

# Upravljanje bespilotnom letjelicom uporabom mobilne mreže u slučaju gubitka komunikacije

---

Iličić, Ivona

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:300127>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Ivona Iličić**

**UPRAVLJANJE BESPILOTNOM LETJELICOM UPORABOM  
MOBILNE MREŽE U SLUČAJU GUBITKA KOMUNIKACIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2020.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **DIPLOMSKI RAD**

**UPRAVLJANJE BESPILOTNOM LETJELICOM UPORABOM  
MOBILNE MREŽE U SLUČAJU GUBITKA KOMUNIKACIJE**

**CONTROLLING UNMANNED AERIAL VEHICLE USING MOBILE  
NETWORK IN CASE OF COMMUNICATION LOSS**

Mentor: doc. dr. sc. Mario Muštra

Studentica: Ivona Iličić

JMBAG: 0135233521

Zagreb, rujan 2020.

Zagreb, 2. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**  
Predmet: **Lokacijski i navigacijski sustavi**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 5914

Pristupnik: **Ivona Iličić (0135233521)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Upravljanje bespilotnom letjelicom uporabom mobilne mreže u slučaju gubitka komunikacije**

### Opis zadatka:

Temeljito opisati navigacijske sustave kakvi se koriste kod bespilotnih letjelica i objasniti princip njihovog rada te navesti glavna ograničenja. Navesti značajke sustava upravljanja bespilotnih letjelica, dijelove frekvencijskog spektra koji se koriste u tu svrhu i dopuštene odašiljačke snage. Objasniti značajke protokola MAVLink koji se koristi za upravljanje bespilotnim letjelicama. Izraditi komunikaciju mikrokontrolera tipa Arduino s upravljačkim sustavom letjelice. Opisati arhitekturu sustava za upravljanje bespilotnom letjelicom putem mobilne mreže. Razviti i demonstrirati funkcionalnost sustava koji omogućava davanje uputa bespilotnoj letjelici putem mobilne mreže u slučaju gubitka komunikacije s upravljačkom stanicom.

Mentor:



---

doc. dr. sc. Mario Muštra

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



# UPRAVLJANJE BESPILOTNOM LETJELICOM UPORABOM MOBILNE MREŽE U SLUČAJU GUBITKA KOMUNIKACIJE

## SAŽETAK

Ubrzani razvoj bespilotnih letjelica dovodi do povećane potražnje i velikog interesa korisnika za iste. Primjenjuju se u širokom spektru zanimanja, od građevine i poljoprivrede do profesionalnog fotografiranja i raznih individualnih interesa za same letjelice. Upravo zbog učestale uporabe bespilotnih letjelica počinje se razmišljati o rješenjima potencijalnih problema na koje bi korisnici mogli naići. Kroz rad je opisano funkcioniranje sustava temeljenog na komunikaciji između GSM modula, mikrokontrolera Arduino i kontrolora leta Pixhawk. Cilj sustava je da u slučaju prekida komunikacije, SMS poruka pokreće implementaciju putne točke na koju se šalje letjelica, na taj način sprječavajući gubitak kontrole nad bespilotnom letjelicom.

**Ključne riječi:** bespilotna letjelica, GSM modul, mikrokontroler Arduino, kontrolor leta Pixhawk

# **CONTROLLING UNMANNED AERIAL VEHICLE USING MOBILE NETWORK IN CASE OF COMMUNICATION LOSS**

## **SUMMARY**

The accelerated development of unmanned aerial vehicles (UAVs) leads to increased demand and great user interest in them. They are applied in a wide range of occupations, from construction and agriculture to professional photography and various individual interests for the UAVs. Precisely because of the frequent use of UAVs, solutions to potential problems that users might encounter are beginning to be considered. This work describes the functioning of the system based on communication between the GSM module, the Arduino microcontroller and the Pixhawk flight controller. The aim of the system is that in case of communication interruption, the SMS message initiates the implementation of the waypoint to which the UAV is sent, thus preventing the loss of control over the UAV.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle, GSM module, Arduino microcontroller, Pixhawk flight controller

## SADRŽAJ

1.	Uvod .....	1
2.	Navigacijski sustavi bespilotnih letjelica .....	3
2.1.	Globalni navigacijski satelitski sustav .....	3
2.1.1.	Global Positioning System .....	5
2.1.2.	GLONASS .....	7
2.1.3.	Galileo .....	7
2.1.4.	BeiDou .....	8
2.2.	Inercijalni navigacijski sustav .....	8
2.3.	Integrirani INS/GPS sustav .....	9
3.	Karakteristike i sustavi upravljanja bespilotnim letjelicama .....	11
3.1.	Klasifikacija bespilotnih letjelica .....	11
3.2.	Primjena u civilne i vojne svrhe .....	13
3.3.	Sustavi upravljanja bespilotnim letjelicama .....	14
4.	Protokol za upravljanje MAVLink .....	15
5.	Komunikacija mikrokontrolera Arduino s upravljačkim sustavom letjelice .....	20
6.	Arhitektura sustava za upravljanje bespilotnom letjelicom putem mobilne mreže ....	25
7.	Primjena sustava u stvarnom okruženju .....	32
8.	Zaključak .....	42
	Literatura .....	43
	Popis slika .....	46
	Popis kratica .....	47

## 1. Uvod

Razvojem tehnologije dolazi do ubrzanog razvoja mnogih tehnoloških rješenja, tako i bespilotnih letjelica. U početku su bile namijenjene isključivo za vojne svrhe, međutim tijekom vremena su postale dostupne i za komercijalne. Sve više korisnika pokazuje zanimanje za funkcionalnosti koje pružaju bespilotne letjelice. Pojedine poslove koje korisnik ne bi mogao odraditi ili bi mu oduzelo puno vremena i financijskih sredstava, uz pomoć bespilotne letjelice odradi u kratkom vremenskom periodu i ekonomski prihvatljivije.

Poput svih upravljanih sustava, tako i bespilotne letjelice mogu doći u nepovoljan položaj uslijed gubitka komunikacije s upravljačkom stanicom. Do gubitka komunikacije može doći iz raznih razloga. Jedan od razloga može biti slučajno ili namjerno ometanje signala. Da bi se spriječili potencijalni gubici, kroz ovaj diplomski rad razvijen je sustav koji upravlja bespilotnom letjelicom u slučaju prekida komunikacije.

Svrha ovog rada je detaljno objasniti sve komponente koje sudjeluju u radu bespilotnih letjelica od navigacijskih sustava, protokola koji se koriste, sustava upravljanja bespilotnim letjelicama do dijelova sustava koji bi upravljao letjelicom u slučaju prekida.

Cilj rada je razviti sustav koji će uz pomoć terminalnog uređaja upravljati bespilotnom letjelicom u slučaju prekida komunikacije.

Diplomski rad je podijeljen u osam cjelina:

1. Uvod
2. Navigacijski sustavi bespilotnih letjelica
3. Karakteristike i sustavi upravljanja bespilotnim letjelicama
4. Protokol za upravljanje MAVLink
5. Komunikacija mikrokontrolera Arduino s upravljačkim sustavom letjelice
6. Arhitektura sustava za upravljanje bespilotnom letjelicom putem mobilne mreže
7. Primjena sustava u stvarnom okruženju
8. Zaključak.



U drugom poglavlju pobliže su objašnjeni navigacijski sustavi bespilotnih letjelica koji se trenutno koriste te su navedeni najčešće korišteni globalni navigacijski satelitski sustavi, u kojim područjima djeluju i koji su im nedostaci.

U trećem poglavlju definirane su podjele bespilotnih letjelica po različitim kategorijama, definirano je na koji način se koriste u civilne i vojne svrhe te su navedeni frekvencijski pojasevi u kojima se koriste i načini upravljanja letjelicama.

U četvrtom poglavlju je detaljno objašnjen MAVLink, komunikacijski protokol pomoću kojeg se komunicira s bespilotnim letjelicama. Navedene su dvije glavne verzije i definirane uloge svih polja koji sadržanih u zaglavljjima protokola.

U petom poglavlju su navedene i pobliže objašnjene komponente između kojih se odvija komunikacija, koji su potrebni preduvjeti za ostvarenje komunikacije i kako će se komunikacija odvijati.

U šestom poglavlju su definirane komponente korištene u izradi sustava za upravljanje bespilotnom letjelicom. Također, sadrži shematski prikaz sustava te arhitekturu samog sustava.

U sedmom poglavlju su prikazani svi dijelovi korišteni u izradi sustava, navedene su knjižnice korištene u izradi koda te prikaz koda u isječcima radi lakšeg razumijevanja.

Osmo poglavlje donosi zaključne osvrte na rad.

Na kraju rada se uz popis literature nalazi i popis slika te popis kratica koji se nalaze u samom radu.

## 2. Navigacijski sustavi bespilotnih letjelica

Navigacija je znanost i vještina vođenja raznih vozila (brodova, zrakoplova i drugih objekata) s jedne točke na drugu bilo vodenim, zračnim putem ili kroz svemir. Određivanje smjera, udaljenosti između dva mjesta i određivanje pozicije vozila spada pod osnovne zadatke navigacije. Navigacijski sustavi mogu biti prema [1]:

- Neautonomni – postupak određivanja parametara oslanja se na infrastrukturu izvan sredstva (npr. elektronički sustavi)
- Autonomni – parametri se određuju samostalno u sredstvu (npr. inercijalni sustavi).

Pod suvremenom navigacijom podrazumijeva se istovremeno korištenje dvaju neovisnih navigacijskih sustava. Danas se koristi globalni navigacijski satelitski sustav – GNSS kao primarni pozicijski sustav, a kao sekundarni ili kontrolni pozicijski sustav koriste se radarska, zbrojena, elektronička, inercijalna navigacija i dr. Izazov kod modeliranja bespilotnih letjelica je pozicioniranje i navigacija letjelica, bez obzira koriste li se one u vojne ili civilne svrhe. Danas, kao što je prethodno spomenuto, se najčešće koriste dva senzora: GNSS i INS (inercijalni navigacijski sustav). [2], [3]

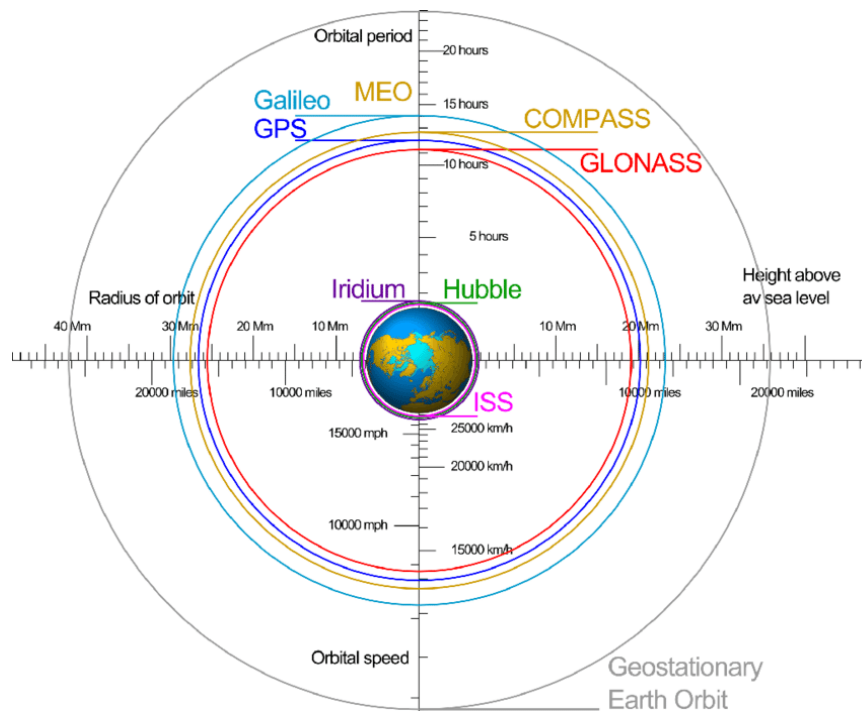
### 2.1. Globalni navigacijski satelitski sustav

Gotovo sve bespilotne letjelice su opremljene s prijemnikom GNSS-a za određivanje točne lokacije. GNSS prijemnik prima i obrađuje sve satelitske signale između prijemnika i satelita. Na uspješnost pozicioniranja GNSS-a utječe nekoliko čimbenika, uključujući pristranost satelitskog sata, atmosfersko kašnjenje i toplinski šum prijemnika. [4], [5]

Učinkovitost GNSS-a se ocjenjuje korištenjem četiri kriterija, prema [6]:

1. Točnost – razlika između izmjerenog i stvarnog položaja, brzine ili vremena prijemnika.
2. Integritet – sposobnost sustava da osigura prag pouzdanost i alarm u slučaju anomalija u podacima o pozicioniranju.
3. Kontinuitet – sposobnost sustava da funkcionira bez prekida.
4. Dostupnost – postotak vremena kada signal ispunjava gornje kriterije točnosti, integriteta i kontinuiteta.

