εφαρμόζεται σε περιπτώσεις εξαιρετικά ασθενών σημάτων (π.χ. στη φασματοσκοπία NMR και στις φασματοσκοπίες μετασχηματισμού Fourier), όπου η καταγραφή του φάσματος με μια απλή σάρωση είναι πρακτικά αδύνατον να δώσει χρήσιμη πληροφορία. Ένα τυπικό θορυβώδες φάσμα και οι μορφές των μέσων φασμάτων, που λαμβάνονται μετά από 10, 100 και 1000 σαρώσεις δείχνονται στο Σχήμα 5.7.10. Είναι προφανές, ότι για να διακριθούν οι κορυφές μικρού ύψους από τον θόρυβο απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός σαρώσεων, διαδικασία για την οποία μπορεί να απαιτηθούν και ώρες συνεχών σαρώσεων.



Σχήμα 5.7.11 Αξιοποίηση της μεθόδου μέσης μορφής σήματος στη σύγχρονη φασματοσκοπία NMR (αρχή). Το δείγμα διεγείρεται ακτινοβολούμενο με μια αλληλουχία σύντομων παλμών ραδιοσυχνότητας (RF) και αποδιδεται κάθε φορά το σήμα FID. Η μέση μορφή εκατοντάδων ή χιλιάδων FID υπόκειται σε μετασχηματισμό Fourier και παρέχει το φάσμα NMR στη συμβατική και ερμηνεύσιμη μορφή.

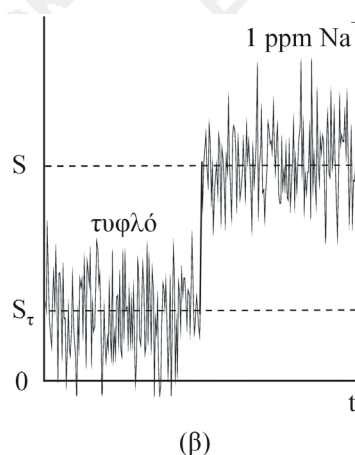
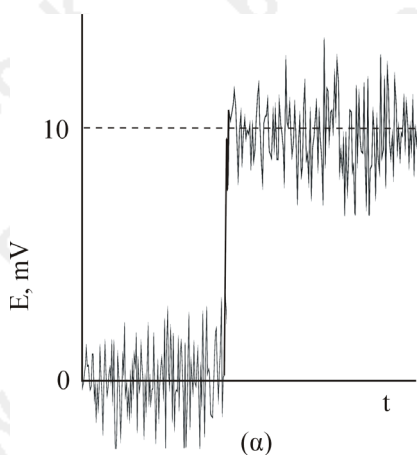
Εφαρμογή των μέσων μορφών σημάτων στη φασματοσκοπία NMR. Ίσως η πλέον τυπική εφαρμογή της μεθόδου των μέσων μορφών σημάτων στη χημική οργανολογία συναντάται στη φασματοσκοπία NMR. Στα σύγχρονα φασματόμετρα NMR αντί να πραγματοποιηθεί σάρωση ραδιοσυχνότητας (radio-frequency, RF) για τη λήψη του φάσματος, το δείγμα (σε σταθερό πάντοτε μαγνητικό πεδίο) ακτινοβολείται με μια αλληλουχία σύντομων (0,5-5 μ s) και ισχυρών παλμών ραδιοσυχνότητας (10^2-10^3 MHz).

Με βάση το φάσμα του ζεύγους 9 του Σχήματος 5.2.2 (σελ. 173), η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με ακτινοβόληση του δείγματος με ευρύτατο φάσμα ραδιοσυνοτήτων.

Κατά την αποδιέγερση το δείγμα ακτινοβολεί μια φθίνουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία ουσιαστικά αποτελεί το φάσμα NMR του δείγματος, αλλά στη μορφή $h(t)$ από την οποία είναι αδύνατον να εξαχθούν οποιεσδήποτε δομικές πληροφορίες. Το σήμα αυτό είναι γνωστό ως σήμα **ελεύθερης επαγωγικής απόσβεσης** (free induction decay, FID), διαρκεί 0,5-5 s, είναι ασθενέστατο και με πολύ μικρό S/N. Με τη βοήθεια ενός ταχύτατου Α/Ψ μετατροπέα πραγματοποιείται “πυκνή” δειγματοληψία του σήματος FID και υπολογίζεται η μέση μορφή του μετά από εκατοντάδες ή και χιλιάδες ακόμη παλμικές διεγέρσεις του δείγματος. Στη συνέχεια με εφαρμογή ορθού μετασχηματισμού Fourier στη μέση μορφή σήματος FID λαμβάνεται το φάσμα NMR στη συμβατική και χημικώς ερμηνεύσιμη μορφή. Η όλη διαδικασία δείχνεται παραστατικά στο Σχήμα 5.7.11.

