

Σύστημα μη γραμμικού Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου εφαρμοσμένο σε αεροπορικό κάθισμα

Δημήτρης Μυλωνάς
Υπ. Διδάκτορας¹
dimimy1579@mail.ntua.com

Αλμπέρτο
Ερσπάμερ
Υπ.
Διδάκτορας²

Χρήστος
Γιακόπουλος
Δρ. Μηχ.
Μηχανικός³

Ιωάννης
Αντωνιάδης
Καθηγητής⁴

^{1,2,3,4} Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών,
Εργαστήριο Δυναμικής και Ακουστικής, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780,
Ζωγράφου, Αθήνα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου, για την ελάττωση της ακουστικής πίεσης γύρω από το προσκέφαλο μιας αεροπορικής θέσης. Το σύστημα βασίζεται στην αρχή της εξουδετέρωσης δύο ακουστικών κυμάτων με ίδιο πλάτος και αντίθετη φάση όταν αυτά συμβάλλουν και είναι προσανατολισμένο στην εξουδετέρωση χαμηλόσυχων ακουστικών διαταραχών, για τις οποίες είναι γνωστό ότι οι παθητικές τεχνικές ηχομείωσης είναι αναποτελεσματικές. Επιπλέον χρησιμοποιείται ένας μη γραμμικός προσαρμοστικός αλγόριθμος (FsLMS), ο οποίος συνδυάζεται με μια τεχνική πρόβλεψης της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, που βασίζεται στη γραμμική παρέκταση. Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο μοντέλο αεροπορικής καμπίνας του εργαστηρίου Δυναμικής και Ακουστικής του ΕΜΠ για πραγματική ακουστική διαταραχή καταγεγραμμένη σε καμπίνα αεροσκάφους κλίνοντος στρωφείου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση του πλάτους των επιμέρους αρμονικών μεγαλύτερη των 10 dB και μείωση του συνολικού επιπέδου θορύβου που κυμαίνεται από 8 dB έως 11 dB στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Non-linear ANC system for aircraft's seat headrest

ABSTRACT

In present work an Active Noise Control System (ANCS) mounted on the headrest of an aircraft's seat is proposed. It is based on the non-linear FsLMS algorithm alongside with a linear extrapolation technique used to estimate the acoustic pressure around the passenger's ears. In order to check system's effectiveness, real-time experiments took place inside an aircraft's cabin mock-up for an acoustic disturbance measured during the flight of a tilt-rotor aircraft. The results have shown a more than 10 dB attenuation of different BPF harmonics and a significant SPL reduction that varies from 8 dB to 11 dB around the passenger's ears.

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί στη μείωση του επιπέδου θορύβου στο εσωτερικό της καμπίνας των αεροσκαφών, κυρίως χάρη στη χρήση καινοτόμων υλικών ηχομόνωσης και στην κατασκευή κινητήρων που παράγουν λιγότερο θόρυβο. Παρόλα αυτά, το συνολικό επίπεδο ακουστικής πίεσης (SPL) είναι συνήθως πάνω από 80 dB [1], συμβάλλοντας στη δημιουργία ενοχλητικών συνθηκών για τον επιβάτη. Όταν αναφερόμαστε στη συχνотική περιοχή πάνω από τα 400 Hz, κυριαρχούν οι αρμονικές που σχετίζονται με τον αεροδυναμικό θόρυβο. Οι χαμηλές συχνότητες από την άλλη, που εντοπίζονται στην ακουστική διαταραχή μέσα στην καμπίνα του αεροσκάφους συνδέονται με την συχνότητα διέλευσης του ρότορα (BPF) και τις αρμονικές της [2]. Ειδικά στα αεροσκάφη κλίνοντος στροφείου (tilt-rotor aircrafts), τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, η συχνότητα BPF είναι περίπου 10 φορές μικρότερη σε σχέση με ένα συμβατικό αεροσκάφος με έλικα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη χρήση ελαφρών και μικρού πάχους ηχομονωτικών υλικών με σκοπό τη μείωση του βάρους, οδηγούν στην αύξηση της ακουστικής πίεσης που οφείλεται σε χαμηλές συχνότητες και μπορεί να φτάσει τα 95 dB [3].

