



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σύστημα απόκτησης δεδομένων από συστοιχία ψηφιακών ΜΕΜΣ
μικροφώνων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Σ. Λύτης

Επιβλέπων καθηγητής : Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σύστημα απόκτησης δεδομένων από συστοιχία ψηφιακών ΜΕΜΣ
μικροφώνων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος, Σ., Λύτης

Επιβλέπων καθηγητής : Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6/5/2019.

.....
Παύλος - Πέτρος Σωτηριάδης
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Πέτρος Μαραγκός
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κιαμάλ Πεκμεστζή
Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Ηλεκτρονικής

Αθήνα, 5/2019

.....

Αλέξανδρος Σ. Λύτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Αλέξανδρος Σ. Λύτης, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν στο πλάι μου όλο αυτό το διάστημα. Την οικογένειά μου που με στήριξε οικονομικά και ψυχολογικά σε δύσκολους καιρούς. Τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε κάθε βήμα. Το εκπαιδευτικό και διοικητικό προσωπικό της σχολής που έκανε πραγματικότητα το όνειρό μου για την απόκτηση υψηλού επιπέδου επιστημονικής γνώσης πάνω στον τομέα της ηλεκτρονικής.

Θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Π. Σωστηριάδη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, την ευκαιρία να είμαι μέρος του εργαστηρίου ηλεκτρονικής καθώς και καθοδήγηση που μου παρείχε. Επίσης, ευχαριστώ όλα τα παιδιά του εργαστηρίου ηλεκτρονικής για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Πέτρο Μαραγγό καθώς χωρίς την υλική υποστήριξη από το εργαστήριο Όρασης Υπολογιστών, Επικοινωνίας Λόγου και Επεξεργασίας Σημάτων δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση του κατασκευαστικού κομματιού της εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την καλή μου φίλη και διδακτορικό ερευνητή στο εν λόγω εργαστήριο Αντιγόνη Τσιάμη για την άψογη συνεργασία και στήριξη καθώς και για το ότι αποτέλεσε το ερευνητικό της έργο έμπνευση για την παρούσα εργασία.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη σχεδίαση και υλοποίηση μιας συστοιχίας μικροφώνων για την χρήση της σε εργαστηριακές εφαρμογές καταγραφής και επεξεργασίας ήχου. Η συστοιχία έχει την δυνατότητα να καταγράψει ήχο ταυτόχρονα από έως και 32 κανάλια οργανωμένων σε υποσυστοιχίες των 8 μικροφώνων οι οποίες μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση δεκάδων μέτρων μεταξύ τους.

Στη συσκευή χρησιμοποιήθηκαν 32 ψηφιακά μικρόφωνα τύπου MEMS. Το σύστημα δομήθηκε σε μορφή αστέρα και με την δυνατότητα προσαρμογής του αριθμού των συνδεδεμένων μικροφώνων με απλή προσθαφαίρεση κόμβων. Τα δεδομένα συλλέγονται από τον κεντρικό κόμβο του αστέρα και αποθηκεύονται χωρίς συμπίεση σε κάρτα μνήμης ενώ ένα από τα κανάλια τροφοδοτείται σε πραγματικό χρόνο σε υπολογιστή μέσω USB. Για τη μεταφορά των δεδομένων στον κεντρικό κόμβο χρησιμοποιήθηκε το βιομηχανικό πρότυπο RS-485.

Λέξεις-Κλειδιά:

Μικροφωνική Συστοιχία, MEMS μικρόφωνα, μικροελεγκτής, RS-485, USB device

Abstract

The present thesis deals with the design and implementation of a microphone array system for use as laboratory equipment for recording audio and speech for signal processing applications. The array is specified to support audio recording simultaneously from up to 32 channels organized at four branches of eight microphones each capable of operating at long distances.

The acoustic sensors used in the system are digital MEMS microphones. The system was built in the form of a star and with the ability to adjust the number of connected microphones easily just by plugging or unplugging nodes. The data is collected from the central node of the star and stored without any compression on a memory card while one of the channels is fed in real time to a computer via USB. The industry standard RS-485 was used to transfer the data to the central hub.

Key-words:

Microphone array, MEMS microphone, MCU, RS-485, USB device

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	15
1.1	Πεδίο εφαρμογών	16
2	Ψηφιακά μικρόφωνα MEMS	17
2.1	Τεχνολογία μικροφώνων τύπου MEMS	17
2.2	Συνεχούς χρόνου ΣΔ κωδικοποίηση	19
2.3	Αποκωδικοποίηση	21
2.4	Αποκωδικοποιητής ADAU 7002	22
2.5	Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν	24
3	Αρχιτεκτονική συστήματος	25
3.1	Πρωτόκολλο επικοινωνίας συγχρονισμού και αποστολής δεδομένων	27
3.2	Περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού (Firmware)	29
3.3	Λειτουργικό διάγραμμα συστάδας μικροφώνων	31
3.4	Λειτουργικό διάγραμμα κεντρικού κόμβου	32
4	Υλοποίηση συστήματος	34
4.1	Πρότυπο RS-485, υλοποίηση διαύλου μεταφοράς δεδομένων	35
4.2	RS485 Transceivers	38
4.3	κύκλωμα κόμβου συστοιχίας μικροφώνων	39
4.4	Κυκλωματικά διαγράμματα κεντρικού κόμβου	46
5	Επίλογος και μελλοντική εργασία	54

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2-1 Διάφραγμα MEM μικροφώνου	17
Εικόνα 2-2 Ενισχυτής σήματος μικροφωνικής κάψας	18
Εικόνα 2-3 ΣΔ modulator	19
Εικόνα 2-4 noise shaping	20
Εικόνα 2-5 Διάγραμμα μετατροπέα δεδομένων	22
Εικόνα 2-6 Απόκριση ψηφιακού φίλτρου ADAU7002	23
Εικόνα 2-7 Πυκνότητα ολικού θορύβου	23
Εικόνα 2-8 Μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν	24
Εικόνα 2-9 Χαρακτηριστικά απόδοσης μικροφώνων	24
Εικόνα 3-1 Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος	25
Εικόνα 3-2 Χρονική πολύπλεξη δεδομένων μικροφώνων	27
Εικόνα 3-3 Πακέτο δεδομένων συστάδας μικροφώνων	27
Εικόνα 3-4 Δομή αρχείου ήχου	28
Εικόνα 3-5 Πίνακας χαρακτηριστικών MCU	30
Εικόνα 3-6 Λειτουργικό διάγραμμα κόμβου μικροφώνων	31
Εικόνα 3-7 Διάγραμμα Firmware κόμβου μικροφώνων	31
Εικόνα 3-8 Λειτουργικό διάγραμμα κεντρικού κόμβου	32
Εικόνα 3-9 Διάγραμμα Firmware κεντρικού κόμβου	33
Εικόνα 4-1 RS-485	35
Εικόνα 4-2 κύκλωμα προσομοίωσης 50m cat5	36
Εικόνα 4-3 32 παλμοί 20Mbit σε τερματισμένη και μη τερματισμένη γραμμή	36
Εικόνα 4-4 Ένας παλμός σε τερματισμένη και μη τερματισμένη γραμμή	37
Εικόνα 4-5 Βρόγχος υστέρησης λήπτη	38
Εικόνα 4-6 Λίστα υλικών (BOM) κόμβου μικροφώνων	40
Εικόνα 4-7 Πυρήνας συστάδας μικροφώνων	41
Εικόνα 4-8 Μετατροπείς δεδομένων συστάδας μικροφώνων	42
Εικόνα 4-9 κονέκτορες μικροφώνων συστάδας μικροφώνων	43
Εικόνα 4-10 διεπαφή RS-485 συστάδας μικροφώνων	44
Εικόνα 4-11 Τροφοδοσία συστάδας μικροφώνων	45
Εικόνα 4-12 Λίστα υλικών (BOM) κεντρικού κόμβου	47
Εικόνα 4-13 Πυρήνας κεντρικού κόμβου – μέρος 1	48
Εικόνα 4-14 Πυρήνας κεντρικού κόμβου – μέρος 2	49
Εικόνα 4-15 κονέκτορες τύπου ethernet κεντρικού κόμβου	50
Εικόνα 4-16 Διεπαφή RS-485 του SPI κεντρικού κόμβου	51
Εικόνα 4-17 Διεπαφή RS-485 ρολογιού συγχρονισμού κεντρικού κόμβου	52
Εικόνα 4-18 Τροφοδοσία κεντρικού κόμβου	53

1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των μεθόδων της επικοινωνίας ανθρώπου υπολογιστή η τεχνολογία και από την άποψη του υλικού αλλά και του λογισμικού και των αλγόριθμων εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς. Από ένα πληκτρολόγιο και ένα ποντίκι, που ήταν τα πρώτα μέσα εισαγωγής και επικοινωνίας του υπολογιστή με το περιβάλλον του, σήμερα έχουμε πολλά συστήματα αισθητήρων όπως μικρόφωνα και κάμερες.

Τα νέα μέσα επικοινωνίας του υπολογιστή με τον άνθρωπο έχουν ενσωματώσει στην καθημερινότητά μας νέες τεχνολογίες και έχουν ανοίξει νέες δυνατότητες αλλά και απαιτήσεις που αφορούν στην παραπέρα ανάπτυξή τους και βελτιστοποίησή τους. Μια από τις δημοφιλέστερες εφαρμογές που τα συναντάμε είναι τα έξυπνα σπίτια (Smart homes) που παρέχουν αυτοματοποιημένες υπηρεσίες ελέγχου του σπιτιού, ψηφιακοί βοηθοί όπως η “alexa” που μπορούν να επικοινωνήσουν με το χρήστη με τη χρήση φυσικής γλώσσας.

Ένας από τους κυρίους τρόπους αλληλεπίδρασης είναι η χρήση φυσικής γλώσσας και συνεπώς η επεξεργασία φωνής και η αναγνώριση ομιλίας (automatic speech recognition ASR) είναι σημαντικό στοιχείο τέτοιων συστημάτων. Αυτό αποτελεί και μία από τις μεγαλύτερες τεχνολογικές δοκιμασίες καθώς οι εφαρμογές αναγνώρισης ομιλίας είναι πολύ ευαίσθητες στο θόρυβο. Το σήμα ήχου που καταγράφεται είναι αποτέλεσμα όχι μόνο της φωνής του χρήστη (ομιλητή) αλλά είναι η υπέρθεση αυτού με τον θόρυβο του περιβάλλοντος, την αντήχηση του ίδιου του σήματος, αλλά και την εξασθένησή του ανάλογα με την απόσταση από τη συσκευή καταγραφής. Έτσι το σήμα αλλοιώνεται ώστε να γίνεται δυσκολότερη αν όχι αδύνατη η αναγνώρισή του.

Για την υπερπήδηση αυτού του βασικού προβλήματος και την λήψη ενός ισχυρού και ‘καθαρού’ σήματος, πέρα από τις διάφορες ψηφιακές μεθόδους, χρησιμοποιούνται μέθοδοι αποθορυβοποίησης με πολλαπλά κανάλια καταγραφής ήχου κατανεμημένων στο χώρο [1]. Αξιοποιούνται τεχνικές χωρικού εντοπισμού του ομιλητή και beamforming [2] ώστε να απομονωθεί η αρχική πηγή της ομιλίας από τους παράγοντες αλλοίωσής της και έτσι να καταστεί δυνατή η αναγνώρισή της με μεγαλύτερη βεβαιότητα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος 32 καναλιών ήχου οργανωμένων σε ομάδες των οκτώ μικροφώνων που μπορούν να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους χωρίς να χάνουν το συγχρονισμό τους.

Η εκπόνηση της εργασίας περιλαμβάνει την σχεδίαση και την κυκλωματική υλοποίηση του συστήματος. Έτσι, περιλαμβάνει την λήψη δεδομένων ήχου από μικρόφωνα τύπου MEMS, το σύστημα μετάδοσης της πληροφορίας και της αποθήκευσής της σε αφαιρούμενο μέσο και την πραγματικού χρόνου μεταφορά της στον υπολογιστή μέσω USB.

Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιούμε στην εφαρμογή είναι MEMS μικρόφωνα και αυτό για το λόγο ότι συνδυάζουν πολύ μικρό κόστος σε σχέση με τα αντίστοιχα δυναμικά ή πυκνωτικά

με πολύ μικρή απόκλιση στα χαρακτηριστικά τους μεταξύ των διαφορετικών μικροφώνων της ίδιας σειράς. Ειδικά το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ζητούμενο για την εφαρμογή μας καθώς στις συστοιχίες θέλουμε όσο το δυνατόν να διατηρείται η ομοιομορφία ανάμεσα στα διαφορετικά κανάλια ήχου.

Όσον αφορά τη δομή της εργασίας στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η τεχνολογία των μικροφώνων τύπου MEMS καθώς και οι τεχνικές κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται. Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος το πρωτόκολλο επικοινωνίας καθώς και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί για αποστολή και αποθήκευση των δεδομένων. Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση και σχεδίαση του υλικού μαζί με τις απαραίτητες προσομοιώσεις και υπολογισμούς καθώς και πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης παρουσιάζονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και οι πλακέτες. Τέλος, στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάζονται προτάσεις και σκέψεις για μελλοντική επέκταση και βελτίωση του συστήματος.

1.1 Πεδίο εφαρμογών

Φυσικά το πεδίο εφαρμογών μιας τέτοιας συστοιχίας δεν περιορίζεται στην αναγνώριση φωνής ή αποκλειστικά σε κάποια ειδικευμένη εφαρμογή αλλά αποτελεί εργαλείο στα χέρια κάθε ερευνητή που μελετά θέματα ακουστικής, επεξεργασίας ήχου, πολυκαναλικής επεξεργασίας κλπ. Για αυτό άλλωστε η προσέγγιση του θέματος έγινε με κριτήριο την δυνατότητα να επαναπροσδιορίζεται η δομή του συστήματος χωρίς να είναι απαραίτητη η εκτεταμένη γνώση πάνω σε θέματα ηλεκτρονικής.

Το εύρος εφαρμογών είναι μεγάλο και μπορεί να περιλαμβάνει από εργαστηριακή εφαρμογή μέχρι ηχοληψία με μεγάλη κατευθυντικότητα (beamforming) και απομόνωση του ομιλητή σε αίθουσα συνεδριάσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες τέτοιες εφαρμογές.

- Συστήματα έξυπνου σπιτιού [1].
- Εντοπισμός θέσης και αναγνώριση του ομιλητή. Το εν λόγω σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν μια ενιαία συστοιχία είναι να οργανωθεί ως σύστημα υποσυστοιχιών με διαφορετικές αρχιτεκτονικές χωρικής κατανομής.
- Μείωση θορύβου του περιβάλλοντος.
- Μελέτες ακουστικής σε αίθουσες και συνεδριακούς χώρους. Η δυνατότητα να τοποθετούμε τα τις υποσυστοιχίες μικροφώνων σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους καθιστούν εφικτό να μελετήσουμε την ακουστική μεγάλων χώρων κάνοντας χρήση συνδυασμένων μεθόδων.

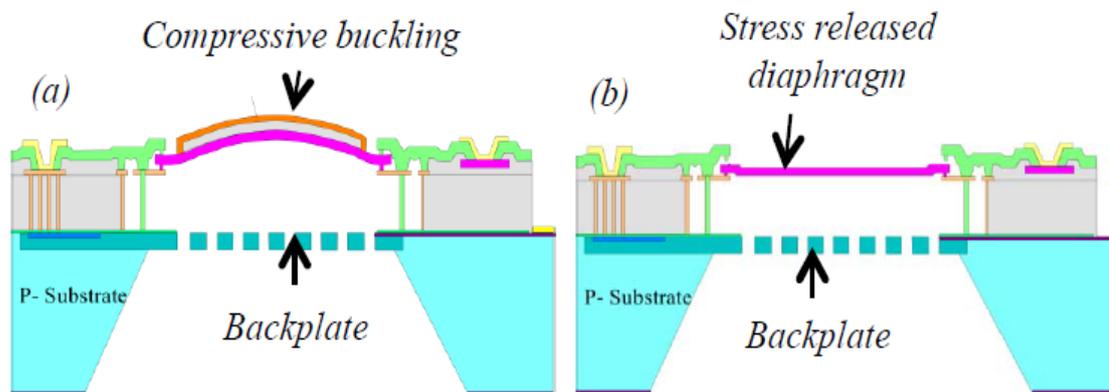
2 Ψηφιακά μικρόφωνα MEMS

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η τεχνολογία των μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα και τα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν κατάλληλα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Επίσης θα παρουσιαστούν οι προδιαγραφές των συγκεκριμένων μικροφώνων και η μορφή κωδικοποίησης της ψηφιακής εξόδου τους.

