



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και Κατασκευή Πλατφόρμας για Ασύρματη
Μετάδοση Δεδομένων με Χρήση του Πρωτοκόλλου
Bluetooth Low Energy (BLE)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Λαλέλλη Ιωάννη

Παπαφώτη Κωνσταντίνου

Επιβλέπων : Παύλος – Πέτρος Σωτηριάδης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και Κατασκευή Πλατφόρμας για Ασύρματη
Μετάδοση Δεδομένων με Χρήση του Πρωτοκόλλου
Bluetooth Low Energy (BLE)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Λαλέλλη Ιωάννη

Παπαφώτη Κωνσταντίνου

Επιβλέπων : Παύλος – Πέτρος Σωτηριάδης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 15^η Οκτωβρίου 2015.

.....
Π. Σωτηριάδης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Θ. Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Πεκμεστζή
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....
Λαλέλλης Ιωάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

.....
Παπαφώτης Κωνσταντίνος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

© (2015) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

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 αυτής 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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια σχεδίασης και κατασκευής ενός συστήματος για την συλλογή ασθενών σημάτων τύπου ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) ή καρδιογραφήματος (ECG) από αισθητήρες και αποστολής αυτών με ασύρματο τρόπο σε κοντινό τερματικό. Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή και παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή και τα επιμέρους μέρη που θα απαρτίσουν την εφαρμογή. Στην συνέχεια αναλύονται ενδελεχώς δύο από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα ασύρματης μετάδοσης προσωπικού χώρου (WPAN), το ZigBee και το Bluetooth Low Energy και επιλέγεται αυτό που ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις της εφαρμογής μας. Ακολούθως παρουσιάζεται η περιγραφή όλων των επιμέρους μονάδων του κυκλώματος και η διασύνδεση αυτών. Ακόμη, αναλύονται ορισμένες διατάξεις κεραιών προκειμένου να μπορέσει το σύστημα μας να επικοινωνήσει με κάποια απομακρυσμένη συσκευή. Τέλος παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος (PCB) καθώς και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τη πειραματική διαδικασία.

Λέξεις κλειδιά

Bluetooth Low Energy, ZigBee, τεχνικές σχεδίασης PCB, Altium Designer, Printed IFA, folded IFA, DA14580, ATmega 328P

Abstract

In the present diploma thesis, an attempt is made to design and fabricate a system which collects weak signals of the (EEG) or (ECG) type through sensors and transmits them wirelessly to nearby terminals. Initially, the main structure and the individual blocks are introduced and briefly described. Next, two of the most popular wireless transmission protocols personal space (WPAN), the ZigBee and Bluetooth Low Energy protocol are studied thoroughly and compared in order to decide the one that fits best to specifications. The thesis continues with the description of each basic functional unit and their interconnection. Moreover, to allow communication with remote devices, specific antenna structures are studied. Finally, we present the design and manufacturing of the printed circuit board (PCB) and the results of the experimental process/measurements.

Key Words

Bluetooth Low Energy, ZigBee, PCB design, Altium Designer, Printed IFA, folded IFA, DA14580, ATmega 328P

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μας εργασίας, κύριο Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη καθώς και για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε σε ένα τόσο απαιτητικό και πολυδιάστατο θέμα. Το κίνητρο και η ουσιαστική βοήθεια που μας παρείχε σε όλη την πορεία της έρευνας ήταν καθοριστικά για την περάτωση του έργου μας..

Ειδική μνεία οφείλουμε να κάνουμε στην τεχνική και υλική βοήθεια, την Dialog Semiconductor και ιδιαίτερα τους κυρίους Μοσχόπουλο Νικόλαο και Μπουγά Παύλο οι οποίοι παρά το φόρτο εργασίας μας ήταν εκεί σε κάθε μας απορία-πρόβλημα.

Φυσικά, θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας για την αγάπη και την φροντίδα με την οποία έχουν μας περιβάλλει σε όλο το ακαδημαϊκό μας ταξίδι ως τώρα, καθώς και για την αμέριστη υλική και ψυχολογική στήριξη που μας παρείχαν. Η αξία τους είναι ανεκτίμητη.

Ακόμη, ευχαριστούμε πολύ και όλα τα υπόλοιπα μέλη του circuits group, τα οποία με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους, τη διάθεση τους και την φιλική ατμόσφαιρα που δημιούργησαν συντέλεσαν στο να περατωθεί αυτό το έργο.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	15
2. Πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας.....	18
2.1 Πρωτόκολλα Ασύρματης μετάδοσης προσωπικού χώρου	18
2.2 ZigBee.....	19
2.2.1 Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee.....	21
2.3 Bluetooth Low Energy	22
2.3.1. Φυσικό επίπεδο	24
2.3.2 Επίπεδο ζεύξης.....	26
2.3.3 HCI.....	28
2.3.4 L2CAP	28
2.3.5 Attribute Protocol.....	28
2.3.6 Security Manager Protocol	29
2.3.7 GATT.....	30
2.3.8 GAP.....	33
2.4 BLE vs ZigBee.....	36
3. Το Σύστημα Καταγραφής και Επεξεργασίας Δεδομένων	38
3.1 Εισαγωγή	38
3.2 Πρωτόκολλα Σειριακής Επικοινωνίας.....	38
3.2.1 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)	38
3.2.2 Serial Peripheral Interface (SPI)	40
3.2.3 Inter-Integrated Circuits (I2C)	42
3.3 Προδιαγραφές Συστήματος.....	44
3.4 Δομή Συστήματος	45
3.5 Περιγραφή των Βασικών Μονάδων του Συστήματος	46

3.5.1	Ο πολυπλέκτης ADG726	46
3.5.2	Ο ADC141S626 A/D Converter	47
3.5.3	Ο μικροελεγκτής ATmega328	49
3.5.4	Το Bluetooth Low Energy SoC DA1580.....	50
3.6	Κυκλωματική Υλοποίηση.....	51
3.6.1	Τροφοδοσία.....	51
3.6.2	Είσοδος Σημάτων.....	52
3.6.3	Διασύνδεση Συσκευών	52
3.6.4	Οι συνδέσεις του ADC141S626	53
3.6.5	Οι συνδέσεις του ATmega328	54
3.6.6	Οι συνδέσεις του DA14580	55
3.7	Προγραμματισμός Μικροελεγκτών	56
3.7.1	Προγραμματισμός DA14580	57
3.7.2	Προγραμματισμός ATmega328.....	57
4.	RF επικοινωνία-Κεραία	58
4.1	Εισαγωγή	58
4.2	Θεωρία	58
4.3	Σχεδίαση IFA για το DA14580.....	63
4.4	Δεύτερη Υλοποίηση: Folded Printed IFA	67
5.	Κατασκευή PCB	73
5.1	Εισαγωγή	73
5.2	Τυπωμένα Κυκλώματα (PCB).....	73
5.3	Ακεραιότητα σήματος σε τυπωμένα κυκλώματα	75
5.4	Σχεδίαση PCB	77
5.5	Εισαγωγή κεραίας στο PCB.....	78

6. Αποτελέσματα – Μετρήσεις	80
6.1 Η υλοποίηση του PCB	80
6.2 Πειραματικές Μετρήσεις	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πλήρες Σχηματικό του Κυκλώματος.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: PCB LAYOUT.....	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: USB Dongle.....	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

1. Εισαγωγή

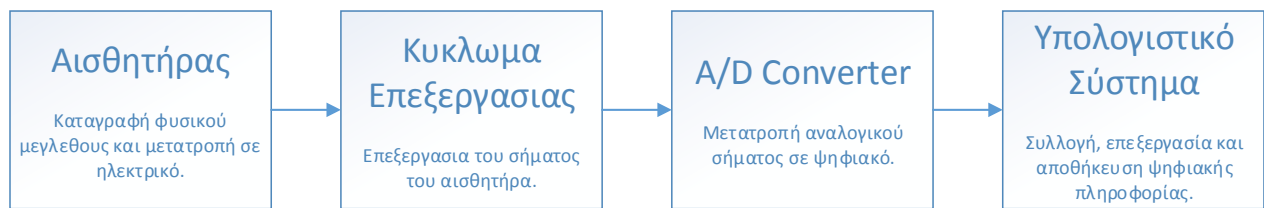
Από τα αρχαία ακόμα χρόνια ο άνθρωπος κάνει προσπάθειες να κατανοήσει και να εξηγήσει με την λογική και την επιστήμη τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο φυσικό του περιβάλλον. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστικό ρόλο έχει διαδραματίσει η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των τελευταίων ετών. Χάρη σε αυτή έχουμε σήμερα κατανοήσει και ερμηνεύσει την λειτουργία ενός σημαντικού κομματιού του κόσμου στον οποίο ζούμε και κατ' επέκταση έχουμε καταφέρει να βελτιώσουμε σημαντικά την ποιότητα της ζωής μας.

Στην προσπάθεια αυτή συμβάλει καθοριστικά και η δυνατότητα μέτρησης, καταγραφής και επεξεργασίας τέτοιων μεγεθών από κατάλληλες διατάξεις. Η ικανότητα των σύγχρονων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων να μετατρέπουν τα διάφορα φυσικά μεγέθη σε ψηφιακή μορφή και να τα επεξεργάζονται μας επιτρέπει να παρατηρούμε καλύτερα το περιβάλλον μας και να βγάζουμε πολύτιμα συμπεράσματα για την λειτουργία του.

Πολλές συσκευές τις οποίες χρησιμοποιούμε συχνά στην καθημερινότητά μας εμπεριέχουν κάποιο σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων προκειμένου να μας δώσουν κάποια πληροφορία ή να καθορίσουν ανάλογα την λειτουργία τους. Φυσικά κάθε τέτοιο σύστημα έχει την δική του ξεχωριστή δομή η οποία καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την λειτουργία που πρέπει να εκτελέσει και τις προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιεί. Παρόλα αυτά η βασική δομή παραμένει η ίδια στην πλειοψηφία των συστημάτων.

Η διαδικασία καταγραφής των δεδομένων ξεκινά με την μετατροπή του φυσικού μεγέθους σε κάποιο ηλεκτρικό μέγεθος το οποίο μπορεί να επεξεργασθεί και να ψηφιοποιηθεί με χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στη συνέχεια η ψηφιακή πλέον πληροφορία μπορεί να αναλυθεί και να αποθηκευτεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ή οποιοδήποτε άλλο υπολογιστικό σύστημα. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, τα βασικά μέρη ενός τέτοιου συστήματος είναι τα εξής:

- Αισθητήρες οι οποίοι αναλαμβάνουν να μετατρέψουν το προς μέτρηση φυσικό μέγεθος σε κάποιο ηλεκτρικό μέγεθος που με κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να παρασταθεί σε ψηφιακή μορφή.



Σχήμα 1.1: Γενική δομή ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων.

- Κάποιο κύκλωμα επεξεργασίας του αναλογικού σήματος των αισθητήρων, το οποίο συνήθως έχει την μορφή τάσης ή ρεύματος, ώστε να έρθει σε μορφή η οποία επιτρέπει την μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα. Κυκλώματα ενίσχυσης και φιλτραρίσματος είναι συνήθως απαραίτητα για να είναι δυνατή η αξιοποίηση των σημάτων που δίνουν στην έξοδό τους οι περισσότεροι αισθητήρες.
- Ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ο οποίος μετατρέπει το επεξεργασμένο σήμα των αισθητήρων σε ψηφιακή μορφή. Ο μετατροπέας αυτός είναι από τα πιο σημαντικά κομμάτια του συστήματος, καθώς τα χαρακτηριστικά του (ταχύτητα δειγματοληψίας, ανάλυση κλπ) διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της ψηφιακής πληροφορίας.
- Υπολογιστικό σύστημα για την συλλογή, ανάλυση και αποθήκευση των ψηφιακών δεδομένων. Αυτό μπορεί να είναι κάποιος ηλεκτρονικός υπολογιστής αλλά και οποιαδήποτε άλλη συσκευή έχει την δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας ψηφιακών δεδομένων.

Φυσικά σε σύγχρονα συστήματα υπάρχει συχνά και η απαίτηση για διαμοιρασμό των δεδομένων με άλλες συσκευές η οποία προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιας μορφής ενσύρματης ή ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών. Φυσικά σε τέτοια συστήματα θα πρέπει να υπάρχουν και επιπλέον στάδια για την μετάδοση των δεδομένων τα οποία αυξάνουν ακόμα περισσότερο τις παραμέτρους και την πολυπλοκότητα της σχεδίασης ενός τέτοιου συστήματος.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω, η σχεδίαση ενός συστήματος απόκτησης δεδομένων μπορεί, αναλόγως την εφαρμογή, να είναι πολύ απαιτητική διαδικασία. Τα χαρακτηριστικά του προς μέτρηση φυσικού μεγέθους (π.χ. διάρκεια, ρυθμός μεταβολής), όσο και οι τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιηθούν κατά την σχεδίαση (π.χ. ευαισθησία, μέγεθος, αυτονομία) είναι παράμετροι οι οποίες καθορίζουν την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος. Έτσι, τα χαρακτηριστικά κάθε ενός από τα παραπάνω στάδια πρέπει να επιλεγθούν με προσοχή, ώστε η τελική ψηφιακή πληροφορία να αντιπροσωπεύει σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό το μετρούμενο φυσικό μέγεθος.

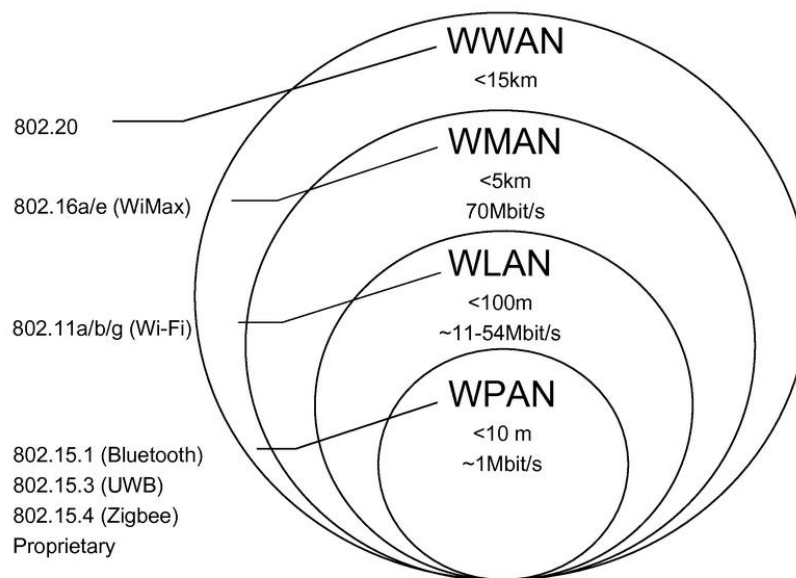
Στην παρούσα εργασία θα γίνει παρουσίαση της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής ενός συστήματος το οποίο θα μπορεί να καταγράφει και να στέλνει ασύρματα σε κοντινές του συσκευές το σήμα από 16 αναλογικές εισόδους (αισθητήρες). Θα παρουσιαστεί αναλυτικά όλη η διαδικασία σχεδίασης και επιλογής των κατάλληλων υλικών καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του συστήματος.

2. Πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας

2.1 Πρωτόκολλα Ασύρματης μετάδοσης προσωπικού χώρου

Με τον όρο ασύρματη μετάδοση εννοούμε την λήψη ή αποστολή πληροφορίας δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων τα οποία δεν συνδέονται με κάποιο φυσικό υλικό. Ως διάυλος για την επικοινωνία αυτών των σημείων χρησιμοποιείται ο αέρας. Για την επίτευξη οποιασδήποτε επικοινωνίας μεταξύ ενός πομπού κι ενός δέκτη πρέπει οι και οι δύο να “ μιλάνε” την ίδια γλώσσα. Η γλώσσα αυτή ονομάζεται αλλιώς πρωτόκολλο επικοινωνίας και εντός αυτού περιέχονται όλες οι αρχές που διέπουν την αλληλεπίδραση πομπού-δέκτη ή ενός δικτύου γενικότερα.

Υπάρχουν πολλές γενικές ομάδες που εσωκλείουν τέτοια πρωτόκολλα τα οποία συντελούν στην ασύρματη επικοινωνία σε ένα δίκτυο, οι οποίες διακρίνονται η μια από την άλλη με κύριο χαρακτηριστικό την απόσταση. Το παρακάτω σχήμα μας δίνει τις κυριότερες εξ’ αυτών κατηγορίες αυτών των πρωτοκόλλων.



Σχήμα 2.1

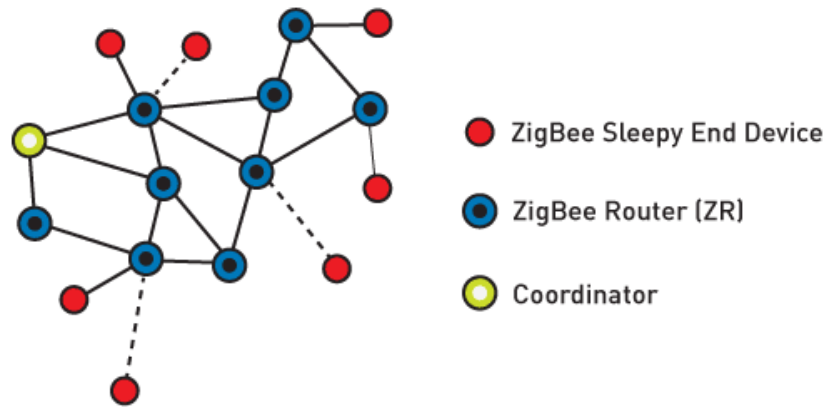
Εφόσον η εφαρμογή μας απευθύνεται σε μετάδοση σημάτων σε μικρή απόσταση και έχουμε περιορισμό ως προς την κατανάλωση ισχύος (ελάχιστη δυνατή) θα επιλέξουμε μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας από την κατηγορία των WPANs (Wireless Personal Area Networks) τα

οποία αναφέρονται σε αποστάσεις από μερικά εκατοστά μέχρι κάποια μέτρα. Το WPAN είναι βασισμένο στο στάνταρ IEEE 802.15. Η τεχνολογία των WPANs έχει γνωρίσει μεγάλη άνθηση τα τελευταία χρόνια κι αυτό διότι η ανάγκη να έχουμε συνδέσεις ηλεκτρονικών συσκευών (υπολογιστές, smartphones, tablets, αισθητήρες) δίχως την παρουσία καλωδίων καθώς και ο έλεγχος-συντονισμός μεταξύ τους αποτελεί επιτακτική ανάγκη-διευκόλυνση και όπως παρατηρούμε η τεχνολογία έχει στραφεί προς αυτή τη κατεύθυνση.

Για τις ανάγκες της εφαρμογής μας ελέγχθηκαν 2 πρωτόκολλα τα οποία ανήκουν στη οικογένεια των WPANs , το ZigBee και το Bluetooth Low Energy (BLE). Στη συνέχεια ακολουθεί μία πιο βαθιά ανάλυση των δύο πρωτοκόλλων. Έπειτα θα τα συγκρίνουμε για να δούμε πιο εκ των δύο είναι καταλληλότερο για τις ανάγκες της εφαρμογής μας.

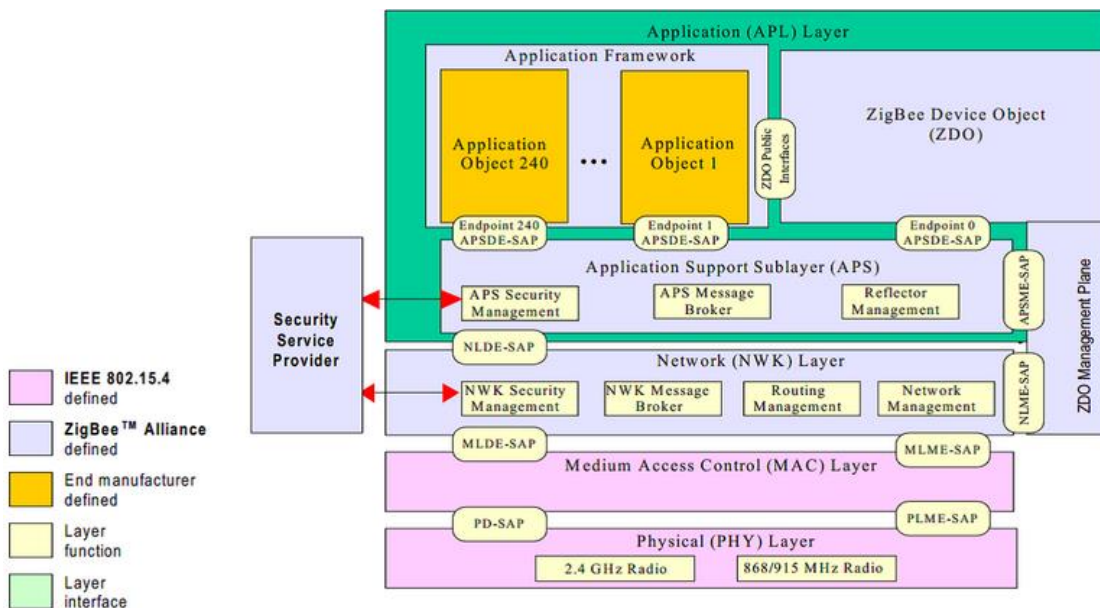
2.2 ZigBee

Το ZigBee αποτελεί ένα πρωτόκολλο της κατηγορίας WPAN που αναλύσαμε προηγουμένως έτσι ώστε να καταστούν οι σαφείς κανόνες που διέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία σ' ένα δίκτυο. Το ZigBee είναι βασισμένο στο στάνταρ IEEE 802.15.4 και δημιουργήθηκε από την εταιρία ZigBee Alliance σε συνεργασία με την IEEE. Το μεγάλο πλεονέκτημα του είναι η μειωμένη κατανάλωση ισχύος κατά την εκπομπή σημάτων και η ικανότητα των επιμέρους κόμβων του δικτύου να βρίσκονται σε απόσταση έως 20 μέτρων σε συνθήκες LOS (Line of Sight). Το σενάριο επικοινωνίας στο ZigBee είναι η μετάδοση δεδομένων από κόμβο σε κόμβο μέσω ενός δικτύου πλέγματος (mesh network) ενδιάμεσων συσκευών έτσι ώστε να φτάσει σε πιο απομακρυσμένους στόχους που δεν είναι άμεσα προσβάσιμοι, εξού και το όνομα του πρωτοκόλλου που σημαίνει ο “χορός των μελισσών” από λουλούδι σε λουλούδι.



Σχήμα 2.2.1: Δίκτυο πλέγματος

Χρησιμοποιείται όπως είπαμε σε εφαρμογές με πλεονέκτημα την πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος αλλά προσφέρει σχετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 250 Kbps. Παρακάτω φαίνεται πώς συντάσσεται η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee.



Σχήμα 2.2.2: Στοίβα ZigBee

2.2.1 Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee

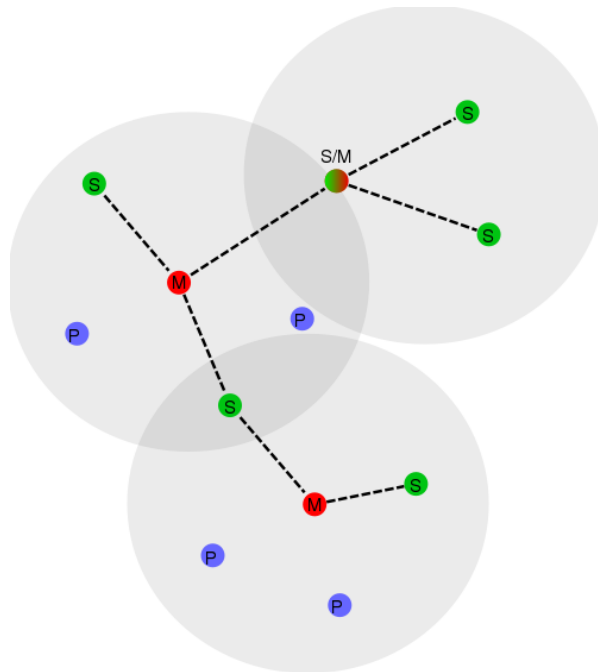
Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee αποτελείται από 4 επίπεδα. Κάθε επίπεδο εκτελεί ένα συγκεκριμένο σύνολο λειτουργιών και παρέχει τις υπηρεσίες του στο ανώτερο επίπεδο μέσω μιας διεπαφής που ονομάζεται σημείο πρόσβασης υπηρεσιών (Service Access Point, SAP). Τα 4 επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων του ZigBee (σχήμα 4.1.1) είναι τα παρακάτω:

- Το φυσικό επίπεδο (Physical layer, PHY) που είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του πομποδέκτη, τη μετάδοση και λήψη δεδομένων, την ανίχνευση ενέργειας στο κανάλι, την εκτίμηση της κατάστασης των καναλιών για την πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και με αποφυγή συγκρούσεων (CSMA-CA) και τη μέτρηση της ποιότητας των λαμβανομένων πακέτων.
- Το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium access control layer, MAC) που παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων και διαχείρισης. Είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση στο κανάλι, για τη διαχείριση των χρονοσχισμών και για την παροχή μιας αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ δύο επιπέδων MAC. Επιπρόσθετα παρέχει τα μέσα για την εφαρμογή διαφόρων μηχανισμών ασφάλειας.
- Το επίπεδο δικτύου (Network layer, NWK) που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του δικτύου, για την είσοδο και την έξοδο μία συσκευής από ένα δίκτυο, για την ασφάλεια και για τη δρομολόγηση των μεταδιδόμενων πακέτων.
- Το επίπεδο εφαρμογών (Application layer, APL) που περιλαμβάνει το υποεπίπεδο α υποστήριξης εφαρμογών (Application support sublayer, APS), το πλαίσιο εφαρμογών (Application framework, AF), τα αντικείμενα συσκευής ZigBee (ZigBee Device Objects, ZDO) και τις καθορισμένες από τον κατασκευαστή εφαρμογές. Το υποεπίπεδο APS είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση δύο συσκευών βάση των αναγκών και των υπηρεσιών τους και για την αποστολή δεδομένων μεταξύ τους. Τα ZDO είναι αυτά που καθορίζουν το ρόλο της κάθε συσκευής στο δίκτυο και το επίπεδο ασφάλειας. Επίσης συμβάλλουν στην ανίχνευση των συσκευών σε ένα δίκτυο και στον προσδιορισμό των υπηρεσιών που αυτές παρέχουν. Το πλαίσιο εφαρμογών είναι το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενούνται οι εφαρμογές μέσα σε μία συσκευή ZigBee.

