

Μάθημα

EEE.7-2.3 & EEE.7-3.3 «ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ»

Εξάμηνο Μαθήματος

7^ο

Διδάσκοντες

Ηλίας Ζώης και Μαρία Ραγκούση

Συνεργάτες Εργαστηρίου

Μάνος Μιχαηλίδης και Άγγελος Χαριτόπουλος

Εξάμηνο Διδασκαλίας

Χειμερινό Εξάμηνο 2022-23

Άσκηση 3: Ηχώ και Αντήχηση (Echo and Reverberation)

Σκοπός της άσκησης

- Η κατανόηση των φυσικών φαινομένων της ηχούς και της αντήχησης.
- Η αναπαραγωγή του καθενός φαινομένου μέσα από ψηφιακό σύστημα.
- Η ανάπτυξη εφαρμογής σε κώδικα C και η πειραματική επαλήθευση των μοντέλων των δύο φαινομένων, χρησιμοποιώντας την κάρτα της Texas Instruments TMS320C5505 USB Stick, ένα μικρόφωνο και ακουστικά ή ηχεία υπολογιστή.

ΜΕΡΟΣ Ι: ΗΧΩ (ECHO)

Ηχώ είναι το φυσικό φαινόμενο όπου ο ακροατής ακούει διακριτή επανάληψη του κυρίως ακουστικού σήματος που εκπέμπει μία πηγή ήχου, χωρίς αυτό να εκπεμφθεί ξανά από την πηγή.

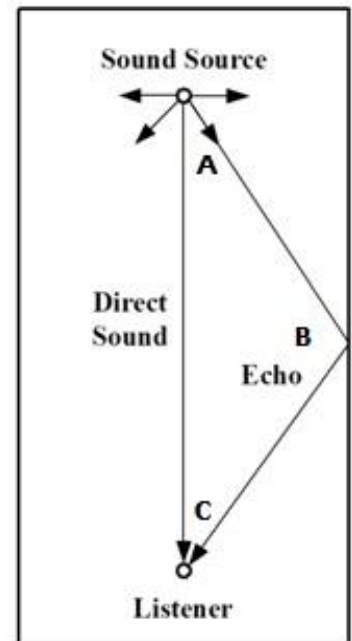
Οφείλεται στην **ανάκλαση** του ήχου σε φυσικά «εμπόδια».

Ο ήχος που φτάνει στον ακροατή είναι υπέρθεση (άθροισμα) του κυρίως ακουστικού σήματος που διαδίδεται απευθείας από την πηγή στον ακροατή (**direct sound path, [A->C]**) και καθυστερημένων εκδοχών του, που φτάνουν στον ακροατή μετά από ανάκλαση σε φυσικά «εμπόδια» (**echo paths, [A->B->C]**).

Η ηχώ είναι ευδιάκριτη (ακούγεται ως διακριτή επανάληψη του κυρίως ακουστικού σήματος, χωρίς επικάλυψη μ' αυτό) επειδή η ταχύτητα διάδοσης του ήχου όταν διαδίδεται στον αέρα είναι σχετικά αργή, περίπου 340 m/sec.

Το αισθητήριο όργανο ακοής του ανθρώπου μπορεί να διακρίνει μεταξύ τους σε χρόνο 1 sec το πολύ 10 διαδοχικούς επάλληλους ήχους. Άρα ο κάθε ήχος πρέπει να διαρκεί το πολύ 1/10 sec για να τον αντιλαμβάνεται ως διακριτό. Από την ταχύτητα του ήχου προκύπτει ότι η απόσταση που διανύει ο ήχος στο 1/10 sec είναι 34 m. Άρα ανάλογα με την απόσταση του εμποδίου (B) όπου γίνεται η ανάκλαση του ήχου:

1. Αν ο απευθείας ήχος και ο εξ ανακλάσεως ήχος ακολουθήσουν διαδρομές που διαφέρουν σε μήκος περισσότερο από 34 μέτρα (**δηλαδή [ABC - AC] > 34m**), ο εξ ανακλάσεως ήχος που φτάνει δεύτερος καθυστερεί περισσότερο από 1/10 sec, οπότε το αυτί αντιλαμβάνεται τον απευθείας ήχο διακριτά από τον εξ ανακλάσεως, και τότε έχουμε **το φαινόμενο της ηχούς (echo)**.
2. Αν ο απευθείας ήχος και ο εξ ανακλάσεως ήχος ακολουθήσουν διαδρομές που διαφέρουν σε μήκος το πολύ 34 μέτρα (**δηλαδή [ABC - AC] <= 34m**), ο εξ ανακλάσεως ήχος δεν καθυστερεί αρκετά ώστε να ακουστεί ξεχωριστά, αλλά επικαλύπτεται χρονικά με τον απευθείας ήχο και τότε έχουμε **το φαινόμενο της αντήχησης (reverberation)**.

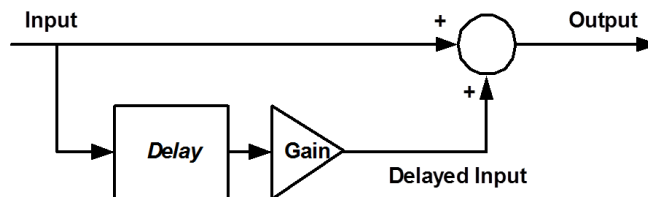


(A) Σύστημα με μία μόνο διαδρομή ηχούς (single echo path)

Block Διάγραμμα του συστήματος

- Προς το παρόν, θα εξετάσουμε ένα σύστημα με ΜΟΝΟ ΜΙΑ διαδρομή ηχούς (single echo path).

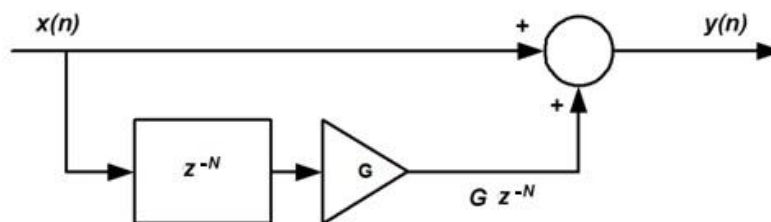
Simplified Echo



- Η βασική σχέση εισόδου – εξόδου είναι «Output = Input + Delayed Input», όπως φαίνεται στο σχήμα.
- Λόγω των απωλειών (απόσβεσης) που υφίσταται το σήμα πάνω στην καθυστερημένη διαδρομή (echo path), το κέρδος είναι $\text{Gain} < 1$ (η ηχώ φτάνει στον ακροατή με απόσβεση).