Naziv GNSS objedinjuje četiri glavne satelitske tehnologije: GPS (eng. *Global Positioning System*), GLONASS (rus. *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), Galileo i Beidou. Svaki od njih sastoji se od tri segmenta: svemirski, kontrolni i korisnički segment. Globalna pokrivenost postiže se konstelacijom od 24 do 30 satelita koji se nalaze u srednjoj Zemljinoj orbiti – MEO (eng. *Medium Earth Orbit*). MEO se nalazi na udaljenosti od 5 000 do 20 000 km od površine Zemlje. GNSS sustavi su smješteni u MEO orbiti, iznad nje se nalazi geostacionarna orbita – GEO (eng. *Geostationary Earth Orbit*) na visini od 35 800 km, kao što je prikazano na slici 1. Kako se tu nalaze najveći sateliti i na velikoj udaljenosti kruže oko Zemlje, potrebna su samo tri GEO satelita za potpuno pokrivanje komunikacije na Zemlji. GEO orbita je značajna za GNSS sustave jer se u njoj nalaze satelitski sustavi za poboljšanje točnosti lociranja. Ispod MEO orbite nalazi se niska Zemljina orbita – LEO (eng. *Low Earth Orbit*) na visini od 500 do 2 000 km. Blizina Zemlje čini ih idealnim za ostvarivanje komunikacije velikih brzina i malog kašnjenja. LEO sateliti su vrlo mali, što ih čini mnogo bržim i jeftinijim za proizvodnju od satelita drugih orbita. Međutim, mala udaljenost od Zemlje znači da je potrebno mnogo više satelita kako bi se osigurala potpuna globalna pokrivenost. [7], [8]



Slika 1. GNSS konstelacija satelita, [9]

### 2.1.1. Global Positioning System

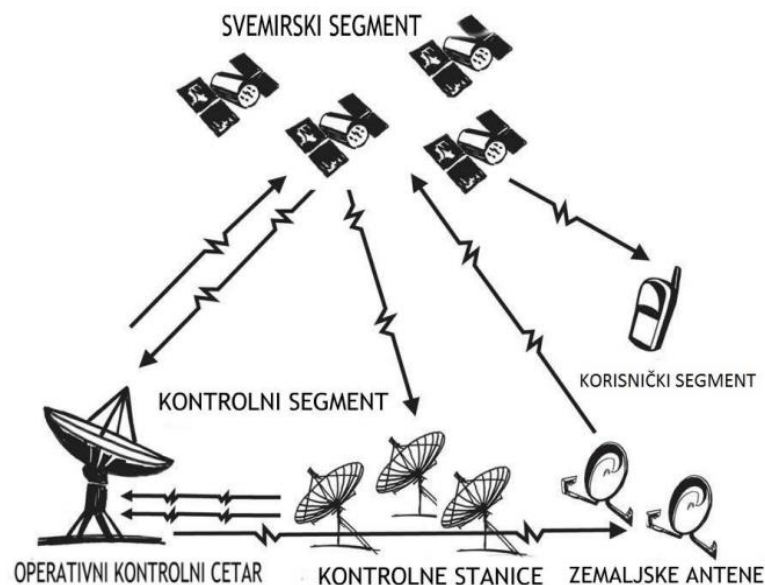
GPS je prvi globalni navigacijski satelitski sustav razvijen od strane Ministarstva obrane SAD-a u svrhu zadovoljenja vojnih potreba da se precizno odredi pozicija, brzina i vrijeme u jedinstvenom referentnom sustavu, bilo gdje na Zemlji ili blizu Zemljine površine. Sastoji se od tri segmenta (slika 2.): svemirskog (sateliti), kontrolnog (zemaljske stanice) i korisničkog segmenta (korisnici i njihovi prijemnici).

Svemirski segment sastoji se od 27 aktivnih satelita (24 operativna i tri rezervna). Nalaze se u MEO, na 20 183 km iznad površine Zemlje. Sateliti su složeni u šest orbitalnih ravnina stoga GPS prijemnik u svakom trenutku prima signale od barem četiri satelita. Sateliti emitiraju radio signale male snage nekoliko frekvencija. Svrha signala je da se izračuna vrijeme potrebno da signal stigne od satelita do GPS prijemnika na Zemlji. Vrijeme pomnoženo s brzinom svjetlosti daje udaljenost od satelita do GPS prijemnika. [10]

Kontrolni segment sastoji se od glavne kontrolne postaje koja na temelju prikupljenih podataka sa 16 nadzornih stanica, optimalno raspoređenih po cijelom svijetu koje kontinuirano prate sve GPS satelite, izračunava odstupanja pozicija svakog satelita od

preciznih orbitalnih modela i odstupanja njihovih atomskih satova od GPS vremena. [11], [12]

Korisnički segment čine svi korisnici koji koriste GPS, odnosno GPS prijemnici. GPS prijemnik mora znati dvije stvari ako želi otkriti svoj položaj na Zemlji, a to je koji je položaj satelita i koja se udaljenost pojedinog satelita od prijemnika.



Slika 2. GPS segmenti, [13]

Prijem GPS signala je jedan od ograničenja GPS navigacijskog satelitskog sustava. Za pravilno funkcioniranje GPS prijemnik zahtijeva nesmetan prijem signala s najmanje četiri GPS satelita. Signali se šire od satelita do antene prijemnika, problem na tom putu nastaje kada signal treba proći kroz vodu, tlo, zidove ili druge prepreke. Stoga se GPS ne može koristiti u podmornicama, niti za podzemno pozicioniranje i snimanje, na primjer u rudnicima ili tunelima. Kod ograničenja GPS navigacijskog satelitskog sustava potrebno je još spomenuti integritet GPS signala i točnost GPS signala. Što se tiče integriteta, položaj GPS prijemnika se određuje mjerenjem dometa do GPS satelita, koristeći satelitske položaje izvedene iz informacija kodiranih u prenesenom signalu. Jedno mjerenje za svaki od četiri satelita obično daje jedinstveno rješenje položaja prijemnika. Međutim, pogrešan položaj satelita ili pogrešno mjerenje dometa, rezultira netočnim izračunom ili položajem prijemnika. Ako se ne otkriju neispravni signali, korisnik neće znati da je prikazani položaj pogrešan. Kod točnosti GPS signala treba naglasiti da GPS prijemnik mjeri vrijeme potrebno da signal stigne

od satelita do prijemnika. Vrijeme putovanja signala pretvara se u mjerenje dometa množenjem s brzinom svjetlosti. Međutim, to mjerenje je podložno nizu različitih grešaka, od kojih se svaka može izraziti kao pogreška korisničkog raspona. [14]

### **2.1.2. GLONASS**

GLONASS je ruski globalni navigacijski satelitski sustav. Također se može podijeliti u tri segmenta: svemirski, kontrolni i korisnički segment. Svemirski segment sastoji se od 24 satelita, od kojih je 21 aktivan i 3 rezervna. Sateliti su raspoređeni u tri srednje Zemljine orbitalne ravnine (MEO) s razmakom od 120°. U svakoj ravnini nalazi se osam satelita s međusobnim razmakom od 45°. Sateliti su smješteni na nadmorskoj visini od 19 100 km s inklinacijom od 64,8°. Orbitalna konstelacija, kakvu ima GLONASS, omogućava konstantnu globalnu pokrivenost na Zemljinoj površini i iznad nje do nadmorske visine od 2 000 km. [11]

### **2.1.3. Galileo**

Galileo je autonoman europski globalni navigacijski satelitski sustav koji pruža visoko precizan globalni servis pozicioniranja. Prvi je sustav za globalno satelitsko pozicioniranje, navigaciju i određivanje vremena kojim upravljaju civilne službe i zajednica država, a pokrenula da je Europska komisija i razvijen je zajedno s Europskom svemirskom agencijom.

Sustav se sastoji od 27 operativnih satelita i 3 rezervna. Sateliti kruže na visini od 23 222 km iznad površine Zemlje u tri srednje Zemljine orbite s inklinacijom od 56° u odnosu na ekvator. Sateliti su ravnomjerno raspoređeni tako da u svakoj orbiti bude po devet operativnih i jedan rezervni satelit. Inklinacija orbita odabrana je tako da osigura dobru pokrivenost na polarnim širinama koje su od GPS-a zapostavljene. [15]

Neki od nedostataka Galileo navigacijskog satelitskog sustava su:

- Nedostatak integriteta
- Nedostatak dostupnosti i kontinuiteta usluge
- Nedostatak točnosti (za kritične faze leta)
- Nema kontrole od strane međunarodnog civilnog tijela. [15]

#### **2.1.4. BeiDou**

BeiDou je kineski navigacijski satelitski sustav. Sastoji se od regionalnog komunikacijskog navigacijskog sustava i globalnog navigacijskog satelitskog sustava. Program su inicijalno pokrenule kineske vojne snage, a danas je dvojnog karaktera, razvijen da zadovolji potrebe civilnih i vojnih korisnika.

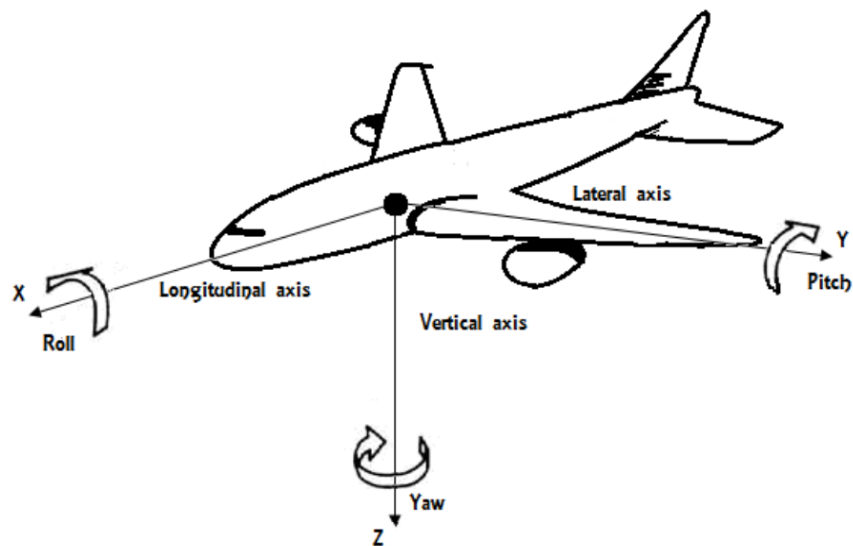
Svemirski segment, za razliku od prethodno navedenih globalnih navigacijsko satelitskih sustava, ima satelite raspoređene u tri različite Zemljine orbite. Ima sveukupno 35 satelita, od kojih se pet satelita nalazi u geostacionarnoj Zemljinoj orbiti, 27 u srednjoj Zemljinoj orbiti i tri satelita su u inkliniranoj geosinkroniziranoj orbiti (IGSO). Sateliti u GEO orbiti nalaze se na nadmorskoj visini od 35 786 km. Sateliti MEO orbite su na nadmorskoj visini od 21 528 km i imaju nagib od 55° prema ekvatorijalnoj ravnini. Sateliti IGSO orbite međusobno su razmaknuti za 120° s inklinacijskim kutom od 55°. GEO i IGSO satelitima se pokriva teritorij Kine i rubna područja Azije, a MEO sateliti omogućuju potpunu globalnu pokrivenost Zemlje. [11]

#### **2.2. Inercijalni navigacijski sustav**

Inercijalna navigacija je samostalna navigacijska tehnika u kojoj se koriste mjerenja akcelerometra i žiroskopa za praćenje položaj i orijentacije objekta u odnosu na poznatu početnu točku, smjer i brzinu. Inercijalne mjerne jedinice – IMU (eng. *Inertial Measurement Units*) obično sadrže tri ortogonalna žiroskopa i tri ortogonalna akcelerometra za mjerenje kutne brzine i linearnog ubrzanja. Obradom signala s tih uređaja moguće je pratiti položaj i orijentaciju objekta. Inercijalna navigacija se koristi u širokom rasponu primjena, uključujući navigaciju zrakoplova, svemirske letjelice, podmornice i brodova. Napretkom tehnologije omogućena je proizvodnja malih i laganih inercijalnih navigacijskih sustava. Ti pomaci šire spektar primjene inercijalne navigacije na područja kao što je praćenje pokreta ljudi i životinja. [16]

Inercijalne mjerne jedinice su elektronički uređaji koji se koriste za otkrivanje trenutne orijentacije objekta. Kao mjerni uređaji moraju ispunjavati skup zahtjeva, npr. najmanja moguća veličina i težina, podesivi filtrirani izlazni podaci. Senzor bi trebao biti sposoban za rad u ekstremnim uvjetima. Trebaju dostavljati visokokvalitetne podatke

najbrže moguće. Da bi ispunili taj uvjet, moderne inercijalne mjerne jedinice koriste najnovija dostignuća u tehnologiji. Sastoje se od najmanje dvije različite vrste senzora. Prvi tip je akcelerometar koji mjeri linearno ubrzanje, drugi je žiroskop koji mjeri kutno ubrzanje. Jedan od najpopularnijih dodatnih senzora je referentni magnetometar, koji se koristi za otkrivanje sjevernog smjera. Od ostalih senzora se koriste temperaturni za algoritme kompenzacije temperature i u slučaju bespilotnih letjelica se koristi visinomjer. Linearni akcelerometri mjere linearno ubrzanje objekta i tako otkriva smjer kretanja objekta. Kako bi se moglo mjeriti kretanje bez obzira na tip autonomnog uređaja obično postoje tri mjerne osi X, Y i Z kao što je prikazano na slici 3. Za svaku os postoji zaseban linearni akcelerometar. Moderni senzori omogućuju mjerenje podataka na sve tri osi pomoću jedinstvenog čipa. [17]

