

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Andre Garašić

**INOVATIVNI SUSTAVI AUTONOMNOG UPRAVLJANJA
BESPILOTNIM LETJELICAMA
DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2023.

Zagreb, 22. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Telematika u prijevoznim sredstvima**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7067

Pristupnik: **Andre Garašić (0135251021)**
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Inovativni sustavi autonomnog upravljanje bezpilotnih letjelica**

Opis zadatka:

Zadatak ovog diplomskog rada je istražiti i analizirati razvoj inovativnih sustava autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama, s posebnim fokusom na primjenu mobilnog spektra. Prvo će se pružiti pregled postojećih sustava upravljanja, slijedi analiza inovativnih tehnologija i njihovog doprinosa u ovom području. Diplomski rad će analizirati performanse mobilnog spektra u kontekstu upravljanja bespilotnim letjelicama te predstaviti primjere rješenja i njihove primjene. Konačno, rad će pružiti preporuke za daljnji razvoj ovih tehnologija s ciljem unaprjeđenja autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



doc. dr. sc. Pero Skorput

doc. dr. sc. Krešimir Vidović (komentor)

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD
INOVATIVNI SUSTAVI AUTONOMNOG UPRAVLJANJA
BESPILOTNIM LETJELICAMA
Inovative Autonomous Drone Control System

Mentor: izv. prof. dr. sc. Pero Škorput

Student: Andre Garašić
JMBAG: 0135251021

Neposredni voditelj: doc. dr. sc. Krešimir Vidović

Zagreb, rujan 2023.

Zahvale

Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Peri Škorputu na savjetima i pomoći tijekom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se neposrednom voditelju doc. dr. sc. Krešimiru Vidoviću na savjetima pri izradi rada. Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na potpori tijekom mojeg studiranja.

SAŽETAK

Napretkom tehnologije mobilnih mreža, pogotovo dolaskom mobilnih mreža pete generacije postaje moguće prenijeti dostatnu količinu informacija s malom latencijom. U istom trenu tehnologija bespilotnih letjelica također napreduje te trenutno omogućuje bogatu senzorsku opremu, stabilne letne karakteristike ali i sve dulje vrijeme leta. Jedan od najvećih nedostataka bespilotnih letjelica danas jest domet koji je limitiran vrstom daljinskog upravljača. Ovim diplomskim radom istražuju se inovativni načini autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama (primarno kvadkoptera), također rad pruža uvid u mogućnosti i limitacije mobilne mreže na visinama na kojima lete bespilotne letjelice, kao glavnog medija komunikacije između letjelice i upravljačkih sustava na zemlji. Rad objašnjava koncept sustava za upravljanje prometom mobilnih letjelica te koji su sve podsustavi potrebni kako bi se on realizirao i opisuju se autonomne procedure i način rada tog sustava te isto tako se pokriva slučaj kada letjelicom upravlja operater. Nadalje, rad pruža uvid u performanse mobilne mreže na visinama leta drona pomoću terenskih istraživanja koja su provedena u Finskoj. Na kraju rada su dani prijedlozi budućih implementacija autonomnih sustava upravljanja dronovima na konkretnim slučajevima uporabe.

KLJUČNE RIJEČI: bespilotne letjelice; 5G; autonomni sustavi upravljanja dronovima

SUMMARY

With the advance of mobile network technology, especially with the arrival of the fifth generation mobile networks it has become possible to transmit a substantial amount of data with little latency. At the same time unmanned aerial vehicle technology has also advanced and at the moment it allows for a rich sensor package, stable flight characteristics and longer flight time. One of the biggest drawbacks of drones today is the range which is limited due to the controller. This thesis researches innovative autonomous drone control systems, also the thesis provides an insight into the possibilities and limitations of the mobile network at which drones fly, as the main communications channel between the aircraft and ground control systems. The thesis researches the concept of the unmanned aerial vehicle traffic management system, all the subsystems necessary for its operation and the autonomous procedures and protocols of the system, also the case when the operator is flying the drone is also covered. Further, the thesis gives insights into the mobile network performance at altitudes at which drones fly with the help of field measurements which have been conducted in Finland. At the end of the thesis future proposals for the implementation of autonomous drone control systems have been given on specific use cases.

KEY WORDS: unmanned aerial vehicles; 5G; autonomous drone control systems

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Pregled postojećih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama	3
2.1	Modeliranje dinamike kvadkoptera	3
2.2	Upravljačka elektronika i senzori kvadkoptera	4
2.3	Pregled strategija upravljanja	5
2.3.1.	Metoda upravljanja temeljena na promišljanju.....	6
3.	Razvoj inovativnih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama	12
3.1	Pregled inovativnih sučelja upravljanja čovjek-dron	12
3.1.1.	Metoda upravljanja gestama	13
3.1.2.	Metoda upravljanja govorom.....	14
3.1.3.	Sučelje mozak-računalo	14
3.1.4.	Multimodalne metode upravljanja	14
3.2	Napredno upravljanje bespilotnim letjelicama pomoću 5G mobilne mreže ..	14
3.2.1.	Utjecaj ključnih 5G značajki na bespilotne letjelice.....	15
3.2.2.	Utjecaj 5G Core mreže na bespilotne letjelice.....	16
4.	Analiza performansi mobilnog spektra	19
4.1	5G Ključni pokazatelji izvedbe	19
4.2	Pregled alata otvorenog koda za mjerenje KPI	22
4.3	Terenska ispitivanja i simulacije izvedbe mobilne mreže	23
4.3.1.	Postavljanje mjerenja	23
4.3.2.	Rezultat i analiza posluženih ćelija.....	24
4.3.3.	Rezultati i analiza susjednih ćelija.....	26
4.3.4.	Postavljanje simulacije	28
4.3.5.	Rezultati i analiza simulacije mobilnosti	29
5.	Pregled rješenja i primjeri primjene	32
5.1	Zakonski okvir	32
5.2	UTM	33
5.2.1.	UTM Koncept operacija	33
5.2.2.	UTM fizička arhitektura	34
5.2.3.	Uloga UTM upravitelja.....	35
5.2.4.	UTM klijenti i UTM servisi.....	36
5.2.5.	Eksterni podatkovni servisi.....	38

5.3	Primjer autonomnog upravljanja dronom pri inspekciji kritične infrastrukture	39
5.3.1.	Koncept operacije nadzora.....	40
5.3.2.	Specifikacija drona	40
5.3.3.	Servisi u oblaku	41
5.3.4.	Komunikacijski servisi	41
5.3.5.	Algoritmi i protokoli.....	41
6.	Preporuke za daljnji razvoj inovativnih sustava autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama	44
6.1	Razvoj sustava prve pomoći s autonomnim dronovima.....	44
6.2	Nadogradnja mobilne mreže autonomnim dronovima	44
7.	Zaključak.....	47

1. Uvod

Širenjem dostupnosti mobilnih mreža pete generacije (5G) otvara se novi spektar mogućnosti povezivanja uređaja. Jedan od tih uređaja jest bespilotna letjelica odnosno dron, čija je korisnost porasla u zadnjih nekoliko godina napretkom sve snažnijih i lakših baterija te dostupnosti kvalitetnih kamera visoke razlučivosti u relativno malom formatu koji je prigodan za uporabu na bespilotnoj letjelici. Glavni nedostaci bespilotnih letjelica trenutno jesu trajanje baterije tj. Vrijeme leta te domet u pogledu fizičkih limitacija daljinskog upravljača (par kilometara u idealnim uvjetima) i zakonskih limitacija.

Povezivanjem bespilotnih letjelica sa suvremenom mobilnom mrežom omogućilo bi napredak u komunikaciji koja je do sada bila ograničena isključivo na relaciji dron – operater, a sada se mogu uključiti i drugi akteri kao što su potencijalni sustavi za upravljanje prometom bespilotnih letjelica i zemaljski kontrolni sustavi. Učinkovitija i brža komunikacija s letjelicom omogućuje automatiziranje procesa letenja na jedan sigurniji način što u konačnici sa suradnjom s ostalim potpornim sustavima dovodi do jednog potpunog rješenja za brojni niz slučajeva uporabe bespilotnih letjelica koji do sad nisu bili izvedivi.

U ovome diplomskom radu cilj je predstaviti inovativne načine upravljanja autonomnim bespilotnim letjelicama. Cilj je istražiti načine i strategije upravljanja bespilotnom letjelicom, stanje i izvedbu mobilnih mreža na visinama leta s obzirom na izvedbu na zemaljskoj razini, potporne sustave koji su potrebni za sigurnu provedbu autonomnih operacije te same slučajeve uporabe za takve scenarije. Samim time, ovaj rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Pregled postojećih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama
3. Razvoj inovativnih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama
4. Analiza performansi mobilnog spektra
5. Pregled rješenja i primjeri primjene
6. Preporuke za daljnji razvoj inovativnih sustava autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama
7. Zaključak

U drugoj cjelini dobiti će se uvid u fizičke karakteristike bespilotnih letjelica, te kako se generira uzgon i što je potrebno da se letjelica kreće u prostoru. Također će se predstaviti senzori koji su uobičajeno na letjelici te sama upravljačka elektronika. Te će se pregledati strategije upravljanja bespilotnim letjelicama.

U trećem poglavlju dobiva se uvid u inovativne načine upravljanja bespilotnim letjelicama, te utjecaj mobilne mreže pete generacije na razvoj inovativnih načina autonomnog upravljanja.

Četvrto poglavlje analizira performanse mobilnog spektra, gdje je fokus stavljen na analizu izvedbe mobilne mreže na visinama od 50 do 150 metara na kojima uobičajeno lete dronovi. Te se identificiraju ključni pokazatelji izvedbe za mobilnu mrežu.

U petom poglavlju se daje primjer rješenja autonomnog sustava upravljanja prometom bespilotnih letjelica, njegovih sastavnih dijelova i podsustava. Također se daje konkretan primjer u vidu autonomne inspekcije električnih vodova pomoću bespilotnih letjelica.

Šesto poglavlje daje primjer potencijalnih slučajeva uporabe gdje se koriste autonomne bespilotne letjelice uparene s 5G mrežom, za potporu prvi prvoj pomoći, te nadogradnju mobilne mreže u hitnim slučajevima.

Sedmo poglavlje daje zaključak rada.

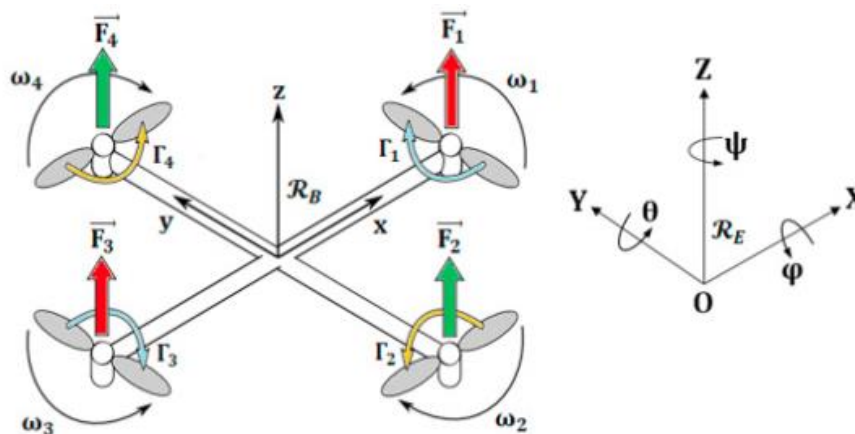
2. Pregled postojećih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama

Iako postoji više vrsta bespilotnih letjelica kao što su: letjelica s više propelera (*engl. Multi-rotor drones*), letjelice s nepomičnim krilima (*engl. Fixed wing drones*), helikopteri (*engl. Single-rotor helicopter drones*) i hibridne letjelice s nepomičnim krilima (*engl. Fixed-wing hybrid drones*) u ovome radu fokus će biti na letjelicama s više propelera, točnije na letjelicu s četiri propelera takozvani „kvadrokopter“ u nastavku rada dron.

Za razumijevanje sustava upravljanja bespilotne letjelice potrebno je razumjeti fizički aspekt leta s jedinstvenim karakteristikama kvadkoptera. Također je potrebno poznavati sensoriku letjelice te upravljačku elektroniku.

2.1 Modeliranje dinamike kvadkoptera

Iz samog imena može se zaključiti da kvadrokopter ima četiri propelera odnosno četiri pogonska motora raspoređena u obliku znaka + (vidljivo na slici 1.) a može biti i u obliku znaka X.



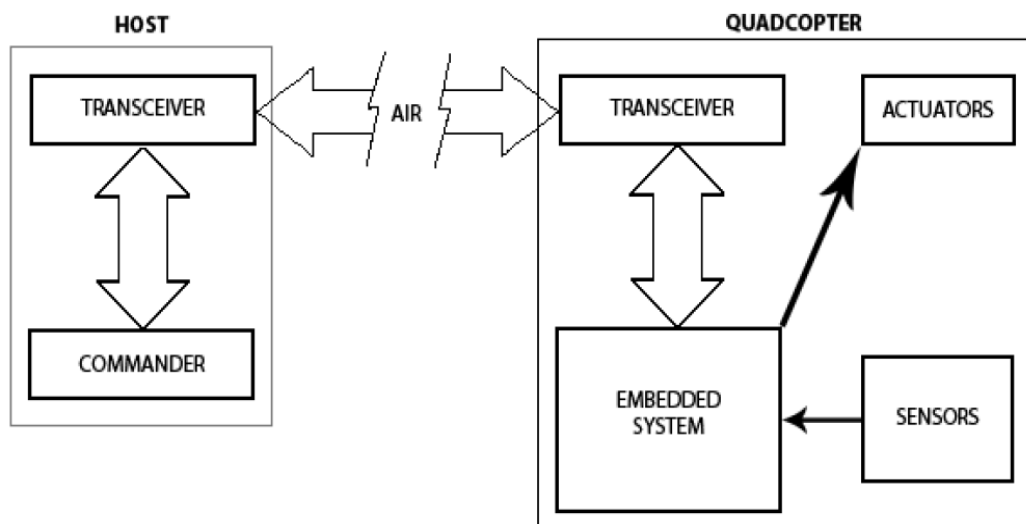
Slika 1. Prikaz kvadkoptera.

Izvor: [1]

Motori pod oznakom 1, 2, 3, 4 zaduženi su za uzdizanje letjelice. Svaki motor sastoji se od nepomičnog djela koji je pričvršćen za tijelo drona te pomičnog djela (tzv. Rotor) za koji su pričvršćeni propeleri koji proizvode potisnu silu prema gore. Potisna sila djeluje samo po Z-osi i biti će centrirana oko svakog motora. Zbog konstrukcije drona, centar gravitacije teži prema sredini (spoju između dva profila koja nose motore) iz toga se može zaključiti kako svaki pojedini motor može proizvoditi zakretni moment svojom vrtnjom te taj zakretni moment može rotirati dron oko centra gravitacije. Kako bi se izjednačio dobiveni zakretni moment motori nasuprot jedan drugog rotiraju u istome smjer, a susjedni motori rotiraju u suprotnome smjeru kako bi se sile okretnog momenta međusobno poništile i kako bi letjelica stabilno letjela na mjestu. Tako se može postići upravljanje letjelice kombinirajući brzinu vrtnje različitih

motora. Ako svi propeleri proizvode istu potisnu silu i svaki motor se okreće u suprotnome smjeru od susjednog motora (koncept koji je ranije spomenut) onda se neće proizvesti zakretni moment i letjelica će lebdjeti na mjestu. Ako želimo da letjelica ide prema gore moramo povećati brzinu vrtnje svih motora jednoliko tako da se proizvede ukupno veća potisna sila. Za spuštanje letjelice potrebno je jednoliko smanjiti brzinu vrtnje svih motora jednoliko. Kako kvadkopter ne može proizvesti prirodno lateralnu silu, lateralna translacija mora se izvesti tako da letjelica postigne nagib i tako će letjelica prirodno krenuti prema smjeru u kojemu je nagnuta. Jednostavna rotacija se postiže tako što se smanji brzina vrtnje motora za određeni iznos i poveća se brzina vrtnje nasuprotnog motora za taj isti iznos. Na primjer, ako letjelica lebdi i poveća se brzina motora 1 za određeni iznos a smanji se brzina vrtnje motora 3 za taj isti iznos, letjelica će rotirati oko Y-osi. Ako se želi postići skretanje (*engl. Yaw*), mora se povećati brzina vrtnje dva nasuprotna motora a smanjiti brzina vrtnje ostala dva nasuprotna motora za isti iznos, na primjer ako letjelica lebdi i poveća se brzina vrtnje motora 1 i 3, i smanji se brzina vrtnje motora 2 i 4 za jednaki iznos, letjelica će rotirati oko Z-osi.

2.2 Upravljačka elektronika i senzori kvadkoptera



Slika 2. Blok dijagram sustava upravljanja.

Izvor: [3]

Svi manevri opisani u prošlom poglavlju uspješno se izvode tako što se šalju ispravni kontrolni impulsi prema motorima letjelice. U ovome poglavlju prikazati će se generalna struktura upravljačkog sustava kvadkoptera, koji je zadužen za primanje naredbi od operatera i kontroliranje motora. Blok dijagram generalne strukture može se vidjeti na slici 2.

Za većinu amaterskih operatera kvadkoptera, upravljač je u obliku radijskog odašiljača koji je u stanju slati različite signale modulirane u različite kanale frekvencija. Elektronika u kvadkopteru prima radio signal i demodulira ga tako da svaki signal odgovara jednome zadatku. Na primjer takav jedan signal može biti analogna ručica za skretanje na odašiljaču, što ju

operater pomakne više to se odašilje veća vrijednost moduliranog signala prema kvadkopteru. Kada se signal primi od strane kvadkoptera, sve vrijednosti se demoduliraju te kanal koji služi za kontrolu brzine vrtnje motora će se iskoristiti da se adekvatno prilagodi brzina vrtnje motora potrebna za navedenu radnju. Segment upravljačke elektronike na slici 2. sastoji se od mikrokontrolera koji je zadužen za procesuiranje podataka od senzora i od operatera i davajući ispravan signal prema motorima za dobivenu naredbu. Jednostavan kvadkopter sastoji se od žiroskopa koji mjeri promjenu kuta rotacije za tri osi, te akcelerometra koji mjeri akceleraciju također u tri osi [3].

Za potrebe komunikacije između operatera i letjelice koristi se primopredajnik (*engl. transceiver*). Postoje različiti proizvođači i tehnologije primopredajnika, te je bitno odlučiti koje značajke su bitne za sustav komunikacije letjelice. Na primjer, za određeni proces modulacije signala postoji kompromis između udaljenosti odašiljanja signala i brzine prijenosa podataka. Inače veći domet odašiljanja signala dolazi s manjom brzinom prijenosa podataka i obrnuto. Također velika količina podataka predstavlja problem s pouzdanošću, pogotovo ako se garantira da će podatkovni paketi stići do odredišta potrebno je dio komunikacijskog kanala rezervirati kako bi se postigla takva pouzdanost što rezultira smanjenom ukupnom brzinom prijenosa. Isto tako u slučaju da je prijenos podatkovnih paketa neuspješan potrebno je pokušati ponovo poslati te pakete što dodatno povećava vrijeme za razmjenu podataka.

Kada upravljačka elektronika dobije i procesira podatke od operatera (zajedno s podacima od senzora) koristi ih za upravljanje s četiri motora na kojima su pričvršćeni propeleri. Motori su najčešće istosmjerni beskontaktni (*engl. DC brushless*) koji su napajani istosmjernom strujom od baterije te kontrolirani od strane elektroničkog modula za brzinu (*engl. ESC – Electronic Speed Control*)

2.3 Pregled strategija upravljanja

Ovo poglavlje daje pregled najčešće korištenih strategija upravljanja bespilotnim letjelicama, uključujući klasične metode kontrole i napredne metode kontrole baziranim na egzaktnim modelima i neizvjesnim modelima. Tablica 1. prikazuje spomenute metode upravljanja [4].

Tablica 1. Pregled strategija upravljanja.