2.1 Τεχνολογία μικροφώνων τύπου MEMS

Τα μικρόφωνα τύπου MEMS χρησιμοποιούν ακουστικούς αισθητήρες που είναι κατασκευασμένοι πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου με τη χρήση τεχνικών παρόμοιων αυτών της κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Τα μικρόφωνα αυτά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως υψηλό σηματοθορυβικό λόγο, μικρό μέγεθος, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλο δυναμικό εύρος και πολύ μικρές κατασκευαστικές αποκλίσεις.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην κίνηση ενός διαφράγματος σε σχέση με μία σταθερή πλάκα και την συνεπαγόμενη αλλαγή της χωρητικότητας του πυκνωτή που σχηματίζεται μεταξύ αυτών των δύο. Ακριβώς όπως λειτουργεί και ένα τυπικό πυκνωτικό μικρόφωνο με τη διαφορά ότι εδώ είναι κατασκευασμένο πάνω στο πυρίτιο και με τεχνικές λιθογραφίας δανεισμένες από τις τεχνικές κατασκευής CMOS IC's. Παρακάτω φαίνεται η βασική διάταξη που χρησιμοποιείται:



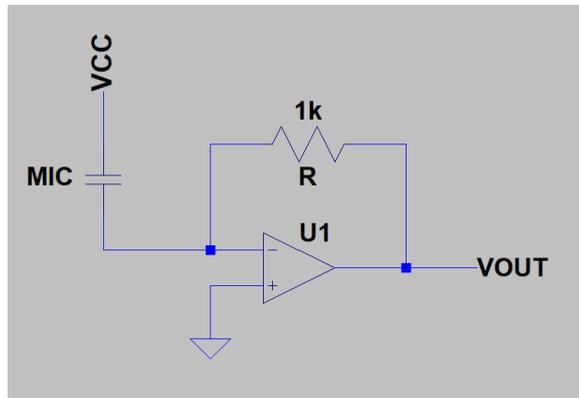
Εικόνα 2-1 Διάφραγμα MEM μικροφώνου

Μεταξύ του διαφράγματος (diaphragm) και της πλάκας (backplate) σχηματίζεται ένας πυκνωτής ο οποίος αλλάζει χωρητικότητα καθώς τα κύματα του ήχου παραμορφώνουν το διάφραγμα. Η μεταβολή αυτή είναι που αξιοποιείται ώστε το μηχανικό κύμα που κινεί το διάφραγμα να μετατραπεί σε ηλεκτρικό ρεύμα που ύστερα ενισχύεται και καταγράφεται.

Θέτοντας τους δύο ακροδέκτες του πυκνωτή σε σταθερή διαφορά δυναμικού η αλλαγή στην χωρητικότητα του πυκνωτή συνεπάγεται την παραγωγή ενός ρεύματος που ορίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$i = V \frac{dC}{dt}$$

Ένα πολύ απλό κύκλωμα για την μετατροπή του ρεύματος αυτού σε αξιοποιήσιμο ηλεκτρικό σήμα φαίνεται παρακάτω:



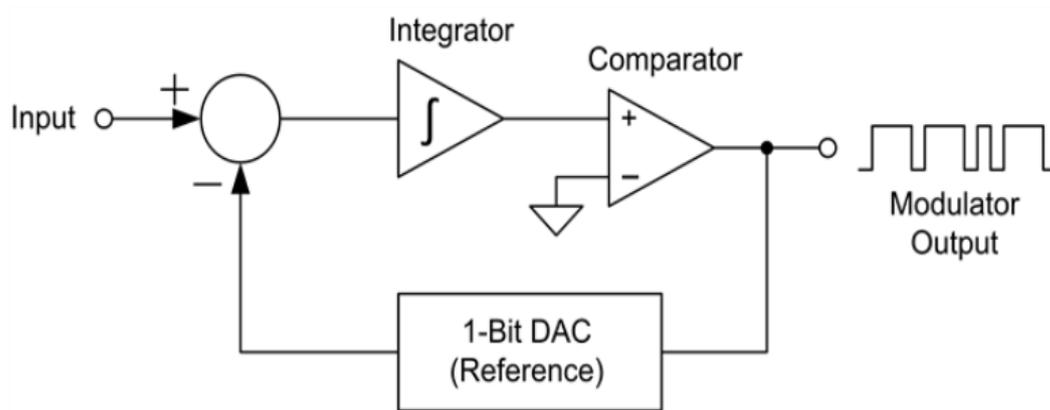
Εικόνα 2-2 Ενισχυτής σήματος μικροφωνικής κάψας

Η μεγάλη ακρίβεια κατασκευής που παρέχουν οι τεχνικές λιθογραφίας πετυχαίνουν να έχουμε πολύ καλά ελεγχόμενη γεωμετρία του διαφράγματος που παίζει και τον κυρίαρχο ρόλο στην απόκριση συχνότητας και φάσης του μικροφώνου. Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης είναι αρκετά περίπλοκη και εκτός του πεδίου της παρούσας εργασίας.

2.2 Συνεχούς χρόνου ΣΔ κωδικοποίηση

Για την επεξεργασία του σήματος θα πρέπει να το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα του μικροφώνου να δειγματοληπτηθεί και να μετατραπεί σε ψηφιακό. Μια από τις πιο συνήθεις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα μικρόφωνα τύπου MEMS και που χρησιμοποιούν και τα συγκεκριμένα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρών σύστημα είναι η κωδικοποίηση PDM (pulse density modulation). Η κωδικοποίηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της 1 bit ΣΔ κωδικοποίησης. Το βασικό χαρακτηριστικό που κάνει την τεχνική αυτή να κυριαρχεί σε πολλά μοντέρνα συστήματα ADC είναι κυρίως το μικρό κόστος της και η μικρή πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε σχέση με την απόδοσή του.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα ενός ΣΔ ADC:



Εικόνα 2-3 ΣΔ modulator

Το σήμα εξόδου ανατροφοδοτείται στην είσοδο και η διαφορά των δύο σημάτων δημιουργεί ένα σήμα σφάλματος. Το σήμα αυτό σφάλματος ολοκληρώνεται και τροφοδοτείται σε έναν συγκριτή (comparator). Όταν το σφάλμα αυτό ξεπεράσει ένα όριο (threshold) τότε ο συγκριτής αναπροσαρμόζει την έξοδο ώστε να εξαλείψει το σφάλμα. Στην πρακτική υλοποίηση του συστήματος η έξοδος του comparator συγχρονίζεται με ένα ρολόι ώστε να ανανεώνει την έξοδό του με βάση αυτό για παράδειγμα με ένα D-flip flop.

Αναλύοντας το παραπάνω σύστημα στο πεδίο του διακριτού χρόνου (discrete time domain) και χρησιμοποιώντας τον Z-μετασχηματισμό (Z-transform) ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

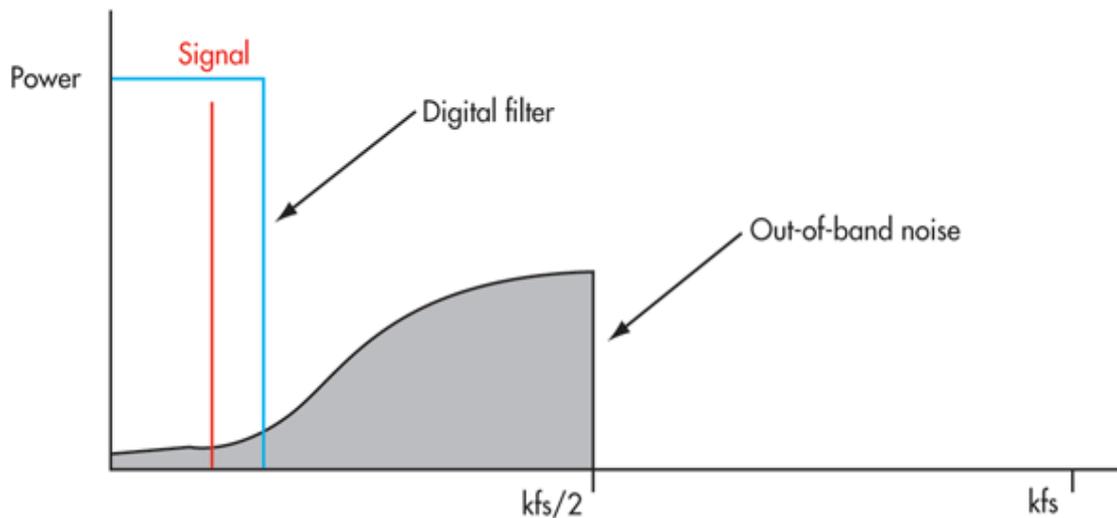
$$Y(z) = X(z) + E(z)(1 - z^{-1})$$

Αναδιατάσσοντας την παραπάνω εξίσωση παίρνουμε:

$$Y(z) = E(z) + [X(z) - Y(z)z^{-1}] \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} \right)$$

Από την εξίσωση μπορούμε να καταλάβουμε πως το σφάλμα $E(z)$ συμβάλει περισσότερο στις υψηλές συχνότητες από ότι στις χαμηλές αφού ο όρος $1/(1-z^{-1})$ λειτουργεί σαν ένα υπερπλάτος φίλτρο. Η ιδιότητα αυτή του συστήματος ουσιαστικά “σπρώχνει” το σφάλμα

κβαντισμού στις υψηλές συχνότητες. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται noise shaping. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2-4 noise shaping

Η συχνότητα δειγματοληψίας στα συστήματα Σ - Δ είναι πολλαπλάσια της συχνότητας Nyquist ώστε ο θόρυβος κβαντισμού να είναι αρκετά μακριά από το χρήσιμο σήμα και έτσι να επιτυγχάνεται μεγάλος σηματοθορυβικός λόγος. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το θόρυβο στην περιοχή του χρήσιμου σήματος παρουσιάζονται παρακάτω:

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} e^2 de} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}$$

$$OSR = \frac{f_s}{2f_o}$$

$$n_o = \frac{e_{rms}}{\sqrt{OSR}}$$

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει το θόρυβο της κβάντισης του σήματος θεωρώντας το σφάλμα (e) να είναι μέσα στο όριο ενός βήματος με ομοιόμορφη κατανομή και ανεξάρτητος από το σήμα. Φυσικά ο θόρυβος δεν είναι ανεξάρτητος από το σήμα σε ένα πραγματικό σύστημα.

Η δεύτερη εξίσωση εισάγει το ρυθμό υπερδειγματοληψίας OSR (over sampling ratio) σε σχέση με την υψηλότερη συχνότητα του ωφέλιμου σήματος με συχνότητα Nyquist $2f_o$.

Τέλος η Τρίτη εξίσωση μας δίνει το συνολικό θόρυβο στην περιοχή συχνοτήτων του ωφέλιμου σήματος.

Οι παραπάνω σχέσεις μας δείχνουν πως όσο περισσότερο μεγαλύτερο ρυθμό υπερδειγματοληψίας έχουμε τόσο λιγότερο θόρυβο λόγω κβαντισμού θα έχουμε.

2.3 Αποκωδικοποίηση

Το παραπάνω bit stream για να μετατραπεί σε χρήσιμο αξιοποιήσιμο σήμα πρέπει να μετατραπεί σε κωδικοποίηση που μπορούμε να επεξεργαστούμε και να αλλάξει ο ρυθμός που το δειγματοληπτούμε. Να γίνει δηλαδή down sampling.

Αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι να φιλτράρουμε το σήμα μας με τέτοιο τρόπο ώστε να κρατήσουμε το ωφέλιμο σήμα και να κόψουμε οτιδήποτε υπάρχει έξω από το πεδίο που μας ενδιαφέρει. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η συγκεκριμένη κωδικοποίηση κρατάει την πληροφορία στις χαμηλές συχνότητες ενώ σπρώχνει το θόρυβο στις υψηλότερες. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι χρειαζόμαστε ένα βαθυπερατό φίλτρο και συγκεκριμένα, αφού μιλάμε για ακουστικό φάσμα, χρειαζόμαστε ένα βαθυπερατό φίλτρο στις ακουστικές συχνότητες.

Η πιο ευθεία υλοποίηση αυτού είναι να προστίθενται τα τελευταία N δείγματα και να διαιρείται το άθροισμα με το N δίνοντάς μας έτσι το μέσο όρο τους. Δηλαδή ένα απλό running average που δεν είναι τίποτα άλλο από το πιο απλό βαθυπερατό φίλτρο που μπορούμε να σχεδιάσουμε. Αυτός είναι και ο τρόπος που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της τεχνικής αυτής στις αρχές της δεκαετίας του '60.

Στην πράξη σήμερα χρησιμοποιούνται πολύ ευρέως IIR και FIR φίλτρα. Το πλεονέκτημα των FIR φίλτρων είναι ότι είναι εγγενώς ευσταθή με το μειονέκτημα ότι απαιτείται να είναι μεγαλύτερης τάξης σε σχέση με τα αντίστοιχης απόκρισης IIR. Από την άλλη τα IIR φίλτρα αν και απαιτούν μικρότερη τάξη για την ίδια απόδοση η σχεδιάσή τους είναι πιο απαιτητική καθώς δεν είναι εξασφαλισμένη η ευστάθειά τους.

Η πιο συχνή έκφραση ενός IIR φίλτρου στο πεδίο του Z μετασχηματισμού είναι η παρακάτω:

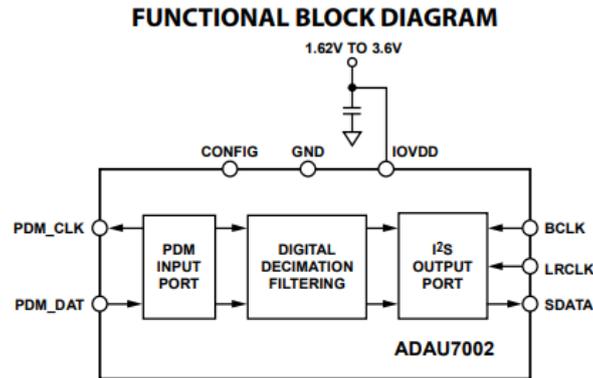
$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^Q a_j z^{-j}}$$

Όπου P και Q είναι η τάξη του ευθέος τμήματος και της ανάδρασης αντίστοιχα και τα a_i και b_i οι συντελεστές του ευθέος κλάδου και της ανατροφοδότησης.

Σε μια πραγματική υλοποίηση χρησιμοποιούνται φίλτρα πολλών διαδοχικών σταδίων μικρότερης τάξης που το καθένα κάνει ταυτόχρονα και downsampling (decimation) κατά έναν παράγοντα M ώστε να διατηρηθεί χαμηλό το υπολογιστικό κόστος και η περιπλοκότητα του συστήματος.

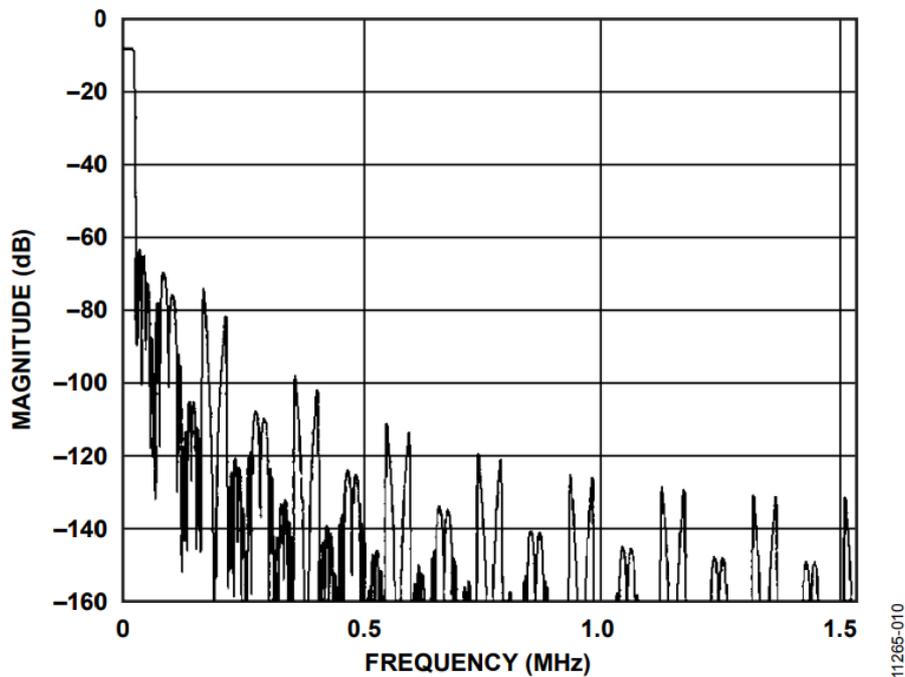
2.4 Αποκωδικοποιητής ADAU 7002

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε έτοιμος αποκωδικοποιητής του εμπορίου. Συγκεκριμένα ο ADAU7002 της analog devices. Ο ADAU 7002 μετατρέπει ένα στέρεο PDM bit stream σε PCM κωδικοποίηση. Στην περίπτωση μας η είσοδος του παρέχεται από δύο ψηφιακά μικρόφωνα. Η έξοδος του μπορεί να δίνεται είτε με το πρότυπο του σειριακού διαύλου ήχου (SAI ή serial audio interface) ή με TDM (time division multiplexing). Τα δεδομένα έχουν πλάτος 22bit και μεταφέρονται σε frames των 32bit.



