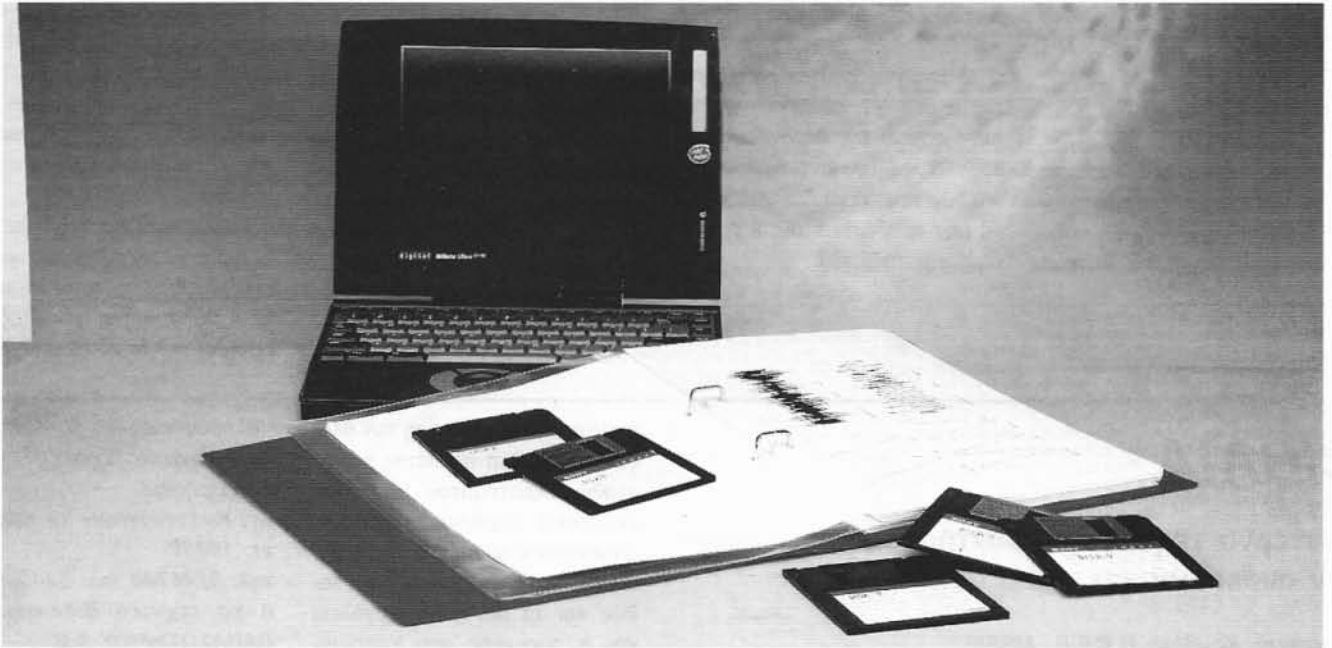


# Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων

γνωρίστε τα μυστικά της σε έξι συνέχειες



Οι ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος (DSP), βρίσκουν σήμερα εφαρμογές κυρίως σε μετασχηματισμούς Fourier και Z και αποτελούν σήμερα ένα από τα ισχυρότερα εργαλεία των μηχανικών. Ο τρόπος που επιλύουν τα διάφορα προβλήματα βασίζεται στη μετατροπή των δειγματοληψίων σε φάσμα συχνοτήτων, γεγονός που κάνει δυνατή την ανάλυση, αλλά και την επεξεργασία, των πάσης φύσεως σημάτων. Αν και η τεχνική της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων έγινε προσιτή στο ευρύ κοινό μόλις πριν από μερικά χρόνια, το θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist, πάνω στο οποίο στηρίζεται, διατυπώθηκε το 1928. Στη σειρά των έξι μαθημάτων που ξεκινάμε σήμερα, θα αποφύγουμε να επεκταθούμε στη μαθηματική θεμελίωση της τεχνικής. Αντίθετα, θα δώσουμε έμφαση σε δοκιμασμένα παραδείγματα που 'τρέχουν' σ' έναν PC εφοδιασμένο με μια κάρτα ήχου και έναν μηχανισμό CD-ROM.

## Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά

- Όλα τα παραδείγματα μπορούν να εκτελεστούν άμεσα
- Πολλά και διάφορα αρχεία κυματομορφών
- Ποικιλία προγραμμάτων για κάθε εφαρμογή
- Όλοι οι πηγαίοι κώδικες στο CD-ROM είναι γραμμένοι σε Turbo Pascal
- Αρχεία τύπου batch για τα σύνθετα πειράματα
- Προσομοίωση της συμπεριφοράς σύνθετων συστημάτων
- Δεν απαιτείται υλικό

Το άρθρο αυτό, που θα ολοκληρωθεί σε έξι μέρη, έχει σαν σκοπό να επιτρέψει στους αναγνώστες του Ελέκτορ να κατανοήσουν τις βασικές αρχές πάνω στις οποίες βασίζεται η ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Η επεξήγηση των διαφόρων όρων και εννοιών θα γίνεται μέσω παραδειγμάτων, ενώ από την πλευρά του αναγνώστη το μόνο που απαιτείται είναι η παρουσία ενός υπολογιστή PC μέσω των δυνατοτήτων, εφοδιασμένου με κάρτα ήχου και μηχανισμό CD-ROM.

## Κλιμακούμενα επίπεδα εκμάθησης

Ξεκινώντας την εκπαιδευτική σειρά από το πρώτο επίπεδο, ο αναγνώστης θα πρέπει απλά να διεκπεραιώσει μερικά πειράματα, χωρίς να νοιάζεται ιδιαίτερα για την πλήρη κατανόηση των βασικών αρχών που προσδιορίζουν τα αποτελέσματά τους.

Στο αμέσως επόμενο επίπεδο θα πρέπει να υλοποιήσει μερικά ακόμα, βασισμένος στο λογισμικό που συνοδεύει την εκπαιδευτική σειρά. Μέσα απ' αυτό δίδονται πολλές χρήσιμες υποδείξεις για το πως αυτά θα διεξαχθούν.

Για τους αναγνώστες που θέλουν να διεισδύσουν βαθύτερα στα μυστικά της ψηφιακής επεξεργασίας, έχει προβλεφθεί ένα ακόμα επίπεδο. Το επίπεδο αυτό αφορά την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του λογισμικού σε επίπεδο πηγαίου κώδικα, αξιοποιώντας τις επεξηγήσεις των εντολών που το αποτελούν. Κατανοώντας τον τρόπο που εργάζεται το συγκεκριμένο λογισμικό, θα είναι πολύ εύκολο γι' αυτούς να σχεδιάσουν τις δικές τους εφαρμογές και να διεκπεραιώσουν τα δικά τους πειράματα.

Τέλος, μετά απ' όλα τα παραπάνω, θα είναι σε θέση (αν το θελήσουν) να μεταφέρουν τα πηγαία προγράμματα στον DSP που θέλουν να χρησιμοποιήσουν, τροποποιώντας τα ανάλογα. Εδώ φυσικά θα πρέπει να ομολογήσουμε ότι μια τέτοια ενέργεια δεν είναι πάντα εύκολη, αφού υπάρχουν πάρα πολλά σημεία που πρέπει να προσεχθούν. Η καλή γνώση π.χ. του διαφορικού λογισμού ή εκκίνησης του υλικού είναι μερικά μόνο απ' αυτά που χρειάζονται για την καλή λειτουργία της τελικής κατασκευής. Φυσικά μέσα στο άρθρο δεν γίνεται αναφορά για τα παραπάνω, αφού η γνώση τους δεν έχει άμεση σχέση με το αντικείμενο της σειράς. Στη βιβλιογραφία που θα δημοσιευθεί στην τελευταία συνέχεια, υποδεικνύονται αρκετά βιβλία σχετικά με όλα τα γνωστικά αντικείμενα που είναι συναφή με την ψηφιακή επεξεργασία σήματος.

Οι ενότητες που θα καλυφθούν στην εκπαιδευτική σειρά σημειώνονται στον **πίνακα 3**. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ψηφιακή επεξεργασία σήματος είναι μια τεχνική που χρειάζεται 'δυνατά' μαθηματικά. Εμείς στην προσπάθειά μας να την κάνουμε προσιτή, θα προσπαθήσουμε να αποφύγουμε τη χρήση τους, όπου αυτό είναι δυνατό.

#### Λογισμικό

Όλα τα προγράμματα που σχετίζονται με τη διεξαγωγή των μαθημάτων βρίσκονται μέσα στο CD-ROM που συνοδεύει τη σειρά, με μορφή αρχείων .EXE. Τα προγράμματα αυτά θα επιτρέψουν στον αναγνώστη όχι μόνο να ολοκληρώσει τα διάφορα πειράματα, αλλά να αναλύσει και να παράγει τα δικά του αρχεία δεδομένων.

Τα περιεχόμενα του CD-ROM, που θα διατίθεται από τα γραφεία του περιοδικού μας με τον κωδικό EPS 986004, σημειώνονται στον **πίνακα 4**.

#### Εγκατάσταση

Όλες οι οδηγίες που σχετίζονται με την εγκατάσταση του λογισμικού της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων βρίσκονται μέσα στο ίδιο CD-ROM και συγκεκριμένα στο αρχείο INSTALL.DOC. Στην πράξη όλα τα προγράμματα αντιγράφονται σ' έναν κατάλογο του σκληρού δίσκου, στον οποίο μετά αποθηκεύονται και τα μεγάλοι μήκους αρχεία δειγματοληπτικής πληροφορίας (αρχεία κυματομορφών, wave), που είναι απαραίτητα για την διεξαγωγή των μαθημάτων. Το CD-ROM περιλαμβάνει επίσης και αρκετές ακόμα οδηγίες για το πως μπορούν οι αναγνώστες να εξοικειωθούν ευκολότερα με το λογισμικό της εκπαιδευτικής σειράς.

#### Πηγαίοι κώδικες

Τα περισσότερα προγράμματα είναι γραμμένα σε Turbo Pascal 5.0 και ο πηγαίος κώδι-

### Πίνακας 2. Παράμετροι των αρχείων κυματομορφών

Ρυθμός δειγματοληψίας	44.100, 22.050, 11.025 Hz
Ψηφία ανά δείγμα	16
Μορφή	ασυμπίεστη
Κανάλια	μονο(φωνικό)

### Πίνακας 3. Ενότητες της εκπαιδευτικής σειράς

-Αρχεία κυματομορφών	-δειγματοληπτισμένα σήματα
-θεώρημα δειγματοληψίας	-aliasing
-φθίνουσα δειγματοληψία	-αναδρομικά χαμηλοδιαβατά και ζωνοδιαβατά φίλτρα
-γεννήτριες σημάτων	-ανάλυση φίλτρων διεγερόμενα με μεταβαλλόμενες συχνότητες
-αναλυτής φάσματος	-ανάλυση Fourier διακριτού χρόνου
-γρήγορη ανάλυση Fourier (FFT)	-γεννήτριες ηχούς
-απόκριση συχνότητας φίλτρου και απόκριση φίλτρου σε θηματική συνάρτηση	-φίλτρα πεπερασμένης απόκρισης (FIR)
-σχεδίαση φίλτρων	-ανάλυση φίλτρων με σήματα θορύβου
-σήματα θορύβου	-σύνθεση Fourier
-περιοδικά σήματα	-διαμόρφωση πλάτους και αποδιαμόρφωση
-διαμόρφωση συχνότητας	-επεξεργασία quadrature
-διαμόρφωση φάσης	-διαμόρφωση RDS (Radio Data Services)
-ασύρματη τηλεμοιοτυπία (φαξ)	

κάς τους περιέχεται και αυτός μέσα στο CD-ROM. Έτσι οι αναγνώστες μας μπορούν να τον επαυξήσουν ή να τον τροποποιήσουν. Ο τρόπος λειτουργίας των προγραμμάτων γίνεται τις περισσότερες φορές σαφής με τη βοήθεια των επεξηγήσεων που συνοδεύουν

τις επιμέρους εντολές.

#### Αρχεία πειραμάτων

Πολλά από τα πειράματα, που διεξάγονται με τη βοήθεια του λογισμικού, απαιτούν την εκτέλεση ορισμένων προγραμμάτων με μια

### Πίνακας 4. Προγράμματα του CD-ROM

#### Γεννήτριες σημάτων

SINO	γεννήτρια ημιτονικού σήματος
SINL	γεννήτρια ημιτονικού σήματος
PULSE1	γεννήτρια παλμών
STEP1	γεννήτρια βήματος (παλμικού)
NOISE1	γεννήτρια λευκού θορύβου
FMSWEEP1	γεννήτρια σάρωσης
MUSICG1	γεννήτρια ηχητικών προγραμμάτων

#### Φίλτρα

SINFIL1	απλό ζωνοδιαβατό φίλτρο
BANDP1	απλό ζωνοδιαβατό φίλτρο
BUTTER1	ψηφιακό φίλτρο Butterworth
LP1	απλό χαμηλοδιαβατό φίλτρο
ECHO1	γεννήτρια ηχούς
FIRFIL1	φίλτρο γενικής χρήσης πεπερασμένης απόκρισης (FIR)
SPECFIL1FIR	σύνθεση φίλτρου

#### Διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση, μαθηματικά

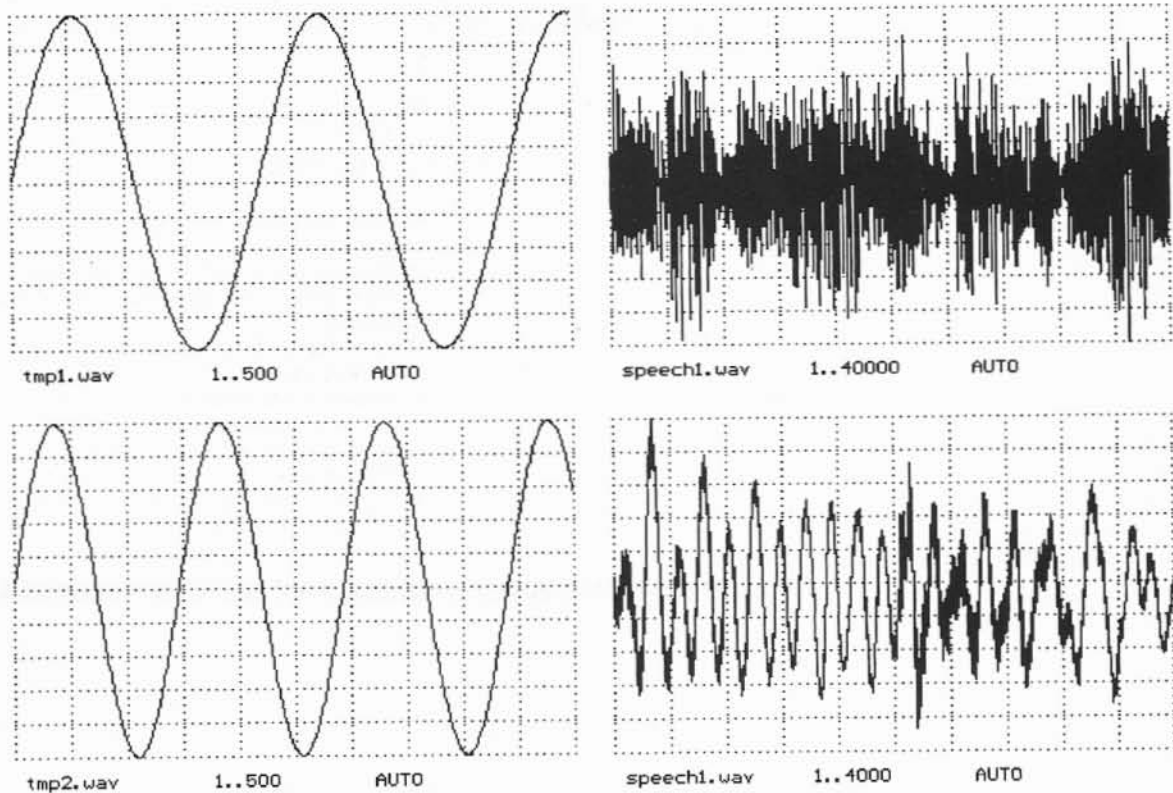
DWNSMPL1	φθίνουσα δειγματοληψία
SUM1	ισοσταθμισμένη άθροιση δύο σημάτων
MUL1	γινόμενο δύο σημάτων (συνάρτηση μίξης, κ.λπ)
AMGEN1	διαμόρφωση πλάτους, σύγχρονη αποδιαμόρφωση, μίξη
FMGEN1	διαμορφωτής συχνότητας
SCHMITT1	συνάρτηση σκανδαλιστή Schmitt
SHORT1	'παράθυρο' σήματος (με'ρος σήματος)
RTTYRX1	αποκωδικοποίηση δεδομένων τηλεμοιοτυπίας (φαξ)

#### Αναλυτές

INFO1	γενική πληροφορία, μέση τιμή, ενέργεια σήματος
SCOPE1	παλμογράφος πολλών καναλιών
SPEC1	αναλυτής φάσματος πολλών καναλιών

#### Διάφορα

SHELP	πρόγραμμα βοήθειας για τα προγράμματα που είναι γραμμένα σε PASCAL
SPP	προεπεξεργαστής για τα αρχεία πειραμάτων



**Σχ. 1. Οι αναπαραγόμενες κυματομορφές απεικονίζονται όπως ακριβώς θα απεικονίζονταν στην οθόνη ενός παλμογράφου.**

συγκεκριμένη σειρά. Θα θελήσετε π.χ. σίγουρα να δημιουργήσετε ένα σήμα, που στη συνέχεια θα πρέπει να το τροποποιήσετε (με τη βοήθεια φίλτρων) και να το απεικονίσετε. Είναι επίσης πιθανό να χρειασθεί να μελετήσετε τη μορφή και την απόκριση ενός σήματος SSB με τη βοήθεια του αρχείου SSB RECEIVERS. Θεωρήσαμε λοιπόν συνηθισμένο να χρειάζεστε για ένα απλό πείραμα περισσότερα από ένα προγράμματα και γι' αυτό σχεδιάσαμε ένα ακόμα που σαν μοναδική του εργασία θα έχει να τα καλεί το ένα μετά το άλλο. Το πρόγραμμα αυτό το ονομάσαμε Προεπεξεργαστή (Preprocessor).

### Ο προεπεξεργαστής SPP

Ο προεπεξεργαστής SPP επιτρέπει την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών που αφορούν ένα πείραμα, ενσωματώνοντάς τις σ' ένα μοναδικό αρχείο. Στην πράξη το πρόγραμμα αυτό δεν κάνει τίποτα περισσότερο από το να διασυνδέει μεταξύ τους όλα εκείνα τα αρχεία που είναι απαραίτητα για τη διεξαγωγή του πειράματος. Η διασύνδεσή τους γίνεται με τη βοήθεια ενός συνόλου εντολών.

Αν π.χ. θελήσετε να εκτελέσετε το πείραμα που περιγράφεται στο αρχείο TEST3.SPP, το μόνο που έχετε να κάνετε είναι να πληκτρολογήσετε DO TEST3.SPP και να πιέσετε αμέσως μετά το πλήκτρο <return>. Δοκιμάστε να

το κάνετε μόλις φθάσει στα χέρια σας το CD-ROM της σειράς. Προς το παρόν σας λέμε ότι τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αρχείου φαίνονται στο **σχ. 1**. Όλα τα προγράμματα εξομοίωσης εκκινούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

### Το πρόγραμμα βοήθειας SHELP

Αν για κάποιο λόγο ξεχάσετε τις βασικές παραμέτρους εισόδου των διαφόρων προγραμμάτων, σίγουρα δεν πρέπει να ανησυχήσετε. Αρκεί να πληκτρολογήσετε SHELP, το όνομα του προγράμματος για το οποίο θέλετε να πάρετε οδηγίες και να πιέσετε στη συνέχεια <return>.

### ‘Πρώτες ύλες’ για τα πειράματά σας...

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων θα χρειασθείτε σίγουρα κάποια αποθηκευμένα σήματα τα οποία θα επεξεργασθείτε αμέσως μετά. Τα σήματα αυτά, όπως ήδη θα καταλάβατε, βρίσκονται στο CD-ROM που σχεδιάστηκε ειδικά για τις ανάγκες αυτής της σειράς. Φυσικά θα μπορείτε ανά πάσα στιγμή να ηχογραφείτε τα δικά σας ακουστικά σήματα, τα οποία όπως και τα προηγούμενα θα πρέπει να αποθηκεύονται σε μορφή αρχείων κυματομορφών (αρχεία .wav τόσο στο DOS όσο και στα Windows). Στην παρούσα σειρά μαθημάτων τα δείγματα των σημάτων εισόδου μαζί μ' αυτά της εξόδου θα δίδονται σε μια συγκεκριμένη μορφή. Οι παράμετροι, οι οποίοι προσδιορίζουν τους τρόπους που είναι αποθηκευμένο ένα σήμα σ' ένα αρχείο

κυματομορφής, σημειώνονται στην επικεφαλίδα του αρχείου. Το ποιες είναι αυτές, όπως επίσης και τι τιμές μπορούν να έχουν, φαίνονται στον **πίνακα 2**.

### Αναπαραγωγή ήχου

Όσοι από τους αναγνώστες μας προτιμούν κυριολεκτικά να ακούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους αντί να τα βλέπουν με μορφή καμπυλών στην οθόνη του υπολογιστή τους, μπορούν να το κάνουν χωρίς κανένα πρόβλημα. Αρκεί να διαθέτουν την κατάλληλη κάρτα ήχου και φυσικά το λογισμικό που συνήθως τη συνοδεύει (ή βρίσκεται εύκολα στο Δίκτυο), για να αναπαράγουν τα αρχεία κυματομορφών που αναδεικνύονται από τα προγράμματα ψηφιακής επεξεργασίας. Στην περίπτωση που έχετε να διαλέξετε μεταξύ λογισμικού κάρτας ήχου που ‘τρέχει’ σε DOS ή σε Windows, προτιμήστε το πρώτο. Αν τελικά αποφασίσετε πως θέλετε να ενεργοποιήσετε αυτήν την λειτουργία, δοκιμάστε να ακούσετε το αρχείο SPEECH1.WAV που βρίσκεται μέσα στο CD-ROM. Θα ακούσετε ομίλια μαζί με μουσική.

### Εγγραφή ήχου

Και εδώ όσοι από τους αναγνώστες μας θέλουν να εγγράψουν δικά τους ηχητικά σήματα, δεν θα μείνουν απογοητευμένοι. Αρκεί να χρησιμοποιήσουν πάλι την κάρτα ήχου, το σχετικό λογισμικό και φυσικά ένα μικρόφωνο. Αν και η εγγραφή ήχων δεν είναι διόλου απαραίτητη (αρκούν τα αρχεία κυματομορφών που έχουν αποθηκευτεί στο CD-ROM), θα μπορούσαμε να το προτείνουμε, αφού έτσι

γίνεται δυνατή η εξοικείωση με τη χρήση των αρχείων αυτών. Γίνεται επίσης δυνατή η επίλυση αρκετών προβλημάτων της σειράς που έχουν σχέση με μέτρηση στάθμης ήχων. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται φυσικά στον ορισμό των παραμέτρων που περιγράφουν τα αρχεία αυτά. Οι παράμετροι θα πρέπει να είναι κατάλληλα ορισμένες, ώστε τα αρχεία να γίνονται αντιληπτά από το λογισμικό της εκπαιδευτικής σειράς.

## Το πρώτο πείραμα

Ένα από τα πολλά προγράμματα του CD-ROM είναι το SIN1.EXE, το οποίο μόλις εκτελεσθεί παράγει κυματομορφής που αντιστοιχεί σ' ένα ημιτονικό σήμα. Πληκτρολογήστε λοιπόν SIN1 και πιάστε <return>. Αν δεν δώσετε καμία παράμετρο και ακούσετε το αρχείο που θα παραχθεί, θα διαπιστώσετε ότι αντιπροσωπεύει έναν ημιτονικό ήχο συχνότητας 1000 Hz με διάρκεια 2 sec. Το (σχετικό) πλάτος του είναι ίσο με 10.000. Φυσικά το αρχείο αυτό μπορείτε να το ακούσετε και να το χρησιμοποιήσετε όσες φορές θέλετε στα πειράματα που θα ακολουθήσουν.

Οι παράμετροι του προγράμματος SIN1 επιτρέπουν την παραγωγή οποιουδήποτε σχεδόν ημιτονικού σήματος. Αν για παράδειγμα

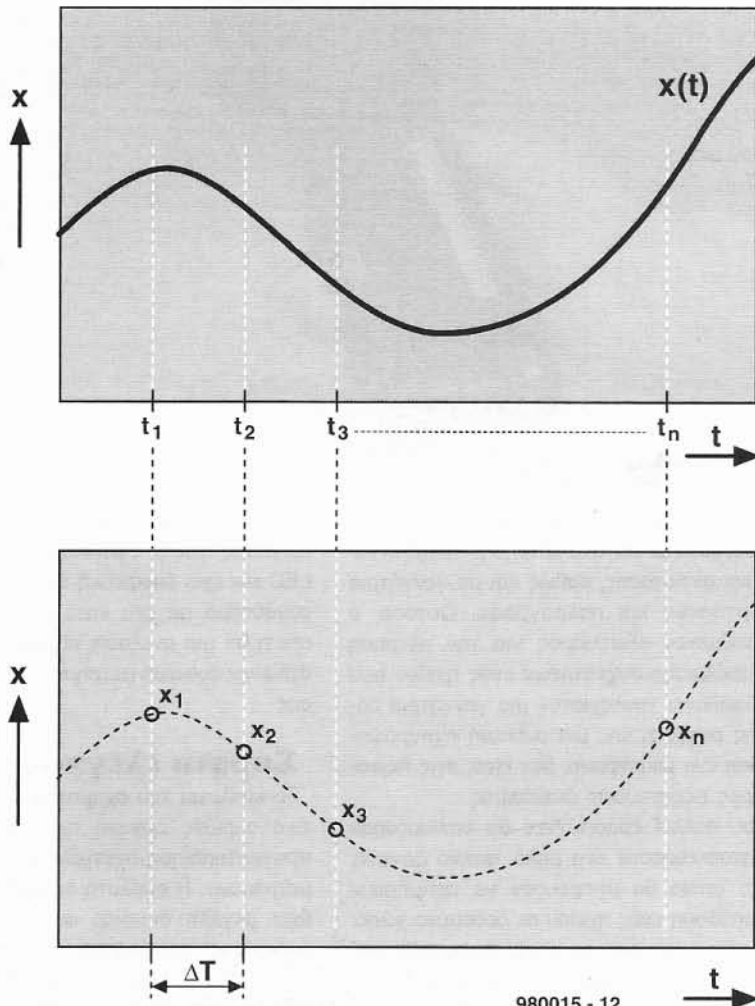
μα θελήσετε να παράγετε ένα αρχείο κυματομορφής με συχνότητα 500 Hz, πλάτους ίσο με 5.000, που θα περιλαμβάνει 100.000 δείγματα και θα έχει συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 11.025 Hz, αρκεί να πληκτρολογήσετε SIN1 \scale=5000 \f0=500 \n=100000 \fs=11025 \out=sin2.wav και να πιάσετε <return>. Θα διαπιστώσετε τότε ότι το αρχείο SIN2.WAV περιέχει ότι ακριβώς ζητήσατε.

Προτείνουμε στους αναγνώστες μας να δημιουργήσουν αρκετά αρχεία αυτού του είδους δίδοντας κάθε φορά διαφορετικές παραμέτρους. Η λειτουργία του συγκεκριμένου προγράμματος θα εξηγηθεί αργότερα.

## Και λίγη θεωρία

Η ψηφιακή επεξεργασία σημάτων βασίζεται στο θεώρημα του Shannon (1949), το οποίο προσδιορίζει το πόσο συχνά θα πρέπει να δειγματοληπτούμε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα, αν θέλουμε να το αναπαράγουμε μετά αξιοποιώντας τα δείγματα που έχουμε καταγράψει. Το θεώρημα αυτό έχει προέλθει από το θεώρημα του Nyquist (1928) το οποίο δια-

Σχ. 2. Δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος.



τείνεται ότι για τον σαφή προσδιορισμό ενός σήματος περιορισμένου εύρους συχνοτήτων αρκεί να ληφθούν δύο μόνο δείγματα στο χρονικό διάστημα μιας περιόδου του. Με άλλα λόγια ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος.

Στη συνέχεια θα μιλήσουμε λίγο για τους μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (Analog to Digital Converters, ADC). Μπορούμε ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους να τους χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες: σ' αυτούς που μετατρέπουν 'ακαριαία' την αναλογική τάση χρησιμοποιώντας πολλούς συγκριτές (flash ADC), σ' αυτούς που βασίζονται σ' έναν μετατροπέα Ψηφιακού σήματος σε Αναλογικό (DAC) για να παράγουν προσεγγιστικά μια τάση ίση με τη μετρούμενη (Successive Approximation ADC) και τέλος σ' αυτούς που μετατρέπουν τη μετρούμενη τάση σε ένα αντίστοιχο χρονικό διάστημα που στη συνέχεια καταμετρούν (Integrating ADC).

Τα σύμβολα που θα χρησιμοποιήσουμε στη σειρά των μαθημάτων που θα ακολουθήσουν είναι απλά και εύκολα στην κατανόησή τους. Με  $x$  θα συμβολίζουμε ένα μεταβαλλόμενο σήμα που μπορεί να έχει μια οποιαδήποτε τιμή τη χρονική στιγμή  $t$ . Η συνάρτηση που περιγράφει τη συμπεριφορά του σήματος  $x$  καθώς περνάει ο χρόνος  $t$  συμβολίζεται με  $x(t)$  (βλέπε σχ. 2). Για να μπορέσουμε να επεξεργασθούμε το σήμα αυτό είναι σκόπιμο να το δειγματοληπτούμε σε ορισμένες χρονικές στιγμές. Η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων είναι τις περισσότερες φορές σταθερή. Ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται κάθε δευτερόλεπτο ορίζει τη συχνότητα ή τον ρυθμό δειγματοληψίας του σήματος.

Τη χρονική στιγμή  $t_n$  το σήμα έχει τιμή  $x(t_n)$ , που από εδώ και πέρα θα αναφέρεται σαν  $x_n$ . Το σήμα επομένως μπορεί πλέον να περιγράφεται σαν ένα σύνολο από αριθμούς, με τον ίδιο δηλαδή τρόπο που καταγράφεται η θερμοκρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς. Αν και η θερμοκρασία μεταβάλλεται, συνήθως με αργούς ρυθμούς, αυτό που θεωρείται σαν θερμοκρασία της ημέρας είναι ο μέσος όρος των επιμέρους μετρηθέντων θερμοκρασιών.

Τον επόμενο μήνα θα αναφερθούμε στα αποτελέσματα της δειγματοληψίας, ενώ θα κάνουμε και την πρώτη γνωριμία μας με τα ψηφιακά φίλτρα.

# Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων

## Δειγματοληψία και ψηφιακά φίλτρα Μέρος 2<sup>ο</sup>

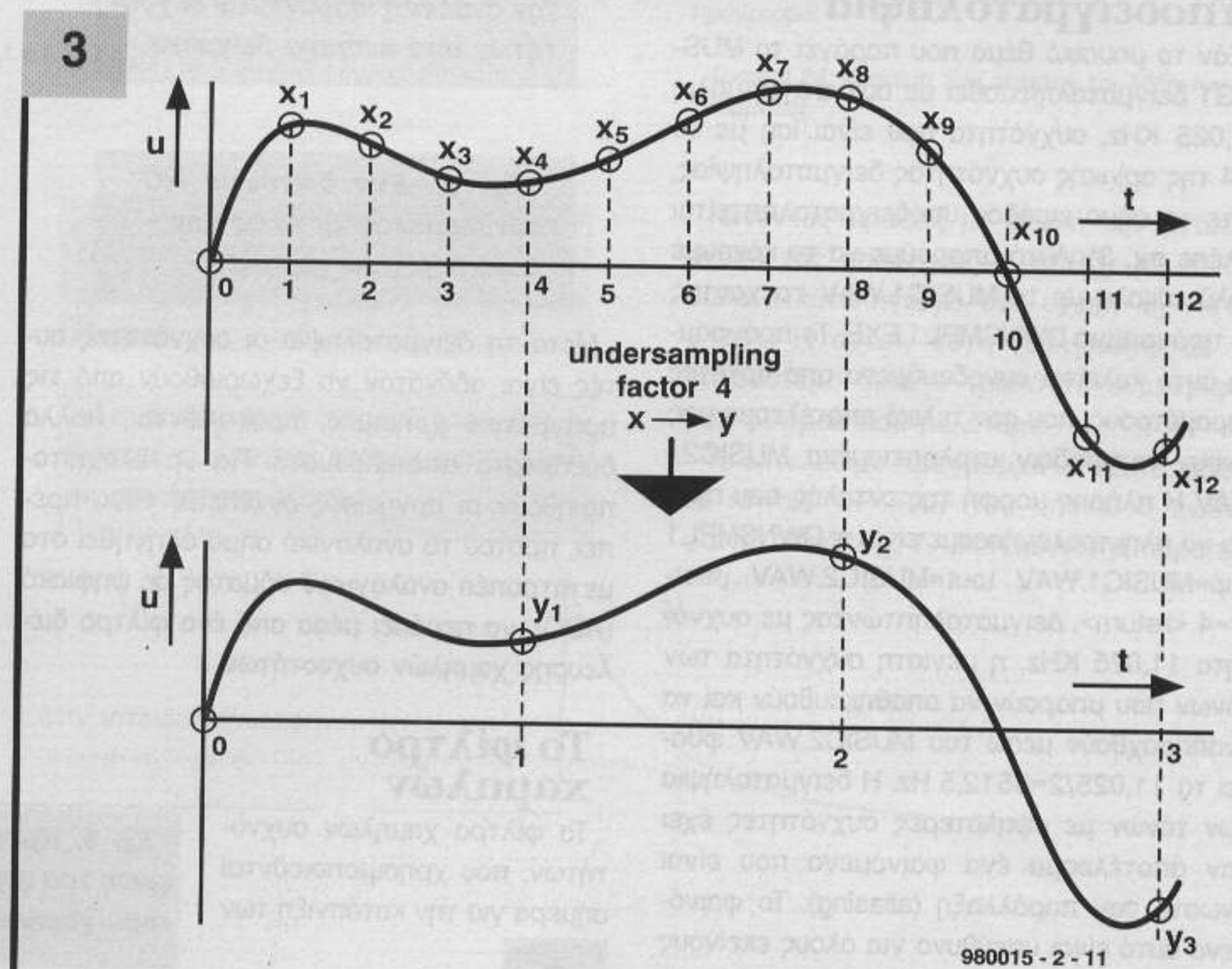
Μετά τη σύντομη εισαγωγή στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων που δημοσιεύσαμε στο προηγούμενο τεύχος, αφιερώνουμε το σημερινό άρθρο στα αποτελέσματα της δειγματοληψίας, επιχειρώντας ταυτόχρονα μια πρώτη γνωριμία με τα ψηφιακά φίλτρα.

Το θεώρημα του Shannon (1949) προβλέπει ότι για την πλήρη ανασκευή ενός ψηφιοποιημένου αναλογικού σήματος αρκούν δύο μόνο δείγματα για κάθε μια περίοδό του. Αυτό με απλά λόγια σημαίνει ότι η συχνότητα δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι διπλάσια της υψηλότερης συχνότητας. Στην πράξη, οι συχνότητες δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται σήμερα υπερβαίνουν αυτό το όριο, αφού μπορεί να είναι έως και πενταπλάσιες της υψηλότερης συχνότητας του σήματος.

Όπως θα φανεί στη συνέχεια, το θεώρημα αυτό παύει να ισχύει όταν η υψηλότερη φασματική συνιστώσα αποκτήσει τιμή μεγαλύτερη του ημίσεως της συχνότητας δειγματοληψίας.

### Ένα μουσικό θέμα

Τρέχοντας το MUSICG1 <return>, θα ακούσετε από τα ηχεία του υπολογιστή σας ένα ιδιόρρυθμο μουσικό θέμα αποτελούμενο από 60 καθαρούς τόνους, που ξεχωρίζουν μεταξύ τους με τη βοήθεια ημιτονίων. Η συχνότητα του χαμηλότερου τόνου είναι 40 Hz, ενώ του



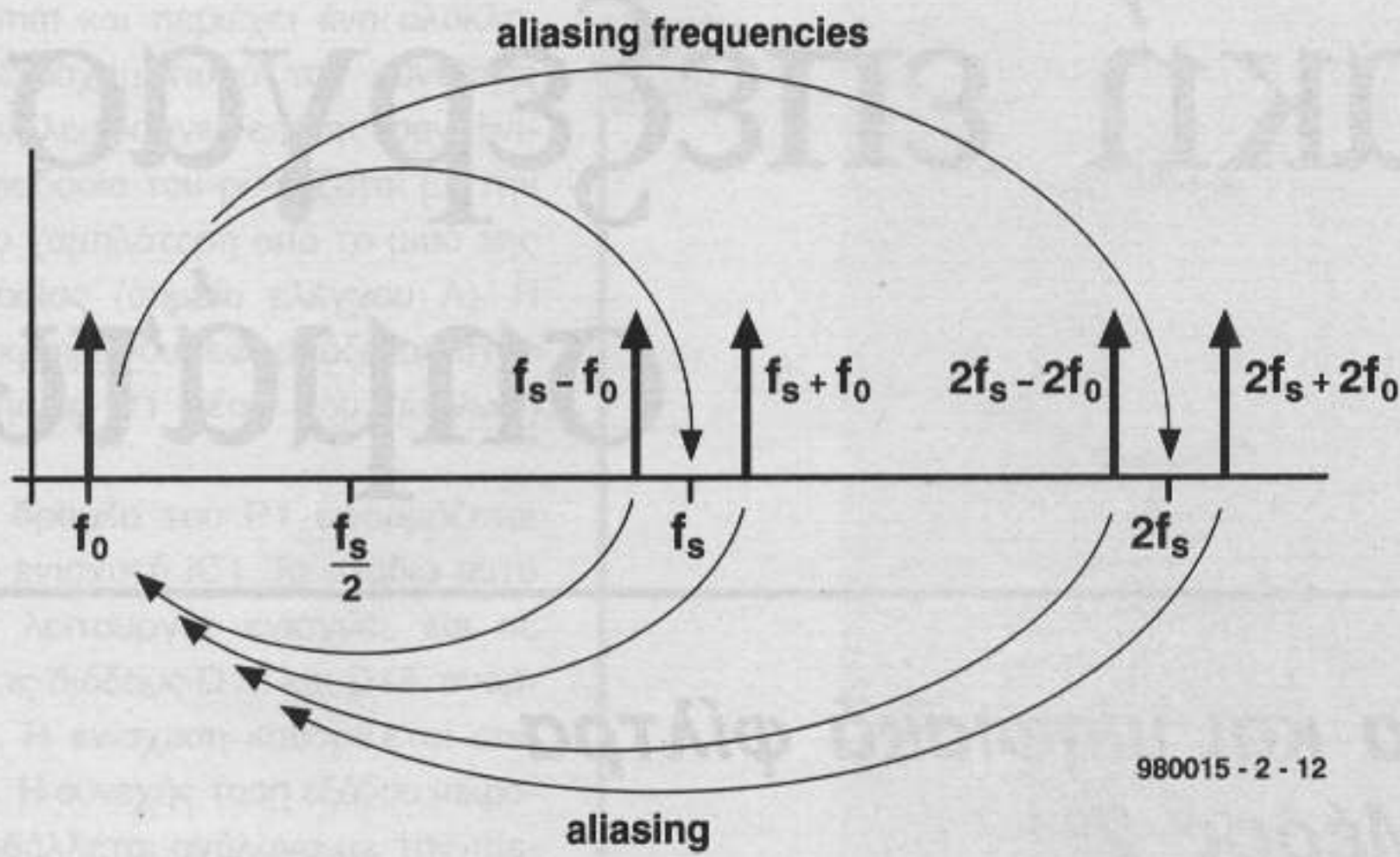
υψηλότερου 14 KHz, καλύπτοντας έτσι μια φασματική περιοχή μεγα-

**Σχ. 3. Όταν υποδειγματοληφτείται ένα σήμα, λαμβάνεται ένα μόνο δείγμα για κάθε  $x$  δείγματα του αρχικού.**

λύτερη από 5 οκτάβες. Οι τόνοι αυτοί δειγματοληφτούνται με συχνότητα 44,1 KHz και αποθηκεύονται στο MUSIC1.WAV. Ακούγοντάς το θα διαπιστώσετε πως η αναπαραγωγή είναι άψογη, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού πληρούνται οι προϋποθέσεις του θεωρήμα-

### Παράλλαξη

Τα αποτελέσματα του φαινομένου της παράλλαξης μπορούν να συγκριθούν μ' εκείνα που έχουμε επανειλημμένως παρατηρήσει στις κινηματογραφικές ταινίες, όπου ένας τροχός με ακτίνες φαίνεται να περιστρέφεται βραδύτερα ή ακόμα και αντίθετα από τη φορά που θα έπρεπε να κινείται. Αυτό οφείλεται στο ότι, αν στο  $n$  καρέ της κινηματογραφικής ταινίας έχει καταγραφεί μια ακτίνα σε μια ορισμένη θέση, στο  $n+1$  καρέ στη θέση αυτή θα έχει έρθει μια γειτονική της. Κάτι τέτοιο θα έχει σαν αποτέλεσμα να φαίνεται ο τροχός ακίνητος ή να στρέφεται με ελαφρά βραδύτερο ρυθμό προς τα εμπρός ή και προς τα πίσω, ανάλογα με το αν η ακτίνα του τροχού που καταγράφεται στο  $n+1$  καρέ βρίσκεται λίγο πιο πριν ή λίγο πιο μετά από αυτήν που καταγράφηκε στο αμέσως προηγούμενο.



980015 - 2 - 12

τος του Shannon.

## Υποδειγματοληψία

Εάν το μουσικό θέμα που παράγει το MUSIC1 δειγματοληπτισθεί με συχνότητα μόλις 11,025 KHz, συχνότητα που είναι ίση με το 1/4 της αρχικής συχνότητας δειγματοληψίας, τότε το σήμα εισόδου υποδειγματοληπτείται (βλέπε σχ. 3). Αυτό μπορούμε να το κάνουμε πολύ εύκολα με το MUSIC1.WAV τρέχοντας το πρόγραμμα DWNSMPL1.EXE. Το πρόγραμμα αυτό καλείται συνοδευόμενο από αρκετές παραμέτρους, που σαν τελικό αποτέλεσμα μας δίνουν το υποδειγματοληπτισμένο MUSIC2.WAV. Η πλήρης μορφή της εντολής που πρέπει να πληκτρολογήσουμε είναι η: DWNSMPL1 \inp=MUSIC1.WAV \out=MUSIC2.WAV \factor=4 <return>. Δειγματοληπτώντας με συχνότητα 11,025 KHz, η μέγιστη συχνότητα των τόνων που μπορούν να αποθηκευθούν και να αναπαραχθούν μέσω του MUSIC2.WAV φθάνει τα  $11,025/2=5512,5$  Hz. Η δειγματοληψία των τόνων με υψηλότερες συχνότητες έχει σαν αποτέλεσμα ένα φαινόμενο που είναι γνωστό σαν παράλλαξη (aliasing). Το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για όλους εκείνους τους τόνους που θα αναδειχθούν κατά την αναπαραγωγή χωρίς να έχουν καμία απολύτως σχέση με τους αρχικούς.

## Συχνότητες παράλλαξης

Αντίθετα απ' ό τι θα νόμιζε κανείς, οι συχνότητες παράλλαξης δεν έχουν τυχαία τιμή. Μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια, αν γνωρίζουμε τις τιμές των συχνοτήτων των σημάτων που συμμετέχουν στην όλη διαδικασία. Εάν π.χ. δειγματοληπτίσουμε ένα σήμα συχνότητας  $f_0 < f_s/2$ , όπου  $f_s$  η συχνότητα δειγματοληψίας, οι τιμές των δειγμάτων που θα προκύψουν θα είναι σαφώς ορισμένες. Το ίδιο συγκεκριμένες θα είναι και αυτές που θα πάρουμε αν τα σήματα που θα υποβληθούν στη διαδικασία της δειγματοληψίας έχουν τιμές ίσες με  $m(f_s - f_0)$  ή  $m(f_s + f_0)$  όπου  $m=1, 2, 3, \dots$  (βλέπε σχ. 4).

Σχ. 4. Το φαινόμενο της παράλλαξης έχει σαν αποτέλεσμα την ανάδειξη ισοδύναμων συχνοτήτων από ανόμοια δείγματα.

Σχ. 5. Ένα δικτύωμα RC συνδεσμοποιημένο σαν αναλογικό φίλτρο χαμηλών.

Μετά τη δειγματοληψία οι συχνότητες αυτές είναι αδύνατον να ξεχωρισθούν από τις πραγματικά χρήσιμες, προκαλώντας πολλά δυσάρεστα αποτελέσματα. Για να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές συνέπειές τους πρέπει, προτού το αναλογικό σήμα οδηγηθεί στο μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), να περάσει μέσα από ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.