Προκειμένου να βελτιωθούν οι ακουστικές συνθήκες για τους επιβάτες αεροσκαφών τέτοιου τύπου, στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, το οποίο εγκαθίσταται στο προσκέφαλο της αεροπορικής θέσης. Πρώτη φορά, ένα τέτοιο σύστημα προτάθηκε το 1953 από τους Olson και May, το οποίο βασίζονταν σε έναν ελεγκτή με ανάδραση [4]. Απο τότε αρκετά συστήματα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου έχουν προταθεί, που έχουν σκοπό να αυξήσουν το μέγεθος της ζώνης ησυχίας και να την τοποθετήσουν γύρω από το κεφάλι του επιβάτη καθώς και να μειώσουν, όσο το δυνατόν περισσότερο τη συνολική ακουστική πίεση μέσα στη ζώνη αυτή. Μια κλασσική προσέγγιση βασίζεται στον αλγόριθμο FxLMS με 2 ηχεία και δυο μικρόφωνα [5], που όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι η ζώνη ησυχίας βρίσκεται κοντά στα μικρόφωνα, τα οποία συνήθως δεν μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στα αυτιά του επιβάτη. Προκειμένου να λυθεί το παραπάνω ζήτημα έχουν προταθεί συστήματα παρακολούθησης κεφαλιού (head tracking) [6] καθώς και αλγόριθμοι προσέγγισης της εικονικής ακουστικής πίεσης στο σημείο ενδιαφέροντος (virtual sensing) [7].

Στην προσέγγιση της παρούσας εργασίας, για το σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου χρησιμοποιήθηκαν δύο subwoofers και δυο ζεύγη μικροφώνων τα οποία προορίζονται για τον προσδιορισμό με την τεχνική της γραμμικής παρέκτασης της ακουστικής πίεσης, στα σημεία όπου βρίσκονται τα αυτιά του επιβάτη [8]. Με τον τρόπο αυτό, η θέση της ζώνης ησυχίας μπορεί να αλλάξει με έναν υπολογιστικά αποτελεσματικό τρόπο, δίνοντας έτσι μια αποδοτική λύση στο πρόβλημα που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έπειτα για τον υπολογισμό του σήματος ακύρωσης θορύβου, με το οποίο οδηγούνται τα subwoofers προτείνεται ο μη γραμμικός αλγόριθμος FsLMS, ο οποίος αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην μοντελοποίηση συστημάτων με ήπιες μη γραμμικότητες και συστημάτων μη ελάχιστης φάσης (non-minimum phase) [9]. Ο συνδυασμός του FsLMS με την μετατόπιση της ζώνης ησυχίας χρησιμοποιώντας την τεχνική της

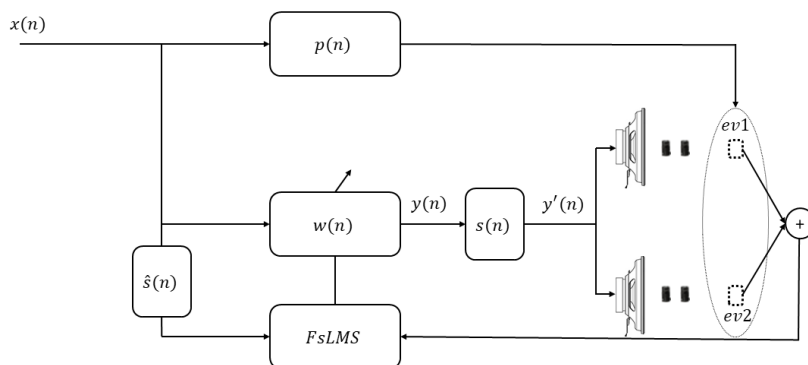
γραμμικής παρέκτασης, αποτελεί την καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά στο μέγεθος της ζώνης ησυχίας, όπου η μείωση της ακουστικής πίεση είναι τουλάχιστον 10 dB.