2.3 Bluetooth Low Energy

Το Bluetooth Low Energy (BLE) αποτελεί εξέλιξη της τεχνολογίας Bluetooth. Ονομάζεται αλλιώς Bluetooth 4.0 ή Bluetooth Smart. Εισήχθη στην τεχνολογία το 2006 υπό την ονομασία Wibree αλλά ενσωματώθηκε στην οικογένεια του Bluetooth το 2010. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι η μειωμένη καταναλισκόμενη ισχύς σε σύγκριση με τους προκατόχους του ενώ παράλληλα μπορεί να εκπέμψει στην ίδια απόσταση με αυτούς διατηρώντας το μειωμένο κόστος παραγωγής. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται κατά κόρον από φορητές κυρίως συσκευές προσπερνώντας σχεδόν όλες τις άλλες τεχνολογίες της οικογένειας των WPANs. Κινητά τηλέφωνα τελευταίας γενιάς (smartphones), ταμπλέτες, handsfree αισθητήρες κίνησης (τύπου wearable), έξυπνα ρολόγια (smart-watches) χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο στάνταρ για σύνδεση με περιφερειακές συσκευές.

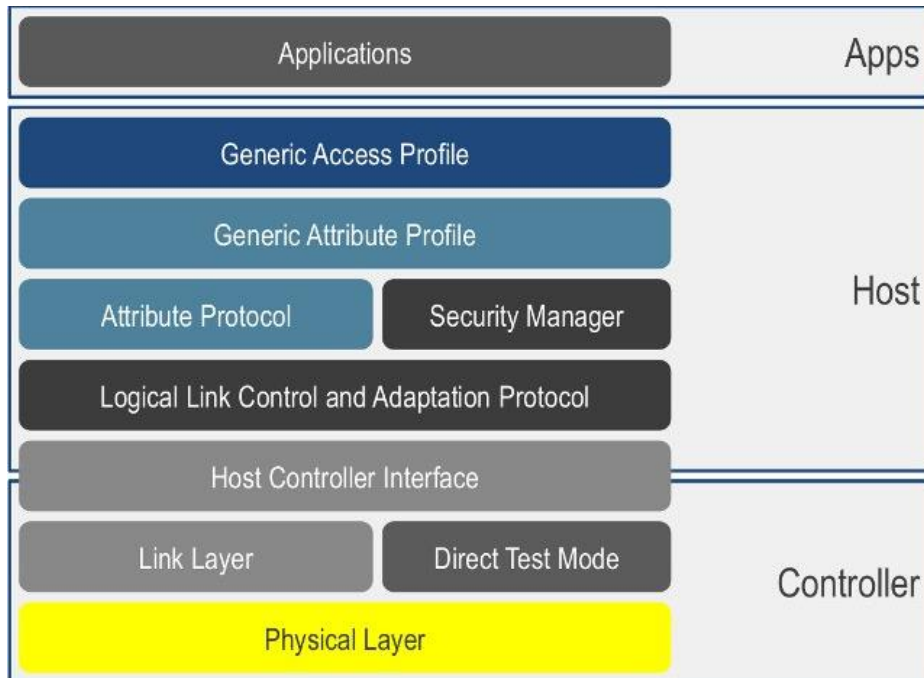
Το BLE έχει αναπτυχθεί έχοντας ως κύρια ιδέα, εκτός από την άμεση επικοινωνία δύο τερματικών, την σύσταση ενός δικτύου-διασποράς (scatternet) Σχήμα 2.3, το οποίο χωρίζεται σε piconets και καθένα από αυτά θα έχει μία κεντρική συσκευή (master) όπως PC, smartphones κ.α, ο οποίος θα χειρίζεται έως οκτώ περιφερειακές συσκευές (slaves), όπως BLE hands-free ή smart-watches. Παράλληλα όμως κάποιος slave ή master μπορεί να ανήκει και σε κάποιο άλλο piconet με κατάλληλη εφαρμογή. (Προσοχή!!! Ένας master δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα κύρια συσκευή σε δύο piconets, ενώ για τους slaves δεν υπάρχει τέτοια περιορισμός).



Σχήμα 3.3a: Δίκτυο διασποράς red=master, green=slave, blue=parking

Είναι αξιοσημείωτο το ότι μια συσκευή που τρέχει το πρωτόκολλο BLE μπορεί να αντέξει για μήνες χωρίς επαναφόρτιση της μπαταρίας, την ώρα που το κλασικό Bluetooth αντέχει μόλις κάποιες μέρες χωρίς επαναφόρτιση. Αυτό μπορεί να φανεί κι από την δομή της στοίβας του BLE σε σχέση με τον προκάτοχο του έχοντας ως στόχο την αποσυμφόρηση της μονάδας επεξεργασίας από πολύπλοκες εντολές και διαδικασίες και ταυτόχρονα την απαίτηση λιγότερης μνήμης για την αποθήκευση των εκτελούμενων λογισμικών (firmware).

Η στοίβα του Bluetooth Low Energy (βλ. Σχήμα 2.3) χωρίζεται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη ονομάζεται controller και η δεύτερη host. Αυτό πρακτικά γίνεται επειδή οι δύο αυτές κατηγορίες σχεδιάζονται ξεχωριστά και στη συνέχεια εφαρμόζονται μαζί για να συνθέσουν το πρωτόκολλο.



Σχήμα 2.3β: Στοιβα BLE

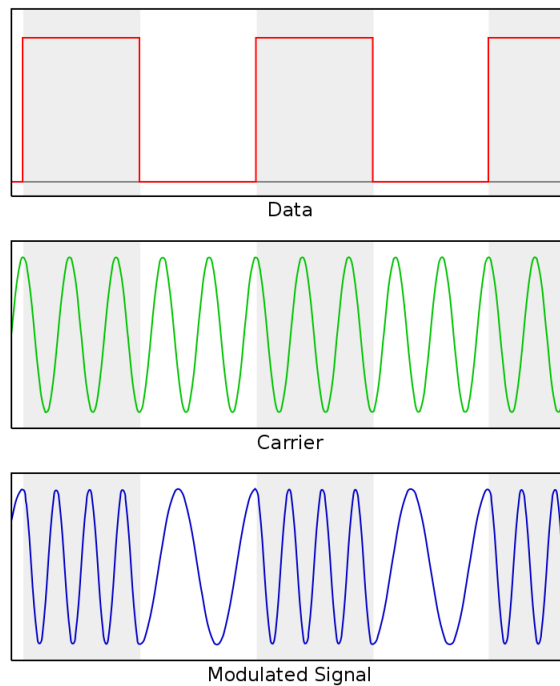
Βλέπουμε ότι η στοίβα του BLE χωρίζεται σε 3 μεγάλες κατηγορίες. Τον controller, τον host και το application. Στη συνέχεια θα γίνει η περιγραφή των στρωμάτων και πως αυτά αλληλοεπιδρούν για να συνθέσουν τελικώς το BLE.

2.3.1. Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο είναι το κύκλωμα στο οποίο υλοποιούνται οι φυσικές συνδέσεις έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Το bandwidth που χρησιμοποιεί ονομάζεται αλλιώς και ISM (industrial, scientific and medical) και ανήκει στην οικογένεια των UHF συχνοτήτων. Σε αντίθεση με το κλασσικό Bluetooth, το BLE διαθέτει 40 κανάλια τα οποία διανέμονται επάνω στο ISM φάσμα με εύρος 2 MHz το καθένα αρχίζοντας από τα 2.402 GHz (για αποφυγή παρεμβολών με γειτονικές περιοχές) δηλαδή:

$$f_c = 2.402 + 2k, k = 0,1,2 \dots 39, \text{έως τα } 2.4815 \text{ GHz}$$

Η μείωση των διαθέσιμων καναλιών έγινε έτσι ώστε να μπορεί να αυξηθεί το εύρος συχνοτήτων κάθε καναλιού πετυχαίνοντας έτσι μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο και αποφεύγοντας διακαναλικές παρεμβολές. Για την αποστολή και τη λήψη των δεδομένων χρησιμοποιείται από το πρωτόκολλο μία παραλλαγή της ψηφιακής διαμόρφωσης FSK (Frequency Shift Keying) που ονομάζεται GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) η οποία χρησιμοποιεί ένα γκαουσιανό φίλτρο στο τέλος έτσι ώστε να ομαλοποιούνται οι μεταβάσεις από ένα σύμβολο σε κάποιο άλλο αποφεύγοντας έτσι την πιθανότητα να έχουμε διασυμβολική παρεμβολή στον δέκτη εξαιτίας της απότομη αλλαγής των συμβόλων, κατά τα άλλα η κωδικοποίηση είναι ακριβώς η ίδια όπως στην FSK, δηλαδή κάθε bit ή σύμβολο κωδικοποιείται με ένα σήμα διαφορετικής συχνότητας το καθένα διατηρώντας όμως το ίδιο πλάτος. Ως θεμελιώδης συχνότητα για να γίνει η FSK θεωρείται η κεντρική συχνότητα του εκάστοτε καναλιού.



Σχήμα 2.3.1: FSK διαμόρφωση

Ο πομπός οφείλει να μεταδίδει σήμα ισχύος έως 10 dBm ενώ έχει προβλεφθεί από τους κατασκευαστές του κι ένα κάτω όριο περί τα -20 dBm έτσι ώστε η οποιαδήποτε συσκευή μεταδίδει

μέσω του πρωτοκόλλου BLE να είναι ορατή από τον δέκτη ο οποίος προφανώς βρίσκεται μέσα στην ακτίνα που ορίζει το πρωτόκολλο.

Από την άλλη πλευρά και ο δέκτης πρέπει να ακολουθεί κάποιους συγκεκριμένους κανόνες για την διεξαγωγή της ομαλής λήψης των πακέτων πληροφορίας. Η ευαισθησία στον δέκτη πρέπει να είναι στην χειρότερη περίπτωση ίση με -70dBm και ο λόγος των λαθών τίθεται στα 0.1%

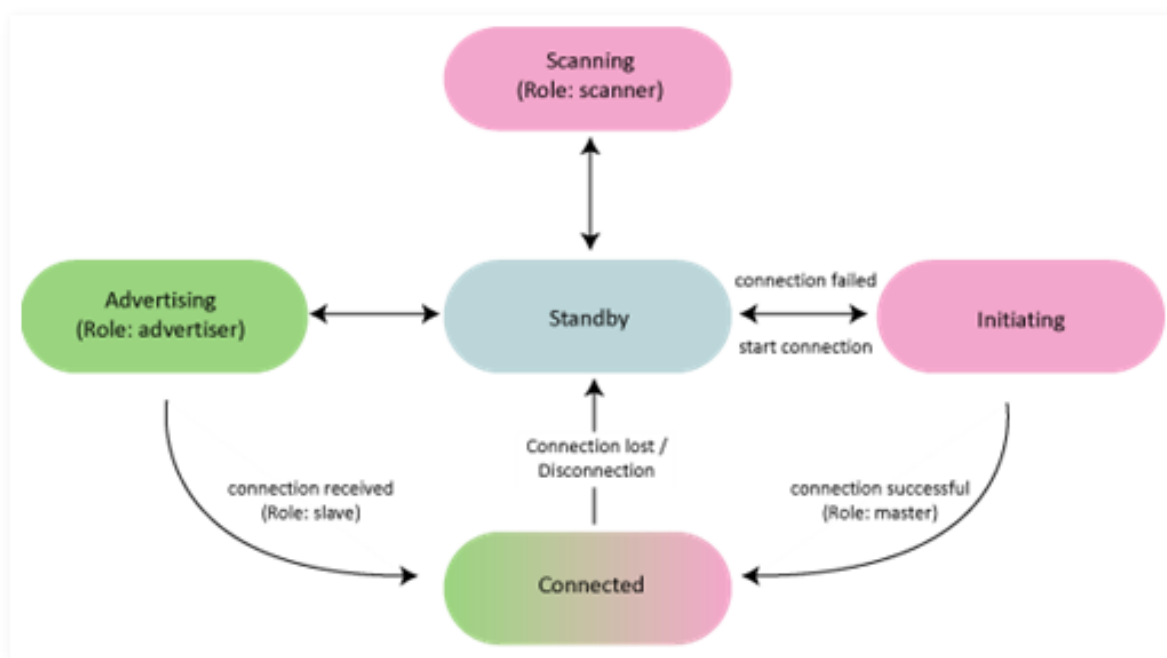
Τυπικά η ταχύτητα μετάδοσης τίθεται ίση με 1Mbps στην καλύτερη περίπτωση όταν απλά στέλνονται bits χωρίς την παρουσία κάποιας εφαρμογής. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η ταχύτητα μετάδοσης μειώνεται αισθητά όταν ο επεξεργαστής που χειρίζεται το πρωτόκολλο τρέχει παράλληλα και κάποια εφαρμογή για επεξεργασία των πακέτων προς αποστολή.

2.3.2 Επίπεδο ζεύξης

Το επίπεδο Ζεύξης δεδομένων στο εκάστοτε πρωτόκολλο είναι υπεύθυνο για να καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο δύο τερματικά-συσκευές πρέπει να εκμεταλλευτούν το φυσικό επίπεδο (κύκλωμα) προκειμένου να επιτευχθεί η μεταξύ τους σύνδεση και επικοινωνία. Το στρώμα αυτό ελέγχει όλες τις πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται η συσκευή. Οι καταστάσεις αυτές είναι: standby, advertising, scanning, initiating ή connected.

- Αρχικά δύο συσκευές που θέλουν να επικοινωνήσουν μέσω του πρωτοκόλλου BLE βρίσκονται σε θέση ετοιμότητας (standby)
- Η κατάσταση advertising χρησιμοποιείται από μία συσκευή όταν εκείνη θέλει να συνδεθεί με μία άλλη. Διαφημίζει δεδομένα έτσι ώστε κάποια απομακρυσμένη συσκευή που βρίσκεται σε κατάσταση scanning να μπορέσει να την εντοπίσει
- Η επιλογή scanning προτρέπει τη συσκευή να «ακούσει» για τυχόν άλλες συσκευές-διαφημιστές για την υλοποίηση της μεταξύ τους σύνδεση

- Η επόμενη κατάσταση που συναντάμε είναι η initiating. Σε αυτή τη φάση η scanner συσκευή απαντά στην advertising με αίτημα σύνδεσης (connection request)
- Σε περίπτωση που η συσκευή διαφημιστής απαντήσει στο αίτημα σύνδεσης με αποδοχή αιτήματος (clear to send) οι δύο συσκευές πλέον βρίσκονται σε «κατάσταση σύνδεσης» (connected)



Σχήμα 2.3.2: Καταστάσεις στο επίπεδο ζεύξης

Η μηχανή καταστάσεων του Link Layer μπορεί να βρίσκεται σε μία μόνο κατάσταση. Επιτρέπεται, όμως, να υπάρχουν περισσότερες της μίας μηχανής καταστάσεων, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να βρίσκεται σε διαφορετική κατάσταση. Στην αρχική έκδοση του BLE (4.0), υπήρχαν κάποιοι περιορισμοί ως προς τις καταστάσεις, στις οποίες οι διάφορες μηχανές καταστάσεων μπορούσαν να βρίσκονται ταυτόχρονα. Με λίγα λόγια, μια συσκευή δεν επιτρεπόταν να είναι ταυτόχρονα master και slave, ενώ μια συσκευή ήδη σε ρόλο slave δεν μπορούσε να είναι ταυτόχρονα slave σε άλλη σύνδεση. Δηλαδή, ένας master είχε τη δυνατότητα να συνδέεται με πολλούς slaves, αλλά ένας slave δεν μπορούσε να συνδέεται παρά μόνο με έναν

master. Παρόλα αυτά υπάρχει όπως επισημάναμε στα προηγούμενα να κατέχει μία συσκευή και τους δύο ρόλους, αλλά με τον σχεδιασμό μίας κατάλληλης εφαρμογής.

2.3.3 HCI

Το HCI (Host controller interface) αποτελεί μία διεπαφή επικοινωνίας μεταξύ του controller και του host μέσω ενός προτυποποιημένου interface. Σε αυτό το στρώμα χρησιμοποιούνται διάφορα πρωτόκολλα ενσύρματης μεταφοράς δεδομένων (UART, USB, SPI)-τα οποία και θα αναλυθούν στη συνέχεια- έτσι ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση και η μεταφορά των εντολών ,δεδομένων από τον controller στον host.

2.3.4 L2CAP

Ακριβώς πάνω από το HCI μπορούμε να δούμε το Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP). Το συγκεκριμένο στρώμα είναι υπεύθυνο για την παροχή υπηρεσιών πολύπλεξης στα ανώτερα στρώματα καθώς και για τον θρυμματισμό-ανασύνθεση πακέτων που δεν μπορούν να σταλθούν ως ένα από τα πιο κάτω επίπεδα.

2.3.5 Attribute Protocol

Ανεβαίνοντας επίπεδο συναντάμε το Attribute Protocol το οποίο έχει ως στόχο να ορίσει και να εκθέσει χαρακτηριστικά (attributes) τα οποία περιγράφουν όλη τη πληροφορία που χρειάζεται να έχει μία συσκευή που ακολουθεί το BLE έτσι ώστε να συνδεθεί με μία άλλη. Επίσης αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για να ξεκινήσουν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες έτσι ώστε μία συσκευή (client) να μπορεί να εντοπίσει και να αναγνωρίσει attributes κάποιας άλλης απομακρυσμένης συσκευής (server) που τρέχει πάνω στο ίδιο πρωτόκολλο.

Ένα attribute μπορεί να αποδοθεί και να κατανοηθεί ως ένα πλαίσιο δεδομένων το οποίο χωρίζεται σε τρεις επιμέρους οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- Attribute Value : Αποτελεί το κύριο μέρος ενός attribute και καταλαμβάνει την πιο μεγάλη έκταση στην αρχιτεκτονική του. Έχει άνω όριο τα 512 bytes αλλά η

πληροφορία αυτού του πεδίου δεν ενδιαφέρει πολύ στην παρούσα φάση το συγκεκριμένο layer. Αξίζει όμως να αναφερθούμε στη σημασία των αδειών (permissions) οι οποίες ενθυλακώνονται μέσα στο value. Οι άδειες καθορίζουν το κατά πόσο ένα attribute είναι διαθέσιμο για διάβασμα (read) ή επεξεργασία (write) αλλά και άλλα χαρακτηριστικά όπως η μετάδοση πάνω από κρυπτογραφημένα κανάλια ή όχι. Αυτή η επιλογή γίνεται σε πιο πάνω επίπεδα και το περιεχόμενο της δεν ενδιαφέρει καθόλου το ATT

- Attribute Type: Το πεδίο Type καθορίζεται με τη βοήθεια ενός Universally Unique Identifier (UUID). Ένα UUID είναι ένας αριθμός μήκους 128 bits ή και μικρότερος (στο BLE μπορεί να φτάσει και τα 16 bits όπως ορίζεται από την Bluetooth SIG) και μας βοηθάει να κατηγοριοποιούμε τα attributes ανάλογα με τις λειτουργίες που προσβέουν, δίνοντας φυσικά την ικανότητα στο προγραμματιστή να φτιάξει δικές του κατηγορίες-τύπους attributes ορίζοντας τα δικά του UUID στο πιο πάνω επίπεδο GATT το οποίο θα περιγράψουμε στη συνέχεια
- Attribute Handle: Αποτελεί έναν μόνιμο αριθμό ο οποίος ορίζει μοναδικά κάποιο attribute (ειδικά στην περίπτωση που το UUID ενδέχεται να είναι ίδιο για δύο ή παραπάνω attributes σε μία συσκευή). Μπορούμε δηλαδή δούμε το πεδίο αυτό σαν τη διεύθυνση ενός attribute

2.3.6 Security Manager Protocol

Στο ίδιο επίπεδο (Σχήμα 3) με το ATT protocol βρίσκεται και το Security Manager Protocol (SMP). Σε αυτό το επίπεδο ορίζονται οι διαδικασίες για να δημιουργηθούν και να ανταλλαχθούν τα απαραίτητα κλειδιά κρυπτογράφησης για να διασφαλισθεί η ασφαλής μετάδοση των πληροφοριών από μια συσκευή σε μία άλλη. Η ασφάλεια στη σύνδεση είναι πολύ σημαντική διότι χωρίς τη χρήση κλειδιών ενδέχεται κάποιος κακόβουλος χρήστης να «ακούει» και να υποκλέπτει τη συνομιλία δύο συσκευών.

Το SMP περιγράφει όλες τις διαδικασίες και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του, απαιτούμενου από την εκάστοτε εφαρμογή, επίπεδου ασφάλειας. Ο αλγόριθμος

κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται είναι ο AES-128. Επίσης, το SMP σχετίζεται άμεσα με λειτουργίες του προτύπου, που βασίζονται σε κλειδιά κρυπτογράφησης, όπως οι διαδικασίες ζευγοποίησης και σύζευξης. Κατά τη διαδικασία της ζευγοποίησης, δύο συσκευές ανταλλάσσουν κατάλληλα κλειδιά, ώστε να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους πάνω από ένα ασφαλές, κρυπτογραφημένο κανάλι (link). Αν τα κλειδιά αυτά αποθηκευτούν στις συσκευές, τότε αυτές μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν ξανά, κατά την επόμενη σύνδεση, αναγνωρίζοντας, με τη βοήθειά τους, την απομακρυσμένη συσκευή. Σε αυτήν την περίπτωση οι συσκευές θεωρούνται συζευγμένες.

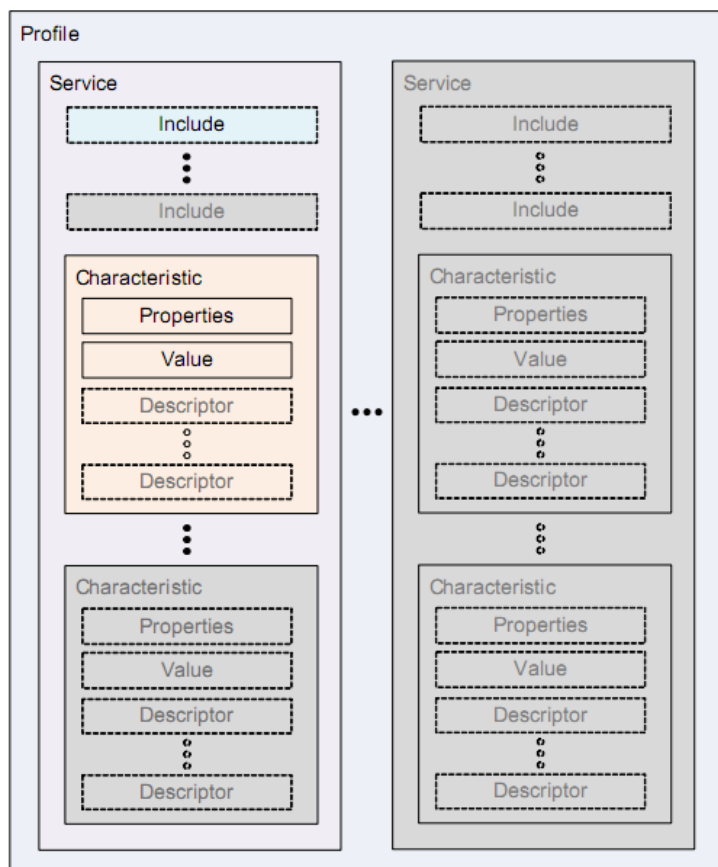
2.3.7 GATT

Ανεβαίνοντας στα στρώματα της στοίβας του BLE συναντάμε το Generic Attribute Profile. Εδώ χρησιμοποιούνται τα attributes που δημιουργούνται στο ATT όπως περιγράψαμε παραπάνω και ομαδοποιούνται έτσι ώστε να συνθέσουν μία ιεραρχία αποτελούμενη από δομές δεδομένα. Αποτελεί το κομμάτι εκείνο όπου ένας προγραμματιστής (developer) έρχεται σε άμεση επαφή. Θυμίζουμε ότι στο ATT έχουμε ορίσει τη έννοια και τον διαχωρισμό συσκευών σε πάροχο (server) και χρήστη (client). Έτσι κι εδώ μπορούμε να χωρίσουμε τις διαδικασίες που δομούν το συγκεκριμένο επίπεδο σε διαδικασίες που χρησιμοποιούνται από τον GATT client και αυτές που διαχειρίζεται ο GATT server.