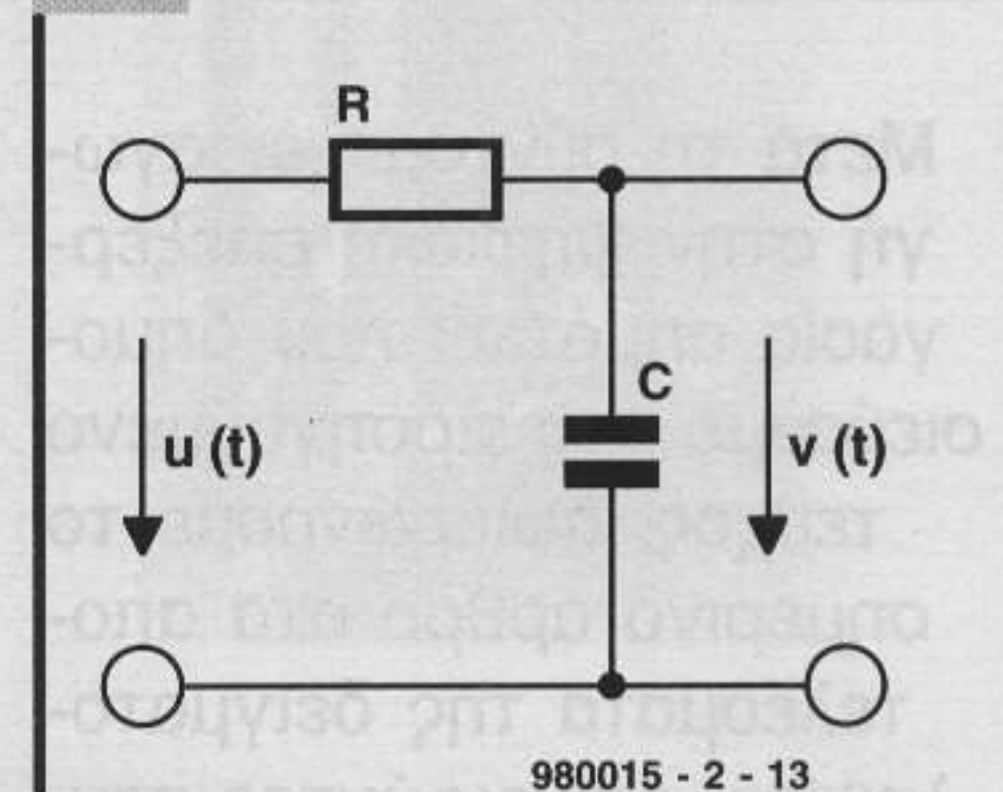
## Το φίλτρο χαμηλών

Τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων, που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατάπνιξη των

κτήσουμε μια συγκεκριμένη καμπύλη απόκρισης στο πεδίο των συχνοτήτων, θα πρέπει να βρούμε την ισοδύναμή της στο πεδίο του χρόνου. Ας δούμε όμως πρώτα τι συμβαίνει μ' ένα αναλογικό φίλτρο (βλέπε σχ. 5 και σχ. 6).

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών δειγματοληψιών ( $\Delta T = t_{k+1} - t_k$ ), η μεταβολή της τάσης εισόδου  $u$  μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η παραδοχή αυτή μας επιτρέπει να υποθέσουμε ότι η τάση εισόδου είναι ίση με  $u_k$ . Το ίδιο αμελητέα μπορεί να θεωρηθεί και η μεταβολή της τάσης εξόδου, η οποία μένει σταθερή στην τιμή  $v_k$ . Κάτω από αυτές τις συν-

5

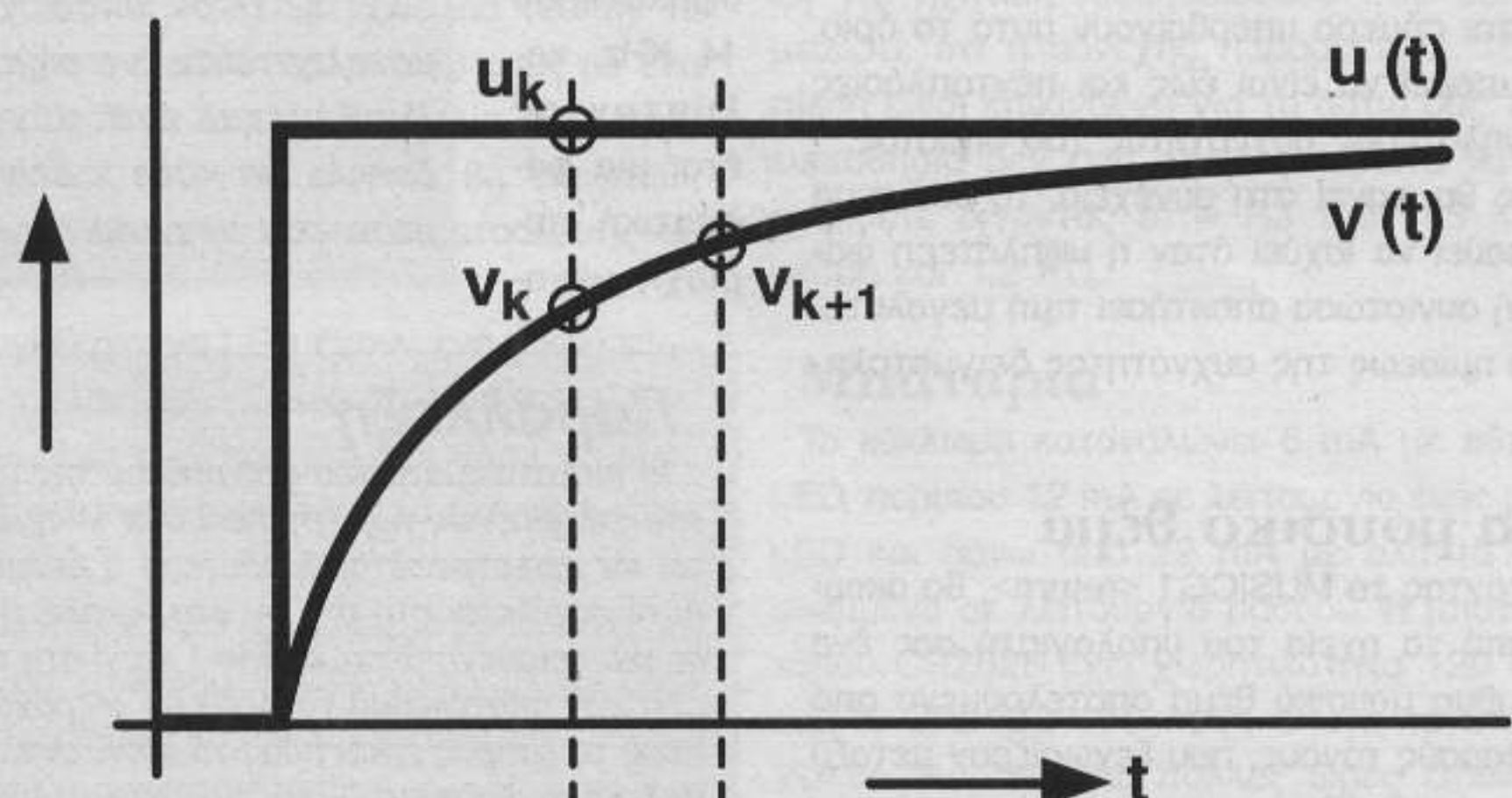


980015 - 2 - 13

συχνοτήτων παράλλαξης, είναι ψηφιακού τύπου. Η συμπεριφορά αλλά και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους είναι τελείως διαφορετικές από εκείνες των συνηθισμένων αναλογικών. Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στο ότι τα αναλογικά φίλτρα επεξεργάζονται τα σήματα εισόδου στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ τα ψηφιακά τα επεξεργάζονται στο πεδίο του χρόνου. Έτσι αν θέλουμε, χρησιμοποιώντας ψηφιακά φίλτρα, να απο-

Σχ. 6. Κρουστική απόκριση του ψηφιακού φίλτρου χαμηλών.

6



980015 - 2 - 14

```

01 program lp1 ;
02 uses dos,crt,graph ;
003
004 {$I SIGLIB.PAS }
005
006 var k:int ;
007     y,scale,r:float ;
008
009 begin
010 start('simple lowpass') ;
011 scale:=1.0           ; set par real('\scale=',scale) ;
012 r:=0.95             ; set par real('\r=',r) ;
013 inp fn:='pulsel.wav' ; set par string('\inp=',inp fn) ;
014 out fn:='tmp.wav'    ; set par string('\out=',out fn) ;
015
016 open inp(inp fn) ;
017 open out(out fn) ;
018
019 y:=0 ;
020 for k:=1 to nsamples do
021 begin
022 output(scale*y) ;
023 y:=r*y+(1-r)*input ;
024 if (k mod 2000)=0 then write('.') ;
025 end ;
026 stop ;
026 end.

```

θήκες, μέσα από την αντίσταση R θα διέρχεται ένα σχεδόν σταθερό ρεύμα ίσο με  $i=(u_k - v_k)/R$ . Αν τη στιγμή της έναρξης του χρονικού διαστήματος η τάση εξόδου στα άκρα του πυκνωτή είναι  $v_k$ , αυτή θα αυξηθεί ελάχιστα λόγω του ρεύματος  $i$ , φθάνοντας στο τέλος του χρονικού διαστήματος την τιμή  $v_{k+1}=v_k+i\Delta t/C = v_k+(v_k-u_k)\Delta t/RC$ .

**Σχ. 7. Το πρόγραμμα που υπολογίζει την απόκριση του ψηφιακού φίλτρου χαμηλών γραμμένο σε γλώσσα Pascal.**

**Σχ. 8. Απόκριση του φίλτρου χαμηλών σε κρουστική (πάνω) και βηματική συνάρτηση (κάτω).**

Γραμμές 1-5: Η αρχή του προγράμματος. Καθορίζεται η βιβλιοθήκη SIGLIB.PAS που θα χρησιμοποιηθεί αμέσως μετά.

Γραμμές 6-7: Ορίζεται η μορφή των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται κατά την αρχικοποίηση της SIGLIB.PAS.

Γραμμές 11-14: Αποδίδονται τιμές στις παραμέτρους του προγράμματος. Οι τιμές αυτές μπορούν να επικαλυφθούν από αυτές που ενδεχομένως δίδονται με την κλήση του προγράμματος.

Γραμμές 16-17: Ορίζει τα αρχεία κυματομορφών (πηγαίο και προορισμού).

Γραμμή 19: Ορίζει την αρχική τιμή της εξόδου του φίλτρου. Οι γραμμές 20 έως 25 σχηματίζουν τον βασικό βρόγχο του προγράμματος.

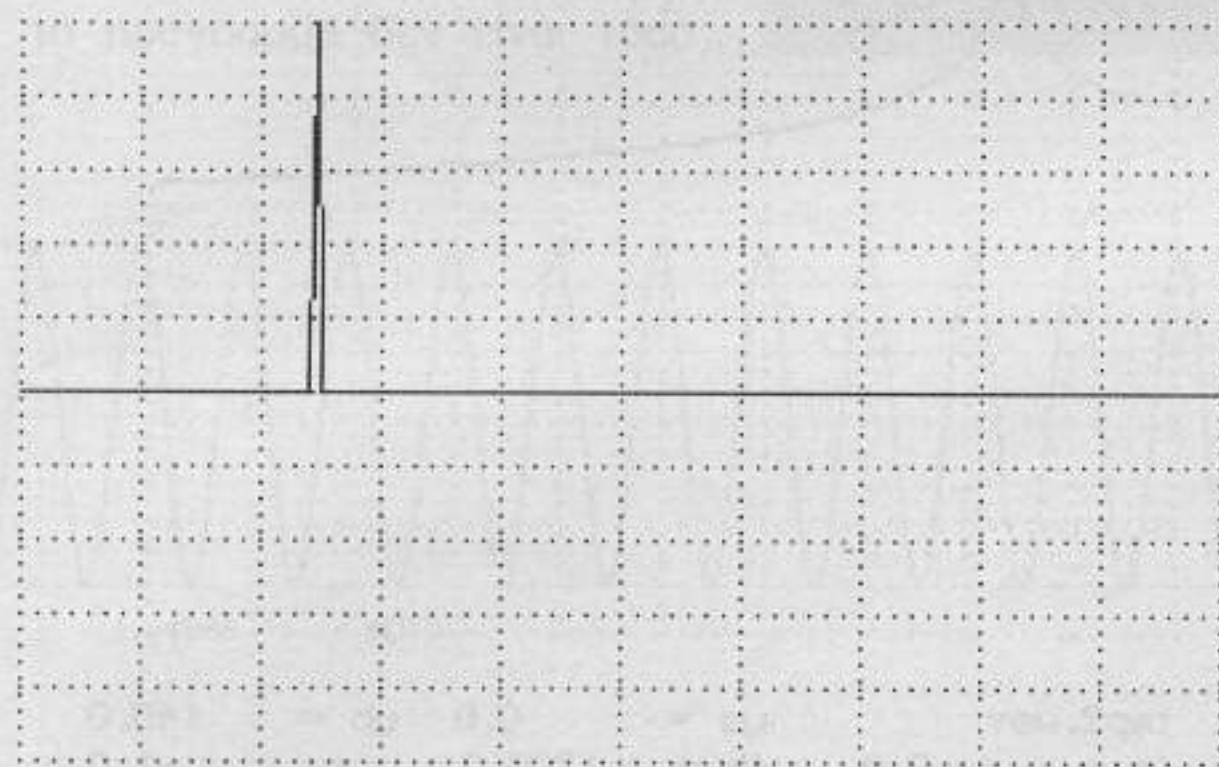
Γραμμή 22: Η υπολογισμένη απόκριση του φίλτρου εγγράφεται στο αρχείο προορισμού.

Γραμμή 23: Ο βασικός αλγόριθμος που εκτελεί το πρόγραμμα.

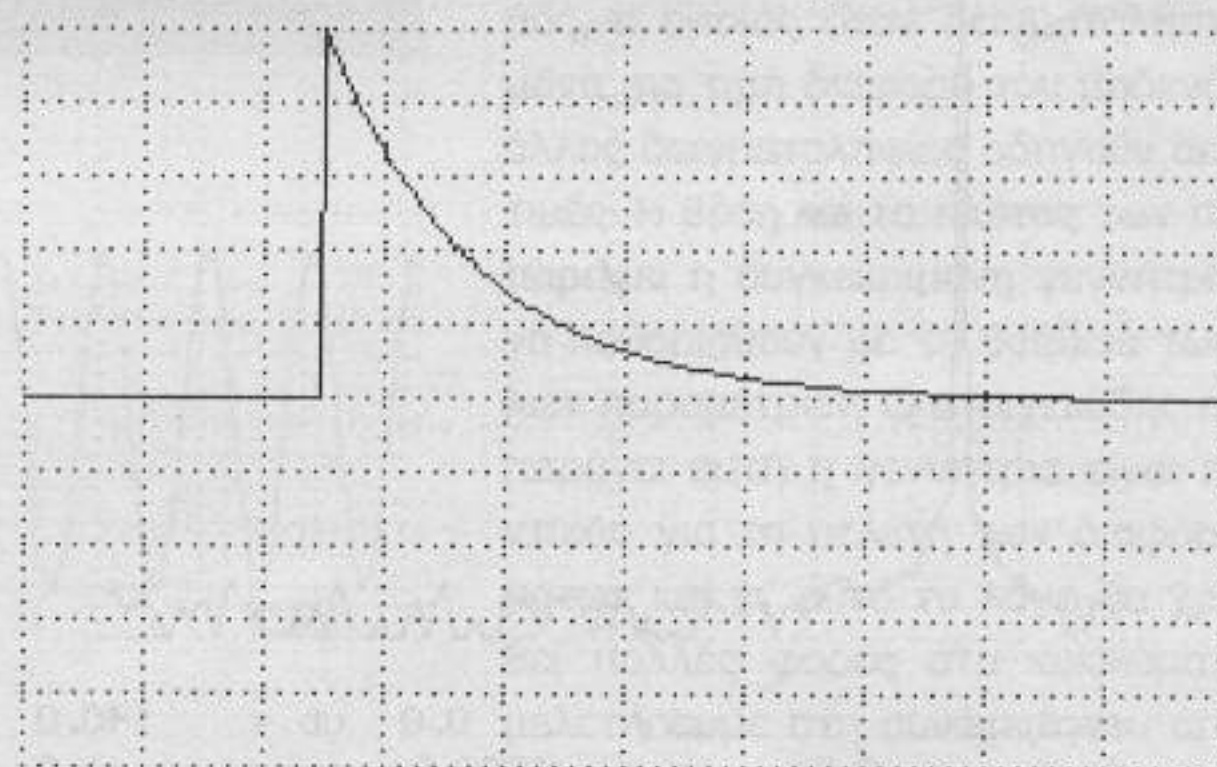
Γραμμή 26: Κλείσιμο των αρχείων και λήξη του προγράμματος.

Κάνοντας πράξεις με σκοπό την αντικατάσταση της ποσότητας  $1-(\Delta t/RC)$  με το σύμβολο  $r$ , καταλήγουμε στη σχέση  $v_k = rv_k + u_k(1-r)$ . Η σχέση αυτή περιγράφει με τον απλούστερο δυνατό τρόπο τη συμπεριφορά του φίλτρου που μελετάμε.

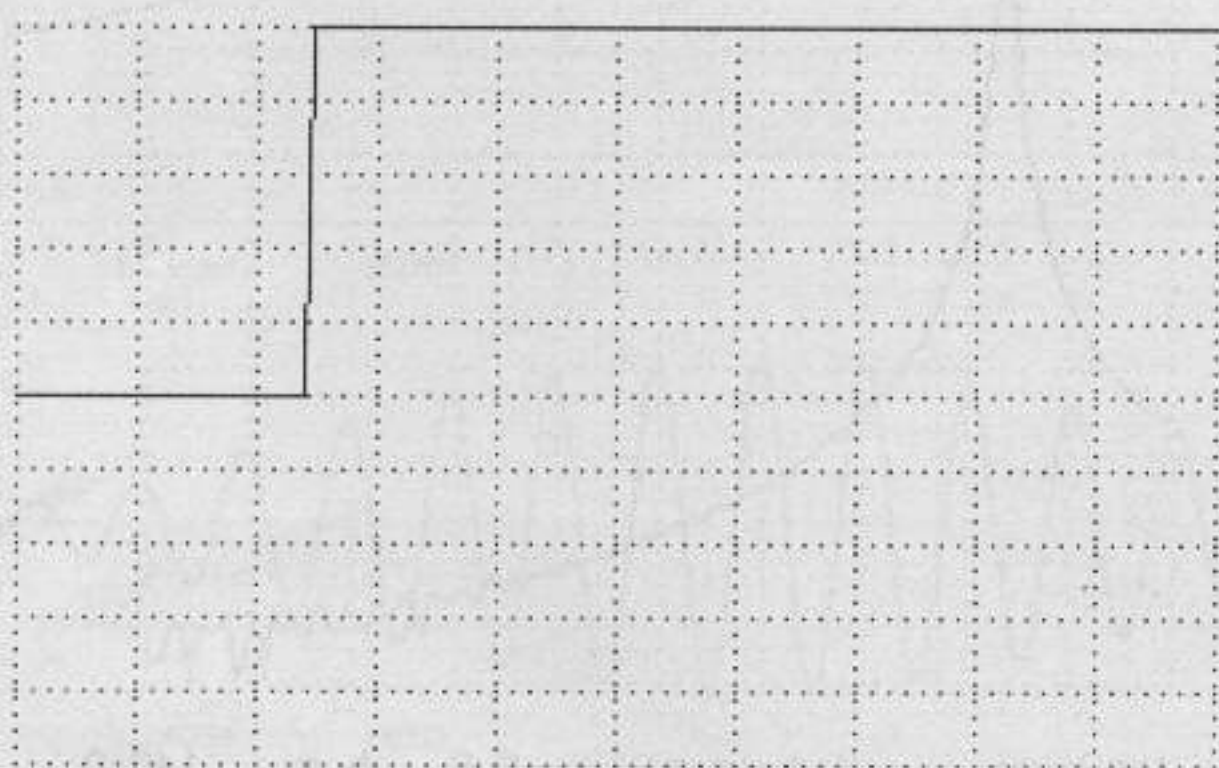
Το εκτελέσιμο πρόγραμμα LP1.EXE, μαζί με το πηγαίο LP1.PAS του οποίου ο κώδικας φαίνεται στο **σχ. 7**, υλοποιούν την παραπάνω



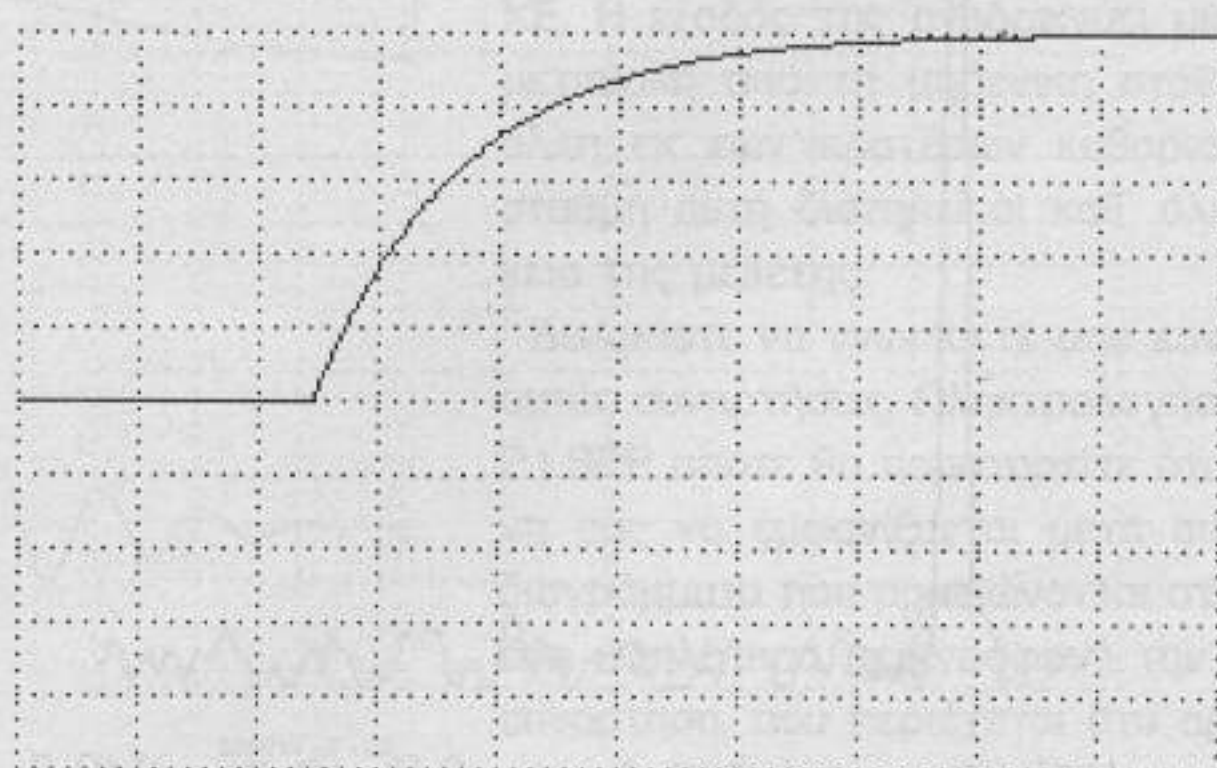
pulsel.wav 1..200 AUTO



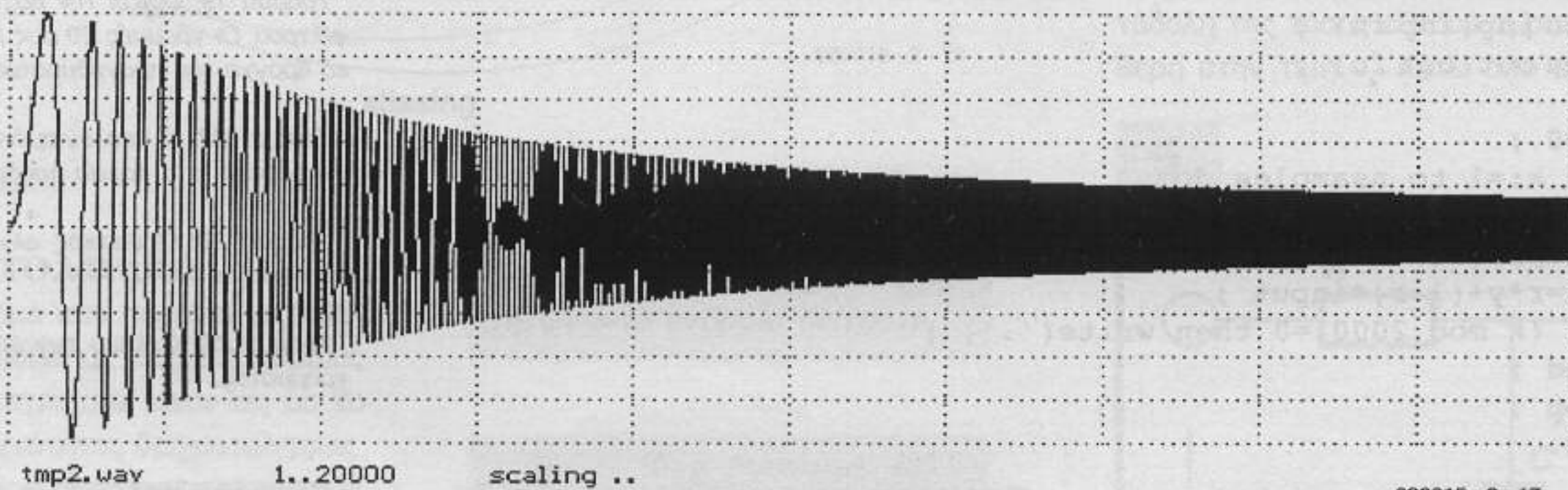
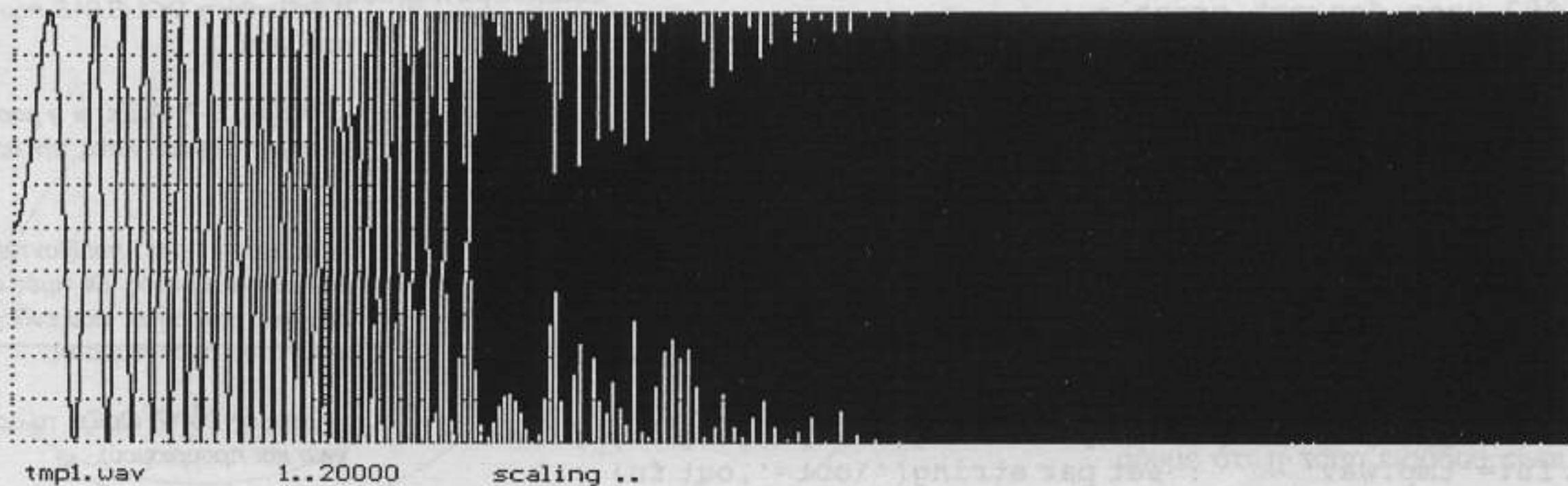
tmp1.wav 1..200 AUTO



step1.wav 1..200 AUTO



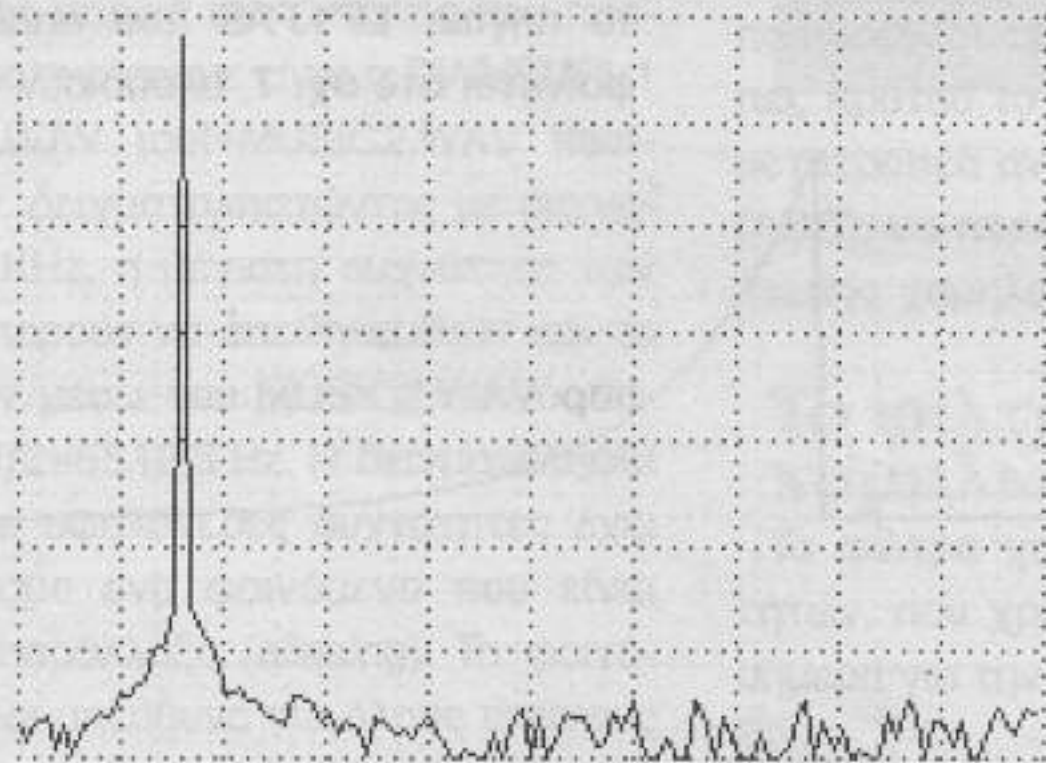
tmp.wav 1..200 AUTO



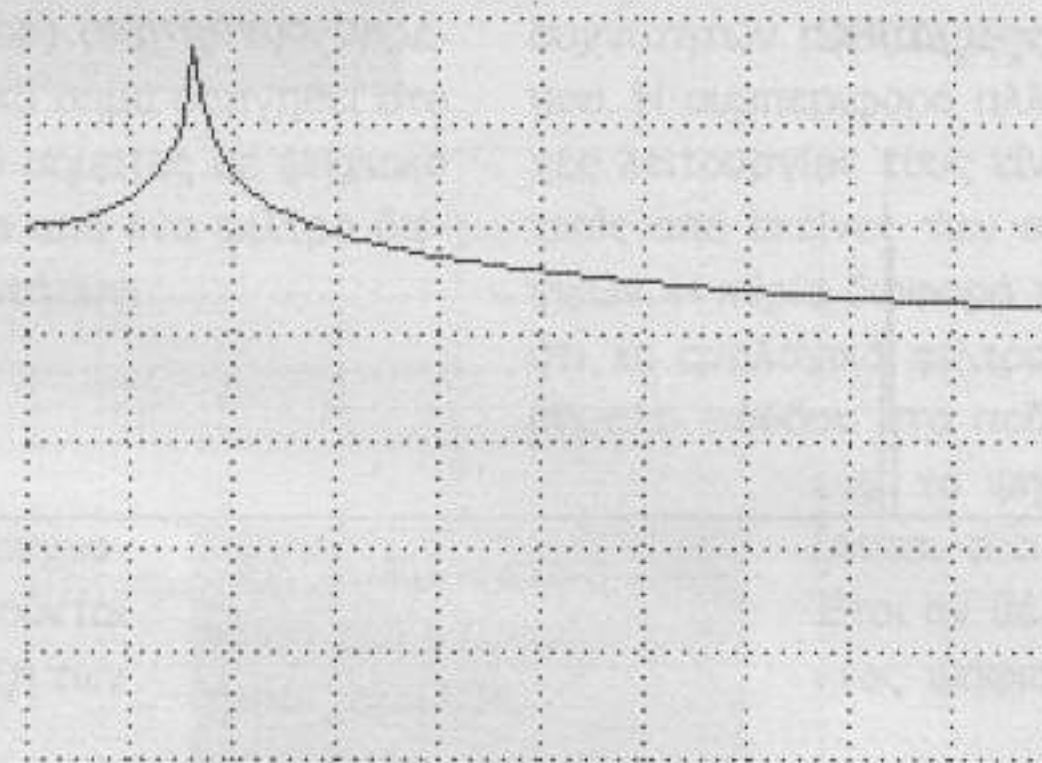
980015 - 2 - 17

Σχ. 9. Η κυματομορφή εξόδου μιας γεννήτριας σάρωσης και η απόκριση του φίλτρου χαμηλών στο σήμα αυτό.

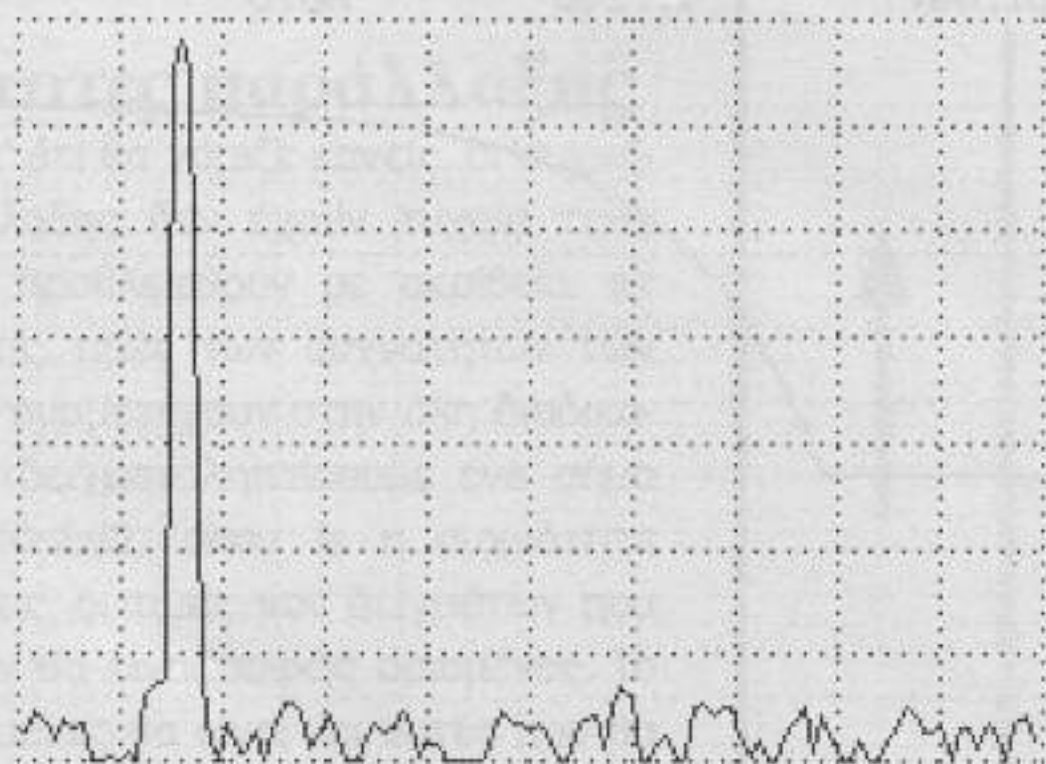
Σχ. 10. Φάσματα ημιτονικών σημάτων. Στο υψηλότερο μέρος απεικονίζονται χωρίς τα αρχικά σήματα να έχουν πολλαπλασιασθεί με τη συνάρτηση παραθύρου, ενώ στο χαμηλότερο έχοντας πολλαπλασιασθεί μ' αυτήν.



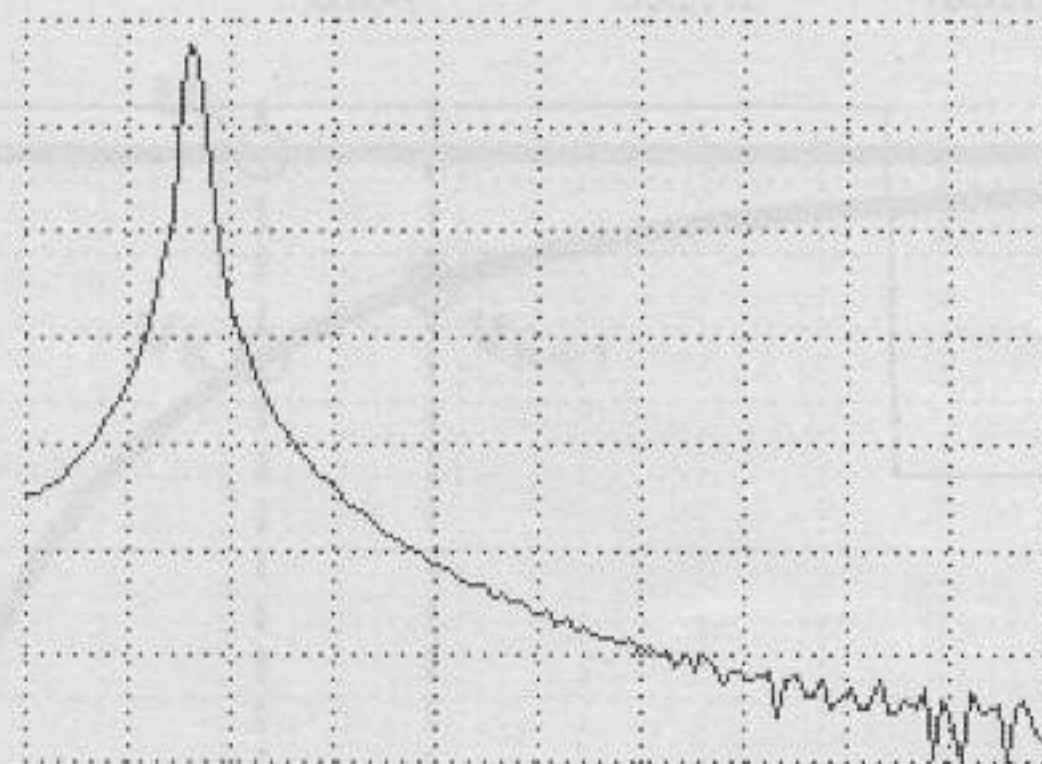
tmp1.wav ya = 0.0 yb = 140.0  
fa = 0.0 fb = 1200.0 cur = -1.0



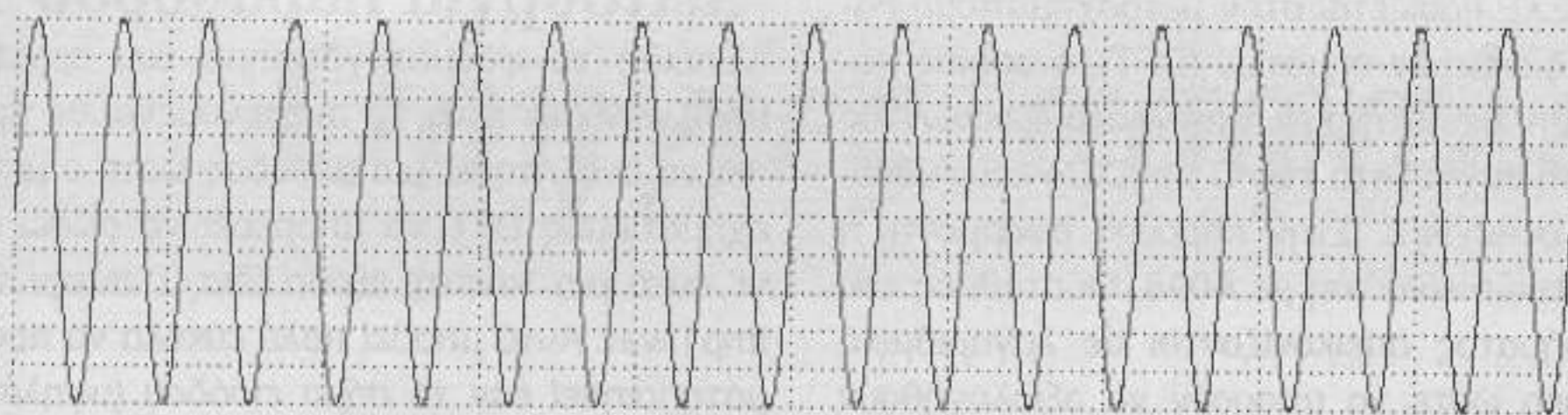
tmp2.wav ya = 0.0 yb = 140.0  
fa = 0.0 fb = 1200.0 cur = -1.0



tmp1.wav (w) ya = 0.0 yb = 140.0  
fa = 0.0 fb = 1200.0 cur = -1.0



tmp2.wav (w) ya = 0.0 yb = 140.0  
fa = 0.0 fb = 1200.0 cur = -1.0



tmp1.wav 1..4096 AUTO



tmp2.wav 1..4096 AUTO

980015 - 2 - 19

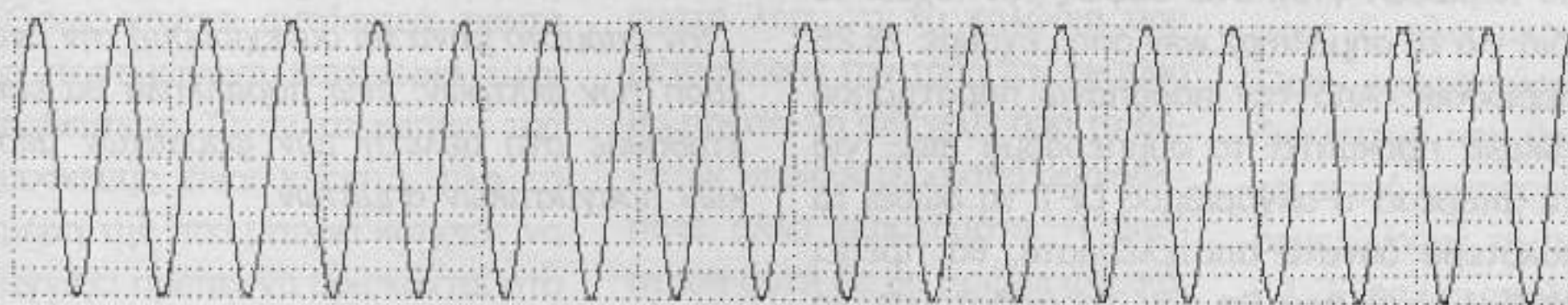
**Σχ. 11.** Τα σήματα που προορίζονται να οδηγηθούν στον αναλυτή φάσματος μπορούν να περικλείουν ή να μην περικλείουν έναν ακέραιο αριθμό περιόδων.

σχέση δίδοντάς μας μια πρώτη γεύση απ' αυτό που ονομάζεται ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Και τα δύο βρίσκονται στο CD-ROM που συνοδεύει την παρούσα σειρά άρθρων του Ελέκτορα.

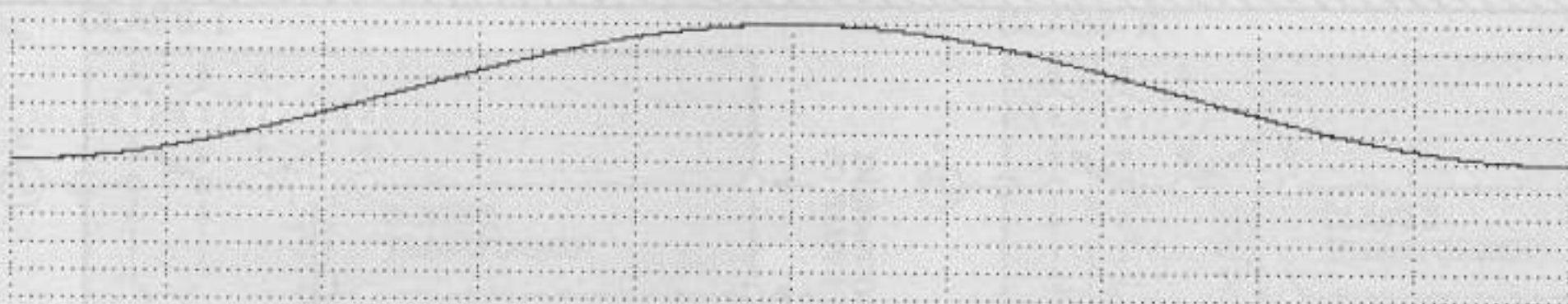
Όπως βλέπουμε ρίχνοντας μια βιαστική ματιά στο σχήμα, το πρόγραμμα δεν είναι τόσο

πολύπλοκο και σύνθετο όσο θα πίστευε κάποιος για τα προγράμματα ψηφιακής επεξεργασίας. Είναι εξαιρετικά απλό, όπως και τα περισσότερα προγράμματα της κατηγορίας του, αν και δεν θα πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι την περισσότερη δουλειά την κάνει η βιβλιοθήκη SIGLIB.PAS.

