

# Κατευθυντικό μικρόφωνο

με ρυθμιζόμενη χαρακτηριστική

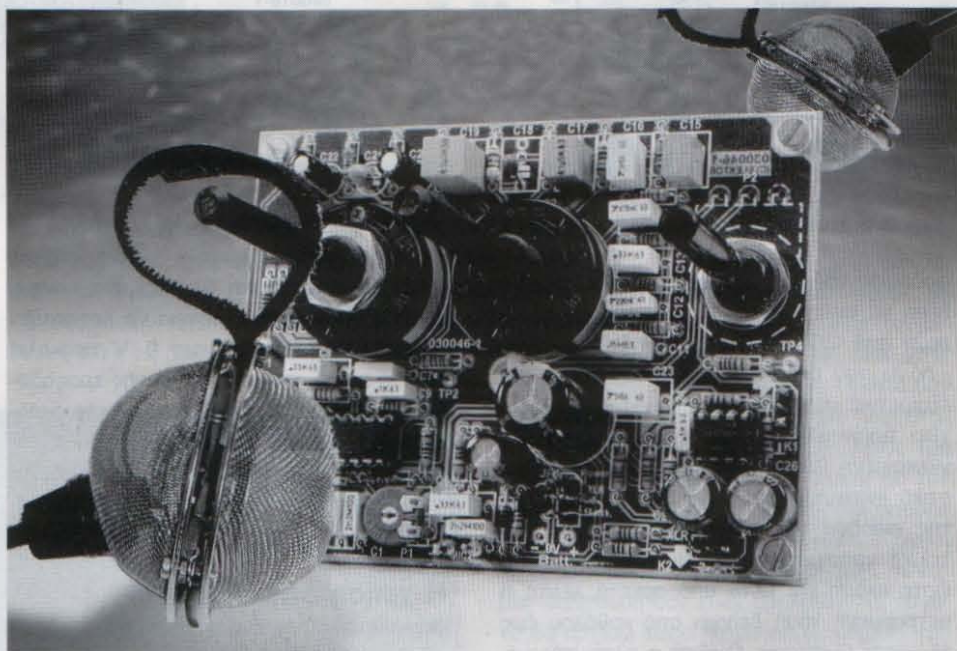
Σχεδίαση K. Rohwer και G. Schmidt

Το κατευθυντικό μικρόφωνο που δημοσιεύτηκε στο τεύχος Οκτωβρίου (2001) του περιοδικού *Ελεktor*, κάνει βέβαια μια χαρά την δουλειά του αλλή παρατηρούμε ότι δεν παρουσιάζει ιδανική κατευθυντικότητα. Οι συντάκτες λοιπόν του άρθρου προχώρησαν στην σχεδίαση ενός νέου κυκλώματος το οποίο ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις, τόσο στην θεωρία όσο και στην πράξη.

Το μικρόφωνο που δημοσιεύτηκε στο τεύχος Οκτωβρίου 2002 του περιοδικού *Ελεktor*, σχεδιάστηκε με στόχο την αποφυγή του κινδύνου εμφάνισης ακουστικής ανάδρασης στην περίπτωση που για παράδειγμα χρησιμοποιείται με μία τζαζ φουσαρμόνικα. Το πρόβλημα όμως είναι ότι δεν παρουσιάζει την ιδανική καρδιοειδή χαρακτηριστική κατευθυντικότητας. Είναι δυνατόν να αποδειχθεί με μαθηματικό τρόπο ότι καθώς η χαρακτηριστική μετασχηματίζεται από παν-κατευθυντική σε σχήμα οκτώ, σε καμία φάση δεν είναι αυστηρά καρδιοειδής ή υπερ-καρδιοειδής. Στην ουσία εισάγεται σταδιακά μία περιοχή κενού, σαν να σφίγγει μία ζώνη γύρω από την παν-κατευθυντική απόκριση μέχρι αυτή να πάρει την μορφή του οκτώ.

Η απόκριση συχνοτήτων δείχνει επίσης να υστερεί κατά κάποιο τρόπο, δεδομένου ότι παρουσιάζει μία σαφή χαρακτηριστική διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (δείτε και το ένθετο). Το γεγονός αυτό επηρεάζει κάπως την αρχική εφαρμογή, αφού εμφανίζεται το καλούμενο φαινόμενο 'εγγύτητας', όπως άλλωστε συμβαίνει και με όλες τις ευαίσθητες στην μεταβολή της πίεσης συσκευές. Αυτό σημαίνει ότι εάν έχουμε μία ηχητική πηγή στην 'εγγύς' περιοχή του μικροφώνου, οι χαμηλές συχνότητες ενισχύονται έχοντας σαν αποτέλεσμα μία τάση αναιρέσης της υπερεπατής χαρακτηριστικής.

Τα παραπάνω φαινόμενα ελήφθησαν υπ' όψη κατά την σχεδίαση του νέου κυκλώματος και έγινε μία σοβαρή προσπάθεια αντιμετώπισης τους. Το νέο λοιπόν κύκλωμα παρουσιάζει



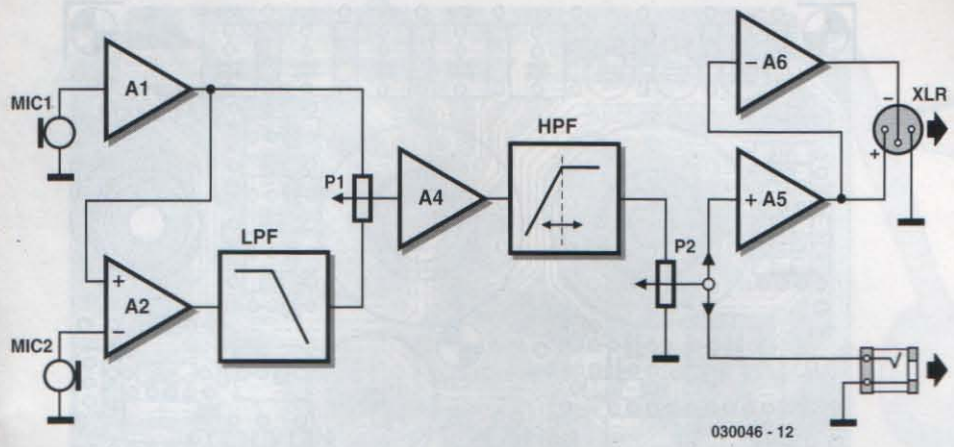
ζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ρυθμιζόμενη χαρακτηριστική κατευθυντικότητας: παν-κατευθυντική, ευρέως καρδιοειδής, καρδιοειδής, υπερ-καρδιοειδής και μορφή οκτώ.
- Απόκριση συχνοτήτων (για μακρινή απόσταση) αντισταθμισμένη μέχρι κάτω από 25 Hz (-3 dB)
- Αντιστάθμιση 'κοντινής ομιλίας' (καλούμενο φίλτρο χαμηλών ή 'roll-off') με ρυθμιζόμενη συχνότητα αποκοπής
- Δυνατότητα επιλογής εξόδου σε 'καρφή'

με μπαταρία 9 V ή XLR με τροφοδοσία φά-ντομ 12 V έως 48 V.

