



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Συστήματος Τηλεμετρίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φώτιος Χ. Ζαφείρης

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

Αθήνα, Μάιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Συστήματος Τηλεμετρίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φώτιος Χ. Ζαφείρης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 30ή Ιουνίου 2021

.....
Π. Σωτηριάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Θ. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σ. Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2021

.....

Φώτιος Χ. Ζαφείρης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
ΕΜΠ

Copyright © Φώτιος Χ. Ζαφείρης, 2021
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 η προσπάθεια σχεδίασης και κατασκευής συστήματος τηλεμετρίας, με σκοπό την αποστολή σημάτων και μετρήσεων από αισθητήρες, σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, το σύστημα θα βρίσκεται στην μύτη πυραύλου μοντελισμού και θα καταγράφει τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια πτήσης, τις οποίες και θα αποστέλλει σε δέκτη στη Γη σε πραγματικό χρόνο. Αρχικά, γίνεται μια περιγραφή της δομής του συστήματος, καθώς και μία εισαγωγή στα πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, γίνεται μία ανάλυση των μερών που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος. Έπειτα, παρουσιάζονται τα σχηματικά του συνολικού κυκλώματος και η διαδικασία σχεδίασης του τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Λέξεις κλειδιά

Τεχνικές σχεδίασης PCB, NRF24, STM32F4, Altium Designer

Abstract

In the present diploma thesis an attempt is made to design and fabricate a system of telemetry, in order to transmit signals and measurements taken from sensors in real time. Specifically, the system will be glued inside the nose cone of a model rocket and ,during the flight, measurements will be recorded and transmitted to a receiver on the ground. Initially, the main structure of the system and the used communication protocols are described. Next, there is an analysis of the parts chosen to be placed in the system. The thesis continues with the presentation of the schematics and the design of the printed circuit board (PCB). Finally, the results of the experimental process/measurements are presented.

Key Words

PCB design, NRF24, STM32F4, Altium Designer

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, οφείλω θερμές ευχαριστίες στον κύριο Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο να αναλάβω ένα τόσο περίπλοκο και δύσκολο θέμα, όπως και σε όλο το εργαστήριο circuits lab για την φιλική ατμόσφαιρα και τη διάθεση που αντιμετώπισα καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ,πιο συγκεκριμένα, τους Κωνσταντίνο Ασημακόπουλο και Κωνσταντίνο Παπαφώτη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές, που σε μεγάλο βαθμό κατέστησαν εφικτή την περάτωση του έργου, παρά τον μεγάλο φόρτο εργασίας τους.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη, όχι μόνο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά σε ολόκληρη τη ζωή μου. Το περιβάλλον αγάπης, υποστήριξης και σεβασμού με το οποίο με έχουν περιβάλλει καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου με έχει βοηθήσει να γίνω ο άνθρωπος που είμαι σήμερα και τους είμαι βαθύτατα ευγνώμων για αυτό.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Κατάλογος Σχημάτων.....	12
Κατάλογος Πινάκων.....	13
1.Εισαγωγή.....	14
2. Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Πρωτόκολλα Σειριακής Ενσύρματης Επικοινωνίας.....	17
2.2.1 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART).....	17
2.2.2 Serial Peripheral Interface (SPI).....	18
2.2.3 Inter-Integrated Circuits (I2C).....	20
2.3 Πρωτόκολλα Ασύρματης Επικοινωνίας.....	23
2.3.1 Εισαγωγή.....	23
2.3.2 ISM Band.....	24
2.3.3 Global Positioning System (GPS).....	25
3. Σχεδίαση του Συστήματος.....	27
3.1 Μικροεπεξεργαστής.....	27
3.2 Αισθητήρες.....	28
3.2.1 LSM9DS1.....	28
3.2.2 H3LIS100DL.....	31
3.2.3 MCP9800.....	32
3.3 Μονάδα Μνήμης.....	33
3.4 Δέκτης GPS.....	36
3.5 Μονάδα RF.....	38
3.6 Τροφοδοσία.....	40

4. Σχηματικά του Συστήματος.....	42
4.1 Σχηματικά Μικροεπεξεργαστή.....	42
4.2 Σχηματικά Αισθητήρων.....	43
5. Σχεδίαση Τυπωμένου Κυκλώματος.....	44
6. Πειραματική Διαδικασία.....	51
6.1 Εισαγωγή.....	51
6.2 Ανάπτυξη Λογισμικού.....	51
6.3 Δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες.....	53
6.4 Αναθεώρηση και τελική δοκιμή.....	56
7. Συμπεράσματα.....	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Ο Κώδικας του STM32F401RET6.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Δομή Συστήματος Τηλεμετρίας.....	15
Σχήμα 1.2 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος.....	16
Σχήμα 2.1 : Συνδεσμολογία UART.....	17
Σχήμα 2.2 : Συνδεσμολογία τεσσάρων συσκευών με SPI.....	19
Σχήμα 2.3 : Συνδεσμολογία τριών συσκευών με I2C.....	21
Σχήμα 2.4 : Κατηγοριοποίηση προτύπων 802 ανάλογα με το εύρος.....	24
Σχήμα 2.5 : Πληροφορία δέκτη GPS.....	26
Σχήμα 3.1 : Δομικό διάγραμμα STM32F401RET6.....	27
Σχήμα 3.2 : Αποτύπωμα (footprint) του STM32F401RET6.....	28
Σχήμα 3.3 : Δομικό διάγραμμα επιταχυνσιόμετρου/γυροσκόπιου.....	29
Σχήμα 3.4 : Δομικό διάγραμμα μαγνητόμετρου.....	29
Σχήμα 3.5 : Αποτύπωμα (footprint) του LSM9DS1.....	30
Σχήμα 3.6 : Δομικό διάγραμμα H3LIS100DL.....	31
Σχήμα 3.7 : Αποτύπωμα (footprint) του H3LIS100DL.....	32
Σχήμα 3.8 : Αποτύπωμα (footprint) του MCP9800.....	32
Σχήμα 3.9 : Δομικό διάγραμμα του MCP9800.....	33
Σχήμα 3.10 : Αποτύπωμα (footprint) της IS25LP128F.....	35
Σχήμα 3.11 : Δομικό διάγραμμα της IS25LP128F.....	35
Σχήμα 3.12 : Δομικό διάγραμμα του TESEO-LIV3F.....	36
Σχήμα 3.13 : Σχηματικό κυκλώματος δέκτη GPS.....	37
Σχήμα 3.14 : Σχηματικό του κυκλώματος του συστήματος τηλεπικοινωνίας.....	39
Σχήμα 3.15 : Σχηματικό του κυκλώματος τροφοδοσίας.....	41
Σχήμα 4.1 : Σχηματικό του κυκλώματος του επεξεργαστή.....	42
Σχήμα 4.2 : Σχηματικό των υποκυκλωμάτων των αισθητήρων.....	43
Σχήμα 5.1 : Εσωτερική δομή πλακέτας τεσσάρων στρωμάτων (<i>pcbway.com</i>).....	45
Σχήμα 5.2 : Πρώτο layer.....	47
Σχήμα 5.3 : Δεύτερο layer, συνδεδεμένο με την τάση τροφοδοσίας.....	47
Σχήμα 5.4 : Τρίτο layer, συνδεδεμένο με την γείωση.....	48
Σχήμα 5.5 : Τέταρτο layer.....	48
Σχήμα 5.6 : Silkscreen.....	49
Σχήμα 5.7 : Τρισδιάστατη προσομοίωση του πάνω μέρους της πλακέτας.....	49
Σχήμα 5.8 : Τρισδιάστατη προσομοίωση του κάτω μέρους της πλακέτας.....	50
Σχήμα 6.1 : Δομή πακέτου δεδομένων αποστολής.....	53
Σχήμα 6.2 : Η τελική μορφή της πλακέτας.....	53
Σχήμα 6.3 : Διαδικασία περιτύλιξης της πλακέτας με πυρίμαχο υλικό.....	54
Σχήμα 6.4 : Τοποθέτηση της πλακέτας στη μύτη του πυραύλου.....	54
Σχήμα 6.5 : Χώρος δοκιμής του συστήματος.....	55
Σχήμα 6.6 : Διαγράμματα επιτάχυνσης.....	57
Σχήμα 6.7 : Διαγράμματα γωνιακής ταχύτητας.....	58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Πακέτο πληροφορίας με πρωτόκολλο UART.....	18
Πίνακας 2.2 : Διαδικασία αποστολής-λήψης πληροφορίας με SPI.....	20
Πίνακας 2.3 : Διαδικασία αποστολής πληροφορίας από Master I2C σε Slave I2C.....	22
Πίνακας 2.4 : Διαδικασία ανάγνωσης πληροφορίας του Slave I2C από Master I2C..	22
Πίνακας 7.1 : Προδιαγραφές του συστήματος.....	59

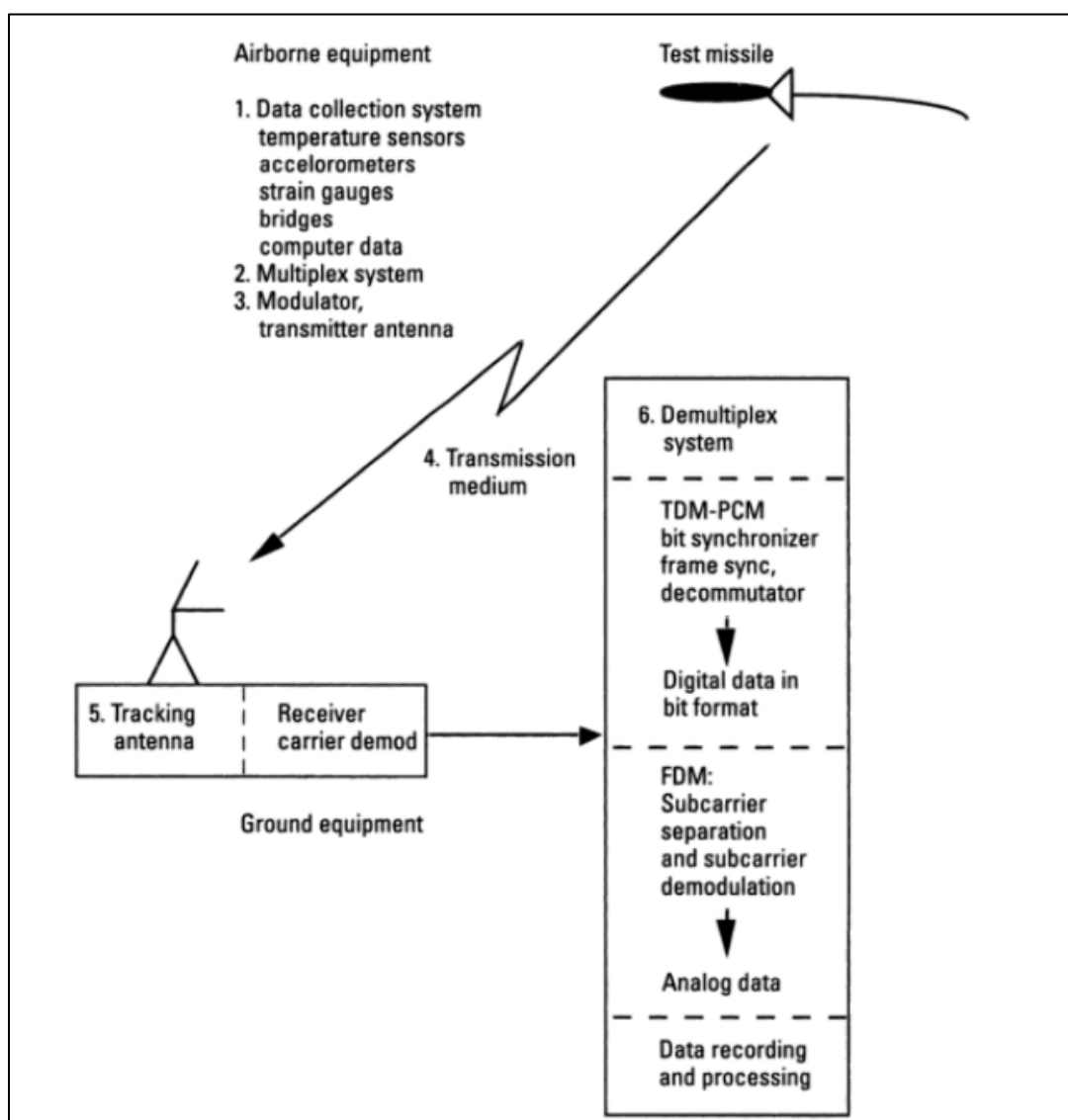
1.Εισαγωγή

Σκοπός ενός συστήματος τηλεμετρίας είναι η συλλογή δεδομένων από ένα απομακρυσμένο ή άβολο περιβάλλον και η μετάδοσή τους σε περιβάλλον όπου μπορεί να περατωθεί η επεξεργασία τους, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων. Συνήθως συστήματα τηλεμετρίας τοποθετούνται σε οχήματα, προκειμένου να αποκτηθούν μετρήσεις όταν αυτά κινούνται, όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα ή και πυραύλους.

Ένα σύστημα τηλεμετρίας αποτελείται από τα εξής:

- Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων, αποτελούμενο από αισθητήρες και μορφοτροπίες, οι οποίοι μετατρέπουν φυσικές μεταβλητές σε ηλεκτρικά σήματα.
- Ένα σύστημα αρχικής επεξεργασίας των σημάτων που αποκτήθηκαν και προετοιμασίας τους για αποστολή.
- Ένα σύστημα υπεύθυνο για την μετάδοση των τροποποιημένων σημάτων. Αρχικά γίνεται η προσαρμογή τους σε φέρον κύμα και στη συνέχεια το κύκλωμα οδηγεί κεραία προκειμένου να επιτευχθεί η μετάδοση. Συνήθως οι συχνότητες μετάδοσης βρίσκονται στα 1,435-1,535 GHz ή στα 2,2-2,29 GHz.
- Ένα μέσο μετάδοσης του κύματος που εκπέμπει η κεραία, συνήθως ο αέρας ή ,σε υποβρύχιες μεταδόσεις, το νερό.
- Ένα σύστημα υποδοχής και αποκωδικοποίησης του κύματος. Αποτελείται από κεραία RF, ενισχυτή σήματος και αποκωδικοποιητή.
- Ένα σύστημα επεξεργασίας των αποκωδικοποιημένων σημάτων, με σκοπό την προετοιμασία τους για το επόμενο βήμα.
- Ένα σύστημα τελικής επεξεργασίας των μετρήσεων, με σκοπό την καταγραφή και χρήση προς εξαγωγή συμπερασμάτων.

Σχηματικά η δομή του συστήματος τηλεμετρίας που περιγράφηκε:

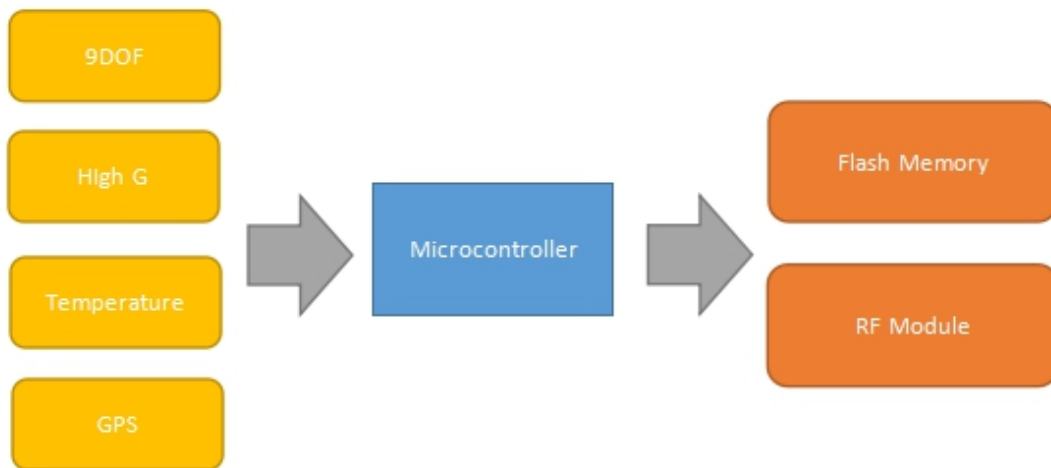


Σχήμα 1.1 : Δομή Συστήματος Τηλεμετρίας

Όπως γίνεται κατανοητό η σχεδίαση και κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία. Αρχικά η επιλογή των αισθητήρων πρέπει να γίνει με γνώμονα την αξιοπιστία αλλά και την ταχύτητα των μετρήσεων τους, αλλά και με το μικρότερο δυνατό βάρος και όγκο, προκειμένου να μην επηρεαστεί η πτητική ικανότητα του πυραύλου στον οποίο θα τοποθετηθούν. Με παρόμοιο σκεπτικό θα πρέπει να επιλεγεί και το σύστημα επεξεργασίας και αποστολής.

Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει η παρουσίαση της σχεδίασης και κατασκευής ενός συστήματος τηλεματικής, το οποίο περιλαμβάνει αισθητήρες, προκειμένου να αποκτούνται μετρήσεις θερμοκρασίας, επιτάχυνσης, μαγνητικού πεδίου και γωνιακής ταχύτητας, μικροελεγκτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συλλογή των μετρήσεων και την αποστολή τους στο κύκλωμα αποστολής της πληροφορίας στη Γη καθώς και κατάλληλο δέκτη στο έδαφος με σκοπό την παρουσίαση και χρήση των μετρήσεων.

Σχηματικά η δομή του συστήματος:



Σχήμα 1.2 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος

2. Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

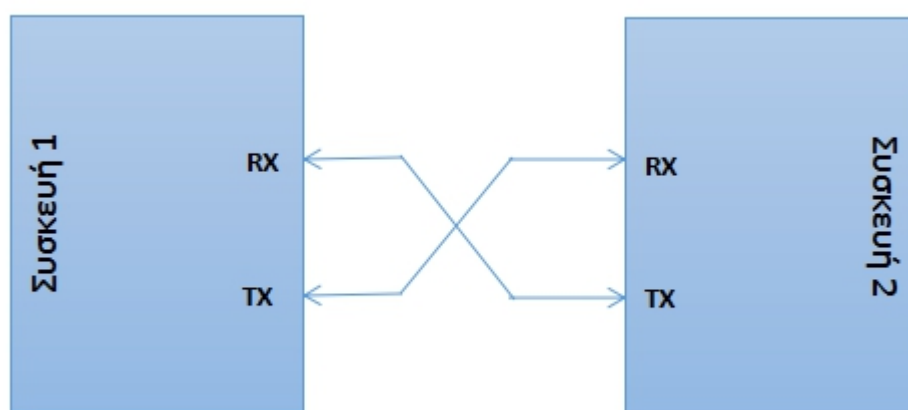
2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιήθηκαν για την επικοινωνία των αισθητήρων με τον μικροεπεξεργαστή, όπως και της επικοινωνίας της πλακέτας-πομπού που βρίσκεται στον πύραυλο με την πλακέτα-δέκτη στο έδαφος.