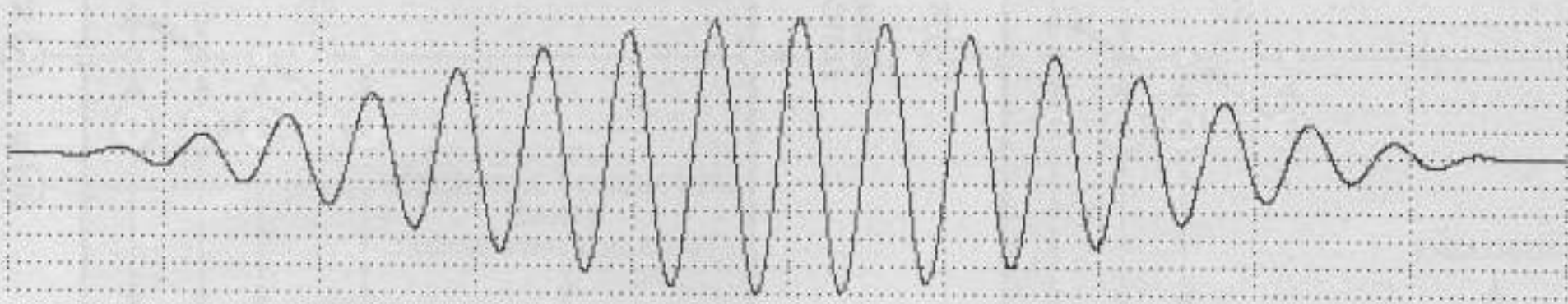
**Σχ. 12.** Αποτελέσματα του πολλαπλασιασμού της πηγαίας κυματομορφής με τη συνάρτηση παραθύρου.



tmp3.wav 1..4096 AUTO



tmp2.wav 1..4096 AUTO



tmp4.wav 1..4096 AUTO

980015 - 2 - 20

Για να δοκιμάσουμε το πρόγραμμα, αρκεί να το τροφοδοτήσουμε με το αρχείο MUS1.WAV που βρίσκεται και αυτό στο CD-ROM. Πληκτρολογήστε LP1  $\backslash r=0.995 \backslash scale=10 \backslash inp=mus1.wav \backslash out=tmp.wav$  <return> και μόλις το πρόγραμμα τερματισθεί, ακούστε το πρωτότυπο MUS1.WAV και αμέσως μετά το TMP.WAV. Οι διαφορές ανάμεσα στα δύο αρχεία κυματομορφών είναι ξεκάθαρες.

Έχοντας φθάσει στο σημείο αυτό, μπορείτε να κάνετε πολλά πειράματα επεμβαίνοντας στην τιμή του  $r$ . Προσέξτε όμως να μην υπερβείτε την τιμή 1, αφού για τιμές του  $r$  μεγαλύτερες απ' αυτή, το φίλτρο γίνεται ασταθές.

Η εκτίμηση όμως της συμπεριφοράς του φίλτρου, χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο αρχείο και το αυτί μας, σίγουρα δεν μπορεί να θεωρηθεί η πλέον ακριβής Γι' αυτό το λόγο θα χρειασθούμε μερικές ειδικές γεννήτριες, ικανές να παράγουν σήματα ελέγχου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Με τα σήματα των εξόδων τους θα διεγείρουμε το φίλτρο χαμηλών που μελετάμε. Μερικοί ακόμα αναλυτές, που θα είναι σε θέση να μας δείξουν την απόκριση του φίλτρου ως προς το χρόνο και ως προς τη συχνότητα, θα ολοκληρώσουν τον εξοπλισμό του εικονικού εργαστηρίου μας.

## Γεννήτριες παλμών

Μέσα στο CD-ROM περιέχονται πολλές γεννήτριες. Την απλούστερη μπορούμε να την καλέσουμε 'τρέχοντας' το πρόγραμμα PULSE1.EXE. Η έξοδος της είναι ένας λεπτός παλμός, ο οποίος όταν δειγματοληπτηθεί δίνει μόνο μια τιμή διάφορη του μηδενός. Όλες οι άλλες δειγματοληψίες οδηγούν σε μηδενικές τιμές. Η θέση και το πλάτος των παλμών που παράγει η συγκεκριμένη γεννήτρια μπορούν να καθορισθούν με τη βοήθεια των κατάλληλων παραμέτρων. Ο στοιχειώδης παλμός που παράγει αυτή η γεννήτρια είναι πολύ σημαντικός για τη μελέτη των διαφόρων κυκλωμάτων και γι' αυτό το λόγο θα χρησιμοποιηθεί πολλές φορές στα κυκλώματα που θα μελετήσουμε στη συνέχεια του άρθρου.

Η επόμενη, εξ ίσου σημαντική γεννήτρια καλείται μέσω του προγράμματος STEP1.EXE. Η έξοδος της αναδεικνύει μια απότομη μεταβολή από τη μηδενική στάθμη σε μια άλλη εκ των προτέρων καθορισμένη. Στη στάθμη αυτή διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Δοκιμάστε να γνωρίσετε από κοντά τις δύο αυτές συναρτήσεις. Πληκτρολογήστε DO XL-P1.SPP οπότε θα παρατηρήσετε ότι στην οθόνη σας να εμφανίζονται μετά από λίγο τα διαγράμματα που σημειώνονται στο σχ. 8. Τα δύο υψηλότερα περιγράφουν την κρουστική συνάρτηση, που περιέχεται στο αρχείο pulse1.wav, μαζί με την απόκριση του φίλτρου χαμηλών όταν διεγείρεται απ' αυτήν (tmp-

wav), ενώ τα δύο χαμηλότερα τη βηματική συνάρτηση του step1.wav και την απόκριση του ίδιου φίλτρου σ' αυτήν τη διέγερση (tmp.wav).

Και εδώ, όπως και προηγουμένως, μπορείτε να εξοικειωθείτε δίδοντας διάφορες τιμές στη μεταβλητή r. Τι θα συμβεί αν π.χ. δώσετε  $r = -0,9$ ;

Οι δύο όμως αυτές συναρτήσεις δε μας βοηθούν πολύ στο να αντιληφθούμε ποια είναι η απόκριση του φίλτρου που μελετάμε. Για να έχουμε επομένως μια καλύτερη αίσθηση του τι συμβαίνει, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη γεννήτρια σάρωσης που περιέχεται και αυτή στο ίδιο CD-ROM.

Πληκτρολογώντας DO XLP2.SPP <return>, η έξοδος της γεννήτριας σάρωσης παράγει ένα σήμα του οποίου η συχνότητα ξεκινάει από το 1 Hz και καταλήγει στο 1 KHz (πάνω μέρος του σχ. 9). Το σήμα αυτό επιβάλλεται στο φίλτρο χαμηλών για να μας δώσει την απόκριση που φαίνεται στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος. Παρατηρήστε ότι το πλάτος του σήματος εξόδου μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα του σήματος εισόδου.

Μια άλλη δυνατότητα που μας δίδεται είναι να παρατηρήσουμε την έξοδο του φίλτρου επιβάλλοντας στην είσοδό του σήμα λευκού θορύβου. Προτού όμως προχωρήσουμε σε μια τέτοια κίνηση, είναι απαραίτητο να αναλύσουμε και να εξετάσουμε τα φάσματα.

## Αναλυτής φάσματος

Καμία εισαγωγή στα συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος δε θα μπορούσε να θεωρηθεί πλήρης αν δεν περιλαμβάνει μια, έστω σύντομη, αναφορά στα φάσματα των σημάτων. Έτσι, μέσα στο CD-ROM που συνοδεύει τη σειρά έχει συμπεριληφθεί το πρόγραμμα SPEC1.EXE, μαζί με το αντίστοιχο πηγαίο SPEC1.PAS, που επιτρέπει τον υπολογισμό αλλά και την απεικόνιση του φάσματος συχνοτήτων οποιουδήποτε αρχείου κυ-

ματομορφών.

Για τον υπολογισμό του φάσματος, το SP-EC1.EXE βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier διακριτών σημάτων (DFT), ο οποίος παράγει  $n/2$  πλάτη από  $n$  δείγματα, ξεκινώντας από τη συχνότητα των 0 Hz (D.C.) και φθάνοντας στην  $fs/2$ . Στην παρούσα εφαρμογή, η τιμή του  $n$  είναι ίση με 4096. Οι στάθμες του γραφήματος απεικονίζονται σε λογαριθμική κλίμακα ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν ευκολότερα. Ας δούμε όμως τα παραπάνω στην πράξη, εκτελώντας το πείραμα XSPE-C1.SPP.

Κατ' αρχήν είναι απαραίτητο να παραχθούν δύο σήματα των οποίων οι συχνότητες είναι ίσες με 193,7988 Hz (αρχείο tmp1.wav) και 196,4905 Hz (αρχείο tmp2.wav). Τα σήματα αυτά περιλαμβάνουν 4096 δείγματα που έχουν καταγραφεί με ρυθμό 44100 δειγμάτων / sec. Αν στα σήματα αυτά τα αναλύσουμε κατα Fourier, θα πάρουμε τα φάσματα που φαίνονται στο σχ. 10.

Κοιτάζοντας το φάσμα του σήματος tmp1.wav, που έχει σχεδιασθεί πάνω αριστερά, καταλήγουμε εύκολα στο συμπέρασμα ότι περιγράφει μόνο μια συχνότητα. Το ίδιο συμβαίνει και με το φάσμα του tmp2.wav (πάνω δεξιά), όπου βλέπουμε μια κορυφή πλάτους 20 dB αλλά, αντίθετα με το προηγούμενο, η κυματομορφή γύρω από αυτήν την κορυφή διατηρείται σε υψηλές στάθμες.

Πως καταφέρνει η ανάλυση DFT να διαχωρίσει τις φασματικές συνιστώσες των σημάτων; Η απάντηση βρίσκεται στο σχ. 11, όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα δείγματα του σήματος tmp1.wav περιγράφουν ένα ακέραιο αριθμό περιόδων (18), ενώ σαφώς δεν ισχύει το ίδιο για το σήμα tmp2.wav όπου έχουμε 18,25 περιόδους. Από την παραπάνω παρατήρηση εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα πως, για να μπορέσει ο αλγόριθμος DFT να δώσει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, θα πρέπει τα δείγματα που θα τον τροφοδοτούμε να

περιγράφουν ακέραιο αριθμό περιόδων.

## Λειτουργία παραθύρου

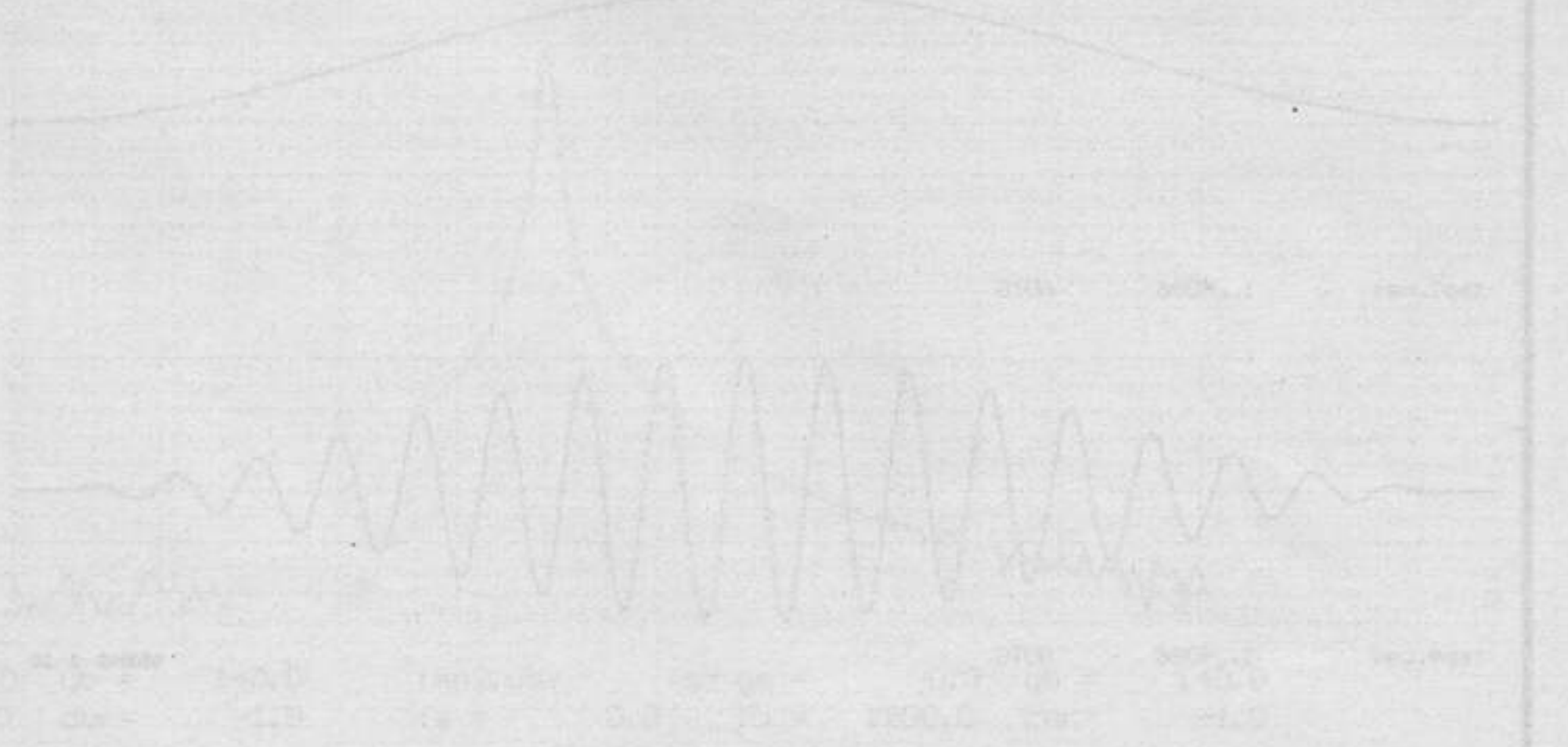
Επειδή το φασματογράφημα του αρχείου tmp2.wav δεν ήταν το αναμενόμενο, θα πρέπει να αναζητηθεί μια μέθοδος ώστε ο μετασχηματισμός DFT να μπορέσει να δώσει και γι' αυτό μια 'κοφή' έξοδο ίδια μ' αυτήν του tmp1.wav. Αυτό μπορεί πολύ εύκολα να πραγματοποιηθεί εάν το σήμα εισόδου (υψηλότερο γράφημα στο σχ. 12) πολλαπλασιασθεί με τη συνάρτηση παραθύρου (μεσαίο γράφημα στο ίδιο σχήμα). Αυτό που προκύπτει φαίνεται ακριβώς κάτω από τα δύο προηγούμενα.

Η χρήση της συνάρτησης παραθύρου εξασφαλίζει ότι το σήμα εισόδου περιλαμβάνει έναν ακέραιο αριθμό περιόδων, με αποτέλεσμα να μπορεί να επιβληθεί με επιτυχία ο μετασχηματισμός DFT. Τα φάσματα των σημάτων που περιέχονται στα αρχεία tmp1.wav και tmp2.wav και έχουν πολλαπλασιασθεί με τη συνάρτηση παραθύρου φαίνονται στο κάτω μέρος του σχ. 10. Είναι σαφές ότι το γράφημα του tmp2.wav είναι πλέον 'κοφτό' όπως θα έπρεπε, αλλά το γράφημα του tmp1.wav έχει γίνει κατά τι ευρύτερο. Η διεύρυνση του tmp1.wav είναι η αρνητική συνέπεια της χρήσης της συνάρτησης παραθύρου. Ο αναλυτής φάσματος που περιέχεται στο CD-ROM, σας επιτρέπει να επιλέγεται για το αν θα χρησιμοποιήσετε τη συνάρτηση παραθύρου ή όχι σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής σας. Τη συνάρτηση παραθύρου θα την ξανασυναντήσουμε και σε επόμενες συνέχειες, όταν αναφερθούμε στη σύνθεση φίλτρων.

*Τον επόμενο μήνα θα συνεχίσουμε την ανάλυση των φίλτρων, ενώ παράλληλα θα επεκταθούμε στη μελέτη των φασμάτων μερικών πραγματικών σημάτων.*



Καμία εισαγωγή στα συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος δε θα μπορούσε να θεωρηθεί πλήρης αν δεν περιλαμβάνει μια, έστω σύντομη, αναφορά στα φάσματα των σημάτων. Έτσι, μέσα στο CD-ROM που συνοδεύει τη σειρά έχει συμπεριληφθεί το πρόγραμμα SPEC1.EXE, μαζί με το αντίστοιχο πηγαίο SPEC1.PAS, που επιτρέπει τον υπολογισμό αλλά και την απεικόνιση του φάσματος συχνοτήτων οποιουδήποτε αρχείου κυ-



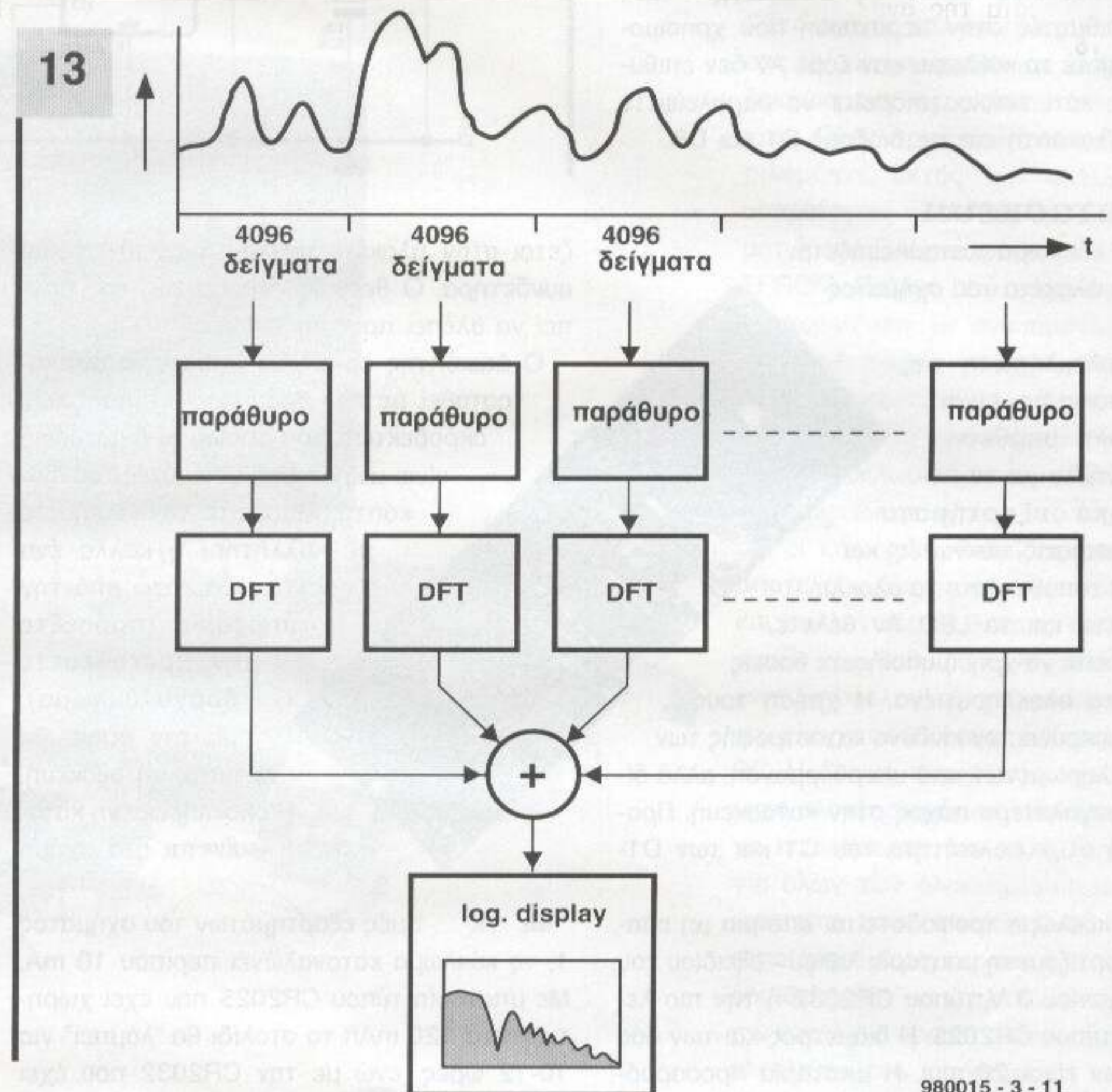
# Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων

## Μέρος 3<sup>ο</sup> Ψηφιακά φίλτρα διέλευσης ζώνης

Στο προηγούμενο τεύχος ασχοληθήκαμε με τον υπολογισμό των φασμάτων. Τώρα ήρθε η ώρα να μιλήσουμε για τη συμπεριφορά των φίλτρων διέλευσης ζώνης.

### Φάσματα εκτεταμένων σημάτων

Στο τέλος της προηγούμενης συνέχειας δείξαμε το πως είναι δυνατό, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό DFT (Μετασχηματισμό Fourier Διακριτού χρόνου), να υπολογίσουμε το φάσμα ενός σήματος αποτελούμενου από έναν σχετικά περιορισμένο αριθμό δειγμάτων ( $n=4096$ ). Στην περίπτωση όμως που το σήμα είναι περισσότερο εκτεταμένο, αποτελείται δηλαδή από πολύ περισσότερα δείγματα, θα πρέπει να ακολουθηθούν κάποιες άλλες διαδικασίες για τις οποίες ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία (βλέπε κατάλογο στο τέλος του άρθρου). Εμείς, στην προσπάθειά μας να κάνουμε τα πράγματα όσο το δυνατόν πιο εύκολα, θα σας δείξουμε μια μέθοδο με την οποία το σήμα εισόδου τεμαχίζεται σε τμήματα των 4096 δειγμάτων (βλέπε **σχ. 13**). Κάθε ένα απ' αυτά τα τμήματα προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του αρχικού εκτεταμένου σήματος με τη συνάρτηση παραθύρου που περιγράφηκε στο δεύτερο μέρος της σειράς.



**Σχ. 13.** Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται το πως υπολογίζεται το φάσμα εκτεταμένων σημάτων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μετασχηματισμός DFT του κάθε ενός τμήματος και αθροίζονται οι ενεργές τιμές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει δυνατή η ανάλυση του συνολικού σήματος. Μετά απ' αυτό ακολουθεί η απεικόνιση του φάσματος.

### Μια εφαρμογή

Και τώρα ας προσπαθήσουμε να απεικονίσουμε το φάσμα ενός πραγματικού σήματος, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μερικές τελείες και παύλες, όπως αυτές μεταδόθηκαν μέσω ενός πομπού σημάτων morse. Το αρχείο που περιέχει αυτό το σήμα είναι το

morse2.wav. Μέσα στο αρχείο αυτό έχουν αποθηκευτεί ταυτόχρονα δύο τηλεγραφικά σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. 'Τρέχοντας' το πείραμα XMORSE1.SPP, μπορούμε να δούμε το φάσμα τους, το οποίο σημειώνεται αρκετά καθαρά στο **σχ. 14**. Μελετώντας καλύτερα το γράφημα, διαπιστώνουμε ότι χαρακτηρίζεται από δύο κορυφές, η τιμή των οποίων μπορεί να υπολογισθεί ακόμα και αν τα τηλεγραφικά σήματα έχουν χαμηλό πλάτος ή συνοδεύονται από υψηλά ποσοστά θορύβου. Για μια ακόμη καλύτερη εμπέδωση της διαδικασίας αυτής, προτείνουμε στον αναγνώστη να αναλύσει το σήμα πιλότου των 19 KHz, που αναδεικνύεται παρασιτικά από τη βαθμίδα ακουστικών συχνοτήτων πολλών φθηνών ραδιοφώνων FM. Ένα τέτοιο σήμα θα βρείτε και σε μορφή αρχείου στο CD-ROM που συνοδεύει την κατασκευή.

## Διέγερση ενός φίλτρου διέλευσης χαμηλών με θόρυβο

Το πείραμα XLP6.SPP εξομοιώνει σε επίπεδο λογισμικού την πειραματική διάταξη του σχ. 15. Στο αριστερό μέρος του διακρίνουμε μια γεννήτρια λευκού θορύβου (NOISE1.EXE), η έξοδος της οποίας διεγείρει ένα τυπικό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Τόσο το σήμα που οδηγείται στην είσοδο του φίλτρου, όσο και το σήμα εξόδου του αναλύονται από τον αναλυτή φάσματος SPEC1. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στο σχ. 16.

## Μετασχηματισμοί DFT και FFT

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του φάσματος ενός δειγματοληπτισμένου σήματος είναι γνωστός με το όνομα Μετασχηματισμός Fourier Διακριτών σημάτων (Discrete Fourier Transform, DFT). Ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), που χρησιμοποιείται εξ ίσου συχνά, υλοποιείται και αυτός από έναν αλγόριθμο, ο οποίος όμως εκτελείται πολύ πιο γρήγορα και αποτελεσματικά από εκείνον του DFT. Για να σας δώσουμε μια ιδέα του πόσο γρήγορος είναι ο FFT σε σχέση με τον DFT, παραθέτουμε έναν πίνακα στον οποίο σημειώνεται ο αριθμός των πράξεων που εκτελούνται αν επιλεγθεί ο αλγόριθμος DFT (δεύτερη στήλη) ή ο αλγόριθμος FFT (τρίτη στήλη). Το σύνολο των δειγμάτων  $n$  του κάθε σήματος φαίνεται στην πρώτη στήλη, ενώ στην τελευταία υπολογίζεται ο αριθμός  $c$  που εκ-

φράζει το κατά πόσο πιο γρήγορος είναι ο μετασχηματισμός FFT σε σχέση με τον DFT.

n	DFT	FFT	c
16	256	64	4
128	16384	896	18
4096	16777216	49152	341

## Από τη γεννήτρια ημιτονικού σήματος στο φίλτρο διέλευσης ζώνης

Για να μπορέσουμε να δείξουμε τις συναρτήσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά μιας πηγής ημιτονικού σήματος ή ενός φίλτρου διέλευσης ζώνης, είναι απαραίτητο να ξαναθυμηθούμε μερικές απλές τριγωνομετρικές σχέσεις που μάθαμε στις πρώτες τάξεις του

λυκείου:

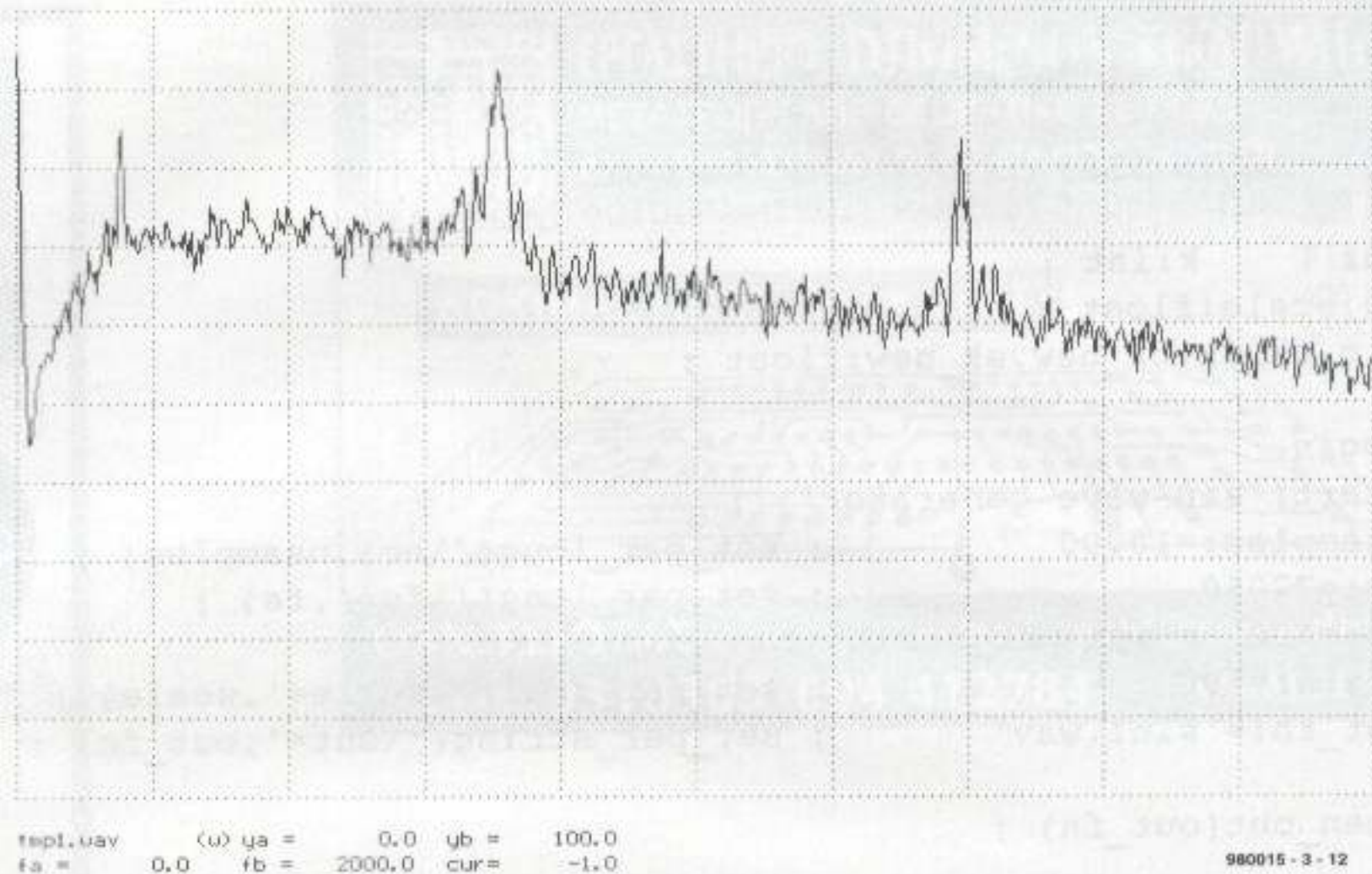
$$\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$\sin(a+b) = \sin a \cos b + \cos a \sin b$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις αποδεικνύεται ότι βοηθούν σημαντικά στην υλοποίηση, σε επίπεδο λογισμικού, μιας γεννήτριας ημιτονι-

Σχ. 14. Δύο σήματα morse (τηλεγραφικά) που μόλις ξεχωρίζουν από το θόρυβο.

14



tmp1.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 2000.0 cur = -1.0

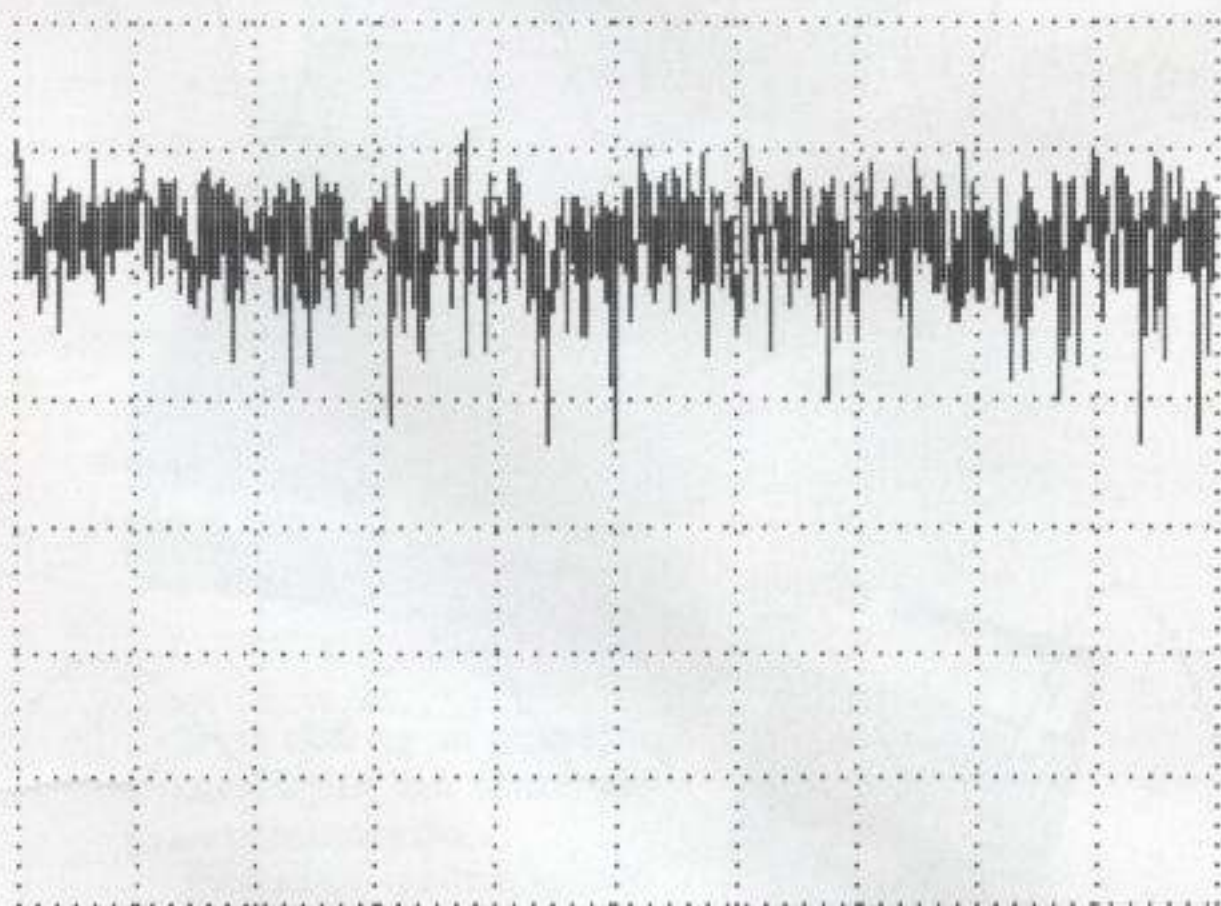
980015 - 3 - 12

15

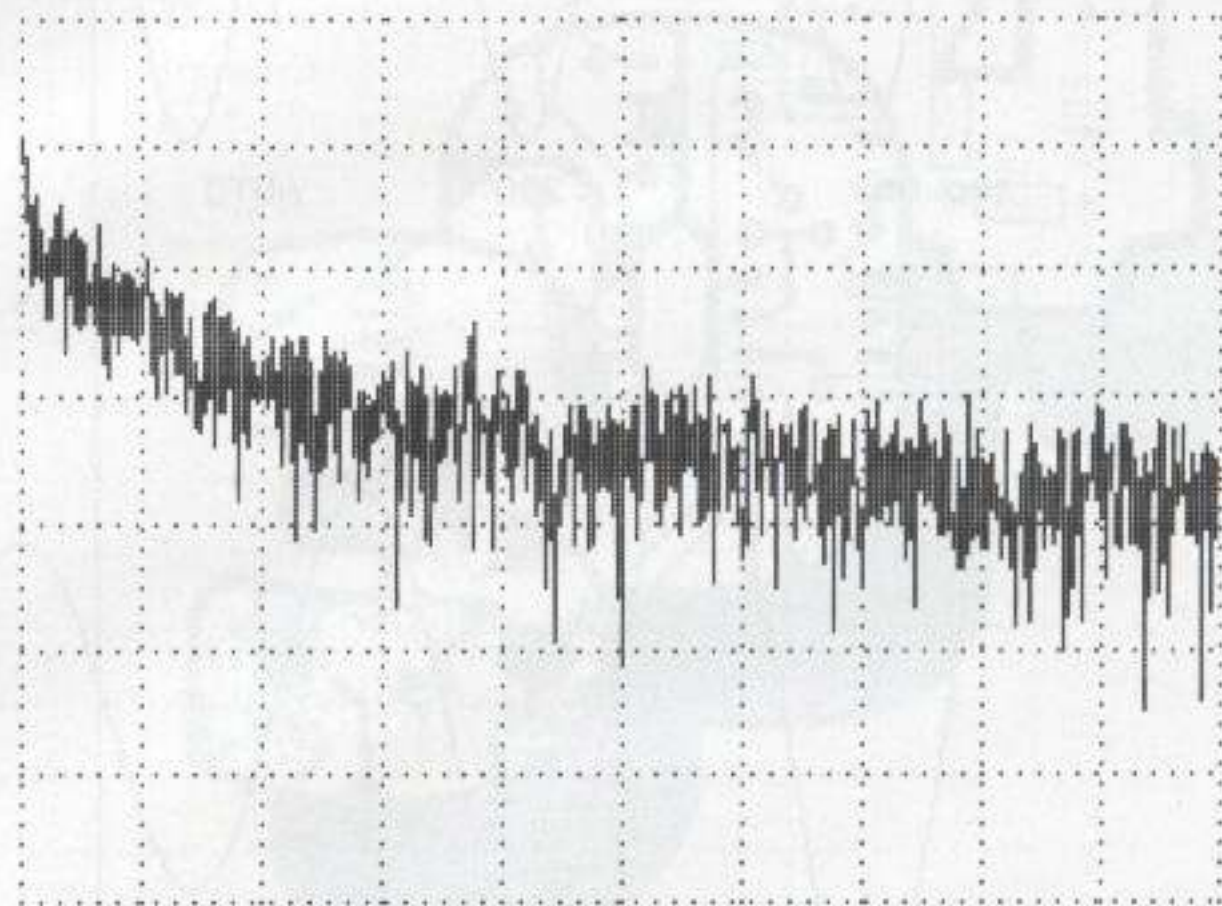


980015 - 3 - 13

16



tmp1.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 5000.0 cur = -1.0



tmp2.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 5000.0 cur = -1.0

980015 - 3 - 14

```
program sin0 ;
uses dos,graph,crt ;
```

```
{$I SIGLIB.PAS}

var      k:int ;
f0,scale:float ;
p,q,ck,sk,ck_new,sk_new:float ;

begin
start('sin-wave-generator') ;
nsamples:=10000           ; set_par_long('\n=',nsamples) ;
fs:=22050                 ; set_par_long('\fs=',fs) ;
f0:=100 ; set_par_real('\f0=',f0) ;
scale:=500                ; set_par_real('\scale=',scale) ;
out_fn:='sin1.wav'       ; set_par_string('\out=',out_fn) ;

open_out(out_fn) ;

p:=cos(2*pi*f0/fs) ;
q:=sin(2*pi*f0/fs) ;
ck:=1 ;
sk:=0 ;

for k:=1 to nsamples do
begin
output(scale*ck) ;
ck_new:=p*ck-q*sk ;
sk_new:=q*ck+p*sk ;
ck:=ck_new ;
sk:=sk_new ;
end ;
stop ;
end.
```

Σχ. 17. Πρόγραμμα παραγωγής ημιτονικού σήματος.

κών σημάτων. Τροποποιώντας τις ελάχιστα θα μπορέσουμε στη συνέχεια να δούμε το πως πραγματοποιείται και το φίλτρο διέλευσης ζώνης.

Ας προχωρήσουμε όμως σε μερικές αντικαταστάσεις. Έστω ότι:

$$p = \cos\psi \quad q = \sin\psi$$

$$c_k = \cos k\psi \quad s_k = \sin k\psi$$

Με  $\psi$  συμβολίζουμε τη γωνία που αποτελεί τη μεταβλητή των τριγωνομετρικών παραστάσεων. Το μέγεθος αυτό αποκτά τιμές σύμφωνα με τη σχέση  $\psi = 2\pi f_0 / f_s$  όπου  $f_0$  είναι η συχνότητα του σήματος που παράγει η γεννήτρια και το οποίο δειγματοληπτείται με συχνότητα  $f_s$ . Με  $c_k$  και  $s_k$  προσδιορίζονται οι τιμές των δειγμάτων μιας συνημιτονικής και μιας ημιτονικής κυματομορφής αντίστοιχα.

Για να δημιουργήσουμε με ψηφιακό τρόπο το επιθυμητό ημιτονικό σήμα, αρκεί να μπορούμε να υπολογίζουμε με μεγάλη ταχύτητα τις τιμές  $c_k$  και  $s_k$  ξεκινώντας από μια αρχική τιμή του  $k$ , έστω την τιμή  $k=0$ .

Κάνοντας αντικαταστάσεις, λαμβάνοντας υπ' όψη τις παραπάνω ιδιότητες, εύκολα βρίσκουμε ότι:

Σχ. 18. Ημιτονικό σήμα σταθερού πλάτους (υψηλότερη κυματομορφή) και μειούμενου πλάτους (χαμηλότερη κυματομορφή).



**Σχ. 19.** Κύκλωμα ενός ιδανικού (επάνω) και ενός πραγματικού ταλαντωτή (κάτω), μαζί με τις κυματομορφές που αναδεικνύουν.

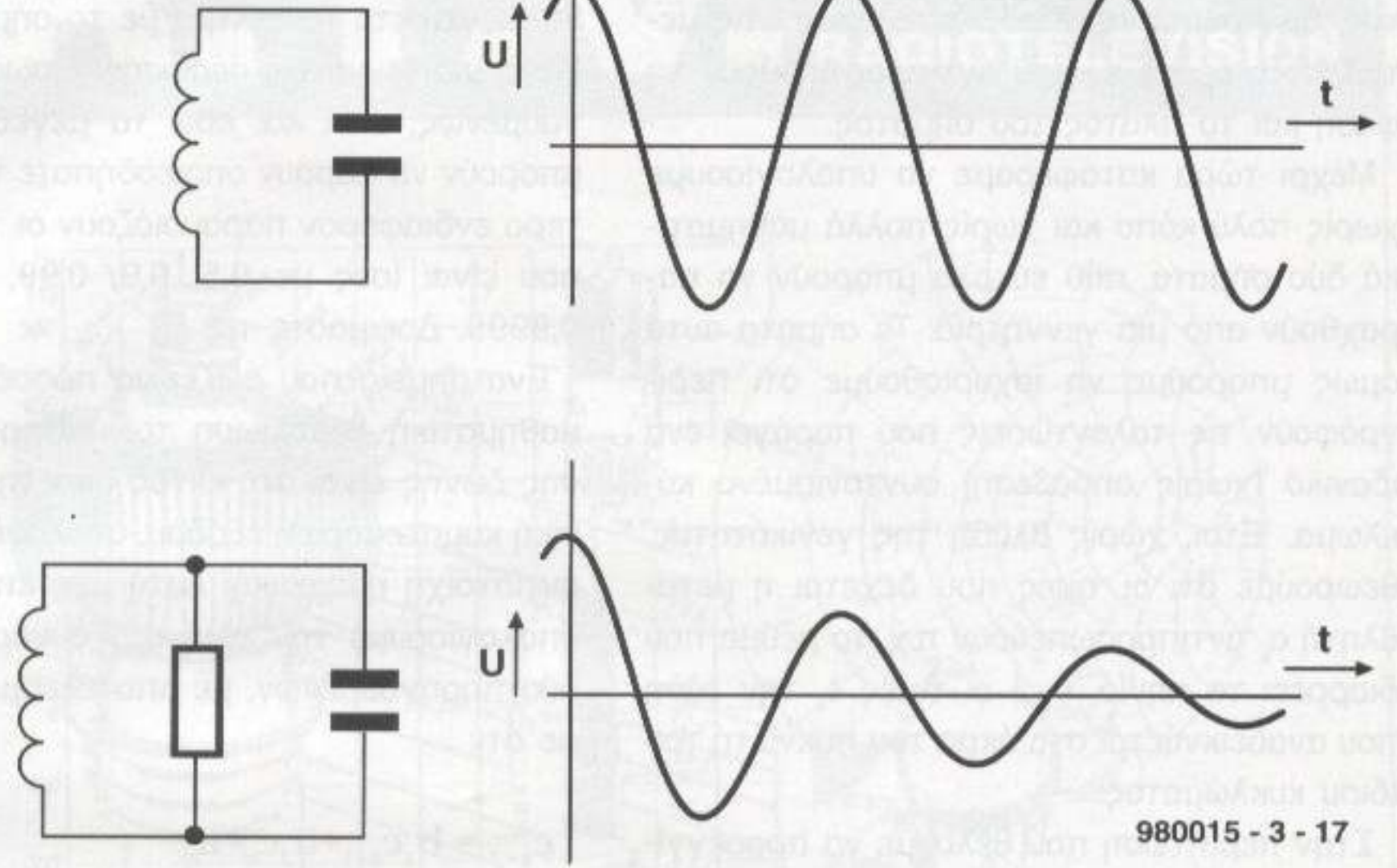
$$c_{k+1} = pc_k - qs_k$$

$$s_{k+1} = qc_k + ps_k$$

Οι σχέσεις αυτές μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, για να προσδιορίσουμε την τιμή του επόμενου δείγματος της συνημιτονικής ή της ημιτονικής κυματομορφής ( $c_{k+1}$ ,  $s_{k+1}$  αντίστοιχα), απαιτούνται μόνο τέσσερις πολλαπλασιασμοί, μία αφαίρεση και μία πρόσθεση. Εννοείται φυσικά πως έχουν καθορισθεί εκ των προτέρων οι τιμές των παραμέτρων  $p$  και  $q$ . Οι πράξεις αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν πολύ εύκολα και αποτελεσματικά με τη βοήθεια ενός ψηφιακού επεξεργαστή σημάτων (DSP). Ρίχνοντας μια σύντομη ματιά στο πρόγραμμα SIN0.PAS (ή .EXE), που φαίνεται στο σχ. 17, θα συμφωνήσετε όλοι πως η συγγραφή ενός τέτοιου προγράμματος δεν παρουσιάζει καμία δυσκολία.

Το πρόγραμμα παράγει ένα ημιτονικό σήμα (XSIN1.SPP), το οποίο απεικονίζεται στο σχ.