- GATT client : Όταν μία συσκευή παίζει τον ρόλο του χρήστη , τότε αυτή ζητά πληροφορίες-δεδομένα από τον διαχειριστή κι έτσι του απευθύνει με τη μορφή πακέτων αιτήματα (requests) και λαμβάνει απαντήσεις (responses). Ο χρήστης δεν γνωρίζει τίποτα εκ των προτέρων, πριν επικοινωνήσει με τον διαχειριστή για τα χαρακτηριστικά (attributes) που εκείνος κατέχει.
- GATT server : Όταν μία συσκευή ορίζεται ως διαχειριστής , τότε αυτή δέχεται τα αιτήματα από τον χρήστη και στη συνέχεια στέλνει απαντήσεις δίνοντας του πληροφορίες για τα attributes που διαθέτει και αν πληροί τις προδιαγραφές να μπορέσουν να συνδεθούν.

Ιεραρχία του GATT- profile

Το GATT προφίλ ορίζει την δομή με την οποία ανταλλάσσονται δεδομένα μεταξύ server και client. Ένα GATT προφίλ απαρτίζεται από υπηρεσίες (services) και τα χαρακτηριστικά (characteristics) τα οποία και αποθηκεύονται με τη μορφή των attributes στον GATT server.



Σχήμα 2.4.7: Ιεραρχία GATT

Όπως περιγράφεται στο σχήμα κάθε προφίλ (profile) αποτελείται από αρκετές υπηρεσίες (services) οι οποίες με τη σειρά τους εσωκλείουν διάφορα χαρακτηριστικά ή αναφορές σε άλλες υπηρεσίες (με την εντολή include). Μία υπηρεσία μπορούμε να τη φανταστούμε σαν συλλογή από δεδομένα και χαρακτήρες έτσι ώστε να πετύχουμε μία επιθυμητή συνάρτηση-διεργασία στη συσκευή που χρησιμοποιεί το BLE. Μπορεί να διαριχθεί σε δύο κατηγορίες, την πρωτεύουσα και την δευτερεύουσα υπηρεσία. Η πρωτεύουσα υπηρεσία είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να παρέχει την απαραίτητη πληροφορία όσον αφορά την χρησιμότητα της συσκευής και γι' αυτό είναι ορατή στον χρήστη που ανταλλάζει πακέτα πληροφοριών μαζί της. Από την άλλη μεριά μία

δευτερεύουσα υπηρεσία περιέχει κάποιες βοηθητικές πληροφορίες στον χρήστη κι έτσι δεν εξωτερικεύεται καθόλου προς αυτόν. Στην πράξη οι δευτερεύουσες υπηρεσίες χρησιμοποιούνται σπάνια.

Στο εσωτερικό ενός service μπορούμε να διακρίνουμε χαρακτηριστικά (characteristics). Κάθε ένα χαρακτηριστικό περιέχει 3 πεδία.

- Ιδιοκτησίες (Properties): Στο πεδίο αυτό ορίζονται ποιες ενέργειες επιτρέπεται να εκτελέσει ο χρήστης στο συγκεκριμένο attribute. Έχει μήκος ενός byte (+1 bit που αναφέρεται σε κάποιον περιγραφέα, ο οποίος μπορεί να έχει επιπλέον τιμές για τα properties) και οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι οι εξής:
 - Broadcast
 - Read
 - Write
 - Notify
 - Indicate
 - Authenticated Signed Writes
- Τιμή (Value): Αποτελεί την τιμή του εκάστοτε χαρακτηριστικού. Εδώ αποθηκεύονται τα δεδομένα του profile και αυτό το attribute είναι προσβάσιμο από τον client αν θέλει να διαβάσει ή να γράψει σε αυτό σε περίπτωση που θέλει να ανακτήσει ή να μεταβάλλει δεδομένα ενός χαρακτηριστικού μέσα στο profile.
- Περιγραφέας (Descriptor): Μετά από το πεδίο value μπορούν να ακολουθήσουν μηδέν ή περισσότεροι descriptors για κάθε χαρακτηριστικό. Ορίζουν διάφορες συμπληρωματικές-βοηθητικές τιμές όπως για παράδειγμα τις μονάδες μέτρησης μεγεθών ή το εύρος που μπορεί να πάρει μία τιμή (όπως π.χ η θερμοκρασία) που εμφανίζονται στο profile . Το SIG έχει ορίσει μια σειρά από descriptors, με τύπους 16-bit ή 32-bit UUIDs, για κάποιες από τις πιο συνηθισμένες χρήσεις. Οι προγραμματιστές μπορούν να ορίσουν νέους descriptors για τις εφαρμογές τους, χρησιμοποιώντας 128-bit UUIDs για τους τύπους τους.

2.3.8 GAP

Το Generic Access Profile (GAP) βρίσκεται πάνω από το GATT στη στοίβα του BLE. Αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό επίπεδο καθότι είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό των ρόλων, των τρόπων λειτουργίας και των διαδικασιών μέσω των οποίων δύο συσκευές μπορούν να βρεθούν, να συνδεθούν και να ανταλλάξουν δεδομένα.

Στο GAP ορίζονται τέσσερις βασικοί ρόλοι, με τους οποίους μπορεί να λειτουργεί μία συσκευή που ακολουθεί το BLE.

1. Broadcaster: Ο ρόλος αυτός αποδίδεται σε μία συσκευή όταν εκείνη διαφημίζει (advertising) πακέτα προς πάσα κατεύθυνση. Απευθύνεται κυρίως σε συσκευές που βρίσκονται σε αδράνεια και ανά τακτά χρονικά διαστήματα δίνουν δεδομένα προς κάποια άλλη συσκευή, που βρίσκεται στο κοντινό τους πεδίο.
2. Observer: Η συσκευή, που ακολουθεί αυτόν το ρόλο, είναι σχεδιασμένη για να δέχεται πακέτα δεδομένων από άλλες συσκευές τύπου broadcaster. Μπορεί να «ακούσει» δεδομένα που ενθυλακώνονται σε διαφημιζόμενα πακέτα από τους παρόχους. Για παράδειγμα σε μια εφαρμογή για μέτρηση της θερμοκρασίας ένας broadcaster μπορεί να μεταδώσει κάποια στιγμή ένα σήμα μίας τιμής που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που μέτρησε ο προσαρτημένος σε αυτόν αισθητήρας και στη συνέχεια να τη μεταδώσει σε μία κεντρική μονάδα (observer) η οποία λαμβάνει αυτές τις τιμές για να τις συλλέξει αλλά όχι να επεξεργαστεί. Για να κάνουμε μία σύνδεση και με τα παραπάνω, ένας observer λειτουργεί σε scanning mode στο επίπεδο ζεύξης.
3. Central: Ο στόχος εδώ για την συσκευή είναι η να παίζει τον ρόλο του master σε μία σύνδεση με μία ή πολλές συσκευές, οι οποίες υποχρεωτικά θα είναι slave. Ο master λαμβάνει πακέτα από έναν αριθμό συσκευών και επιλέγει με ποιον ή ποιους θα αρχίσει να επικοινωνεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι το BLE σαν πρωτόκολλο είναι ασύμμετρο, το οποίο σημαίνει ότι οι υπολογιστικές απαιτήσεις (μνήμη-επεξεργαστής) που θα έχει ο master θα είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές του slave.
4. Peripheral: Αντίθετα με τον central, ο peripheral role αποδίδεται σε συσκευές που καλούνται να παίξουν τον ρόλο του slave στο επίπεδο ζεύξης. Χρησιμοποιεί τη λειτουργία διαφήμισης πακέτων έτσι ώστε κάποιο central role τερματικό να τις βρει και να πραγματοποιηθεί η μεταξύ τους επικοινωνία. Η μικρή υπολογιστική ισχύ που

χρειάζονται για να λειτουργήσουν τις καθιστά αρκετά φθηνές λύσεις για ασύρματη επικοινωνία στην αγορά.

Όπως έχει τονιστεί και παραπάνω εκτός από τους ρόλους μιας συσκευής, στο GAP ορίζονται οι τρόποι (modes) και οι διαδικασίες (procedures), με τους οποίους λειτουργούν οι συσκευές στο πρωτόκολλο και αναλύονται παρακάτω.

Mode	Application Roles	Applicable Peer Procedures
Broadcast	Broadcaster	Observation
Non-discoverable	Peripheral	N/A
Limited discoverable	Peripheral	Limited & General discovery
General discoverable	Peripheral	General discovery
Non-connectable	Peripheral, broadcaster, observer	N/A
Any connectable	Peripheral	Any connection establishment

Πίνακας 2.3.8.α: Συσχέτιση Τρόπων-Ρόλων

Τρόποι λειτουργίας:

- **Broadcast:** Όταν ο τρόπος (mode) λειτουργίας μίας συσκευής είναι broadcast τότε αυτή στέλνει δεδομένα κάνοντας advertising προς πάσα κατεύθυνση.
- **Non-discoverable:** Όταν η συσκευή μας είναι σε non discoverable mode τότε αυτή δεν μπορεί να εντοπιστεί από συσκευές
- **Limited discoverable:** Μια συσκευή σε limited discoverable mode μπορεί να ανακαλυφθεί από άλλες συσκευές, για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα(κάποια λίγα δευτερόλεπτα), με εκτέλεση από αυτές των general ή limited discovery procedures.
- **General discoverable:** Εδώ η συσκευή που έχει αυτόν τον τρόπο λειτουργίας είναι διαθέσιμη για εντοπισμό και για σύνδεση.
- **Non-connectable:** Μια συσκευή σε non-connectable mode δεν επιτρέπει συνδέσεις με άλλες συσκευές
- **.Any connectable:** Σε αυτή τη περίπτωση η συσκευή μας είναι έτοιμη να συνδεθεί με τον οποιαδήποτε της ζητηθεί.

Procedure	Application Role(s)	Applicable Peer Mode(s)
Observation	Observer	Broadcast
Limited discovery	Central	Limited discoverable
General discovery	Central	Limited & General discoverable
Name discovery	Peripheral, central	N/A
Any connection establishment	Central	Any connectable
Connection parameter update	Peripheral, central	N/A
Terminate connection	Peripheral, central	N/A

Πίνακας 2.3.8.β: Συσχέτιση Διαδικασιών-Ρόλων

Διαδικασίες:

- Observation procedure: Η διαδικασία αυτή εκτελείται σε μία συσκευή όταν αυτή ψάχνει για τα advertising πακέτα του broadcaster.
- Limited discovery procedure: Εδώ η συσκευή μας που εκτελεί αυτή τη διαδικασία, προσπαθεί να «ανακαλύψει» συσκευές, οι οποίες όμως βρίσκονται σε limited discoverable mode. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια κάποιων σημαιών (flags) που ελέγχει ο developer.
- General discovery procedure: Σε αντίθεση με την limited discovery διαδικασία, η συσκευή προσπαθεί να «δει» συσκευές που βρίσκονται είτε σε limited είτε σε general discoverable mode. Αποτελεί δηλαδή μια πιο γενική περίπτωση.
- Name discovery procedure: Στη συγκεκριμένη διαδικασία μία συσκευή προσπαθεί να ανακτήσει το GAP name service μίας συσκευής που βρίσκεται στην εμβέλεια της.
- Μια συσκευή εκτελεί το connection parameter update procedure, προκειμένου να αλλάξει τις παραμέτρους της σύνδεσής της με μια απομακρυσμένη συσκευή. Οι παράμετροι είναι αυτές που είδαμε παραπάνω, κατά την περιγραφή του επιπέδου ζεύξης. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί τόσο από ένα peripheral, το οποίο είναι ο slave της σύνδεσης, όσο και από ένα central, το οποίο είναι ο master της σύνδεσης, με χρήση εντολών στα επίπεδα HCI και L2CAP που παρέχονται στους hosts και οι οποίες στη

συνέχεια μετουσιώνονται σε πακέτα που ανταλλάσσονται μεταξύ των Link Layers των δύο συσκευών.

- **Terminate Connection procedure:** Αυτή η διαδικασία εκτελείται από μια περιφερειακή ή κεντρική, όταν αυτή θέλει να διακόψει τη υπάρχουσα σύνδεση με μία άλλη συσκευή με την οποία είχαν συνάψει δεσμό.

2.4 BLE vs ZigBee

Σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε τα δύο υπό εξέταση πρωτόκολλα για να καταλήξουμε εν τέλει σε αυτό που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής που θέλουμε να σχεδιάσουμε-κατασκευάσουμε. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές στις επιδόσεις των πρωτοκόλλων BLE και ZigBee:

Technical Specification	ZigBee	Bluetooth Low Energy
Εμβέλεια (θεωρητική) σε LOS συνθήκες	10-20 m	>20 m
Ρυθμός Μετάδοσης over the air	250 Kbits/s	1Mbits/s
Ρυθμός μετάδοσης πάνω από εφαρμογή (application throughput)	110 Kbits	270 Kbits/s
Ενεργές συνδέσεις	240 κόμβοι	έως 7 slaves
Συχνότητα λειτουργίας	2.45 GHz (ISM)	2.45 GHz (ISM)
Ασφάλεια	128-bit AES	128-bit AES
Καταναλισκόμενη ισχύς (τυπικές τιμές)	0.001-0.1 Watts	0.01-0.05 Watts
Τοπολογία δικτύου	Mesh network	Scatternet

Πίνακας 2.4: BLE vs ZigBee

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να καταλάβουμε ότι το BLE έχει το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης τόσο στον αέρα όσο και αν τρέχει παράλληλα κάποια εφαρμογή, ενώ το ZigBee έχει από τη πλευρά του καλύτερη συμπεριφορά ως προς τους πολύ περισσότερους κόμβους που μπορούν να συνυπάρξουν σε ένα μόλις δίκτυο.

Για την εφαρμογή μας κύριος στόχος είναι η επίτευξη ενός όσο το δυνατόν καλύτερου ρυθμού μετάδοσης για τα αρκετά αναλογικά σήματα που έρχονται σαν είσοδοι στο σύστημα μας και πρέπει να σταλούν με γρήγορα και με την απαιτούμενη αξιοπιστία. Επιπλέον τη δεδομένη χρονική στιγμή μας ενδιαφέρει μια σύνδεση συσκευής προς συσκευή και όχι η σύσταση κάποιου μεγάλου δικτύου για διαμοιρασμό της επικοινωνίας. Όλα αυτά μας οδήγησαν στην επιλογή του πρωτοκόλλου BLE ως το καταλληλότερο για να πραγματοποιήσουμε την κατασκευαστική μας εργασία.

3. Το Σύστημα Καταγραφής και Επεξεργασίας Δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

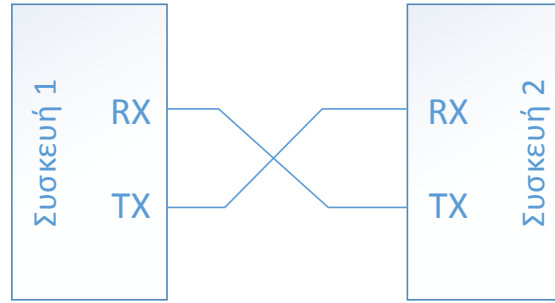
Στην ενότητα αυτή αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στις διάφορες τεχνολογίες και πρωτόκολλα σειριακής επικοινωνίας τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια της εργασίας. Έπειτα παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης του υποσυστήματος απόκτησης δεδομένων με έμφαση στις σχεδιαστικές επιλογές που έγιναν τόσο στην δομή του συστήματος όσο και στην επιλογή των κατάλληλων υλικών για την ικανοποίηση των προδιαγραφών που είχαν τεθεί.

3.2 Πρωτόκολλα Σειριακής Επικοινωνίας

Η σειριακή επικοινωνία, δηλαδή η επικοινωνία δύο συσκευών κατά την οποία οι συσκευές ανταλλάσσουν μόνο ένα bit δεδομένων κάθε χρονική στιγμή, έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται πλέον στην πλειοψηφία των εφαρμογών που απαιτούν ψηφιακή επικοινωνία. Εξαιρέση δεν αποτελούν και οι διάφορες μονάδες (υποκυκλώματα) του συστήματος απόκτησης δεδομένων που παρουσιάστηκε παραπάνω, οι οποίες χρησιμοποιούν πρωτόκολλα σειριακής επικοινωνίας προκειμένου να ανταλλάσσουν δεδομένα. Ακολουθεί λοιπόν μία συνοπτική παρουσίαση των πιο συνηθισμένων πρωτόκολλων και τεχνολογιών σειριακής επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

3.2.1 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)

Ο UART δεν αποτελεί κάποιο πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας αλλά πρόκειται για μια τεχνολογία πομποδέκτη ο οποίος μπορεί να υλοποιήσει ένα πλήθος πρωτοκόλλων σειριακής επικοινωνίας όπως τα RS-232, RS-422 και RS-485. Η επικοινωνία πομπού και δέκτη γίνεται ασύγχρονα (χωρίς να υπάρχει κάποιο κοινό ρολόι) και στηρίζεται στον συγχρονισμό των διαφορετικών ρολογιών του πομπού και του δέκτη σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο πομποδέκτης UART είναι βασικό περιφερειακό στους περισσότερους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές/μικροελεγκτές. Η φυσική σύνδεση των δύο συσκευών που επικοινωνούν με UART στην πιο απλή της μορφή φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1: Σύνδεση συσκευών για επικοινωνία με χρήση του UART.

Η λειτουργία του πομπού βασίζεται σε ένα shift register ο οποίος μετατρέπει την προς αποστολή πληροφορία σε μια σειρά από bit. Στη συνέχεια τα bit της πληροφορίας στέλνονται με την παρακάτω πλαισίωση.

Start Bit	Data Bits	Parity Bit	Stop Bit(s)
1 Bit	5-9 Bits	1Bit	1-2 Bits

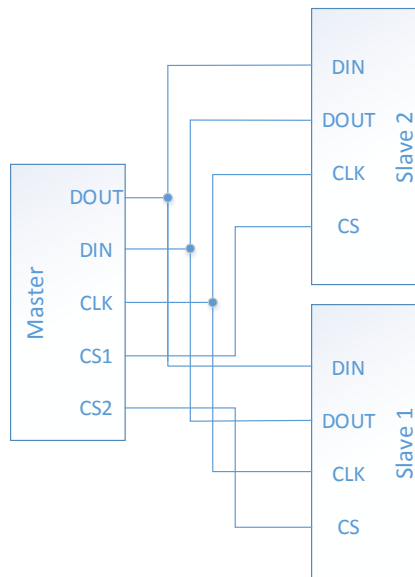
Πίνακας 3.1: Πλαισίωση δεδομένων για αποστολή με UART.

Αρχικά ο πομπός στέλνει ένα bit που καθορίζει την έναρξη της επικοινωνίας (start bit) το οποίο ακολουθείται από τα bit της πληροφορίας (τα οποία συνήθως είναι 8). Στη συνέχεια προαιρετικά στέλνετε ένα bit διόρθωσης σφαλμάτων (parity bit) το οποίο παίρνει την τιμή 0 ή 1 ανάλογα με το αν το πλήθος των bit πληροφορίας που είναι ίσα με το 1 είναι άρτιο ή περιττό. Τέλος ένα ή δύο bit στέλνονται για να σηματοδοτήσουν το τέλος της μετάδοσης (stop bits). Όσο διαρκεί η διαδικασία αποστολής ενός πλαισίου δεδομένων ειδικός μηχανισμός απαγορεύει την εγγραφή νέων δεδομένων στον shift register προκειμένου να μην υπάρχει επικάλυψη δεδομένων μέσα στον shift register.

Αντίστοιχα ο δέκτης περιμένει να λάβει το bit έναρξης της επικοινωνίας, συγχρονίζει το ρολόι του με αυτό του πομπού, και στη συνέχεια αποθηκεύει κάθε bit πληροφορίας που λαμβάνει σε ένα shift register. Όταν λάβει όλα τα bit πληροφορίας το περιεχόμενο του shift register γίνεται διαθέσιμο προς χρήση.

3.2.2 Serial Peripheral Interface (SPI)

Το SPI είναι ένα πρωτόκολλο σειριακής σύγχρονης επικοινωνίας. Για να επικοινωνήσουν δύο συσκευές με SPI συνδέονται σε συνδεσμολογία Master - Slave. Η Master συσκευή είναι αυτή που ξεκινάει την επικοινωνία, καθορίζει τις παραμέτρους της αλλά παρέχει και το ρολόι για τον συγχρονισμό των δύο συσκευών. Αφού ξεκινήσει η επικοινωνία, τόσο η Master όσο και η Slave συσκευή μπορούν να στείλουν και να λάβουν δεδομένα. Σε μία SPI επικοινωνία μπορούν να υπάρχουν και περισσότερες από μια συσκευές σε ρόλο Master η Slave, ωστόσο δεν συνηθίζεται να υπάρχουν περισσότερες από μία συσκευές σε ρόλο Master. Η master συσκευή επιλέγει με ποια slave συσκευή θέλει να επικοινωνήσει ορίζοντας την κατάσταση των chip select ακροδεκτών των slave συσκευών. Η σύνδεση δύο συσκευών σε Master - Slave για SPI επικοινωνία απεικονίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2: Σύνδεση συσκευών για επικοινωνία με χρήση του SPI.

Φυσικά με παρόμοιο τρόπο μπορούν να συνδεθούν και περισσότερες από δύο slave συσκευές.

Κάθε μία από τις δύο συσκευές έχει ένα shift register στον οποίο αποθηκεύει τα δεδομένα που θέλει να στείλει. Η διαδικασία αποστολής αυτών των δεδομένων αλλά και λήψης των προς αποστολή δεδομένων της άλλης συσκευής διαρκεί 8 παλμούς του ρολογιού της Master συσκευής και φαίνεται παρακάτω.

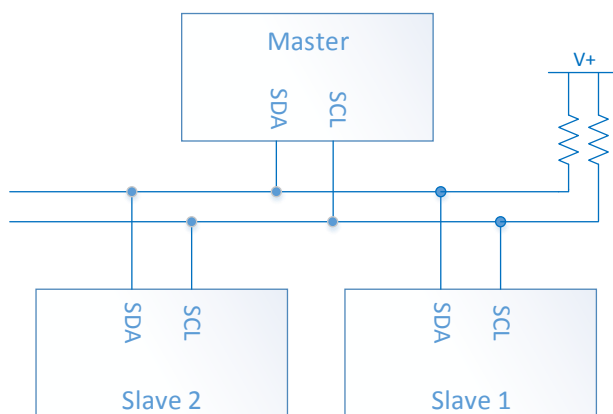
Master's Shift Register								Slave's Shift Register							
Clock 0															
M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
Clock 1															
S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Clock 2															
S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3	S2
Clock 3															
S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3
Clock 4															
S3	S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4
Clock 5															
S4	S3	S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5
Clock 6															
S5	S4	S3	S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6
Clock 7															
S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7
Clock 8															
S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M7

Πίνακας 3.2: Το περιεχόμενο των shift register της master και της slave συσκευής κατά την διάρκεια της SPI επικοινωνίας

Σε κάθε παλμό οι δύο shift registers περιστρέφονται κατά μία θέση και το LSB του κάθε shift register γίνεται MSB στον shift register της άλλης συσκευής. Έτσι μετά από 8 παλμούς του ρολογιού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία αποστολής και λήψης δεδομένων και τα δεδομένα των shift registers γίνονται διαθέσιμα προς χρήση.

3.2.3 Inter-Integrated Circuits (I2C)

Το πρωτόκολλο I2C αναπτύχθηκε από την Philips με στόχο την διασύνδεση σχετικά αργών περιφερειακών σε μητρικές κάρτες υπολογιστών. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα απλό δίαυλο στον οποίο συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους συσκευές και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η επικοινωνία με I2C έχει πολλές ομοιότητες με την SPI επικοινωνία. Είναι και αυτή μια σύγχρονη σειριακή επικοινωνία, στην οποία οι συσκευές συνδέονται σε συνδεσμολογία Master-Slave. Οι παράμετροι της επικοινωνίας ορίζονται και εδώ από την master συσκευή και ο συγχρονισμός των δύο συσκευών γίνεται με το ρολόι της master συσκευής. Η I2C μπορεί να είναι είτε μονόδρομη είτε αμφίδρομη. Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης δύο συσκευών στην I2C επικοινωνία.



Σχήμα 3.3: Σύνδεση συσκευών για επικοινωνία με χρήση του I2C.

Να σημειωθεί ότι η χρήση των pullup αντιστάσεων στους ακροδέκτες SDA και SCL όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα είναι απαραίτητη και οφείλεται στην open-drain συνδεσμολογία του I2C διαύλου.

Κάθε συσκευή που συνδέεται στον I2C δίαυλο έχει μία μοναδική διεύθυνση η οποία συνήθως έχει μέγεθος 7 bits (σπάνια χρησιμοποιούνται και 10 bits). Έτσι για την επικοινωνία δύο συσκευών (μίας master και μίας slave), η master συσκευή που πρέπει να καθορίσει τις παραμέτρους της επικοινωνίας εκτός από τα δεδομένα που θέλει να στείλει, πρέπει να στείλει και την διεύθυνση της slave συσκευής που συμμετέχει στην επικοινωνία. Η πλαισίωση των δεδομένων για I2C

επικοινωνία για την περίπτωση που η master συσκευή γράφει δεδομένα στη slave συσκευή περιγράφεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

S	SLAVE ADDRESS	W	A	DATA	A	DATA	NA	P
	From Master to Slave			A = Acknowledge				
				NA = Not Acknowledge				
	From Slave to Master			S = Start Condition				
				P = Stop Condition				

Πίνακας 3.3: Πλαισίωση δεδομένων για αποστολή με I2C (Master -> Slave).