## Σχηματικό διάγραμμα

Στο Σχήμα 1 έχουμε το σχηματικό διάγραμμα του νέου προ-ενισχυτή, στο οποίο απεικονίζονται οι κάψες των πυκνωτικών μικροφώνων Mic1 και Mic2 τοποθετημένες η μία με την πλάτη στην άλλη με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στο άρθρο Οκτωβρίου του 2002. Το σήμα από το Mic1 οδηγείται αρχικά στο IC1.A και στην συνέχεια, μαζί με το σήμα από το Mic2 οδηγείται στον διαφορικό ενισχυτή



030046 - 12

Σχήμα 1. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος.

IC1.B. Με τον τρόπο αυτό έχουμε ένα μορφοτροπεία βαθμού μεταβολής πίεσης, αποτελούμενο από δύο μορφοτροπείς πίεσης.

Στην συνέχεια ακολουθεί ένα βαθυπερατό φίλτρο (LPF, Low Pass Filter) σχηματιζόμενο από τον τελεστικό ενισχυτή IC1.C, το οποίο αντισταθμίζει την υπερατά χαρακτηριστική που προκύπτει από την διευθέτηση των δύο μικροφώνων. Η σωστή απόκριση του εν λόγω φίλτρου εξαρτάται από την φυσική απόσταση μεταξύ των διαφραγμάτων των δύο μικροφώνων. Με την βοήθεια του διαιρέτη τάσης

P1 που ακολουθεί, έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίζουμε συνεχώς την έξοδο μεταξύ του (απομονωμένου) σήματος εξόδου του Mic1 (παν-κατευθυντική χαρακτηριστική), και της εξόδου του βαθυπερατού φίλτρου (χαρακτηριστική σε σχήμα οκτώ). Αυτή τη φορά το σταθμισμένο άθροισμα παράγει πράγματι τις διάφορες καρδιοειδείς χαρακτηριστικές, δεδομένου ότι το βαθυπερατό φίλτρο εισάγει επίσης και τις σωστές ολισθήσεις φάσης.

Παρακάτω, υπάρχει ένας ακόμη ενισχυτής-καταχωρητής (IC1.D), ο οποίος εξασφαλίζει

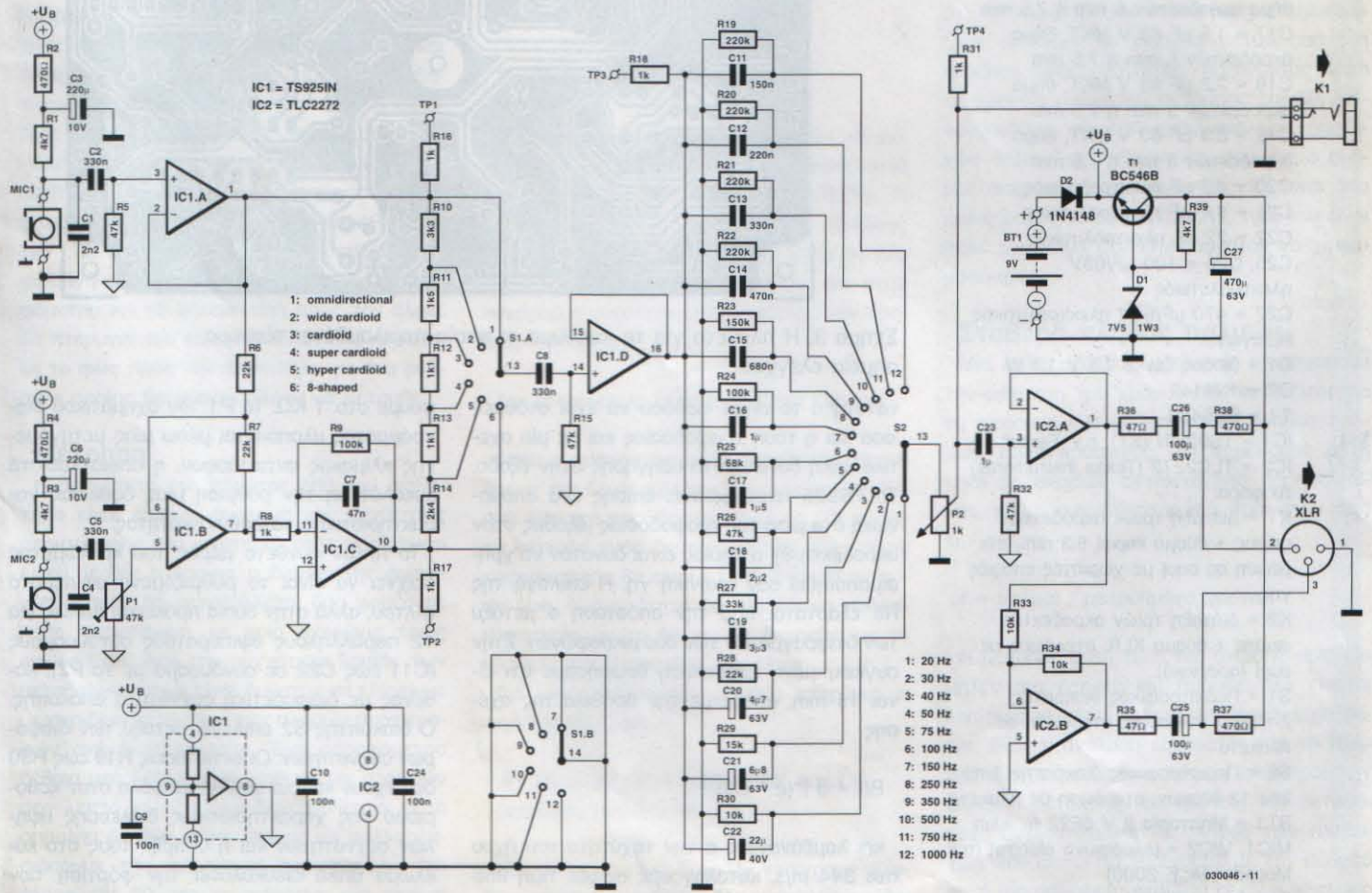
μία είσοδο χαμηλής εμπέδησης στο υπερατά φίλτρο (HPF, High Pass Filter) που χρησιμοποιείται για αντιστάθμιση 'κοντινής ομιλίας'. Οι ρυθμίσεις συχνότητας του εν λόγω φίλτρου είναι ρυθμιζόμενες, για να επιτρέπουν ποικιλία αποστάσεων του ομιλητή από το μικρόφωνο.