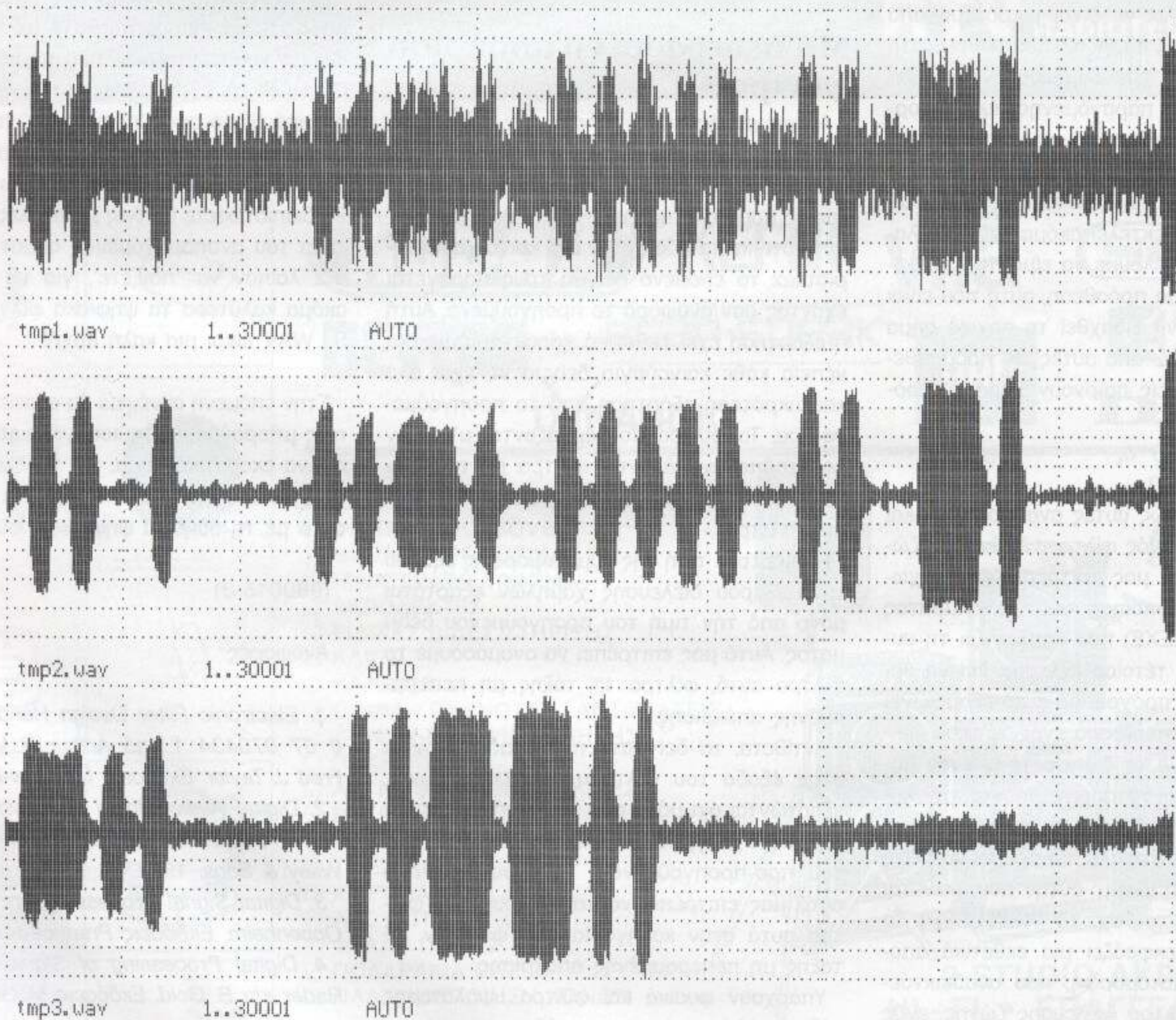
19



980015 - 3 - 17

**Σχ. 20.** Το σήμα εξόδου ενός ραδιοφωνικού δέκτη, ο οποίος λαμβάνει ταυτόχρονα σήματα morse με συχνότητες 700 και 1400 Hz από δύο διαφορετικούς σταθμούς (1<sup>η</sup> κυματομορφή). Αμέσως μετά ακολουθούν τα σήματα των δύο σταθμών, που έχουν 'ξεχωρισθεί' με τη βοήθεια φίλτρων διέλευσης ζώνης.

20



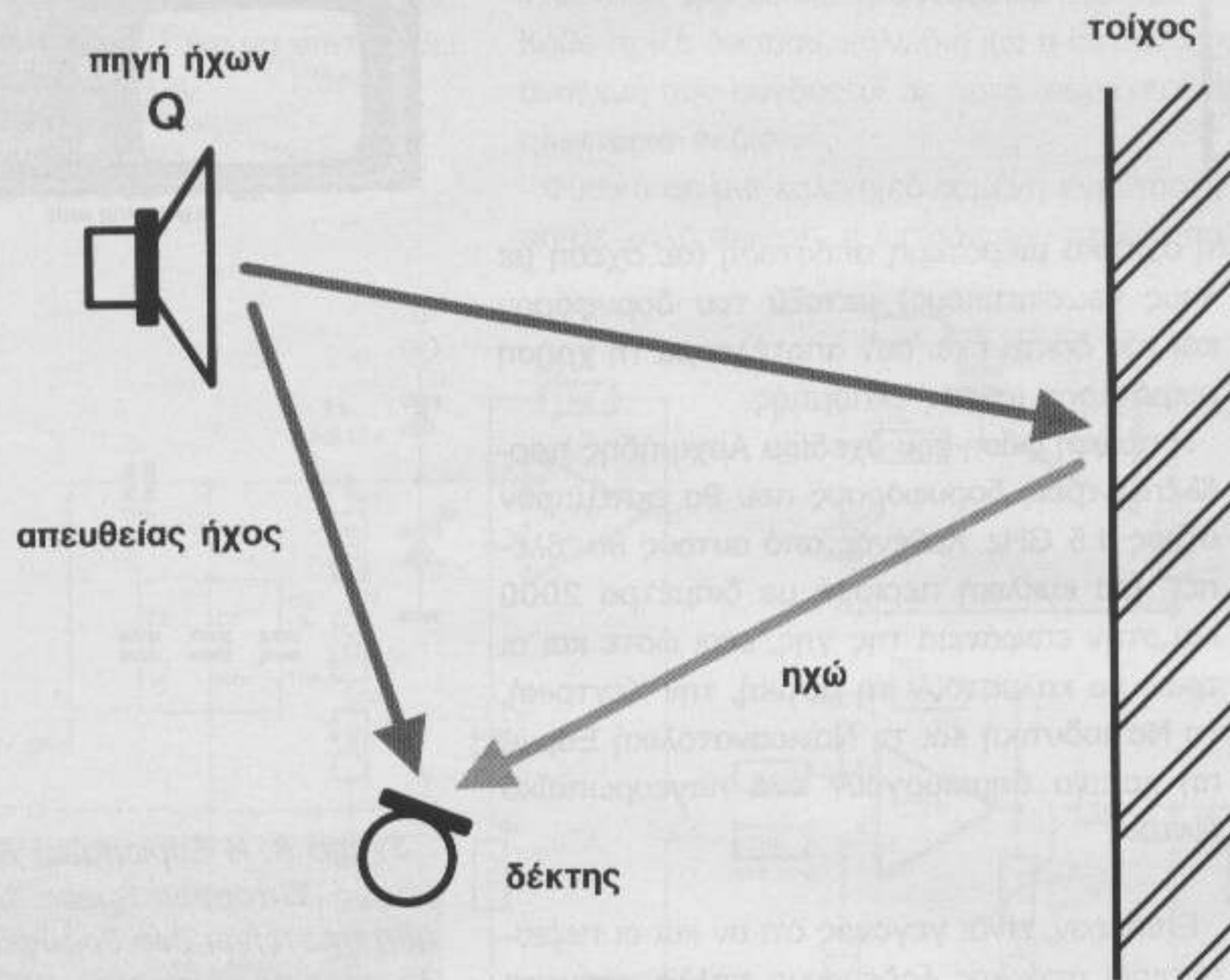
980015 - 3 - 18

# Ψηφιακή επεξεργασία σημάτων

## Από την ηχώ στα φίλτρα FIR

Μέρος 4<sup>ο</sup>

21



980015 - 4 - 11

**Σχ. 21.** Η ηχώ δημιουργείται από την ανάκλαση ενός ηχητικού κύματος πάνω σ' ένα εμπόδιο. Χαρακτηρίζεται από χρονική καθυστέρηση και εξασθένηση.

Αξιοποιώντας τις δυνατότητες της Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων, μπορούμε πολύ εύκολα να δημιουργήσουμε τα γνωστά ηχητικά εφέ της ηχούς και της αντήχησης. Σ' αυτό το άρθρο θα αναλύσουμε διεξοδικά το πως παράγονται αυτά τα εφέ, αξιοποιώντας τα προγράμματα που υπάρχουν μέσα στο CD-ROM. Ταυτόχρονα, θα μιλήσουμε και για τα φίλτρα διέλευσης ζώνης FIR.

### Μία μόνο ηχώ

Η ηχώ είναι ένα φαινόμενο που προκαλείται από την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων πάνω σ' ένα εμπόδιο. Η αντίληψη των ανακλώμενων κυμάτων μαζί με τα κύματα που φθάνουν απ' ευθείας στο αυτί μας, μας δίνει την αίσθηση ότι ακούμε δύο φορές τον ίδιο ήχο. Στο αυτί, ο ανακλώμενος ήχος είναι ίδιος με τον απ' ευθείας, με τη διαφορά ότι φθάνει λίγο αργότερα απ' αυτόν (παρουσιάζει χρονική καθυστέρηση) και ότι είναι ελαφρά εξασθενημένος (έχει μειωμένο πλάτος). Αν θεωρήσουμε ότι η χρονική καθυστέρηση είναι ίση με  $M$  δείγματα, τότε το σήμα που φθάνει στον ακροατή του ήχου περιγράφεται από τη σχέση:

$$y_k = s_k + a s_{k-M}$$

όπου με  $s_k$  συμβολίζουμε τον αρχικό (απ' ευθείας) ήχο, με  $a$  τη σταθερά εξασθένησης και με  $s_{k-M}$  τον ήχο που προέρχεται από την ανάκλαση και είναι χρονικά μετατοπισμένος. Πως όμως όλα τα παραπάνω μπορούν να αξιοποιηθούν από ένα πρόγραμμα; Είναι φανερό πως για να προσδιορισθεί με ακρίβεια η τιμή  $y_k$  (τιμή του συνολικού σήματος ήχου τη χρονική στιγμή  $k$ ), είναι απαραίτητο να γνω-

ρίζουμε την τιμή του αρχικού σήματος ήχου, όπως είχε καταγραφεί πριν από  $M$  δείγματα. Αυτό σημαίνει πως στο επίπεδο του λογισμικού θα πρέπει να έχει καθορισθεί μια μνήμη προσωρινής αποθήκευσης (buffer), που θα είναι σε θέση να διατηρεί τις τιμές τουλάχιστον  $M$  δειγμάτων. Το πιο απλό που μπορεί να σκεφθεί κανείς για να λύσει αυτό το πρόβλημα, είναι η χρήση, στην οποία η διακινούμενη πληροφορία θα σχηματίζει έναν βρόγχο. Αυτό θυμίζει τα παλιά συστήματα παραγωγής ηχούς που χρησιμοποιούσαν για την αποθήκευση του ήχου μια ατέρμονη μαγνητική ταινία. Η διαφορά φυσικά του "κυκλικού ολισθητή" με την ατέρμονη ταινία είναι το ότι σ' αυτόν οι 'κεφαλές εγγραφής και ανάγνωσης' είναι εκείνες που μετακινούνται, ενώ στην ταινία μετακινείται η ίδια η πληροφορία.

Το πρόγραμμα ECHO1.PAS (σχ. 22) είναι βασισμένο σε μια καθυστέρηση  $M=8192$  δειγμάτων και έχει γραφτεί με σκοπό να προσθέτει ηχώ στα αρχεία κυματομορφών που εισάγονται σ' αυτό.

Η επιθυμητή χρονική καθυστέρηση δεν εξαρτάται όμως μόνο από τον αριθμό των δειγμάτων που προβλέπει η τιμή  $M$ , αλλά και από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Εάν π.χ. η συχνότητα αυτή είναι 22050 δείγματα / sec, τότε η καθυστέρηση θα είναι ίση με  $8192/22050 = 0,37$  sec. Προτού 'τρέξετε' το πρόγραμμα αυτό, ακούστε το πρωτότυπο αρχείο κυματομορφών WD1R.WAV. Στη συνέχεια ακούστε και το TMP.WAV, μέσα στο οποίο έχει προστεθεί η ηχώ. Οι εντολές που πρέπει να πληκτρολογήσετε για να πετύχετε τα παραπάνω είναι οι:

```
ECHO1 \inp = wd1r.wav  
out = tmp.wav
```

### Πολλαπλή ηχώ

Η προσθήκη μιας μόνο ηχούς στον πρωτότυπο ήχο τις περισσότερες φορές είναι μάλλον ανεπαρκής. Για να έχουμε πιο 'πλούσιο' ήχο, θα πρέπει να εισάγουμε δύο ή περισσότερα ανακλώμενα σήματα, που θα διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στη χρονική καθυστέρηση όσο και στην εξασθένηση. Αν θεωρήσουμε ότι

οι τιμές αυτές είναι οι L, M και a, b αντίστοιχα, τότε η σχέση που περιγράφει την τελική κυματομορφή είναι η:

$$y_k = s_k + as_{k-L} + bs_{k-M}$$

Στη σχέση αυτή μπορούν να προστεθούν περισσότεροι όροι, οδηγώντας μ' αυτόν τον τρόπο στην πολλαπλή ηχώ. Στο CD-ROM θα βρείτε ένα ακόμα πρόγραμμα που μπορεί να παράγει πολλαπλή ηχώ, εισάγοντας έναν μεγάλο αριθμό προσθετών στην παραπάνω σχέση. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί επιτρέπουν τον καθορισμό του αριθμού των προσθετών, όπως επίσης και τη χρονική καθυστέρηση και εξασθένηση που αντιπροσωπεύει καθ' ένας απ' αυτούς. Το όνομά του είναι FIRFIL1, ένα όνομα που, όπως θα διαπιστώσουμε αργότερα, δεν είναι διόλου τυχαίο. Σαν παράδειγμα σας προτείνουμε να χρησιμοποιήσετε το αρχείο XECHO2.SPP

```
\\file 'exec.bat'
firfil1\inp = speech1.wav\out =
tmp.wav\filter =fir1.fir
\\eof
```

```
\\file 'fir1.fir' a simple test filter 50 0,5
3000 0,4
6000 0,3
12000 0,2
16000 0,1
\\eof

\\end
```

Οι παράμετροι που ορίζονται μ' αυτόν τον τρόπο έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πενταπλής ηχούς με καθυστερήσεις 0, 3000, 6000, 12000 και 16000 δειγμάτων και με εξασθενήσεις 0,5, 0,4, 0,3, 0,2 και 0,1 του πλάτους του αρχικού σήματος. Τροποποιώντας τις, μπορείτε να επιτύχετε καθυστερήσεις μέχρι και 16383 δειγμάτων, ενώ το ίδιο πρόγραμμα μπορεί να δημιουργεί ηχώ αποτελούμενη από 1000 το πολύ προσθετούς.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω, μπορείτε να δοκιμάσετε το αρχείο XECHO2.SPP ακούγοντας τα αποτελέσματα που παράγει μέσω του TMP.WAV. Αν το πλήθος των προσθετών γίνει πολύ μεγάλο, τότε αυτό που θα ακούσετε μπορεί να θεωρηθεί σαν αντήχηση.

## Φίλτρα FIR

Το πρόγραμμα FIRFIL1 είναι σε θέση να κάνει πολύ περισσότερα πράγματα από το να προσθέτει πολλαπλή ηχώ σ' έναν ήχο. Για να το διαπιστώσετε, μπορείτε να δημιουργήσετε ένα σήμα σάρωσης, που στη συνέχεια θα το οδηγήσετε στο φίλτρο που ορίζεται από το ECHO3.SPP. Αυτό που θα πάρετε θα είναι ο

22

```
program echol ;
uses dos,crt,graph ;
{I SIGLIB.PAS }

var k:int;
    x,y:float ;
    buffer:array[0..8191] of float ;
    pointer:int ;

begin
start('simple echo') ;
inp_fn:='tmp1.wav' ; set_par_string('\inp=',inp_fn) ;
out_fn:='tmp.wav' ; set_par_string('\out=',out_fn) ;

open_inp(inp_fn) ;
open_out(out_fn) ;

pointer:=0 ;
for k:=0 to 8191 do buffer[k]:=0 ;

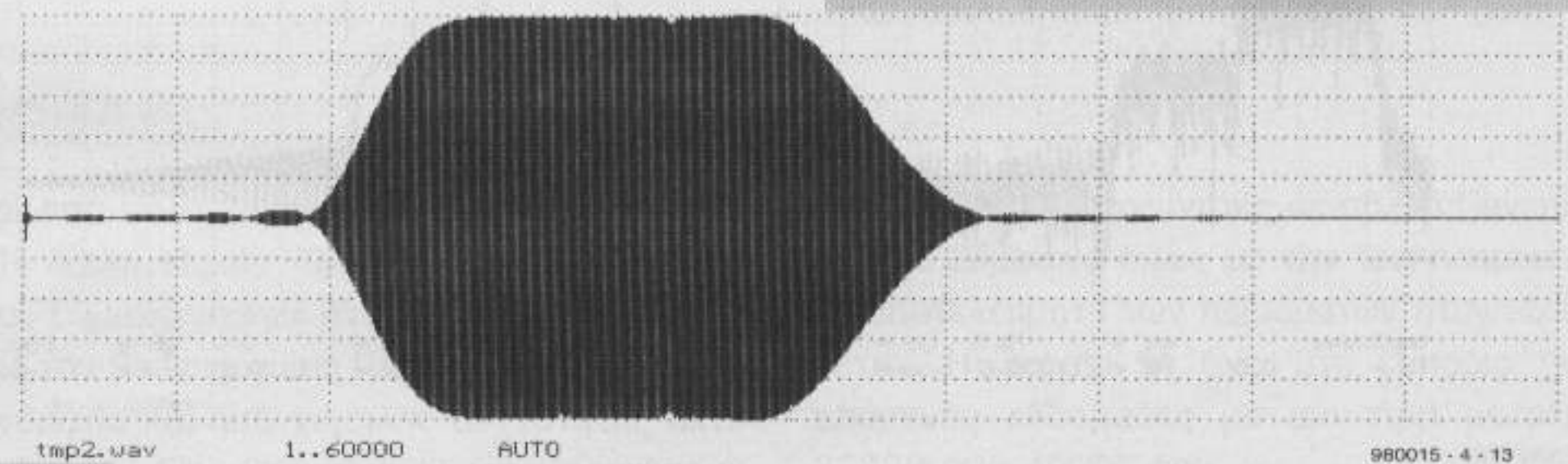
for k:=1 to nsamples do
begin
x:=input ;
y:=buffer[pointer] ;
buffer[pointer]:=x ;
pointer:=pointer+1 ;
if pointer>=8192 then pointer:=0 ;
output(x+0.5*y) ;
end ;

stop ;
end.
```

Σχ. 22. Πρόγραμμα παραγωγής ηχούς.

23

Σχ. 23. Αν σ' ένα φίλτρο παραγωγής ηχούς επιβληθεί ένα σήμα σάρωσης, η κυματομορφή που θα πάρουμε από την έξοδό του θα είναι ίδια μ' αυτήν ενός φίλτρου διέλευσης ζώνης.

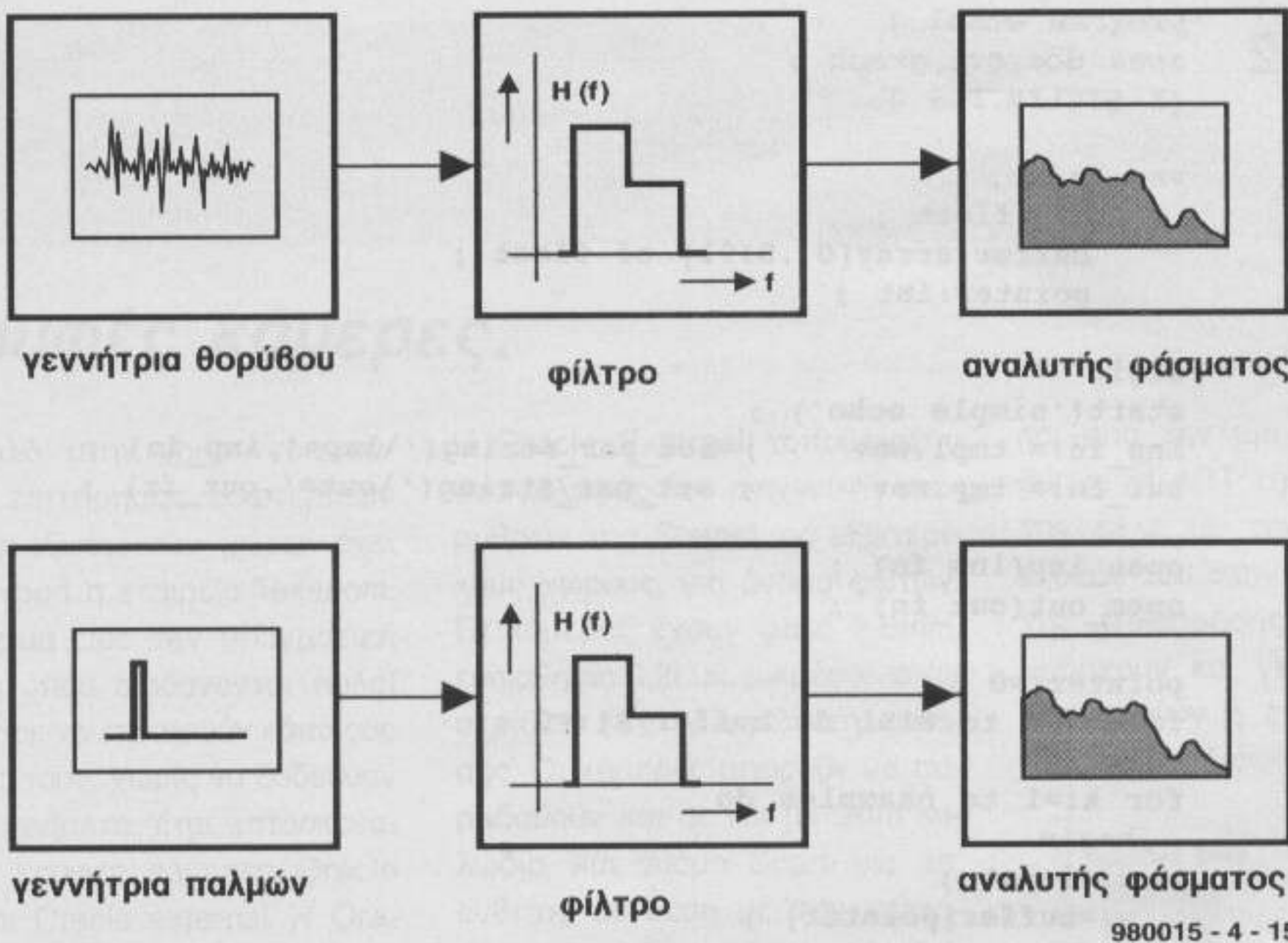


24



αρχικός ήχος, επαυξημένος με 256 συνιστώσες ηχούς και μάλλον ασυνήθιστες τιμές εξασθένησης. Στο σχ. 23 φαίνεται η γραφική παράσταση της παραγόμενης κυματομορφής. Εύκολα αντιλαμβάνεστε ότι το γράφημα αυτό

Σχ. 24. Κρουστική απόκριση φίλτρου διέλευσης ζώνης.



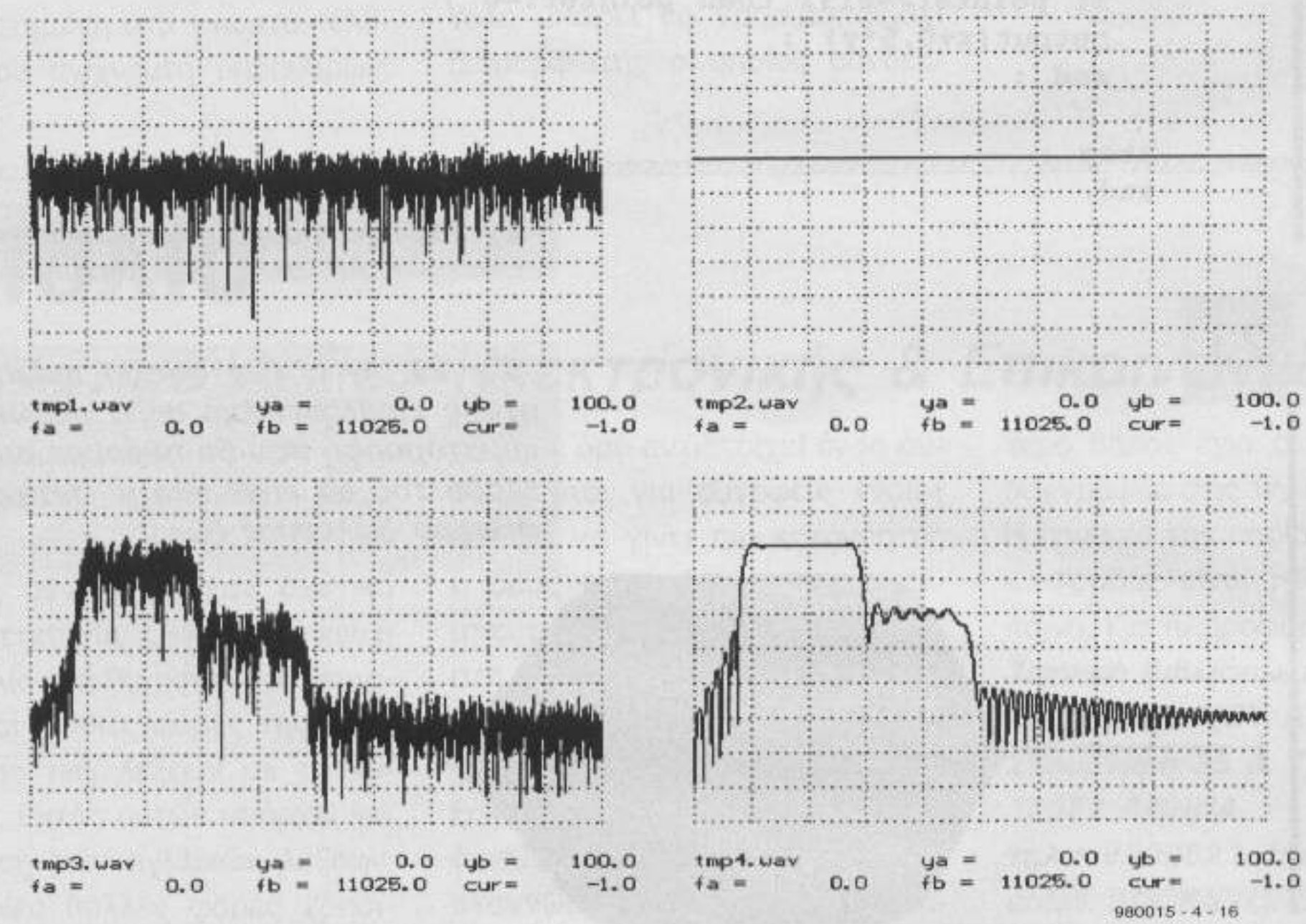
Σχ. 25. Τα σήματα θορύβου και οι παλμοί χαρακτηρίζονται από τα ίδια φάσματα.

αντιστοιχεί σ' ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης. Δυστυχώς, είναι μάλλον δύσκολο να συνδυάζουμε τόσες πολλές συνιστώσες, όπως π.χ. τις 256 που παράγαγε το ECHO3.SPP, έτσι ώστε να έχουμε ένα φίλτρο ζώνης. Προτού όμως εξηγήσουμε το πως μπορεί να προσεγγισθεί μια τέτοια λειτουργία, είναι προτιμότερο να μιλήσουμε λίγο περισσότερο για τα φίλτρα Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης (Finite Impulse Response) ή αλλιώς φίλτρα FIR.

Ένα φίλτρο FIR, ικανό να παράγει πολλαπλή ηχώ με συνιστώσες που καθυστερούν κατά 0, 1, 2, ... δείγματα και εξασθενήσεις  $a_0, a_1, a_2, \dots$  μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$y_k = a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \dots$$

όπου  $x_k$  και  $y_k$  είναι τα δείγματα που αναδει-



Σχ. 26. Καθορισμός της απόκρισης συχνότητας με τη βοήθεια θορύβου (αριστερά) και παλμού (δεξιά). Στο πάνω μέρος φαίνονται τα σήματα εισόδου και στο κάτω τα αντίστοιχα σήματα εξόδου.

κνύονται στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα.

Η κρουστική απόκριση ενός τέτοιου φίλτρου, που δεν είναι άλλη από την τιμή της  $y_k$  όταν  $x_0=1$  και  $x_i=0$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$y_k = a_0 x_0 + a_1 x_{-1} + a_2 x_{-2} + \dots$$

Επειδή όμως μόνο το δείγμα  $x_0$  έχει τιμή ίση με 1 (όλα τα επόμενα έχουν τιμή 0), η σχέση αυτή για  $k=0$  γίνεται:

$$y_0 = a_0$$

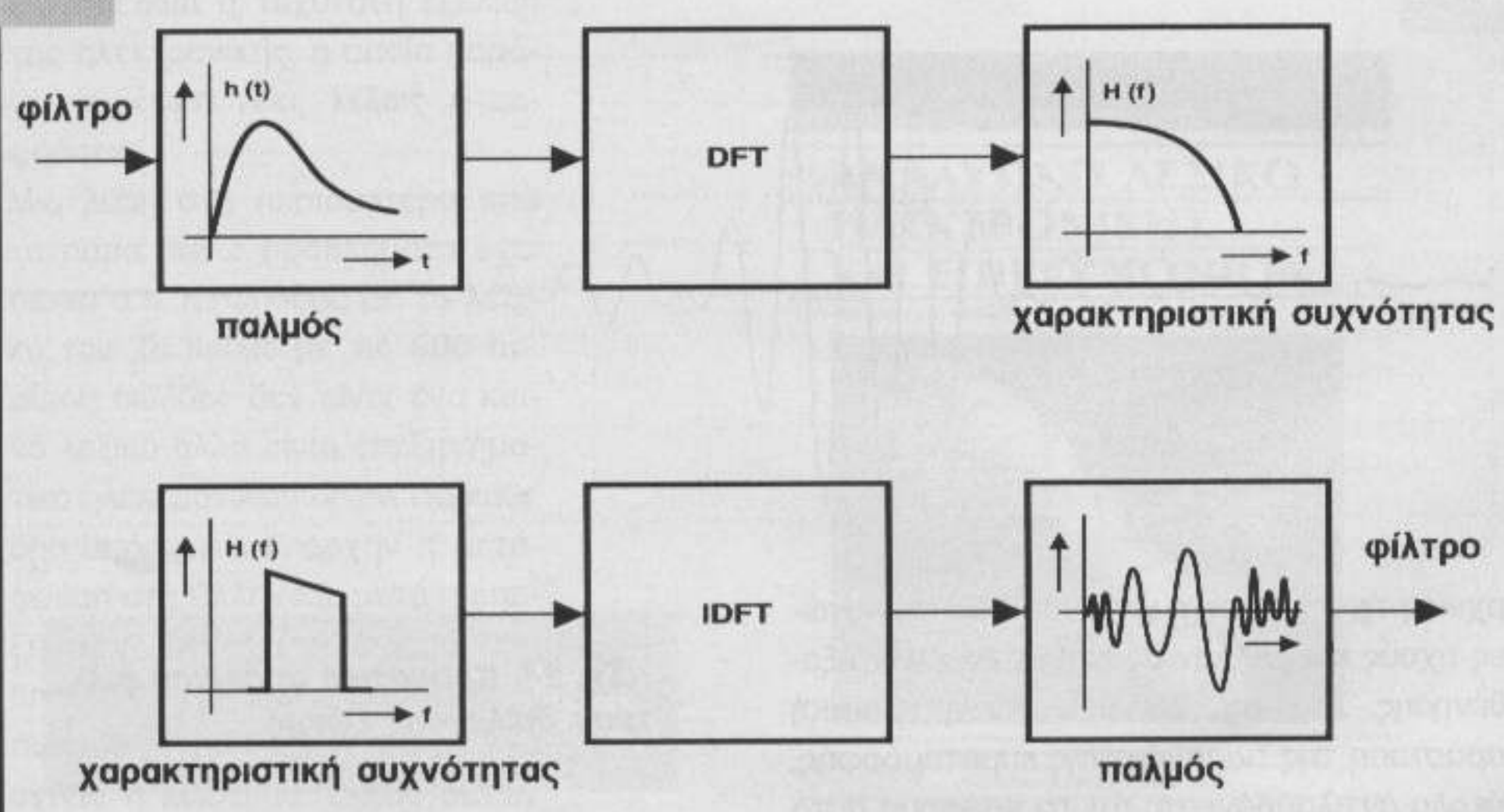
Για την τιμή  $k=1$  θα έχουμε:

$$y_1 = a_0 x_1 + a_1 x_0 + a_2 x_{-1} + \dots$$

ή αλλιώς (λαμβάνοντας πάλι υπ' όψη ότι  $x_0=1$  και όλα τα άλλα  $x_i = 0$ )

$$y_1 = a_1$$

Σχ. 27. Ο μετασχηματισμός DFT επιτρέπει τον υπολογισμό της απόκρισης συχνότητας έχοντας δεδομένη την κρουστική απόκριση. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός DFT επιτρέπει τον υπολογισμό της κρουστικής, έχοντας σαν πρώτη ύλη την απόκριση συχνότητας.



Επεκτείνοντας αυτό το σκεπτικό και για τις υπόλοιπες τιμές του  $k$ , καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για όλα τα  $k > 0$  θα έχουμε  $y_k = a_k$ . Αυτό με απλά λόγια σημαίνει πως η απόκριση του συγκεκριμένου φίλτρου σε κρουστική διέγερση δίνει τον συντελεστή του φίλτρου. Η συμπεριφορά αυτή εξασφαλίζεται από το δεύτερο μέρος του XECHO3.SPP. Στο **σχ. 24** φαίνεται η κρουστική απόκριση του φίλτρου. Θυμίζει αρκετά την κυματομορφή που αναδεικνύεται στην έξοδο ενός ταλαντωτή, κάτι που είναι μάλλον αναμενόμενο αφού στην πράξη το φίλτρο διέλευσης συμπεριφέρεται σαν συνεζευγμένα ταλαντευόμενα κυκλώματα.

## Σήματα ευρέος φάσματος

Στην προηγούμενη συνέχεια, όταν θέλαμε να εξακριβώσουμε τη συμπεριφορά ενός φίλτρου, επιβάλλαμε σ' αυτό σήμα λευκού θορύβου. Ο λόγος που χρησιμοποιούσαμε ένα τέτοιο σήμα, είχε σχέση με την ίδια τη φύση του λευκού θορύβου, ο οποίος εξ υποθέσεως αποτελείται από πάρα πολλές φασματικές συνιστώσες του ίδιου πλάτους. Αν το σήμα θορύβου περάσει από ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης (επάνω μέρος του **σχ. 25**), οι συχνότητες που το αποτελούν θα εμφανισθούν στην έξοδό του με το ίδιο πλάτος (αριστερό μέρος του **σχ. 26**). Τη συμπεριφορά αυτή μπορείτε να την εξακριβώσετε με τη βοήθεια του XPULSE1.SPP.

Ο υπολογισμός της απόκρισης ενός φίλτρου, που δέχεται με σήμα θορύβου, είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα εργασία, μιας και απαιτείται η άθροιση όλων των επιμέρους σημάτων που επιβάλλονται στην είσοδο του φίλτρου. Θα έπρεπε επομένως να βρεθεί ένα καλύτερο σήμα που θα υποκαθιστούσε το σήμα θορύβου, επιτρέποντας ταυτόχρονα την απλούστευση των πράξεων. Το σήμα αυτό δεν είναι άλλο από αυτό που εκφράζει ένας μοναδικός παλμός, ο οποίος εύκολα μπορεί να παραχθεί από το πρόγραμμα PULSE1.EXE.

Το φάσμα που δίνει ένας παλμός παραμένει σχεδόν σταθερό για όλες τις συχνότητες (δεξιό μέρος του **σχ. 26**), γεγονός που αποδεικνύει τους λόγους για τους οποίους ο παλμός μπορεί να υποκαταστήσει μια γεννήτρια λευκού θορύβου.

Η απόκριση ενός φίλτρου σ' έναν τέτοιο παλμό εξαρτάται από την κρουστική απόκρισή του. Στην έξοδό του θα εμφανισθούν όλες οι συχνότητες που αντιπροσωπεύει ο παλμός ή μ' άλλα λόγια: το φάσμα της κρουστικής απόκρισης του φίλτρου συμπίπτει με την απόκριση συχνότητας όπως αυτή φαίνεται στις κυματομορφές tmp3.wav και tmp4.wav του **σχ. 26**. Αυτή η παρατήρηση επαληθεύει μια από τις βασικότερες αρχές της θεωρίας της ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων, που εύ-

28

```

\\file 'exec.bat'
\\ generate filter
specfill \filter=tmp.fil \fir=tmpa.fir \bitmap=pic.ps
\\eof

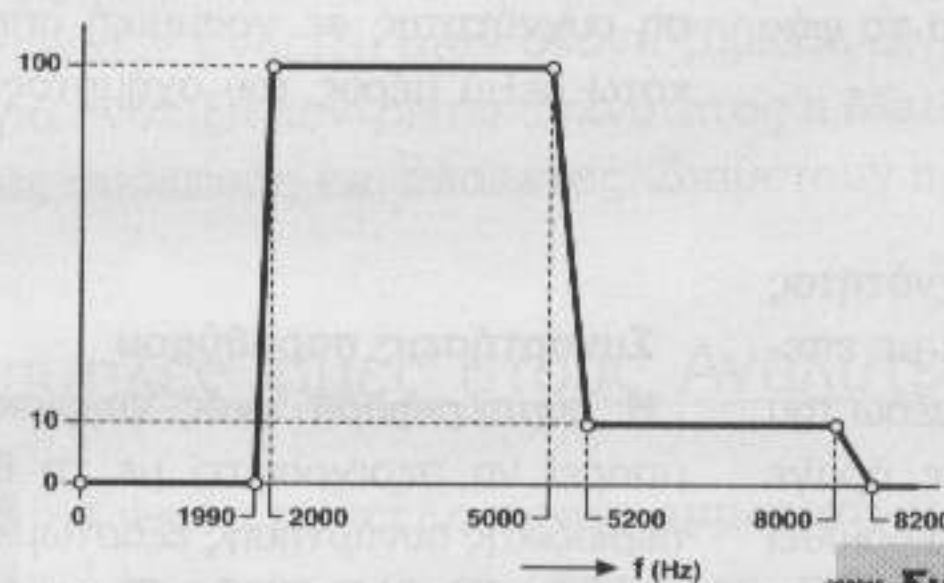
\\ filter specification

\\file 'tmp.fil'
a simple filter as example
normal
44100      ; sample frequency
128        ; number of taps
7          ; alpha for window
7          ; number of data points in frequency domain
0          0
1990      0
2000      100
5000      100
5200      10
8000      10
8200      0
\\eof

```

**Σχ. 28.** Το αρχείο δεδομένων XFILDES1.SPP.

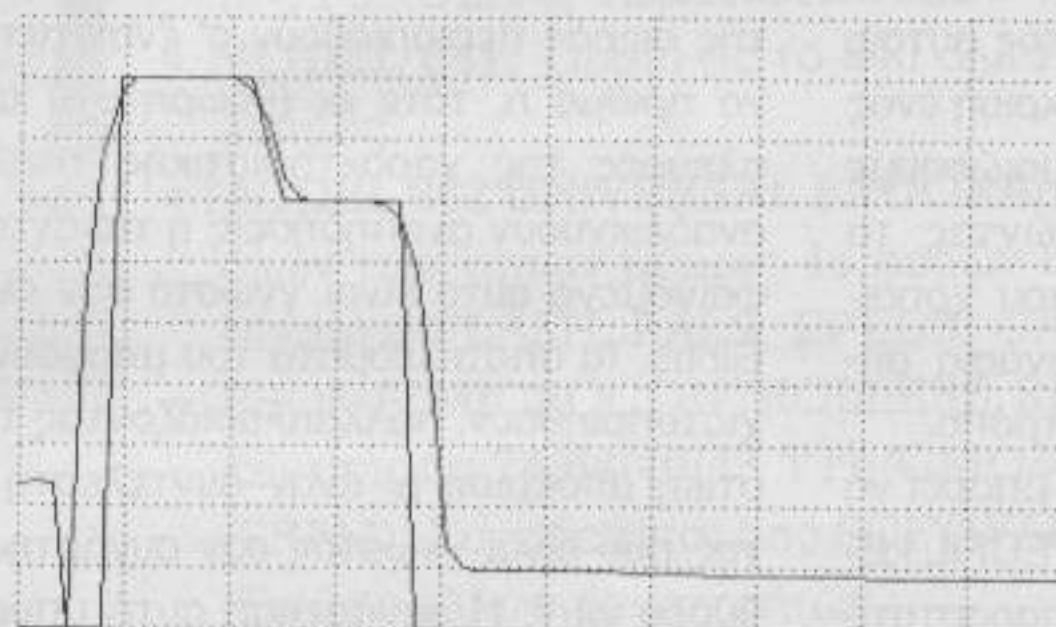
29



**Σχ. 29.** Προκαθορισμένη απόκριση συχνότητας κατάλληλη για τη σχεδίαση φίλτρων.

30

n= 128 alpha= 7.00000000 fs= 4.410E+0004  
specification: tmp.fil fir-out to: tmpa.fir



980015 - 4 - 20

κολα μπορεί να τεκμηριωθεί μέσω μαθηματικών.

Όταν πρόκειται να υπολογιστεί η φασματική ή η κρουστική απόκριση ενός φίλτρου μέσω ενός αναλυτή φάσματος, η συνάρτηση παρα-

**Σχ. 30.** Γραφήματα που εμφανίζονται στην οθόνη κατά τη διάρκεια της σχεδίασης φίλτρων.

θύρου οφείλει να είναι απενεργοποιημένη, έτσι ώστε να αποφευχθούν τα λανθασμένα αποτελέσματα. Είναι σημαντικό η κρουστική απόκριση να αποτελείται από λίγα δείγματα (στη συγκεκριμένη περίπτωση 4096), ώστε να μπορεί να 'τρέξει' ο αλγόριθμος DFT (Ανάλυση Fourier Διακριτού χρόνου) του αναλυτή φάσματος.

Ο υπολογισμός της απόκρισης συχνότητας ενός φίλτρου, επιβάλλοντας στην είσοδό του έναν μοναδικό παλμό και αξιοποιώντας τα σήματα εξόδου του μέσω του αλγόριθμου DFT, αποτελεί σήμερα μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδο (σχ. 27). Στην περίπτωση που μ' αυτόν τον τρόπο επιχειρείται ο προσδιορισμός της απόκρισης ενός ενισχυτή, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το πλάτος των επιβαλλόμενων παλμών να μην προκαλέσει υπερδιέγερση. Αν οι αλληπάλληλες δοκιμές σας αναγκάσουν να καταλήξετε στη χρήση παλμών πολύ μικρού πλάτους, τότε τα αποτελέσματα που θα πάρετε θα είναι επίσης αλλοιωμένα λόγω του μικρού λόγου σήματος προς θόρυβο. Τότε, το μόνο που σας μένει να κάνετε είναι να επιβάλλετε στον ενισχυτή σας σήμα ψευδο-θορύβου, του οποίου οι συνιστώσες διατηρούν χαμηλό πλάτος σ' όλο το φάσμα των συχνοτήτων.

## Σχεδίαση φίλτρων

Από τη στιγμή που η απόκριση συχνότητας ενός φίλτρου μπορεί να υπολογισθεί με επεξεργασία της κρουστικής απόκρισης μέσω του μετασχηματισμού DFT, θα μπορούσε άραγε να συμβεί και το αντίθετο; Να προσδιορισθεί δηλαδή η κρουστική, θεωρώντας γνωστή την απόκριση συχνότητας; Η απάντηση σ' αυτό το ερώτημα είναι καταφατική, αφού για το σκοπό αυτό έχουμε ένα ακόμα εργαλείο: τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier Διακριτού χρόνου (inverse DFT, IDFT). Εκτός αυτού, όταν γνωρίζουμε την κρουστική απόκριση ενός φίλτρου, μπορούμε εύκολα να εξομοιώσουμε τη συμπεριφορά του χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FIL1.EXE. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων σχεδιάζονται μ' αυτόν τον τρόπο.

Για τη σχεδίαση των φίλτρων FIR μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα SPECFIL1.EXE. Η λειτουργία φαίνεται αρκετά παραστατικά με τη βοήθεια των γραφημάτων που σημειώνονται στο κάτω μέρος του σχ. 27. Θεωρώντας γνωστή την απόκριση συχνότητας του φίλτρου, υπολογίζεται με την βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού DFT η κρουστική απόκρισή του. Ο μετασχηματισμός έχει ελαφρά διαφοροποιημένα αποτελέσματα λόγω της συνάρτησης παραθύρου. Μ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να τροποποιηθούν ελαφρά τα χαρακτηριστικά του φίλτρου, ώστε αυτό να προσεγγίσει ακόμα καλύτερα τις αρχικές

προδιαγραφές του. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα του αντίστροφου μετασχηματισμού καταγράφονται σ' ένα αρχείο και από εκεί αποδίδονται σαν δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα σχεδίασης φίλτρων FIR. Ένα πρόγραμμα ικανό να σχεδιάσει φίλτρα είναι το XFILDES1.SPP, του οποίου οι εντολές φαίνονται στο σχ. 28.

Το αρχείο που διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του φίλτρου είναι το TMPFIL. Μέσα σ' αυτό σημειώνονται η ταχύτητα δειγματοληψίας, ο αριθμός των δειγμάτων που συμμετέχουν στην κρουστική απόκριση, οι παράμετροι της συνάρτησης παραθύρου, όπως επίσης και οι τιμές της απολαβής στις διάφορες συχνότητες. Η τιμή της ενίσχυσης για τις συχνότητες που δεν αναφέρονται στο αρχείο υπολογίζεται μέσω μεθόδων γραμμικής παρεμβολής, όπως φαίνεται στο σχ. 29.

