



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών**

Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος

3η εργαστηριακή άσκηση

**«Συστοιχίες Μικροφώνων (Microphone Arrays) και Πολυκαναλική
Επεξεργασία Σημάτων (Multichannel Signal Processing) »**

Βασιλοπούλου Φωτεινή

ΑΜ: 03114854

Ακαδημαϊκό έτος 2018-2019

Μέρος 1. Συστοιχίες μικροφώνων και χωρικό φιλτράρισμα (Spatial Filtering)

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της χρήσης συστοιχιών μικροφώνων για την επεξεργασία ακουστικών σημάτων. Με την χρήση μικροφώνων κατανεμημένων στον χώρο, αξιοποιούνται τόσο τα χρονικά όσο και τα χωρικά χαρακτηριστικά των σημάτων που λαμβάνονται. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να απορριφθούν σήματα που δεν έρχονται από την επιθυμητή κατεύθυνση και άρα αποτελούν θόρυβο.

Κάθε σήμα που λαμβάνεται φιλτράρεται από ένα γραμμικό, χρονικά αναλλοίωτο φίλτρο και στη συνέχεια τα σήματα από όλα τα κανάλια αθροίζονται με αποτέλεσμα την τελική έξοδο του συστήματος. Η διαδικασία είναι γνωστή ως *beamforming*, ενώ το σύστημα των φίλτρων και του αθροιστή ονομάζεται *beamformer*. Για την περιγραφή της χωρικής απόκρισης του *beamformer* χρησιμοποιείται το *beam pattern* (που αποτελεί το χρονικό ανάλογο της απόκρισης συχνότητας ενός φίλτρου). Αποτέλεσμα της επεξεργασίας αυτής είναι η απομόνωση του ηχητικού σήματος που φτάνει υπό μία συγκεκριμένη γωνία στη συστοιχία, αποκόποντας τα σήματα που φτάνουν από οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση και θεωρούνται θόρυβος.

Εδώ χρησιμοποιείται μια γραμμική διάταξη συστοιχιών N μικροφώνων. Θεωρούμε ότι τα μικρόφωνα ισαπέχουν μεταξύ τους κατά d , συνεπώς πρόκειται για ομοιόμορφη γραμμική συστοιχία (*uniform linear array*, *ULA*). Σε αυτήν την περίπτωση, το *delay-and-sum beam pattern* δίνεται από τον τύπο:

$$B(\omega, \theta) = \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{N\omega}{2c} d(\cos \theta - \cos \theta_s) \right]}{\sin \left[\frac{\omega}{2c} d(\cos \theta - \cos \theta_s) \right]} \Rightarrow$$
$$B(f, \theta) = \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{N 2\pi f}{2c} d(\cos \theta - \cos \theta_s) \right]}{\sin \left[\frac{2\pi f}{2c} d(\cos \theta - \cos \theta_s) \right]}$$

Όπου

- N , ο αριθμός των μικροφώνων της συστοιχίας
- d , η απόσταση μεταξύ των μικροφώνων
- $c = 340 \text{ m/sec}$, η ταχύτητα του ήχου στον αέρα
- f , η συχνότητα του ηχητικού σήματος
- θ_s , η γωνία υπό την οποία φτάνει το επιθυμητό σήμα στη συστοιχία φίλτρων
- θ , το σύνολο των πιθανών γωνιών με τις οποίες φτάνουν τα σήματα στη συστοιχία των φίλτρων.

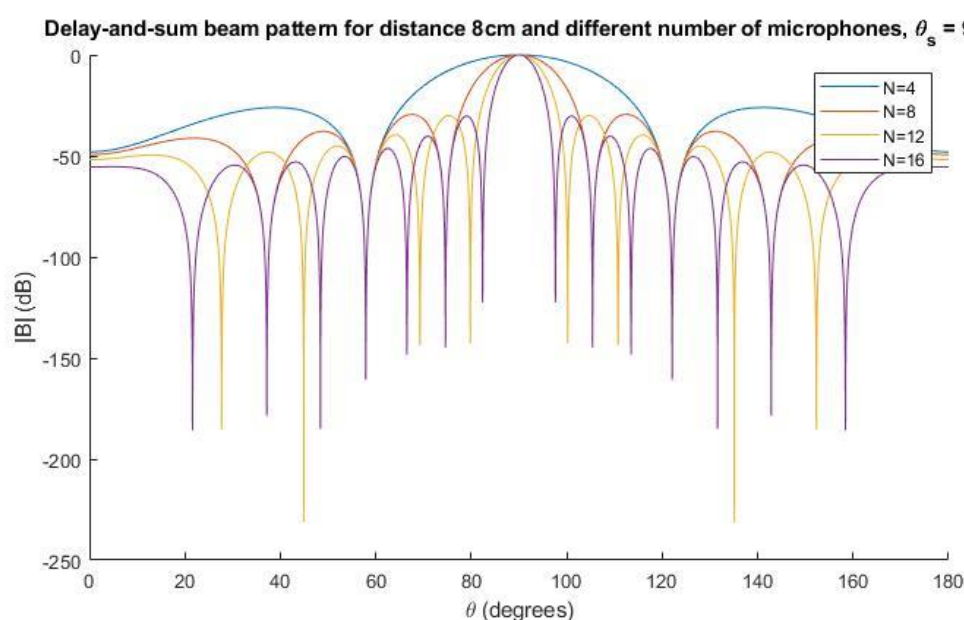
1.4 Μελέτη χαρακτηριστικών του delay-and-sum beam pattern

Στη συνέχεια, σκοπός είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται το μέτρο του *delay-and-sum beam pattern*, για μεταβολές ορισμένων παραμέτρων. Το μέτρο του *delay-and-sum beam pattern* αποτελείται από ένα κύριο λοβό και παράπλευρους μικρότερους λοβούς. Το κέντρο του κύριου λοβού εντοπίζεται στην επιθυμητή γωνία που έχουμε κάθε φορά θέσει (από την οποία θεωρούμε ότι φτάνει το σήμα που θέλουμε να ενισχύσουμε) με το σήμα να περνά χωρίς μείωση του πλάτους του. Σε όλες τις υπόλοιπες συχνότητες το πλάτος μειώνεται αποκόπτοντας τελικά τα υπόλοιπα σήματα. Μικρότερο εύρος κύριου λοβού συνεπάγεται ενίσχυση λιγότερων σημάτων πέραν του επιθυμητού και άρα καλύτερο τελικό αποτέλεσμα, με λιγότερο θόρυβο. Αντίθετα, όταν ο κύριος λοβός έχει μεγάλο πλάτος ενισχύεται το σήμα από πολλές γωνίες εκτός από την επιθυμητή μειώνοντας την ποιότητα του σήματος εξόδου.

1.4.1 Μεταβολή του αριθμού μικροφώνων

Αρχικά μεταβάλλουμε τον αριθμό των μικροφώνων της συστοιχίας, διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ τους και ίση με $d = 8\text{cm}$. Η συχνότητα είναι ίση με $f = 2\text{kHz}$ και το επιθυμητό σήμα φτάνει στη συστοιχία υπό γωνία $\theta_s = 90^\circ$. Τα σήματα φτάνουν με γωνίες $\theta \in [0, 180^\circ]$.