Η master συσκευή στέλνει την συνθήκη εκκίνησης και στη συνέχεια την διεύθυνση της slave συσκευής με την οποία θέλει να επικοινωνήσει αλλά και σήμα το οποίο καθορίζει την διεύθυνση της επικοινωνίας (εγγραφή η ανάγνωση από την slave συσκευή). Στη συνέχεια η slave συσκευή στέλνει σήμα επιβεβαίωσης (Acknowledge) και περιμένει να λάβει τα δεδομένα από την master συσκευή. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η slave συσκευή να μη στείλει σήμα επιβεβαίωσης (Not Acknowledge). Τότε η master συσκευή στέλνει σήμα τερματισμού της επικοινωνίας.

Με απολύτως παρόμοιο τρόπο επιτυγχάνεται η επικοινωνία και όταν η master συσκευή θέλει να διαβάσει δεδομένα από την slave η όταν υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία. Τέτοια παραδείγματα φαίνονται παρακάτω.

S	SLAVE ADDRESS	R	A	DATA	A	DATA	NA	P
---	---------------	---	---	------	---	------	----	---

Πίνακας 3.3: Πλαισίωση δεδομένων για αποστολή με I2C (Slave -> Master).

S	SLAVE ADDRESS	W	A	DATA	A	S	SLAVE ADDRESS	R	A	DATA	NA	P
---	---------------	---	---	------	---	---	---------------	---	---	------	----	---

Πίνακας 3.3: Πλαισίωση δεδομένων για αποστολή με I2C (Master <-> Slave).

3.3 Προδιαγραφές Συστήματος

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων από ένα πλήθος αισθητήρων και η ασύρματη μετάδοση αυτών των δεδομένων αυτών σε κάποιο υπολογιστικό σύστημα. Το πρώτο στάδιο λοιπόν της σχεδίασης ήταν ο καθορισμός κάποιων προδιαγραφών τις οποίες θα έπρεπε να ικανοποιεί το σύστημα τόσο όσον αφορά τα τεχνικά του χαρακτηριστικά τα οποία θα διαμορφώσουν την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων, αλλά και όσον αφορά την υλοποίηση και κατασκευή του τελικού προϊόντος. Σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό των προδιαγραφών ήταν η δυνατότητα χρήσης του συστήματος αυτού σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Η πρώτη επιλογή που έπρεπε να γίνει ήταν το πλήθος των εισόδων δεδομένων που θα μπορούσε να υποστηρίξει το σύστημα. Λόγω του γεγονότος ότι σε πολλές εφαρμογές απαιτείται ένα αρκετά μεγάλο πλήθος αισθητήρων, ίδιων η διαφορετικών, για την μέτρηση και καταγραφή φυσικών μεγεθών, αποφασίστηκε το σύστημα να μπορεί να συλλέγει δεδομένα από 16 διαφορεικές εισόδους.

Το επόμενο ερώτημα που έπρεπε να απαντηθεί, ήταν το πλήθος των ψηφιακών δειγμάτων που θα λαμβάνονται από κάθε είσοδο, το οποίο θα καθόριζε και το μέγιστο εύρος ζώνης των σημάτων που θα μπορούσε το σύστημα να καταγράψει, αλλά και η ανάλυση αυτών των δειγμάτων. Εδώ, λαμβάνοντας υπ όψιν και τους περιορισμούς που έθετε η απαίτηση για ασύρματη μετάδοση των δεδομένων, αποφασίστηκε να λαμβάνονται 1000 ψηφιακά δείγματα ανά δευτερόλεπτο από κάθε είσοδο δίνοντας έτσι στο σύστημα ένα αναλογικό εύρος ζώνης τουλάχιστον 100Hz για κάθε είσοδο στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι εισοδοί. Επίσης για να περιοριστούν οι απώλειες στην ποιότητα του σήματος λόγω της μετατροπής του σε ψηφιακή μορφή χωρίς όμως να αυξηθεί πολύ σε όγκο η ψηφιακή πληροφορία, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ανάλυση 14 bit κατά την μετατροπή του σήματος.

Τέλος βασικό κριτήριο για την δυνατότητα χρήσης του συστήματος αυτού σε μεγάλο εύρος εφαρμογών ήταν οι διαστάσεις του τελικού προϊόντος αλλά και οι απαιτήσεις του σε τροφοδοσία. Αποφασίστηκε λοιπόν οι διαστάσεις του να κρατηθούν όσο το δυνατόν μικρότερες ώστε να εξασφαλιζετε η φορητότητα του αλλά και να υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας και σχετικά μεγάλης αυτονομίας με την χρήση μπαταριών.

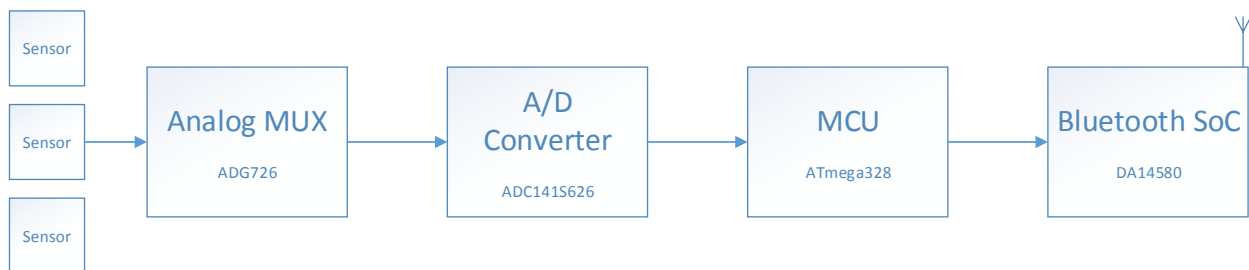
Συνοπτικά οι προδιαγραφές του υποσυστήματος απόκτησης δεδομένων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Προδιαγραφές Συστήματος	
Προδιαγραφή	Τιμή
Τάση τροφοδοσίας	3V ($\pm 1.5V$, Λειτουργία με μπαταρίες)
Πλήθος εισόδων δεδομένων	16 διαφορικές
Πλήθος δειγμάτων ανά είσοδο	1000 δείγματα
Ανάλυση δειγμάτων	14 Bit
Πρωτόκολλο Ασύρματης Επικοινωνίας	Bluetooth Low Energy (BLE)
Εύρος αναλογικής εισόδου	-1.5V ως 1,5V
Κατανάλωση Ρεύματος	Ελάχιστη δυνατή

Πίνακας 3.4: Οι προδιαγραφές του συστήματος.

3.4 Δομή Συστήματος

Η δομή του υποσυστήματος απόκτησης δεδομένων, όπως προέκυψε από τις προδιαγραφές που αναλύθηκαν παραπάνω, παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4: Η δομή του συστήματος.

Αρχικά, για να υπάρξει η δυνατότητα πολλαπλών εισόδων, χρησιμοποιήθηκαν 2 αναλογικοί πολυπλέκτες 16 σε 1 οι οποίοι μεταφέρουν κάθε φορά στην έξοδό τους το διαφορικό σήμα της επιλεγμένης εισόδου. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αναλογικός πολυπλέκτης ADG726 της Analog Devices ο οποίος συνδυάζει δυο πολυπλέκτες 16 σε 1 σε μια συσκευασία.

Στη συνέχεια το σήμα της επιλεγμένης από τον πολυπλέκτη εισόδου μετατρέπεται σε ψηφιακό με την χρήση ενός A/D converter. Για να ικανοποιηθούν τόσο οι απαιτήσεις σε ταχύτητα δειγματοληψίας και ανάλυση, όσο και η απαίτηση για όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση επιλέχθηκε ο A/D converter ADC141S626 της Texas Instruments.

Έπειτα, λόγω του σχετικά μεγάλου όγκου των δεδομένων που καλείται να διαχειριστεί ο ασύρματος πομποδέκτης, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός μικροελεγκτή ανάμεσα στον δειγματολήπτη και τον πομποδέκτη. Ο μικροελεγκτής αυτός αναλαμβάνει τόσο τον χειρισμό των εισόδων επιλογής του πολυπλέκτη, όσο και την τη συλλογή των ψηφιακών δεδομένων από τον A/D converter, μία πρώτη επεξεργασία τους και την αποστολή των επεξεργασμένων δεδομένων στο επόμενο στάδιο για την ασύρματη μετάδοσή τους. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται ο Atmel ATmega328.

Τέλος τα επεξεργασμένα ψηφιακά δεδομένα καταλήγουν σε ένα Bluetooth Low Energy chip το οποίο ενσωματώνει λειτουργίες μικροελεγκτή για επικοινωνία του με τις άλλες μονάδες του κυκλώματος αλλά και την τελική επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και πομποδέκτη για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων. Για αυτή την δουλειά επιλέχθηκε το DA14580 της Dialog Semiconductor.

3.5 Περιγραφή των Βασικών Μονάδων του Συστήματος

3.5.1 Ο πολυπλέκτης ADG726

Ο ADG726 είναι ένας διπλός 16 σε 1 CMOS αναλογικός πολυπλέκτης της Analog Devices. Ουσιαστικά πρόκειται για δύο ανεξάρτητους 16 σε 1 πολυπλέκτες στην ίδια συσκευασία με την δυνατότητα να συνδυαστούν και να δώσουν διαφορεική έξοδο. Η αντίσταση ανάμεσα στην επιλεγμένη είσοδο και την έξοδο είναι 4Ω ενώ ο χρόνος επιλογής εισόδου είναι 23ns. Η εσωτερική δομή του καθώς και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα.

Analog Devices ADG726	
Supply Voltage	1.8V to 5.5V (single)
On Resistance	4Ω (5V supply)
Analog Signal Range	0 to Supply Voltage (Rail to Rail)
Transition Time	23ns
Positive Supply Current	20μA max
Package	48 TQFP / 48LFCSP

Πίνακας 3.5: Τα βασικά χαρακτηριστικά του πολυπλέκτη ADG726 .

Η επιλογή κάποιου από τους δύο πολυπλέκτες γίνεται με την χρήση των ακροδεκτών CSA και CSB οι οποίοι ενεργοί χαμηλά. Η έξοδος του κάθε πολυπλέκτη καθορίζεται από 4 bit επιλογής στους ακροδέκτες A0-A3 και αλλάζει μόνο όταν ο ακροδέκτης WR είναι στο λογικό 0. Επίσης δίνεται δυνατότητα απενεργοποίησης όλου του chip μέσω του ακροδέκτη EN.

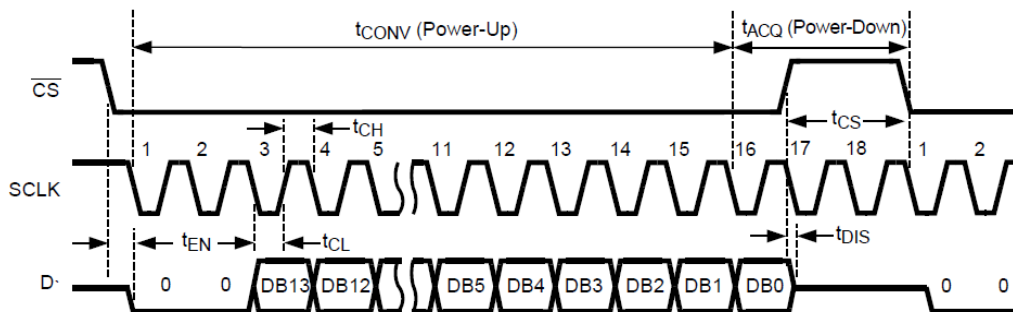
3.5.2 Ο ADC141S626 A/D Converter

Ο ADC141S626 είναι ένας A/D converter της Texas Instruments βασισμένος στην αρχιτεκτονική SAR (Successive Approximation Register). Έχει ανάλυση 14 bit (13,3 ENOB) και ταχύτητα δειγματοληψίας που μπορεί να φτάσει έως και τα 250 χιλιάδες δείγματα το δευτερόλεπτο. Διαθέτει διαφορική είσοδο η οποία εξασφαλίζει πολύ καλή απόρριψη του κοινού σήματος της εισόδου. Η αναλογική είσοδος του μπορεί να φτάσει μέχρι την τάση τροφοδοσίας ενώ για την λειτουργία του απαιτεί εξωτερική τάση αναφοράς. Η επικοινωνία του με τις υπόλοιπες συσκευές γίνεται μέσω SPI. Τέλος η χαμηλή του κατανάλωση τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές στις οποίες η τροφοδοσία γίνεται με μπαταρίες. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εσωτερική δομή, η διάταξη των ακροδεκτών καθώς και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ADC141S626.

Texas Instruments ADC141S626	
Analog Supply Voltage	2.7V to 5.5V (single)
Digital I/O Supply Voltage	2.7V to 5.5V (single)
Sample Rate	50kSPS to 250kSPS
Resolution	14 Bits (13.3 ENOB)
Reference Voltage	1V to Supply Voltage
Analog Input Voltage Range	0V to Supply Voltage
Clock Frequency	0.9MHz to 4.5MHz
Power Consumption	2mW (3V Supply Voltage)
	4μW (3V Supply – Power Down)
Package	10 VSSOP

Πίνακας 3.6: Τα βασικά χαρακτηριστικά του a/d converter ADC141S626 .

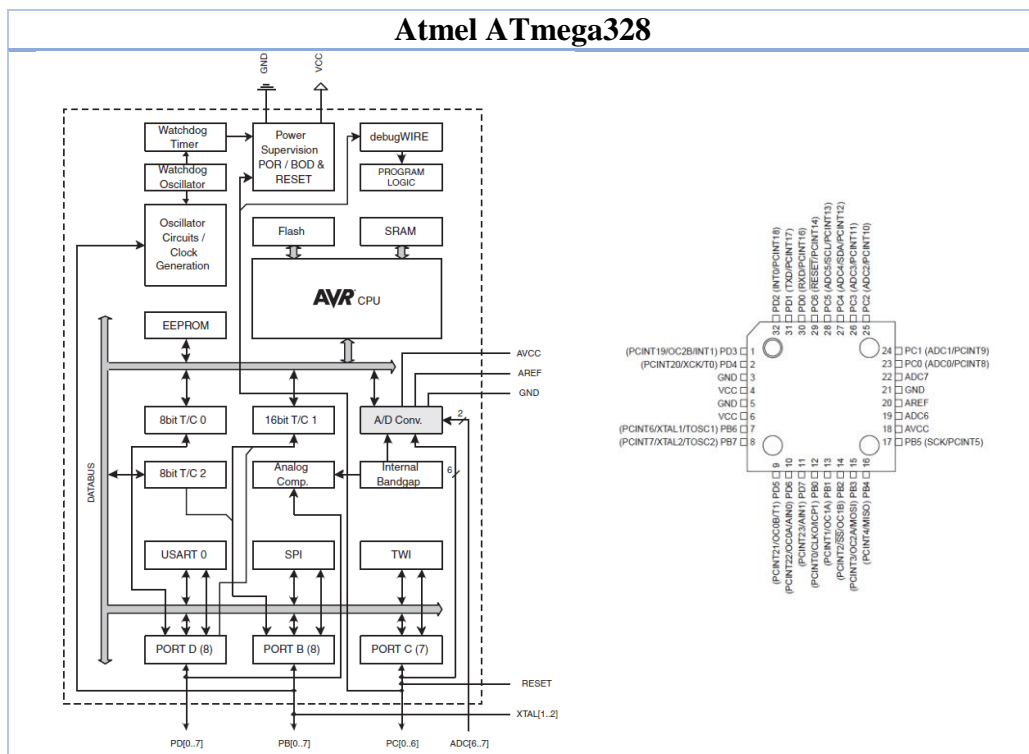
Η επικοινωνία με τον ADC141S626 είναι πολύ απλή αφού το μόνο που απαιτείται είναι δύο SPI συναλλαγές. Κατά την πρώτη επιστρέφονται τα περισσότερα σημαντικά bit του αποτελέσματος της μετατροπής ενώ κατά την δεύτερη επιστρέφονται τα λιγότερο σημαντικά bit του αποτελέσματος της μετατροπής όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.5: Το διάγραμμα χρονισμού του ADC141S626.

3.5.3 Ο μικροελεγκτής ATmega328

Ο ATmega328, μέλος της οικογένειας των ATmega της Atmel, είναι ένας 8 bit μικροελεγκτής αρχιτεκτονικής RISC. Ενσωματώνει πλήθος περιφερειακών (UART, SPI, ADC, I2C, Timers, Analog Comparator) ενώ η ταχύτητα λειτουργίας του μπορεί να φτάσει μέχρι τα 20MHz με χρήση εξωτερικού κρυστάλλου. Έχει σχεδιασθεί ώστε να έχει χαμηλή κατανάλωση ρεύματος η οποία φτάνει ως τα 0,75μΑ όταν βρίσκεται σε Power Save Mode. Παρακάτω φαίνεται η εσωτερική δομή του ATmega328, η διάταξη των ακροδεκτών του καθώς και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.



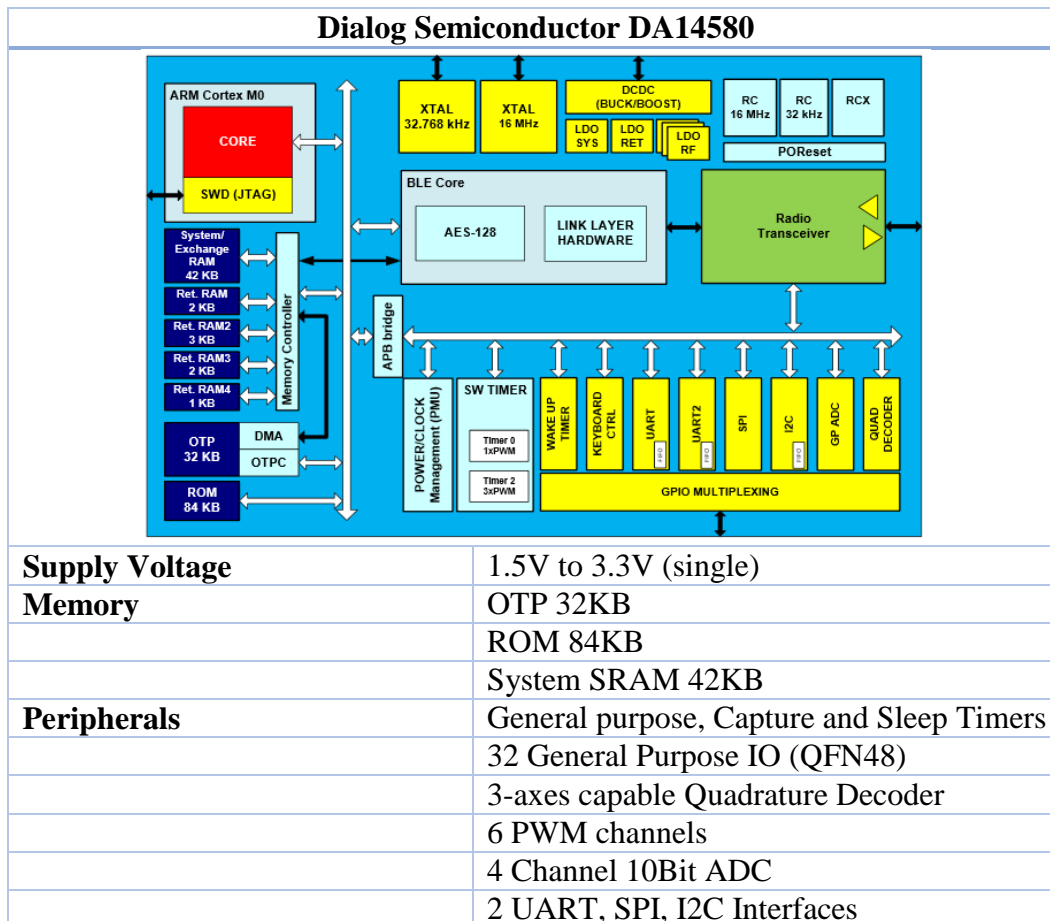
Supply Voltage	1.8V to 5.5V (single)
Memory	Flash 32KB EEPROM 1KB SRAM 2KB
Peripherals	Two 8Bit Timers/Counters One 16Bit Timer/Counter RTC with Separate Oscillator 6 PWM channels 8 Channel 10Bit ADC UART, SPI, I2C Interfaces
Speed	Internal RC oscillator at 8.0MHz Up to 20MHz with external crystal

Power Consumption	0.2mA in Active Mode
	0.1μA in Power Down Mode
Package	28 PDIP / 32 TQFP / 28 QFN / 32QFN

Πίνακας 3.7: Τα βασικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή ATmega328.

3.5.4 Το Bluetooth Low Energy SoC DA1580

Το DA1580 αποτελεί ένα συνδυασμό ενός Bluetooth Low Energy πομποδέκτη μαζί με ένα ARM Cortex M0 μικροελεγκτή. Ο Cortex M0, ο οποίος λειτουργεί στα 16MHz εκτελεί τόσο τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου του BLE όσο και όποια άλλη λειτουργία μικροελεγκτή προγραμματιστεί από τον χρήστη να εκτελέσει αφού ενσωματώνει ένα μεγάλο πλήθος περιφερειακών όπως A/D converter, timers, SPI και UART πομποδέκτες κ.α. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά καθώς και η εσωτερική δομή του DA1580 φαίνονται παρακάτω.



Radio Transceiver	2.4GHz CMOS Transceiver
	-20dBm output power in “Near Field Mode”
	-93dBm receiver sensitivity
Power Consumption	TX: 3.4mA, RX:3.7mA
Package	34 WLCP/ 40QFN/ 48 QFN

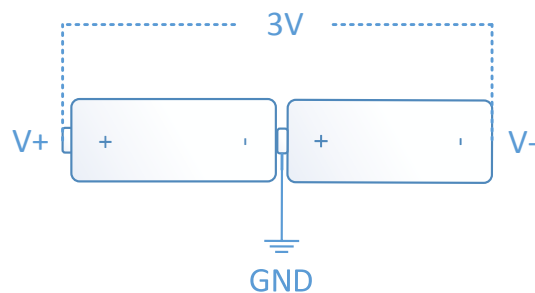
Πίνακας 3.7: Τα βασικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή ATmega328 .

3.6 Κυκλωματική Υλοποίηση

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί η κυκλωματική υλοποίηση του συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω. Για την καλύτερη κατανόηση του κυκλώματος η περιγραφή του θα γίνει τμηματικά και χωρίς να γίνει αναφορά σε όλες τις λεπτομέρειες. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην διασύνδεση των στοιχείων του κυκλώματος αλλά και στις σχεδιαστικές επιλογές που έγιναν. Τα πλήρη σχηματικά του κυκλώματος δίνονται στο παράρτημα.

3.6.1 Τροφοδοσία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κύκλωμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η τροφοδότησή του από μπαταρίες. Έτσι λοιπόν επιλέχθηκε το σύστημα να λειτουργεί με δύο μπαταρίες και συνολικό εύρος τροφοδοσίας 3V. Η χρήση δύο μπαταριών αντί μίας δεν επηρεάζει καθόλου την λειτουργία του κυκλώματος αφού όλα τα εξαρτήματα τροφοδοτούνται από το πλήρες εύρος της τάσης των μπαταριών αλλά το καθιστά ικανό να διαχειριστεί σήματα από διπλής τροφοδοσίας αισθητήρες χωρίς αυτά να χρειάζονται καμία επεξεργασία.



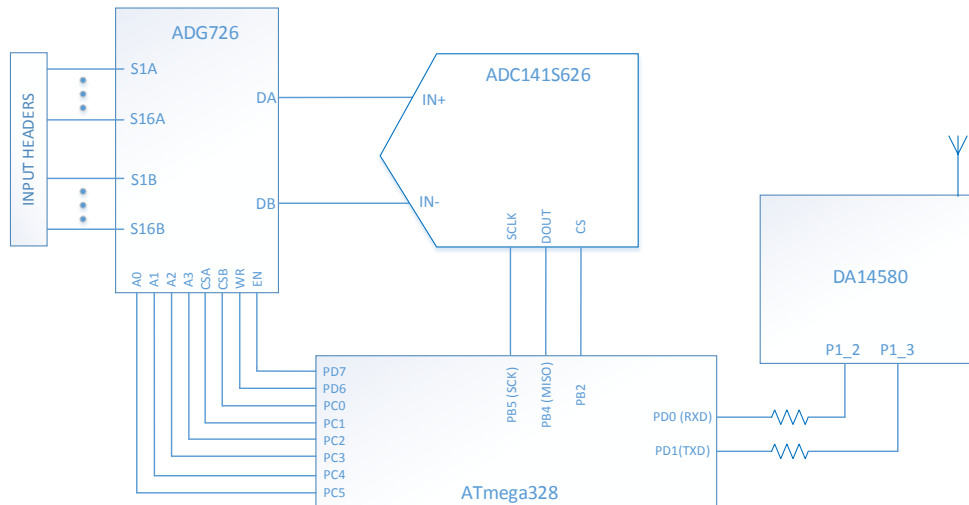
Σχήμα 3.6: Η μορφή της τροφοδοσίας του κυκλώματος.

Επίσης για να υπάρχει φιλτράρισμα της τάσης τροφοδοσίας και να αποφευχθούν τα προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει ο θόρυβος τροφοδοσίας στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τοποθετήθηκαν δύο παράλληλοι πυκνωτές ανάμεσα στον ακροδέκτη τροφοδοσίας κάθε ολοκληρωμένου και στο κάτω άκρο της τάσης τροφοδοσίας.