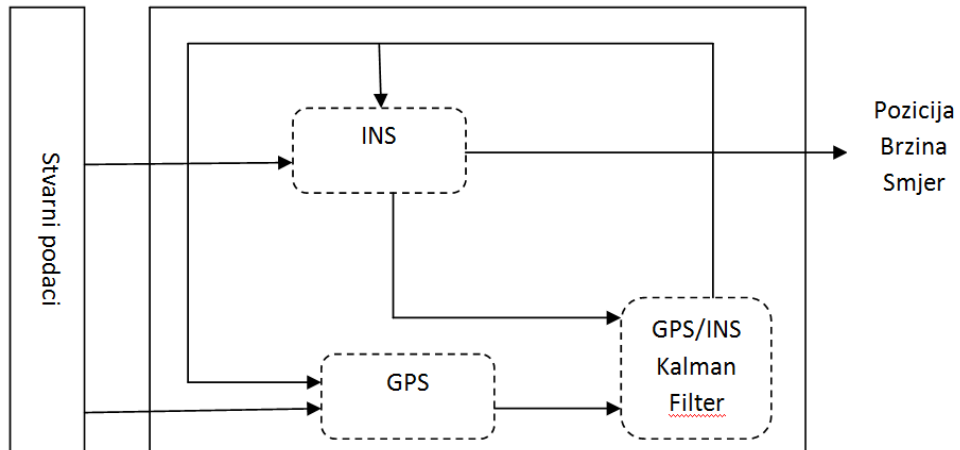


Slika 3. Prikaz osi, [17]

### 2.3. Integrirani INS/GPS sustav

Integrirani navigacijski sustav zahtjeva složenu razinu povezivanja između GPS-ovih sirovih mjerenja i navigacijskog rješenja inercijalne mjerne jedinice. Ta vrsta integriranog navigacijskog sustava pruža preciznije rješenje za navigaciju jer koristi neobrađena GPS mjerenja i ne zahtjeva potpuni skup signala od četiri satelita. Kalmanov filter je uobičajen način implementacije ove integracije. [18]





Slika 4. Integrirani navigacijski sustav, [18]

Arhitektura implementiranog, čvrsto spojenog integriranog navigacijskog sustava prikazana je na slici 4. Blok inercijskog navigacijskog sustava odgovoran je za obradu podataka inercijalne mjerne jedinice i davanje navigacijskog rješenja. GPS blok daje sirova mjerenja, GPS/INS Kalman filter blok obrađuje IMU i GPS podatke te pruža povratne informacije INS i GPS blokovima. GPS blok može prenositi stvarna GPS mjerenja do GPS/INS Kalman filter bloka. GPS/INS Kalman filter blok je odgovoran za procjenu stanja INS-a i GPS-a za pružanje rješenja za točnu poziciju, brzinu i položaj. [18]

### 3. Karakteristike i sustavi upravljanja bespilotnim letjelicama

Bespilotna letjelica ili UAV (*eng. Unmanned Aerial Vehicle*) je letjelica ili zrakoplov bez posade, poznatija pod nazivom *dron*. Letjelicom se može upravljati na daljinu, ona može letjeti samostalno uporabom unaprijed programiranog plana leta ili pomoću složenih autonomnih dinamičkih sustava. Bespilotne letjelice se mogu koristiti u vojne i civilne svrhe. Sukladno namjeni različite karakteristike letjelica dobivaju na važnosti.

#### 3.1. Klasifikacija bespilotnih letjelica

Bespilotne letjelice se mogu klasificirati prema velikom broju karakteristika. Razvrstavanje prema karakteristikama korisno je za dizajnere, proizvođače i potencijalne kupce jer omogućuje tim grupama da usklade svoje potrebe s performansama bespilotnih letjelica (slika 5.). Važne karakteristike prema [19] su:

1. Masa
2. Izdržljivost i domet
3. Maksimalna visina
4. Opterećenje krila
5. Vrsta motora.



Slika 5. Vrste bespilotnih letjelica, [20]

Po masi se bespilotne letjelice dijele na:

- „super teške“ bespilotne letjelice, čija je masa veća od dvije tone
- Letjelice „velike težine“, čija je masa između 200 i 2 000 kg
- Letjelice srednje težine, čija je masa između 50 i 200 kg
- „lagane“ letjelice, mase između 5 i 50 kg
- Mikro bespilotne letjelice, čija je masa ispod 5 kg. [19]

Klasifikacija prema izdržljivosti i dometu:

- Bespilotne letjelice velike izdržljivosti, mogu ostati u zraku 24 sata ili više, domet za takve letjelice je veći od 1 500 km
- Bespilotne letjelice srednje izdržljivosti su one koje imaju izdržljivost između 5 i 24 sata, domet takvih letjelica je između 100 i 400 km
- Letjelice niske izdržljivosti, imaju izdržljivost manju od 5 sati, koriste se za kratke misije, domet je manji od 100 km. [19]

Prema maksimalnoj visini bespilotne letjelice se dijele na:

- Letjelice niske visine, lete do visine od 1 000 m
- Srednje visine, kategorija letjelica koje lete na visini između 1 000 i 10 000 m
- Velike nadmorske visine, sve letjelice koje mogu letjeti na visini iznad 10 000 m. [19]

Klasifikacija bespilotnih letjelica prema opterećenju krila:

- Bespilotne letjelice s opterećenjem krila većim od  $100 \text{ kg/m}^2$  klasificiraju se kao visoko opterećene
- Letjelice s opterećenjem krila manjim od  $100 \text{ kg/m}^2$  i većim od  $50 \text{ kg/m}^2$  su klasificirani kao srednje opterećene
- Sve letjelice s opterećenjem krila manjim od  $50 \text{ kg/m}^2$  su nisko opterećene. [19]

Prema vrsti motora:

- Turbo fan
- Dvotaktni
- Klipni
- Rotacioni
- Turboprop
- Električni. [19]

### **3.2. Primjena u civilne i vojne svrhe**

Bespilotne letjelice su prvenstveno razvijane radi zadovoljavanja vojnih potreba, međutim tijekom vremena primjena letjelica se proširila i u civilne svrhe. Što se tiče civilne primjene, bespilotne letjelice se koriste u poljoprivredi, za procjenu štete i osiguranja, u građevini, za medije i zabavu i dr.

U poljoprivredi letjelice mogu stvoriti optimalnu shemu sadnje, nadzirati usjeve i primjenjivati precizne količine pesticida i herbicida. Pomažu pri procjenama štete uslijed prirodnih katastrofa te pronalaska unesrećenih, u građevini prate napredak u gradnji, pregledavaju lokacije kamenoloma. Osim toga koriste se i u filmskoj industriji za snimanje filmskih scena, bez korištenja skupih helikoptera. Kako su cijene letjelica postale pristupačnije, reklamne agencije su ih počele koristiti za svoje potrebe, nogometni timovi za taktičke analize, itd. [21]

U vojne svrhe se bespilotne letjelice mogu koristiti:

- kao mete, za vježbu vojnim lovcima u zraku i na tlu, predstavljaju neprijateljske avione ili bombe
- kao izviđačke letjelice, koriste se za špijuniranje neprijatelja
- kao borbene letjelice, za uništenje neprijateljske infrastrukture, teritorija, itd.
- kao letjelice za razvoj, za istraživanje novih tehnologija i implementaciju istih u već postojeće letjelice. [22]

### 3.3. Sustavi upravljanja bespilotnim letjelicama

Za upravljanje bespilotnim letjelicama su dodijeljeni frekvencijski pojasevi u 12, 14, 20 i 30 GHz. Postoje tri načina upravljanja bespilotnim letjelicama, a to su: daljinsko upravljanje, polu-autonomno i autonomno upravljanje.

Bespilotne letjelice na daljinsko upravljanje – RVPs (eng. *Remotely Piloted Vehicles*) zahtijevaju stalnu kontrolu od strane operatora koji se nalazi na Zemlji. Trenutno je vrlo malo modernih letjelica kojima se upravlja na daljinu. U 1980-im i ranim 1990-ima počelo se razvijati sustave kojima se uz udaljeno upravljanje moglo upravljati i unaprijed programiranim sustavom vođenja. To su bili počeci razvoja autonomnih bespilotnih letjelica. [23]

Polu-autonomno upravljanje bespilotnom letjelicom zahtjeva daljinsko upravljanje, odnosno pomoć od strane operatora na Zemlji u kritičnim dijelovima leta. Kritični dijelovi leta su polijetanje, slijetanje, operacije korištenja oružja i neki izbjegavajući manevri. Operator mora preuzeti potpunu kontrolu nad letjelicom prije leta, tijekom uzlijetanja, slijetanja i kada se letjelica nalazi u blizini baze. Kada je letjelica u zraku uključuje se autopilot i letjelica počinje slijediti unaprijed programiranu rutu. Operator je odgovoran za letjelicu tijekom cijele operacije te u bilo kojem trenutku može preuzeti kontrolu. [23]

Teoretski, potpuno autonomno upravljanje da bi se postigao cilj, ne zahtjeva ljudski doprinos. Samostalna letjelica prati i procjenjuje stanje vlastite konstrukcije i kontrolira ugrađena sredstva unutar programiranih ograničenja. Sofisticirani autopilot omogućava letenje i obavljanje misije na programiranim rutama bez upravljanja ljudskog faktora. Bespilotnim letjelicama u potpunosti upravlja putno računalo, a jedina uloga operatora na zemaljskoj jedinici je nadziranje letjelice, tj. provjera odvija li se sve kako je zamišljeno. [23]

#### 4. Protokol za upravljanje MAVLink

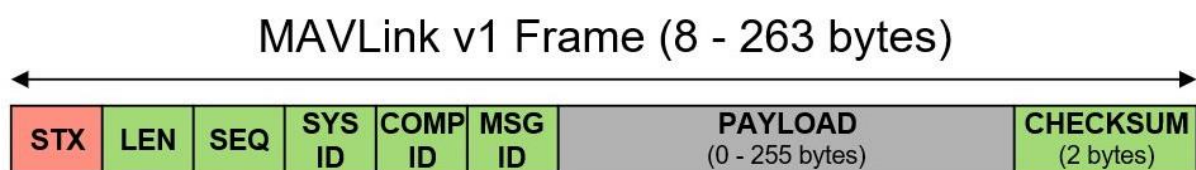
MAVLink (eng. *Micro Air Vehicle Link*) je komunikacijski protokol za bespilotne letjelice. Definira skup dvosmjernih poruka koje se razmjenjuju između bespilotnih letjelica i zemaljskih stanica. Koristi se u većim sustavima autopilota, uglavnom ArduPilot i PX4 te pruža razne mogućnosti, ne samo za nadgledanje i kontrolu misija bespilotnih letjelica, već i za njihovu integraciju na Internet. Zemaljska stanica šalje komande i kontrole bespilotnoj letjelici, dok letjelica šalje telemetrijske i statusne informacije. [24]

MAVLink je binarni telemetrijski protokol dizajniran za sustave ograničenih resursa i ograničene širine pojasa. Implementiran je u dvije glavne verzije: v1.0 i v2.0 (v2.0 može raščlaniti i slati v1.0 pakete). Telemetrijski tokovi podataka šalju se višestruko, dok aspekti protokola koji mijenjaju konfiguraciju sustava i zahtijevaju zajamčenu isporuku poput protokola misije ili parametara protokola se šalju od točke do točke s ponovnim slanjem. Format MAVLink-a optimiziran je za sustave ograničenih resursa, stoga redoslijed polja nije isti kao u XML (eng. *Extensible Markup Language*) specifikacijama. U protokolu se razvrstavaju sva polja paketa prema veličini, od većih do manjih. Razvrstavanje se vrši korištenjem algoritma sortiranja, koji osigurava da sva polja koja nije potrebno preurediti ostaju u istom redoslijedu. To sprječava probleme s usklađivanjem u sustavima za kodiranje/dekodiranje i omogućuje učinkovito pakiranje/raspakiranje. [25]