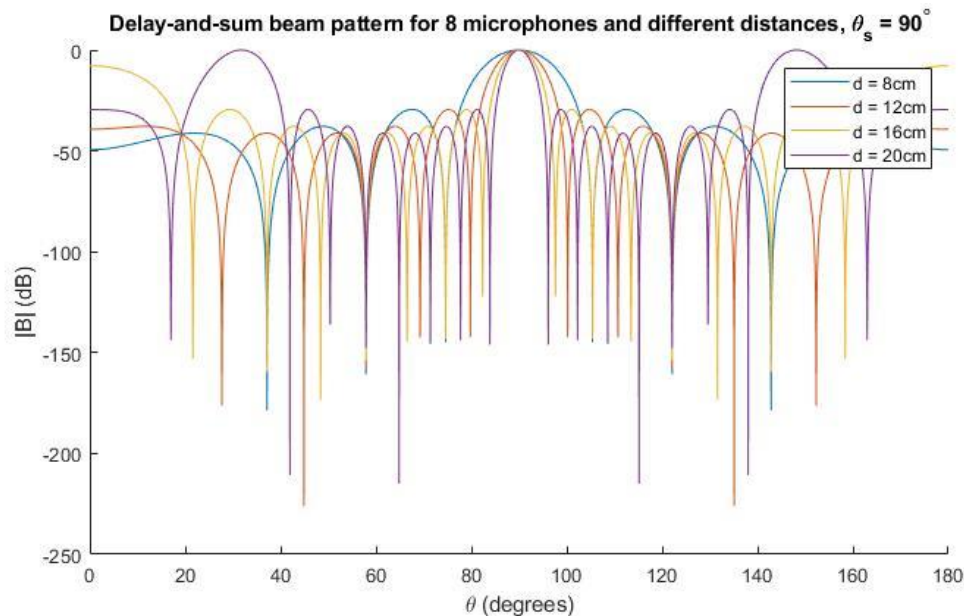
Παρατηρώντας το μέτρο του *delay-and-sum beam pattern* διαπιστώνουμε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των μικροφώνων της συστοιχίας, μειώνεται το πλάτος των λοβών και αυξάνεται ο αριθμός τους. Επίσης το μέτρο των παράπλευρων λοβών μειώνεται σημαντικά σε σχέση με αυτό του κύριου. Συνεπώς επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα σήματος εξόδου όσο αυξάνονται τα μικρόφωνα της συστοιχίας.



Εικόνα 1: Γραφική παράσταση του μέτρου του *delay-and-sum beam pattern* σε λογαριθμική κλίμακα, σε συνάρτηση με τον αριθμό των μικροφώνων της συστοιχίας.

1.4.2 Μεταβολή της απόστασης μεταξύ των μικροφώνων

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των μικροφώνων ($N = 8$) και των υπόλοιπων μεταβλητών όπως αναφέρονται στο προηγούμενο ερώτημα, μεταβάλλουμε την απόσταση μεταξύ αυτών. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των μικροφώνων επιτυγχάνεται καλύτερο αποτέλεσμα.



Εικόνα 2: Γραφική παράσταση του μέτρου του delay-and-sum beam pattern σε λογαριθμική κλίμακα, σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των μικροφώνων της συστοιχίας.

Φαινόμενο spatial aliasing

Το επιθυμητό σήμα φτάνει στη συστοιχία υπό γωνία $\theta_s = 90^\circ$. Το μέτρο του beam pattern γίνεται ίσο με την μονάδα όταν:

$$\sin \left[\frac{1}{2} \frac{\omega}{c} d (\cos \theta - \cos \theta_s) \right] = 0 \Leftrightarrow$$

$$\cos \theta = \cos \theta_s + m \frac{c}{d} \frac{2\pi}{\omega} = \cos \theta_s + m \frac{\lambda}{d}, \quad m = \dots, -1, 0, 1, \dots$$

Όπου $\lambda = c/f$ το μήκος κύματος του ηχητικού σήματος.

Αν $m = 0$, η μοναδική λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι $\theta = \theta_s$, συνεπώς το μέτρο του beam pattern γίνεται μονάδα μόνο στην επιθυμητή διεύθυνση (steering direction). Στην περίπτωση όμως που ισχύει:

$$\left| \cos \theta_s \pm \frac{\lambda}{d} \right| \leq 1$$

θα υπάρχει γωνία $\theta \neq \theta_s$ για την οποία θα ισχύει $|B(\omega, \theta)| = 1$, με αποτέλεσμα και αυτά τα σήματα να περνούν αναλλοίωτα στην έξοδο. Ο beamformer δεν μπορεί πλέον να διαχωρίσει αν το σήμα προέρχεται από την επιθυμητή κατεύθυνση ή όχι, συνεπώς η αποθρομβοποίηση αποτυγχάνει.

Για να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο πρέπει:

$$d < \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_s|} \quad (1)$$

Για να ισχύει η σχέση αυτή για κάθε γωνία θ_s πρέπει:

$$d < \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d < \frac{c}{2f}$$

Αν η εξίσωση (1) δεν ικανοποιείται, δημιουργείται φαινόμενο *spatial aliasing*, δηλαδή στο *beam pattern* εμφανίζονται πλευρικοί λοβοί μοναδιαίου πλάτους (*grating lobes*).

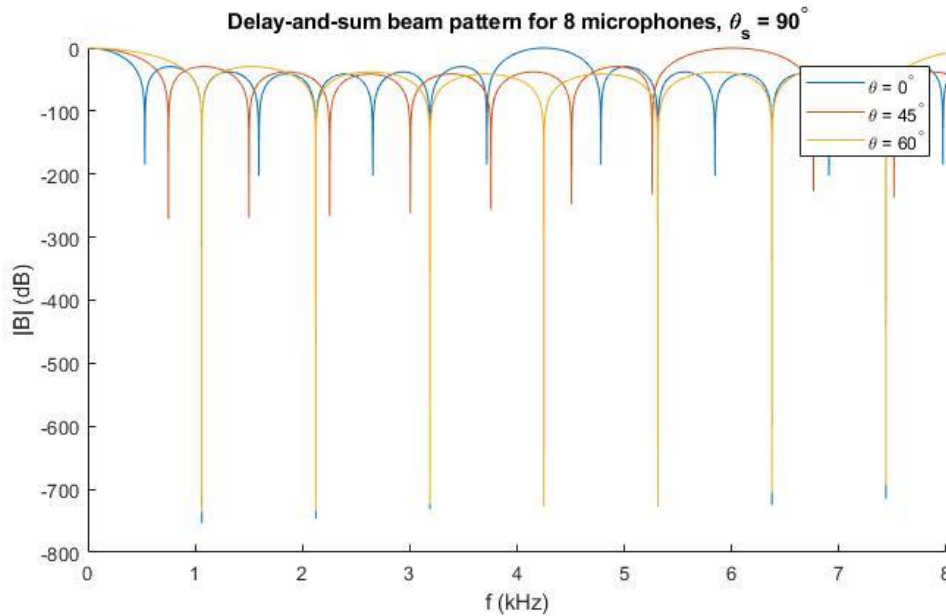
1.4.3 Μεταβολή της συχνότητας του ηχητικού σήματος

Θεωρούμε ότι η συστοιχία αποτελείται από $N=8$ μικρόφωνα και η απόσταση μεταξύ τους είναι $d=8\text{cm}$. Η γωνία με την οποία φτάνει στη συστοιχία το επιθυμητό σήμα είναι $\theta_s=90^\circ$ ενώ οι γωνίες που μελετάμε είναι οι $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$ και $\theta=60^\circ$. Στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση της συχνότητας του ηχητικού σήματος στο πλάτος του *beam pattern*.

