



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

---

## Ψηφιακή Επεξεργασία Φωνής

Άσκηση 6η

Στυλιανού Ιωάννης

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

---

# ΗΥ578: 6<sup>η</sup> Σειρά Ασκήσεων

1. Αποδείξτε ότι οι εξισώσεις:

$$u(x, t) = u^+(t - \frac{x}{c}) - u^-(t + \frac{x}{c})$$

$$p(x, t) = \frac{\rho c}{A} \left[ u^+(t - \frac{x}{c}) + u^-(t + \frac{x}{c}) \right]$$

είναι λύσεις της κυματικής εξίσωσης:

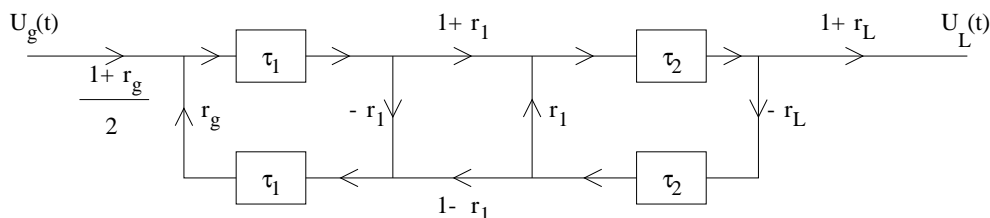
$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho}{A} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

Βοήθεια: Κάντε χρήση του κανόνα της αλυσίδας:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial t}$$

2. Θεωρούμε ότι έχουμε μια φωνητική οδό με δύο διατομές  $A_1$  και  $A_2$ . Το διάγραμμα ροής εισόδου-εξόδου φαίνεται στο Σχήμα. 1 όπου  $\tau_1$  και  $\tau_2$  είναι οι χρόνοι που χρειάζεται ο ήχος για να διαδωθεί στην πρώτη και δεύτερη διατομή, αντίστοιχα. Επίσης



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής για ένα μοντέλο φωνητικής οδούς δύο διατομών.

$$r_1 = \frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}$$

και  $r_g$  και  $r_L$  είναι οι συντελεστές ανάκλασης στα άκρα (φωνητικές χορδές και χείλη).

(α') Ποια είναι η απόκριση σε συχνότητα του συστήματος;

$$H(\Omega) = \frac{U_L(\Omega)}{U_g(\Omega)}$$

(β') Δείξτε ότι αν η διαφορά πίεσης στην έξοδο των χειλιών είναι μηδέν ( $p(L, t) = 0$ ) και αν δεν υπάρχουν απώλειες στις φωνητικές χορδές η απόκριση σε συχνότητα του συστήματος έχει τη μορφή:

$$H(\Omega) = \frac{1 + r_1}{\cos[\Omega(\tau_1 + \tau_2)] + r_1 \cos[\Omega(\tau_1 - \tau_2)]}$$

3. Κατά την εκφώνηση των ηχηρών /i/, /ae/ και /a/, θεωρούμε ένα μοντέλο για τη φωνητική οδό δύο διατομών χωρίς απώλειες. Για κάθε φώνημα ισχύουν τα παρακάτω στοιχεία.

Φώνημα	$l_1$	$A_1$	$l_2$	$A_2$
/i/	9 cm	8 cm <sup>2</sup>	6 cm	1 cm <sup>2</sup>
/ae/	4 cm	1 cm <sup>2</sup>	13 cm	8 cm <sup>2</sup>
/a/	9 cm	1 cm <sup>2</sup>	8 cm	7 cm <sup>2</sup>

όπου  $l_1$  και  $l_2$  είναι το μήκος του κάθε τομέα και  $A_1$  και  $A_2$  οι διατομές τους. Θεωρούμε ταχύτητα ήχου  $c = 35000 \text{ cm/sec}$ .

(α') Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της Ασκήσης 2, και θεωρώντας μηδενικές απώλειες ( $r_g = 1, r_L = 1$ ) υπολογίστε τα πλάτη και γωνίες των 4 πρώτων πόλων (αυτοί που έχουν τη μικρότερη γωνία). Αυτοί αντιστοιχούν στα πρώτα τέσσερα formants.

