

UDK 629.73:528.7:535.4

Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Ispitivanje interferencije signala na bespilotne letjelice

Marin DUBROVIĆ – Donji Miholjac¹, Zvonimir NEVISTIĆ,
Željko BAČIĆ – Zagreb²

SAŽETAK. *Bespilotne letjelice (BPL) postaju sve važniji dio svakodnevnog života za obavljanje zadataka u različitim područjima kao što su misije spašavanja, praćenje prirodnih katastrofa, nadzor prometa, poljoprivrede i dr. Također, BPL danas se sve više koriste i u geodeziji gdje im je glavna svrha masovno prikupljanje prostornih podataka fotogrametrijskim metodama ili metodama laserskog skeniranja, što omogućuje stvaranje trodimenzionalnih modela za različite primjene, od GIS analiza i katastra do prostornog planiranja i izmjere dosad nepristupačnih područja klasičnim metodama izmjere. BPL dio je sustava bespilotnih zrakoplova (engl. Unmanned Aerial System – UAS) gdje se komunikacija između različitih komponenti, navigacija i pozicioniranje odvijaju primjenom radio signala koji su podložni interferenciji. Interferencija radio signala može biti namjerna ili slučajna te može dovesti do poremećaja rada UAS-a čime posljedično mogu nastati katastrofalne posljedice. Ovaj rad ispituje utjecaj namjernog ometanja (blokiranja) signala (engl. jamming) na radio komunikaciju i navigaciju BPL-a. Istraživanje je provedeno koristeći dvije letjelice, DJI Phantom 4 i DJI Mavic 3E koje su jedne od najčešće upotrebljivanih letjelica u praksi. Ometanje je provedeno koristeći dva različita ometača signala, a rezultati predstavljaju vizualnu analizu ponašanja letjelice tijekom leta pod utjecajem ometača, ispitivanje točnosti koordinata projekcijskih središta fotografija za različite metode pozicioniranja te statističku analizu parametara koji utječu na točnost pozicioniranja poput broja vidljivih satelita i kvalitete primljenog signala. Ukupno je napravljeno sedam testova s letjelicom DJI Phantom 4 i šest testova s letjelicom DJI Mavic 3E koji su pokazali različito ponašanje i ranjivost letjelica pod utjecajem interferencije. Ovaj rad pruža vrijedne rezultate o ranjivosti BPL-a na interferenciju signala i potiče daljnja istraživanja u razvoju rješenja za poboljšanje otpornosti na ometanje.*

Ključne riječi: bespilotna letjelica, UAS, ometač, GNSS, interferencija.

¹ Marin Dubrović, mag. ing. geod. et geoinf., Karašica-Vučica d.d., Trg Ante Starčevića 9, HR-31540 Donji Miholjac, Hrvatska, e-mail: mdubrovic@geof.hr

² dr. sc. Zvonimir Nevistić, Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: zvonimir.nevistic@geof.unizg.hr
prof. dr. sc. Željko Bačić, Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: zeljko.bacic@geof.unizg.hr

1. Uvod

Razvoj tehnologije, smanjenje troškova i nove funkcionalnosti dovele su do široke upotrebe bespilotnih letjelica (BPL) u različitim područjima ljudske djelatnosti. BPL tako nalaze primjenu u misijama spašavanja, praćenju prirodnih katastrofa, nadzoru prometa, poljoprivrednoj proizvodnji, nadzoru industrijskih postrojenja, upravljanju kriznim situacijama i u različitim drugim situacijama. U području geodezije BPL primjenjuju se za fotogrametrijska i laserska snimanja iz zraka. Kao rezultat dobivaju se trodimenzionalni modeli koji se mogu koristiti za potrebe katastarske i topografske izmjere, izrade geodetskih podloga i karata, praćenje i nadzor klizišta, kamenoloma i različitih deponija, izradu modela fasada zgrada i kulturnih spomenika te mnoge druge primjene.

