



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Χειρισμός τετρακοπτέρου με κινήσεις χεριού Gesture-based quadcopter control

Πτυχιακή Εργασία
των φοιτητών

Γεώργιος Αμπόνης – 516002
Σωτήριος Αλεξανδρίδης – 515004

Κωδικός πτυχιακής:
19168M

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τζέκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2020

Τίτλος Π.Ε. (Ελληνικά)	Χειρισμός τετρακοπτέρου με κινήσεις χεριού
Τίτλος Π.Ε. (Αγγλικά)	Gesture-based quadcopter control
Κωδικός Π.Ε.	19168M
Όνομ/νυμα και Κ.Α.Σ. φοιτητών	Γεώργιος Αμπόνης – 516002 Σωτήριος Αλεξανδρίδης – 515004
Όνομ/νυμο εισηγητή	Παναγιώτης Τζέκης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Ημ/νία ανάληψης Π.Ε.	13 Νοεμβρίου 2019
Ημ/νία περάτωσης Π.Ε.	17 Ιουνίου 2020

Βεβαιώνουμε ότι είμαστε οι συγγραφείς αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών **Γεωργίου Αμπόνη** και **Σωτηρίου Αλεξανδρίδη** που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, οι συγγραφείς/δημιουργοί εκχωρούν στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας των συγγραφέων/δημιουργών, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση των συγγραφέων/δημιουργών.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη, το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός συστήματος χειρισμού drone μέσω κινήσεων του χεριού. Σκοπός δεν είναι απλά η μετάφραση του τρόπου κίνησης του χεριού σε σήμα ελέγχου, αλλά και η δημιουργία μιας ευέλικτης υλικο-λογισμικής πλατφόρμας πάνω στην οποία μπορεί να βασιστεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη. Η παρούσα εργασία ξεκινάει από το φυσικό επίπεδο και ολοκληρώνεται σε υψηλό επίπεδο αφαίρεσης. Αποτελεί μια λειτουργική απόδειξη της χρήσης ασυνδεσμικών πρωτοκόλλων επίπεδης ιεραρχίας για επικοινωνία πραγματικού χρόνου και υψηλής ακρίβειας, με δυνατότητα μεταβλητού αριθμού peers. Η επίπεδη ιεραρχία της επικοινωνίας, σε συνδυασμό με το δυναμικό αριθμό peers είναι τα δυνατότερα σημεία της πλατφόρμας αυτής, καθώς επιτρέπουν τη δημιουργία ευφυών δικτύων δυναμικής ιεραρχίας.

Μία ανεπτυγμένη εκδοχή της εφαρμογής αυτής της εργασίας βρίσκει εξαιρετική εφαρμογή στις διατάξεις σμηνών μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV swarms), όπου απαιτείται ταχύτατο redundant control σε μικρό εύρος ζώνης. Σε εφαρμογές όπου το ανθρώπινο στοιχείο παραμένει στο κέντρο ενδιαφέρει η αύξηση της αμεσότητας διάδρασης ανθρώπου – μηχανής.

Μια τέτοια πλατφόρμα που επιτρέπει τον ενστικτώδη χειρισμό ενός ηλεκτρο-μηχανικού συστήματος από τον ανθρώπινο χειριστή, μειώνει την ανάγκη ύπαρξης μεσάζοντων δικτυωμάτων «μετάφρασης» ανθρώπινης δραστηριότητας σε σήμα ελέγχου. Έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα εκμάθησης, ο ανθρώπινος εγκέφαλος, χάρη στην προσαρμοστική του ικανότητα, επιτρέπει στο χρήστη να χειρίζεται ένα πολύπλοκο σύστημα με μεγάλη ακρίβεια, σαν προέκταση του εαυτού του. Η ιατρική επιστήμη θα είχε πολλά να αντλήσει από τη βελτιστοποίηση μιας τέτοιας τεχνολογίας, ειδικά στην επερχόμενη εποχή της 5G τεχνολογίας. Σε ένα ιδεατό σενάριο, θα μπορούν να λαμβάνουν χώρα απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις μέσω διαδικτύου με την χρήση ανάλογων συστημάτων και δημιουργία ταχέων αξιόπιστων ζεύξεων 5G ελάχιστης καθυστέρησης. Επιπρόσθετα, άνθρωποι με κινητικές δυσκολίες ή μερική αναπηρία θα μπορούν να αυξήσουν το βαθμό αυτονομίας τους με χρήση διατάξεων που θα λειτουργούν και θα ελέγχονται ενστικτωδώς ως προεκτάσεις του σώματός τους. Στόχος είναι η αρμονική ένωση ανθρώπου και μηχανής σε ένα νέο σύστημα.

Abstract

The scope of this thesis is the study, design and implementation of a hand gesture-based drone control system. The objective is not to simply translate the hand movements into a control signal, but also to create a flexible firmware platform on which further research and development can be based. The present work begins at the physical layer and is completed at a high level of abstraction. It is a proof of concept of the usage of connectionless, flat-hierarchy protocols for real time and high precision communication, with the potential of a variable number of peers. The flat hierarchy of the established communication, as well as the dynamic number of peers are the strongest points of this work, as they allow for the creation of intelligent networks with a dynamic hierarchy.

A more advanced version of the of this work finds exceptional application in the implementation of unmanned aerial vehicle swarms (UAV swarms), which require rapid redundant control over a small bandwidth. In applications where the human element remains at the center, the increase of the immediacy of human-machine interaction is of interest.

A platform that allows the instinctive manipulation of an electro-mechanical system by a human operator reduces the need for intermediate networks to “translate” human activity into a control signal. After some learning time, the human brain, thanks to its adaptability, allows the user to operate a complex system such as a quadcopter with high accuracy, like an extension of themselves. Medical science would have a lot to gain from an optimized version of this technology, especially in the age of the upcoming 5G technology. In an ideal scenario, remote web-based surgery can take place using similar systems and the establishment of fast and reliable 5G links with minimal latency. In addition, people with mobility issues or partial disabilities will be able to increase their degree of autonomy by using devices that will function and be controlled instinctively, as an extension of their body. The goal is the harmonious unification of man and machine in a new system.

Ευρετήριο περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 1 Σύστημα drone	9
1.1 Κατασκευή drone.....	9
1.2 Αρχή λειτουργίας quadcopter.....	12
Κεφάλαιο 2 Υλισμικό συσκευών αποστολής και λήψης	15
2.1 Flex sensor	15
2.2 MPU6050 Accelerometer + Gyroscope	15
2.3 ESP32 Microcontroller	18
2.4 SSD1306 OLED display.....	21
Κεφάλαιο 3 Εξαγωγή μετρήσεων αισθητήρων	23
3.1 Εξαγωγή γωνιακών παραμέτρων	23
3.2 Αποφυγή ακραίων μεταβολών γωνιακών παραμέτρων	23
3.3 Εξαγωγή παραμέτρου κάμψης	26
Κεφάλαιο 4 Επικοινωνία και ασφάλεια	27
4.1 Αρχιτεκτονική Ζεύξης.....	27
4.2 ESP-Now.....	30
4.3 Ροή ESP-Now επικοινωνίας.....	32
4.3.1 Ορισμός δομής μηνύματος.....	32
4.3.2 Αρχικοποίηση ESP-Now	33
4.3.3 Προσθήκη Peer	33
4.3.4 Αποστολή / λήψη δεδομένων.....	34
4.4 Ασφάλεια	34
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα και προτάσεις βελτίωσης / επέκτασης	37
5.1 Επίτευξη επικοινωνίας	37
5.1.1 Σενάριο 2 peers	37
5.1.2 Σενάριο πολλαπλών peers	40
5.1.2.1 Χρήση κεντρικού ελεγκτικού node	40
5.1.2.2 Αποκέντρωση δικτύου	42
5.2 Κατανάλωση ισχύος συστήματος	46
5.3 Εφαρμογή σε δίκτυο 5G.....	48

5.4 Αποτίμηση εργασίας.....	50
Παράρτημα Α Σχηματικά κυκλωμάτων, πλακέτες και κατασκευή	53
Παράρτημα Β Προγράμματα.....	59
Βιβλιογραφία	61

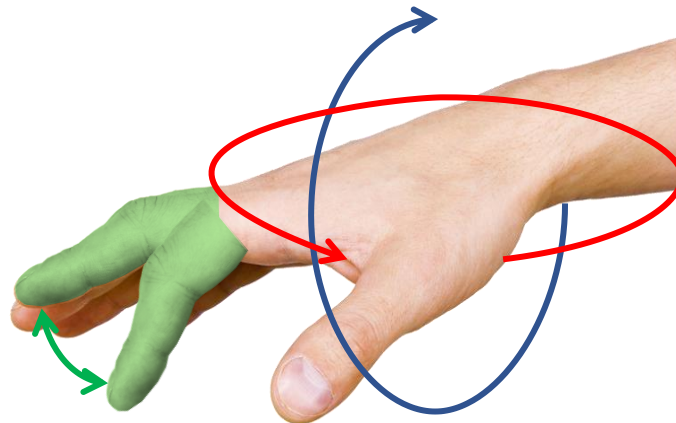
Εισαγωγή

Βασικός στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η θεμελίωση μίας πλατφόρμας μετάφρασης των φυσικών κινήσεων του ανθρώπινου χεριού σε σήματα ελέγχου, με ασύρματη μετάδοση αυτών στον ελεγκτή ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους (τετρακόπτερο drone). Η πλατφόρμα αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως «σκελετός» πάνω στον οποίο βασίζονται ευφυή multi-peer δίκτυα τύπου FANET.

Οι κινήσεις του χεριού θα μιμούνται τους χειρισμούς που είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθούν από το drone. Λόγω της λεπτότητας των χειρισμών και των ευμετάβλητων συνθηκών στο περιβάλλον πτήσης, το σύστημα πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις:

- Χαμηλό latency
- Υψηλή ακρίβεια
- Ικανή εμβέλεια
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
- Μεταβλητότητα αριθμού peers
- Μη επεμβατικό / άνετο

Σε πρώτο στάδιο, πρέπει να προσδιοριστεί ο τρόπος απόκτησης της εισόδου που παρέχεται από το χειριστή του drone. Η προσέγγισή μας περιλαμβάνει ένα σύνολο αισθητήρων που προσαρμόζονται ως μία wearable συσκευή στο χέρι του χειριστή. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα κλίσης και περιστροφής του χεριού, καθώς και κάμψης των δακτύλων (βλ. Σχήμα 0.1).



Σχήμα 0.1 Αναπαράσταση χειρισμών που πραγματοποιούνται από το χέρι

Τα “raw” ληφθέντα δεδομένα των αισθητήρων βαθμονομούνται, υπόκεινται σε απαραίτητη επεξεργασία σήματος, και σχηματίζουν ισομεγέθη πακέτα. Τα πακέτα αυτά εμφωλεύονται σε δεδομενογράμματα και αποστέλλονται μέσω ασύρματης ζεύξης ESP-Now.

Τα παραπάνω προσαρμόζονται σε τυπωμένο κύκλωμα μικρό σε όγκο, ώστε να τοποθετηθεί εύκολα σε ένα γάντι, το οποίο ο χειριστής μπορεί να φορέσει με άνεση, δίχως κάποια σημαντική επιβάρυνση ή περιορισμό στο εύρος και την ευκολία των κινήσεών του.

Η συσκευή στο άλλο άκρο της ασύρματης ζεύξης, λαμβάνει τα δεδομενογράμματα, τα αποσυνθέτει και ανακτά τα πακέτα με τα (μερικώς) επεξεργασμένα δεδομένα. Κατόπιν, ολοκληρώνοντας την

επεξεργασία σήματος, η μονάδα “node” προωθεί τα σήματα ελέγχου σε φίλτρα RC, των οποίων η έξοδος λαμβάνεται ως είσοδος από μια μονάδα PPM κωδικοποιητή. Ο κωδικοποιητής επικοινωνεί απ’ ευθείας με το drone. Έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος.

Σε ένα ελαφρώς τροποποιημένο σενάριο (βασισμένο στην παρούσα ηλεκτρονική και λογισμική πλατφόρμα), το node λειτουργεί και ως δρομολογητής, που προωθεί την ληφθείσα πληροφορία στην κατάλληλη συσκευή αναλόγως την MAC διεύθυνση προορισμού. Αυτό συνεπάγεται ταυτόχρονη επικοινωνία (και κατ’ επέκταση έλεγχο) μεγάλου αριθμού συσκευών ταυτοχρόνως.

Με τη λογική σειρά που περιγράφηκε παραπάνω αναπτύσσονται και τα κεφάλαια της πτυχιακής εργασίας. Η λογική ροή των κεφαλαίων ξεκινάει από το φυσικό επίπεδο και φτάνει σε επίπεδο εφαρμογής.

Ξεκινώντας, στο Κεφάλαιο 1, εξηγείται το σύστημα του drone. Συνεχίζοντας, στο Κεφάλαιο 2, αναλύονται τα υλικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην μονάδα αποστολής (“master”), όσο και στην μονάδα node (“slave”). Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο εξάγονται τα δεδομένα των αισθητήρων, ώστε να είναι αξιοποιήσιμα. Με την ίδια λογική, το Κεφάλαιο 4 αναλύει τα περί ζεύξεως, αρχιτεκτονικής καθώς και τα ζητήματα ασφαλείας που προκύπτουν. Στο Κεφάλαιο 5 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της επικοινωνίας ESP-Now, σενάρια multi-peer δικτύωσης, θέματα κατανάλωσης ισχύος, όπως και προτάσεις – περιθώρια βελτίωσης. Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται δύο παραρτήματα. Το Παράρτημα Α περιλαμβάνει τα σχηματικά κυκλωμάτων και φωτογραφικό υλικό της υλοποιημένης κατασκευής. Στο Παράρτημα Β υπάρχουν τα διαγράμματα ροής των προγραμμάτων που συντάχθηκαν στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας.

Στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας και την προσπάθεια υλοποίησης μίας φιλοσοφίας ένωσης ανθρώπου – μηχανής αναπτύχθηκαν τα εξής:

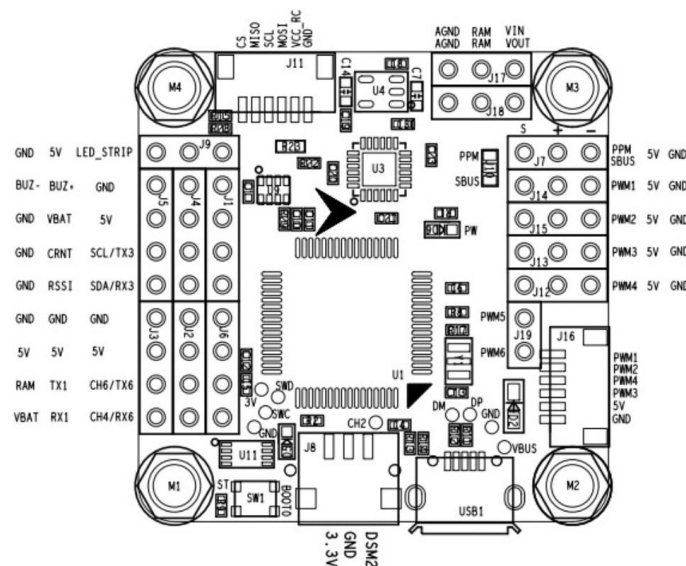
- Ένα λειτουργικό drone
- Πρωτότυπη διάταξη δειγματοληψίας και αποστολής (master)
- Πρωτότυπη διάταξη λήψης και φιλτραρίσματος (node)
- Προγράμματα για τις παραπάνω διατάξεις
- Λειτουργικά τυπωμένα κυκλώματα των διατάξεων
- Μια επεκτάσιμη και ευέλικτη πλατφόρμα ασυνδεσμικής επικοινωνίας πραγματικού χρόνου

Κεφάλαιο 1 Σύστημα drone

Το τετρακόπτερο (στο εξής αναφερόμενο και ως quadcopter ή απλά drone) αποτελεί το προς έλεγχο στοιχείο της διάταξης. Το υπό ανάπτυξη σύστημα ελέγχου θα κληθεί να συνδεθεί με το προϋπάρχον σύστημα που φέρει το drone. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο να εξετάσουμε πρώτα τον τρόπο διεπαφής του ελεγκτή του drone, ώστε να εξασφαλίσουμε την αρμονική συνεργασία των δύο συστημάτων. Επίσης, απαιτείται γνώση του τρόπου με τον οποίο πετάει το drone, για να προσδιορίσουμε τους χειρισμούς που θα προσομοιώνει ο χρήστης με τις κινήσεις του χεριού του. Προφανώς κάθε drone διαφοροποιείται ως προς τη μηχανική δομή, το υλισμικό και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που εφαρμόζονται, άρα δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί κάποια καθολική λύση που θα συνεργάζεται με οποιοδήποτε drone. Ωστόσο, δεν είναι αυτός ο σκοπός της εργασίας, οπότε επιλέχθηκε ένα drone που να στηρίζεται με πλούσια βιβλιογραφία από τον κατασκευαστή του και να επιτρέπει εύκολα την προσαρμογή νέων συστημάτων και περιφερειακών στο ήδη υπάρχον υλισμικό.

1.1 Κατασκευή drone

Το drone που επιλέχθηκε βασίζεται στον ελεγκτή Omnibus F4, θεμέλιο για τον οποίο αποτελεί ο STM32F405 LQFP64 χρονισμένος στα 168MHz με 1MB flash και 192kB SRAM. Βάσει της σελίδας του κατασκευαστή [1], ο εν λόγω ελεγκτής παρέχει δυνατότητα χρήσης γυροσκοπίου MPU6000 6DOF IMU και βαρομέτρου BMP280. Η θύρα διεπαφής με προγραμματιστικό περιβάλλον είναι τύπου micro USB. Το περιβάλλον προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι το Betaflight. Για τον απομακρυσμένο έλεγχο του drone χρησιμοποιείται η κεραία FS-iA6B της εταιρείας FlySky που λειτουργεί ως δέκτης στα 2.4GHz. Η εν λόγω κεραία λήψης επιλέχθηκε λόγω του ότι: α) υποστηρίζει έως και 6 κανάλια επικοινωνίας και β) υποστηρίζει εξόδους τόσο Pulse Width Modulation (PWM) όσο και pulse position modulation (PPM). Η επιλεγείσα διαμόρφωση σήματος είναι η PPM, διότι επιτρέπει τη χρήση μιας μόνο φυσικής γραμμής για την μετάδοση πολλαπλών σημάτων ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, για τα 4 χρησιμοποιούμενα κανάλια (roll, pitch, yaw, thrust) υπάρχει μια μόνο φυσική σύνδεση του δέκτη με τον ελεγκτή. Έτσι, απλοποιείται σημαντικά η κατασκευή. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται μια κάτοψη του ελεγκτή Omnibus F4, καθώς και μια εξήγηση των συνδέσεων που έγιναν.



Σχήμα 1.1 Omnibus F4 pinout [1]

Ο δέκτης συνδέεται στο pin 5 της σειράς J7 και έχει ως τροφοδοσία τα 5V και GND της ίδιας σειράς. Στα pins PWM1, PWM2, PWM3 και PWM4 συνδέονται τα Electronic Speed Controllers (ESCs) για τον έλεγχο των τριφασικών brushless κινητήρων του drone. Στην πράξη, ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει το κατά PPM διαμορφωμένο σήμα, αποπολυπλέκει τα υπερκείμενα σήματα ελέγχου που εκπέμπει ο χειριστής και βάσει των λαμβανόμενων δεδομένων δίνει τις κατάλληλες εξόδους PWM στους κινητήρες έπειτα από εφαρμογή PID αλγορίθμου. Η πλακέτα του ελεγκτή τροφοδοτείται με 5V είτε από τις γραμμές VIN και GND αντίστοιχα των σειρών J17 και J18, είτε από ειδικό pin στην πίσω πλευρά. Η τάση της μπαταρίας διαβάζεται από το pin VBAT στην σειρά J3. Συνοπτικά φαίνεται η αντιστοιχία των συνδέσεων στον Πίνακα 1.1 .

Πίνακας 1.1 Αντιστοιχία συνδέσεων Omnibus F4

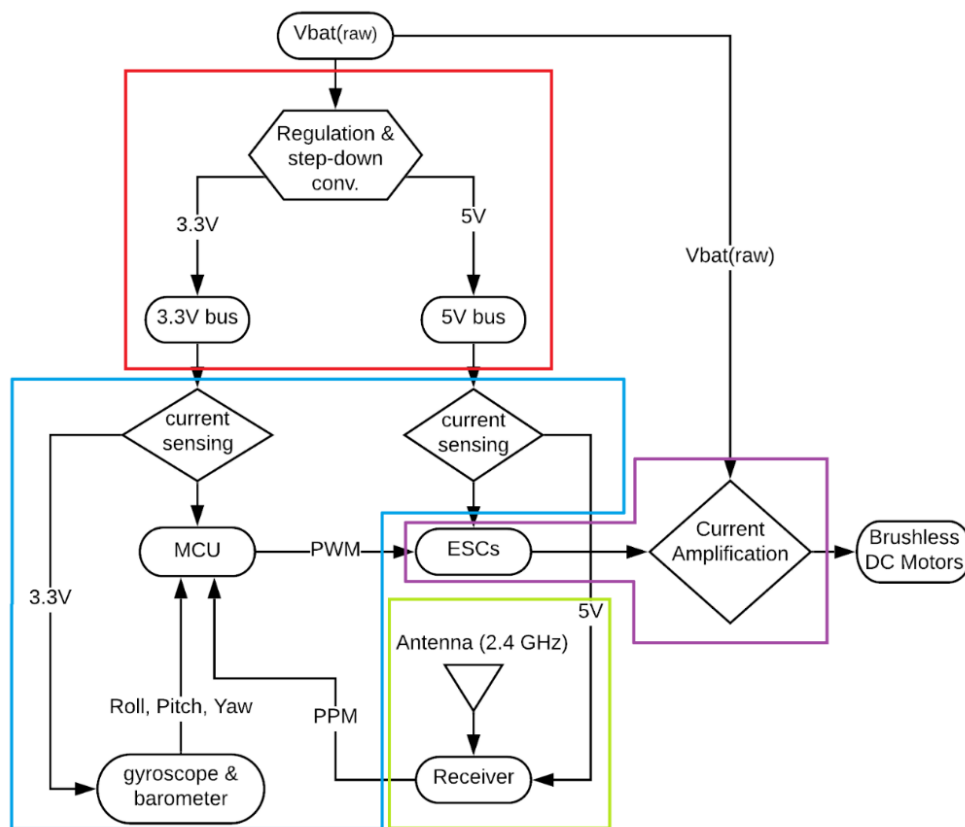
Feature	Connection
Receiver	pin 5 (row J7)
ESCs	PWM1
	PWM2
	PWM3
	PWM4
Power (5V)	VIN & GND

Για την παροχή τάσεων τροφοδοσίας χρησιμοποιείται μια συμβατική πλακέτα διανομής ισχύος (Power Distribution Board, PDB) που με την χρήση step down converter παρέχει σταθερές τάσεις 3.3V, 5V καθώς και Vbat(raw) (μη μετασηματισμένη τάση μπαταρίας) για την τροφοδοσία της πλακέτας του ελεγκτή, της κεραίας του δέκτη αλλά και των ESCs. Η γραμμή ρεύματος της τάσης Vbat(raw) χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των κινητήρων του drone. Η πλακέτα διανομής ισχύος συνδέεται άμεσα, τόσο ηλεκτρικά όσο και μηχανικά με την πλακέτα του ελεγκτή από όπου τροφοδοτείται και ο δέκτης FS-iA6B.

Για την τροφοδοσία του όλου εναέριου συστήματος γίνεται χρήση μπαταρίας λιθίου πολυμερούς (LiPo) 4S (τέσσερα στοιχεία 3,7V συνδεδεμένα σε σειρά). Η αθροιστική τάση που δέχεται ο διανομέας ισχύος ανέρχεται σε 16.8V όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη.

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται η λειτουργία των βασικών και απολύτως απαραίτητων κυκλωμάτων που απαρτίζουν το drone και οι ηλεκτρικοί συσχετισμοί μεταξύ τους. Ακολουθεί η εξήγηση του διαγράμματος: Η τάση Vbat(raw) στην κορυφή του διαγράμματος αντιπροσωπεύει την τάση της μπαταρίας πριν οποιοσδήποτε μετασηματισμός λάβει χώρα. Το στοιχείο «Regulation & step-down conv.» αντιπροσωπεύει τους step-down μετασηματιστές 3.3V και 5V που υλοποιούνται πάνω στο PDB. Τα στοιχεία current sensing στο διάγραμμα αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν τους μετρητές ρεύματος που υλοποιούνται πάνω στην πλακέτα του ελεγκτή με τη χρήση απλών shunt resistors και μέτρηση πτώσης τάσης στα άκρα τους. Το στοιχείο MCU είναι ο μικροεπεξεργαστής της σειράς STM32F4 που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής. Όπως είναι προφανές, ο ελεγκτής τροφοδοτείται με 3.3V από την αντίστοιχη γραμμή του PDB. Συνεχίζοντας, το στοιχείο «gyroscope & barometer» αντιστοιχεί στα ολοκληρωμένα κυκλώματα MPU6000 6DOF (γυροσκόπιο) και το BMP280 (βαρόμετρο) που επίσης τροφοδοτούνται με τάση 3.3V και δίνουν πληροφορίες προσανατολισμού στον «εγκέφαλο» του drone, όπως φαίνεται στο διάγραμμα με την γραμμή «Roll, Pitch, Yaw». Το στοιχείο του δέκτη

«Receiver» και η κεραία του δέχονται 5V ως τάση τροφοδοσίας. Ο δέκτης λαμβάνει τα κατά PPM κωδικοποιημένα σήματα και τα προωθεί στον MCU όπου υπόκεινται σε επεξεργασία. Τα ESCs συνδέονται στην γραμμή τάσης 5V, λαμβάνουν σήματα PWM από τον MCU (τα οποία προέκυψαν έπειτα από επεξεργασία των PPM σημάτων λήψης) και ελέγχουν τα brushless DC motors. Προκειμένου να προσφέρουν στους κινητήρες τα μεγάλα ρεύματα που ζητούν για την λειτουργία τους, τα ESCs ενισχύουν το προσφερόμενο ρεύμα παίρνοντας απευθείας μια γραμμή τάσης από την μπαταρία (Vbat(raw)).