Na temelju protokola MAVLink definira se struktura poruka te kako se iste stavljaju u seriju na aplikacijskom sloju. Te poruke se zatim prosljeđuju na niže slojeve (transportni sloj, fizički sloj) koji ih prosljeđuju u mrežu. Prednost protokola MAVLink je što podržavaju različite tipove transportnih slojeva i medija zahvaljujući laganoj strukturi. Može se prenositi putem WiFi-a (eng. *Wireless Fidelity*), Ethernet-a (TCP/IP (eng. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*)) ili serijskog telemetrijskog kanala niske propusnosti koji radi na sub-GHz frekvencijama od 433 MHz, 868 MHz ili 915 MHz. Sub-GHz frekvencije omogućavaju postizanje velikog komunikacijskog dometa za daljinsko upravljanje bespilotnom letjelicom. Maksimalna brzina prijenosa podataka može doseći 250 kbit/s, a najveća udaljenost je oko 500 m, koja uvelike ovisi o okruženju, razini buke i mjestu postavljanja antene. Druga alternativa je korištenje mrežnog sučelja, koje je obično WiFi ili Ethernet i strujanje MAVLink

poruke putem IP mreže. U tom slučaju, autopilot koji pokreće MAVLink protokol obično podržava i UDP (eng. *User Datagram Protocol*) i TCP (eng. *Transmission Control Protocol*) vezu na transportnom sloju između zemaljske stanice i bespilotne letjelice, ovisno o razini pouzdanosti koju zahtjeva aplikacija. Naravno, općepoznato je da UDP je komunikacijski protokol koji ne zahtjeva konekciju između klijenta i poslužitelja te nema mehanizam koji osigurava pouzdanu isporuku poruka, ali pruža brzu i laku alternativu za strujanje poruka u stvarnom vremenu. S druge strane, TCP je pouzdan protokol orijentiran na vezu, pruža bolju pouzdanost zahvaljujući mehanizmu potvrde isporuke poruka. Može biti podložan zagušenjima i teškom upravljanju vezom. Izbor transportnog protokola prepušten je korisniku, ovisno o zahtjevima koje ima vezane za razmjenu poruka između bespilotne letjelice i zemaljske stanice. [26]

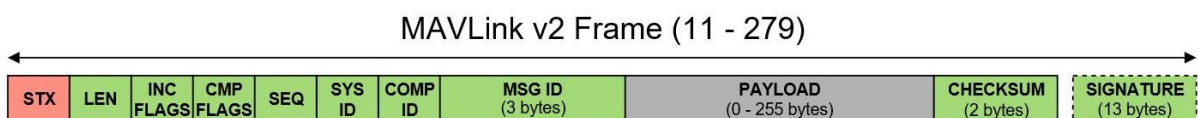
Komunikacija bespilotne letjelice sa zemaljskom stanicom odvija se razmjenom MAVLink poruka, koje su u binarnom obliku. Binarni oblik znači da je kontekst poruke pretvoren u niz byte-ova kako bi se prenijela putem mreže. Primatelj poruke u binarnom obliku vrši obrnutu pretvorbu kako bi mogao pročitati izvorno značenje poslanih poruka. Binarno oblikovanje je značajno po tome što maksimalno smanjuje veličinu prenošene poruke u usporedbi sa XML ili čak JSON (eng. *JavaScript Object Notation*). Svaka MAVLink poruka sadrži zaglavlje priloženo tijelu poruke. Zaglavlje nosi informacije o poruci, dok tijelo prenosi sadržaj poruke. [26]



Slika 6. Zaglavlje MAVLink v1.0, [26]

Zaglavlje MAVLink v1.0 prikazano na slici 6. sadrži osam važnih dijelova. Prvo polje je STX i odnosi se na simbol koji predstavlja početak MAVLink okvira. U MAVLink v1.0 STX je jednak posebnom simbolu 0xFE. Drugo polje (LEN) predstavlja dužinu poruke u byte-ovima i kodira se u 1 B. Treće polje (SEQ) označava redni broj poruke, kodiran je u 1 B i ima vrijednost od 0 do 255. Nakon što dosegne vrijednost 255, redni broj se ponovno postavlja na 0 i povećava se svakom generiranom porukom. Redni broj poruke je bitan za otkrivanje gubitaka u prijemniku. Četvrto polje (SYS ID) predstavlja ID sustava. Svaka bespilotna letjelica

trebala bi imati svoj ID sustava, posebno ako njom upravlja zemaljska stanica. Zemaljskoj stanici se obično dodjeljuje broj 255 kao ID sustava. Nedostatak kod MAVLink v1.0 je to što on ograničava broj bespilotnih letjelica kojima upravlja jedna zemaljska stanica na 254, jer je ID sustava kodiran u 1 B. Peto polje (COMP ID) je ID komponente, on identificira komponentu sustava koja šalje poruku. Šesto polje (MSG ID) predstavlja ID poruke koji se odnosi na vrstu poruke umetnute u korisne podatke. Na primjer, ukoliko je ID poruke jednak 0 onda se odnosi na poruku tipa *heartbeat*, koja pokazuje da je sustav „živ“, ukoliko je ID 33, onda se odnosi na poruku kojom se prenose GPS koordinate bespilotne letjelice. ID poruke je bitna informacija koja omogućuje raščlanjivanje korisnih podataka i izvlačenje informacija iz istog, ovisno o vrsti poruke. Polje PAYLOAD nalazi se odmah iz ID-a poruke i može zauzeti najviše 255 B. Posljednje polje je ciklička provjera redukcije – CRC (eng. *Cyclic Redundancy Check*). CRC provjerava je li se poruka promijenila tijekom prijenosa te imaju li pošiljatelj i primatelj istu poruku. Minimalna duljina MAVLink v1.0 iznosi 8 B za potvrđene pakete bez korisnih podataka, s druge strane, maksimalna duljina poruke iznosi 263 B za cijeli paket. [26]



Slika 7. Zaglavlje MAVLink v2.0, [26]

Zaglavlje MAVLink v2.0 protokola je kompatibilno s verzijom MAVLink v1.0 te uključuje nekoliko poboljšanja u odnosu na prethodnu verziju. Slika 7. prikazuje strukturu zaglavlja MAVLink v2.0, može se primijetiti da su neka polja ostala ista, dodana nova i neka postojeća izmijenjena. Prvo polje je oznaka početka okvira, a njegova vrijednost je 0xFD za MAVLink v2.0. Drugo polje je duljina poruke i isto je kao i u prethodnoj verziji. MAVLink uvodi dva nova polja prije polja SEQ. Prvo je INC FLAGS, utječe na strukturu poruke, to polje označava sadrži li paket neke značajke koje se moraju uzeti u obzir pri raščlanjivanju paketa. Na primjer, ukoliko je to polje jednako 0x01 znači da je paket potpisan i da je na kraju paketa dodan potpis. Drugo polje je CMP FLAGS, ne utječe na strukturu poruke, označava oznake koje se mogu zanemariti, ako se ne razumiju i ne sprječava obradu poruke, čak i ako se oznaka ne može protumačiti. Na primjer, može se odnositi na oznake koje označavaju prioritet paketa. Polja SEQ, SYS ID i COMP ID su ista kao i u zaglavlju MAVLink v1.0. Međutim, ID poruke je kodiran u 24 B, umjesto 8 B u prethodnoj verziji, što omogućava puno više vrsta



poruka, dosežući 16 777 215 mogućih tipova. Polje PAYLOAD može primiti do 255 B podataka, ovisno o tipu poruke. Polje CHECKSUM slično je kao u prethodnoj verziji, koristi izbornu polje za potpis od 13 B kako bi osigurao da je veza zaštićena od neovlaštenih promjena. To svojstvo značajno poboljšava sigurnosne aspekte prethodne verzije jer omogućuje provjeru autentičnosti poruke i potvrđuje da poruka dolazi od pouzdanog izvora. Polje potpis poruke se dodaje ako je polje INC FLAGS postavljeno na 0x01. Potpis poruke sadrži sljedeća polja:

- Link ID – veličine 1 B, predstavlja ID veze (kanala) koji se koristi za slanje paketa. Svaki kanal koji se koristi za slanje podataka bi trebao imati vlastiti Link ID. Omogućuje višekanalnu kontrolu nad bespilotnim letjelicama.
- Vremenska oznaka – kodirana je s 6 B. Povećava se za svaku poslanu poruku preko kanala. Primjenjuje se na svaki tok gdje je tok definiran s ID sustava, ID komponente i ID veze. Koristi se za izbjegavanje napada ponavljanjem.
- Potpis – kodira se s 6 B, izračunava se na temelju cjelovite poruke, vremenske oznake i tajnog ključa. Tajni ključ je zajednički simetrični ključ pohranjen na oba kraja, u autopilotu i zemaljskoj stanici. [26]

Potpis poruke kod MAVLink v2.0 unosi promjene u načinu obrade dolaznih poruka. Ako je poruka potpisana odbacuje se ako je:

- Vremenska oznaka primljene poruke starija od prethodnog paketa primljenog iz istog toka koji je identificiran (ID sustava, ID komponente i ID veze).
- Izračunati potpis različit od potpisa priloženog u poruci.
- Vremenska oznaka premašila minutu u odnosu na vremensku oznaku lokalnog sustava. [26]

MAVLink definira nekoliko vrsta poruka koje su identificirane ID-em poruke. Poruka čiji je ID niži od 255 uobičajene su za MAVLink v1.0 i MAVLink v2.0, a one čiji je ID poruke veći od 255 specifične su za MAVLink v2.0. MAVLink poruke se dijele u dvije klase:

- Poruke stanja – ove poruke se šalju od strane bespilotne letjelice prema zemaljskoj stanici i sadrže informacije o stanju letjelice, kao što su njen ID, lokacija, brzina i nadmorska visina.

- Komandne poruke – poruke koje se šalju od strane zemaljske stanice prema bespilotnoj letjelici, a u njima se šalje naredba da se izvrši neka radnja ili zadatak. Na primjer, zemaljska stanica može poslati naredbu bespilotnoj letjelici za polijetanje, slijetanje, odlazak na neku točku ili čak izvršenje misije s nekoliko točaka. [26]

## 5. Komunikacija mikrokontrolera Arduino s upravljačkim sustavom letjelice

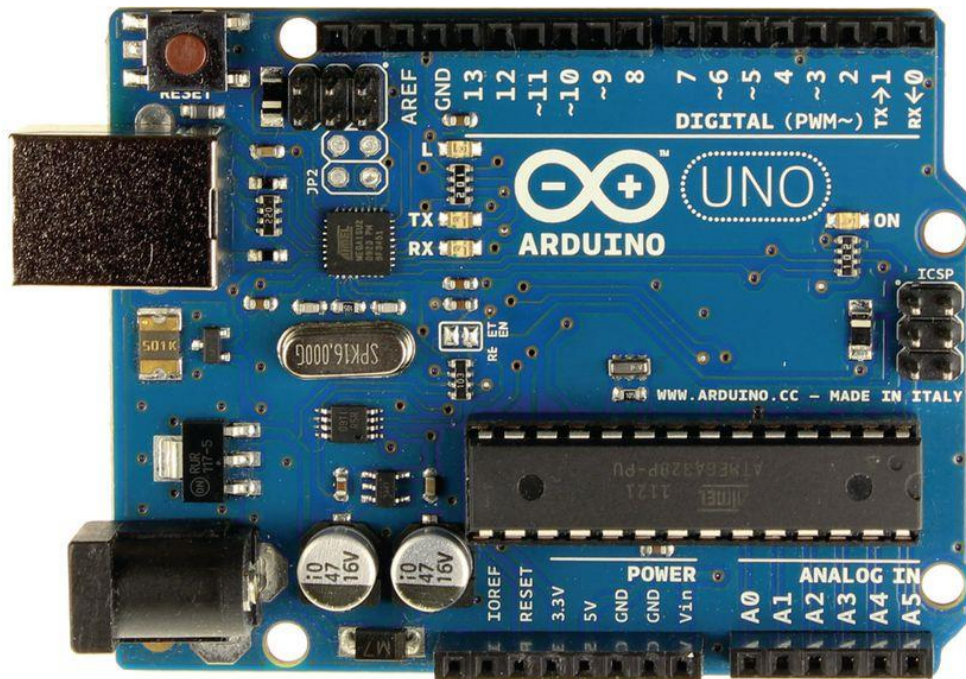
U ovom radu je Pixhawk glavna upravljačka jedinica unutar bespilotne letjelice (slika 8.). Pixhawk je otvoreni hardverski sklop, poput Arduina. Pixhawk je kontrolor leta te podržava mnoge dodatne senzore poput barometra, magnetometra, akcelerometra i žiroskopa. Pogodan je za automatsko pokretanje bespilotne letjelice. Fleksibilniji i pouzdaniji je u usporedbi s drugim kontrolorima. Globalna zajednica osnovana oko Pixhawk-a ima za cilj izraditi i razviti jednostavnije i financijski prihvatljivije upravljačke jedinice za bespilotne letjelice. Uz Pixhawk treba spomenuti i ArduPilot, odnosno program kojim se upravlja bespilotnim letjelicama. Osim ArduPilot-a, Pixhawk je kompatibilan s raznim drugim letjelicama i konfiguracijama, poput multikoptera s 3, 4, 6 ili 8 rotora, aviona s raznim konfiguracijama, helikoptera, brodova, automobila, itd. [27], [28]



Slika 8. Pixhawk, [29]

Arduino je platforma otvorenog koda (eng. *open-source*), namijenjena za kreiranje elektroničkih prototipova. Temelji se na sklopovlju i programskom paketu, kojeg karakterizira fleksibilnost i jednostavnost korištenja. Arduino platforma se može definirati kao skup elektroničkih i softverskih komponenti. Odlikuje ga jednostavno povezivanje u

složenije cjeline da bi se izradili zabavni ili poučni elektronički sklopova. Arduino ploča, prikazana na slici 9., može čitati ulaze (npr. svjetlo na senzoru, prst na gumbu ili *Twitter* poruku) i pretvarati ih u izlaze (npr. aktiviranje motora, uključivanje LED lampica, objavljivanje nečega na mreži). [30], [31]