BPL dio je sustava bespilotnih zrakoplova (engl. *Unmanned Aerial Systems* – UAS). Komunikacija između komponenti UAS-a, određivanje položaja i navigacija letjelice odvija se primjenom radio signala koji su podložni interferenciji s drugim radio signalima. Interferencija, odnosno ometanje signala može biti prirodna smetnja ili radio interferencija koja može biti izazvana namjerno ili slučajno (Zhouyi i dr. 2015) i ona može dovesti do poremećaja funkcioniranja UAS-a. Slučajno ometanje obično uzrokuje manje probleme, dok se namjerno ometanje izvodi s ciljem onesposobljavanja ili preuzimanja kontrole nad BPL-om. Za namjerno ometanje signala koriste se ometači (engl. *jammer*) i zavaravači (engl. *spoofers*). Ometači rade na principu ometanja radio signala emitiranjem signala iste frekvencije koji su jače snage od izvornih signala. Emitiranjem dovoljno snažnih signala ometač osigurava da prijemnik ne može interpretirati izvorne signale, što onemogućuje njegovo ispravno funkcioniranje (Heuschamps 2022). Zavaravanje signala odnosi se na odašiljanje krivotvorenih signala koje prijemnik interpretira kao autentične signale (Rozenbeek 2020). Zavaravanjem signala moguće je preuzeti kontrolu nad BPL-om. U ovom radu korištena je tehnika ometanja signala (engl. *jamming*).

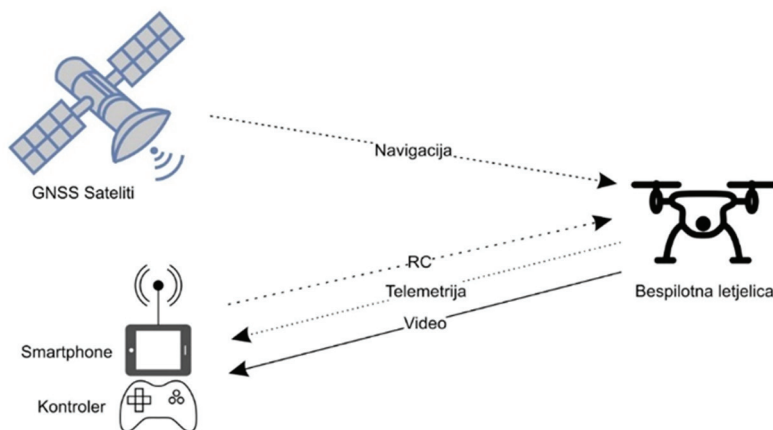
Utjecaj ometanja signala u području geodezije odnosi se uglavnom na GNSS (Globalni navigacijski satelitski sustav) signale koje primaju precizni geodetski prijamnici ili bespilotne letjelice. Istraživanja utjecaja jammera na precizne prijamnike napravljena su kroz nekolicinu radova na Geodetskom fakultetu (Gudelj 2023, Hulina 2018), ali su i predmet objavljenih stručnih članaka (Vidulin i dr. 2013, Bažec i dr. 2020). Prema Gudelj (2023) i Hulina (2018) ovisno o udaljenosti ometača od statičnog GNSS prijemnika dolazi do potpunog gubitka prijema signala ili dolazi do njegove degradacije. Ispitivanja su provedena za jednofrekvencijski i višefrekvencijski ometač pojedinačno i simultano za oba ometača. U radu Vidulin i dr. (2013) testiran je utjecaj jednofrekvencijski ometača na precizni geodetski GNSS prijemnik, uređaj za navigaciju i mobilni telefon te je zaključeno da testirani ometač onemogućuje prijem signala ispitivanih uređaja i na udaljenostima većim od 15 metara. Bažec i dr. (2020) proveli su ispitivanja utjecaj statičnog i kinematičkog ometanja na niz preciznih geodetskih prijemnika i zaključili da instrumenti različitih proizvođača i različitih specifikacija reagiraju različito na ometanje signala. Ometanje signala bespilotnih letjelica isto tako je obrađeno kroz niz radova (Rozenbeek 2020, Heuschamps 2022, Pärilin i dr. 2018). Rozenbeek (2020) je napravio detaljno ispitivanje ometača i zavaravača na signale bespilotne letjelice i zaključio da

je tehnike zavaravanja teško implementirati dok je utjecaj ometača različit ovisno o tome koji spektar se ometa te o karakteristikama BPL-a. Heuschamps (2022) u svom radu bavio se studijama i dizajnom, odnosno konstrukcijom ometača BPL-a za neutralizaciju letjelica koje se koriste u negativne svrhe. Pärlin i dr. (2018) ispitali su mogućnosti neutralizacije BPL-a ometanjem komunikacije između letjelice i kontrolne stanice i zaključili su da udaljenosti na kojima dolazi do uspješnog ometanja ovise o tehnici ometanja kao i protokolu kojeg koristi letjelica.