Σχήμα 1.2 Λειτουργικό διάγραμμα τετρακοπτήρου

Ο χρωματικός κώδικας στο Σχήμα 1.2:

- Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα επίπεδα λειτουργιών που υλοποιεί το PDB.
- Με μπλε χρώμα συμβολίζονται οι λειτουργίες που υλοποιούνται στην πλακέτα του ελεγκτή.
- Με πράσινο χρώμα συμβολίζονται οι λειτουργίες που υλοποιεί ο δέκτης Τέλος, με μωβ χρώμα συμβολίζονται οι λειτουργίες που υλοποιούν τα ESCs.
- Τα 2 στοιχεία που φαίνεται να είναι απομονωμένα (σύμβολο « $V_{bat}(raw)$ » πάνω από το σχήμα και σύμβολο «Brushless DC Motors») είναι τα «ακραία» τερματικά στοιχεία: η μπαταρία και οι κινητήρες που εκτελούν σταθερά και μονίμως από μια απλή λειτουργία έκαστο. Τα δύο αυτά τερματικά στοιχεία δεν έχουν υψηλού επιπέδου διάδραση με το υπόλοιπο σύστημα του drone.

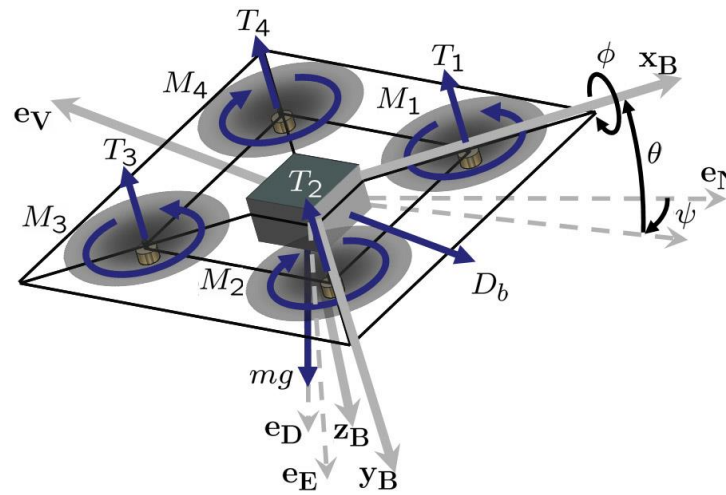


Σχήμα 1.3 Η κατασκευή του quadcopter που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή

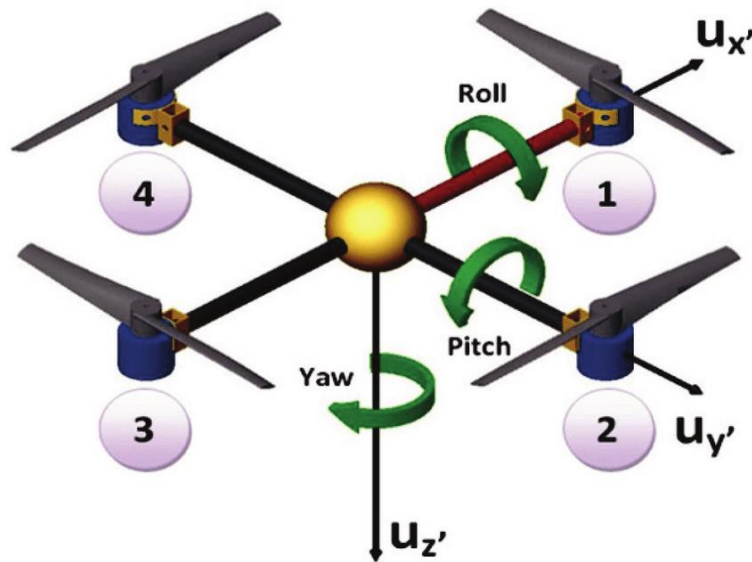
1.2 Αρχή λειτουργίας quadcopter

Το χρησιμοποιούμενο μη επανδρωμένο (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) αεροσκάφος ανήκει στην κατηγορία των τετρακοπτέρων, καθώς φέρει 4 κινητήρες διατεταγμένους με εναλλάξ κατεύθυνση περιστροφής (βλ. Σχήμα 1.4 κινητήρες M1, M2, M3, M4). Υπάρχουν τέσσερις βασικοί χειρισμοί που μπορούν να πραγματοποιηθούν, οι οποίοι ελέγχονται από αντίστοιχες παραμέτρους (βλ. Σχήμα 1.5):

- Αυξομείωση υψομέτρου
Το ύψος στο οποίο πετάει το drone εξαρτάται από τη παράμετρο thrust, προσαρμόζοντας όμοια την ταχύτητα που περιστρέφονται και οι τέσσερις κινητήρες.
- Κίνηση εμπρός – πίσω
Το drone κινείται ενός τα εμπρός ή πίσω μεταβάλλοντας τη γωνία pitch, υψώνοντας ή χαμηλώνοντας το μπροστινό τμήμα του. Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την ταχύτητα των κινητήρων ανά γειτονικά ζεύγη.
- Κίνηση δεξιά – αριστερά
Η κίνηση δεξιά – αριστερά πραγματοποιείται μεταβάλλοντας τη γωνία roll. Πρακτικά δε διαφέρει από την κίνηση μπρος – πίσω, αφού οι κινητήρες ελέγχονται και πάλι ανά γειτονικά ζεύγη.
- Περιστροφή
Το drone μπορεί να περιστραφεί ως προς τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται κάθετα στο επίπεδο που είναι διατεταγμένοι οι κινητήρες και εξαρτάται από την παράμετρο yaw. Επιτυγχάνεται ελέγχοντας διαφορικά μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων ανά διαγώνια ζεύγη [2].



Σχήμα 1.4 Διάγραμμα ενός quadcopter [2]



Σχήμα 1.5 Οι παράμετροι pitch, roll και yaw ενός quadcopter [3]

Πρακτικά, οι τρεις πρώτοι χειρισμοί (thrust, pitch και roll) επαρκούν για να ελέγξει κανείς την πτήση ενός quadcopter στο χώρο. Για αυτό το λόγο αρκούμαστε σε αυτούς τους χειρισμούς και για την εφαρμογή μας.

Κεφάλαιο 2 Υλισμικό συσκευών αποστολής και λήψης

Με τις κινήσεις του χεριού του χρήστη, μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος των παρακάτω παραμέτρων πτήσης του drone:

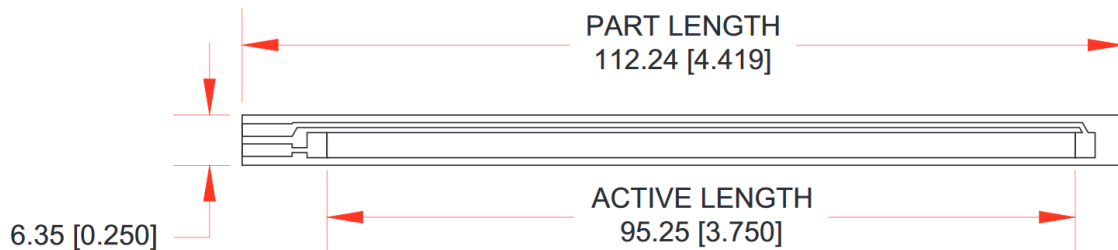
- Έλεγχος του thrust (ύψος του drone)
- Έλεγχος στον άξονα roll
- Έλεγχος στον άξονα pitch

Ο έλεγχος κάθε μιας από τις παραπάνω μεταβλητές γίνεται με την λήψη δεδομένων σχετικά με την κάμψη δακτύλων του χρήστη, την επιτάχυνση και τον προσανατολισμό του χεριού του χρήστη ως προς οριζόντιο επίπεδο παράλληλο στην επιφάνεια της γης.

Ο χειριστής θα περιστρέφει το χέρι του περί των αξόνων roll και pitch, ελέγχοντας αυτές τις παραμέτρους αντίστοιχα, ενώ για τον έλεγχο του thrust, θα κάμπτε το δάχτυλό του. Όσο περισσότερο κάμπτεται το δάχτυλο, τόσο θα αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων.

2.1 Flex sensor

Η λήψη δεδομένων κάμψης επιτυγχάνεται με χρήση αισθητήρα κάμψης (flex sensor) 11.25cm της εταιρείας Spectra Symbol [4]. Ο αισθητήρας αυτός πρόκειται για μια αντίσταση της οποίας η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα με την κάμψη που έχει υποστεί. Η τιμή αντίστασης του αισθητήρα σε έκταση (μηδενική κάμψη) ανέρχεται σε 20kΩ. Η τιμή της αντίστασης του αισθητήρα σε πλήρη κάμψη αυξάνεται στα 65kΩ.

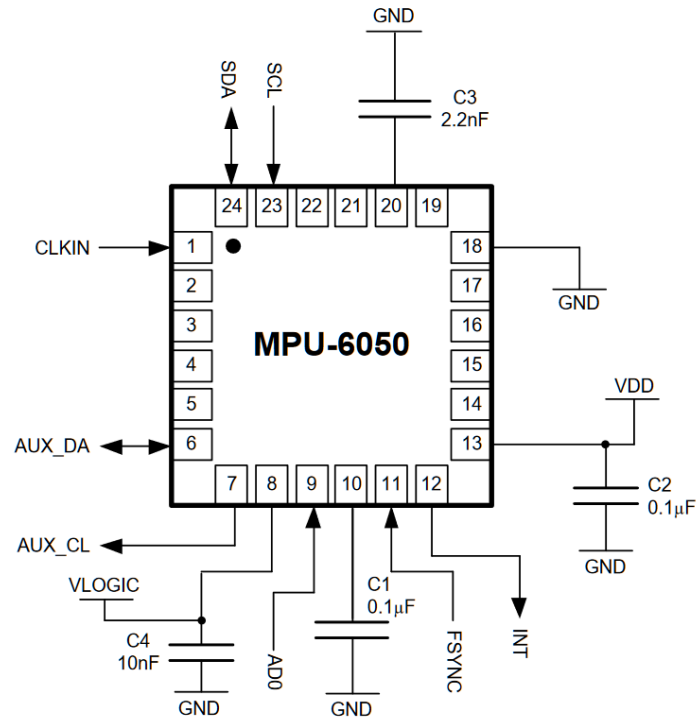


Σχήμα 2.1 Spectra Symbol flex sensor [4]

Η παραπάνω μεταβλητή αντίσταση συνδυάζεται με σταθερή αντίσταση 10KΩ σε συνδεσμολογία διαιρέτη τάσης. Η επιλογή του αισθητήρα κάμψης έγινε με κύριο κριτήριο την αξιοπιστία και την απλότητα.

2.2 MPU6050 Accelerometer + Gyroscope

Για την λήψη δεδομένων προσανατολισμού του χεριού χρησιμοποιείται το γυροσκόπιο και επιταχυνσιόμετρο MPU6050 της εταιρείας InvenSense [5]. Η συσκευή αυτή παρέχει δεδομένα στον μικροελεγκτή μέσω του πρωτοκόλου I²C. Η συσκευή συνδέεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 και λειτουργεί ως στοιχείο «slave» του I²C bus.



Σχήμα 2.2 MPU6050 [5]

Το λογικά επίπεδα για την I²C επικοινωνία καθορίζονται από την τάση που εφαρμόζεται στο pin VLOGIC (3.3V εν προκειμένω, που παρέχονται από τον step down converter ενσωματωμένο στην πλακέτα του μικροελεγκτή). Για την επικοινωνία με το MPU6050 και την λήψη σειριακών δεδομένων από τους registers, παρουσιάζονται δύο επιλογές:

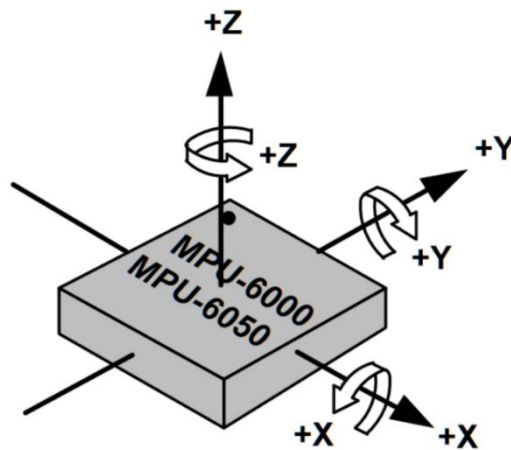
1. Απ' ευθείας επικοινωνία με τους registers του ολοκληρωμένου κυκλώματος
2. Χρήση εξωτερικών βιβλιοθηκών που κάνουν την «μετάφραση»

Όπως είναι αναμενόμενο, η άμεση επικοινωνία με τους data registers του MPU6050 είναι ταχύτερη και δεν απαιτεί καμία εξωτερική βιβλιοθήκη πέρα από την βιβλιοθήκη επικοινωνίας «I2Cdev.h» του Jeff Rowberd [6] ώστε να αποκτήσουμε πρόσβαση στους registers. Ένας χάρτης των διευθύνσεων ενδιαφέροντος (τιμές γυροσκοπίου και επιταχυνσιομέτρου σε κάθε άξονα) των data registers φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 MPU6050 registers [5]

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F
3B	59	ACCEL_XOUT_H	R
3C	60	ACCEL_XOUT_L	R
3D	61	ACCEL_YOUT_H	R
3E	62	ACCEL_YOUT_L	R
3F	63	ACCEL_ZOUT_H	R
40	64	ACCEL_ZOUT_L	R
41	65	TEMP_OUT_H	R
42	66	TEMP_OUT_L	R
43	67	GYRO_XOUT_H	R
44	68	GYRO_XOUT_L	R
45	69	GYRO_YOUT_H	R
46	70	GYRO_YOUT_L	R
47	71	GYRO_ZOUT_H	R
48	72	GYRO_ZOUT_L	R

Εν τέλει για λόγους ευκολίας διαχείρισης των τιμών επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την βιβλιοθήκη «MPU6050.h» του Jeff Rowberg [7] που με λιγότερη επεξεργασία δίνει αναγνώσιμα – και κατ' επέκταση πιο εύκολα αξιοποιήσιμα δεδομένα. Η βιβλιοθήκη παρέχει υπηρεσία επικοινωνίας με τους registers και δίνει τιμές στις μεταβλητές γωνίας και γωνιακής επιτάχυνσης αντίστοιχα, για τα διανύσματα των γωνιακών παραμέτρων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.3. Για την εφαρμογή μας απασχολούν τα διανύσματα +X και +Y, τα οποία αντιστοιχούν στις παραμέτρους roll και pitch.



Σχήμα 2.3 MPU6050 axis [5]

Μια ενδιαφέρουσα και ιδιαίτερα χρήσιμη ιδιότητα του module MPU6050 είναι ότι με την χρήση των κατάλληλων συναρτήσεων είναι δυνατό να εξαχθούν παράλληλα (ταυτόχρονα) δεδομένα τόσο γωνίας όσο και επιτάχυνσης, χωρίς το ένα να αποκλείει το άλλο. Αυτό καθίσταται δυνατό διότι οι τιμές των γωνιών και γωνιακών επιταχύνσεων δίνονται από διαφορετικούς registers (βλ. Πίνακας 2.1). Αυτό μας ενδιαφέρει πολύ καθώς χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα αυτή δεν είναι απαραίτητο να επιλέξουμε έναν τύπο μεταβλητής (γυροσκοπίου / επιταχυνσιόμετρου) και να προβούμε σε παραγωγή / ολοκλήρωση αντίστοιχα ώστε να εξάγουμε διαφορετικά δεδομένα. Στην πράξη το MPU6050 κάνει αυτόματα την ολοκλήρωση των τιμών του επιταχυνσιόμετρου και έτσι μας δίνει τις τιμές του γυροσκοπίου. Αυτό μας επιτρέπει να μειώνουμε τον φόρτο εργασίας του ελεγκτή μας κατά την εφαρμογή ενός PD control αλγορίθμου, αφού δεν χρειάζεται να παραγωγίζει / ολοκληρώνει δεδομένα ή να καλεί ξεχωριστά μετρητικές συναρτήσεις χρόνου π.χ. «milis()» και να καταναλώνει πολύτιμη επεξεργαστική ισχύ και ενέργεια. Με τις τιμές του γυροσκοπίου αντικαθιστούμε την ολοκλήρωση (άθροιση ανά μονάδα χρόνου) των τιμών του επιταχυνσιόμετρου.

Οι τιμές που δίνει το γυροσκόπιο έχουν την τάση να ολισθαίνουν. Η χρήση μετρήσεων από το επιταχυνσιόμετρο γίνεται βοηθητικά και εξυπηρετεί στη σταθεροποίηση των λαμβανόμενων τιμών. Επίσης, η λειτουργία του επιταχυνσιόμετρου είναι χρήσιμη για να προσδιοριστεί το απόλυτο επίπεδο (κάθετο στη δύναμη της βαρύτητας) και κατ' επέκταση ο προσανατολισμός του χεριού.

2.3 ESP32 Microcontroller

Η συσκευή συνδεδεμένη στο χέρι του χειριστή του drone δειγματοληπτεί τα προαναφερθέντα σήματα (τιμές roll, pitch, thrust) και επικοινωνεί με μια συζευγμένη μονάδα στην οποία αποστέλλει τα προς επεξεργασία δεδομένα. Υπήρξαν πολλοί λόγοι που οδήγησαν στην χρήση του ESP32 έναντι άλλων συσκευών. Το όλο σύστημα χειρισμού (συνολικά δύο σημεία ασύρματης ζεύξης) αποτελείται από:

1. Δικτύωμα δειγματοληψίας δεδομένων κίνησης χειρός του χρήστη και σύστημα αποστολής σημάτων ελέγχου αποτελούμενο από: MPU6050 – flex sensor – μικροελεγκτή, κεραία αποστολής
2. Δικτύωμα λήψης και επεξεργασίας των αποστελλόμενων σημάτων ελέγχου αποτελούμενο από: μικροελεγκτή, κεραία λήψης, παθητικά/ενεργά φίλτρα, και breakout board για παροχή πρόσβασης στα PWM σήματα ελέγχου που δίνονται ως έξοδοι
3. Σύστημα τελικής αποστολής υπεύθυνο για την μετάφραση των PWM σημάτων ελέγχου σε PPM σήμα, αναγνωρίσιμο από τον συμβατό δέκτη του drone

Σε ό,τι αφορά το άμεσα συνδεδεμένο στο χρήστη σύστημα δειγματοληψίας και κατόπιν αποστολής δεδομένων, τα κύρια επιθυμητά χαρακτηριστικά και δυνατότητες είναι τα εξής:

- Δυνατότητα παραμετροποίησης τρόπου λειτουργίας A/D converter (συχνότητα δειγματοληψίας, επίπεδα κβαντισμού) και μέγιστος έλεγχος πάνω στο ποιές διεπαφές του μικροελεγκτή θα λειτουργούν ως είσοδοι
- Δυνατότητα υψίσυχνης επικοινωνίας I²C
- Χαμηλή κατανάλωση για μεγιστοποίηση αυτονομίας
- Ιδανικά να μην απαιτείται εξωτερική κεραία αποστολής (η ζεύξη συστήματος χεριού – συστήματος επεξεργασίας θα είναι ασύρματη όπως προαναφέρθηκε), καθώς το σύστημα θα είναι σε άμεση επαφή με τον χρήστη και επιθυμούμε την ελάχιστη επιβάρυνση με πρόσθετο όγκο και ακαμψία (απλότητα / φορητότητα συστήματος).

Όσον αφορά το σημείο λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων, οι επιθυμητές δυνατότητες και χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- Δυνατότητα παραγωγής υψίσυχνου PWM σήματος ώστε να πληρείται το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist-Shannon. Επεξήγηση: Η είσοδος του συστήματος τελικής PPM εκπομπής περιμένει να «δει» σήμα της τάξης των 100kHz. Συνεπώς το ενδιαμέσο στάδιο επεξεργασίας πρέπει να έχει την δυνατότητα να παράγει PWM σήμα συχνότητας ικανής να «προσομοιώσει» τέτοιο υψίσυχνο σήμα μετά την χρήση κατάλληλων φίλτρων.
- Δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε GPIO pin ως PWM output. Ο αριθμός αυτών των εξόδων πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 (ένα PWM output για κάθε ένα σήμα thrust, roll, pitch).
- Δυνατότητα παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών του PWM σήματος εξόδου: αλλαγή αριθμού σταθμών κβαντισμού, αλλαγή συχνότητας κατά βούληση.
- Ικανή επεξεργαστική ισχύς (επιθυμητή η ύπαρξη διπύρηνου επεξεργαστή για αποτελεσματικό έλεγχο με χρήση PID/PD αλγορίθμων).
- Όπως και στο σύστημα αποστολής, είναι ιδανικό να μην απαιτείται εξωτερική κεραία λήψης για λόγους απλότητας και φορητότητας.

Από τους περισσότερους εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές, ο ESP32 κρίνεται ιδανικός για την εφαρμογή. Σύμφωνα με τα φύλλα δεδομένων της Espressif [8, 9] ενσωματώνει διπύρρηνο επεξεργαστή Xtensa 32-bit LX6 χρονισμένο στα 160 ή 240MHz (αναλόγως την έκδοση). Σύμφωνα με την εταιρεία κατασκευής του ESP32 (Espressif Systems), ο επεξεργαστής του ESP32 SoC έχει αρχιτεκτονική ειδικά διαμορφωμένη για διαχείριση διεργασιών PID control και εμφωλευμένων interrupts με μέγιστη αποτελεσματικότητα. Το ESP32 ενσωματώνει επίσης 532.48 kByte SRAM, A/D converter των 12 bit (άρα $n = 2^{12} - 1 = 4095$ επίπεδα κβαντισμού), 2 διεπαφές I²C επικοινωνίας και δυνατότητα παραγωγής PWM σήματος από σχεδόν οποιαδήποτε διεπαφή εξόδου. Τέλος, σε ό,τι αφορά την ασύρματη ζεύξη, το ESP32 παρέχει δύο βασικές επιλογές: WiFi (802.11 b/g/n), Bluetooth (v4.2), οι οποίες αναλύονται σε βάθος στην Παράγραφο 4.1. Σημείωση: το πρότυπο 802.11 δεν μας περιορίζει αποκλειστικά σε εφαρμογές που απαιτούν χρήση κεντρικού δρομολογητή.

Το pinout του μικροελεγκτή που επιλέχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Στο σχήμα φαίνεται ότι εκτός των GPIO 34, 35, 36 και 39, όλες οι υπόλοιπες διεπαφές λειτουργούν ως οτιδήποτε προγραμματιστούν. Εκτός αυτού, πλην αυτών των τεσσάρων GPIO pins, όλες οι υπόλοιπες έξοδοι είναι σε θέση να παράγουν PWM μέγιστης συχνότητας 78.125kHz για ανάλυση $n = 10$ bits (άρα $2^{10}-1 = 1023$ βήματα κβαντισμού).

Σημείωση: με διαφορετική ανάλυση (bits κβαντισμού) λαμβάνουμε διαφορετική μέγιστη συχνότητα PWM. Ενδεικτικά για $n = 8$ η μέγιστη συχνότητα ανέρχεται σε 312.5kHz. Γενικά, η σχέση που συνδέει ανάλυση και συχνότητα PWM είναι η εξής:

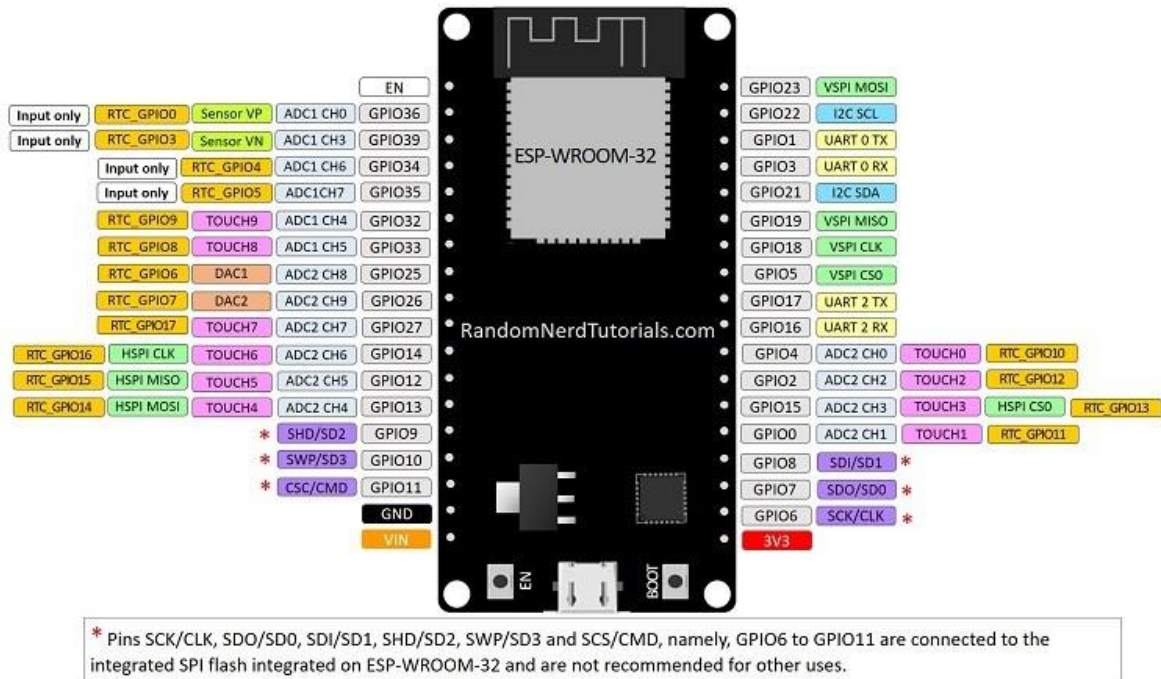
$$f_{max(PWM)} = \frac{8 \cdot 10^7}{2^n} \quad (2.1)$$

όπου n ο αριθμός bits κβαντισμού.

Πρέπει συνεπώς να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ ανάλυσης και συχνότητας PWM. Με ανάλυση 10bits ($n=10$) διατηρείται επαρκής έλεγχος στα επίπεδα της ισοδύναμης τάσης εξόδου ενώ παράλληλα η μέγιστη συχνότητα του PWM σήματος αγγίζει τα 78.125kHz. Πειραματικά, ωστόσο, προέκυψε πως για τις εισόδους του PPM αναμεταδότη απαιτείται συχνότητα ανώτερη των 78.125kHz. Υπό άλλες συνθήκες θα έπρεπε μειωθούν τα επίπεδα κβαντισμού θέτοντας $n=9$. Θα μειώνονταν δηλαδή από 1024 σε 512, κάτι το οποίο άμεσα συνεπάγεται μικρότερο έλεγχο. Ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος ήταν η τοποθέτηση φίλτρων RC στις εξόδους του ESP32.