Σχέση εισόδου-εξόδου του συστήματος (απλουστευμένη περίπτωση μίας ηχούς)

Simplified Echo



Στο πεδίο του (διακριτού) χρόνου n, η έξοδος δίνεται από τη σχέση

$$y(n) = x(n) + G x(n-N) = x(n) * \delta(n) + G x(n) * \delta(n-N) = x(n) * [1 \delta(n) + G \delta(n-N)] = x(n) * h(n),$$

όπου

- N είναι τα χρονικά δείγματα καθυστέρησης, ή $N T_s = N / f_s$ η καθυστέρηση σε sec,
- “*” είναι η πράξη της συνέλιξης και
- $h(n) = [1 \delta(n) + G \delta(n-N)]$ είναι η κρουστική απόκριση του συστήματος.

Στο πεδίο της συχνότητας (δηλαδή στο πεδίο Z , αφού πρόκειται για ψηφιακό σύστημα) η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι η $H(z)$:

$$H(z) = Z \{ h(n) \} = 1 + G z^{-N},$$

Η έξοδος $Y(z)$ λαμβάνεται ως γινόμενο της συνάρτησης μεταφοράς $H(z)$ επί την είσοδο $X(z)$:

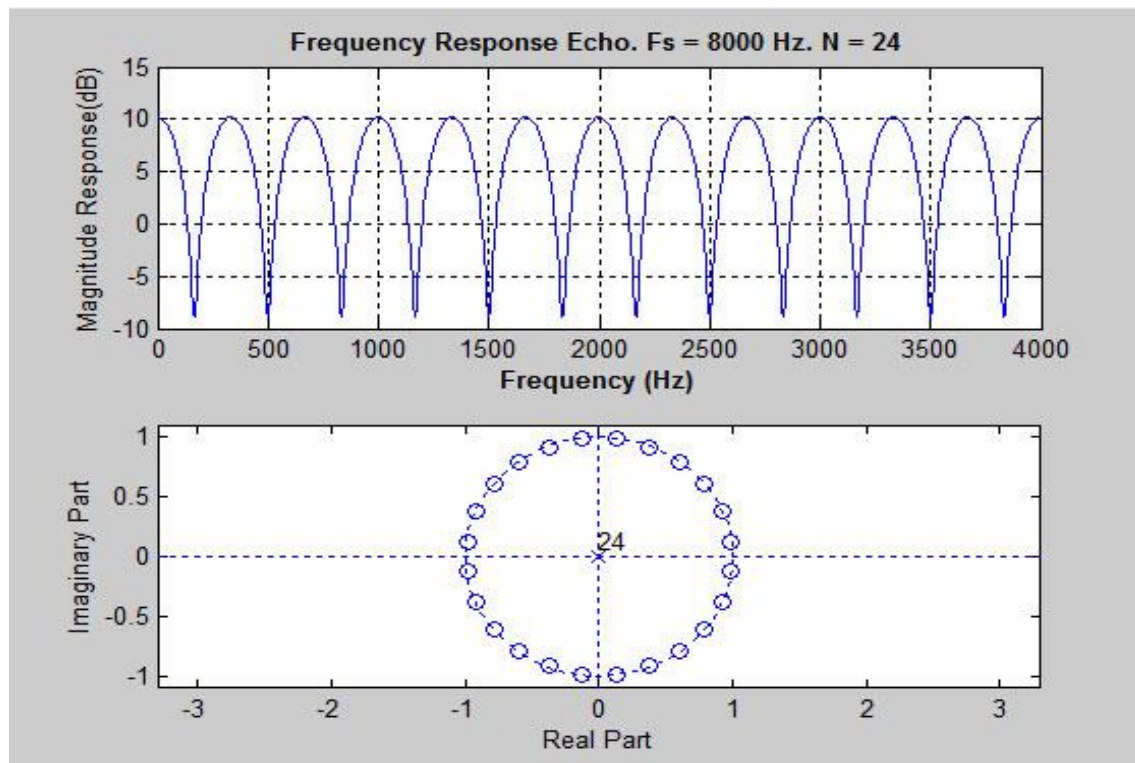
$$Y(z) = H(z) \cdot X(z) = [1 + G z^{-N}] X(z).$$

Απόκριση συχνότητας του συστήματος (απλουστευμένη περίπτωση μίας ηχούς)

Η απόκριση συχνότητας του απλουστευμένου συστήματος με μία ηχώ μπορεί να υπολογιστεί με το ακόλουθο αρχείο **.m** στο περιβάλλον Matlab. ΠΡΟΣΟΧΗ: Εδώ έχουμε πολλαπλασιάσει αριθμητή και παρονομαστή της $H(z)$ επί z^N , ώστε να γίνει η $H(z)$ ρητή συνάρτηση του z και όχι του z^{-1} : $H(z) = [1 + G z^{-N}] = [z^N + G] / [z^N] = B(z) / A(z)$.

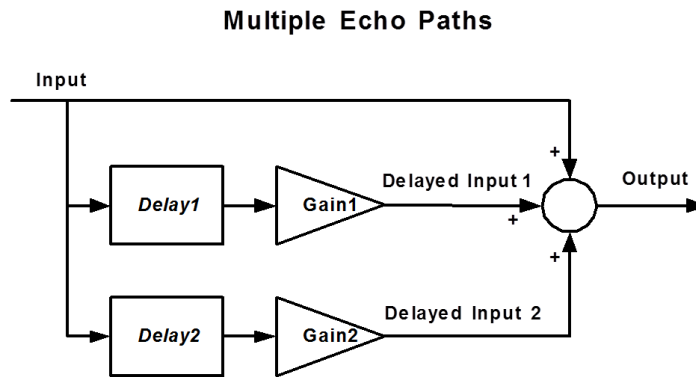
```
%
% Example 03: Echo and Reverberation.
%
% Simplified Transfer Function of system with (only one) echo path:
%   H(z) = [1 + Gz^(-N)] = [z^N + G] / [z^N],
% where
%   G = Gain of the echo path, with 0<G<1 (attenuation, here set to G=0.8)
%   N = Time delay of the echo path (here set to N=24 samples)
% Calculating frequency response and poles / zeros of H(z)
%
b = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.8]; % Numerator polynomial
a = 1; % Denominator polynomial
Fs = 8000; % Sampling frequency 8 KHz, good for telephone quality speech
[H, f] = freqz(b, a, 1024, Fs);
H_magn = 20*log10(abs(H)*1.8);
subplot(2,1,1)
plot(f,H_magn)
grid on
xlabel('Frequency in Hz')
ylabel('Magnitude response in dB')
title('System with (one) echo path: frequency response, G=0.8, N=24')
subplot(2,1,2)
zplane(b,a)
%
```

Απόκριση συχνότητας (καμπύλη μέτρου μόνο) και διάγραμμα πόλων / μηδενικών



(B) Σύστημα με πολλαπλές διαδρομές της ηχούς (multiple echo paths)

Πρακτικά σε έναν κλειστό χώρο (π.χ. σε ένα δωμάτιο) η ηχώ θα ακολουθήσει πολλαπλές διαδρομές, δηλαδή στον ακροατή θα φτάσει η υπέρθεση του κυρίως ακουστικού σήματος που εξέπεμψε η πηγή (**direct sound path**) και πολλών καθυστερημένων εκδοχών του (**multiple echo paths**) που οφείλονται σε ανακλάσεις σε διαφορετικά φυσικά «εμπόδια», καθένα από τα οποία μπορεί να αποτελείται από διαφορετικό υλικό και να απέχει και διαφορετική απόσταση από την πηγή και από τον ακροατή. Στο σχήμα φαίνεται παράδειγμα με δύο (2) διαφορετικές διαδρομές της ηχούς. Ανάλογα με την γεωμετρία του κλειστού χώρου, αυτό μπορεί να γενικευθεί για $M \gg 2$ διαδρομές.