2.2 Πρωτόκολλα Σειριακής Ενσύρματης Επικοινωνίας

2.2.1 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)

Ο UART δεν αποτελεί από μόνος του ένα ολοκληρωμένο πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας, παρά μια κοινή συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε κύκλωμα που περιλαμβάνει μικροεπεξεργαστές ή μικροελεγκτές. Επιτρέπει την υλοποίηση διάφορων πρωτοκόλλων σειριακής επικοινωνίας, όπως τα RS-232, RS-422 και RS-485, και επιλέγεται λόγω της ευκολίας στη συνδεσμολογία και στην μεγάλη προσαρμοστικότητα σε ταχύτητα και μέγεθος δεδομένων. Σε φυσικό επίπεδο η συνδεσμολογία δύο συσκευών που επικοινωνούν με UART φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.1 : Συνδεσμολογία UART

Η αποστολή ή λήψη δεδομένων γίνεται με κατάλληλη πλαισίωση τους. Το μήνυμα ξεκινά με ένα bit που υποδεικνύει ότι ξεκινά μετάδοση (start bit). Στη συνέχεια τα επόμενα πέντε έως εννιά bit περιέχουν την πληροφορία. Αμέσως μετά μπαίνει, προαιρετικά, ένα bit, το οποίο ονομάζεται parity bit, και υποδεικνύει αν το πλήθος των bit της πληροφορίας που είναι ίσα με το ένα είναι άρτιος ή ζυγός αριθμός. Η μετάδοση τερματίζεται με ένα ή δύο bit, που ονομάζονται stop bits. Σχηματικά η πλαισίωση που περιγράφηκε:

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

Πίνακας 2.1 : Πακέτο πληροφορίας με πρωτόκολλο UART

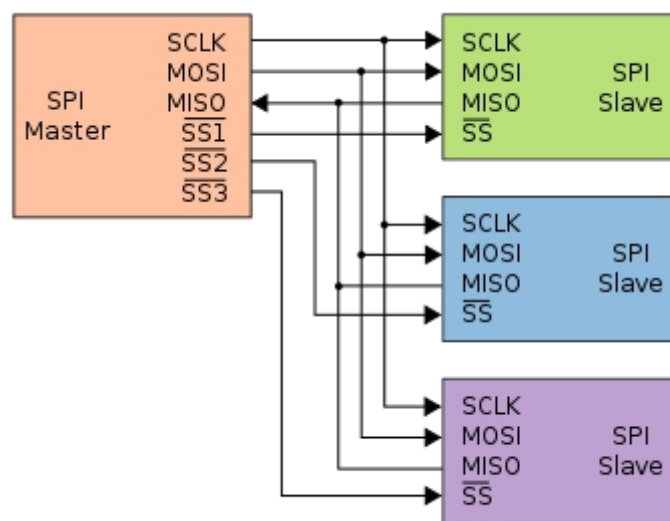
Για την επίτευξη ορθής επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών θα πρέπει να τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Από την στιγμή που δεν μεταφέρεται παλμός (ρολόι) από την μία συσκευή στην άλλη, θα πρέπει η ταχύτητα της ενδοεπικοινωνίας να είναι κοινή και στις δύο συσκευές (να έχουν κοινό baudrate). Έπειτα, ο αριθμός των data bits θα πρέπει να είναι κοινός και στις δύο συσκευές, όπως και η ύπαρξη ή μη του parity bit. Τέλος, θα πρέπει ο αριθμός των stop bits να είναι κοινός και στις δύο συσκευές.

2.2.2 Serial Peripheral Interface (SPI)

Το SPI είναι ένα πρωτόκολλο σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας. Αναπτύχθηκε από την Motorola το 1979 και αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα επικοινωνίας στα ενσωματωμένα συστήματα. Οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες με τη συνδεσμολογία του SPI ακολουθούν μια σχέση αφέντη-σκλάβου (Master-Slave). Μπορεί να υπάρχει μόνο μία συσκευή Master και όλες οι υπόλοιπες είναι slaves. Η συσκευή-master ορίζει το ποια συσκευή λειτουργεί και παρέχει το ρολόι για όλες τις συσκευές-slaves.

Η σύνδεση δύο συσκευών με SPI γίνεται με χρήση τεσσάρων καλωδίων. Το πρώτο μεταφέρει από τον αφέντη στον σκλάβο το ρολόι (SCLK). Το δεύτερο αποτελεί την είσοδο δεδομένων για τον αφέντη και ταυτόχρονα την έξοδο του

σκλάβου (Master In Slave Out - MISO). Το τρίτο καλώδιο αποτελεί την είσοδο για την συσκευή-slave και ταυτόχρονα την έξοδο της συσκευής-master (Master Out Slave In - MOSI). Το τέταρτο καλώδιο αποστέλλει σήμα από τη συσκευή αφέντη στην συσκευή σκλάβο, προκειμένου να ξεκινήσει την λειτουργία του (Chip Select - CS). Η συνδεσμολογία του SPI επιτρέπει να συνδεθούν πολλαπλές συσκευές-σκλάβοι σε μία συσκευή-αφέντη, χρησιμοποιώντας κοινό data-bus, δηλαδή, τα καλώδια SCLK, MISO και MOSI, έχοντας διαφορετικά CS συνδεδεμένα με την συσκευή-αφέντη. Σχηματικά μια τέτοια συνδεσμολογία φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.2 : Συνδεσμολογία τεσσάρων συσκευών με SPI

Για την ολοκλήρωση μιας επιτυχημένης αποστολής δεδομένων μεταξύ του SPI Master και του SPI Slave, απαιτείται αρχικά ένα ρολόι κατάλληλης συχνότητας (συνήθως κάποια MHz) που παρέχεται από τον SPI Master στον SPI Slave. Έπειτα, ο SPI Master οδηγεί το σήμα CS στο 0, ώστε να σηματοδοτήσει στον SPI Slave την εκκίνηση της μεταξύ τους επικοινωνίας. Η αποστολή και λήψη δεδομένων γίνεται από τα σήματα MOSI και MISO. Κάθε συσκευή έχει ένα shift register στο οποίο αποθηκεύει τα δεδομένα που θέλει να αποστείλει. Για κάθε bit που στέλνει, σε ένα κύκλο ρολογιού, στην έξοδο, λαμβάνει ένα από την είσοδό του. Μία επιτυχημένη αποστολή ολοκληρώνεται σε οκτώ κύκλους ρολογιού, με τα οκτώ bits του shift register, λόγω των περιστροφών, να περιέχουν πλέον τα οκτώ bits που εισήλθαν κατά την αποστολή. Σχηματικά η διαδικασία αποστολής:

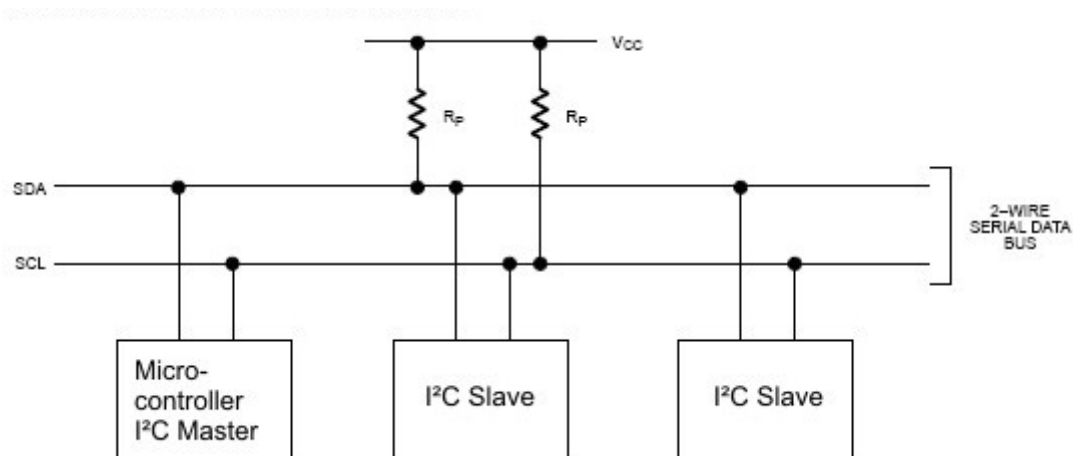
Master Shift Register								Slave Shift Register							
<i>Clock Pulse 0</i>															
M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
<i>Clock Pulse 1</i>															
S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1
<i>Clock Pulse 2</i>															
S1	S0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	M0	S7	S6	S5	S4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

Πίνακας 2.2 : Διαδικασία αποστολής-λήψης πληροφορίας με SPI

2.2.3 Inter-Integrated Circuits (I2C)

Το πρωτόκολλο I2C αναπτύχθηκε από την Phillips και χρησιμοποιείται για την σύνδεση περιφερειακών μικρής ταχύτητας, κυρίως σε μητρικές κάρτες και ενσωματωμένα συστήματα. Έχει αρκετά απλή συνδεσμολογία, αφού χρειάζεται μόλις δύο καλώδια για να επιτύχει ημιαψίδρομη επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών. Το πρώτο καλώδιο παρέχει ρολόι σε όλες τις συσκευές και το δεύτερο τα δεδομένα που λαμβάνει ή αποστέλλει η κάθε συσκευή. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα, εδώ οι γραμμές απαιτείται να είναι συνδεδεμένες σε αντιστάσεις τερματισμού (pull-up resistors). Αυτό συμβαίνει καθώς και οι δύο γραμμές είναι τύπου ανοικτού απαγωγού (open drain) και χωρίς την ύπαρξη των pull-up resistors οι γραμμές θα βρίσκονταν διαρκώς στο 0, αποκλείοντας κάθε πιθανή επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Όπως στο SPI, έτσι και στο πρωτόκολλο του I2C οι συσκευές διαχωρίζονται σε συσκευές-master και σε συσκευές-slave. Πάλι οι I2C Master παρέχουν το ρολόι στους I2C Slaves και είναι αυτοί που μπορούν να εκκινήσουν την διαδικασία επικοινωνίας.

Μια συνδεσμολογία I2C, μεταξύ τριών I2C συσκευών (ενός Master με δύο Slave) φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.3 : Συνδεσμολογία τριών συσκευών με I2C

Η αποστολή δεδομένων ξεκινά με μία ακολουθία έναρξης και τερματίζει με μία ακολουθία τερματισμού. Οι ακολουθίες αυτές σηματοδοτούνται με την αλλαγή στην γραμμή SDA από λογικό 1 σε λογικό 0 (έναρξη) και με την αλλαγή από λογικό 0 σε λογικό 1 (τερματισμός) ενόσω η γραμμή SCL βρίσκεται σε λογικό 1. Είναι οι μοναδικές περιπτώσεις στις οποίες πραγματώνεται αλλαγή στην γραμμή SDA κατά την διάρκεια παλμού του ρολογιού και όχι στην ακμή του. Ανάμεσα στις ακολουθίες αυτές μεταδίδεται πληροφορία μεγέθους 8 bit. Μετά την μετάδοση των 8 bit, η συσκευή που επρόκειτο να τα λάβει αποστέλλει ένα bit επιβεβαίωσης. Αν αυτό έχει τιμή λογικό 0, τότε η αποστολή ήταν επιτυχής (ACK), ενώ αν έχει τιμή λογικό 1 σημαίνει ότι υπήρξε αποτυχία (NACK).

Λόγω της απουσίας εξειδικευμένης γραμμής για την ενεργοποίηση των συσκευών σκλάβων, κάθε συσκευή έχει έναν δικό της αριθμό, μία διεύθυνση μεγέθους 7 bit, την οποία περιμένει και βρίσκεται σε αδράνεια μέχρι να την αναγνώσει από την γραμμή SDA. Τότε και μόνο τότε ξεκινά η επικοινωνία μεταξύ master και slave. Το όγδοο bit κατά την αποστολή της διεύθυνσης ορίζει το κατά πόσο ο master θέλει να αναγνώσει (λογικό 0) ή να γράψει (λογικό 1) δεδομένα στον slave. Μετά την ανάγνωση της διεύθυνσης του ο slave στέλνει bit επιβεβαίωσης στον master και ανάλογα με το R/W bit, είτε περιμένει δεδομένα από τον master είτε

ξεκινά την αποστολή των δεδομένων στην γραμμή SDA. Μετά από κάθε byte που γράφει ή διαβάζει αποστέλλει σήμα επιβεβαίωσης, εκτός από το τελευταίο, όπου και στέλνει σήμα αποτυχίας και περιμένει την ακολουθία τερματισμού. Χαρακτηριστικά θα παρουσιαστεί η αποστολή πληροφορίας μεγέθους 2 byte από συσκευή master σε slave:

S	Διεύθυνση Slave (7bits)	R/W = 1 (1bit)	ACK (1bit)	Data Byte 1 (8bits)	ACK (1bit)	Data Byte 2 (8bits)	NACK (1bit)	P
	Από Master σε Slave			S = Ακολουθία Εκκίνησης P = Ακολουθία Τερματισμού				
	Από Slave σε Master			ACK = Σήμα Επιβεβαίωσης NACK = Σήμα Αποτυχίας				

Πίνακας 2.3 : Διαδικασία αποστολής πληροφορίας από Master I2C σε Slave I2C

Αντίστοιχα, μια διαδικασία ανάγνωσης πληροφορίας 2 bytes του slave από τον master:

S	Διεύθυνση Slave (7bits)	R/W = 0 (1bit)	ACK (1bit)	Data Byte 1 (8bits)	ACK (1bit)	Data Byte 2 (8bits)	NACK (1bit)	P
	Από Master σε Slave			S = Ακολουθία Εκκίνησης P = Ακολουθία Τερματισμού				
	Από Slave σε Master			ACK = Σήμα Επιβεβαίωσης NACK = Σήμα Αποτυχίας				

Πίνακας 2.4 : Διαδικασία ανάγνωσης πληροφορίας του Slave I2C από Master I2C

2.3 Πρωτόκολλα Ασύρματης Επικοινωνίας

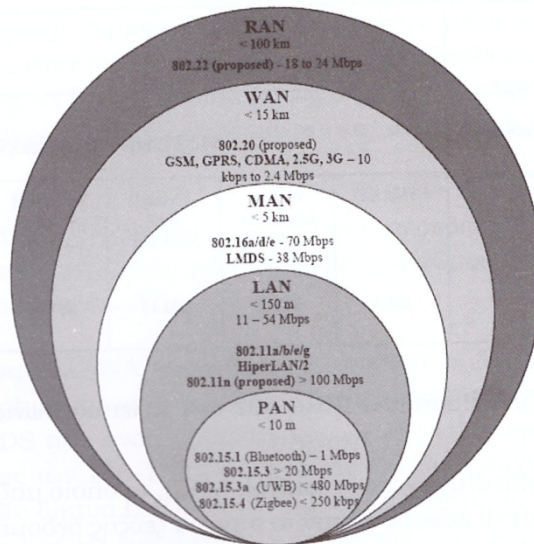
2.3.1 Εισαγωγή

Από τις αρχές του 1990 η έκρηξη της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας, έχει οδηγήσει στην διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για ευρυζωνικά δίκτυα με σκοπό την μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Σήμερα, ο προσανατολισμός αυτών των δικτύων έχει συνδεθεί άρρηκτα με το Διαδίκτυο και τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη για όλο και μεγαλύτερη ταχύτητα.

Ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, θεωρούνται τα ασύρματα δίκτυα που διαθέτουν σημαντικό εύρος ζώνης (τουλάχιστον 2.5MHz) και ,κατά συνέπεια προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (τουλάχιστον 1Mbps), αλλά και επιτρέπουν την πρόσβαση πολλών χρηστών σε κοινούς τηλεπικοινωνιακούς πόρους (κεραία, φυσικό δίαυλο, εύρος ζώνης).

Στην εμπορική επιτυχία των δικτύων αυτών συντέλεσε η έκδοση της σειράς προτύπων 802 από τον διεθνή οργανισμό IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers). Οι προδιαγραφές των συγκεκριμένων προτύπων καλύπτουν όλες τις δυνατές κλίμακες ραδιοκάλυψης και περιλαμβάνουν:

- Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN), όπου η ακτίνα κάλυψης είναι της τάξης μεγέθους κάποιων μέτρων, με χαρακτηριστικότερη εμπορική εφαρμογή το Bluetooth.
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), όπου η ακτίνα κάλυψης είναι της τάξης μεγέθους μερικών δεκάδων μέτρων, με χαρακτηριστικότερη εμπορική εφαρμογή το Wi-Fi.
- Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), όπου η ακτίνα κάλυψης είναι της τάξης μεγέθους μιας αστικής περιοχής, με χαρακτηριστικότερη εμπορική εφαρμογή το WiMax.
- Ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (WRAN), όπου η κάλυψη είναι της τάξης μεγέθους μιας γεωγραφικής περιφέρειας (για παράδειγμα ένας νομός), με χαρακτηριστικότερη εφαρμογή το WiFi-TV.



Σχήμα 2.4 : Κατηγοριοποίηση προτύπων 802 ανάλογα με το εύρος

2.3.2 ISM Band

Η ρύθμιση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων είναι αρμοδιότητα του Τομέα Ραδιοεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Το διαθέσιμο φάσμα για την υλοποίηση ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων χωρίζεται σε αδειοδοτημένες συχνότητες και σε συχνότητες που εξαιρούνται της αδειοδότησης. Οι πρώτες παρέχονται από τις εθνικές αρχές διαχείρισης φάσματος και απολαμβάνουν προστασίας από παρεμβολές, λόγω του ότι κάθε νέα εκχώρηση οφείλει να συμμορφώνεται με συγκεκριμένες προδιαγραφές που περιορίζουν την παρεμβολή προς τα γειτονικά συστήματα. Αντίθετα, στις συχνότητες που εξαιρούνται αδειοδότησης δεν υπάρχει κάποια υποχρέωση για συμμόρφωση με κανονισμούς για την ομαλή λειτουργία των γειτονικών συστημάτων. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη ποιότητα υπηρεσιών στις συγκεκριμένες συχνότητες και καθιστά πιο δύσκολη και απρόβλεπτη τη σχεδίαση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τυπικές ζώνες που εξαιρούνται αδειοδότησης στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη είναι οι ζώνες 2.4-2.483GHz, 5.15-5.35GHz, 5.47-5.725GHz και 5.725-5.825GHz.

Για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με ακαδημαϊκό σκοπό συνήθως γίνεται χρήση κάποιας συχνότητας στο φάσμα ISM (Industrial , Scientific, Medical). Οι συχνότητες που ορίστηκαν ως ISM ήταν κυρίως συχνότητες στις οποίες

διάφορες οικιακές συσκευές δημιουργούσαν παρεμβολές και κατά συνέπεια δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από αξιόπιστα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, για παράδειγμα ένας οικιακός φούρνος μικροκυμάτων δημιουργεί παρεμβολή περίπου στα 2.5GHz. Προφανώς αυτές οι συχνότητες εξαιρούνται αδειοδότησης και εξαιτίας αυτού η χρήση τους αυξάνεται διαρκώς. Κύριες συχνότητες του φάσματος ISM και πλέον χρησιμοποιούμενες βρίσκονται στα 2.4-2.5GHz και στα 5.725-5.875GHz και έχουν εύρος ζώνης 100MHz και 150MHz αντίστοιχα.