ESP32 DEVKIT V1 – DOIT

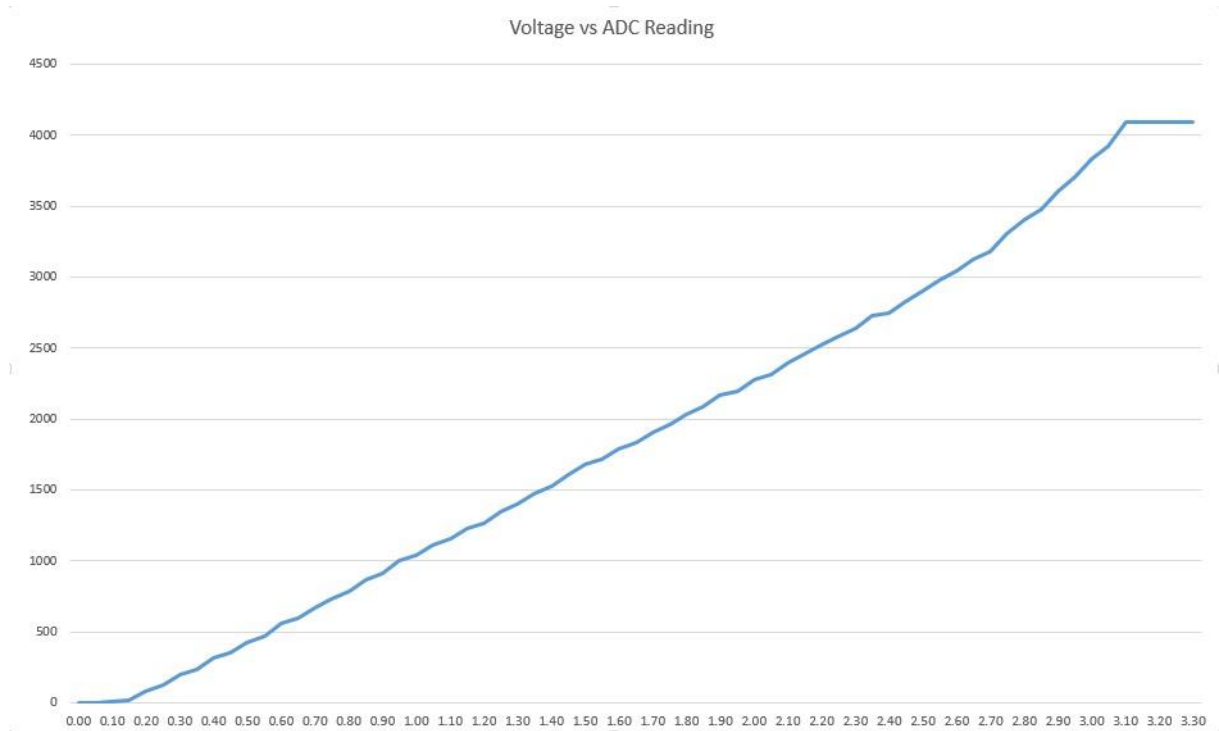
version with 36 GPIOs



Σχήμα 2.4 ESP32 DevKit v1 pinout [10]

Αξιοσημείωτο είναι ότι το ESP32 έχει συγκριτικά με τους υπόλοιπους διαθέσιμους μικροελεγκτές ιδιαίτερα μικρή κατανάλωση ισχύος. Σε περιπτώσεις απώλειας σήματος και συνεχούς προσπάθειας ανακάλυψης εκπομπού/δέκτη και επανασύνδεσης, το μέγιστο ζητούμενο ρεύμα δεν θα ξεπεράσει τα 450mA για τάση τροφοδοσίας 5V. Με άλλα λόγια στην απολύτως χειρότερη περίπτωση (απώλεια αξιόπιστης ζεύξης ή λειτουργία σε ηλεκτρικά θορυβώδες περιβάλλον με συνεχείς παρεμβολές), η κατανάλωση δεν πρόκειται να ξεπεράσει τα 2.25W. Αξιοποιώντας την λειτουργία Ultra Low Power του ενσωματωμένου επεξεργαστή και γράφοντας έξυπνες ρουτίνες εντοπισμού αποστολέα και αντίστοιχα παραλήπτη των σημάτων ελέγχου, μπορούμε να πετύχουμε σημαντική αύξηση στην αυτονομία - τόσο του συστήματος χειρισμού όσο και του συστήματος λήψης / επεξεργασίας. Όλα τα γραφήματα τάσης/ρεύματος/ισχύος συναρτήσει χρόνου/αποστελλόμενων πακέτων/απόστασης επικοινωνούντων συσκευών, καθώς και περαιτέρω ανάλυση του θέματος της αυτονομίας και της ενέργειας υπάρχουν στην ειδική Παράγραφο 5.2. Τέλος, το ESP επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση της Bluetooth και της WiFi κεραιάς, κάτι που αφήνει πολλά και χρήσιμα περιθώρια ελιγμών για την εγκαθίδρυση ζεύξεων με πολλαπλά σημεία πρόσβασης ή/και hops.

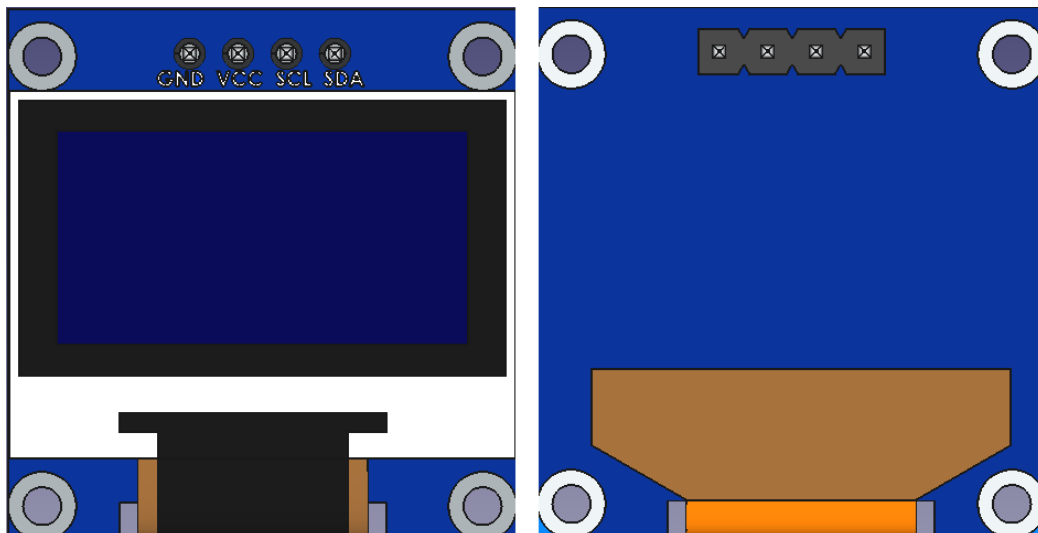
Σε ό,τι αφορά την χρήση του on-board ADC του ESP32, παρατηρείται ότι οι τιμές που προσεγγίζουν το λογικό «1» τείνουν να εξισώνονται με την αντίστοιχη τάση πριν εξισωθούν στην πραγματικότητα. Η συμπεριφορά του δεν είναι αυστηρά γραμμική, και μάλιστα παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με τον αριθμό βημάτων κβαντισμού. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται καθαρά ότι οι τιμές μετά τα 3.1V εξισώνονται εσωτερικά. Εκτός αυτού παρουσιάζονται πολλαπλές «νησίδες» μη γραμμικότητας. Λύση αποτελεί είτε η χρήση εξωτερικού ADC, είτε λογισμικά τεχνάσματα ώστε να ακυρωθεί αυτή η μη γραμμική εσωτερική εξίσωση των λαμβανομένων τιμών.



Σχήμα 2.5 Συμπεριφορά εσωτερικού ADC [11]

2.4 SSD1306 OLED display

Η διάταξη λήψης των δεδομένων (slave) θα έχει ενσωματωμένη μια οθόνη τύπου OLED της εταιρίας Solomon Systech [12] για παροχή ανάδρασης στον χρήστη αλλά και αποσφαλμάτωση. Πρόκειται για dot matrix panel ανάλυσης 128 x 68 pixels. Υποστηρίζει επικοινωνία μέσω SPI ή I²C. Πάνω του θα εμφανίζονται τα λαμβανόμενα και βαθμονομημένα σήματα ελέγχου περιστροφής και κάμψης που εκπέμπει η συσκευή αποστολής (master). Στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής, επιλέχθηκε η χρήση SPI πρωτοκόλλου επικοινωνίας λόγω ευκολίας στην ενσωμάτωση.



Σχήμα 2.6 SSD1306 – άποψη μοντέλου [13]

Κεφάλαιο 3 Εξαγωγή μετρήσεων αισθητήρων

3.1 Εξαγωγή γωνιακών παραμέτρων

Η εξαγωγή των τιμών του MPU6050 γίνεται με τη χρήση ενσωματωμένων συναρτήσεων που περιλαμβάνονται στη βιβλιοθήκη «MPU6050.h» [7]. Η βιβλιοθήκη χρησιμοποιεί τετραδόνια (quaternions) για τις γωνιακές παραμέτρους που παράγονται από το DMP (Digital Motion Processor) του MPU6050, προς αποφυγή του φαινομένου Gimbal Lock [14]. Επειδή, όμως, οι τιμές σε τετραδόνια δεν έχουν άμεση πρακτική αξία για την εφαρμογή μας, χρησιμοποιείται η συνάρτηση `mpu.dmpGetEuler(euler, &q)`, η οποία μετατρέπει τις τιμές σε γωνίες Euler μετρημένες σε ακτίνια. Στη συνέχεια, μπορούν να υπολογιστούν τα διανύσματα της βαρύτητας, οι παράμετροι yaw, pitch, roll και η επιτάχυνση. Τέλος, γίνονται οι μετατροπές από ακτίνια σε μοίρες, οι οποίες είναι πλέον αξιοποιήσιμες και έτοιμες για περαιτέρω επεξεργασία και απόστολή. Ακολουθεί η εκτενέστερη ανάλυση των σημαντικότερων τμημάτων του κώδικα:

```

1 // display Euler angles in degrees
2 mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
3 mpu.dmpGetEuler(euler, &q)
4 mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
5 mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
6 mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
7 float gy;
8 mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
9 Serial.print("ypr\t");
10 Serial.print(ypr[0] * 180 / M_PI);
11 ax = ypr[0] * 180 / M_PI;
12 Serial.print("\t");
13 Serial.print(ypr[1] * 180 / M_PI);
14 ay = ypr[1] * 180 / M_PI;
15 Serial.print("\t");
16 Serial.println(ypr[2] * 180 / M_PI);
17 az = ypr[2] * 180 / M_PI;
```

3.2 Αποφυγή ακραίων μεταβολών γωνιακών παραμέτρων

Τα εσφαλμένα bits, ο θόρυβος, αλλά και ξαφνικές, ανεπιθύμητες μεταβολές από την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος χειρισμού, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλα προβλήματα. Καθίσταται επιτακτική η εύρεση μηχανισμού ελέγχου τέτοιων μεταβολών και μετριάσμού των συνεπειών τους, ως δικλείδα ασφαλείας σε περίπτωση ηλεκτρικού ή ανθρώπινου σφάλματος. Ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί ο έλεγχος αυτός είναι με την παραγωγή των προκύπτοντων τιμών περιστροφής ανά άξονα και την σύγκρισή τους με «κατώφλια» μειώνοντας την επιρροή τους ανάλογα με το πόσο τα υπερβαίνουν. Παραγωγίζοντας τις τιμές γωνίας για έναν άξονα λαμβάνεται ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα του συστήματος.

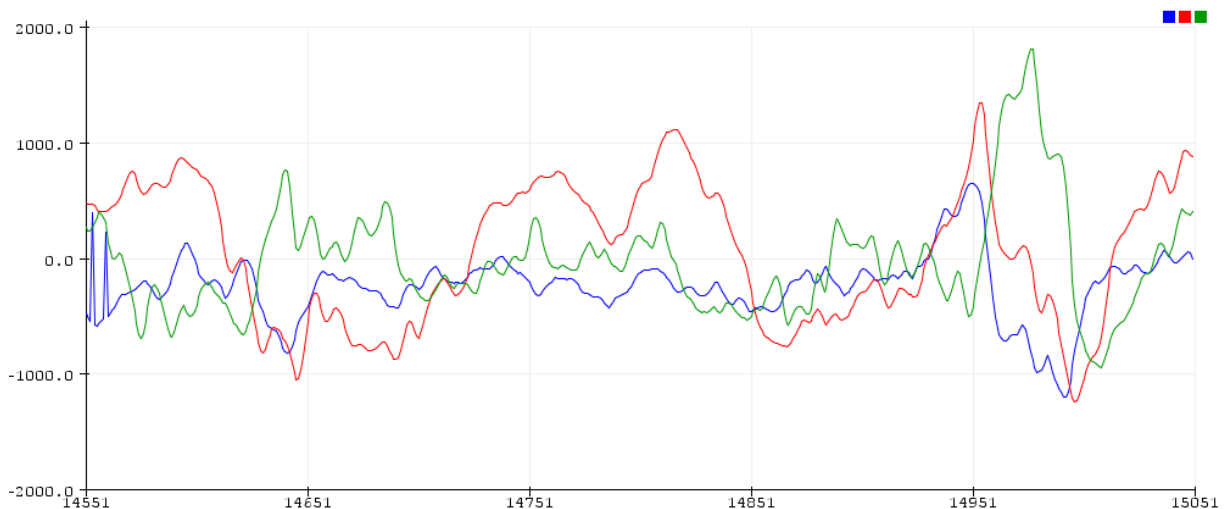
Η διαδικασία της μέτρησης και παραγωγίσης απαιτεί την δημιουργία ενός ξεχωριστού εμφωλευμένου πλαισίου χρόνου μέσα στο κυρίως πρόγραμμα, όπως και χρήση συναρτήσεων καθυστέρησης. Στην πράξη αυτό προκαλεί τεράστια προβλήματα στις ρουτίνες αποστολής και λήψης του πρωτοκόλλου ESP-Now, καθώς απαιτεί αυστηρώς καθορισμένο χρονικό πλαίσιο δημιουργίας πακέτων, κωδικοποίησης, κρυπτογράφησης και αποστολής.

Η παραμικρή ασυνέπεια ή παρέκκλιση από τους προκαθορισμένους από το πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς χρόνους, καθιστά την επικοινωνία πρακτικά αδύνατη λόγω ασυμφωνίας χρονικών σημείων αναφοράς εσωτερικών συναρτήσεων και ρουτινών. Υπό διαφορετικές συνθήκες θα απαιτούνταν τροποποίηση ρουτινών του πρωτοκόλλου ESP-Now ώστε να αντισταθμιστεί η ύπαρξη εμφωλευμένων πλαισίων χρόνου. Ωστόσο, αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.2 ότι το ολοκληρωμένο MPU6050 που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, παρέχει την δυνατότητα παράλληλης παροχής δεδομένων γωνίας και ρυθμού μεταβολής γωνιών.

Μέσα στο ωφέλιμο φορτίο των μεταδιδόμενων πακέτων θα περιλαμβάνονται και 3 επιπλέον μεταβλητές για τον έλεγχο του ρυθμού μεταβολής των τιμών του γυροσκοπίου. Οι μεταβλητές αυτές λαμβάνονται από τους registers του MPU6050 και κανονικοποιούνται με τις εξής εντολές:

```
1 | mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
2 | mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
3 | mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
```

Η λήψη των τιμών γίνεται με την εντολή `mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer)`. Οι δύο επόμενες εντολές είναι συμπληρωματικές. Συμβάλλουν στην κανονικοποίηση των λαμβανομένων τιμών αφαιρώντας την συνιστώσα της βαρυτικής επιτάχυνσης από τις τιμές επιτάχυνσης των αξόνων ενδιαφέροντος. Η τελική αφαίρεση της συνιστώσας της βαρυτικής επιτάχυνσης γίνεται με την εντολή `mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity)` που λαμβάνει ως ορίσματα τα `&aaReal`, `&aa`, `&gravity`. Το πρώτο όρισμα είναι ο πίνακας τιμών της επιτάχυνσης ανά άξονα, χωρίς την βαρυτική επιρροή. Το δεύτερο όρισμα είναι ο πίνακας τιμών της επιτάχυνσης ανά άξονα χωρίς καμία επεξεργασία. Το τρίτο όρισμα είναι πίνακας που περιγράφει το διάνυσμα της βαρυτικής επιτάχυνσης ανά άξονα. Οι τιμές που προκύπτουν αποθηκεύονται σε μονοδιάστατους πίνακες των 16 bits με δομή $[x, y, z]$. Η τιμή μεταβλητής για κάθε άξονα είναι `Real.x`, `Real.y` και `Real.z` αντίστοιχα. Παρακάτω φαίνονται σε διάγραμμα τιμών / χρόνου οι τιμές των στοιχείων του πίνακα `Real[x, y, z]` μετά την αφαίρεση της βαρυτικής συνιστώσας.

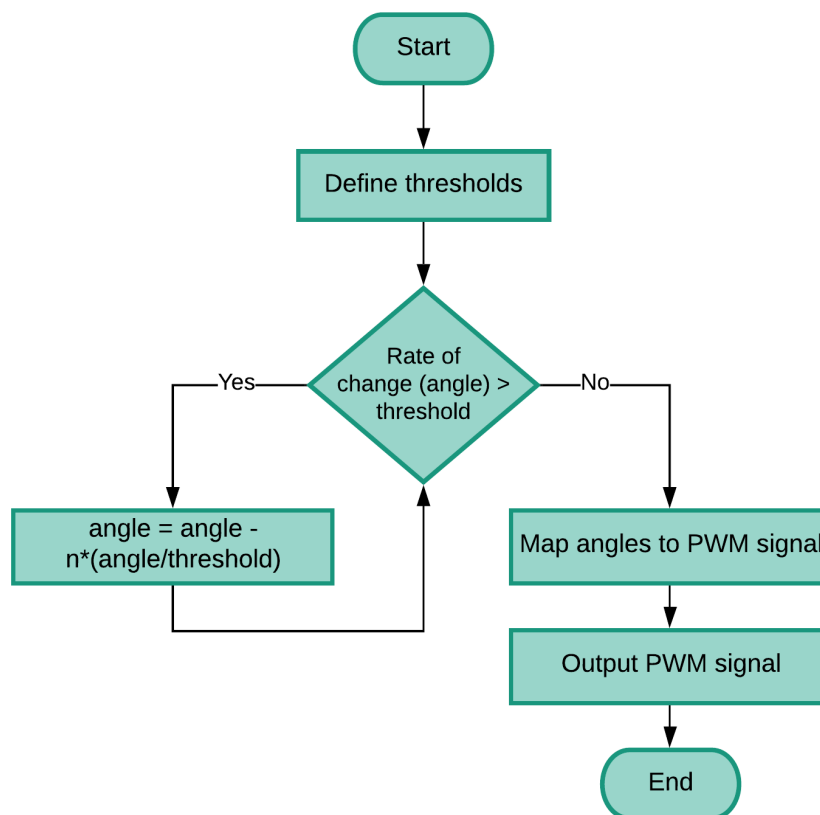


Σχήμα 3.1 Γωνιακές ταχύτητες Roll, Pitch, Yaw (μπλε, κόκκινο πράσινο αντίστοιχα)

Ο πίνακας τιμών γωνιακής ταχύτητας για τους άξονες roll, pitch, yaw, έπειτα από την αφαίρεση της βαρυτικής επιρροής, εμφωλεύεται σε πακέτα και δρομολογείται μαζί με τις υπόλοιπες μεταβλητές

προς αποστολή. Η επεξεργασία των τιμών θα γίνει αποκλειστικά στην μονάδα του παραλήπτη. Η επεξεργασία θα γίνεται ως μέρος του κυρίως προγράμματος του παραλήπτη. Η λογική του ελέγχου είναι η εξής:

1. Ελέγχεται η τιμή του ρυθμού μεταβολής κάθε άξονα
2. Εφόσον αυτή ξεπερνά το κατώφλι που ορίστηκε για κάθε άξονα, η τιμή της εξόδου θα μειώνεται κατά μέγεθος ανάλογο του πόσο ο ρυθμός μεταβολής υπερβαίνει το δεδομένο κατώφλι, πολλαπλασιασμένο επί έναν συντελεστή βαρύτητας.
3. Ο έλεγχος επαναλαμβάνεται μέχρι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας του ελεγχόμενου άξονα να μην ξεπερνά το κατώφλι που ορίστηκε.
4. Εάν ο ρυθμός μεταβολής δεν υπερβαίνει το κατώφλι, γίνεται η βαθμονόμηση των τιμών σε PWM σήμα $2^{10} = 1024$ βημάτων, τα οποία αποτελούν τα τελικά σήματα ελέγχου.



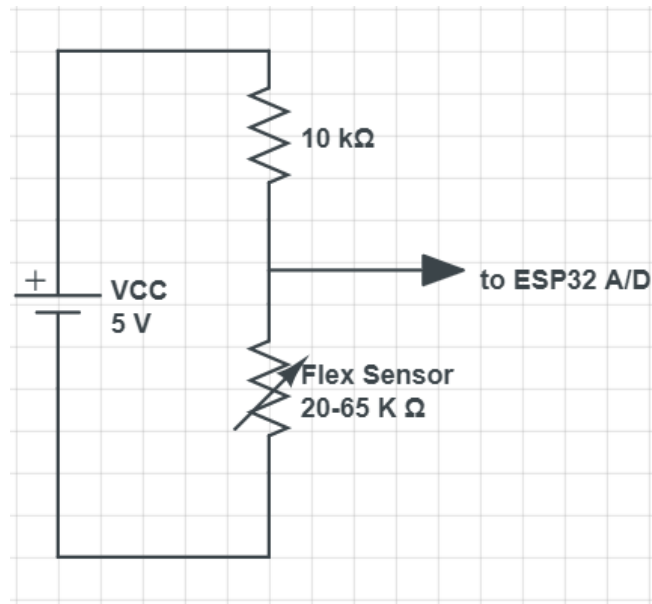
Σχήμα 3.2 Λογικό διάγραμμα υποπρογράμματος περιορισμού ακραίων τιμών εξόδου

Ο συντελεστής βαρύτητας n αρχικά τίθεται ίσος με 1. Η ιδανική του τιμή για κάθε άξονα προκύπτει πειραματικά. Το υποπρόγραμμα που περιγράφεται από το παραπάνω διάγραμμα θα εκτελείται μέσα στον βρόχο του κυρίου προγράμματος για κάθε μεταβλητή που αφορά τα διανύσματα των γωνιών.

3.3 Εξαγωγή παραμέτρου κάμψης

Η ανάγνωση των τιμών από τον αισθητήρα κάμψης δεν απαιτεί κάποια εξωτερική βιβλιοθήκη, καθώς ο αισθητήρας είναι εντελώς παθητικό στοιχείο. Μπορούμε να εξάγουμε τιμές πολύ απλά παρατηρώντας απλά τις μεταβολές τάσης σε ένα ακροδέκτη του A/D converter που περιλαμβάνει το ESP32.

Το ένα άκρο του αισθητήρα κάμψης συνδέεται στην γείωση και το άλλο σε σειρά με την αντίσταση 10KΩ η οποία συνδέεται επίσης σε μια τάση τροφοδοσίας. Η μεταβολή της τιμής κάμψης του αισθητήρα μεταφράζεται σε μεταβολή της τάσης που παρατηρείται στον διαιρέτη τάσης. Η επιλογή της τιμής της αντίστασης 10KΩ έγινε με γνώμονα την μέγιστη δυνατή μεταβολή της μετρούμενης τάσης στην έξοδο του δικτυώματος του διαιρέτη. Η έξοδος του διαιρέτη τάσης συνδέεται απ' ευθείας σε είσοδο A/D converter του χρησιμοποιούμενου μικροελεγκτή και διαβάζεται με την εντολή `analogRead (GPIO pin)`, όπου GPIO pin ο αντίστοιχος ακροδέκτης του ESP32.



Σχήμα 3.3 Σχηματικό σύνδεσης flex sensor

Κεφάλαιο 4 Επικοινωνία και ασφάλεια

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η διαδικασία επίτευξης ζεύξης ESP-Now μεταξύ των δύο συσκευών που επικοινωνούν με αυτό το πρωτόκολλο. Τα παρακάτω δηλαδή αφορούν την συσκευή master (συνδεδεμένη στον χειριστή), και την συσκευή node (που είναι ο slave της ESP-Now ζεύξης και δρομολογεί τα σήματα στο drone).

Σημείωση: η συσκευή node μετέχει σε δύο ζεύξεις παράλληλα: ESP-Now και PPM. Η μονάδα αυτή αναφέρεται εδώ ως slave, διότι αυτός είναι ο ρόλος της στην αναλυόμενη επικοινωνία (ESP-Now). Εφόσον ληφθεί υπόψιν και το PPM μέρος της συνολικής ροής σημάτων, ο ESP-Now slave είναι ορθότερο να ονομαστεί node, διότι αποτελεί γέφυρα μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων.