Εικόνα 2-5 Διάγραμμα μετατροπέα δεδομένων

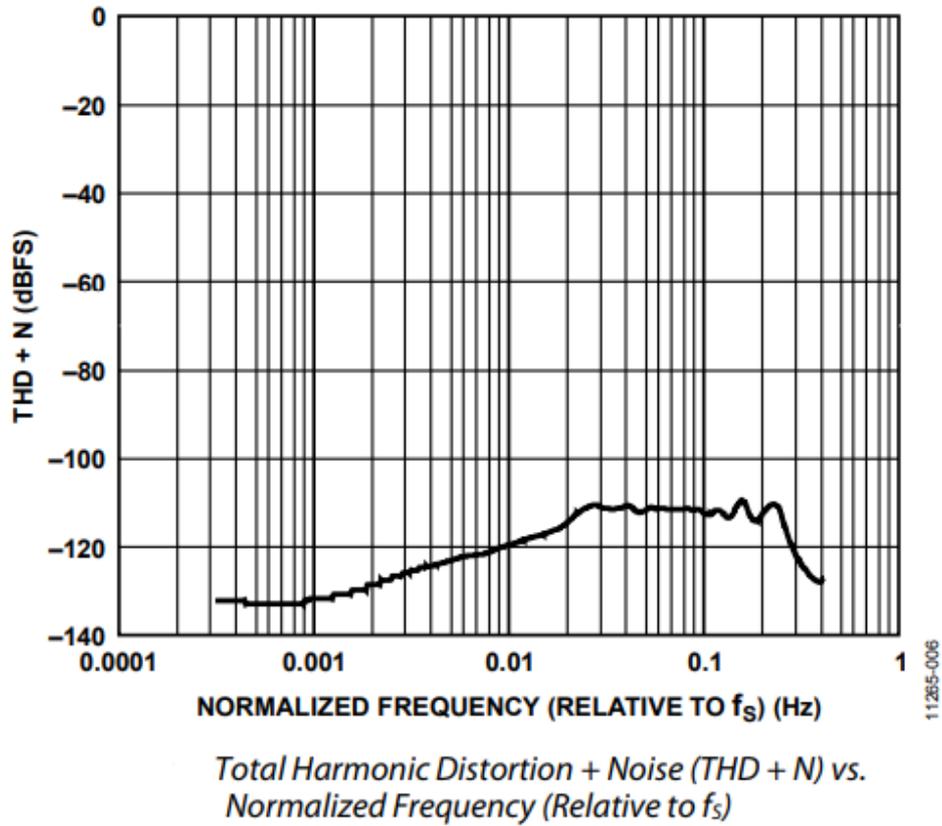
Με βάση το datasheet η απόκριση του φίλτρου είναι η εξής:



Εικόνα 2-6 Out-of-Band Frequency Response (48 kHz Output)

Εικόνα 2-6 Απόκριση ψηφιακού φίλτρου ADAU7002

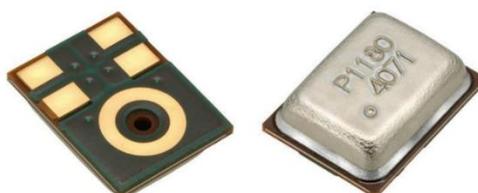
Ο συνολικός θόρυβος που προκύπτει από το άθροισμα του θορύβου και της μη γραμμικότητας παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 2-7 Πυκνότητα ολικού θορύβου

2.5 Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του συστήματος είναι τα SPH1668LM4H-1. Αυτού του τύπου τα μικρόφωνα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές καταγραφής φωνής καθώς και σε συστοιχίες μικροφώνων και κινητά τηλέφωνα. Το μέγεθός τους είναι μικρό και δεν χρειάζονται σχεδόν καθόλου περιφερειακά κυκλώματα για να λειτουργήσουν πέρα από την παροχή του σήματος του ρολογιού και την πηγή τάσης.



Εικόνα 2-8 Μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα συγκεκριμένα ψηφιακά μικρόφωνα δίνουν έξοδο διαμορφωμένη κατά PDM (pulse density modulation). Αποτελεί πολύ γενική κατηγορία διαμόρφωσης ώστε το σύστημα να είναι συμβατό με μεγάλο εύρος ποιότητας και τιμής.

Επίσης λάβαμε υπόψη μας τη δυνατότητα να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων δειγματοληψίας έως τουλάχιστον 48kHz καθώς οι απαιτήσεις του συστήματος είναι τέτοιες που να μπορεί να λειτουργήσει σε πολλαπλές συχνότητες δειγματοληψίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισής τους.

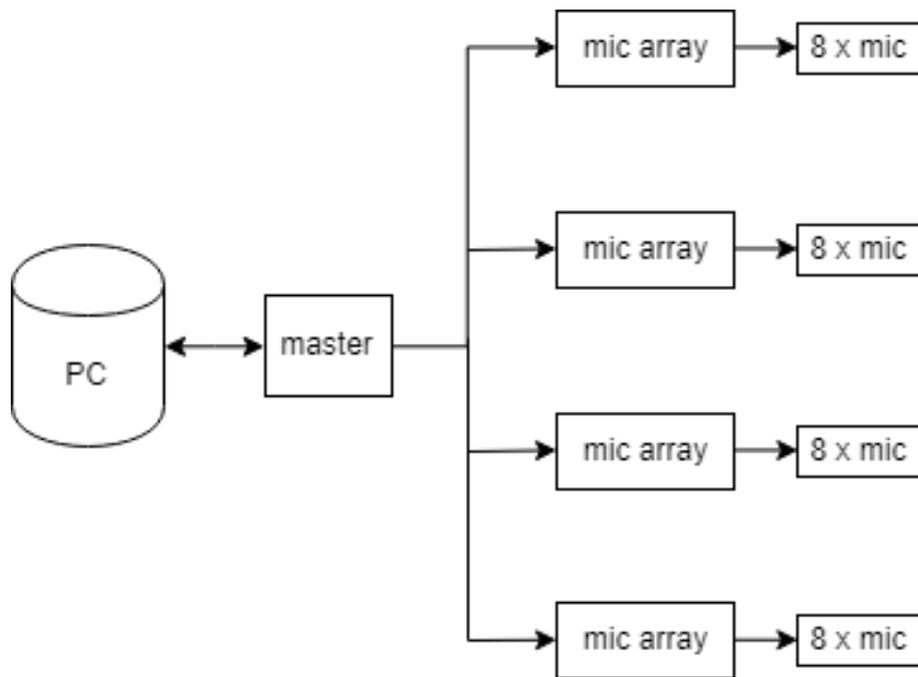
Performance Mode						
TEST CONDITIONS: $f_{\text{clock}} = 2.4 \text{ MHz}$, $V_{\text{DD}} = 1.8 \text{ V}$, unless otherwise indicated						
Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supply Current ^{1,2,3}	I_{DD}		-	626	700	μA
Sensitivity ¹	S	94 dB SPL @ 1 kHz	-30	-29	-28	dBFS
Signal to Noise Ratio	SNR	94 dB SPL @ 1 kHz, A-weighted, $f_{\text{clock}} = 3.072 \text{ MHz}$	-	65.5	-	dB(A)
Total Harmonic Distortion	THD	94 dB SPL @ 1 kHz	-	0.1	-	%
		120 dB SPL @ 1 kHz	-	1.6	-	
Acoustic Overload Point	AOP	10% THD @ 1 kHz	-	122	-	dB SPL
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	200 mVpp sinewave @ 1 kHz	-	64	-	dBV/FS
Power Supply Rejection	PSR+N	100 mVpp 1/8 duty cycle rectangular waveform @ 217 Hz, A-weighted	-	-91	-	dBFS(A)

Εικόνα 2-9 Χαρακτηριστικά απόδοσης μικροφώνων

3 Αρχιτεκτονική συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η συνολική υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του συστήματος καθώς και το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ της πλακέτας κεντρικού κόμβου και των πλακετών δειγματοληψίας των συστοιχιών μικροφώνων.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος του οποίου τα μέρη θα αναλυθούν παρακάτω:



Εικόνα 3-1 Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος

Το σύστημα έχει δομηθεί σε δίκτυο τύπου αστέρα. Κάθε κόμβος του συστήματος έχει στον πυρήνα του έναν μικροελεγκτή που αναλαμβάνει την αποστολή και αποθήκευση των δεδομένων από τα μικρόφωνα καθώς και όποια επεξεργασία χρειάζεται. Συγκεκριμένα οι μικροελεγκτές των συστάδων είναι επιφορτισμένοι με την δειγματοληψία των μικροφώνων και την αποστολή των δεδομένων, μετά την επεξεργασία τους, στον κεντρικό κόμβο. Ο κεντρικός, αντίστοιχα, κόμβος αναλαμβάνει να παρέχει το σήμα συγχρονισμού σε όλα τα μικρόφωνα και να αποθηκεύει τα δεδομένα που λαμβάνει από τις συστάδες. Ταυτόχρονα στέλνει σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα ενός από τα μικρόφωνα στον υπολογιστή μέσω USB.

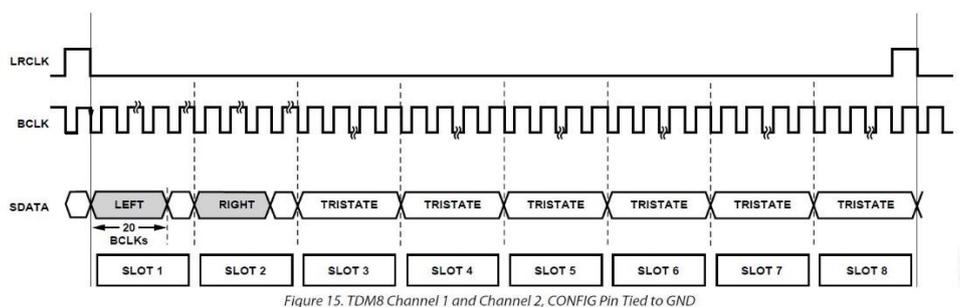
Με τη συγκεκριμένη δομή ο κεντρικός κόμβος (master) μπορεί να ελέγχει ανεξάρτητα κάθε συστάδα μικροφώνων. Ταυτόχρονα είναι για το χρήστη εύκολο να αλλάξει τον αριθμό των μικροφώνων που χρησιμοποιεί κάθε φορά χωρίς αυτό να συνεπάγεται αλλαγές στο σύστημα από πλευράς υλικού ή λογισμικού. Το μόνο που χρειάζεται να κάνει είναι να προσθέσει ή να αφαιρέσει κόμβους οι οποίοι όπως φαίνεται είναι οργανωμένοι σε τέσσερις συστάδες των οκτώ μικροφώνων.

Για τον ακριβή συγχρονισμό της δειγματοληψίας όλων των μικροφώνων ο κεντρικός κόμβος παρέχει το κοινό σήμα (ρολόι) συγχρονισμού σε όλες τις συστοιχίες μικροφώνων. Αυτό εξαλείφει και την ανάγκη μηχανισμού συμμόρφωσης για την περίπτωση απόκλισης των ρυθμών δειγματοληψίας μεταξύ των διαφορετικών συστάδων, εάν το ρολόι της κάθε συστάδας παραγόταν τοπικά, καθώς επίσης εξασφαλίζει το ότι τα δεδομένα όλων των μικροφώνων θα είναι “ευθυγραμμισμένα” μεταξύ τους ανεξάρτητα σε ποια συστάδα ανήκουν κάνοντας ευκολότερη την διαδικασία επεξεργασίας και αποθήκευσής τους.

3.1 Πρωτόκολλο επικοινωνίας συγχρονισμού και αποστολής δεδομένων

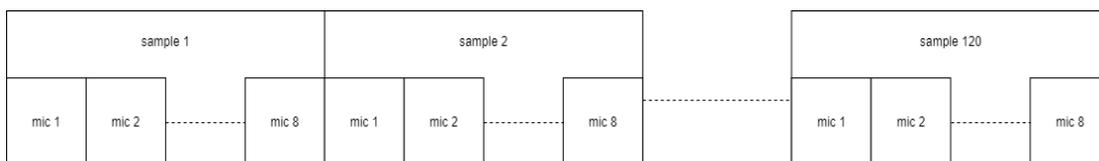
Το σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει έως και 32 μικρόφωνα με μέγιστη δειγματοληψία 48kHz. Αυτό σημαίνει πως κάθε συστάδα οκτώ μικροφώνων πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται και να στέλνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με ρυθμό έως και 384k samples / sec. Αυτό συνεπάγεται πως ο κεντρικός κόμβος λαμβάνει 1.536Msamples/sec από όλα τα μικρόφωνα.

Για τη δημιουργία του ρολογιού που τροφοδοτείται στους οδηγούς των μικροφώνων (data converter) χρησιμοποιείται το ρολόι που τροφοδοτεί ο κεντρικός κόμβος σε όλες τις συστοιχίες και είναι συχνότητας 12.288MHz. Με την χρήση του περιφερειακού SAI (Serial Audio Interface) κάνουμε λήψη των δεδομένων από τους οδηγούς των μικροφώνων. Τα δεδομένα αυτά είναι οργανωμένα σε frames των 32bit και όλα τα μικρόφωνα πολυπλέκονται χρονικά ανάλογα με τη ρύθμιση του data converter. Στην αρχή κάθε frame παράγεται από τον MCU ένας παλμός συγχρονισμού που σηματοδοτεί στους data converters να ξεκινήσουν την δημιουργία του επόμενου δείγματος. Παρακάτω φαίνεται η εν λόγω διαδικασία για τα 2 μικρόφωνα του πρώτου data converter:



Εικόνα 3-2 Χρονική πολύπλεξη δεδομένων μικροφώνων

Τα δεδομένα από όλα τα μικρόφωνα αφού ληφθούν από τον MCU του κόμβου συσσωρεύονται και οργανώνονται σε πακέτα των 960 συνολικών δειγμάτων ή 120 δειγμάτων ανά μικρόφωνο. Για την διαδικασία αυτή και για να μην απασχολείται ο πυρήνας του MCU όση ώρα λαμβάνονται τα δεδομένα γίνεται χρήση του περιφερειακού του DMA. Όταν ένα πακέτο συμπληρωθεί τότε στέλνεται στο κεντρικό κόμβο με χρήση του περιφερειακού του SPI με την ίδια λογική του DMA. Παρακάτω φαίνεται η δομή του πακέτου:

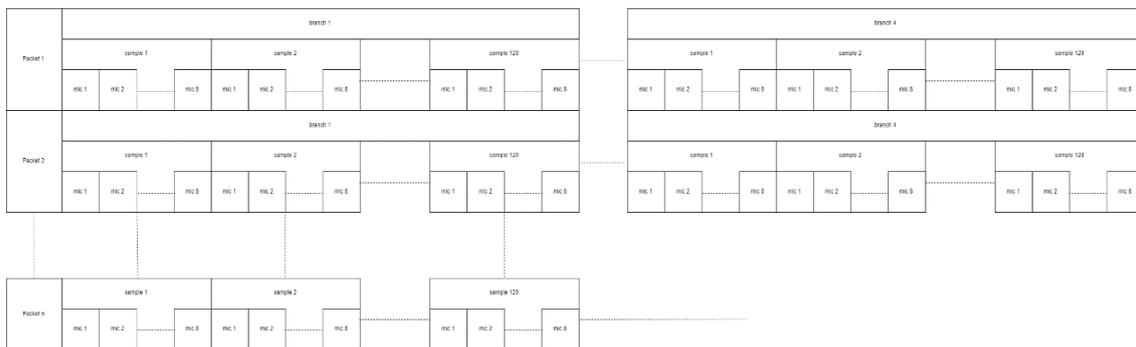


Εικόνα 3-3 Πακέτο δεδομένων συστάδας μικροφώνων

Το πακέτο αυτό στέλνεται κάθε 2.5 msec στον κεντρικό κόμβο όπου και λαμβάνεται με αντίστοιχη χρήση του DMA και αποθηκεύονται στην κάρτα μνήμης.

Για την ελαχιστοποίηση του χρόνου εγγραφής στη μνήμη και για να ξεπεράσουμε το γεγονός ότι το σύστημα αρχείων (file system) που χρησιμοποιούμε δεν υποστηρίζει DMA λειτουργία συσσωρεύουμε πολλαπλά πακέτα πριν τα αποθηκεύσουμε. Το πακέτο που κατασκευάζουμε αποτελείται από 10 τέτοια πακέτα ανά συστάδα μικροφώνων.

Για να αποθηκεύσουμε στην κάρτα SD τα πακέτα αυτά ο MCU ελέγχει αν όλες οι συστάδες μικροφώνων έχουν στείλει 10 πακέτα προτού έρθει το επόμενο πακέτο. Σε περίπτωση που καθυστερήσει να συμπληρωθεί είτε δεν φτάσει ποτέ κάποιο από τα τέσσερα πακέτα τότε αυτό αντικαθίσταται από μηδενικά ώστε να μην αλλοιωθεί η δομή του αρχείου και ταυτόχρονα να μην δημιουργηθεί πρόβλημα σε περίπτωση που δεν είναι συνδεδεμένες όλες οι συστάδες μικροφώνων. Έτσι το αρχείο ακολουθεί την παρακάτω δομή:



Εικόνα 3-4 Δομή αρχείου ήχου

Ταυτόχρονα η κάθε εγγραφή παράγει ένα αρχείο ελέγχου που περιέχει όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για τις διαδοχικές εγγραφές που κάνουμε.