Για να μην υπάρχει το φαινόμενο *spatial aliasing* πρέπει:

$$f < \frac{c}{d(1 + \cos \theta_s)} \Rightarrow f < \frac{c}{d} \Rightarrow f < 4.25 \text{ kHz}$$

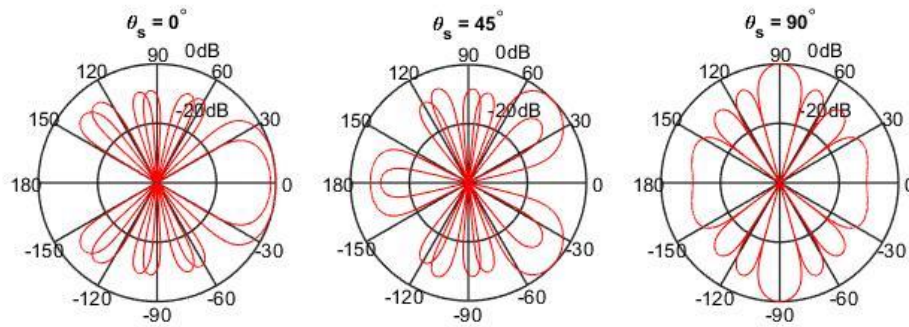
Πράγματι, παρατηρούμε ότι για $f \geq 4.25 \text{ kHz}$ ξεκινά η εμφάνιση *grating lobes*.



Εικόνα 3: Γραφική παράσταση του μέτρου του *delay-and-sum beam pattern* σε λογαριθμική κλίμακα, σε συνάρτηση με την συχνότητα του ηχητικού σήματος που φτάνει από διάφορες γωνίες (εκτός από την επιθυμητή).

1.4.4 Μεταβολή της γωνίας άφιξης του ηχητικού σήματος

Τέλος μεταβάλλουμε την γωνία άφιξης των ηχητικών σημάτων στη συστοιχία, ενώ το επιθυμητό σήμα φτάνει υπό γωνίες $\theta_s=0^\circ$, $\theta_s=45^\circ$ και $\theta_s=90^\circ$. Θεωρούμε ότι η συστοιχία αποτελείται και πάλι από $N=8$ μικρόφωνα και η απόσταση μεταξύ τους είναι $d=8\text{cm}$, ενώ η συχνότητα του σήματος είναι $f=2\text{kHz}$. Τα διαγράμματα που προκύπτουν έχουν την μορφή που περιμέναμε. Το μέτρο του *delay-and-sum beam pattern* γίνεται μονάδα μόνο κατά τη διεύθυνση της πηγής του επιθυμητού ηχητικού σήματος, εφόσον ικανοποιείται η Σχέση (1).



Εικόνα 4: Γραφική παράσταση του μέτρου του *delay-and-sum beam pattern* σε λογαριθμική κλίμακα, σε συνάρτηση με την γωνία άφιξης των διαφόρων ηχητικών σημάτων, σε πολικό διάγραμμα.

Μέρος 2. Εφαρμογή Beamforming για Speech Enhancement

2.1 Beamforming σε προσομοιωμένα σήματα

2.1.1 Delay-and-sum beamforming

Στη συνέχεια θεωρούμε μια γραμμική συστοιχία $N = 7$ μικροφώνων σε απόσταση $d = 8cm$ μεταξύ τους. Υπάρχει επίσης μία πηγή σήματος φωνής και μία πηγή θορύβου σε γωνία $\theta = 45^\circ$ και $\theta = 135^\circ$, αντίστοιχα, με τη συστοιχία. Ο θόρυβος είναι ζωνοπερατός και η ενέργειά του συγκεντρώνεται στις συχνότητες $f \in [500Hz, 2.5kHz]$. Η συχνότητα δειγματοληψίας όλων των σημάτων είναι $f = 48kHz$ και τα δύο σήματα από τις πηγές θορύβου και φωνής είναι ασυσχέτιστα.

Αρχικά σκοπός είναι η αποθορυβοποίηση του σήματος που έχει ηχογραφηθεί από τα επτά μικρόφωνα της συστοιχίας με χρήση του *delay-and-sum beamformer*. Τα βάρη του *beamformer* δίνονται από την σχέση:

$$d(k) = e^{-j\frac{N-1}{2}\frac{\omega}{c}d\cdot\cos(\theta)} \cdot \left[1, e^{j\frac{\omega}{c}d\cdot\cos(\theta)}, \dots, e^{j(N-1)\frac{\omega}{c}d\cdot\cos(\theta)}\right]^T$$

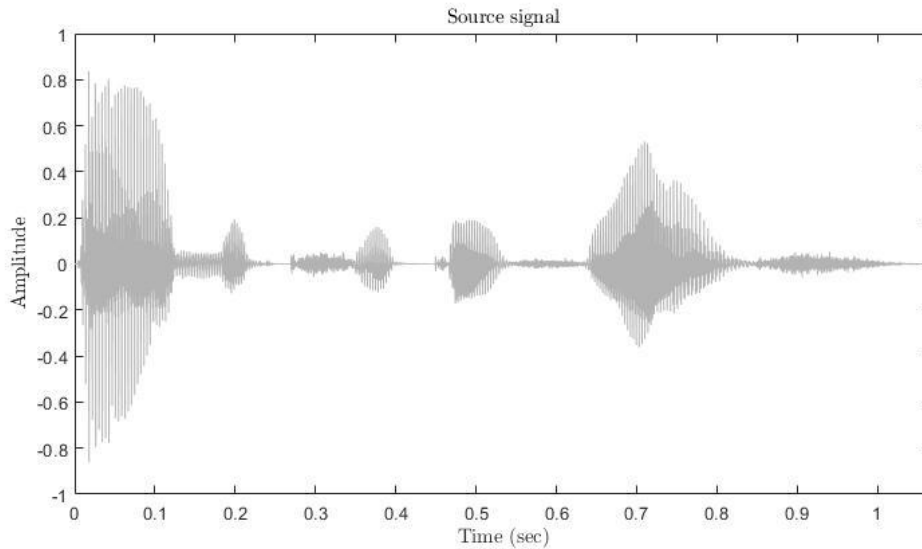
Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$H(\omega) = \frac{1}{N}d^H(k_s)$$