3.6.2 Είσοδος Σημάτων

Η είσοδος των προς καταγραφή σημάτων στο σύστημα γίνεται από ακροδέκτες οι οποίοι οδηγούν τα σήματα εισόδου στα 16 κανάλια του πολυπλέκτη. Τα σήματα αυτά μπορεί να έχουν εύρος από μερικά mV μέχρι και την τάση τροφοδοσίας και συχνότητα μέχρι μερικές εκατοντάδες Hz. Για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των σημάτων εισόδου και να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του θορύβου, σε κάθε διαφορετική είσοδο έχει προβλεφθεί και ένας τρίτος ακροδέκτης ο οποίος δίνει την δυνατότητα σύνδεσης των σημάτων εισόδου στην πλακέτα μέσω θωρακισμένων καλωδίων.

3.6.3 Διασύνδεση Συσκευών

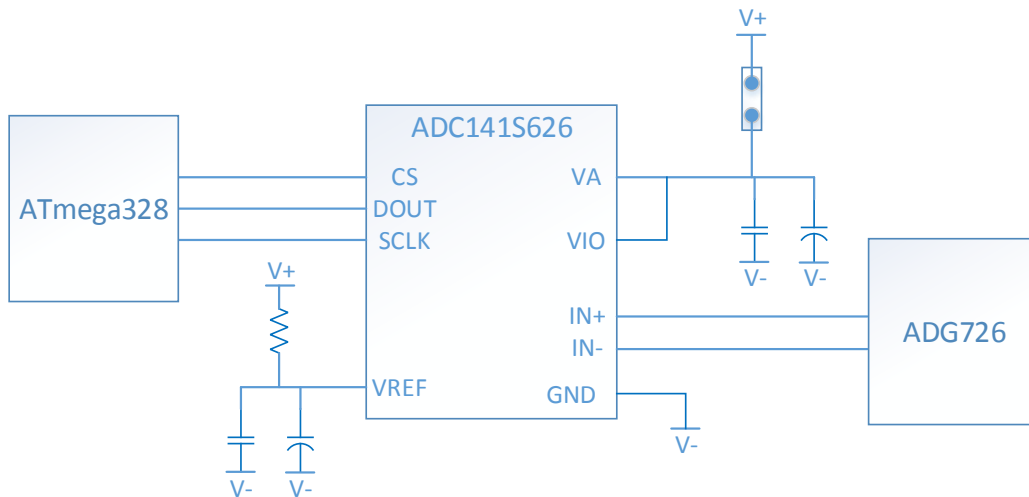


Σχήμα 3.6: Η διασύνδεση των διάφορων εξαρτημάτων του κυκλώματος.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται παρουσίαση της διασύνδεσης των διάφορων στοιχείων του κυκλώματος με έμφαση την ροή των δεδομένων τόσο στο αναλογικό όσο και στο ψηφιακό μέρος του κυκλώματος. Παραλείπονται τα διάφορα στοιχεία που απαιτούνται για την λειτουργία του κάθε εξαρτήματος ώστε να γίνει εμφανής η συνδεσμολογία που αφορά την ροή των δεδομένων από την αναλογική είσοδο μέχρι το σημείο όπου γίνεται η ασύρματη μετάδοσή τους.

3.6.4 Οι συνδέσεις του ADC141S626

Εκτός από την διασύνδεσή του με το υπόλοιπο κύκλωμα, σημαντική παράμετρος για την καλή λειτουργία του A/D converter είναι και η τάση αναφοράς του η οποία όπως έχει αναφερθεί ήδη απαιτείται να δοθεί εξωτερικά στον ADC141S626. Για να είναι εκμεταλλεύσιμο όλο το εύρος της τροφοδοσίας επιλέχθηκε σαν τάση αναφοράς το πάνω άκρο της τάσης τροφοδοσίας. Η σύνδεση της τάσης αναφοράς στον A/D converter γίνεται μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου για την απόρριψη του υψίσυχνου θορύβου. Επίσης η τροφοδότηση του ADC141S626 γίνεται μέσω ενός jumper ώστε να είναι δυνατή η απενεργοποίηση του, η οποία είναι αναγκαία κατά τον προγραμματισμό του ATmega328.

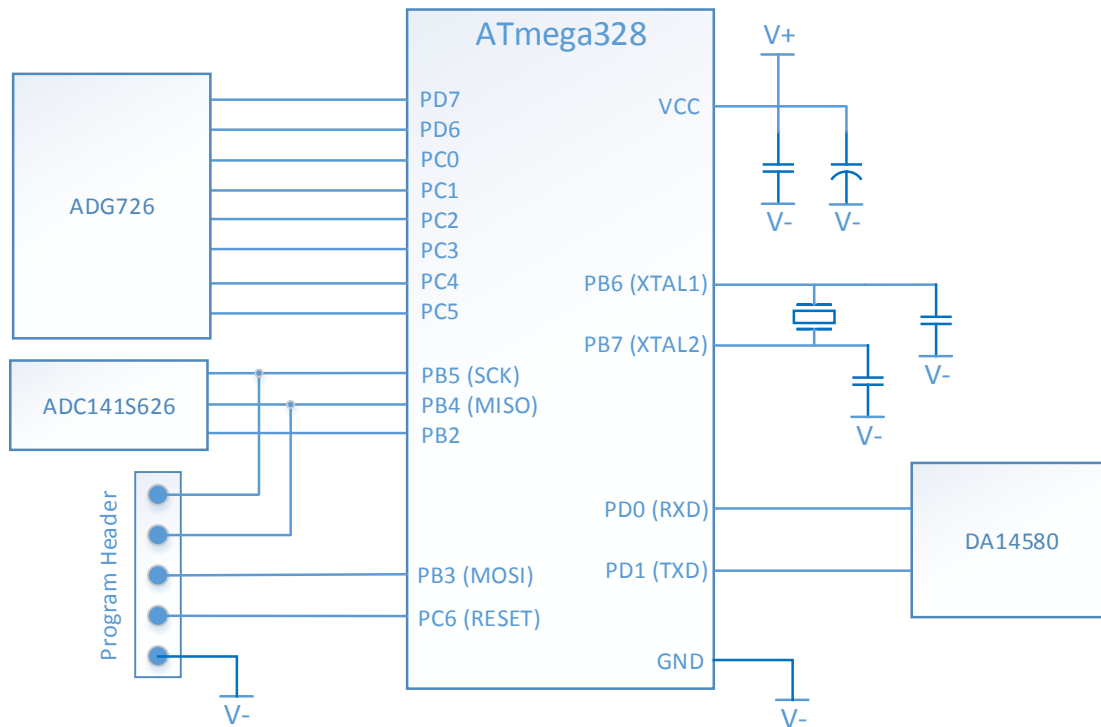


Σχήμα 3.7: Οι συνδέσεις του ADC141S626.

3.6.5 Οι συνδέσεις του ATmega328

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο ρόλος του ATmega328 στο σύστημα είναι να συλλέγει και να κάνει μια πρώτη επεξεργασία στα δεδομένα που παίρνει από τον A/D converter πριν τα στείλει στο DA14580 για την ασύρματη μετάδοση τους.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί επεξεργαστική ισχύ την οποία διαθέτει ο ATmega328 αφού έχει εσωτερικό ταλαντωτή στη συχνότητα των 8MHz. Παρόλα αυτά η κατανάλωση ρεύματος του ATmega328 όταν λειτουργεί σε τόσο μεγάλη συχνότητα είναι απαγορευτική για την παρούσα εφαρμογή. Έτσι χρησιμοποιήθηκε εξωτερικός κρύσταλλος προκειμένου η ταχύτητα του ATmega328 να περιοριστεί στα 3,8486MHz και να μειωθεί σημαντικά η κατανάλωσή του.

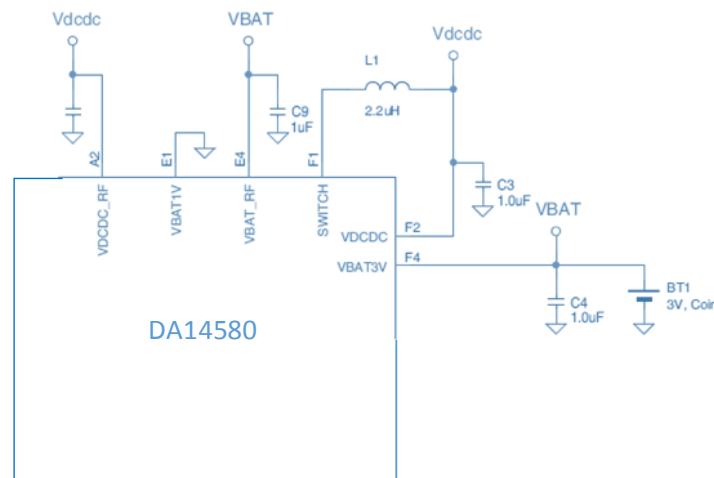


Σχήμα 3.7: Οι συνδέσεις του ATmega328.

Ο προγραμματισμός του ATmega328 γίνεται μέσω του SPI και ενός header ο οποίος καθιστά προσβάσιμους τους απαραίτητους ακροδέκτες όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα.

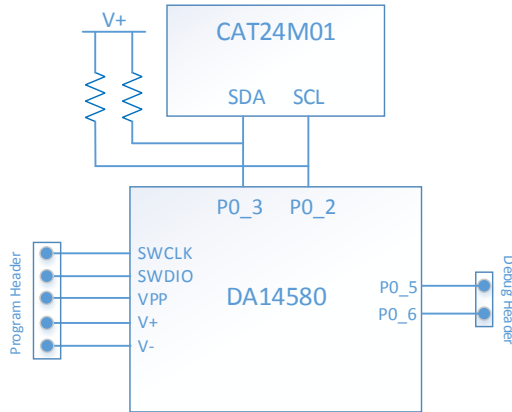
3.6.6 Οι συνδέσεις του DA14580

Το DA14580 αποτελεί ένα συνδυασμό μικροελεγκτή και πομποδέκτη Low Power Bluetooth. Για να καλύψει τις ανάγκες τροφοδοσίας τόσο των αναλογικών όσο και των ψηφιακών κυκλωμάτων που το απαρτίζουν, έχει ενσωματωμένο DC-DC converter καθώς και ξεχωριστούς LDO για κάθε κομμάτι του συστήματος. Για την σωστή λειτουργία αυτών των συστημάτων αλλά και την καλή λειτουργία του πομποδέκτη απαιτείται η εξωτερική σύνδεση ορισμένων στοιχείων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.8: Οι συνδέσεις για την τροφοδοσία του DA14580.

Για τον προγραμματισμό του DA14580 υπάρχουν δύο εναλλακτικές. Η πρώτη είναι η εγγραφή στην OTP μνήμη του, η οποία όμως όπως λέει και το όνομά της είναι μόνιμη και δεν αφήνει περιθώρια αλλαγής - βελτιστοποίησης του λογισμικού. Η δεύτερη είναι η σύνδεση μιας εξωτερικής μνήμης στην οποία ανατρέχει αυτόματα το DA14580 κάθε φορά που ξεκινά την λειτουργία του και αντιγράφει από εκεί το λογισμικό στην μνήμη του. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε χρήση μίας εξωτερικής I2C EEPROM μνήμης η οποία συνδέθηκε στο DA14580 με τον τρόπο που φαίνεται το διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.9: Οι σύνδεση της EEPROM και των ακροδεκτών προγραμματισμού του DA14580.

Για τον προγραμματισμό της EEPROM αλλά και για λόγους αποσφαλμάτωσης έχει προβλεφθεί να υπάρχει πρόσβαση στους απαραίτητους ακροδέκτες όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα.

Επίσης εκτός από τον κρύσταλλο των 16MHz ο οποίος είναι απαραίτητος για την λειτουργία του κυκλώματος, στο DA14580 συνδέθηκε και ένας δεύτερος κρύσταλλος στα 32kHz ο οποίος χρησιμοποιείται ως ρολόι του συστήματος όταν βρίσκεται σε sleep mode.

Τέλος όσον αφορά το κομμάτι του πομποδέκτη του DA14580 και της κεραίας που είναι απαραίτητη για την ασύρματη επικοινωνία γίνεται εκτενής ανάλυση στο επόμενο κεφάλαιο.

3.7 Προγραμματισμός Μικροελεγκτών

Βασικό κομμάτι του παραπάνω συστήματος αποτελούν οι δύο μικροελεγκτές (ο ATmega328 και ο ARM Cortex M0 που περιέχεται στο DA14580) οι οποίοι αναλαμβάνουν την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, όσο και την δημιουργία των κατάλληλων σημάτων για την λειτουργία του πολυπλέκτη και του A/D converter. Όπως γίνεται λοιπόν κατανοητό, ο προγραμματισμός των δύο αυτών μικροελεγκτών καθορίζει κατά πολύ την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι στόχος αυτής της εργασίας δεν ήταν να γραφεί ένα πλήρως αποδοτικό λογισμικό για τους δύο μικροελεγκτές αλλά να υπάρξει λογισμικό που να επιτρέπει την λειτουργικότητα του συστήματος.

3.7.1 Προγραμματισμός DA14580

Όσον αφορά το DA14580 και τον ARM Cortex M0 δεν έγινε ανάπτυξη πρωτότυπου λογισμικού στα πλαίσια αυτής της εργασίας αλλά χρησιμοποιήθηκε το ήδη υλοποιημένο από την κατασκευάστρια εταιρία Serial Port Service με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Έτσι το DA14580 διαβάζει συνεχώς δεδομένα από της UART θύρα του και αφού μαζέψει ικανό πλήθος δεδομένων δημιουργεί πακέτα και τα στέλνει μέσω Bluetooth σε όποια συσκευή είναι συνδεδεμένη μαζί του.

3.7.2 Προγραμματισμός ATmega328

Για τον ATmega328 αναπτύχθηκε ένα πολύ απλό λογισμικό το οποίο αναλαμβάνει τον χειρισμό του πολυπλέκτη, την συλλογή των δεδομένων του A/D converter και την αποστολή των δεδομένων στο Bluetooth soc μέσω της UART θύρας του. Συνοπτικά οι διαδικασίες που εκτελεί ο ATmega328 φαίνονται στο παρακάτω κομμάτι κώδικα. Ο πλήρης κώδικας του ATmega328 δίνεται στο παράρτημα.

```
int main(void)
{
    //Initialize ADG726
    mux_init();

    //Initialize ADC141S626
    adc_init();

    //Initialize UART
    uart_init(5);

    //Wait for DA14580 to connect
    _delay_ms(15000);

    //Forever
    while(1)
    {
        //For every input channel
        for (int i = 0; i<15; i++)
        {
            //Select the i channel
            select_channel(i);

            //Get a sample from the current channel
            sample = adc_get_sample();

            //Transmit the sample via UART
            UART_transmit(MSByte);
            UART_transmit(LSbyte);
        }
    }
}
```

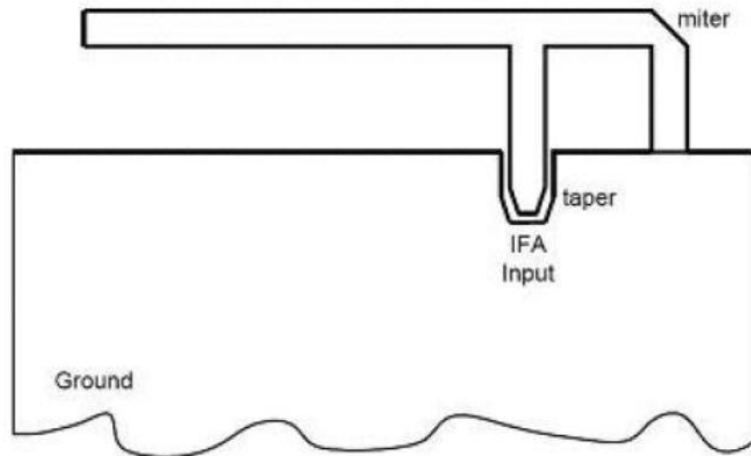
4. RF επικοινωνία-Κεραία

4.1 Εισαγωγή

Από τα μέσα της δεκαετίας του 90', ο τομέας των προσωπικών ασύρματων επικοινωνιών βρίσκεται σε συνεχή πρόοδο. Η ανάγκη για την ύπαρξη υπολογιστικά δυνατών, αξιόπιστων και συνάμα αποδοτικών συσκευών με παράλληλο στόχο την ελαχιστοποίηση του μεγέθους αυτών δεν θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστο το πεδίο των κεραιών. Εκεί ακριβώς στοχεύει και η τεχνολογία για την κατασκευή μιας κεραίας για να υποστηρίξει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων από το DA14580 που θα συζητήσουμε στη συνέχεια. Η κεραία που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ανήκει στην οικογένεια των τυπωμένων κεραιών και πιο ειδικά σε αυτή των κεραιών ανεστραμμένου F (Inverted-F Antenna) ή πιο απλά IFA. Οι IFA's θεωρούνται μία πολύ καλή και αξιόπιστη λύση που ακολουθεί την απαίτηση ως προς το μέγεθος ή την αποδοτικότητα και θα την συναντήσουμε σε πολλές σημερινές εφαρμογές, όπως στα κινητά τηλέφωνα, ταμπλέτες και έξυπνα ρολόγια.

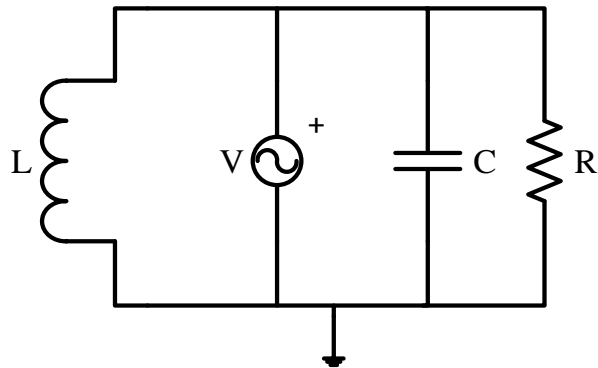
4.2 Θεωρία

Η κεραία ανεστραμμένου F πήρε το όνομα της εξαιτίας της γεωμετρίας της, αφού μοιάζει με ανάποδο F, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2α. Η διάταξη μίας IFA αναφέρεται σε δύο επίπεδα, τα οποία αποτελούνται συνήθως από χαλκό. Στο ενδιάμεσο επίπεδο τοποθετείται κάποιο διηλεκτρικό υλικό με διηλεκτρική σταθερά ϵ_r . Στο δεύτερο επίπεδο βρίσκουμε ένα επίπεδο γείωσης.



Σχήμα 4.2α

Στη θέση IFA Input εφαρμόζεται η τροφοδοσία της κεραίας από το chip. Μπορούμε προς το παρόν να θεωρήσουμε ότι η τροφοδοσία γίνεται ακριβώς σε αυτό το σημείο χωρίς κάποιο μηχανισμό προσαρμογής κι ότι σε αυτό το σημείο έχουμε συνθήκες τέλει προσαρμογής στα 50 Ω. Το λεπτό άνω στέλεχος που είναι παράλληλο με τη γη (ground) είναι αποτελεί τον ακτινοβολητή της κεραίας. Βρίσκεται σε μία απόσταση (ύψος) από τη γη και το μήκος του είναι ανάλογο του μήκους κύματος της τεχνολογίας που θέλουμε να ακολουθήσουμε. Αυτό το στέλεχος όμως είναι υπεύθυνο για την εισαγωγή μίας χωρητικότητας C, που δημιουργείται μεταξύ του άνω άκρου και της γείωσης. Αυτό αναπαρίσταται σε ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα στο σχήμα 4.2β. Όπως βλέπουμε το στέλεχος αυτό συνδέεται με τη γη μέσω ενός κάθετου στελέχους (shorting pin). Το στέλεχος αυτό εισάγει την απαραίτητη επαγωγή L στο σύστημα, έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η χωρητικότητα από τον ακτινοβολητή. Αυτό το κάνουμε ακριβώς για να πετύχουμε την καθαρά ωμική χαρακτηριστική αντίσταση των 50 Ω που απαιτείται στην τροφοδοσία.



Σχήμα 4.28

Για την τροφοδοσία θέλουμε L , C τέτοια ώστε:

$$\begin{cases} Z_0 = R + jX \\ X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \end{cases} \xrightarrow{R=50\Omega} Z_0 = 50 \Omega$$

Παρατηρούμε ότι η τροφοδοσία είναι πλησιέστερα με το βραχυκυκλωμένο στέλεχος απ' ότι με το άκρο του ακτινοβολητή (open end). Αυτό συμβαίνει ακριβώς για το λόγο που εξηγήσαμε παραπάνω, τη ισορροπία δηλαδή της επαγωγής με τη χωρητικότητα έτσι ώστε η μία να αναιρεί την άλλη και να αφήνει μονάχα το ωμικό φορτίο να προσδίδει την χαρακτηριστική αντίσταση στην είσοδο.

Το επίπεδο της γης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της κεραίας που καλούμαστε να κατασκευάσουμε. Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι με την εισαγωγή του βραχυκυκλωμένου στελέχους θα επάγονται ρεύματα από την τροφοδοσία προς τη γη. Το σύστημα κεραίας-γης μπορεί να παρομοιαστεί με ασύμμετρο δίπολο. Το μήκος της γης πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις, έτσι ώστε η κεραία να είναι λειτουργική και αποδοτική.

- Το μήκος της γης πρέπει να είναι περίπου ίσο με το $\lambda/4$ του μήκους κύματος που λειτουργεί η κεραία.
- Αν το μήκος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο της ποσότητας $\lambda/4$, τότε θα έχουμε προβλήματα κατευθυντικότητας της κεραίας.
- Αν πάλι το μήκος της κεραίας είναι σημαντικά μικρότερο από $\lambda/4$, τότε θα είναι πολύ δύσκολο να συντονίσουμε την κεραία μας στην επιθυμητή συχνότητα.

- Το πλάτος της γης θα πρέπει, θεωρητικά, να είναι άπειρο. Πρακτικά θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από $\lambda/4$

Η τοποθέτηση της τυπωμένης κεραίας πάνω στο επίπεδο θα πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν στην άκρη της πλακέτας κι αυτό για να πετύχουμε την επιθυμητή ομοιόμορφη κατευθυντική (omnidirectional) ιδιότητα της κεραίας ως προς την κατεύθυνση που ορίζει το μήκος του βραχυκυκλωμένου στελέχους.

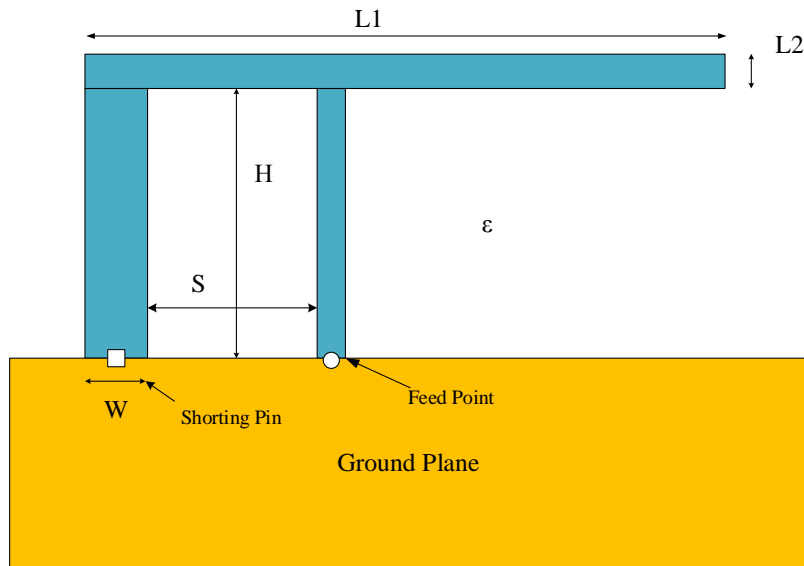
Εύρος συχνοτήτων

Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για την αξιολόγηση μίας κεραίας, αποτελεί το εύρος συχνοτήτων (bandwidth) το οποίο θα θέλαμε να καλύπτει όλες αυτές τις συχνότητες που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε για ασύρματη μετάδοση. Ιδιαίτερα στις IFA υπάρχουν τεχνικές σχεδίασης οι οποίες μπορούν να μας δώσουν τη δυνατότητα να διαχειριστούμε αυτό το μέγεθος ανάλογα με την εφαρμογή μας.