Slika 9. Arduino ploča, [32]

Arduino je nastao na Institutu za interakcijski dizajn Ivera, kao jednostavan alat za brzo prototipiranje, namijenjen studentima bez predznanja iz elektronike i programiranja. Čim je došlo do šire primjene, ploča se počela mijenjati kako bi se prilagodila novim potrebama i izazovima, od jednostavnih 8-bitnih ploča do proizvoda za IoT (eng. *Internet of Things*) aplikacije, nosive uređaje i 3D ispise. Arduino je namijenjen svima, od umjetnika, dizajnera, hobista do elektroničara, odnosno svima koji su zainteresirani za funkcionalnosti i mogućnosti koje isti nudi. Zahvaljujući jednostavnom korištenju i dostupnosti svima, Arduino je korišten u tisućama različitih projekata i aplikacija. Arduino softver jednostavan je za početnike, a opet dovoljno fleksibilan za napredne korisnike. Profesori i studenti ga koriste za izgradnju jeftinih znanstvenih instrumenata, za dokazivanje načela kemije i fizike ili za početak programiranja i robotike. Dizajneri i arhitekti grade interaktivne prototipove, glazbenici i umjetnici koriste ga za eksperimentiranje s novim glazbenim instrumentima. [30], [31]

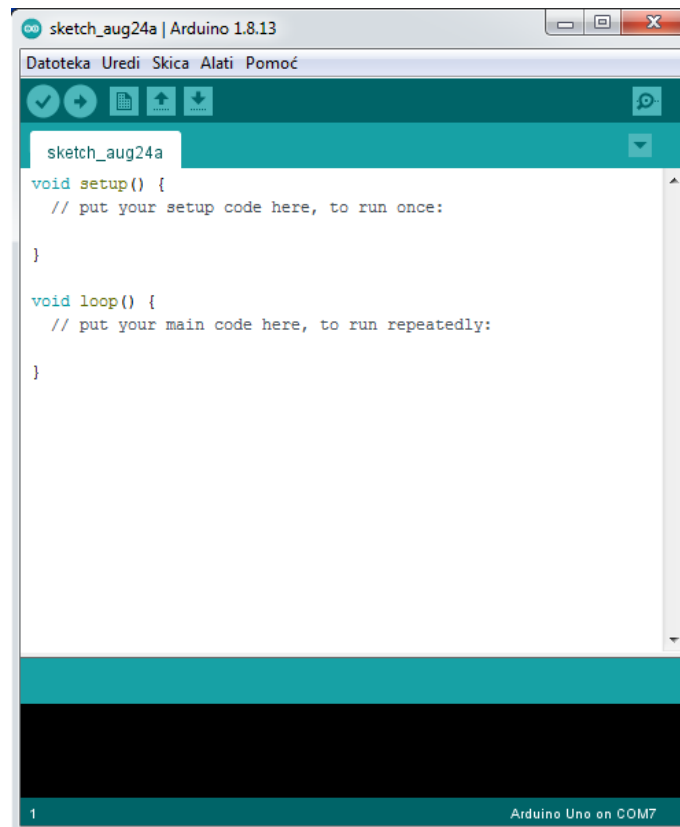
„Srce“ Arduina jesu mikrokontroleri. Mikrokontroler je elektronički uređaj napravljen u obliku čipa. Najbolje je definirati ga kao malo računalo sadržano na jednom integriranom sklopu. Strukturu mikrokontrolera čini mikroprocesorska jedinica, RAM (eng. *Random Access Memory*) i ROM (eng. *Read Only Memory*) memorija, *flash* memorija te nekoliko komunikacijskih modula za serijsku, paralelnu, USB (eng. *Universal Serial Bus*), Ethernet komunikaciju, itd. Arduino najčešće koristi 8-bitne mikrokontrolere tvrtke ATMEL. Najčešće korišten model je ATMEGA328P, prikazan na slici 10., koji se koristi na osnovnoj Arduino prototipnoj ploči. Prototipna ploča osim kontrolera sastoji se i od drugih sklopova kao što je sklop za programiranje, napajanje, od pinova i raznih priključaka. Dostupni su mnogi drugi mikrokontroleri i platforme mikrokontrolera, međutim, Arduino se u masi ističe zbog sljedećih značajki:

- Cijena – Arduino ploče su financijski dostupnije u usporedbi s drugim platformama mikrokontrolera.
- Omogućava rad na različitim operativnim sustavima (Windows, Macintosh OSX i Linux).
- Jednostavno i jasno programsko okruženje.
- Proširivi softver – softver je objavljen kao otvoreni alat te je dostupan za proširenje iskusnim programerima.
- Proširivi hardver – iskusni dizajneri sklopova mogu napraviti vlastitu verziju modula, proširiti da i poboljšati. [31]



Slika 10. Mikrokontroler, [33]

Arduino programski jezik temelji se na C ili C++ jezicima. Programiranje Arduina slično je programiranju mikrokontrolera. Arduino IDE (eng. Integrated Development Environment) je program koji se koristi za pisanje kodova za Arduino, prikazan na slici 11. Kod Arduino programiranja važno je spomenuti biblioteke.



Slika 11. Izgled Arduino IDE

Biblioteke su datoteke napisane u C ili C++ jeziku. Biblioteke moraju biti smještene unutar Arduino mape, kako bi se mogle koristiti. Svaka biblioteka predstavlja jednu mapu koja nosi njeno ime, a u njoj se moraju nalaziti <ime\_biblioteke>.cpp i <ime\_biblioteke>.h datoteke u kojima je kodirano sučelje biblioteke. Biblioteke se dodaju u Arduino skicu korištenjem *include* naredbe. [34]

Ploče za proširenje funkcionalnosti, odnosno štitovi (eng. shield), spajaju se na Arduino i imaju dodatne ulazne ili izlazne priključke kojima dodaju nove funkcionalnosti. S gornje i donje strane štita nalaze se nožice jednako raspoređene kao i priključci na Arduino ploči. Štit se spaja na Arduino ploču umetanjem nožica u odgovarajuće priključke. Neki priključci se mogu rezervirati za vlastitu komunikaciju s Arduino, a ostali se prosljeđuju na vlastite priključke, tako da se drugi uređaji mogu izravno spojiti na štit. Takvim načinom je

omogućenom višestruko spajanje štitova, jednog na drugi. Štitovi (slika 12.) mogu omogućiti spajanje LCD-a (eng. Liquid Crystal Display), kontrole motora preko Arduina, spajanje GPS-a, dimnog detektora, kamere, itd. [35]



Slika 12. Arduino štitovi, [36]

U ovom radu, sučelje između zemaljske stanice i autopilota sastoji se od Arduino GSM (eng. Global System for Mobile Communications) štita i mikrokontrolera Arduino Uno. Zemaljska stanica šalje naredbe koristeći GSM/GPRS (eng. General Packet Radio Service) mrežu i GSM štit koji prima signal. Arduino Uno, glavni mikrokontroler komunikacijskog podsustava, čita podatke iz GSM štita, obrađuje ih i prosljeđuje autopilotu bespilotne letjelice. Kontrolor leta Pixhawk koristi MAVLink protokol za komunikaciju sa zemaljskom stanicom. Kada korisnik koristi softver zemaljske stanice koji je povezan s Internetom, sustav stvara UDP most između zemaljske stanice i kontrolora leta. Arduino ploča je unaprijed konfigurirana s IP portom zemaljske stanice te MAVLink poruke preusmjerava od zemaljske stanice prema letjelici i obrnuto. Pri komunikaciji, podaci su organizirani u MAVLink paketima, stoga nije potrebna daljnja obrada od strane Arduina. U slučaju kada korisnik šalje upravljačke naredbe putem tekstualnih poruka – SMS (eng. Short Message Service), potrebno je više koraka. Prije slanja poruke s kontrolnim naredbama, šalje se poruka s jedinstvenim kodom iz sigurnosnih razloga. Jednostavna tekstualna poruka koju korisnik šalje sa svog mobilnog uređaja ne slijedi MAVLink protokol. Stoga je Arduino Uno konfiguriran s nekoliko naredbi, organiziranih u MAVLink pakete koje letjelica može izvesti (npr. vratiti se u bazu, sletjeti, poletjeti) te se dodjeljuje jedinstveni broj svakoj naredbi. [37]

## 6. Arhitektura sustava za upravljanje bespilotnom letjelicom putem mobilne mreže

U cilju boljeg razumijevanja kako neki sustav radi bitno je prikazati arhitekturu sustava, tj. dijelove od kojih se sustav sastoji. Središte ovog rada je Arduino ploča, kao što je već spomenuto, ima mnoštvo funkcionalnosti i komponenti, kao što se vidi na slici 13.



Slika 13. Dijelovi Arduino ploče, [38]

Prekidač za resetiranje – pritiskom na taj prekidač, šalje se logički impuls pinu za resetiranje mikrokontrolera i program se pokreće ponovno. Npr. u slučaju kad se programirani kod ne ponavlja, a korisnik ga želi testirati više puta.

USB priključak – koristi se za učitavanje programa s Arduino IDE-a na Arduino ploču. Također, ploča se može napajati preko ovog priključka.

Čip USB sučelja – može se definirati kao prevoditelj signala. Pretvara signale USB razine u razinu koju razumije Arduino ploča.

Kristalni oscilator – kvarcni kristalni oscilator, otkucava 16 milijuna puta u sekundi. Na svakoj kvačici mikrokontroler izvodi po jednu operaciju.

Regulator napona – ukoliko je ploča opskrbljena višim naponom nego može podnijeti, regulator je štiti od izgaranja.



Priključak za struju – Arduino ploča može se napajati AC-DC-DC adapterom ili baterijom. Izvor napajanja može se spojiti uključivanjem 2,1 mm središnjeg pozitivnog utikača u utičnicu na ploči. Arduino UNO ploča radi na naponu od 5 Volti, međutim, može izdržati i napon od najviše 20 Volti.

Digitalni pinovi – ti pinovi se mogu koristiti kao ulazni ili izlazni pinovi. Kad se koriste kao izlazni, ti pinovi djeluju kao izvor napajanja za spojene dijelove te isporučuju 40 mA struje na 5 Volti, što je više nego dovoljno za LED osvjetljenje. Kad se koriste kao ulazni pinovi, čitaju signale iz spojene komponente. Neki od digitalnih pinova su označeni simbolom (~) pored brojeva pinova (3, 5, 6, 9, 10 i 11). Ti pinovi djeluju kao normalni digitalni pinovi, međutim, razlika između njih i ostalih je ta što se oni mogu koristiti za pulsno-širinsku modulaciju (eng. PWM – *Pulse Width Modulation*).

TX RX LED – TX (eng. *transmission*) označava prijenos, a RX (eng. *receive*) prijem. To su LED indikatori koji treptaju kad god Arduino ploča odašilje ili prima podatke.

Mikrokontroler – najistaknutiji crni pravokutni čip s 28 pinova. Mikrokontroler koji se koristi na Arduino UNO ploči je Atmega328P tvrtke Atmel. Atmega328P sadrži, prema [38]:

- Flash memoriju od 32 KB, gdje je pohranjen program učitani iz Arduino IDE-a
- RAM memoriju od 2 KB. To je memorija za vrijeme izvođenja.
- CPU koji kontrolira sve što se događa unutar uređaja, dohvaća programske upute s flash memorije i pokreće ih uz pomoć RAM-a.
- EEPROM - programirana memorija samo za čitanje s električnim brisanjem od 1 KB. To je vrsta ne hlapljive memorije koja zadržava podatke čak i nakon ponovnog pokretanja i resetiranja uređaja.

