



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ



## Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θέμα :  
«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου  
με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό  
χρόνο»

Γαλάνης Παύλος Α.Μ : 8096619



## Ορισμός Προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική αφορά τη σχεδίαση και ανάπτυξη ενός τετρακόπτερου για χρήση σε εκπαιδευτικές δραστηριότητες. Το τετρακόπτερο θα είναι χαμηλού κόστους, θα υλοποιηθεί με μικροελεγκτή Arduino, θα έχει δυνατότητα ανύψωσης φορτίου (payload) έως 700gr. Για τους αρχικούς πειραματισμούς και ρυθμίσεις το τετρακόπτερο θα ασφαλίζει σε ειδική βάση που θα προστατεύει τον χρήστη από τραυματισμούς. Επιπλέον θα είναι εξοπλισμένο με τηλεμετρία σε πραγματικό χρόνο για την αποστολή των δεδομένων πτήσης σε σταθμό βάσης (H/Y ή/και οθόνη LCD).



## Η Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

### Θεωρητικό Μέρος

- Κινηματική Ανάλυση
- Quaternions
- Electronic Compass
- PID Controller
- Pulse Width Modulation
- I2C protocol
- Interrupts
- Analog to Digital Converter
- Weight and Balance
- Propeller Balancing

### Επισκόπηση Υλικού

- Arduino
- MPU 6050
- MPU 9250
- ESC (Electronic speed Controller)
- Brushless Motors
- Lipo Battery
- Τηλεκατεύθυνση
- DC Voltage Step-Down Switching Regulators
- QMC5883L Compass
- VL53L1X Time of Flight Sensor
- nRF24L01
- HC-12 Half Duplex Wireless Transceiver
- BMP 280 Temperature and Pressure Sensor
- GPS
- Οθόνη LCD 16x2

### Τρόπος Λειτουργίας

- Flight Controller
- Secondary MCU
- Telemetry Receiver
- Weight & Balance

Σταθμός ελέγχου και ρύθμισης  
Quadcopter

Excel Data Streamer

Ηλεκτρονικά Κυκλώματα  
Bill of Materials

Ανάλυση και συγγραφή λογισμικού

«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στηρίχτηκε στον τεμαχισμό του προβλήματος που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία σε μικρά αυτόνομα προβλήματα. Κάθε ένα από αυτά μελετήθηκε και αναπτύχθηκε αρχικά σε πρόγραμμα εξομοίωσης ή σε πραγματικές συνθήκες με την χρήση breadboard με την προοπτική να ενσωματωθεί τελικά στην κατασκευή

## Επιμέρους Προβλήματα

- Ανάγνωση και αναπαραγωγή σήματος τηλεχειρισμού
- Επιλογή μοτέρ και προπελών σε συνάρτηση με το βάρος του τετρακόπτερου
- Δυναμομέτρηση μοτέρ – προπελών και κατανάλωση ρεύματος, επιλογή μπαταρίας
- Αδρανειακό σύστημα μέτρησης
- PID
- Πομποδέκτες σε διάφορες συχνότητες
- Ηλεκτρονικές πυξίδες
- Time of flight αισθητήρες
- Αισθητήρες βαρομετρικής πίεσης
- GPS
- Σταθμός ελέγχου τετρακόπτερου

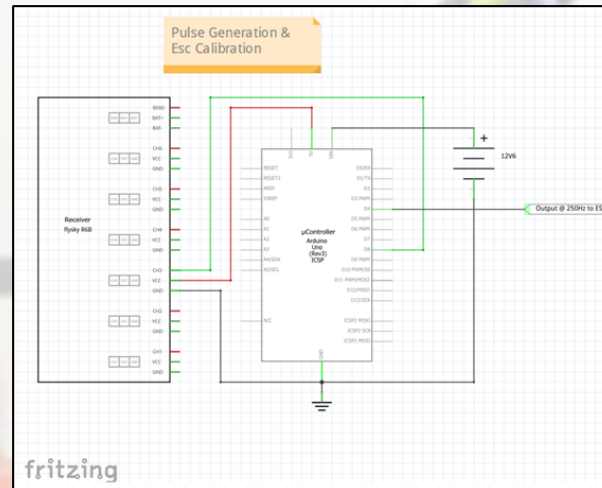
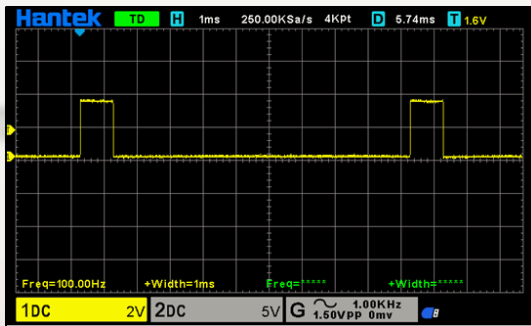


