

Μάθημα

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

Εξάμηνο Μαθήματος

7<sup>ο</sup>

Διδάσκοντες

Ηλίας Ζώης και Μαρία Ραγκούση

Συνεργάτες Εργαστηρίου

Μάνος Μιχαηλίδης και Άγγελος Χαριτόπουλος

Εξάμηνο Διδασκαλίας

Χειμερινό Εξάμηνο 2022-23

## Άσκηση 8: Παραγωγή αλλοιωμένης φωνής (Alien voices generation)

### Σκοπός της άσκησης

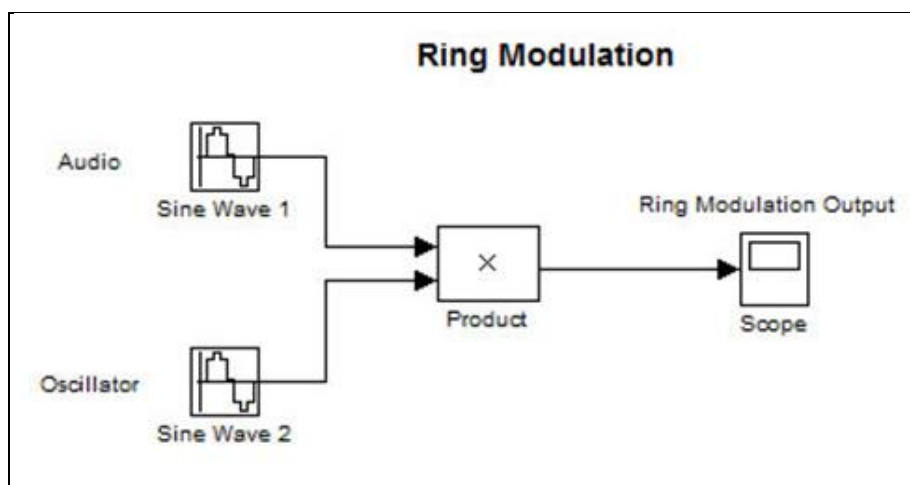
Εκτός από την **παραγωγή** συνθετικών ημιτονικών κυμάτων, ένας επεξεργαστής DSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την **διαμόρφωσή τους (modulation)**, ώστε να επιτευχθούν επιθυμητά ακουστικά αποτελέσματα. Η παρούσα άσκηση αφορά τη μελέτη και χρήση της **διαμόρφωσης πλάτους ακουστικών σημάτων (ring modulation)**, με εφαρμογή την παραγωγή **αλλοιωμένης φωνής** και με πρακτικό ενδιαφέρον στην ηχητική επένδυση κινηματογραφικών ταινιών, spots, κινουμένων σχεδίων, κλπ.

Σκοπός της άσκησης είναι

- Κατανόηση της διαμόρφωσης πλάτους ακουστικού σήματος (**ring modulation**),
- Κωδικοποίηση της διαμόρφωσης σε γλώσσα C και εφαρμογή στην αλλοίωση φωνής, για παραγωγή του ακουστικού εφέ των «εξωγήινων» φωνών (alien voices generation),
- Χρήση του μικροφώνου που είναι συνδεδεμένο με το Texas Instruments TMS320C5505 USB Stick για εισαγωγή της φυσικής φωνής και χρήση των ακουστικών ή των ηχείων του υπολογιστή για την αναπαραγωγή της αλλοιωμένης φωνής.