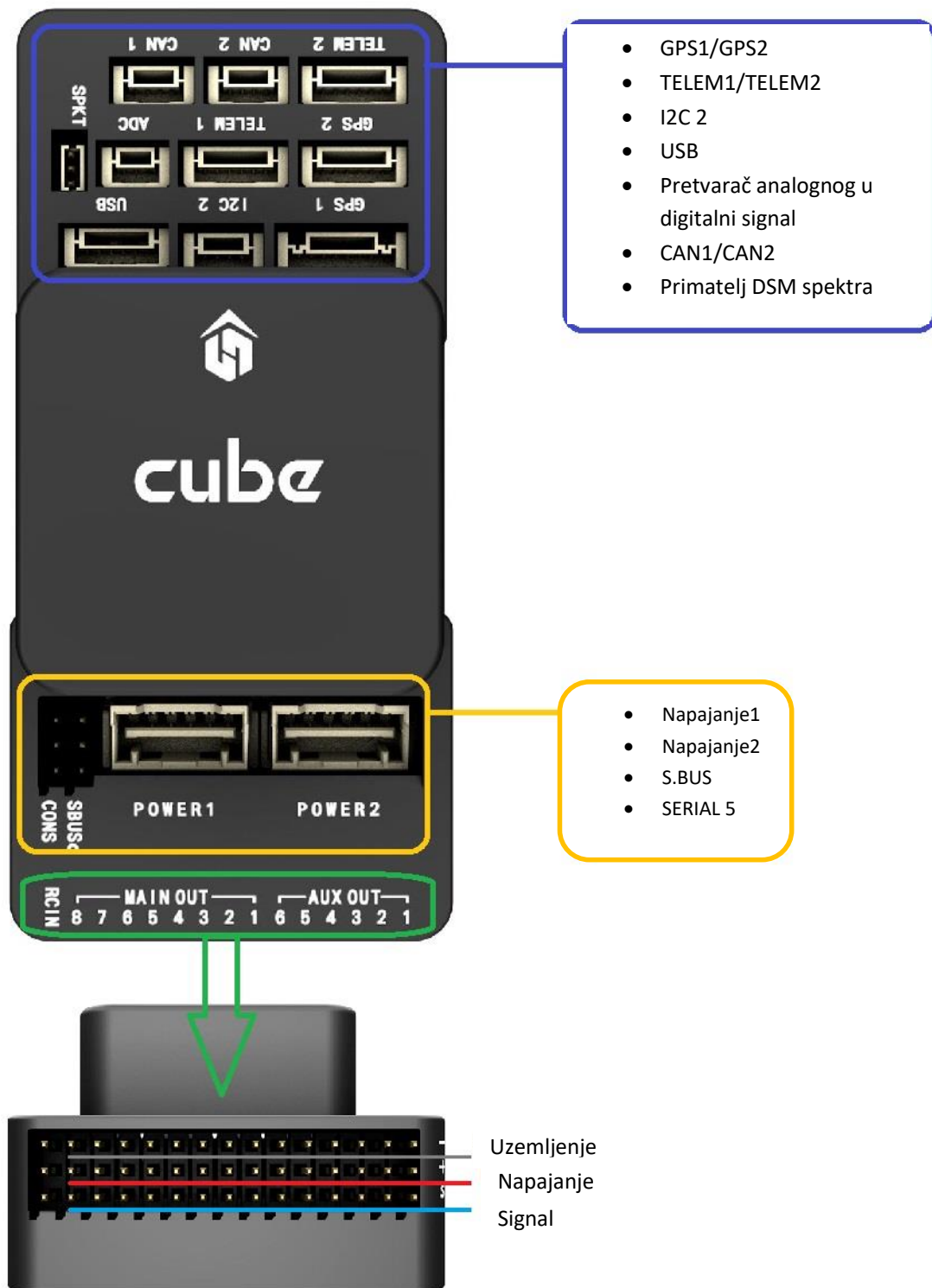
Atmega328P je unaprijed programiran s programom za pokretanje. To omogućuje izravno postavljanje novog Arduino programa u uređaj, bez korištenja vanjskog hardverskog programera, što Arduino UNO ploču čini jednostavnijom za korištenje.

Analogni pinovi – Arduino UNO ploča ima 6 analognih ulaznih pinova. Ti pinovi mogu očitati signal s analognog senzora poput temperaturnog senzora i pretvoriti ga u digitalnu vrijednost tako da ga sustav razumije. Pinovi samo mjere napon, a ne struju jer imaju vrlo visok unutarnji otpor. Zbog toga kroz pinove teče samo mala količina struje.

Druga, ne manje bitna, komponenta sustava je kontrolor leta Pixhawk Cube 2.1. Kontrolor leta Pixhawk Cube 2.1 fleksibilan je autopilot namijenjen prvenstveno proizvođačima komercijalnih sustava. Temelji se na otvorenom hardverskom dizajnu Pixhawk projekta FMUV3 i izvodi PX4 na NuttX operativnom sustavu. Dizajniran je za korištenje sa specifičnim nosačem kako bi se smanjilo ožičenje, poboljšala pouzdanost i pojednostavila montaža. Cube uključuje izolaciju vibracije na dva IMU uređaja, s trećim fiksnim IMU-om kao sigurnosnom kopijom.

Što se tiče sučelja ima (slika 14.):

- Pet UART (eng. *universal asynchronous receiver-transmitter*), velike snage
- Dva CAN, jedan s unutarnjim primopredajnikom 3.3 V, jedan s proširenjem
- Primatelj DSM spektra, satelitski kompatibilan ulaz
- S.BUS, kompatibilan ulaz i izlaz
- Ulaz signala PPM
- Ulazi napajanja
- I2C
- SPI
- Pretvarač analognog u digitalni signal
- Unutarnji i vanjski micro USB priključak. [39]

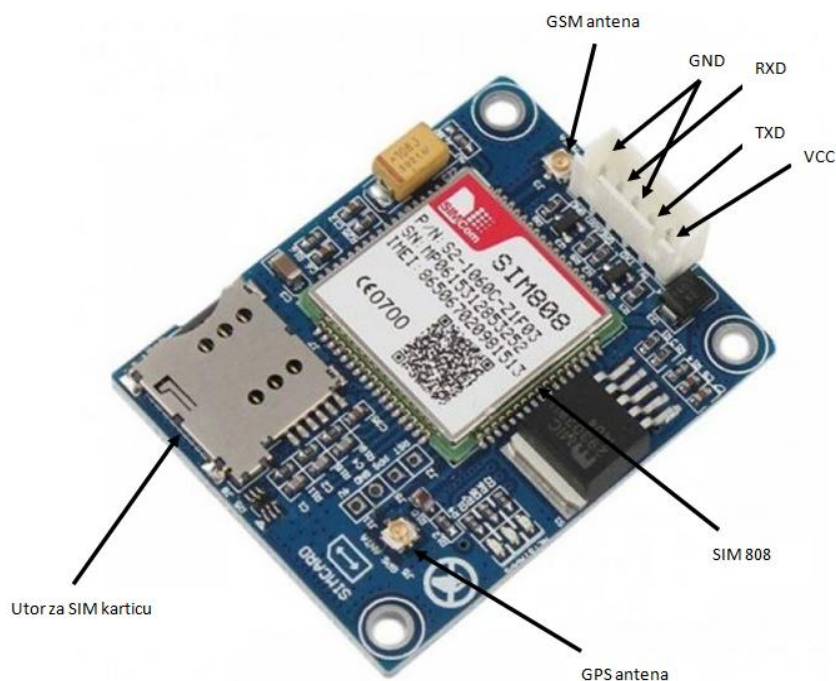


Slika 14. Dijelovi kontrolora leta, [39]

Glavne značajke uređaja su:

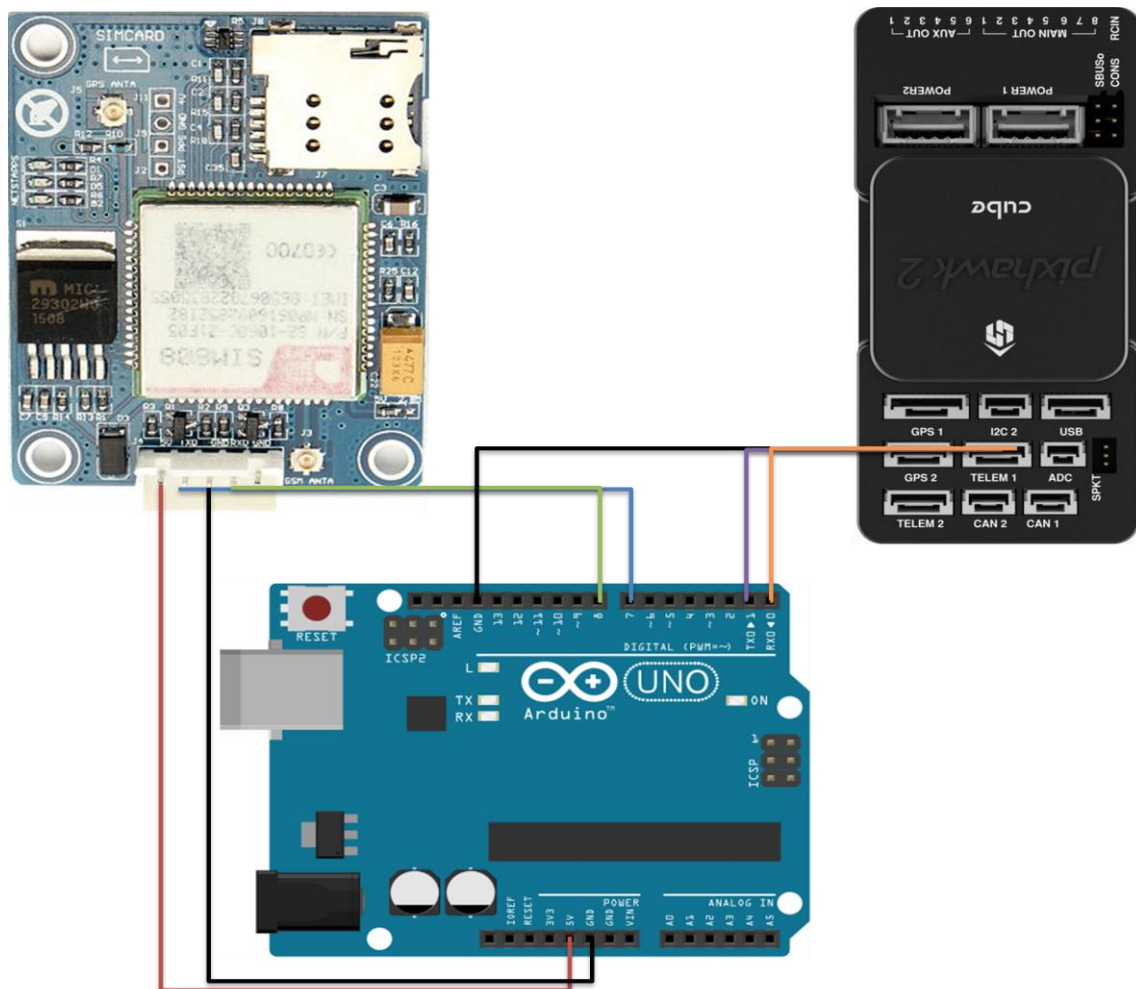
- 32-bitna STM32F427 Cortex-M4F jezgra s FPU-om
- 168 MHz
- 256 KB Flash memorije
- 32-bitni STM32F103 dailsafe co-procesor
- 14 PWM/servo izlaza
- Obilje mogućnosti povezivanja za dodatne periferne uređaje (UART, I2C, CAN)
- Integrirani sigurnosni sustav za oporavak tokom leta i ručno prevladavanje s namjenskim procesorskim i samostalnim napajanjem
- Sigurnosni sustav integrira miješanje, pružajući dosljedni način autopilota i ručno prebacivanje
- Ulazi napajanja i automatsko prebacivanje
- Vanjska sigurnosna sklopka
- Višebojni LED vizualni indikatori
- microSD kartica za brzu prijavu kroz duži period. [39]

Zadnja komponenta koju je bitno spomenuti u ovom sustavu je GSM modul SIM808 (slika 15.). On je potreban za komunikaciju mobilnog uređaja s Arduinoom.



Slika 15. Dijelovi GSM modula SIM808, [40]

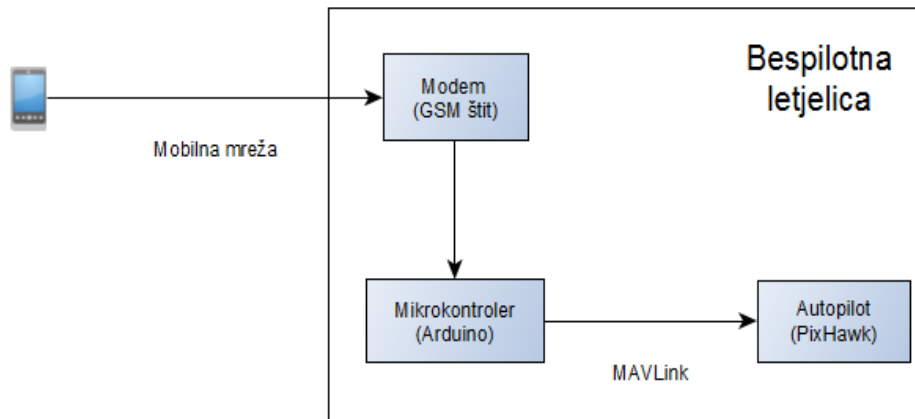
SIM808 modul je cjelovit četvero pojasni GSM/GPRS modul koji kombinira GPS tehnologiju za satelitsku navigaciju. Kompaktni dizajn s integriranim GPRS-om i GPS-om u SMT pakete značajno štedi vrijeme i troškove za razvoj aplikacija s omogućenim GPS-om. Zahvaljujući industrijskom standardnom sučelju i GPS funkciji, omogućuje nesmetano praćenje promjenjivih sredstava na bilo kojem mjestu i u bilo kojem trenutku uz pokrivenost signalom. SIM808 modul omogućuje slanje i primanje SMS poruka te upućivanje i primanje poziva.



Slika 16. Shematski prikaz sustava

Na ovom shematskom prikazu (slika 16.) može se jasno vidjeti kako su povezane prethodno navedene komponente. Crvena linija predstavlja žicu koja povezuje 5V kod GSM modula i Arduino ploče, crna uzemljenje, zelena povezuje Rx GSM-a i Tx Arduina, dok plava povezuje obrnuto, odnosno Tx GSM-a i Rx Arduina. Pri povezivanju Arduina i Pixhawk

imamo tri linije. Crna povezuje uzemljenja, ljubičasta Rx Pixhawk i Tx Arduina te narančasta Tx Pixhawk i Rx Arduina.