Τελειώνοντας, φθάνουμε στο ποτενοσιόμετρο ελέγχου της έντασης P2. Στο σημείο αυτό έχουμε την δυνατότητα να εξάγουμε το σήμα σε ένα θύσμα τύπου 'καρφή', ενώ είναι επίσης δυνατό να παράγουμε ένα ισοσταθμισμένο σήμα εξόδου 'στυλ στούντιο' σε θύσμα XLR. Η ισοσταθμισμένη έξοδος προκύπτει από τον καταχωρητή IC2.A και τον αναστρέφοντα ενισχυτή IC2.B.

**Κυκλωματικό διάγραμμα**

Ο εντοπισμός των διαφόρων μερών του σχηματικού διαγράμματος στο αντίστοιχο κυκλωματικό διάγραμμα που περιγράφεται στο Σχήμα 2, είναι μάλλον εύκολος. Να σημειώσουμε απλώς ότι οι είσοδοι στο IC1.B έχουν αντιστραφεί, για να αντισταθμίσουν την αντιστροφή που υφίσταται το σήμα στο βαθυπερατό φίλτρο IC1.C.

Η μονάδα TS925 είναι ένας τετραπλός τελεστικός ενισχυτής χαμηλού θορύβου με δυ-



- 1: 20 Hz
- 2: 30 Hz
- 3: 40 Hz
- 4: 50 Hz
- 5: 75 Hz
- 6: 100 Hz
- 7: 150 Hz
- 8: 250 Hz
- 9: 350 Hz
- 10: 500 Hz
- 11: 750 Hz
- 12: 1000 Hz

Σχήμα 2. Απαιτούμενο κυκλωματικό διάγραμμα του κατευθυντικού μικροφώνου

## Κατάλογος εξαρτημάτων

Αντιστάσεις:

R1, R3, R39 = 4,7 ΚΩ

R2, R4, R37, R38 = 470 Ω

R5, R15, R26, R32 = 47 ΚΩ

R6, R7, R28 = 22 ΚΩ

R8, R16, R17, R18, R31 = 1 ΚΩ

R9, R24 = 100 ΚΩ

R10 = 3,3 ΚΩ

R11 = 1,5 ΚΩ

R12, R13 = 1,1 ΚΩ

R14 = 2,4 ΚΩ

R19 - R22 = 220 ΚΩ

R23 = 150 ΚΩ

R25 = 68 ΚΩ

R27 = 33 ΚΩ

R29 = 15 ΚΩ

R30, R33, R34 = 10 ΚΩ

R35, R36 = 47 Ω

P1 = 47 ΚΩ τρίμμερ προρύθμισης

P2 = λογαριθμικό ποτενσιόμετρο 1ΚΩ

Πυκνωτές:

C1, C4 = 2,2 nF

C2, C5, C8, C13 = 330 nF

C3, C6 = 220 μF10V ηλεκτρολυτικός

C7 = 47 nF

C9, C10, C24 = 100 nF

C11 = 150 nF

C12 = 220 nF

C14 = 470 nF

C15 = 680 nF

C16, C23 = 1 μF 63 V MKT, θήμα ακροδεκτών 5 mm ή 7,5 mm

C17 = 1,5 μF 63 V MKT, θήμα ακροδεκτών 5 mm ή 7,5 mm

C18 = 2,2 μF 63 V MKT, θήμα ακροδεκτών 5 mm ή 7,5 mm

C19 = 3,3 μF 63 V MKT, θήμα ακροδεκτών 5 mm ή 7,5 mm

C20 = 4,7 μF ηλεκτρολυτικός

C21 = 6,8 μF ηλεκτρολυτικός

C22 = 22 μF ηλεκτρολυτικός

C25, C26 = 100 μF/63V

ηλεκτρολυτικός

C27 = 470 μF/63V ηλεκτρολυτικός

Ημιαγωγοί:

D1 = δίοδος ζένερ 7,5 V 1,3 W

D2 = 1N4148

T1 = BC546B

IC1 = TS925IN (ST), π.χ. Farnell

IC2 = TLC2272 (Texas Instruments)

Διάφορα:

K1 = Διάταξη τριών ακροδεκτών σειράς + βύσμα καρφί 6,3 mm, στερέωση σε σασί με χωριστές επαφές γης.

K2 = Διάταξη τριών ακροδεκτών σειράς + βύσμα XLR, στερέωση σε σασί (αρσενικό).