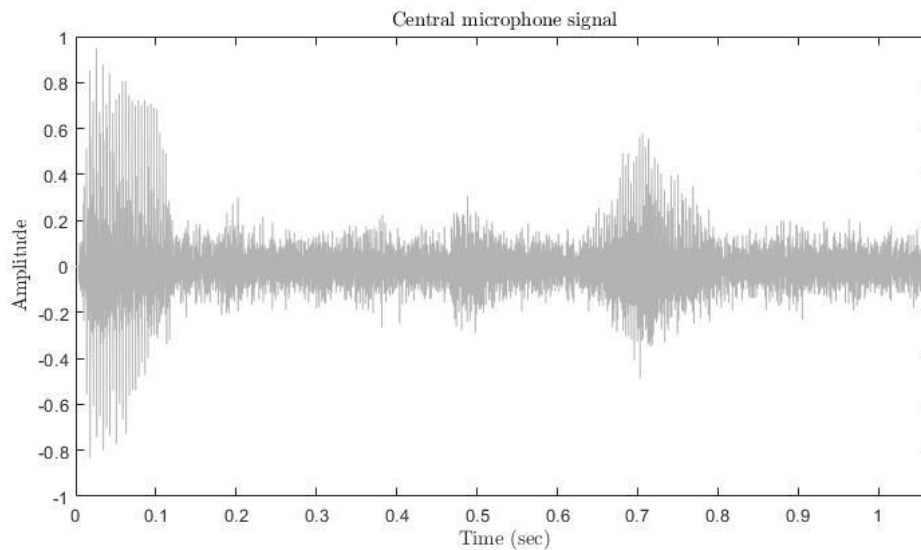
Συνεπώς η έξοδος μπορεί να δοθεί με τη σχέση:

$$Y(\omega) = H^T(\omega)F(\omega, a) = H^T(\omega)d(k)F(\omega)$$

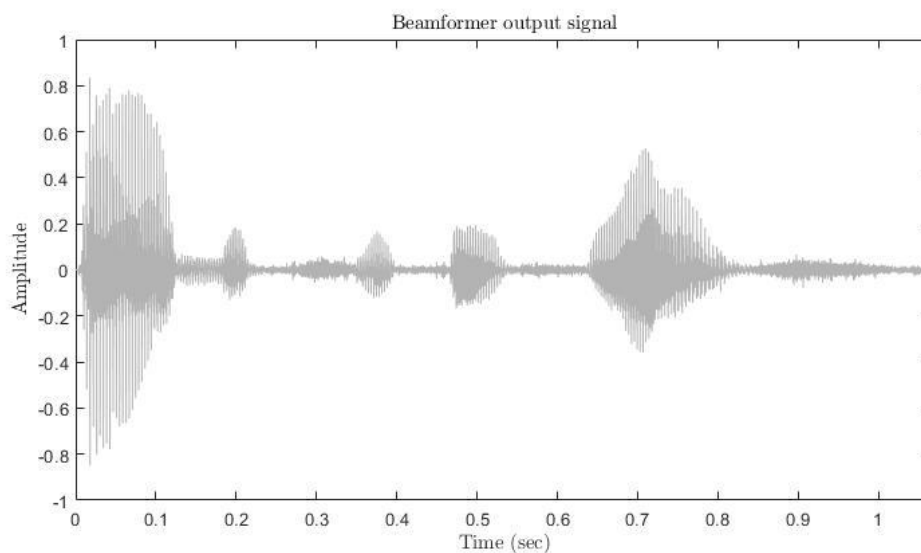
Αθροίζοντας τις στήλες του $Y(\omega)$ (οι οποίες αντιστοιχούν στα 7 καταγεγραμμένα σήματα) και εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό *Fourier* λαμβάνουμε το σήμα εξόδου $y(t)$ του *beamformer*.



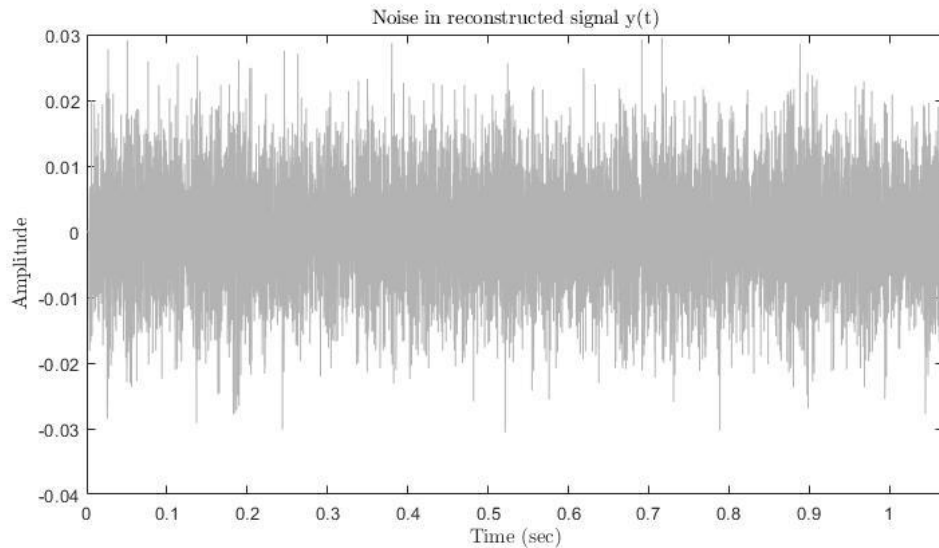
Εικόνα 5 : Γραφική παράσταση του καθαρού σήματος φωνής σε συνάρτηση με τον χρόνο.



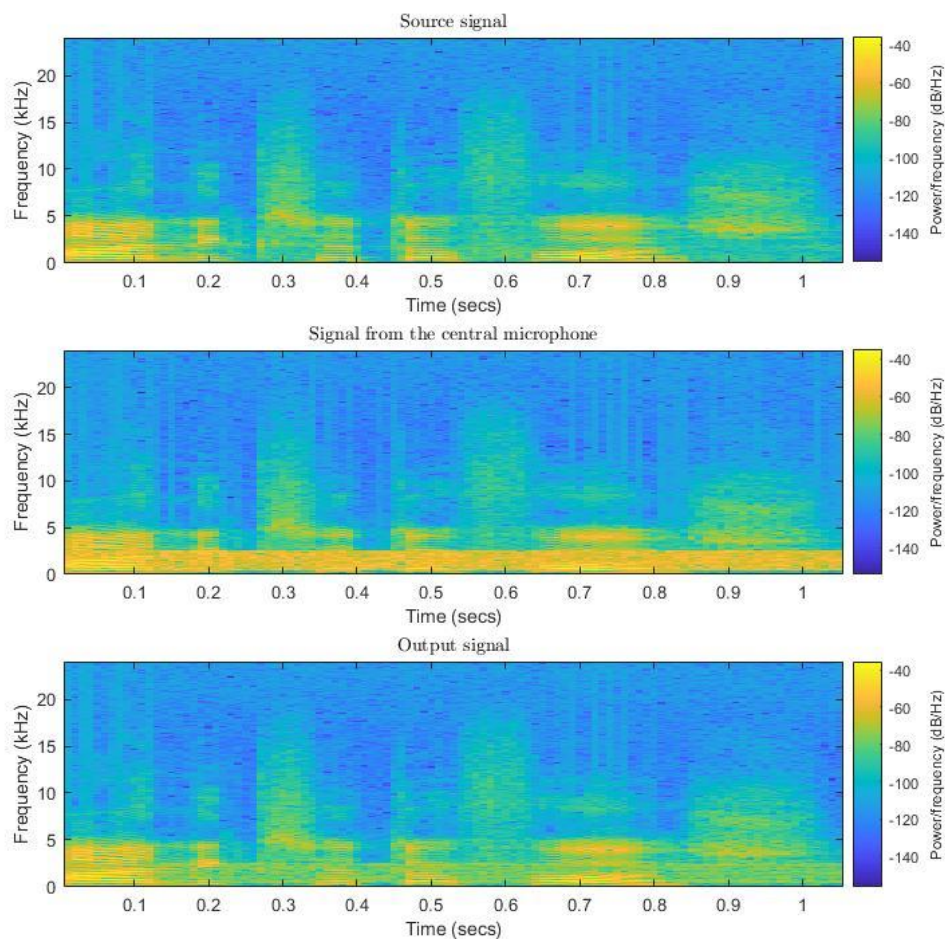
Εικόνα 6 : Γραφική παράσταση του σήματος που έχει καταγραφεί από το κεντρικό (4^ο) μικρόφωνο της συστοιχίας, σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 7 : Αποθορυβοποιημένο σήμα εξόδου από τον *delay-and-sum beamformer* με χρήση των σημάτων ήχου από τη συστοιχία μικροφώνων, σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 8 : Σήμα που προκύπτει από την αφαίρεση του καθαρού σήματος φωνής από το αποθρονοποιημένο σήμα εξόδου του *beamformer*, σε σχέση με τον χρόνο. Όπως φαίνεται πρόκειται μόνο για σήμα θορύβου.