4.1 Αρχιτεκτονική Ζεύξης

Η λογική πορεία των σημάτων ελέγχου είναι η εξής:

1. Οι τιμές των μεταβλητών (γωνιακές παράμετροι και κάμψη αισθητήρα) προς αποστολή δειγματοληπτούνται από το ESP – αποστολέα.
2. Οι «καθαρές» τιμές αυτές χρήζουν επεξεργασίας, φιλτραρίσματος και βαθμονόμησης πριν την αξιοποίησή τους.
 - Σε αυτό το σημείο υπάρχουν δύο βασικές επιλογές:
 - α) η απαιτούμενη επεξεργασία σήματος να γίνει on-board και ο αποστολέας να δρομολογήσει αποκλειστικά και μόνο έτοιμα σήματα ελέγχου, ή
 - β) ο αποστολέας να στείλει την «καθαρή» πληροφορία στο ESP του παραλήπτη, επιφορτίζοντάς το με την ευθύνη της επεξεργασίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν η διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύς κάθε ελεγκτή και οι εν δυνάμει καθυστερήσεις που μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές στις ευαίσθητες στον χρόνο ρουτίνες αποστολής / λήψης.
 - Όσον αφορά τα δεδομένα του MPU6050 επιλέγεται να αποστέλλονται επεξεργασμένα, καθώς υπάρχουν ήδη δομημένες εξαιρετικά αποτελεσματικές συναρτήσεις. Όσον αφορά γωνιακές/επιταχυνσιακές παραμέτρους, ο παραλήπτης θα λαμβάνει τιμές γωνιών για τις οποίες θα κάνει μόνο βαθμονόμηση σε σήμα PWM. Αντίθετα, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον αισθητήρα κάμψης θα αποστέλλονται ως έχουν, χωρίς να υποστούν καμιά επεξεργασία. Έτσι μοιράζεται στους επεξεργαστές των δύο ESP ο επεξεργαστικός φόρτος. Συγκεκριμένα, η λήψη και βαθμονόμηση των μεταβλητών γωνίας σε κάθε άξονα γίνεται όπως φαίνεται παρακάτω, από τις τιμές του μονοδιάστατου πίνακα `ypr[]`.

```

1  | ax = ypr[0] * 180 / M_PI;
2  | ay = ypr[1] * 180 / M_PI;
3  | az = ypr[2] * 180 / M_PI;
```

Αντίστοιχα, δειγματοληψία των μη βαθμονομημένων δεδομένων κάμψης του αισθητήρα γίνεται με την παρακάτω εντολή, όπου `n` το GPIO pin που θα χρησιμοποιηθεί ως ADC:

```

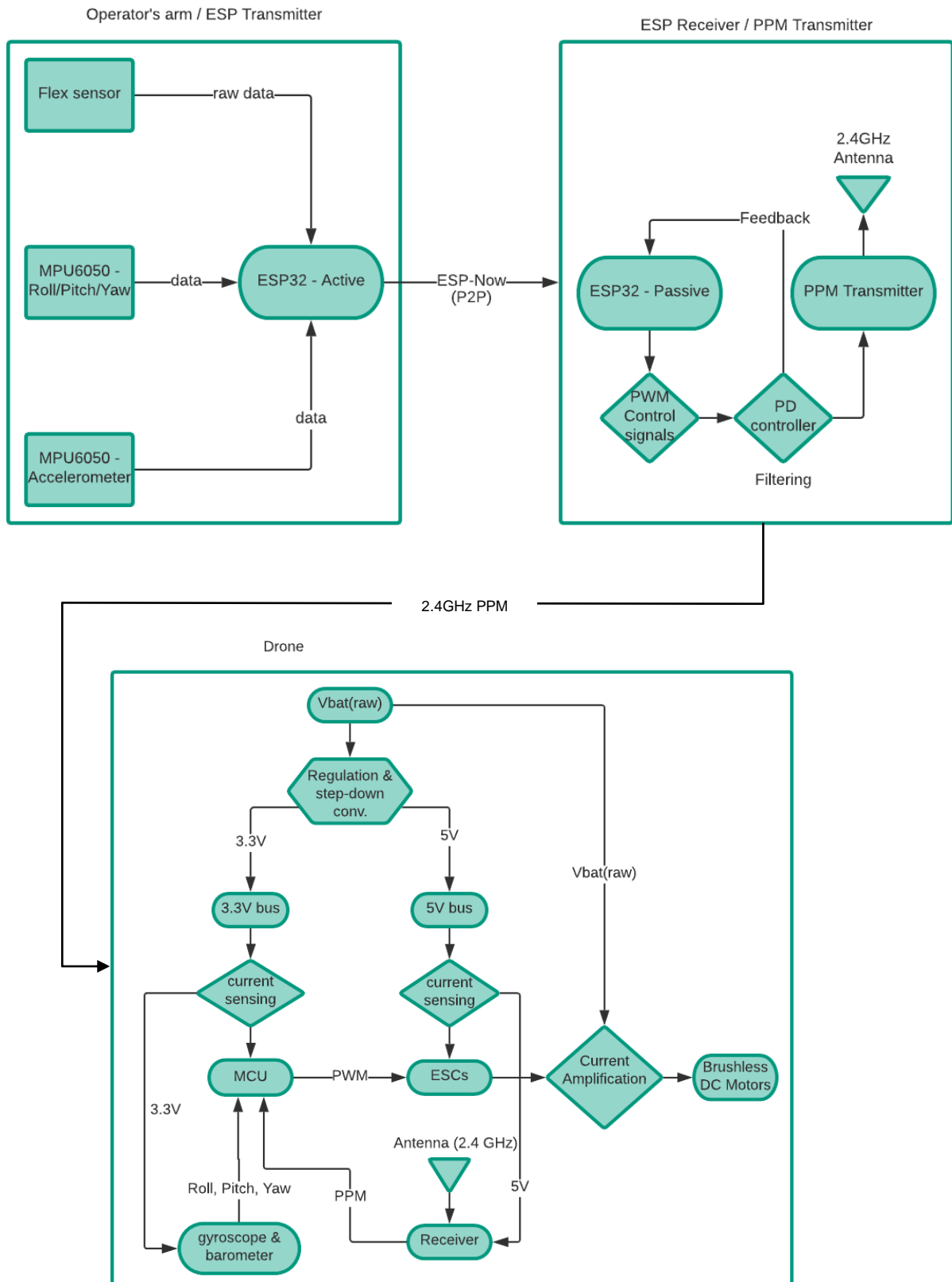
1 | pinMode(n, INPUT); //in setup() function
... | ...
3 | flex = analogRead(n); //in loop() function

```

Όπως αναφέρθηκε, ο ADC του ESP32 παρουσιάζει ελαφρώς μη γραμμική συμπεριφορά, κάτι που θα μας απασχολήσει στην πορεία. Οι βαθμονομημένες τιμές μεταβλητών του MPU6050 και οι καθαρές τιμές του αισθητήρα κάμψης πρέπει να σταλούν με το ελάχιστο δυνατό latency στην μονάδα του δέκτη. Υπάρχουν διάφορες επιλογές όσον αφορά τον τρόπο αποστολής.

- Bluetooth: παρέχει εμβέλεια 5 – 30m, latency 200ms και bitrate 2.1Mb/sec. Το πρότυπο αυτό απαιτεί μικρή κατανάλωση ισχύος αλλά δεν είναι ασφαλές και δεν ενδείκνυται για ζεύξεις αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων.
 - Wifi: τυπικά παρέχει εμβέλεια 32 – 95m, latency 150ms και bitrate 600Mb/sec. Απαιτεί σημαντικά περισσότερη ισχύ, ωστόσο είναι σημαντικά ασφαλέστερο από το Bluetooth. Σημαντική αύξηση της καθυστέρησης εισάγει η χρήση δρομολογητή.
 - nRF24L01: παρέχει εμβέλεια 800m, ελάχιστο latency (400-500μsec) και bitrate 1 ή 2 Mb/sec (επιλεγόμενο). Ο transceiver nRF24L01 απαιτεί εξωτερικό επεξεργαστή για τη δειγματοληψία [15].
 - ESP-Now: παρέχει εμβέλεια μέχρι και 1km χρησιμοποιώντας το πρότυπο 802.11 LR, μεταβλητό latency ανάλογα με το μέγεθος πακέτου (τυπικά της τάξης μεγέθους 500μsec). Δεν απαιτεί σύνδεση σε δρομολογητή, είναι συγκριτικά ασφαλές πρωτόκολλο, απαιτεί ελάχιστο hardware και δημιουργήθηκε για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Τέλος, λόγω του ότι βασίζεται στην ίδια σειρά προτύπων με το WiFi, επιτρέπεται διάδραση μεταξύ τους εφόσον αυτό είναι επιθυμητό (π.χ. έλεγχος μέσω γραμμής 5G). Λόγω των παραπάνω, είναι η καλύτερη δυνατή επιλογή για την εφαρμογή αυτή.
3. Τα δεδομένα αποστέλλονται με ESP-Now και λαμβάνονται από την αντίστοιχη διάταξη του δέκτη - node, ο οποίος κατόπιν βαθμονομεί τις τιμές του αισθητήρα κάμψης και την τελική επεξεργασία. Από τις βαθμονομημένες τιμές, προκύπτουν τα PWM σήματα ελέγχου.
 4. Τα προκύπτοντα σήματα ελέγχου φιλτράρονται και έπειτα από εφαρμογή μιας μορφής PD ελέγχου, δρομολογούνται στη διάταξη Node που τελεί χρέη PPM κωδικοποιητή.
 5. Τα δεδομένα αποστέλλονται στο flight controller του drone.

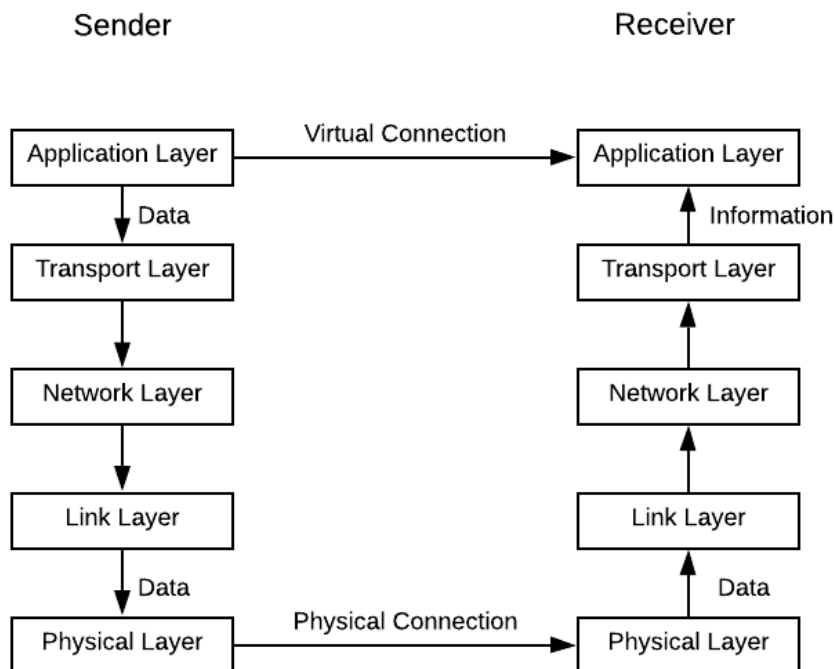
Στο Σχήμα 4.1 περιγράφεται η διαδρομή των δεδομένων από την στιγμή της δειγματοληψίας μέχρι την στιγμή της αποστολής των PPM σημάτων στον flight controller.



Σχήμα 4.1 Ολοκληρωμένο διάγραμμα συστήματος ελέγχου και επικοινωνίας

4.2 ESP-Now

Σύμφωνα με τα Networking APIs του ESP32 [16] και το API Reference του ESP8266 [17], το ESP-Now είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς, όμοιο λειτουργικά με το UDP. Όπως είναι αναμενόμενο, δεν κάνει χρήση επιβεβαιώσεων (ACK-less protocol) και δεν κάνει «χειραψία» κατά την πραγματοποίηση της ζεύξης. Ακόμη, δε γίνεται επαναμετάδοση σε περίπτωση σφάλματος ή απώλειας πακέτου. Εάν χαθεί πληροφορία δεν είναι δυνατό να ανακτηθεί. Με άλλα λόγια το πρωτόκολλο αυτό είναι (όπως άλλωστε και το UDP) αναξιόπιστο. Είναι δυνατό ωστόσο να υλοποιηθεί αξιοπιστία σε επίπεδο εφαρμογής, καθώς η ζεύξη είναι πλήρως αμφίδρομη. Το ESP-Now είναι ταχύτατο και το μόνο που ζητάει ως αναγνωριστικό είναι η MAC address της μονάδας με την οποία επικοινωνεί. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η κεφαλίδα κάθε πακέτου είναι πολύ μικρή σε σχέση με το ωφέλιμο φορτίο, όπως φαίνεται στην ανάλυση του ESP-Now πακέτου. Στο Σχήμα 4.2 της στοίβας πρωτοκόλλων του TCP/IP φαίνεται η «διαδρομή» δεδομένων και η εν τέλει μετατροπή τους σε πακέτα πληροφορίας. Το ESP-Now βρίσκεται στο 4^ο επίπεδο OSI (επίπεδο μεταφοράς) και διαχειρίζεται τη μεταφορά δεδομένων μέσω της φυσικής ζεύξης 2.4GHz.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ζεύξης αποστολέα-παραλήπτη στο TCP/IP stack

Το πρωτόκολλο ESP-Now υιοθετεί μια «επίπεδη» ιεραρχία που μεταξύ άλλων το απλουστεύει δομικά και επιτρέπει full duplex επικοινωνία πολύ εύκολα. Σε μια ESP-Now ζεύξη δεν υπάρχει σχέση master-slave μεταξύ των επικοινωνούντων οντοτήτων. Αντίθετα υπάρχει πλήρως αμφίδρομη σχέση peer-to-peer. Σε αντίθεση με το UDP ωστόσο, δεν απαιτείται σύνδεση σε WiFi δίκτυο. Οι δύο (στην εφαρμογή μας) μονάδες επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς να απαιτείται ενδιάμεσος δρομολογητής – κάτι που μειώνει περαιτέρω το latency στην επικοινωνία. Να σημειωθεί πως απαιτείται ένα αρχικό «ταίριασμα» των μονάδων, έπειτα από το οποίο επιτυγχάνεται η παραμένουσα peer-to-peer σύνδεση και δεν απαιτείται handshake. Το προεπιλεγμένο – βασικό bitrate του ESP-Now είναι 1Mb/s.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας ESP-Now παρέχει τις παρακάτω υπηρεσίες στην διεργασία της ασύρματης ζεύξης:

- Κρυπτογραφημένη και μη κρυπτογραφημένη unicast επικοινωνία
- Πλήρως αμφίδρομη (full duplex) επικοινωνία
- Επιλεκτική κρυπτογράφηση για κάθε επικοινωνούσα συσκευή
- Ωφέλιμο φορτίο έως και 250 byte για κάθε δεδομένογραμμα
- Ενημέρωση του επιπέδου εφαρμογής σχετικά με την κατάσταση αποστολής (επιτυχία/αποτυχία) μέσω της συνάρτησης callback.
- Αναξιόπιστη, ασυνδεδασμένη υπηρεσία. Δεν υλοποιείται αξιοπιστία στο επίπεδο μεταφοράς. Δεν υπάρχει εγγύηση από το επίπεδο μεταφοράς ότι τα δεδομένα θα φτάσουν στον παραλήπτη, ούτε ότι αν φτάσουν, θα είναι με τη σωστή σειρά.

Το πρωτόκολλο ESP-Now έρχεται με κάποιους περιορισμούς:

- Μη υποστήριξη ευρυεκπομπής (broadcast) – αδιάφορο για την εφαρμογή μας
- Υποστήριξη μέχρι 10 κρυπτογραφημένων peers σε κατάσταση «Station Mode». Υποστηρίζονται ωστόσο πολλαπλοί Multiple unencrypted peers (μέχρι 20).
- Το ωφέλιμο φορτίο δεδομένογραμματος δεν μπορεί να ξεπερνά τα 250 bytes.
- Δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη χρήση της δυνατότητας WiFi συνδεδασμότητας των ESP καθώς η κεραία 2.4GHz χρησιμοποιείται για αποστολή/λήψη από το ESP-Now.

Μας ενδιαφέρει η μεταφορά 7 μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο (roll, pitch, yaw, thrust και ρυθμός μεταβολής roll, pitch, yaw αντίστοιχα) με χρήση “long” variables (8 byte) καταλήγουμε ότι απαιτούνται τουλάχιστον $7 \cdot 8 = 56$ bytes. Τα 250 bytes/πακέτο που έχουμε διαθέσιμα είναι υπεραρκετά. Όπως διαπιστώνεται, ο λόγος ωφέλιμου φορτίου προς header + αναγνωριστικά, είναι παραπάνω από ικανοποιητικός. Παρακάτω αναλύεται η δομή των αποστέλλομενων πακέτων όπως ορίζεται στο API του ESP-Now. Ο παραλήπτης λαμβάνει το πακέτο στο φυσικό επίπεδο, το οποίο παραδίδει τα ενθουλακωμένα δεδομένα στα υπερκείμενα επίπεδα.

Η δομή του, σύμφωνα με το IoT Development Framework (IDF) της Espressif [16]:

Πίνακας 4.1 ESP-Now vendor specific action frame format [16]

MAC Header	Category Code	Organization ID	Random Values
24 bytes	1 byte	3 bytes	4 bytes

- MAC Header: Η MAC κεφαλίδα αποτελείται από τρία πεδία διεύθυνσης. Το πρώτο πεδίο διεύθυνσης είναι η διεύθυνση του παραλήπτη. Το δεύτερο πεδίο διεύθυνσης είναι η διεύθυνση του αποστολέα. Το τρίτο πεδίο MAC διεύθυνσης αντιστοιχεί στην διεύθυνση ευρυεκπομπής (0xFF:FF:FF:FF:FF:FF).
- Category Code: Το πεδίο αυτό έχει την τιμή 127 που καθορίζεται από την Espressif.
- Organization Identifier: Το πεδίο «Organization Identifier» περιλαμβάνει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (0x18fe34), το οποίο είναι τα τρία πρώτα bytes της MAC διεύθυνσης που δόθηκε στην συσκευή από την Espressif.

- Random Value: Το πεδίο αυτό περιέχει έναν τυχαίο αριθμό και χρησιμοποιείται για να αποτρέψει επιθέσεις τύπου relay, όπου το μεταδιδόμενο σήμα υποκλέπτεται, καταγράφεται και επαναλαμβάνεται ή αλλοιώνεται με δόλιο σκοπό.
- Vendor Specific Content: Αυτό το πεδίο είναι υπερσύνολο των ακόλουθων τριών πεδίων:

Πίνακας 4.2 ESP-Now vendor specific content [16]

Vendor Specific Content	FCS	Element ID	Length
7 - 255 bytes	4 bytes	1 byte	1 byte

- FCS: Το πεδίο Frame Check Sequence (FCS) περιέχει bytes που χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό σφαλμάτων.
- Element ID: Το πεδίο Element ID έχει την τιμή 221, προκαθορισμένη από την Espressif ως δημιουργό του πρωτοκόλλου.
- Length: Το πεδίο «Length» είναι το συνολικό μήκος του «Organization Identifier», «Type», «Version» και «Body»:

Πίνακας 4.3 ESP-Now vendor specific fields [16]

Organization ID	Type	Version	Body
3 bytes	1 byte	1 byte	0 - 250 bytes

- Organization Identifier: Η Espressif όρισε ότι το πεδίο Organization ID θα υπάρχει δύο φορές σε κάθε δεδομένογραμμα.
- Type: Το πεδίο “Type” έχει τιμή 4 που υποδεικνύει δεδομένογραμμα πρωτοκόλλου ESP-Now.
- Version: Το πεδίο “Version” παίρνει την τιμή που αντιστοιχεί στην εκάστοτε έκδοση ESP-Now.
- Body: Το πεδίο που περιέχει το ωφέλιμο φορτίο. Στην περίπτωσή μας τις τιμές των long μεταβλητών ελέγχου.

4.3 Ροή ESP-Now επικοινωνίας

4.3.1 Ορισμός δομής μηνύματος

Μια προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται για την επιτυχή εξαγωγή των δεδομένων από το ληφθέν δεδομένογραμμα είναι η εξής: η δομή του κάθε μηνύματος πρέπει να είναι ακριβώς η ίδια. Παρόλο που φαίνεται προφανές, πρέπει κάθε όνομα, κάθε τύπος μεταβλητής, αλλά και κάθε μεταβλητή καθ' εαυτή να έχει οριστεί με τον ίδιο τρόπο τόσο στον αποστολέα όσο και στον παραλήπτη. Σε διαφορετική περίπτωση, ο παραλήπτης δεν θα είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει ορθά τα μηνύματα και είτε θα χαθεί πληροφορία, είτε θα παραληφθεί εσφαλμένα. Ο ορισμός δομής μηνυμάτων γίνεται ως εξής:

```

1 | typedef struct struct_message {
2 |     float ax;
3 |     float ay;
4 |     float az;
5 |     float gx;
6 |     float gy;
7 | }
```

```

8 | struct_message;
9 | struct_message Readings;

```

Με τις παραπάνω εντολές, ορίστηκε μια δομή μηνύματος που περιέχει τις μεταβλητές `ax`, `ay`, `az`, `gz`, `zy` και είναι όλες τύπου `float`. Η δομή αυτή έπειτα ονομάζεται `Readings`. Ο παραλήπτης είναι σε θέση τώρα να εξάγει σωστά πληροφορία από κάθε μήνυμα. Η δήλωση δομής μηνύματος γίνεται έξω από τις συναρτήσεις `setup()` και `loop()`, μαζί με τον ορισμό των `global` μεταβλητών.

4.3.2 Αρχικοποίηση ESP-Now

Πριν την εγκαθίδρυση ζεύξης μεταξύ των επικοινωνούντων μονάδων απαιτείται αρχικοποίηση του πρωτοκόλλου ESP-Now. Αυτό γίνεται καλώντας την συνάρτηση `esp_now_init()`. Καθώς η αναμετάδοση πληροφορίας μέσω ESP-Now προαπαιτεί την ενεργοποίηση της κεραίας WiFi του εκάστοτε ESP, πρέπει να αρχικοποιηθεί η αντίστοιχη λειτουργία προηγουμένως. Αντίστοιχα, το WiFi πρέπει να απενεργοποιηθεί μόνον αφού έχει ολοκληρωθεί η επικοινωνία και έχει κληθεί η `esp_now_deinit()`. Όταν καλείται αυτή η συνάρτηση ανάρτησης αρχικοποίησης, όλη η πληροφορία που αφορά την ζεύξη των επικοινωνούντων μονάδων διαγράφεται.

4.3.3 Προσθήκη Peer

Αφού γίνει η αρχικοποίηση και πριν συμβεί οποιαδήποτε ανταλλαγή πληροφορίας, πρέπει να γίνει η προσθήκη `peer`. Στο στάδιο αυτό, «βλέπει» η μια μονάδα την άλλη για πρώτη φορά και κάνουν μια αναγνωριστική χειραψία (γίνεται μια και μοναδική φορά). Υπεύθυνη συνάρτηση για αυτό είναι η `esp_now_add_peer()`. Απαιτείται να είναι γνωστή η MAC διεύθυνση του `peer` με τον οποίον θα υπάρξει επικοινωνία. Προκειμένου να μαθευτεί η διεύθυνση αυτή, γίνεται χρήση της συνάρτησης `WiFi.macAddress()` της βιβλιοθήκης `ESP8266WiFi.h` που περιλαμβάνεται στο `core` πρόγραμμα για το ESP8266, ωστόσο μπορεί να αξιοποιηθεί και για άλλους μικροελεγκτές της Espressif. Το παρακάτω πρόγραμμα που γράφτηκε για τον σκοπό αυτόν τυπώνει σε `serial monitor` τη διεύθυνση MAC του εκάστοτε ESP:

```

1 | #include <ESP8266WiFi.h>
2 | void setup(){
3 |     Serial.begin(9600);
4 |     Serial.println("ESP MAC address: ");
5 |     Serial.println(WiFi.macAddress());
6 | }
7 | void loop(){}

```

Η διεύθυνση αυτή λαμβάνεται ως είσοδος στο πρόγραμμα αποστολέα και παραλήπτη με την εντολή: `uint8_t broadcastAddress[] = {0x4B, 0x70, 0xBF, 0xA1, 0xB1, 0xB9};` (Οι δεκαεξαδικοί αριθμοί είναι ενδεικτικοί μιας MAC διεύθυνσης).

Η εισαγωγή της MAC address είναι υποχρεωτική (στην περίπτωση μας) και στις δύο μονάδες. Σε αυτό το στάδιο, εφόσον έχει επιλεγεί ότι θα υπάρξει κρυπτογράφηση στην επικοινωνία των μονάδων, ανταλλάσσονται τα αντίστοιχα κλειδιά PMK των 16 bytes για την αποκρυπτογράφηση των ληφθέντων δεδομένων.

4.3.4 Αποστολή / λήψη δεδομένων

Έπειτα από τον ορισμό δομής μηνύματος, την αρχικοποίηση και την προσθήκη των peers, οι μονάδες είναι έτοιμες να ανταλλάξουν δεδομένα. Οι προς αποστολή μεταβλητές ενθυλακώνονται σε πακέτα επιπέδου μεταφοράς έχοντας ως διεύθυνση αποστολέα και παραλήπτη τις MAC διευθύνσεις των αντίστοιχων μονάδων. Η αποστολή των δεδομένων γίνεται, καλώντας την συνάρτηση `esp_now_send()`. Εκτός της συνάρτησης αυτής, χρησιμοποιείται η `sp_now_register_send_cb` η οποία παρέχει ανάδραση σχετικά με την κατάσταση αποστολής. Συγκεκριμένα, επιστέφει `ESP_NOW_SEND_SUCCESS` ή `ESP_NOW_SEND_FAIL` σε περίπτωση επιτυχίας ή αποτυχίας αντίστοιχα. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον είναι επιθυμητή η υλοποίηση αξιοπιστίας σε επίπεδο εφαρμογής. Σε κάθε περίπτωση, ακόμη και αν δεν υλοποιείται κανενός τύπου αξιοπιστία, χρησιμοποιείται η ανάδραση αυτή με τον εξής τρόπο: κάθε πακέτο αποστέλλεται εφόσον έχει ληφθεί η ανάδραση της συνάρτησης `sp_now_register_send_cb` για το προηγούμενο εξερχόμενο πακέτο. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί συμφόρηση στον παραλήπτη. Προσοχή ωστόσο: η επιβεβαίωση που παρέχεται από την συνάρτηση αυτή αποτελεί επιβεβαίωση επιτυχούς αποστολής και όχι παράδοσης. Ο αποστολέας δεν έχει τρόπο να γνωρίζει αν ένα πακέτο έχει παραδοθεί στον προορισμό του. Όπως αναφέρθηκε, το πρωτόκολλο ESP-Now υποστηρίζει P2P επικοινωνία και συνεπώς δεν υφίσταται η έννοια της σχέσης master-slave. Καταχρηστικά ωστόσο, θα αναφερόμαστε στην μονάδα του αποστολέα ως master και αυτήν του παραλήπτη ως slave αντίστοιχα.

4.4 Ασφάλεια

Το ESP-Now δεν είναι εστιασμένο στην ασφάλεια αλλά στην ταχύτητα. Παρόλα αυτά, παρέχονται κάποιες υπηρεσίες ασφαλείας μέσω κρυπτογράφησης των μεταδιδόμενων πακέτων εφόσον αυτό είναι επιθυμητό και γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις από τον προγραμματιστή των μονάδων. Σύμφωνα με την παράγραφο «Security» στο API Reference του ESP-Now της Espressif [16], γίνεται χρήση της μεθόδου του CCMP (Counter-mode CBC-MAC Protocol) [18, 19]. Οι μονάδες έχουν ένα πρωτεύον κύριο κλειδί (PMK) το οποίο χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφιση τοπικών κύριων κλειδιών (LMK) βάσει προτύπου AES-128 (Advanced Encryption Standard). Η δυνατότητα αυτή ενεργοποιείται καλώντας την συνάρτηση `esp_now_set_pmk()`.

Διαλέγονται τρία κρυπτογραφήματα του κλάδου Rijndael μεγέθους block 128 bits έκαστο. Το AES-128 υλοποιείται μέσω τεσσάρων βασικών βημάτων [20]:

1. Key expansion: Απόκτηση κλειδιών Rijndael
2. Round key addition: Κάθε byte πληροφορίας υπόκειται σε λογική πράξη XOR με το κλειδί που προέκυψε.
3. Loop
 - α. Substitute bytes: Κάθε προκύπτον byte αντικαθίσταται από ένα άλλο σύμφωνα με προσυμφωνημένο πίνακα δύο διαστάσεων.
 - β. Shift rows: Οι τρεις τελευταίες σειρές του πίνακα μετατοπίζονται κυκλικά.
 - γ. Mix columns: Γραμμική ανάμιξη τεσσάρων byte κάθε στήλης.
 - δ. Round key addition: Κάθε byte πληροφορίας υπόκειται σε λογική πράξη XOR με το κλειδί που προέκυψε, όπως στο βήμα 2.