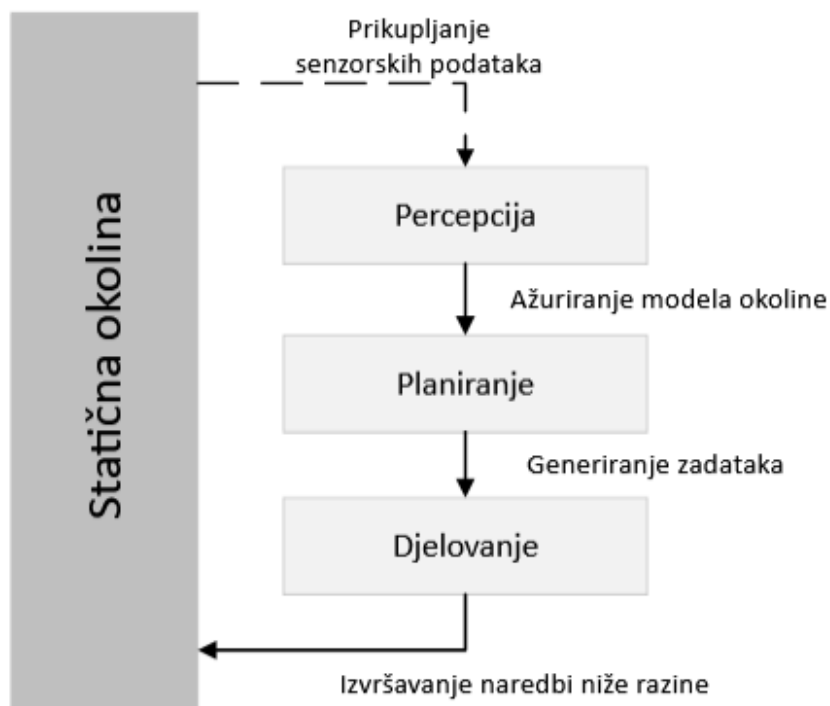
Kategorija	Metoda upravljanja	Karakteristike
Klasične metode	Linearizacija uznemirenosti + Eigenstructure pristup dodjeli	Garantira lokalnu stabilnost s uskim područjem rada, sporo procesiranje
	„Gain scheduling approach“	Omogućuje lokalnu stabilnost s širokim područjem rada, sporo procesiranje
	Sustav Linearnog variranja parametara	Omogućuje globalnu stabilnost uz određenu robustnost, sporo procesiranje
	Linearno kvadratni regulator	Pristup optimalne kontrole, jednostavan za implementaciju

	Nelinearna dinamična kontrola inverzije (NDI)	Prigodno za potpuno kontrolabilne sustave
	Unutarnja-vanjska petlja + NDI	Bazirana na pretpostavci dvije vremenske skale, primjenjiva na manje kontrolabilne sustave
	Unutarnja-vanjska petlja + NDI + naredbeni filter	Manje ovisan o izvedbi zatvorene petlje na pretpostavci o dvije vremenske skale
	„Backstepping“ metoda kontrole	Primjenjiva za sustave s povratnom petljom, eksplozija derivacija
	„Backstepping“ metoda uz naredbeni filter	Sprječava eksploziju derivacija
Napredne metode	μ -sinteza + Dinamična Inverzija (DI)	Omogućuje stabilnost vanjske petlje
	Adaptivna NDI	Prilagodljivost zatvorene petlje
	Adaptivni „Backstepping“	Omogućuje otpornost na vanjske smetnje
	L1 adaptivno upravljanje	Brza adaptacija s robusnošću i zajamčenom prijelaznom izvedbom
	Inkrementalni dizajn baziran na senzorima + NDI	Robustan na nepoznate smetnje
	Tradicionalna kontrola smetnji bazirana na promatraču	Zahtjeva odvajanje i linearizaciju
	Nelinearna kontrola smetnji bazirana na promatraču	Bez odvajanje i linearizacije
	Proširena kontrola temeljena na promatraču	Ne zahtjeva precizan model letjelice
	Promatrač poremećaja kliznog načina rada	Garantira stabilnost u vremenu

Izvor: [4]

2.3.1. Metoda upravljanja temeljena na promišljanju

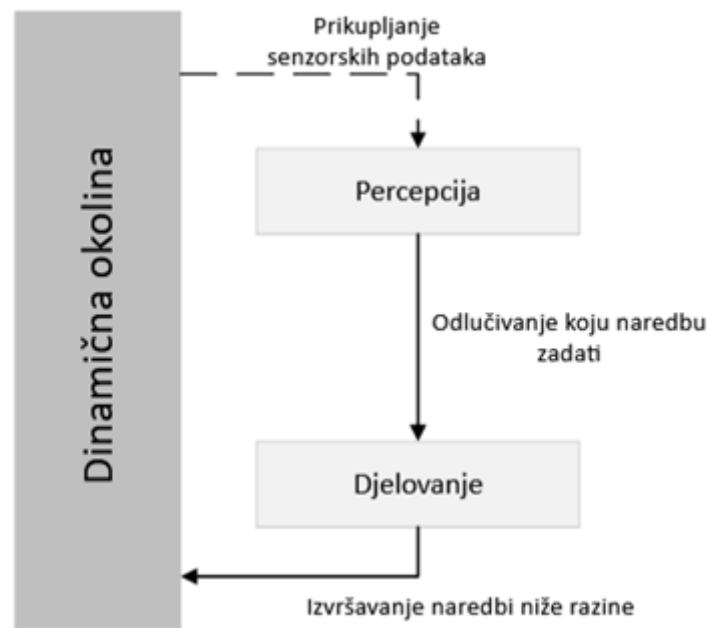
Metoda upravljanja temeljena na promišljanju (tzv. Deliberativna arhitektura) je takozvana odozgo prema dolje (*engl. Top-down*) metoda. Kako bi se zadovoljili zahtjevi letačke operacije, metoda upravljanja temeljena na promišljanju uvažava ciljeve i prepreke kako bi izvršila naredbe niže razine prema letjelici. Metoda se sastoji od tri zasebne funkcionalnosti: promatranje okoline, planiranje i djelovanje. Za svaki određeni cilj (slika 3.) modul za promatranje okoline detaljno mapira okolinu letjelice kako bi ažurirao model okoline. Za ostvarivanje cilja operacije, modul za planiranje generira validan plan zadatka imajući u vidu limitacije letjelice. Na kraju, modul za djelovanje pretvara plan zadatka u naredbe niže razine koje letjelica razumije. Zatim letjelica ponavlja tu sekvencu modula dok ne dostigne cilj operacije. Ovakva arhitektura posjeduje određene slabosti u sljedećim aspektima: Ako jedan od modula zakaže, cijela arhitektura ne radi, arhitektura je neučinkovita u dinamičnom i neizvjesnom okruženju. Potrebuje veliku snagu procesiranja, memorije i vremena kako bi se generirao cijeli model okoline, te ima veću vjerojatnost neuspjeha ako reprezentacija modela okoline je netočna ili nepotpuna [5].



Slika 3. Deliberativna arhitektura.

Izvor: [5]

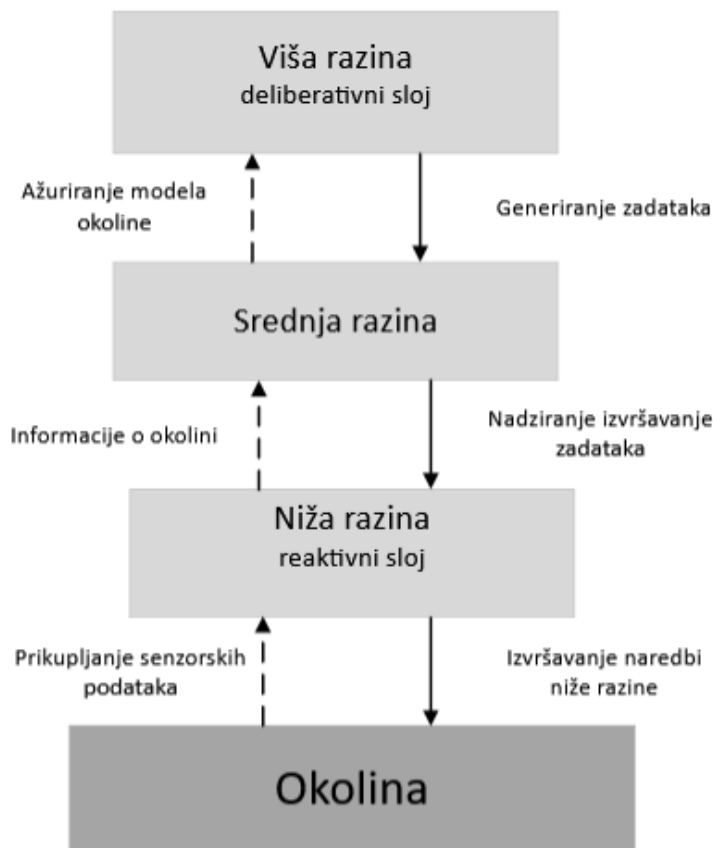
Reaktivna upravljačka arhitektura koristi pristup odozdo prema gore (*engl. Bottom-up*) koji je razvijen kako bi upotrijebio neke nedostatke deliberativne upravljačke arhitekture. Sastoji se od reaktivnih skupa pravila koji se nose s promjenama u okolini, ova arhitektura implementira kontrolnu strategiju kao kolekciju uvjeta i radnji koji spajaju podatke od senzora s radnjama letjelice. Može raditi u dinamičnoj okolini generirajući naredbe za letjelicu baziranu na podacima sa senzora i to bez izgradnje modela okoline ili kompleksnih proračuna planiranja puta. Na slici 4. prikazano je kako upravljačka arhitektura percipira okolinu letjelice prikupljajući podatke sa senzora, potom automatski odlučuje koje radnje (komande letjelici) izvesti. Ova arhitektura je jednostavnija u vidu računalne kompleksnosti od deliberativnog pristupa i brže se prilagođava dinamičnim promjenama bez prijašnjeg znanja o okolini. Međutim reaktivna upravljačka arhitektura nepogodna je za operacije letjelice s velikom kompleksnošću i nejasno definiranim ciljevima. Iz tog razloga ova arhitektura koristi se kada je okolina dobro poznata, ciljevi su dobro definirani i letjelica je opremljena s dovoljno senzora da prikupi sve potrebne podatke [5].



Slika 4. Reaktivna arhitektura.

Izvor: [5]

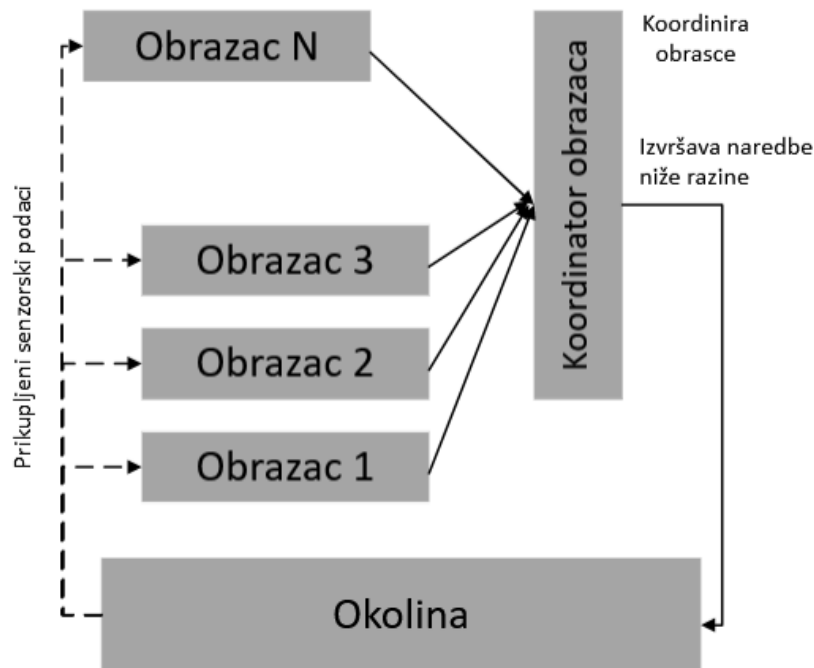
Hibridna upravljačka arhitektura proizlazi iz spajanja značajki deliberativne arhitekture s reaktivnom arhitekturom kako bi letjelice mogla izvesti određene operacije u stvarnome svijetu. Hibridni pristup dizajniran je kako bi se nosio s kompleksnim ciljevima i složenim ograničenjima u dinamičnom okruženju. Pruža kompromis između reaktivnog i deliberativnog pristupa. Najčešće, hibridna arhitektura sastoji se od tri hijerarhijska sloja (slika 5.). Viši sloj (deliberativni sloj) za donošenje odluka. Ovaj sloj izvršava kompleksne izračune kako bi generirao validan plan zadataka koje odgovaraju skupu radnji. Svaka radnja definira specifičnu sekvencu naredbi koja se šalje reaktivnom sloju kako bi generirao željene radnje. Srednji sloj nadzire interakciju između višeg i nižeg sloja. Niži sloj (reaktivni sloj) za rudimentarno upravljanje osluškuje okolinu. On upravlja neposrednom sigurnošću letjelice radnjama kao što su izbjegavanje objekata. Niži sloj upravlja letjelicom tako što izvršava sekvence naredbi koje dobije od višeg sloja [5].



Slika 5. Hibridna arhitektura.

Izvor: [5]

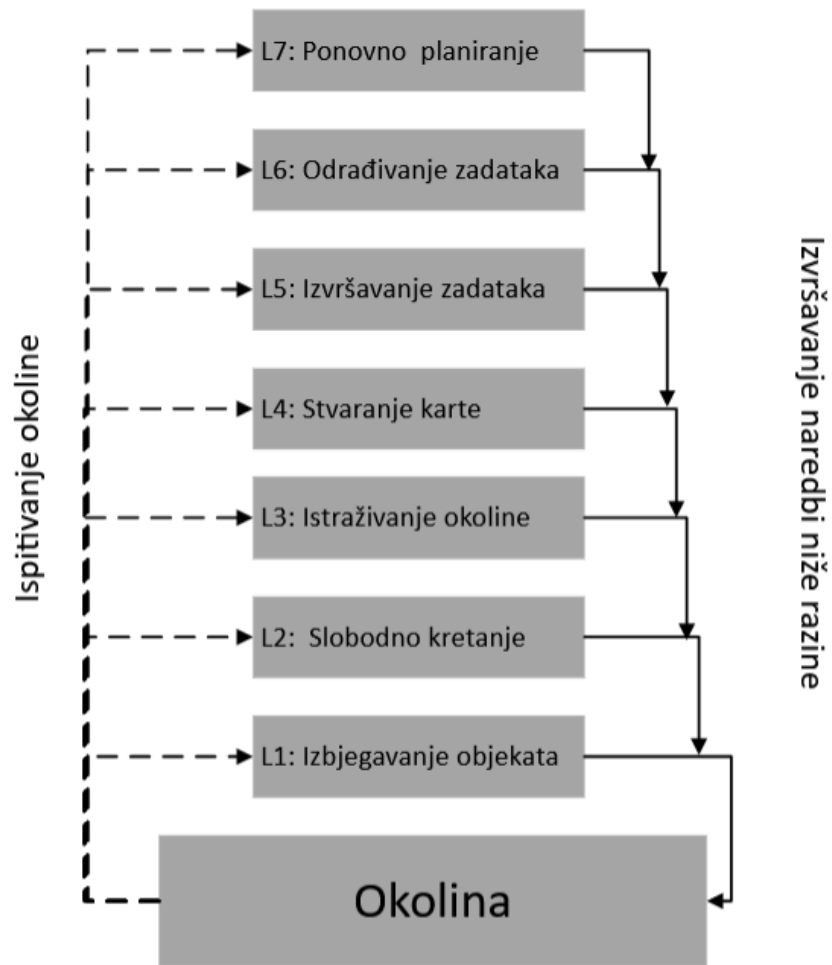
Arhitektura kontrole ponašanja dizajnirana je tako da kreira reaktivne module percepcije i djelovanja, načelno arhitektura kontrole ponašanja dijeli kontrolne strategije na zasebne blokove „ponašanja“ (slika 6.), gdje pritom svaki blok je zadužen za određeni zadatak. Ova arhitektura pruža neke prednosti s obzirom na reaktivan pristup. Svaki blok ponašanja može imati reaktivna i deliberativna svojstva i značajke. To znači da se ova arhitektura može nositi s nepredviđenim okolnostima koje letjelica može doživjeti bez znanja o okolini. Također arhitektura nudi paralelno i istodobno izvođenje blokova ponašanja koji djeluju neovisno jedan o drugome kako bi postigli zadane ciljeve te pruža dobro rješenje za problem izvođenja zadataka u raznim i nepoznatim okolinama. Arhitektura kontrole ponašanja posjeduje nedostatke u vidu kombiniranja i koordiniranja više blokova ponašanja, te kako blokovi ponašanja predstavljaju naredbe niže razine ponekad može biti teško ostvariti ciljeve više razine [5].



Slika 6. Arhitektura kontrole ponašanja.

Izvor: [5]

Višerazinska arhitektura (engl. Subsumption architecture) dizajnirana je kako bi pružila izvediv pristup prema izgradnji robusnog sustava upravljanja letjelicama. Pruža dobro rješenje za slučaj s više senzora i ciljeva, gdje se predlaže proširiva slojevita arhitektura koja pruža jedinstvenu reprezentaciju letjelica. Ova arhitektura raščlanjuje problem upravljanja letjelicom na skup poredanih upravljačkih razina prema redosljedu izvršavanja zadataka. Svaka razina ima definiran jedan zadatak upravljanja letjelicom kao što može biti izbjegavanje prepreka. Brook je definirao sedam razina, svaka od koje pruža specifičnu razinu autonomije: prva razina osigurava da upravljački sustav letjelice izbjegne kontakt s drugim objektima, druga razina omogućuje slobodno kretanje u okolini bez sudara s objektima, treća razina pruža mogućnost istraživanja okoline, četvrta razina gradi kartu okoline i planira put do određenih odredišta, peta razina razmišlja o ciljevima i odrađuje zadatke, šesta razina izvodi plan kako bi se došlo do određenog cilja i sedma razina obrazlaže postupke i ponovo planira zadatke. Višerazinski pristup ima tri veća nedostatka, pri izvođenju, mehanizam prioriteta ograničava sustav da se prilagodi, isto tako zato što se više razine miješaju s nižim razinama one se ne mogu dizajnirati neovisno, te ključni zadaci se ne mogu uvijek prioritizirati [5].



Slika 7. Višerazinska arhitektura.

Izvor: [5]

3. Razvoj inovativnih sustava upravljanja bespilotnim letjelicama

Dosadašnji sustavi upravljanja bespilotnih letjelica zasnivali su se na stalnoj komunikaciji između operatera i letjelice, te je za većinu ključnih parametara koji određuju sigurnost leta bio zadužen operater. Prije samog leta, operater je zadužen za provjeru ispravnosti letjelice tako što prvo vizualno provjeri ispravnost svih dijelova letjelica (propelera, nosive konstrukcije, baterije, senzora) te nakon toga i provjeri ispravnost svih sustava na letjelici u koji su uključeni ispravno kalibriranje žiroskopa i akcelerometra, provjera stanje baterije i provjera (ako postoji) dostupnosti GPS signala. U sklopu provjera prije leta uključeno je osiguravanje područja leta u vidu poštivanja pravila koja nalažu da se letjelica mora nalaziti na sigurnoj udaljenosti od drugih osoba, zrakoplova i objekata isto tako letjelica se ne smije ispuštati iz vida operatera. Također bitno je poštovati prostorna ograničenja održavanja letova u smislu blizine prema zračnoj luci, ključnim infrastrukturnim objektima ili drugim ograničavajućim faktorima, uz samu lokaciju treba obratiti pozornost na visinu leta zato što je ona također limitirana u nekim područjima kao što je u blizini uzletno-sletnih staza zračnih luka te može iznositi do 50 metara i do 120 metara iznad tla.

3.1 Pregled inovativnih sučelja upravljanja čovjek-dron

Čovjek može imati više uloga u interakciji s bespilotnom letjelicom. Uloga ovisi o vrsti uporabe letjelice i njezinoj razini autonomije. Čovjek može imati aktivnu ulogu operatera letjelice, gdje on direktno upravlja letjelicom preko nekog upravljača kako bi izvršio određeni zadatak. Na primjer fotografiranje dalekovoda pri rutinskoj kontroli. Još jedna uloga je ona primatelja, u tome slučaju čovjek ne upravlja letjelicom ali koristi od interakcije s njom, na primjer dostave paketa s dronom. Posljednja uloga je kod autonomnih letjelica gdje je čovjek potreban kao nadzornik. Iako moderne letjelice s najnovijom tehnologijom mogu letjeti potpuno autonomno, čovjek je i dalje potreban u slučaju kada treba promijeniti plan leta, ili nadgledati sami proces leta.