Slika 17. Arhitektura sustava

Na slici 17. je prikazana arhitektura sustava koji upravlja bespilotnom letjelicom u slučaju prekida komunikacije. Kao što se može primijetiti GSM modul, Arduino i Pixhawk su implementirani na bespilotnu letjelicu. U trenutku prestanka komunikacije kontrolora leta Pixhawk s zemaljskom kontrolnom stanicom, počinje se primjenjivati sustav komunikacije s kontrolorom leta prikazan na slici. U toj situaciji neizravno komunicira korisnik, koji šalje poruku GSM modulu i Pixhawk. Odnosno, poruka koja stiže od korisnika je pokretač Arduino koda, koji se već nalazi u Arduino ploči.

## 7. Primjena sustava u stvarnom okruženju

Za izradu sustava koji upravlja bespilotnom letjelicom u slučaju prekida komunikacije potrebno je:

- Arduino Uno R3 (slika 18.)
- PixHawk Cube 2.1 (slika 19.)
- GSM modul SIM808 (slika 20.)
- GSM antena (slika 21.)
- Micro SIM kartica (slika 22.)
- Telemetrijski kabel (slika 23.)
- Sedam žica



Slika 18. Arduino UNO R3



Slika 19. Pixhawk Cube 2.1



Slika 20. GSM modul SIM808

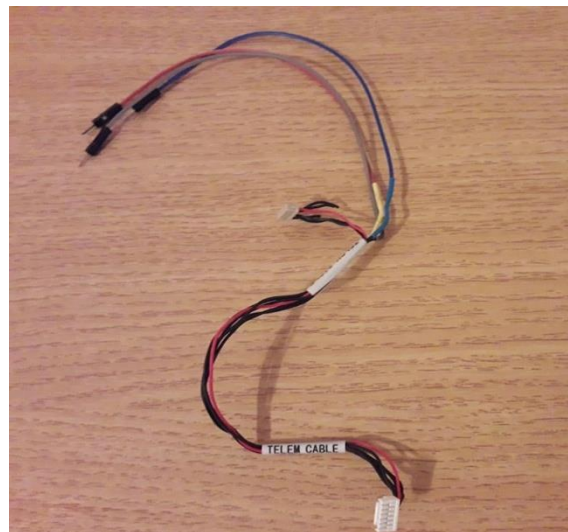


Slika 21. Micro SIM kartica





Slika 22. GSM antena



Slika 23. Telemetrijski kabel

Programski jezik korišten za programiranje Arduina je C++. C++ je programski jezik opće namjene. Može se koristiti za razvoj operativnih sustava, preglednika, igara i slično. Podržava različite načine programiranja poput proceduralnog, objektno orijentiranog i funkcionalnog.

Korištene biblioteke u radu su:

- SoftwareSerial – omogućuje serijsku komunikaciju na digitalnim pinovima Arduina, koristeći softver za kopiranje funkcionalnosti Tx i Rx pinova
- Mavlink – zaglavlje biblioteke za komunikaciju između bespilotnih letjelica i/ili zemaljskih kontrolnih stanica. Sastoji se od skupa specifikacija za različite sustave, definiranih u XML datotekama i Python alata koji specifikacije pretvaraju u odgovarajući kod za podržane jezike.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <mavlink.h>

SoftwareSerial mySerial(7,8); //Pinovi na koje je spojen GSM modul

String message;
```

Slika 24. Definiranje biblioteka i pinova

Na početku se definiraju sve biblioteke koje se koriste. Ukoliko se ne koristi unaprijed definiran Serial port potrebno je definirati digitalne pinove na koji se neka komponenta spaja, u ovom slučaju GSM modul, kao što je prikazano na slici 24. Tx pin GSM modula se spaja na Rx pin Arduino ploče i obrnuto, Rx GSM-a na Tx Arduina.

```
void setup() {
  mySerial.begin(57600); //pokretanje porta na kojem je GSM
  Serial.begin(57600); // pokretanje porta na kojem je PixHawk
  delay(100);
  Serial.print("SIM808 spreman");

  mySerial.print("AT+CMGF=1\r"); //postavljanje GSM modula u tekst mode
  mySerial.print("AT+CNMI=2,2,0,0,0\r"); //AT naredba za primanje SMS poruka
  delay(100);

  mission_count();
}
```

Slika 25. Void setup

U nastavku koda (slika 25.), točnije u dijelu *void setup ()*, upisuju se naredbe koje se trebaju pokrenuti samo jednom. Tu se pokreće *mySerial*, port na koji je spojen GSM modul te *Serial*, port na koji je spojen Pixhawk. Također, definiraju se AT naredbe za GSM modul,

konkretno, da se GSM modul postavi u tekst mode i da može primiti SMS poruke. Osim toga aktivira se i *mission\_count()*, čime se pokreće komunikacija s Pixhawkom.

```
void loop() {
  if (mySerial.available()>0){
    message = mySerial.readString();
    Serial.print(message);
    delay(10);
  }
  if (message.indexOf("ON") > -1){
    MavLink_receive();
    message = "";
  }
}
```

Slika 26. Void loop

Zatim, slijedi *void loop()*, u tom dijelu koda se upisuju naredbe koje se ponavljaju. Ono što je prikazano na slici 26., pojednostavljeno glasi, ukoliko na *mySerial port* dođe nešto, tj. ukoliko korisnik pošalje SMS poruku i GSM modul je očita, *Serial port* ispisuje sadržaj poruke. U nastavku se vidi uvjet *if*, gdje je definirano, ako sadržaj poruke glasi „ON“, samo u tom slučaju se pokreće *Mavlink\_receive()*.

```
void mission_count() {
  uint8_t _system_id = 255;
  uint8_t _component_id = 2;
  uint8_t _target_system = 1;
  uint8_t _target_component = 0;
  uint16_t count = 2;
  mavlink_message_t msg;
  uint8_t buf[MAVLINK_MAX_PACKET_LEN];
  mavlink_msg_mission_count_pack(_system_id, _component_id, &msg,
  _target_system, _target_component, count);
  uint16_t len = mavlink_msg_to_send_buffer(buf, &msg);
  Serial.write(buf, len);
}
```

Slanjem *mission\_count* poruke, Pixhawk zna da korisnik želi unijeti neke nove točke i koliko ih treba očekivati. Bez pokretanja protokola s tom Mavlink porukom, Pixhawk ne zna

što napraviti s primljenim parametrima. Funkcija *mission\_count()* „pakira“ podatke koji se specificiraju u varijable i šalje ih Pixhawk, dajući mu do znanja da se žele prenijeti dvije točke (prva točka je *HOME*, a druga je pravo odredište, na koje se želi poslati letjelicu). Nakon što se ta poruka pošalje, Pixhawk će odgovoriti s *Mission Request* porukom Arduinou navodeći slijed točaka koje očekuje. Ta je poruka okidač za sljedeći korak u protokolu.

```
case MAVLINK_MSG_ID_MISSION_REQUEST:
```

```
{
    mavlink_mission_request_t missionreq;
    mavlink_msg_mission_request_decode(&msg, &missionreq);
    Serial.print("\nMission Req Sequence: ");Serial.println(missionreq.seq);
    Serial.print("SysID: ");Serial.println(missionreq.target_system);
    Serial.print("Compid: ");Serial.println(missionreq.target_component);
    if (missionreq.seq == 0) {
        create_home();
        Serial.print("Sent Home: \n");
    }
    if (missionreq.seq == 1) {
        create_waypoint();
        Serial.print("Sent Waypoint: \n");
    }
}
```

Ovaj isječak koda, pregledava *Mission Request* poruku poslanu od Pixhawka, u kojoj obraća pažnju na sekvencijski broj. Ako Pixhawk traži prvu točku, odnosno *missionreq.seq == 0*, kod će pokrenuti funkciju *create\_home()*, ukoliko traži drugu, odnosno *missionreq\_seq == 1*, kod pokreće funkciju *create\_waypoint()*.

```

void create_home() {
    uint8_t _system_id = 255;
    uint8_t _component_id = 2;
    uint8_t _target_system = 1;
    uint8_t _target_component = 0;
    uint16_t seq = 0;
    uint8_t frame = 0;
    uint16_t command = MAV_CMD_NAV_WAYPOINT;
    uint8_t current = 0;
    uint8_t autocontinue = 0;
    float param1 = 0;
    float param2 = 0;
    float param3 = 0;
    float param4 = 0;
    float x = 45.464217;
    float y = -1.280222;
    float z = 200;
    mavlink_message_t msg;
    uint8_t buf[MAVLINK_MAX_PACKET_LEN];
    mavlink_msg_mission_item_pack(_system_id, _component_id, &msg,
    _target_system, _target_component, seq, frame, command, current, autocontinue,
    param1, param2, param3, param4, x, y, z);

    uint16_t len = mavlink_msg_to_send_buffer(buf, &msg);
    Serial.write(buf, len);
}

```

Prikazana funkcija `create_home()`, pakira parametre navedene u varijablama u Mavlink poruku koja specificira koordinate početne točke korištenjem `MAV_CMD_NAV_WAYPOINT` naredbe. Kad se ta poruka pošalje Pixhawk, Pixhawk će poslati novu *Mission Request* poruku koja sadrži sekvencijski broj sljedeće točke koju Pixhawk očekuje, odnosno 1. Još jednom isječak koda sa slike 28., obrađuje *Mission Request* poruku i izvršava funkciju `create_waypoint()`. U ovom radu, sustav zapravo zanemaruje parametre

početne točke ukoliko je letjelica već u zraku. Naime, kad se bespilotna letjelica pokrene sustav automatski očitava početnu točku.

```
void create_waypoint() {
    uint8_t _system_id = 255;
    uint8_t _component_id = 2;
    uint8_t _target_system = 1;
    uint8_t _target_component = 0;
    uint16_t seq = 1;
    uint8_t frame = 0;
    uint16_t command = MAV_CMD_NAV_WAYPOINT;
    uint8_t current = 1;
    uint8_t autocontinue = 0;
    float param1 = 0;
    float param2 = 0;
    float param3 = 0;
    float param4 = 0;
    float x = 45.8112864;
    float y = 16.0420784;
    float z = 50;
    mavlink_message_t msg;
    uint8_t buf[MAVLINK_MAX_PACKET_LEN];
    mavlink_msg_mission_item_pack(_system_id, _component_id, &msg,
    _target_system, _target_component, seq, frame, command, current, autocontinue,
    param1, param2, param3, param4, x, y, z);
    uint16_t len = mavlink_msg_to_send_buffer(buf, &msg);
    Serial.write(buf, len);
}
```

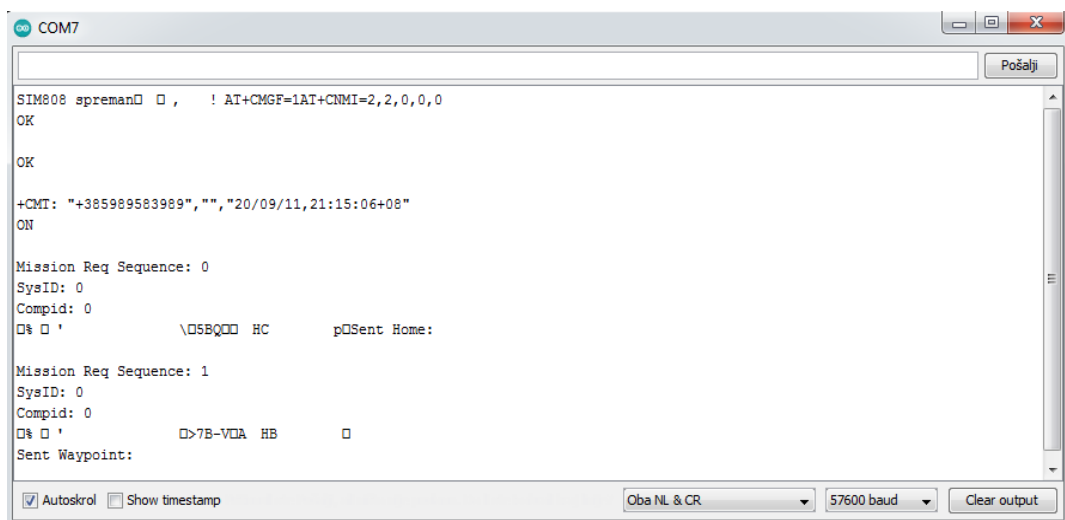
Funkcija *create\_waypoint()* je gotovo identična funkciji *create\_home()*. Jedina je razlika drugačije GPS koordinate i sekvencijski broj.