5.8 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

- 5-1 Ποιες πληροφορίες παρέχει το φάσμα συχνοτήτων ενός σήματος; Σε τί αναμένεται να διαφέρει το φάσμα του σήματος σε σχέση με το φάσμα ισχύος του σήματος;
- 5-2 Ποιοι είναι οι κυριότεροι τύποι ηλεκτρικών θορύβων;
- 5-3 Για ποιους λόγους συχνά είναι ανεπιθύμητη η ενίσχυση σημάτων με ενισχυτές ευρείας ζώνης συχνοτήτων;
- 5-4 Ποια μέτρα μπορούν να ληφθούν ώστε να περιορισθεί σε ένα κύκλωμα ενισχυτή η επίδραση: (α) του θερμικού θορύβου, (β) του θορύβου $1/f$ και (γ) του θορύβου που οφείλεται σε σύλληψη θορύβου 50 Hz από το δίκτυο ηλεκτρικής τροφοδοσίας;
- 5-5 Τί είδους παραμορφώσεις στο σήμα εξόδου αναμένονται σε περιπτώσεις ενίσχυσης (α) ενός τετραγωνικού σήματος και (β) ενός παλμικού σήματος, με ένα ενισχυτή περιορισμένης ζώνης συχνοτήτων.
- 5-6 Να εκτιμηθεί γραφικά η τιμή του λόγου S/N του σήματος των 10 mV, όπως επίσης και το όριο μέτρησης και το όριο ανίχνευσης του σήματος (καταγράφημα α), εάν πραγματοποιούνται απλές (μεμονωμένες) μετρήσεις. Ανάλογα, εάν μια φλογοφωτομετρική διάταξη παρέχει το σήμα S_r (καταγράφημα β) για μέτρηση του τυφλού και το σήμα S για τη μέτρηση διαλύματος Na^+ 1,00 ppm και ως αναλυτικό σήμα νατρίου θεωρείται η διαφορά $S - S_r$, να εκτιμηθεί η ελάχιστη μετρήσιμη και η ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση Na^+ , με βάση: (α) απλές (μεμονωμένες) μετρήσεις και των S και S_r και (β) τιμές S και S_r που είναι οι μέσες τιμές 20 και 100 μετρήσεων, αντίστοιχα.



- 5-7 Τί είναι ο βρόχος γείωσης και σε ποιες περιπτώσεις αναμένεται να εισάγει ιδιαίτερα έντονο θόρυβο κατά τη διαδικασία των μετρήσεων;
- 5-8 Ποιους τύπους θορύβου είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ικανοποιητικά (α) ένας διαφορικός ενισχυτής με υψηλό CMRR; (β) ένας τελεστικός ενισχυτής σταθεροποιημένος με τεμαχιστή (chopper stabilized);
- 5-9 Τί είναι ο ενισχυτής ζώνης σημάτων και τί ο ενισχυτής αποκοπής; Πώς υλοποιούνται και σε ποιες περιπτώσεις μπορούν να αξιοποιηθούν;
- 5-10 Ποιά είναι η αρχή λειτουργίας του lock-in ενισχυτή και του ολοκληρωτή boxcar.
- 5-11 Για ποιο λόγο πραγματοποιείται τεμαχισμός του οπτικού σήματος σε συστήματα φασματομετρίας; Σε ποια σημεία της ροής πληροφορίας (σήματος) πρέπει να πραγματοποιείται ο τεμαχισμός και ποιοι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη για τον καθορισμό της συχνότητάς του;
- 5-12 Η μέση τιμή σήματος εισόδου σε μια μονάδα ενίσχυσης είναι 12 mV και το σήμα εξόδου είναι 2,4 V. Εάν η τυπική απόκλιση του σήματος εισόδου είναι 0,5 mV και του σήματος εξόδου 0,3 V να εκτιμηθεί η εικόνα θορύβου της μονάδας.
- 5-13 Η μέτρηση pH διαλύματος πραγματοποιείται με ψηφιακό πεχαμέτρο με διακριτική ικανότητα 0,001 πεχαμετρικής μονάδας. Να εκτιμηθεί η αναμενόμενη τυπική απόκλιση των μετρήσεων pH υδατικού διαλύματος σταθερής τιμής pH, εάν το σύστημα των ηλεκτροδίων (υάλου-αναφοράς) ως πηγή σήματος έχει εσωτερική αντίσταση 1500 MΩ, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στη θερμοκρασία δωματίου (20 °C) και ο ενισχυτής του πεχαμέτρου έχει εύρος ζώνης διέλευσης συχνοτήτων 1000 Hz.
- 5-14 Ένα σήμα πρόκειται να εισαχθεί σε ένα υπολογιστή στη μορφή χρονικώς ισοαπεχόντων σημείων. Ποιοι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για να καθορισθεί η συχνότητα δειγματοληψίας ενός σήματος;
- 5-15 Σύνθετο σήμα αποτελείται από τις ακόλουθες ημιτονικές συχνότητες: 3 Hz, 8 Hz, 25 Hz και 35 Hz. Ποιες συχνότητες αναμένεται να παρουσιασθούν στο εκ δειγματοληψίας σήματος εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι: (α) 60 Hz και (β) 40 Hz.
- 5-16 Ποιες μεθόδους λογισμικού για εξομάλυνση σημάτων γνωρίζετε; Ποιά είναι η αρχή τους; Σε ποιες περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοσθεί η καθεμία και σε ποιές όχι; Πώς συγκρίνονται μεταξύ τους; Ποιά παραδείγματα εφαρμογών τους στη χημική οργανολογία γνωρίζετε;
- 5-17 Αναφέρατε τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής των τεχνικών εξομάλυνσης-φιλτραρίσματος σημάτων (α) με πολυωνυμική εξομάλυνση (Savitzky-Golay) και (β) με λήψη της μέσης μορφής σημάτων.