Εικόνα 9 : Φασματογραφήματα (*spectrograms*) του καθαρού σήματος φωνής, του σήματος από το κεντρικό μικρόφωνο της συστοιχίας και της εξόδου του *beamformer*.

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα, εφαρμόζοντας *delay-and-sum beamforming* επιτυγχάνεται αρκετά καλού βαθμού αποθορυβοποίηση του σήματος φωνής. Η διαφορά του καθαρού σήματος από το αποθορυβοποιημένο σήμα είναι σκέτος θόρυβος, συνεπώς θεωρούμε ότι η αποθορυβοποίηση είναι επιτυχής.

Τέλος, υπολογίζουμε το SNR του σήματος από το κεντρικό μικρόφωνο και την έξοδο του *beamformer*, επιβεβαιώνοντας ότι το σήμα εξόδου έχει λιγότερο θόρυβο.

$$SNR_{central\ microphone} = 3\ dB$$

$$SNR_{beamformer} \cong 20.38\ dB$$

Η έξοδος του *beamformer* είναι αποθηκευμένη στο αρχείο “sim_ds.wav”.

2.1.2 Μονοκαναλικό Wiener φιλτράρισμα

Στη συνέχεια επιχειρούμε αποθορυβοποίηση ενός παραθύρου του σήματος φωνής χρησιμοποιώντας μονοκαναλικό Wiener φιλτράρισμα. Συγκεκριμένα, εργαζόμαστε στο πλαίσιο του σήματος που λαμβάνεται από το κεντρικό μικρόφωνο της συστοιχίας (*sensor 3*), για $t \in [0.47\ sec, 0.5\ sec]$. Το σήμα του παραθύρου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως:

$$x[n] = s[n] + v[n]$$

Όπου $s[n]$ είναι το καθαρό σήμα που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο πλαίσιο και $v[n]$ η συνιστώσα θορύβου.

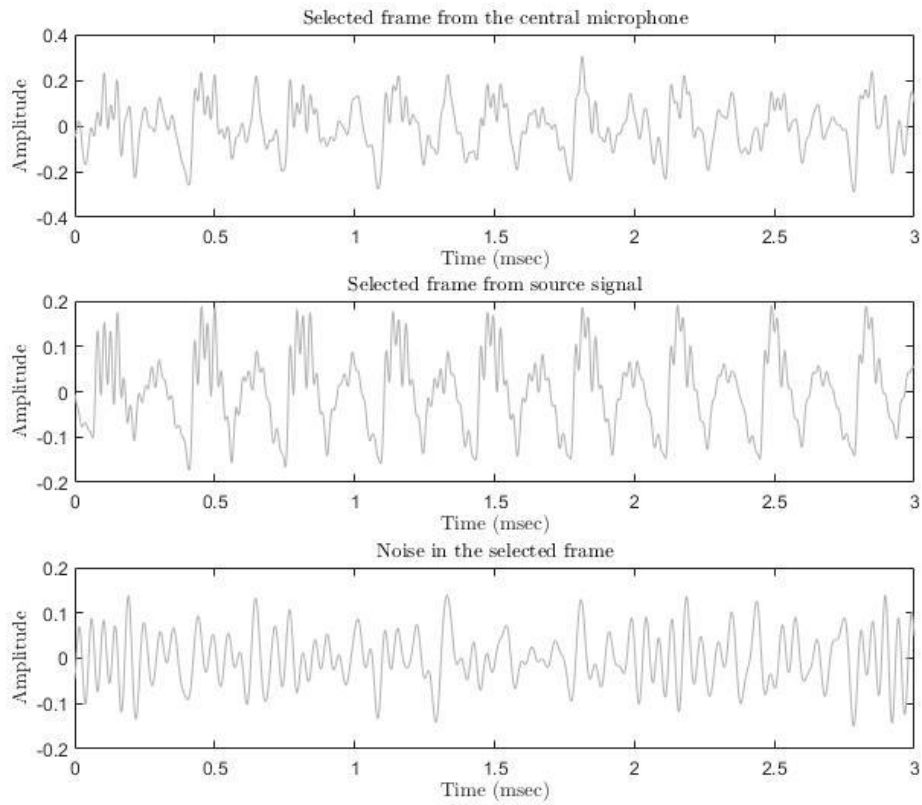
Εφόσον τα σήματα είναι ασυσχέτιστα, η απόκριση συχνότητας του IIR Wiener φίλτρου είναι

$$H_w(\omega) = 1 - \frac{P_v(\omega)}{P_x(\omega)}$$

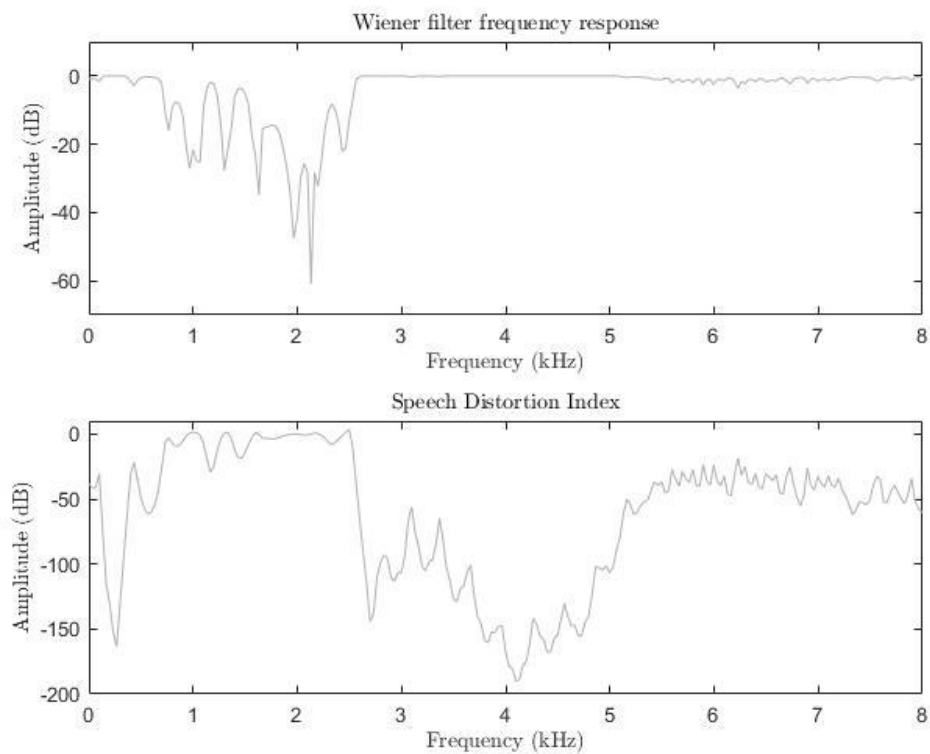
Όπου $P_v(\omega)$ και $P_x(\omega)$ τα φάσματα ισχύος (*power spectrum*) του θορύβου και του σήματος $x[n]$ αντίστοιχα. Τα φάσματα ισχύος υπολογίζονται με χρήση της συνάρτησης *pwelch* του MATLAB.