4. Loop

- α. Substitute bytes: Κάθε προκύπτον byte αντικαθίσταται από ένα άλλο σύμφωνα με προσυμφωνημένο πίνακα δύο διαστάσεων.
- β. Shift rows: Οι τρεις τελευταίες σειρές του πίνακα μετατοπίζονται κυκλικά.
- γ. Round key addition: Κάθε byte πληροφορίας υπόκειται σε λογική πράξη XOR με το κλειδί που προέκυψε, όπως στο βήμα 2.

Όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 4.3.3, τα προσυμφωνημένα κλειδιά ανταλλάσσονται μεταξύ των ESP στο στάδιο προσθήκης peer. Το κλειδί τίθεται ως εξής:

```
esp_err_t esp_now_set_pmk(const uint8_t *pmk);
```

Αν δε θέσει ο προγραμματιστής ένα δικό του PMK, το πεδίο συμπληρώνεται με μια προεπιλεγμένη τιμή. Μια εξαιρετική υλική προσθήκη σε ένα σύστημα κρυπτογραφημένο με PMK είναι η εξωτερική συσκευή αποκρυπτογράφησης υλοποιημένη με ψηφιακές λογικές πύλες ή ακόμη και FPGA εφόσον η πολυπλοκότητα του κλειδιού (άρα και η ασφάλεια) αντισταθμίζει το κόστος.

Για την εφαρμογή της παρούσας εργασίας δεν κρίθηκε απαραίτητη η κρυπτογράφηση των δεδομένων. Ακόμη, σε εφαρμογές σμηνών με μεγάλο όγκο peers, η χρήση κρυπτογράφησης περιορίζει σημαντικά τον αριθμό peers. Εάν η εκάστοτε εφαρμογή δεν είναι απολύτως απαραίτητο να κρυπτογραφηθεί, συνιστάται το κλειδί να αφεθεί στην προεπιλεγμένη του τιμή.

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα και προτάσεις βελτίωσης / επέκτασης

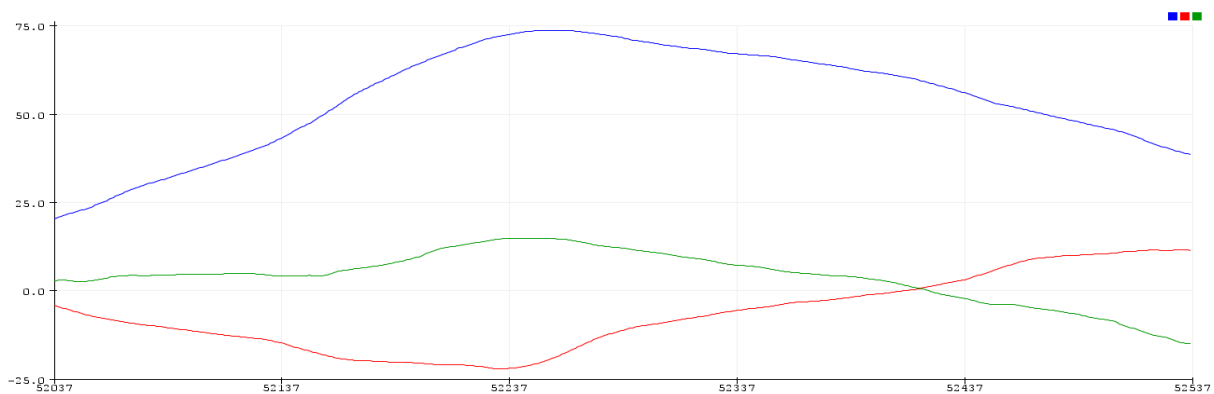
5.1 Επίτευξη επικοινωνίας

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται όσα λαμβάνουν χώρα μετά την επιτυχή ζεύξη μεταξύ των ESP μονάδων. Αναλύονται διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας με χρήση ζεύξεων διαφορετικών αρχιτεκτονικών. Επίσης, εκτιμάται η ποιότητα τις επικοινωνίας, η κατανάλωση ισχύος και εξετάζονται πιθανές βελτιώσεις.

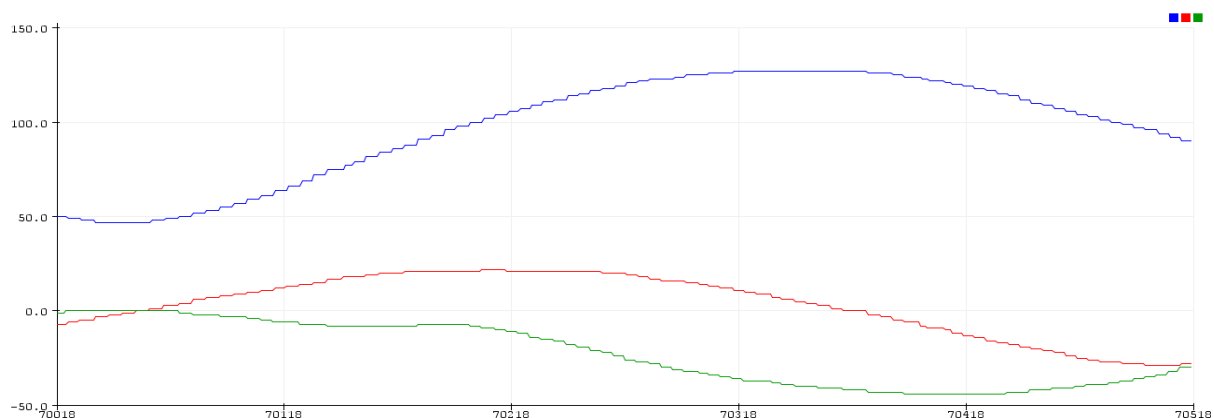
5.1.1 Σενάριο 2 peers

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα αποτελέσματα της επικοινωνίας των ESP όσον αφορά την αξιοπιστία και την ακεραιότητα. Αρχικά εξετάζονται τα σήματα του γυροσκοπίου συγκρίνοντας κυματομορφές στην πλευρά του αποστολέα με κυματομορφές στην πλευρά του παραλήπτη (όχι απαραίτητα σε χρονικό συσχετισμό μεταξύ τους). Το baud rate σε όλες τις περιπτώσεις είναι 115200 symbols/sec.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 και Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται μετρήσιμη παραμόρφωση στα σήματα. Η αιτία της παραμόρφωσης δεν είναι παρεμβολές, αλλά το πεπερασμένο baud rate.

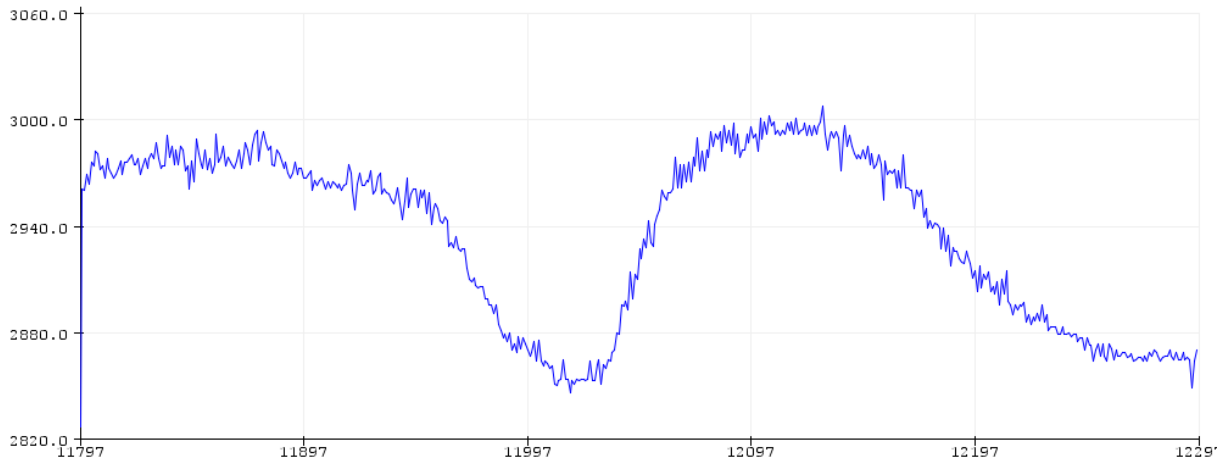


Σχήμα 5.1 Βαθμονομημένα roll, pitch, yaw (μπλε, κόκκινο πράσινο αντίστοιχα) στην πλευρά του αποστολέα

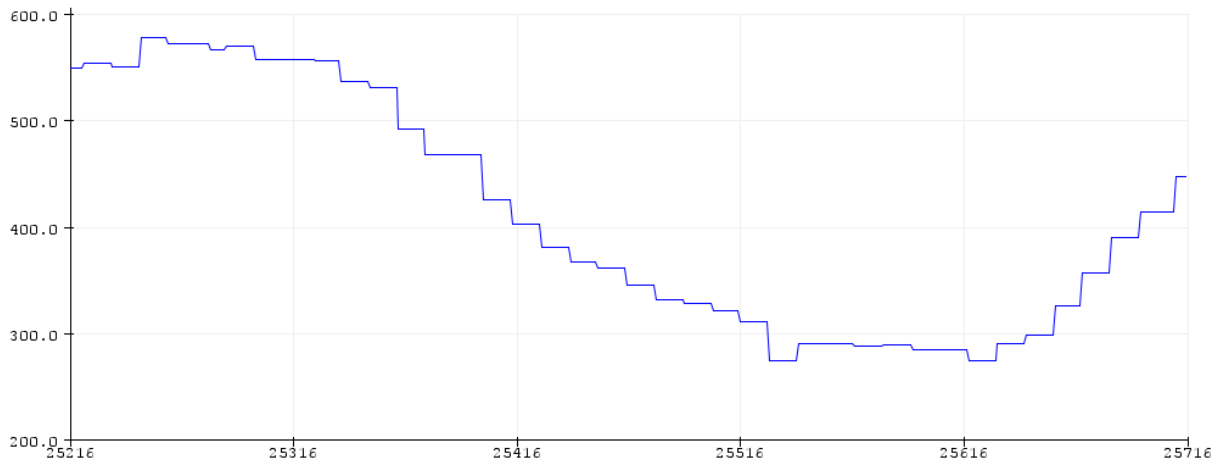


Σχήμα 5.2 Βαθμονομημένα roll, pitch, yaw (μπλε, κόκκινο πράσινο αντίστοιχα) στην πλευρά του παραλήπτη

Κεφάλαιο 5



Σχήμα 5.3 Δεδομένα αισθητήρα κάμψης στην πλευρά του αποστολέα



Σχήμα 5.4 Βαθμονομημένα δεδομένα αισθητήρα κάμψης στην πλευρά του παραλήπτη

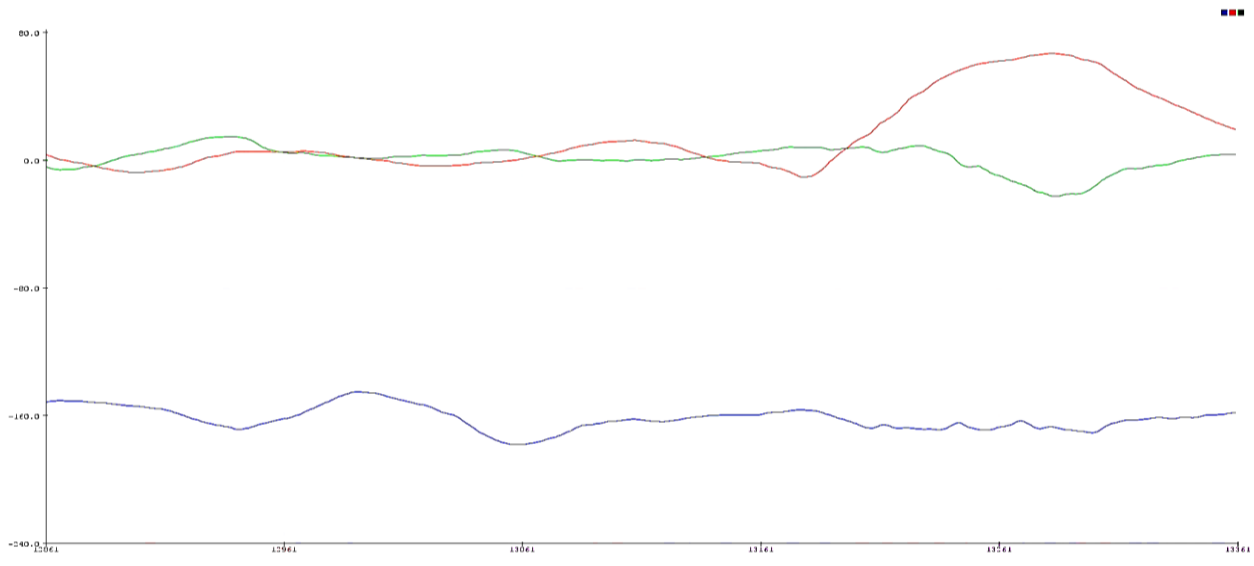
Όσον αφορά τα ληφθέντα δεδομένα του αισθητήρα κάμψης παρατηρούνται μεγαλύτερα ποσά θορύβου. Εν μέρει οφείλεται και στον εγγενή θόρυβο που παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.3 του αποστολέα. Να σημειωθεί ότι λόγω εστίασης στην προκείμενη κυματομορφή (κυρίως στην πλευρά του παραλήπτη), οι παρασιτικές διακυμάνσεις των πραγματικών μεταδιδόμενων τιμών φαίνονται μεγεθυμένες. Τα βαθμονομημένα δεδομένα επίσης, παρουσιάζουν θεωρητικά μεγαλύτερα βήματα κβαντισμού, καθώς οι δυνατές τιμές διακύμανσης έχουν περιοριστεί σημαντικά (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, η μέγιστη απόλυτη τιμή κάμψης δεν φτάνει το 600).

Σημείωση: ως “απόλυτη τιμή κάμψης” ορίζεται το σήμα που προκύπτει από την βαθμονόμηση, πριν την εφαρμογή λογισμικού ή/και υλικού φιλτραρίσματος. Εν προκειμένω, στο Σχήμα 5.4, η τιμή 600 θα αντιπροσώπευε Duty Cycle 58.59% (ίσο με $600/1024$, αφού χρησιμοποιούνται 2^{10} στάθμες κβαντισμού). Καθώς η λογική που χρησιμοποιείται είναι 3.3V, το Duty Cycle αυτό θα αντιστοιχούσε σε τάση ίση με $3.3V * 0.5859 = 1.933V$.

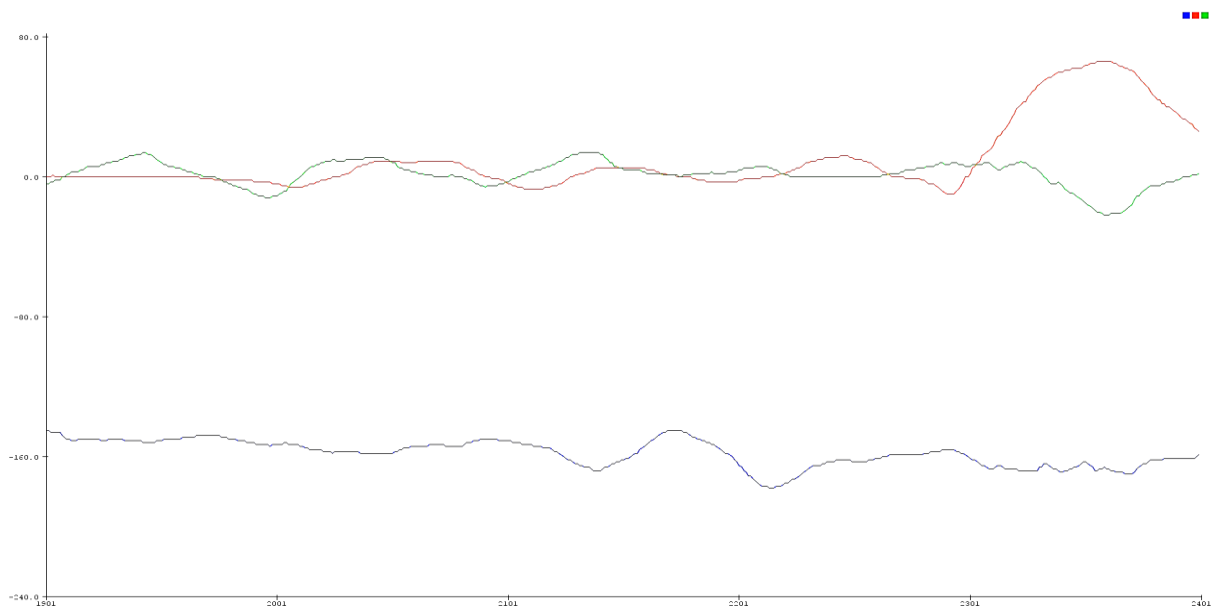
Ο εγγενής θόρυβος που παρουσιάζεται τόσο στον αποστολέα όσο και στον παραλήπτη οφείλεται και στην κεραία των ESP που χρησιμοποιείται για την ζεύξη των δύο συσκευών. Η διαδικασία αποστολής και λήψης αντίστοιχα, προκαλεί ηλεκτρικό θόρυβο αλλά και διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας

του MPU6050. Υπάρχουν τρόποι να αποφευχθεί η προσθήκη του θορύβου στην συσκευή όπου γίνεται η λήψη δεδομένων από το MPU6050. Στον αποστολέα (master):

1. Προστίθενται φίλτρα εξομάλυνσης στην γραμμή τροφοδοσίας του MPU6050 – εναλλακτικά, πλήρης απομόνωση τάσης τροφοδοσίας των δύο συσκευών με χρήση buffer ή ακόμη και δημιουργία ξεχωριστής τάσης αναφοράς.
2. Εγκατάσταση πυρήνα φερρίτη γύρω από την καλωδίωση τροφοδοσίας και μεταφοράς δεδομένων του MPU6050, για τη μείωση EMI (Electromagnetic Interference).



Σχήμα 5.5 Βαθμονομημένα δεδομένα επιταχυνσιομέτρου όπως προκύπτουν από τον master



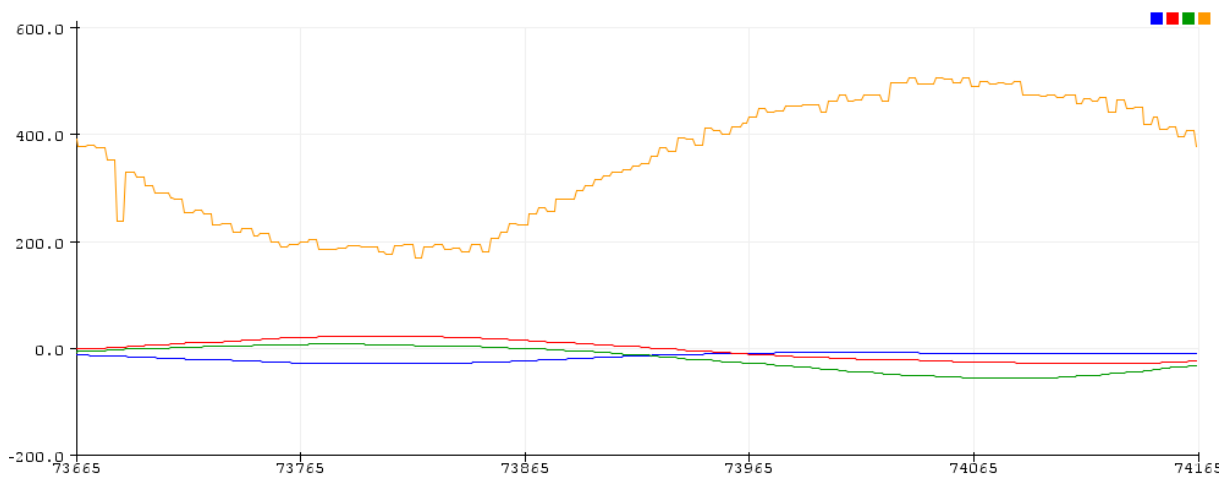
Σχήμα 5.6 Βαθμονομημένα δεδομένα επιταχυνσιομέτρου όπως λαμβάνονται από τον slave

Το Σχήμα 5.5 και Σχήμα 5.6 είναι σε χρονικό συσχετισμό (ωστόσο καθώς τα στιγμιότυπα λήφθηκαν σε οθόνες διαφορετικών διαστάσεων, παρουσιάζεται κάποια διαπλάτυνση στο Σχήμα 5.5 στον άξονα των x). Η ακρίβεια των ληφθέντων δεδομένων είναι εξαιρετική, ειδικά λαμβάνοντας υπόψιν το

περιορισμένο baud rate της επικοινωνίας. Αυξάνοντας περαιτέρω το baud rate, επιτυγχάνεται ακόμη πιο ομαλή μετάβαση από την μια ληφθείσα τιμή στην επόμενη.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνονται όλες οι κυματομορφές των ληφθέντων δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή όπου τα γραφήματα του serial monitor δεν είναι εστιασμένα σε μια συγκεκριμένη κυματομορφή ο θόρυβος γίνεται λιγότερο αισθητός. Προκειμένου να εξαληφθεί εντελώς ο θόρυβος και οι συνέπειές του λαμβάνονται επιπλέον μέτρα. Στον παραλήπτη (slave) γίνεται χρήση:

1. Υλικών παθητικών RC φίλτρων στις εξόδους PWM του παραλήπτη.
2. Λογισμικού φίλτρου υλοποιημένου στον παραλήπτη όπως αναλύεται στην Παράγραφο 3.2.



Σχήμα 5.7 Βαθμονομημένα δεδομένα γυροσκοπίου και αισθητήρα κάμψης στην πλευρά του παραλήπτη (Μπλε-Roll, Κόκκινο-Pitch, Πράσινο-Yaw, Κίτρινο-Flex sensor)

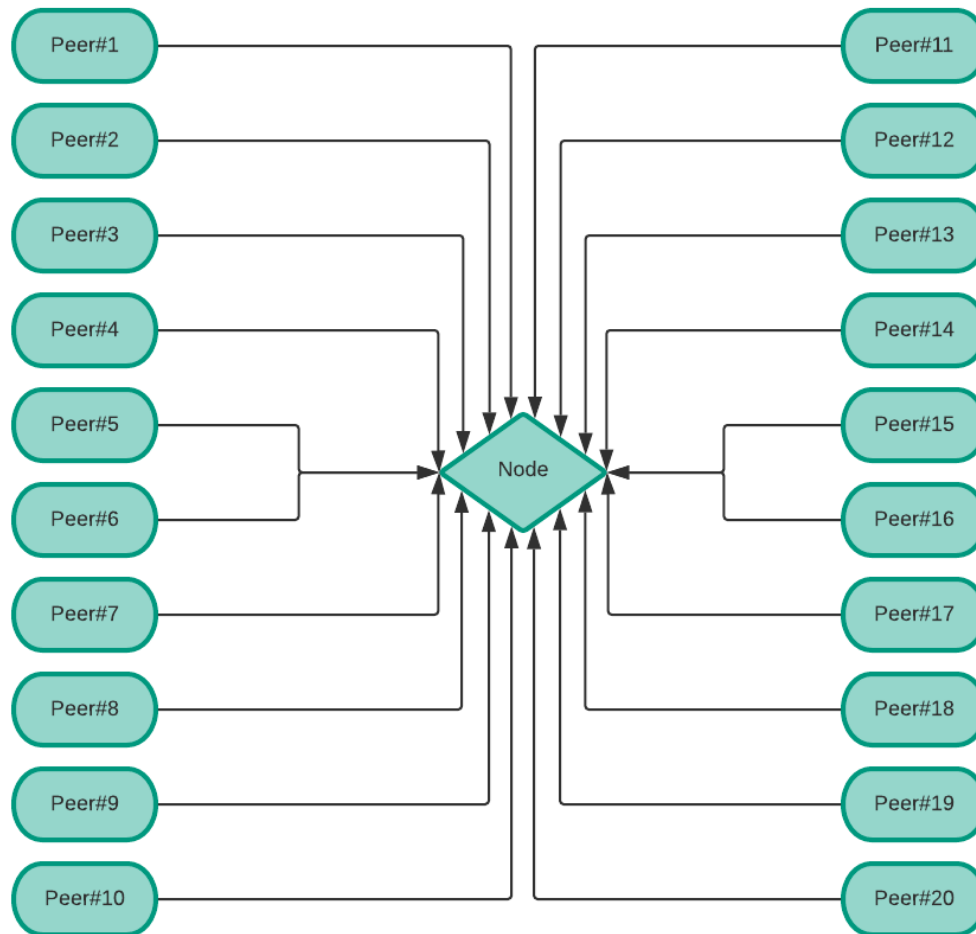
5.1.2 Σενάριο πολλαπλών peers

Η ευέλικτη δομή του ESP-Now μας επιτρέπει να διασυνδέσουμε μεγάλο αριθμό peers (έως και 20) στην ίδια δικτυακή συσκευή. Έχοντας αυτό το εργαλείο, καθίσταται δυνατή η δόμηση ενός δικτύου peers που είτε θα επικοινωνούν απ' ευθείας μεταξύ τους (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση σμήνους UAV), είτε θα επικοινωνούν μέσω node που θα λειτουργούν ως δρομολογητές μεταξύ διαφορετικών ομάδων peers - σμηνών. Ο κόμβος πρέπει να είναι registered peer κάθε «κυττάρου» του εκάστοτε σμήνους.

5.1.2.1 Χρήση κεντρικού ελεγκτικού node

Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε κυτταρική συσκευή του σμήνους δεν χρειάζεται να επικοινωνεί με όλες τις υπόλοιπες, αλλά μόνο με το κεντρικό node. Ο περιορισμένος αριθμός διασυνδεδεμένων peers σημαίνει ότι η μονάδα που τελεί χρέη node μπορεί να επικοινωνεί παράλληλα με 20 μονάδες maximum. Κατά συνέπεια, κάθε μεμονωμένο κυτταρικό στοιχείο πιστεύει ότι βρίσκεται σε αποκλειστική επικοινωνία με την ελεγκτική συσκευή (node), η οποία καλείται να ελέγξει τα 20 «υποτελή» του μέλη. Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα παράδειγμα τέτοια επικοινωνίας. Τυπικά η σχέση μεταξύ node και peer είναι σαν τις τυπικές σχέσεις master-slave που βλέπουμε σε άλλα πρωτόκολλα, αλλά με την εξής σημαντική διαφορά: κάθε «υποτελής» συσκευή μπορεί ανά πάσα στιγμή να στείλει μήνυμα ή αίτημα διακοπής ρουτίνας. Σε κάθε περίπτωση (είτε με χρήση κεντρικού

ελεγκτικού node είτε χωρίς) η επικοινωνία μεταξύ δύο άμεσα συνδεδεμένων συσκευών είναι πλήρως αμφίδρομη.