1. Αλγόριθμος ενεργητικού ελέγχου θορύβου

Για να υλοποιηθεί το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου απαιτούνται δύο στάδια: Στο πρώτο, το οποίο προηγείται χρονικά του δεύτερου, πραγματοποιείται ο υπολογισμός ενός μοντέλου του δευτερογενούς μονοπατιού του συστήματος των μεγαφώνων και των μικροφώνων. Στο δεύτερο, χρησιμοποιείται το άθροισμα των εικονικών σημάτων σφάλματος στα αυτιά του επιβάτη, που υπολογίστηκαν μέσω της τεχνικής της γραμμικής παρέκτασης, για να προσδιορισθεί η συνάρτηση κόστους. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους γίνεται με τον αλγόριθμο FsLMS δεύτερης τάξης και ταυτόχρονα υπολογίζονται οι συντελεστές ενός μη γραμμικού προσαρμοστικού φίλτρου. Η συνέλιξη του φίλτρου αυτού με το σήμα αναφοράς, το οποίο προέρχεται από ένα μικρόφωνο στην πηγή του θορύβου, δίνει το σήμα που οδηγεί τα subwoofers του συστήματος (Σχ.1).

1.1 Μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού

Το δευτερογενές μονοπάτι $s(n)$ (Σχ.1) περιλαμβάνει, το ηλεκτροακουστικό σύστημα που ξεκινά από τον ελεγκτή και τελειώνει στα μικρόφωνα σφάλματος. Για την μοντελοποίησή του χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος LMS (Least Mean Square) με σήμα αναφοράς λευκό θόρυβο, ο οποίος αναπαράγεται από τα δύο subwoofers και σήμα σφάλματος το άθροισμα των σημάτων των δύο μακρινών, ως προς τα ηχεία μικροφώνων κάθε ζεύγους.



Σχήμα 1: Μπλόκ διάγραμμα του συστήματος τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Με $x(n)$ συμβολίζεται η ηχητική διαταραχή στην πηγή του θορύβου, με $s(n)$ και $\hat{s}(n)$ το δευτερογενές μονοπάτι και η εκτίμησή του που προέκυψε από το πρώτο στάδιο μοντελοποίησης. Επίσης με $w(n)$ συμβολίζεται το μη γραμμικό προσαρμοστικό φίλτρο και με $ev1, ev2$ οι εκτιμώμενες ακουστικές πιέσεις στις θέσεις της ακύρωσης του θορύβου (αυτιά επιβάτη) που προκύπτουν από την γραμμική παρέκταση των σημάτων των πραγματικών μικροφώνων.

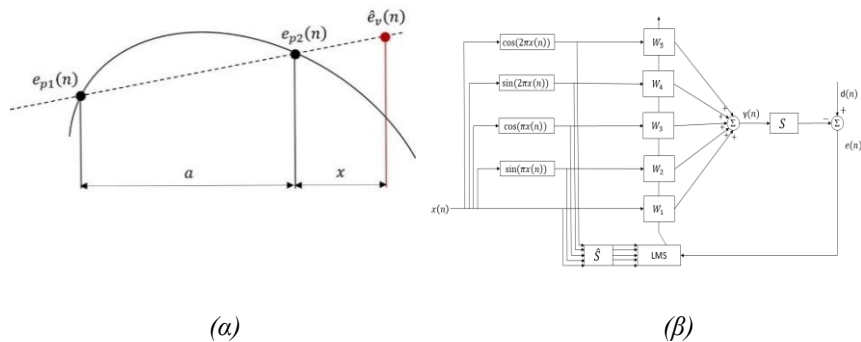
Η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού με κατά το δυνατόν μικρότερο σφάλμα συμβάλλει στην ευστάθεια και την καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου του δευτέρου σταδίου του συστήματος, όπου το σήμα αναφοράς αρχικά φιλτράρεται από το μοντέλο πριν χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο FsLMS.