Για τον έλεγχο της εγγραφής σε πραγματικό χρόνο από τον χρήστη από υπολογιστή ένα από όλα τα μικρόφωνα τροφοδοτείται μέσω του USB του κεντρικού κόμβου στον υπολογιστή. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μία απλή συσκευή USB (USB stack) κλάσης ήχου που αναλαμβάνει να στέλνει τα δεδομένα στον υπολογιστή.

3.2 Περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού (Firmware)

Για την ανάπτυξη του Firmware που τρέχει στους ελεγκτές χρησιμοποιήθηκαν οι Drivers των περιφερειακών που δίνονται από την STMicroelectronics την εταιρία που κατασκευάζει τους μικροελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν.

Η επιλογή των ελεγκτών αυτών έγινε με κριτήριο να μπορούν να διαχειριστούν από τη μία το υπολογιστικό κόστος όχι μόνο του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες του παρόντος συστήματος αλλά και με το βλέμμα στραμμένο σε μελλοντική επέκταση της λειτουργικότητας του συστήματος με προσθήκη μέχρι και αλγορίθμων συμπίεσης ή περεταίρω επεξεργασίας του ήχου.

Για τις ανάγκες του πρωτοκόλλου προκύπτουν οι αντίστοιχες ανάγκες για τα χαρακτηριστικά των ελεγκτών τόσο στον κόμβο συλλογής των δεδομένων όσο και στον κεντρικό κόμβο.

Έτσι για τον κόμβο που δειγματοληπτεί τους μετατροπείς δεδομένων που οδηγούν τα μικρόφωνα και με βάση το λειτουργικό διάγραμμα που παρουσιάζεται στην επόμενη υποπαράγραφο (εικόνα #) έχουμε τις παρακάτω ελάχιστες απαιτήσεις:

1. Υποστήριξη περιφερειακού σειριακού διαύλου ήχου (SAI) με δυνατότητα οδήγησης από εξωτερικό ρολόι συγχρονισμού
2. Υποστήριξη σειριακού διαύλου επικοινωνίας (SPI) με δυνατότητα αποστολής δεδομένων με ρυθμό τουλάχιστον 20Mbps
3. Υποστήριξη λειτουργίας DMA για τα παραπάνω περιφερειακά

Αντίστοιχα για τον κεντρικό κόμβο οι απαιτήσεις που προδιαγράφονται για το σύστημά μας παρουσιάζονται παρακάτω ενώ το λειτουργικό διάγραμμα του firmware παρουσιάζεται επίσης στην αντίστοιχη υποπαράγραφο (εικόνα #).

1. Υποστήριξη τεσσάρων ανεξάρτητων σειριακών διαύλων επικοινωνίας (SPI) με δυνατότητα λήψης δεδομένων με ρυθμό τουλάχιστον 20Mbps
2. Ύπαρξη DMA περιφερειακού για την παράλληλη λήψη δεδομένων από τα τέσσερα κανάλια SPI ταυτόχρονα
3. Υποστήριξη κάρτας SD με ταχύτητα εγγραφής τουλάχιστον 6.144M Byte/sec
4. Υποστήριξη USB2.0 περιφερειακού για μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή

Για τα παραπάνω χαρακτηριστικά αλλά λαμβάνοντας υπόψη την μελλοντική επέκταση του συστήματος επιλέξαμε να προδιαγράψουμε και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα σε συστήματα που κάνουν ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Ταυτόχρονα η επιλογή έγινε και με κριτήριο την υψηλή απόδοση σε DMIPS καθώς και την ύπαρξη ενσωματωμένων DSP λειτουργιών. Οι δύο μικροελεγκτές που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με τα πιο κύρια χαρακτηριστικά που παίζανε ρόλο στην επιλογή:

Περιφερειακό/ Χαρακτηριστικό	STM32F446RET	STM32F767ZIT
SPI	2 SPI @ 22.5Mbit/s, 2 SPI @ 45Mbit/s	6 SPI @ 54 Mbit/s
SAI	2 SAI peripherals with external clock configuration	
DMA	2 x ports, 8 channels/port	2 x ports, 8 channels/port
SD card peripheral		2 x SDMMC (up to 50MHz at 1,4 or 8bit mode)
USB2.0	YES	YES
Clock	180MHz	216MHz
DMIPS/MHz	1.25 DMIPS/MHz	2.14 DMIPS/MHz
FPU	FPU, Adaptive real-time accelerator	DPFPU, ART Accelerator™ and L1-cache: 16 Kbytes I/D cache
RAM	128 KB of SRAM	SRAM: 512 Kbytes (including 128 Kbytes of data TCM RAM for critical real-time data) + 16 Kbytes of instruction TCM RAM (for critical real-time routines) + 4 Kbytes of backup SRAM
FLASH	512kB	2 Mbytes

Εικόνα 3-5 Πίνακας χαρακτηριστικών MCU

Για την ανάπτυξη του λειτουργικού χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες HAL που αποτελούν το Framework της STMicroelectronics και το περιβάλλον παραγωγής κώδικα αρχικοποίησης και παραμετροποίησης των περιφερειακών STM32CubeMX.

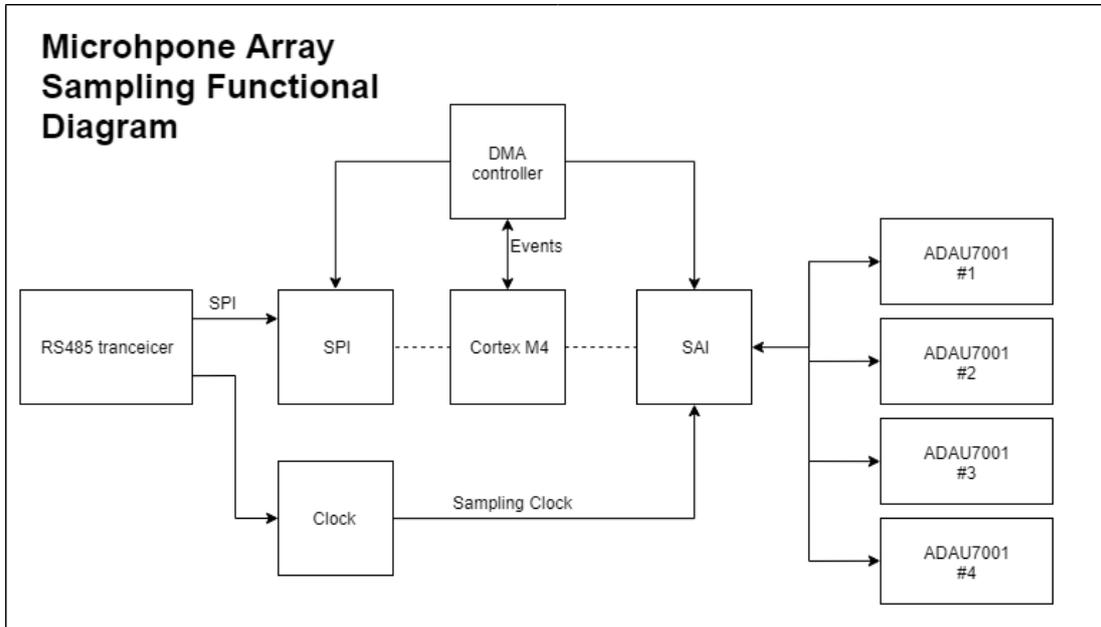
Όλα τα αρχεία αποθηκεύτηκαν και διαχειρίστηκαν με χρήση git repository ώστε να είναι δυνατή πιο αποτελεσματική οργάνωση της ανάπτυξης του κώδικα. Ολόκληρος ο πηγαίος κώδικας και για τον κόμβο των μικροφώνων και τον κεντρικό κόμβο βρίσκονται στα παρακάτω repositories που είναι ανοιχτά για τον καθένα που θέλει να έχει πρόσβαση:

Link στο repository του κόμβου μικροφώνων: https://github.com/Lytis/MM_repo.git

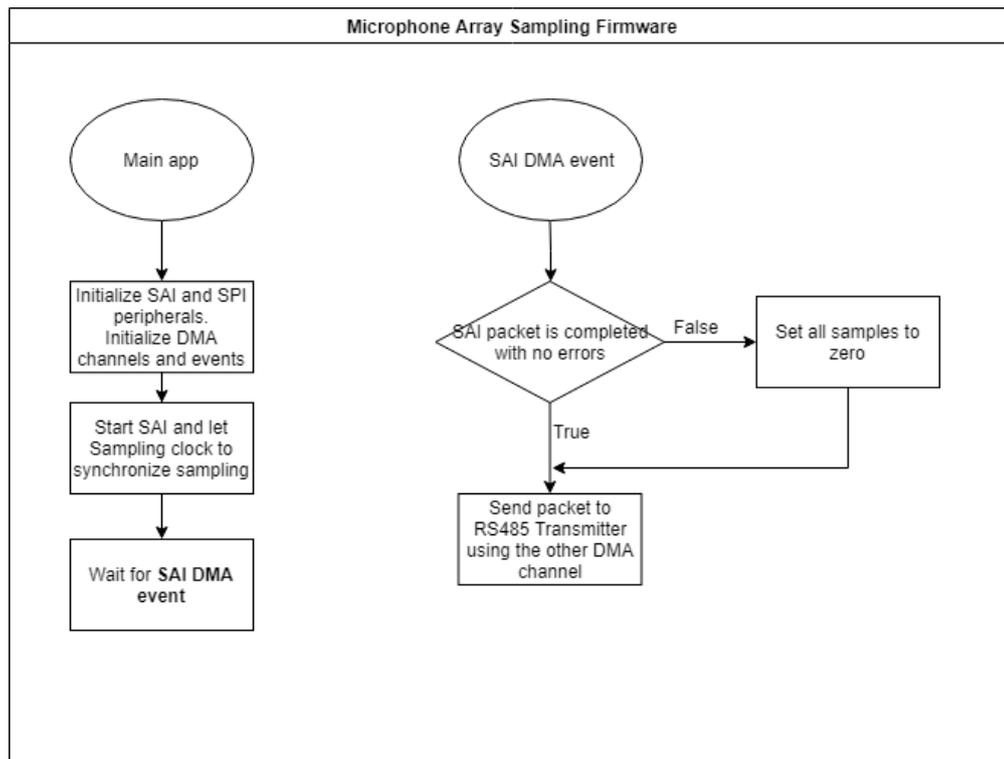
Link στο repository του κεντρικού κόμβου: https://github.com/Lytis/BM_repo.git

3.3 Λειτουργικό διάγραμμα συστάδας μικροφώνων

Το παρακάτω διάγραμμα αποτελεί το λειτουργικό διάγραμμα της διαδικασίας λήψης των δεδομένων από τα μικρόφωνα με τα περιφερειακά που χρησιμοποιεί ο MCU καθώς και το λειτουργικό διάγραμμα της λειτουργίας του firmware που τρέχει:



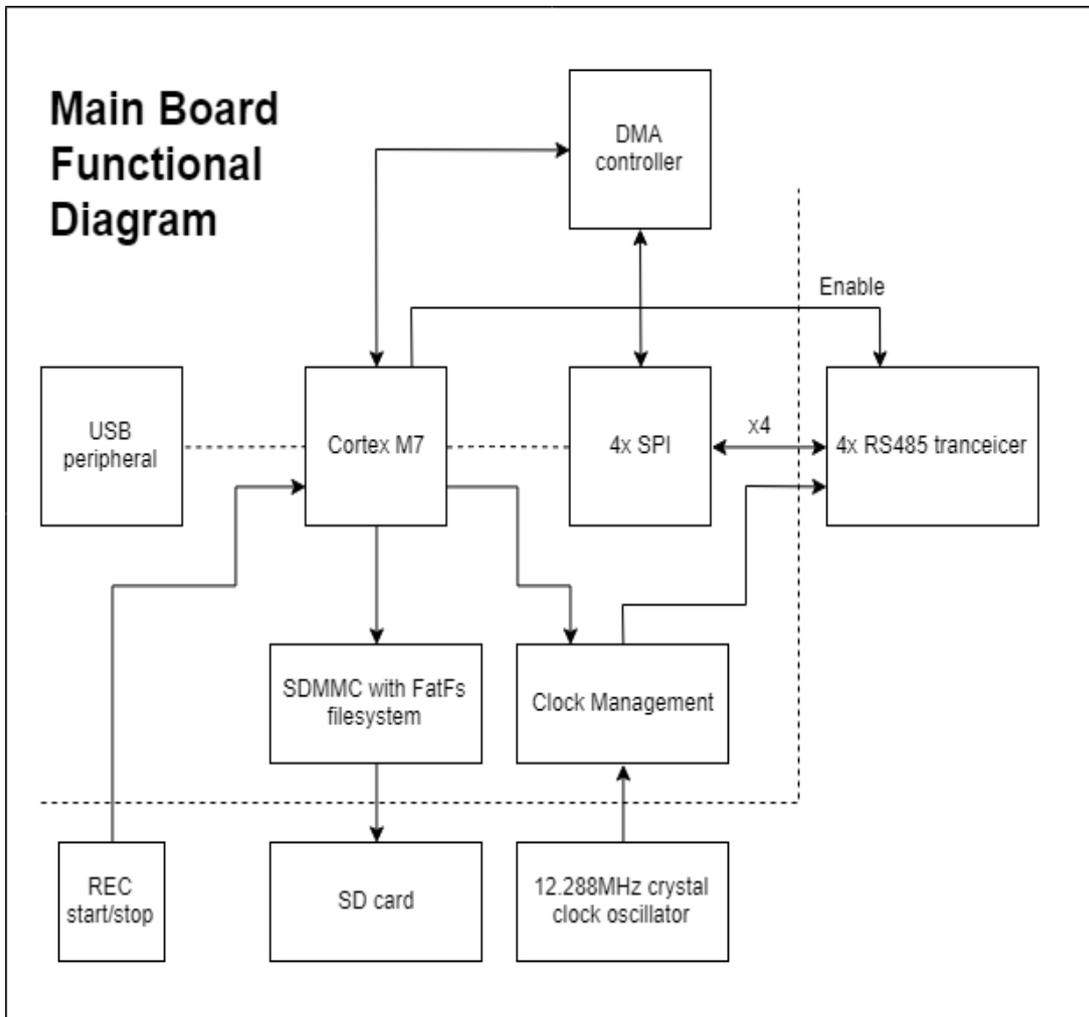
Εικόνα 3-6 Λειτουργικό διάγραμμα κόμβου μικροφώνων



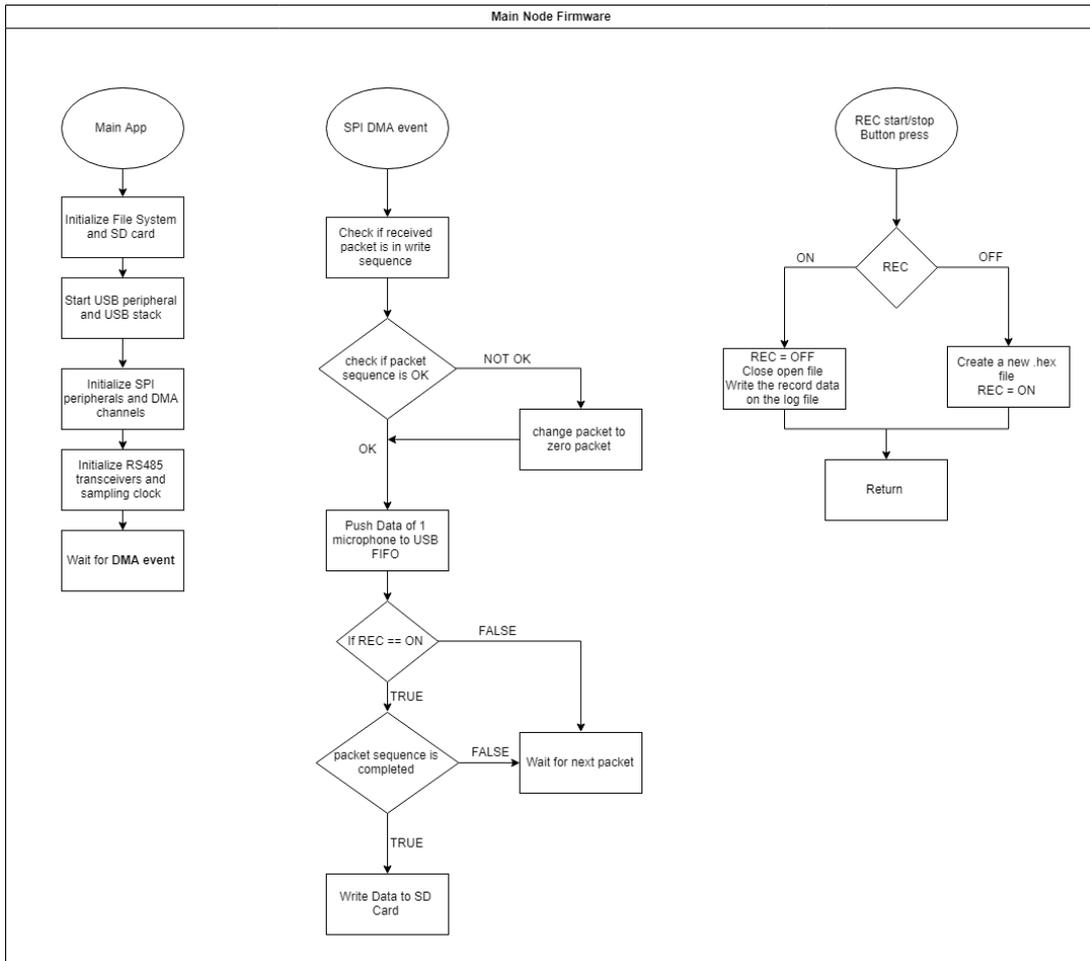
Εικόνα 3-7 Διάγραμμα Firmware κόμβου μικροφώνων

3.4 Λειτουργικό διάγραμμα κεντρικού κόμβου

Εδώ παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα και η λειτουργία του firmware του κεντρικού κόμβου του συστήματος που υλοποιεί την λήψη και αποθήκευση των δεδομένων από όλες τις συστοιχίες των οκτώ μικροφώνων.