- Το εύρος συχνοτήτων επηρεάζεται αρκετά από το μέγεθος της γείωσης. Για παράδειγμα αν μικρύνουμε το μέγεθος της πλάκας της γης μπορούμε να μεγαλώσουμε το bandwidth (BW). Επίσης αν τοποθετήσουμε σχισμές στην πλάκα της γείωσης μπορούμε αντιθέτως να μειώσουμε το bandwidth.
- Ο παράγοντας ποιότητας Q είναι αντιστρόφως ανάλογος με το εύρος συχνοτήτων.
- Η απόσταση μεταξύ του στελέχους της τροφοδοσίας και του shorting pin μπορεί να μεταβάλλει το BW

Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού

Έστω η IFA του επόμενου σχήματος:



Εικόνα 4.2γ

Η συχνότητα συντονισμού υπολογίζεται από τις κάτωθι σχέσεις:

$$\begin{cases} L_1 + L_2 - W + H \cong L_1 + H = \lambda/4 \\ \lambda = c/f_c \\ c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \end{cases} \Rightarrow f_c = \frac{c_0}{4 * \sqrt{\epsilon} * (L_1 + H)}$$

όπου ϵ , c_0 , η διηλεκτρική σταθερά η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή και η ταχύτητα του φωτός σε κενό χώρο, η οποία είναι $3 \cdot 10^8$ m/s (SI) . Η εισαγωγή μιας σχισμής στη διάταξη ελαττώνει τη συχνότητα συντονισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζεται ροή ρευμάτων στην άκρη της σχισμής, η οποία δημιουργεί χωρητικό φορτίο που μειώνει τη συχνότητα συντονισμού και επομένως τις διαστάσεις της κεραιάς αρκετά. Οι ίδια λογική για τις σχισμές ισχύει και για διατάξεις που λειτουργούν σε δύο συχνότητες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί επίσης ότι αλλαγές που γίνονται στο πλάτος της άνω πλάκας μπορούν να επηρεάσουν τον καθορισμό της συχνότητα συντονισμού. Επίσης, ο αγωγού βραχυκύκλωσης W κατέχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συχνότητας συντονισμού,

καθώς αυτή μειώνεται όταν μικρύνει το πλάτος του. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της IFA έναντι άλλων διατάξεων, είναι ότι δεν χρειάζεται να γίνει προσαρμογή στην είσοδο (τροφοδοσία) με συγκεντρωμένα στοιχεία (lumped elements) όπως πυκνωτές και πηνία τα οποία ενδέχεται να θόρυβο ή/και απώλειες . Αυτό γίνεται κατανοητό από τη στιγμή που χρησιμοποιούμε τα δύο στελέχη (βραχυκυκλωμένο-ανοιχτό) για να την πετύχουμε.

Πλεονεκτήματα IFA's

Συνοψίζουμε εδώ τα πλεονεκτήματα που μας παρέχει μία IFA σε σχέση με άλλες διατάξεις:

- Μη αναγκαία τοποθέτηση προσαρμοστικού κυκλώματος
- Φθηνή κατασκευή σε σύγκριση με άλλους τύπους κεραίων (σπειροειδής, χοανοκεραία)
- Καταλαμβάνει μικρό χώρο πάνω στο κύκλωμα
- Έχει την ικανότητα να δείχνει υψηλό κέρδος τόσο στην κάθετη όσο και στην οριζόντια πόλωση. Αυτό δίνει τεράστιο πλεονέκτημα στις IFA's διότι δεν μπορούμε πάντα να προβλέψουμε το πώς λαμβάνονται τα σήματα εναέρια και ειδικότερα σε κλειστούς χώρους όπου λόγω σκεδάσεων και ανακλάσεων καθίσταται δύσκολος ο προσδιορισμός του λαμβανόμενου πεδίου.

Τέλος θα πρέπει να τονίσουμε ότι μεταβάλλοντας πολλούς από τους παράγοντες της διάταξης μπορούμε να πετύχουμε κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα σε ένα μέγεθος, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να επηρεάζεται αρνητικά ένα άλλο. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνεται συνετή επιλογή της γεωμετρίας της κεραίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι απαιτήσεις μας.

4.3 Σχεδίαση IFA για το DA14580

Στην παρούσα εργασία πρέπει να βρούμε την κατάλληλη γεωμετρία της IFA έτσι ώστε να εναρμονίζεται, πρώτον με τις απαιτήσεις του DA14580 της Dialog Semiconductor και δεύτερον με τις προδιαγραφές που θέτει ο κατασκευαστής τυπωμένων πλακετών, σχετικά με το υλικό. Όπως ήδη είναι γνωστό το DA14580 χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth Low Energy για την ασύρματη μετάδοση πληροφορίας. Το πρωτόκολλο αυτό έχει συχνότητα λειτουργίας τα 2.45 GHz. Επίσης η σχεδίαση μας θα γίνει σε τέσσερα επίπεδα (layers) και το υλικό της πλακέτας θα είναι τεχνολογίας FR-4. Παρακάτω παρατίθενται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του FR-4 καθώς και κάποια γεωμετρικά- τεχνικά που ορίζει ο κατασκευαστής που πρέπει να είναι απαραίτητως γνωστά όταν υπολογίζουμε την γεωμετρία της κεραίας.

Παράμετρος	Τιμή
Κατάρρευση διηλεκτρικού	>50kV/m
Διηλεκτρική σταθερά ϵ_r	4.2-4.8 (αναλόγως τη συχνότητα λειτουργίας)
Συντελεστής απωλειών ($\tan\delta$)	0.017

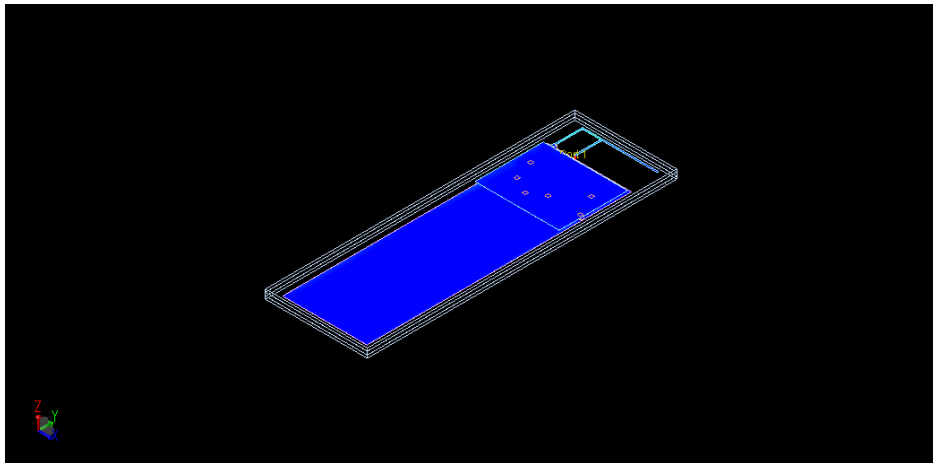
Πίνακας 4.3α

Το PCB μας όπως είπαμε θα κατασκευαστεί σε πλακέτα 4 layers και η διηλεκτρική σταθερά στην περίπτωση αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή $\epsilon_r=4.4$, ενώ η απόσταση της άνω πλάκας (που βρίσκεται ο ακτινοβολητής) με την πλάκα της γης είναι $h=0.25$ mm. Εφαρμόζουμε λοιπόν τις εξισώσεις που δόθηκαν παραπάνω για τον υπολογισμό των επιμέρους μεγεθών της γεωμετρίας μας και καταλήγουμε στις διαστάσεις του παρακάτω πίνακα.

Παράμετρος	Τιμή
L1	24mm
H	7mm
W	0.5mm
L2	0.5mm

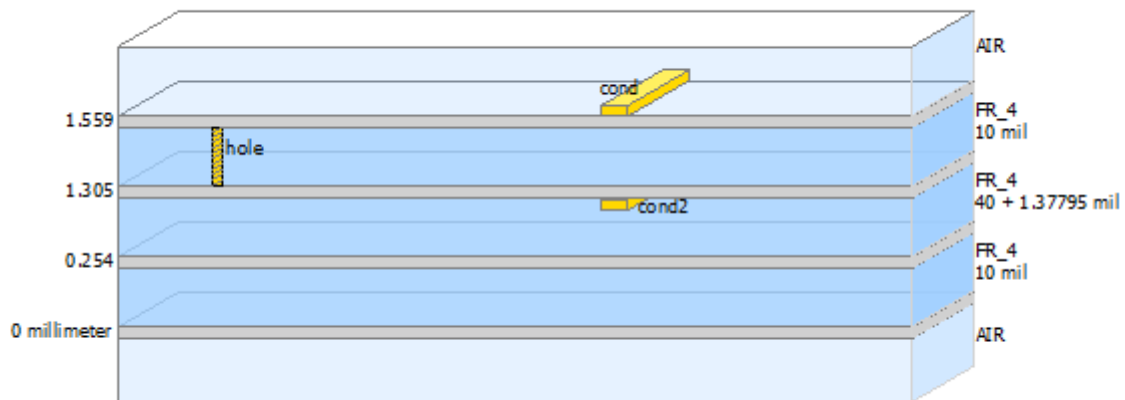
Πίνακας 4.3β

Η προσομοίωση της κεραίας έγινε με το πρόγραμμα Advanced Design System της Agilent (τόρα Keysight). Παρακάτω φαίνεται η κεραία όπως υλοποιήθηκε στο layout του ADS.

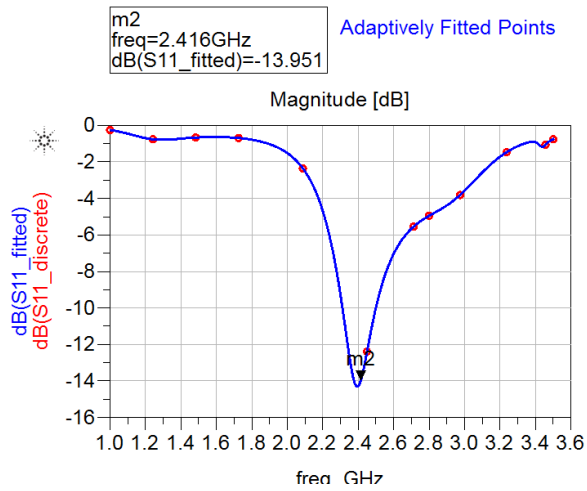


Εικόνα 4.3^α

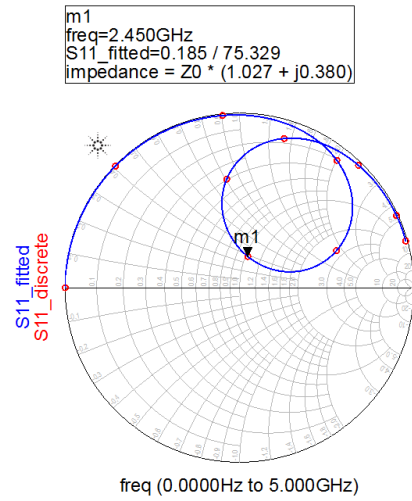
Η προσομοίωση που έλαβε χώρα έγινε με τη μέθοδο Finite Element Method (FEM). Για να δούμε την συχνότητα συντονισμού της κεραίας μπορούμε να συμβουλευτούμε το διάγραμμα της $S(1,1)$ παραμέτρου από τον πίνακα σκέδασης, η οποία στην ουσία μας δείχνει την ανακλώμενη προς το προσπίπτουσα ακτινοβολία στην είσοδο. Μαζί με τη συχνότητα συντονισμού φαίνεται και η προσαρμογή στα 50 Ohm στον χάρτη Smith καθώς και οι προδιαγραφές του υποστρώματος.



Σχήμα 4.3β



Σχήμα 4.3γ

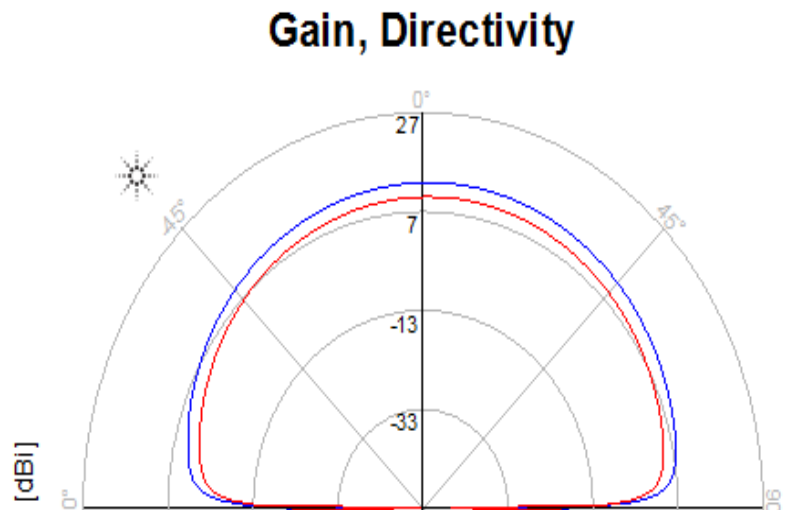


Σχήμα 4.3δ

Εν συνεχεία, μπορούμε να δούμε το διάγραμμα κέρδος μαζί με την κατευθυντικότητα της κεραιάς και κάποια άλλα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά της διάταξης μας κρατώντας την αζιμουθιακή γωνία σταθερή ($\phi=0$)

Frequency (GHz)	2.45
Input power (Watts)	0.000913589
Radiated power (Watts)	0.000469566
Directivity(dBi)	4.57975
Gain (dBi)	1.68921
Radiation efficiency (%)	51.3979
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000107266
Effective angle (Steradians)	4.37758
Angle of U Max (theta, phi)	133 298
E(theta) max (mag,phase)	0.193153 -80.2677
E(phi) max (mag,phase)	0.208597 -65.5669
E(x) max (mag,phase)	0.125348 -58.3743
E(y) max (mag,phase)	0.212493 -73.5514
E(z) max (mag,phase)	0.141263 99.7323

Εικόνα 4.3ε

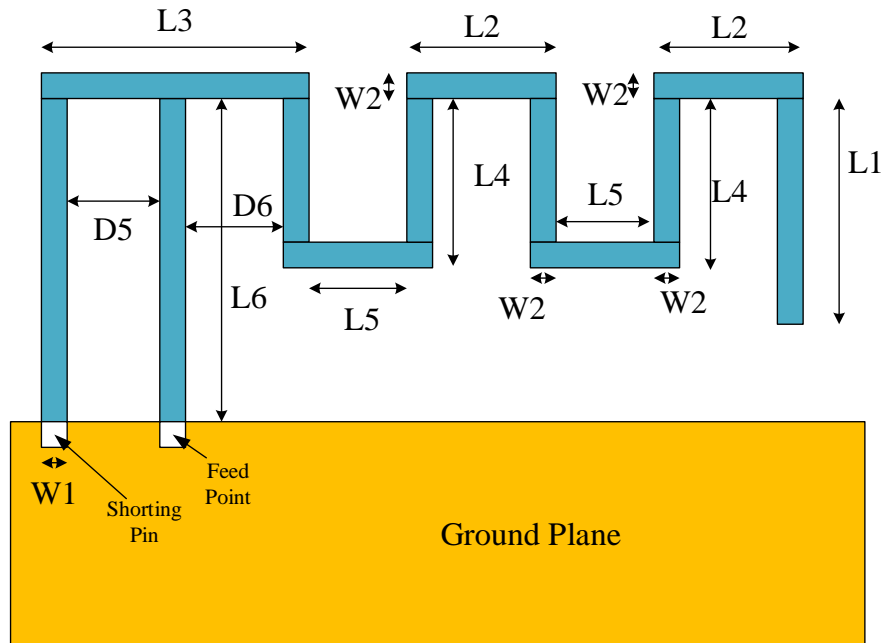


Σχήμα 4.3ζ

Παρόλο όμως που τελικά υλοποιήθηκε σχεδιαστικά και προσομοιάστηκε η κεραία μας στο ADS με σχετικά επιτυχή τρόπο κρίνεται σκόπιμο να μειώσουμε το συνολικό μέγεθος της διάταξης και ιδιαίτερα του μήκους L_1 διότι τα 2.5 cm είναι αρκετά μεγάλη διάσταση για τη σχεδίαση μας.

4.4 Δεύτερη Υλοποίηση: Folded Printed IFA

Η επόμενη προσπάθεια που γίνεται αφορά πάλι μία τυπωμένη IFA αλλά αυτή τη φορά με αναδιπλωμένο στέλεχος L_1 . Αυτή η διάταξη ονομάζεται folded printed IFA και μας δίνει το πλεονέκτημα μικρότερου χώρου με τα ίδια ή και καλύτερα χαρακτηριστικά από την προηγούμενη προσπάθεια μας.



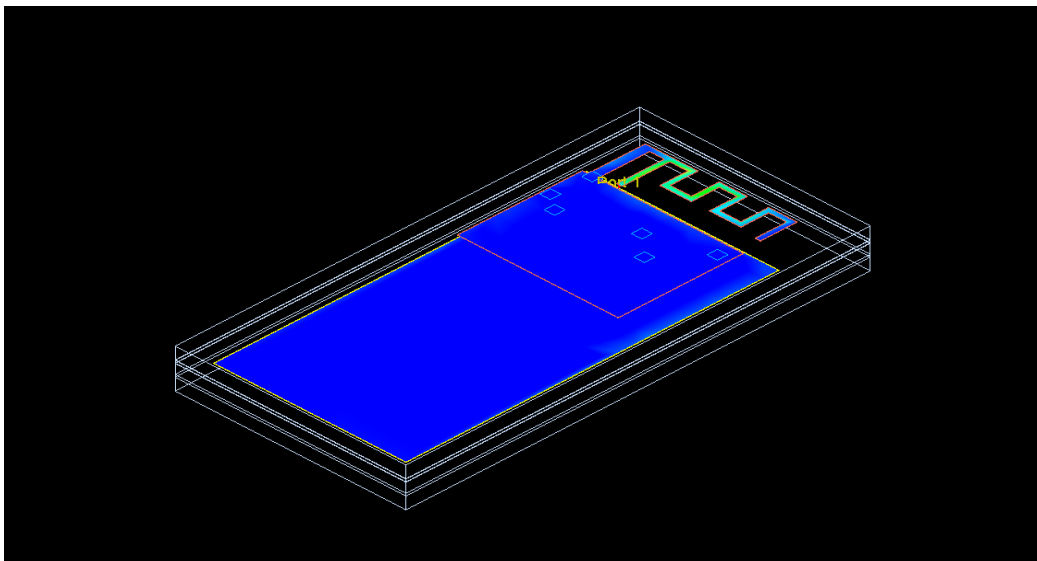
Σχήμα 4.4^α

Δυστυχώς δεν μπορούσαμε να βρούμε κάποιο μαθηματικό μοντέλο που να μας δίνει τις ακριβείς σχέσεις μεταξύ των μηκών της διάταξης μας και του μήκος κύματος που λειτουργεί το BLE. Το σχήμα αυτό το πήραμε από την βιβλιογραφία (Papers[1]). Τα μήκη φαίνονται παρακάτω:

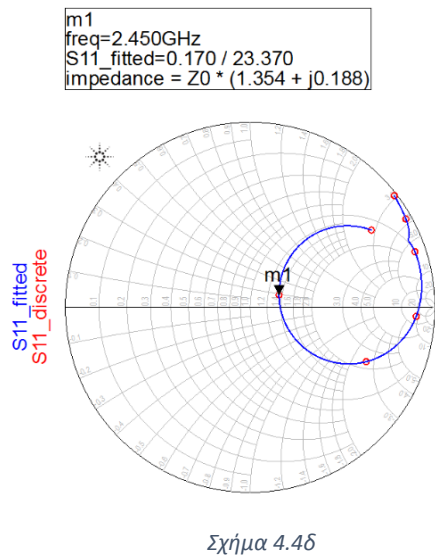
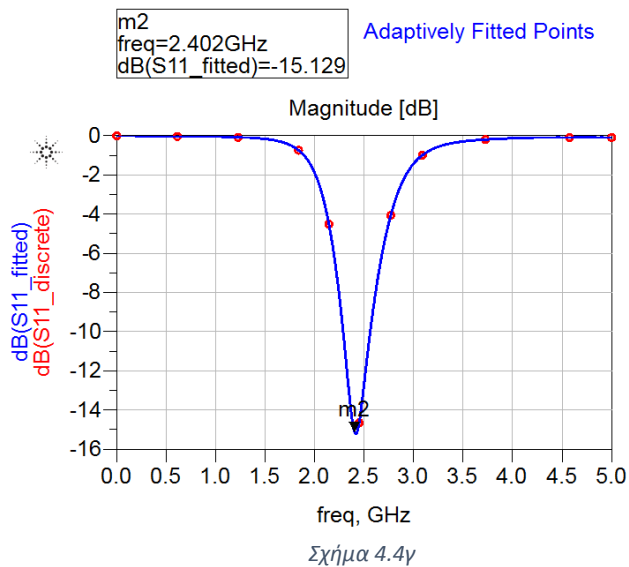
Μήκος	Τιμή (mm)
L1	3.94
L2	2.7
L3	5
L4	2.64
L5	2
L6	4.9
D5	1.4
D6	1.7
W1	0.9
W2	0.5

Πίνακας 4.4

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος παραμένουν αμετάβλητα. Μετά την κατασκευή της κεραίας στο ADS ακολουθούμε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν παίρνουμε τα διαγράμματα S(1,1) και τον χάρτη Smith.



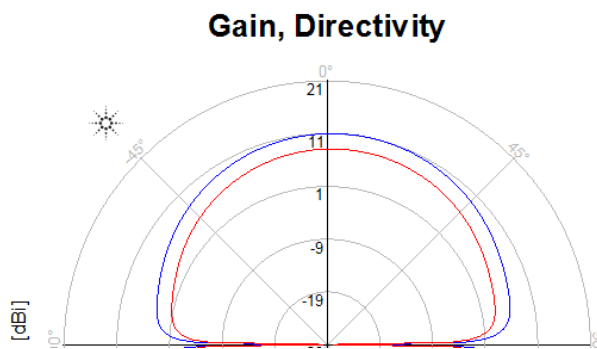
Εικόνα 1.48



Τελικώς ακολουθούν τα διαγράμματα κέρδους και κατευθυντικότητας καθώς αι κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά της κεραίας όπως τα παίρνουμε από την Post Processing επιλογή του ADS.

Frequency (GHz)	2.45
Input power (Watts)	0.000937098
Radiated power (Watts)	0.00048034
Directivity(dBi)	4.61491
Gain (dBi)	1.71255
Radiation efficiency (%)	51.2582
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000110619
Effective angle (Steradians)	4.34229
Angle of U Max (theta, phi)	139 286
E(theta) max (mag,phase)	0.246427 -80.3677
E(phi) max (mag,phase)	0.150403 -45.9974
E(x) max (mag,phase)	0.106279 -30.1961
E(y) max (mag,phase)	0.214277 -74.0972
E(z) max (mag,phase)	0.161671 99.6323

Εικόνα 4.4ε



Εικόνα 4.4ζ

Μετά την προσομοίωση της folded IFA και την προσομοίωση της με το ADS κρίναμε σωστό πριν να την βάλουμε στο τελικό PCB και να τη δώσουμε σε εταιρία παραγωγής πλακετών, να κατασκευάσουμε μία στο εργαστήριο και να την ελέγξουμε για να βεβαιωθούμε για τα

αποτελέσματα της προσομοίωσης . Πήραμε λοιπόν μία κενή πλακέτα από το εμπόριο δύο επιπέδων με τις προδιαγραφές που φαίνονται παρακάτω:

Specifications:

- Board type laminate
- Material FR4
- Laminate thickness 1.5mm
- Board clad type copper
- Board variant double sided
- Copper plating thickness 32μm
- Length 297mm
- Width 210mm

Όπως βλέπουμε ο κατασκευαστής δεν μας δίνει καμία τιμή για την διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και η πλακέτα είναι αρκετά πιο χοντρή από αυτή που θα έχουμε στο τελικό μας σχέδιο. Αυτό όμως δεν είναι αποτρεπτικός παράγοντας για να εξετάσουμε αν οι μετρήσεις που έγιναν κατά την προσομοίωση στον υπολογιστή είναι λάθος. Αντίθετα μπορούμε να δούμε πως η αλλαγή του μεγέθους του πάχους του διηλεκτρικού θα επηρεάσει την συχνότητα λειτουργίας και στη συνέχεια να προσπαθήσουμε αλλάζοντας το πάχος του διηλεκτρικού και τη επιτρεπτότητα στην προσομοίωση να πετύχουμε μία ταύτιση στην τιμή της συχνότητας.