«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

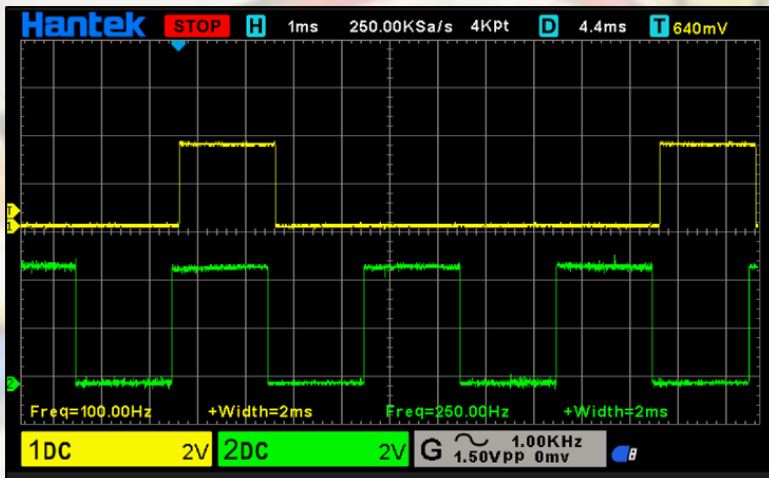
Τρόπος Λειτουργίας: Η ανάγνωση και αναπαραγωγή του παλμού τηλεχειρισμού



```

ESC_calibration | Arduino 1.6.9
File Edit Sketch Tools Help

ESC_calibration $
5 int throttle_input, throttle ;
6 unsigned long timer_1, motor1, esclwaveform, current_time, esc_loop_timer, pulse_time, zero_timer ;
7 byte last_channel_1;
8
9
10 void setup() {
11   Serial.begin(250000);
12   PCICR |= (1 << PCIE0);
13   PCMSK0 |= (1 << PCINT0);
14   DDRD |= B00010000;
15   zero_timer = micros();
16 }
17
18 void loop() {
19
20   motor1 = throttle_input;
21   if (motor1 < 1000) motor1 = 1000;
22   if (motor1 > 2000) motor1 = 2000;
23
24   while(micros() - zero_timer < 4000);
25   zero_timer = micros();
26
27   PORTD |= B00010000;
28
29   esclwaveform = micros() + motor1;
30
31   while ( (PORTD & B00010000) != 0) {
32     esc_loop_timer = micros();
33     if(esclwaveform <= esc_loop_timer)PORTD &= B11101111;
34   }
35   Serial.println(motor1);
36 }
37 ISR(PCINT0_vect){
38   current_time = micros();
39   // Throttle
40   if(PINB & B00000001){
41     if(last_channel_1 == 0){
42       last_channel_1 = 1;
43       timer_1 = current_time;
44     }
45   }
46   else if(last_channel_1 == 1){
47     last_channel_1 = 0;
48     throttle_input = current_time - timer_1;
49   }
50 }
    
```



Ο παλμός εισόδου στον μικροελεγκτή (κίτρινη κυματομορφή)  
 Ο παλμός εξόδου του μικροελεγκτή (πράσινη κυματομορφή)  
 Η νέα συχνότητα στα 250 Hz



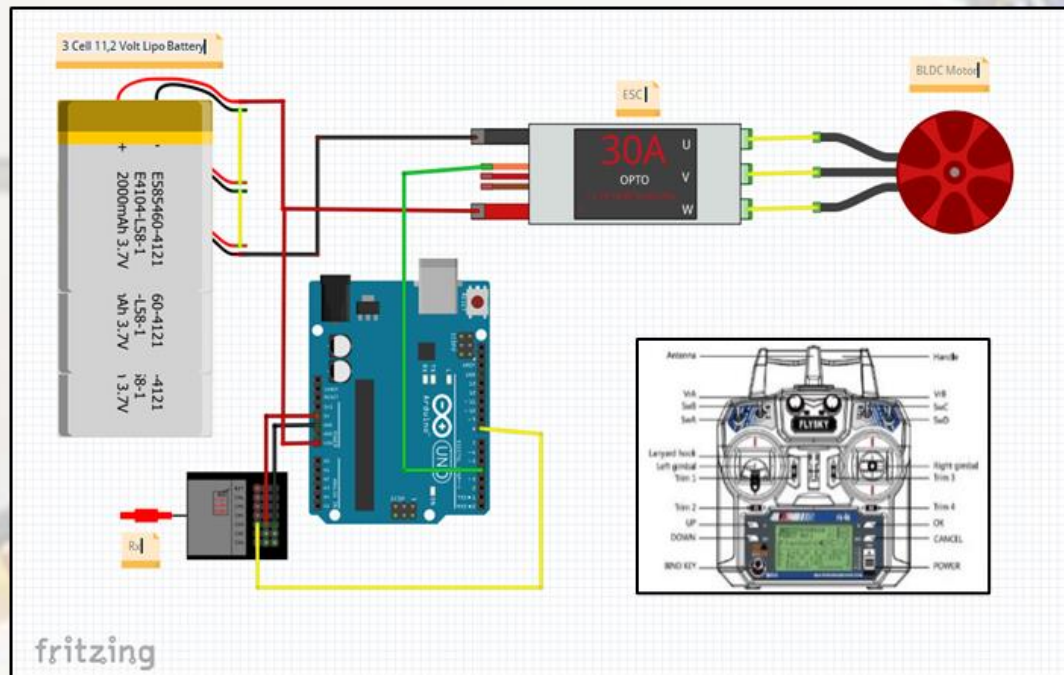
«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