Το αποτέλεσμα του προγράμματος σχεδίασης φαίνεται στο σχ. 30. Στο επάνω αριστερά γράφημα φαίνονται οι αποκρίσεις όπως είχαν προκαθορισθεί και όπως προέκυψαν μετά τη σχεδίαση, απεικονισμένες σε λογαριθμικούς άξονες. Η κρουστική απόκριση φαίνεται στο κάτω αριστερά γράφημα, ενώ η απόκριση συχνότητας σε γραμμική απεικόνιση στο κάτω δεξιά μέρος του σχήματος.

## Συναρτήσεις παραθύρου

Η συμπεριφορά ενός ψηφιακού φίλτρου μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια μιας περιοδικής συνάρτησης εξαρτώμενης από την περίοδο δειγματοληψίας T, που μπορεί εύκολα να γενικευθεί με τη βοήθεια των σειρών Fourier. Οι σταθερές μιας τέτοιας σειράς αντιπροσωπεύουν την κρουστική απόκριση του φίλτρου. Όταν στην πράξη οι άπειροι όροι της σειράς περιορισθούν σ' έναν πεπερασμένο αριθμό n, τότε οι (θεωρητικά) απότομες πλευρές της χαρακτηριστικής του φίλτρου αναδεικνύουν αναπηδήσεις ή ταλαντώσεις. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν Φαινόμενο Gibbs. Τα αποτελέσματά του μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, πολλαπλασιάζοντας την κρουστική απόκριση μ' έναν συντελεστή βαρύτητας που είναι γνωστός σαν συνάρτηση παραθύρου w(n). Η συνάρτηση αυτή μπορεί εύκολα να συμπεριληφθεί στη διαδικασία σχεδίασης ενός φίλτρου FIR. Μερικές από τις πιο συνηθισμένες συναρτήσεις παραθύρου έχουν τη μορφή που σημειώνεται παρακάτω.

Ορθογώνια	$w(n) = 1$ $0n(N-1)$
Τριγωνική	$w(n) = 2n/(N-1)$ $0n(N-1)/2$
Bartlett	$w(n) = 2-[(2n)/(N-1)]$ $(N-1)/2n(N-1)$
Hanning	$w(n) = 0,5-0,5\cos[(2-$

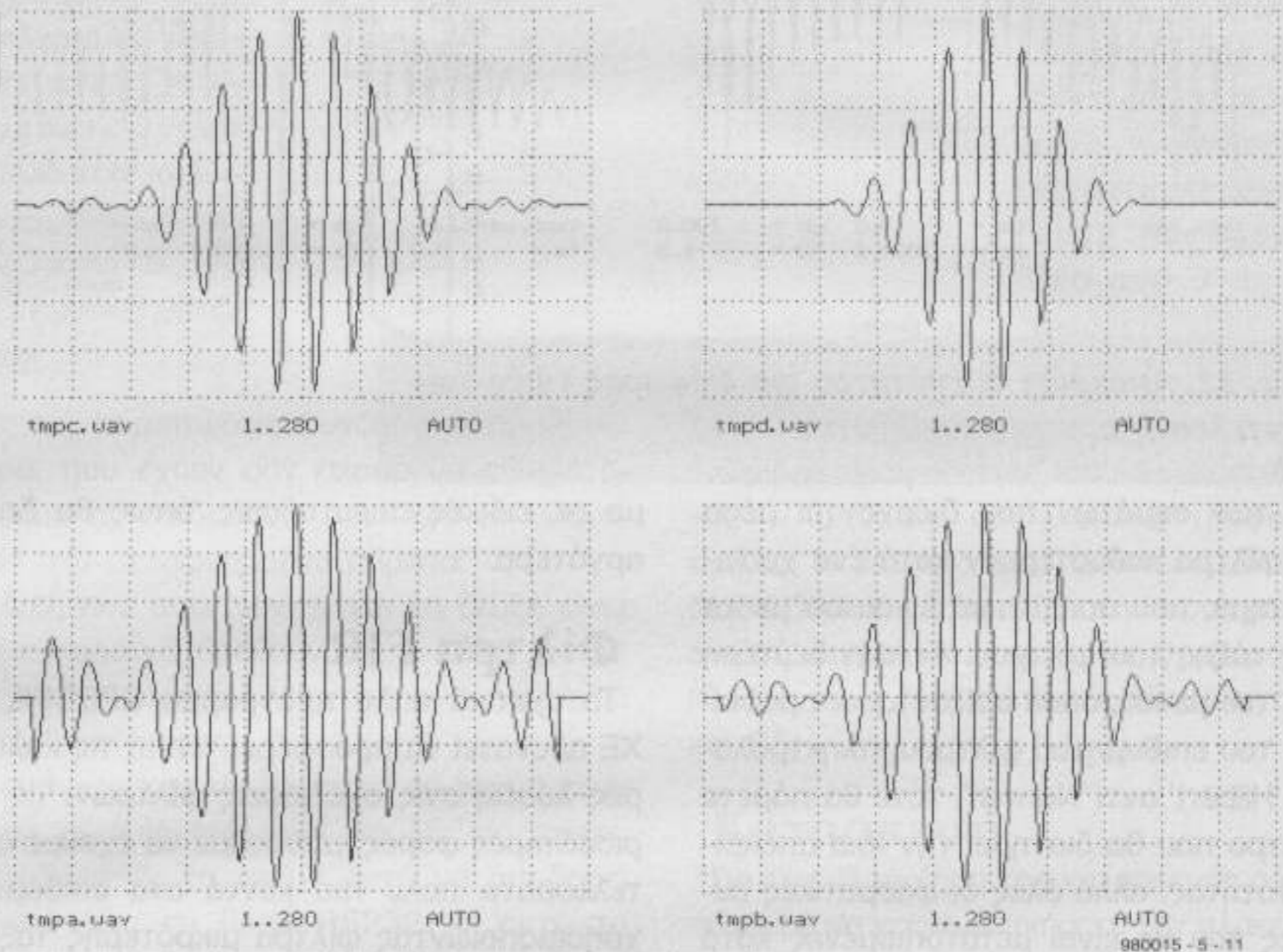
$\pi n)/(N-1)]$	$0n(N-1)$
Hamming	$w(n) = 0,54-0,46\cos[(2\pi n)/(N-1)]$
	$0n(N-1)$

# Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων

## Μέρος 5<sup>ο</sup> Ψηφιακά φίλτρα και τεχνικές διαμόρφωσης

31

Σ' αυτό το τεύχος θα συνεχίσουμε την αναφορά μας στη σχεδίαση των ψηφιακών φίλτρων, στρέφοντας κατόπιν το ενδιαφέρον μας στις διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης.



Σχ. 31. Κρουστική απόκριση για διάφορες τιμές του συντελεστή  $\alpha$  (συνάρτηση παραθύρου).

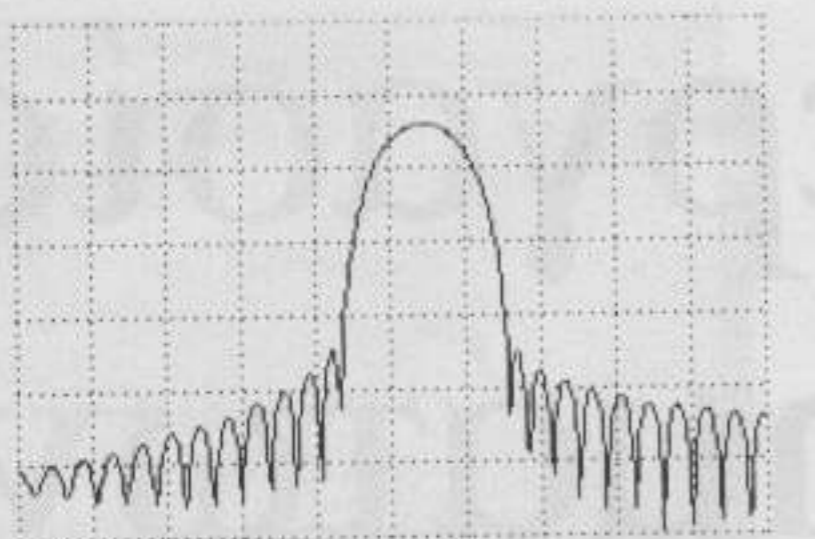
### Παράμετροι των ψηφιακών φίλτρων

Είναι πράγματι πολύ βολικό το ότι μας δίδεται η δυνατότητα να σχεδιάσουμε ένα φίλτρο, έχοντας σαν μοναδικό δεδομένο την καμπύλη απόκρισής του. Αφού την προσδιορίσετε, θα πρέπει σαν επόμενη κίνηση να καθορίσετε τον αριθμό των δειγμάτων που θα περιγράφουν την κρουστική του απόκριση, κάτι που σε τελική ανάλυση σχετίζεται άμεσα με την τάξη του ( $N$ ). Και εδώ όμως θα πρέπει να δώσετε ιδιαίτερη προσοχή. Αν ο αριθμός των δειγμάτων γίνει πολύ μεγάλος, τότε ο όγκος των εκτελούμενων πράξεων θα καταστήσει το σύστημα δυσκίνητο. Έτσι λοιπόν, καλό είναι να τον διατηρήσετε όσο το δυνατό πιο μικρό. Το πρόγραμμα εφαρμογής SPECFIL1.EXE, που υπάρχει στο CD-ROM, απαιτεί επίσης και τον καθορισμό της παραμέτρου  $\alpha$  που σχετίζεται με τη συνάρτηση παραθύρου. Στα σχ. 31 και σχ. 32 βλέπουμε το πως επιδρά αυτή η παράμετρος σ' ένα φίλτρο. Οι τιμές που αντιστοιχούν στα τέσ-

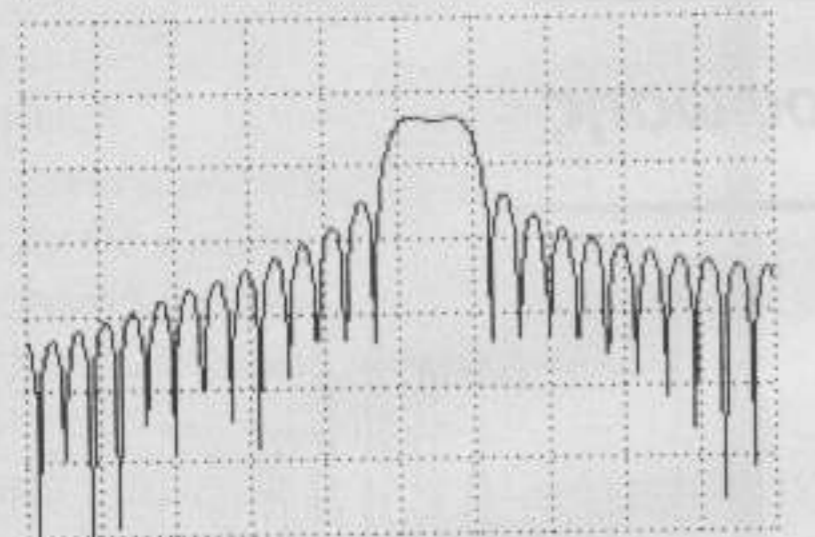
σερα γραφήματα είναι οι 0,1, 3, 5 και 14. Παρατηρήστε ότι, αν η τιμή του  $\alpha$  είναι μικρή, δεν έχουμε στην ουσία καμία μεταβολή. Η καμπύλη που προσδιορίζει τη βηματική απόκριση αναδεικνύει αιχμές και στις δύο πλευρές της κυματομορφής, που στο γράφημα απόκρισης συχνότητας εμφανίζονται σαν λοβοί δεξιά και αριστερά της ζώνης διέλευσης του φίλτρου. Αυξάνοντας την τιμή του  $\alpha$ , μειώνεται το μέγεθος των λοβών, αλλά η απόκριση συχνότητας του φίλτρου δεν θα είναι πια ίδια με την αρχική. Θα διαπιστώσετε δηλαδή, ότι το εύρος ζώνης μεγαλώνει, ενώ οι πλευρές του δεν είναι πλέον τόσο κοφτές. Ο μόνος εναλλακτικός τρόπος για να αντιμετωπίσετε τα παραπάνω προβλήματα είναι η αύξηση της τάξης του φίλτρου.

### Απόκριση φάσης

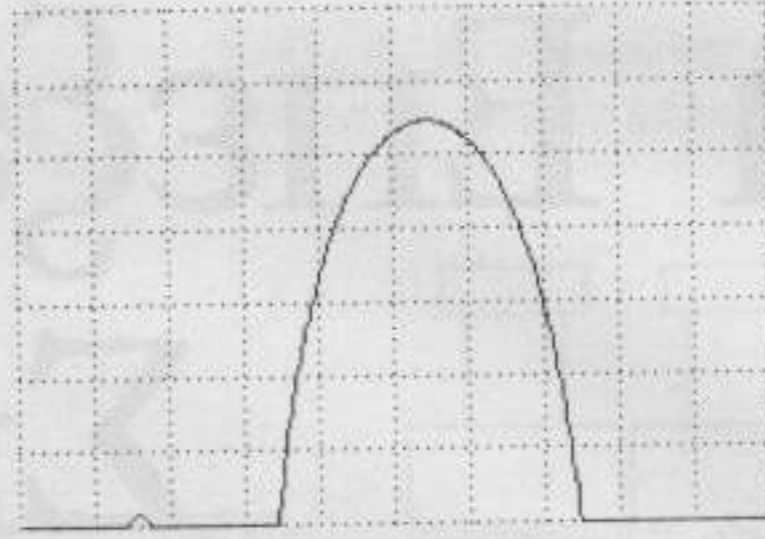
Το πρόγραμμα σχεδίασης που ήδη χρησιμοποιείτε, επιτρέπει τη σχεδίαση φίλτρων με γραμμική απόκριση φάσης. Αυτό, με απλά λόγια, σημαίνει πως όλες οι φασματικές συνι-



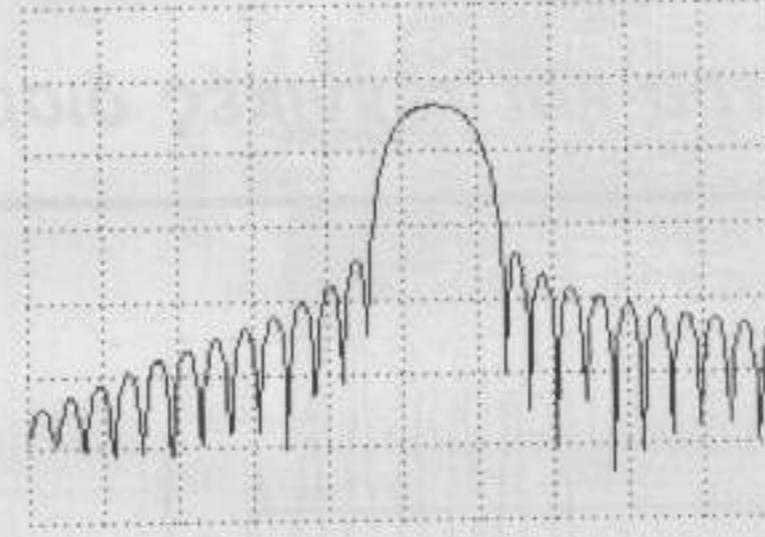
tmpc.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 2000.0 cur = -1.0



tmpa.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 2000.0 cur = -1.0



tmpd.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 2000.0 cur = -1.0



tmpb.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 2000.0 cur = -1.0

980015-5-12

Σχ. 32. Απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές του συντελεστή α.

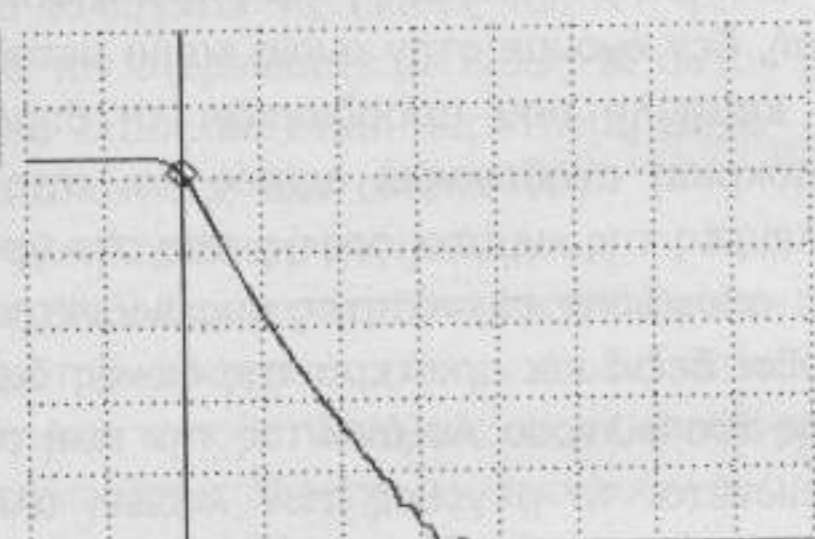
στώσες των σημάτων που διέρχονται μέσα από το φίλτρο καθυστερούν κατά ένα χρονικό διάστημα, που αριθμητικά είναι ίσο με το 1/2 της τάξης του φίλτρου. Αν στη δεύτερη γραμμή του μενού, όπου ορίζονται οι προδιαγραφές του επιθυμητού φίλτρου, πληκτρολογήσετε 'Hilbert' αντί 'Normal', τότε θα πάρετε ένα φίλτρο που θα διατηρεί την ίδια απόκριση συχνότητας, αλλά όλες οι φασματικές συσιστώσες του θα είναι μετατοπισμένες κατά 90. Ένα τέτοιο φίλτρο αποδεικνύεται χρήσι-

μο σε ειδικές περιπτώσεις, όπως θα δούμε αργότερα.

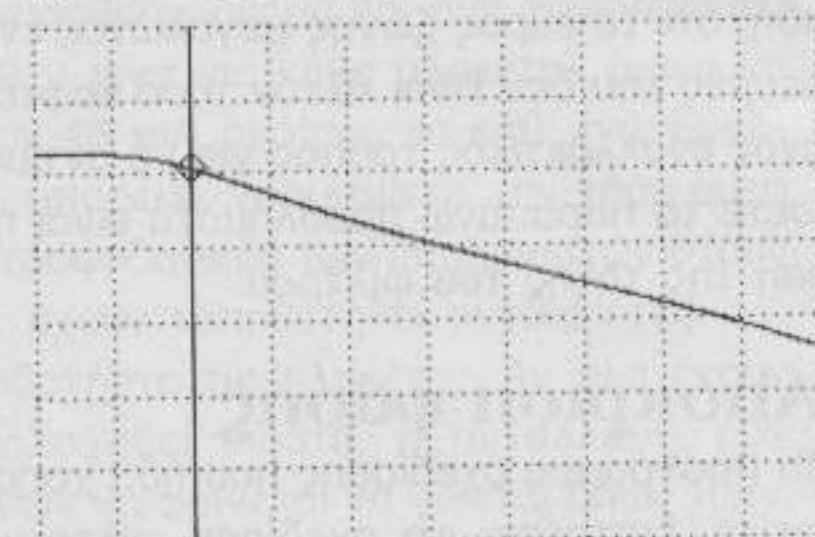
### Φίλτρα FIR

Το σχετικά απλό πρόγραμμα SPECFIL1.E-XE αδυνατεί να προσφέρει πάντα τις καλύτερες λύσεις στις σχεδιάσεις φίλτρων. Τις περισσότερες φορές, μπορούμε να έχουμε αποτελέσματα πολύ πιο κοντά στα επιθυμητά, χρησιμοποιώντας φίλτρα μικρότερης τάξης. Δυστυχώς, η σχεδίαση ενός περισσότερο

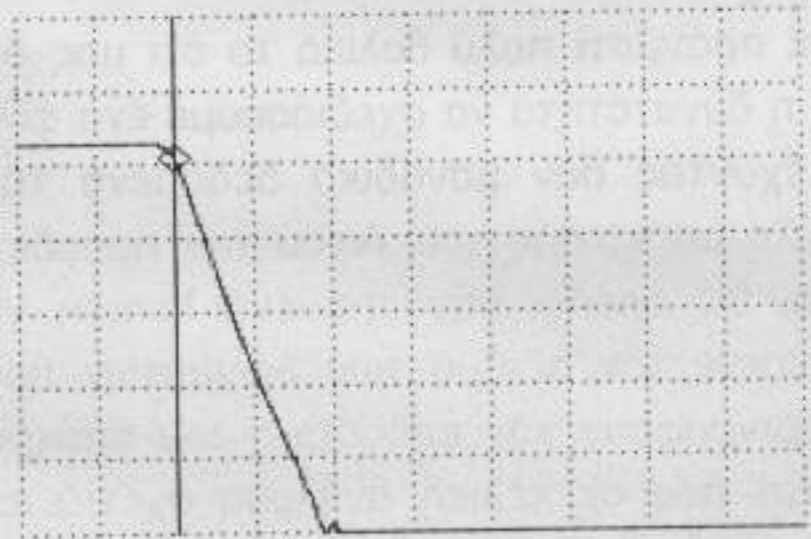
Σχ. 34. Απόκριση συχνότητας φίλτρων Butterworth διαφόρων τάξεων.



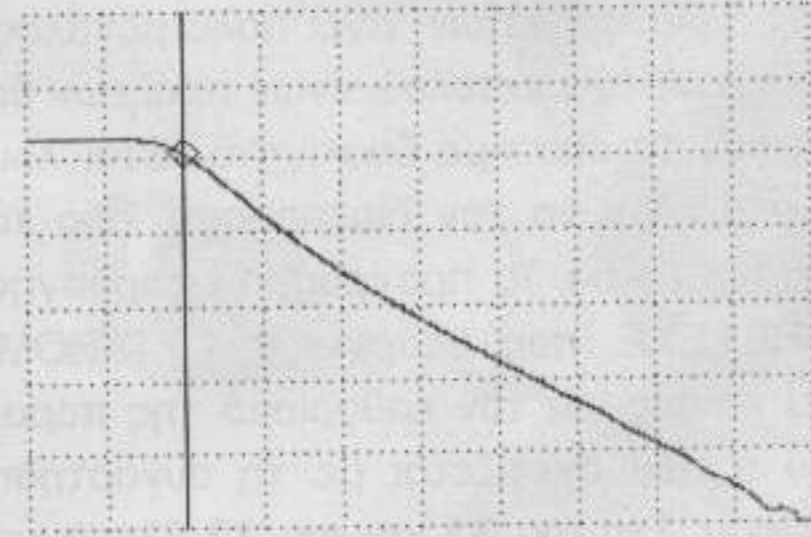
tmp3.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = 800.0



tmp1.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = 800.0



tmp4.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = 800.0



tmp2.uav ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = 800.0

980015-5-14

```

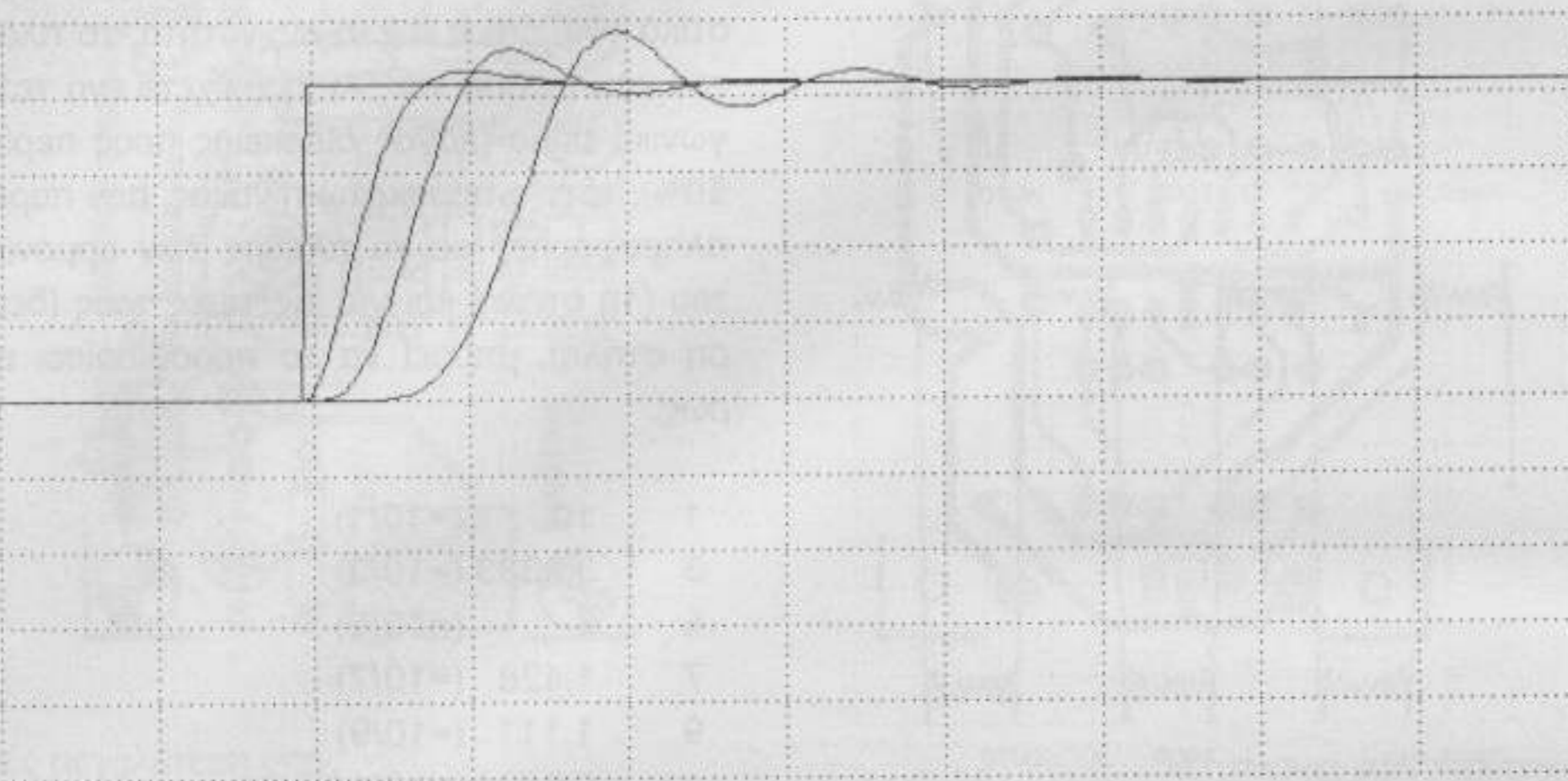
1 cntre=taps-1;
2 mr=0, mx0=dm(i2,m2),
  my0= pm(i7,m7);
3 do fir1 until ce;
4 fir1:mr=mr+mx0 * my0(ss),
  mx0= dm(i2,m2),
  my0= pm(i7,m7);
5 mr=mr+mx0*my0(rnd);
6 if mv sat mr;

```

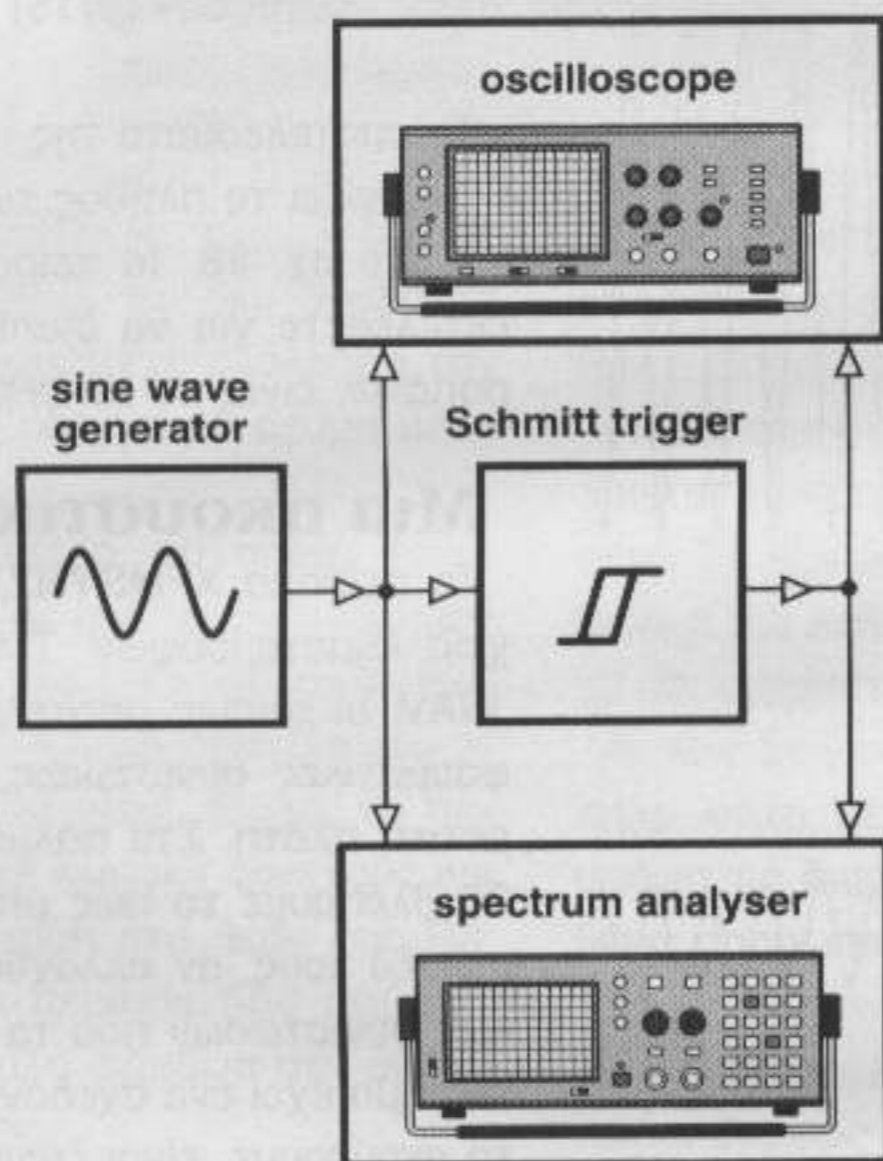
Σχ. 33. Πρόγραμμα για τη σχεδίαση μη περιοδικών φίλτρων FIR.

'αποδοτικού' φίλτρου δεν μπορεί να αναλυθεί στο παρόν άρθρο. Ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία που αναφέρεται στο τέλος αυτού του μέρους. Υπάρχουν επίσης πολλά προγράμματα που διατίθενται στο εμπόριο και τα οποία επιτρέπουν στους επαγγελματίες σχεδιαστές ψηφιακών φίλτρων να κατασκευάσουν φίλτρα υψηλής ποιότητας. Στο σχ. 33 σημειώνεται ένα τμήμα του προγράμματος σχεδίασης φίλτρων FIR, που μπορούν να υλοποιηθούν με τη βοήθεια του DSP ADSP2181 της Analog Devices. Αν χρησιμοποιηθεί κρύσταλλος συχνότητας 16,66 MHz, κάθε μια από τις εντολές του εκτελείται σε χρόνο 30 nsec. Ο εσωτερικότερος βρόγχος (γραμμές 3, 4) διαρκεί 30 nsec περίπου. Έτσι, αν θεωρήσουμε σαν συχνότητα δειγματοληψίας τα 48 KHz, τότε ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων είναι ίσος περίπου με 20 μsec. Αν μάλιστα θέλουμε το φίλτρο αυτό να επεξεργάζεται στερεοφωνικά σήματα, τότε ο χρόνος αυτός υποδιπλασιάζεται, φθάνοντας τα 10 μsec. Αυτές οι διαπιστώσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως αν θέλουμε να φτιάξουμε ένα στερεοφωνικό φίλτρο FIR, θα έχουμε στη διάθεσή μας 10 μsec/30 nsec = 333 στοιχεία καθυστέρησης, κάτι που σε τελική ανάλυση σημαίνει ότι N333. Το παραπάνω συμπέρασμα μας πείθει πως ακόμα και οι πιο σύγχρονοι DSP αδυνατούν να εκτελέσουν ταυτόχρονα όλες εκείνες τις εντολές που σχετίζονται με τόσο ισχυρά φίλτρα. Έτσι λοιπόν το μόνο που μένει, και που κάνουν όλοι οι σχεδιαστές φίλτρων, είναι ο υποβιβασμός της συχνότητας δειγματοληψίας και η όσο το δυνατόν πιο απλή σχεδίαση. Μια εναλλακτική λύση αποτελεί η σχεδίαση φίλτρων IIR αντί FIR, αλλά δυστυχώς τα IIR δεν τα πάνε τόσο καλά με την απόκριση φάσης.

step1.wav 1..250  
 tmp1.wav 1..250  
 tmp2.wav 1..250  
 tmp3.wav 1..250



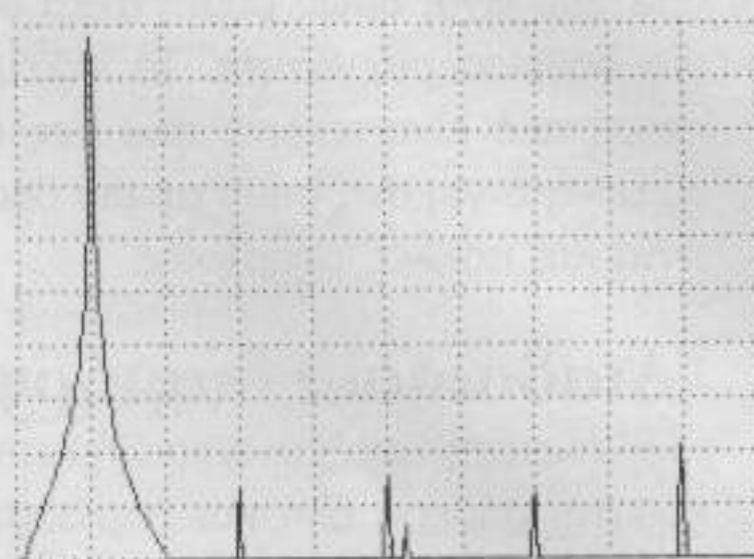
980015 - 5 - 15



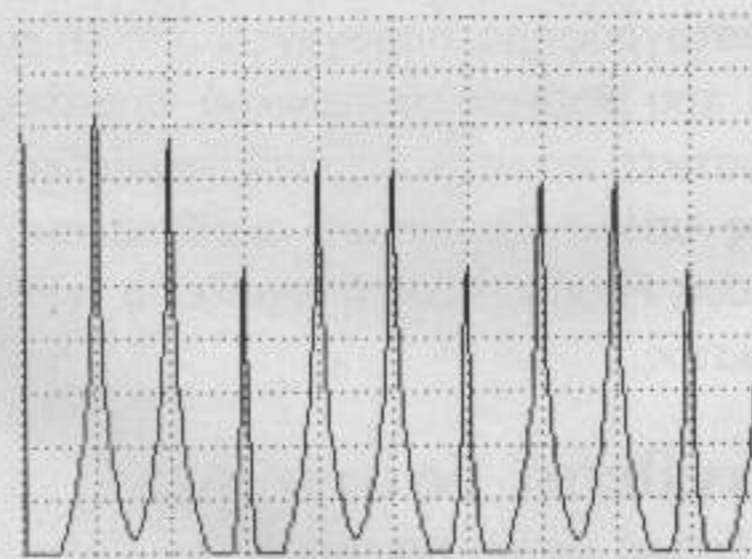
980015 - 5 - 16

Σχ. 36. Ένας συγκριτής με υστέρηση παράγει ορθόγωνιο σήμα.

Σχ. 37. Φάσματα ενός ημιτονικού και ενός ορθογώνιου σήματος.



tmp.wav (ω) ya = 0.0 yb = 130.0  
 fa = 0.0 fb = 4410.0 cur = -1.0



tmp1.wav (ω) ya = 0.0 yb = 130.0  
 fa = 0.0 fb = 4410.0 cur = -1.0

980015 - 5 - 18

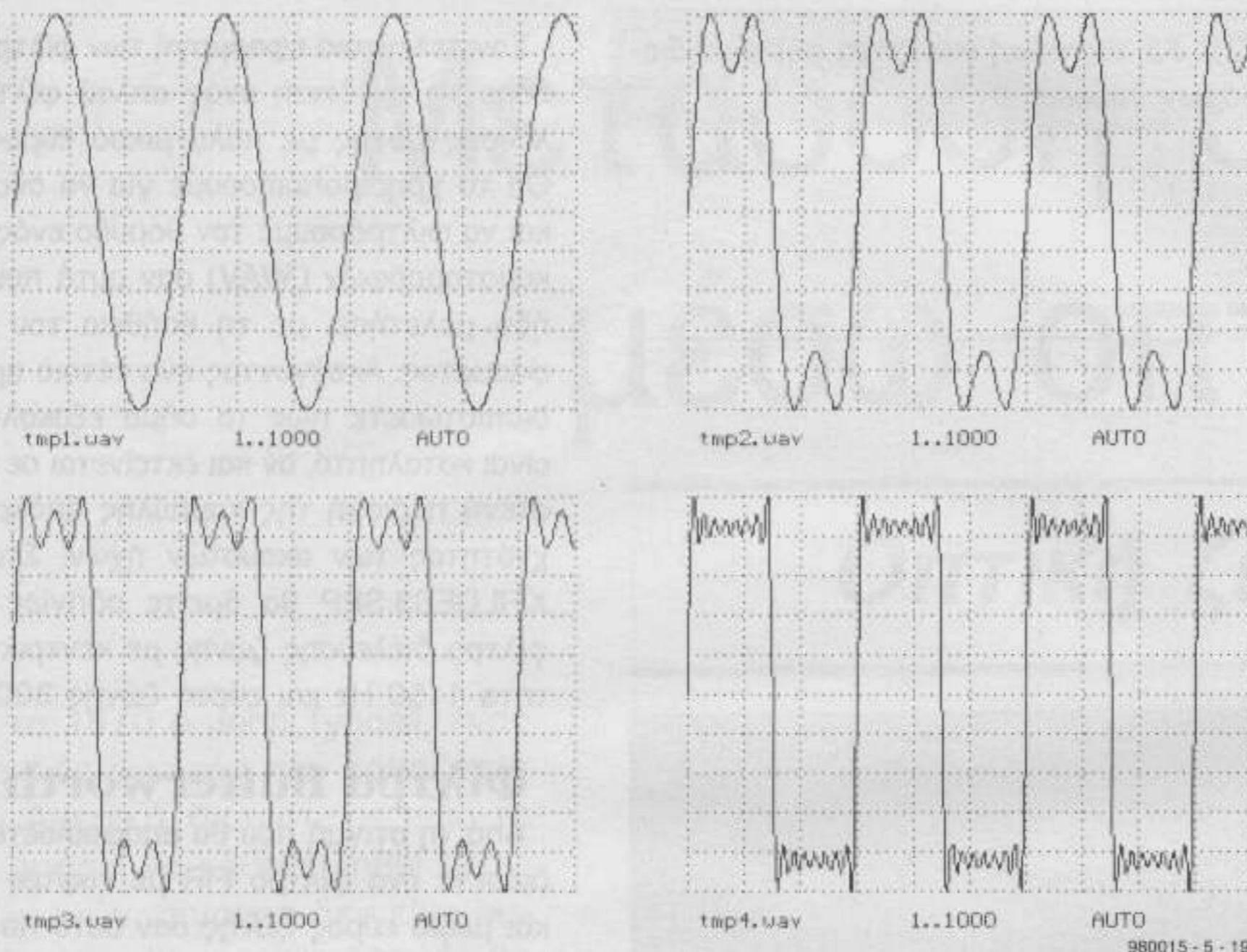
Σαν τελευταία εφαρμογή των φίλτρων αφήσαμε τη σχεδίαση ενός απλού φίλτρου διέλευσης ζώνης με πολύ μικρό εύρος ζώνης. Θα το χρησιμοποιήσουμε για να αναλύσουμε και να φιλτράρουμε τον θόρυβο ενός αρχείου κυματομορφών (.WAV) σαν αυτά που έχουμε ήδη μελετήσει με τη βοήθεια του αναλυτή φάσματος. Ακούγοντας ένα τέτοιο αρχείο, θα διαπιστώσετε πως το σήμα εξακολουθεί να είναι καταληπτό, αν και εκτείνεται σε μια πολύ στενή περιοχή της καμπύλης απόκρισης συχνότητας των ακουστών ήχων. Στο αρχείο XFILDES3.SPP θα βρείτε οδηγίες για ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης με κεντρική συχνότητα 1150 Hz και εύρος ζώνης 300 Hz.

## Φίλτρα Butterworth

Από τη στιγμή που θα αποφασίσετε να σχεδιάσετε ένα φίλτρο FIR με κοφτές πλευρές και μικρό εύρος ζώνης σαν αυτό που αναφέραμε στην αρχή του άρθρου, θα διαπιστώσετε πόσο μεγάλος είναι ο όγκος των αριθμητικών πράξεων που πρέπει να εκτελεί ο DSP.

Αν ειδικότερα, θέλετε να σχεδιάσετε φίλτρα διέλευσης χαμηλών, είναι καλύτερο να χρησιμοποιήσετε το πρόγραμμα BUTTER1.PAS, που επιτρέπει την εξομοίωση κοφτών φίλτρων IIR με μικρό εύρος ζώνης. Θυμίζουμε ότι τα φίλτρα IIR είναι πολύ γρηγορότερα από τα FIR. Το πόσο κοφτές θα είναι οι πλευρές του γραφήματος απόκρισης συχνότητας των φίλτρων αυτών, εξαρτάται από την τάξη τους (που πρέπει να είναι ζυγός αριθμός). Η δεύτερη παράμετρος είναι η συχνότητα αποκοπής. Οι καμπύλες απόκρισης συχνότητας που παράγονται από το αρχείο XBUTTER2.SPP, για συχνότητα αποκοπής 800 Hz, συχνότητα δειγματοληψίας 11.025 KHz και τάξη φίλτρου 2, 4, 8 και 12 φαίνονται στο σχ. 34. Η απόκριση και των τεσσάρων διαφορετικών φίλτρων είναι επίπεδη μέχρι τη συχνότητα αποκοπής, χωρίς δηλαδή καμία διακύμανση, αλλά η εξασθένηση γίνεται μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται η τάξη του φίλτρου. Οι βηματικές αποκρίσεις που χαρακτηρίζουν τα ίδια φίλτρα για τις τάξεις 2, 4 και 8, όπως παράγονται από το XBUTTER1.SPP, φαίνονται στο σχ. 35. Παρατηρήστε ότι όσο αυξάνεται η τάξη του φίλτρου, αυξάνονται επίσης οι αναπηδήσεις και ο χρόνος ανόδου.

Άλλοι τύποι φίλτρων, όπως οι Chebishev και Butler, που είναι γνωστοί από τα αναλογικά τους ισοδύναμα, μπορούν να εξομοιωθούν επίσης από τα ολοκληρωμένα DSP. Δυστυχώς, ο περιορισμένος αριθμός των σελίδων του περιοδικού μας απαγορεύει να κάνουμε μια έστω σύντομη παρουσίασή τους. Οι αναγνώστες που θα θελήσουν να ασχοληθούν μ' αυτά, παραπέμπονται στη βιβλιογραφία που σημειώνεται στο τέλος του παρόντος μέρους.



**Σχ. 38. Φασματογραφήματα ορθογώνιων σημάτων με πολλές αρμονικές.**

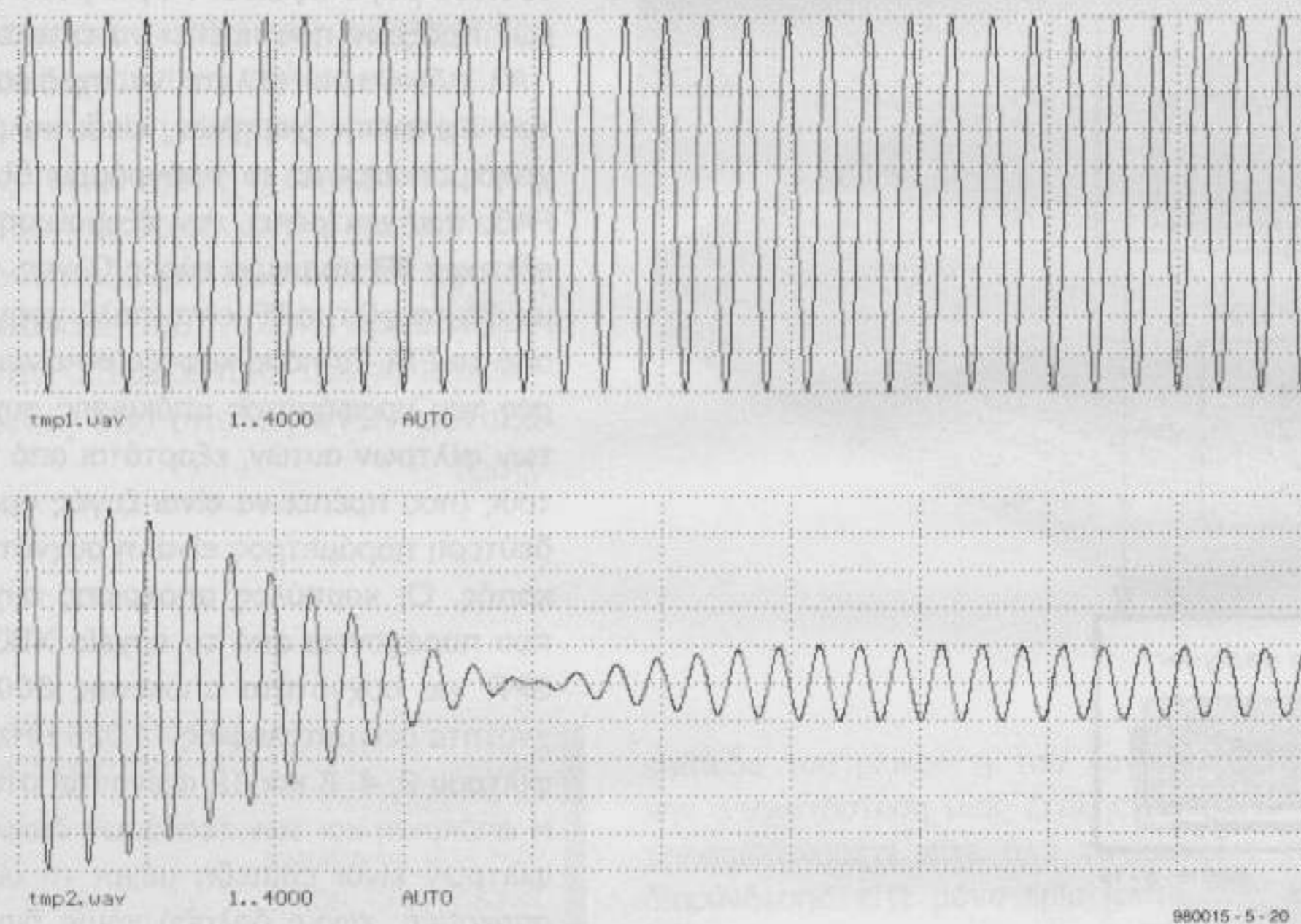
δοσμένος ένας κατάλογος από τα χαρακτηριστικά του, όπως π.χ. η συχνότητα, το πλάτος του και η φάση του. Αν π.χ. έχετε ένα τετραγωνικό σήμα (λόγος διάρκειας προς περίοδο 50%), τότε ο παρακάτω πίνακας, που παρέχει πληροφορίες για το πλήθος των αρμονικών του (1η στήλη) και για τις τιμές τους (δεύτερη στήλη), μπορεί να το προσδιορίσει πλήρως.