Iako je područje proučavanja interakcije čovjek-dron (*engl. Human Drone Interaction – HDI*) relativno neistraženo sve do 2018. godine, do sada su se razvili zanimljivi načini upravljanja s dronovima. Te inovativne metode, koje su još poznate kao prirodna korisnička sučelja (*engl. Natural User Interfaces – NUI*) omogućuju korisniku interakciju s letjelicom na bazi gesta, govora, pogleda, dodira i korištenja posebnih sučelja koji su spojeni s ljudskim mozgom (*engl. Brain-Computer Interfaces BCI*). Svaka upravljačka metoda utječe na način na koji pilot upravlja s letjelicom u različitim pogledima, kao što su vrijeme izobrazbe, točnost, latencija i udaljenost. Pregled svih prednosti i mana od pojedinih načina upravljanja dan je u tablici x. Glavni cilj prirodnih korisničkih sučelja je postići intuitivan način upravljanja letjelicom, koji radi prema korisnikovim očekivanjima. Prirodna korisnička sučelja omogućuju operaterima koji nisu nužno profesionalci da upravljaju letjelicom sa smanjenom vremenom obuke, smanjenom količinom stresa i potencijalno manjim brojem nesreća [6].

Tablica 2. Pregled metoda upravljanja.

Metoda upravljanja	Prednosti	Nedostaci
Daljinski upravljač	Niska latencija Precizna kontrola	Manje intuitivan od prirodnih upravljačkih sučelja

Gestama	Prirodna i intuitivna Kratak period uhodavanja	Veća latencija i manja preciznost od ostalih metoda
Govorom	Prirodna i intuitivna Kratak period uhodavanja Beskontaktna	Zvuk propelera može remetiti prepoznavanje govora Zahtjeva neposrednu prisutnost operatera
BCI	Beskontaktna Dostupna osobama s invaliditetom	Dulji period obuke Manja preciznost upravljanja Sporiji odziv
Dodir	Prirodna i intuitivna metoda Kratak period uhodavanja	Zahtjeva prisutnost operatera na lokaciji Zahtjeva dodatne sigurnosne mjere
Multimodalna	Može kombinirati prednosti drugih metoda	Moguća veća kompleksnost i cijena

Izvor: [6]

3.1.1. Metoda upravljanja gestama

Studije su pokazale, kada se korisnike upitalo da interagiraju s letjelicom bez ikakvih instrukcija, kontrola gestama je bio primarni izbor većine ispitanika. Neposredne interakcije s letjelicama su prirodnije koristeći geste nego korištenje daljinskog upravljača što pozitivno utječe na društveni aspekt sučelja upravljanja čovjek-dron. Jedan od načina implementacije metode upravljanja pomoću gestama je korištenje Kinect naprave (Proizvod koji detektira pokrete napravljen od kompanije Microsoft primarno za uporabu s Xbox igraćom konzolom) za dobivanje prostornih podataka i prepoznavanje položaja. Takav pristup uspješno je korišten za neposredno i udaljeno upravljanje. Kako bi se postiglo stvarno iskustvo leta može se Kinect uređaj spojiti s Oculus Rift naočalama za virtualnu stvarnost. Nedostatak korištenja Kinect uređaja za interakciju čovjeka i drona je relativno visoka latencija sustava, od otprilike 300 milisekundi. Prepoznavanje gesta može se također postići korištenjem kamera i računalnog vida. Većina letjelica već ima ugrađene kamere koje se mogu koristiti za prepoznavanje gesta bez dodatnih senzora koji povećavaju teret na letjelici. Detektiranje izraza lica može se koristiti za estimaciju pozicije letjelice relativno od korisnika, te korisnik može usmjeriti dron tako što pokaže prema željenom smjeru. Prototip je razvijen koristeći Parrot AR dron i njegovu ugrađenu kameru. Dron prvo prepoznaje ljudsko lice, nakon toga Viola-Jones algoritam za prepoznavanje lica se koristi i Kalmanov filter se također koristi za prepoznavanje lica i smanjenja netočnih prepoznavanja lica. Razvijen je sustav estimacije koji prepoznaje smjer u kojem gleda lice korisnika što omogućuje letjelici estimaciju pozicije i udaljenosti s obzirom na korisnika. Operater može poslati dron na određenu lokaciju tako što usmjeri ruku, obojene rukavice su korištene kako bi se olakšalo prepoznavanje.

3.1.2. Metoda upravljanja govorom

Studija o uporabi prirodnih korisničkih sučelja pokazala je da 38% Američkih i 58% Kineskih korisnika koristi govor kao metodu interakcije što upućuje na to da je ona intuitivna metoda kontrole. Međutim kontrola glasovnim naredbama nije još temeljito istražena. Može se razmotriti kako je kontrola govorom jednostavnija, zato što sve što operater treba učiniti je memorizirati glasovne naredbe što doprinosi kraćem vremenu obuke. Slično kao i kod upravljanja gestama, upravljanje govorom može dodati latenciju, tj. Sporiji odziv što limitira primjenu takve vrste upravljanja. Jedan od nedostataka je to što korisnik mora biti u neposrednoj blizini letjelice ako se glasovne naredbe procesuiraju od strane same letjelice. Takav nedostatak ne utječe na sustave gdje se koristi zemaljska kontrolna stanica za dekodiranje glasovnih naredbi i upravljanje letjelicom. Izrađen je prototip pomoću Parrot ARDrone-a i Aerostack sustava za upravljanje letjelicama pomoću glasovnih naredbi. U tom projektu pilot koristi glasovne naredbe kako bi komunicirao sa zemaljskog kontrolnom stanicom, koja šalje naredbe prema letjelici. Procesuiranje glasovnih naredbi radi se pomoću Pocket Sphinx modela za prepoznavanje govora koji je razvijen na sveučilištu Carnegie Mellon. Trenutna verzija sadrži rječnik od 15 kontrolnih naredbi kojemu se može proširiti funkcionalnost s dodatnim naredbama. Program sluša za jednostavne naredbe od jedne do tri riječi, povratne informacije se dobivaju od modela za prepoznavanje govora te se naredba pošalje letjelici.

3.1.3. Sučelje mozak-računalo

Metoda upravljanja pomoću sučelja mozak-računalo tj. Upravljanje drona uz pomoć moždanih impulsa ima velik potencijal kao tehnologija koja pomaže osobama s invaliditetom i kao metoda upravljanja. Za upravljanje letjelice uz pomoć moždanih signala, pilot mora nositi neku vrstu slušalica ili natkape koja mjeri aktivnost električnih impulsa na ljudskoj glavi, najčešći takav uređaj je Electroencefalograf (EEG). Izmjereni impulsi se dekodiraju pomoću algoritama strojnog učenja kako bi se moglo fizičkim uređajima moglo upravljati pomoću moždanih impulsa. Iako je uspješno provedeno testiranje s tri stupnja tolerancije, znanstvenici koji su provodili testiranje tvrde kako interakcija sučeljem mozak-računalo i dalje posjeduje dosta limitacija za razliku od drugih upravljačkih sučelja te su potrebna dodatna istraživanja kako bi se povećala preciznost i robusnost sustava prije nego što pređe iz faze testiranja u implementaciju.

3.1.4. Multimodalne metode upravljanja

Kombinirajući različite metode interakcije može spojiti prednosti svake metode. Multimodalni pristup može se koristiti kako bi se stvorila direktna veza s letjelicom primjerice tako što se polijetanje i slijetanje kontrolira glasovnim naredbama a kontrole pokreta uz pomoć gesta.

3.2 Napredno upravljanje bespilotnim letjelicama pomoću 5G mobilne mreže

Konvencionalni način slanja naredbi od operatera prema letjelici odvija se preko daljinskog upravljača koji odašilje radio signale na određenoj frekvenciji (tipično 2.4 i 5.7 GHz) što rezultira efektivnoj duljini transmisije od 6 kilometara u dobrim uvjetima. Nedostaci takvog sustava su domet, limitirana propusnost i visoka potrošnja energije. To su sve limitirajući faktori pri ostvarivanju punog potencijala bespilotnih letjelica čije značajke poput visoke mobilnosti, jednostavnog pokretanja i mogućnost autonomnog rada privlače pozornost za širok spektar

uporabe kao što su spašavanje i pronalaženje, poljoprivreda, javna zaštita, prikupljanje podataka i brojni drugi. Uz to, bespilotne letjelice pružaju obećavajuće rješenje u specifičnom slučaju pružanja mobilne usluge u hitnim slučajevima, ruralnim sredinama te potpori pri zgusnuto naseljenim područjima. Korištenjem 5G mobilne mreže za komunikaciju bespilotnih letjelica donosi priliku pružiti stabilnu povezanost dok se smanjuju dimenzije, težina i potrošnja energije te se povećavaju multimedijalne mogućnosti letjelica. 5G nastoji pružiti širok spektar servisa preko različitih pristupnih kanala i više-razinskih mreža za krajnjeg korisnika. Isto tako koristi Radio Access Networks (RANs) arhitekturu, koja više nije limitirana udaljenošću korisnika od bazne stanice ili kompleksne infrastrukture [7].

3.2.1. Utjecaj ključnih 5G značajki na bespilotne letjelice

5G spektar i frekvencija: Više frekvencijskih pojaseva dodijeljeni su trenutno 5G New Radio (NR) standardu. Definirana frekvencije tzv. „milimetre wave“ kreću se od 30 GHz i 300 GHz, što može pružiti visoku podatkovnu propusnost i nisku latenciju između letjelice i udaljenog kontrolnog centra. Komunikacija u tom pojasu uz prijenos u spektru iznad 6 GHz pokazala se kao važna komponenta 3GPP 5G NR standarda zbog iznimnog potencijala unatoč tome što je neučinkovita za komunikaciju na veće udaljenosti.

Upravljanje signalnim snopom (engl. Beamforming): Nove prepreke za 5G komunikaciju predstavljaju specifične karakteristike bespilotnih letjelica, kao što su trodimenzionalnost u prostoru i značajne limitacije u razmjeru, težini i snazi samih letjelica. Kako bi se poboljšala mogućnost primanja 5G signala letjelica, koristi se tehnologija upravljanja signalnim snopom tako da se oni međusobno konstruktivno „smetaju“ pod određenim kutom. „5G Multiple Input Multiple Output (MIMO)“ polja s tisućama malih združenih antena kombiniranih u jednoj formaciji mogu se koristiti kako bi se evaluirao učinkovitiji put transmisije do krajnjeg korisnika (npr. Letjelice).

Decentralizirano procesiranje podataka (engl. Multi Access Computing – MEC): 5G NR koristi modernu fizičku više slojevitost što značajno smanjuje latenciju RAN arhitekture tako što se procesiranje podataka i servisa ne odvija centralizirano na jednom mjestu već se to odvija na rubu mreže i bliže korisniku što smanjuje latenciju. Također prebacivanje komunikacije između pilota i drona na mobilnu mrežu omogućuje bespilotnoj letjelici manju potrošnju energije.

Virtualizacija funkcija mreže (engl. Network Function Virtualisation NFV) i mreže definirane softverom (engl. Software Defined Networks SDN): još jedna značajka mreže pete generacije je virtualizacija određenih funkcija komponenti kao što su ruteri i vatrozid koje su omogućene kao virtualizirane instance na 5G mreži, najčešće na rubnom dijelu mreže koristeći MEC infrastrukturu. Proces virtualizacije utječe na razne značajke bespilotne letjelice koje preuzima mreža. Virtualizacija funkcija mreže uparena s tehnologijom mreža definiranim softverom daju podršku za dinamičko programiranje čvorova mreže što omogućuje razdvajanje upravljačke od podatkovne razine.

Multipleksija mreže (engl. Network slicing): Koncept mrežne multipleksije omogućuje više virtualnim mrežama da rade istodobno na platformi dijeljene fizičke mrežne infrastrukture. To je posebno zanimljivo za bespilotne letjelice zato što se može odvojiti dio

podataka za kontrolu letjelice od dijela podataka kao što je videoprijenos te svaki ima svoj dedicerani spektar mreže [8].

3.2.2. Utjecaj 5G Core mreže na bespilotne letjelice

Specificirano od strane 3rd Generation Partnership Project (3GPP), nova 5G Core mreža orijentirana je prema računarstvu u oblaku i arhitekturi baziranoj na servisima (engl. Service Based Architecture SBA) prikazano na slici 8., koja pokriva sve 5G funkcionalnosti i interakcije uključujući autentikaciju, zaštitu, upravljanje sesijama i moderiranje prometa krajnjih korisnika. Također je naglasak stavljen na virtualizaciji određenih funkcija (NFV) korištenjem decentraliziranog procesiranja podataka (MEC) kao ključni faktor u arhitekturi. Kako bi se postigla učinkovitija i skalabilnija multipleksija mreže, bitan čimbenik je ukloniti ovisnost Pristupne mreže (engl. Access Network - AN) i jezgre mreže (engl. Core Network – CN) te modularizirati arhitekturu. Sljedeće ključne funkcije mreže (engl. Network Functions – NF) su dio 5G core mrežne arhitekture:

Kontrola pristupa i funkcija upravljanja mobilnošću (engl. Access and Mobility Management Function – AMF) zadužena je za kontrolu pristupa i mobilnosti.

Funkcija upravljanja sesijama (engl. Session Management Function – SMF) konfigurira sesije prema pravilu.

Funkcija upravljanja i prosljeđivanja korisničkih podataka (engl. User Plane Function – UPF).

Funkcija autentikacije servera (engl. Authentication Server Function – AUSF).

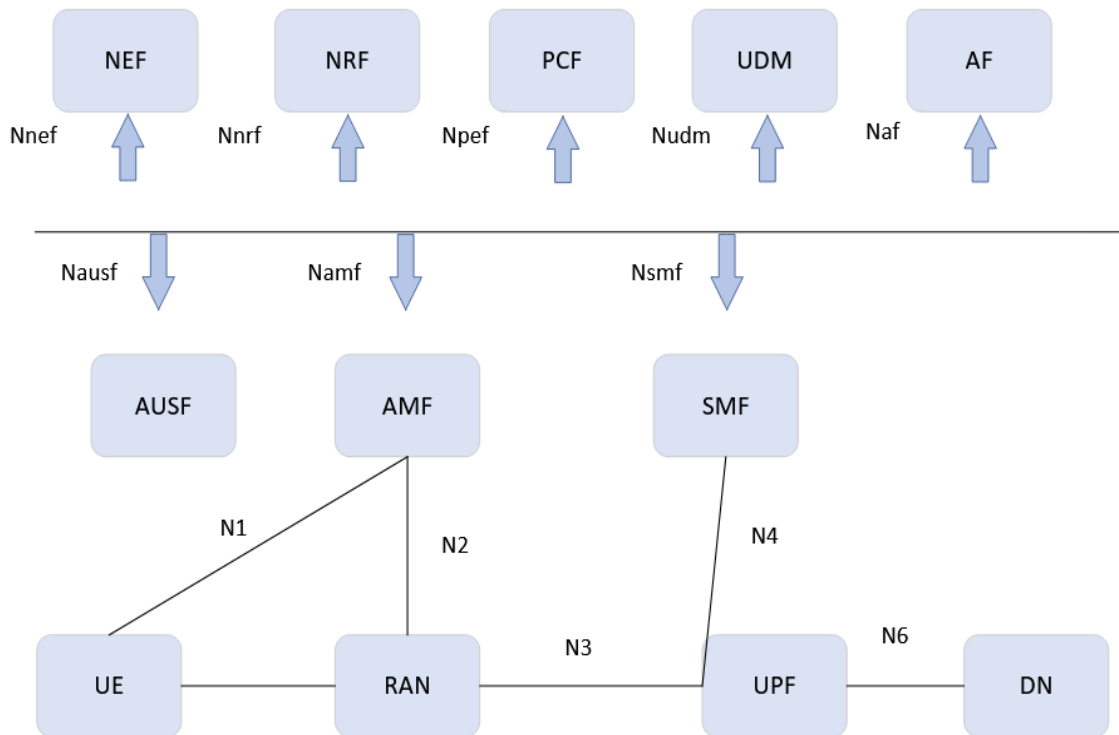
Funkcija kontrole pravila (engl. Policy Control Function – PCF).

Unificirana funkcija upravljanja podataka (engl. Unified Data Management Function – UDMF) integrira podatke korisnika za fiksni i mobilni pristup NG jezgri.

Funkcija odabira multipleksije mreže (engl. Network Slice Selection Function – NSSF) podržava odabir instance za multipleksiju mreže.

Funkcija mrežnog repozitorija (engl. Network Repository Function – NRF) pruža uslugu registracije i pronalaska NF servisa.

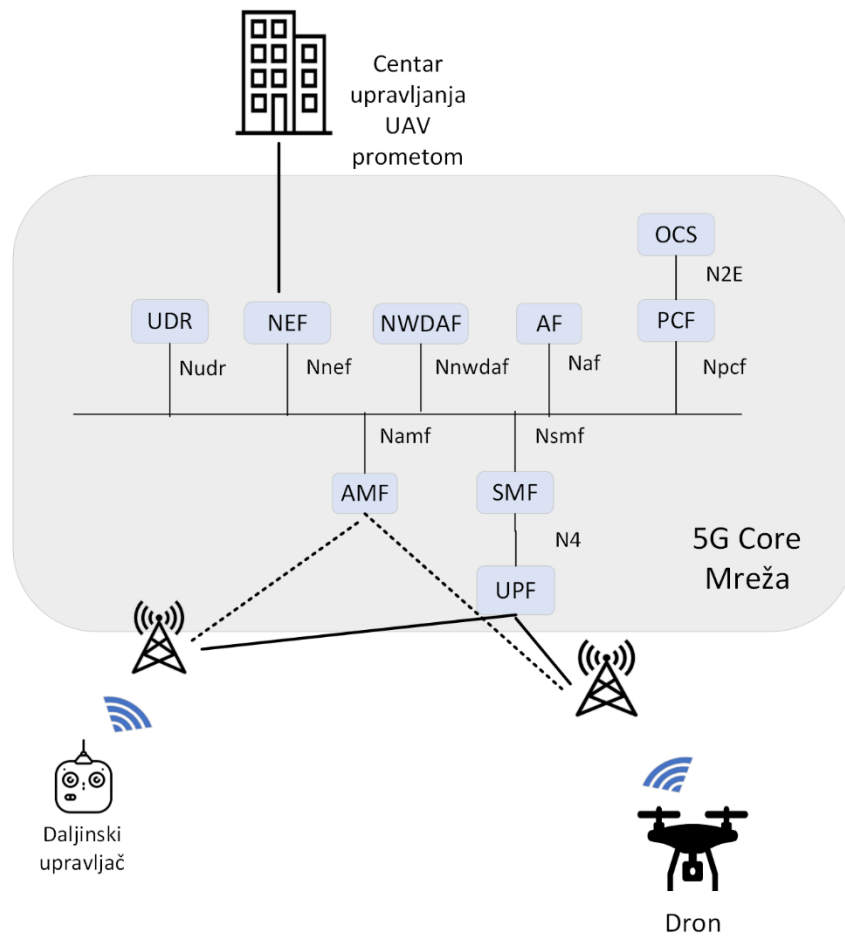
Funkcija izlaganja mreže (engl. Network Exposure Function – NEF) upravlja vidljivošću događaja i funkcija.



Slika 8. 5G referentna arhitektura.

Izvor: [8]

3GPP implementirao je referentni model za bespilotne letjelice pod nazivom 3GPP TR 22.825 baziran na 5G Core arhitekturi baziranoj na servisima (engl. Service Based Architecture – SBA), prikazan na slici 9., gdje se bespilotna letjelica (u ulozi uređaja krajnjeg korisnika) može upravljati preko daljinskog upravljača ili kroz mrežu što bi na primjer omogućilo upravljanje letjelice izvan vidnog polja operatera (engl. *Beyond Visual Line-of-Sight – BVLOS*). U vidu pokrivenosti, autorizacije, praćenja i kvalitete usluge (engl. *Quality of Service – QoS*) bespilotne letjelice mogu iskoristiti prednosti 3GPP modela [8].



