

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER

Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας

EMC²

Φαινόμενο Doppler

Όταν μια πηγή ήχου και ένας ακροατής βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, η συχνότητα του ήχου που ακούει ο ακροατής δεν είναι ίδια με τη συχνότητα της πηγής, αλλά υπάρχει μια σχέση που συνδέει την μετατόπιση της συχνότητας και τις ταχύτητες της πηγής και του ακροατή. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **φαινόμενο Doppler**.

Για παράδειγμα αν βρίσκεστε στο δρόμο και ένα ασθενοφόρο κινείται με την σειράνα του ανοικτή, τότε καθώς σας προσεγγίζει ακούτε τον ήχο της σειρήνας ολοένα και οξύτερο, ενώ όταν σας προσπερνά και απομακρύνεται ο ήχος ακούγεται συνεχώς ασθενέστερος.

Χαρακτηριστική εφαρμογή του φαινομένου Doppler αποτελούν τα ραντάρ για τον έλεγχο της ταχύτητας των αυτοκινήτων.

Για απλούστευση εξετάζεται μόνο η ειδική περίπτωση στην οποία η πηγή και ο ακροατής κινούνται κατά μήκος της γραμμής που τους ενώνει. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

α) Ακίνητη πηγή – Κινούμενος ακροατής



Σχήμα 1

Έστω μια ακίνητη ηχητική πηγή S και ένας ακροατής L που κινείται με ταχύτητα v_L ως προς την πηγή. Η πηγή εκπέμπει ένα ηχητικό κύμα συχνότητας ν και μήκους κύματος $\lambda = v/\nu$, όπου v η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

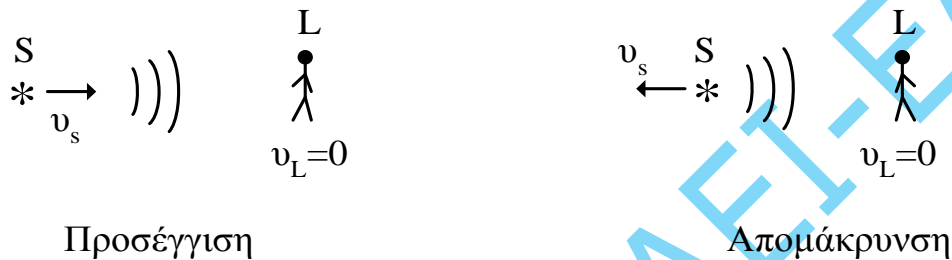
Όταν ο ακροατής προσεγγίζει την πηγή, η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων φτάνουν σε αυτόν με ταχύτητα $v + v_L$, η οποία ισούται και με το μήκος κύματος λ επί την συχνότητα ν_L που αντιλαμβάνεται ο ακροατής. Δηλαδή είναι:

$$\lambda \nu_L = v + v_L \Rightarrow \nu_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v/\nu} \Rightarrow \nu_L = \frac{v + v_L}{v} \nu \quad (1)$$

Αντίθετα όταν ο ακροατής απομακρύνεται από την πηγή, η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων φτάνουν σε αυτόν με ταχύτητα $v - v_L$, η οποία είναι ίση με λv_L , οπότε:

$$\lambda v_L = v - v_L \Rightarrow v_L = \frac{v - v_L}{\lambda} = \frac{v - v_L}{v/v} \Rightarrow \boxed{v_L = \frac{v - v_L}{v} v} \quad (2)$$

β) Κινούμενη πηγή – Ακίνητος ακροατής



Σχήμα 2

Έστω μια ηχητική πηγή S που κινείται με ταχύτητα v_s ως προς έναν ακίνητο ακροατή L . Η πηγή εκπέμπει ένα ηχητικό κύμα συχνότητα ν και v είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα, αφού προσδιορίζεται από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης και δεν επηρεάζεται από την κίνηση της πηγής. Το μήκος κύματος λ όμως μεταβάλλεται και δεν ισούται με v/ν , γιατί η πηγή ακολουθεί ή απομακρύνεται από τα πλησιάζοντα κύματα του ακροατή και επομένως τα μέτωπα πλησιάζουν ή απομακρύνονται μεταξύ τους.

Έτσι αν η πηγή πλησιάζει τον ακροατή με ταχύτητα v_s και ν είναι η συχνότητα των εκπεμπόμενων κυμάτων, τότε στη διάρκεια κάθε ταλαντώσεως καλύπτει μια απόσταση v_s/ν και κάθε μήκος κύματος μικραίνει κατά το ποσό αυτό. Άρα το μήκος κύματος του ήχου που αντιλαμβάνεται ο ακροατής είναι:

$$\lambda_L = \frac{v}{\nu} - \frac{v_s}{\nu}$$

Και επειδή $v = \lambda_L v_L \Rightarrow \lambda_L = v/v_L$ η συχνότητα του ήχου που ακούει ο ακροατής αυξάνεται και γίνεται ίση με:

$$\frac{v}{v_L} = \frac{v - v_s}{v} \Rightarrow \boxed{v_L = \frac{v}{v - v_s} v} \quad (3)$$

Αντίθετα αν η πηγή απομακρύνεται από τον ακροατή, το εκπεμπόμενο μήκος κύματος είναι κατά v_s/ν μεγαλύτερο από το λ και έτσι ο ακροατής ακούει την μειωμένη συχνότητα:

$$v_L = \frac{v}{v + v_s} v \quad (4)$$

Η γενική σχέση που ισχύει για κινούμενη πηγή και ακίνητο ακροατή είναι:

$$v_L = \frac{v}{v \mp v_s} v \quad (5)$$

όπου το πλην ισχύει όταν η πηγή προσεγγίζει τον ακροατή και το συν όταν η πηγή απομακρύνεται από τον ακροατή.