Μπορούμε να βρούμε το ϵ_r μέσω της σχέσης :

$$\epsilon_r = \frac{C * D}{A * \epsilon_0}$$

όπου C, D, A, ϵ_0 , η χωρητικότητα μεταξύ των δύο επιπέδων, το πάχος του διηλεκτρικού (το πάχος του χαλκού είναι αμελητέο), το εμβαδόν της πλακέτας και η διηλεκτρική σταθερά στον αέρα. Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών είναι:

Μέγεθος	Τιμή
C	1.852 nF
D	1.5 mm
A	297*210 mm ²
ϵ_0	8.854*10 ⁻¹² F/m

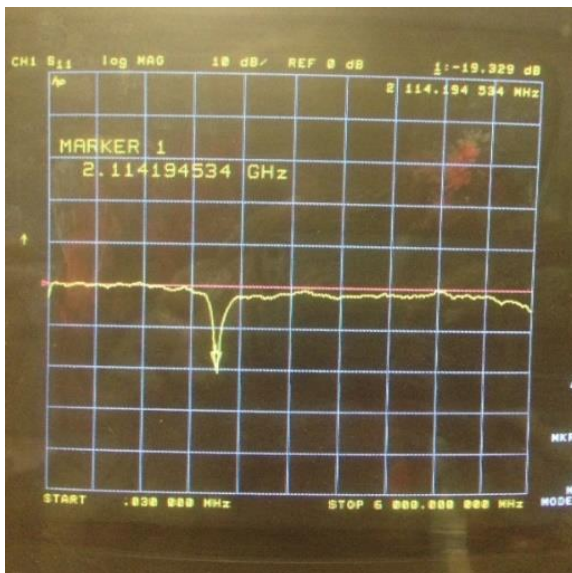
Αξίζει να σημειωθεί ότι η χωρητικότητα της πλακέτας μετρήθηκε στο LCR meter του εργαστηρίου ηλεκτρονικής. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς βρέθηκε $\epsilon_r=4.9$. Η υλοποίηση μας, τα αποτελέσματα αυτής, αλλά και της προσομοίωσης βρίσκονται στις παρακάτω εικόνες



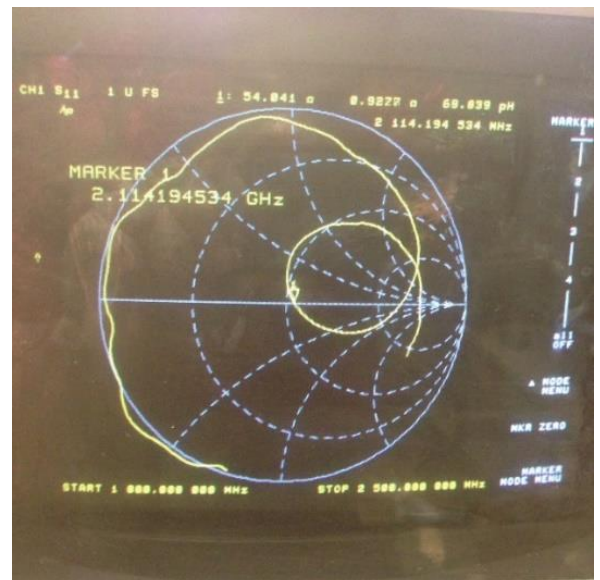
Εικόνα 4.4η



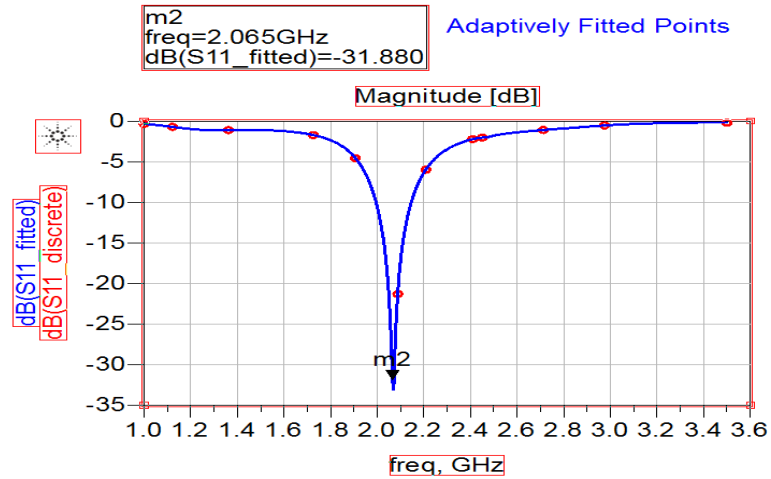
Εικόνα 4.4ι



Εικόνα 4.4κ



Εικόνα 4.4λ



Εικόνα 4.4μ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να καταλήξουμε ότι η προσομοίωση μας είναι πολύ κοντά στην πραγματική υλοποίηση. Τα πειράματα της κατασκευαστικής υλοποίησης έγιναν στον Network Analyzer του εργαστηρίου ηλεκτρονικής HP 8753D.

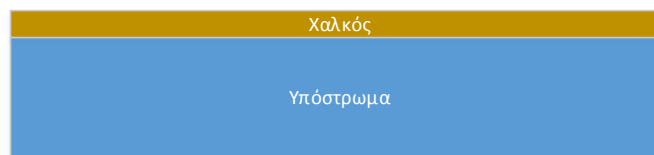
5. Κατασκευή PCB

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αρχικά μια παρουσίαση των βασικότερων σημείων της τεχνολογίας των τυπωμένων κυκλωμάτων (pcb). Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μια ανάλυση της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος με το πρόγραμμα Altium Designer. Τέλος θα γίνει μία παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων που πάρθηκαν προκειμένου να υπάρξει μία εκτίμηση της πραγματικής απόδοσης του συστήματος.

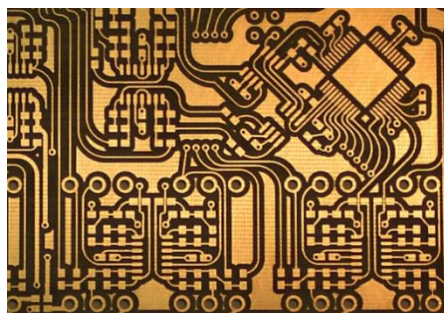
5.2 Τυπωμένα Κυκλώματα (PCB)

Ο όρος τυπωμένα κυκλώματα (pcb) αναφέρεται στην τεχνολογία κατά την οποία οι συνδέσεις μεταξύ των διάφορων εξαρτημάτων ενός κυκλώματος γίνονται με την μορφοποίηση ενός λεπτού στρώματος χαλκού στην επιφάνεια ενός διηλεκτρικού υποστρώματος. Η πιο απλή δομή μιας τυπωμένης πλακέτας φαίνεται παρακάτω.



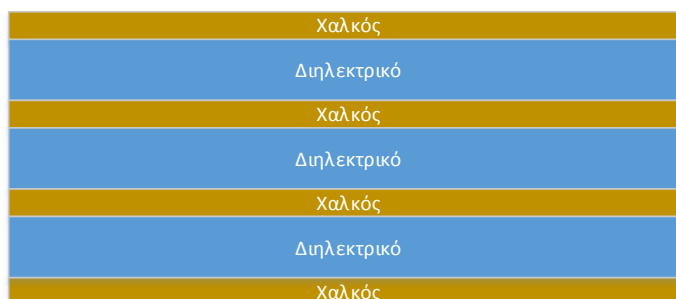
Σχήμα 5.1: Η πιο απλή μορφή μιας τυπωμένης πλακέτας ενός στρώματος.

Στο λεπτό στρώμα του χαλκού χαράζονται οι διαδρομές για να γίνουν οι συνδέσεις των εξαρτημάτων καθώς και τα pads για την τοποθέτηση των διάφορων εξαρτημάτων. Τέλος ανοίγονται στην πλακέτα οι απαραίτητες για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων τρύπες.



Σχήμα 5.2: Φωτογραφία της κάτωψης ενός pcb.

Φυσικά υπάρχουν και πιο πολύπλοκες δομές από αυτή του σχήματος 5.1. Περισσότερα επίπεδα χαλκού που χωρίζονται μεταξύ τους με διηλεκτρικό εξυπηρετούν περιπτώσεις κυκλωμάτων όπου οι συνδέσεις δεν μπορούν να γίνουν σε ένα επίπεδο ή υπάρχει ανάγκη για εξοικονόμηση χώρου.



Σχήμα 5.3: Δομή ενός pcb τεσσάρων στρωμάτων.

Επιπλέον βοηθητικά στρώματα που βοηθάνε στην προστασία και την συναρμολόγηση του κυκλώματος μπορούν να προστεθούν στην πλακέτα. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα βοηθητικά στρώματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- Solder Mask

Πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα ειδικού βερνικιού που μπαίνει πάνω από τα εξωτερικά στρώματα χαλκού της πλακέτας αφήνοντας εκτεθειμένα μόνο τα σημεία στα οποία θα κολληθεί

κάποιο εξάρτημα. Έχει συνήθως πράσινο χρώμα και βοηθάει στην αποφυγή βραχυκυκλωμάτων αλλά και στην προστασία της πλακέτας από την διάβρωση.

- Silkscreen η Overlay

Πάνω από το solder mask υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης κειμένου ή σχεδίων για την διευκόλυνση στην συναρμολόγηση και απασφαλμάτωση της πλακέτας. Με αυτή την μέθοδο συνήθως τυπώνεται πάνω στην πλακέτα η θέση και ο προσανατολισμός των διάφορων εξαρτημάτων αλλά και άλλες πληροφορίες όπως κάποια σημεία ελέγχου του κυκλώματος. Επίσης συχνά τυπώνονται και πληροφορίες όπως το όνομα ή το λογότυπο του κατασκευαστή της πλακέτας.

- Solder Paste Layer

Πρόκειται για μία λεπτή στρώση από ειδική ουσία (solder paste) η οποία διευκολύνει στην ροή της κόλλησης πάνω στον χαλκό και βοηθάει στην κόλληση των smd εξαρτημάτων. Η ουσία αυτή μπαίνει στις περιοχές των pads οι οποίες δεν καλύπτονται από το solder mask.

5.3 Ακεραιότητα σήματος σε τυπωμένα κυκλώματα

Η διαδικασία σχεδίασης της τυπωμένης πλακέτας δεν είναι πάντα απλή διαδικασία και η σωστή λειτουργία του κυκλώματος δεν είναι πάντα δεδομένη όταν αυτό μεταφέρεται από την προσομοίωση σε τυπωμένη πλακέτα. Ειδικά όταν το κύκλωμα λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες η σχεδίαση πρέπει να γίνει με προσοχή καθώς υπάρχει ένα πλήθος φαινομένων τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία του κυκλώματος. Ενδεικτικά κάποια από τα πιο συνηθισμένα φαινόμενα που επηρεάζουν την σωστή λειτουργία μιας τυπωμένης παρουσιάζονται παρακάτω.

5.3.1 Γραμμές μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς μπορεί να ορισθεί ως μια αγωγή σύνδεση μεταξύ δύο σημείων ικανή να μεταφέρει σήμα. Ιδανικά σε ένα τυπωμένο κύκλωμα οι γραμμές που συνδέουν τα διάφορα στοιχεία μεταξύ τους πρέπει να έχουν μηδενική αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα. Ενώ λοιπόν για μικρές συχνότητες μπορεί να γίνει αυτή η παραδοχή, όσο η συχνότητα των σημάτων μεγαλώνει οι γραμμές δεν συμπεριφέρονται ως ιδανικές και παρουσιάζουν χωρητικότητες και επαγωγές που μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στην λειτουργία του κυκλώματος.

5.3.2 Ταίριασμα χαρακτηριστικών αντιστάσεων

Αν δεν υπάρξει ειδική μέριμνα, οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις των γραμμών μιας τυπωμένης πλακέτας δεν έχουν την ίδια τιμή με τις χαρακτηριστικές αντιστάσεις των πηγών και των φορτίων στα οποία καταλήγουν. Όταν συμβαίνει αυτό ένα μέρος της ενέργειας του σήματος δεν απορροφάται από το φορτίο και ανακλάται πίσω προς την πηγή. Η διαδικασία αυτή, ειδικά όταν το κύκλωμα λειτουργεί σε μεγάλες συχνότητες, αλλοιώνει το μεταφερόμενο σήμα δημιουργώντας σε αυτό φαινόμενα όπως υπερύψωση (overshoot) ή κωδωνισμό (ringing).

5.3.3 Crosstalk

Κάθε φορά που ένα σήμα περνάει από μία γραμμή μεταφοράς, γύρω από την γραμμή δημιουργείτε ένα μαγνητικό πεδίο. Crosstalk ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο όταν δύο γραμμές μιας τυπωμένης πλακέτας βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη, το πεδίο της μίας δημιουργεί ανεπιθύμητα ρεύματα στην διπλανή της γραμμή και το αντίθετο.

5.3.4 EMI (Electromagnetic Interference)

Οι γραμμές που συνδέουν τα διάφορα εξαρτήματα σε μια τυπωμένη πλακέτα είναι δυνατόν υπό προϋποθέσεις να λειτουργήσουν σαν κεραίες και να εισάγουν στο κύκλωμα ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο μέγεθος και το σχήμα των γραμμών μιας τυπωμένης πλακέτας.

5.4 Σχεδίαση PCB

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας είναι πολύ σημαντικό στάδιο της κατασκευής ενός κυκλώματος καθώς, ειδικά σε κυκλώματα τα οποία λειτουργούν σε μεγάλες συχνότητες, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την καλή λειτουργία του κυκλώματος. Έτσι λοιπόν κατά την σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κυρίως στο κομμάτι του ασύρματου πομποδέκτη ώστε η τελική λειτουργία της να είναι η αναμενόμενη.

Η σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας έγινε σε 4 layer. Στα δύο εξωτερικά layer έγιναν οι συνδέσεις των εξαρτημάτων ενώ στα εσωτερικά layer τοποθετήθηκαν τα δύο άκρα της τάσης τροφοδοσίας. Η επιλογή αυτή έγινε προκειμένου να υπάρχει μεγάλη επιφάνεια γείωσης ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα θορύβου και παρεμβολών που επηρεάζουν την συμπεριφορά του κυκλώματος στις μεγάλες συχνότητες όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Επίσης η χρήση τεσσάρων layer έδωσε την δυνατότητα για πιο πυκνή τοποθέτηση των εξαρτημάτων και συνεπώς πιο μικρές διαστάσεις της τελικής πλακέτας.

Για το μέσο της τάσης τροφοδοσίας (GND) γύρω από το οποίο αναμένεται να ταλαντώνεται το σήμα εισόδου έχει σχεδιαστεί μία αρκετά μεγάλη επιφάνεια χαλκού στο bottom layer της πλακέτας για λόγους παρόμοιους με αυτούς που οδήγησαν στην χρήση ξεχωριστών layer για τα δύο άκρα της τροφοδοσίας.

Όσον αφορά το κομμάτι του ασύρματου πομποδέκτη το layout έγινε σύμφωνα με το documentation του κατασκευαστεί ώστε να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία του. Τα πιο χαρακτηριστικά σημεία είναι τα εξής:

- Κρύσταλλοι

Οι συνδέσεις ανάμεσα στους δύο κρυστάλλους και το DA14580 θέλουν ιδιαίτερη προσοχή για να αποφευχθούν φαινόμενα παρεμβολών και θορύβου στο ρολόι του ασύρματου πομποδέκτη. Για τον λόγο αυτό οι δύο κρύσταλλοι τοποθετήθηκαν σε μικρή απόσταση από το DA14580 ώστε οι γραμμές που τα συνδέουν να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Επίσης γύρω από τους δύο κρυστάλλους τοποθετήθηκε θωράκιση συνδεδεμένη στο layer της γης μέσω vias.

- Τροφοδοσία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το DA14580 διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα τροφοδοσίας το οποίο φροντίζει και για την τροφοδοσία του πομποδέκτη που περιέχει. Χρειάζεται λοιπόν ειδική μέριμνα προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο υψίσυχνος θόρυβος ο οποίος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο κύκλωμα για την ασύρματη μετάδοση. Για τον λόγο αυτό, κατά την σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας οι πυκνωτές που φιλτράρουν την τροφοδοσία του υψίσυχνου κομματιού κρατήθηκαν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ολοκληρωμένο. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, ένα μικρό πηνίο σχηματίστηκε με την γραμμή που ενώνει τους ακροδέκτες VDCDC και VDCDC_RF.

Για να γίνουν περισσότερο σαφή όλα τα παραπάνω, στο παράρτημα δίνεται η πλήρης μορφή του layout του τυπωμένου κυκλώματος.

5.5 Εισαγωγή κεραίας στο PCB

Πολύ σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση του PCB παίζει η τοποθέτηση της κεραίας καθώς δεν φτάνει μόνο η προσομοίωση που κάναμε στο κεφάλαιο 4, αλλά θα πρέπει να σχεδιαστεί κι ένας κυματοδηγός κατάλληλος για να συνδέσει την έξοδο από το DA14580 προς την τροφοδοσία της κεραίας. Η Dialog στο datasheet της μας υποδεικνύει ότι για να έχουμε 50 Ohm χαρακτηριστική αντίσταση στην έξοδο, πρέπει να τοποθετηθεί «κοντά» ένα πηνίο με τιμή 3.9nH παράλληλα με την έξοδο και τη γη. Μετά την τοποθέτηση του, για συχνότητα λειτουργίας 2.45GHz υπολογίζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυματοδηγού μας από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} * \frac{1}{\frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + \frac{K(k_2)}{K(k'_2)}}$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - (k_1)^2}$$

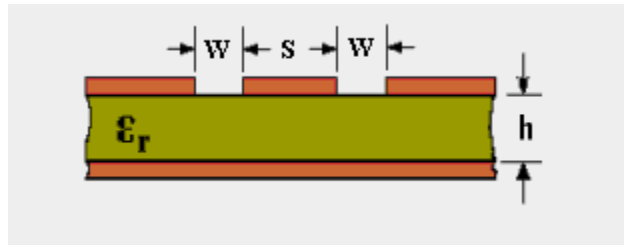
$$k_1 = \frac{S}{S + 2W}$$

$$k'_2 = \sqrt{1 - (k_2)^2}$$

$$k_2 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi}{4} * \frac{S}{h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi}{4} * \frac{S + 2W}{h}\right)}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1 + \epsilon_r \frac{K(k_1') K(k_2)}{K(k_1) K(k_2')}}{1 + \frac{K(k_1') K(k_2)}{K(k_1) K(k_2')}}}$$

όπου, W, S, h, ϵ_r , οι διαστάσεις και η διηλεκτρική σταθερά όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Η συνάρτηση K(k) αποτελεί το ελλειπτικό ολοκλήρωμα πρώτου είδους, ενώ η ϵ_{eff} είναι η ενεργή επιτρεπτότητα.

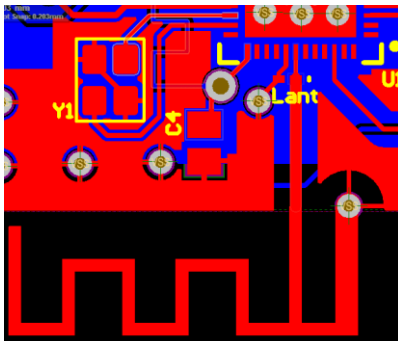


Εικόνα 5.3: Μεγέθη για τον υπολογισμό του κυματοδηγού

Η ανάλυση και επίλυση των εξισώσεων μας δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

- S=4.5 mm
- W=0.6 mm
- h= 0.25 mm
- $Z_0=49.45 \Omega$

Με τα ευρήματα αυτά μπορούμε να σχεδιάσουμε στο Altium Designer την κεραία μαζί με τον κυματοδηγό. Η σύνδεση και η διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 5.4



Εικόνα 5.4: Σχεδίαση της κεραίας με το Altium Designer

6. Αποτελέσματα – Μετρήσεις

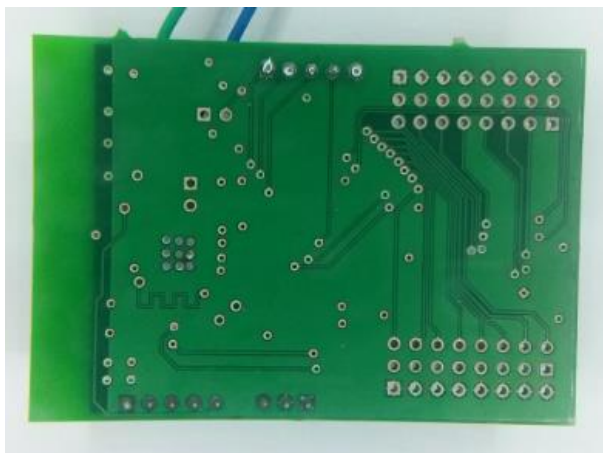
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν η τελική υλοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος που περιγράφηκε παραπάνω καθώς και οι πειραματικές μετρήσεις από την λειτουργία του.

6.1 Η υλοποίηση του PCB

Το pcb το οποίο κατασκευάστηκε σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναλυθεί, έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 6.1: Η μπροστινή όψη του τυπωμένου κυκλώματος



Σχήμα 6.2: Η πίσω όψη του τυπωμένου κυκλώματος

6.2 Πειραματικές Μετρήσεις

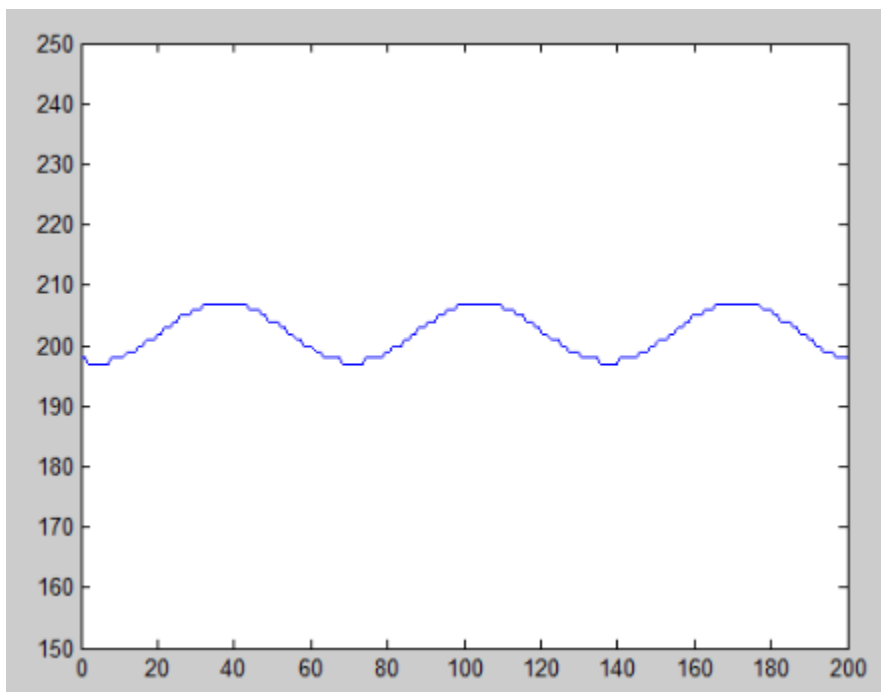
Για την πειραματική επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας του συστήματος υλοποιήθηκε μία διάταξη στην οποία τρεις γεννήτριες σημάτων τροφοδότησαν τρεις από τις δεκαέξι εισόδους του συστήματος. Οι τρεις γεννήτριες είχαν ρυθμιστεί ώστε να βγάλουν στην έξοδο τους τα εξής:

Γεννήτρια Α: Ημίτονο συχνότητας 7Hz

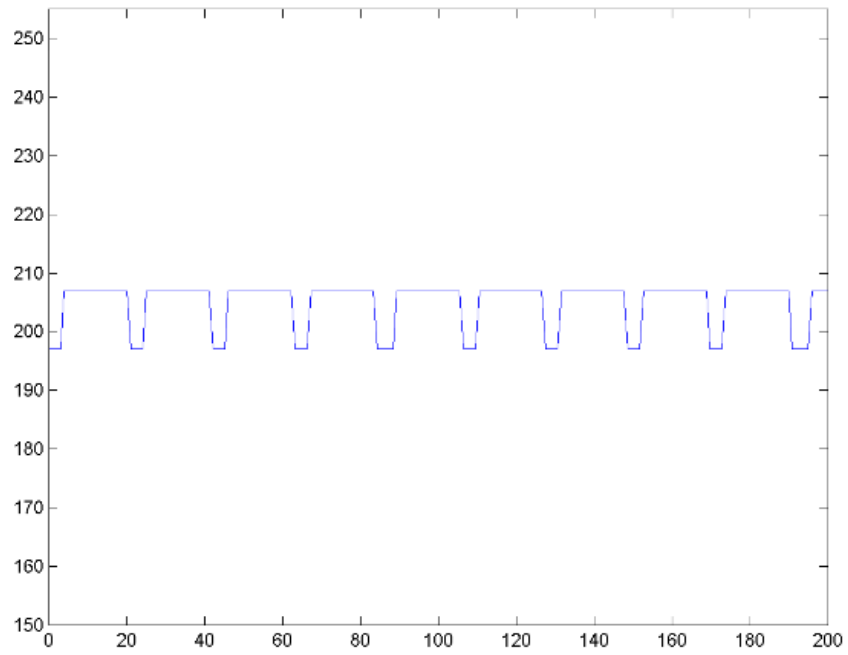
Γεννήτρια Β: Τετραγωνικό παλμό συχνότητας 10Hz με Duty Cycle 80%

Γεννήτρια Γ: Τετραγωνικό παλμό συχνότητας 10Hz με Duty Cycle 50%

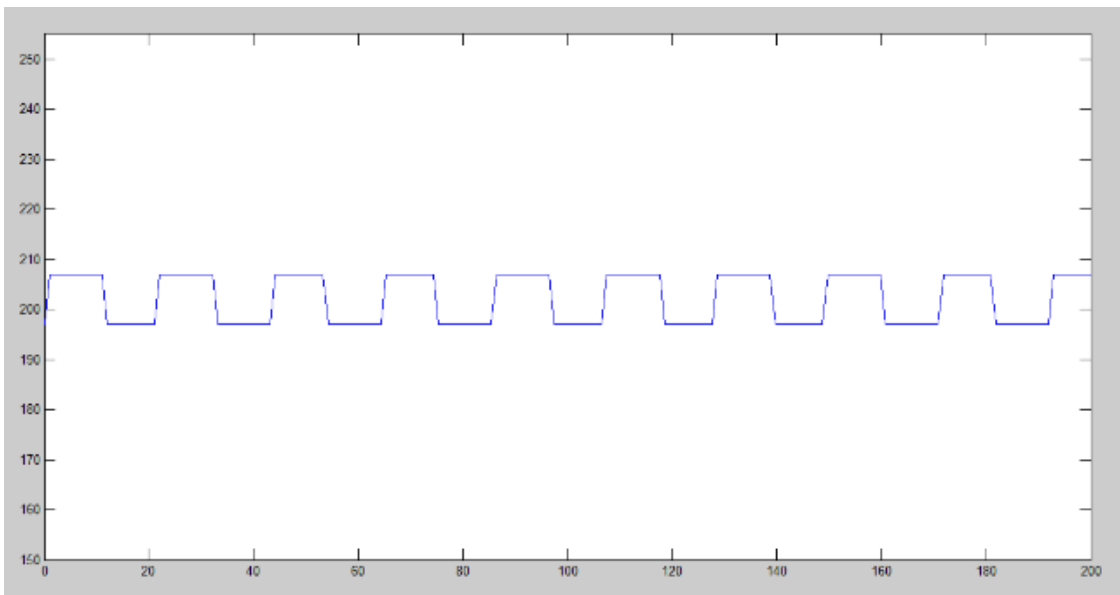
Το σήμα των τριών αυτών εισόδων στάλθηκε σε κοντινό υπολογιστή στον οποίο έγιναν με χρήση Matlab οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν. Να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι σήμα εισόδου συνδέθηκε μόνο στις τρεις από τις δεκαέξι εισόδους του συστήματος, όλες οι εισοδοί ήταν ενεργοποιημένες με αποτέλεσμα ο ρυθμός δειγματοληψίας των τριών αυτών εισόδων να ισούται με τον συνολικό ρυθμό δειγματοληψίας διαιρεμένο με το 16 και όχι με το 3.