S1 = Περιστροφικός διακόπτης 2-πόλων 6-θέσεων, στερέωση σε πλακέτα

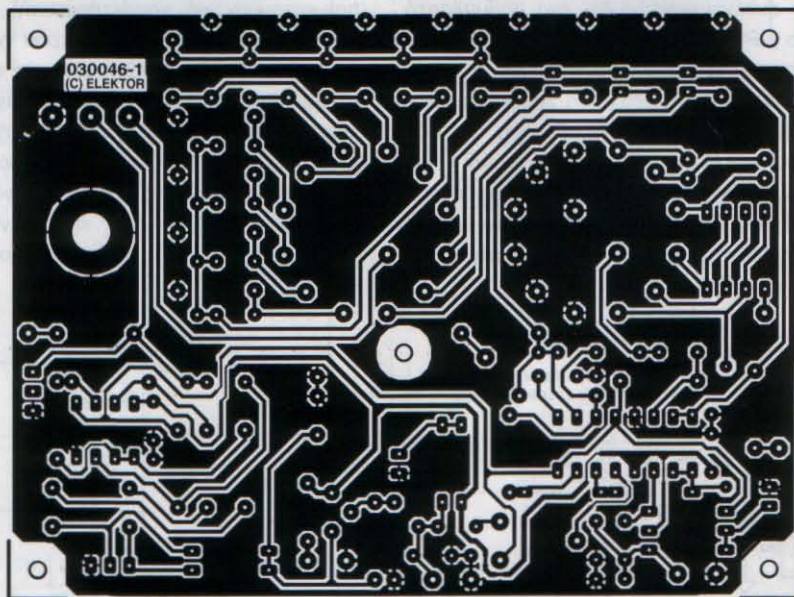
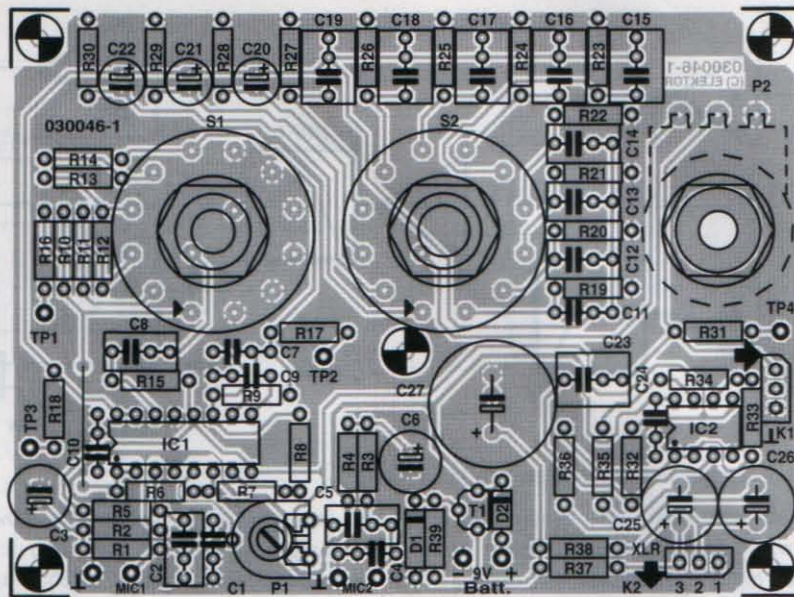
S2 = Περιστροφικός διακόπτης 1-πόλου 12-θέσεων, στερέωση σε πλακέτα

BT1 = Μπαταρία 9 V 6F22 με κλιπ

MIC1, MIC2 = μικρόφωνα electret (π.χ. Monacor MCE 2000)

Πλακέτα, κωδικός παραγγελίας

030046-1



Σχήμα 3. Η πλακέτα για το κύκλωμα, η οποία περιλαμβάνει τέσσερα σημεία ελέγχου.

νατότητα το σήμα εισόδου να έχει στάθμες 'οσο και η τάση τροφοδοσίας και με μία σχετική καλή δυνατότητα οδήγησης στην έξοδο. Το TS925 περιλαμβάνει επίσης ένα απομονωτή στο μισό της τροφοδοσίας (έξοδος στον ακροδέκτη 8), ο οποίος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν εικονική γη. Η επιλογή της R8 εξαρτάται από την απόσταση d μεταξύ των διαφραγμάτων των δύο μικροφώνων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήσαμε ότι είναι 15 mm, οπότε με την βοήθεια της σχέσης

$$R8 = d / (c * C3)$$

και λαμβάνοντας c την ταχύτητα του ήχου στα 344 m/s, καταλήγουμε σε μία τιμή 956 Ω. Η συγκεκριμένη τιμή δεν είναι ιδιαίτερα

ψουμε στο 1 ΚΩ. Το P1 του σχηματικού διαγράμματος υλοποιείται μέσω μιας μεταγόμενης κλίμακας αντιστάσεων, η οποία καθιστά ευκολότερη την ρύθμιση μίας δοθείσας χαρακτηριστικής κατευθυντικότητας.

Το πλέον σύνθετο μέρος του κυκλώματος δείχνει να είναι το ρυθμιζόμενο υπερπαρατό φίλτρο, αλλά στην ουσία πρόκειται απλώς για 12 παράλληλους υπερπαρατούς συνδυασμούς (C11 έως C22 σε συνδυασμό με το P2), καθέναν με διαφορετική συχνότητα αποκοπής. Ο διακόπτης S2 επιλέγει μεταξύ των διαφόρων συχνοτήτων. Οι αντιστάσεις R19 έως R30 δεν έχουν κάποιο σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της χαρακτηριστικής διέλευσης υψηλών συχνοτήτων και η ύπαρξη τους στο κύκλωμα απλά διευκολύνει την φόρτιση των πυκνωτών στο μισό της τάσης τροφοδοσίας,

TLO84  
TLO72

μεταβατικά ρεύματα κατά την μεταγωγή του φίλτρου. Η τιμή του ποτενσιομέτρου ρύθμισης της έντασης είναι μάλλον χαμηλή (1 K $\Omega$ ), έτσι ώστε να είναι δυνατή η λήψη της εξόδου για θύσμα κατ' ευθείαν από τον δρομέα.

Και οι δύο κάψες των μικροφώνων συνδέονται με τον καταχωρητή εξόδου IC2.A μέσω συνδυασμών RC (C2/R5, C5/P1 και C23/R32). Με τον τρόπο αυτό η εξόδος κάτω από τα 16 Hz κατεβαίνει στα 12 dB ανά οκτάβα και εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχει περίπτωση υπερδότησης των IC1.C και IC1.B.

Οι δύο τελεστικοί ενισχυτές συνδέονται παράλληλα με το θύσμα στην έξοδο, ώστε να παράγουν ένα ισοσταθμισμένο (καθώς και απομονωμένο) σήμα εξόδου. Ο IC2.A ενεργεί μόνον ως προσωρινή μνήμη ενώ ο IC2.B αναστρέφει το σήμα. Το ισοσταθμισμένο σήμα οδηγείται στον σύνδεσμο XLR μέσω των C25 και C26.

## Τροφοδοσία φάντομ

Η τροφοδοσία των ηλεκτρονικών μερών και των μικροφώνων είναι δυνατόν να ληφθεί είτε από μία μπαταρία 9 V PP3, είτε από κάποια τράπεζα μίξης η οποία διαθέτει τροφοδοσία φάντομ. Η δίοδος D2 απομονώνει τις δύο πηγές και εμποδίζει την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Οι R37 έως R39, C27, T1 και D1 δημιουργούν την τροφοδοσία φάντομ: η καθαρή τάση φάντομ εμφανίζεται στο σημείο σύνδεσης των R37 και R38, αφού το AC σήμα έχει απορριφθεί. Στην συνέχεια και μετά την εξομάλυνση (C27), οι T1 και D1 σχηματίζουν μία απλή αλλά επαρκέστατη βαθμίδα σταθεροποίησης τάσης αποδίδοντας περίπου 6,8 V. Χάρη στην λειτουργία σε όλο το εύρος τροφοδοσίας που παρουσιάζουν τα ολοκληρωμένα, το κύκλωμα διαθέτει ικανοποιητικότητα οδηγησης στην έξοδο.