Επίσης, η παραμόρφωση του σήματος (*speech distortion index*) που προκαλείται από το φίλτρο είναι:

$$n_{sd}(\omega) = \frac{E[|S(\omega) - H_w(\omega)S(\omega)|^2]}{P_x(\omega)} = |1 - H_w(\omega)|^2$$



Εικόνα 10: Γραφική παράσταση του σήματος από το κεντρικό μικρόφωνο της συστοιχίας, το καθαρό σήμα φωνής και το θόρυβο από το επιλεγμένο παράθυρο.



Εικόνα 11: Γραφικές παραστάσεις της απόκρισης συχνότητας του Wiener φίλτρου και του speech distortion index.

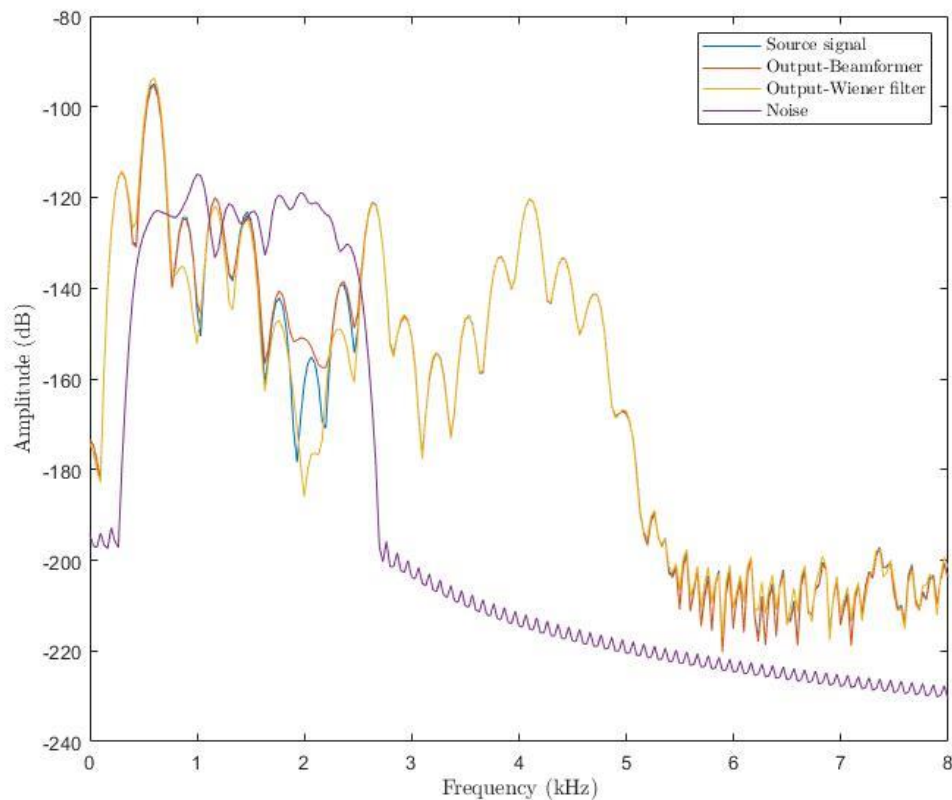
Η απότομη πτώση του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου στις συχνότητες $f \in [500\text{Hz}, 2.5\text{kHz}]$, στις οποίες και εντοπίζεται ο θόρυβος, οδηγεί στην απόρριψή του από το τελικό σήμα. Παράλληλα, στο διάστημα αυτό, ο δείκτης παραμόρφωσης προσεγγίζει το μηδέν.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το καθαρό σήμα φωνής, ο θόρυβος και τα αποθορυβοποιημένα σήματα από τις δύο μεθόδους που εφαρμόστηκαν (*delay-and-sum beamformer*, *single-channel Wiener filter*). Και στις δύο περιπτώσεις η ποιότητα του σήματος βελτιώνεται, με καλύτερα αποτελέσματα να έχει η μέθοδος *beamforming*. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και με την μέτρηση των SNR των σημάτων, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

$$SNR_{\text{Single-channel Wiener filter input}} = 3.14 \text{ dB}$$

$$SNR_{\text{Single-channel Wiener filter output}} = 10.83 \text{ dB}$$

$$SNR_{\text{Beamformer output}} = 20.67 \text{ dB}$$



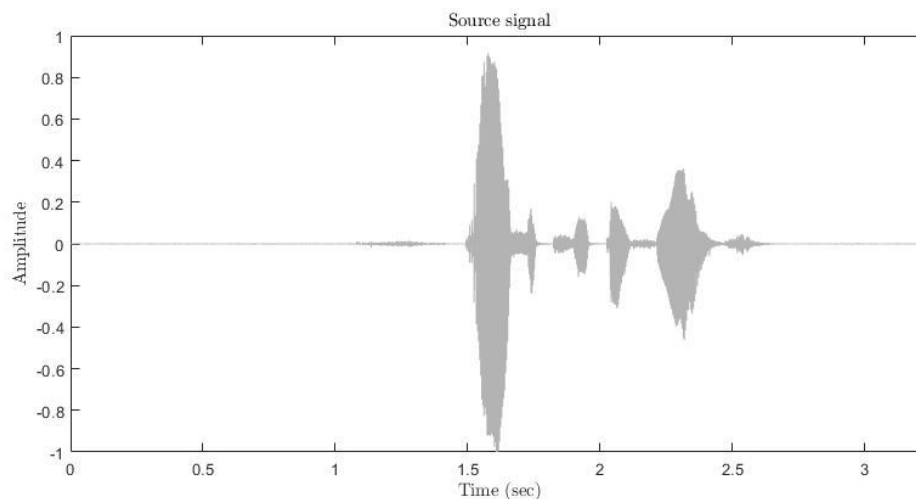
Εικόνα 12 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δύο μεθόδους αποθορυβοποίησης.

2.2 Beamforming σε πραγματικά σήματα

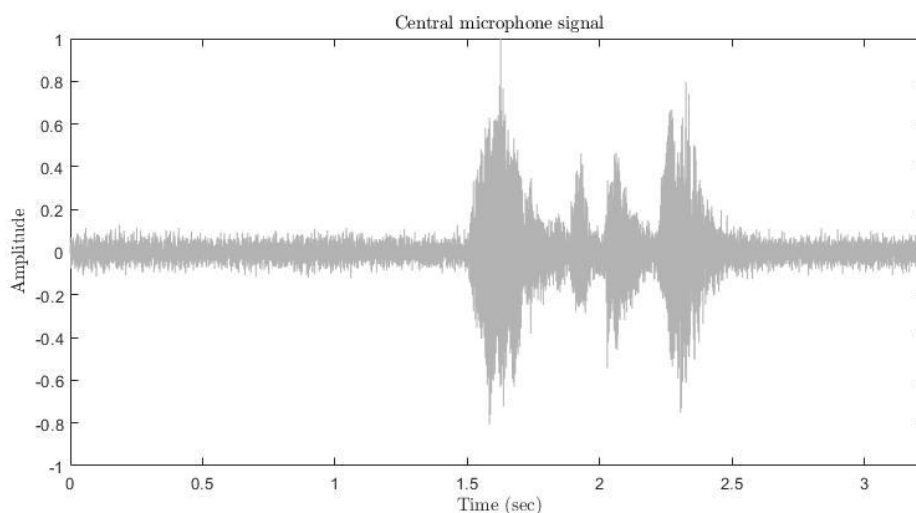
Τέλος, θεωρούμε μια γραμμική συστοιχία $N = 7$ μικροφώνων σε απόσταση $d = 4\text{cm}$ μεταξύ τους. Υπάρχει επίσης μία πηγή σήματος φωνής σε γωνία $\theta = 45^\circ$ με τη συστοιχία, με συχνότητα δειγματοληψίας $f = 48\text{kHz}$. Σε αυτή την περίπτωση, ο θόρυβος δεν προέρχεται από σημειακή πηγή αλλά από διάφορες πηγές οι οποίες δημιουργούν ένα ισοτροπικό και ομοιογενές πεδίο θορύβου (diffuse noise field). Επίσης ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί στάσιμος (stationary random process).