Εικόνα 3-8 Λειτουργικό διάγραμμα κεντρικού κόμβου



Εικόνα 3-9 Διάγραμμα Firmware κεντρικού κόμβου

4 Υλοποίηση συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά η κυκλωματική υλοποίηση του συστήματος καθώς και ο σχεδιασμός της πλακέτας μαζί με τις απαραίτητες προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις πάνω στο κύκλωμα. Ξεκινώντας από την αρχιτεκτονική του συστήματος που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο τρία (3) θα παρουσιαστούν οι τεχνικές απαιτήσεις σε υλικό και με βάση αυτές οι κυκλωματικές επιλογές οι επιλογές υλικού και στοιχείων που κάναμε.

Το πρώτο βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η δυνατότητα να προσθέτουμε και να αφαιρούμε από τον κεντρικό κόμβο συστάδες μικροφώνων που να μπορούν να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μέχρι και δεκάδες μέτρα μακριά. Ταυτόχρονα η σύνδεση αυτή πρέπει να εξυπηρετεί τις ανάγκες μεταφοράς δεδομένων με την χρήση ενός σειριακού διαύλου SPI και την μεταφορά του σήματος συγχρονισμού από τον κεντρικό κόμβο προς τις συστοιχίες. Επίσης για την αποφυγή χρήσης ξεχωριστής τροφοδοσίας για καθεμία από τις συστάδες η παροχή ρεύματος μπορεί να γίνεται μέσα από την ίδια σύνδεση.

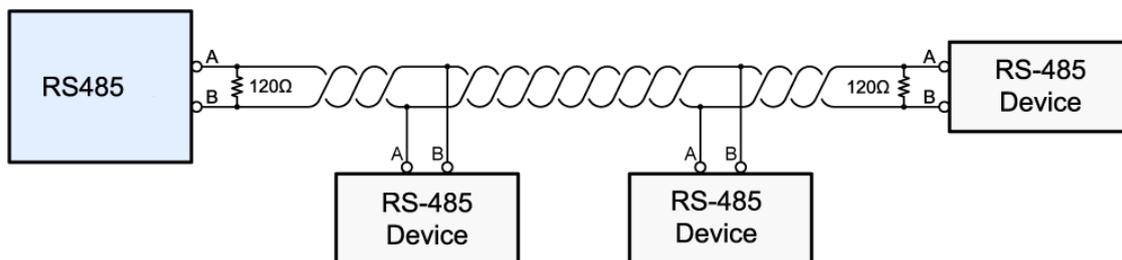
Οι παραπάνω απαιτήσεις μπορούν να καλυφθούν με την χρήση ενός cat5 ethernet καλωδίου που παρέχει τέσσερα ζεύγη συνεστραμμένων αγωγών χωρίς θωράκιση τα οποία είναι αρκετά για την εφαρμογή μας. Για την μετάδοση δεδομένων μέσω αυτού του καλωδίου χρησιμοποιούμε τα τρία ζεύγη καλωδίων με βάση το rs485 πρότυπο όπως θα αναλυθεί παρακάτω ενώ χρησιμοποιούμε το τέταρτο ζεύγος για την παροχή τάσης.

Οι συστάδες μικροφώνων τροφοδοτούνται από τον κεντρικό κόμβο ώστε να μην είναι απαραίτητη η χρήση είτε μπαταριών είτε κάποιας άλλης φορητής πηγής ενέργειας. Έτσι ο κεντρικός κόμβος θα πρέπει να έχει την ικανότητα οδήγησης όλων των συστάδων ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό και για να μην έχουμε περιορισμό από την ικανότητα της θύρας USB του υπολογιστή για παροχή ρεύματος από τη μία και για να έχει την ικανότητα η συσκευή να δουλεύει χωρίς να είναι συνδεδεμένη σε κάποιον υπολογιστή από την άλλη τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή τάσης 12 volt. Για παράδειγμα από έναν τυπικό μετασχηματιστή του εμπορίου.

4.1 Πρότυπο RS-485, υλοποίηση διαύλου μεταφοράς δεδομένων

Το RS485 αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά πρότυπα σειριακής επικοινωνίας που χρησιμοποιείται σήμερα για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Ο δίαυλος επικοινωνίας αποτελείται από έναν κόμβο οδήγησης και μπορεί να οδηγήσει τουλάχιστον 32 συσκευές σύμφωνα με τις προδιαγραφές της TIA (Telecommunications Industry Association) και EIA (Electronic Industries Alliance). Η επικοινωνία είναι Half-duplex που σημαίνει ότι κάθε στιγμή μόνο ένας κόμβος μπορεί να οδηγεί το δίαυλο και όλες οι υπόλοιπες συσκευές να ακούνε.

Με βάση το πρότυπο κάθε bit πληροφορίας στέλνεται ως μια διαφορική τάση μέσω ενός ζεύγους συνεστραμμένων αγωγών όπως φαίνεται παρακάτω. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλο για την εφαρμογή μας το cat5 ethernet καλώδιο που επιλέχθηκε.



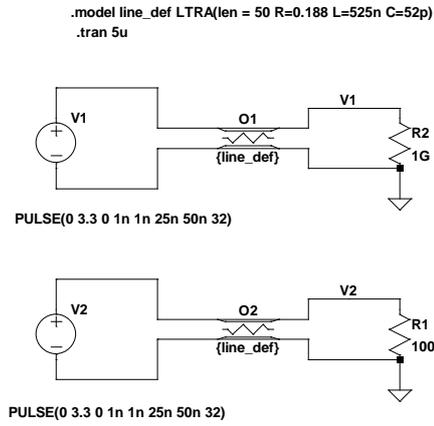
Εικόνα 4-1 RS-485

Το σύστημα που σχεδιάζουμε πρέπει να είναι ικανό να μεταφέρει τα δεδομένα κάθε συστοιχίας των οκτώ μικροφώνων που δειγματοληπτούνται με ρυθμό 48kHz και κάθε δείγμα αποτελείται από 4 bytes. Άρα θα πρέπει να εξυπηρετεί τουλάχιστον 12.288Mbps με βάση το πρωτόκολλο που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για να έχουμε χρονικό περιθώριο ανάμεσα στην αποστολή διαδοχικών πακέτων θα προδιαγράψουμε μέγιστο ρυθμό 20Mbps. Ταυτόχρονα η μία γραμμή θα πρέπει να στέλνει το ρολόι δειγματοληψίας το οποίο είναι στα 12.288MHz.

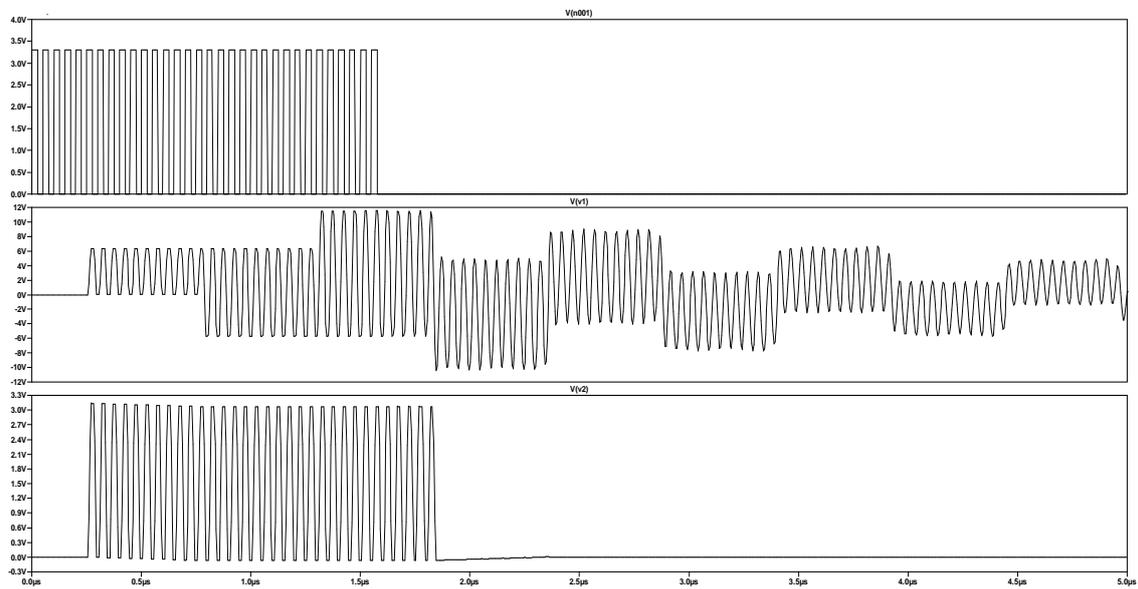
Η γραμμή που μεταφέρει τα δεδομένα είναι καλώδιο ethernet κατηγορίας 5 (cat5) το οποίο από τις προδιαγραφές του παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων με ρυθμό 100Mbps σε μήκος καλωδίου 100 μέτρων που είναι αρκετό για τις προδιαγραφές μας και χωρίς να έχει μεγάλο κόστος. Η χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου με βάση τις προδιαγραφές είναι $100 \pm 15 \Omega$ από 1 έως 100MHz ενώ η αντίσταση κλειστού βρόγχου κάθε ζεύγους μικρότερη από $0.188 \Omega/m$.

Για την αποφυγή ανακλάσεων του σήματος (ringing) πρέπει να τερματίσουμε την γραμμή με την χαρακτηριστική της αντίσταση στη μεριά του δέκτη. Παρακάτω φαίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις για σωστά τερματισμένη γραμμή και μη τερματισμένη γραμμή

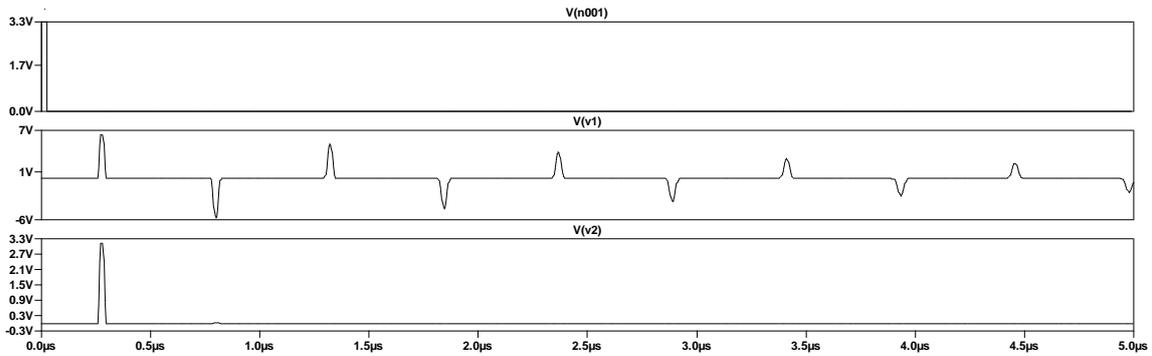
μεταφοράς μήκους 50 μέτρων βασισμένη στις προδιαγραφές του cat5 καλωδίου που στην πρώτη περίπτωση στέλνει 32bit με ρυθμό 20Mbps και στην δεύτερη έναν μόνο παλμό.



Εικόνα 4-2 κύκλωμα προσομοίωσης 50m cat5



Εικόνα 4-3 32 παλμοί 20Mbit σε τερματισμένη και μη τερματισμένη γραμμή



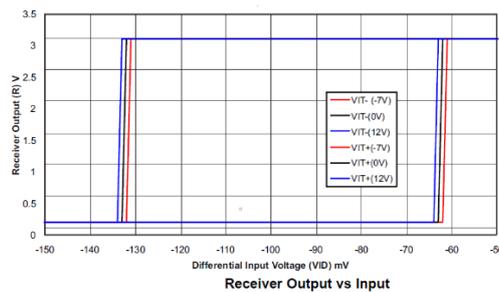
Εικόνα 4-4 Ένας παλμός σε τερματισμένη και μη τερματισμένη γραμμή

Στην δεύτερη περίπτωση φαίνεται καθαρά το ringing δηλαδή η ανάκλαση του παλμού σε πρώτη φάση στο μη τερματισμένο άκρο και μετά στην ανάκλαση στο άκρο του οδηγού ο οποίος έχει πολύ μικρή αντίσταση εξόδου οπότε το κύμα ανακλάται και μάλιστα ανεστραμμένο. Για αυτό παρατηρούμε και την αντιστροφή στην τάση του παλμού κάθε φορά που φτάνει στο ανοιχτοκυκλωμένο άκρο της γραμμής μεταφοράς μετά την ανάκλασή του στο οδηγούμενο άκρο.

4.2 RS485 Transceivers

Για να οδηγήσουμε την γραμμή επιλέξαμε τους αμφίδρομους οδηγούς SN65HVD78 της Texas instruments που μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα είτε ως transmitter είτε ως receiver.

Τα συγκεκριμένα chip έχουν ικανότητα οδήγησης μέχρι 50MHz. Επίσης όταν λειτουργούν σαν δέκτες έχουν αρκετά μεγάλο βρόγχο υστέρησης (80mV) που δίνει αυξημένη ανοσία στο θόρυβο. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό τους είναι ότι όταν μεταβαίνουν ανάμεσα σε ενεργή και ανενεργή κατάσταση η συμπεριφορά τους είναι προβλέψιμη και καλά ορισμένη ώστε να μπορούμε να τα βάζουμε σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ανάμεσα στην αποστολή διαδοχικών πακέτων χωρίς να χρειάζεται κάποιος επιπλέον μηχανισμός μειώνοντας έτσι και την κατανάλωση του κυκλώματος.



Εικόνα 4-5 Βρόγχος υστέρησης λήπτη

Για να έχουμε την δυνατότητα επέκτασης του πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ του κεντρικού κόμβου και των συστοιχιών μικροφώνων με αμφίδρομη επικοινωνία τερματίζουμε την γραμμή και στις δύο πλευρές.