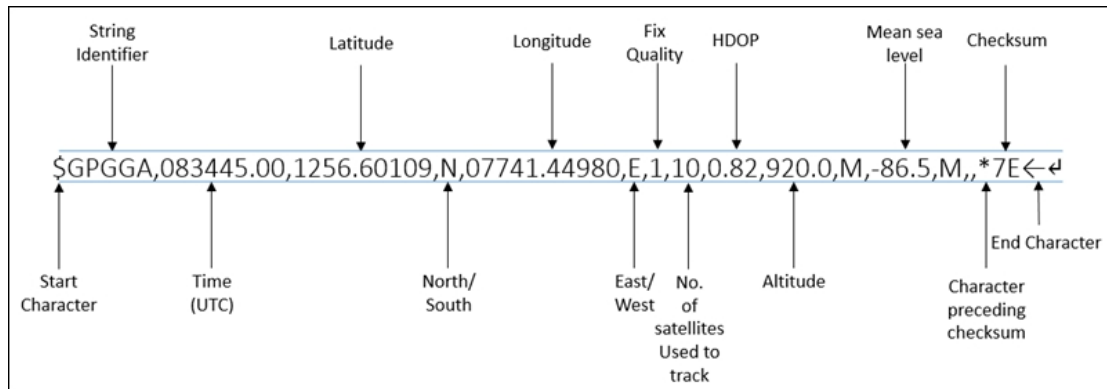
2.3.3 Global Positioning System (GPS)

Το GPS ή Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης είναι παγκόσμιο σύστημα γεωγραφικού εντοπισμού θέσης το οποίο βασίζεται σε ένα “πλέγμα” εικοσιτεσσάρων δορυφόρων της Γης, εφοδιασμένων με ειδικές συσκευές εντοπισμού, οι οποίες ονομάζονται πομποδέκτες GPS. Οι πομποδέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για την θέση ενός αντικειμένου, την ταχύτητα, το υψόμετρο του και την κατεύθυνση της κίνησης του. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από τον Αμερικανικό Στρατό στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και μόνο μετά τη δεκαετία του 1990 έγινε γνωστό και διαθέσιμο στο ευρύ κοινό.

Το GPS αποτελείται από τρία τμήματα, αρχικά τους δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά με τη Γη και παρέχουν τις πληροφορίες, έπειτα το επίγειο τμήμα ελέγχου με βάσεις ανά την υφήλιο με σκοπό την συντήρηση και τον συντονισμό των δορυφόρων, και τέλος τον τελικό χρήστη ο οποίος αποκωδικοποιεί με κατάλληλο λογισμικό τις πληροφορίες των δορυφόρων και ενημερώνεται για την ακριβή του γεωγραφική θέση. Για τον ακριβή υπολογισμό της γεωγραφικής θέσης δεν αρκεί σήμα από ένα δορυφόρο, αντίθετα χρειάζεται σήμα από τουλάχιστον τρεις δορυφόρους.

Η αποκωδικοποίηση ενός σήματος δορυφόρου, προκειμένου να υπολογιστεί η γεωγραφική θέση, είναι μια διαδικασία που απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλου φορητού δέκτη στην εκάστοτε συσκευή. Ένας φορητός δέκτης αποτελείται από τρία μέρη. Μια εσωτερική δορυφορική κεραία, η οποία λαμβάνει το σήμα από τους δορυφόρους, έχοντας οπτική επαφή μαζί τους ή ανακλάσεις του σήματός τους σε εμπόδια (για

παράδειγμα σε κτήρια σε μια αστική περιοχή). Στη συνέχεια το ληφθέν σήμα εισέρχεται στον κυρίως δέκτη GPS, ο οποίος με κυκλώματα εξαιρετικά χαμηλού θορύβου και ειδικές τεχνικές επεξεργασίας σημάτων ξεχωρίζει τις πραγματικές πληροφορίες του δορυφόρου από τις παρεμβολές άλλων τηλεπικοινωνιών. Από αυτό το στάδιο εξέρχεται μια σειρά πληροφοριών (γεωγραφική θέση, ακριβής ώρα, υψόμετρο, ταχύτητα) η οποία χρίζει επεξεργασίας από το επόμενο στάδιο, τον μικροεπεξεργαστή, ώστε να μετατραπεί σε “ανθρώπινη” μορφή και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όποια εφαρμογή το επιθυμεί. Ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει μια σειρά δεδομένων από τον δέκτη μέσω κάποιου πρωτοκόλλου ενσύρματης επικοινωνίας και πραγματοποιεί το λεγόμενο parsing της πληροφορίας. Συνήθως οι δέκτες GPS χρησιμοποιούν μία εξειδικευμένη “γλώσσα” προκειμένου να λαμβάνουν και να αποστέλλουν δεδομένα, το πρωτόκολλο NMEA. Με αυτό το πρωτόκολλο η πληροφορία που εισέρχεται στον μικροεπεξεργαστή περιέχει όλα τα δεδομένα ,αλλά ταξινομημένα με συγκεκριμένη σειρά και χωρισμένα με ειδικούς χαρακτήρες. Parsing της πληροφορίας ονομάζεται η διαδικασία αποκωδικοποίησης αυτής της στοίβας πληροφοριών από τον μικροεπεξεργαστή. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μία πληροφορία από δέκτη GPS χωρίς να έχει γίνει parsing:

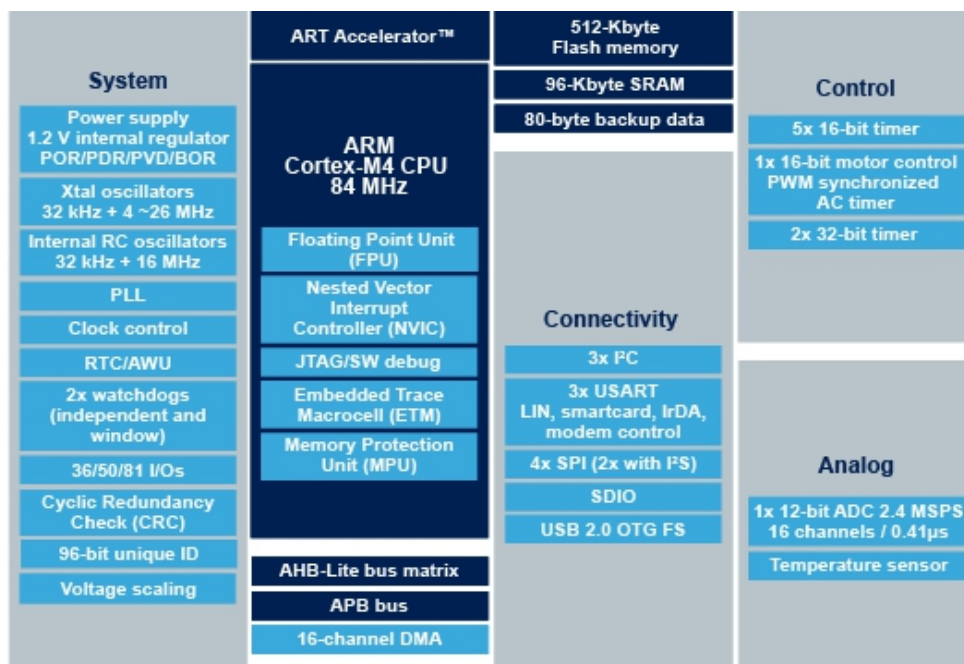


Σχήμα 2.5 : Πληροφορία δέκτη GPS

3. Σχεδίαση του Συστήματος

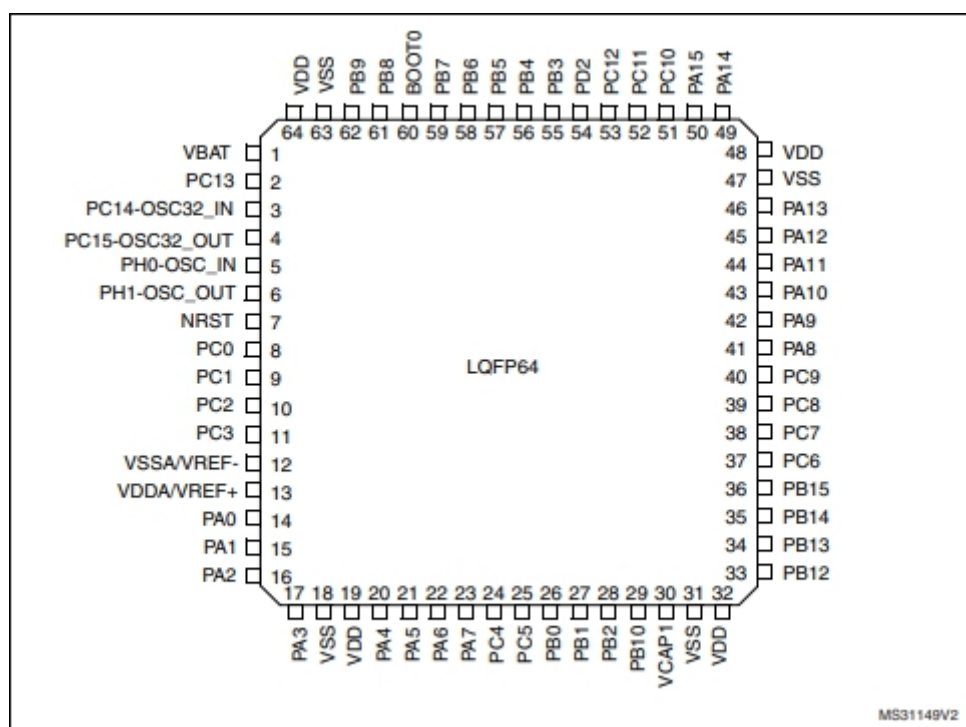
3.1 Μικροεπεξεργαστής

Για την λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητη η παρουσία μικροεπεξεργαστή, ο οποίος καλείται να έχει ρόλο χρονοδρομολογητή στις λειτουργίες των αισθητήρων, αλλά και στις διαδικασίες αποστολής από την κεραία και στην εγγραφή ή ανάγνωση από την μνήμη flash. Χρειάζεται να έχει αρκετές εισόδους περιφερειακών (υποδοχές για συσκευές SPI, I2C και UART), αρκετή μνήμη για τον κώδικα της εφαρμογής και το μικρότερο δυνατό μέγεθος. Με αυτές τις προϋποθέσεις επιλέχθηκε ο μικροεπεξεργαστής STM32F401RET6 της ST Microelectronics. Το δομικό του διάγραμμα και τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.1 : Δομικό διάγραμμα STM32F401RET6

Ο μικροεπεξεργαστής είναι σε πακέτο LQFP64 και το αποτύπωμα του φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.2 : Αποτύπωμα (footprint) του STM32F401RET6

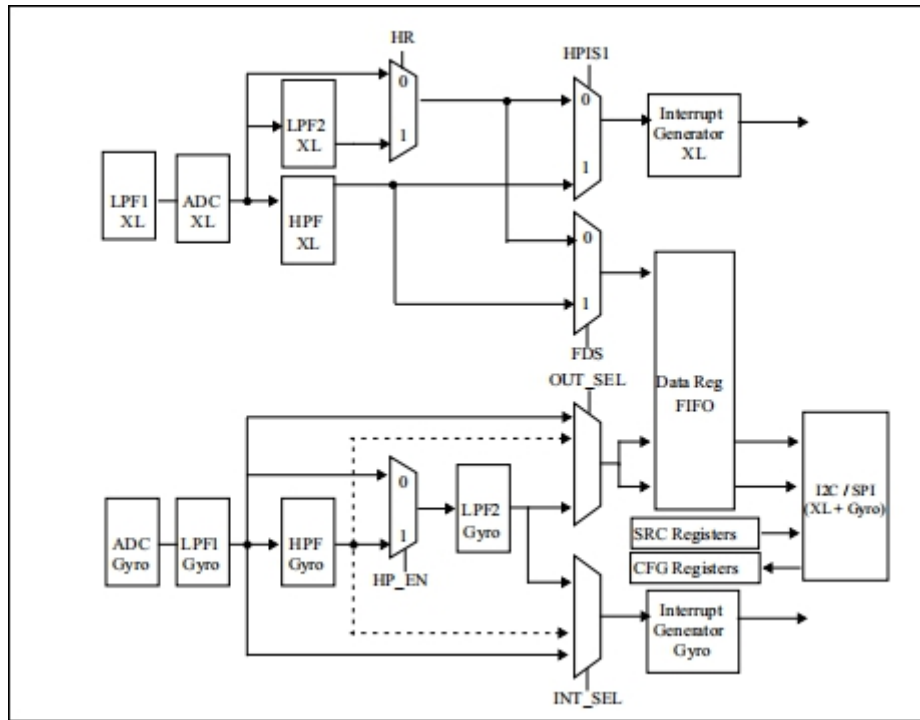
3.2 Αισθητήρες

Το σύστημα θα πρέπει να παρέχει μετρήσεις επιτάχυνσης, γωνιακής ταχύτητας, μαγνητικού πεδίου και θερμοκρασίας. Παρακάτω γίνεται η ανάλυση της επιλογής του κάθε αισθητήρα καθώς και το έργο που επιτελεί.

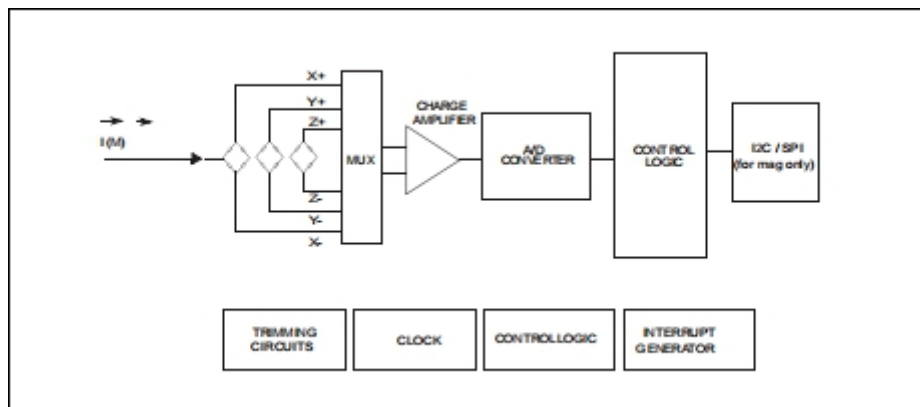
3.2.1 LSM9DS1

Αρχικά, θα χρειαστούμε έναν αισθητήρα που θα δίνει μετρήσεις για επιτάχυνση, μαγνητικό πεδίο και γωνιακή ταχύτητα. Ο LSM9DS1 της ST-Microelectronics επιλέχθηκε καθώς δίνει μετρήσεις επιτάχυνσης, μαγνητικού πεδίου και γωνιακής ταχύτητας σε τρεις διαστάσεις. Ανήκει στην κατηγορία των 9DoF (9 Degrees of Freedom) αισθητήρων, οι οποίοι βρίσκουν τεράστια χρήση στη βιομηχανία. Έχει τη δυνατότητα μέτρησης από -16 έως +16 g επιτάχυνσης, από -16 έως +16 Gauss

μαγνητικό πεδίο και γωνιακή ταχύτητα από -2000 έως +2000 dps. Ο αισθητήρας περιέχει στο ίδιο package ξεχωριστά δύο δομικά κυκλώματα, το πρώτο περιέχει το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο και το δεύτερο το μαγνητόμετρο. Το δομικό του διάγραμμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

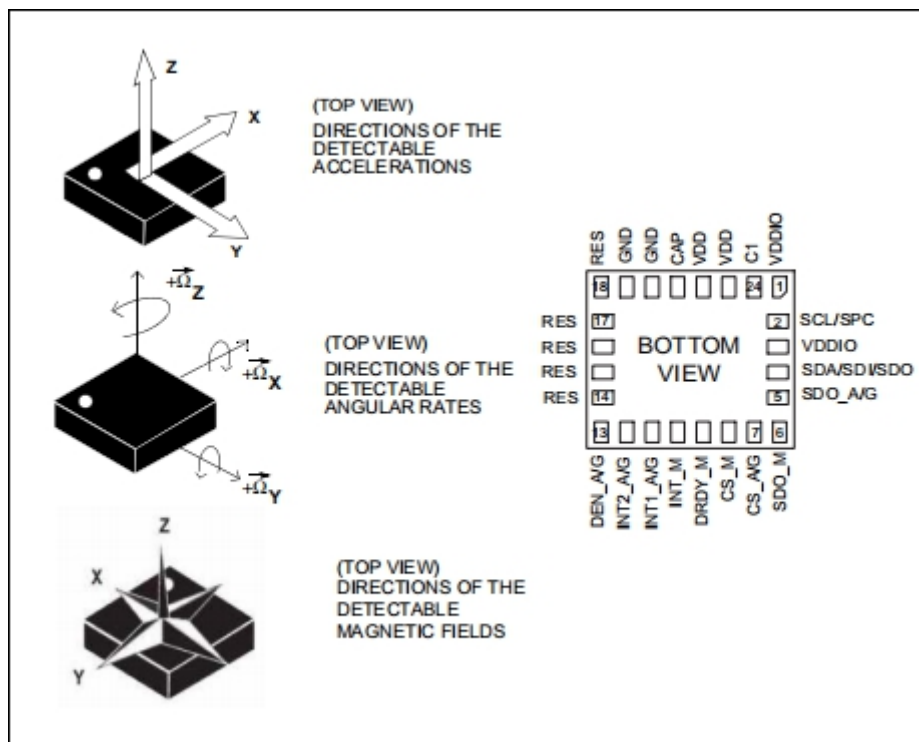


Σχήμα 3.3 : Δομικό διάγραμμα επιταχυνσιόμετρο/γυροσκόπιου



Σχήμα 3.4 : Δομικό διάγραμμα μαγνητόμετρου

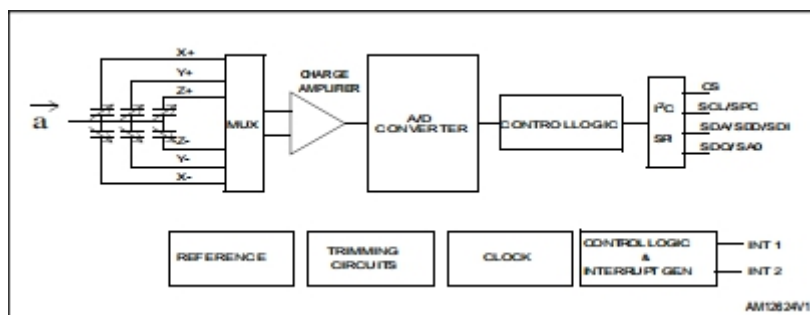
Οι μετρήσεις που δίνει ο αισθητήρας είναι μεγέθους 2bytes σε κάθε διάσταση. Μπορεί να συνδεθεί με μικροεπεξεργαστή ακολουθώντας είτε το πρωτόκολλο SPI είτε I2C. Στην δική μας εφαρμογή επιλέχθηκε να ακολουθηθεί το SPI πρωτόκολλο για την επικοινωνία του με τον μικροεπεξεργαστή καθώς επιθυμούμε την μέγιστη δυνατή ταχύτητα στον δίαυλο επικοινωνίας. Ο LSM9DS1 παρέχει επίσης την δυνατότητα παροχής διακοπών στο σύστημα (external interrupts), πλήρως προγραμματιζόμενων, δίνοντας τη δυνατότητα στο σύστημα να επικοινωνεί μαζί του μόνο όταν υπάρχει διαθέσιμη μέτρηση προς αποστολή. Επίσης, έχει την δυνατότητα εισόδου σε power-down mode όταν δεν επικοινωνεί με τον μικροεπεξεργαστή, προσφέροντας σημαντική μείωση στην κατανάλωση ρεύματος από την μπαταρία. Ο LSM9DS1 έρχεται σε πακέτο LGA-24L με πολύ μικρό αποτύπωμα, μόλις 3mm*3.5mm*1mm, το οποίο φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5 : Αποτύπωμα (footprint) του LSM9DS1