Στο πεδίο του (διακριτού) χρόνου n , η έξοδος δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) + G_1 x(n-N_1) + G_2 x(n-N_2) + \dots + G_M x(n-N_M) = \\ &= x(n) * \delta(n) + G_1 x(n) * \delta(n-N_1) + G_2 x(n) * \delta(n-N_2) + \dots + G_M x(n) * \delta(n-N_M) \\ &= x(n) * [1 \delta(n) + G_1 \delta(n-N_1) + G_2 \delta(n-N_2) + \dots + G_M \delta(n-N_M)] = x(n) * h(n), \end{aligned}$$

όπου N_1, N_2, \dots, N_M οι χρονικές καθυστερήσεις και $G_1, G_2, \dots, G_M < 1$ οι αποσβέσεις, αντίστοιχα, των διαφορετικών διαδρομών της ηχούς, και

$$h(n) = 1 \delta(n) + G_1 \delta(n - N_1) + G_2 \delta(n - N_2) + \dots + G_M \delta(n - N_M)$$

είναι η κρουστική απόκριση του συστήματος.

Στο πεδίο της συχνότητας (δηλαδή στο πεδίο Z , αφού πρόκειται για ψηφιακό σύστημα) η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι η $H(z)$:

$$H(z) = Z \{ h(n) \} = 1 + G_1 z^{-N_1} + G_2 z^{-N_2} + \dots + G_M z^{-N_M},$$

και η έξοδος λαμβάνεται ως γινόμενο της συνάρτησης μεταφοράς επί την είσοδο $X(z)$:

$$Y(z) = H(z) \cdot X(z) = [1 + G_1 z^{-N_1} + G_2 z^{-N_2} + \dots + G_M z^{-N_M}] X(z).$$

Συνοψίζοντας, σε ένα ψηφιακό σύστημα που αναπαράγει το φαινόμενο της ηχούς:

- Το σήμα εξόδου του συστήματος (που ακούει τελικά ο ακροατής) προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από την είσοδο, και όχι από προηγούμενες τιμές της εξόδου. Άρα το ψηφιακό σύστημα αυτό δεν περιέχει βρόχο ανάδρασης, αλλά έναν ή περισσότερους παράλληλους κλάδους.
- Ορισμένες συχνότητες στο σήμα εξόδου (που ακούει τελικά ο ακροατής) θα είναι εξασθενημένες.
- Επειδή οι πόλοι του συστήματος βρίσκονται ΜΕΣΑ στον μοναδιαίο κύκλο, το ψηφιακό σύστημα που αναπαράγει το φαινόμενο της ηχούς είναι πάντα ΕΥΣΤΑΘΕΣ.

ΜΕΡΟΣ II: ΑΝΤΗΧΗΣΗ (REVERBERATION)

Η **αντήχηση** είναι φυσικό φαινόμενο συναφές με την ηχώ, αλλά διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν, με αποτέλεσμα να απαιτείται διαφορετική σχεδίαση (block διάγραμμα) για την κατασκευή ενός ψηφιακού συστήματος που αναπαράγει το φυσικό φαινόμενο της αντήχησης.

Όπως αναφέρθηκε στο ΜΕΡΟΣ I,

- όταν ο ανακλώμενος ήχος καθυστερήσει αρκετά ($> 1/10$ sec) ώστε να ακουστεί διακριτά από τον ακροατή (μετά το τέλος του κυρίως ήχου) έχουμε ΗΧΩ, ενώ
- όταν ο ανακλώμενος ήχος φτάσει αρκετά νωρίς ($\leq 1/10$ sec) ώστε να επικαλυφθεί χρονικά με τον κυρίως ήχο, ενισχύοντάς τον, έχουμε ΑΝΤΗΧΗΣΗ.

Στην ειδική περίπτωση που ο ομιλητής και ο ακροατής είναι στο ίδιο σημείο / είναι το ίδιο άτομο, δηλαδή η πηγή του ήχου (A) και το σημείο ακρόασης (C) ταυτίζονται, ο απευθείας ήχος φτάνει ακαριαία ($[A \rightarrow C] = 0$). Συνεπώς,

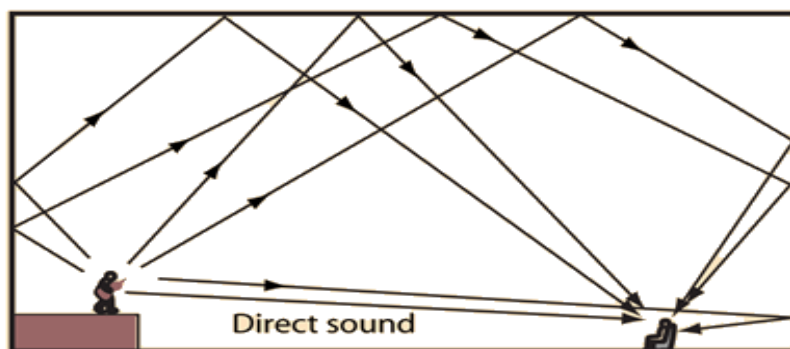
- αν ο ανακλώμενος ήχος επιστρέψει μετά από διαδρομή μεγαλύτερη από 34 m ($[A \rightarrow B \rightarrow A] > 34\text{m}$), δηλαδή αργότερα από $1/10$ sec, θα ακουστεί ως ηχώ. Αυτό σημαίνει ότι το εμπόδιο απέχει περισσότερο από 17m.
- αν ο ανακλώμενος ήχος επιστρέψει μετά από διαδρομή το πολύ 34 m ($[A \rightarrow B \rightarrow A] \leq 34\text{m}$), δηλαδή σε λιγότερο από $1/10$ sec, θα ακουστεί ως αντήχηση. Αυτό σημαίνει ότι το εμπόδιο απέχει λιγότερο από 17m.