**Τρόπος Λειτουργίας:** Η δυναμομέτρηση των 4 BLDC

- BLDC Motors 2212 1000KV
- Propellers 10 inches , 4,5 deg pitch



*Το Setup για τις χαρακτηριστικές των μοτέρ*



*Τροφοδοτικό, ζυγαριά, υπολογιστής, τηλεχειρισμός και η κατασκευή του μοτέρ με το ESC και τις συνδέσεις.*



*Τα 4 τέσσερα μοτέρ με τις προπέλες τους και τα ESC's*

«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

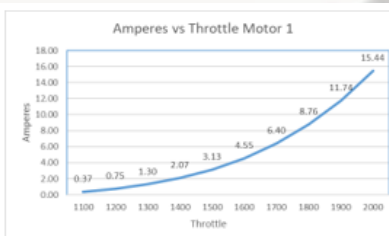
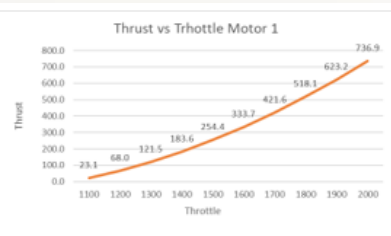
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

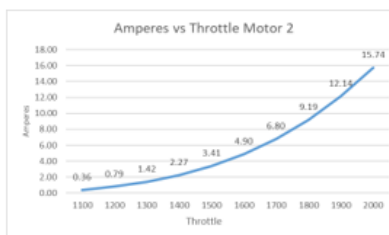
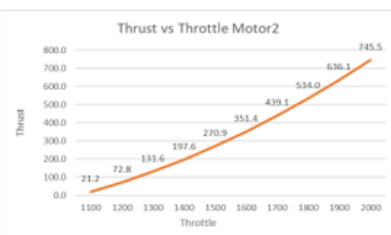
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τρόπος Λειτουργίας: Οι χαρακτηριστικές των 4 BLDC Motors ( 12V2)

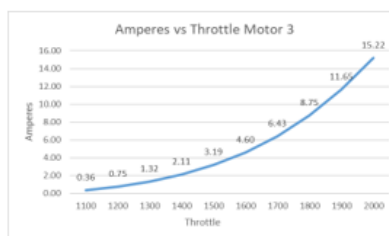
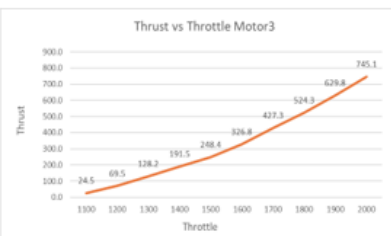
Motor 1		
Throttle	Thrust	Amperes
1100	23.1	0.37
1200	68.0	0.75
1300	121.5	1.30
1400	183.6	2.07
1500	254.4	3.13
1600	333.7	4.55
1700	421.6	6.40
1800	518.1	8.76
1900	623.2	11.74
2000	736.9	15.44



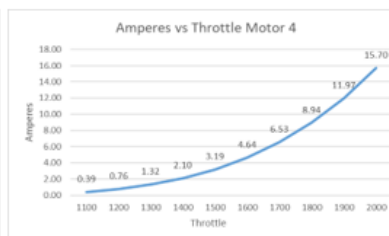
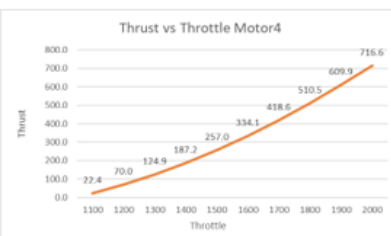
Motor 2		
Throttle	Thrust	Current
1100	21.2	0.36
1200	72.8	0.79
1300	131.6	1.42
1400	197.6	2.27
1500	270.9	3.41
1600	351.4	4.90
1700	439.1	6.80
1800	534.0	9.19
1900	636.1	12.14
2000	745.5	15.74



Motor 3		
Throttle	Thrust	Current
1100	24.5	0.36
1200	69.5	0.75
1300	128.2	1.32
1400	191.5	2.11
1500	248.4	3.19
1600	326.8	4.60
1700	427.3	6.43
1800	524.3	8.75
1900	629.8	11.65
2000	745.1	15.22



Motor 4		
Throttle	Thrust	Current
1100	22.4	0.39
1200	70.0	0.76
1300	124.9	1.32
1400	187.2	2.10
1500	257.0	3.19
1600	334.1	4.64
1700	418.6	6.53
1800	510.5	8.94
1900	609.9	11.97
2000	716.6	15.70



Reference Voltage 12V2		
Motor	Max Thrust	Max Amps
Motor 1	736.9	15.44
Motor 2	745.5	15.74
Motor 3	745.1	15.22
Motor 4	716.6	15.70
Average	736.0	15.50

Reference Voltage 12V2		
1500μsec	Thrust	Amps
Motor 1	254.4	3.10
Motor 2	270.9	3.40
Motor 3	248.4	3.19
Motor 4	257.0	3.20
Average	257.7	3.22
Average x4	1030.7	12.89

- Μέσο μέγιστο Thrust : 736 gr.
- Μέση μέγιστη κατανάλωση : 15.5 A

50 % Throttle

- Μέσο Thrust : 257 gr.
- Μέσο Current Drain : 3.22 A

Το Quadcopter των 1030 gr θα κάνει Hover με μια κατανάλωση των 13 A (τάση αναφοράς 12V2).