Παρακάτω φαίνονται οι πειραματικές μετρήσεις που πήραμε από το κύκλωμα σε λειτουργία με χρήση καλωδίου 5 μέτρων:

(φωτο από παλμογραφο)

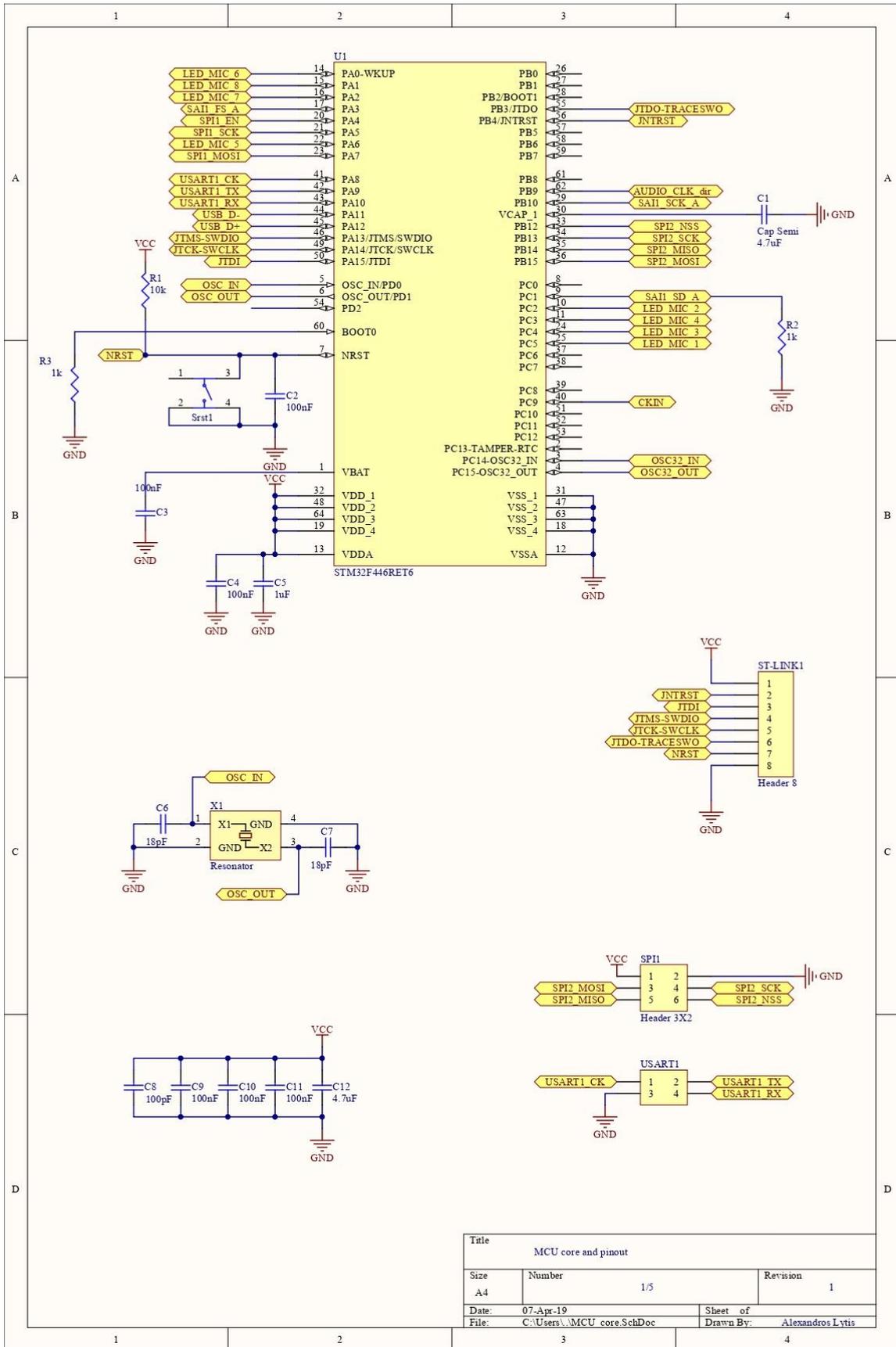
4.3 κύκλωμα κόμβου συστοιχίας μικροφώνων

Παρακάτω δίνονται αναλυτικά τα κυκλωματικά διαγράμματα της συστοιχίας μικροφώνων όπως αυτά σχεδιάστηκαν με τη χρήση του Altium designer καθώς και η λίστα των υλικών (bill of materials) που χρησιμοποιήθηκαν. Τα ολοκληρωμένα αρχεία βρίσκονται και σε ηλεκτρονική μορφή σε online repository που είναι ελεύθερα προσβάσιμο για να τα κατεβάσει ο καθένας στο link: <https://github.com/Lytis/Microphore-Array-Files>

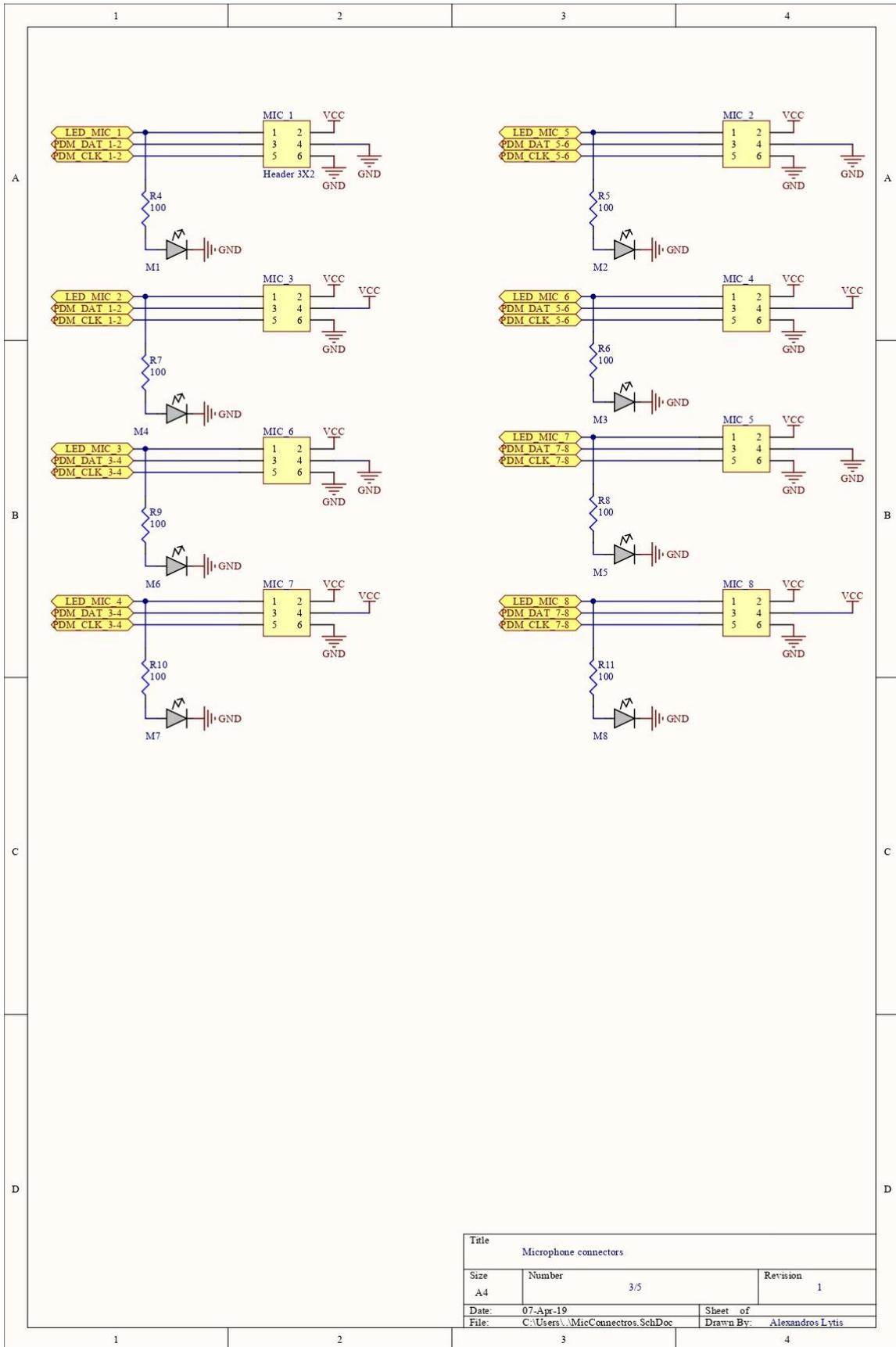
Designator	Description	PartNumber	Manufacturer	Quantity	Value
C1, C12	0603 Capacitor			2	4.7uF
C2, C3, C4, C9, C10, C11, C13, C14, C15, C16, C21, C26, C27, C28	0603 Capacitor			14	100nF
C5	0603 Capacitor			1	1uF
C6, C7	0603 Capacitor			2	18pF
C8, C22, C25	0603 Capacitor			3	100pF
C17	0603 Capacitor			1	0.1uF
C18	0603 Capacitor			1	47uF
C23	0603 Capacitor			1	22uF
C24	0603 Capacitor			1	10nF
C29	0603 Capacitor			1	1000pF
C19, C20	Aluminum Polymer Capacitor , 47 μF; + / - 20%; 16 V , 6,3 x 5,8	875105344006	Wurth Elektronik	2	47uF
R1	0603 Resistor			1	10k
R2, R3, R20, R21, R22	0603 Resistor			5	1k
R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11	0603 Resistor			8	100
R12, R14, R15, R17, R18	0603 Resistor			5	[DNP]
R13, R24, R25	0603 Resistor			3	0
R16, R19	0603 Resistor			2	47k
R23	0603 Resistor			1	100K
R26, R28, R30, R32, R33, R35	0603 Resistor			6	1

R27, R31, R34	0603 Resistor			3	120
R29	0603 Resistor			1	100 ohm
D1, D2	Schottky Diode	MBR180S1-7	Diodes Incorporated	2	
D3	Schottky Diode	CDBU0130L	Comchip Technology	1	
ETH1	RJ45 Ethernet Connector	1734795-1	TE Connectivity	1	
L1	WE-LQS SMD Power Inductor, size 8040, 15 uH	74404084150	Würth Elektronik	1	15 uH
L2, L3, M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	RED LED	LTST-C190KRKT	Lite-On	10	
Srst1	WS-TASV 6x6 mm SMD switch	430152043826	Würth Elektronik	1	
U1	STM32 ARM-based 32-bit MCU	STM32F466RET	ST microelectronics	1	
U2, U3, U4, U5	PDM to PCM Data Converter	ADAU7002ACBZ	Analog Devices	4	
U6	switching power-3.3V	TPS5403DR	Texas Instruments	1	
U7, U8, U9	RS-485 interface chip	SN65HVD78DGKR	Texas Instruments	3	
USB_1	WR-COM Mini USB 2.0 Type B SMT Horizontal 5 Contacts	65100516121	Würth Elektronik	1	
VTS1, VTS2, VTS3	ESD Suppressors / VTS Diodes	CDSOT23-SM712	Bourns	3	
X1	Crystal Resonator	ABM8G-12.288MHZ-4Y-T3	ABRACON	1	12.288MHz

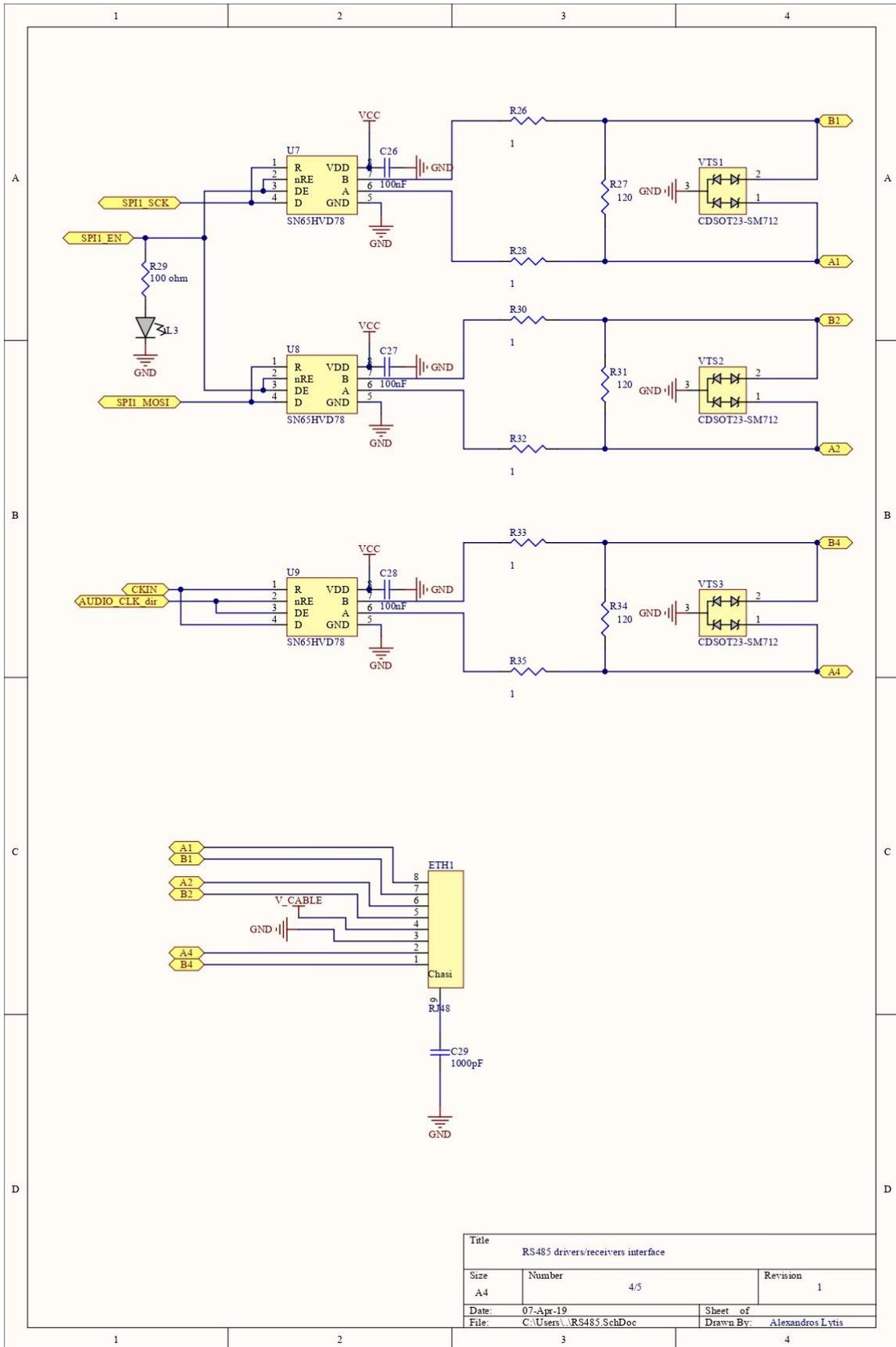
Εικόνα 4-6 Λίστα υλικών (BOM) κόμβου μικροφώνων