Σχήμα 5.8 Multi-peer δίκτυο με χρήση κεντρικού ελεγκτή

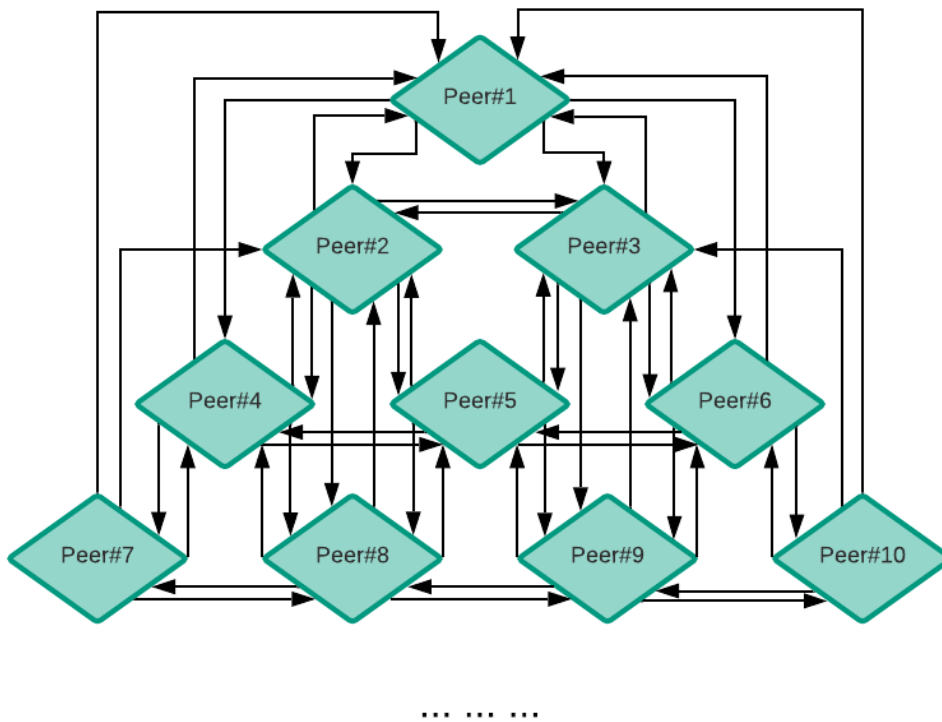
Στο Σχήμα 5.8 Multi-peer δίκτυο με χρήση κεντρικού ελεγκτή φαίνεται η δομή του συστήματος όταν γίνεται χρήση node. Όπως γίνεται κατανοητό, η κεντρική συσκευή «βλέπει» όλες τις υπόλοιπες συσκευές ως peers, ενώ οι ίδιες όχι. Ωστόσο είναι δυνατόν π.χ. ο Peer#1 να επικοινωνήσει με τον Peer#20 εφόσον το Node δρομολογήσει το μήνυμα στην MAC address του παραλήπτη. Προκειμένου όλοι οι peers να μπορούν να επικοινωνήσουν με όλους, πρέπει είτε να έχουν οι ίδιοι αποθηκευμένες σε πίνακα όλες τις MAC addresses των συσκευών συνδεδεμένων στο Node, είτε το ίδιο το Node να σχηματίσει πίνακα αντιστοιχιών του δικτύου του. Στην πράξη, το Node καταλήγει να λειτουργεί ως δρομολογητής, ως lookup table και ως ελεγκτική αρχή ταυτόχρονα. Σε περίπτωση υπολειτουργίας ή βλάβης, ολόκληρο το δίκτυο – σμήνος, παύει να λειτουργεί. Τα κύτταρα δεν έχουν διαφορετικό τρόπο επικοινωνίας μεταξύ τους. Η αρχιτεκτονική που περιγράφεται παραπάνω είναι αποδοτική σε εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό peers. Καθώς το ESP-Now δρομολογεί δεδομένα μέσω διεύθυνσης MAC, δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί η χρήση πίνακα αντιστοιχιών· η μόνη επιλογή ως προς αυτό, είναι εάν ο πίνακας θα βρίσκεται στο node ή σε κάθε μεμονωμένο peer. Σε αυτή τη περίπτωση, υπεύθυνο τόσο για την λήψη εξωτερικών εντολών όσο και για την ανάθεση εντολών

στους Peers είναι το Node. Στην δεύτερη περίπτωση, το σύστημα με τον κατάλληλο προγραμματισμό, μπορεί να ανακάμψει από απώλεια node, αφού δεν απαιτείται να λειτουργεί (και) ως δρομολογητής, αλλά μόνο ως ελεγκτικός μηχανισμός.

5.1.2.2 Αποκέντρωση δικτύου

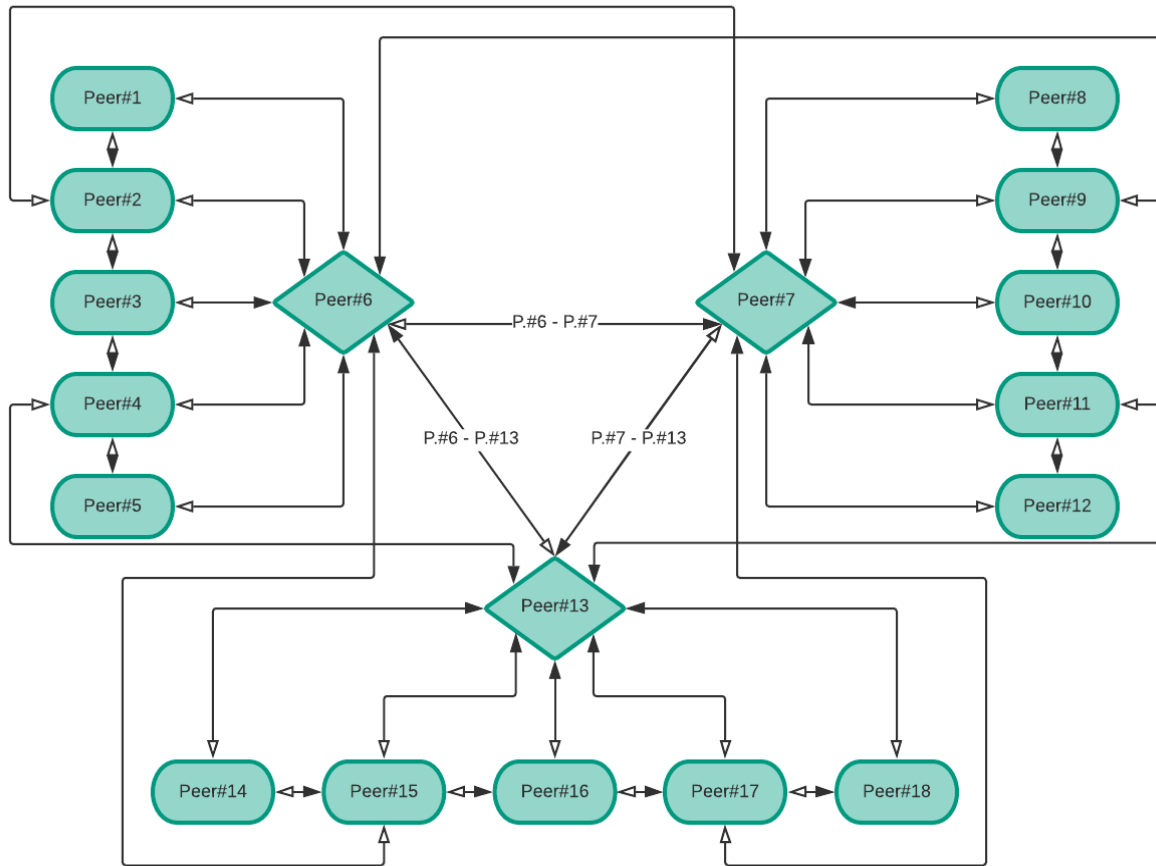
Η αρχιτεκτονική αυτή του multi-peer δικτύου αποτελεί ουσιαστικά η λογική βάση των εναέριων δικτύων τύπου FANET. Εδώ οι επικοινωνούσες συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν η μια με την άλλη άμεσα και χωρίς την χρήση «δρομολογητή». Ανάλογα τον αριθμό των διασυνδεδεμένων συσκευών, μπορεί να είναι πρακτικό κάθε «κύτταρο» να έχει αποθηκευμένη μια μικρή λίστα των κυττάρων με τα οποία συνορεύει. Ανάλογα την δομή του δικτύου, η λίστα μπορεί (αν όχι επιβάλλεται) να είναι redundant (πλεοναστική). Έτσι δεν χρειάζεται κάθε peer να κρατάει πίνακες με όλες τις διευθύνσεις των υπολοίπων στοιχείων, αλλά θα ρωτήσει τα συνορεύοντα στοιχεία. Σε περίπτωση απώλειας ενός στοιχείου, ανάλογα την αρχιτεκτονική του δικτύου, θα υπάρχει κάποιος αριθμός διαθέσιμων συσκευών που μπορούν να δρομολογήσουν το εκάστοτε μήνυμα.

Για παράδειγμα:



Σχήμα 5.9 Multi-peer δίκτυο χωρίς κεντρικό ελεγκτή

Εν προκειμένω, οι περισσότεροι peers «γνωρίζονται» μεταξύ τους. Ωστόσο εάν π.χ. ο Peer#9 θελήσει να ανταλλάξει μήνυμα με τον Peer#2, δεν έχει την δυνατότητα να το κάνει άμεσα. Μπορεί ωστόσο να λάβει την αντιστοίχιση της MAC address του Peer#2 από τους Peer#5, Peer#8, Peer#3, με τους οποίους βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία. Κάθε κυτταρική συσκευή έχει πρόσβαση στους πίνακες αντιστοιχίσεων Peer-ID – MAC addr. Εάν κάποιος από τους Peer#5/8/3 καταστραφεί, το σύστημα παραμένει λειτουργικό. Στην πραγματικότητα, το δίκτυο αυτό αποτελείται από μικρότερα υποδίκτυα που επικοινωνούν μεταξύ τους. Μια ακριβέστερη απεικόνιση είναι η παρακάτω:



Σχήμα 5.10 Multi-peer δίκτυο αποτελούμενο από 3 υποδίκτυα

Οι «δρομολογητές» δεν είναι παρά peers με περισσότερες διευθύνσεις MAC αποθηκευμένες στους πίνακές τους από ότι οι υπόλοιποι. Η μερική αποκέντρωση που παρατηρείται εδώ επιτρέπει στο δίκτυο να παρουσιάζει πλεονασμό στις διασυνδέσεις του, ενώ παράλληλα δεν είναι απαραίτητο κάθε κύτταρο να «γνωρίζει» όλα τα υπόλοιπα, αλλά μονάχα τα κομβικά. Να σημειωθεί ότι κάθε ένα από τα στοιχεία υπόκειται σε περιορισμό του αριθμού του peers έως και 20. Αυτό σημαίνει ότι με την τριγωνική αρχιτεκτονική στο Σχήμα 5.10 ο μέγιστος αριθμός μη κομβικών peers είναι $16 \cdot 3 = 48$, ενώ συνολικά υποστηρίζονται 51. Ο υπολογισμός ισχύει θεωρώντας πλεοναστικές συνδέσεις μεταξύ peer και nodes όπως αυτές μεταξύ Peer#2 και Peer#7.

Οι 3 κεντρικοί peers δεν είναι απαραίτητοι για την λειτουργία του δικτύου, ωστόσο διευκολύνουν την ροή των δεδομένων. Για παράδειγμα: έστω ότι το δίκτυο Peer#6 – Peer#7 τίθεται εκτός λειτουργίας. Ο Peer#6 θα διαβάσει στην κεφαλίδα του μηνύματος το ID του peer στον οποίο απευθύνεται, θα ανατρέξει στον πίνακά του και θα ανακαλύψει την διεύθυνση MAC του peer ενδιαφέροντος. Κατόπιν θα δρομολογήσει το εκάστοτε πακέτο στον Peer#9 από όπου θα διαμοιραστούν στους υπόλοιπους peers. Με άλλα λόγια, οποιοδήποτε κυτταρικό στοιχείο του μεγάλου δικτύου μπορεί να γίνει επιτόπου δρομολογητής.

Αυτό είναι άλλωστε που καθιστά το ESP-Now ιδανικό για μια τέτοια εφαρμογή: η επίπεδη ιεραρχία που παρουσιάζει μπορεί να επιτρέψει σε οποιοδήποτε τμήμα του δικτύου να γίνει κόμβος. Ακόμη, καθώς κάθε συσκευή είναι εξίσου ικανή από άποψη hardware, δεν τίθεται ζήτημα υποβιβασμού της απόδοσης του δρομολογητή.

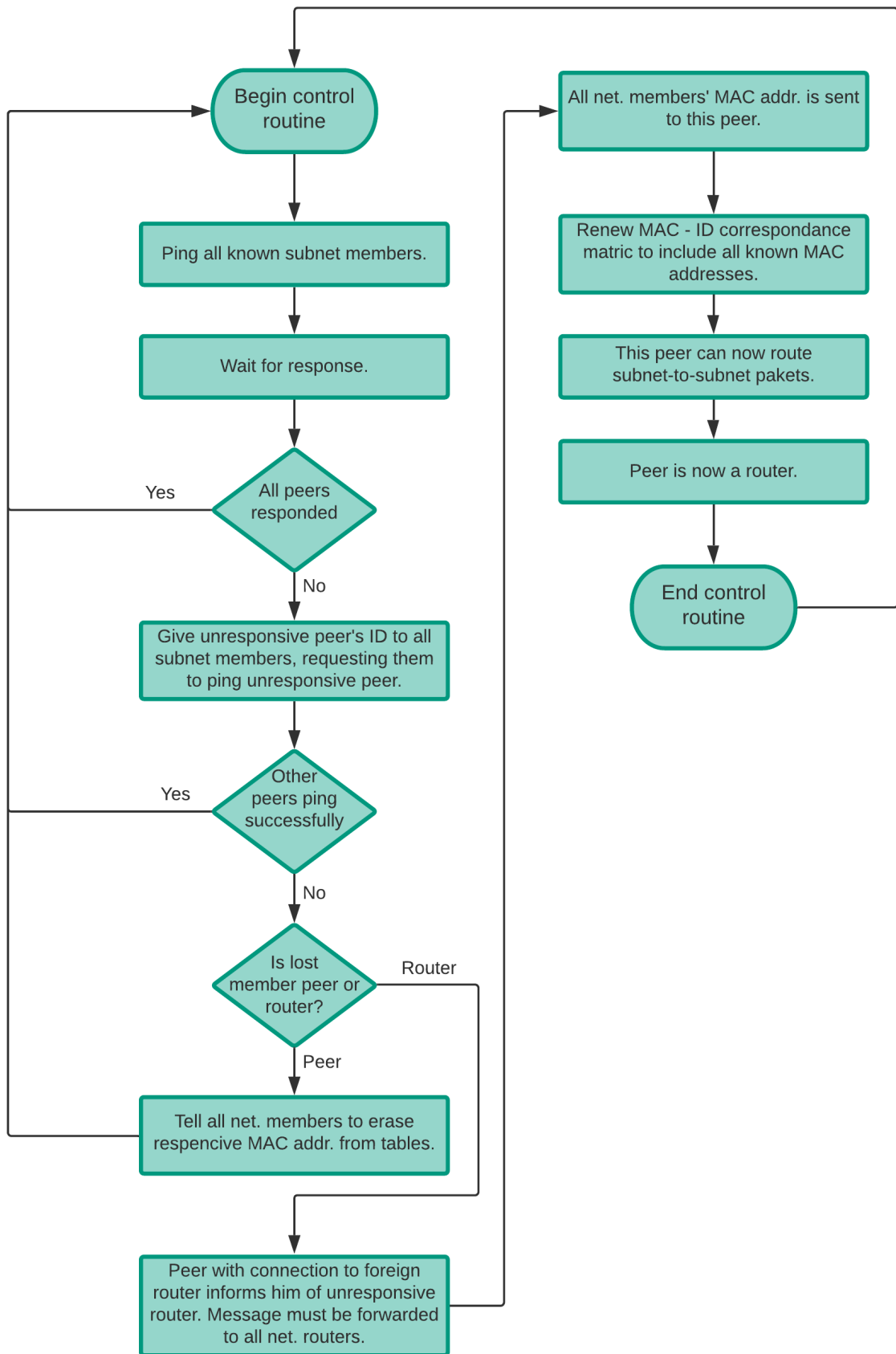
Εάν ένα δίκτυο σαν αυτό του παραπάνω σχήματος λειτουργήσει με ESP-Now, οι έννοιες «κόμβος» και «δρομολογητής» γίνονται δυναμικές (αν όχι «ρευστές») ιδιότητες που ορίζονται από τις ανάγκες του δικτύου και όχι από εγγενείς αρχιτεκτονικούς περιορισμούς. Το ίδιο το δίκτυο μπορεί να αλλάξει την δομή του ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Ως εκ τούτου, προκύπτει πως για κάθε peer πρέπει να γραφτεί ένα υποπρόγραμμα ελέγχου το οποίο θα ελέγχει την κατάσταση της ζεύξης με όλους τους επικοινωνούντες peers στο εκάστοτε υποδίκτυο, συμπεριλαμβανομένου και του τοπικού δρομολογητή.

Τα παρακάτω αποτελούν πρόταση δημιουργίας ρουτίνας για το πρωτόκολλο ESP-Now. Τα παρακάτω θα μπορούσαν να υλοποιηθούν σε μεταγενέστερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου, ή εναλλακτικά να γίνουν η βάση ενός νέου ασυνδεσμικού πρωτοκόλλου όμοιου δομικά με το UDP. Η παρακάτω πρόταση είναι στοχευμένη στην κάλυψη αναγκών των σμηνών UAV, ωστόσο βρίσκει εξαιρετική εφαρμογή και σε δορυφορικά δίκτυα (τύπου CubeSat constellation), αποκεντρωμένα βιομηχανικά συστήματα, και γενικώς διατάξεις υψηλής αξιοπιστίας που επιδέχονται κάποιον βαθμό αποκέντρωσης.

Προτείνεται:

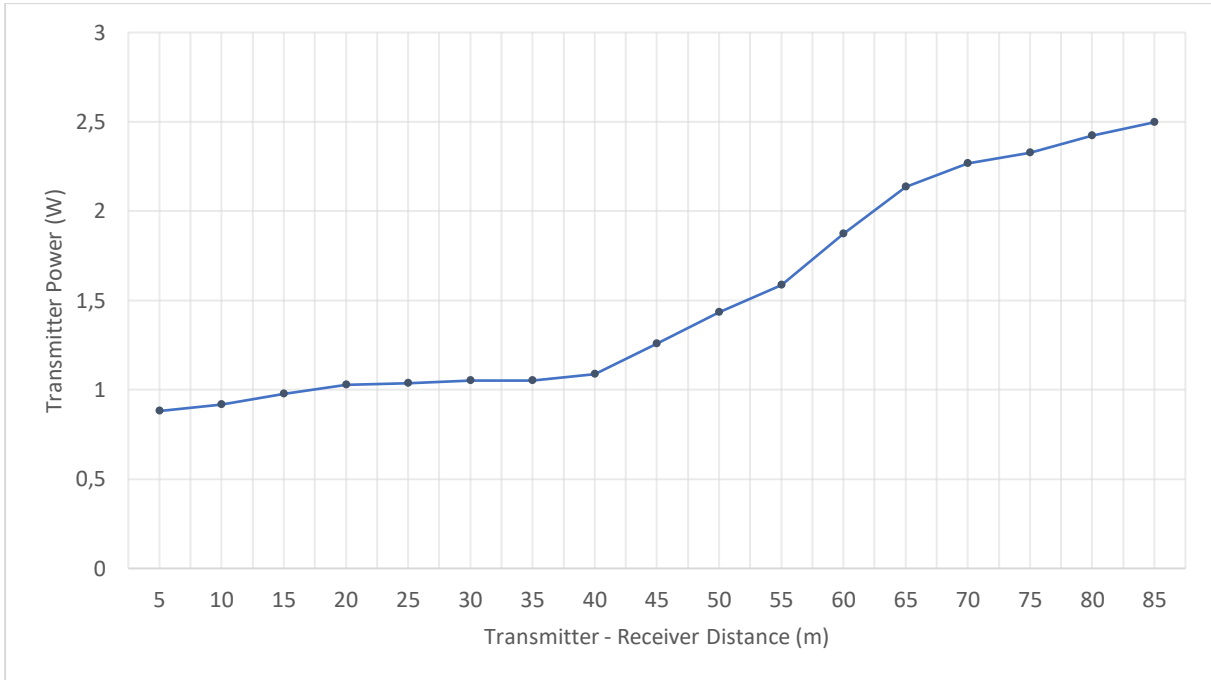
1. Αποστολή ελεγκτικών πακέτων ανά λίγα δευτερόλεπτα με διαφορά φάσης ανάλογη του αριθμού των peers ανά υποδίκτυο, ώστε να επιτυγχάνεται ικανή συχνότητα ελέγχου ενώ παράλληλα δεν προκαλείται συμφόρηση στο δίκτυο.
2. Εάν κάποιος peer ή ο δρομολογητής, αποτύχει να αποκριθεί στα πακέτα ελέγχου κατάστασης ζεύξης προερχόμενα από έναν peer, όλοι οι peers εκείνου του υποδικτύου καλούνται να δοκιμάσουν επίσης την αποστολή ελεγκτικών πακέτων στην ίδια μονάδα.
3. Εάν και πάλι δεν ληφθεί καμία απάντηση, η ελεγχόμενη κυτταρική μονάδα πρέπει να θεωρηθεί εκτός ελέγχου και το δίκτυο να επαναδιαμορφωθεί ανάλογα όπως περιγράφεται παρακάτω.
4. Εάν η μονάδα με την οποία χάθηκε η επικοινωνία είναι peer, γίνονται τα παρακάτω:
 - α. Ο αντίστοιχος δρομολογητής στέλνει πακέτο στους δρομολογητές των άλλων υποδικτύων γνωστοποιώντας την απώλεια μονάδας, όπως και την διεύθυνση MAC που είχε. Τώρα μπορεί να αφαιρεθεί από τους πίνακες αντιστοιχιών των υπολοίπων μονάδων. Η λειτουργία του δικτύου συνεχίζεται απρόσκοπτα.
 - β. Επανεκκίνηση της ρουτίνας.
5. Εάν η μονάδα με την οποία παρατηρήθηκε απώλεια επικοινωνίας εκτελούσε χρέη δρομολογητή, γίνονται τα παρακάτω:
 - α. Όσες μονάδες έχουν επικοινωνία με δρομολογητές διαφορετικών υποδικτύων, γνωστοποιούν την απώλεια δρομολογητή.
 - β. Οι μονάδες στις οποίες γνωστοποιείται το παραπάνω, στέλνουν την MAC address τους στον peer που διατηρεί επαφή με τους δρομολογητές των διαφορετικών υποδικτύων.
 - γ. Ο peer αυτός ανανεώνει τον πίνακα αντιστοιχιών του με τις διευθύνσεις MAC όλων των υπολοίπων συσκευών.
 - δ. Πλέον η μονάδα με τον ανανεωμένο πίνακα αντιστοιχιών μπορεί να αναλάβει χρέη δρομολογητή και να μεταφέρει δεδομένα μεταξύ των υποδικτύων που μετείχαν στην αρχική επικοινωνία.
 - ε. Η λειτουργία του δικτύου συνεχίζεται με την νέα δομή.
 - στ. Επανεκκίνηση της ρουτίνας.
6. Ολοκλήρωση ρουτίνας.



Σχήμα 5.11 Λογικό διάγραμμα ελεγκτικής ρουτίνας

5.2 Κατανάλωση ισχύος συστήματος

Η αυτονομία της διάταξης ελέγχου είναι προφανώς υψίστης σημασίας, καθώς σε περίπτωση απώλειας ζεύξης η ελεγχόμενη συσκευή τίθεται εκτός ελέγχου. Έγιναν πειραματικές μετρήσεις σε απόσταση 5 έως και 85 μέτρα (βλ. Σχήμα 5.12 και Πίνακας 5.1). Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε ημισιαστικό περιβάλλον, με αραιά εμπόδια και συνεχή διατήρηση LOS. Το περιβάλλον αυτό θεωρείται ρεαλιστικό για τα περισσότερα σενάρια χρήσης του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 5.12: ESP-Now power consumption over distance (sparse obstacles, LOS scenario)

Πίνακας 5.1 Πειραματικές μετρήσεις κατανάλωσης ισχύος σε διάφορες αποστάσεις

Distance (m)	Transmitter Power (W)	Transmitter Voltage (V)	Transmitter Current (mA)
5	0.881125	5.035	175
10	0.91637	5.035	182
15	0.97679	5.035	194
20	1.02714	5.035	204
25	1.03721	5.035	206
30	1.052315	5.035	209
35	1.072455	5.035	213
40	1.08756	5.035	216
45	1.25875	5.035	250
50	1.434975	5.035	285
55	1.586025	5.035	315
60	1.87302	5.035	372
65	2.13484	5.035	424
70	2.26575	5.035	450
75	2.32617	5.035	462
80	2.421835	5.035	481
85	2.49736	5.035	496

Όπως διαπιστώνεται, η απαιτούμενη ισχύς διπλασιάζεται κάθε περίπου 50 μέτρα. Σε ένα περιβάλλον με πυκνή βλάστηση ή κτήρια στον ενδιάμεσο χώρο η απαιτούμενη ισχύς σχεδόν διπλασιάζεται για την ίδια απόσταση μεταξύ αποστολέα – παραλήπτη. Γενικώς η συμπεριφορά της διάταξης μάλλον μπορεί να χαρακτηριστεί προβλέψιμη, με την αύξηση της κατανάλωσης να παρουσιάζει γραμμικότητα στο μεγαλύτερό της κομμάτι. Η όποια μη γραμμικότητα παρουσιάζεται (π.χ. απότομη αύξηση της κλίσης στην απόσταση 45 μέτρων) μπορεί να θεωρηθεί και ως επακόλουθο αστάθμητων παραγόντων, καθώς το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε μη αυστηρά ελεγχόμενο περιβάλλον.

Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου αυτονομίας που θα παρέχεται στην διάταξη. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας δύο μπαταρίες ιόντων λιθίου (τύπου 18650) σε παράλληλη σύνδεση, 2500mAh έκαστη (άρα 5 Ah σύνολο), ο χρόνος αυτονομίας προκύπτει ως εξής:

Ενεργειακή πυκνότητα συστοιχίας:

$$3.6V \cdot 5Ah = 18Wh \quad (5.1)$$

Θεωρώντας μέση απόσταση ίση με 40 μέτρα:

$$t = \frac{18Wh}{1.08756W} = 16.5508h \quad (5.2)$$

Στο σενάριο μέγιστης κατανάλωσης στο περιβάλλον όπου έγιναν οι μετρήσεις θα ισχύει:

$$t = \frac{18Wh}{2.49736W} = 7.2076h \quad (5.3)$$

Στην πράξη, η φορητή διάταξη του αποστολέα, θα τροφοδοτείται από την συστοιχία 2x18650, ενώ η διάταξη του δέκτη – node, θα τροφοδοτείται μέσω σταθερής παροχής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην γραμμή τροφοδοσίας θα προστεθεί ferrite core για αποφυγή πιθανού θορύβου που θα προκαλέσει διακυμάνσεις στις τιμές του MPU6050. Ήδη επιλέγοντας την τροφοδοσία από μπαταρίες, εξαλείφεται σχεδόν παντελώς το πρόβλημα του θορύβου τροφοδοσίας.

Όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος του drone αυτού καθ' εαυτού, το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ζητήσει σε απλή πτήση ανέρχεται σε 8A στα 12V (= 96W). Η μπαταρία που θα χρησιμοποιηθεί στο drone έχει χωρητικότητα που ανέρχεται στα 1300mAh σε τάση 14.8V. Η μπαταρία είναι δηλαδή σε θέση να παρέχει 19.24Wh.

Η ελάχιστη αυτονομία του drone σε ώρες θα είναι:

$$t = \frac{19.24Wh}{96W} = 0.20h = 12min \quad (5.4)$$

Καθώς στην πράξη η κατανάλωση δεν θα είναι διαρκώς 96W, ο χρόνος πτήσης πειραματικά προκύπτει ότι ανέρχεται περίπου στα 15 – 18 min, που είναι παραπάνω από ικανοποιητικά για τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν.

5.3 Εφαρμογή σε δίκτυο 5G

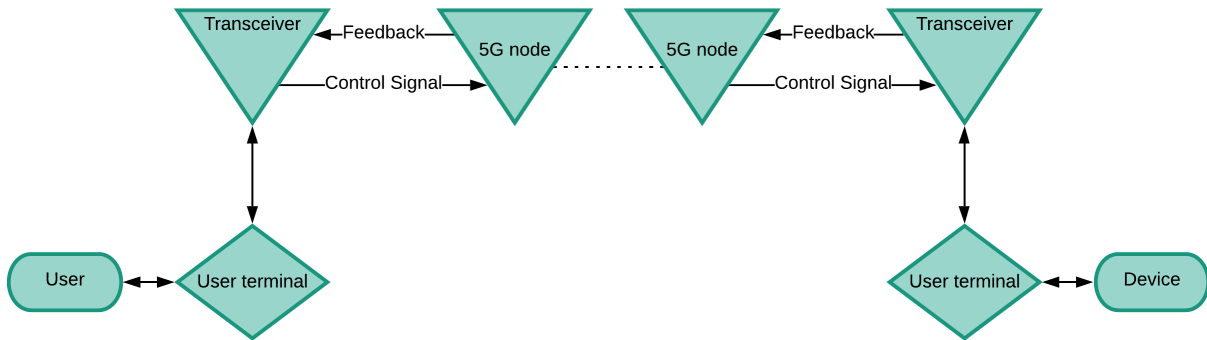
Όπως αναφέρθηκε στον πρόλογο, η παρούσα εργασία δομήθηκε με μακροπρόθεσμο σκοπό τον απομακρυσμένο έλεγχο συστημάτων μεγάλης ακρίβειας. Η επανάσταση στον χώρο της τεχνολογίας 5G είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα για ανάλογες εφαρμογές. Η πιθανότητα να καταστεί δυνατή η μεταφορά μεταβλητών μεγάλης ευαισθησίας σε θόρυβο σε πραγματικό χρόνο είναι παραπάνω από εκπληκτική. Η τεχνολογία αυτή, ισχυρίζεται ότι έρχεται με ιδανικό air latency της τάξης των λίγων ms (χωρίς να συνυπολογίζεται προσπέλαση σε εξυπηρετητές άκρων, ο αριθμός συνδεδεμένων πελατών σε κάθε επαναλήπτη κλπ).

Στην προκείμενη εφαρμογή δεν παρουσιάζεται μεγάλη εξάρτηση από την χωρητικότητα της γραμμής (τα πακέτα που μεταφέρονται είναι σχετικά μικρά), αλλά από την καθυστέρηση που παρουσιάζεται. Υπερβολικά μεγάλη καθυστέρηση καθιστά τον έλεγχο πρακτικά αδύνατο, ειδικά αν η παροχή ανάδρασης γίνεται επίσης μέσω της ίδιας ζεύξης. Όσον αφορά το 5G, εμφανίζονται στην πραγματικότητα τρεις τύποι καθυστέρησης που επηρεάζουν την ποιότητα του ασκούμενου ελέγχου:

1. «Καθυστέρηση αέρα: Η καθυστέρηση που παρουσιάζεται μεταξύ τερματικής συσκευής χρήστη και πύργου αναμεταδότη. Η καθυστέρηση αυτή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις εξής παραμέτρους: α) ισχύς σήματος β) αριθμός συνδεδεμένων τερματικών συσκευών χρηστών στον εκάστοτε αναμεταδότη γ) απόσταση μεταξύ τερματικής συσκευής και αναμεταδότη δ) ηλεκτρικός θορύβος. Σε ένα υπάρχον δίκτυο 4G, το “air latency” ανέρχεται σε τουλάχιστον 10ms. Η τεχνολογία 5G θα μειώσει την καθυστέρηση αυτή από 10ms σε 1-5ms.
2. Καθυστέρηση End-to-End: Η συνολική καθυστέρηση που παρουσιάζεται στην ζεύξη μεταξύ δικτυακής συσκευής και gateway. Περιλαμβάνονται στην καθυστέρηση αυτή και οι καθυστερήσεις των ενδιαμέσων δρομολογητών, μεταγωγέων (δηλαδή wide area network και radio access network), καθώς και όλων των επεξεργασιών που λαμβάνουν χώρα. Η καθυστέρηση end-to-end κυμαίνεται από 30ms έως και 100ms. Και πάλι, εξαρτάται από πολλαπλές παραμέτρους όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Μερικά παραδείγματα μεταβλητών που επηρεάζουν την καθυστέρηση αυτή είναι ο φόρτος δικτύου, ο αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών, η απόσταση των κόμβων.
3. Καθυστέρηση Διαδικτύου End-to-End: Η καθυστέρηση που παρουσιάζεται πρακτικά κατά την λήψη δεδομένων μέσω δικτύου 5G από τερματικό υπολογιστή που βρίσκεται εκτός 5G κάλυψης. Εφόσον γίνει η παραδοχή ότι η ζεύξη γίνεται εξ ολοκλήρου μέσω δικτύου 5G χωρίς διαμεσολάβηση ζεύξης διαφορετικού τύπου, η καθυστέρηση αυτή μπορεί να αγνοηθεί. Σε περίπτωση που η πρόσβαση σε τμήμα δικτύου εκτός 5G καθίσταται αναγκαία, η καθυστέρηση διαδικτύου end-to-end μπορεί να μειωθεί με την χρήση edge computing.» [21]

Η πραγματική καθυστέρηση που θα παρατηρείται σε δίκτυο 5G για half duplex επικοινωνία, θα κυμαίνεται στα 65ms (λαμβάνοντας υπόψιν τα αθροίσματα των μέσων όρων των καθυστερήσεων αέρα και end-to-end) ή ιδανικά 31ms. Χωρίς αμφιβολία οι καθυστερήσεις αυτές είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που παρουσιάζονται με το ESP-Now. Ωστόσο με χρήση προβλεπτικών αλγορίθμων και πρόσθετων συναρτήσεων σταθεροποίησης, είναι δυνατόν να μειωθεί το αντίκτυπο της αυξημένης καθυστέρησης σε μεγάλη απόσταση. Με άλλα λόγια, πρέπει να βελτιωθεί το πρόγραμμα του ελεγχόμενου συστήματος ώστε να είναι ανθεκτικό σε latency της τάξης των 130ms

(θεωρώντας full duplex επικοινωνία για feedback στον τερματικό χρήστη). Στην παρούσα εφαρμογή, το οπτικό feedback από την συσκευή είναι άμεσο και λαμβάνεται άμεσα από τον χρήστη, χωρίς να απαιτείται μετάδοση. Στην περίπτωση χρήσης 5G προφανώς δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα. Η παροχή ανάδρασης θα γίνεται μέσω του τηλεπικοινωνιακού καναλιού από το οποίο γίνεται ο τηλεχειρισμός.



Σχήμα 5.13: Λογικό διάγραμμα απομακρυσμένης επικοινωνίας

Στην πραγματικότητα, ελάχιστες είναι οι ουσιαστικές αλλαγές που πρέπει να γίνουν στα υπάρχοντα προγράμματα για να λειτουργήσει μέσω απομακρυσμένης σύνδεσης διαδικτύου. Οι μονάδες master και slave θα σταματούσαν να κάνουν χρήση του πρωτοκόλλου ESP-Now και θα γινόταν χρήση δομής MQTT broker/client αντίστοιχα. Η αλλαγή αυτή επιβάλλει την δρομολόγηση των πακέτων μέσω συμβατικών router/switches κατά την αποστολή, και αντίστοιχα κατά την λήψη της πληροφορίας. Θεωρώντας ελάχιστο φόρτο και μόνον τις εγγενείς καθυστερήσεις της 5G υποδομής και λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις καθυστερήσεις δρομολόγησης ενός συμβατικού router μέσω ασύρματης ζεύξης (καθώς η όλη διάταξη είναι εγγενώς ασύρματη) το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει σε καθυστέρηση, όπως αναφέρθηκε, της τάξης των 135ms κατ' ελάχιστο.

Η χρήση κάποιας αντίστοιχης διάταξης ελέγχου για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας (π.χ. απομακρυσμένη ιατρική επέμβαση) είναι προς το παρόν μη ρεαλιστική. Η εισαγωγή των δικτύων 5G φαίνεται να καθιστά την εφαρμογή ελέγχου τέτοιας ακριβείας σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιήσιμη. Η εξάλειψη ωστόσο, των εγγενών καθυστερήσεων που παρουσιάζονται λόγω φυσικών ατελειών στα μέσα διάδοσης, δεν πρόκειται να συμβεί στο (άμεσο) μέλλον. Καθώς τα «hops» που απαιτούνται για την επιτυχή δρομολόγηση της πληροφορίας προσθέτουν, καθυστέρηση θα πρέπει να βρεθεί ένα «κατώφλι» έπειτα από το οποίο η εισαχθείσα καθυστέρηση καθιστά το σύστημα ανίκανο να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας πραγματικού χρόνου. Με αυτήν την λογική, θα μπορούσαν να υπάρχουν «κόμβοι» ελέγχου πραγματικού χρόνου σε σημεία που μπορούν να εξυπηρετήσουν τον μεγαλύτερο αριθμό πελατών, με τον ελάχιστο αριθμό hops. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η συμφόρηση στο μελλοντικό παγκόσμιο δίκτυο.

Η αποκέντρωση κόμβων ελέγχου με παράλληλη χρήση ασυνδεσμικών πρωτοκόλλων για πακέτα δεδομένων ελέγχου, είναι ίσως ο καλύτερος τρόπος να προσεγγιστεί στο μέγιστο μια ιδανική επικοινωνία πραγματικού χρόνου. Αντίστοιχη εφαρμογή της αποκέντρωσης των κόμβων ελέγχου, είναι η «νεφοποίηση» του εγκεφάλου-ελεγκτή ενός σμήνους μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Ο έλεγχος ενός σμήνους μπορεί να γίνεται συλλογικά και όχι από έναν «master».

5.4 Αποτίμηση εργασίας

Με την επιτυχή ολολήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έχουν επιτευχθεί οι περισσότεροι στόχοι που τέθηκαν ως προς την ποιότητα της επικοινωνίας, την εμβέλεια της ζεύξης, την κατανάλωση ισχύος σε ρεαλιστικό σενάριο χρήσης, την ανάλυση των δειγματοληφθέντων σημάτων αλλά και την καθυστέρηση που παρουσιάζεται στην επικοινωνία. Η ποιότητα της επικοινωνίας ορίζεται ως συνάρτηση των πακέτων που καταφθάνουν επιτυχώς στον προορισμό χωρίς απώλειες και της ακρίβειας των τιμών του γυροσκοπίου/επιταχυνσιομέτρου και αισθητήρα κάμψης.

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίσαμε και τρόποι επίλυσης των αντίστοιχων προβλημάτων:

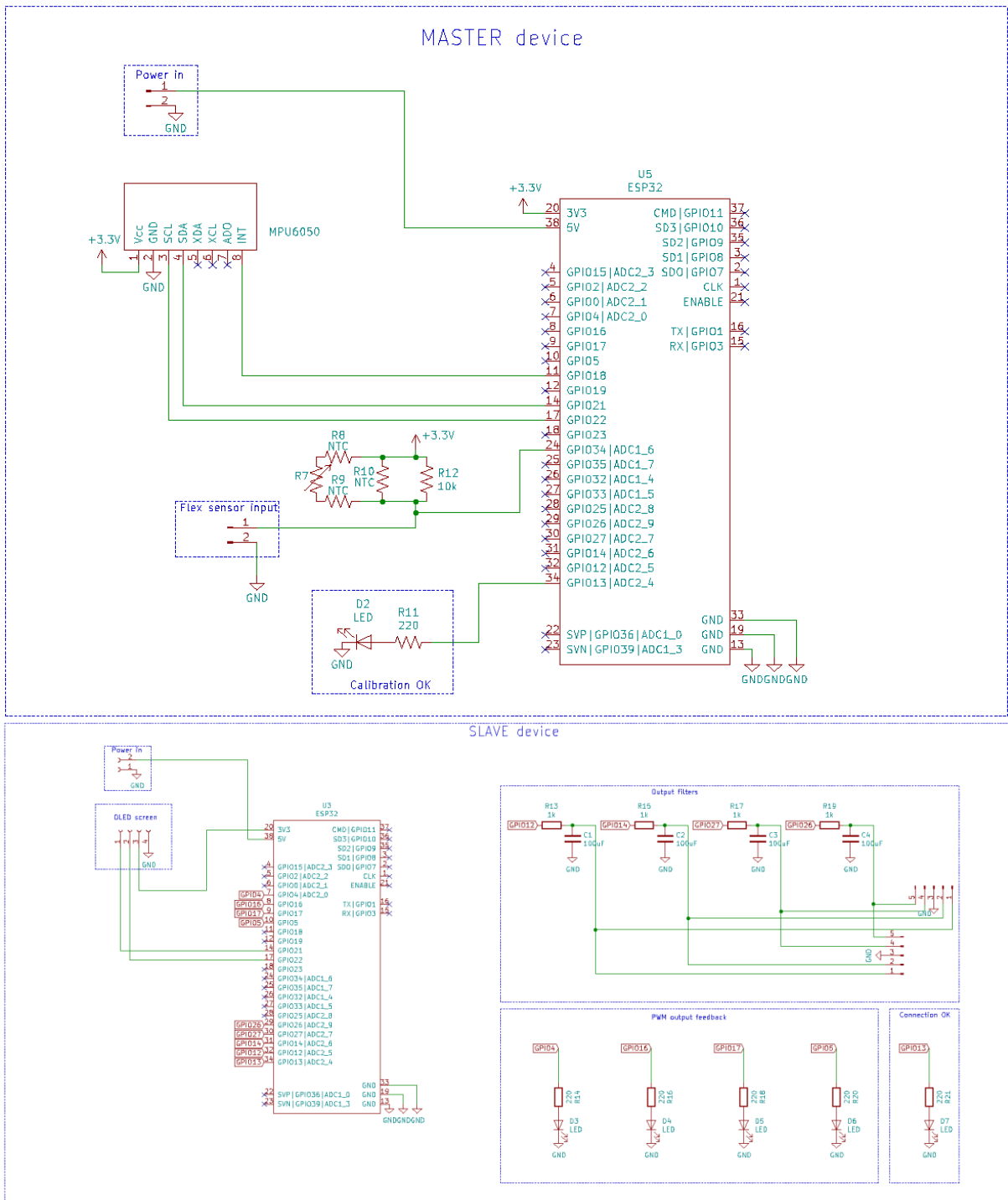
- 1) Πρόβλημα: Ασυμβατότητα MPU6050 με ESP32.
Επίλυση μέσω τροποποίησης των βιβλιοθηκών διεπαφής MPU6050 – ESP32.
- 2) Πρόβλημα: Μη λειτουργία ESP-Now με MPU6050 (προβλήματα χρονισμού)
Επίλυση μέσω εμφώλευσης ρουτινών δειγματοληψίας μέσα στις ρουτίνες αποστολής του πρωτοκόλλου ESP-Now. Η δειγματοληψία και η αποστολή γίνεται ξεχωριστά για κάθε τιμή που λαμβάνει η γωνία σε κάθε άξονα.
- 3) Πρόβλημα: Αποσυνδέσεις του ESP-Now με χρήση των βιβλιοθηκών της arafruit για το MPU6050
Απόρριψη των βιβλιοθηκών της Adafruit. Στα τελικά προγράμματα έγινε χρήση των παρακάτω βιβλιοθηκών: I2Cdev.h, MPU6050_6Axis_MotionApps20.h, esp_now.h, WiFi.h .
- 4) Πρόβλημα: Μη γραμμικότητα on-board ADC (πρόβλημα με το διάβασμα του flex sensor)
Επίλυση μέσω εμφώλευσης συναρτήσεων mapping στο πρόγραμμα ADC δειγματοληψίας του αποστολέα. Κάθε συνάρτηση map χαρτογραφεί τις τιμές σε ένα νέο εύρος. Μετά την δεύτερη εμφωλευμένη χαρτογραφήση, το πρόβλημα μη γραμμικότητας του on-board ADC λύνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου. Συμπληρωματικά, έγινε μια δευτερεύουσα χαρτογράφηση στην μονάδα node ώστε να μειωθεί η επιρροή των τιμών του flex sensor για τις «προβληματικές» τάσεις από 0 έως και 1V στο πλήρες εύρος των τελικών τιμών του throttle (από 0 έως και 3.3V).
- 5) Πρόβλημα: Υπερβολικός θόρυβος κβαντισμού στις τιμές του flex sensor.
Επίλυση μέσω μείωσης συχνότητας δειγματοληψίας και αύξησης σταθμών κβαντισμού. Η αύξηση και μείωση αυτή έγιναν σταδιακά μέχρι οι τιμές που «διαβάζει» ο ADC να θεωρηθούν ικανοποιητικά ακριβείς. Ο ιδανικός συνδυασμός κατέληξε να είναι: $f = 78.125\text{kHz}$, και 1023 στάθμες κβαντισμού.
- 6) Πρόβλημα: Drifting τιμών γυροσκοπίου.
Επίλυση μέσω δειγματοληψίας των τιμών του γυροσκοπίου για 6 sec. (χρόνος ικανός ώστε να προκύψουν τα πραγματικά offsets) και εν τέλει αφαίρεσης των συνιστωσών των offsets από τις τιμές που θεωρούνται ίσες με το 0 για κάθε άξονα. Το πρόβλημα δεν επιλύθηκε πλήρως ακόμη και μετά από την παραπάνω τροποποίηση. Ένα επιπλέον μέτρο επίλυσης είναι η αφαίρεση της συνιστώσας της βαρυτικής επιτάχυνσης. Το πρόβλημα επιλύθηκε πρακτικά εξ ολοκλήρου, με όποιο drifting υπάρχει να μην είναι μετρήσιμο σε λογικό χρόνο χρήσης.

Δυνατές βελτιώσεις και προεκτάσεις της παρούσας πλατφόρμας:

- 1) Επέκταση πλατφόρμας για χρήση σε δίκτυα 5G.
- 2) Χρήση αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης για αναγνώριση και αντιστοίχιση κινήσεων σε πακέτα ελέγχου συμπεριφοράς του drone.
- 3) Τυποποίηση πακέτων συμπεριφοράς (τύπου MAVLink). Λόγου χάρη, μια συγκεκριμένη κίνηση/περιστροφή να σκανδαλίζει την απογείωση ή αντίστοιχα την ομαλή προσγείωση.
- 4) Συνδυασμός των 2 πάνω προεκτάσεων για έλεγχο drone swarm από ανθρώπινο χρήστη.
- 5) Επικοινωνία μεταξύ drone σε διατάξεις swarm σε multi-peer και multi-peer/node αρχιτεκτονική.
- 6) Ζεύξη μεταξύ πολλαπλών nodes/peers και δημιουργία δυναμικής ιεραρχίας σε δίκτυο swarm.
- 7) End-to-end κρυπτογράφηση και αντίστοιχα αποκρυπτογράφηση με χρήση λογικών πυλών ή FPGA.
- 8) Υλοποίηση αξιοπιστίας σε επίπεδο εφαρμογής για επανεκπομπή χαμένων πακέτων ελέγχου.

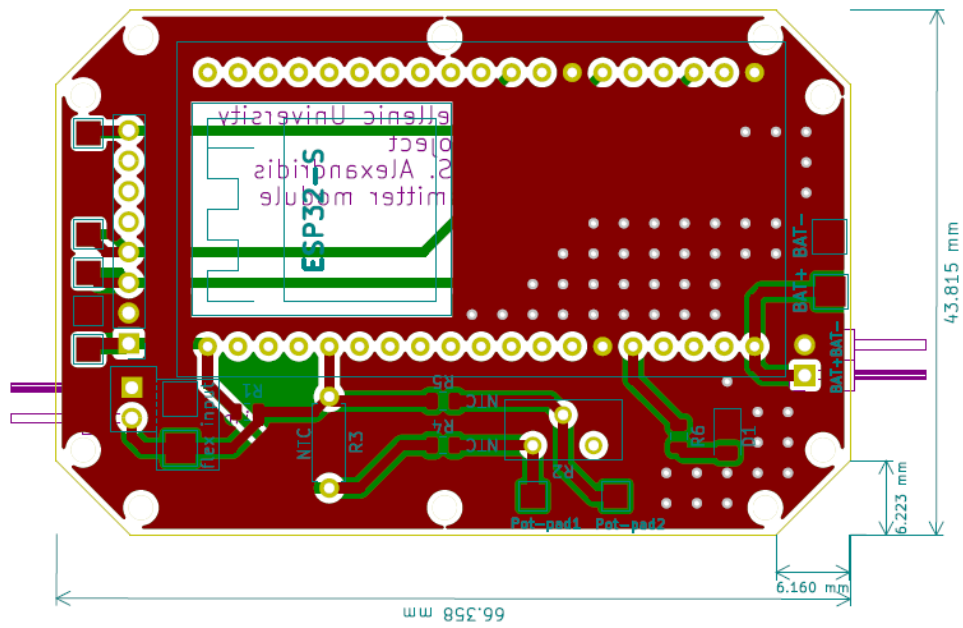
Παράρτημα Α Σχηματικά κυκλωμάτων, πλακέτες και κατασκευή

A.1 Σχηματικό κυκλώματος master και slave

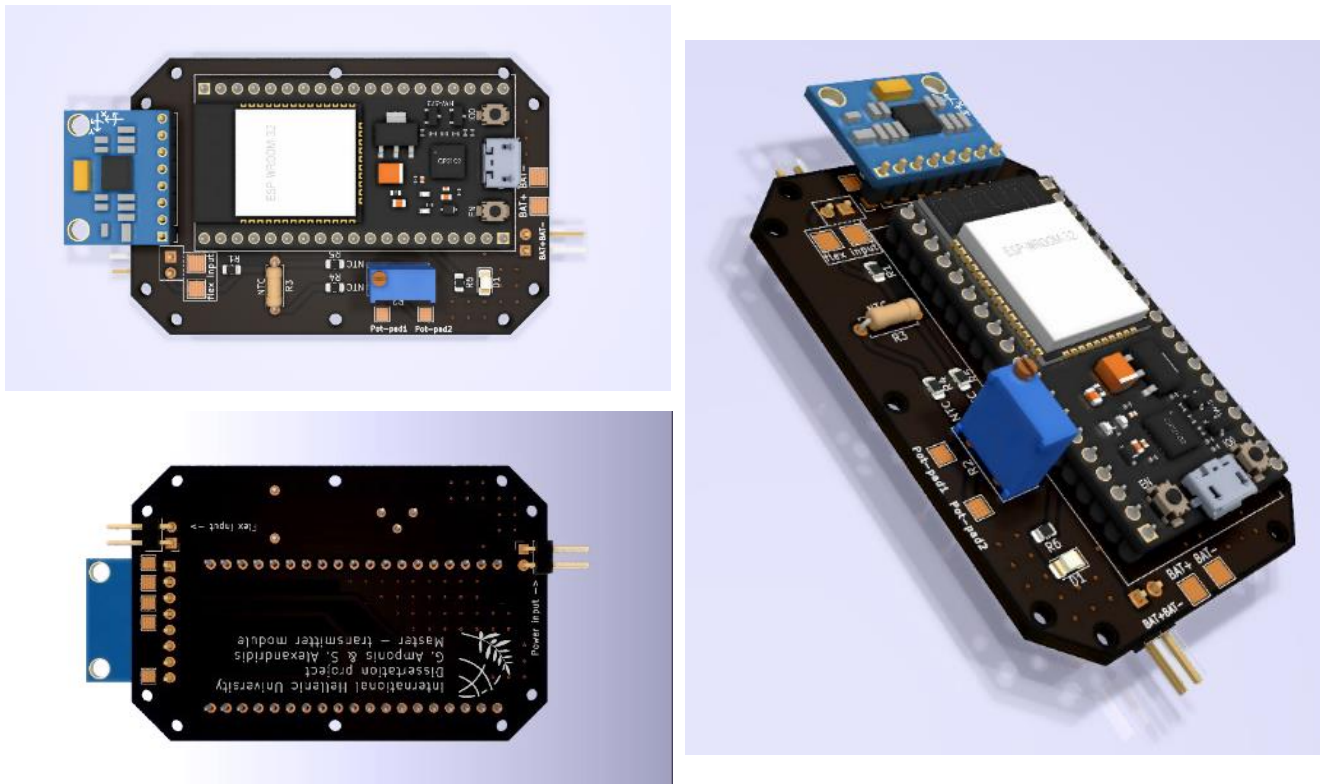


Σχήμα A.1 Σχηματικά αποστολέα-master (πάνω) και παραλήπτη-node (κάτω)

A.2 Πλακέτα αποστολέα (master)