«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

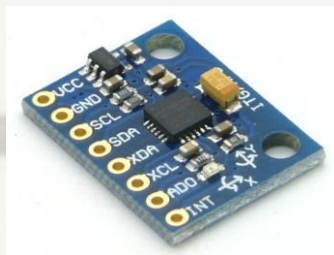
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

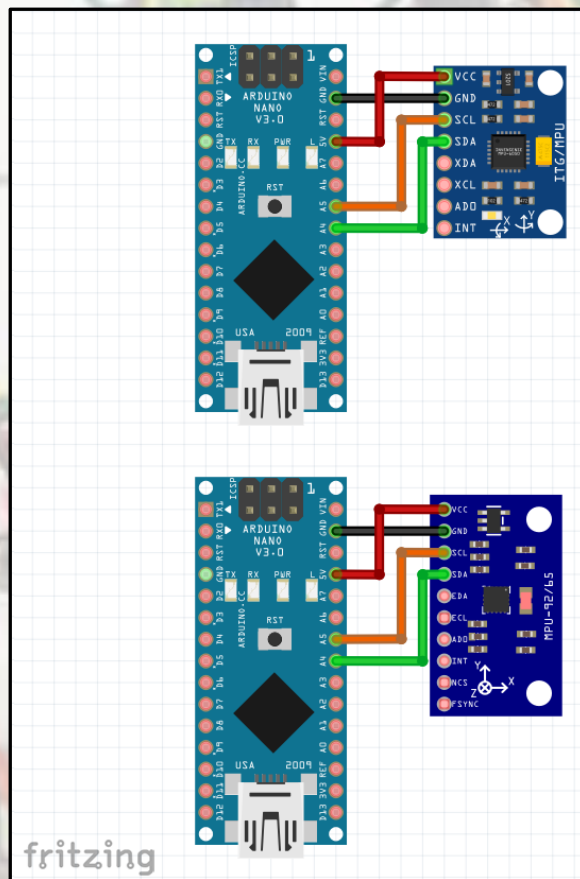
Τρόπος Λειτουργίας: Inertial Measurement Unit

MPU 6050

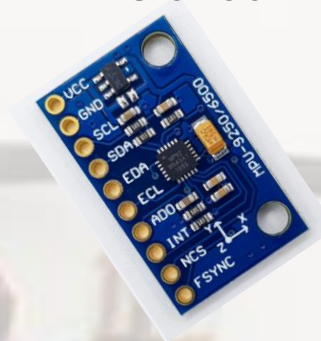


6 Degrees of Freedom IMU

- 3 axis Accelerometer
- 3 axis Gyro
- IIC
- Raw Data
- DMP
- Flight Controller



MPU 9250



9 Degrees of Freedom IMU

- 3 axis Accelerometer
- 3 axis Gyro
- 3 axis Magnetometer
- IIC
- DMP
- Madgwick Filter
- Secondary IMU



«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

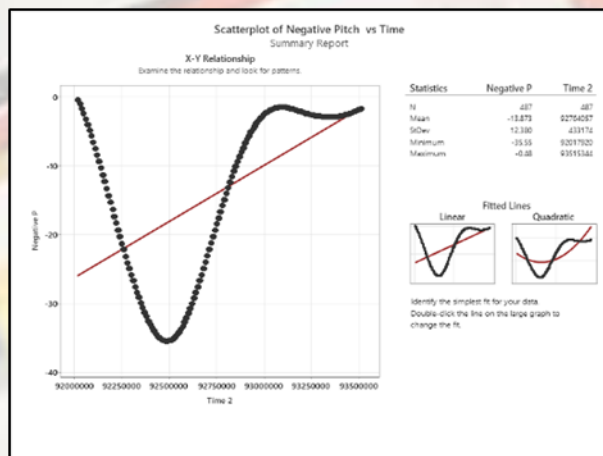
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## Τρόπος Λειτουργίας: Proportional – Integral – Derivative Controller