Η λειτουργία του κυκλώματος είναι δυνατόν να γίνει με τροφοδοσία φάντομ στις συνήθεις τάσεις των 12 V, 24 V ή 48 V.

## Κατασκευή και ρύθμιση

Πέρα από τα ίδια τα μικρόφωνα, δεν υπάρχουν και πολλά θέματα για συζήτηση αναφορικά με την κατασκευή του κυκλώματος. Η πλακέτα που εικονίζεται στο Σχήμα 3, θα πρέπει λογικά να εξασφαλίζει μία άνετη συναρμολόγηση των εξαρτημάτων. Προσοχή να μην λησμονήσουμε την συρμάτινη γέφυρα κοντά στην R18. Επάνω στην πλακέτα υπάρχουν τέσσερα σημεία ελέγχου, στα οποία καλό είναι να κολλήσουμε ακίδες εφ' όσον σκοπούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις επάνω στο κύκλωμα.

Η μόνη ρύθμιση που χρειάζεται έχει να κάνει με την αντιστάθμιση των διαφορών μεταξύ της κάψας των δύο μικροφώνων. Η ρύθμιση αυτή γίνεται μέσω του P1 και προϋποθέ-

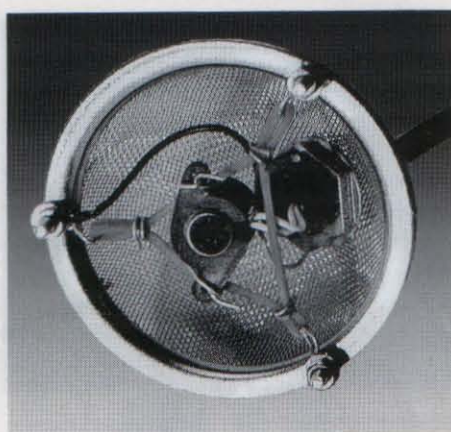
τει ότι θα έχουμε συνδεδεμένο στην έξοδο του κυκλώματος ένα παλμογράφο ή ένα βολτόμετρο ακουστών συχνοτήτων σε κλίμακα mV. Θέτουμε την χαρακτηριστική κατευθυντικότητα σε σχήμα οκτώ και το υψι-περατό φίλτρο στην χαμηλότερη συχνότητα. Κοντά στα μικρόφωνα φέρνουμε μία πηγή ακουστού ημιτονικού σήματος χαμηλής συχνότητας (τουλάχιστον όμως 16 Hz), διατηρώντας ταυτόχρονα τον άξονα του ζεύγους των μικροφώνων κάθετο στην κατεύθυνση της πηγής του ήχου. Το πλέον κατάλληλο για αυτή την δουλειά είναι ίσως ένα σήμα 50 Hz, δεδομένου ότι τόσο η παραγωγή όσο και οδήγηση του σε ένα στερεοφωνικό ενισχυτή είναι σχετικά εύκολη. Τα ηχεία βέβαια δεν θα παράγουν κανένα ιδανικό σήμα χωρίς παραμόρφωση, οπότε στην οθόνη του παλμογράφου είναι απαραίτητο να επικεντρωθούμε στην θεμελιώδη μόνον συνιστώσα του σήματος. Το πλάτος εξόδου θα πρέπει να ρυθμιστεί με την βοήθεια του P1 στο ελάχιστο, ενώ ενδέχεται να είναι χρήσιμο να αναζητήσουμε το ελάχιστο πλάτος 'παίζοντας' και με τον προσανατολισμό του μικροφώνου.

Η χρήση χαμηλής συχνότητας μας εξυπηρετεί, διότι στις υψηλότερες συχνότητες οι ανακλάσεις του ήχου μπορούν εύκολα να καλύψουν την πραγματική κατεύθυνση της πηγής του ήχου, υποθέτοντας πάντοτε ότι δεν έχουμε πρόσβαση σε κάποιο θάλαμο απαλλαγμένο ανακλάσεων όπως επίσης και ότι δεν επιθυμούμε να κάνουμε τις δοκιμές μας σε ανοιχτό χώρο.

Στην περίπτωση που δεν διαθέτουμε τον κατάλληλο εξοπλισμό, το μόνο που μπορούμε να κάνουμε είναι να δείξουμε εμπιστοσύνη στον κατασκευαστή των μικροφώνων, να θεωρήσουμε ότι οι δύο κάψες είναι ολόιδιες και να θέσουμε το P1 ακριβώς στην μέση της διαδρομής του.

## Η χρήση του μικροφώνου

Οι υπογράφοντες το άρθρο συναρμολόγησαν τα δύο μικρόφωνα όπως ακριβώς και στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 2 του αρχικού άρθρου). Παρ' όλα αυτά, δεν ακολουθήσαμε επακριβώς την διαδικασία που περιγράφεται στο Σχήμα 3 του ίδιου άρθρου και δεν φέραμε το θωρακισμένο καλώδιο μέχρι τις κάψες. Αντ' αυτού, για να συνδεθούμε με ένα θωρακισμένο δίκλωνο καλώδιο χρησιμοποιήσαμε μικρά κομμάτια πλεξούδας. Ο ελαστικός σωλήνας που φέρει τις δύο κάψες, αναρτάται με την βοήθεια ελαστικών λωρίδων στο εσωτερικό ενός ανοξείδωτου σφαιρικού σουρωτηριού από αυτά που χρησιμοποιούν οι Άγγλοι για το τσάι (Σχήμα 4). Οι ελαστικές λωρίδες οι οποίες στερεώνονται με τρεις βίδες M2 στην περίμετρο του σουρωτηριού, εξυπηρετούν στην απόρριψη του θορύβου που μπορεί να προκύ-



Σχήμα 4. Οι κάψες των μικροφώνων αναρτώνται με την βοήθεια ελαστικών λωρίδων.