1.2 Γραμμική παρέκταση

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η γραμμική παρέκταση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, όπου λόγω της γεωμετρίας του προσκέφαλου μιας αεροπορικής θέσης, είναι δύσκολο να τοποθετηθούν μικρόφωνα. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί δύο ζεύγη μικροφώνων (Σχ. 2α) και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για χαμηλόσυχνες ακουστικές διαταραχές (<400 Hz), όπου τα μήκη κύματος είναι μεγάλα. Με βάση τα σήματα κάθε ζεύγους υπολογίζεται η εικονική ακουστική πίεση από την εξίσωση της γραμμικής παρέκτασης (Εξ. 1).

$$e_v(n) = \frac{e_{p2}(n) - e_{p1}(n)}{a} * x + e_{p2}(n) \quad (1.1)$$

Όπου a είναι η απόσταση ανάμεσα στα δυο μικρόφωνα κάθε ζεύγους και x η απόσταση ανάμεσα στο πιο μακρινό μικρόφωνο και τη θέση όπου επιδιώκεται η ακύρωση του θορύβου (Σχ. 2α).



Σχήμα 2: (α) Σχηματική απεικόνιση του προσδιορισμού της ακουστικής πίεσης στα σημεία ενδιαφέροντος με την τεχνική της γραμμικής παρέκτασης, (β) μπλοκ διάγραμμα του μη γραμμικού αλγορίθμου FsLMS δεύτερης τάξης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

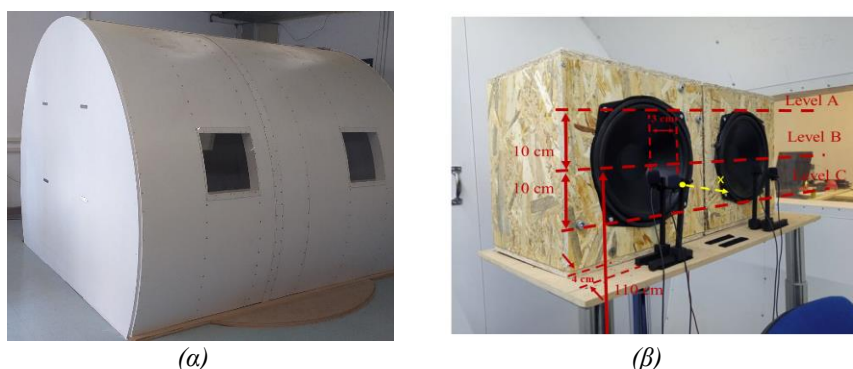
1.3 Μη γραμμικός αλγόριθμος FsLMS 2^{ης} τάξης

Ο αλγόριθμος FsLMS είναι η προσαρμογή ενός Functional Link Neural Network (FLNN) στο πρόβλημα του ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Έτσι αντί για ένα σήμα

αναφοράς που έχουμε στον κλασσικό FxLMS, στον FsLMS δεύτερη τάξης με ημιτονοειδή συνάρτηση επέκτασης (Σχ. 2β) έχουμε 5 σήματα αναφοράς. Οι έξοδοι των μη γραμμικών φίλτρων που προκύπτουν συνδυάζονται για τον υπολογισμό του τελικού σήματος ακύρωσης θορύβου. Με τον τρόπο αυτό εισάγονται μη γραμμικότητες, οι οποίες καθιστούν τον εν λόγω αλγόριθμο πιο αποτελεσματικό στην πρόβλεψη ακουστικών διαταραχών με χαοτικά χαρακτηριστικά παράλληλα με τις αρμονικές συνιστώσες.