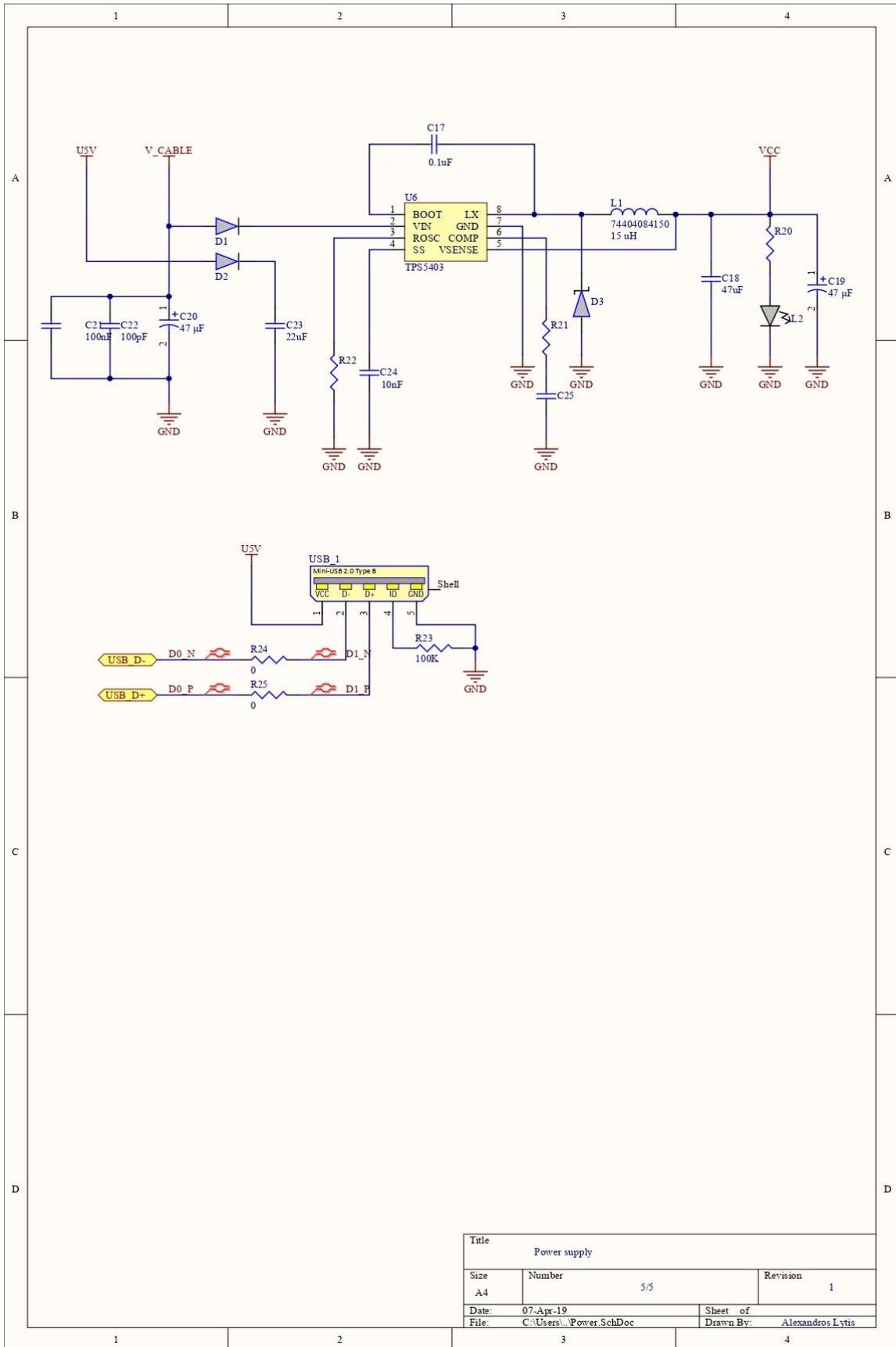
Εικόνα 4-7 Πυρήνας συστάδας μικροφώνων



Εικόνα 4-9 κόνεκτορες μικροφώνων συστάδας μικροφώνων



Εικόνα 4-10 διεπαφή RS-485 συστάδας μικροφώνων



Εικόνα 4-11 Τροφοδοσία συστάδας μικροφώνων

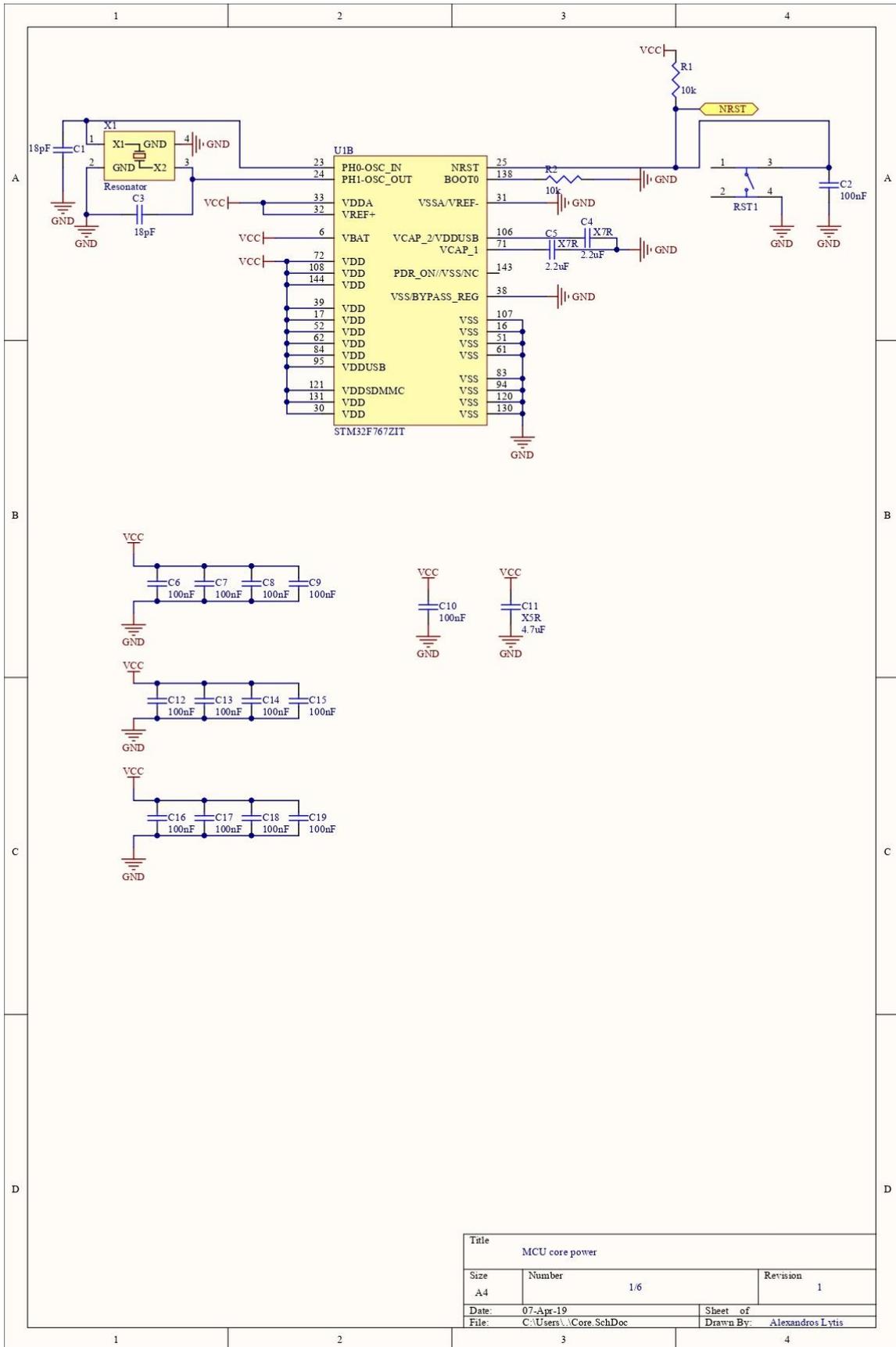
4.4 Κυκλωματικά διαγράμματα κεντρικού κόμβου

Όπως και στα κυκλωματικά διαγράμματα του κόμβου μικροφώνων έτσι και εδώ δίνονται τα κυκλωματικά διαγράμματα κατά τον ίδιο τρόπο καθώς και σε ηλεκτρονική μορφή στο ίδιο repository: <https://github.com/Lytis/Microphone-Array-Files>

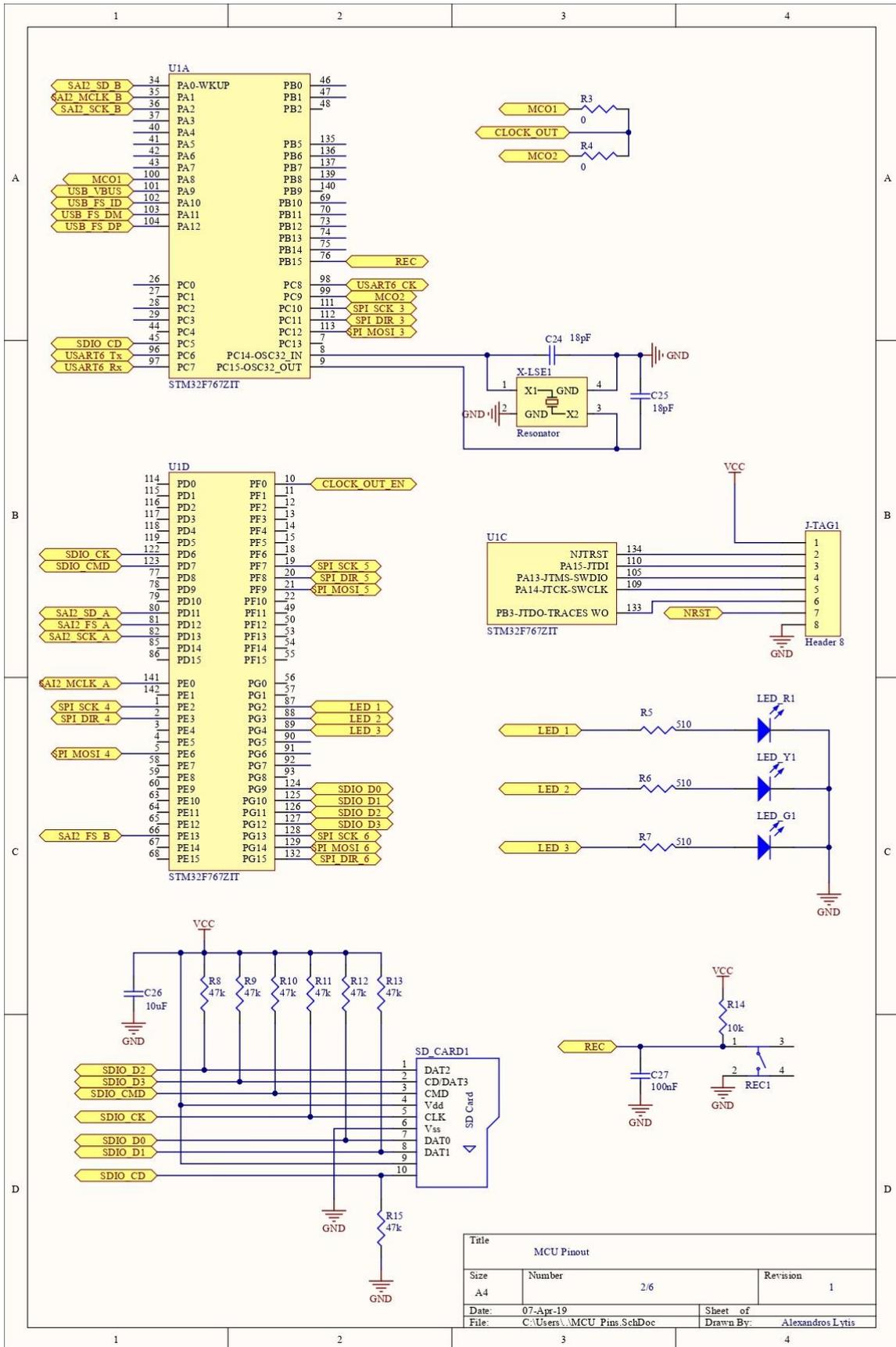
Designator	Description	PartNumber	Manufacturer	Quantity	Value
C28, C37	0603 Capacitor			2	0.1uF
C4, C5	0603 Capacitor			2	2.2uF
C33, C42	0603 Capacitor			2	2.2uF
C11	0603 Capacitor			1	4.7uF
C32, C41	0603 Capacitor			2	10nF
C26	0603 Capacitor			1	10uF
C1, C3, C24, C25	0603 Capacitor			4	18pF
C2, C6, C7, C8, C9, C10, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C27, C30, C35, C39, C44, C47, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57, C58	0603 Capacitor			31	100nF
C31, C36, C40, C45, C46	0603 Capacitor			5	100pF
C20, C21, C22, C23	0603 Capacitor			4	1000pF
C29, C38	WCAP-ASLI Aluminum Electrolytic Capacitors, 47uF	865080645012	Würth Elektronik	2	47uF
C34, C43	WCAP-ASNP Aluminum Electrolytic Capacitors, 22uF	865250543005	Würth Elektronik	2	22uF
R3, R4, R23	0603 Resistor			3	0
R24, R26, R27, R29, R30, R32, R33, R35, R36, R38, R39, R41, R42, R44, R45, R47, R48, R50, R51, R53, R54, R56, R57, R59	0603 Resistor			24	1
R1, R2, R14, R22	0603 Resistor			4	10k
R8, R9, R10, R11, R12, R13, R15, R17, R18, R20, R21	0603 Resistor			11	47k
R25, R28, R31, R34	0603 Resistor			4	100
R37, R40, R43, R46, R49, R52, R55, R58	0603 Resistor			8	120
R5, R6, R7, R16, R19	0603 Resistor			5	510

L1, L2	SMD Power Inductor, 8040	74404084150	Würth Elektronik	2	15 uH
D1, D4	Schottky Diode	CDBU0130L	Comchip Technology	2	
D2, D3	Schottky Diode	MBR180S1-7	Diodes Incorporated	2	
ETH1, ETH2, ETH3, ETH4	RJ45 Ethernet Connector	1734795-1	TE Connectivity	4	
LED1, LED2	RED LED	LTST- C190KRKT	Lite-On	1	
LED_G1	GREEN LED	LTST- C190KGKT	Lite-On	1	
LED_R1	RED LED	LTST- C190KRKT	Lite-On	1	
LED_Y1	YELLOW LED	LTST- C190KSKT	Lite-On	1	
PWR1	WR-DC DC Power Jack Right Angled(6.4)	694108301002	Würth Elektronik	1	
REC1, RST1	WS-TASV 6x6 mm SMD	430152043826	Würth Elektronik	2	
SD_CARD1	WR-CRD Micro SD Card	693071010811	Würth Elektronik	1	
U1	STM32 ARM-based 32- bit MCU	STM32F767ZIT	ST microelectronics	1	
U2, U3	switching power-3.3V	TPS5403DR	Texas Instruments	2	
U4, U5, U6, U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13, U14, U15	RS-485 interface chip	SN65HVD78D GKR	Texas Instruments	12	
USB1	WR-COM Mini USB 2.0 Type B SMT Horizontal 5 Contacts	65100516121	Würth Elektronik	1	
VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6, VT7, VT8, VT9, VT10, VT11, VT12	ESD Suppressors / VTS Diodes	CDSOT23- SM712	Bourns	12	
X1	Crystal Resonator	ABM8G- 12.288MHZ- 4Y-T3	ABRACON	1	12.288M Hz
X-LSE1	Crystal Resonator	ABS25- 32.768KHZ-T	ABRACON	1	32.768kH z

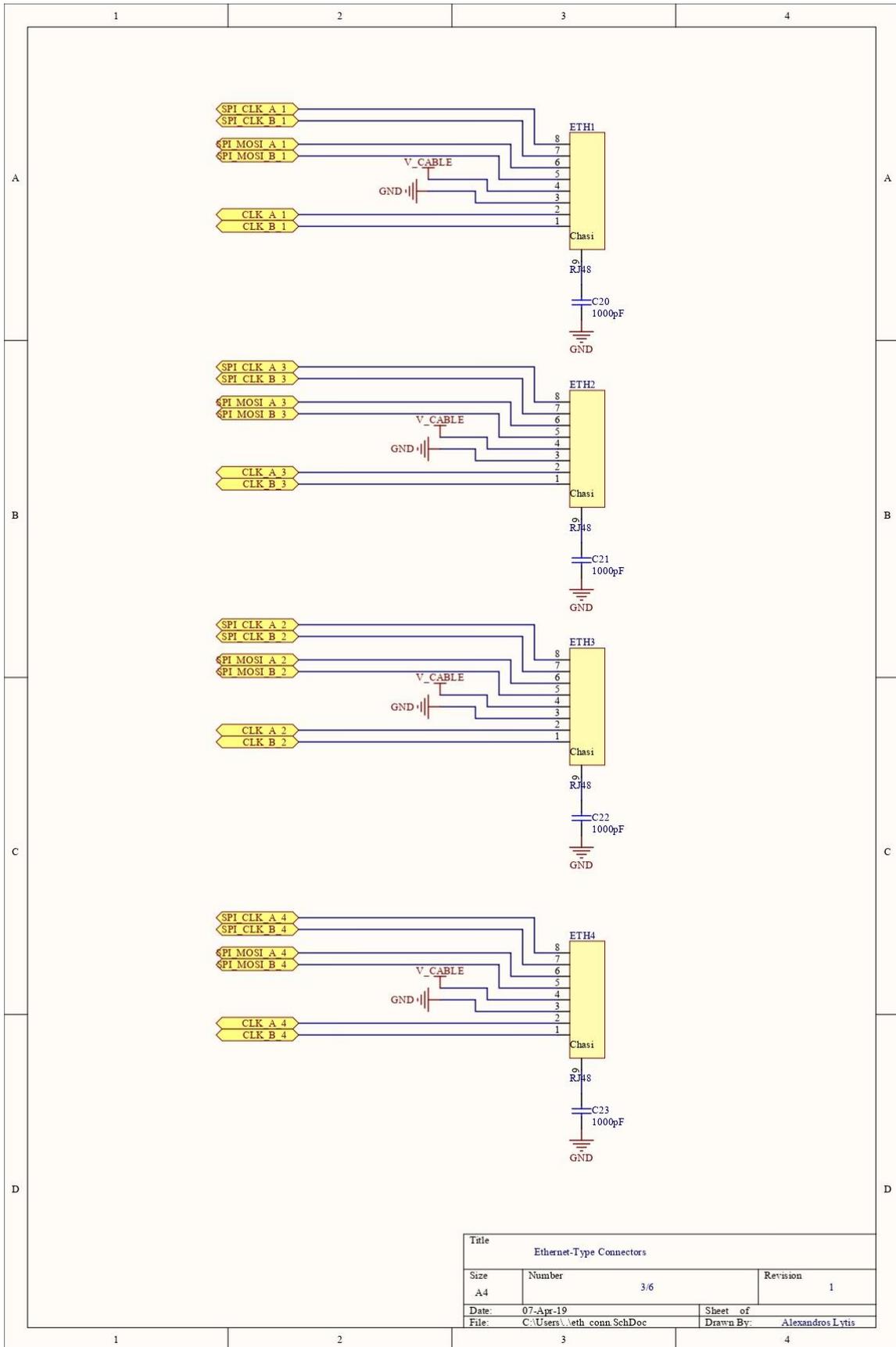
Εικόνα 4-12 Λίστα υλικών (BOM) κεντρικού κόμβου