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

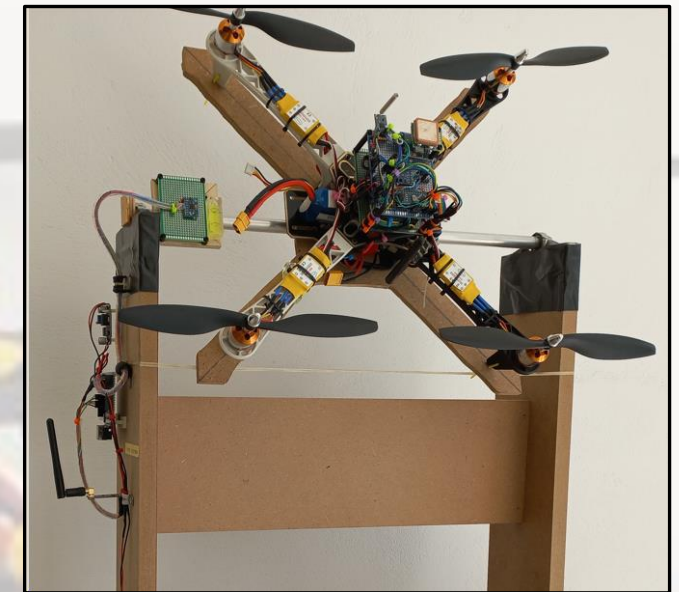
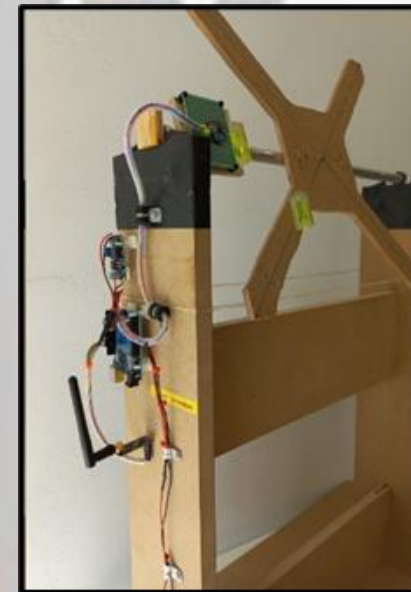
PID	PID on IDE
$u_P(t) = K_P e(t)$	pitch_Kp = Kp_for_pitch * error
$u_I(t) = K_I \int_0^t e(t)dt$	pitch_Ki += pid_pitch_error * Ki_for_pitch
$u_D(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t)$	pitch_Kd = (pid_pitch_error - previous_pid_pitch_error) * Kd_for_pitch



Αντίδραση τετρακόπτερου Negative Pitch vs Time

Μέγιστη απόκλιση 35.55 μοίρες. Πλήθος ζευγαριών απόκλισης – χρόνου, 487 σε συνολικό χρόνο περίπου 1.5 δευτερολέπτων. Το setpoint είναι 0 μοίρες

## Test Station



- Αυτόνομο Αδρανειακό Σύστημα (MPU6050)
- Κίνηση σε κλειστού τύπου bearings
- Ασύρματη αποστολή δεδομένων σε Arduino IDE Serial Monitor – Excel Data Streamer