2. Πειραματικά αποτελέσματα

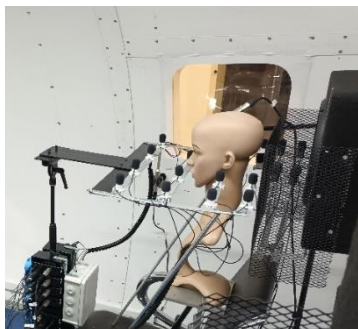
Το σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω αξιολογήθηκε πειραματικά σε μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους εγκατεστημένο μέσα στο εργαστήριο (Σχ. 3α) προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητά του στη μείωση του πλάτους των επιμέρους αρμονικών της ακουστικής διαταραχής καθώς και του συνολικού επιπέδου ακουστικής πίεσης (SPL) γύρω από το προσκέφαλο της αεροπορικής θέσης. Σαν ακουστική διαταραχή χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό σήμα καταγεγραμμένο μέσα στην καμπίνα ενός αεροσκάφους κλίνοντος στορφέιου (tilt-rotor) κατά τη διάρκεια πτήσης με ταχύτητα 160 κόμβους σε ύψος 10000 πόδια. Έπειτα το σήμα αυτό αναπαράχθηκε από ένα subwoofer στο χώρο του εργαστηρίου, με τρόπο ώστε να διατηρεί όσο το δυνατό περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του πραγματικού σήματος. Για το σύστημα ενεργητικού ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 2 subwoofer τύπου Visaton WS 25E και 4 μικρόφωνα Shure MX 183 (Σχ. 3β).



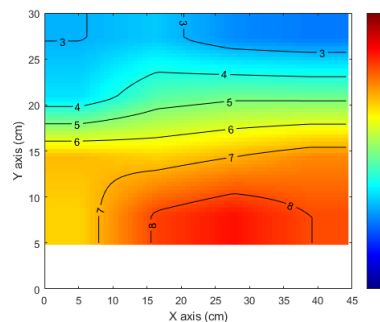
Σχήμα 3: (α) Μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών, (β) σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου με δυο subwoofers και δύο ζεύγη μικροφώνων.

Η ακουστική διαταραχή κάτω από τα 400 Hz στην περιοχή όπου επιχειρήθηκε η ακύρωση του θορύβου αποτελείται από αρμονικές της συχνότητας διέλευσης του ρότορα (BPF), η οποία βρίσκεται στα 24 Hz και χαμηλόσυχο θόρυβο. Συνεπώς οι κύριες αρμονικές βρίσκονται στα 48 Hz, 72 Hz, 96 Hz και 119 Hz. Στο σχήμα 4α παρουσιάζεται το σύστημα μέτρησης της συνολικής ακουστικής πίεσης (SPL) στην περιοχή του προσκέφαλου. Αυτό αποτελείται από 4 σειρές μετρητικών μικροφώνων, τα οποία σχηματίζουν ένα πλέγμα το οποίο μπορεί να κινείται στην κατακόρυφη

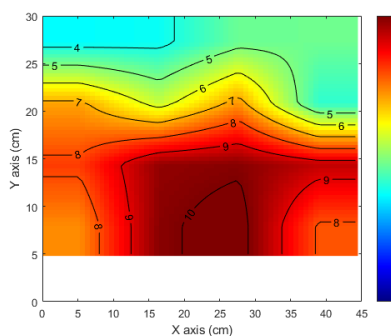
διεύθυνση. Οι μετρήσεις έγιναν σε 3 επίπεδα με απόσταση 100 cm, 110 cm και 120 cm αντίστοιχα από το πάτωμα της καμπίνας.



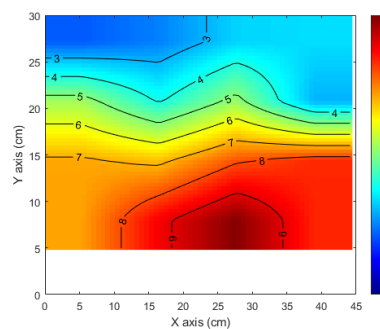
(α)



(β)



(γ)