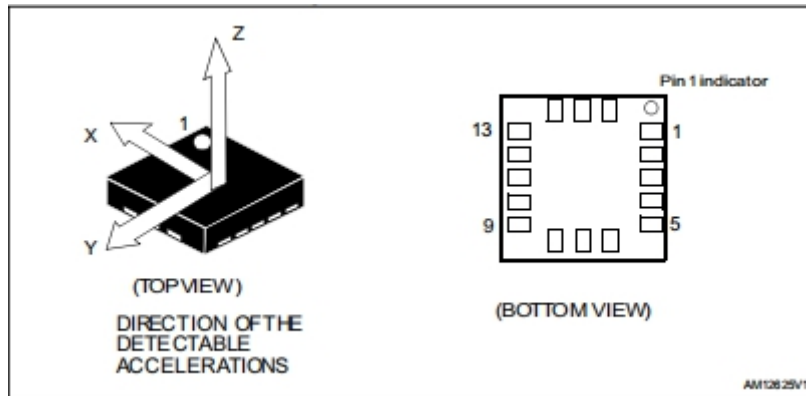
3.2.2 H3LIS100DL

Κατά την εκτόξευση του πυραύλου το σύστημα θα κληθεί να μετρήσει τεράστιες τιμές επιτάχυνσης, τέτοιες που ενδεχομένως ο LSM9DS1 να μην έχει στο εύρος μέτρησης του. Για αυτό το διάστημα της εκτόξευσης θα χρειαστεί διαφορετικό επιταχυνσιόμετρο με σημαντικά μεγαλύτερο εύρος μέτρησης. Αυτό συνεπάγεται και με χαμηλότερη ακρίβεια μέτρησης, ωστόσο, το μικρό διάστημα στο οποίο θα λειτουργήσει δεν θα επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων. Για να επιτελέσει αυτό το έργο επιλέχθηκε ο H3LIS100DL της ST Microelectronics, ο οποίος έχει εύρος μέτρησης από -100 έως +100 g. Η μέτρησή του έρχεται ως 8bit πληροφορία και έχει τη δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας είτε με SPI είτε με I2C. Και πάλι θα επιλέξουμε το πρωτόκολλο SPI καθώς στο διάστημα της λειτουργίας του θα χρειαστούμε μεγάλη ταχύτητα επικοινωνίας στον διάυλο, αλλά και επειδή μετά το πέρας της εκτόξευσης θα τοποθετηθεί σε power-down mode για ελάχιστη κατανάλωση ρεύματος, έτσι δεν επιθυμούμε να βρίσκεται σε διάυλο I2C όπου σε κάθε αποστολή πληροφοριών θα ελέγχει αν έχει σταλεί η διεύθυνσή του. Το δομικό διάγραμμα του αισθητήρα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.6 : Δομικό διάγραμμα H3LIS100DL

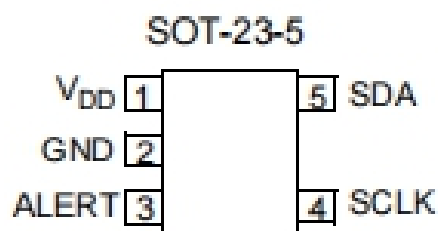
Ο H3LIS100DL παρέχει και δύο συνδέσεις αφιερωμένες σε εξωτερικές διακοπές (external interrupts), οι οποίες μπορούν να ενημερώνουν τον μικροεπεξεργαστή ότι υπάρχει έτοιμη μέτρηση ή ότι κάποια μέτρηση έχει ξεφύγει από το εύρος που έχει προγραμματιστεί στον αισθητήρα. Το package του αισθητήρα είναι TFLGA-16L και έχει διαστάσεις 3mm*3mm*1mm. Το αποτύπωμά του φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.7 : Αποτύπωμα (footprint) του H3LIS100DL

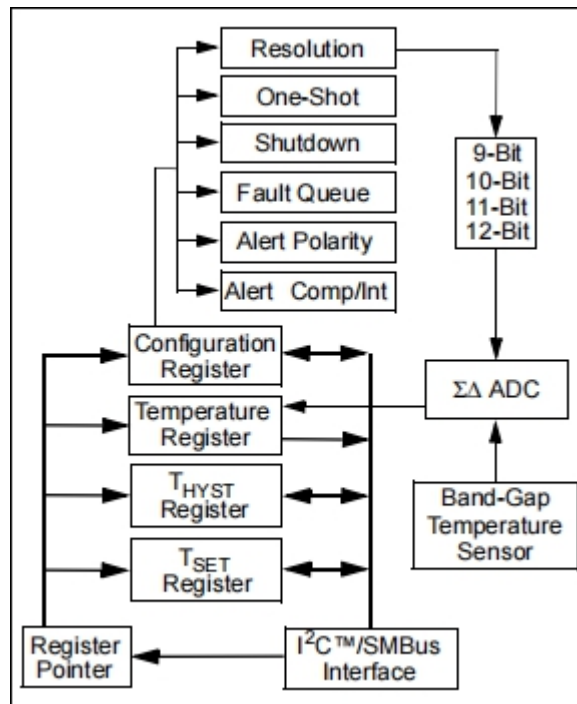
3.2.3 MCP9800

Τέλος, θα χρειαστούμε έναν αισθητήρα ο οποίος θα παρέχει μετρήσεις θερμοκρασίας. Για τις μετρήσεις αυτές δεν υπάρχει ιδιαίτερη επίσπευση, αφού κυρίως μας ενδιαφέρουν για να παρατηρούμε φαινόμενα υπερθέρμανσης στην πλακέτα. Για αυτό το λόγο δεν τοποθετήθηκε σε γραμμή SPI αλλά σε I2C, με μικρότερη ταχύτητα. Επίσης, σημαντική προϋπόθεση είναι ο αισθητήρας να έχει το μικρότερο δυνατό αποτύπωμα και βάρος. Συνδυάζοντας τα προηγούμενα επιλέχθηκε ο αισθητήρας θερμοκρασίας MCP9800 της εταιρείας Microchip, ο οποίος διαθέτει εύρος μέτρησης από -55 έως +125 βαθμούς Κελσίου και ακρίβεια ενός βαθμού Κελσίου σε θερμοκρασίες από -10 έως 80 βαθμούς Κελσίου. Η μέτρηση έχει μέγεθος από 9 έως 12 bits, ανάλογα με την ακρίβεια που έχει διαλέξει ο χρήστης και όπως προαναφέρθηκε επικοινωνεί με πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C. Διαθέτει μικρό αποτύπωμα (SOT-23-5) και interrupt pin που ενημερώνει για μετρήσεις εκτός του προγραμματισμένου εύρους μέτρησης:



Σχήμα 3.8 : Αποτύπωμα (footprint) του MCP9800

Το δομικό διάγραμμα του αισθητήρα φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.9 : Δομικό διάγραμμα του MCP9800

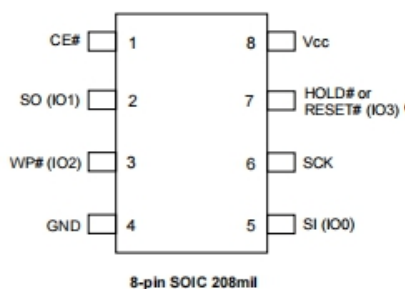
3.3 Μονάδα Μνήμης

Το σύστημα θα χρειαστεί κάποια μονάδα μνήμης υπεύθυνη για την αποθήκευση των μετρήσεων, ώστε μετά την προσγείωση του πυραύλου να είναι δυνατή η ανάκτηση του συνόλου των μετρήσεων από το σύστημα. Αυτό είναι χρήσιμο και για την αξιολόγηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος της πλακέτας, αφού μπορεί εμπράκτως να ελέγξει αν χάθηκαν μετρήσεις κατά την τηλεπικοινωνία. Για αυτό το σκοπό είναι αναγκαία η επιλογή μονάδας μνήμης, η οποία θα έχει την δυνατότητα διατήρησης των δεδομένων ακόμα και χωρίς να τροφοδοτείται αλλά και να έχει αρκετή ανοχή και ανθεκτικότητα σε απαιτητικές συνθήκες, όπως είναι αυτές εντός της μύτης του πυραύλου. Η καταλληλότερη επιλογή με αυτές τις προϋποθέσεις είναι μια μνήμη flash.

Η τεχνολογία των μνημών flash αναπτύχθηκε από την Toshiba το 1980 και βασίστηκε στην ανάγκη της βιομηχανίας την εποχή εκείνη να αποκολληθεί από τα μειονεκτήματα των μνημών EEPROM και RAM. Οι πρώτες χρειάζονταν σβήσιμο όλων των δεδομένων που περιείχαν προκειμένου να εισέλθουν νέα, ενώ οι δεύτερες έχαναν το σύνολο των δεδομένων τους μόλις αποσυνδέονταν από την τροφοδοσία. Αυτά είναι ,αντίθετα, τα κύρια πλεονεκτήματα της μνήμης flash, η οποία χωρίζει την μνήμη της σε κομμάτια (sectors) και σελίδες (pages) προκειμένου να είναι δυνατή η διαγραφή των δεδομένων μόνο μιας σελίδας ή ενός τομέα της μνήμης για να εισέλθουν νέα δεδομένα στη θέση τους, αλλά και διατηρεί τα δεδομένα της ακόμα και χωρίς τροφοδοσία. Άλλο ένα πλεονέκτημα της μνήμης flash είναι η ανθεκτικότητα της σε σχέση με τους σκληρούς δίσκους (hard disks), κάτι που την έχει εδραιώσει ως καταλληλότερη επιλογή σε φορητά συστήματα. Ωστόσο, η μνήμη flash προσφέρει σημαντικά χαμηλότερες ταχύτητες από ότι μια μνήμη RAM ή ROM, αλλά και είναι ικανή για πεπερασμένο μόνο αριθμό αναγνώσεων και εγγραφών στους τομείς και τις σελίδες της.

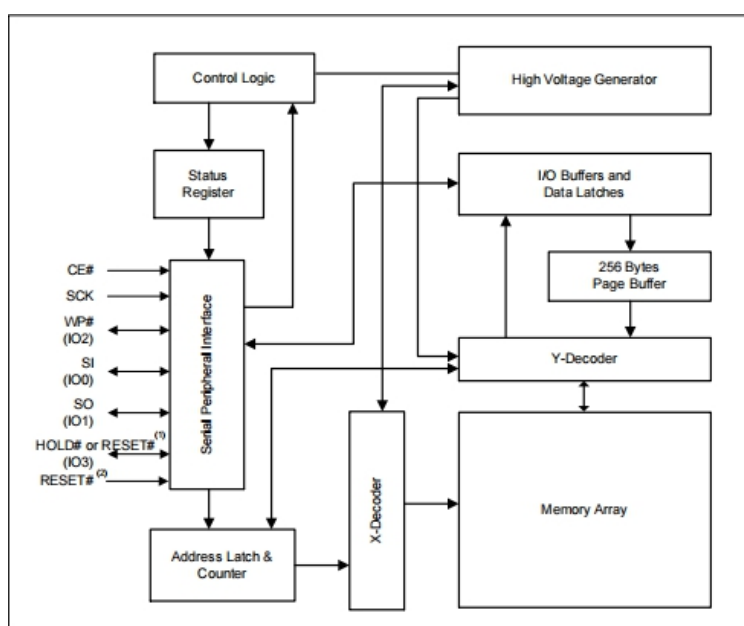
Οι μνήμες flash χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις NAND Flash και τις NOR Flash. Και οι δύο χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία με MOSFET ρυθμιζόμενης πύλης (floating gate), αλλά διαφέρουν σε κυκλωματικό επίπεδο. Σε μια NAND μνήμη τα κελιά μνήμης είναι συνδεδεμένα σε σειρά με λειτουργία παρόμοια με αυτή μιας λογικής πύλης NAND, ενώ στη NOR μνήμη τα κελιά μνήμης είναι συνδεδεμένα παράλληλα στην γραμμή στην οποία εισέρχονται τα δεδομένα και κατά συνέπεια μπορούν να προγραμματιστούν το καθένα ξεχωριστά.

Η μνήμη που επιλέχθηκε για το σύστημα είναι η IS25LP128F της ISSI, μια NOR μνήμη flash με χωρητικότητα 128Mbits που ακολουθεί πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI και έχει συχνότητα ανάγνωσης 80MHz. Το package της μνήμης είναι 8-pin SOIC και το αποτύπωμά της φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.10 : Αποτύπωμα (footprint) της IS25LP128F

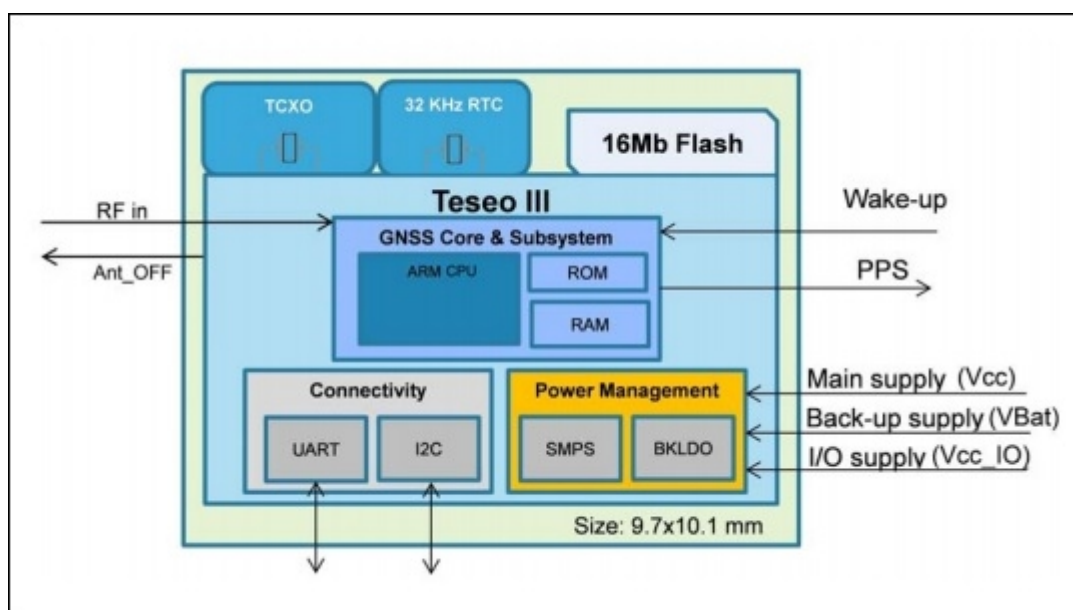
Η μνήμη έχει είσοδο αφιερωμένη για επίτρεψη εγγραφής, αλλά και την δυνατότητα προστασίας των δεδομένων της με password, εξασφαλίζοντας σε μεγάλο βαθμό την ασφάλεια των δεδομένων της. Επίσης, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη, όταν επιθυμεί να γράψει μεγάλο όγκο δεδομένων, να τα αποστείλει μέσω της σειριακής επικοινωνίας και έπειτα να τερματίσει το δίαυλο χωρίς να περιμένει την εγγραφή τους στην μνήμη, λόγω του εσωτερικού κυκλώματος της μνήμης που συνεχίζει την εγγραφή ακόμα και με τον δίαυλο επικοινωνίας ανενεργό. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται σημαντικός χρόνος ανάμεσα στις εγγραφές στην μνήμη. Ο επεξεργαστής χρειάζεται μόνο πριν την αποστολή δεδομένων να ελέγχει αν η μνήμη έχει ολοκληρώσει τις προηγούμενες εγγραφές, και αν ναι, να αποστέλλει τα νέα δεδομένα προς εγγραφή και να συνεχίζει στην επόμενη διεργασία του. Το δομικό διάγραμμα της μνήμης φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.11 : Δομικό διάγραμμα της IS25LP128F

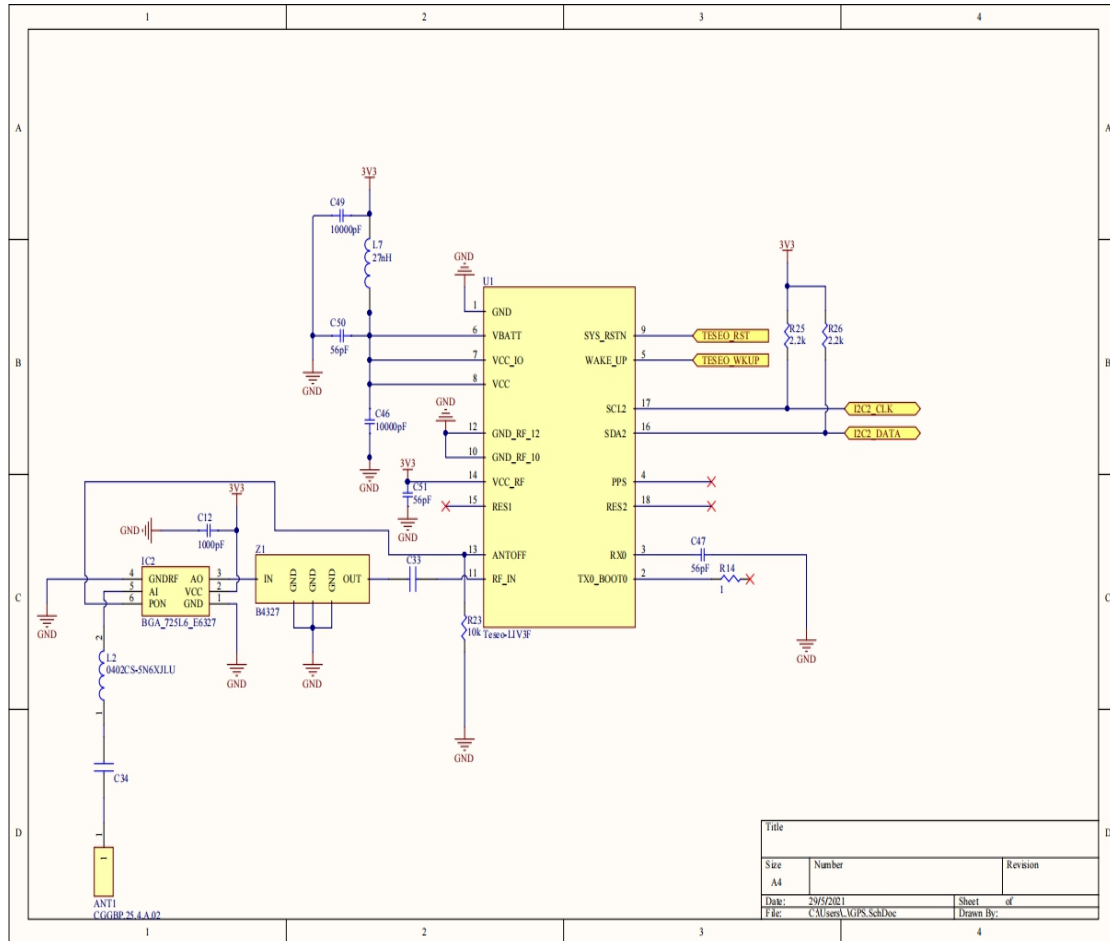
3.4 Δέκτης GPS

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή του συστήματος τηλεμετρίας, ωστόσο, υψίστης σημασίας είναι και η δυνατότητα του συστήματος να αποστέλλει κατά τη διάρκεια της πτήσης του πυραύλου και, κυρίως στην προσγείωση του, στίγμα στον δέκτη με την ακριβή τοποθεσία του. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο πύραυλος θα μπορεί να βρεθεί με οποιεσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες, ακόμα και αν έχει χαθεί η οπτική επαφή μαζί του μετά την προσγείωση. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ο δέκτης ST Microelectronics Teseo LIV3F, ο οποίος συνδέεται με μια παθητική κεραία προς επικοινωνία του με τους δορυφόρους. Διαθέτει ρυθμό εξόδου έως 10Hz, δηλαδή μπορεί να μας αποστέλλει έως δέκα στίγματα του πυραύλου ανά δευτερόλεπτο. Συνδέεται με τον μικροεπεξεργαστή μέσω είτε του πρωτοκόλλου I2C, είτε μέσω του πρωτοκόλλου UART. Το δομικό του κύκλωμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.12 : Δομικό διάγραμμα του TESEO-LIV3F

Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την τοποθέτηση του στην πλακέτα φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.13 : Σχηματικό κυκλώματος δέκτη GPS

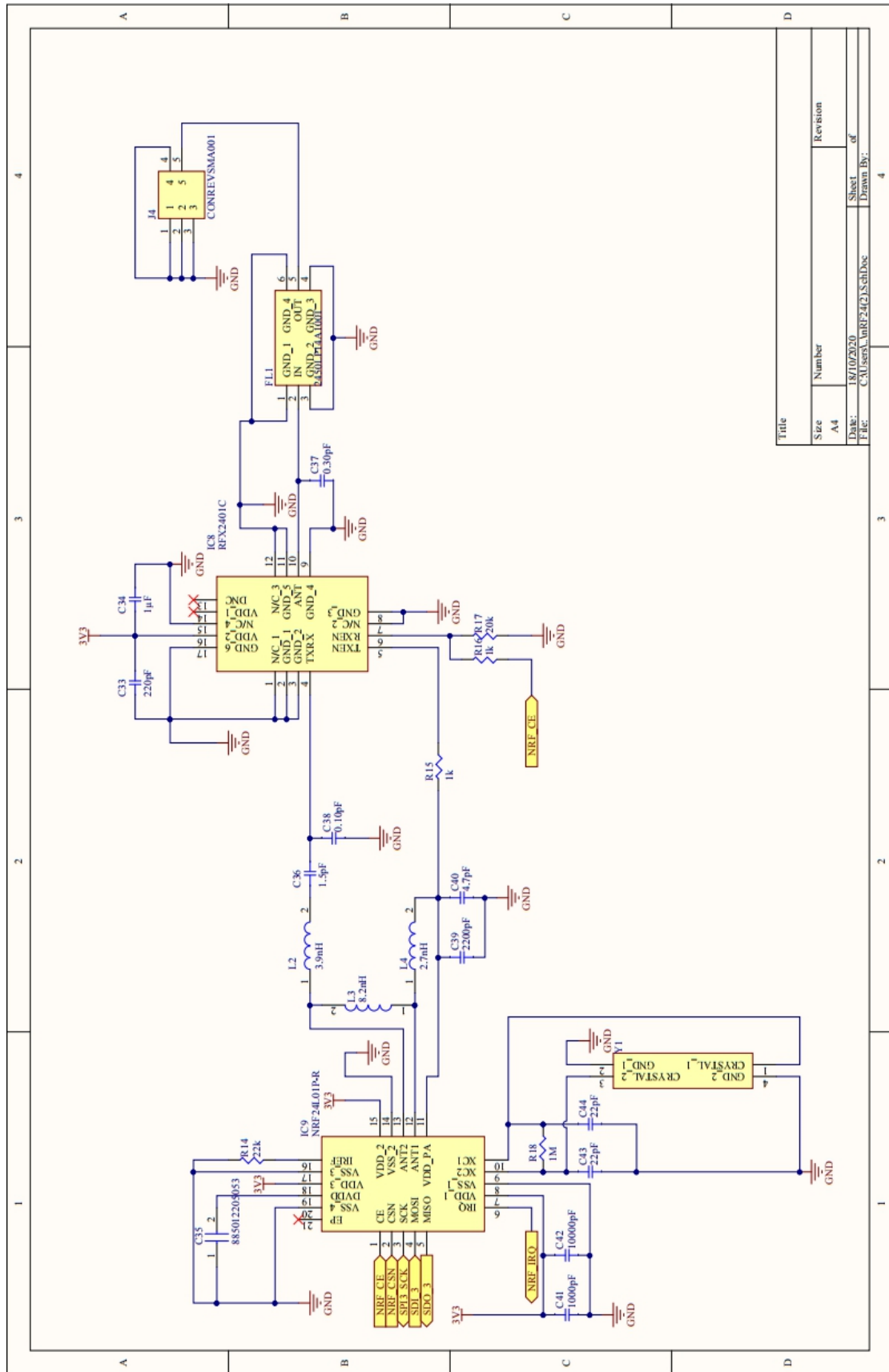
3.5 Μονάδα RF

Για την επικοινωνία του συστήματος που βρίσκεται στον πύραυλο με τον δέκτη στο έδαφος, χρειάζεται ένα κατάλληλο τηλεπικοινωνιακό κύκλωμα που να προσφέρει αξιόπιστη ζεύξη αλλά και μεγάλη ταχύτητα μετάδοσης (data rate). Εξαιρετικά σημαντικό είναι και το εύρος της επικοινωνίας καθώς ο πύραυλος θα βρίσκεται σε σημαντική απόσταση από το έδαφος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα άνωθεν έγινε η επιλογή του nRF24L01 της Nordic Semiconductors, έναν πομποδέκτη στις συχνότητες 2.4-2.4835GHz του φάσματος ISM. Λειτουργεί με ειδικό πρωτόκολλο της κατασκευάστριας εταιρείας και επικοινωνεί με μικροεπεξεργαστή μέσω SPI. Η διαμόρφωση του σήματος που χρησιμοποιείται στην κεραία είναι η GFSK, κάνοντας έτσι τις εναλλαγές εντός του διαμορφωμένου σήματος πιο ομαλές, περνώντας το από φίλτρο Gauss, βοηθώντας έτσι στην ποιότητα της τηλεπικοινωνίας.

Για την λειτουργία του απαιτεί την κατάλληλη συνδεσμολογία με κάποιο δομοστοιχείο υπεύθυνο για την εναλλαγή του από πομπό σε δέκτη και αντίστροφα, αλλά και την ενίσχυση του σήματος πριν φτάσει στην κεραία (πομπός) ή την ενίσχυση του σήματος που λήφθηκε από την κεραία με τον λιγότερο δυνατό θόρυβο (δέκτης). Τέλος, χρειάζεται η τοποθέτηση κατάλληλης κεραίας, μετά από φίλτρο απόρριψης αρμονικών συχνοτήτων. Φυσικά για την τοποθέτηση της κεραίας θα πρέπει η γραμμή μεταφοράς να είναι προσαρμοσμένη στην κεραία για μέγιστη μεταφορά του σήματος.

Λόγω του γεγονότος ότι η ορθή λειτουργία του συγκεκριμένου κομματιού του συστήματος αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί σε ξεχωριστό τυπωμένο κύκλωμα και να τοποθετηθεί στο συνολικό κύκλωμα ως εξωτερική πλακέτα, προκειμένου να αποφευχθεί ο θόρυβος από τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος, αλλά και από την άλλη κεραία που υπάρχει στο σύστημα (GPS). Το σχηματικό της φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Title	
Size	Number
A4	Revision
Date:	Sheet
18/10/2020	of
File:	Drawn By:
C:\Users\ankf24\Documents	

Σχήμα 3.14 : Σχηματικό του κυκλώματος του συστήματος τηλεπικοινωνίας

3.6 Τροφοδοσία

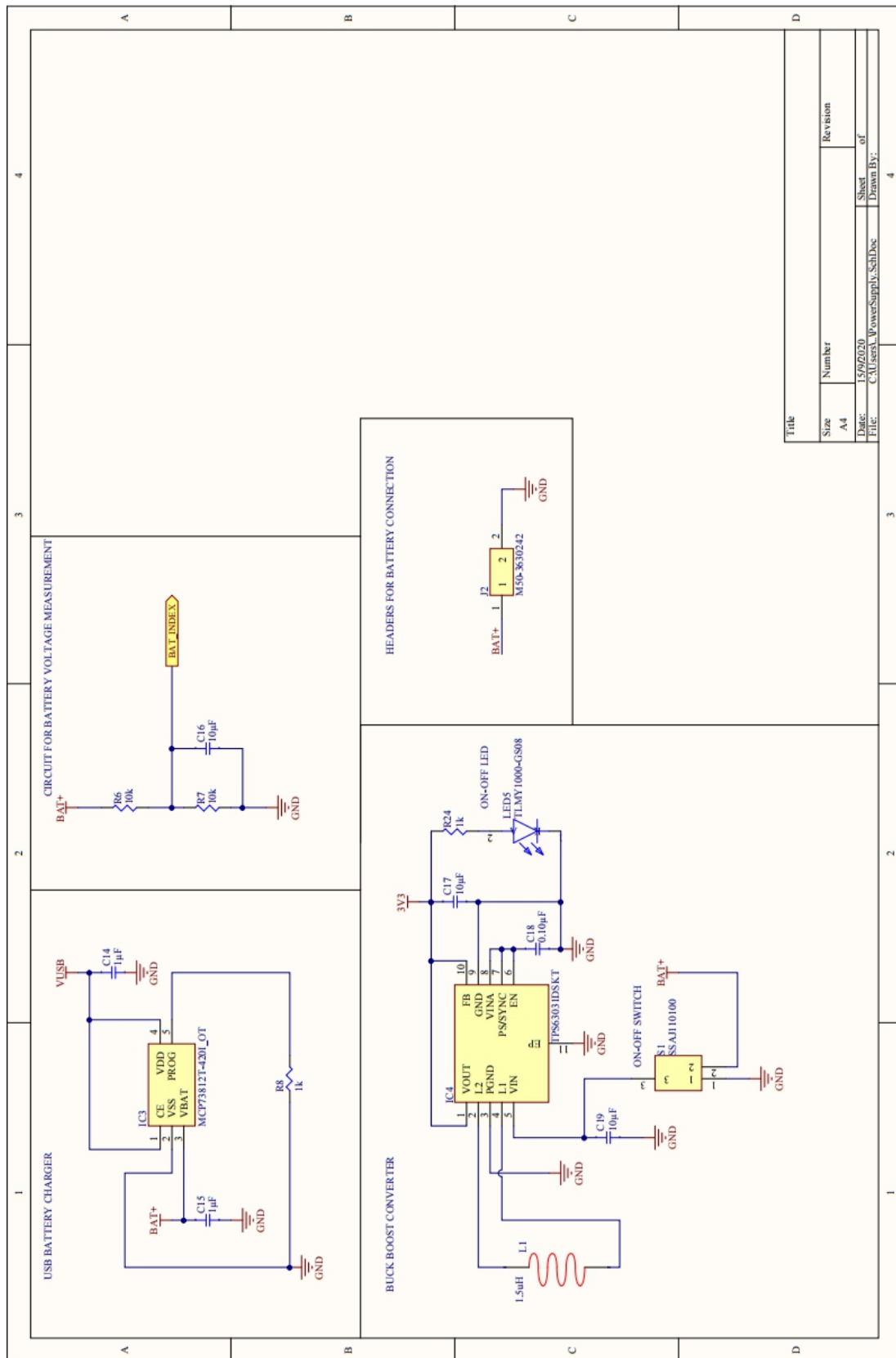
Ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός λειτουργικού και αξιόπιστου συστήματος είναι το σύστημα τροφοδοσίας του. Ένα άρτιο σύστημα τροφοδοσίας εξασφαλίζει την ορθή λειτουργία όλων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων του συστήματος και αποτρέπει επικίνδυνες διακυμάνσεις στην τάση που μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε καταστροφικές βλάβες τους.

Το σύστημα που σχεδιάζεται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία τροφοδοτείται από τάση 3.3V. Για να επιτευχθεί αυτό η τροφοδοσία προέρχεται από μπαταρία κατάλληλης τάσης, ή μέσω σύνδεσης USB. Η τάση παραμένει σταθερή και στις δύο περιπτώσεις, ανεξάρτητα από το πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία, με την χρήση κυκλώματος buck-boost. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο TPS63031 της Texas Instruments, που μπορεί να προσφέρει σταθεροποιημένη τάση 3.3V με έως και 800mA απαίτηση ρεύματος από το κύκλωμα, τιμή εξαιρετικά μεγαλύτερη από την απαίτηση του συστήματος.

Στη συνέχεια, χρειάζεται ένα κύκλωμα για την φόρτιση της μπαταρίας, μέσω USB. Για να επιτελέσει αυτόν το σκοπό επιλέχθηκε ο φορτιστής μπαταρίας λιθίου MCP73812T της Microchip, ο οποίος εξασφαλίζει την σταθερή τροφοδοσία της μπαταρίας με κατάλληλο ρεύμα, ανάλογα με τη φάση φόρτισης της, ώστε να επεκτείνει την διάρκεια ζωής της, αλλά και να εξασφαλίσει ότι δε θα υπάρξει υπερφόρτιση της.

Τέλος, στο κύκλωμα έχει προστεθεί ένας διαιρέτης τάσης που οδηγεί είσοδο στον μικροεπεξεργαστή, ώστε να υπάρχει και ψηφιακός έλεγχος της τάσης του συστήματος, αλλά και της φόρτισης της μπαταρίας.

Το σχηματικό του συνολικού κυκλώματος τροφοδοσίας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:

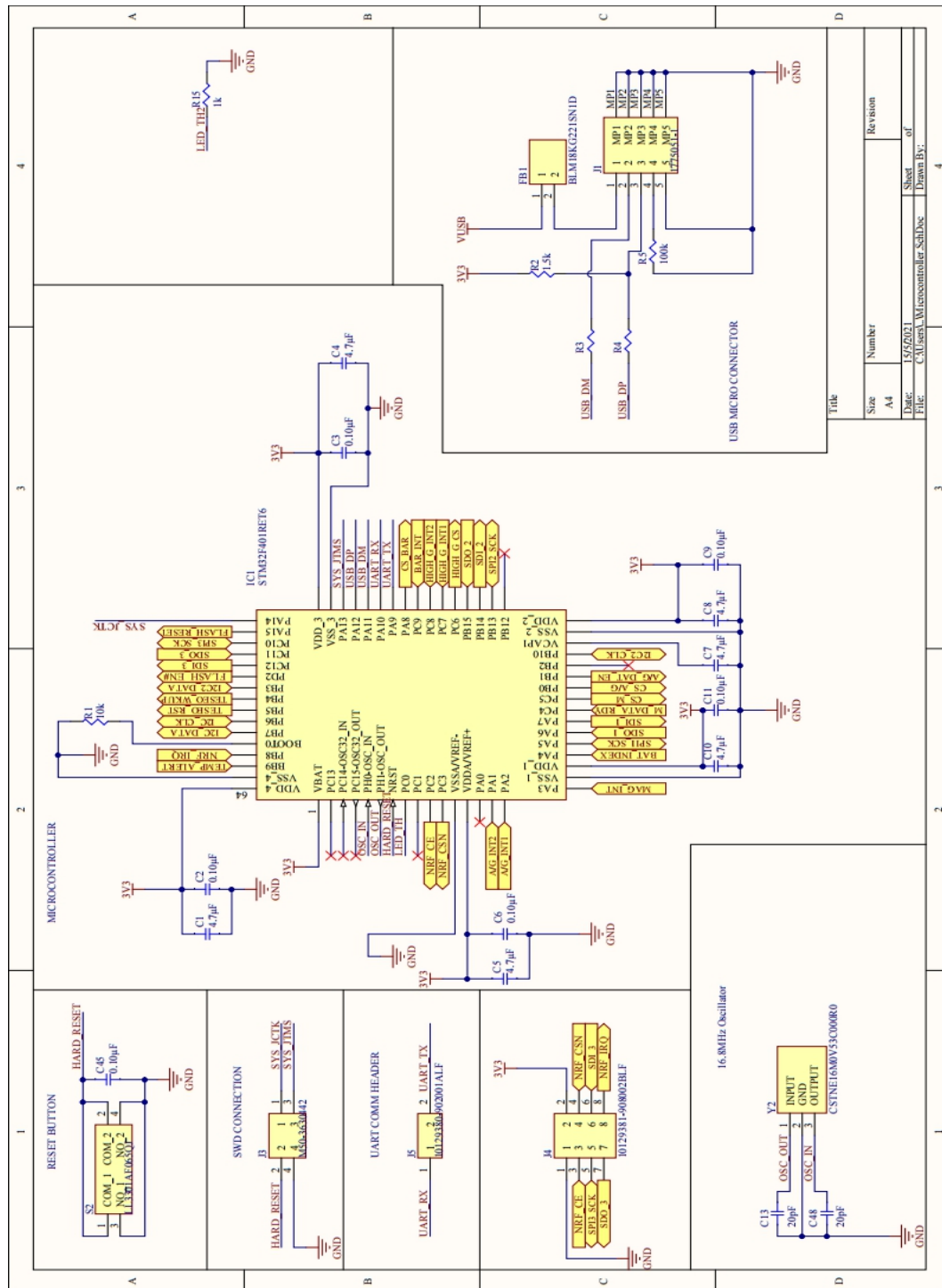


Title	
Size	Number
A4	Revision
Date:	Sheet
File:	of
C:\User\... Powersupply_SchDoc	4
Drawn By:	