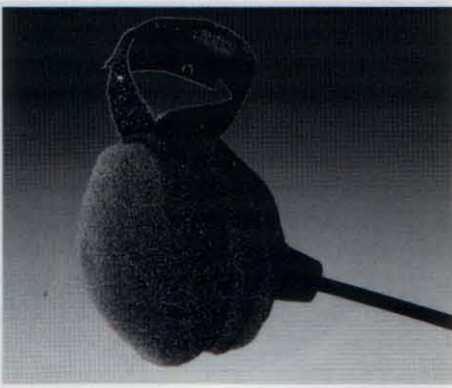
ψει από το κράτημα. Το καλώδιο εισάγεται στο σουρωτήρι λοξά, μέσω μίας διάταξης απορρόφησης των μηχανικών τάσεων η οποία επίσης στερεώνεται επάνω στο σουρωτήρι (Σχήμα 5). Συνδέοντας μάλιστα την θωράκιση του καλωδίου στο πλέγμα του σουρωτηριού, επιτυγχάνουμε και την απαιτούμενη θωράκιση από τον θόρυβο.

Τελειώνοντας, συνδέουμε τα δύο ημισφαιρια-σουρωτήρια με βίδες, καλύπτοντας το σύνολο της κατασκευής με ένα φίλτρο προστασίας από 'ξερούς' ήχους. Στο πρωτότυπο χρησιμοποιήσαμε δύο μεγάλα σφουγγάρια από ακουστικά, καλύπτοντας με αυτά τα δύο ημισφαίρια (Σχήμα 6), έτσι που η όλη κατασκευή θύμιζε... ξεροψημένο λουκουμά. Για να διευκολύνουμε και το κράτημα του μικροφώνου, μεταξύ των δύο ημισφαιρίων στερεώσαμε και μία ταινία συγκράτησης.

Τα ηλεκτρονικά μέρη βρίσκονται σε ξεχωριστό κουτί, το οποίο μπορεί για παράδειγμα να στερεώνεται στην ζώνη αυτού που φέρει



Σχήμα 5. Το πρωτότυπο πριν τοποθετηθεί το σφουγγάρι.



Σχήμα 6. Η μονάδα του μικροφώνου ολοκληρωμένη.

το μικρόφωνο. Η σύνδεση γίνεται μέσω δι-κλωνου θωρακισμένου καλωδίου το οποίο καταλήγει σε ένα θύσμα DIN 5 ακροδεκτών, όπου τα ζεύξη των ακροδεκτών συνδέονται παράλληλα για να αυξήσουμε την αξιοπιστία των επαφών. Για την έξοδο με τροφοδοσία φάντομ χρησιμοποιούμε ένα θύσμα XLR για

ασσί, ενώ για την περίπτωση τροφοδοσίας από μπαταρία χρησιμοποιούμε μία υποδοχή για 'καρφί' 6,3 mm με μονωμένο διακόπτη επαφής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε την αναγκαστική ενσωμάτωση ξεχωριστού διακόπτη on/off, καθώς και την υποχρέωση να θυμόμαστε κάθε φορά να τον ανοίξουμε.

Κατά την τελική χρήση στην σκηνή, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να πειραματιζόμαστε για να εντοπίζουμε ποια από τις διαθέσιμες χαρακτηριστικές κατευθυντικότητας προσφέρει την ελάχιστη ανάδραση. Αυτό εξαρτάται τόσο από τις θέσεις των ηχείων όσο και από τις παρακείμενες επιφάνειες ανάκλασης του ήχου. Η συχνότητα αποκοπής του υπερηχητικού φίλτρου θα πρέπει να οριστεί κατά προσέγγιση. Το φαινόμενο της 'εγγύτητας' το οποίο η συγκεκριμένη σχεδίαση προσπαθεί να αντιμετωπίσει, δεν είναι πάντοτε ανεπιθύμητο: σε ορισμένες περιπτώσεις τα ιδιαίτερα τονικά χαρακτηριστικά του αποτελούν πράγματι το ζητούμενο. (030046-1)

## Αναφορές:

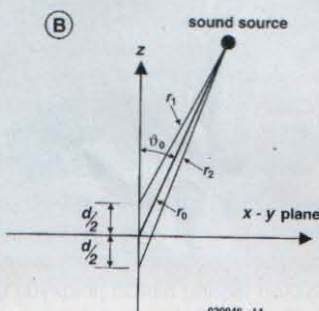
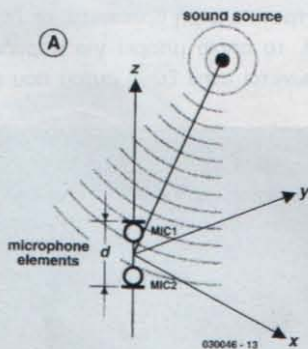
Φυλλάδιο δεδομένων TS925, ST Microelectronics

Κατευθυντικό μικρόφωνο. Του Klaus Rohwer, Περιοδικό Ελεκτορ, Οκτώβριος 2002, σελίδα 36.

Εγχειρίδιο Μαθηματικών' (Handbook of Mathematics). Του Bronstein Semendiyayev, Springer-Verlag, Βερολίνο 2002.

## Υπολογισμός της χαρακτηριστικής κατευθυντικότητας και της απόκρισης συχνότητας

Στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιήσουμε μιγαδικούς αριθμούς, διότι στην συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα. Οι υπολογισμοί θα μπορούσαν επίσης να γίνουν με χρήση πραγματικών μεγεθών, αλλά αυτό θα μπερδεύει λιγάκι τα πράγματα. Ως συνήθως, για τον άξονα των φανταστικών θα χρησιμοποιήσουμε j αντί για i, δεδομένου ότι το i είναι δυνατόν να μπερδευτεί με το ρεύμα.



Επιλέγουμε ένα σύστημα συντεταγμένων όπου τα διαφράγματα των μικροφώνων έχουν μία απόσταση d στον άξονα των z, ευρισκόμενα συμμετρικά ως προς το επίπεδο x-y (δηλαδή σε απόσταση d/2 προς τα επάνω και προς τα κάτω).

Δείτε το Σχήμα A και το Σχήμα B. Η πηγή του ήχου βρίσκεται σε απόσταση r0 από την κορυφή του συστήματος των συντεταγμένων. Έστω λοιπόν ότι η απόσταση μεταξύ της πηγής και των δύο διαφραγμάτων είναι r1 και r2.