Slika 9. Referentni model 5G mreže za bespilotne letjelice.

Izvor: [8]

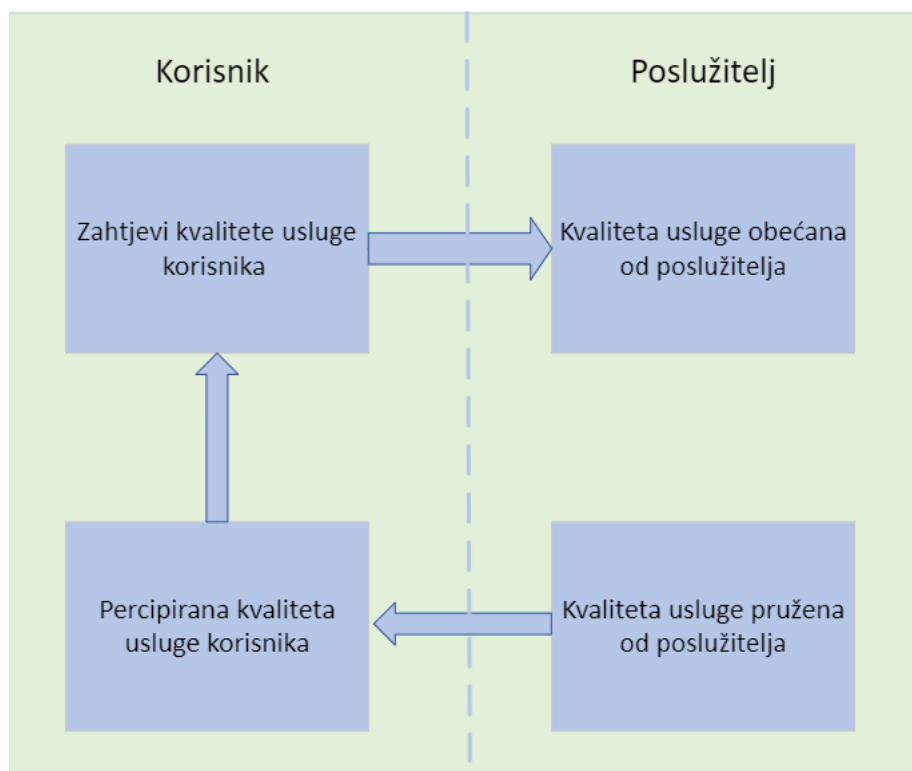
Također 3GPP pristup omogućuje sustav praćenje prometa bespilotnih letjelica (*UAS Traffic Management – UTM*) koji komunicira s letjelicama i omogućuje određenim dionicima da pristupe informacijama kao što su identitet letjelice i meta-podaci letjelice, kao na primjer Civilna zaštita ili policija. Očekuje se od arhitekture bazirane na servisima (SBA) da također unaprijedi podršku za bespilotne letjelice, uključujući navigaciju letjelica i kontrolu zračnog prometa, prognozu vremena i upravljanje povezanošću [8].

4. Analiza performansi mobilnog spektra

Sve je počelo 1980-ih s prvom generacijom mobilnih mreža (1G) koja je omogućavala samo pozive preko mobilnih uređaja, 1990 se pojavio 2G koji je uz pozive imao i mogućnost slanja tekstualnih poruka u obliku SMS-a, to se 2000. nadogradilo s 3G mrežom gdje je prvi puta bio moguć pristup internetu preko mobilnog uređaja a sve se to nadogradilo 2010. s 4G mrežom koja je omogućila konzumiranje mobilnog videosadržaja širokim masama zajedno s većom podatkovnom brzinom sve do današnjice to jest pojavom pete generacije mobilne mreže (5G) koja obećava digitalizaciju cijelih industrija i sveobuhvatno novo iskustvo s konzumiranjem sadržaja na internetu.

4.1 5G Ključni pokazatelji izvedbe

Cilj 5G ključnih pokazatelja izvedbe mreže (*engl. Key Performance Indicators – KPI*) je izmjeriti izvedbu mreže pete generacije s različitih perspektiva, kao što je perspektiva korisnika ili perspektiva poslužitelja prikazano na slici 10.



Slika 10. Veza između kvalitete usluga i pružatelja usluga.

Izvor: [9]

Iako se naizgled čine slično, mogu se razlikovati u pristupnim točkama gdje se mjere i sučelju preko kojega se ispitivanja provode. Isto tako, alati uz pomoć kojih se izvode mjerenja su različiti, zato što su prilagođeni specifičnom sloju (na primjer, fizički, mrežni ili aplikativni sloj) ili segmentu 5G mrežne arhitekture (na primjer. Radio, transportna ili core mreža). Kako bi se dobio bolji pregled ključni pokazatelji izvedbe mreže prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Definiranje 5G KPI.

Naziv (naziv na engleskom)	Opis	Mjerna jedinica
Jednosmjerna latencija (<i>One-way-latency</i>)	Jednosmjerna latencija je ukupno vrijeme potrebno da se paket pošalje od komunikacijske jedinice pošiljatelja dok ne stigne do komunikacijske jedinice primatelja.	ms
Varijacija latencije (<i>Jitter</i>)	Varijacija latencije predstavlja promjenu iznosa latencije koja utječe na poslani pakete od strane primatelja prema pošiljatelju.	ms
Dostupnost (<i>Availability</i>)	Dostupnost, izražena u postocima, predstavlja omjer između količine vremena gdje specifična komponenta sustava odgovara primljenim zahtjevima i zadovoljava danim uvjetima kvalitete usluge, i ukupne količine vremena u kojemu je ta komponenta aktivna.	%
Pouzdanost (<i>Reliability</i>)	Pouzdanost, izražena u postocima, predstavlja omjer između broja poslanih paketa mrežnog sloja koji su uspješno primljeni na određeni čvor unutar vremenskog ograničenja zadanog za taj servis, i broja ukupnih poslanih paketa od mrežnog sloja.	%
Gubitak paketa (<i>Packet Loss</i>)	Gubitak paketa, izražen u postocima, predstavlja omjer između broja paketa koji ne stignu do odredišta, mjereno na određenom sučelju logičke arhitekture servisa, i ukupnog broja poslanih paketa.	%
Gustoća spojenih uređaja (<i>Connection Density</i>)	Ukupan broj spojenih i/ili dostupnih uređaja po prostornoj jedinici	Uređaja/km ²
Prostorni Kapacitet (<i>Area Capacity</i>)	Ukupni kapacitet podatkovnog prometa poslužen po prostornoj jedinici	Bps/m ²
Brzina podataka pružena korisniku (<i>User Experienced Data Rate</i>)	Brzina prijenosa podataka koju doživljava korisnik 5G mreže koji isporučuje ili prima podatke.	Mbps
Garantirana brzina (<i>Guaranteed Rate</i>)	Omjer između broja bitova, poslanih preko specifičnog sučelja na servisu logičke arhitekture, i jedinice vremena. Garantirana brzina prijenosa je minimalna brzina prijenosa podataka kako bi servis ispravno funkcionirao.	Mbit/s

Količina podataka (<i>Data Volume</i>)	Ukupna količina informacija prenesenih preko određenog sučelja za vrijeme rada servisa, mjerena u bitovima.	Gbits
Konfiguriranje komponente (<i>Components Onboarding Configuration</i>)	Vrijeme potrebno za konfiguraciju nove komponente.	min
Vrijeme puštanja komponente u rad (<i>Component Deployment Time</i>)	Vrijeme potrebno za puštanje komponente u rad.	min
Vrijeme izrade/adaptacije virtualne instance (<i>Slice Creation/Adaptation Time</i>)	Vrijeme proteklo od početka izrade/adaptacije sve do potpune operabilnosti virtualne instance mreže (Slice-a).	ms
Vrijeme za skaliranje (<i>Time to Scale</i>)	Vrijeme potrebno za skaliranje aktivne komponente.	min
SS-RSRP	„Synchronization Signal (SS) Reference Signal Received Power“ je definiran kao linearni prosjek snage od dobivenih referentnih signala.	dBm
CSI-RSRP	„Channel State Information Reference Signal Received Power“ je definiran kao linearni prosjek snage dobivenih od resursnih elemenata od antenskih priključak koji odašilju referentni signal s informacijama o stanju kanala.	dBm
SS-RSRQ	„Secondary Synchronization Signal Reference Signal Received Quality (SS-RSRQ)“ definiran je kao omjer $N \times \text{SS-RSRP} / \text{RSSI}$, gdje je N broj resursnih blokova RSSI mjerenja.	dB
CSI-RSRQ	„Channel State Information Reference Signal Received Quality (CSI-RSRQ)“ definiran je kao omjer $N \times \text{CSI-RSRP} / \text{CSI-RSSI}$, gdje je N broj resursnih blokova CSI-RSSI mjerenja.	dB
SS-SINR	„Secondary Synchronization Signal-to-Noise and Interference Ratio (SS-SINR)“ definirana je kao linearni prosjek snage resursnih elemenata koji nose sekundarne sinkronizacijske signale podijeljene s linearnim prosjekom snage smetnja i interferencije.	dB

CSI-SINR	„Channel State Information Signal-to-Noise and Interference Ratio (CSI-SINR) definiran je kao linearni prosjek doprinosa snage resursnih elemenata koji nose referentne signale s informacijama o stanju kanala podijeljene s linearnim prosjekom snage smetnja i interferencija.	dB
----------	---	----

Izvor: [9]

Definirani ključni pokazatelji mogu se mjeriti na različitim točkama u mreži, baziranim na pozicijama gdje su locirani mjerni uređaji [10].

4.2 Pregled alata otvorenog koda za mjerenje KPI

Ova cjelina sadrži popis alata koji su bili korišteni u različitim EU projektima za mjerenje KPI. Generalno mjerenja KPI zasnivaju se ne korištenju 5G mrežnih sonde za prikupljanje podataka i upravljačkog rješenja u oblaku za analizu podataka. Sonde su uređaji ili softverski dodaci koji su postavljeni na ključnim spojnicama u mreži, kako bi nadgledali određene parametre, pasivno ili aktivno generirajući pritom malo opterećenje na mreži kako bi simulirali korisnike. Sonde se generalno svrstavaju u dvije kategorije:

Hardverske sonde su uređaji ili oprema postavljena blizu RAN ili core elemenata mreže kako bi nadzirali zadane parametre.

Softverske sonde koje su u obliku softverskih dodataka koji su ugrađeni ili zasebno instalirani na elemente mobilne mreže ili čak na uređaje krajnjih korisnika.

Isto tako mjerenja se mogu odvijati u dva načina mjerenja:

Pasivna mjerenja nadgledaju mrežne parametre, kao što su propusnost i iskorištenost mreže, bez generiranja umjetnog podatkovnog prometa za potrebe mjerenja.

Aktivna mjerenja šalju kontrolne podatke kako bi izmjerili vremenski osjetljive parametre, kao što su latencija i gubitak paketa. Aktivne sonde mogu mjeriti KPI nakon što se servis pusti u pogon i dok se servis isporučuje.

Može se razmotriti pet načina implementacije mjernih alata:

Korisnički i serverski-bazirani alati imaju za cilj mjeriti od kraja do kraja KPI, kao što su vrijeme kružnog putovanja podataka (*engl. Round Trip Time – RTT*) i propusnost pomoću *Transmission Control Protocol (TCP)* sesija.

Alati za pojedinačne čvorove šalju proizvoljne podatke prema bilo kojem čvoru i mjere vrijeme odziva samog poslužiteljskog čvora ili servisa koji određeni čvor poslužuje kroz posebni zahtjev. Također mogu mjeriti dostupnost (servisa ili čvorova).

Alati u mreži pasivno nadgledaju protok podataka i kreiraju izvješća o njima. Ti alati su posebno korisni kada se kombiniraju s *Real-time Transport Protocol (RTP)*, gdje jedna pasivna sonda može mjeriti točnu stopu gubitka paketa, RTT-a i slično.

Alati koji su upogonjeni na računalnom sustavu servera poslužitelja i pružaju detaljan pregled svih servisa koji su pokrenuti na istim računalima.

Hardverski alati su manje fleksibilni, kako se ne mogu upogoniti preko softverskih kontejnera ili paketa. Međutim zato su korisniji za testiranje nižih slojeva 5G mreže kao što je simuliranje većih broja korisničkih uređaja.

Alati otvorenog koda za mjerenje KPI:

Ping je TCP/IP naredba koja se koristi kako bi se razriješili problemi s povezanošću, dostupnosti i imenovanjem. Naredba se bazira na *Internet Control Message Protocol (ICMP)* te pruža statistiku o povezanosti (gubitak paketa i RTT).

iPerf je često korišteni alat za mjerenje izvedbe mreže i ugađanje postavki, pružajući aktivna mjerenja maksimalne moguće propusnosti na IP baziranoj mreži. Podržava podešavanje raznih parametara povezanih s vremenom, memorijom i protokolima (TCP, UDP, SCTP). Za svaki test pruža izvještaj o propusnosti, gubitku paketa i drugim parametrima. iPerf posjeduje funkcionalnosti za klijente i korisnike te može kreirati tokove podataka kako bi se mjerila propusnost između dvije krajnje točke u jednom ili oba smjera.

Bmon je alat za mrežno praćenje i otklanjanje kvarova za Unix-slične operativne sustave, koji dohvaća statistike o mreži. Alat je pouzdan i učinkovit u praćenju propusnosti u stvarnom vremenu i predviđanju potražnje.

Curl je naredba korištena za prijenos podataka. Dostupna je za mnogo uređaja i aplikacija te podržava mnoge protokole i tipove podataka.

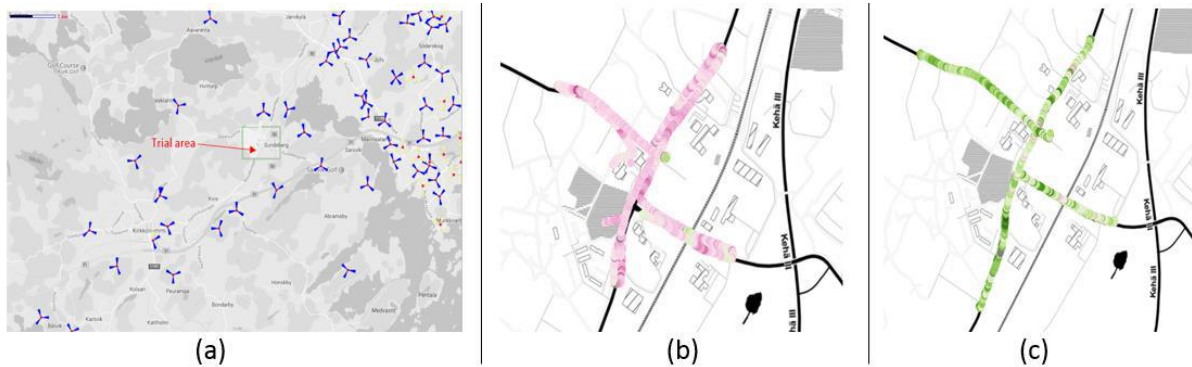
4.3 Terenska ispitivanja i simulacije izvedbe mobilne mreže

Istraživači iz Ericssona proveli su terenska ispitivanja i simulacije kako bi doprinijeli trenutnoj razini znanja o dronovima spojenim na mobilnu mrežu, fokus je bio pogotovo na donošenju novih uvida u dizajn mreža baziranih na provedenim testiranjima i rezultatima simulacija. Takvi zaključci koji su doneseni iz eksperimentalnih mjerenja i simulacija imaju posebno visoku praktičku važnost. Ova studija vođena terenskim ispitivanjima kako bi se shvatile varijacije u primljenom mobilnom signalu u usporedbi sa zemaljskim mjerenjima za dronove je od velike važnosti. Također se opisalo kako su latencija i fizička dodjela resursa povezani za povezivanje dronova. Doneseni zaključci ključni su za naredbenu i kontrolnu komunikaciju s dronovima, te se identificiraju glavne zapreke pri pružanju podrške mobilnosti za spojene dronove.

4.3.1. Postavljanje mjerenja

Mjerenja su se odvila na komercijalnoj LTE mreži u predgrađu Finskog grada Masale. Slika 11. Pokazuje pozicije antena i orijentacije odašiljača na baznim stanicama oko testnog područja. Letovi dronom i mjerenja odrađena su uz pomoć DJI Phantom 4 Pro letjelice, duljina leta je oko 30 minuta. Mjerenja su odrađena TEMS Pocket 16.3 aplikacije instalirane na LTE pametnom mobitelu koji je bio pričvršćen za letjelicu. Rezultati i analiza prikazani kasnije su dobiveni od ruta na zemlji, 50 metara i 150 metara visine leta, zemaljska razina služi kao

referentno mjerilo, a 150 metara je odabrano jer je to najveća dopuštena visina leta dronom u Finskoj gdje je eksperiment proveden. Rezultati na zemlji prikupljeni su vožnjom automobila po ruti prikazanoj na slici 11(c), a ruta drona na nebu prikazana je na slici 11(b). Dron je letio brzinom od oko 18 km/h, dok je auto vozio brzinom od 20-40 km/h ovisno o prometu na cesti. Podaci prikupljeni na zemlji uspoređeni su s podacima prikupljenim u zraku, zbog kompleksnosti, prezentirani su samo podaci skupljeni u pojasu frekvencije od 800 MHz.



Slika 11. Testni let drona u Masali, Finska: a) prikaz pozicija baznih stanica i orijentacija antena oko testnog područja; b) prikaz rute za letjelicu na 2D karti; c) prikaz referentne rute po kojoj se kretao automobil na zemlji.

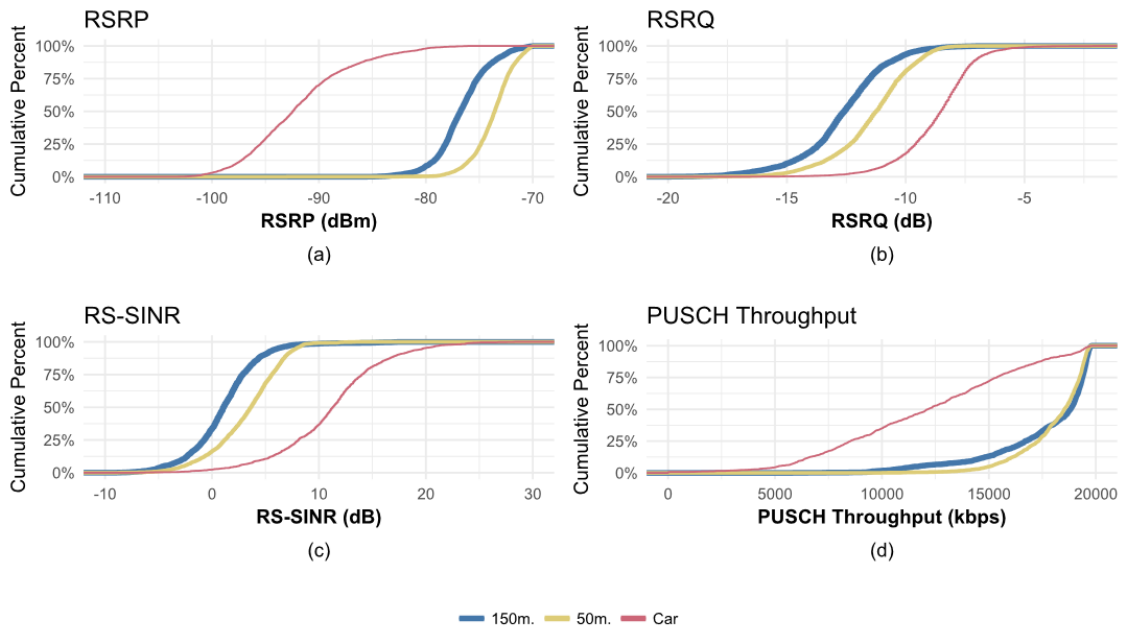
Izvor: [10]

4.3.2. Rezultat i analiza posluženih ćelija

Prvo se istražuje terensko mjerenje podataka koje odgovara spojenoj ćeliji prikazano na slici 12. Snaga primljenog referentnog signala (*engl. RSRP*) je ključni parametar koji ukazuje na jačinu primljenog signala u LTE mreži. Iz RSRP distribucije na grafu na slici 12(a), može se vidjeti da je RSRP na visinama od 50 i 150 metara viši od RSRP na zemaljskoj razini. RSRP na 50 percentilu za visine 50 i 150 metara je 18.9 dB i 15.6 dB jači od odgovarajuće vrijednosti na zemaljskoj razini. Komercijalne mobilne mreže postavljene su tako da su antene na odašiljačima baznih stanica nagnute prema tlu kako bi se optimizirala pokrivenost na tlu. Na visinama od 50 ili 150 metara, korisnička oprema na dronu je vrlo vjerojatno bila poslužena s dijelom manje snage glavnog spektra ili sa sporednim dijelom signala koji odašilju antene koji imaju smanjenu jačinu signala u usporedbi s glavnim dijelom signala koji poslužuju korisničku opremu na zemlji. Bitno za razmotriti je da su uvjeti širenja signala na nebu puno povoljniji nego prema zemlji. Zato kao rezultat, primijetilo se kako je korisnička oprema na dronu izmjerila jači signal RSRP od ćelije nego oprema na tlu. Kvaliteta primljenog referentnog signala (RSRQ) je još jedan ključan parametar mjerenja koji pokazuje primljenu kvalitetu signala u LTE mreži.