(β') Αν θεωρήσουμε επιρροές από τις φωνητικές χορδές και τα χείλη, χρησιμοποιούμε  $r_g = 0.98$  και  $r_L = 0.77$ . Υπολογίστε ξανά τα πλάτη και γωνίες των 4 πρώτων formants.

(γ') Ποια είναι σε κάθε περίπτωση οι συχνότητες σε  $\text{Hz}$  των 4 πρώτων formants;

Βοήθεια: Για να βρείτε του πόλους του συστήματος χρησιμοποιήστε την αλλαγή μεταβλητής

$$z = e^{j2\Omega/c}$$

και στη συνέχεια με τη βοήθεια του Matlab και των εντολών roots, abs, angle απαντήστε στα παραπάνω ερωτήματα.

4. Θεωρούμε ότι η φωνητική οδός για ένα ηχηρό φώνημα έχει μήκος 17 cm και διατομή 5 cm<sup>2</sup>. Καθώς ανοίγουν οι φωνητικές χορδές δημιουργείται μια δεύτερη κοιλότητα μήκους 2 cm (θεωρώντας και τις νόθες φωνητικές χορδές) και διατομής 1 cm<sup>2</sup>. Υπολογίστε τη συχνότητα του πρώτου formant όταν οι φωνητικές χορδές είναι κλειστές και όταν είναι ανοικτές όπως περιγράφεται παραπάνω. Θεωρώντας ότι το άνοιγμα και κλείσιμο των φωνητικών χορδών γίνεται

κάθε 100 Hz σχεδιάστε το διάγραμμα χρόνου-συχνότητας για το πρώτο formant. Θεωρήστε απώλειες ενέργειας ( $r_g = 0.98$  και  $r_L = 0.77$ ).

5. Η αντίσταση  $Z_R(\Omega)$  που δημιουργείται από τα χείλη δίδεται να είναι ίση με:

$$Z_R(\Omega) = \frac{j\Omega L_r R_R}{R_R + j\Omega L_R}$$

(σχέση 4.24 σελ. 132 από T. Quatieri) όπου  $R_R = 128/(9\pi^2)$  και  $L_R = 8a/(3\pi c)$  και  $a$  είναι η ακτίνα ανοίγματος του στόματος. Θεωρήστε  $a = 1.3 \text{ cm}$  - μικρό σχετικά ανοίγμα μιας και υπάρχει κίνδυνος με τα διάφορα έντομα που κυκλοφορούν τέτοια εποχή.

Χρησιμοποιώντας το διγραμμικό μετασχηματισμό

$$s = \frac{2}{T} \left[ \frac{z - 1}{z + 1} \right]$$

όπου  $T = 1/f_s$  με  $f_s = 10000 \text{ Hz}$  δείξτε ότι:

$$Z_R(e^{j\omega}) = 1 - e^{-j\omega}$$

και διαπιστώστε (σχεδιάζοντας το φάσμα πλάτους) ότι υπάρχει περίπου 6 dB κέρδος ανά οκτάβα.

Σημείωση : ένας πόλος που είναι μακριά από το μοναδιαίο κύκλο δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση σε συχνότητα ενός συστήματος.

6. Βασισμένοι στην προηγούμενη σειρά ασκήσεων και στην τωρινή, θα πρέπει να γνωρίζετε πλέον καλά το μοντέλο source-filter για την παραγωγή της φωνής. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο δημιουργήστε τους ήχους /i/, /ae/ και /a/ με  $f_s = 8000 \text{ Hz}$  για κανονική ηχηρή φωνή, ψιθυριστή, και με κάποια ανωμαλία (π.χ. vocal fry). Για τους ήχους που εμφανίζουν περιοδικότητα να δημιουργήσετε ανδρική, γυναικεία και παιδική φωνή.

# Σημειώματα

## Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, **Στυλιανού Ιωάννης**. «Ψηφιακή Επεξεργασία Φωνής. Άσκηση 6η». Έκδοση: 1.0. **Ηράκλειο/Ρέθυμνο** 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://www.csd.uoc.gr/~hy578>.

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