Σχήμα 3.15 : Σχηματικό του κυκλώματος τροφοδοσίας

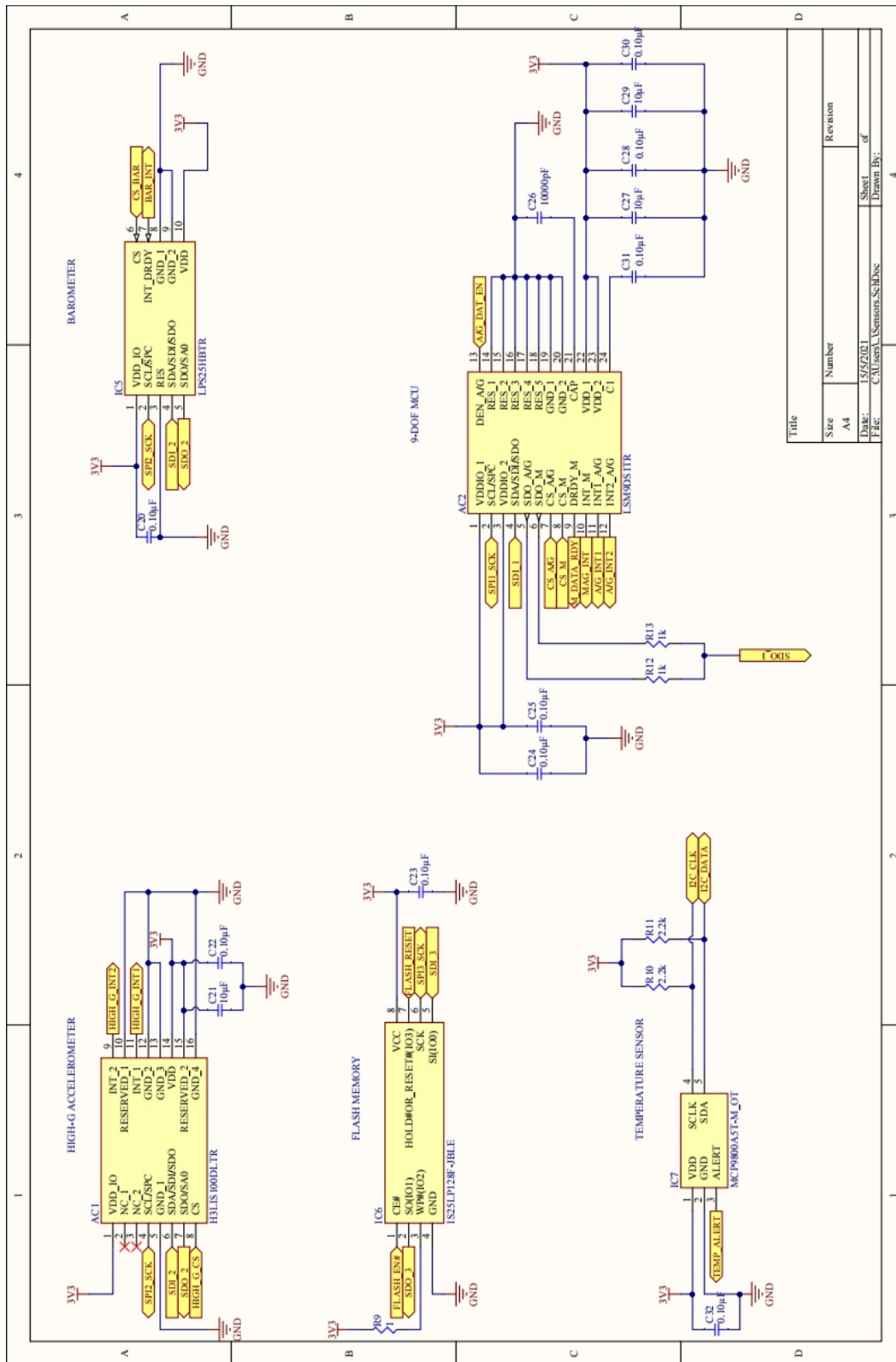
4. Σχηματικά του Συστήματος

4.1 Σχηματικά Μικροεπεξεργαστή



Σχήμα 4.1 : Σχηματικό του κυκλώματος του επεξεργαστή

4.2 Σχηματικά Αισθητήρων



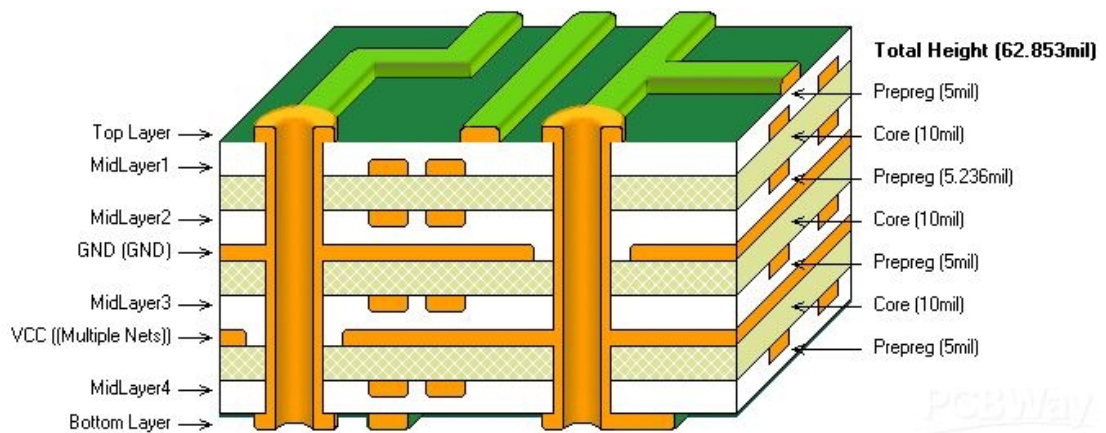
Σχήμα 4.2 : Σχηματικό των υποκυκλωμάτων των αισθητήρων

5. Σχεδίαση Τυπωμένου Κυκλώματος

Η τεχνολογία των τυπωμένων κυκλωμάτων άρχισε από τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν και ξεκίνησαν οι προσπάθειες για την εύρεση πιο οικονομικού τρόπου κατασκευής ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ωστόσο, η ανακάλυψη των τυπωμένων κυκλωμάτων αποδίδεται στον Αυστριακό μηχανικό και εφευρέτη Paul Eisler, ο οποίος το 1936 κατασκεύασε ραδιόφωνο που περιείχε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Η ανακάλυψη του χρησιμοποιήθηκε και αξιοποιήθηκε κυρίως μετά το τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου από τις ΗΠΑ, ενώ ο ίδιος έκανε μεγάλο δικαστικό αγώνα για να αναγνωριστεί η πατέντα ως δική του.

Ένα τυπωμένο κύκλωμα αποτελείται από στρώμα φύλλου μονωτικού υλικού και φύλλου χαλκού πάνω σε μονωτικό υπόστρωμα. Το φύλλο χαλκού υπόκειται ειδική χημική επεξεργασία και παίρνει μορφή δημιουργώντας το κύκλωμα. Ένα τυπωμένο κύκλωμα μπορεί να έχει μια στρώση χαλκού ή και περισσότερες, χωρισμένες μεταξύ τους με στρώμα μονωτικού υλικού. Συνήθως τα μέρη του κυκλώματος συνδέονται στο κύκλωμα μέσω ειδικών υποδοχών στο στρώμα χαλκού (pads) ,που σχηματίζονται κατά την σχεδίαση, και προσφέρουν ,πέρα από τη σύνδεση στο κύκλωμα, μηχανική στήριξη στα στοιχεία που έχουν κολληθεί. Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμών του χαλκού (copper traces), οι οποίες έχουν το ρόλο των καλωδίων σε ένα κανονικό κύκλωμα. Δυο ξεχωριστά στρώματα χαλκού μπορούν να συνδεθούν μέσω ειδικών τρυπών που διαπερνούν τα μονωτικά στρώματα (vias). Η ύπαρξη περισσότερων στρωμάτων σε μία πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος επιτρέπει τον πιο αποδοτικό σχεδιασμό της και κατά συνέπεια μικρότερο μέγεθος στο τελικό προϊόν. Αυτό συμβαίνει καθώς δίνεται η δυνατότητα στον σχεδιαστή να τοποθετήσει τις διασυνδέσεις (traces) σε διαφορετικά στρώματα (layers) παράλληλα. Πιο συνηθισμένες επιλογές στρωμάτων είναι η ύπαρξη είτε δύο είτε τεσσάρων στρωμάτων χαλκού. Στην πρώτη περίπτωση στρώμα χαλκού υπάρχει στο πάνω και στο κάτω μέρος της πλακέτας, ενώ στη δεύτερη υπάρχουν δύο επιπλέον στρώματα ανάμεσά τους. Σημαντικό μειονέκτημα της ύπαρξης πολλών στρωμάτων χαλκού είναι η δυσκολία εύρεσης λάθους και διόρθωσης μετά το σχεδιασμό και την κατασκευή του κυκλώματος.

Σχηματικά η εσωτερική δομή μιας πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.1 : Εσωτερική δομή πλακέτας τεσσάρων στρωμάτων (*pcbway.com*)

Συνήθης πρακτική σε πλακέτες τεσσάρων στρωμάτων είναι να αφιερώνονται τα μεσαία δυο στρώματα για την τάση τροφοδοσίας και τη γείωση. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές που τοποθετούνται στην πλακέτα μπορούν να συνδεθούν με την τροφοδοσία ή τη γείωση μόνο με ένα νίαις, εξοικονομώντας έτσι χώρο από traces αλλά και παρασιτικά φαινόμενα που μπορούν να προέλθουν από βρόγχους τροφοδοσίας και γείωσης.

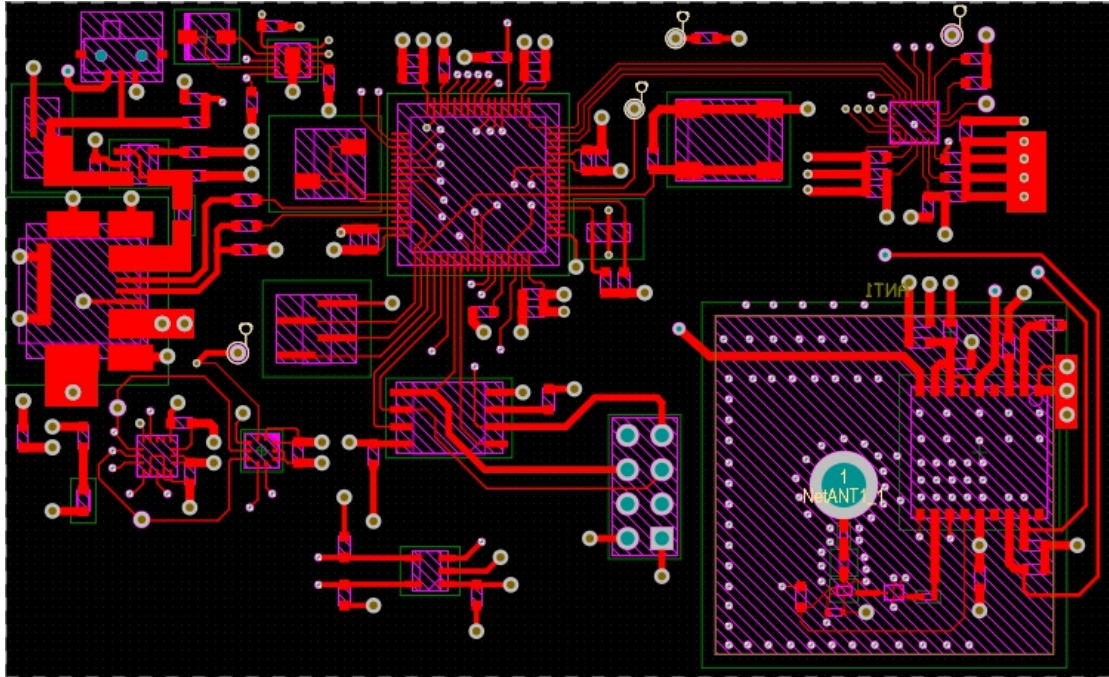
Στο άνω και κάτω μέρος της πλακέτας μετά την τοποθέτηση των στρωμάτων χαλκού τοποθετείται ένα επιπλέον μονωτικό στρώμα, το οποίο προστατεύει τον χαλκό από οξείδωση και από την άμεση επαφή με το περιβάλλον. Πάνω από αυτό το στρώμα μπορεί να τοποθετηθεί προαιρετικά, ένα επιπλέον στρώμα (silkscreen) που συνήθως περιέχει σχήματα επιλογής του σχεδιαστή. Μπορεί να έχει γράμματα, αριθμούς ακόμα και εικόνες και πίνακες, με σκοπό να βοηθήσουν αργότερα κατά την κόλληση των εξαρτημάτων ή και κατά την χρήση του κυκλώματος.

Για την πλακέτα που θα περιέχει το σύστημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε η σχεδίαση πλακέτας τεσσάρων στρωμάτων, ώστε να επιτευχθούν οι προδιαγραφές όγκου που υπάρχουν κατά την τοποθέτηση στην μύτη του πυραύλου.

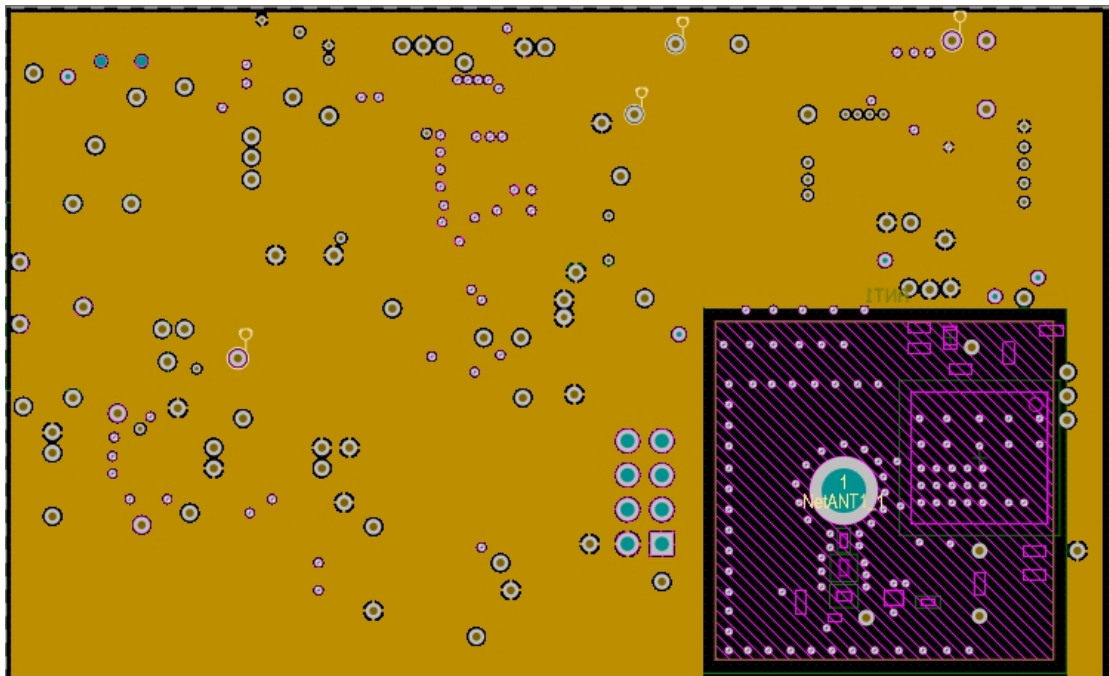
Η σχεδίαση του κυκλώματος έγινε μέσω του λογισμικού Altium Designer. Οι διαστάσεις της πλακέτας είναι 8cm*5cm μέγεθος που επιτρέπει την προσαρμογή της στην μύτη του πυραύλου. Τα δύο ενδιάμεσα στρώματα είναι συνδεδεμένα με την τροφοδοσία και την γείωση αντίστοιχα, προκειμένου να μειωθούν γραμμές σύνδεσης των ολοκληρωμένων και να αποφευχθούν παρασιτικά φαινόμενα. Η χωροταξική κατανομή στην πλακέτα κατά την σχεδίαση επιλέχθηκε με γνώμονα τα παρακάτω:

- Ο μικροεπεξεργαστής πρέπει να βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στην πλακέτα ,ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμος από όλες τις συσκευές.
- Ο υποδοχέας USB της πλακέτας πρέπει να βρίσκεται σε ακριανό σημείο στην πλακέτα ,ώστε να καθιστά εύκολη τη σύνδεση αφού έχουν συνδεθεί όλα τα μέρη της πλακέτας.
- Το σύστημα τροφοδοσίας θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στην θύρα USB από όπου και φορτίζεται η μπαταρία, ώστε να μην υπάρχουν γραμμές μεγάλου μήκους εντός της πλακέτας να μεταφέρουν σημαντική ποσότητα ρεύματος. Επίσης, λόγω της ύπαρξης πηνίων στο κύκλωμα τροφοδοσίας θα πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο μακριά από τις κεραίες του συνολικού συστήματος.
- Η κεραία της τηλεπικοινωνίας θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πιο απομακρυσμένη από την κεραία του GPS, καθώς τα σήματα που λαμβάνει η δεύτερη είναι τόσο χαμηλά σε ισχύ που οποιαδήποτε παρεμβολή από το κύκλωμα μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα του δέκτη να επικοινωνεί σταθερά με τους δορυφόρους.
- Το σύστημα του GPS, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, θα πρέπει να βρίσκεται απομονωμένο στην πλακέτα.
- Σε κάθε τμήμα του συστήματος πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες υποδοχές για σύνδεση λογικού αναλυτή, ώστε να διαπιστωθούν τυχόν λάθη κατά τον προγραμματισμό της πλακέτας.
- Οι γραμμές, τα νίαις και τα pads για την σύνδεση των εξαρτημάτων θα πρέπει να ακολουθούν και να συμμορφώνονται με τις κατασκευαστικές δυνατότητες και προδιαγραφές του κατασκευαστή. Κάθε εργοστάσιο κατασκευής έχει διαφορετικές προδιαγραφές και πρέπει να ακολουθηθούν προκειμένου να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του κυκλώματος.

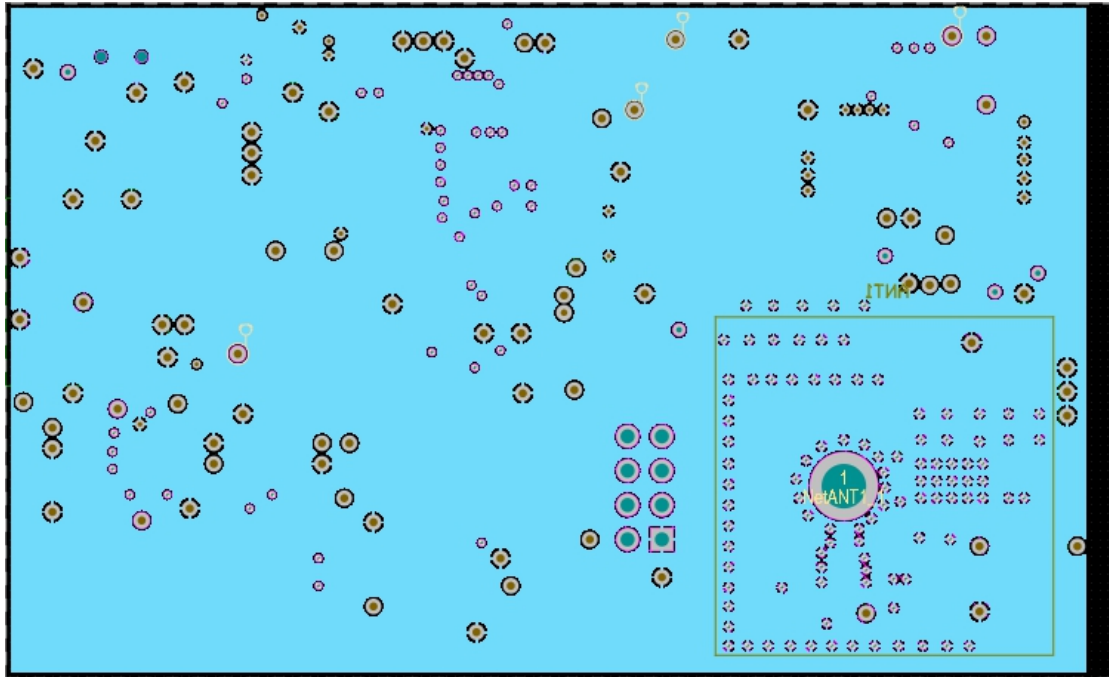
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται ξεχωριστά το κάθε στρώμα (layer) της πλακέτας, καθώς και οι γραμμές, τα vias και τα pads:



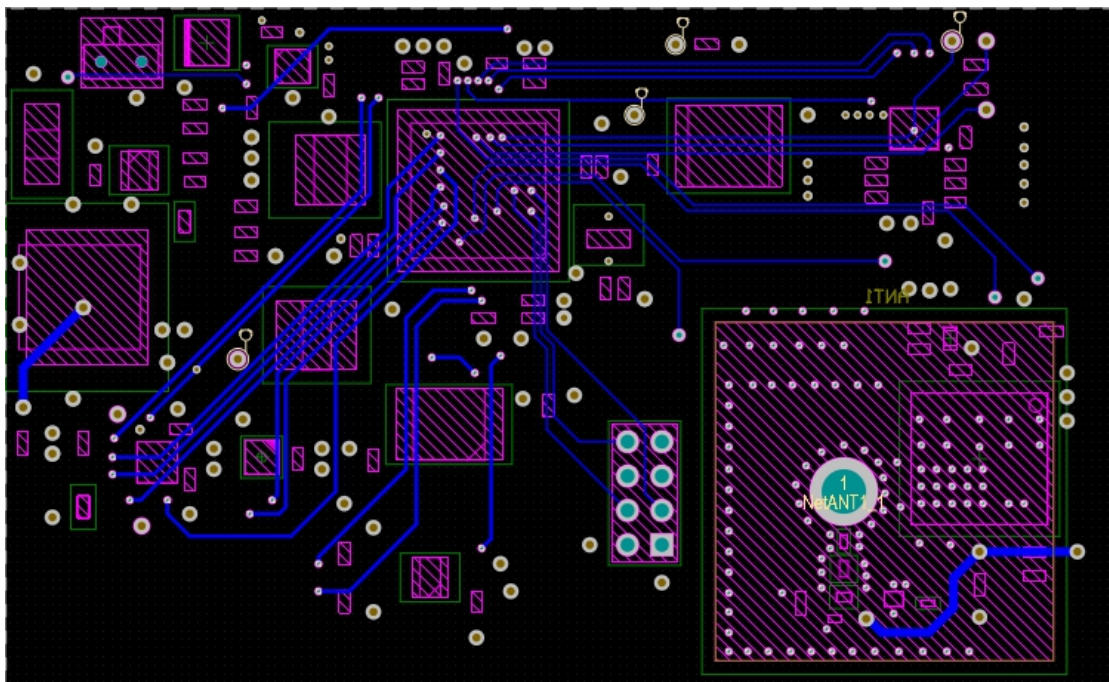
Σχήμα 5.2 : Πρώτο layer



Σχήμα 5.3 : Δεύτερο layer, συνδεδεμένο με την τάση τροφοδοσίας

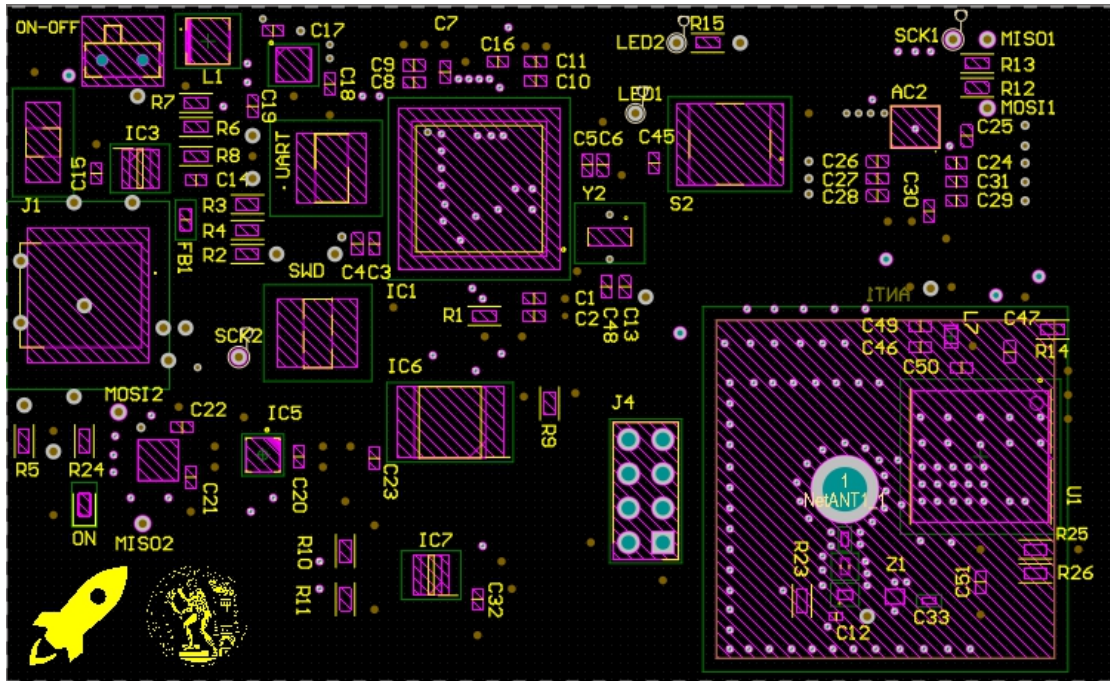


Σχήμα 5.4 : Τρίτο layer, συνδεδεμένο με την γείωση



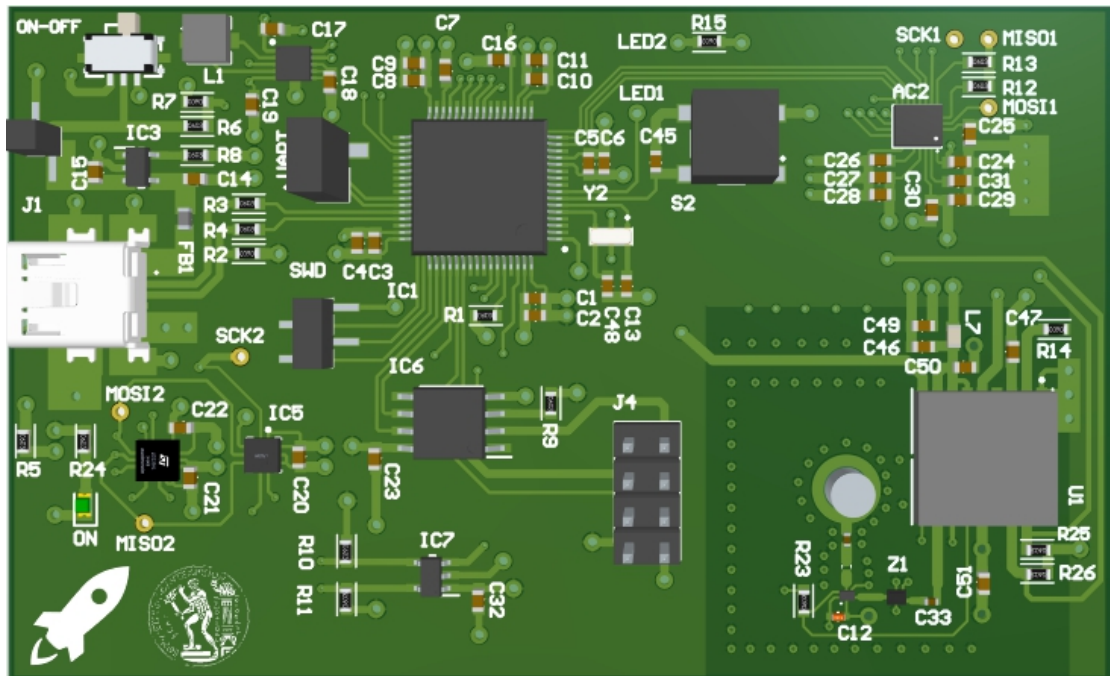
Σχήμα 5.5 : Τέταρτο layer

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η σχεδίαση του silkscreen που αναφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την διαδικασία σύνδεσης των εξαρτημάτων, αλλά και κατά την χρήση του συστήματος στην ολοκληρωμένη του μορφή:

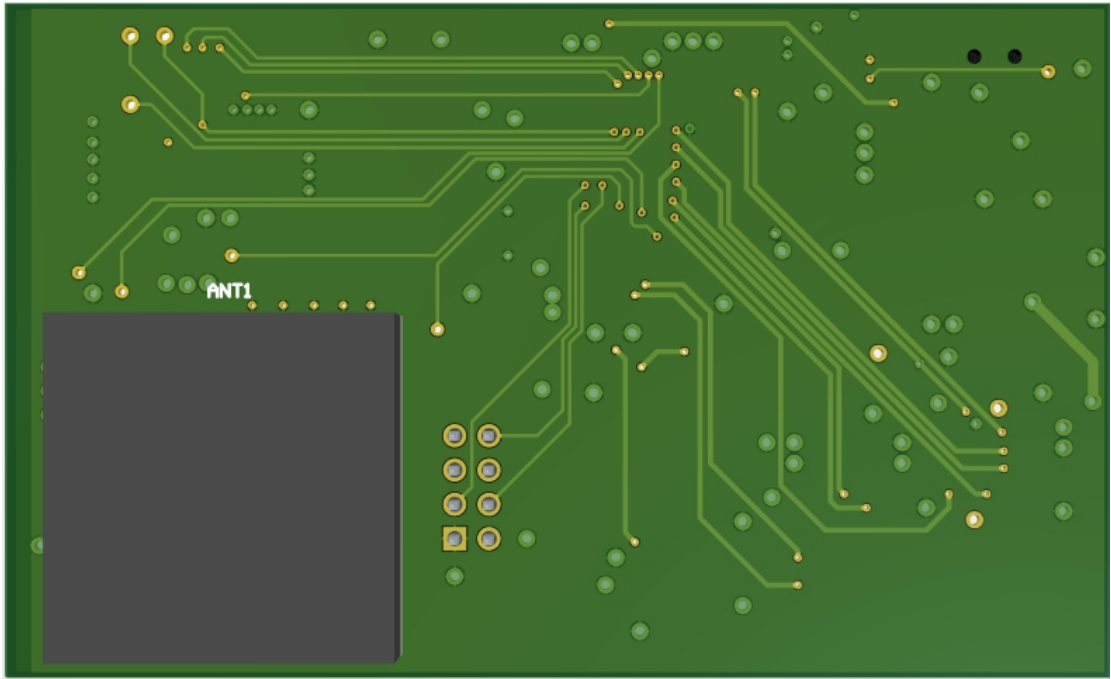


Σχήμα 5.6 : Silkscreen

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η πλακέτα, όπως αναμένουμε να είναι μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της:



Σχήμα 5.7 : Τρισδιάστατη προσομοίωση του πάνω μέρους της πλακέτας



Σχήμα 5.8 : Τρισδιάστατη προσομοίωση του κάτω μέρους της πλακέτας

6. Πειραματική Διαδικασία

6.1 Εισαγωγή

Μετά τη σχεδίαση και τη κατασκευή της πλακέτας, σκοπός αυτής της διπλωματικής ήταν η δοκιμή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα η απόκτηση μετρήσεων κατά την πτήση του πυραύλου. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού με σκοπό την ορθή καταγραφή των μετρήσεων από τους αισθητήρες και την αποστολή τους με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα στον δέκτη. Στη συνέχεια το σύστημα θα πρέπει να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες και να κριθεί η απόδοση του σε σχέση με τις προδιαγραφές, και να βελτιωθεί ώστε να τις επιτύχει.

6.2 Ανάπτυξη Λογισμικού

Βασική αρχή στην ανάπτυξη του λογισμικού του συστήματος αποτελεί η σχεδίαση προσαρμοσμένων προγραμμάτων οδήγησης (drivers) για την κάθε συσκευή που συνδέεται με τον μικροεπεξεργαστή, με σκοπό η αρχικοποίηση και η χρήση τους να μην γίνεται από το κεντρικό πρόγραμμα, αλλά με κλήση συναρτήσεων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται τμηματικός ο προγραμματισμός του συστήματος και ,κατά συνέπεια, πιο εύκολη η διόρθωση πιθανών αστοχιών αλλά και πιο εύκολη η βελτίωση και η προσθήκη λειτουργιών στο ήδη υπάρχον σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη τα datasheet των αισθητήρων έγινε η ανάπτυξη driver για το καθένα ξεχωριστά, οι οποίοι υπάρχουν στο παράρτημα της παρούσας εργασίας. Ο προγραμματισμός έγινε σε γλώσσα C, στο πρόγραμμα STM32Cube IDE.

Έχοντας τα προγράμματα οδήγησης των αισθητήρων, επόμενο βήμα είναι ο προγραμματισμός του κεντρικού προγράμματος. Σκοπός του είναι να αρχικοποιεί τους αισθητήρες, τη μνήμη και την κεραία και στη συνέχεια να εισέρχεται σε έναν ατέρμονα βρόγχο, στον οποίο θα γίνεται η απόκτηση των μετρήσεων, η αποθήκευση και στη συνέχεια η αποστολή τους μέσω της κεραίας. Η ταχύτητα επικοινωνίας

ρυθμίστηκε στο κάθε περιφερειακό ώστε να μην ξεπερνά την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας που είναι δηλωμένη στο datasheet.

Η εφαρμογή της επικοινωνίας του μικροεπεξεργαστή με τα περιφερειακά του μπορούσε να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι η γραμμική ακολουθία ενός προγράμματος που επικοινωνεί με το κάθε περιφερειακό με τη σειρά λαμβάνοντας την μέτρηση, αποθηκεύοντας σε δύο buffers, έναν για αποστολή στην μνήμη flash και έναν για την αποστολή στη κεραία, μεγέθους 256 και 32 bytes αντίστοιχα. Ο δεύτερος είναι η χρήση interrupts σε κάθε επικοινωνία. Με αυτόν τον τρόπο κάθε περιφερειακό στέλνει σήμα στον μικροεπεξεργαστή όταν έχει έτοιμη μέτρηση, προκειμένου να διαβαστεί από το κεντρικό πρόγραμμα, το οποίο τις τοποθετεί στους ίδιους buffers που περιγράφηκαν στον πρώτο τρόπο. Ο δεύτερος τρόπος είναι σαφώς ταχύτερος αφού εκμεταλλεύεται πλήρως την ταχύτητα των περιφερειακών, δε θα χρειαστεί να περιμένει κάποιον πιο αργό αισθητήρα ούτε θα χάσει τιμή από κάποιον πιο γρήγορο. Ο πρώτος τρόπος, ωστόσο, έχει το πλεονέκτημα της προβλέψιμης λειτουργίας του κώδικα, γνωρίζουμε από πριν ότι θα αποκτηθούν ίδιος αριθμών μετρήσεων από κάθε αισθητήρα, χωρίς τον κίνδυνο να “παγιδευτεί” κάποιος αισθητήρας που δεν προλαβαίνει να δώσει interrupt αρκετά γρήγορα ώστε να διαβαστεί η μέτρησή του. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο γνωρίζουμε από πριν τη δομή των πακέτων που θα αποσταλούν από το σύστημα στον δέκτη. Για αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε να μην γίνει η χρήση interrupts κατά την εκτέλεση του κεντρικού προγράμματος, χωρίς αυτό να σημαίνει όμως ότι το σύστημα δεν έχει την δυνατότητα να εφαρμόσει μια τέτοια δομή επικοινωνίας, όλα τα περιφερειακά έχουν συνδεδεμένα τα interrupt pins τους σε εισόδους του μικροεπεξεργαστή.

Το πακέτο δεδομένων προς αποστολή δημιουργείται κατά την απόκτηση των μετρήσεων. Αρχικά, γίνεται η ανάγνωση της θερμοκρασίας (2bytes), στη συνέχεια η ανάγνωση της τρισδιάστατης επιτάχυνσης από το H3LIS100DL (1byte x 3 άξονες = 3bytes) και τέλος η ανάγνωση των μετρήσεων του LSM9DS1 (2bytes x 3 άξονες x 3 αισθητήρες = 18bytes). Το μέγεθος του πακέτου είναι συνολικά 23bytes, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει ακόμα χώρος για 9bytes πληροφορίας που μπορούν να προστεθούν στο πακέτο. Αυτός ο χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή του στίγματος του GPS όταν το σύστημα αντιληφθεί ότι βρίσκεται σε διαδικασία προσγείωσης.

Σχηματικά, το πακέτο δεδομένων :

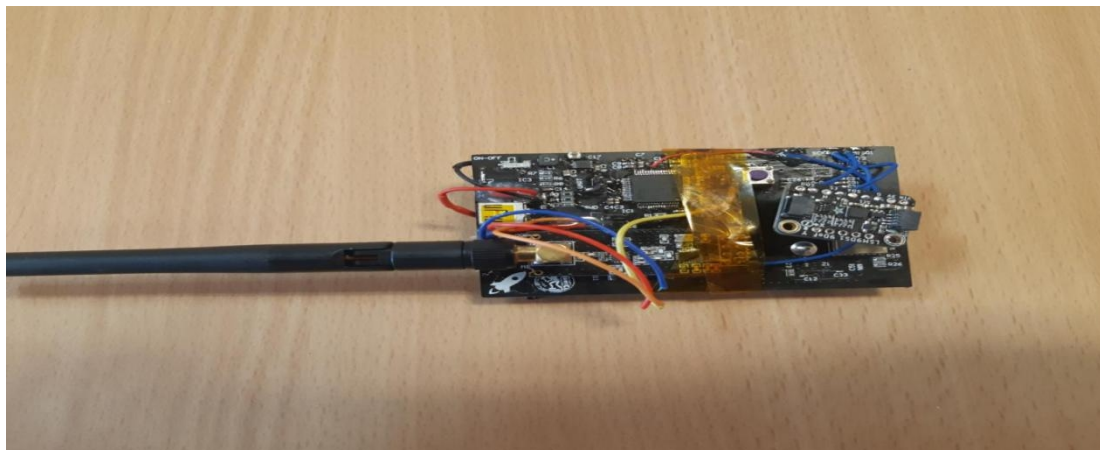
Πακέτο Αποστολής Δεδομένων					
Temperature 2bytes	High-G 3-axis Acceleration 3bytes	3-axis Acceleration 6bytes	3-axis Angular Speed 6bytes	3-axis Magnetic Field 6bytes	Empty(for future use) 9bytes
					MCP9800
					H3LIS100 DLTR
					LSM9DS1

Σχήμα 6.1 : Δομή πακέτου δεδομένων αποστολής

Το κάθε πακέτο που αποστέλλει ο πομπός θα λαμβάνεται από τον δέκτη και θα καταγράφεται σε αρχείο δεδομένων. Για να είναι ευκολότερη η επεξεργασία των δεδομένων στο τέλος κάθε πακέτου ο δέκτης προσθέτει ένα αναγνωριστικό 4bytes. Αυτό το αναγνωριστικό θα μας δείξει στο τέλος πόσα πακέτα λήφθηκαν κατά την πειραματική δοκιμή.

6.3 Δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες

Επόμενο βήμα, μετά τον προγραμματισμό, είναι η δοκιμή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.



Σχήμα 6.2 : Η τελική μορφή της πλακέτας

Για την ασφάλεια του συστήματος κατά την τοποθέτηση στην μύτη του πυραύλου, περιτυλίχθηκε από πυρίμαχο υλικό, ώστε να μην επηρεαστεί από την έκρηξη του καυσίμου.



Σχήμα 6.3 : Διαδικασία περιτύλιξης της πλακέτας με πυρίμαχο υλικό

Έπειτα, έγινε η τοποθέτηση στην μύτη του πυραύλου:



Σχήμα 6.4 : Τοποθέτηση της πλακέτας στη μύτη του πυραύλου

Στη συνέχεια, το σύστημα μεταφέρθηκε από το εργαστήριο στο χώρο δοκιμής με σκοπό την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 6.5 : Χώρος δοκιμής του συστήματος

Η πτήση του πυραύλου έγινε και τα δεδομένα του συστήματος καταγράφηκαν. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, ωστόσο, παρατηρήθηκαν αστοχίες που δεν επέτρεπαν την ολοκλήρωση της εργασίας. Αρχικά, ο ρυθμός μετάδοσης ήταν εξαιρετικά μικρότερος από τον αναμενόμενο (πάρθηκαν περίπου 100 χιλιάδες μετρήσεις από όλη τη πτήση του πυραύλου), σημαντικότερο, ωστόσο, πρόβλημα ήταν ότι η ζεύξη πομπού και δέκτη χάθηκε για κάποιο διάστημα κατά την πτήση. Κατά συνέπεια, η δοκιμή κρίθηκε αποτυχημένη και το σύστημα επέστρεψε στο εργαστήριο για βελτίωση.