Οι αποστάσεις αυτές είναι δυνατόν να υπολογιστούν με την βοήθεια του κανόνα των ημιτόνων:

$$r_1^2 = r_0^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 - r_0 \cdot d \cdot \cos \theta_0$$

$$r_2^2 = r_0^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 - r_0 \cdot d \cdot \cos \theta_0$$

Εδώ θ0 είναι η γωνία μεταξύ του άξονα z και της γραμμής που συνδέει την κορυφή των αξόνων και την πηγή του ήχου. Η πίεση p που οφείλεται στο κύμα του ήχου που διαδίδεται συμμετρικά και σφαιρικά, είναι δυνατόν να εκφραστεί ως προς τον χρόνο t και την απόσταση r, ως εξής:

$$p = \frac{p_0}{r} \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

Εδώ ω = 2 \* π \* f είναι η γωνιακή ταχύτητα του ήχου και κ = ω / c = 2 \* π \* λ είναι το πλήθος των κύκλων του ήχου, όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου (344 m/s) και λ είναι το μήκος κύματος (λ = c / f). Η p0 είναι μία παράμετρος η οποία εκπροσωπεί την ένταση του ηχητικού κύματος και για τους συγκεκριμένους υπολογισμούς δεν είναι απαραίτητη η γνώση της τιμής της. Η εξίσωση (3) μας δείχνει ότι η ένταση του ήχου είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από την πηγή του ήχου. Υποθέτουμε τώρα ότι το κάθε μικρόφωνο παράγει μία τάση ανάλογη της πίεσης του ήχου στο διάφραγμα του. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε τις τάσεις αυτές ως εξής:

$$U_1 = \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{j(\omega t - kr_1)}$$

$$U_2 = \frac{U_0}{r_2} \cdot e^{j(\omega t - kr_2)}$$

Εδώ πάλι η U0 είναι μία άλλη απροσδιόριστη παράμετρος, η οποία είναι ανάλογη του p0 και στην συνέχεια θα βγει από τους υπολογισμούς. Μας εξυπηρετεί στις συγκεκριμένες εξισώσεις να διαχωρίσουμε την αποκλειστική εξάρτηση από τον χρόνο και να εισάγουμε ένα σύνθετο πλάτος A. Τώρα έχουμε

$$U_1 = \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{-jkr_1} \cdot e^{j\omega t}$$

$$U_2 = \frac{U_0}{r_2} \cdot e^{-jkr_2} \cdot e^{j\omega t}$$

Στην συνέχεια θα χρειαστεί να αναπτύξουμε (για παράδειγμα) το U1 και κατά συνέπεια και το σύνθετο πλάτος στο πραγματικό και το φανταστικό του μέρος. Θα πρέπει κατά συνέπεια να

$$\hat{U}_1 := \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{-jkr_1}$$

$$\Rightarrow U_1 = \hat{U}_1 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\hat{U}_2 = \frac{U_0}{r_2} \cdot e^{-jk_2} \Rightarrow U_2 = \hat{U}_2 \cdot e^{j\omega t}$$

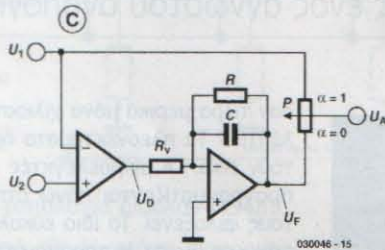
Ξαναγράψουμε την σύνδεση εκθετική συνάρτηση στα πραγματικά και φανταστικά της μέρη:

$$\hat{U}_1 = \frac{U_0}{r_1} (\cos kr_1 - j \sin kr_1) \Rightarrow \text{Re}(\hat{U}_1) = \frac{U_0}{r_1} \cos kr_1, \quad \text{Im}(\hat{U}_1) = \frac{U_0}{r_1} \sin kr_1$$

Το πλάτος δεν είναι το πραγματικό μέρος, αλλά μάλλον το μέτρο του σύνθετου πλάτους (το οποίο και θα χρειαστούμε αργότερα):

$$|\hat{U}| = \sqrt{\text{Re}(\hat{U})^2 + \text{Im}(\hat{U})^2}$$

Ρίχνουμε τώρα μία ματιά στο κύκλωμα του Σχήματος C.



Η διαφορική τάση UD δίνεται από την σχέση:

$$\hat{U}_D = \hat{U}_2 - \hat{U}_1 = U_0 \left( \frac{1}{r_2} e^{-jk_2} - \frac{1}{r_1} e^{-jk_1} \right)$$

Η εξίσωση για την τάση στην έξοδο του βαθυ-περατού φίλτρου UF προκύπτει εφαρμόζοντας τον κανόνα του Kirchoff στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή:

$$U_F = -U_D \frac{R}{R_V} \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Στις χαμηλές συχνότητες η απολαθή της βαθμίδας αυτής τείνει προς την σταθερή τιμή:

$$v = \frac{R}{R_V}$$

Γράφουμε το δ για τον λόγο μεταξύ της συχνότητας που μας ενδιαφέρει και την συχνότητα αποκοπής

$$\delta := \omega RC$$

$$\Rightarrow U_F = -U_D \cdot v \cdot \frac{1}{1 + j\delta} = -U_D \cdot v \cdot \frac{1 - j\delta}{1 + \delta^2}$$

$$\Rightarrow \hat{U}_F = -U_0 \cdot v \cdot \frac{1 - j\delta}{1 + \delta^2} \left( \frac{1}{r_2} e^{-jk_2} - \frac{1}{r_1} e^{-jk_1} \right)$$

$$\Rightarrow \hat{U}_F = -U_0 \cdot v \cdot \frac{1 - j\delta}{1 + \delta^2} \left[ \left( \frac{1}{r_2} \cos kr_2 - \frac{1}{r_1} \cos kr_1 \right) + j \left( \frac{1}{r_1} \sin kr_1 - \frac{1}{r_2} \sin kr_2 \right) \right]$$

$$\Rightarrow \text{Re}(\hat{U}_F) = U_0 \cdot \frac{v}{1 + \delta^2} \left[ \frac{\cos kr_1}{r_1} - \frac{\cos kr_2}{r_2} + \delta \left( \frac{\sin kr_2}{r_2} - \frac{\sin kr_1}{r_1} \right) \right]$$

$$\Rightarrow \text{Im}(\hat{U}_F) = U_0 \cdot \frac{v}{1 + \delta^2} \left[ \delta \left( \frac{\cos kr_2}{r_2} - \frac{\cos kr_1}{r_1} \right) + \frac{\sin kr_2}{r_2} - \frac{\sin kr_1}{r_1} \right]$$