RSRQ uključuje utjecaj interferencije susjednih ćelija. Iz prikaza RSRQ na slici 12(b), može se vidjeti da je RSRQ na visinama od 50 i 150 metara niži od RSRQ na zemlji. 50 percentil vrijednosti RSRQ na visinama od 50 i 150 metara je 2.8 dB i 4.1 dB niži od pripadajuće vrijednosti na zemaljskoj razini. Lošije vrijednosti RSRQ dobivenih od mjerenih ćelija su očekivane zbog velike slobode širenja signala na nebu što doprinosi jačoj interferenciji signala pri povratku od strane ćelija na koje dron nije spojen. Alternativni parametar kvalitete primljenog signala je omjer signala i interferencije i smetnji (*engl. Signal to Interference-plus-*

Noise-Ratio – SINR). Slika 12(c) prikazuje distribuciju SINR referentnih signala. 50 percentil SINR referentnih signala na visinama od 50 do 150 metara su 7.7 dB i 10.2 dB niži od pripadajućih vrijednosti na zemaljskoj razini. Ta mjerenja opet pokazuju kako je interferencija signala pri povratku od strane ćelija na koje dron nije spojen, jača u zraku od zemaljske razine.



Slika 12. Podaci s poslužujuće bazne stanice: a) RSRP distribucija; b) RSRQ distribucija; c) RS-SINR distribucija; d) prikazuje propusnost uzlazne veze.

Izvor: [10]

Snaga primljenog signala na korisničkoj opremi drona od bazne stanice najviše ovisi o dva faktora: gubitak snage i pojačanje antene. Generalno, kako se visina povećava, gubitak snage se prvo smanjuje zbog povećane razine usluge te se potom smanjuje zbog gubitka koji se javlja prilikom povećanja udaljenosti koji nadilazi povećanu razinu usluge. Dodatno, pojačanje antene na rubnim dijelovima se smanjuje kako se visina povećava. Dobiveni rezultat je prvotnim povećanjem visine, povećava se primljena snaga signala korisničke opreme na dronu od baznih stanica te se potom smanjuje kao što je pokazano na terenskim mjerenjima slikom 12(a). Snaga interferencije signala pri povratku je suma svih primljenih snaga signala od svih susjednih baznih stanica. Generalno, kako se visina povećava, interferencija signala pri povratku se prvotno povećava te se potom smanjuje. Slično obrazloženje može se primijeniti na interferenciju signala prema korisničkoj opremi. Za razmotren visinski domet (150 metara na terenskim istraživanjima i 300 metara u simulaciji), došlo se do otkrića da se kvaliteta signala (SINR/RSRQ) smanjuje kako se visina povećava. Mora se imati na umu da su RSRP, RSRQ i RS-SINR sve parametri za silaznu vezu to jest vezu od bazne stanice prema korisničkoj opremi. Mnogi slučajevi korištenja bespilotnih letjelica koriste kameru koji zahtijevaju dobru uzlaznu vezu (od letjelice prema baznoj stanici). Na terenskim mjerenjima se također mjerila propusnost uzlazne veze preko LTE dijeljenog kanala fizičke uzlazne veze (*engl. Physical Uplink Shared Channel – PUSCH*) povezan s učitavanjem podataka, kao što je prikazano na slici 12(d). Može se vidjeti da je varijanca propusnosti uzlazne veze na visinama od 50 metara i 150 metara puno

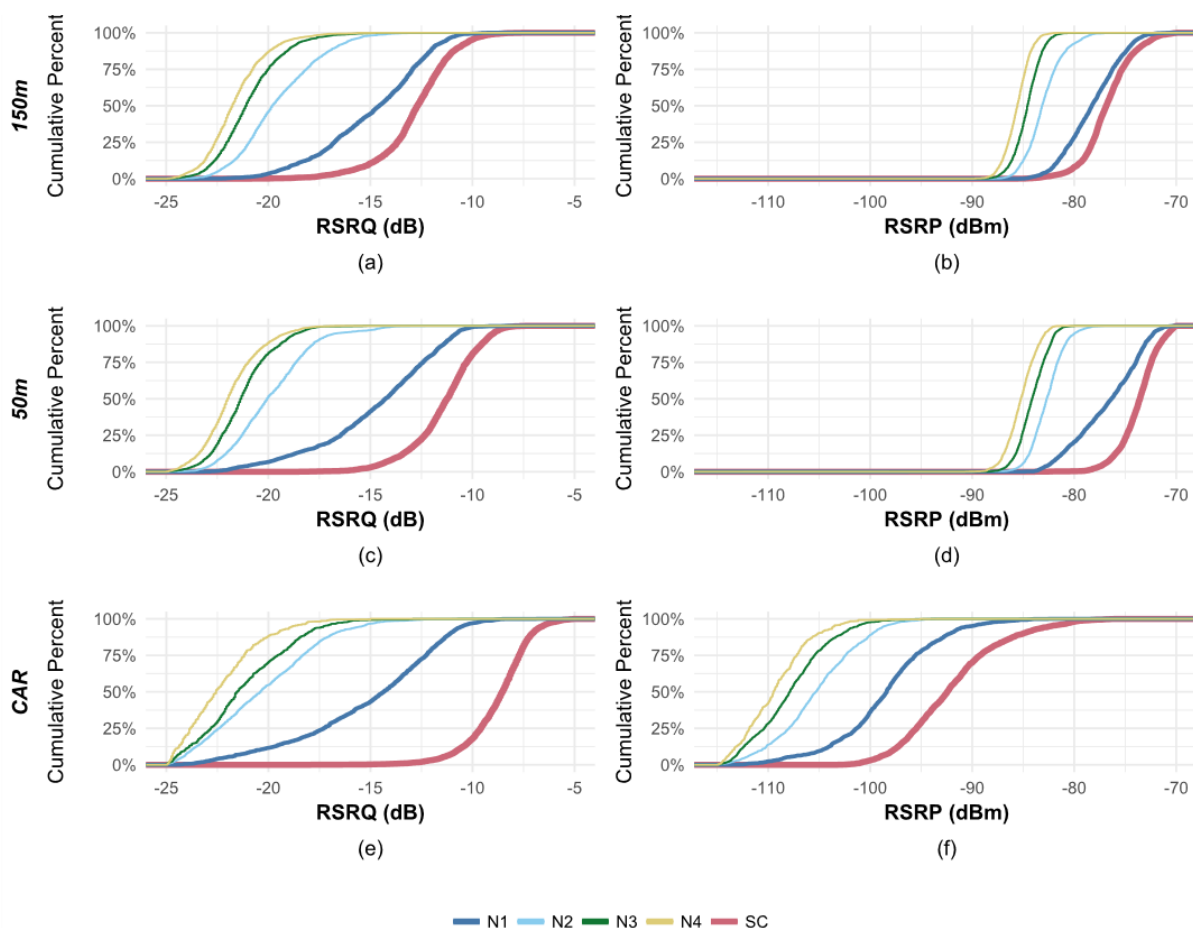
manja nego na zemaljskoj razini. Također se može vidjeti kako je propusnost na visinama od 50 metara i 150 metara veća nego odgovarajuće vrijednosti na zemaljskoj razini. 50 percentil propusnosti na visinama od 50 metara i 150 metara iznosi otprilike 18.5 Mbps i otprilike 18.8 Mbps, dok je propusnost na zemaljskoj razini otprilike 12.5 Mbps. U tom terenskom mjerenju, korisnička oprema na letjelici je doživjela bolje okolnosti uzlazne veze zbog jako malih gubitaka na nebu u odnosu na uvjete na zemlji. To je najvjerojatnije dovelo do boljih vrijednosti uzlazne veze na nebu. Također se treba spomenuti da propusnost snažno ovisi o mnogim faktorima kao što je opterećenje na mreži.

4.3.3. Rezultati i analiza susjednih ćelija

U ovome poglavlju, ispituje se dobiveni podaci o susjednim ćelijama prikupljeni terenskim mjerenjem. Analiza jačine i kvalitete signala susjednih ćelija je korisna jer daje uvid u utjecaj interferencije od susjednih ćelija. Dodatno, vrijednosti jačine i kvalitete signala susjednih ćelija su bitne iz aspekta mobilnosti. U običajenoj mreži, korisnička oprema je konfigurirana za mjerenje i izvještavanje o jačini i kvaliteti signala susjednih ćelija koja će mreža koristiti kako bi donosila odluke o prespajanju.

RSRP i RSRQ distribucije podataka za četiri najjače susjedne ćelije prikazane su na slici 13. Koriste se oznake N_k za označavanje k-te najjače susjedne ćelije. Zbog jednostavnosti usporedbe, također se prikazuju distribucije RSRP i RSRQ spojene ćelije. Prvi red grafova prikazuje distribucije podataka RSRP i RSRQ za visinu od 150 metara, drugi red za 50 metara i treći red za zemaljsku razinu.

Od podgrafova (b), (d) i (f) slike 13, može se vidjeti kako se razdioba RSRP susjednih ćelija smanjuje kako se visina povećava. Razlika RSRP u 50 percentilu između prve (N_1) i četvrte (N_4) najjače ćelije smanjuje se s 11.4 dB na zemaljskoj razini na 7.4 dB na visini od 50 metara te na 6.5 dB na visini od 150 metara. Za druge susjedne ćelije osim najjače, RSRP na 50 percentilu su ispod 105 dB na zemaljskoj razini. Na visini i od 50 metara i 150 metara, zbog uvjeta širenja signala koji su blizu uvjetima slobodnog širenja, na tim visinama korisnička oprema na letjelici vrijednosti 50 percentila RSRP od tih susjednih ćelija su iznad -86 dBm, od podgrafova (a), (c) i (e) slike 13., može se sličan trend vidjeti i za RSRQ.



Slika 13. Mjerni podaci susjedne ćelije: a), c) i e) prikazuju distribuciju RSRQ na visinama od 150m, 50m i zemaljskoj razini; b), d) i f) prikazuju distribuciju RSRP na visinama od 150m, 50m i na zemaljskoj razini.

Izvor: [10]

Iz perspektive korisničke opreme, relativna primljena snaga signala između detektiranih susjednih ćelija i spojene ćelije su značajnije. Treba primijetiti, da vrijednost tih razlika (spojena ćelija RSRP – susjedna ćelija RSRP) može biti negativna jer u praksi spojena ćelija nije uvijek najjača ćelija zbog dinamičkih okolnosti mreže i korištene margine za primopredaju. Za RSRP razliku između spojene ćelije i najjače susjedne ćelije (spojena ćelija RSRP – N1 RSRP), postotak negativne RSRP razlike na zemaljskoj razini je oko 11% na terenskim istraživanjima. Postotak negativne RSRP razlike povećava se kako se povećava visina, na oko 21% na 50 metara i oko 33% na 150 metara. To je vjerojatno zbog bržeg opadanja uzorka antene zato što je korisnička oprema na dronu poslužena sa sporednim režnjevima ili dijelovima s manjim pojačanjem glavnog režnja od antene na baznoj stanici.

U ovome mjerenju, 50 percentil razlike RSRP između spojene ćelije i najjače susjedne ćelije na zemaljskoj razini je 6.5 dB. Odgovarajuće razlike RSRP na 50 metara i 150 metara su 2.8 dB i 1.6 dB. Inače, mjerenje se pokreće kada susjedna ćelija postane X puta jača od spojene ćelije, gdje je X najčešće postavljen na malu vrijednost (npr. 3 dB). Kako bi se bolje kontrolirao izvještaj mjerenja s korisničke opreme drona, 3GPP je poboljšao izvještaje mjerenja tako da

mreža može konfigurirati pokretanje izvještaja mjerenja ako su mjereni RSRP/RSRQ/RS-SINR od više ćelija iznad određene granice.

Terenska ispitivanja su važna, ali su također limitirana u vidu broja letjelica koje se mogu istovremeno testirati i broju značajki i konfiguracija u stvarnoj komercijalnoj mreži. Kao komplement terenskim ispitivanjima, istraživači su proveli simulacije čiji rezultati su prezentirani u idućim poglavljima kako bi se dobio uvid u izvedbu mreže kada mreža posluhuje više korisničkih uređaja na letjelicama odjednom na većem području.

4.3.4. Postavljanje simulacije

Pretpostavke koje slijedi simulacija latencije su postavljene od strane 3GPP studije o poboljšanoj LTE podršci za letjelice. Neke od ključnih pretpostavki su:

Prometni model: paketi dolaze periodično s periodom od 100 ms te imaju fiksnu veličinu paketa od 125 bytea, što dovodi do brzine prijenosa podataka od 100 kbps za upravljanje i kontrolu na svakoj korisničkoj opremi na dronu. Zadana granica latencije je 50 ms.

Scenarij puštanja u pogon: Urbani makro scenarij s letjelicama, gdje su bazne stanice postavljene u heksagonalnu formaciju s 19 lokacija i 3 ćelije po lokaciji. Propusnost LTE sustava je 10 MHz na 2 GHz operativnoj frekvenciji.

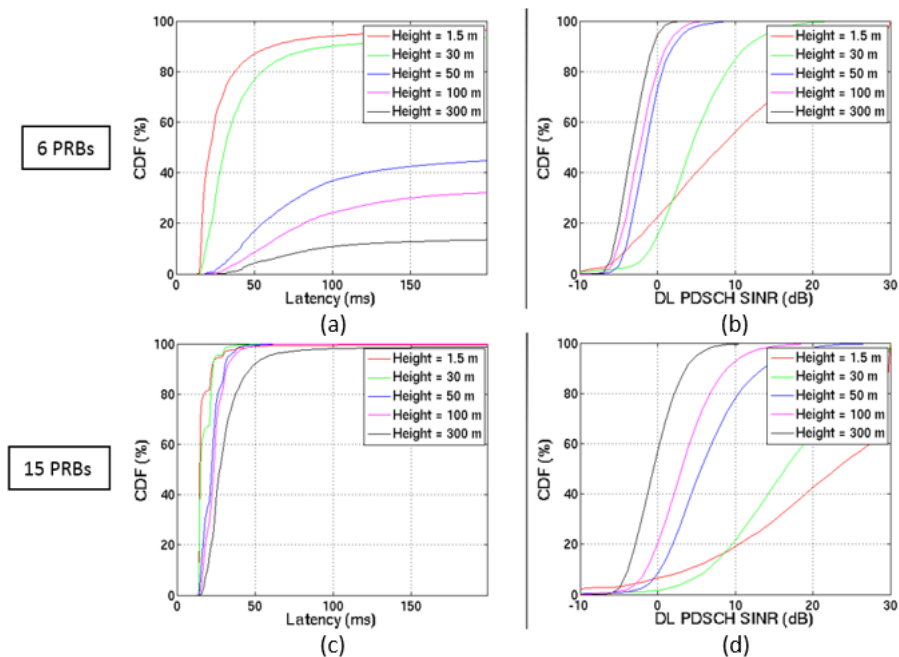
Model i konfiguracija antena: svaka bazna stanica ima dvije unakrsno polarizirane odašiljačke (TX) i primaće (RX) antene s 10 stupnjeva nagiba prema zemlji na 25 metara. Antene baznih stanica su modelirane prema sintetiziranom uzorku antena koristeći niz antena po stupcima od 16 unakrsno polariziranih antenskih elemenata, gdje je razmak antena 0.8λ gdje λ označava valnu duljinu. Svaki korisnički uređaj posjeduje jedan više smjerski odašiljač i dva unakrsno polarizirana više smjerska primaća elementa.

U ovoj evaluaciji, fokus je na naredbenim i kontrolnim prometom u silaznoj vezi i pretpostavlja se da raspoređivač podijeli radio resurse tako da su promet bespilotnih letjelica i zemaljski mobilni promet podijeljeni na ortogonalne frekvencijske resurse. S takvom razdjelom, signali zemaljskih korisničkih uređaja i signali korisničkih uređaja na dronu se ne ometaju. Međutim, korisnička oprema na dronu u ćeliji svejedno doživljava interferenciju od susjednih ćelija zato što susjedne ćelije možda koriste isti radio resurs kako bi služili drugim dronovima s korisničkom opremom spojenom na susjednu ćeliju. Pretpostavlja se prisutnost pet drona s korisničkom opremom u svakoj ćeliji, rezultirajući s prometom od 500 kbps naredbenih i kontrolnih instrukcija po ćeliji. U evaluaciji simulirala se izvedba na različitim visinama, 1.5, 30, 50, 100 i 300 metara. Prezentirani su rezultati simulacije u dvije različite skupine, jedna je sa 6 alociranih fizičkih resursnih blokova (*engl. Physical Resource Blocks – PRBs*), druga je s 15 alociranih fizičkih resursnih blokova.

Slika 14(a) prikazuje distribuciju latencije na različitim visinama kada je korišteno 6 fizičkih resursnih blokova za usluživanje prometa od letjelica. Slika 14(b) prikazuje odgovarajuće distribucije od SINR za dijeljeni kanal za silaznu vezu (*Physical Downlink Shared Channel – PDSCH*). Od PDSCH SINR distribucije, može se vidjeti kako se SINR

značajno smanjuje kako se visina povećava. Iz distribucije latencija se vidi kako čak ni na zemaljskoj razini od 1.5 metara, ne može se postići vrijednost ispod 50 ms.

Slika 14(c) prikazuje distribuciju latencije na različitim visinama kada je korišteno 15 fizičkih resursnih blokova za usluživanje prometa od letjelica. Slika 14(d) prikazuje odgovarajuće distribucije PDSCH SINR. Iz PDSCH SINR distribucije može se vidjeti iako SINR pada značajno kako se visina povećava, i dalje je dosta veći nego u slučaju kada se koristilo samo 6 fizičkih resursnih blokova. Iz distribucije latencija se vidi kako je moguće ostati ispod granice od 50 ms i to pouzdano 99% vremena na visinama od 1.5, 30, 50 i 100 metara te 92% na 300 metara.