```

case MAVLINK_MSG_ID_MISSION_ACK:
{
    mavlink_mission_ack_t missionack;
    mavlink_msg_mission_ack_decode(&msg, &missionack);
    Serial.print("\nMission Ack Sequence: ");Serial.println(missionack.type);
    Serial.print("SysID: ");Serial.println(missionack.target_system);
    Serial.print("CompID: ");Serial.println(missionack.target_component);
    if (missionack.type == 1) {
        Serial.print("\nMission upload FAILED: ");Serial.println(missionack.type);
    }
    if (missionack.type == 0) {
        Serial.print("\nMission upload SUCCESSFULL: ");Serial.println(missionack.type);
    }
}
}

```

Nakon što Pixhawk pošalje i uspješno primi drugu točku više ne čeka daljnje koordinate. Umjesto toga šalje natrag poruku *MISSION\_ACK*. Ukoliko *MISSION\_ACK* poruka sadrži 0, znači da je zadatak uspješno obavljen, ukoliko sadrži 1, znači da zadatak nije uspješno obavljen.



Slika 27. Serijski izlaz

Slika 28. prikazuje serijske izlaze koda. Iz prikaza se može vidjeti da je GSM modul aktiviran, namješten za primanje poruka, prikaz poruke koja uzrokuje pokretanje koda.

Također, vide se *Mission Request* poruke, sukladno kojima se izvršavaju funkcije *create\_home()*, odnosno *create\_waypoint()*.



Slika 28. Prikaz u Mission Planner-u

Nakon što je komunikacija između Arduina i Pixawka završena, može se otvoriti *Mission Planner*, softver za zemaljsko upravljanje i pročitati točku iz Pixhawk. Kao što je već prije navedeno, može se primijetiti, da je sustav zanemario navedenu početnu točku u kodu. Pri primjeni sustava, GPS je očitao koordinate ispred zgrade Fakulteta prometnih znanosti u Vukelićevoj ulici i automatski su te koordinate definirane kao početne. U trenutku primanja SMS poruke bespilotna letjelica izvršava naredbu i leti na koordinate upisane u kodu. Točka prikazana na slici 29. je ista ona točka koja je definirana u funkciji *create\_waypoint()*.



## 8. Zaključak

Kada je riječ o bespilotnim letjelicama, neophodno je spomenuti navigacijske sustave. Bez navigacijskih sustava bespilotne letjelice ne bi mogle funkcionirati na predviđeni način. Pod suvremenom navigacijom podrazumijevamo korištenje dvaju neovisnih navigacijskih sustava. Najčešće su to globalni navigacijski satelitski sustav i inercijski navigacijski sustav. Globalni navigacijski satelitski sustav određuje točnu lokaciju letjelice, dok inercijski navigacijski sustav koristi mjerenja za praćenje položaja i orijentacije objekta u odnosu na poznatu početnu točku, smjer i brzinu.

Podjela bespilotnih letjelica se može vršiti prema više različitih karakteristika. Od mase, izdržljivosti i dometa, maksimalne visine do opterećenja krila i vrste motora. Kod upravljanja bespilotnim letjelicama korisnici imaju na izbor tri sustava upravljanja, a to su daljinsko, polu-autonomno i autonomno upravljanje.

Pod upravljanjem podrazumijevamo komunikaciju zemaljske kontrolne stanice i bespilotne letjelice. MAVLink protokol omogućuje upravo tu komunikaciju. Osim nadgledanja i kontrole misija bespilotnih letjelica i njihovih integracija na Internet, omogućuje zemaljskoj stanici da šalje komande i kontrole bespilotnoj letjelici, a letjelici da šalje telemetrijske i statusne informacije prema zemaljskoj stanici.

Cilj ovog diplomskog rada je bio izgradnja sustava koji radi u slučaju prekida komunikacije standardnim putem. Od važnijih komponenti bitno je spomenuti mikrokontroler Arduino, kontrolor leta Pixhawk i GSM modul, između kojih je uspostavljena komunikacija. U slučaju javljanja bilo kakvih smetnji tijekom komunikacije s bespilotnom letjelicom, korisnik šalje SMS poruku putem svog mobilnog uređaja. SMS poruka koju prima GSM modul je okidač za pokretanje koda te se bespilotna letjelica šalje na željenu točku.

## Literatura

- [1] Markežić I. Lokacijski i navigacijski sustavi (separati s predavanja). Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Zagreb, 2011.
- [2] Navigacija. Preuzeto sa: <https://tehnika.lzmk.hr/navigacija/> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [3] Pavlik D, Popčević I, Rumora A. Bepilotne letjelice podržane INS i GNSS sensorima. Ekscentar. 2014; 17: 65-70.
- [4] Zhang G, Hsu LT. Intelligent GNSS/INS integrated navigation system for a commercial UAV flight control system. Aerospace Science and Technology. 2018; 80: 368-380.
- [5] Misra P, Enge P. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance. Lincoln, Mass: Ganfa-Jamuna Press. Second Edition; 2012.
- [6] What is GNSS? Preuzeto sa: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [7] Global Navigation Satellite System (GNSS). Preuzeto sa: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [8] Vatalaro F, Corazza GE, Caini C, Ferrarelli C. Analysis of LEO, MEO and GEO Global Mobile Satellite Systems in the Presence of Interference and Fading. IEEE journal on selected areas in communications. 1995; 13(2): 291-300.
- [9] URL: [https://www.researchgate.net/figure/GNSS-constellations-and-selected-satellites-Adapted-from\\_fig2\\_264858490](https://www.researchgate.net/figure/GNSS-constellations-and-selected-satellites-Adapted-from_fig2_264858490) [Pristupano: srpanj 2020.]
- [10] GNSS (Globalni navigacijski satelitski sustavi). Preuzeto sa: <http://www.ss-gradjevinska-tehnicka-ri.skole.hr/marijan/images/stories/programi/GNSS.pdf> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [11] Zrinjski M, Barković Đ, Matika K. Razvoj i modernizacija GNSS-a. Geodetski list. 2019; 1: 45-65.
- [12] Muštra M. Kolegij: Lokacijski i navigacijski sustavi. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Zagreb, 2019.
- [13] URL: <https://shivkumardas.wordpress.com/agri-tech/an-introduction-to-gps-gis-and-its-uses-in-agriculture/> [Pristupano: srpanj 2020.]

- [14] Kleusberg A, Langley RB. The limitations of GPS. GPS world; 1990.
- [15] Galileo satellites. Preuzeto sa: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo\\_satellites](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_satellites) [Pristupano: srpanj 2020.]
- [16] Woodman OJ. An introduction to inertial navigation. University of Cambridge. Technical Report. 2007.
- [17] Nawrat A, Jedrasiak K, Daniec K, Koterak R. Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications. InTech. 2012; 10: 213-240.
- [18] Jamal SZ. Tightly Coupled GPS/INS Airborne Navigation System. IEEE A&E systems magazine. 2012; 39-42.
- [19] Arjomandi M, Agostino S, Mammone M, Nelson M, Zhou T. Classification of Unmanned aerial vehicles. University of Adelaide. 2006.
- [20] Types of quadcopter drones. Preuzeto sa: <http://www.regimage.org/types-of-quadcopter-drones/> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [21] Goldberg S. How drones are shooting movies, fighting wildfires, and hanging out with Martha Stewart. INC magazine. 2017.
- [22] Types of military drones: the best technology available today. Preuzeto sa: <https://www.mydronelab.com/blog/types-of-military-drones.html> [Pristupano: srpanj 2020.]
- [23] Gupta S G, Ghonge M M, Jawandhiya P M. Review of Unmanned Aircraft System (UAS). International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. 2013; 2(4): 1647-1658.
- [24] Allouch A, Cheikhrouhou O, Koubaa A, Khalgui M, Abbas T. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems. Prince Sultan University. 2019.
- [25] Protocol Overview. Preuzeto sa: <https://mavlink.io/en/about/overview.html> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [26] Koubaa A, Allouch A, Alajlan M, Javed Y, Belghith A, Khalgui M. Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey. Journal of LATEX class files. 2015; 14(8): 1-23.
- [27] Kovač Levantin J, Renčelj N, Cvetković N, Ribić D, Kašuba F. Projektiranje, izrada i eksploatacija bespilotne letjelice fiksnih krila s Kanard konfiguracijom. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. Zagreb, 2017.

- [28] Manikandan S, Meenakshi S, Rashmi K, Sanjeev B, Santhosh Kumar T. GSM based agricultural monitoring system using drone. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2019; 6(3): 1336-1339.
- [29] 3D Robotics Pixhawk Flight Controller. Preuzeto sa: <https://uavsystemsinternational.com/products/3d-robotics-pixhawk-flight-controller-not-chinese-clone> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [30] Zenzerović P. *Arduino kroz jednostavne primjere*. Zagreb, 2013.
- [31] What is Arduino? Preuzeto sa: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [32] URL: <https://www.distrelec.biz/en/microcontroller-board-uno-arduino-a000066/p/11038919> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [33] URL: <https://www.amazon.com/ATMEGA328P-PU-with-Arduino-Bootloader-Uno/dp/B007SH0D0A> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [34] Arduino Libraries. Preuzeto sa: <https://www.arduino.cc/en/hacking/libraries> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [35] Arduino shields. Preuzeto sa: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/arduino-shields> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [36] URL: [https://www.researchgate.net/figure/Configurable-Arduino-shields-from-various-manufacturers-LCD-jack-sensor-input-signal\\_fig2\\_313923176](https://www.researchgate.net/figure/Configurable-Arduino-shields-from-various-manufacturers-LCD-jack-sensor-input-signal_fig2_313923176) [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [37] Solidakis G N, Tsokas F M, Batistatos M C, Sagias N C, Tsoulos G V, Zarbouti D A, Athanasiadou G E. An Arduino-Based Subsystem for Controlling UAVs Through GSM. *6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies*. 2017.
- [38] A tour of the Arduino UNO board. Preuzeto sa: <https://www.hackerearth.com/blog/developers/a-tour-of-the-arduino-uno-board/> [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [39] Cube Flight Controller. Preuzeto sa: [https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight\\_controller/pixhawk-2.html](https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html) [Pristupano: kolovoz 2020.]
- [40] URL: [http://tspares-bd.com/index.php?route=product/product&product\\_id=279](http://tspares-bd.com/index.php?route=product/product&product_id=279) [Pristupano: kolovoz 2020.]

## Popis slika

Slika 1. GNSS konstelacija satelita .....	5
Slika 2. GPS segmenti .....	6
Slika 3. Prikaz osi .....	9
Slika 4. Integrirani navigacijski sustav .....	10
Slika 5. Vrste bespilotnih letjelica .....	11
Slika 6. Zaglavlje MAVLink v1.0 .....	16
Slika 7. Zaglavlje MAVLink v2.0 .....	17
Slika 8. Pixhawk .....	20
Slika 9. Arduino ploča .....	21
Slika 10. Mikrokontroler .....	22
Slika 11. Izgled Arduino IDE .....	23
Slika 12. Arduino štitovi .....	24
Slika 13. Dijelovi Arduino ploče .....	25
Slika 14. Dijelovi kontrolora leta .....	28
Slika 15. Dijelovi GSM modula SIM808 .....	29
Slika 16. Shematski prikaz sustava .....	30
Slika 17. Arhitektura sustava .....	31
Slika 18. Arduino UNO R3 .....	32
Slika 19. Pixhawk Cube 2.1 .....	33
Slika 20. GSM modul SIM808 .....	33
Slika 21. Micro SIM kartica .....	33
Slika 22. GSM antena .....	34
Slika 23. Telemetrijski kabel .....	34
Slika 24. Definiranje biblioteka i pinova .....	35
Slika 25. Void setup .....	35
Slika 26. Void loop .....	36
Slika 27. Serijski izlaz .....	40
Slika 28. Prikaz u Mission Planner-u .....	41

## Popis kratica

CRC (eng. *Cyclic Redundancy Check*)  
GEO (eng. *Geostationary Earth Orbit*)  
GLONASS (rus. *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*)  
GNSS (eng. *Global Navigation Satellite System*)  
GPRS (eng. *General Packet Radio Service*)  
GPS (eng. *Global Positioning System*)  
GSM (eng. *Global System for Mobile Communications*)  
IDE (eng. *Integrated Development Environment*)  
IGSO (eng. *Inclined Geosynchronous Orbit*)  
IMU (eng. *Inertial Measurement Units*)  
INS (eng. *Integrated Navigation System*)  
IoT (eng. *Internet of Things*)  
IP (eng. *Internet Protocol*)  
JSON (eng. *JavaScript Object Notation*)  
LCD (eng. *Liquid Crystal Display*)  
LEO (eng. *Low Earth Orbit*)  
MAVLink (eng. *Micro Air Vehicle Link*)  
MEO (eng. *Medium Earth Orbit*)  
PWM (eng. *Pulse Width Modulation*)  
RAM (eng. *Random Access Memory*)  
ROM (eng. *Read Only Memory*)  
RVPs (eng. *Remotely Piloted Vehicles*)  
SMS (eng. *Short Message Service*)  
TCP (eng. *Transmission Control Protocol*)  
UART (eng. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)  
UAV (eng. *Unmanned Aerial Vehicle*)  
UDP (eng. *User Datagram Protocol*)  
USB (eng. *Universal Serial Bus*)  
WiFi (eng. *Wireless Fidelity*)  
XML (eng. *Extensible Markup Language*)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada pod naslovom **UPRAVLJANJE BESPILOTNOM LETJELICOM UPORABOM**

**MOBILNE MREŽE U SLUČAJU GUBITKA KOMUNIKACIJE**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 17.9.2020.

Studentica:

(potpis)