Εικόνα 4-13 Πυρήνας κεντρικού κόμβου – μέρος 1

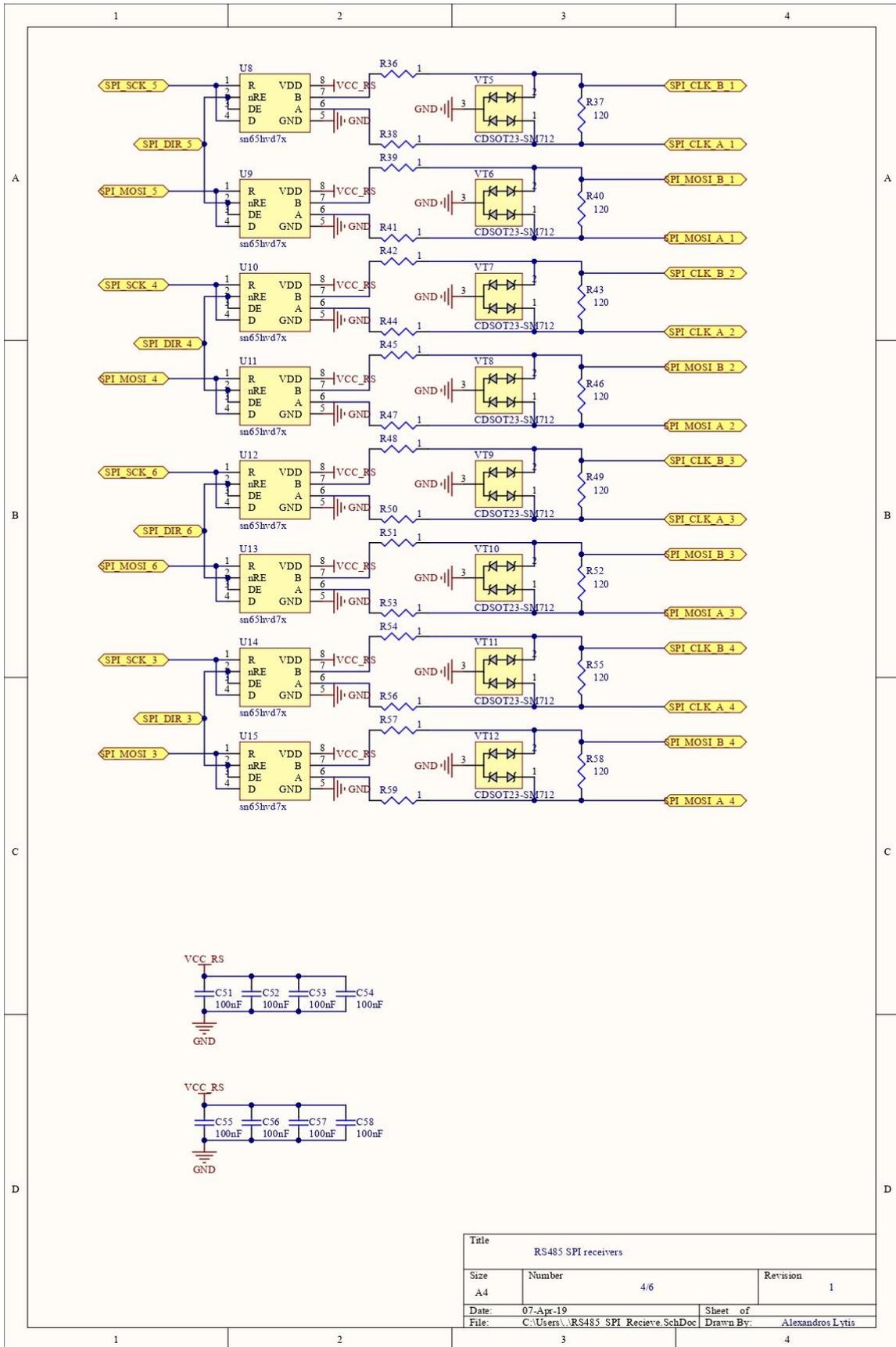


Εικόνα 4-14 Πιρήνας κεντρικού κόμβου – μέρος 2

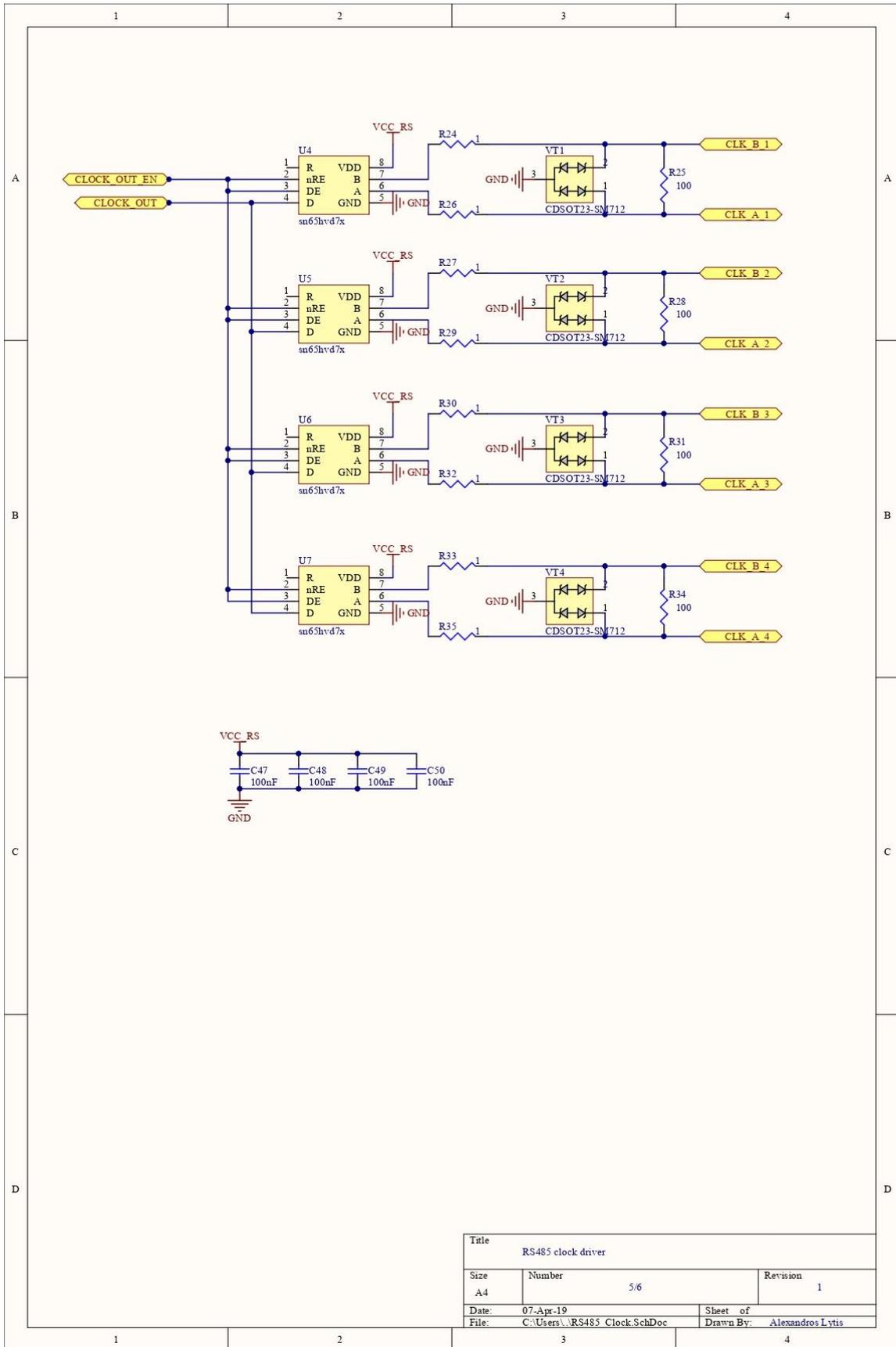


Title		
Ethernet-Type Connectors		
Size	Number	Revision
A4	3/6	1
Date:	07-Apr-19	Sheet of
File:	C:\Users\aleth_conn\SchDoc	Drawn By: Alexandros Lytis

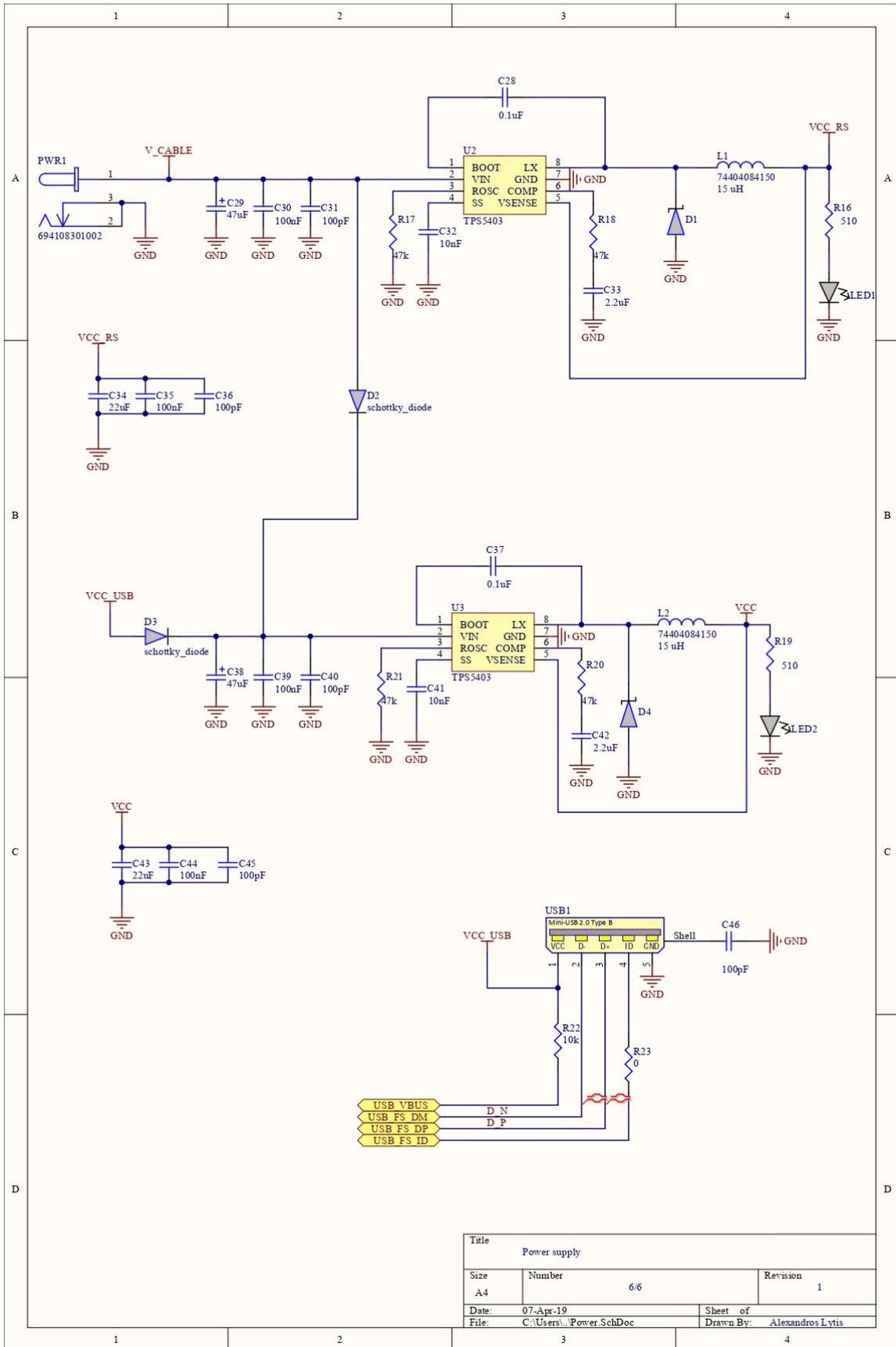
Εικόνα 4-15 κονέκτορες τύπου ethernet κεντρικού κόμβου



Εικόνα 4-16 Διεπαφή RS-485 του SPI κεντρικού κόμβου



Εικόνα 4-17 Διεπαφή RS-485 ρολογιού συγχρονισμού κεντρικού κόμβου



Εικόνα 4-18 Τροφοδοσία κεντρικού κόμβου

5 Επίλογος και μελλοντική εργασία

Η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη προσέγγιση και υλοποίηση μια τέτοιας συστοιχίας μικροφώνων. Για το λόγο αυτό έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί με σκοπό την απόδειξη της χρησιμότητας και λειτουργικότητάς του. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης προδιαγράφηκαν με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρόμοιων συστοιχιών του εμπορίου. Η επέκταση που πρόσθεσε η παρούσα εργασία αφορά κύρια στην δυνατότητα να επεκτείνουμε την μικροφωνική συστοιχία με ευέλικτο τρόπο από τη μία και από την άλλη δίνει τη δυνατότητα να τοποθετηθούν τα μικρόφωνα σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους στο χώρο χωρίς ο συγχρονισμός τους να χαθεί και άρα χωρίς να απαιτείται από το χρήστη να επανασχεδιάσει την συστοιχία.

Δόθηκε βάρος κυρίως στο να σχεδιαστεί μια βάση η οποία μπορεί να αποτελέσει το βασικό πυρήνα για περαιτέρω επέκταση της λειτουργικότητας της και προσαρμογής της σε καινούριες απαιτήσεις. Επίσης η χρήση του cortex-M4 MCU εξασφαλίζει τον εύκολο προγραμματισμό του συστήματος ώστε να μπορεί να καλύψει διαφορετικές ανάγκες σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Τα περιθώρια βελτίωσης και τροποποίησής του firmware που τρέχει το σύστημα αναδείχθηκαν από την πρώτη κιόλας στιγμή της διαδικασίας σχεδίασης του αλλά λόγω του όγκου δουλειάς και της περιπλοκότητας της υλοποίησής τους αποφασίστηκε να μην υλοποιηθούν καθώς θα μπορούσε να αποτελούν από μόνα τους το θέμα νέας διπλωματικής εργασίας. Αναφέρουμε τα πιο σημαντικά από αυτά εδώ:

- Υλοποίηση αλγορίθμων συμπίεσης και νέου πρωτοκόλλου μεταφοράς δεδομένων τόσο στους κόμβους δειγματοληψίας των μικροφώνων όσο και στον κεντρικό κόμβο.
- Υλοποίηση ενός USB stack ώστε να μεταφέρει όλα τα δεδομένα μέσω USB στον υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο με αντίστοιχη ανάπτυξη της απαραίτητης εφαρμογής από τη μεριά του υπολογιστή.
- Επέκταση του πρωτοκόλλου μεταφοράς δεδομένων με χρήση κώδικα διόρθωσης λαθών που υποστηρίζεται σε επίπεδο υλικού από το περιφερειακό των ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν.
- Υλοποίηση αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του κεντρικού κόμβου και των κόμβων δειγματοληψίας για δυναμική παραμετροποίηση του συστήματος.

Επίσης Υπάρχουν πολλές δυνατότητες που αφορούν την επέκταση και βελτιστοποίηση του hardware του συστήματος ώστε να δύναται η δυνατότητα να καλύπτει πιο ιδιαίτερες προδιαγραφές που υπάρχουν σε συστήματα καταγραφής ήχου αλλά και να μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω. Κάποιες σκέψεις παρουσιάζονται εδώ:

- Αντικατάσταση του MCU του κεντρικού κόμβου με FPGA ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να προσθέσουμε περισσότερα κανάλια ήχου καθώς στην παρούσα υλοποίηση ένας από τους περιοριστικούς παράγοντες είναι ο περιορισμένος αριθμός περιφερειακών που μπορούν να λειτουργούν παράλληλα.
- Αντικατάσταση του MCU του κόμβου των μικροφώνων με audio DSP chip το οποίο παρέχει λειτουργίες φιλτραρίσματος και συμπίεσης του ήχου υλοποιημένους σε επίπεδο υλικού.
- Προσθήκη εξωτερικής μνήμης RAM στους δύο κόμβους για την επέκταση των δυνατοτήτων τους.
- Επέκταση του USB από USB2.1 σε USB3 ώστε να καταστεί δυνατή η μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου μεγαλύτερης συστοιχίας ή μεγαλύτερου ρυθμού δειγματοληψίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Z. I. Skordilis, A. Tsiami, P. Maragos, G. Potamianos, L. Spelgatti, and R. Sannino, "MULTICHANNEL SPEECH ENHANCEMENT USING MEMS MICROPHONES," *ICASSP-2015*, 2015.
- [2] EPCOS AG, Munich, Germany, University of Applied Sciences-München, "CHIP SCALE PACKAGE OF A MEMS MICROPHONE AND ASIC," 2010.
- [3] GoerTek Inc. China, "THE ERA OF SILICON MEMS MICROPHONE AND LOOK BEYOND," *Transducers 2015*, pp. 375-378, 2015.
- [4] C. De Berti, P. Malcovati, L. Crespi and A. Baschiroto, "A Low-Power, Continuous-Time Sigma-Delta Modulator for MEMS Microphones," *PRIME 2013*, pp. 53-56, 2013.
- [5] R. W. Stewart and E. Pfann, "Oversampling and sigma-delta strategies for data conversion," *ELECTRONICS & COMMUNICATION ENGINEERING JOURNAL*, pp. 37-47, FEBRUARY 1998.
- [6] JAMES C. CANDY, Y. C. CHING, D. S. ALEXANDER, "Using Triangularly Weighted Interpolation to Get 13-Bit PCM," *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, pp. 1268-1275, NOVEMBER 1976.
- [7] George I. Bourdopoulos and Theodore L. Deliyannis, Member, IEEE, "High-Order Vector Sigma-Delta Modulators," *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—II: ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING*, vol. 47, no. 6, pp. 493-503, JUNE 2000.
- [8] Brianna Klingensmith, Thomas Campbell, and Michael Y. Feng Reza Mohammadi Ghazi and Oral Buyukozturk, "Highly Synchronized, Simultaneous, High-Speed 24-bit Data Acquisition of Triaxial MEMS Accelerometers for Monitoring a Real World Civil Structure".
- [9] A. Hermanis, R. Cacurs, K. N. esenberg and M. Greitans, "Efficient Real-Time Data Acquisition of Wired Sensor Network with Line Topology," *IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, pp. 133-138, 2013.
- [10] J. D. EVERARD, "A Single-Channel PCM Codec," *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, vol. 27, no. 2, pp. 283-295, 1979.
- [11] Castro, M., Sebastian, R., Yeves, F., Peire, J., Urrutia, J., & Quesada, J, "Well-known serial buses for distributed control of backup power plants. RS-485 versus

controller area network (CAN) solutions.," *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society.*, 2002.

- [12] Yanfang Wang, Wandui Mao, Jinying Li, Peng Zhang, & Xiaoping Wang. , "A distributed rectifier testing system based on RS-485.," *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.* , 2010.
- [13] Tuan Thanh Dang, Jin Ho Kim, Dung Duc Nguyen and Jae Wook Jeon, "A Gateway for Multi-device Communication between Mechatrolink-III and RS-485," *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 2012.
- [14] B. D. V. Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, pp. 4-24, 1988.