«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

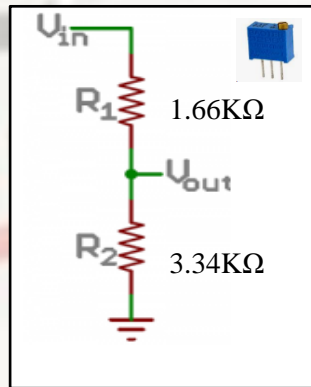
Τρόπος Λειτουργίας: Τηλεμετρία

### Secondary MCU

Throttle

- Signal from Fly-Sky Rx
- Interrupt

Battery Percentage



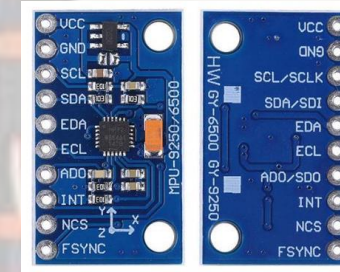
- Arduino Analog Input

Temperature Altitude



- BMP 280
- IIC Connection

Heading



- MPU 9250
- IIC Connection

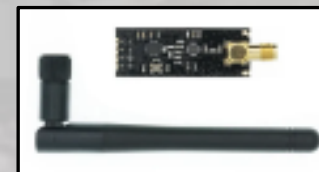
Pitch Angle

Roll Angle

Command

- Signal from Fly-Sky Rx
- Interrupt

Data Package Transmission



nRF24L01 PA+  
2.4 GHz



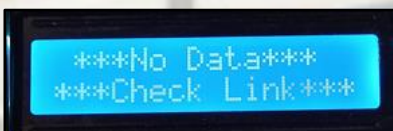
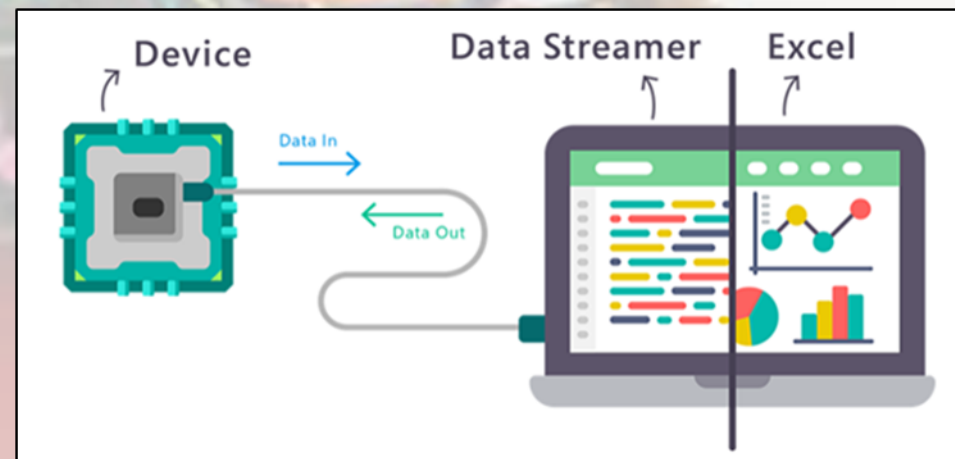
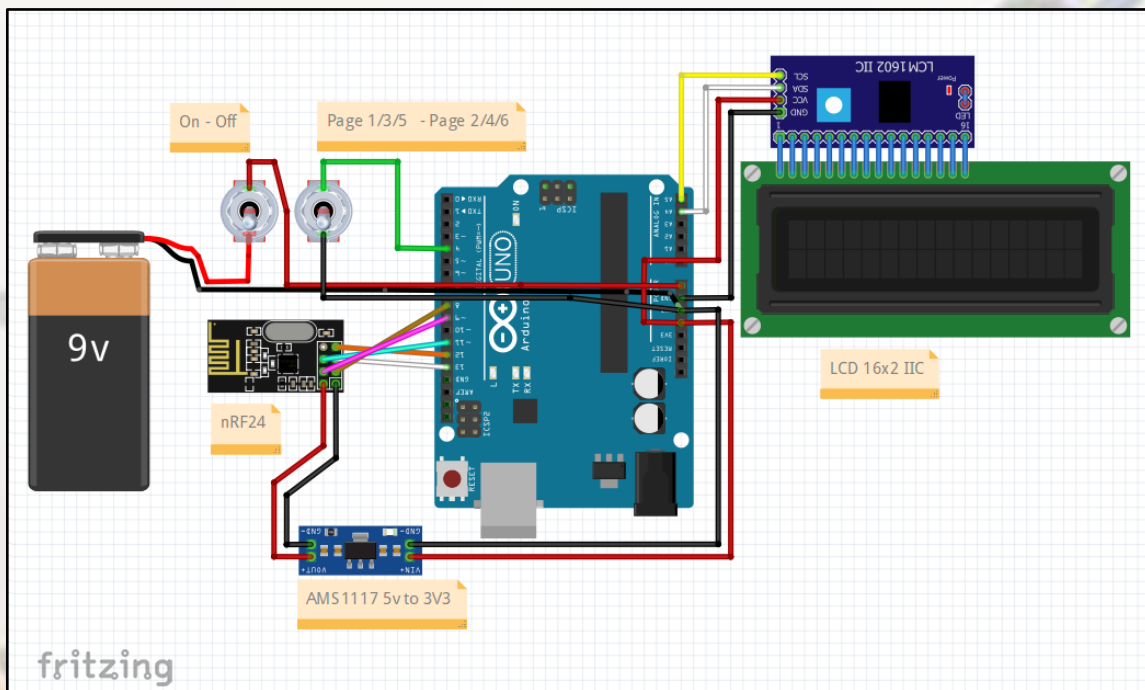


«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## Δέκτης Τηλεμετρίας



«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

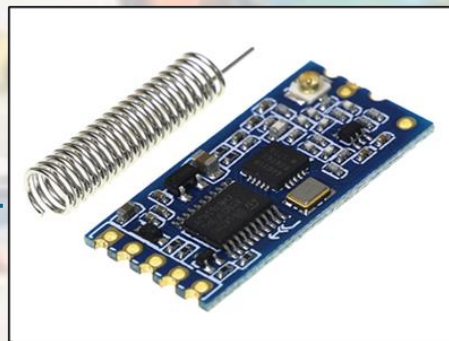
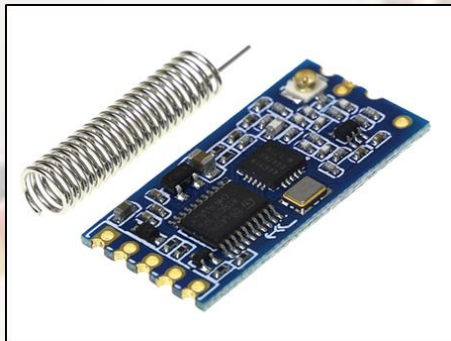
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τρόπος Λειτουργίας: GPS