1	10	(=10/1)
3	3,3333	(=10/3)
5	2	(=10/5)
7	1,428	(=10/7)
9	1,111	(=10/9)
11	0,9090	(=10/11)
13	0,7692	(=10/13)
15	0,6666	(=10/15)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Fourier που υπολογίζει το πλήθος των αρμονικών, φαίνεται στο **σχ. 38**. Το πείραμα που μπορείτε να εκτελέσετε για να διαπιστώσετε όλα τα παραπάνω, είναι το XFORU2.SPP.

### Μια ακουστική δοκιμή

Το πείραμα XFMSYN2.SPP παράγει τα αρχεία κυματομορφών TMP1.WAV και TMP2.WAV, οι οποίες αποτελούνται από τις ίδιες φασματικές συνιστώσες, αλλά έχουν διαφορετικά πλάτη. Στα παλμογραφήματα του **σχ. 39** βλέπουμε το πως μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους, αν αλλαχθεί η φάση των βασικών συνιστωσών που τα αποτελούν. Το πρώτο σήμα έχει ένα σχεδόν σταθερό πλάτος. Αν το ακούσουμε, είναι ζήτημα αν θα προσέξουμε μια μικρή αυξομείωση της έντασής του λόγω μιας χαμηλής διαμόρφωσης που εμπεριέχει. Αν φυσικά ακούσουμε το TMP2.WAV, οι μεγάλες αυξομειώσεις του πλάτους του θα γίνουν σίγουρα αντιληπτές. Το σήμα TMP1.WAV αντιπροσωπεύει ένα σήμα VHF/FM το οποίο έχει διαμορφωθεί ελάχιστα κατά πλάτος. Χαρακτηρίζεται από ένα γραμμικό φάσμα που είναι όμως συμμετρικό σε σχέση με μια δοθείσα συχνότητα. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι εκείνο που μας απαγορεύει να μιλάμε για ένα σήμα με μια βασική συχνότητα και πολλές αρμονικές.



**Σχ. 39. Σήματα με ίδια πλάτη αλλά διαφορετικές φάσεις.**

### Περιοδικά σήματα

Αν επιχειρήσετε να μελετήσετε στον αναλυτή φάσματος διάφορα περιοδικά σήματα, θα διαπιστώσετε πως αποτελούνται από φασματικές συνιστώσες των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους τους. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με το μαθηματικό αξίωμα, που διατείνεται πως κάθε περιοδικό σήμα αποτελείται από ένα σήμα βασικής συχνότητας και ένα σύνολο από αρμονικές. Ας πραγματοποιήσουμε όμως το πείραμα που φαίνεται στο **σχ 36**. Στο σχήμα αυτό, το σήμα μιας γεννήτριας

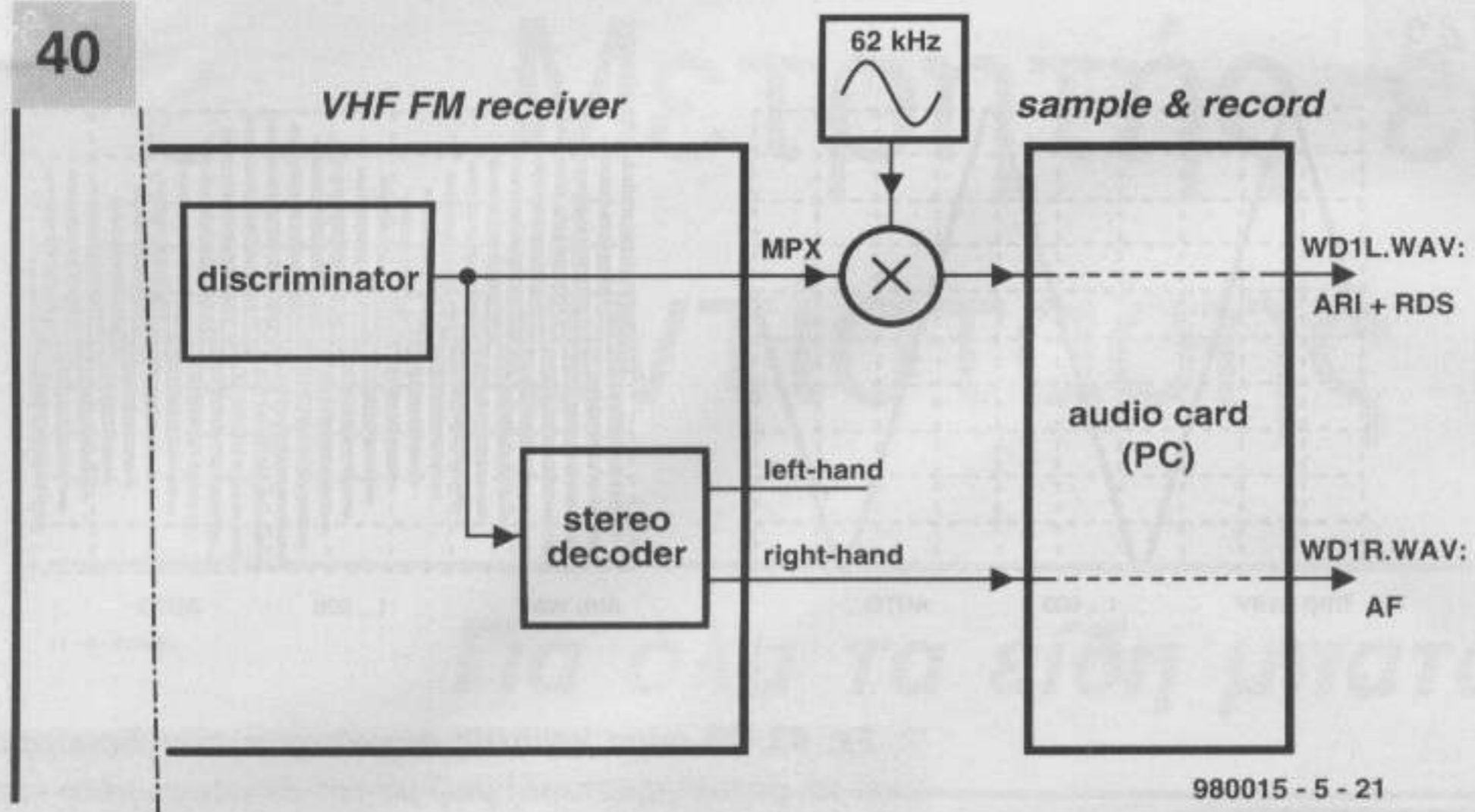
ημιτονικών σημάτων μετατρέπεται με τη βοήθεια ενός συγκριτή υστέρησης (Schmitt Trigger) σε ένα ορθογώνιο, το φάσμα του οποίου φαίνεται στο **σχ. 37** (πείραμα XFOUR1.SPP). Όλες οι συχνότητες που σημειώνονται στο φασματογράφημα, παράγονται από τη συχνότητα του βασικού ημιτονικού σήματος. Οι φασματικές συνιστώσες ενός περιοδικού σήματος υπολογίζονται με ακρίβεια από την ανάλυση Fourier που εφαρμόζει ο αναλυτής φάσματος.

### Σύνθεση Fourier

Το βασικό μενού που θα αναγνωρίσετε μόλις 'τρέξετε' το πρόγραμμα του CD-ROM, περιλαμβάνει μια επιλογή η οποία σας επιτρέπει να προσδιορίζετε ένα σήμα όταν είναι

### Διαδικασία διαμόρφωσης

Η Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος χρησιμοποιείται σήμερα όλο και περισσότερο στους ραδιοφωνικούς δέκτες. Τα κινητά τηλέφωνα π.χ. χρησιμοποιούν πολύπλοκες τεχνικές διαμόρφωσης, που είναι δυνατές μόνο με τις τακτικές της ψηφιακής επεξεργασίας. Κρίνου-



980015 - 5 - 21

Σχ. 40. Διάγραμμα στο οποίο φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η καταγραφή ενός ραδιοφωνικού σήματος που περιέχει πληροφορίες ARI (Autofahrer Rundfunk Informationen = Πληροφορίες κίνησης για αυτοκινητιστές) και RDS (Radio Data System = Σύστημα ραδιοεκπομπής δεδομένων).

με λοιπόν επιτακτική την ανάγκη να παρουσιάσουμε μερικές από τις μεθόδους διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης, που αν και γνωστές, σίγουρα αξίζει να τις μελετήσουμε από την πλευρά των φασμάτων.

### Το Βασικό υλικό

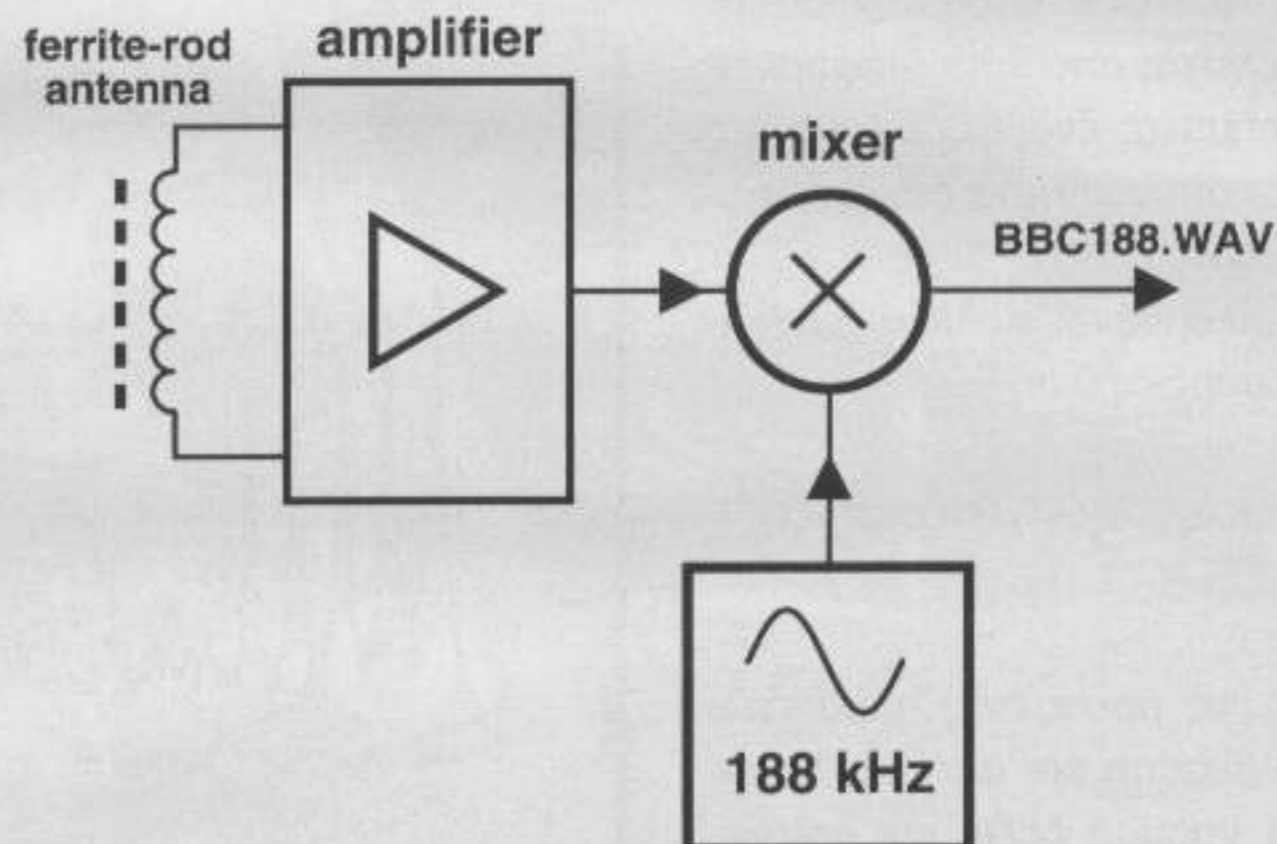
Στην προσπάθειά μας να κρατήσουμε αυτή τη σειρά άρθρων όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πράξη, θα βασιστούμε σε γνώσεις και δεδομένα που είναι ευρέως γνωστά. Η διάταξη που φαίνεται στο σχ. 40 παράγει τα αρχεία κυματομορφών WD1L.WAV και WD1R.WAV. Σε πολλές χώρες, οι πομποί ραδιοφωνίας στα VHF (FM) εκπέμπουν, εκτός από το κανονικό πρόγραμμα, και έναν ακόμα συμπιεσμένο φορέα συχνότητας 57 KHz διαμορφωμένο κατά πλάτος (AM). Ο φορέας αυτός μεταφέρει συνήθως στοιχεία για την κίνηση στους δρόμους (σύστημα ARI). Την ίδια στιγμή, μέσω του ίδιου φορέα που διαμορφώνεται και κατά φάση (PM), μεταφέρονται και σήματα RDS. Για να γίνει δυνατή η δειγματοληψία αυτών των σημάτων στον δέκτη, το φέρον των 57 KHz μετατρέπεται με τη βοήθεια ενός σταθερού σήματος σε σήμα 5 KHz 2 KHz. Το σήμα αυτό είναι εκείνο που έχει αποθηκευτεί στο αρχείο κυματομορφών WD1R.WAV.

### BBC: AM και PM

Τη διαμόρφωση πλάτους μπορούμε να τη μελετήσουμε καλύτερα, με τη βοήθεια του ραδιοφωνικού σήματος που εκπέμπει το BBC στους 198 KHz. Το φέρον αυτού του σήματος υφίσταται μίξη με ένα σήμα 188 KHz, παράγοντας σήμα 10 KHz (σχ. 41) το οποίο μπορούμε να το δειγματοληψήσουμε με ρυθμό 44,1 KHz. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να ελέγξουμε τη διαμόρφωση πλάτους ακόμα και με τα αυτιά μας (!)

Αυτό που είναι ακόμα πιο ενδιαφέρον είναι ότι το φέρον των 198 KHz διαμορφώνεται επίσης και κατά φάση, ώστε να μπορεί να

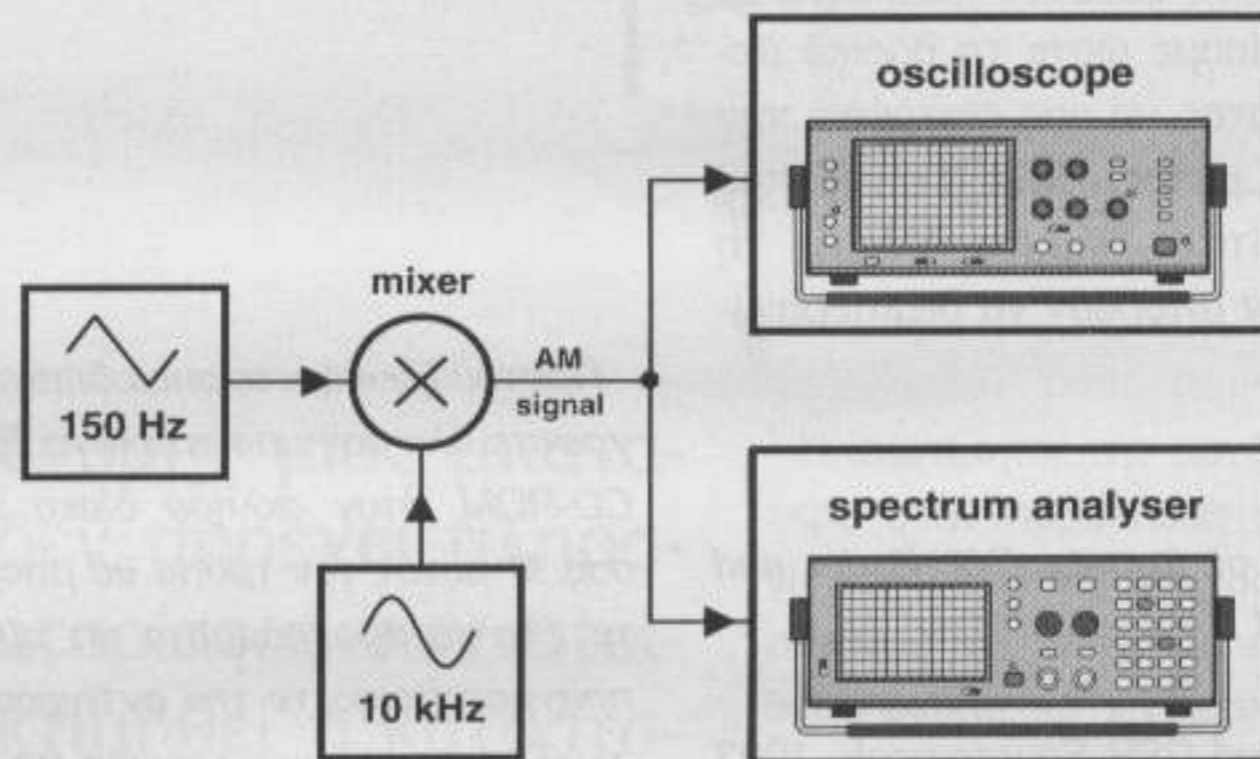
41



980015 - 5 - 22

Σχ. 41. Διάταξη για την παραγωγή σήματος AM.

42



980015 - 5 - 23

μεταφέρει πληροφορία ελέγχου. Ένα τέτοιο σήμα περιλαμβάνεται στο αρχείο BBC188.WAV.

### Διαμόρφωση πλάτους

Στη διαμόρφωση πλάτους, το σήμα  $s(t)$  το οποίο προορίζεται να διαμορφώσει τον φορέα  $f_c$  ( $\omega_c = 2\pi f_c$ ) υπερτίθεται πάνω σ' αυτόν. Στην περίπτωση που το σήμα του φορέα είναι συνημιτονικό, το εκπεμπόμενο σήμα έχει τη μορφή:

$$x(t) = [C + Ms(t)]\cos(\omega_c t)$$

Σχ. 42. Καταγραφή ενός σήματος AM.

όπου με  $C$  συμβολίζουμε το πλάτος του φορέα και με  $M$  το βάθος διαμόρφωσης.

Συνήθως, η  $f_c$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερη απ' όλες τις συχνότητες που περιέχονται στο  $s(t)$ . Οι εξομοιώσεις που χρησιμοποιούμε σ' αυτό το άρθρο βασίζονται σε σχετικά χαμηλές συχνότητες φορέα (της τάξης των 10 KHz). Αυτό σημαίνει πως στη θέση του σήματος  $s(t)$  χρησιμοποιούνται πολύ χαμηλές ακουστικές συχνότητες.

Στο πείραμα XAM1.SPP, όπως φαίνεται στο σχ. 42, ένα φέρον συχνότητας 2 KHz διαμορφώνεται μ' ένα τριγωνικό σήμα συχνότητας 150 Hz. Το τριγωνικό σήμα  $s(t)$  φαίνεται στο σχ. 43 (αριστερά), μαζί με τον κατά πλάτος (AM) διαμορφωμένο φέρον (δεξιά). Τα φάσματα των δύο αυτών σημάτων φαίνονται στο σχ. 44. Παρατηρήστε ότι στο φάσμα του διαμορφωμένου φορέα δεξιά και αριστερά από την κεντρική συχνότητα εμφανίζονται οι πλευρικές συχνότητες που χαρακτηρίζουν κάθε σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος. Η ύπαρξη των πλευρικών μπορεί να εξηγηθεί και με τη βοήθεια της σχέσης που περιγράφει τη διαμόρφωση:

$$[C + M \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t) = C \cos(\omega_c t) + M/2 \cos[(\omega_c - \omega_m)t] + M/2 \cos[(\omega_c + \omega_m)t]$$

Μέσα απ' αυτήν φαίνεται καθαρά πως το τελικό σήμα αποτελείται από τρία διαφορετικά συνημιτονικά σήματα: ένα φέρον και τις δύο πλευρικές που απέχουν μια συγκεκριμένη απόσταση από αυτό.

Το σήμα  $s(t)$  περιλαμβάνει πολλές συνημιτονοειδείς κυματομορφές:

$$s(t) = a_0 \cos(\omega_0 t) + a_1 \cos(\omega_1 t) + a_2 \cos(\omega_2 t) + \dots$$

Κάθε ένας από τους όρους της παραπάνω σχέσης αντιπροσωπεύεται και από μια ξεχωριστή κατακόρυφη γραμμή δεξιά και αριστερά απ' αυτήν του φορέα. Για να μπορέσετε να μελετήσετε όσο το δυνατόν καλύτερα τα σήματα AM, φροντίσαμε ώστε το βασικό μενού του προγράμματος να σας επιτρέπει την κλήση του προγράμματος AMGEN1.EXE που παράγει τα απαραίτητα σήματα AM, με τη βοήθεια των οποίων μπορούν να διεκπεραιωθούν τα πειράματα.

#### Αναφορές

*Digital Processing of Signals, C.M. Rader and B. Gold, McGraw-Hill*

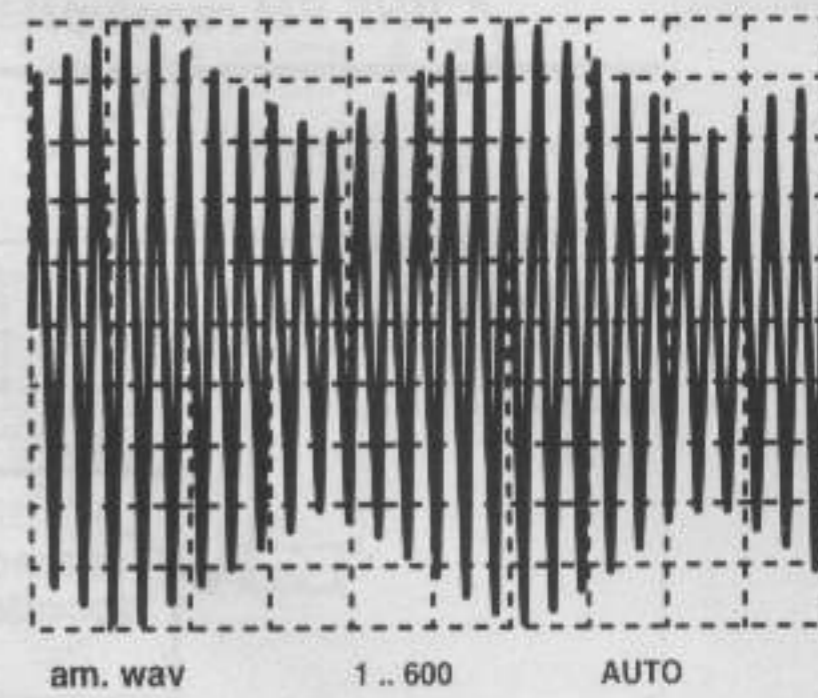
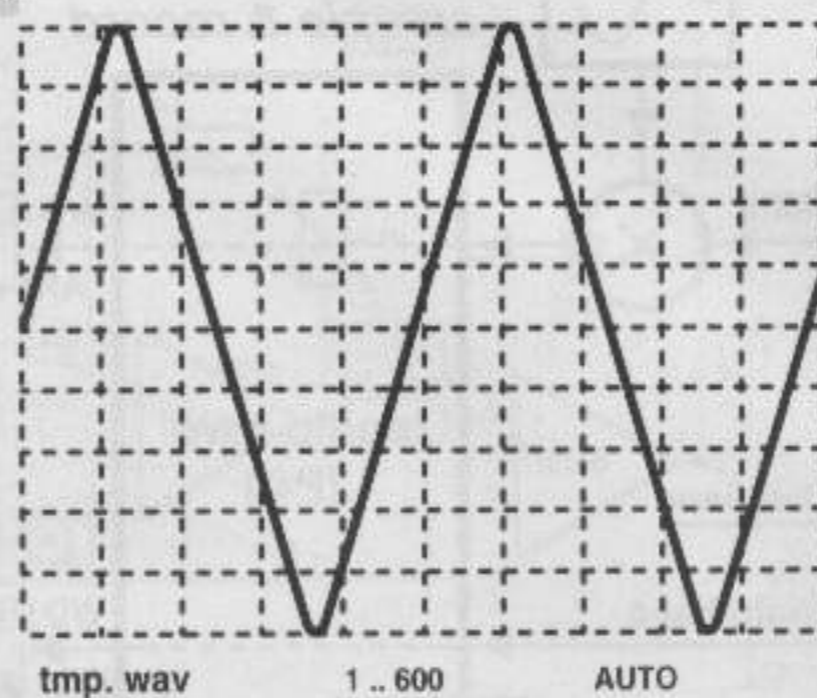
*Analog Interface and DSP Source-book, 1993 ISBN 0 07 707694 X, Alan Clements, McGraw-Hill*

*Communications Technology Hand-book, 1997 ISBN 0 240 51461 0, Geof Lewis, Focal Press*

*Digital Audio Signal Processing, 1997 ISBN 0 471 97226 6, Udo Zolzer, Wiley*

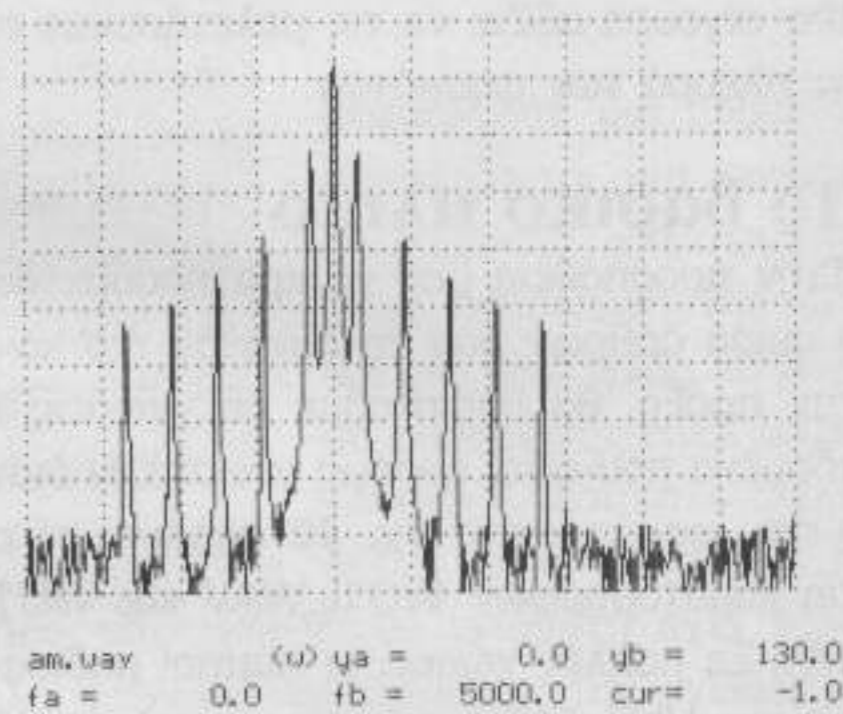
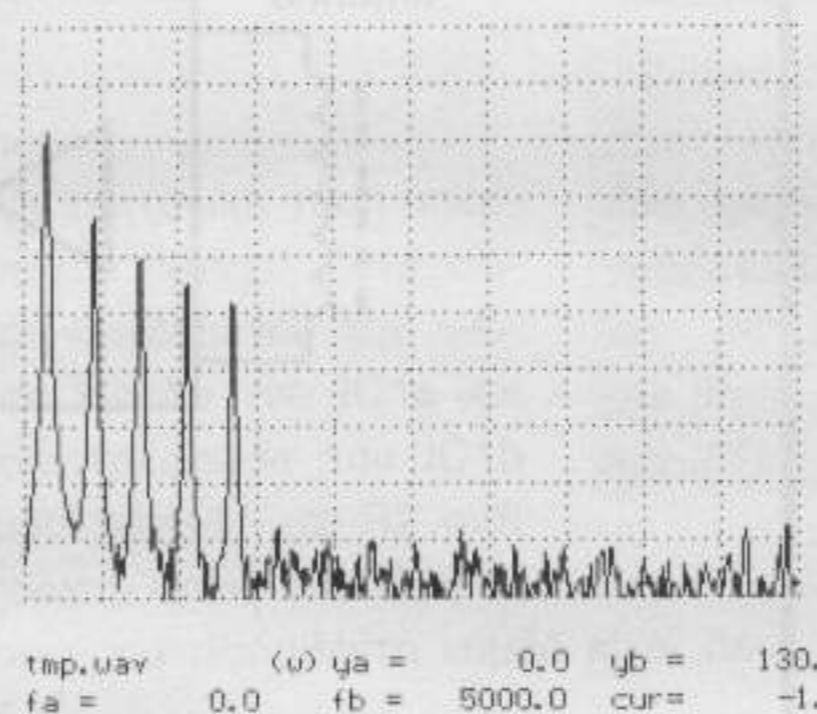
*Digital Systems Reference Book, 1991 ISBN 0 7506 1008 5 B. Holdsworth & G.R. Martin Butterworth-Heinemann*

43



Σχ. 43. Το σήμα χαμηλής συχνότητας που διαμορφώνει το φέρον (αριστερά) μαζί με τον διαμορφωμένο κατά πλάτος (AM) φορέα (δεξιά).

44



Σχ. 44. Φάσμα του σήματος που διαμορφώνει το φέρον (αριστερά) και του διαμορφωμένου φέροντος (δεξιά).

Προτού ξεκινήσετε οποιοδήποτε πείραμα, αντιγράψτε όλο τον υποκατάλογο 'Espresso' από το CD-ROM, στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή σας. Μ' αυτόν τον τρόπο θα μπορείτε να τρέχετε όλα τα προγράμματα απ' αυτόν. Το πως θα πραγματοποιήσετε την αντιγραφή, εξηγείται με ακρίβεια στο αρχείο 'readme' που περιέχεται στο CD-ROM.

Όταν αντιγράφετε ένα ή περισσότερα αρχεία μέσα από το περιβάλλον των Windows, μαζί μ' αυτά αντιγράφεται και ο χαρακτηρισμός 'Read Only' (Μόνο για Ανάγνωση). Σε μερικά από τα προγράμματα που περιέχονται στον κατάλογο 'Espresso', ο χαρακτηρισμός αυτός ίσως προξενήσει προβλήματα, τα οποία θα γίνουν αντιληπτά είτε με τα σχετικά παράθυρα σφαλμάτων που θα ανοίγονται, είτε με την πλήρη απουσία εικόνας από την οθόνη του υπολογιστή. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να λυθούν αν, με τη βοήθεια του 'Εξερευνητή' ('Explorer') των Windows, επιλέξετε όλα τα αρχεία του υποκαταλόγου

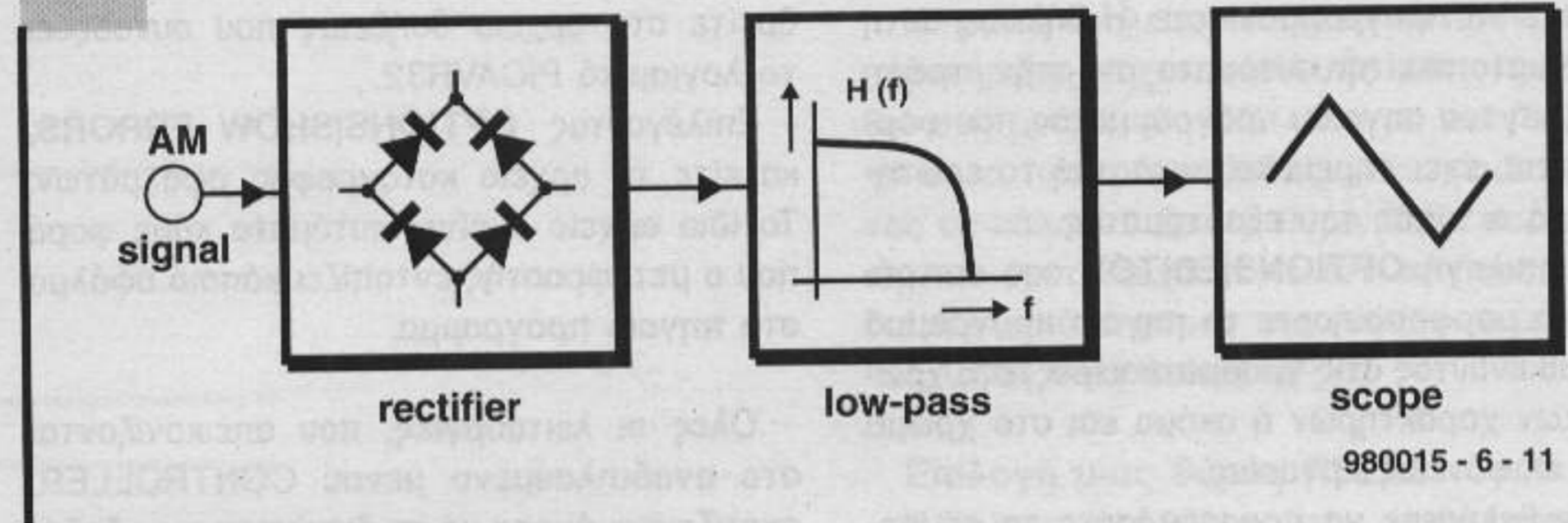
'Espresso', όπως αυτά έχουν αντιγραφεί στον σκληρό δίσκο, και απενεργοποιήσετε τον χαρακτηρισμό 'Μόνο για Ανάγνωση' (επιλέξτε τα αρχεία και με το ποντίκι ενεργοποιήστε τις επιλογές Αρχείο/Ιδιότητες, ακυρώνοντας κατόπιν το 'τσεκάρισμα' δίπλα στο σχετικό χαρακτηρισμό). Αφού κάνετε τα παραπάνω, πατήστε OK και όλα από εδώ και πέρα θα λειτουργούν κανονικά.

# Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων

## Μέρος 6<sup>ο</sup> Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση

45

Στην 6<sup>η</sup> και τελευταία συνέχεια της σειράς, θα ασχοληθούμε με τις διαδικασίες της διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης.



Σχ. 45. Βασικές αρχές της αποδιαμόρφωσης.

### Αποδιαμόρφωση περιβάλλουσας

Για τα σήματα που είναι διαμορφωμένα κατά πλάτος (AM), ο όρος 'αποδιαμόρφωση' υποδηλώνει την διαδικασία μέσω της οποίας εξάγεται από το διαμορφωμένο σήμα η πληροφορία που μεταφέρει. Για να γίνει αυτό, απαιτείται η ανόρθωση του φορέα υψηλής συχνότητας και η οδήγηση του ανορθωμένου σήματος σ' ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών (σχ. 45). Για την αποδιαμόρφωση του σήματος που πρωτοαναφέραμε στην προηγούμενη συνέχεια (Μέρος 5), βασισθήκαμε στο πείραμα MOD3.SPP. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στο σχ. 46. Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών είναι απαραίτητο για την απόρριψη των ανεπιθύμητων φασματικών συνιστωσών.

### Ξανά το BBC

Ο αποδιαμορφωτής, που αναφέραμε παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αποδιαμόρφωση του ραδιοφωνικού σήματος που εκπέμπει το BBC στους 198 KHz. Στην εφαρμογή μας, το σήμα αυτό (BBC188.WAV) υφίσταται μίξη με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή (LO) που παρέχει σήμα συχνότητας 188 KHz. Το αποτέλεσμα είναι ένα σήμα ενδιάμεσης συχνότητας 10 KHz. Η διαδικασία της μίξης επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του αρχείου XDEMOD3.SPP, ενώ το αποτέλεσμα, που είναι σήμα ακουστικής συχνότητας, είναι αποθηκευμένο στο αρχείο TMP4.WAV. Μελετώντας το φάσμα του αρχείου BBC188.WAV

(πείραμα XDEMOD2B), θα παρατηρήσουμε μία κορυφή στη συχνότητα των 10 KHz. Η κορυφή αυτή αντιπροσωπεύει το σήμα ενδιάμεσης συχνότητας (IF) που προήλθε από τη μετατροπή. Παρατηρούμε ακόμα και μια λιγότερο έντονη κορυφή στην περιοχή των 5 KHz.

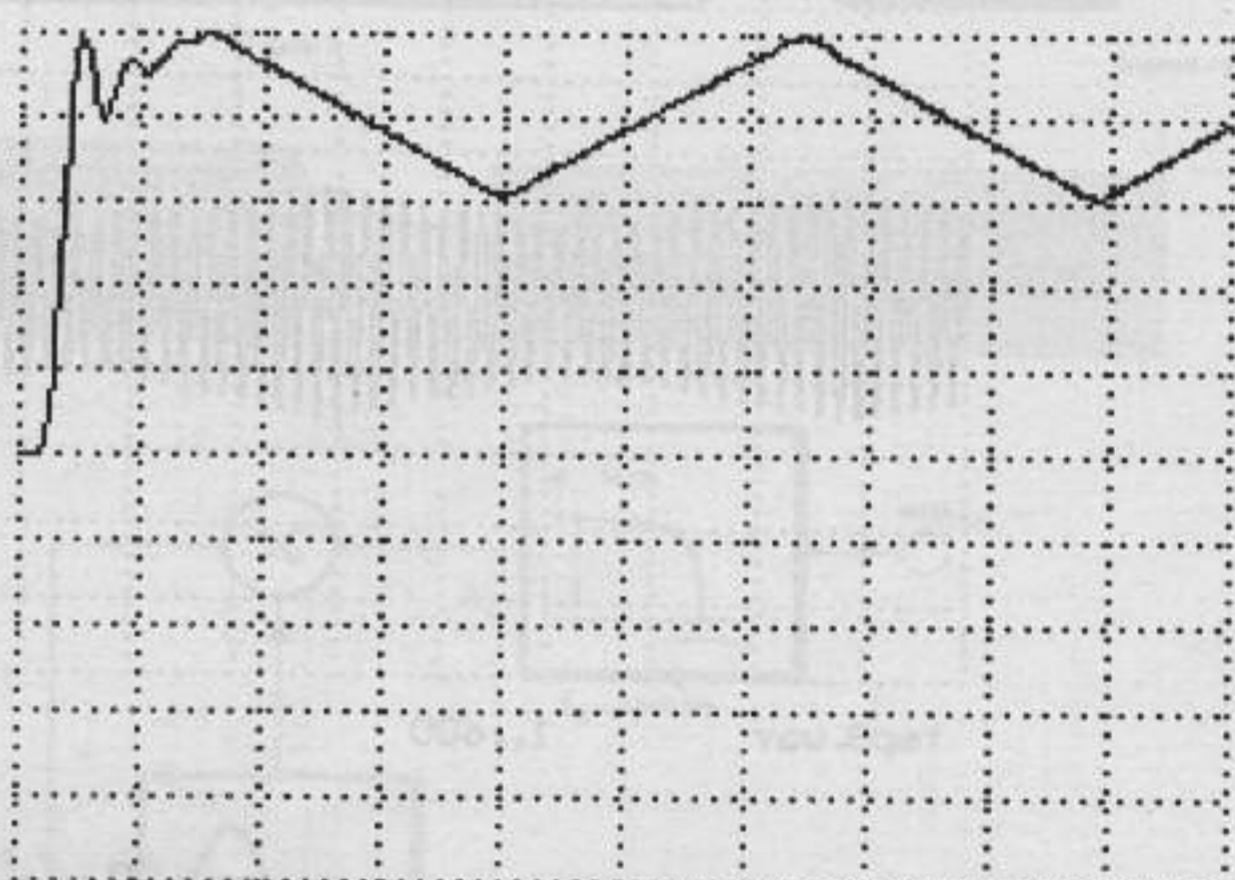
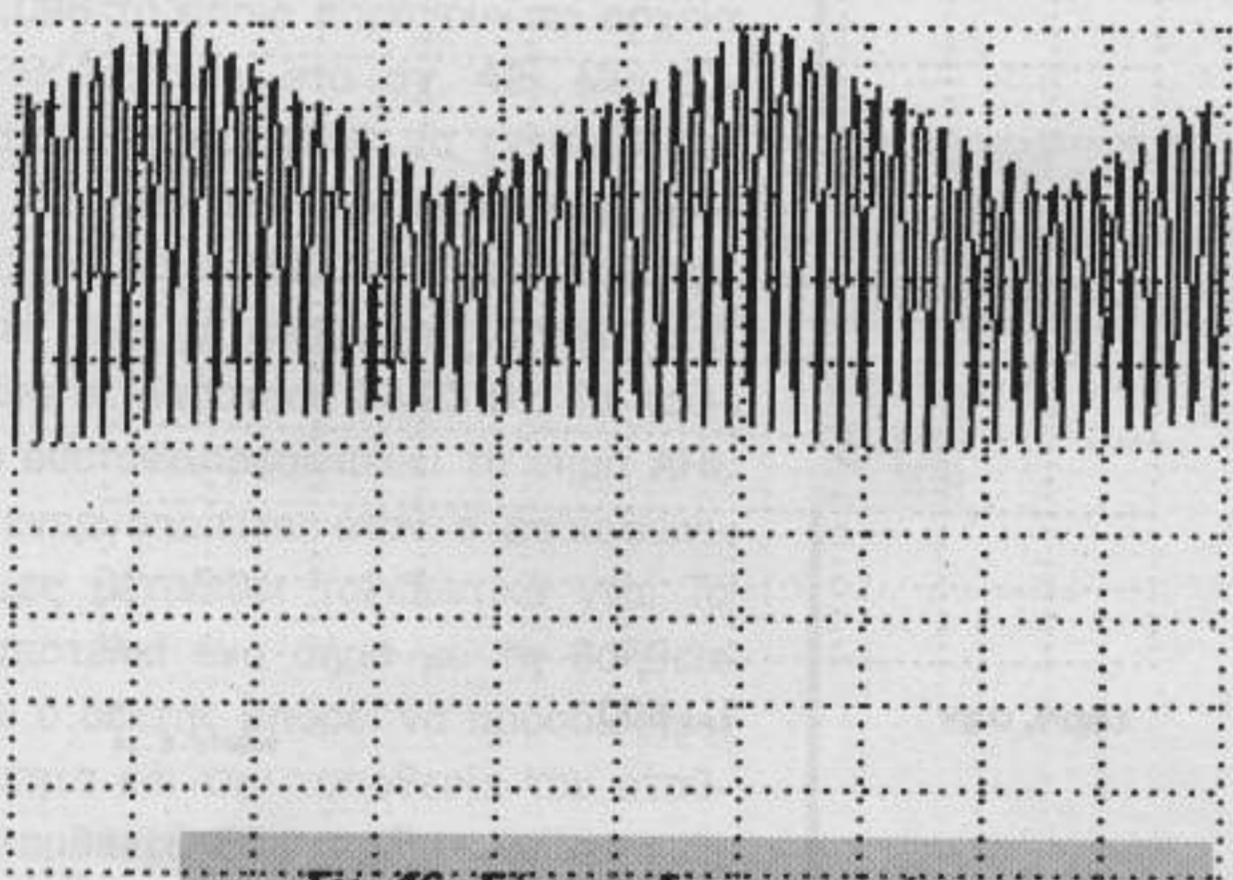
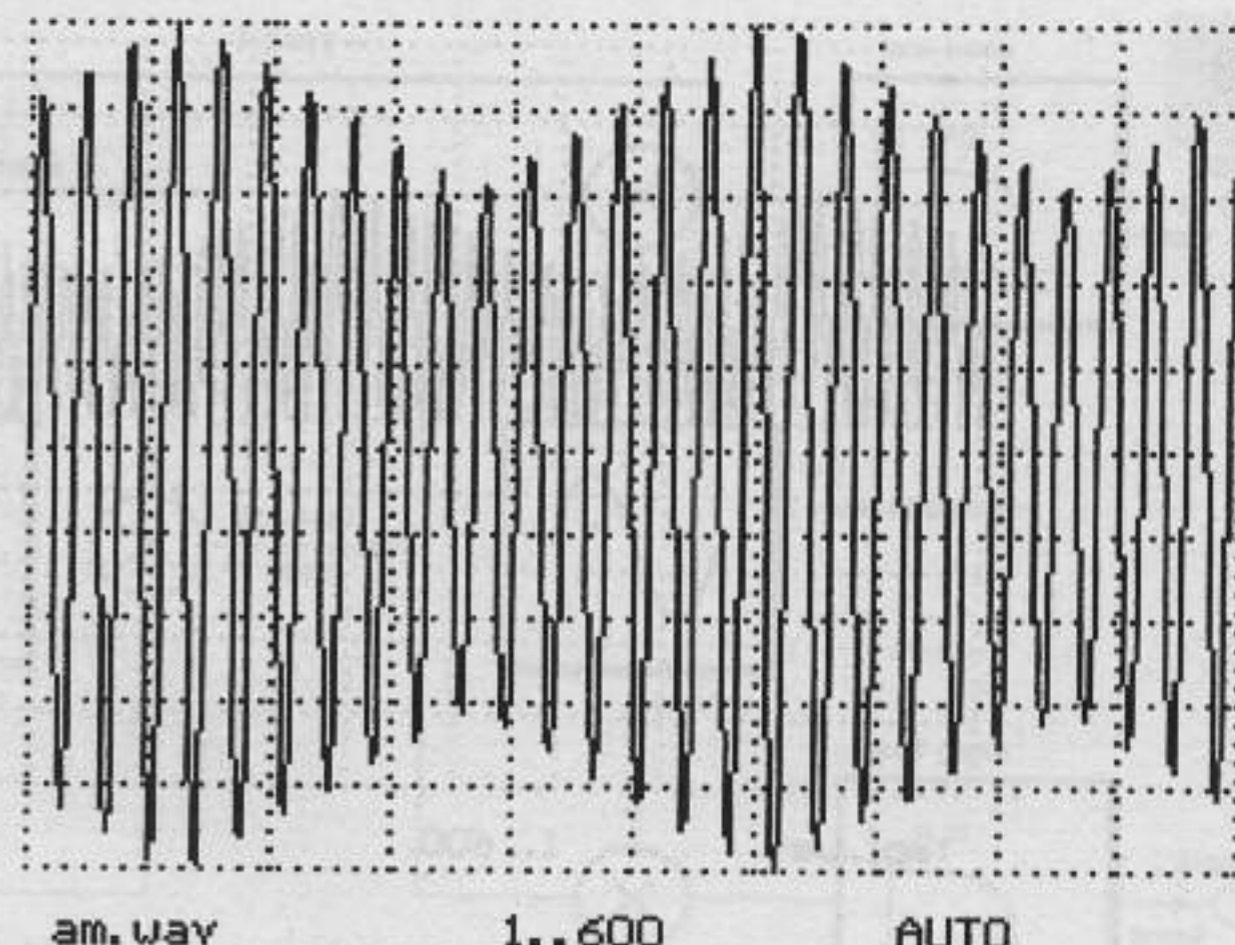
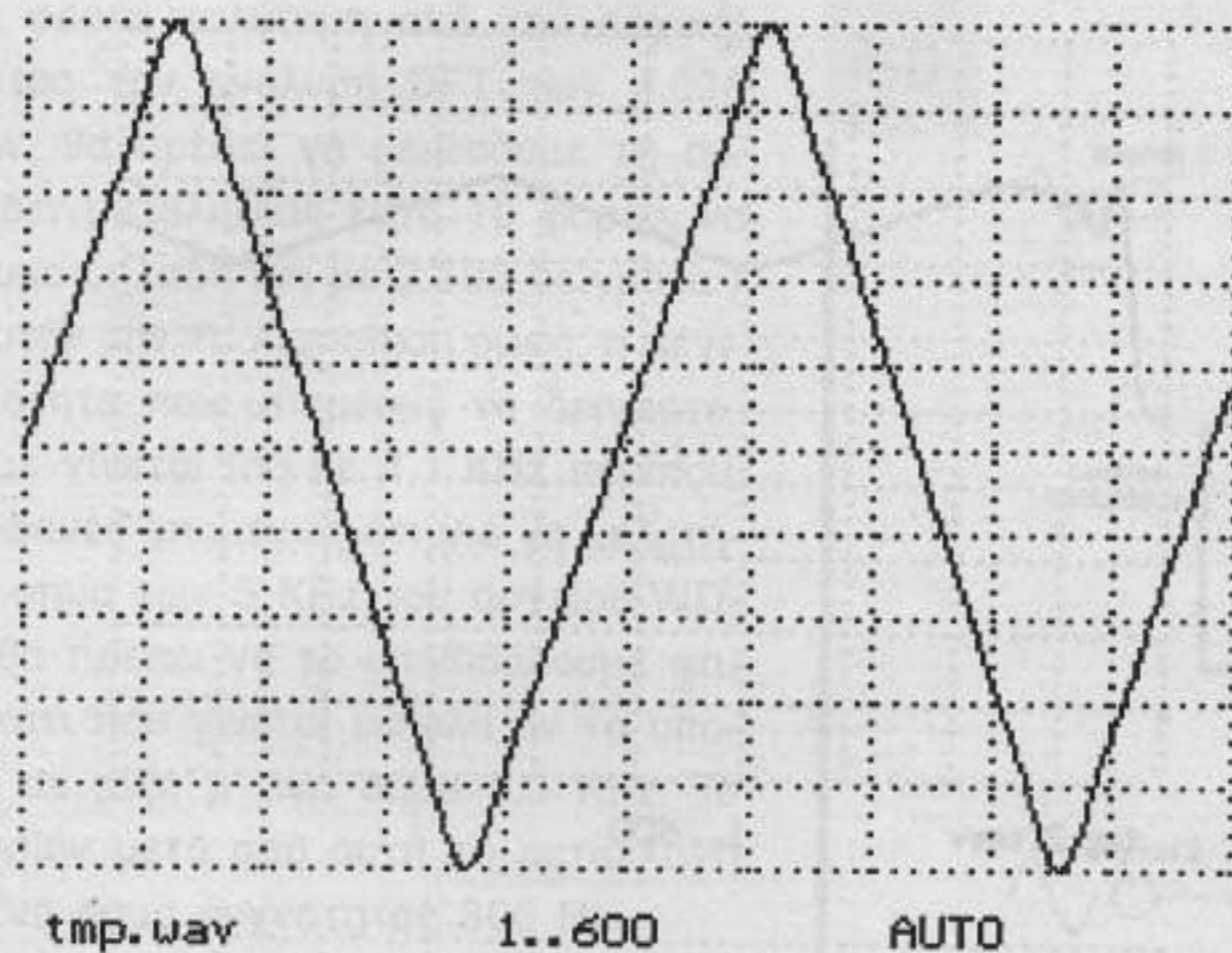
Η παρασιτική ενδιάμεση συχνότητα των 5 KHz προκύπτει από τη μίξη του σήματος του τοπικού ταλαντωτή με το σήμα του σταθμού 'Ευρώπη 1' που εκπέμπει στους 183 KHz. Αυτό εύκολα μπορούμε να το επαληθεύσουμε, εάν υποβάλλουμε σε μίξη το αρχείο BBC188.WAV με τέτοιο τρόπο, ώστε η ενδιάμεση συχνότητα που θα αναδείξουν τα φίλτρα να είναι 5 KHz, αντί για 10 KHz. Θα ακούσουμε τότε τον 'Ευρώπη 1' στη Γαλλική γλώσσα. Αν το ίδιο αρχείο το υποβάλλουμε σε μίξη ζητώντας ενδιάμεση συχνότητα 19 KHz, θα ακούσουμε έναν άλλο ραδιοφωνικό σταθμό που εκπέμπει στους 207 KHz.