γ) Κινούμενη πηγή – Κινούμενος ακροατής

Αν τόσο η πηγή όσο και ο ακροατής κινούνται μέσα στο μέσο διάδοσης, αποδεικνύεται εύκολα σύμφωνα με τα παραπάνω ότι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο ακροατής είναι:

$$v_L = \frac{v \pm v_L}{v \mp v_s} v \quad (6)$$

Η σχέση (6) περικλείει όλες τις δυνατές περιπτώσεις της σχετικής κίνησης πηγής και ακροατή.

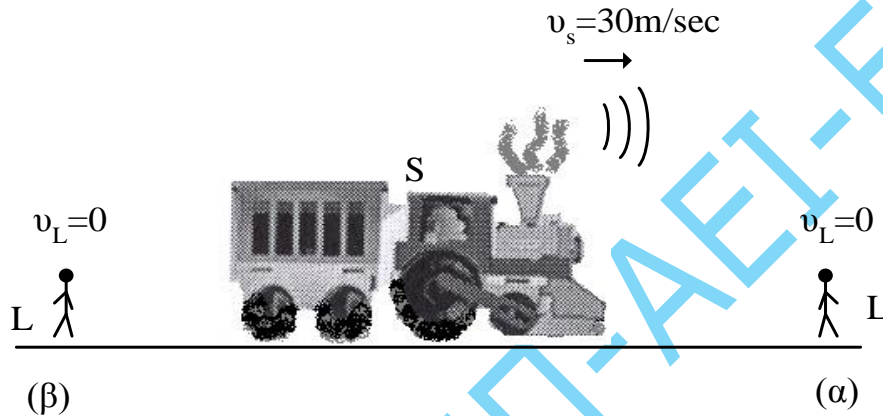
📖 Παρατήρηση

Στην παραπάνω ανάλυση του φαινομένου Doppler θεωρήθηκε ότι το μέσο στο οποίο διαδίδονται τα ηχητικά κύματα (αέρας) παραμένει ακίνητο. Αν το μέσο έχει ταχύτητα v_m κατά μήκος της γραμμής που ενώνει την πηγή και τον ακροατή, τότε η ταχύτητα του ήχου ως προς τον ακροατή είναι $v + v_m$, οπότε η γενική εξίσωση (6) του φαινομένου Doppler γίνεται:

$$v_L = \frac{v \pm v_L + v_m}{v \mp v_s + v_m} v \quad (7)$$

✍ Εφαρμογή

Ένα τρένο ταξιδεύει με ταχύτητα 30 m/sec ως προς ακίνητο αέρα. Η συχνότητα του ήχου που εκπέμπει η σφυρίχτρα της αμαξοστοιχίας είναι 400Hz και η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 344 m/sec. Τι συχνότητα σφυρίγματος θα ακούσει ένας ακίνητος ακροατής και πόσο είναι το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων **α)** μπροστά από την αμαξοστοιχία και **β)** πίσω από την αμαξοστοιχία.

Λύση

α) Επειδή η ηχητική πηγή (τρένο) προσεγγίζει τον ακίνητο ακροατή, η συχνότητα του σφυρίγματος που αντιλαμβάνεται ο ακροατής σύμφωνα με την (3) είναι:

$$v_L = \frac{v}{v - v_s} v = \frac{344}{344 - 30} \cdot 400 \text{ Hz} \Rightarrow v_L = 438,2 \text{ Hz}$$

Το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων μπροστά από την αμαξοστοιχία είναι:

$$v = \lambda_L v_L \Rightarrow \lambda_L = \frac{v}{v_L} = \frac{344 \text{ m/sec}}{438,2 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda_L = 0,79 \text{ m}$$

β) Όταν ο ακίνητος ακροατής είναι πίσω από την αμαξοστοιχία, η ηχητική πηγή απομακρύνεται από αυτόν και η συχνότητα του σφυρίγματος που αντιλαμβάνεται ο ακροατής σύμφωνα με την (4) είναι:

$$v_L = \frac{v}{v + v_s} v = \frac{344}{344 + 30} \cdot 400 \text{ Hz} \Rightarrow v_L = 368 \text{ Hz}$$

Ενώ το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων πίσω από την αμαξοστοιχία είναι:

$$v = \lambda_L v_L \Rightarrow \lambda_L = \frac{v}{v_L} = \frac{344 \text{ m/sec}}{368 \text{ Hz}} \Rightarrow \lambda_L = 0,93 \text{ m}$$