Κατά την αντήχηση, ο ήχος που φθάνει στον ακροατή είναι άθροισμα (υπέρθηση) του κυρίως ακουστικού σήματος που εκπέμπει η πηγή και καθυστερημένων αλλά ενισχυμένων εκδοχών του σήματος εξόδου, που συντηρούν ένα - αρχικά ενισχυόμενο και τελικά αποσβεννύμενο - ηχητικό αποτέλεσμα στον ακροατή (persistent sound) το οποίο μπορεί να διαρκεί και αφού έχει σταματήσει η εκπομπή από την πηγή.

Το φαινόμενο της αντήχησης μπορεί να εμφανιστεί τόσο σε κλειστούς όσο και σε ημίκλειστους ή ανοιχτούς χώρους (π.χ. δάση, φαραγγια, κλπ.)

Η αντήχηση σε κλειστούς χώρους

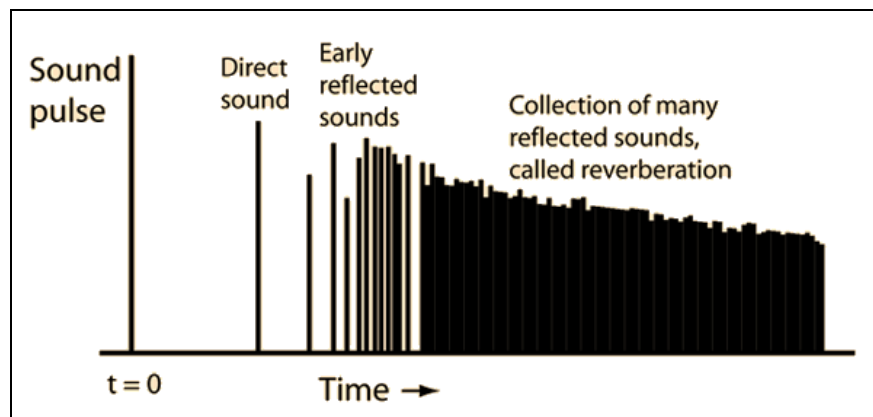
Σε ένα κλειστό χώρο, όπως είναι ένα αμφιθέατρο ή μία αίθουσα ομιλιών ή συναυλιών, αντήχηση ονομάζεται η άθροιση όλων των ανακλώμενων ήχων από τις επιφάνειες του χώρου. Στον ακροατή φτάνει ο απευθείας ήχος από την πηγή (ομιλητής ή performer) καθώς και όλες οι διαφορετικές ανακλάσεις (βλ. σχήμα, από <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acoustic/reverb.html>).



- Περιορισμένη αντήχηση είναι επιθυμητή διότι συντηρεί τον ήχο ώστε ο ακροατής να «προλαβαίνει» να τον αισθανθεί – καθώς, ελλείψει αντήχησης, η απόσβεση της έντασης του ήχου στους κλειστούς χώρους θα ήταν εξαιρετικά απότομη.
- Υπερβολική αντήχηση, ωστόσο, είναι ανεπιθύμητη, καθώς οι διαδοχικοί ήχοι που εκπέμπει η πηγή (ομιλητής) θα συγχέονταν στο αυτί του ακροατή και το συνολικό αποτέλεσμα θα ήταν αλλοιωμένο σε σχέση με τον ήχο που εκπέμπει η πηγή (π.χ. χάνεται η άρθρωση και οι ακροατές δεν αντιλαμβάνονται τι λέει ο ομιλητής).

Το ακριβές «ποσό» αντήχησης που παρουσιάζει δεδομένος κλειστός χώρος, μετρείται αντικειμενικά από το μέγεθος που ονομάζεται **Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time, RT_{60})**. Ορίζεται ως ο χρόνος σε sec που απαιτείται μέσα στο συγκεκριμένο κλειστό χώρο, ώστε η ένταση του ήχου στον ακροατή να πέσει 60 dB κάτω από την αρχική τιμή της. (Μείωση κατά 60 dB αντιστοιχεί σε μείωση στο 1/1000 του αρχικού πλάτους του σήματος). Χρόνος αντήχησης 1.5 – 2.5 sec θεωρείται γενικά αποδεκτός, ενώ μικρότερες τιμές (1 sec) ευνοούν την ποιοτική ακρόαση ομιλίας και μεγαλύτερες τιμές (3 sec) ευνοούν την ποιοτική ακρόαση μουσικής.

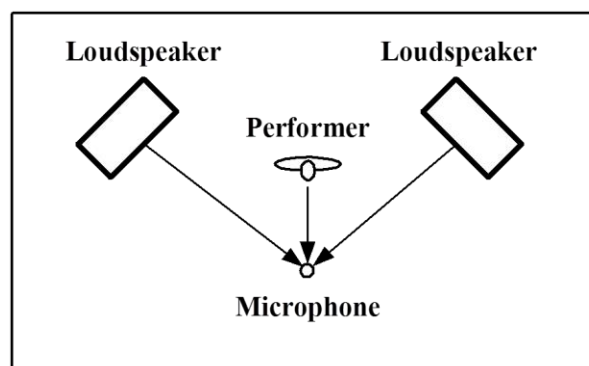
Στο επόμενο σχήμα (από <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acoustic/reverb.html>), φαίνεται ένας ήχος κρουστικής μορφής που εκπέμπει η πηγή, καθώς και οι χρόνοι άφιξης στον ακροατή, διαδοχικά, (α) του ήχου που διαδίδεται απευθείας, (β) των πρώτων, διακριτών, ανακλάσεων, και (γ) των μετέπειτα πολυπληθών ανακλάσεων που συγχέονται μεταξύ τους και ονομάζονται συλλογικά «αντήχηση» του χώρου.



Η αντήχηση στη σκηνή

Ένας μουσικός ή τραγουδιστής στη σκηνή (performer) ή ένας παραγωγός μουσικής εκτός σκηνής, συχνά επιθυμεί να εισάγει επίτηδες αντήχηση στο ακουστικό σήμα που ακούν οι ακροατές του, για λόγους αισθητικής απόλαυσης και καλλιτεχνικής έκφρασης. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα για να δημιουργείται ή να προσομοιώνεται το αποτέλεσμα της αντήχησης.

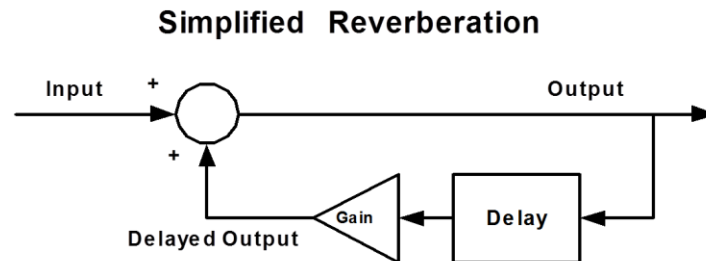
Σε ένα τέτοιο σύστημα, ο ήχος φθάνει στο μικρόφωνο τόσο από την πηγή (Performer) όσο και από τα μεγάφωνα (Loudspeakers), τα οποία μεταδίδουν **ενισχυμένο** τον ήχο του μικροφώνου. Η υπέρθεση αυτών των ήχων αποτελεί το σήμα που τελικά ακούει ο ακροατής (σήμα εξόδου του συστήματος με αντήχηση). Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται παράδειγμα με δύο (2) μεγάφωνα. (Δεν φαίνονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ενίσχυσης κλπ. που οδηγούν από το μικρόφωνο πίσω προς τα μεγάφωνα.)