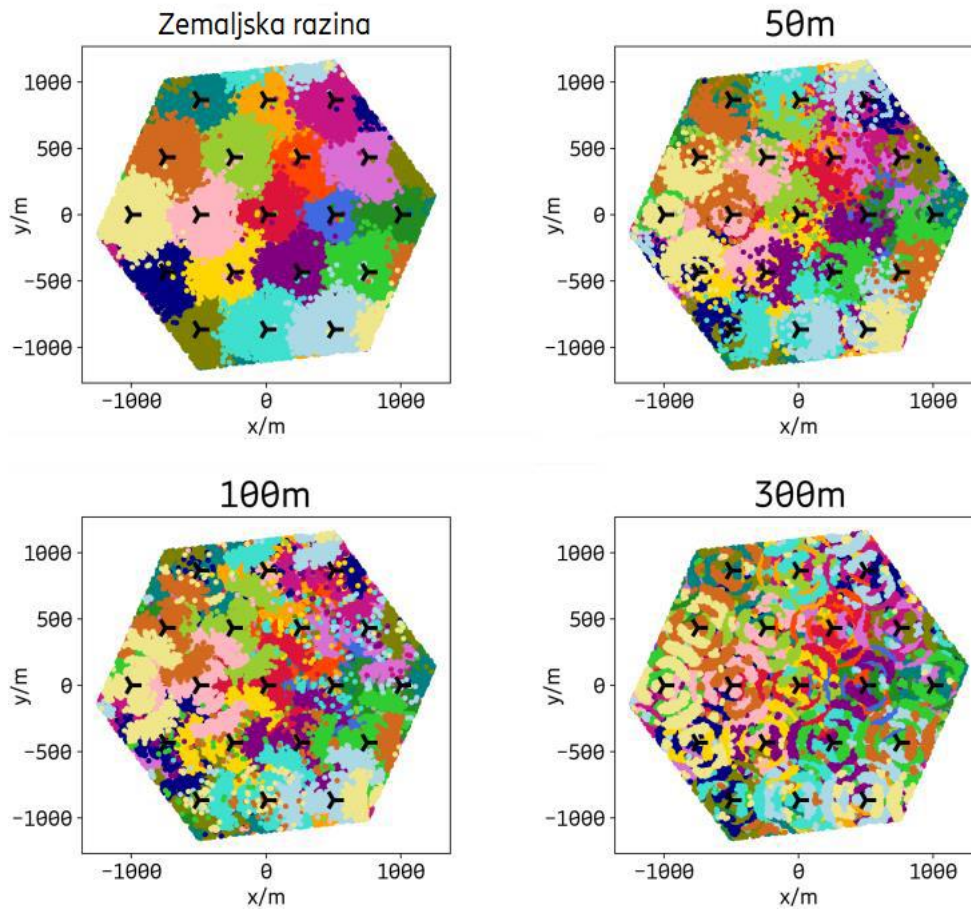
Slika 14. Simulacija rezultata silazne veze: a) i c) predstavljaju latenciju; b) i d) predstavljaju SINR.

Izvor: [10]

4.3.5. Rezultati i analiza simulacije mobilnosti

Osiguravajući pouzdanu vezu u prisutnosti kretanja drona je bitno za velik broj slučajeva uporabe. Postoje dva glavna aspekta koja čine podršku mobilnosti za dronove izazovnima. Prvi je signal spojene ćelije. Antene na baznim stanicama su inače nagnute prema dolje za par stupnjeva. Glavni režanj od antene na baznoj stanici stoga pokriva veliki dio površine ćelije kako bi se poboljšala izvedba za zemaljske korisničke uređaje. Prema tome, na zemaljskoj razini naj snažnija stanica je inače ona najbliža. Korisnička oprema na dronu s druge strane može biti poslužena od bočnih reznjeva od antene na baznoj stanici, koji imaju slabije pojačanje. Pokrivenost bočnih reznjeva može biti manja te signal na rubu može nestati odjednom zbog slabosti antena. Na određenoj lokaciji, najjači signal može doći od udaljenije bazne stanice, ako je pojačanje bočnih reznjeva od bliže bazne stanice dronu puno slabiji. Ti učinci se mogu jasno vidjeti na slici 15, koja prikazuje maksimalne identifikatore ćelija na bazi snage za asocijaciju ćelija na zemaljskoj razini i na visinama od 50, 100 i 300 metara. Na većim

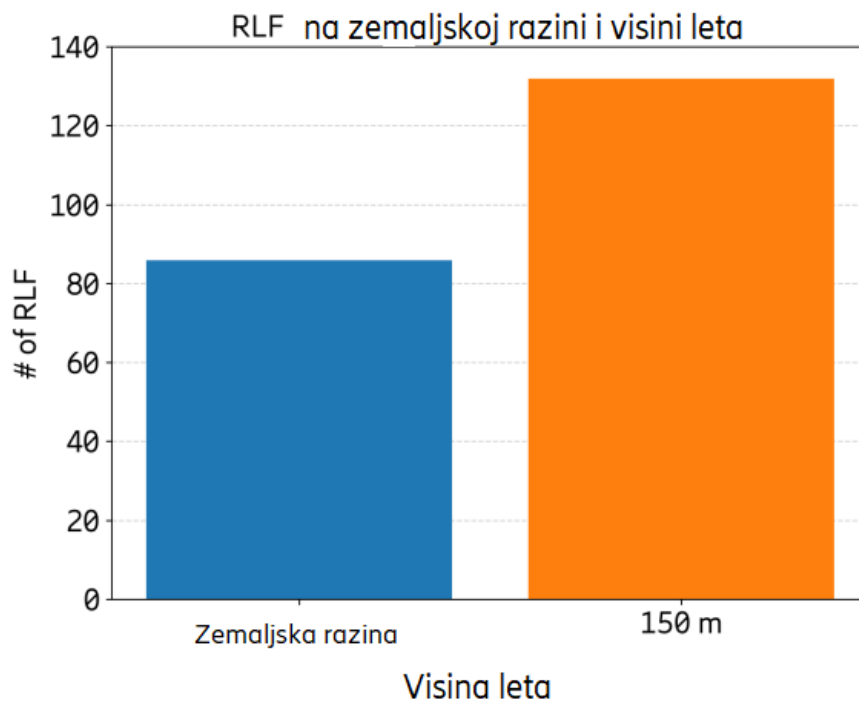
visinama, područja pokrivanja postaju fragmentirana te se uzorak fragmentacije određuje strukturom reznjeva od antena bazne stanice.



Slika 15. Maksimalni primljeni identifikatori ćelija na bazi snage na zemaljskoj razini i na visinama od 50m, 100m i 300m.

Izvor: [10]

Drugi aspekt je interferencija. Kao što se prethodno spomenulo, kako se visina povećava, više baznih stanica ima propagaciju uvjeta razine usluge prema korisničkoj opremi na dronu. Kao rezultat, korisnička oprema na dronu može generirati interferenciju pri uzlaznoj vezi prema susjednim ćelijama dok može iskusiti isto tako interferenciju pri silaznoj vezi od susjednih ćelija. Zbog povećane interferencije, SINR može postati izrazito siromašan na određenim visinama. Oslabljen SINR može dovesti do povećanja neuspješnih radio veza (*engl. Radio Link Failures – RLF*). Također može dovesti do više grešaka pri prespajanju jer se izvještaji mjerenja, naredbe prespajanja itd mogu izgubiti prilikom izvršavanja procedure prespajanja. Povišena stopa neuspjelih spajanja radio veze (RLF) na većim visinama također je zabilježena na terenskim ispitivanjima. Slika 16 prikazuje broj neuspjelih spajanja radio veze (RLF) mjerenim na terenskom ispitivanju na zemaljskoj razini i na visini leta od 150 metara. Može se vidjeti kako se broj neuspjelih spajanja radio veze na visini od 150 metara povećava za više od 50% u usporedbi sa zemaljskom razinom [10].



Slika 16. Broj RLF-ova mjereni na terenskom istraživanju na zemaljskoj razini i na 150m.

Izvor: [10]

5. Pregled rješenja i primjeri primjene

Sustav upravljanja prometom bespilotnih letjelica (*engl. Unmanned Aircraft System Traffic Management – UTM*) je ekosustav za upravljanje prometom za nekontrolirane operacije koje su razdvojene, ali komplementarne s kontrolom zračne plovidbe.

5.1 Zakonski okvir

Prije same implementacije rješenja potrebno je analizirati zakone i regulacije za primjenu autonomnih bespilotnih letjelica kako bi sve bilo u skladu s propisima. Za područje Europske unije smjernice i prijedloge donosi agencija za zrakoplovnu sigurnost Europske Unije (*engl. European Union Aviation Safety Agency – EASA*). Agencija donosi odluke o zajedničkim pravilima u području civilnog zrakoplovstva, te izmjenama i dopunama uredba i direktiva. Okvir za sigurno upravljanje civilnih bespilotnih letjelica postavlja regulacije EU 2019/947 i EU 2019/945.

U Republici Hrvatskoj regulacije donosi Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (*engl. Croatian Civil Aviation Agency – CCAA*). CCAA je odgovorna za provođenje regulacija i nadzor civilnog zračnog prometa u Republici Hrvatskoj, te donosi pravila, smjernice i propise koja se odnose na operacije bespilotnih letjelica, njihovu registraciju, uvjete uporabe, sigurnost, dozvole i ostale aspekte primjene u zračnom prostoru Republike Hrvatske [11]. U Republici Hrvatskoj je trenutno na snazi Zakon o zračnom prometu («Narodne novine», broj 69/09, 84/11, 54/13, 127/13 i 92/14) te ministar mora, prometa i infrastrukture na temelju članka 142. točka 5. Zakona o zračnom prometu donosi Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova kojim se propisuju uvjeti za sigurnu uporabu bespilotnih zrakoplova operativne mase do i uključujući 150 kilograma te uvjeti kojima moraju udovoljavati osobe koje sudjeluju u izvođenju letova tim zrakoplovima. Odredbe tog pravilnika ne primjenjuju se na bespilotne zrakoplove kada obavljaju vojne, carinske ili policijske aktivnosti, traganje i spašavanje, gašenje požara, nadzor granica i obalne straže ili slične aktivnosti koje se poduzimaju u javnom interesu, ili kada se koriste u zatvorenom prostoru [12].

Zakoni i regulacije u Republici Hrvatskoj usklađeni su s Europskim direktivama te se provedba komercijalnih operacija s bespilotnim letjelicama svrstava u tri kategorije, otvorena, posebna i certificirana kategorija. Otvorena kategorija odnosi se većinski na rekreativne slučajeve korištenja bespilotnih zrakoplova s malim rizikom, otvorena kategorija dijeli se na tri potkategorije:

A1 omogućuje let iznad ljudi, ali ne i skupina ljudi

A2 može se letjeti blizu ljudi

A3 mora se letjeti dalje od ljudi

Svaka potkategorija dolazi s vlastitim skupom zahtjeva, zbog toga je u otvorenoj kategoriji bitno identificirati potkategoriju za koju je planirana operacija svrstana. Uz kategoriju operacije bitno je obratiti pozornost i na kategoriju u koju spada bespilotna letjelica, to ovisi o težini letjelice te njenim letnim karakteristikama [13].

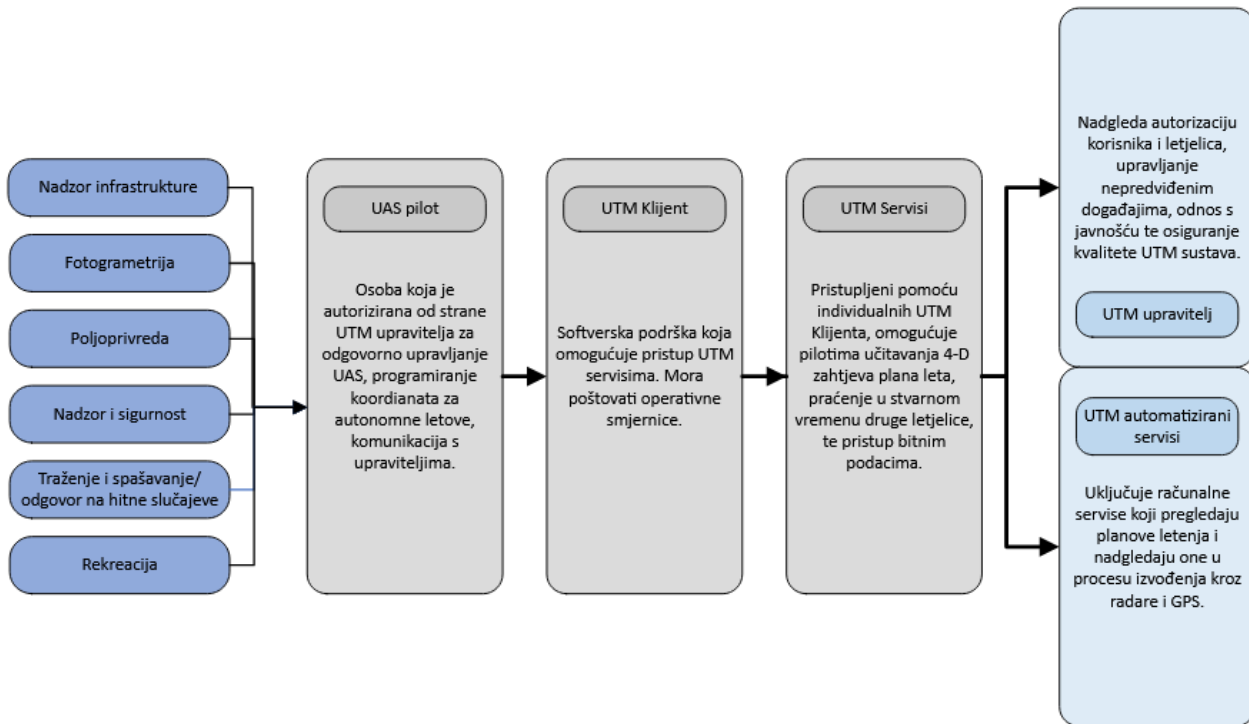
Letjelica također se može letjeti u posebnoj kategoriji kada se operira van limitacija iznesenih u otvorenoj kategoriji. Primjeri operacija u posebnoj kategoriji uključuju letenje van vidnog polja, korištenje drona mase veće od 25kg, letjeti na visini većoj od 120 metara, kada se ispušta teret s letjelice.

5.2 UTM

Sustav upravljanja prometom bespilotnih letjelica (UTM) sastoji se od vlastitog zračnog prostora i upravitelja.

5.2.1. UTM Koncept operacija

Kontrola zračne plovidbe nastaviti će obnašati funkciju najvećeg autoriteta u pogledu UTM sustava. Oni će uspostaviti politiku i regulaciju uključujući zračne sigurnosti, registraciju letjelica, autorizaciju letjelica i licenciranje pilota. Individualni UTM sustavi zahtijevati će jednog ili više upravitelja koji će dnevno nadgledati operacije, kako bi osigurali da se piloti pridržavaju protokola, kako bi komunicirali sa zakonodavnim tijelima i javnosti te kako bi osigurali da UTM autonomni servisi rade ispravno [14]. UTM klijenti, koji predstavljaju softverske aplikacije bazirane na internetu, omogućiti će pilotima i upraviteljima pristup važnim podacima o zračnom prostoru, te uvid u planove i preglede plana leta. Zemaljski radari, GPS, lokalne vremenske postaje i relevantni dionici pružiti će sve za let bitne informacije UTM klijentima. UTM automatizirani servisi, odnosno automatizirani računalni sustav zračnog prostora (*engl. Automated Airspace Computer System – AACS*), planirati će rute za autonomne letjelice i pregledavati planove leta od pilota. Sve bespilotne letjelice biti će opremljene s tehnologijom detektiranja i izbjegavanja u slučaju da pilot i automatizirani servis nisu u stanju izbjeći opasnost. Jedna takva tehnologija je automatsko nadziranje i odašiljanje, koja omogućuje precizno nadziranje pomoću satelitskih sustava. Lokacija, brzina i drugi podaci odredili bi se uz pomoć globalnog sustava pozicioniranja (*engl. Global Positioning System – GPS*) te bi se odaslali mreži zemaljskih stanica. Za normalni zahtjev leta, može se koristiti procedura prikazana na slici 17.



Načini primjene letjelica

Priprema i planiranje leta

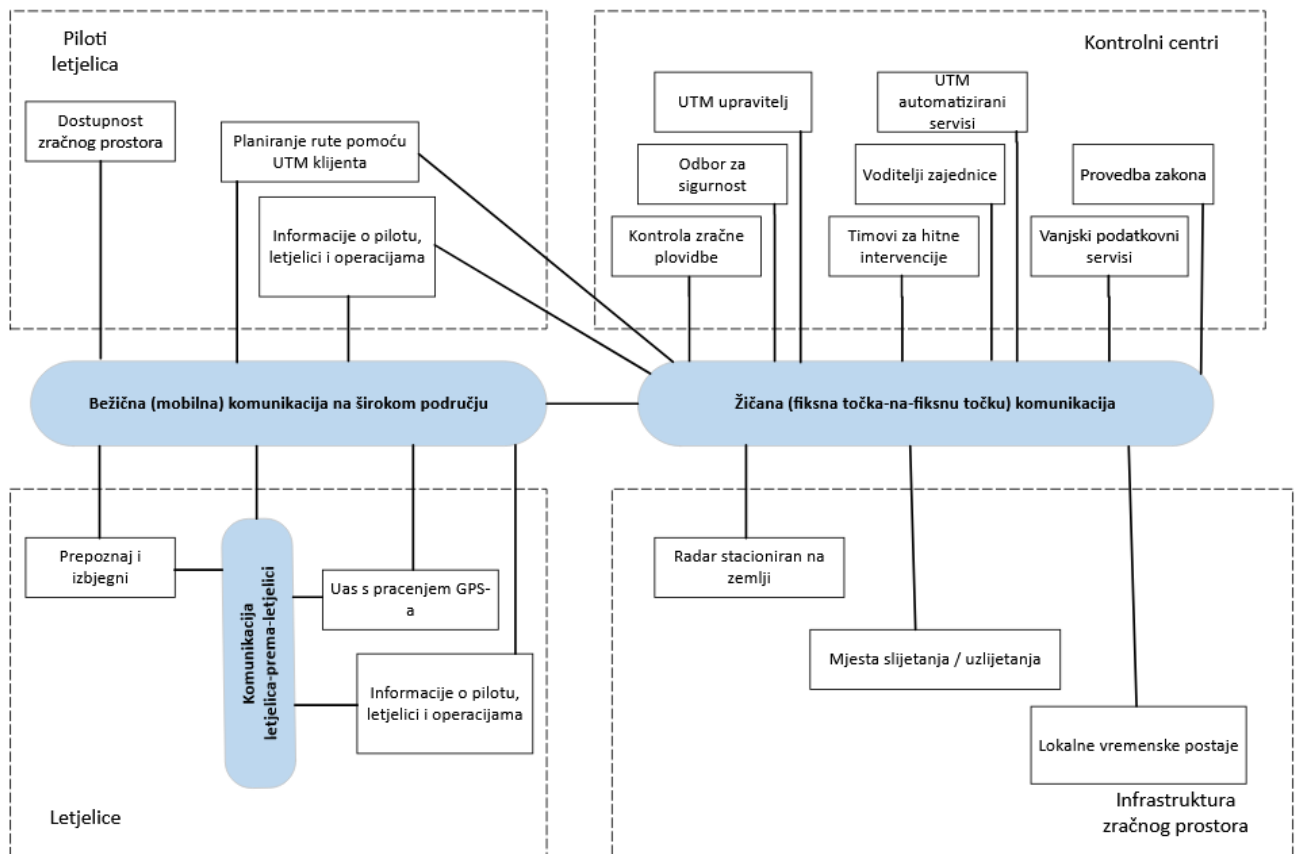
Nadgledanje i odobravanje

Slika 17. UTM koncept sustava i operacijski tijek.

Izvor: [15]

5.2.2. UTM fizička arhitektura

Fizička arhitektura UTM-a sastoji se od četiri klase: pilota letjelica, kontrolni centar, samih letjelica i zračne infrastrukture. Unutar Klasa su podsustavi, koji mogu biti fizičke jedinice koje pružaju podršku UTM sustavu ili funkcijama povezanim s fizičkim jedinicama sustava. Svaki podsustav je spojen s nekom vrstom komunikacijskog sustava. Za UTM sustave, postoje tri metode komunikacije: bežična na širokom području (*engl. Wide-area wireless*), žičana (*engl. Wireline*) i letjelica-prema-letjelici (*engl. Vehicle-to-vehicle*). Bežična na širokom području sastoji se od bežične internetske veze, satelitske veze i mobilne mreže. Žičana veza sastoji se od telefonskih mreža, žičanog pristupa internetu i optičkog pristupa. Komunikacija letjelica-prema-letjelici može koristiti dediceranu komunikaciju kratkog dometa (*engl. Dedicated Short-range Communication – DSRC*), GPS, automatizirane servise, ili kombinaciju svih za sinkronizaciju letjelica u dijeljenom zračnom prostoru. Slika 18. prikazuje diagram UTM fizičke arhitekture.



Slika 18. UTM fizička arhitektura.

Izvor: [15]

5.2.3. Uloga UTM upravitelja

Jedna bitna odgovornost upravitelja je autorizacija pilota i letjelica, što uključuje certificiranje i registracija za letjelice i dozvole za licencirane pilote za rad, za određeni UTM zračni prostor. To je u slučaju ako se ovlasti za autorizaciju prebaci s trenutnog odgovornog tijela na upravitelje, decentralizirani proces autorizacije olakšao bi dobivanje pravih isprava za odgovorne pilote, te isto tako za pouzdane letjelice s odgovarajućom razinom tehnologije mogu upravljati u zračnom prostoru.