U-Blox NEO-M8N

UART to USB converter

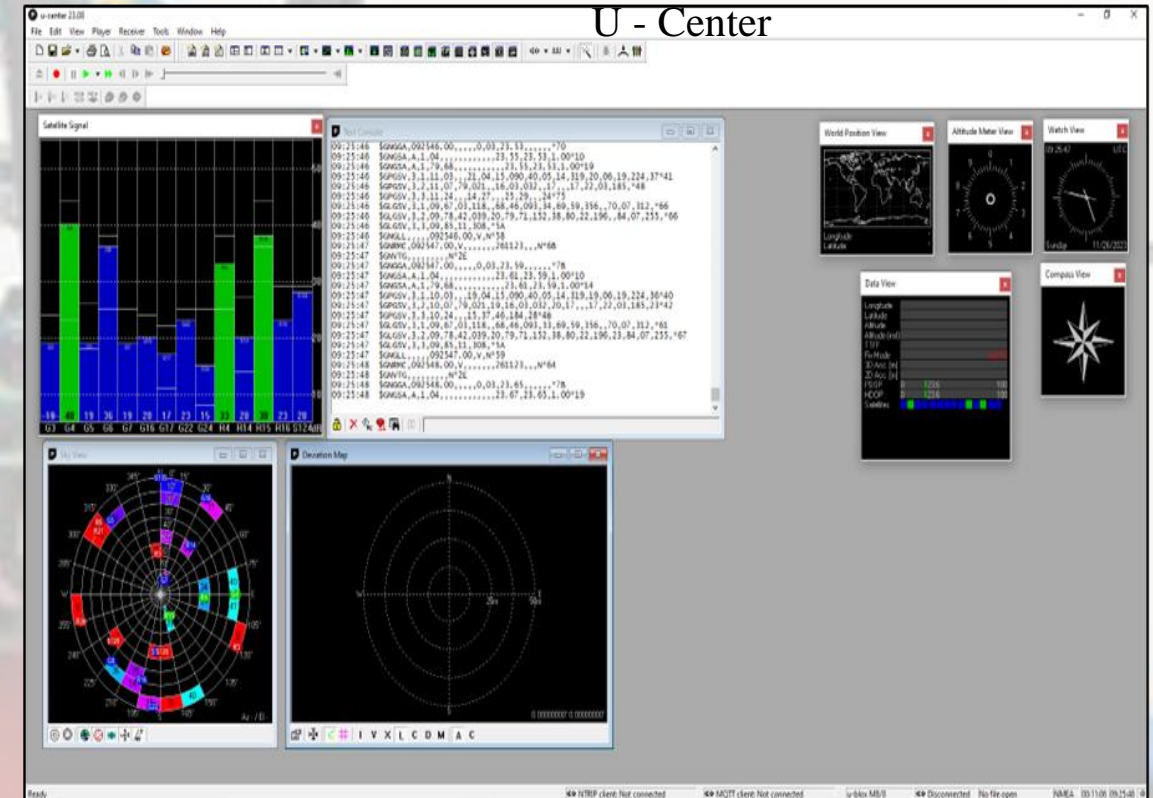


433 MHz

UART  
9600 Bps  
8-N-1  
AT Commands

HC-12 Transceiver  
Half – Duplex 20dbm

HC-12 Transceiver  
Half – Duplex 20dbm



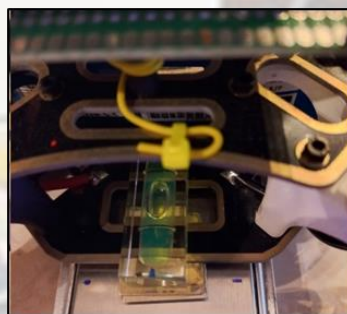
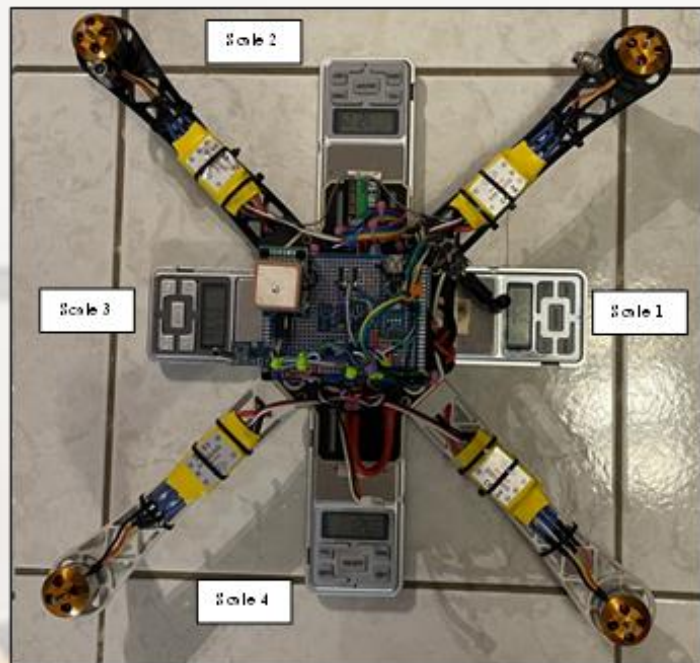


«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## Weight & Balance – Prop Balancing



Axis	Scale No	Weight(gr)
Roll Axis	Scale 1	359.8
	Scale 3	359.6
Pitch Axis	Scale 2	121.4
	Scale 4	120.6
Props(4x)	Scale 5	54
Total		1015.4