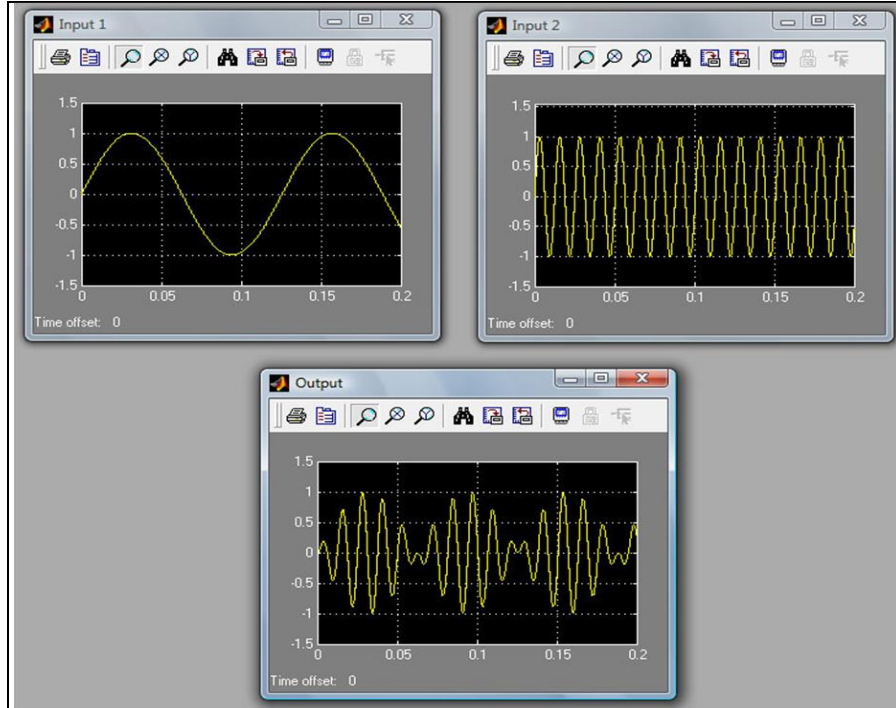
### ΜΕΡΟΣ Ι: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (Ring modulation)

Για τη διαμόρφωση πλάτους ενός ακουστικού σήματος (ring modulation), μελετάμε κατ' αρχήν τη διαμόρφωση ενός απλού ημιτόνου κατά πλάτος. Αυτή επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το υπό διαμόρφωση ακουστικό ημίτονο (audio σήμα εισόδου) με ένα δεύτερο ημίτονο που παράγεται για το σκοπό αυτό από έναν αρμονικό ταλαντωτή (oscillator), όπως δείχνει σε διάγραμμα βαθμίδων η επόμενη εικόνα:



Στην επόμενη εικόνα φαίνονται

- (α) το προς διαμόρφωση ημιτονικό ακουστικό σήμα εισόδου (πάνω αριστερά),
- (β) το ημίτονο διαμόρφωσης που γεννά ο αρμονικός ταλαντωτής (πάνω δεξιά),
- (γ) το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης, δηλαδή του πολλαπλασιασμού των (α) και (β), (κάτω).



Για να αντιληφθούμε πώς λειτουργεί στο πεδίο των συχνοτήτων η **διαμόρφωση πλάτους**, δηλαδή η πράξη του **πολλαπλασιασμού δύο σημάτων** (η βαθμίδα PRODUCT στο προηγούμενο διάγραμμα βαθμίδων) και τι επιτυγχάνει, εξετάζουμε τις τριγωνομετρικές ταυτότητες για το συνημίτονο του αθροίσματος και για το συνημίτονο της διαφοράς δύο γωνιών, έστω A και B:

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

$$\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

Αν προσθέσουμε τις δυο αυτές ισότητες κατά μέλη, παίρνουμε την εξής μορφή που περιέχει γινόμενο (πολλαπλασιασμό) στο δεξί σκέλος:

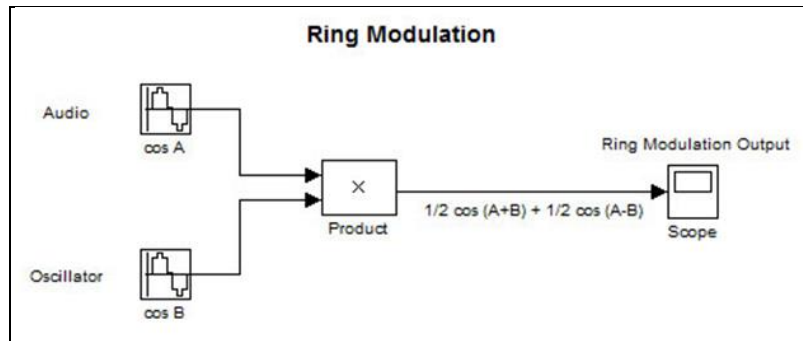
$$\cos(A+B) + \cos(A-B) = 2 \cos A \cos B$$

οπότε, επιλύοντας ως προς το γινόμενο, έχουμε τελικά:

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A+B) + \frac{1}{2} \cos(A-B)$$

Άρα αν **πολλαπλασιάσουμε** δύο συχνότητες A και B, θα προκύψει στην έξοδο **άθροισμα (υπέρθεση)** δύο συνημιτονικών συνιστωσών. Η πρώτη θα έχει ως συχνότητα το **άθροισμα** των δύο αρχικών συχνοτήτων (A+B) και η δεύτερη τη **διαφορά** τους (A-B). Σημειώστε ότι οι αρχικές συχνότητες A και B δεν εμφανίζονται καθόλου στην έξοδο. Πράγματι δεν υπάρχει όρος του τύπου  $\cos A$  ή  $\cos B$ .

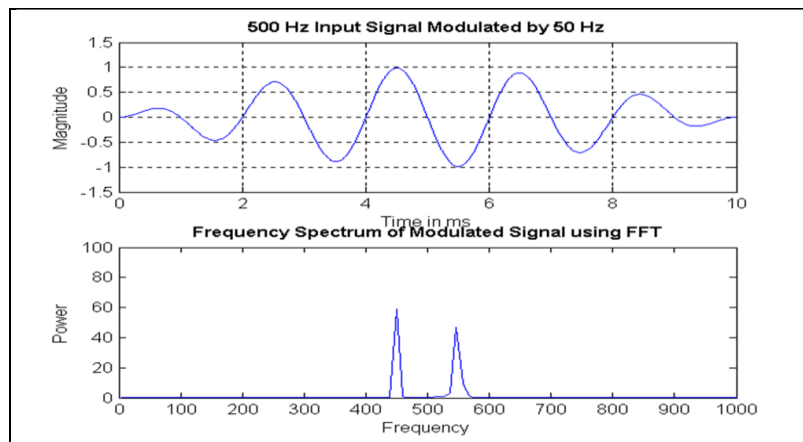
Άρα μπορούμε τώρα να εξειδικεύσουμε το αρχικό διάγραμμα βαθμίδων ως εξής (για την απλοποιημένη περίπτωση πάντα που το ακουστικό σήμα προς διαμόρφωση είναι ένα μόνο ημίτονο, δηλαδή μόνο μία συχνότητα):



### Παράδειγμα

Ακουστικό σήμα αποτελούμενο από ένα μόνο ημίτονο των 50 Hz διαμορφώνεται από ημίτονο συχνότητας 500 Hz. Το αποτέλεσμα με βάση τις προηγούμενες τριγωνομετρικές σχέσεις είναι υπέρθεση δύο ημιτόνων, η πρώτη στα  $500 + 50 = 550$  Hz και η δεύτερη στα  $500 - 50 = 450$  Hz.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται (α) το σήμα εξόδου, δηλαδή το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης, στο πεδίο του χρόνου (πάνω) και (β) το φάσμα του σήματος αυτού, στο πεδίο της συχνότητας (κάτω). Διαπιστώνουμε πράγματι ότι η ανάλυση φάσματος του διαμορφωμένου πλέον σήματος δείχνει την ύπαρξη δύο συνιστωσών, μίας στα 450 Hz και μίας στα 550 Hz, όπως προβλεπόταν.