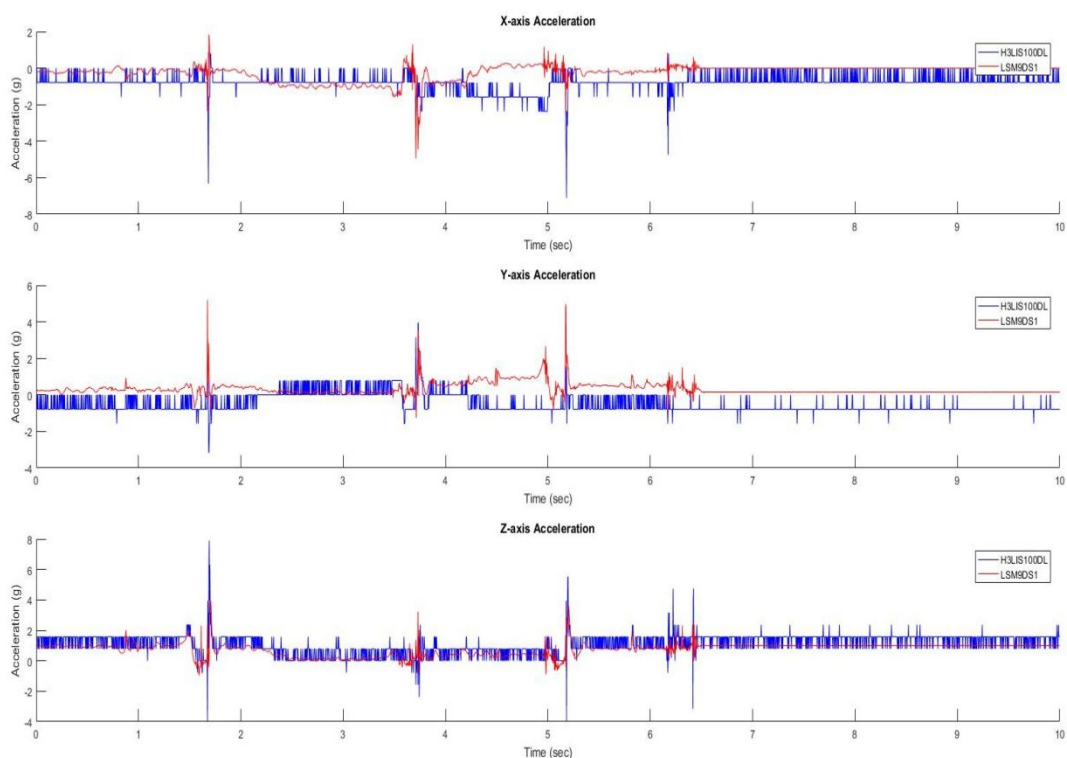
6.4 Αναθεώρηση και τελική δοκιμή

Πρώτος στόχος μετά την αποτυχία της ζεύξης κατά τη δοκιμή, ήταν η βελτίωση του συστήματος τηλεπικοινωνίας. Μετά από έλεγχο του συστήματος διαπιστώθηκε ότι λόγω αστοχίας στον κώδικα, κατά την αρχικοποίηση του πομποδέκτη της κεραίας η ενίσχυση του PA (Power Amplifier) της κεραίας δεν οριζόταν στα 0dBm, αντίθετα, παρέμενε στην αρχική τιμή των -18dBm, κάτι που μείωσε εξαιρετικά το εύρος της ζεύξης και δικαιολογεί την απώλεια της κατά τη δοκιμή. Μετά τη διόρθωση στον κώδικα έγινε δοκιμή για το εύρος και διαπιστώθηκε ότι η ζεύξη μένει σταθερή για πάνω από 300 μέτρα απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη διατηρώντας οπτική επαφή. Αυτή η απόσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από το μέγιστο ύψος που προβλέπεται να φτάσει ο πύραυλος, κατά συνέπεια, θεωρήθηκε επιτυχημένη η διόρθωση.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν οι παράγοντες που μείωσαν το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Η αδύναμη ζεύξη σίγουρα οδήγησε στην απώλεια πακέτων δεδομένων, ωστόσο, δεν θα μπορούσε να είναι ο μοναδικός παράγοντας που οδήγησε σε αστοχία το σύστημα. Μετά από πολλαπλές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η καθυστέρηση δεν οφειλόταν στον πομπό, αλλά στο δέκτη. Συγκεκριμένα, τα πακέτα πληροφορίας, προκειμένου να καταγραφούν σε αρχείο στον υπολογιστή, μεταφέρονταν μέσω σειριακής επικοινωνίας (UART) σε κατάλληλο τερματικό από όπου γινόταν η καταγραφή σε αρχείο txt. Για να επιτευχθεί αυτό γινόταν η χρήση της συνάρτησης `printf` από την βιβλιοθήκη `stdio.h` ώστε να γίνει η εκτύπωση στο τερματικό. Παρατηρήθηκε ότι η χρήση της συγκεκριμένης συνάρτησης καθυστερούσε εξαιρετικά το σύστημα και οδηγούσε σε παρατήρηση πολύ χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Η διόρθωση της συγκεκριμένης αστοχίας πραγματοποιήθηκε με αντικατάσταση της συνάρτησης `printf` και χρήση της συνάρτησης `HAL_UART_Transmit` από τη βιβλιοθήκη `HAL` που έχει δημιουργηθεί για τους μικροεπεξεργαστές `STM32`, αυξάνοντας ταυτόχρονα το `baudrate` της σύνδεσης `UART` από 115200 σε 921600 bits per second. Με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός μετάδοσης αυξήθηκε σημαντικά, φτάνοντας τα 100kbps.

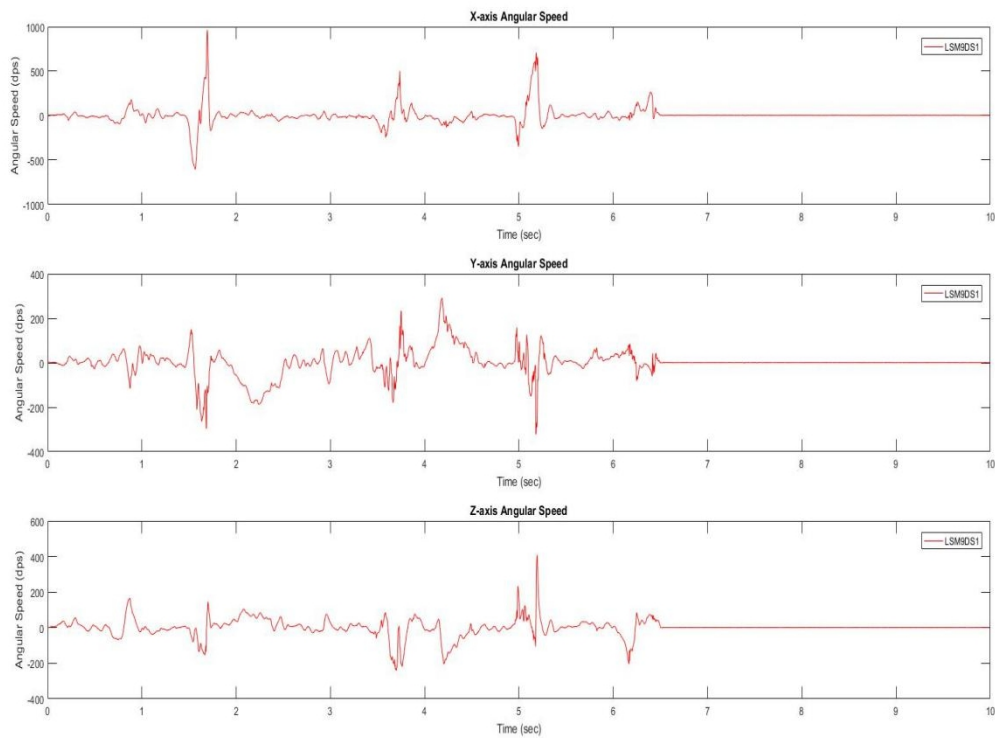
Μετά τις προαναφερθείσες διορθώσεις το σύστημα ήταν έτοιμο για δεύτερη δοκιμή, προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του. Για τεχνικούς λόγους η δεύτερη δοκιμή (πτήση του πυραύλου) ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί. Η αδυναμία εύρεσης καυσίμου και κατάλληλων πυροκροτητών, σε συνδυασμό με την επικινδυνότητα για πυρκαγιά σε περίπτωση αστοχίας κατά τη πτήση επέβαλαν την μη πραγματοποίηση δεύτερης δοκιμής.

Η τελική δοκιμή έγινε σε συνθήκες εργαστηρίου προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του συστήματος. Πομπός και δέκτης τοποθετήθηκαν σε απόσταση μεταξύ τους. Η πλακέτα του πομπού υπέστη τρεις ρίψεις, μία σε κάθε άξονα, ανάμεσα στις οποίες πραγματοποιούνταν περιστροφή της πλακέτας, σε διάστημα 10 δευτερολέπτων. Οι μετρήσεις καταγράφηκαν με ρυθμό 87kbps. Χαρακτηριστικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιτάχυνσης και γωνιακής ταχύτητας που αποκτήθηκαν κατά τη δοκιμή:



Σχήμα 6.6 : Διαγράμματα επιτάχυνσης

Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις του αισθητήρα H3LIS100DL και με κόκκινο του LSM9DS1.



Σχήμα 6.7 : Διαγράμματα γωνιακής ταχύτητας

Στο σχήμα 38 φαίνεται ο λόγος που επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά επιταχυνσιόμετρα και οι μετρήσεις δεν βασίστηκαν μόνο στο H3LIS100DL, το οποίο έχει ακρίβεια μέτρησης 1g, αλλά στο LSM9DS1 με ακρίβεια μέτρησης 0.244mg.

Από τα σχήματα φαίνεται καθαρά η κίνηση της πλακέτας, ρίψη στον άξονα z, περιστροφή ως προς τον άξονα y, ρίψη ως προς τον άξονα x, περιστροφή ως προς τον άξονα z, ρίψη στον άξονα y και τέλος επαφή με το έδαφος και παραμονή του συστήματος σε ηρεμία.

7. Συμπεράσματα

Η σχεδίαση και κατασκευή του συστήματος τηλεμετρίας αποτέλεσε μια απαιτητική δοκιμασία. Οι τελικές προδιαγραφές του συστήματος είναι οι εξής:

Connectivity	USB-B, UART, SWD
RF Frequency	2.4-2.5GHz
Range	~500m
Data Pack Size	32bytes
Internal Memory	128Mb FLASH
Size	8cm x 5cm x 1.2cm
Data rate	87kbps

Πίνακας 7.1 : Προδιαγραφές του συστήματος

Η λειτουργικότητα του συστήματος αποδείχθηκε κατά το πειραματικό στάδιο, ωστόσο, υπάρχουν τομείς στους οποίους επιδέχεται βελτίωση, αδύνατη να πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά, η υλοποίηση του κώδικα μπορεί να βελτιωθεί, ακολουθώντας ένα σύστημα με interrupts, ακόμα και με την υλοποίηση λειτουργικού συστήματος, αντί κεντρικού κώδικα για απόλυτο έλεγχο της χρονοδρομολόγησης των εργασιών του συστήματος. Επίσης, η υλοποίηση της αναγνώρισης από το σύστημα του σημείου πτήσης στο οποίο βρίσκεται προκειμένου να αλλάζει λειτουργία (ενεργοποίηση - απενεργοποίηση αισθητήρων, GPS, μνήμης flash) θα μπορούσε να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος. Τέλος, το σύστημα τηλεπικοινωνίας θα μπορούσε με χρήση πιο ισχυρού πομπού και δέκτη να αυξήσει σημαντικά το εύρος της τηλεπικοινωνίας, ή ακόμα και με την απόκτηση κάποιας συχνότητας εκτός ISM να επιτύχει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης, λόγω της έλλειψης παρεμβολών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Ο Κώδικας του STM32F401RET6

Τα προγράμματα οδήγησης (drivers) για το σύστημα είναι διαθέσιμα στο επόμενο link: <https://github.com/fzafeiris/Telemetry.git>

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο κώδικας του κεντρικού προγράμματος του πομπού:

```
/* USER CODE BEGIN Header */
/**
*****
*****

* @file      : main.c

* @brief     : Main program body
*****
*****

* @attention

*

* <h2><center>&copy; Copyright (c) 2021 STMicroelectronics.
* All rights reserved.</center></h2>

*

* This software component is licensed by ST under BSD 3-Clause license,
* the "License"; You may not use this file except in compliance with the
the
* License. You may obtain a copy of the License at:
*
*           opensource.org/licenses/BSD-3-Clause
*

*****
*****

*/

/* USER CODE END Header */

/* Includes
-----*/

#include "main.h"
```

```

/* Private includes
-----*/

/* USER CODE BEGIN Includes */
#include "MCP9800.h"
#include "LSM9DS1.h"
#include "H3LIS100DLTR.h"
#include "IS25LP128F.h"
#include <stdio.h>
#include <strings.h>
#include "functions.h"

/* USER CODE END Includes */

/* Private typedef
-----*/

/* USER CODE BEGIN PTD */
/* USER CODE END PTD */

/* Private define
-----*/

/* USER CODE BEGIN PD */
/* USER CODE END PD */

/* Private macro
-----*/

/* USER CODE BEGIN PM */
/* USER CODE END PM */

/* Private variables
-----*/

I2C_HandleTypeDef hi2c1;
I2C_HandleTypeDef hi2c2;
SPI_HandleTypeDef hspi1;
SPI_HandleTypeDef hspi2;
SPI_HandleTypeDef hspi3;
UART_HandleTypeDef huart1;

/* USER CODE BEGIN PV */
/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes
-----*/

void SystemClock_Config(void);

```

```

static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_I2C1_Init(void);
static void MX_SPI2_Init(void);
static void MX_SPI3_Init(void);
static void MX_I2C2_Init(void);
static void MX_USART1_UART_Init(void);
static void MX_SPI1_Init(void);

/* USER CODE BEGIN PFP */
/* USER CODE END PFP */

/* Private user code
-----*/

/* USER CODE BEGIN 0 */
/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */
    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU
Configuration-----*/

    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the
Systick. */

    HAL_Init();

    /* USER CODE BEGIN Init */
    /* USER CODE END Init */

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* USER CODE BEGIN SysInit */
    /* USER CODE END SysInit */

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();

```

```

MX_I2C1_Init ();
MX_SPI2_Init ();
MX_SPI3_Init ();
MX_I2C2_Init ();
MX_USART1_UART_Init ();
MX_SPI1_Init ();
/* USER CODE BEGIN 2 */
uint32_t MemAddrs = 0;
uint64_t TxpipeAddrs = 0x11223344AA;
uint8_t myTxData[32];
uint8_t FlashBuf[256];

// Teseo LIV3F Commands
static const char *rst = "PSTMRESTOREPAR*11\r\n";
static const char *agss = "PSTMSTAGPSONOFF,1*4B\r\n";
static const char *nmea_rec = "$PSTMNMEAREQUEST,00002,00000*4E\r\n";
static const char *setport = "$PSTMCFGPORT,1,0,3A,0*02\r\n";
static const char *setmsg =
"$PSTMCFGMSGL,3,255,00000002,00000000*4E\r\n";
static const char *setsat1 = "$PSTMSTAGPSSETCONSTMASK,7*10\r\n";
static const char *setsat2 = "$PSTMSETPAR,3227,0x40*53\r\n";

//NRF init and getting ready to transmit
NRF24_begin(NRF_CSN_GPIO_Port, NRF_CSN_Pin, NRF_CE_Pin, hspi3);
NRF24_stopListening ();
NRF24_openWritingPipe (TxpipeAddrs);
NRF24_setAutoAck (false);
NRF24_setChannel (55);
NRF24_setPayloadSize (32);

//Setting up the GPS
GPS_Transmit (setport);
GPS_Save ();

```

```

GPS_Transmit(setmsg);

GPS_Save();

GPS_Transmit(setsat1);

GPS_Save();

GPS_Transmit(nmea_rec);

GPS_Save();

//Setting up the sensors and memory

my_MCP_begin(hi2c1, 80, 75, BIT_RES_12, FAULT_Q_4);

H3LIS_begin(hspi2, HIGH_G_CS_GPIO_Port, HIGH_G_CS_Pin, NORMAL,
DATA_RATE_400HZ);

IS25_Init(FLASH_CS_GPIO_Port, FLASH_CS_Pin);

LSM_begin(hspi1, LSM_CSAG_GPIO_Port, LSM_CSM_GPIO_Port, LSM_CSAG_Pin, LSM
_CSM_Pin);

LSM_SetAG(LSM9DS1_CTRL_REG6_XL_ODR_XL_476HZ,
LSM9DS1_CTRL_REG1_G_ODR_G_476HZ, LSM9DS1_CTRL_REG6_XL_FS_XL_8G,
LSM9DS1_CTRL_REG1_G_FS_G_2000DPS, LSM9DS1_FIFO_CTRL_FMODE_BYPASS);

LSM_M_Set(LSM9DS1_CTRL_REG1_M_DO_80HZ, LSM9DS1_CTRL_REG2_M_FS_8GAUSS,
0);

uint16_t temp; // temporary variable
uint8_t cnt=0; // data pack counter

/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */

/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    //Getting temperature measurement and storing value to buffer (2bytes)
    temp = MCP_get_temp(hi2c1);
    myTxData[0] = (temp>>8) &0xFF;
    myTxData[1] = temp&0xFF;

    //Getting acceleration measurement from H3LIS100DLTR and directly
store it to buffer (3bytes)

    H3LIS_get_acceleration(&myTxData[2]);

```



```

    //Getting acceleration measurement from LSM9DS1 and directly store
it to buffer (6bytes)

    LSM_GetRawAcc(&myTxData[5]);

    //Getting gyroscope measurement from LSM9DS1 and directly store it
to buffer (6bytes)

    LSM_GetRawGyro(&myTxData[11]);

    //Getting magnetometer measurement from LSM9DS1 and directly store
it to buffer (6bytes)

    LSM_GetRawM(&myTxData[17]);

    //Store datapack to memory buffer (fits 8 packs)

    memcpy(&FlashBuf[32*cnt],myTxData,32);

    cnt++;

    //If memory buffer is full store to memory

    if(cnt==8) {

        IS25_write(MemAddrs,256,FlashBuf);

        MemAddrs = MemAddrs + 256;

    }

    //Transmit the datapack

    Rocket_Transmit(myTxData,32);

    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */

}

/* USER CODE END 3 */
}

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

1. Dr. Frank Carden, “Telemetry Systems Engineering”, 2002.
2. Π. Κωπτής, Π. Αράπογλου, “Ασύρματες Επικοινωνίες”, εκδ. Τζιόλα 2017.

Datasheets:

1. ST Microelectronics STM32F401RET Datasheet
2. ST Microelectronics LSM9DS1 Datasheet
3. ST Microelectronics H3LIS100DL Datasheet
4. Microchip MCP9800/1/2/3 Datasheet
5. Integrated Silicon Solution Inc. IS25LP128F Datasheet
6. Nordic Semiconductors nRF24L01 Datasheet
7. ST Microelectronics Teseo LIV3F Datasheet