2.2.1 Delay-and-sum beamforming

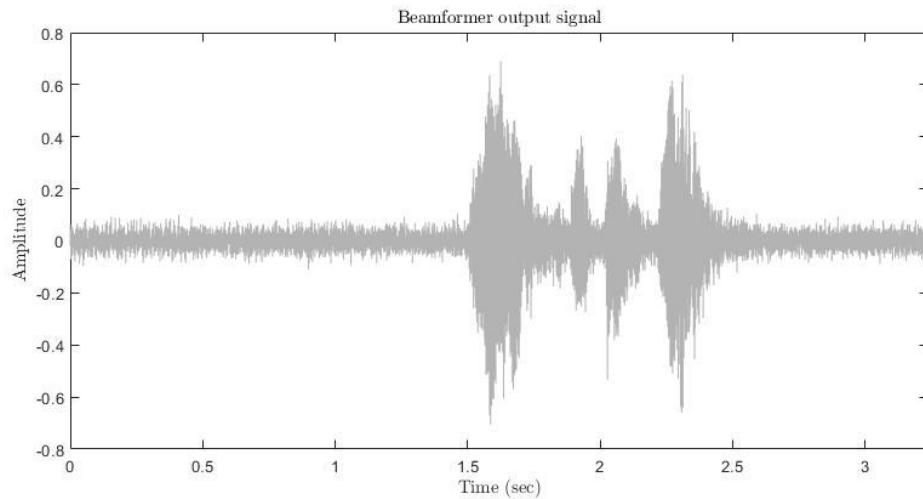
Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία με πριν, εφαρμόζουμε τη μέθοδο *beamforming*. Όπως παρατηρούμε από τα ακόλουθα διαγράμματα η αποθορυβοποίηση δεν είναι επιτυχής, γεγονός που οφείλεται στις πολλές πηγές θορύβου που υπάρχουν στο χώρο.



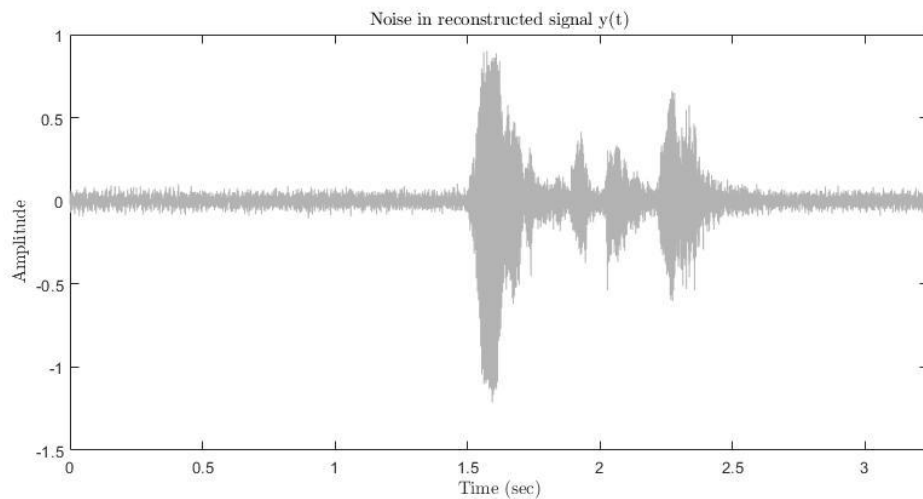
Εικόνα 13 : Γραφική παράσταση του καθαρού σήματος φωνής σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 14 : Γραφική παράσταση του σήματος που έχει καταγραφεί από το κεντρικό μικρόφωνο της συστοιχίας μικροφώνων.

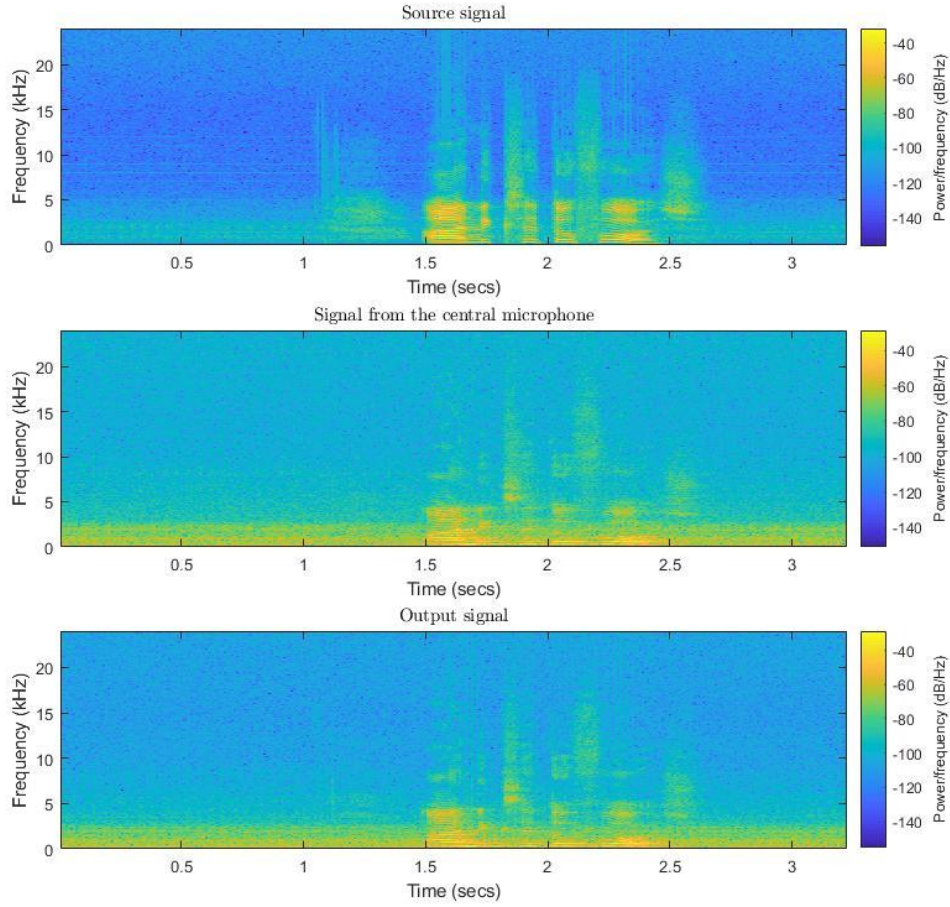


Εικόνα 15 : Γραφική παράσταση του σήματος που λαμβάνεται από την έξοδο του *beamformer* σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 16 : Γραφική παράσταση του θορύβου που περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου του *beamformer* σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η μορφή που έχει ο θόρυβος στο σήμα εξόδου του *delay-and-sum beamformer* επιβεβαιώνει ότι η αποθρομβοποίηση του σήματος απέτυχε, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση των προσομοιωμένων σημάτων.