### Εφαρμογές της διαμόρφωσης πλάτους (ring modulation)

- Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται στην εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος. Συγκεκριμένα η διαμόρφωση πλάτους (ring modulation) ουσιαστικά ταυτίζεται με την διαμόρφωση AM (Amplitude Modulation), στη ραδιοφωνία. Πρόκειται για την ειδική περίπτωση **AM (double sidebands – no carrier)**.
- Στην περίπτωση της ραδιοφωνίας, το ημίτονο που παράγεται από τον αρμονικό ταλαντωτή, δηλαδή η συχνότητα διαμόρφωσης, είναι αρκετά υψηλότερα από τις συχνότητες του ακουστικού σήματος προς διαμόρφωση. Συγκεκριμένα μπορεί να βρίσκεται στη ζώνη των εκατοντάδων KHz ή των MHz.
- Αντίθετα, το ακουστικό σήμα κινείται στην ακουστική ζώνη συχνοτήτων (20 Hz – 20 KHz) και προκειμένου περί φωνής (ομιλίας) έως και 4 KHz περίπου, άρα είναι χαμηλόσυχο σε σχέση με το ημίτονο διαμόρφωσης. Επίσης δεν περιέχει ένα μόνο ημίτονο, αλλά αναλύεται κατά Fourier σε υπέρθεση πολλών ημιτόνων, το καθένα με τη δική του συχνότητα, πλάτος και φάση. Η συχνότητα διαμόρφωσης διαμορφώνει την καθεμία από αυτές.
- Οπότε οι συχνότητες αθροίσματος και διαφοράς, που εμφανίζονται την έξοδο του διαμορφωτή, είναι υψίσυχνες και εμφανίζονται να ισαπέχουν δεξιά και αριστερά της (υψηλής) συχνότητας διαμόρφωσης. Στη ραδιοφωνία αναφέρονται ως **πλευρικές ζώνες συχνοτήτων (sidebands)**.

## ΜΕΡΟΣ II: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΛΟΙΩΜΕΝΗΣ ΦΩΝΗΣ

### (Α) Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση αφορά την κωδικοποίηση σε γλώσσα C μίας εφαρμογής που υλοποιεί τη διαμόρφωση πλάτους (ring modulation) για να δημιουργήσει το ακουστικό εφέ των «εξωγήινων» φωνών (alien voices generation). Συγκεκριμένα,

- η φυσική (αναλλοίωτη) φωνή εισάγεται μέσω του μικροφώνου,
- η διαμόρφωση πλάτους (ring modulation) πραγματοποιείται από τον επεξεργαστή TMS320C5505 USB Stick, ανάλογα με τις παραμέτρους που του δίνονται κάθε φορά μέσω του κώδικα C, και
- το αποτέλεσμα (η αλλοιωμένη φωνή) ακούγεται από τα ακουστικά ή τα ηχεία του υπολογιστή.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν

- η συνάρτηση ημιτόνου **sine( )** από την βιβλιοθήκη DSPLIB της Texas Instruments, όπως αυτή αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην Άσκηση 4 για την παραγωγή ημιτονικών κυμάτων, και
- η συνάρτηση **ring\_modulation()** από την ίδια βιβλιοθήκη, για τον πολλαπλασιασμό του ακουστικού σήματος εισόδου (από το μικρόφωνο) με το ημιτονικό κύμα που συνθέτει εσωτερικά ο επεξεργαστής με την sine( ).