Propeller Balancer



Static Balanced Propeller

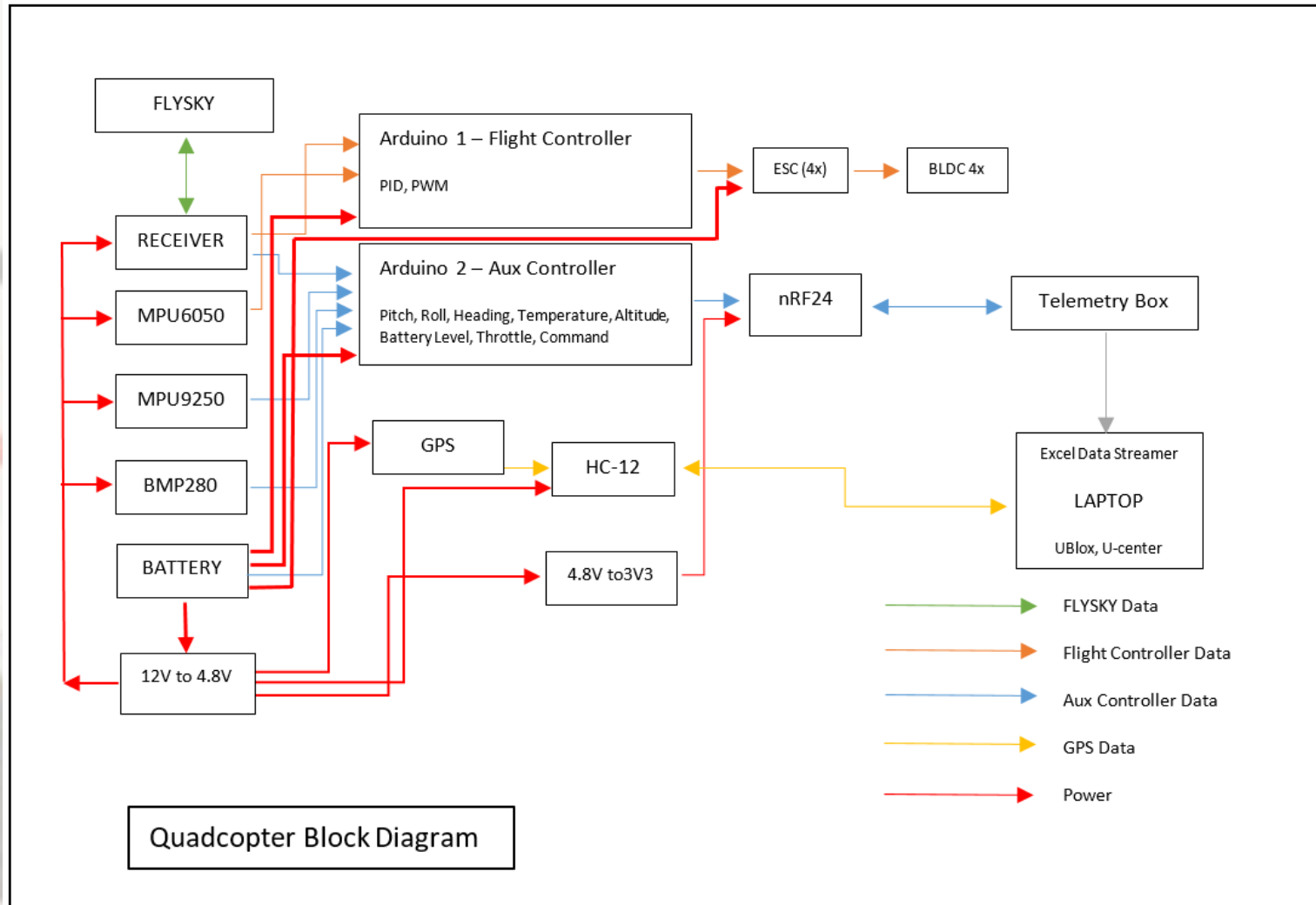


«Ανάπτυξη εκπαιδευτικού τετρακόπτερου με δυνατότητα τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο»

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### Μπλοκ Διάγραμμα







## Μελλοντικές Αναβαθμίσεις

- Το MPU9250 ως κύριο IMU στον Flight Controller
- Σχεδιασμός Printed Circuit Board ( ελάττωση βάρους και ηλεκτρικού θορύβου λόγω καλωδιώσεων)
- Χρήση 3D εκτυπωτή για δημιουργία Module Cases
- Time of Flight Sensor ( Obstacle Avoidance ή Terrain Following ή Altitude Hold )
- Διαφορετικά set PID coefficients ανάλογα με το payload ( διαθέσιμα δύο κανάλια προς χρήση)
- Φωτισμός

Γαλάνης Παύλος

[pgalanisgr@yahoo.com](mailto:pgalanisgr@yahoo.com)

[Galanis.pavlos@haicorp.com](mailto:Galanis.pavlos@haicorp.com)

[linkedin.com/in/paul-galanis-2576b51a2](https://www.linkedin.com/in/paul-galanis-2576b51a2)