Σχήμα 6.3: Το σήμα της Γεννήτριας Α.



Σχήμα 6.4: Το σήμα της Γεννήτριας Β.

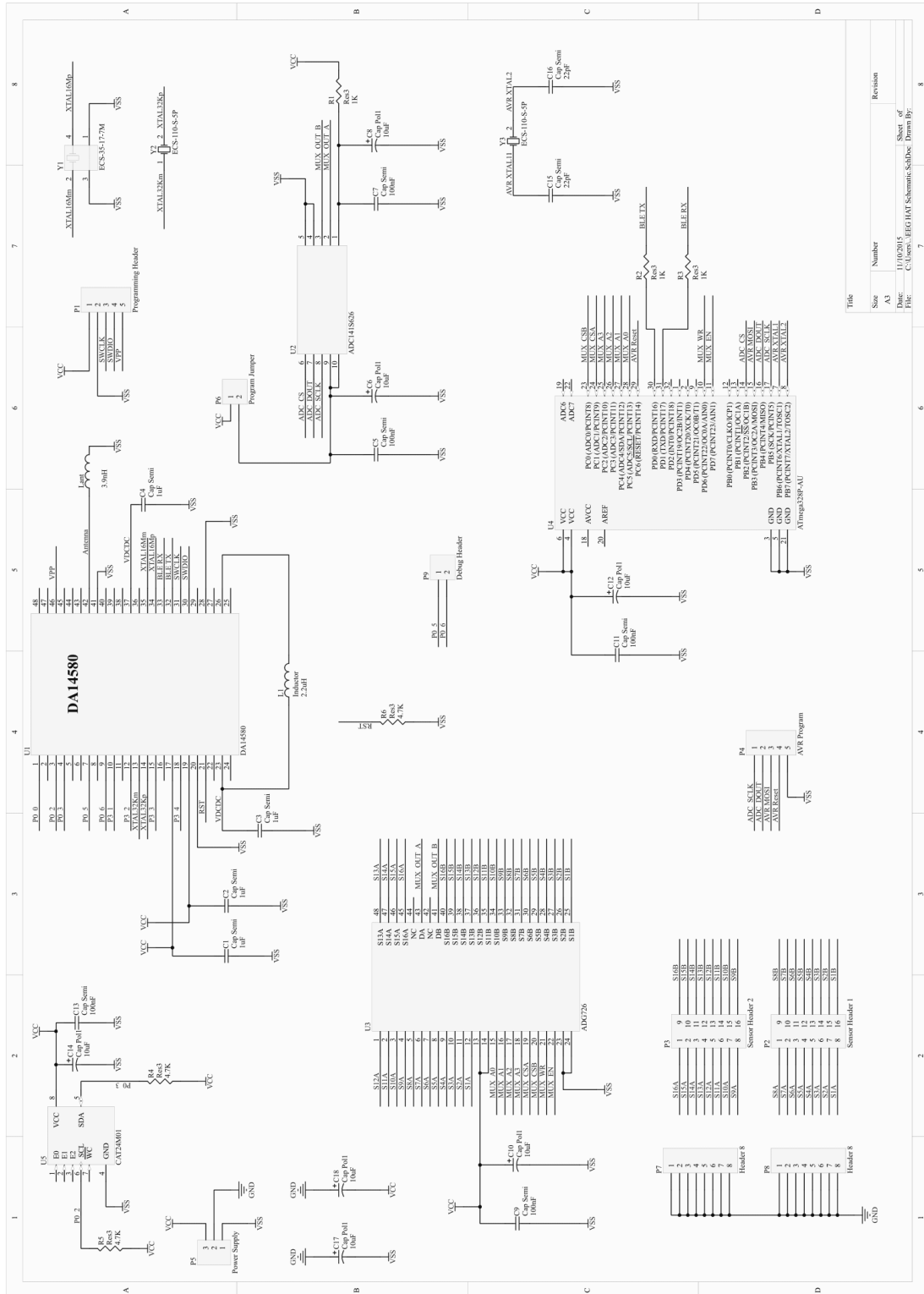


Σχήμα 6.5: Το σήμα της Γεννήτριας Γ.

Ο συνολικός ρυθμός δειγματοληψίας του τελικού συστήματος μετρήθηκε να είναι ίσος με 5000 δείγματα το δευτερόλεπτο (312 δείγματα ανά είσοδο το δευτερόλεπτο) το οποίο σημαίνει ότι κάθε είσοδος έχει ένα αναλογικό εύρος ζώνης τουλάχιστον 30Hz.

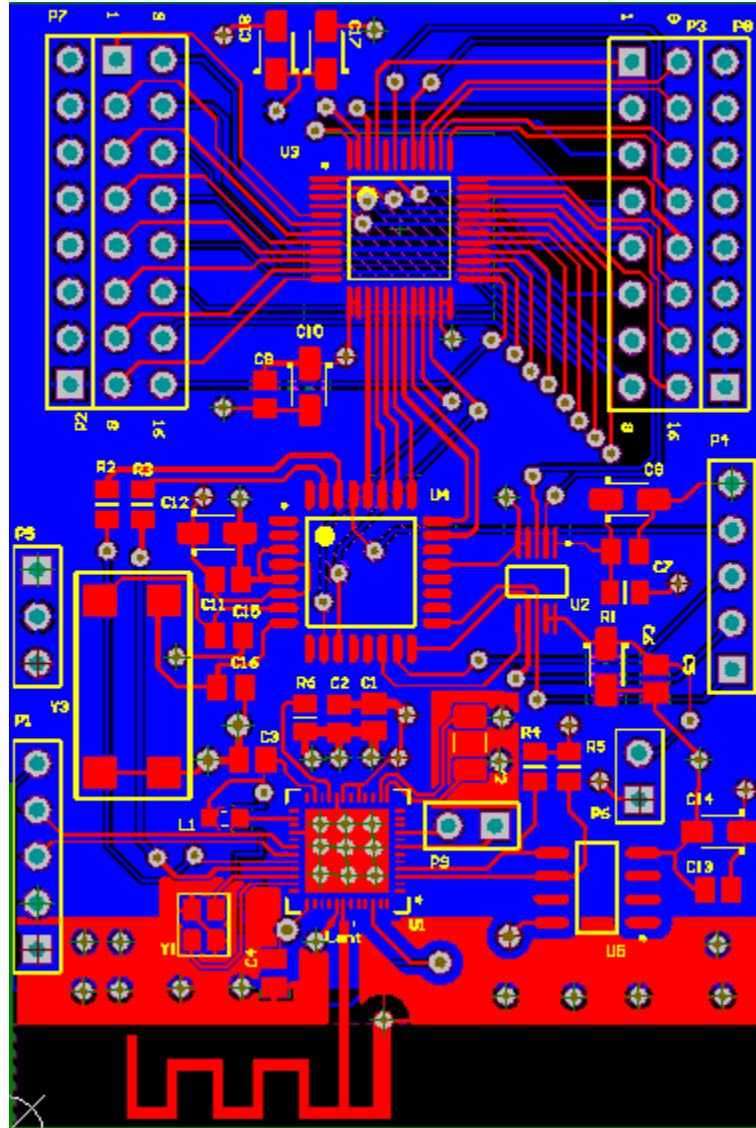
Παρόλα αυτά υπενθυμίζεται ότι στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και ο προγραμματισμός των διάφορων στοιχείων προκειμένου το σύστημα να αποκτήσει μια στοιχειώδη λειτουργικότητα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορούν θεωρητικά να βελτιωθούν πολύ με την ανάπτυξη πιο αποδοτικού λογισμικού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πλήρες Σχηματικό του Κυκλώματος



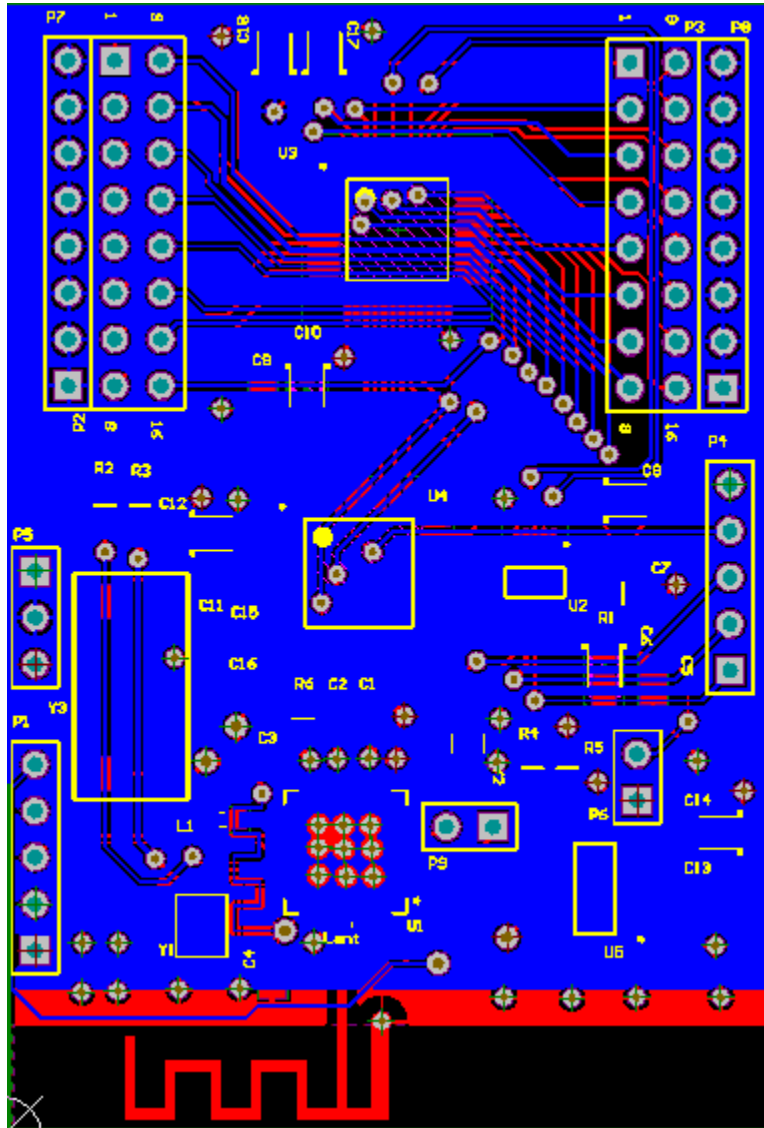
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: PCB LAYOUT

B.1 Top Layer



Σχήμα Β1: Το πάνω επίπεδο της τυπωμένης πλακέτας.

B.2 Bottom Layer

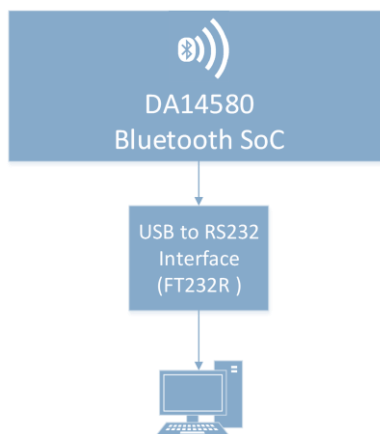


Σχήμα Β2: Το κάτω επίπεδο της τυπωμένης πλακέτας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: USB Dongle

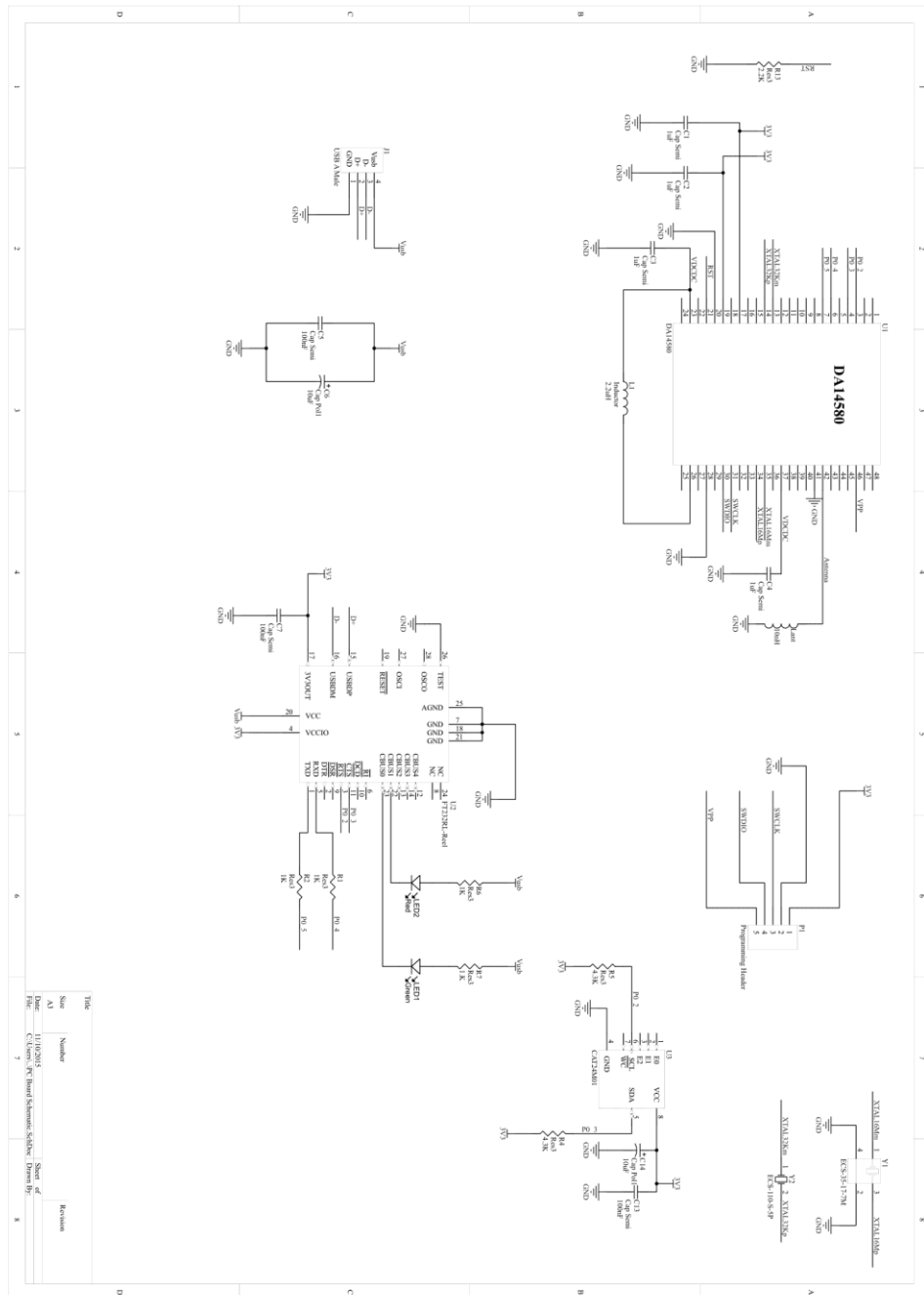
Από τα πρώτα ακόμα στάδια της σχεδίασης έγινε φανερό ότι δεν υπάρχει ακόμα πλήρης υποστήριξη του πρωτοκόλλου Bluetooth Low Energy από το λειτουργικό σύστημα των Windows στο οποίο έγιναν οι πρώτες δοκιμές. Προκειμένου λοιπόν το τελικό προϊόν να μπορεί να λειτουργεί στο λειτουργικό σύστημα των Windows το οποίο άλλωστε είναι και το πιο εμπορικό, αποφασίστηκε η δημιουργία ενός στικ usb το οποίο θα μπορεί να παίρνει δεδομένα από ένα DA14580 μέσω UART και να στέλνει αυτά τα δεδομένα στον υπολογιστή μέσω USB. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει εύκολα συμβατότητα του τελικού κυκλώματος με όλα τα λειτουργικά συστήματα ενώ παράλληλα δεν χάνεται η δυνατότητα χρήσης του Serial Port Profile το οποίο είναι ήδη υλοποιημένο.

Η δομή του κυκλώματος που περιγράφηκε παραπάνω είναι πολύ απλή. Το DA14580 συνδέεται μέσω της UART θύρας του με το FT232R το οποίο μετατρέπει την UART επικοινωνία σε επικοινωνία USB επιτρέποντας την σύνδεση της συσκευής με τον υπολογιστή. Εκεί το FT232R αναγνωρίζεται ως σειριακή θύρα, της οποίας η προσπέλαση είναι πολύ απλή από κάθε λειτουργικό σύστημα. Η γενική δομή του κυκλώματος του USB Dongle φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα Γ1: Γενική δομή USB Dongle.

Στο πλήρες κύκλωμα προφανώς πέρα των δύο ολοκληρωμένων που φαίνονται παραπάνω, περιλαμβάνονται και όλα τα εξαρτήματα που χρειάζονται τα δύο ολοκληρωμένα προκειμένου να λειτουργήσουν. Η τροφοδότηση του κυκλώματος γίνεται μέσω της USB θύρας, ενώ τα 3,3V που χρειάζεται το DA14580 για να λειτουργήσει παράγονται εσωτερικά στο FT232R.



Σχήμα Γ2: Πλήρες σχηματικό του USB Dongle.

Η μορφή του υλοποιημένου PCB του παραπάνω κυκλώματος παρουσιάζεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν.



Σχήμα Γ3: Μπροστινή όψη του USB Dongle



Σχήμα Γ4: Πίσω όψη του USB Dongle

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Ο Κώδικας του ATmega328

```
-----Main App.c-----

#include <avr/io.h>
#include "UART.h"
#include "SPI.h"
#include <stdlib.h>
#include "MUX.h"
#include "AD Converter.h"
#include "Main App.h"

#define F_CPU 3800000UL
#include <util/delay.h>

int main(void)
{
    //Initialize UART, SPI, ADC and MUX
    spi_init_master();
    adc_init();
    mux_init();
    uart_init(5);

    //Wait for DA14580 to boot
    _delay_ms(15000);

    //Initialize other variables
    uint16_t sample;

    select_channel(0);

    while(1)
    {
        for (int i =0; i<15; i++)
        {
            //Select MUX channel
            select_channel(0);

            //Get sample
            sample=adc_get_sample();

            //Transmit sample via UART
            uart_transmit(sample>>8);
            uart_transmit(sample);

            //Wait a little
            _delay_ms(2);
        }
    }
}
```

-----MUX.c-----

```
#include "MUX.h"
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

/*
PC0 -> CSB (Always 0)
PC1 -> CSA (Always 0)
PC2 -> A3
PC3 -> A2
PC4 -> A1
PC5 -> A0
PD6 -> WR
PD7 -> EN (Always 0)
*/

int channel[15];

void mux_init (void)
{
    //Set Inputs - Outputs
    DDRC = (1<<DDC0)|(1<<DDC1)|(1<<DDC2)|(1<<DDC3)|(1<<DDC4)|(1<<DDC5);
    DDRD = (1<<DDD6)|(1<<DDD7);

    //Set CSA, CSB and EN to 0
    PORTC = (0<<PORTC0)|(0<<PORTC1);
    PORTD = (0<<PORTD7);
}

void resetPORTC ()
{
    PORTC = (PORTC & (0b11000011));
}

void select_channel (int channel_num)
{
    resetPORTC ();

    if (channel_num<15)
    {
        PORTC = PORTC|(channel_num<<6) ;

        PORTD = (0<<PORTD6);

        _delay_us(100);

        PORTD = (1<<PORTD6);
    }
}
```

-----AD Converter.c-----

```
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include "AD Converter.h"

void cs_high(void)
{
    PORTB = (1<<PORTB2);
}

void cs_low(void)
{
    PORTB = (0<<PORTB2);
}

void cs_init(void)
{
    //Set CS pin as Output
    DDRB = (1<<DDB2);
}

void adc_init(void)
{
    //Initialize CS pin
    cs_init();

    //Initialize SPI in Master mode
    spi_init_master();

    //Set CS pin high
    cs_high();
}

int adc_get_sample(void)
{
    //Initialize variables
    uint16_t byte1,byte2;
    uint16_t sample=0;

    //Get the sample
    cs_low();

    byte1=spi_tranceiver(0);
    byte2=spi_tranceiver(0);

    cs_high();

    //2s complement
    sample = (byte1<<8)|byte2 ;

    sample = ~(sample - 1);

    return sample;
}
```

```

}

-----SPL.c-----

#include <avr/io.h>

// Initialize SPI Master Device (without interrupt)
void spi_init_master (void)
{
    DDRB = 0b11101111;          //Set MOSI, SCK as Output
    SPCR = (1<<SPE)|(1<<MSTR)|(1<<CPOL)|(1<<CPHA); //Enable SPI, Set as Master
}

//Function to send and receive data for both master and slave
int spi_tranceiver (int data)
{
    SPDR = data;                //Load data into the buffer
    while(!(SPSR & (1<<SPIF))); //Wait until transmission complete
    return(SPDR);               //Return received data
}

-----UART.c-----

#include <avr/io.h>

void uart_pins_init (void)
{
    //Set TX pin as Output
    DDRD = (1<<DDD1);
}

void uart_init( int BaudLow)
{
    //Initialize UART pins
    uart_pins_init();

    //Set baud rate
    UBRR0H = 0;
    UBRR0L = BaudLow;

    //Enable receiver and transmitter
    UCSR0B = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0);

    //Set frame format: 8data, 2stop bit
    UCSR0C = (0<<USBS0)|(3<<UCSZ00);
}

void uart_transmit( unsigned char data )
{
    /* Wait for empty transmit buffer */
    while ( !( UCSR0A & (1<<UDRE0)) );
    /* Put data into buffer, sends the data */
    UDR0 = data;
}

```

```

unsigned char uart_recieve( void )
{
    /* Wait for data to be received */
    while ( !(UCSR0A & (1<<RXC0)) );
    /* Get and return received data from buffer */
    return UDR0;
}

```

-----Main App.h-----

```
#include <avr/io.h>
```

```
int main(void);
```

-----MUX.h-----

```
#include <avr/io.h>
```

```
void mux_init (void);
void select_channel (int channel);
```

-----AD Converter.h-----

```
#include <avr/io.h>
```

```
void adc_init(void);
int adc_get_sample(void);
void cs_low(void);
void cs_high(void);
void cs_init(void);
```

-----UART.h-----

```
#include <avr/io.h>
```

```
void uart_pins_init (void);
void uart_init( int BaudLow);
void uart_transmit( unsigned char data );
unsigned char uart_recieve( void );
```

-----SPI.h-----

```
#include <avr/io.h>
```

```
void spi_pins_init (void);
void spi_init_master (void);
int spi_tranceiver (int data);
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

1. Brian C. Wadell, “Transmission Line Design Handbook”, Artech House, 1991
2. Kevin Townsend, Carles Cufí, Akiba, Robert Davidson, “Getting Started with Bluetooth Low Energy”, O’Reilly, 2014
3. Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipiboon “Microstrip Antenna design handbook”, Artech House, 2001

Papers-Application Notes

1. Audrun Andersen , Application Note AN043
2. Gao Hongmin, Liu Jinbo, “Design and Improvement of a Printed IFA for Bluetooth System”, Beijing Institute of Technology
3. B.T.P Madhav, VGKM Pisipati, Habibulla Khan, P.V. Datta Prasad, Shorting Plate Planar Inverted Folded on LC Substrate for Bluetooth Application
4. S.Gopalakrishnan, R.Pradeep, P.Ramya, “Modified Planar Inverted F Antenna for Wimax Application” , International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 4, Issue 3, March 2015
5. Παπατζανάκης Ευστάθιος Ανάπτυξη ενσωματωμένης εφαρμογής πάνω σε Bluetooth Low Energy development board και εφαρμογής smart-phone με σκοπό τη δημιουργία ενός συστήματος καταγραφής καιρού, Διπλωματική Εργασία , 2014

Datasheets

1. Analog Devices ADG726 Datasheet
2. Texas Instruments ADC141S626 Datasheet
3. Dialog Semiconductor DA14580 Datasheet
4. On Semiconductor CAT24M01 Datasheet
5. Atmel ATmega328 Datasheet

DA14580 Documentation

1. User manual – DA14580 Development Kit v1.1
2. User manual – DA14580 Software architecture v3.0
3. User manual – DA14580 Software Development Guide v1.1
4. User manual – DA14580 Sleep mode configuration v1.0
5. User manual – DA14580 Memory map and scatter file v1.0
6. User manual – DA14580 Peripheral Examples v1.0
7. User manual – DA14580 Proximity application example in an integrated- and externalprocessor solution v1.0
8. DA14580 Development Kit Mainboard Schematic – Version C2.0
9. Application Note – DA14580 Supply Current Measurements v1.1
10. Application Note – DA14580-01 Cold boot timing and power details v1.0