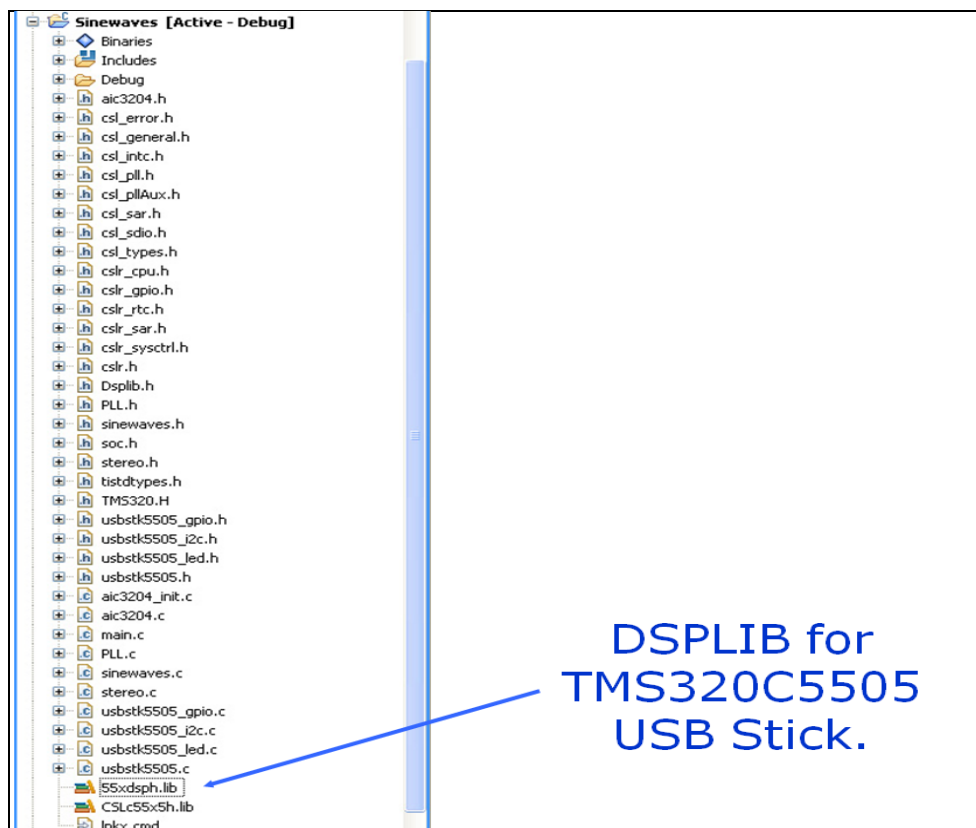
Υπενθυμίζεται ότι, όπως είδαμε στην Άσκηση 4 «Παραγωγή Ημιτονικών Κυμάτων», για να χρησιμοποιηθούν οι έτοιμες συναρτήσεις της βιβλιοθήκης συναρτήσεων DSPLIB, θα πρέπει προηγουμένως

1. να προστεθούν οι ακόλουθες δύο δηλώσεις ( **#include** ) στον κώδικα C, ώστε να περιληφθούν τα κατάλληλα Αρχεία Επικεφαλίδας (header files):

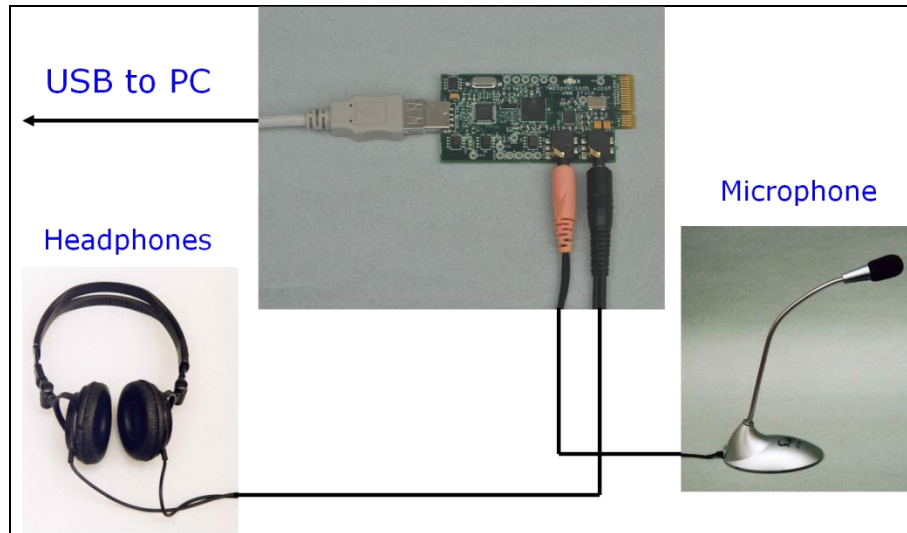
```
#include "tms320.h"
```

```
#include "dsplib.h"
```