Εικόνα 17 : Φασματογραφήματα του καθαρού σήματος φωνής, του σήματος από το κεντρικό μικρόφωνο της συστοιχίας και της εξόδου του beamformer.

Τέλος, υπολογίζουμε το *segmental SNR* (*SSNR*) των σημάτων από τον τύπο:

$$SSNR = \frac{10}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=Lm}^{Lm+L-1} s^2(n)}{\sum_{n=Lm}^{Lm+L-1} v^2(n)} \right)$$

Όπου L είναι το μήκος των πλαισίων, $s(n)$ το σήμα φωνής, $v(n)$ ο θόρυβος. Τα πλαίσια τα οποία έχουν *SSNR* μεγαλύτερο από $35dB$ θεωρούμε ότι δεν έχουν σημαντικές διαφορές για την ποιότητα του σήματος και τίθενται στην τιμή $35dB$. Αντίθετα, τα πλαίσια σιωπής των οποίων το *SSNR* είναι μικρότερο από $-5dB$ αγνοούνται στον υπολογισμό του μέσου όρου.

Οι τιμές των *SSNR* που υπολογίζονται, επιβεβαιώνουν ότι δεν επιτεύχθηκε αποθρονοποίηση μέσω του beamformer, λόγω της συσχέτισης μεταξύ των σημάτων θορύβου.

$$SSNR_{Central\ microphone} \cong 3.27\ dB$$

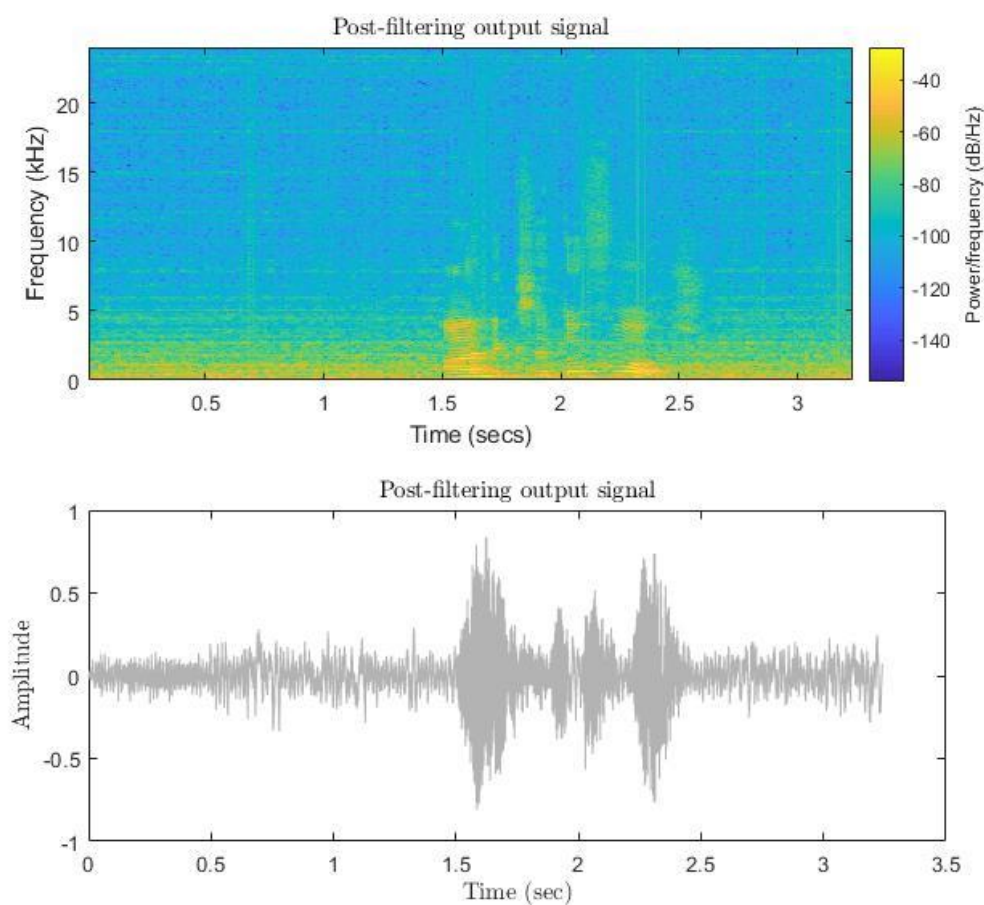
$$SSNR_{Delay-and-sum\ Beamformer\ output} \cong 2.60\ dB$$

Η έξοδος του beamformer είναι αποθηκευμένη στο αρχείο “real_ds.wav”.

2.2.2 Post-filtering με Wiener φίλτρο

Στην περίπτωση των πραγματικών σημάτων με ισοτροπικό και ομογενές πεδίο θορύβου, η μέθοδος του *delay-and-sum beamforming* δεν έχει αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο εφαρμόζουμε *post-filtering*, δηλαδή η έξοδος του *beamformer* οδηγείται σε μονοκαναλικό φίλτρο ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα του σήματος.

Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούμε μονοκαναλικό *IIR Wiener* φίλτρο. Τα φάσματα ισχύος εκτιμώνται με χρήση της συνάρτησης *pwelch*. Επίσης, εφόσον το σήμα φωνής δεν είναι στάσιμο, ακολουθούμε ανάλυση βραχέος χρόνου (*short-time analysis*) με επικαλυπτόμενα πλαίσια διάρκειας *26 msec* (1248 δειγμάτων) και παράθυρα *Hamming* αντίστοιχου μήκους. Τέλος η ανασύνθεση του σήματος γίνεται με τη μέθοδο *overlap-add*. Επιλέχθηκε επικάλυψη 45% εφόσον σε αυτή την περιοχή τιμών παρατηρήθηκε καλύτερη τιμή του *SSNR*.



Εικόνα 18 : Αποτελέσματα του σήματος που προκύπτει μετά από την εφαρμογή *post-filtering* με μονοκαναλικό *IIR Wiener* φίλτρο.

Στο σήμα εξόδου που προέκυψε, το *SSNR* υπολογίστηκε:

$$SSNR_{Post-filtering\ output\ signal} \cong 11.05\ dB$$

Συνεπώς επιβεβαιώνεται ότι το σήμα είναι καλύτερης ποιότητας σε σχέση με την έξοδο του *beamformer*.

Τέλος, υπολογίζουμε το μέσο όρο των $SSNR$ από τα σήματα εισόδου, όπως αυτά έχουν καταγραφεί από τη συστοιχία μικροφώνων.

$$SSNR_{input,mean} \cong 3.02 \text{ dB}$$

Επομένως η χρήση του συστήματος *delay-and-sum beamformer* και *Wiener filter* οδηγεί σε βελτίωση του σήματος κατά 265.99%

Η έξοδος του *Wiener* φίλτρου είναι αποθηκευμένη στο αρχείο “*real_mmse.wav*”.