### Σύγχρονη αποδιαμόρφωση

Εκτός από τον παραπάνω τρόπο, υπάρχουν και αρκετοί άλλοι για να μπορέσουμε να αποδιαμορφώσουμε ένα σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος. Όταν στην προηγούμενη συνέχεια μιλήσαμε για διαμόρφωση πλάτους, αφήσαμε να εννοηθεί σαφώς ότι ο πολλαπλασιασμός ενός σήματος μ' ένα άλλο ημιτονικό (προερχόμενο από έναν τοπικό ταλαντωτή), έχει σαν αποτέλεσμα τη μετάθεση του φάσματος του αρχικού σήματος σε μια άλλη φασματική πε-

Προτού χρησιμοποιήσετε τα προγράμματα του CD-ROM ESPRESSO, είναι απαραίτητο να αντιγράψετε ολόκληρο τον φάκελο αρχείων στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή σας. Μπορείτε τότε να τα 'τρέξετε' από εκεί, όπως άλλωστε περιγράφεται στο αρχείο README που βρίσκεται στο ίδιο CD-ROM.

Όταν ένα σύνολο αρχείων αντιγράφεται από ένα CD-ROM στον σκληρό δίσκο, μαζί με τα αρχεία αντιγράφονται και οι ιδιότητές τους. Στην προκείμενη περίπτωση, η ιδιότητα 'Μόνο για ανάγνωση', που χαρακτηρίζει όλα τα αρχεία ενός οπτικού δίσκου, είναι δυνατόν να σας δημιουργήσει πολλά και διάφορα προβλήματα. Για να μπορέσετε να τα παρακάμψετε, σας προτείνουμε μέσω του 'Εξερευνητή των Windows' να επιλέξετε τον φάκελο που αντιγράψατε στον σκληρό δίσκο και αφού κάνετε δεξί 'κλικ', να αφαιρέσετε το τσεκάρισμα από την ομώνυμη ιδιότητα στο παράθυρο 'Ιδιότητες' που ανοίγει. Πατήστε 'OK' και όλα τα προβλήματα που ήδη διαπιστώσατε ότι υπήρχαν ή ενδεχομένως θα διαπιστώνατε παύουν να υπάρ-



Σχ. 46. Σημάτα διαμορφωμένα -και απο-  
διαμορφωμένα- κατά πλάτος.

tmp2.wav 1..600 AUTO

980015 - 6 - 12

ριοχή. Επεκτείνοντας αυτήν τη σκέψη, εύκολα προκύπτει ότι μπορούμε να ξαναπάρουμε το φάσμα του αρχικού σήματος κάνοντας έναν δεύτερο πολλαπλασιασμό. Το πείραμα, μέσω του οποίου μπορούμε να πετύχουμε την αποκατάσταση του φάσματος, είναι το XDEMOD5.SPP (σχ. 47), ενώ τα αποτελέσματα της φασματικής μετάθεσης φαίνονται στο σχ. 48. Αν το σήμα του τοπικού ταλαντωτή (LO) είναι ίδιο μ' αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του αρχικού σήματος, τότε το τελευταίο μπορεί να ανακτηθεί με μεγάλη ακρίβεια, μέσω ενός πολλαπλασιαστή και ενός φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.

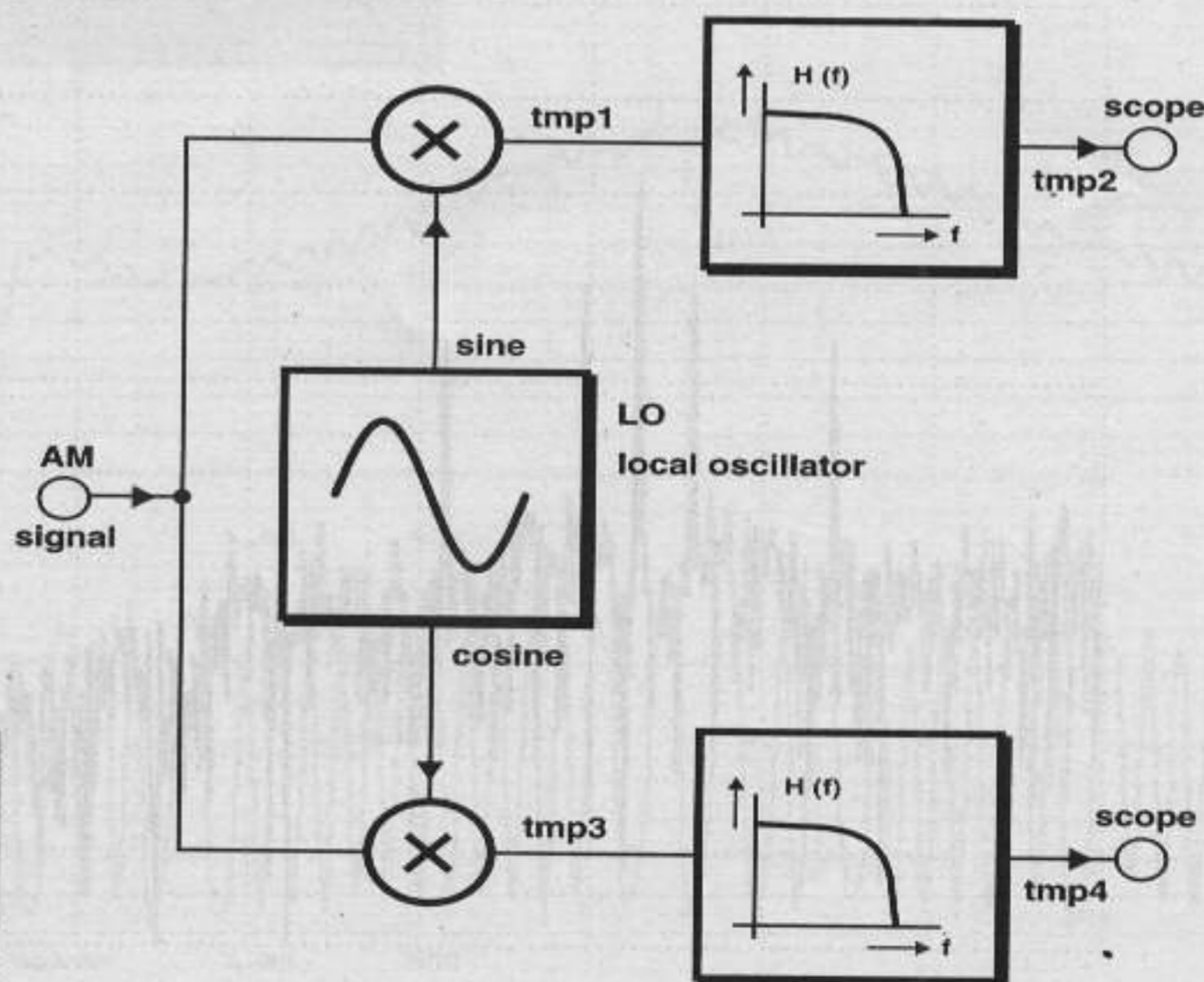
Αν η φάση του σήματος του τοπικού ταλαντωτή διαφέρει κατά  $90^\circ$  σε σχέση με τον φορέα, τότε το σήμα που θα αναδειχθεί στην έξοδο του φίλτρου θα είναι μηδενικό. Είναι επομένως αναγκαίο τα δύο αυτά σήματα να είναι πάντα σε φάση. Η μέθοδος αποδιαμόρφωσης, που προϋποθέτει όλα τα παραπάνω, είναι γνωστή με το όνομα 'Σύγχρονη αποδιαμόρφωση' ή 'Συμφασική αποδιαμόρφωση'. Όταν και τα δύο σήματα ολισθαίνουν

το ένα σε σχέση με το άλλο, οι εναλλαγές της φάσης προκαλούν αυξομειώσεις στη στάθμη του αποδιαμορφωμένου σήματος. Γι' αυτό το λόγο, όλοι οι συμφασικοί αποδιαμορφωτές που κατασκευάζονται σήμερα βασίζονται στη χρήση κυκλωμάτων κλειδωμένης φάσης (PLL). Μ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η συμφασικότητα των δύο σημάτων και συνεπώς η σταθερότητα της στάθμης του αποδιαμορφού-

μενου ηχητικού σήματος. Οι αποδιαμορφωτές αυτού του τύπου, αν και ιδιαίτερα σύνθετοι, έχουν αρχίσει να κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος εξ αιτίας των ιδιαίτερα αξιολογών χαρακτηριστικών τους.

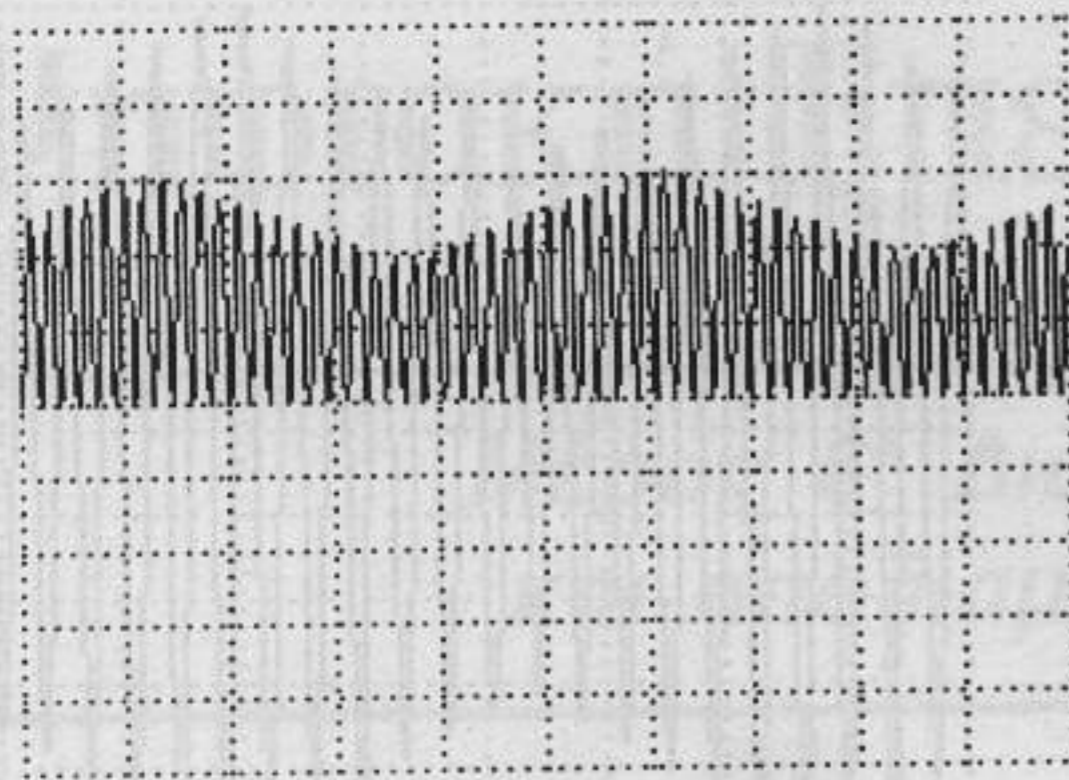
## Αναλυτής φάσματος μεγάλης

47

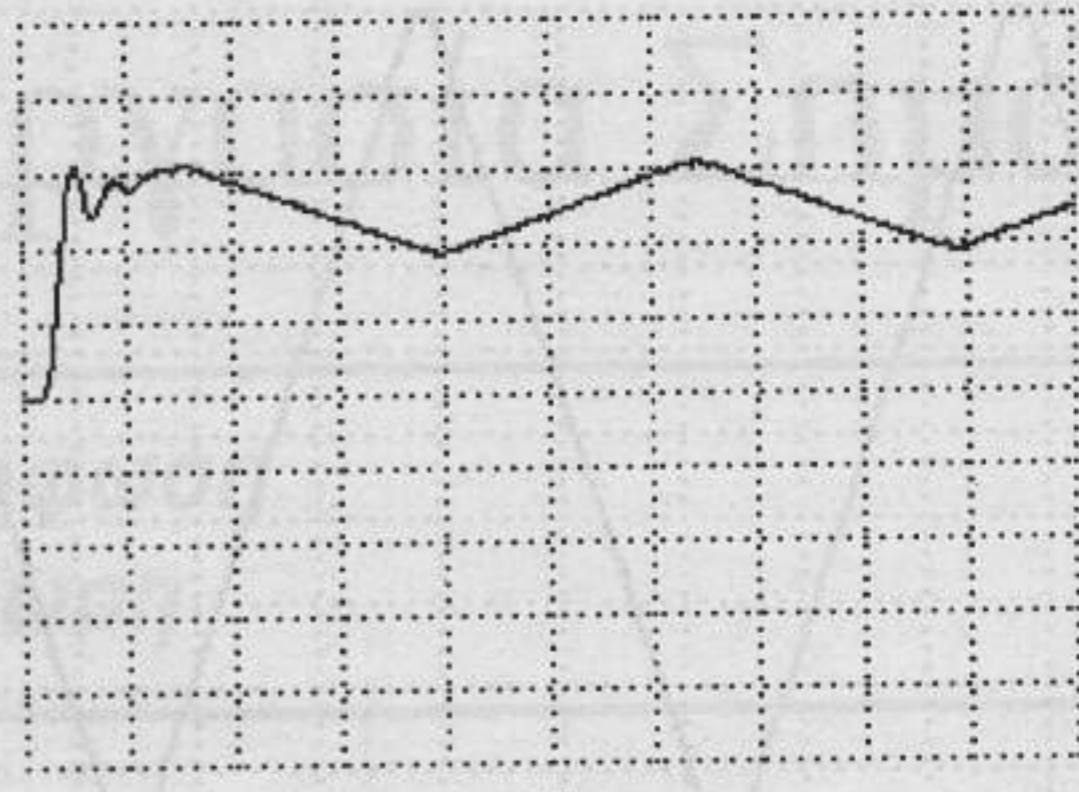


Σχ. 47. Σύγχρονη ή συμφασική αποδιαμόρφωση. Για την πραγματοποίησή της απαιτείται ένα σήμα συμφασικό με τον φορέα.

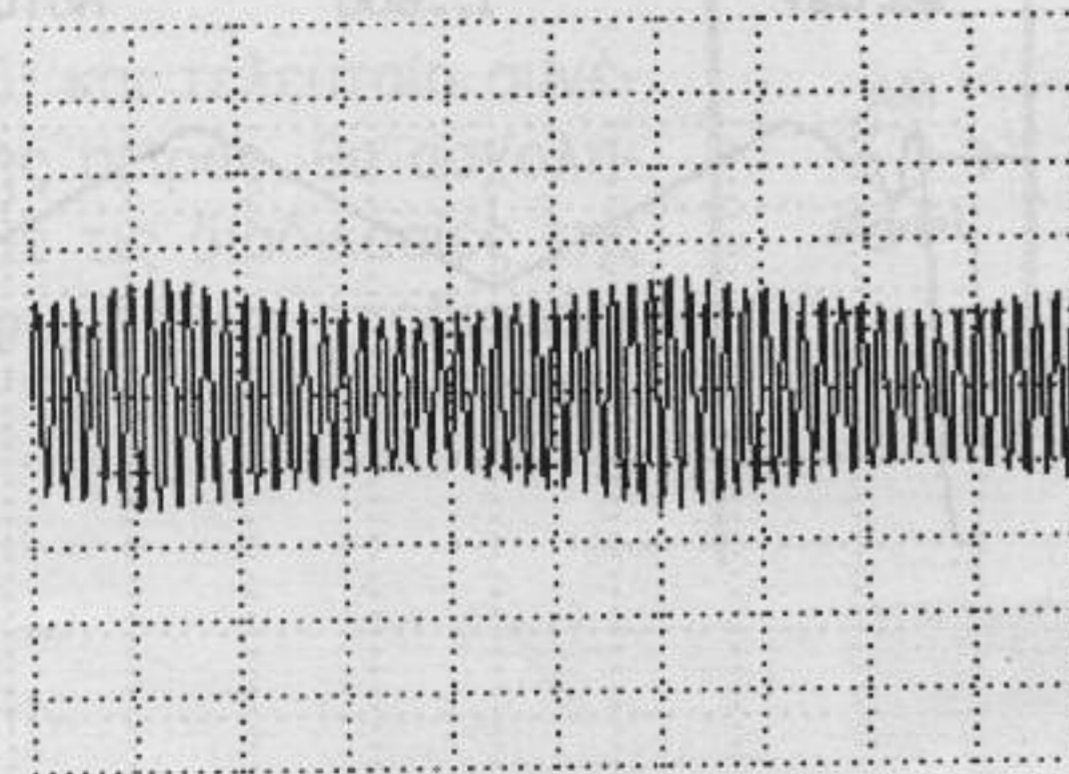
980015 - 6 - 13



tmp1.wav 1..600



tmp2.wav 1..600



tmp3.wav 1..600



tmp4.wav 1..600

980015 - 6 - 14

Σχ. 48. Επάνω: συμφασική αποδιαμόρφωση, κάτω: σύγχρονη αποδιαμόρφωση με σήμα τοπικού ταλαντωτή μετατοπισμένου κατά  $90^\circ$

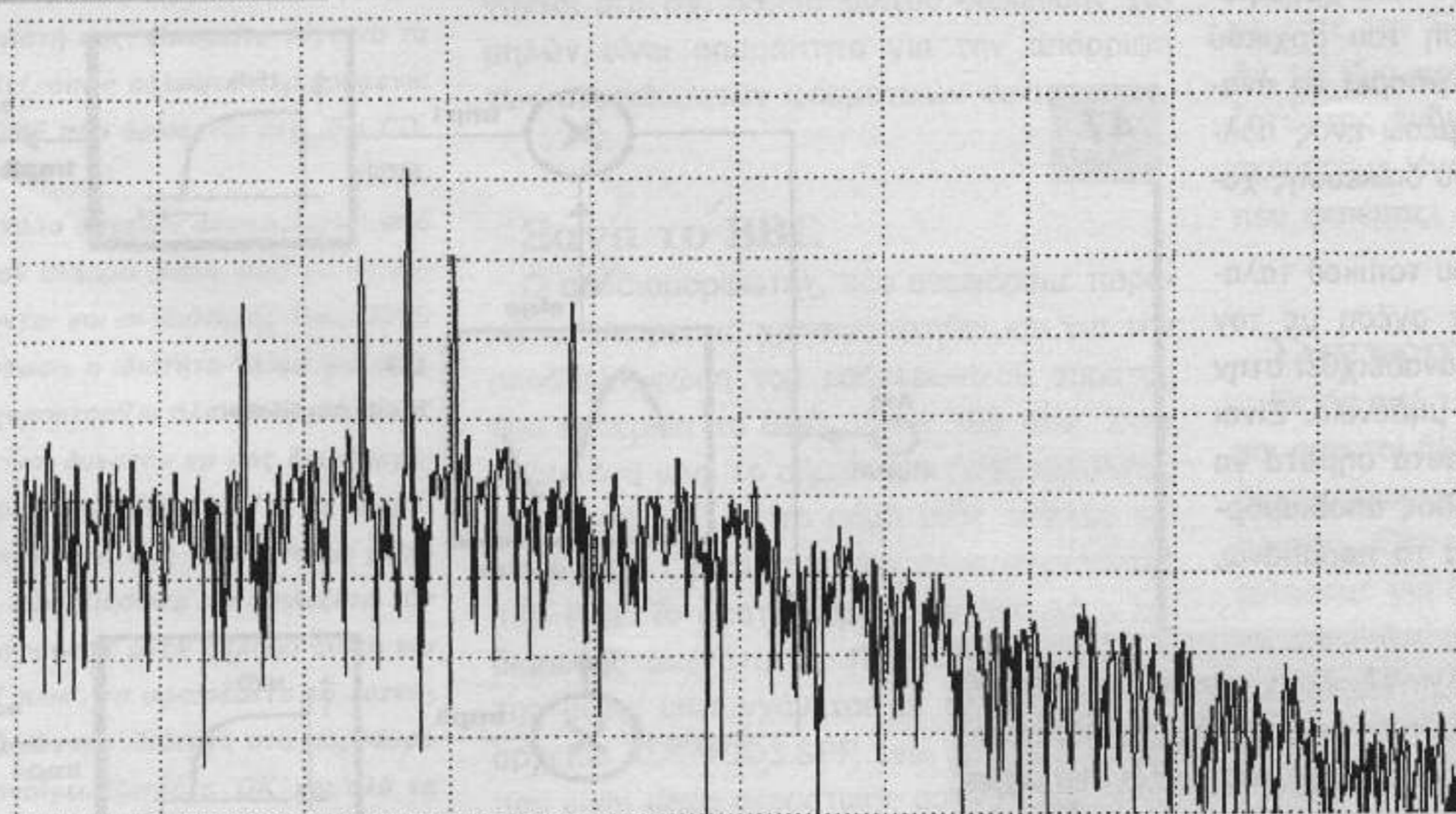
### ακρίβειας

Εξηγήσαμε ήδη το πως είναι δυνατόν να μετατεθεί μια περιοχή φάσματος σε μια άλλη, πολλαπλασιάζοντας απλώς το αρχικό σήμα μ' ένα άλλο καθαρό ημιτονικό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σήμερα απ' όλους τους ραδιοφωνικούς δέκτες που παράγουν σήμα ενδιάμεσης συχνότητας (IF). Βασιζόμενοι στις ίδιες αρχές, μπορούμε να βελτιώσουμε την ακρίβεια του αναλυτή φάσματος (SPEC1) που ήδη έχουμε χρησιμοποιήσει. Όταν το πρωτότυπο σήμα σαρώνεται με ρυθμό 22.050 δειγμάτων / sec και στη συνέχεια ακολουθεί ανά-

λυση DFT 4.096 δειγμάτων, το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε αντιστοιχεί σε μια απόσταση 5,3833 Hz μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων. Αν θέλουμε να μελετήσουμε μια φασματική περιοχή με μεγαλύτερη ακρίβεια, τότε θα πρέπει να την μεταθέσουμε σε μια χαμηλότερη περιοχή, να την υποβάλλουμε σε φιλτράρισμα χαμηλών συχνοτήτων και να την δειγματοληψίσουμε με χαμηλή συχνότητα.

Ας δούμε όμως πως γίνονται όλα αυτά, θεωρώντας ότι έχουμε ένα σήμα 5 KHz. Αν θελήσουμε να το αναλύσουμε με ακρίβεια 0,5

Σχ. 49. Φασματογράφημα υψηλής ακρίβειας όπου φαίνεται το υποφέρων των 57 KHz που μεταφέρει το σήμα ARI.



tmp4.wav (ω) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 1102.5 cur = -1.0

980015 - 6 - 15

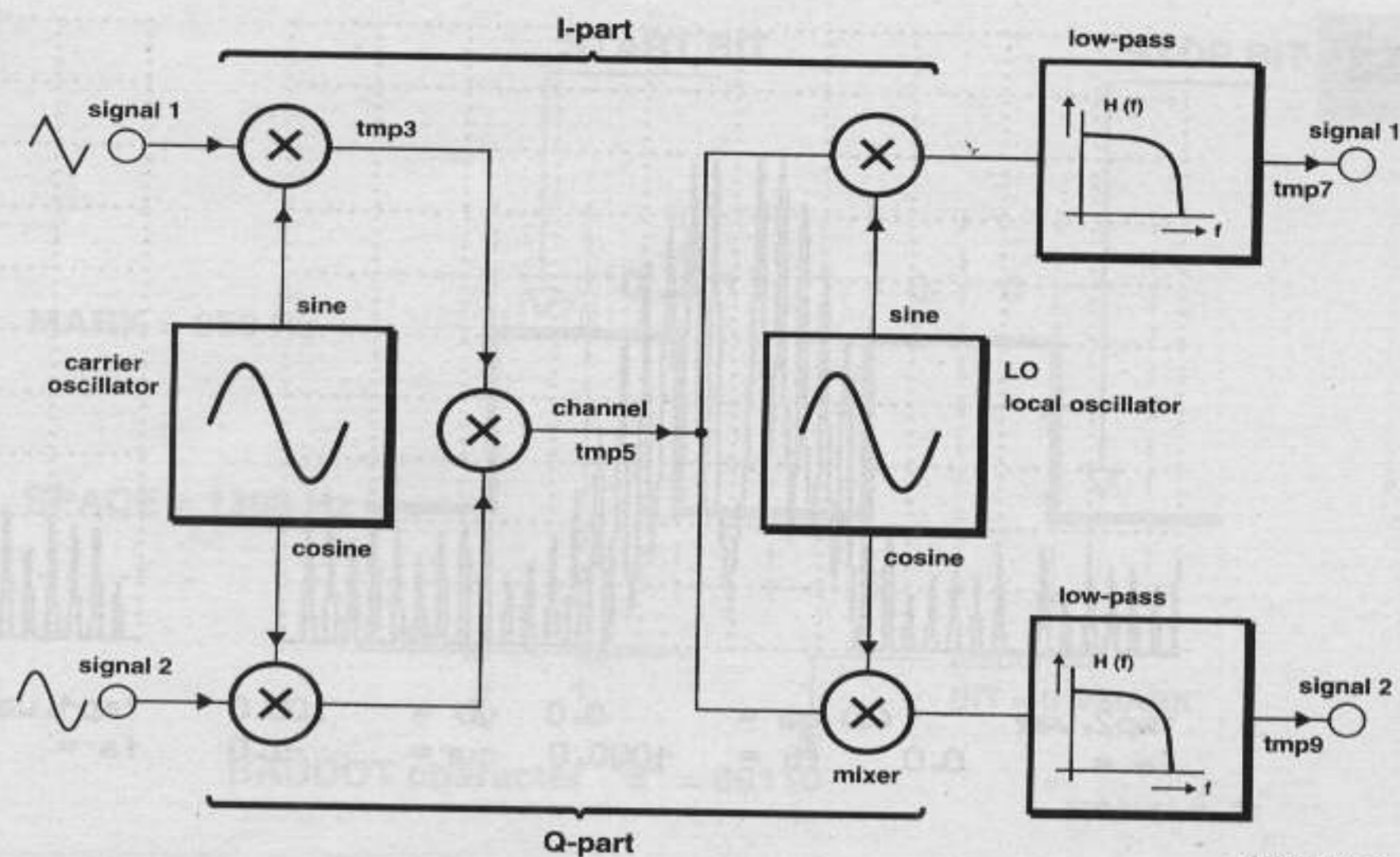
Hz (δέκα φορές καλύτερη από την αρχική) διατηρώντας την ανάλυση DFT των 4.096 δειγμάτων, θα πρέπει να μειώσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας κατά 10 φορές, να την κάνουμε δηλαδή ίση με 2.205 δείγματα / sec. Μ' αυτήν την τροποποίηση όμως, η μέγιστη συχνότητα που μπορούμε να δειγματοληψίσουμε γίνεται ίση με 1,1 KHz περίπου. Είναι προφανές επομένως ότι για να μελετήσουμε το σήμα των 5 KHz του αρχείου WD-1L.WAV, θα πρέπει να το υποβιβάσουμε φασματικά, κάτι που γίνεται εύκολα αν το υποβάλλουμε σε μίξη μ' ένα σήμα 5,3 KHz. Το τελικό προϊόν μετά από αυτή τη μεταλλαγή θα είναι ένα σήμα συχνότητας 300 Hz.

Αν ξεκινήσουμε με 40.960 δείγματα, θα μείνουν 4.096 τα οποία παράγουν το αρχείο XSPEC.SPP (φαίνεται στο σχ. 49). Μια σύντομη ματιά μας επιτρέπει να εντοπίσουμε το φέρον (57 KHz πριν τον υποβιβασμό συχνότητας), που έχει δεξιά και αριστερά του δύο σήματα: ένα σε απόσταση 125 Hz από αυτό και ένα σε απόσταση 34,93 Hz. Το πρώτο από τα δύο αντιπροσωπεύει το σήμα ARI, το οποίο ενεργοποιείται όταν ο ραδιοφωνικός σταθμός μεταδίδει ταξιδιωτικά νέα. Το δεύτερο αποτελεί ένα σήμα με τη βοήθεια του οποίου ο δέκτης μπορεί να προσδιορίσει την ταυτότητα και την τοποθεσία του σταθμού που λαμβάνει. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε πως όταν αναλύεται το πρώτο μέρος του αρχείου WD1L.WAV, απουσιάζει η κορυφή των 125 Hz. Αυτό οφείλεται στο ότι για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ο φορέας αυτός δεν μεταφέρει καμία πληροφορία τέτοιου τύπου.

## Τέτραγωνική διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση

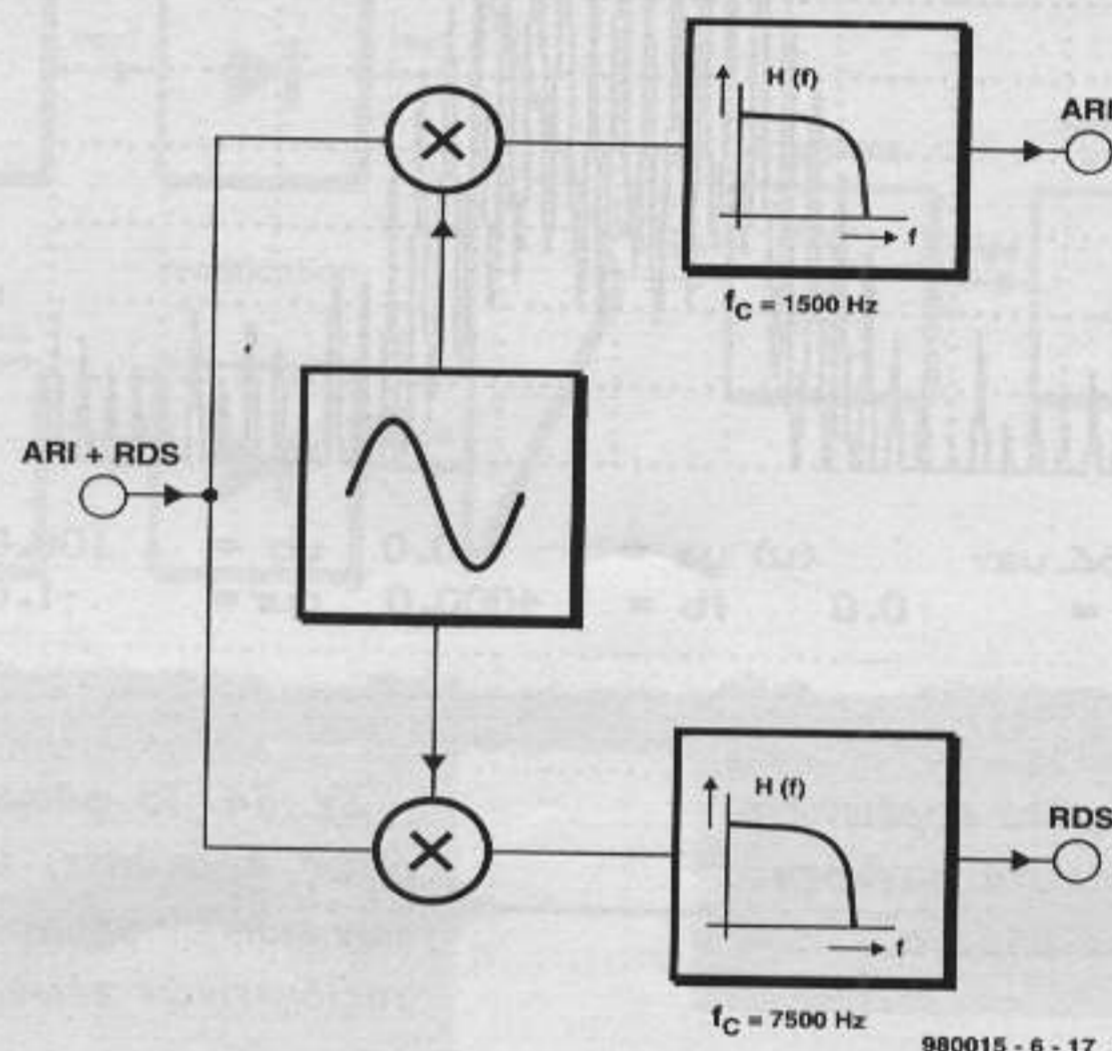
Η προηγούμενη αναφορά μας σχετικά με τη συμφασική διαμόρφωση κατέληξε στο συμπέρασμα πως για να γίνει δυνατή η αποδιαμόρφωση ενός φορέα, θα πρέπει το σήμα του τοπικού ταλαντωτή να έχει φάση ίδια μ' αυτή του φορέα. Αν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τους, τότε δεν παράγεται κανένα απολύτως σήμα εξόδου. Την ιδιομορφία αυτή μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε εκπέμποντας ταυτόχρονα δύο φορείς, που έχουν την ίδια συχνότητα, αλλά διαφέρουν φασικά μεταξύ τους κατά 90. Τους δύο αυτούς φορείς μπορούμε να τους διαμορφώσουμε με διαφορετικές πληροφορίες και να τους εκπέμψουμε μέσα από το ίδιο κανάλι. Το ίδιο εύκολα μπορούμε να τους αποδιαμορφώσουμε και να πάρουμε την αρχική πληροφορία (σχ. 50). Την παραπάνω μέθοδο διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης μπορούμε να την εξομοιώσουμε με τη βοήθεια του αρχείου XDEMOD4.SPP. Στη θέση της πληροφορίας που διαμορφώ-

50



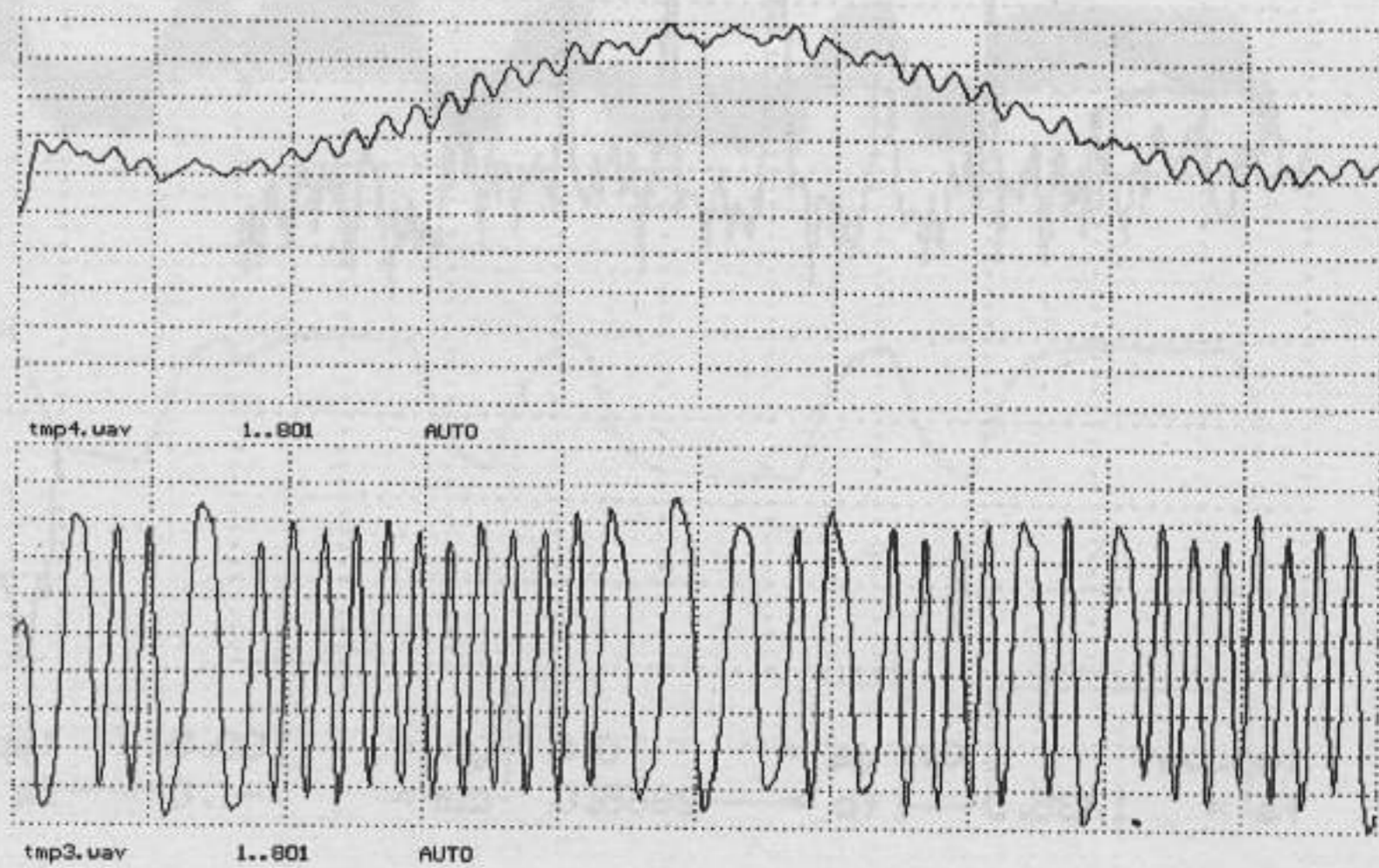
Σχ. 50. Σύνθεση ενός συστήματος που βασίζεται στην τέτραγωνική διαμόρφωση / αποδιαμόρφωση.