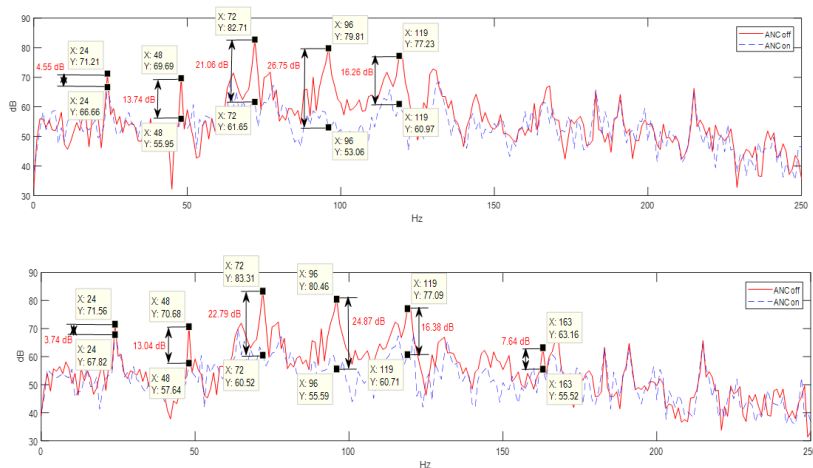
(δ)

Σχήμα 4: (α) Μετρητική διάταξη με πλέγμα μικροφώνων και διαφορά της συνολικής ακουστικής πίεσης (dB) μετά την ενεργοποίηση του συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου για το επίπεδο με απόσταση από το δάπεδο (β) 100 cm, (γ) 110 cm και (δ) 120 cm. Η SPL πριν την ενεργοποίηση του συστήματος ήταν περίπου 95 dB γύρω από το προσκέφαλο του επιβάτη. Τέλος η περιοχή από 0 cm έως 5 cm στη διεύθυνση Y δεν περιλαμβάνει μετρήσεις μιας και δεν είναι δυνατόν τα αυτιά να βρεθούν σε αυτή.

Σαν επίπεδο όπου βρίσκονται συνήθως τα αυτιά ενός επιβάτη μεσαίου ύψους θεωρήθηκε εκείνο που απέχει 110 cm από το πάτωμα. Επιπλέον τα μικρόφωνα που αντιστοιχούν στη θέση των αυτιών θεωρήθηκε ότι απέχουν από την επιφάνεια του προσκεφάλου 10 cm καθώς και 15 cm μεταξύ τους.

Στα σχήματα 4β, 4γ και 4δ παρουσιάζεται η διαφορά της ακουστικής πίεσης όταν το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου είναι ενεργοποιημένο σε σχέση με την κατάσταση όταν το σύστημα είναι απενεργοποιημένο. Οι τιμές της ακουστικής πίεσης ανάμεσα στα μικρόφωνα που απαρτίζουν το πλέγμα προσεγγίζονται με γραμμική παρεμβολή αφού δεν είναι εφικτό να έχουμε μια μέτρηση για κάθε σημείο του χώρου. Παρατηρούμε ότι ειδικότερα στο επίπεδο των αυτιών (Σχ. 4γ) δημιουργείται μια ζώνη με μείωση της SPL κατά 10 dB, που έχει εμβαδό 20 cm x 10 cm. Ακόμα η ζώνη

μείωσης της SPL κατά 8 dB καταλαμβάνει εμβαδό ίσο με 25 cm x 5 cm στο επίπεδο με απόσταση 100 cm από το πάτωμα της καμπίνας, 35 cm x 15 cm στο επίπεδο με απόσταση 110 cm και 30 cm x 10 cm στο επίπεδο με απόσταση 120 cm.



Σχήμα 5: Φάσματα συχνοτήτων στα σημεία όπου είναι πιθανό να βρίσκονται τα αυτιά ενός επιβάτη μεσαίου ύψους (το επάνω φάσμα αντιστοιχεί στο αριστερό αυτί) και αντιστοιχούν σε απόσταση 110 cm από το πάτωμα του αεροσκάφους και 10 cm από το επίπεδο του προσκεφάλου. Επίσης τα δυο σημεία απέχουν 15 cm μεταξύ τους.