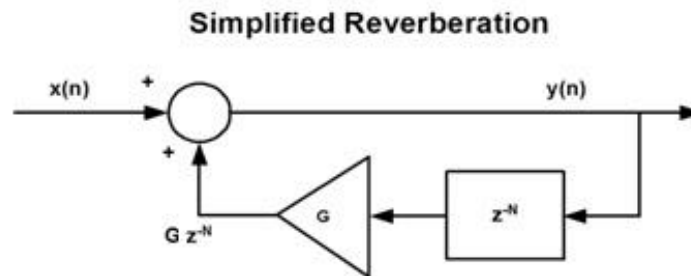
(A) Σύστημα με μία μόνο διαδρομή αντήχησης

Block Διάγραμμα συστήματος

- Προς το παρόν, θα εξετάσουμε σύστημα με MONO MIA διαδρομή αντήχησης (single reverberation path).
- Ο ακροατής ακούει στο σημείο εξόδου το εξής σήμα: «Output = Input + Delayed Output»
- Στην καθυστερημένη διαδρομή (reverberation path), το κέρδος μπορεί να είναι $\text{Gain} > 1$ (οπότε η αντήχηση φτάνει στον ακροατή ενισχυμένη).



Σχέση εισόδου-εξόδου του συστήματος (απλουστευμένη περίπτωση μίας αντήχησης)



Στο πεδίο του (διακριτού) χρόνου n, η έξοδος δίνεται από τη σχέση

$$y(n) = x(n) + G y(n-N) = x(n) + G y(n) * \delta(n-N) \Rightarrow$$

$$y(n) - G y(n) * \delta(n-N) = x(n) \Rightarrow$$

$$y(n) * [\delta(n) - G \delta(n-N)] = x(n),$$

όπου N τα χρονικά δείγματα καθυστέρησης, ή $N T_s = N / f_s$ η καθυστέρηση σε sec.

Στο πεδίο της συχνότητας (δηλαδή στο πεδίο Z, αφού πρόκειται για ψηφιακό σύστημα) η συνέλιξη γίνεται πολλαπλασιασμός και η έξοδος δίνεται από τη σχέση

$$Y(z) \cdot [1 - G z^{-N}] = X(z) \quad \Rightarrow \quad H(z) = Y(z) / X(z) = 1 / [1 - G z^{-N}],$$

όπου η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος $H(z)$ είναι η

$$H(z) = Z \{ h(n) \} = 1 / [1 - G z^{-N}].$$

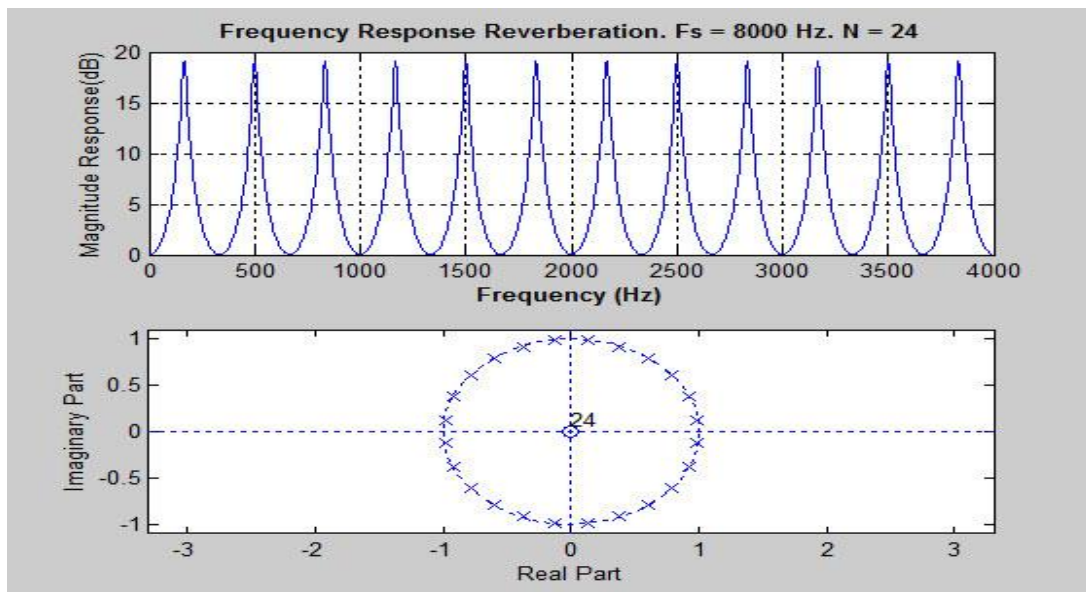
Απόκριση συχνότητας του συστήματος (απλουστευμένη περίπτωση μίας αντήχησης)

Η απόκριση συχνότητας του απλουστευμένου συστήματος με μία αντήχηση μπορεί να υπολογιστεί με το ακόλουθο αρχείο .m στο περιβάλλον Matlab. ΠΡΟΣΟΧΗ: Εδώ έχουμε πολλαπλασιάσει αριθμητή και παρονομαστή της $H(z)$ επί z^N , ώστε να γίνει η $H(z)$ ρητή συνάρτηση του z: $H(z) = 1 / [1 - G z^{-N}] = [z^N] / [z^N - G] = B(z) / A(z)$.


```

%
% Example 03: Echo and Reverberation.
%
% Simplified Transfer Function of system with (only one) reverberation path.
%  $H(z) = 1 / [1 - Gz^{(-N)}] = [z^N] / [z^N - G]$ ,
% where
% G = Gain of the reverb path, (amplification - positive feedback, here set to G=0.8)
% N = Time delay of the reverb path (here set to N=24 samples)
% Calculating frequency response and poles / zeros of H(z)
%
a = [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.8]; % Denominator
b = 1; % Numerator
Fs = 8000; % Sampling frequency 8 KHz
[H, f] = freqz(b, a, 1024, Fs);
H_magn = 20*log10(abs(H));
subplot(2,1,1)
plot(f,H_magn)
grid on
xlabel('Frequency in Hz')
ylabel('Magnitude response in dB')
title('System with (one) reverb path: frequency response, G=0.8, N=24')
subplot(2,1,2)
zplane(b,a)
%
```