U UTM sustavu, upravitelj pregledava predložene planove leta od strane pilota i odobrava, odbacuje ili mijenja ih. Odgovorno tijelo trebalo bi odabrati sigurnosne kriterije (na primjer sigurnosni razmak) koje UTM upravitelj trebao uvažavati prilikom donošenja odluke odobravanja ili odbijanja plana leta. U osnovnom sustavu, UTM upravitelj trebao bi uspostaviti vremenski okvir za zakazivanje letova. Na primjer, upravitelj bi mogao zatražiti da se svi planovi leta predaju dan prije planiranog leta. Upravitelj bi rijetko kada trebao odbijati planirane letove jedino ako je UTM sustav već dosegao određeni kapacitet baziran na utvrđenim protokolima. Ako je moguće, upravitelj bi trebao sugerirati alternativne rute ili vremena leta.

Treba postojati i neka vrsta interakcije između UTM sustava i žurnih službi, policije i generalne javnosti. To je još jedno područje gdje će UTM upravitelj ili drugi zaposlenik UTM

sustava biti korišten. Ako policija dobije pritužbu da je letjelica letila prenisko ili zadirala u nečiji privatni prostor, te pritužbe trebaju se proslijediti UTM upravitelju. Upravitelj onda može provesti istragu kako bi ustvrdio dali je pilot namjerno prekršio plan leta. Ako je to slučaj, upravitelj može suspendirati i ako je potrebno obavjestiti policiju za počinjen prekršaj. Međutim, ako je dostupno, UTM automatizirani servisi trebali bi biti dovoljno napredni da prijave letjelicu koja se ne pridržava plana leta.

Postoje i zabrinutosti o privatnosti, građani ili tvrtke mogu se žaliti na povećanu buku ili ometanje od letjelica, čak i ako se pridržavaju odobrenih planova leta. Ako je to slučaj, upravitelj može odrediti da letjelice ne smiju letjeti u određenim područjima na primjer grobljima ili drugim mjestima koje zahtijevaju privatnost. Upravitelj može označiti zonu bez letenja na sučelju s geografskom kartom UTM klijenta kako bi obavijestio pilote da će svi letovi kroz tu zonu biti zabranjeni. Upravitelj također može geografski ograničiti određeno područje što predstavlja određenu virtualno barijeru koja bi onemogućila autonomnim letjelicama da lete u tom području, te da će piloti dobiti upozorenje ako se približe tom području. Kao pomoć pilotima da izbjegnju takozvane zone bet letenja, upravitelji mogu napraviti koridore kroz koje bi se promet odvijao u blizini takvih područja. Letenje unutar takvih koridora bio bi podložan sigurnosnim propisima nadležnog tijela.

Osim fizičke privatnosti opisane iznad, UTM sustav također mora ukomponirati Sustav sigurnosti informacija letjelice (*engl.* Unmanned Aircraft System Information Security system – UASIS), zbog činjenice da takve letjelice se jako oslanjaju na ugrađeni autopilot kako bi ispravno funkcionirale. Letjelica je ranjiva prema raznim vrstama napada i potencijalne posljedice mogu biti katastrofalne ako se ne uzmu ozbiljno.

Na kraju, ako se timovi žurnih službi oslanjaju na letjelice za traženje i spašavanje ili medicinsku opskrbu na mjestu nesreće, upravitelj bi trebao imati mogućnost pomoći sa sigurnom navigacijom takvih letjelica tako što prizemlji sve nevažne letjelice na putu koje letjelice u slučaju nužde trebaju prijeći. Slično kao i na cestovnom prijevozu, hitne službe trebale bi dobiti beskompromisni prioritet. Dodatno upravitelj može prioritizirati neke operacije pred drugima. Na primjer, letjelice koje istražuju potencijalne požare trebale bi dobiti odobrenje prije letjelice koja dostavlja pakete u istom području. Naravno, mnogi drugi scenariji će se pojaviti gdje upravitelj mora prosuditi što je važnije.

5.2.4. UTM klijenti i UTM servisi

UTM klijent je aplikacija na internetu koja omogućuje pilotima pristup UTM servisima. Takva aplikacija može se pristupiti šetom računala, tableta ili mobilnog uređaja, kako bi piloti mogli pristupiti UTM servisima s terena ili uredske okoline. Drugi korisnici trebali bi biti u mogućnosti razviti personalizirani UTM klijent, međutim onim moraju biti u stanju komunicirati s UTM servisima preko nekog određenog standarda kako bi svi piloti mogli pristupiti točnim i pouzdanim podacima. Rekreativci, neovisni piloti i manja poduzeća mogli bi imati pristup nekoj vrsti osnovnog UTM klijenta, razvijen od treće strane za široku uporabu.

Planiranje leta, za početak piloti moraju isplanirati rutu kroz korisničku mapu UTM klijenta. Postoji više načina za isplanirati let, za pilote koji misle ručno upravljati letjelicom (u vidnom polju ili ne), imaju opciju ili rezervirati 3D zračni prostor za operacije s nepredvidivim

planom letenja koji su bazirani na trenutnoj dostupnosti, ili predložiti okvirni geografski put s određenim sigurnosnim razmacima, ili zatražiti dostupni plan leta od UTM automatiziranog servisa baziranog na pruženoj početnoj i završnoj točki. Za pilote pri postavljanju plana za autonomne letjelice koriste UTM automatizirani servis koji pruža i mijenja plan leta ako je potrebno.

Ovisno o dostupnoj tehnologiji u vrijeme začetka UTM sustava, ili će upravitelji pregledati sve planove leta, ili će UTM automatizirani servisi organizirati i planirati sve rute koristeći napredna programska rješenja. Kako se promet povećava, automatizirani servisi trebali bi postati obavezni kako se ne bi previše tereta stavljalo na upravitelje. Korisne tehnologije kao AACs koje dolaze od kontrole zračnog prostora iduće generacije mogle bi učiniti zračni prostor izrazito sigurnima [European Aviation Safety Agency (EASA). (2015). *Concept of Operations for Drones: A risk based approach to regulation of unmanned aircraft*. European Aviation Safety Agency (EASA).]. AACs, primijenjen na bespilotne letjelice, uzeo bi u obzir sve pred određene rute i planirao bi nove rute uzimajući u obzir potrebe operatora i usvojenih sigurnosnih procedura i sigurnosnih razmaka između letjelica. Generirani plan komunicirao bi se s operaterom preko UTM klijenta, te bi on imao mogućnost okvirno isplanirati alternativnu rutu te bi ju sustav ispravio na bazi sigurnosnih algoritama.

Dizajn i organizacija svih UTM klijenata razvijenih od trećih strana ili ovlaštenih proizvođača trebale bi sadržavati kartu zračnog prostora UTM sustava kao primarni pogled pri prvom pristupu stranici UTM klijenta. Trebalo bi postojati više načina i opcija za planiranje ruta koristeći neke od prije spomenutih mogućnosti. Dodatno uz planiranje rute, sučelje karte koristilo bi se za informiranje pilota o drugim letjelicama u blizini, informiranje pilota o neovlaštenim letjelicama, informiranje pilota o njihovoj letjelici i za automatizirane servise i upravitelje kako bi mogli davati instrukcije u kriznim situacijama za nepredviđene procedure. Dodatno, sučelje s kartom je okruženo s prozorima koji pružaju relevantne informacije od eksternih izvora, koji su spomenuti u idućem poglavlju. Primjer osnovnog dizajna i organizacije takve aplikacije je prikazan na slici 19. gdje se vidi internetska stranica jedinice za upravljanje zračnim prostorom RH (*engl. Airspace Management Cell – AMC*).

22.8.2023. 15:01:36 **Zagreb_Maksimir No-Fly Zone** : Obavještavamo korisnike zračnog prostora da je 24. kolovoza 2023. uspostavljena zona zabrane letenja na području grada Zagreba. Za više informacija pogledajte rubriku Vijesti.



Slika 19. Prikaz jednostavne UTM sustava.

Izvor: Autor

5.2.5. Eksterni podatkovni servisi

Eksterni podatkovni servisi pružaju operaterima, upraviteljima i automatiziranim servisima nužne informacije kako bi podržali s odobravanjem plana letova. Neke korisne informacije uključuju , ali nisu ograničene na informacije o vremenu i vjetru, topografske karte, strukturne podatke, prepreke te informacije o letjelicama i korisničke informacije. Tablica 4. sadrži sažetak svih informacija koji bi trebale biti pružene od strane vanjskih izvora za operatere, upravitelje i automatizirane sustave za pomoć pri operaciji.

Tablica 4. Primjeri eksternih podataka pruženih UTM klijentu.

Pruženi podaci	Izvor
Podaci o zračnom prostoru	Hrvatska kontrola zračne plovidbe
Podaci o vertikalnim opstrukcijama	Hrvatska kontrola zračne plovidbe, drugi
Karte terena	Državna geodetska uprava
Vremenski uvjeti i predviđanja	Državni hidrometeorološki zavod
Planovi leta i nadzorni podaci	Hrvatska kontrola zračne plovidbe, nadležno tijelo

Izvor: Autor

Podaci o vremenu i vjetru su iznimno važni za letjelice jer jaka kiša ili tuča mogu uzrokovati kvarove ili pad kod letjelica, te vjetar može odnijeti letjelicu s planirane putanje. Lokalne vremenske postaje trebale bi konstantno ažurirati UTM sustav. Upravitelji i piloti trebali bi s lakoćom locirati informacije o vremenu i upozorenja pomoću UTM klijenta. AACS koji pruža algoritme koji planiraju rute letova, trebali bi biti u mogućnosti promijeniti putanju letova uzimajući u obzir vjetar te otkazati letove ako su vrijeme ili vjetar pre ekstremni. Proizvođači letjelica trebali bi pružiti granice do kojih letjelice mogu operirati, s uračunatom marginom za sigurnost. Ako automatizirani servisi ili upravitelj detektira da uvjeti nadilaze specifikaciju proizvođača, let bi trebao biti otkazan ili pomaknut.

Piloti i autonomni sustavi letjelica trebali bi znati točnu lokaciju zgrada, dalekovoda, drveća te topografiju područja u kojemu se odvija operacija. UTM klijent trebao bi uključivati 3D modele okoline unutar zračnog prostora UTM sustava. Za autonomne sustave, trebala bi postojati minimalna dozvoljena visina leta na što više geografskih lokacija moguće. Za šumasta područja gdje je najveće drveće visine na primjer 15 metara, sustav ne smije dozvoliti autonomnim letjelicama s predodređenim polazištem i odredištem da lete ispod 25 metara kako bi zadovoljili sigurnosne margine. 3D mape bi koristile upravitelju ili automatiziranim servisima da odobre planove leta ili generiraju sigurne planove leta za autonomne letjelice.

Radari bazirani na zemlji, nadzorne kamere i ostala mjerna oprema pomagala bi u otkrivanju i obavještanju o neovlaštenim objektima u zračnom prostoru i preprekama upravitelja i pilote pomoću UTM klijenta. Na primjer ako bi neregistrirana letjelica koristila UTM zračni prostor, UTM klijent bi prikazao poruku upozorenja za operatore, te bi se generirani planovi leta izmijenili bazirano na predviđenoj putanji od neregistrirane letjelice. Sličan proces mogao bi se koristiti za ostale nepredviđene ili nisko leteće letjelice. Bazirano na tim informacijama, upravitelj može odlučiti jeli sigurno za letjeti unatoč neregistriranoj letjelici ili svi piloti trebaju izvesti hitno slijetanje.

Informacije o letjelici i korisničke informacije također bi trebale biti dostupne pomoću UTM klijenta. Neki upravitelji UTM sustava mogu zatražiti pilote da se odreknu njihovih prava na privatnost u cilju sigurnosti. To bi pomoglo u slučaju da jedan pilot primijeti nepropisno ili zabrinjavajuće ponašanje od strane letjelice ili drugog pilota. Pilot koji promatra, trebao bi biti u mogućnosti pristupiti informacijama o letjelici i pilotu uz pomoć karte UTM klijenta te dobiti pristup imenu, letjelici, poslodavcu i kontaktnim informacijama tog pilota. Tada bi pilot mogao prijaviti nepropisno ponašanje upravitelju na pregled, ili dati prijateljsko upozorenje drugome pilotu oko kršenja propisa.

5.3 Primjer autonomnog upravljanja dronom pri inspekciji kritične infrastrukture

Infrastrukturne inspekcije tradicionalno su se izvodile kao vizualne inspekcije s terena. Takva metoda zahtjeva dosta ljudskog napora te nije učinkovita u teško dostupnim mjestima. Glavna dodana vrijednost inspekcije s dronovima je njihova mogućnost u obavljanju inspeksijskih ciljeva učinkovito i točno često u područjima koja nisu dostupna pješice ili s vozilom.

5.3.1. Koncept operacije nadzora

Operacija nadzora je definirana kao struktura podataka koja opisuje ciljeve i podatke pridružene tipu operacije, početne i završne lokacije, geografska ograničenja, postavke kamere itd. Operacija je podijeljena na skupove zadataka, na primjer, snimanje slika na definiranoj lokaciji relativno prema cilju inspekcije. Zadaci se dodjeljuju dronovima u roju (*engl. Swarm*) operacije. Roj autonomnih dronova obavlja operaciju inspekcije tako što izvršava zadatke operacije dok svi zadaci nisu izvršeni. Prvo dronovi navigiraju do početne lokacije operacije prema globalnom planu leta. Potom protokol za dodjeljivanje zadataka određuje pojedinačnu alokaciju individualnih zadataka za dronove. Roj dronova kontinuirano izvršava nove zadatke ako je prethodni zadatak obavljen. Operacija inspekcije je limitirana dostupnim punjenjem baterije drona, svaki dron će tijekom operacije proći kroz nekoliko ciklusa punjenja. Svaki dron šalje podatke telemetrije prema zemaljskoj kontrolnoj postaji (*engl. Ground Control Station*), koja kontinuirano nadzire napredak operacije inspekcije. Spajaju se na kontrolu misije u oblaku kako bi učitali podatke od inspekcije. Kada se svi zadaci izvrše, roj dronova se povlači s područja inspekcije.

5.3.2. Specifikacija drona

Primarno će se opisivati hardverske i softverske komponente kritične za let, platformu za procesiranje te vanjskih senzora. Hardver sastoji se od standardnih komponenti kao što su DC motori, propeleri, upravljačke elektronike brzine (ESC). Računalni sustav drona je kompaktan, lagan i dovoljno fleksibilan da se može staviti na skoro svaki dron. Procesiranje više i niže razine odvija se u računalnoj elektronici. Računske operacije potrebne za operaciju drona mogu se svrstati u dvije kategorije: procesiranje informacija kritičnih za let i aplikativno procesiranje. Elektronika za kontrolu leta zadužena je za procesiranje informacija ključnih za let. To uključuje redundantno procesiranje kontrole leta i stabilnosti, Jedinicu za mjerenje inercije, navigacijski sustav i sigurnosne značajke. Pomoćno računalo zaduženo je za aplikativno procesiranje u letjelici. Na tom računalu su svi sustavi koji nisu kritični za obavljanje funkcije leta, uključujući procesiranje slike, aplikacije upravljanja rojem letjelica, aplikacije za inspekciju itd.

Zbog potrebe detekcije nadglavnih kablova odabrao se radarski senzor s milimetarskim valovima. Ovaj tip senzora odašilje radio signal u donjem milimetarskom frekvencijskom rasponu i određuje relativnu lokaciju objekata u njegovu dometu tako što analizira odbijene zrake koje su došle natrag do senzora. Zbog količine metala u vodovima oni su iznimno reflektivni prema radio valovima, što znači da radar može postići dobar omjer signala naspram smetnji u procesu detektiranja vodova. Dodatno uz radar, paket senzora za detekciju vodova opremljen je s kamerom. Mala gustoća radarskih podataka sa senzora onemogućuje detekciju smjera vodova. Ta informacija može se prikupiti sa slika relativno jednostavno koristeći standardne algoritme kao na primjer Hough Line algoritam za detekciju ravnih linija.

5.3.3. Servisi u oblaku

Cilj razvijanja servisa u oblaku je pružiti autonomno planiranje operacija, nadziranje i kontrolu te omogućiti centralnu točku gdje se podaci mogu učitati s operacija i upravljati s njima unutar servisa. Podaci prikupljeni kroz operacije se mogu nadalje koristiti za analizu i optimizaciju autonomnih misija. Razmjena podataka između roja dronova i servisa u oblaku se vrši pomoću interneta. Standardizirani podatkovni model osigurava interoperabilnost između aplikacija koje su pokrenute u dronovima, zemaljskoj kontrolnoj postaji i servisima u oblaku. Interakcija između drona i oblaka je asinkrona s najmanjom mogućom razinom ovisnosti jedna o drugoj kao u klijent-server odnosu programskog modela. Globalni plan leta, koji je određen servisom u oblaku, komuniciran je dronovima u obliku lokacija koje trebaju pregledati sa zadacima koji definiraju samo inspekciju. Dronovi izvješćuju njihov status prema oblaku tako što šalju njihovu trenutnu lokaciju, brzinu, razinu punjenja itd., zajedno s drugim relevantnim podacima. Servisi u oblaku mogu biti realizirani pomoću Kubernetes grupa na jednom ili više servera zavisno o potražnji, te je korištena arhitektura mikroservisa koja omogućuje bolju organizaciju koda i širenje sustava s implementacijom novih značajki. Isto tako omogućuje individualno skaliranje dijelova sustava koji su u visokoj potražnji, što dovodi do optimizacije korištenja resursa u oblaku.

5.3.4. Komunikacijski servisi

Letjelice su dizajnirane u tri sloja koji se sastoji od servisa u oblaku u pozadini, sami roj drona i mrežu koja sadrži komunikaciju između tog dvoje. Letjelica sadrži komunikacijsko rješenje spajanje i operativne usluge su osigurane od kraja-do-kraja (*engl. End-to-end*). Mrežna arhitektura sastoji se od pod mreža koje sadrže komunikaciju Dron-na-zemlju (*engl. Drone-to-ground – D2G*) koja podržava komunikaciju između individualnih dronova i infrastrukture na zemlji, Dron-na-dron komunikacija (D2D) omogućuje funkcionalnosti roja i Dron-na-oblak komunikacija (*engl. Drone-to-cloud – D2C*) koja omogućuje razmjenu informacija između podatkovnih servisa.

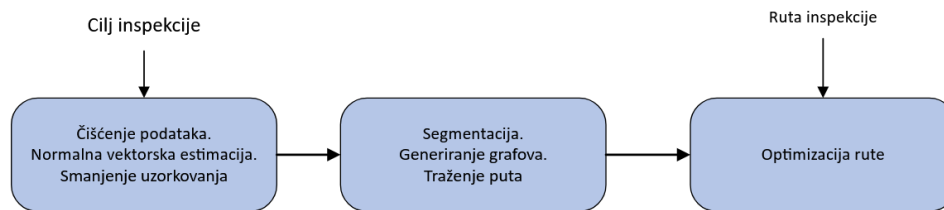
5.3.5. Algoritmi i protokoli

Kooperativni sustav s više dronova dizajniran je kao suradnja više algoritama i protokola. Algoritam za detektiranje vodova pouzda se u podatke dobivene od radara s letjelice, kamere te podataka dobivenih od elektronike za kontrolu leta. Prvo se slike s kamere procesuiraju kroz specijalizirani hardver koji koristi Hough Lines algoritam kako bi definirali smjer električnih vodova relativno prema dronu. Potom se koristi fuzija podataka kako bi se spojili podaci smjera električnih vodova s kamere, 3D mjerenja od radarskog senzora i odometrije u povezanu estimaciju o poziciji nadzemnih vodova. Kada se podaci s radara, kamere i odometrija spoje u projekcijskoj ravnini, koristi se Kalmanov filer za svaki estimirani električni vod kako bi se pratila njegova pozicija tijekom vremena. Završni rezultat nakon obrade je reprezentacija estimacije položaja svakog detektiranog električnog voda što uključuje 3D poziciju najbliže točke i smjera električnog voda u odnosu na dron.