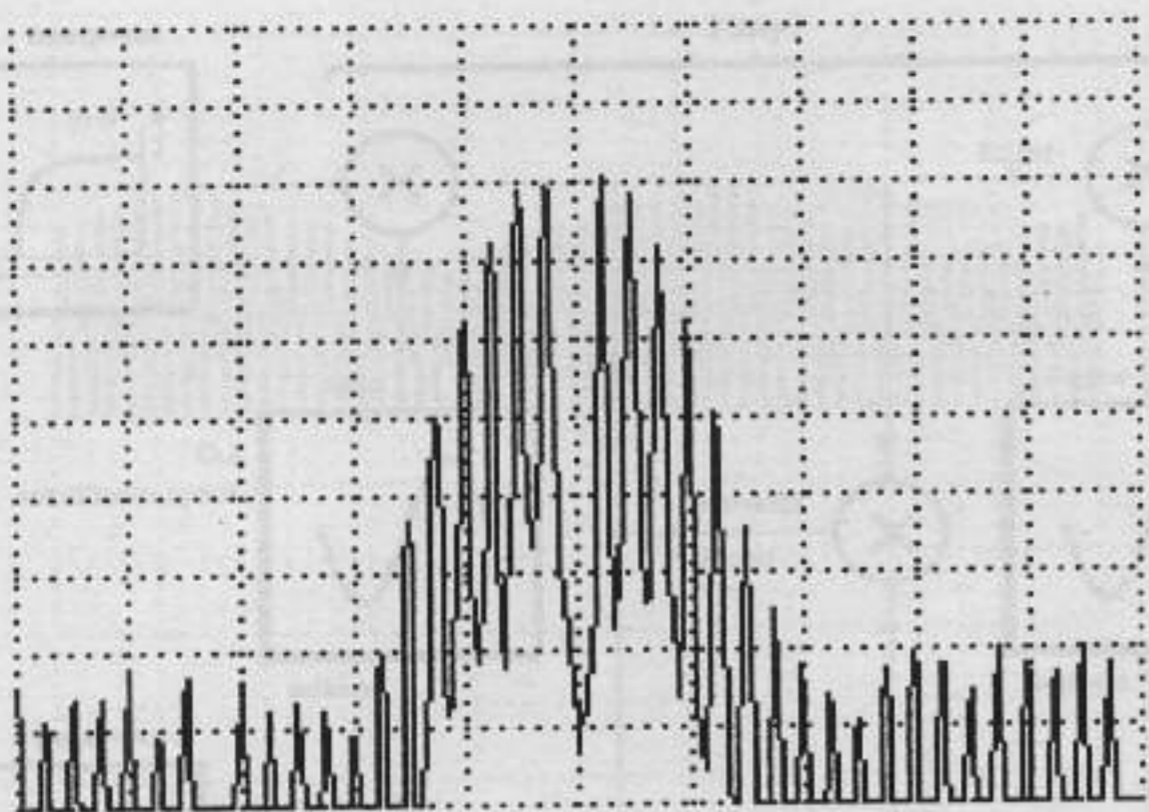
51



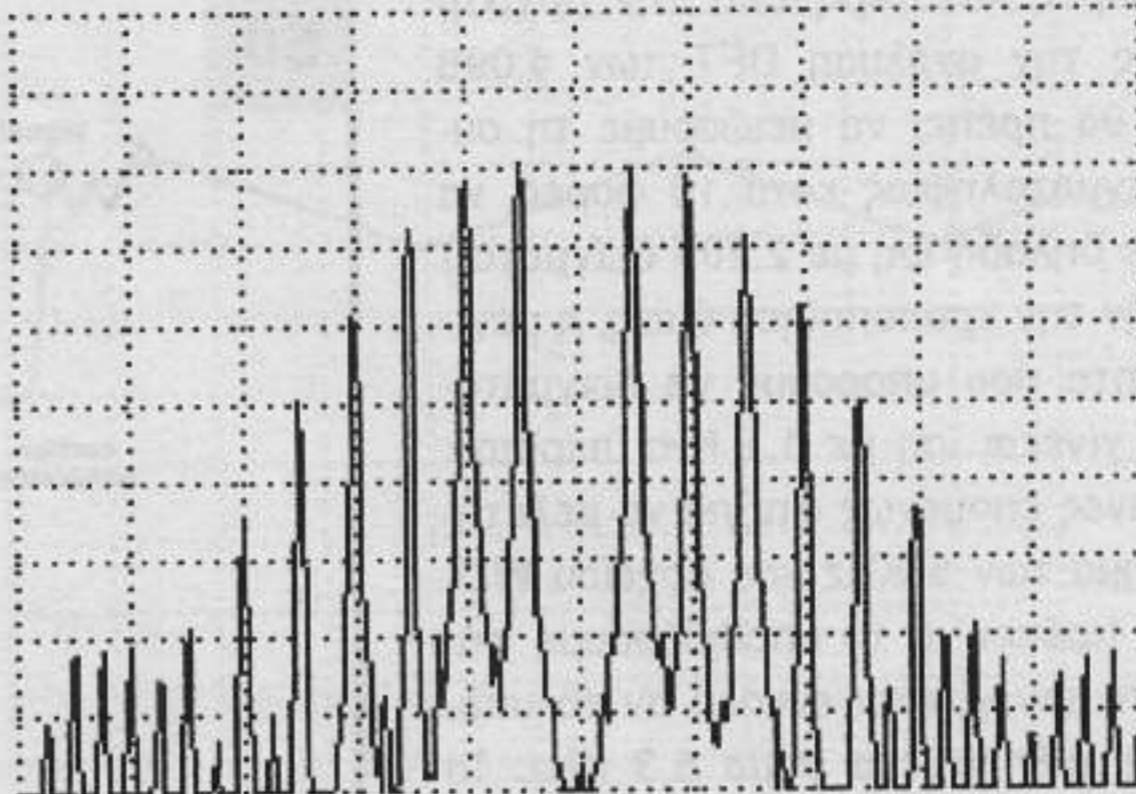
Σχ. 52. Επάνω: το αποδιαμορφωμένο σήμα ARI, κάτω: το αποδιαμορφωμένο σήμα RDS.

52

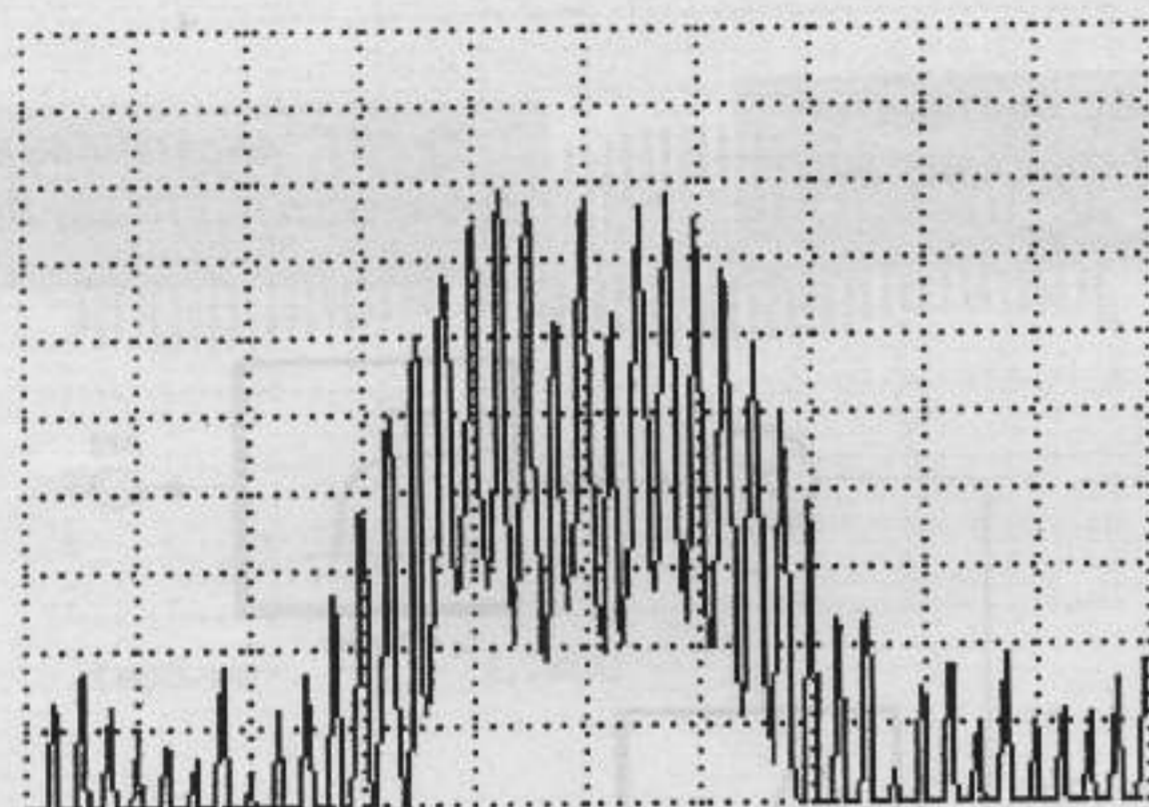




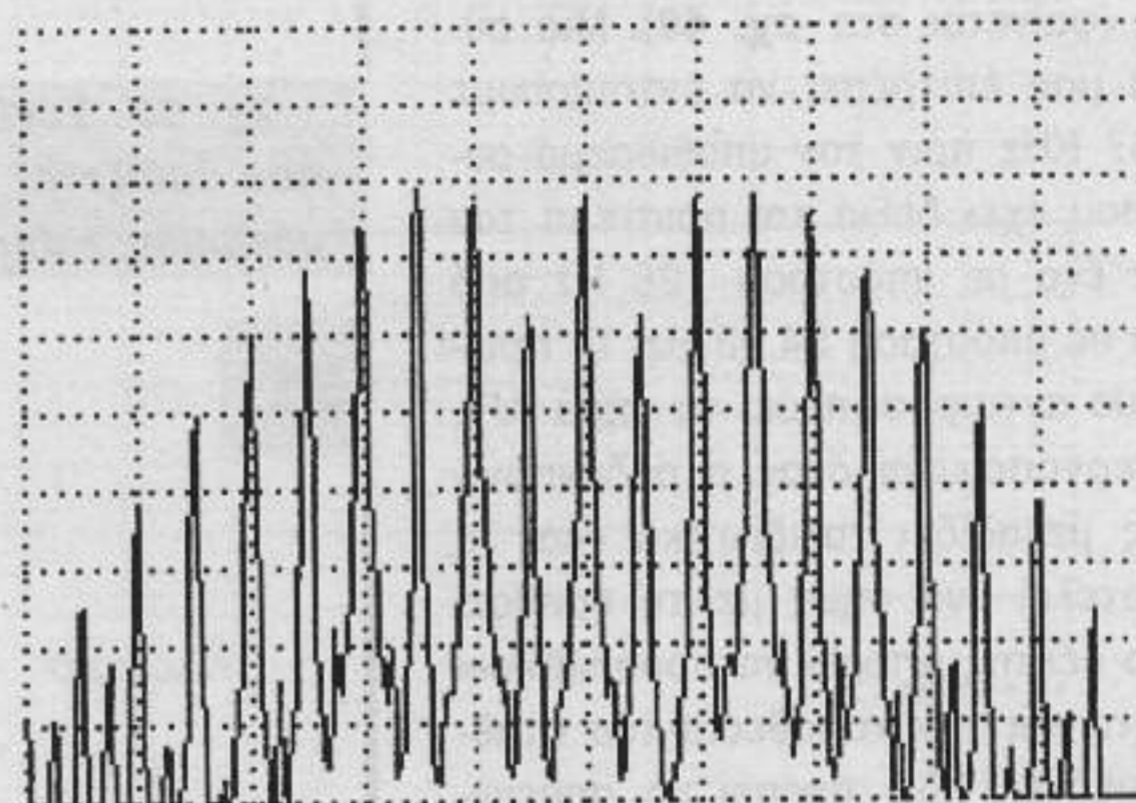
tmp2.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = -1.0



tmp4.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = -1.0



tmp6.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = -1.0



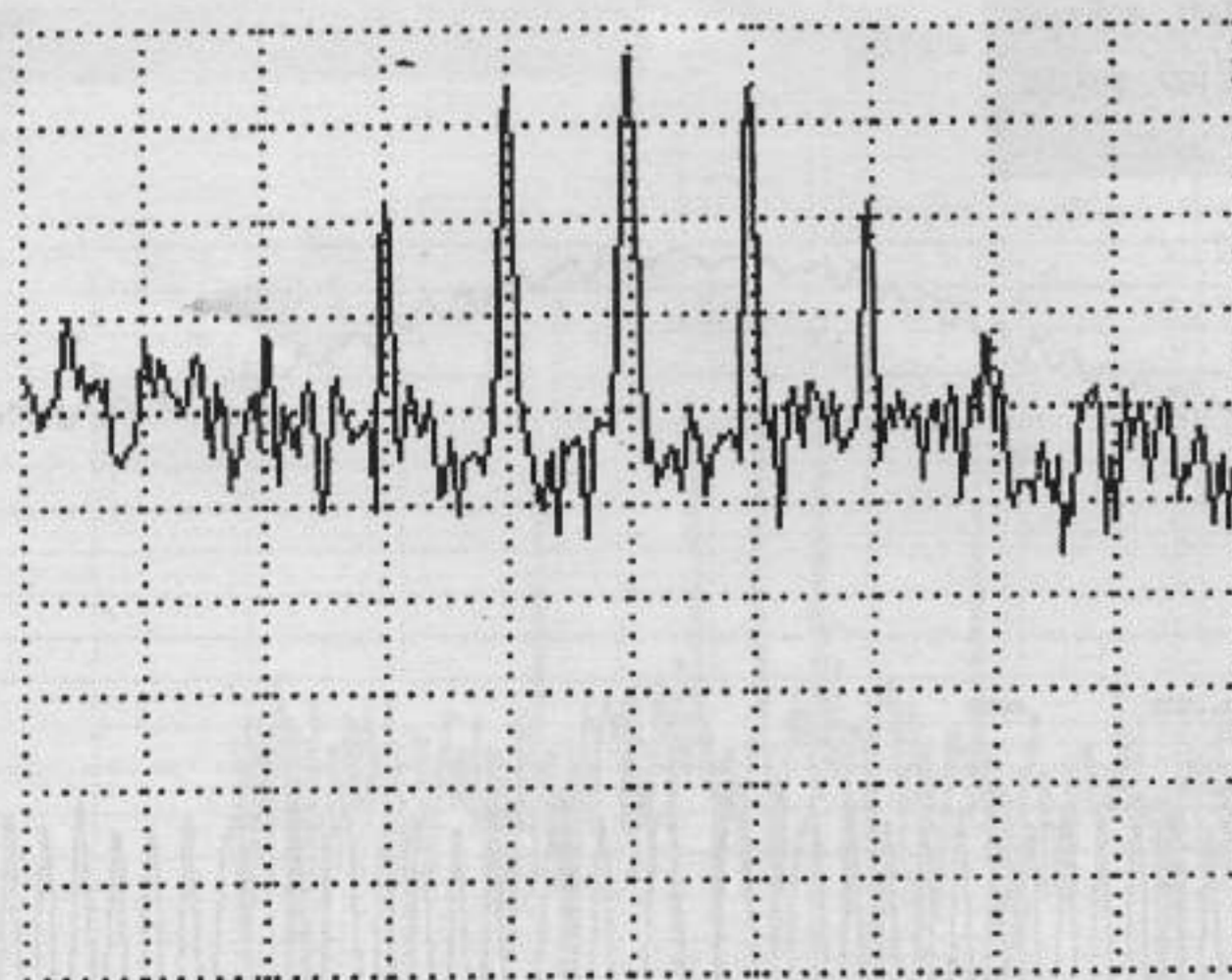
tmp8.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 0.0 fb = 4000.0 cur = -1.0

980015 - 6 - 19

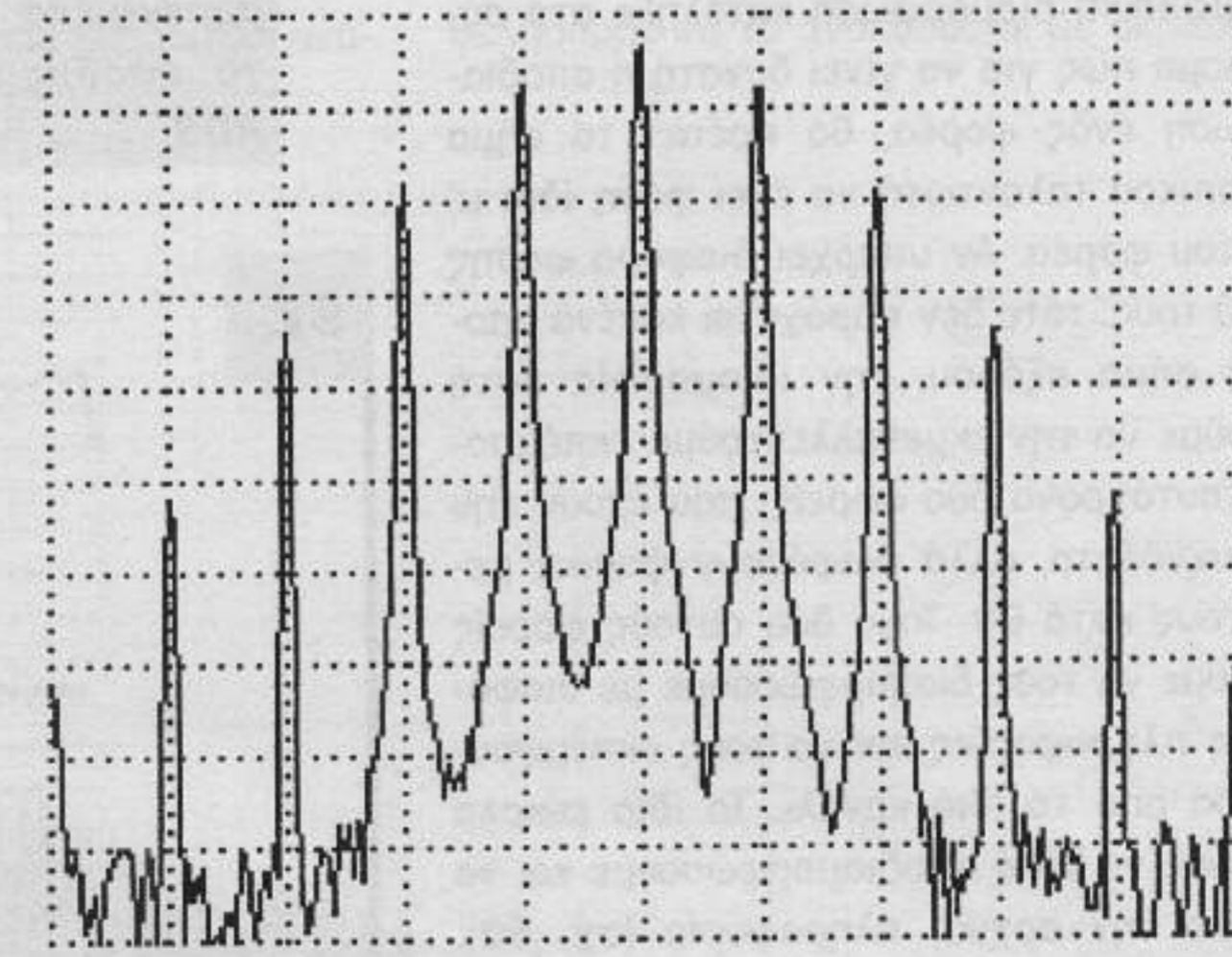
Σχ. 53. Φάσματα φορέων διαμορφωμένων κατά συχνότητα από ημιτονικά σήματα.

Σχ. 54. Το φάσμα ενός σήματος FM, όπως προκύπτει μετά τη διαμόρφωση των ειδικών σημάτων έναρξης εκπομπής ταξιδιωτικών νέων. (Στήν Γερμανία)

νει τον πρώτο φορέα έχουμε εισάγει ένα τριγωνικό σήμα, ενώ στη θέση της δεύτερης ένα ημιτονικό. Όταν σε μια διαδικασία διαμόρφωσης χρησιμοποιούμε έναν ημιτονικό και έναν συνημιτονικό φορέα ταυτόχρονα, λέμε



tmp.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 1735.0 fb = 2965.0 cur = -1.0



tmp2.wav (w) ya = 0.0 yb = 100.0  
fa = 1735.0 fb = 2965.0 cur = -1.0

980015 - 6 - 20

ότι έχουμε τριγωνική επεξεργασία. Ο κύριος φορέας (ημιτονικός) μαζί με τις συνιστώσες του χαρακτηρίζεται με τον χαρακτήρα I (In phase, σε φάση), ενώ ο δεύτερος (συνημιτονικός) με τον χαρακτήρα Q (Quadrature, τριγωνικός).

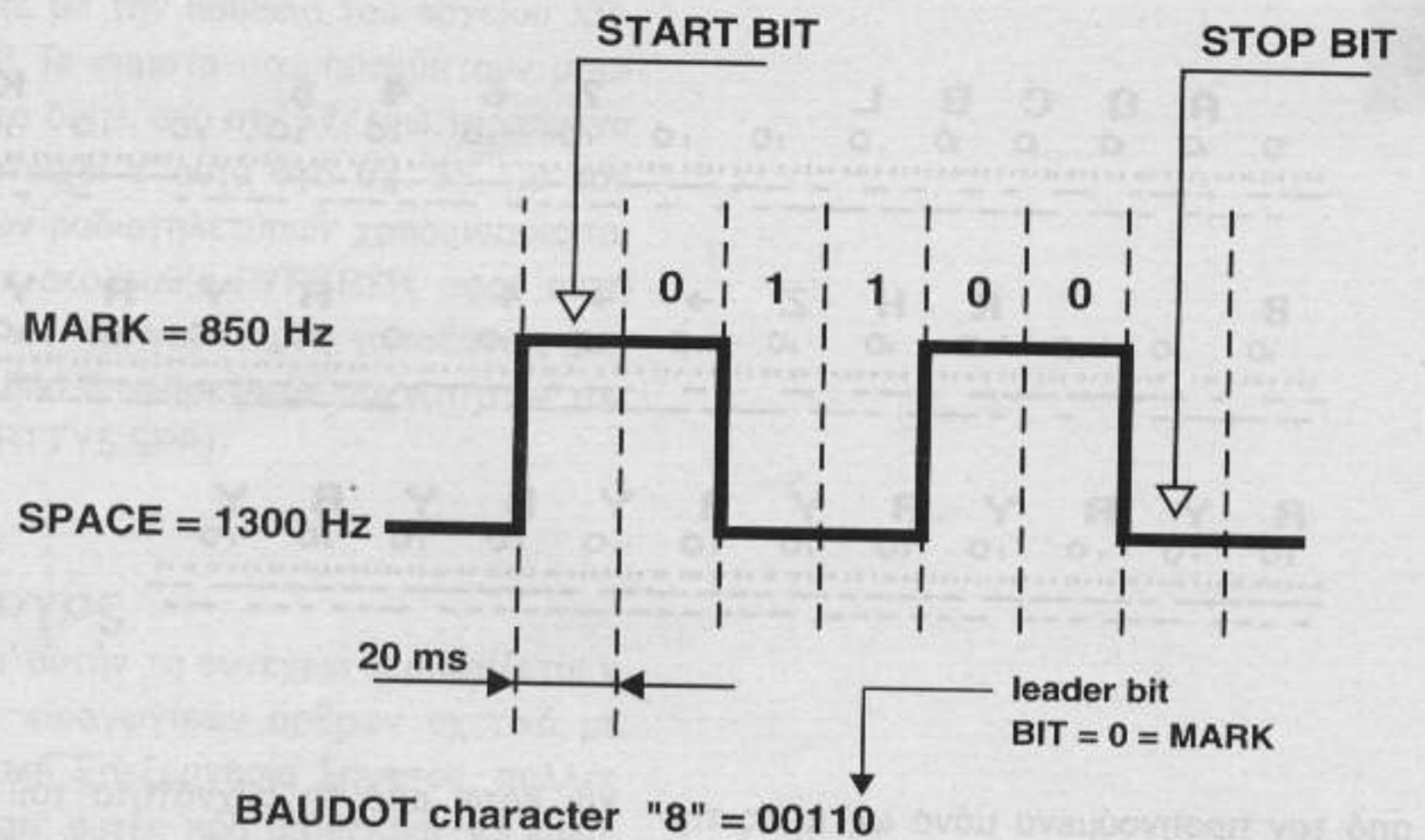
### Φώραση σημάτων RDS

Μια πρακτική εφαρμογή της ορθογωνικής διαμόρφωσης συναντάμε σήμερα στη ραδιοφωνία VHF και UHF. Ο υποφορέας των 57 KHz, που αναφέραμε προηγουμένως, έχει σαν σκοπό να σηματοδοτεί την αποστολή ταξιδιωτικών νέων, θέτοντας σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους τα ραδιόφωνα εντός ή εκτός λειτουργίας. Η πληροφορία αυτή (ARI) μεταδίδεται με τη βοήθεια μιας συχνότητας 125 Hz που διαμορφώνει τον υποφορέα. Το σήμα, που προκύπτει από τη διαμόρφωση, αποτελεί το σήμα I της τριγωνικής διαμόρφωσης.

Τον ίδιο υποφορέα χρησιμοποιεί και το σύστημα αποστολής ραδιοφωνικών δεδομένων (RDS), προκειμένου να στείλει στους δέκτες ένα σωρό άλλα χρήσιμα στοιχεία. Για να αποτραπεί η αλληλεπίδραση των δύο αυτών σημάτων πληροφορίας, το σήμα RDS διαμορφώνει έναν ίδιο υποφορέα που διαφέ-

Σχ. 57. Τα σήματα στα διάφορα μέρη του αποκωδικοποιητή.

55

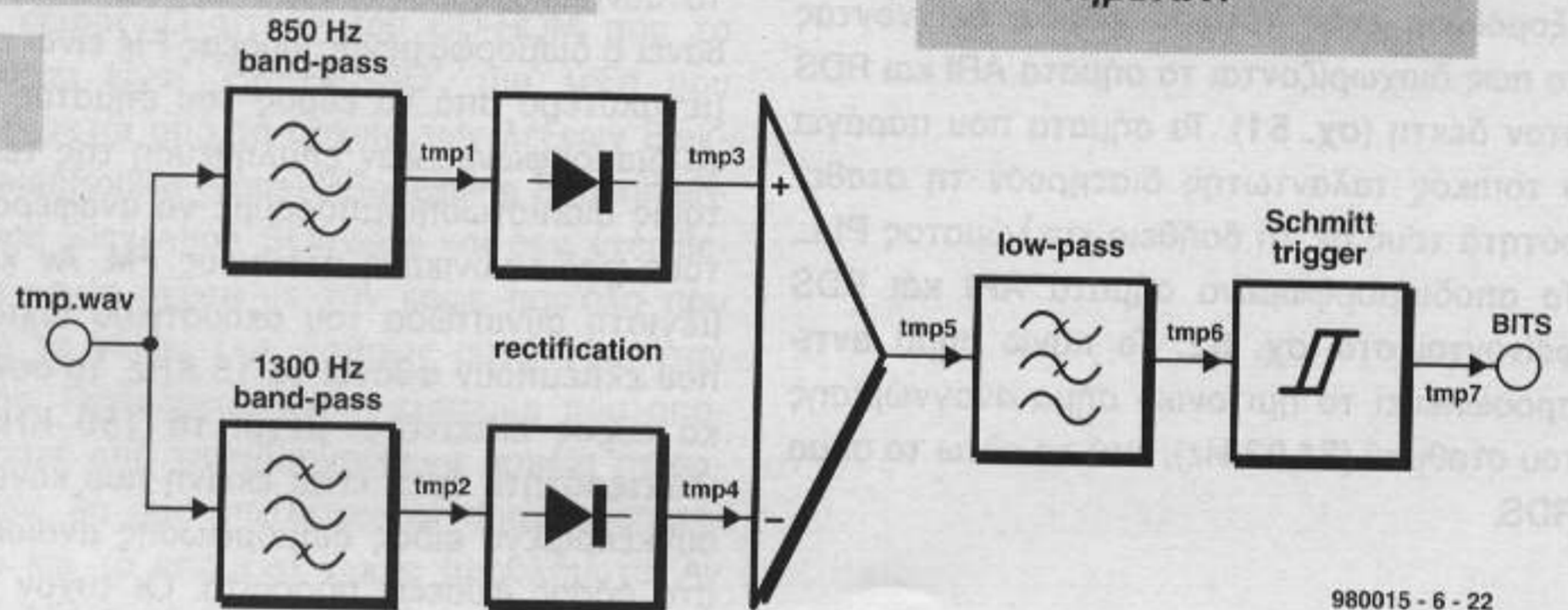


980015 - 6 - 21

Σχ. 55. Τυπικό ραδιοηλεκτρονικό σήμα.

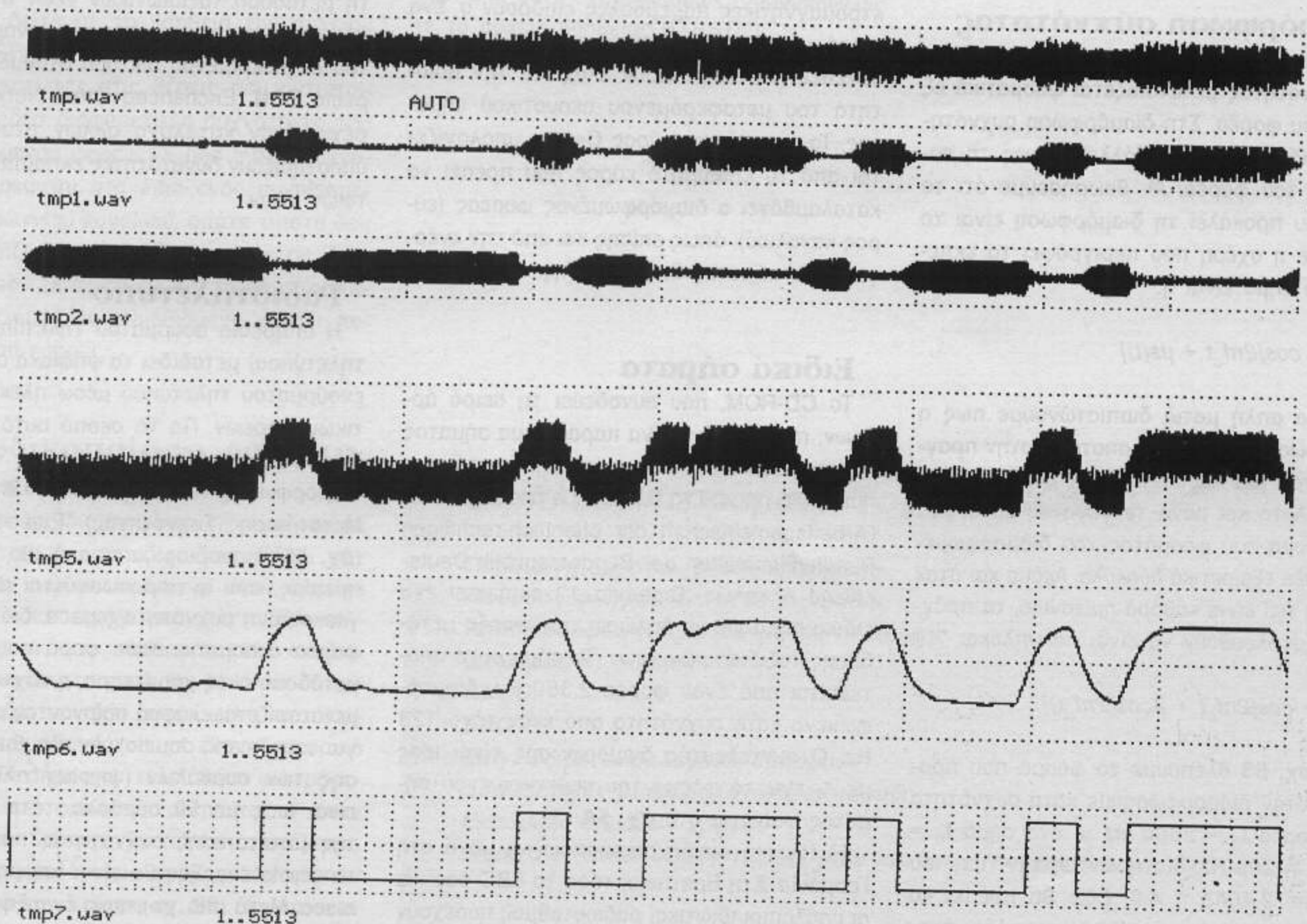
Σχ. 56. Ένας πλήρης αποκωδικοποιητής ραδιοηλεκτρονικών σημάτων.

56

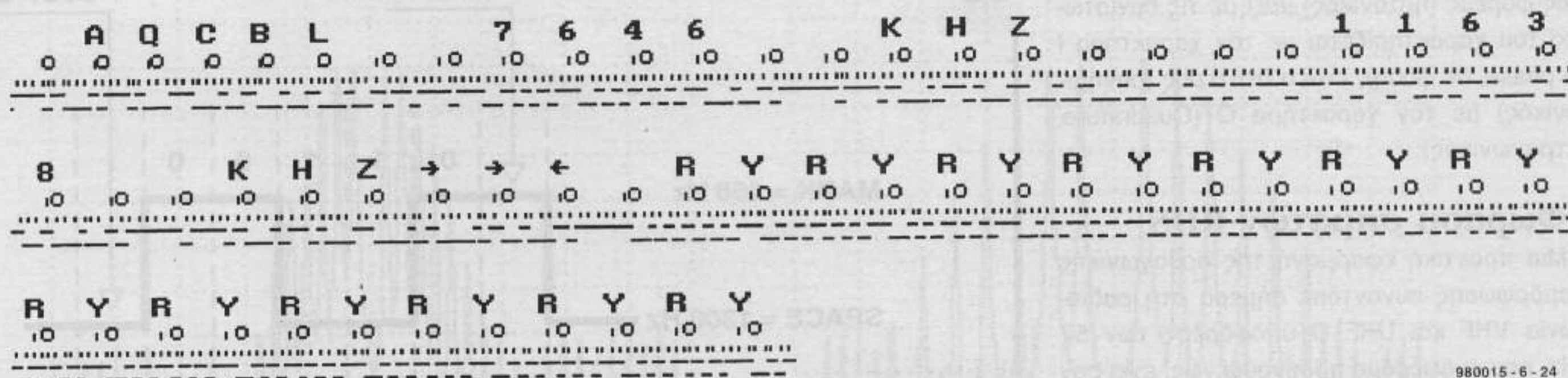


980015 - 6 - 22

57



980015 - 6 - 23



980015-6-24

ρει από τον προηγούμενο μόνο ως προς τη φάση (90°). Αυτό σημαίνει πως ο συνημιτονικός αυτός φορέας αντιπροσωπεύει το σήμα Q της τέτραγωνικής διαμόρφωσης. Το αρχείο πειραματισμού XRDS2.SPP επιτρέπει την εξομοίωση ενός τέτοιου φορέα, δείχνοντας το πως διαχωρίζονται τα σήματα ARI και RDS στον δέκτη (σχ. 51). Τα σήματα που παράγει ο τοπικός ταλαντωτής διατηρούν τη σταθερότητά τους με τη βοήθεια κυκλώματος PLL. Τα αποδιαμορφωμένα σήματα ARI και RDS φαίνονται στο σχ. 52. Το πάνω σήμα αντιπροσωπεύει το ημιτονικό σήμα αναγνώρισης του σταθμού (34,93 Hz), ενώ το κάτω το σήμα RDS.

### Διαμόρφωση συχνότητας

Στη διαμόρφωση πλάτους, το σήμα χαμηλής συχνότητας μετατοπίζεται φασματικά εξ αιτίας του φορέα. Στη διαμόρφωση συχνότητας, το ίδιο σήμα μεταβάλλει απλώς τη συχνότητα του φορέα. Αν θεωρήσουμε ότι το σήμα που προκαλεί τη διαμόρφωση είναι το  $s(t)$ , τότε η σχέση που περιγράφει το εκπεμπόμενο σήμα είναι η:

$$y(t) = \cos[2\pi f_c t + \mu s(t)]$$

Με μια απλή ματιά διαπιστώνουμε πως η διαμόρφωση συχνότητας αποτελεί στην πραγματικότητα μια παραλλαγή της διαμόρφωσης φάσης. Αυτό και μόνο το γεγονός κάνει τον υπολογισμό του φάσματος του διαμορφωμένου φορέα εξαιρετικά δύσκολο. Ακόμα και όταν το σήμα  $s(t)$  είναι καθαρά ημιτονικό, τα πράγματα εξακολουθούν να είναι πολύπλοκα:

$$y(t) = \cos[2\pi f_c t + \mu \cos(2\pi f_m t)]$$

Στο σχ. 53 βλέπουμε το φάσμα που προκύπτει όταν διαμορφώσουμε κατά συχνότητα έναν φορέα  $f_c = 2000$  Hz μ' ένα σήμα  $f_m = 100$  Hz ή 200 Hz, διατηρώντας την τιμή του  $\mu$  ίση με 2,4048 ή 4,0. Εδώ θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι απλές φασματικές συνιστώσες συναντώνται σε απόσταση  $f_m$  πάνω

και κάτω από τη συχνότητα του φορέα. Ο φορέας του σήματος δεν είναι υποχρεωτικό να εμφανίζεται μέσα στο φάσμα. Το πλάτος των απλών συνιστωσών μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel. Το συνολικό εύρος φάσματος που καταλαμβάνει ο διαμορφωμένος φορέας FM είναι πολύ μεγαλύτερο από το εύρος του σήματος που το διαμορφώνει. Σαν επαλήθευση της τελευταίας διαπίστωσης μπορούμε να αναφέρουμε τους ραδιοφωνικούς σταθμούς FM. Αν και η μέγιστη συνιστώσα του ακουστικού σήματος που εκπέμπουν φθάνει τα 15 KHz, το συνολικό εύρος εκτείνεται μέχρι τα 150 KHz. Η ιδιαιτερότητα αυτή είναι εκείνη που κάνει το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης αναισθητο στα πάσης φύσεως παράσιτα. Οι τυχόν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές επιδρούν σ' ένα μικρό μέρος του εκπεμπόμενου εύρους, με συνέπεια να επηρεάζουν ελάχιστα την ποιότητα του μεταφερόμενου ακουστικού σήματος. Το απαραίτητο εύρος Carson υπολογίζεται από το επιθυμητό εύρος που πρέπει να καταλαμβάνει ο διαμορφωμένος φορέας (εύρος καναλιού), όπως επίσης και από την ενέργεια του σήματος διαμόρφωσης.

### Ειδικά σήματα

Το CD-ROM, που συνοδεύει τη σειρά άρθρων, περιλαμβάνει ένα παράδειγμα σήματος διαμορφωμένου κατά συχνότητα από ένα ημιτονικό σήμα. Στη Γερμανία ο σταθμός ARD (Arbeitsgemeinschaft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der Bundesrepublik Deutschland ή απλώς 'Γερμανία 1') εκπέμπει ένα ειδικό σήμα για να δηλώσει την έναρξη μετάδοσης ταξιδιωτικών νέων. Το σήμα αυτό αποτελείται από έναν φορέα 2.350 Hz, διαμορφωμένο κατά συχνότητα από έναν τόνο 123 Hz. Ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι ίσος με 1, ενώ το φάσμα του συγκεκριμένου σήματος φαίνεται στο σχ. 54.

Η τακτική αυτή χρησιμοποιείται μόνο στη Γερμανία. Στη Βρετανία, τόσο το BBC όσο και οι υπόλοιποι ιδιωτικοί ραδιοσταθμοί, παρέχουν ταξιδιωτικές υπηρεσίες γνωστές σαν TP/TA

**Σχ. 58. Οι χαρακτήρες που προκύπτουν από την αποκωδικοποίηση του ραδιοτηλετυπικού σήματος.**

και EON. Με την προϋπόθεση ότι ο οδηγός-ακροατής έχει ενεργοποιήσει στον δέκτη του τη διαδικασία λήψης ταξιδιωτικών νέων (traffic mode), μόλις γίνει αντιληπτή η έναρξη μετάδοσής τους, θα διακοπεί η ακρόαση του κανονικού ραδιοφωνικού προγράμματος ή ακόμα και η αναπαραγωγή του κασετοφώνου, και θα αυξηθεί ελαφρά η ένταση του μεγαφώνου. Η τελευταία επέμβαση είναι απαραίτητη για να προκαλέσει το ενδιαφέρον του οδηγού. Η υπηρεσία TP/TA επιτρέπει τη διακοπή των προγραμμάτων του BBC με σκοπό τη μετάδοση ταξιδιωτικών νέων στις περιοχές εκείνες που καλύπτουν οι αναμεταδότες του συγκεκριμένου δικτύου σταθμών. Η υπηρεσία EON (Enhanced Other Networks) παρέχει έναν κατάλογο άλλων σταθμών που υποστηρίζουν δυνατότητες εκπομπής ταξιδιωτικών νέων.

### Ραδιοτηλέτυπο

Η υπηρεσία ασύρματου τηλετύπου (ραδιοτηλετύπου) μεταδίδει τα ψηφιακά σήματα του ενσύρματου τηλετύπου μέσω ηλεκτρομαγνητικών φορέων. Για το σκοπό αυτό ο φορέας διαμορφώνεται σύμφωνα με τις αρχές της διαμόρφωσης FSK (Frequency Shift Keying, Μετατόπισης Συχνότητας). Ένα τέτοιο σήμα (σχ. 55) προσδιορίζεται από μια κατάσταση ηρεμίας, που αντιπροσωπεύεται από μια συγκεκριμένη συχνότητα (space, διάστημα) του φορέα εκπομπής. Κάθε φορά που αρχίζει η μετάδοση ενός χαρακτήρα, η συχνότητα αυτή μετατοπίζεται ελαφρά παίρνοντας μια καινούργια τιμή (mark, σημείο). Αν ο ρυθμός μετάδοσης των συμβόλων (ψηφίων πληροφορίας) είναι ίσος με 50 σύμβολα, τότε η διάρκεια της μετατόπισης συχνότητας που προκαλεί το ψηφίο έναρξης θα είναι ίση με  $1/50 = 20$  msec. Μετά από το ψηφίο έναρξης, εκπέμπονται σετσιακά τα ψηφία που προσδιορίζουν τον εκπεμπόμενο χαρακτήρα. Ο κώδικας Ba-

udot, που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα, προβλέπει την παρουσία πέντε ψηφίων για κάθε χαρακτήρα. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ενός αλφαβήτου 64 διαφορετικών χαρακτήρων. Κάθε μεταδιδόμενο ψηφίο έχει διάρκεια ίση μ' αυτή του ψηφίου έναρξης, ενώ το σύνολο των ψηφίων που σχηματίζουν τον χαρακτήρα πλαισιώνεται από ένα ψηφίο λήξης. Η διάρκεια του τελευταίου είναι 1,42 φορές μεγαλύτερη απ' αυτή του ψηφίου έναρξης και χαρακτηρίζεται από εκπομπή συχνότητας αντίστοιχης του space. Ο επόμενος χαρακτήρας μπορεί να εκπεμφθεί οποιαδήποτε στιγμή αργότερα (ασύγχρονη μετάδοση), ξεκινώντας και τελειώνοντας με τον ίδιο τρόπο.

Στη διαμόρφωση FSK, η συχνότητα που αντιστοιχεί στο mark είναι ίση με 850 Hz, ενώ αυτή που αντιστοιχεί στο space ίση με 1350 Hz. Τα ψηφία της μεταδιδόμενης πληροφορίας επιβάλλονται σε ψηφιακή μορφή στην είσοδο ελέγχου ενός VCO (Voltage Controlled Oscillator, Ταλαντωτής Ελεγχόμενος από Τάση), το οποίο παράγει δύο διαφορετικές συχνότητες. Η απόσταση μεταξύ των δύο αυτών συχνοτήτων ονομάζεται 'μετατόπιση' (shift). Το αρχείο RTTY1.WAV περιλαμβάνει ένα τέτοιο σήμα, του οποίου τα ψηφία που το διαμορφώνουν εναλλάσσονται με ρυθμό 50 bit/sec. Οι συχνότητες mark και space είναι ίδιες μ' αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το φάσμα αυτού του σήματος μπορείτε να το δείτε με τη βοήθεια του αρχείου XRTTY1.SPP. Όπως θα το περιμένατε, δείχνει δύο κορυφές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις δύο διαφορετικές συχνότητες του διαμορφωμένου φορέα. Οι δύο αυτές συχνότητες βρίσκονται στα όρια ενός συνηθισμένου τηλεφωνικού καναλιού, οπότε τίποτα δεν μας εμποδίζει να τις εκπέμψουμε με τις ίδιες τεχνικές που εκπέμπουμε και τα σήματα ομιλίας μέσα από ένα συνηθισμένο κανάλι περιορισμένου εύρους.

## Αποκωδικοποίηση ραδιοτηλετυπικών σημάτων

Ένας φορέας διαμορφωμένος σύμφωνα με τη μέθοδο FSK μπορεί να μας δώσει την πληροφορία που μεταφέρει μ' έναν σχετικά απλό τρόπο. Κατ' αρχήν απαιτούνται δύο φίλτρα ζώνης, εκ των οποίων το ένα αναδεικνύει τη συχνότητα mark και το άλλο τη space. Οι έξοδοι των δύο αυτών φίλτρων ανορθώνονται και οδηγούνται σ' έναν διαφορικό ενισχυτή. Το σήμα του τελευταίου φιλτράρεται μια ακόμα φορά και οδηγείται σ' έναν σκανδαλιστή Schmitt. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ψηφιακό σήμα ανάλογο αυτού που διαμόρφωσε τον πομπό (σχ. 56). Την αποκωδικοποίηση του σήματος FSK μπορείτε να τη

μελετήσετε με την βοήθεια του αρχείου XRTTY6.SPP. Τα σήματα που προκύπτουν μπορείτε να τα δείτε στο σχ. 57, ενώ το κείμενο που αντιστοιχεί σ' αυτά στο σχ. 58. Για τον έλεγχο των ραδιοτηλετύπων χρησιμοποιείται συνήθως η ακολουθία RYRYRYR, αφού αυτή προκαλεί τις γρηγορότερες μεταβάσεις μεταξύ των δύο διαφορετικών συχνοτήτων του φορέα (XRTTY5.SPP).

## Επίλογος

Αν και μ' αυτήν τη συνέχεια τερματίζεται η σειρά των εισαγωγικών άρθρων σχετικά με την Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος, πολλές ενότητες απ' αυτές που θα θέλαμε να καλύψουμε δεν στάθηκε δυνατόν να συμπεριληφθούν. Μπορείτε όμως εσείς, αξιοποιώντας τα αρχεία του CD-ROM, να τις μελετήσετε μόνοι σας συμπληρώνοντας το αντικείμενο της σειράς. Ο τίτλος του CD-ROM που τα περιέχει είναι 'ESPRESSO', μια λέξη που προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Elektor electronics Signal PRocessing Experiments and Simulation SOfware και δεν έχει βέβαια καμία σχέση με τον καφέ παρ'όλο που μετά το τέλος των άρθρων αυτών θα ήταν καλός. Πιστεύουμε ότι η εμπειρία που αποκτήσατε από τα προηγούμενα αρχεία πειραμάτων, θα σας επιτρέψει να πραγματοποιήσετε και τα επόμενα χωρίς προβλήματα. Αν παρ' όλα αυτά έχετε απορίες, συμβουλευτείτε το αρχείο βοήθειας EXPS.DOC.

## Επιπλέον πειράματα του CD-ROM

*Παραγωγή σημάτων μονής πλευρικής*

*Μέθοδος φίλτρου και μέθοδος φάσης*

*Αποδιαμόρφωση σημάτων μονής πλευρικής*

*Διαμόρφωση φάσης*

*AMDS*

*BBC*

*Επίγειες μετεωρολογικές εκπομπές*

*Δορυφορικές μετεωρολογικές εκπομπές*

*Εκπομπές σημάτων χρόνου*

*Σήματα διτονιών (DTMF) (Dual tone multiple frequency)*