Το ποτενοσίμετρο P μας επιτρέπει να συνθέσουμε τα UI και UF σε διάφορες αναλογίες. Έστω α το ποσοστό του UI. Τότε θα έχουμε:

$$\hat{U}_A = \alpha \hat{U}_1 + (1 - \alpha) \hat{U}_F$$

Από αυτό το σημείο και πέρα καλό είναι ο υπολογισμός να προχωρήσει αριθμητικά. Αυτό μπορεί να γίνει με την βοήθεια ενός απλού προγράμματος επεξεργασίας

λογιστικών φύλλων όπως είναι το Excel. Δημιουργούμε πρώτα μία στήλη για την μεταβαλλόμενη παράμετρο, αφήνοντας χώρο για αρκετές τιμές. Στην περίπτωση των χαρακτηριστικών κατευθυντικότητας αυτή είναι η θ0, και στην περίπτωση της συχνότητας αυτή είναι η f. Στην συνέχεια δημιουργούμε μερικές ακόμη στήλες για τα ενδιάμεσα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης. Τα λογιστικά φύλλα δεν είναι γενικά σε θέση να επεξεργάζονται μιγαδικούς αριθμούς, οπότε χρειάζονται χωριστές στήλες για το πραγματικό και χωριστές για το μιγαδικό μέρος κάθε σύνθετου μεγέθους. Καλό είναι επίσης να κρατήσουμε μία γωνία στο λογιστικό φύλλο στο οποίο θα αποθηκεύσουμε όλες τις σταθερές τιμές όπως r0, α, R, και C (όλα σε μονάδες SI, δηλαδή: m, Ω, και F).

Κατά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών κατευθυντικότητας, είναι βέβαια απαραίτητο να διατηρήσουμε την συχνότητα σταθερή (για παραδειγμα f = 1000 Hz), όπως επίσης κατά τον υπολογισμό της απόκρισης συχνότητων θα πρέπει να διατηρήσουμε σταθερή την γωνία πρόσπτωσης του ήχου θ0 (για παράδειγμα 0°). Όσον αφορά τώρα την άγνωστη U0 μπορούμε απλά να την θέσουμε στο 1. Στην προ τελευταία στήλη μπορούμε με την βοήθεια των εξισώσεων (14) και (23) να υπολογίσουμε την συμπεριφορά της UA, ενώ στην τελευταία στήλη μετατρέπουμε τις τιμές αυτές σε decibel χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$u = 20 \cdot \log \left( \frac{\hat{U}_A}{U_0} r_0 \right)$$

Εδώ μπορούμε να δούμε να δούμε κι όλες γιατί θέσαμε την U0 σε 1, απλοποιώντας την σχέση (24). Το u είναι τώρα ένα κατάλληλο μέγεθος για να μελετήσουμε την εξάρτηση από

την μεταβαλλόμενη παράμετρο. Τα προγράμματα επεξεργασίας λογιστικών φύλλων διαθέτουν συνήθως μορφές σχεδιασμάτων κατάλληλες για την χαρακτηριστική κατευθυντικότητας, όπως είναι η λειτουργία σχεδίασης πολικών συντεταγμένων του Excel. Περιλαμβάνοντας τον συντελεστή του r0, μπορούμε εύκολα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα σε διάφορες αποστάσεις μεταξύ πηγής ήχου και μικροφώνου, ενώ σε διαφορετική περίπτωση η εξάρτηση του u από την απόσταση αυτή θα ήταν πολύ μεγάλη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μεταβολή του ποσοστού σύνθεσης α. Οι τιμές που ακολουθούν δίνουν τις χαρακτηριστικές που εικονίζονται:

α	Χαρακτηριστική κατεύθυνσης
0	σχήμα οχτώ
0,25	Υπερκαρδιοειδές
0,37	supercardioid
0,66	Εύρο καρδιοειδές
1	Μόνοκατευθυντικό

Η χαρακτηριστική προσεγγίζεται καλύτερα όταν

$$R_V = \frac{d}{cC}$$

Η βέλτιστη τιμή για την RV εξαρτάται από την απόσταση d μεταξύ των δύο διαφραγμάτων. Η R από την άλλη, επηρεάζει την συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου και κατά συνέπεια το χρήσιμο εύρος του μικροφώνου, καθώς και την απολαθή (δείτε την εξίσωση 17). Κατά συνέπεια, η τιμή της R αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ εύρους ζώνης και του κινδύνου παρουσίας θορύβου λόγω υψηλής απολαθής. Μια ενδιαφέρουσα εκδοχή είναι το αποτέλεσμα που παρουσιάζει η μεταβολή του r0. Μπορούμε πολύ ευκρινώς να παρατηρήσουμε το φαινόμενο εγγύτητας, το οποίο όταν α = 0 και με μικρή τιμή της r0, ενισχύει τις χαμηλές συχνότητες. Θέτοντας C = 0 και R = RV, μπορούμε να εξομοιώσουμε το κύκλωμα του Οκτωβρίου 2002 χωρίς βαθυπερατό φίλτρο. Εδώ μπορούμε να παρατηρήσουμε την ισχυρή εξάρτηση της στάθμης του σήματος εξόδου από την συχνότητα, ακόμη και με μεγαλύτερες τιμές της r0.

Στο αποτέλεσμα βέβαια των υπολογισμών δεν μπορούμε να δώσουμε υπερβολική εμπιστοσύνη. Ας μην λημονούμε ότι δεν λάβαμε υπ' όψη το γεγονός ότι στην πράξη τα διαφράγματα δεν είναι σημειακά αλλά έχουν ένα συγκεκριμένο μέγεθος, γεγονός το οποίο έχει σημαντική επίδραση στις υψηλές συχνότητες. Ένα άλλο θέμα είναι ότι οι κάψες των μικροφώνων δεν είναι ιδανικά τοποθετημένες σε ανοικτό χώρο αλλά περιβάλλονται από το σουρωτήρι και το φίλτρο, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τόσο η χαρακτηριστική κατευθυντικότητας όσο και η απόκριση συχνότητων. Οι παραπάνω λοιπόν υπολογισμοί δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τις πραγματικές μετρήσεις σε ένα χώρο χωρίς αντήχηση, αλλά βέβαια απουσία τέτοιων δυνατοτήτων μπορούν τουλάχιστον να δώσουν μία ενδεχομένως χρήσιμη προσέγγιση.