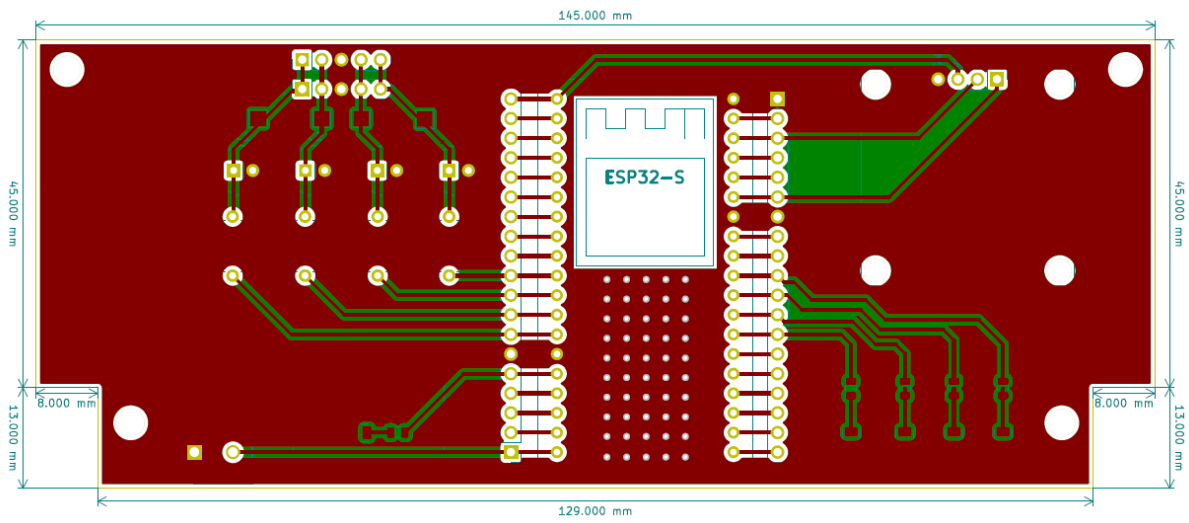


Σχήμα A.2 Σχέδιο PCB master

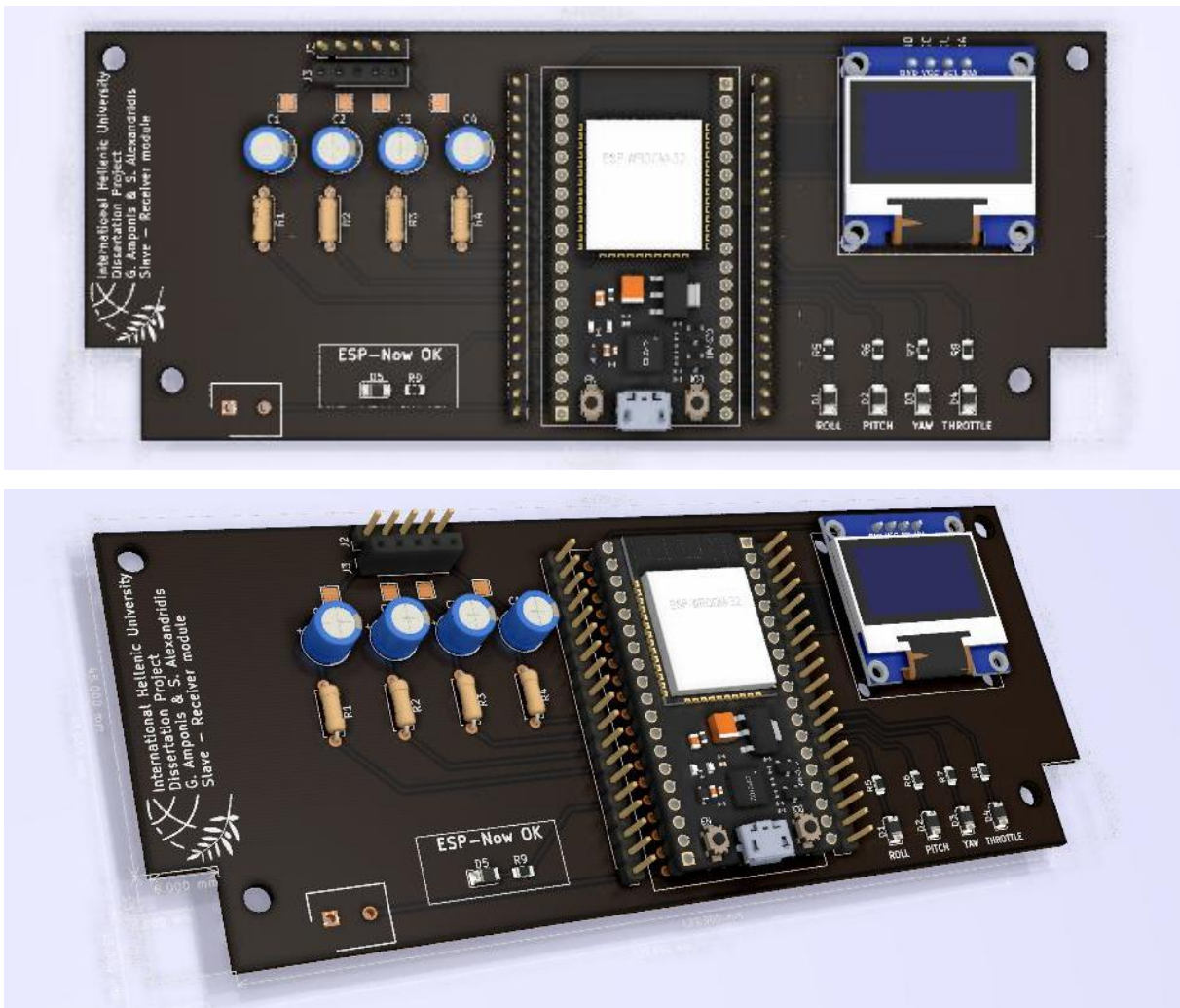


Σχήμα A.3 3D render της πλακέτας master

A.3 Πλακέτα παραλήπτη (node / ESP-Now slave)

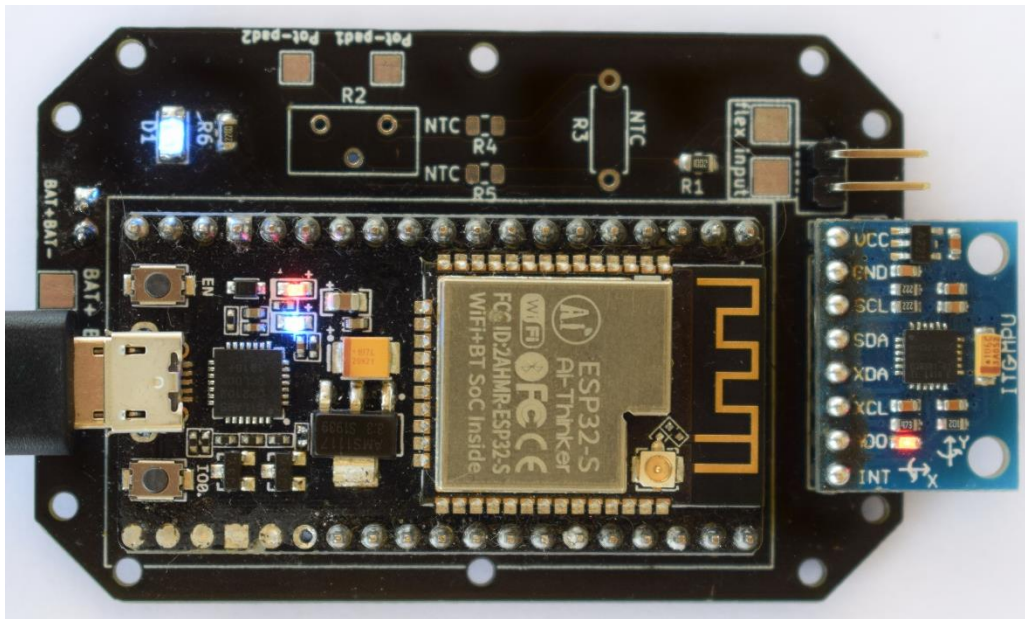


Σχήμα A.4 Σχέδιο PCB node (ESP-Now slave)

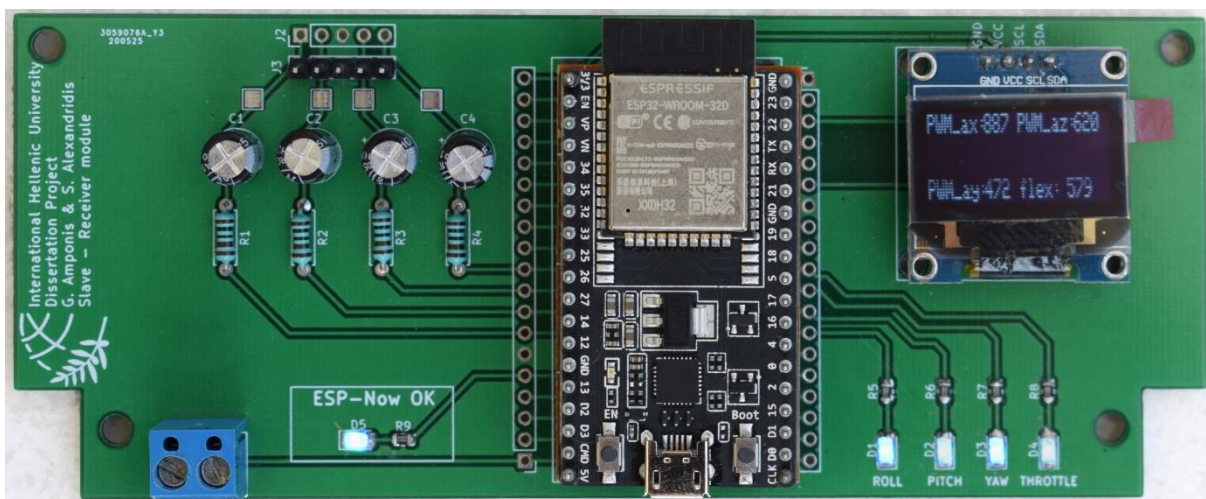


Σχήμα A.5 3D render της πλακέτας node (ESP-Now slave)

Α.4 Φωτογραφίες υλοποιημένων πλακετών

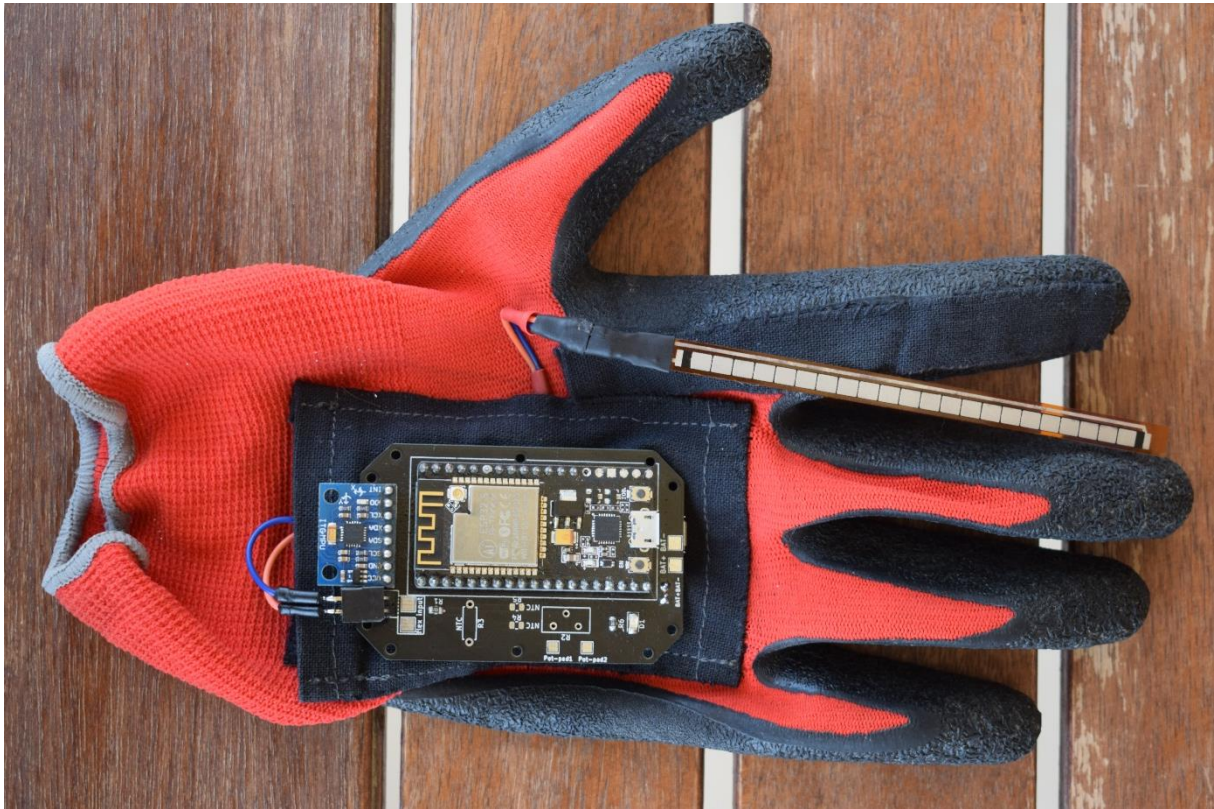


Σχήμα Α.6 Ολοκληρωμένη πλακέτα master

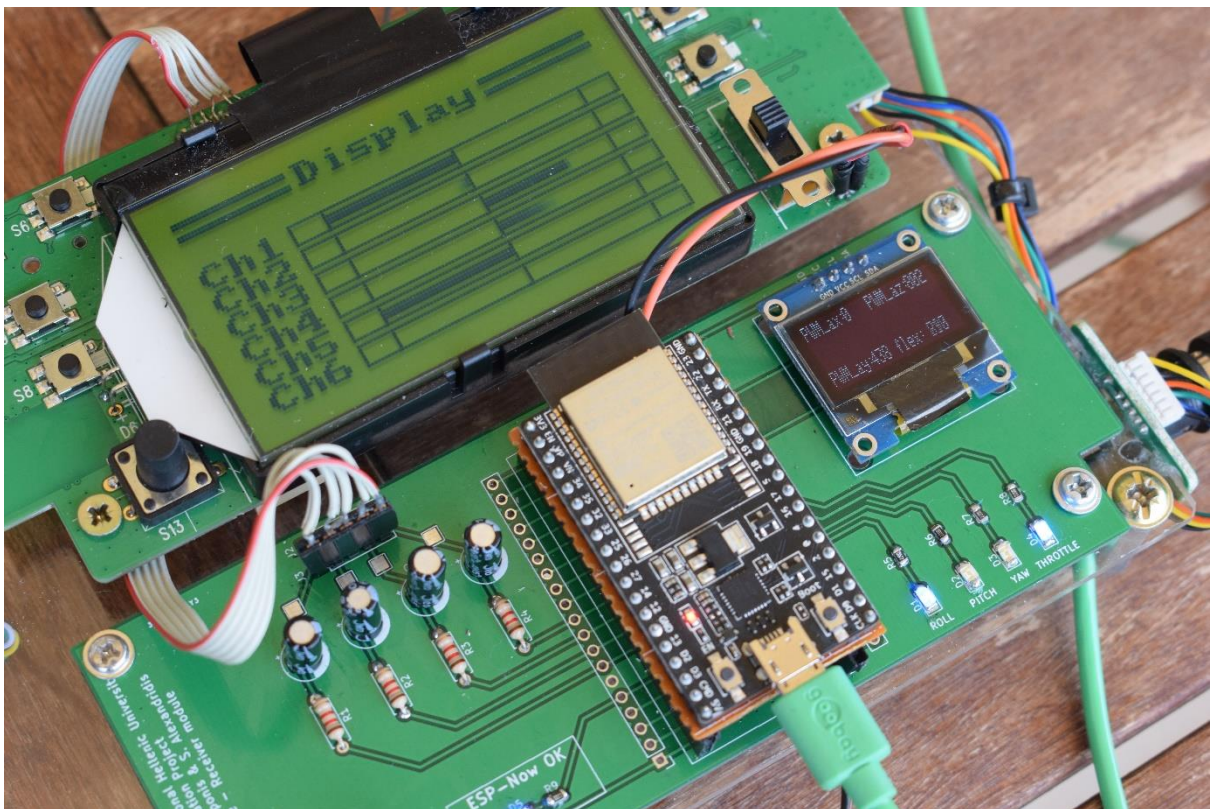


Σχήμα Α.7 Ολοκληρωμένη πλακέτα node (ESP-Now slave)

A.5 Φωτογραφίες κατασκευής



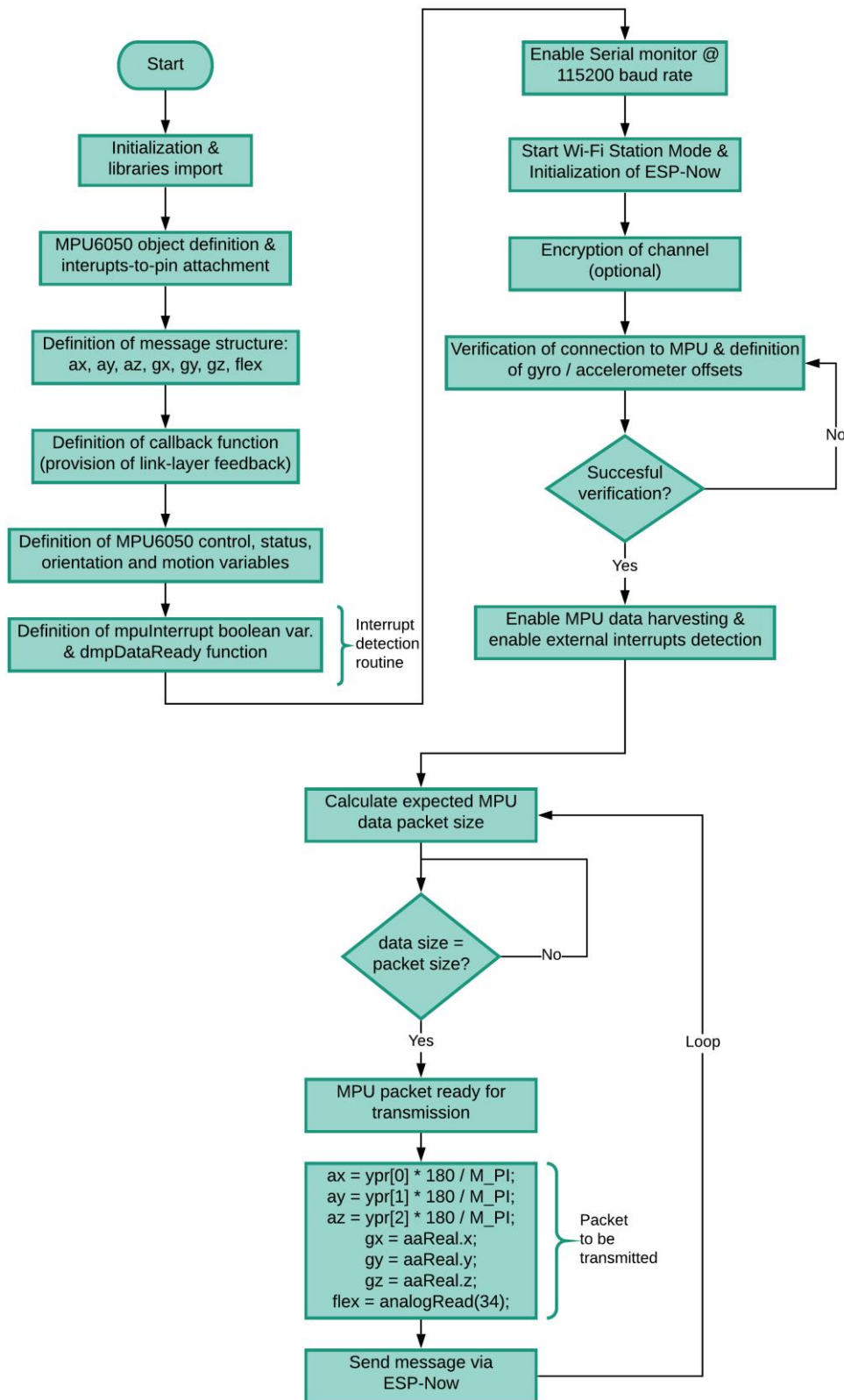
Σχήμα A.8 Γάντι χειριστή drone



Σχήμα A.9 Διάταξη πλακέτας node και drone flight controller

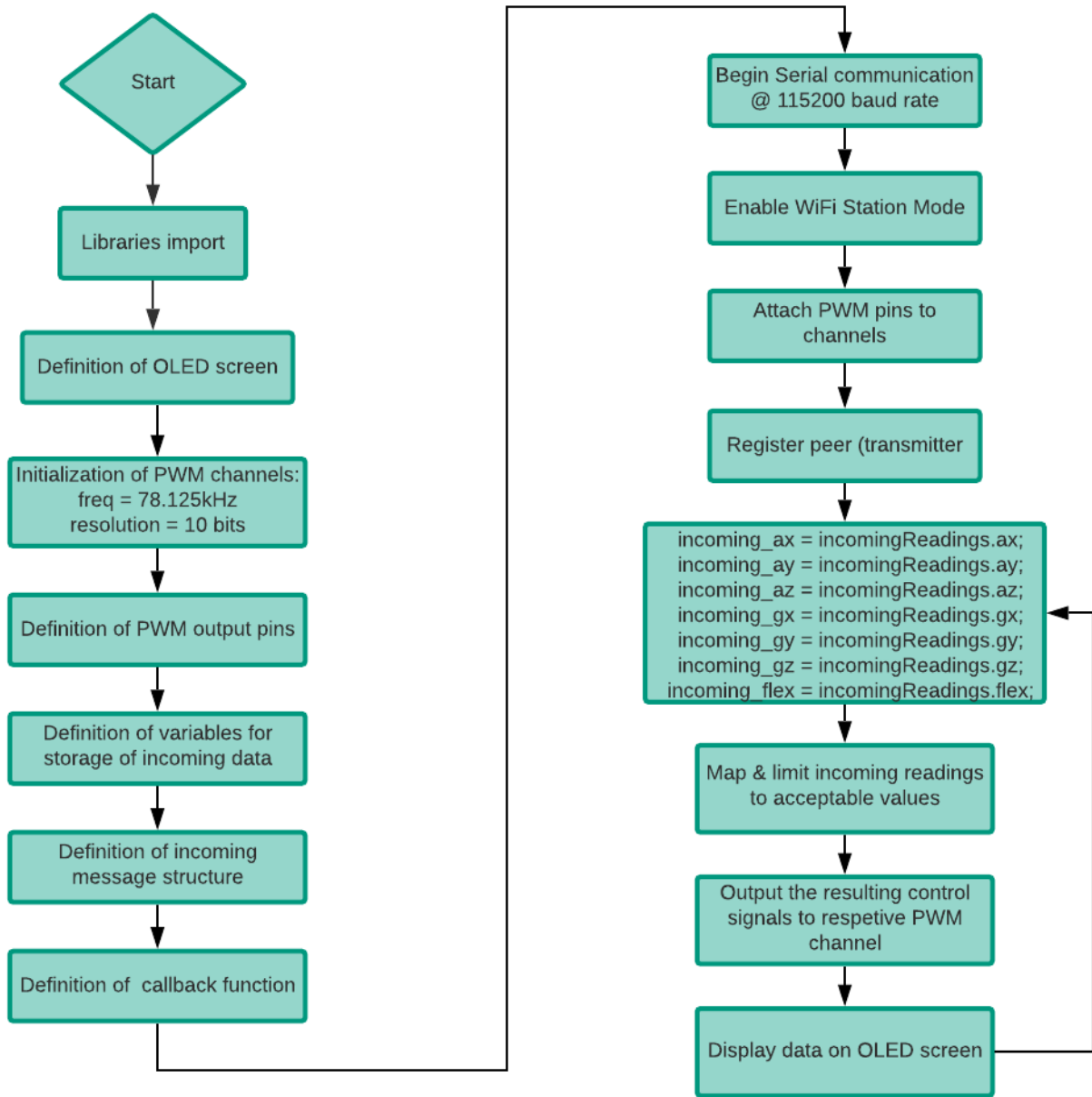
Παράρτημα Β Προγράμματα

Β.1 Πρόγραμμα αποστολέα (master)



Σχήμα Β.1 Αφαιρετικό διάγραμμα ροής προγράμματος αποστολέα (master)

Β.2 Πρόγραμμα παραλήπτη (slave)



Σχήμα Β.2 Αφαιρετικό διάγραμμα ροής προγράμματος παραλήπτη (slave)

Βιβλιογραφία

- [1] PX4 Dev Team, "PX4," [Online]. Available: https://docs.px4.io/v1.10/en/flight_controller/omnibus_f4_sd.html.
- [2] G. Hoffmann, H. Huang, S. Waslander and C. Tomlin, "Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment," in *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, South Carolina, USA, 2007.
- [3] P. Kumar, R. Kumar, S. Anand, D. E. N. Ganesh and D. V. Prithviraj, "Quad Band Signal Strength Monitoring System Using Quadcopter and Quad Phone," *Journal of Green Engineering*, vol. 5, no. Special Issue on Green Mobile Communication, p. 4, 2015.
- [4] Spectra Symbol, "Spectra Symbol," 2014. [Online]. Available: <https://www.spectrasymbol.com/wp-content/uploads/2019/07/flexsensordatasheetv2019revA.pdf>.
- [5] InvenSense, "InvenSense TDK," 19 Aug 2013. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>.
- [6] J. Rowberd, "I2C Device Library," 17 Jan 2017. [Online]. Available: <http://www.i2cdevlib.com/>.
- [7] J. Rowberg, "Github," 21 Jun 2012. [Online]. Available: https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/blob/master/Arduino/MPU6050/examples/MPU6050_DMP6/MPU6050_DMP6.ino.
- [8] Espressif Systems, "Espressif," 28 Apr 2020. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [9] Espressif Systems, "Espressif," 21 Nov 2019. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
- [10] R. Santos and S. Santos, "Random Nerd Tutorials," [Online]. Available: <https://i2.wp.com/randomnerdtutorials.com/wp-content/uploads/2018/08/ESP32-DOIT-DEVKIT-V1-Board-Pinout-36-GPIOs-updated.jpg?ssl=1>.
- [11] "vseven", "ESP32 Forum," 2017-2019. [Online]. Available: <https://www.esp32.com/viewtopic.php?f=19&t=2881>.
- [12] Solomon Systech, "Solomon Systech," Apr 2008. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>.
- [13] CDMXeléctronica, "GrabCAD," 28 Feb 2020. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/display-oled-ssd1306-de-0-96-1>.

- [14] A. Popa, "MadSciNet," 4 Jun 1998. [Online]. Available: <http://www.madsci.org/posts/archives/aug98/896993617.Eg.r.html>.
- [15] Nordic Semiconductor, "Nordic Semiconductor," Mar 2008. [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series>.
- [16] Espressif Systems, "Espressif," 07 Feb 2020. [Online]. Available: https://docs.espressif.com/_/downloads/esp-idf/en/latest/pdf/.
- [17] Espressif Systems, "Espressif," Mar 2019. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/2c-esp8266_non_os_sdk_api_reference_en.pdf.
- [18] IEEE, 802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Spec, 2016.
- [19] M. D. Ciampa, Security + guide to network security fundamentals, Course Technology/Cengage Learning, 2009.
- [20] National Institute of Standards and Technology, Federal Information Processing Standards Publication 197: ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES), 2001.
- [21] B. Greene, "SENKI," 9 Dec 2018. [Online]. Available: <https://www.senki.org/5g-latency-reality-checks/>.