Απόκριση συχνότητας (καμπύλη μέτρου μόνο) και διάγραμμα πόλων / μηδενικών



Συνοψίζοντας, σε ένα σύστημα που αναπαράγει το φαινόμενο της αντήχησης:

- Το σήμα εξόδου του συστήματος, που ακούει τελικά ο ακροατής, προέρχεται όχι αποκλειστικά και μόνο από την είσοδο, αλλά από την είσοδο ΚΑΙ από προηγούμενες τιμές της εξόδου. Άρα το σύστημα αυτό περιέχει **βρόχο ανάδρασης (feedback loop)**, σε αντίθεση με της ηχούς, που περιείχε απλώς παράλληλους κλάδους.
- Ορισμένες συχνότητες στο σήμα εξόδου (που ακούει τελικά ο ακροατής) θα είναι ενισχυμένες.
- Επειδή οι πόλοι του συστήματος βρίσκονται ΠΑΝΩ στον μοναδιαίο κύκλο, το σύστημα της αντήχησης θεωρητικά είναι οριακά ευσταθές, αλλά στην πράξη μπορεί να γίνει ΑΣΤΑΘΕΣ.

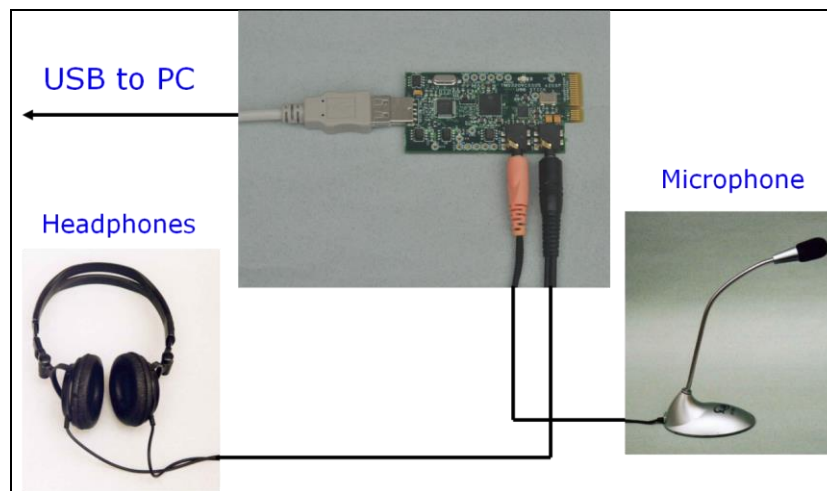
ΜΕΡΟΣ III: ΗΧΩ ΚΑΙ ΑΝΤΗΧΗΣΗ ΣΤΟΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΚΟΣΜΟ

- Πρακτικά σε ένα κλειστό χώρο (π.χ. σε ένα δωμάτιο) η ηχώ θα έρχεται στον ακροατή από πολλαπλές διαδρομές.
- Όταν ο ήχος ανακλάται από μια επιφάνεια ενός φυσικού εμποδίου στο χώρο (π.χ. τοίχοι / πετάσματα, δάπεδο / οροφή, έπιπλα, κλπ.) δημιουργείται «χρωματισμός» του ηχητικού σήματος, δηλαδή ορισμένες συχνότητες απορροφώνται από το εμπόδιο περισσότερο από άλλες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού κατασκευής του. Επίσης για τον ίδιο λόγο θα υπάρξουν και αλλαγές φάσης στις διάφορες συχνοτικές συνιστώσες του σήματος.
- Επομένως, μια εμπορική / επαγγελματική μονάδα ψηφιακής αναπαραγωγής των φαινομένων ηχούς και αντήχησης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα για πολλές διαφορετικές διαδρομές καθυστέρησης του ήχου.

(A) Εισαγωγή στο εργαστήριο

- Σε αυτό το εργαστήριο θα προσομοιωθεί και θα λειτουργήσει μία τέτοια ψηφιακή μονάδα ηχούς και αντήχησης, ως μία εφαρμογή γραμμένη σε κώδικα C.
- Θα εκτελέσετε τον αντίστοιχο κώδικα ώστε να υλοποιήσετε τα διαφορετικά ακουστικά εφέ ηχούς και αντήχησης στην κάρτα TMS320C5505 USB stick.
- Θα χρησιμοποιήσετε ρυθμό δειγματοληψίας $F_s = 24.000$ Hz αντί για $F_s = 48.000$ Hz. Αυτό επιτρέπει να υλοποιηθούν μεγαλύτεροι χρόνοι καθυστέρησης.
- Οι buffers της ηχούς και της αντήχησης υλοποιούνται ως κυκλικοί buffers (circular buffers).