Όσο αφορά στα φάσματα συχνοτήτων στα σημεία των αυτιών (Σχ. 5), παρατηρείται μείωση των πλατών των κύριων αρμονικών μεγαλύτερη από 10 dB. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση των πλάτους της αρμονικής στα 72 Hz (21,06 dB στο αριστερό αυτί και 22,79 dB στο δεξί) και της αρμονικής στα 96 Hz (26,75 dB στο αριστερό αυτί και 24,87 dB στο δεξί).

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, βασισμένο στον μη γραμμικό αλγόριθμο FsLMS δεύτερης τάξης και δοκιμάστηκε σε ένα μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους για μια πραγματική ακουστική διαταραχή που προέρχεται από ένα αεροσκάφος κλίνοντος στροφείου. Η ζώνη ησυχίας με μείωση της SPL κατά τουλάχιστον 7 dB καταλαμβάνει μια περιοχή με όγκο διαστάσεων 35 cm x 10 cm x 30 cm. Επιπλέον στην περιοχή των αυτιών του επιβάτη η μείωση της SPL είναι περίπου 10 dB και το πλάτος των κύριων αρμονικών της BPF (48 Hz, 72 Hz, 96 Hz, 119 Hz) καταγράφει μείωση μεγαλύτερη των 10 dB με πιο αξιοσημείωτη την εξασθένιση των αρμονικών στα 72 Hz και 96 Hz που ξεπερνάει τα 20 dB. Με βάση τα παραπάνω το σύστημα δημιουργεί μια ζώνη ησυχίας επαρκή για ήπιες κινήσεις του κεφαλιού, στην οποία η εξασθένιση της συνολικής ακουστικής πίεσης αγγίζει και σε κάποια σημεία ξεπερνά τα 10 dB, γεγονός που το

καθιστά αποτελεσματικό για τη βελτίωση των ακουστικών συνθηκών γύρω από το προσκέφαλο του επιβάτη.

4. Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικά κονδύλια μέσω του Horizon 2020 / Clean Sky JU, υπό την πρόσκληση ενδιαφέροντος H2020-CS2_CFP10-2019-01 (Clean sky), με θέμα JTI-CS2-2019-CFP10-AIR-02-82, τύπο δράσης CS2-RIA και όνομα έργου PIANO: Path Identification for Active Noise Control (αριθμός έργου: 885976).

5. Αναφορές

- [1] I. Dimino, F. Aliabadi, Active Control of Aircraft Cabin Noise, Imperial College Press, London (2015).
- [2] G. Benardini, C. Testa, M. Gennaretti, “Tiltrotor cabin noise control through smart actuators”, Journal of Vibration and Control, **22**, pp 3-17 (2016).
- [3] A. D. Marano, T. Pollito, M. Guida, M. Barbarino, M. Belardo, A. Perazzolo, F. Marulo, “Tiltrotor Acoustic Data Acquisition and Analysis”, Aerotecnica Missili and Spazio, **100**, pp 111-122 (2021).
- [4] H. F. Olson, E. G. May, “Electronic sound absorber”, Journal of the Acoustical Society of America, **25**, pp 1130–1136 (1953).
- [5] I. Dimino, C. Colangeli, J. Cuenca, P. Vitiello, M. Barbarino, “Active noise control for aircraft cabin seats”, Applied Sciences, **12**, (2022).
- [6] W. Jung, S.J. Elliot, J. Cheer, “Combining the remote microphone technique with head tracking for local active sound control”, Journal of the Acoustical Society of America, **142**, pp 298-307 (2017).
- [7] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander, C. Petersen, “A review of virtual sensing algorithms for active noise control”, Algorithms, **1**, pp 69-99 (2008).
- [8] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis, “An extrapolation-based virtual sensing technique of improving the control performance of the FxLMS algorithm in a maritime environment”, Applied Acoustics, **193**, (2022).
- [9] D.P. Das, G. Panda, “Active mitigation of Nonlinear Noise Processes using a novel filtered-s LMS Algorithm”, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, **12**, pp 313-322 (2004).