Globalno planiranje puta odnosi se na planiranje puta gdje je okolina unaprijed poznata te se stoga ne treba planirati od strane računala od autonomnog drona. Kada se izvodi inspekcija

infrastrukture koristeći autonomne dronove, lokacije infrastrukture su poznate unaprijed i koriste se za prikazivanje međutočka u letu. Zbog sigurnosti, dronovi lete u neposrednoj blizini infrastrukture koristeći sustav dalekovoda kao referencu za planiranje rute. Algoritam rješava modificirani problem trgovačkom putnika gdje dronovi kreću s različitih pozicija do inspeksijskih ciljeva koji odabere korisnik. Okolina je prezentirana pomoću grafova gdje čvorovi predstavljaju lokacije dalekovoda. Spojnice predstavljaju udaljenosti između susjednih čvorova. Algoritam računa matricu udaljenosti za svaki skup početnih točaka (lokacija drona) i odredišta (lokacija mjesta inspekcije) koristeći A* algoritam za računanje najkraće udaljenosti za svaki par.

Planiranje puta inspekcije odnosi se na detaljnije planiranje kretanje drona određene ciljevima inspekcije koji su limitirani ograničenjima okoline kao što su prepreke na primjer vegetacija. Proces planiranja puta inspekcije primjenjuje 3D modele cilja inspekcija. Na primjer, zadatak inspekcije za dron može biti da koristi segment mosta s potpornim elementom i model mosta kako bi se kalkulirao plan kretanja. Slika 20. prikazuje postupak procesiranja podataka za generaciju puta inspekcije.



Slika 20. Prikaz procesa generiranja rute.

Izvor: [15]

Metoda za izbjegavanje prepreka omogućuje dronovima izbjegavanje kolizije na primjer s ljudima, infrastrukturom, vegetacijom, inspeksijskom okolinom itd. Algoritam za izbjegavanje prepreka koristi crveno-zeleno-plavo dubinsku kameru (*engl. Red-Green-Blue-Depth – RGBD*) za detekciju prepreka prikazan na slici 21. Kamera uočava drveće (slika 21. lijevo), prikaz podataka u „point cloud“ formatu relativno prema objektivu kamere (slika 21. desno). Estimacija dubine u obližnjoj okolini koristi se za generiranje rute temeljem na vođenom gradijent-baziranoj optimizaciji putanje [15].



Slika 21. Prikaz korištenja RGBD kamere za detekciju prepreke.

Izvor: [15]

Za detektiranje kvarova razvijen je algoritam umjetne inteligencije za autonomne kooperativne dronove osiguravajući kontinuirano nadziranje mostova, pruga, i visokonaponskih električnih vodova. Kako bi inspeksijski algoritam baziran na računalnom vidu bio robusniji, koristi se duboko učenje. Uzimajući u obzir da autonomni kooperativni dronovi trebaju provoditi kontinuiranu inspekciju u stvarnovremenskoj okolini, postavljanje teške opreme ba dron rezultiralo bi u visokoj potrošnji energije. Iz tog razloga za inspekciju u stvarnom vremenu koristila se YOLOv4 arhitektura dubokog učenja [16]. YOLOv4 algoritam može se pokrenuti na uređajima niske potrošnje u stvarnom vremenu te isto tako detektirati objekte s visokom preciznošću. Predloženi algoritam za uočavanje kvarova sastoji se od tri glavna koraka. Prvi korak je prikupljanje podataka, označavanje i treniranje modela, drugi korak sastoji se od detekcije kvarova korištenjem dronova tako što se pokrene algoritam dubokog učenja u stvarnom vremenu za inspekcije i treći korak uključuje komunikaciju s oblakom i slanje podataka o kvarovima bazi podataka u oblaku.

6. Preporuke za daljnji razvoj inovativnih sustava autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama

Kako mobilna mreža pete generacije (5G) postaje sve raširenija može se zaključiti kako će se s time i razvijati slučajevi uporabe u sve većoj mjeri.

6.1 Razvoj sustava prve pomoći s autonomnim dronovima

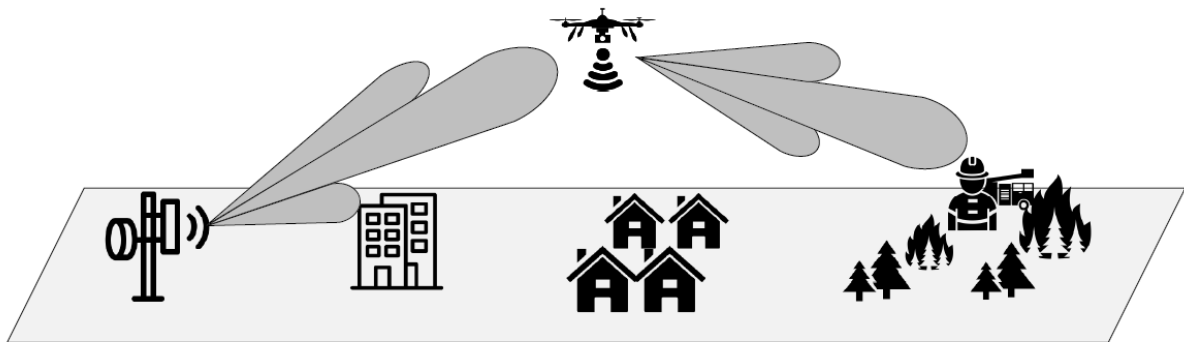
Informacije igraju ključnu ulogu pri upravljanju prirodnim nepogodama i pomoći. Dronovi mogu pružiti superiornu implementaciju u tri tipa scenarije humanitarne pomoći, prvi je komunikacija i koordinacija operacija, druga je pokrivanje terena i treća je pretraživačke operacije. U zadnjem scenariju, brza raspodjela dronova pomaže u identifikaciji raspršenih gruba unesrećenih osoba, te također pokušava razaznati jesu li unesrećene žrtve odrasli ili djeca. Dronovi također mogu pomoći locirati elektromagnetsku emisiju od osobnih stvari žrtava zakopanih pod ruševinama ili u gustim šumama s većom brzinom i boljom preciznošću. Autonomija procesa zahtjeva stroge zahtjeve za sigurnost korištene arhitekture i mehanizama. Sigurnosne mjere imaju za cilj spriječiti daljnje žrtve zbog kvara na sustava na dronu [17].

6.2 Nadogradnja mobilne mreže autonomnim dronovima

Mobilne mreže iduće generacije biti će ključne u omogućavanju šire adaptacije uređaja Interneta stvari (*engl. Internet of things – IOT*) iduće generacije tako što će se povećati broj mogućih spojenih uređaja, pruža se veća propusnost podataka te skoro stvarnovremenski odziv.

Dronovi su relativno povoljno rješenje koje može učinkovito proširiti povezanost mobilnih mreža u područjima koju su inače nedostupna preko uobičajene infrastrukture ili trenutno nedostupna zbog na primjer kvarova na mreži. Isto tako bazne stanice na dronu mogu povećati kvalitetu veze između ad hoc udaljenog čvora i određene bazne stanice. Bazne stanice na dronu su također lukrativna rješenja za pružanje pouzdane, širokopojasne privremene bežične veze na širokom području za vrijeme posebnih događanja, prirodnih katastrofa, sportskih događaja i brojnih drugih scenarija gdje je permanentno postavljanje infrastrukture nepotrebno. Zbog svojih karakteristika u vidu mobilnosti i fleksibilne adaptacije visine, mobilne bazne stanice na dronu mogu efektivno komplementirati postojeće mobilne sustave tako što pružaju dodatan kapacitet u određenom području i osiguravajući pokrivenost mobilnom mrežom u teško dostupnim ruralnim sredinama.

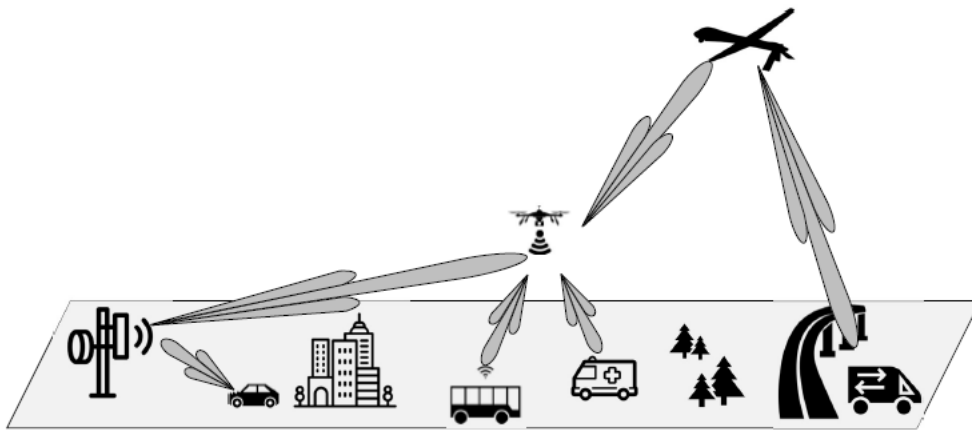
Jedan od scenarija je poboljšanje mobilne mreže pomoću dronova koji su opremljeni mobilnom baznom stanicom. U ovome scenariju pretpostavlja se da dronovi opremljeni mobilnom tehnologijom u ulozi pružatelja usluge, čvorovi u zraku služeći kao bazne stanice mogu pružiti značajna poboljšanja u zgusnutim mrežama s malim ćelijama. Slika 22. prikazuje moguću uporabu poboljšanja pokrivenosti mobilnog signala na zahtjev, ovdje u slučaju šumskih požara. U tom scenariju, linija vidljivosti između radio antene i odgovarajuće korisničke opreme u ovome slučaju vatrogasca je blokirana. Privremena mobilizacija bazne stanice na dronu omogućuje umanjena te smetnje tako što se omogući novi put, te se tako uspostavi privremena ali direktna i pouzdana veza između krajnjeg korisnika i mobilne infrastrukture [18].



Slika 22. Poboljšanje pokrivenosti u hitnim slučajevima pomoću mobilnih baznih stanica na dronu.

Izvor: [18]

Zbog njihove mobilnosti i mogućnosti uspostaviti liniju vidljivosti, letjelice mogu podržati uspostavljanje mobilne ad hoc mreže na zemaljskoj ravnini. S dolaskom pametnih i vozila koja same voze, potreba za konstantnom, neprekinutom i stvarnovremenskom komunikacijom nikad nije bila veća. Беспilotne letjelice pokazale su više puta njihovu korisnost u vidu podrške komunikacije uređaj-na-uređaj, te s većom podrškom za mobilnost u B5G/6G mrežama, one su odlični način kako olakšati stvarnovremensku razmjenu informacija i odašiljanje poruka između članova mobilne mreže. Dobar primjer ovakve komunikacije je odašiljanje sigurnosnih informacija pomoću беспilotnih letjelica prema brojnim vozilima bez direktne linije vidljivosti ili nedostatne pokrivenosti [19]. Zračna bazna stanica također može poboljšati pouzdanost veze uređaj-na-uređaj tako što smanjuje poteškoće koje se stvaraju interferencijom, koja je uzrok povećanog broja ponovnih slanja. Slika 23. prikazuje scenarij komunikacije među vozilima koja je podržana dronovima.



Slika 23. Mobilna bazna stanica na dronu za podršku komunikacije među vozilima.

Izvor: [18]

7. Zaključak

Bespilotne letjelice višestruko su pokazale njihovu korist u određenim industrijskim aplikacijama i šire. Pogotovo u domeni inspekcija kritičnih infrastrukturnih objekata koji čovjeku nisu lagano dostupni kao što su dalekovodi, bazne stanice i vjetrenjače, gdje uporaba bespilotnih letjelica smanjuje potreban angažman ljudskih resursa što povećava sigurnost.

Ovaj diplomski rad fokusirao se na kvadkoptere kao najrašireniju vrstu komercijalno dostupnih bespilotnih letjelica, koji kako se opisalo u drugom poglavlju posjeduje zavidne letačke karakteristike i omogućuje precizno upravljanje i manevriranje u uskim i nepovoljnim okolinama. U ovome radu, domet bespilotnih letjelica je identificiran kao glavni faktor koji je kočio bespilotne letjelice u ostvarivanju njihovog punog potencijala. U ostvarivanju cilja autonomnih bespilotnih letjelica koji su neovisni od lokacije operatera nametnula se ideja upravljanju letjelicama pomoću mobilne mreže, točnije 5G mreže. Takav pristup omogućuje letjelicama da budu neovisne od operatera ili u slučaju autonomnih operacija da budu neovisni o lokaciji sustava za upravljanje. Međutim korištenje mobilnih mreža kao sredstvo komunikacije dolazi s vlastitim poteškoćama, ponajprije zato što su mobilne mreže optimizirane za rad na zemaljskoj razini, dok dronovi lete na visinama od 50 do 150 metara. Terensko istraživanje kvalitete mobilnih podataka na visini provedeno je u Finskoj koje pokazuje kako trenutne mreže podržavaju inicijalne potrebe takve komunikacije, uz određene poteškoće u vidu interferencije i mobilnosti u kretanju između ćelija. Jedan od ključnih sustava kojeg je potrebno definirati u slučaju autonomnih operacije s dronovima jest sustav upravljanja prometom bespilotnih letjelica koji omogućuje sigurno kreiranje plana leta te integraciju s ostalim letovima. Sustav može nadzirati i pratiti trenutačne i buduće letove te po potrebi mijenjati rute u nepredviđenim situacijama te je kao takav okosnica za sigurnu integraciju autonomnih letjelica u zračni prostor jer predstavlja središnji prostor sa svim relevantnim informacijama na kojima se drugi sustavi mogu zasnivati. Za primjer budućeg razvoja navedeni su sustav podrške prve pomoći te sustav nadogradnje mobilne mreže pomoću dronovima gdje oba sustava se oslanjaju na korištenje više autonomnih bespilotnih letjelica kako bi ispunili zajednički cilj.

U konačnici može se reći kako je tehnologija spremna za autonomne letjelice, međutim potrebni potporni sustavi i zakonodavstvo još nisu na potrebitoj razini. Pokazalo se kako ima potencijalnih slučajeva uporabe koji bi za dobrobit društva iskoristili potencijal autonomnih letjelica te su oni dobra referenca za budućnost u kojoj je izgledno da će autonomni dronovi letjeti nad našim nebom u jednom obliku ili drugom.

Popis literature

- [1.] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-quadcopter-with-coordinate-axes-29_fig1_354125102 [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [2.] Thu, K. M., Gavrilov, A.I. *Designing and modeling of quadcopter control system using L1 adaptive control*, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, 2016.
- [3.] Azevedo, F., Complete system for quadcopter control, Federal University of Rio Grande do Sul, Prto Alegre, 2014.
- [4.] Zuo, Z., Liu, C., Han, Q., Song, J., Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges, *IEEE/CAA Journal of automatica sinica*, vol. 9, 2022.
- [5.] Idalene, A., Boukhdir, K., Medromi, H., UAV control architecture: review, *International journal of advanced computer science and applications*, vol. 10, 2019.
- [6.] Tezza, D., Andujar, M., The state of the art of humand-drone interaction: a survey, *IEEE access* vol. 7, 2019.
- [7.] Li, B., Fei, Z., Zhang, Y., UAV communications ofr 5G and beyond: recent advances and future trends, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, April 2019.
- [8.] Koumaras H, Makropoulos G, Batistatos M, Kolometsos S, Gogos A, Xilouris G, Sarlas A, Kourtis M-A. 5G-Enabled UAVs with Command and Control Software Component at the Edge for Supporting Energy Efficient Opportunistic Networks. *Energies*. 2021.
- [9.] 5G-PPP Test, Measurement and KPIs Validation Work Group, White paper „KPIs Measurement Tools From KPI definition to KPI validation enablement“, 2023.
- [10.] X. Lin et al., "Mobile Network-Connected Drones: Field Trials, Simulations, and Design Insights," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, 2019.
- [11.] <http://www.ccaa.hr/o-nama-94187> [Pristupljeno: kolovoz, 2023.]
- [12.] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_11_104_2040.html [Pristupljeno: kolovoz, 2023.]
- [13.] <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones/drones-regulatory-framework-background/open-category-civil-drones> [Pristupljeno: kolovoz, 2023.]
- [14.] Hussein, M., Nouacer, R., Corradi, F., Ouhammou, Y., Villar, E., Tieri, C., Castiñeira, C., Key technologies for safe and autonomous drones, *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 87, 2021.
- [15.] Jacobsen R.H., Matlekovic L., Shi L., Malle N., Ayoub N., Hageman K., Hansen S., Nyboe F.F., Ebeid E., Design of an Autonomous Cooperative Drone Swarm for Inspections of Safety Critical Infrastructure, *Applied Sciences*, 2023.
- [16.] Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016.

- [17.] L. Apvrille, Y. Roudier and T. J. Tanzi, "Autonomous drones for disasters management: Safety and security verifications," 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC), Gran Canaria, Spain, 2015.
- [18.] Amponis G., Lagkas T., Zevgara M., Katsikas G., Xirofotos T., Moscholios I., Sarigiannidis P., Drones in B5G/6G Networks as Flying Base Stations, Drones, 2022.
- [19.] Su, Y., LiWang, M., Hosseinalipour, S., Huang, L., Dai, H., Optimal Position Planning of UAV Relays in UAV-assisted Vehicular Networks, IEEE International Conference on Communications, Virtual, 2021.

Popis ilustracija

<i>Slika 1. Prikaz kvadkoptera.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2. Blok dijagram sustava upravljanja.</i>	<i>4</i>
<i>Slika 3. Deliberativna arhitektura.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4. Reaktivna arhitektura.</i>	<i>8</i>
<i>Slika 5. Hibridna arhitektura.</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6. Arhitektura kontrole ponašanja.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 7. Višerazinska arhitektura.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8. 5G referentna arhitektura.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 9. Referentni model 5G mreže za bespilotne letjelice.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 10. Veza između kvalitete usluga i pružatelja usluga.</i>	<i>19</i>
<i>Slika 11. Testni let drona u Masali, Finska: a) prikaz pozicija baznih stanica i orijentacija antena oko testnog područja; b) prikaz rute za letjelicu na 2D karti; c) prikaz referentne rute po kojoj se kretao automobil na zemlji.</i>	<i>24</i>
<i>Slika 12. Podaci s poslužujuće bazne stanice: a) RSRP distribucija; b) RSRQ distribucija; c) RS-SINR distribucija; d) prikazuje propusnost uzlazne veze.</i>	<i>25</i>
<i>Slika 13. Mjerni podaci susjedne ćelije: a), c) i e) prikazuju distribuciju RSRQ na visinama od 150m, 50m i zemaljskoj razini; b), d) i f) prikazuju distribuciju RSRP na visinama od 150m, 50m i na zemaljskoj razini.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 14. Simulacija rezultata silazne veze: a) i c) predstavljaju latenciju; b) i d) predstavljaju SINR.</i>	<i>29</i>
<i>Slika 15. Maksimalni primljeni identifikatori ćelija na bazi snage na zemaljskoj razini i na visinama od 50m, 100m i 300m.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 16. Broj RLF-ova mjereni na terenskom istraživanju na zemaljskoj razini i na 150m. ..</i>	<i>31</i>
<i>Slika 17. UTM koncept sustava i operacijski tijek.</i>	<i>34</i>
<i>Slika 18. UTM fizička arhitektura.</i>	<i>35</i>
<i>Slika 19. Prikaz jednostavnog UTM sustava.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 20. Prikaz procesa generiranja rute.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 21. Prikaz korištenja RGBD kamere za detekciju prepreke.</i>	<i>43</i>
<i>Slika 22. Poboljšanje pokrivenosti u hitnim slučajevima pomoću mobilnih baznih stanica na dronu.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 23. Mobilna bazna stanica na dronu za podršku komunikacije među vozilima.....</i>	<i>46</i>

Popis tablica

<i>Tablica 1. Pregled strategija upravljanja.....</i>	<i>5</i>
<i>Tablica 2. Pregled metoda upravljanja.</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 3. Definiranje 5G KPI.</i>	<i>20</i>
<i>Tablica 4. Primjeri eksternih podataka pruženih UTM klijentu.....</i>	<i>38</i>

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je Diplomski rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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 završnog/diplomskog rada pod naslovom Inovativni sustavi autonomnog upravljanja bespilotnim letjelicama, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 06.09.2023

Andra Garašić
(ime i prezime, potpis)