(B) Η συνδεσμολογία του TMS320C5505



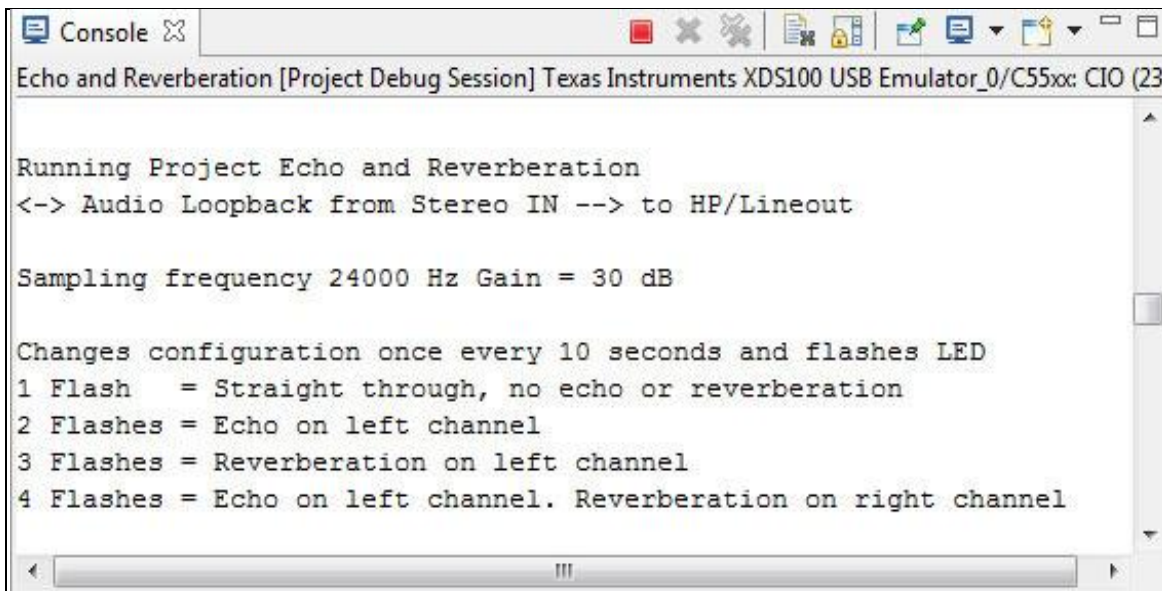
(Γ) Συνοπτικά βήματα

- Χρησιμοποιήστε τα αρχεία προγράμματος (τον κώδικα) που δίνεται στην Άσκηση 3 «Ηχώ και Αντήχηση». Αν δεν υπάρχουν ήδη στο φάκελο **Desktop -> My Documents -> Workspace -> example_03**, δημιουργήστε το φάκελο αυτό και αντιγράψτε τα αρχεία της άσκησης μέσα σ' αυτόν.
- Ακολουθήστε **ΟΛΑ** τα βήματα και τις ρυθμίσεις παραμέτρων που δίνονται στο φυλλάδιο «**Εισαγωγή και Εκτέλεση Προγραμμάτων στο CCS**». Συνοπτικά:
 - 1) Πραγματοποιούμε την ζητούμενη συνδεσμολογία, που φαίνεται στο Σχήμα.
 - 2) Ανοίγουμε το **Code Composer Studio (CCS)**.
 - 3) Εντοπίζουμε το **EXAMPLE_03**, και το θέτουμε **SET AS ACTIVE PROJECT**
 - 4) Ανοίγουμε τα αρχεία της άσκησης επιλέγοντας το **[+]**
 - 5) Κάνουμε διπλό κλικ στο **main.c** της άσκησης
 - 6) Επιλέγουμε **Project -> Build Active project**

- 7) Επιλέγουμε **Target->Launch IT Debugger** (ρυθμίσεις παραμέτρων από το Properties, όπως στην Εισαγωγή)
- 8) Επιλέγουμε **Target->Debug active project**
- 9) Επιλέγουμε **Target->Run**
- 10) Για να τερματίσουμε την εκτέλεση του προγράμματος, επιλέγουμε **Target->Halt**.

(Δ) Εκτέλεση του κώδικα ως έχει:

Στο Tab **“Console” (Κονσόλα)** η εικόνα επεξηγεί τη λειτουργία του προγράμματος, όταν εκτελείται ως έχει (χωρίς τροποποίηση του κώδικα):



Συγκεκριμένα, όση ώρα εκτελείται το πρόγραμμα αυτό (μεταξύ RUN και HALT), η λειτουργία του είναι να μεταβαίνει κυκλικά μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών configurations του συστήματος ηχούς και αντήχησης. Κάθε μετάβαση σηματοδοτείται **ανάβοντας το πράσινο LED** της κάρτας 1, 2, 3 ή 4 φορές, αντίστοιχα.

1° configuration: Ακούγεται στα ακουστικά μόνο ο απευθείας ήχος της πηγής (έχουν απενεργοποιηθεί τα φαινόμενα ηχούς και αντήχησης).

2° configuration: Ακούγεται στα ακουστικά το φαινόμενο της ηχούς, στο ένα μόνο κανάλι (αριστερό ακουστικό).

3° configuration: Ακούγεται στα ακουστικά το φαινόμενο της αντήχησης, στο ένα μόνο κανάλι (αριστερό ακουστικό).

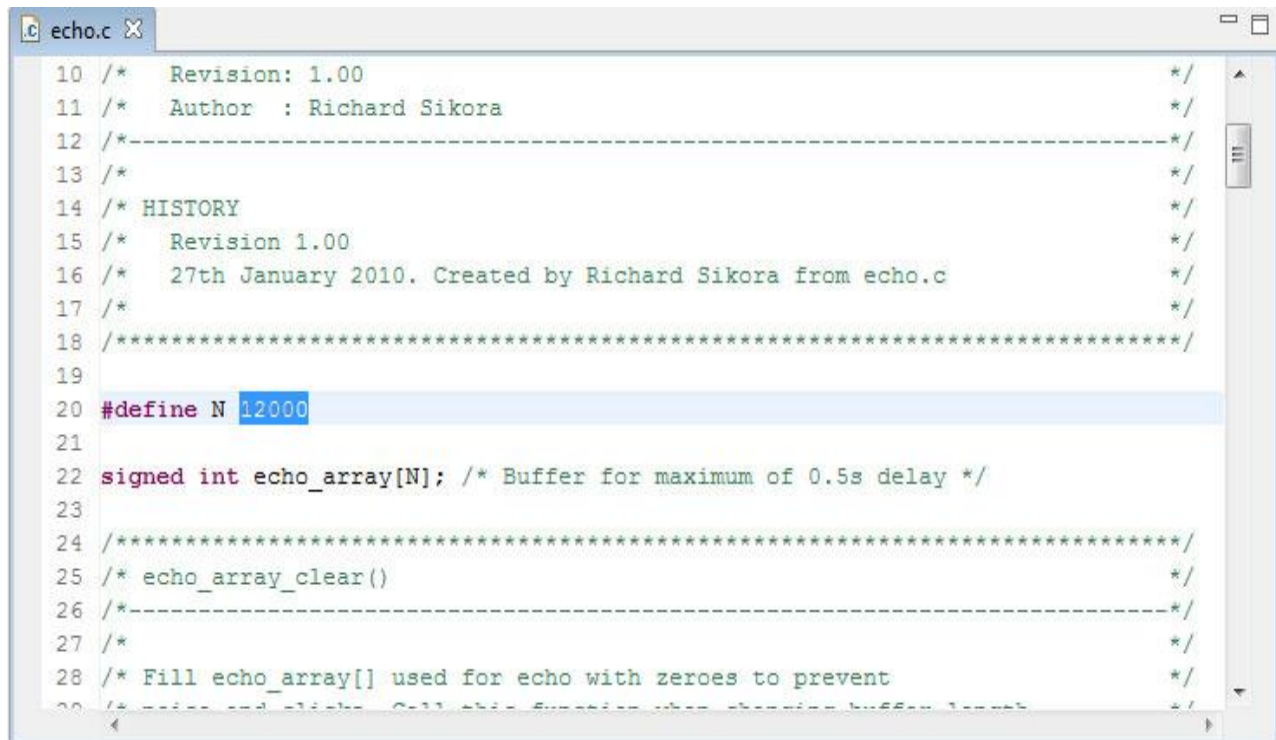
4° configuration: Ακούγονται στα ακουστικά και τα δύο φαινόμενα, ηχούς και αντήχησης, στο ένα κανάλι (αριστερό ακουστικό) η ηχώ και στο άλλο (δεξί ακουστικό) η αντήχηση.