2. να βρίσκεται μέσα στο φάκελο με τα αρχεία του προγράμματος (δηλαδή του **Active Project**) το κατάλληλο Αρχείο Βιβλιοθήκης **55xdsp.lib**, πριν δοθεί η εντολή "Build Active Project", όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



## (B) Η συνδεσμολογία του TMS320C5505



## (Γ) Συνοπτικά βήματα

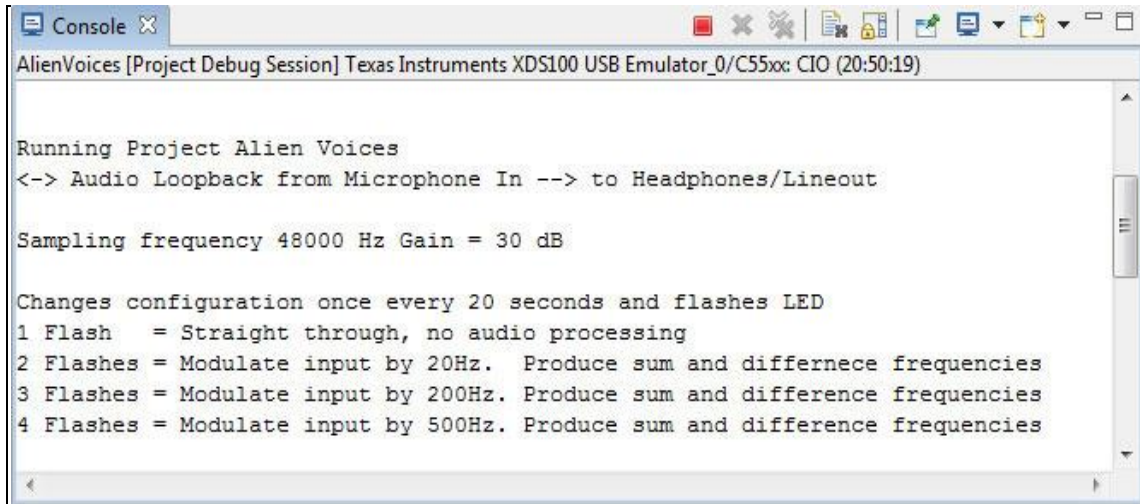
- Χρησιμοποιήστε τα αρχεία προγράμματος (τον κώδικα) που δίνεται στην Άσκηση 8 «Παραγωγή Αλλοιωμένης Φωνής». Αν δεν υπάρχουν ήδη στο φάκελο **Desktop -> My Documents -> Workspace -> example\_08**, δημιουργήστε το φάκελο αυτό και αντιγράψτε τα αρχεία της άσκησης μέσα σ' αυτόν.
- Ακολουθήστε **ΟΛΑ** τα 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\_08, 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) Από το **Project->Properties** ρυθμίζουμε τα Properties (όπως στο φυλλάδιο «Εισαγωγή»)
  - 7) Επιλέγουμε **Project->Build Active project**
  - 8) Επιλέγουμε **Target->Launch T.I. Debugger** (Target configuration και save, όπως στο φυλλάδιο «Εισαγωγή»)
  - 9) Επιλέγουμε **Target->Debug active project**
  - 10) Επιλέγουμε **Target->Run**
  - 11) 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). Το πρόγραμμα αυτό μεταβαίνει κυκλικά κάθε 20 δευτερόλεπτα μεταξύ των εξής 4 λειτουργιών:

- (1) Απλή αναπαραγωγή στα ακουστικά της φωνής που εισέρχεται από το μικρόφωνο, χωρίς αλλοίωση,
- (2) Διαμόρφωση της εισερχόμενης φωνής από ημίτονο των 20 Hz
- (3) Διαμόρφωση της εισερχόμενης φωνής από ημίτονο των 200 Hz
- (4) Διαμόρφωση της εισερχόμενης φωνής από ημίτονο των 500 Hz

Το LED της πλακέτας αναβοσβήνει για να σηματοδοτήσει την κάθε μετάβαση.



```
AlienVoices [Project Debug Session] Texas Instruments XDS100 USB Emulator_0/C55xx: CIO (20:50:19)

Running Project Alien Voices
<-> Audio Loopback from Microphone In --> to Headphones/Lineout

Sampling frequency 48000 Hz Gain = 30 dB

Changes configuration once every 20 seconds and flashes LED
1 Flash = Straight through, no audio processing
2 Flashes = Modulate input by 20Hz. Produce sum and difference frequencies
3 Flashes = Modulate input by 200Hz. Produce sum and difference frequencies
4 Flashes = Modulate input by 500Hz. Produce sum and difference frequencies
```

## (Ε) Εκτέλεση του κώδικα μετά από τροποποίηση

Συνοπτικά βήματα τροποποίησης του κώδικα και εκτέλεσης του προγράμματος:

- 1) Μεταβαίνουμε στην οθόνη **C/C++ Projects** (και όχι στην οθόνη Debug), επιλέγοντάς την από τον επιλογέα οθόνης άνω δεξιά. Επιλέγουμε το αρχείο που θα τροποποιήσουμε (π.χ. main.c) και με διπλό κλικ πάνω στο όνομά του, το ανοίγουμε στην κεντρική οθόνη. Με χρήση του **editor**, τροποποιούμε τον κώδικα C, κατά το επιθυμητό κάθε φορά. Στο τέλος αποθηκεύουμε τις αλλαγές (**save**).
- 2) Επιλέγουμε **Project->Rebuild Active project**. (Στην ερώτηση για overwrite απαντάμε yes).
- 3) Επιλέγουμε **Target->Debug Active project**.
- 4) Επιλέγουμε **Target->Run**.
- 5) Για να τερματίσουμε την εκτέλεση του προγράμματος, επιλέγουμε **Target->Halt**.

### ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ 1<sup>η</sup>: Αλλαγή της συχνότητας διαμόρφωσης

Η συχνότητα διαμόρφωσης ορίζεται μέσα στο κυρίως πρόγραμμα, main.c, στο σημείο όπου καλείται η συνάρτηση “generate\_sinewave\_1()” για να συνθέσει το ημίτονο διαμόρφωσης. Η πρώτη από τις δύο παραμέτρους μέσα στην παρένθεση κλήσης της “generate\_sinewave\_1( )” είναι η συχνότητα του ζητούμενου ημιτονικού κύματος.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα Βήματα 3 και 4 του προαναφερθέντος σεναρίου με τα 4 Βήματα, δηλαδή το βήμα όπου η συχνότητα διαμόρφωσης είναι 200 Hz και 500 Hz, αντίστοιχα.

- Τροποποιείτε τις συχνότητες, π.χ. ορίστε τη συχνότητα στο Βήμα 3 στα 100 Hz και τη συχνότητα στο Βήμα 4 στα 1.500 Hz, και ακούστε το αποτέλεσμα.



```
167 }
168 else if ( Step == 3)
169 {
170     sinewave1 = generate_sinewave_1 (200, 32767); // 200Hz sinewave of amplitude 1.000
171     left_output = ring_modulation (sinewave1, mono_input);
172     right_output = left_output;
173 }
174 else if ( Step == 4)
175 {
176     sinewave1 = generate_sinewave_1 (500, 32767); // 500Hz sinewave of amplitude 1.000
177     left_output = ring_modulation (sinewave1, mono_input);
178     right_output = left_output + mono_input/4; // Add some of original signal for cl
179 }
180
181 aic3204_codec_write(left_output, right_output);
182
183 ticks++;
184 if ( ticks == SAMPLES_PER_SECOND)
185 {
```

## ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ 2<sup>η</sup>: Βελτίωση της ποιότητας της αλλοιωμένης φωνής

Στο ίδιο σημείο μέσα στο αρχείο main.c, και αφού επαναφέρουμε τις συχνότητες διαμόρφωσης των Βημάτων 3 και 4 στην αρχική τους τιμή, 200 Hz και 500 Hz, αντίστοιχα, αυξάνουμε την ένταση (το συντελεστή) της φυσικής φωνής (μη αλλοιωμένη συνιστώσα) που προστίθεται στην αλλοιωμένη στο δεξί κανάλι, ώστε το αποτέλεσμα να είναι πιο καταληπτό (ο ακροατής να διακρίνει τι λέει ο ομιλητής). Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η τροποποίηση αυτή.

- Πραγματοποιείτε την τροποποίηση του συντελεστή της μη αλλοιωμένης συνιστώσας από (1/4) σε (1/2) και ακούστε το αποτέλεσμα.

```
167 }
168 else if ( Step == 3)
169 {
170     sinewave1 = generate_sinewave_1 (200, 32767); // 200Hz sinewave of amplitude 1.000
171     left_output = ring_modulation (sinewave1, mono_input);
172     right_output = left_output;
173 }
174 else if ( Step == 4)
175 {
176     sinewave1 = generate_sinewave_1 (500, 32767); // 500Hz sinewave of amplitude 1.000
177     left_output = ring_modulation (sinewave1, mono_input);
178     right_output = left_output + mono_input/2; // Add some of original signal for cl
179 }
180
181 aic3204_codec_write(left_output, right_output);
182
183 ticks++;
184 if ( ticks == SAMPLES_PER_SECOND)
185 {
```

### ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ 3<sup>η</sup>: Δημιουργία ακουστικού εφέ με αλλοίωση ΚΑΙ αντήχηση

Το ακουστικό αποτέλεσμα της αλλοιωμένης φωνής μπορεί να τροποποιηθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας και την αντήχηση (reverberation). Για να το επιτύχετε ακολουθείτε τα εξής βήματα:

1. Αντιγράψετε τα αρχεία `reverberation.c` και `reverberation.h` από την Άσκηση 3 «Ηχώ και Αντήχηση».
2. Προσθέτετε στην αρχή του κυρίως προγράμματος `main.c` το εξής:

```
#include "reverberation.h"
```

3. Τέλος, μέσα στο κυρίως πρόγραμμα `main.c` και θέση της εντολής που ορίζει το δεξί κανάλι της εξόδου, σε οποιοδήποτε από τα Βήματα 2, 3 ή 4, εισάγετε την εντολή:

```
right_output = reverberation(left_output + mono_input/4);
```

- Πραγματοποιείτε την αλλαγή και ακούστε το αποτέλεσμα. Τι παρατηρείτε;
- Τροποποιείτε τις παραμέτρους `N` και `DEPTH` μέσα στην `reverberation.c` και ακούστε πάλι το αποτέλεσμα. Τι παρατηρείτε;

### (ΣΤ) Ερωτήσεις

- Εξηγείστε τι είναι η διαμόρφωση πλάτους (ring modulation) και που χρησιμοποιείται.
- Γιατί η διαμόρφωση πλάτους παράγει άθροισμα και διαφορά συχνοτήτων και όχι τις ίδιες τις συχνότητες;
- Τι συμβαίνει αν εφαρμοστεί η διαμόρφωση πλάτους (ring modulation) όχι σε ένα απλό ημίτονο αλλά σε ένα πιο σύνθετο σήμα, όπως π.χ. σε ένα κομμάτι μουσικής;