(Ε) Εκτέλεση του κώδικα μετά από τροποποίηση

Συνοπτικά βήματα τροποποίησης του κώδικα και εκτέλεσης του προγράμματος

- 1) Με χρήση του **editor**, τροποποιούμε τον κώδικα C, κατά το επιθυμητό κάθε φορά.
- 2) Επιλέγουμε **Target->Rebuild Active project**.
- 3) Επιλέγουμε **Target->Run**.
- 4) Για να τερματίσουμε την εκτέλεση του προγράμματος, επιλέγουμε **Target->Halt**.

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ 1^η: Αλλαγή του μήκους buffer της ηχούς

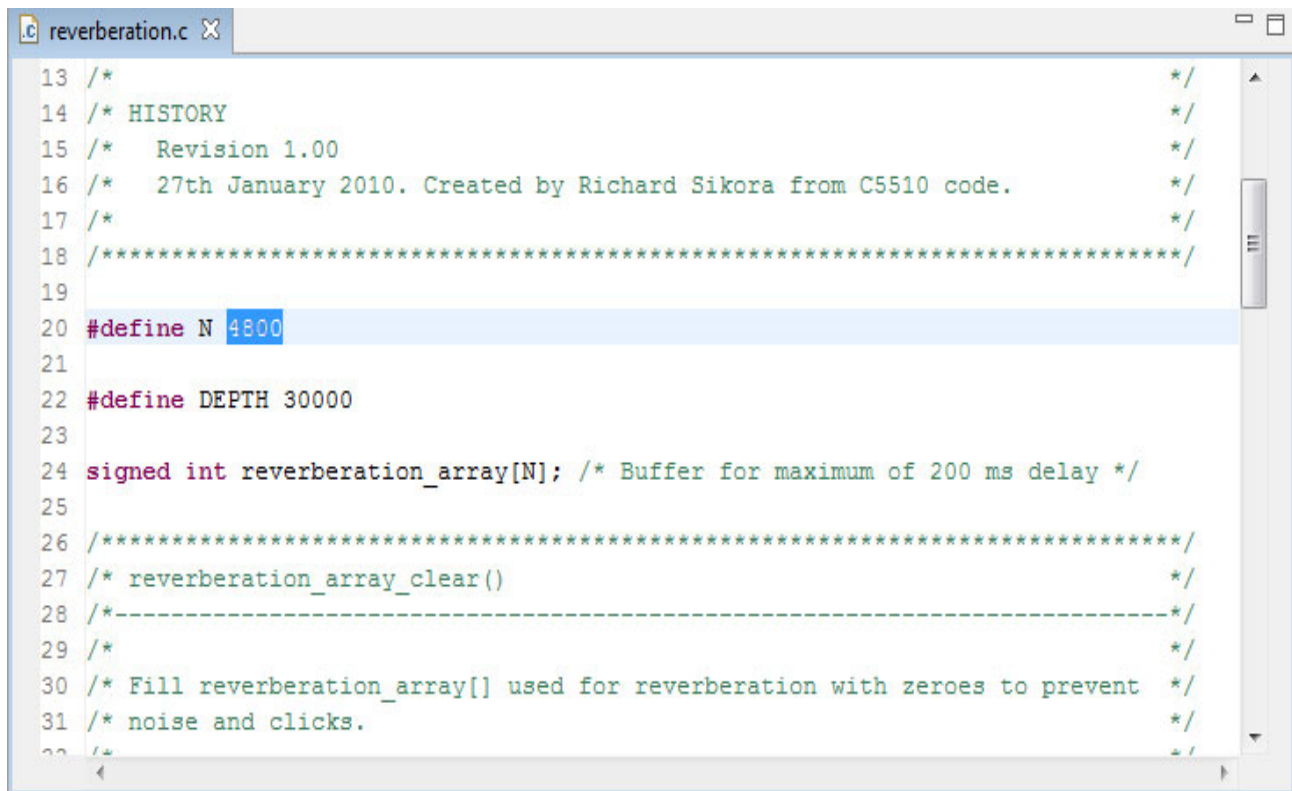


```
10 /* Revision: 1.00 */
11 /* Author : Richard Sikora */
12 /*-----*/
13 /* */
14 /* HISTORY */
15 /* Revision 1.00 */
16 /* 27th January 2010. Created by Richard Sikora from echo.c */
17 /* */
18 /*-----*/
19
20 #define N 12000
21
22 signed int echo_array[N]; /* Buffer for maximum of 0.5s delay */
23
24 /*-----*/
25 /* echo_array_clear() */
26 /*-----*/
27 /* */
28 /* Fill echo_array[] used for echo with zeroes to prevent
29 /* uninitialized data. Call this function when changing buffer length
30 /*-----*/
```

Ρύθμιση του buffer της ηχούς

- Στο αρχείο **echo.c**, αλλάξτε την τιμή της παραμέτρου N, δηλαδή το μήκος του buffer καθυστέρησης της ηχούς.
- Δοκιμάστε διάφορες τιμές του N, μεγαλύτερες και μικρότερες της αρχικής. Κάθε φορά κάνετε rebuilt και run το project. Παρατηρείστε πώς αλλάζει η ηχώ καθώς το N μειώνεται ή αυξάνεται;
- Ποια είναι η μέγιστη τιμή του N που υποστηρίζεται από το hardware αυτής της κάρτας;

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ 2^η: Αλλαγή του μήκους buffer και του βάθους της αντήχησης



```
13 /* */
14 /* HISTORY */
15 /* Revision 1.00 */
16 /* 27th January 2010. Created by Richard Sikora from C5510 code. */
17 /* */
18 /****** */
19
20 #define N 4800
21
22 #define DEPTH 30000
23
24 signed int reverberation_array[N]; /* Buffer for maximum of 200 ms delay */
25
26 /****** */
27 /* reverberation_array_clear() */
28 /*----- */
29 /* */
30 /* Fill reverberation_array[] used for reverberation with zeroes to prevent */
31 /* noise and clicks. */
32 /* */
```

Ρύθμιση αντήχησης

- Στο αρχείο **reverberation.c**, αλλάξτε την τιμή της παραμέτρου **N**, δηλαδή το μήκος του buffer της αντήχησης. Η παρούσα τιμή είναι 200ms.
- Μεταβάλλετε την τιμή της παραμέτρου **DEPTH** μεταξύ 0 και 32767. Ακούστε το αποτέλεσμα.
- Ερώτηση: Τι συμβαίνει όταν το **DEPTH** φτάσει τη μέγιστη τιμή του, δηλαδή 32767, οπότε το 100% του σήματος εξόδου ανατροφοδοτείται στην είσοδο του συστήματος;

(ΣΤ) Ερωτήσεις

- Ποιες είναι οι διαφορές μεταξύ της ηχούς και της αντήχησης;
- Η ηχώ ή η αντήχηση απαιτεί τη λιγότερη μνήμη για να γράψετε το πρόγραμμά σας;
- Πώς θα εξασφαλίζατε ότι το σύστημα με την αντήχηση παραμένει ευσταθές;