Ovaj rad ispituje utjecaj interferencije radio signala na bespilotne letjelice s naglaskom na utjecaj ometanja signala na točnost pozicioniranja letjelice. Smetnje i interferencija u GNSS signalu, utječe na kvalitetu opažanja GNSS-a bespilotne letjelice, a time posljedično na točnost vanjske orijentacije fotografija. Za testirane bespilotne letjelice ispitana je točnost položaja snimljenih fotografija, ponašanje letjelica prilikom ometanja radio signala, napravljena je analiza broja opažanih satelita i kvalitete primljenih signala. Korišteni ometači u ovom radu, u prethodno spomenutim radovima, već su ispitani te su prema stečenim saznanjima kreirani poligoni za testiranje.

2. Komunikacijski kanali bespilotnih letjelica

UAS se sastoji od bespilotne letjelice, zemaljske kontrolne stanice, navigacijskog sustava, komunikacijskog sustava, sustava za prikupljanje podataka i udaljenog pilota (Gillins i dr. 2018). Od navedenih dijelova UAS-a navigacijski i komunikacijski sustav primjenjuju radio signale koji su podložni interferenciji i mogu biti ometani primjenom ometača. Uspješnost onesposobljavanja, odnosno ometanja bespilotne letjelice najviše ovisi o uspješnosti onesposobljavanja navigacijskog (GNSS) sustava letjelice (Matić i dr. 2020, Tedeschi i dr. 2019). Slika 1 prikazuje tipičnu bežičnu komunikaciju unutar sustava bespilotnih zrakoplova koja se sastoji od navigacijskih signala, signala radio kontrole te signala koji prenose video i telemetrijske podatke.



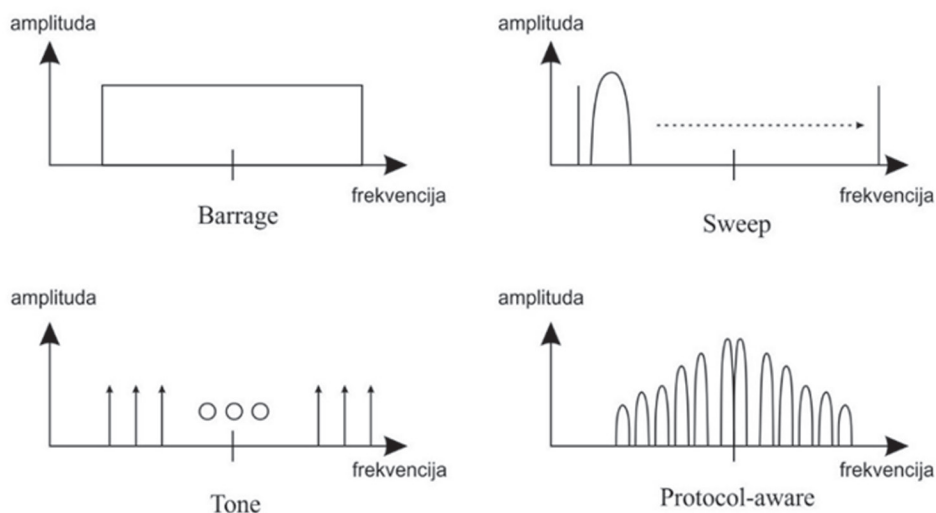
Slika 1. Bežična komunikacija sustava bespilotnih zrakoplova (Rozenbeek 2020).

Navigacijski sustav sastoji se od GNSS-a, INS-a (engl. *Inertial Navigation System*), magnetometra, barometra, infracrvenih i optičkih sustava, čija je osnovna zadaća određivanje pozicije i brzine bespilotne letjelice te vremena, odnosno osiguravanje PVT informacije (engl. *Position Velocity Time*) (Rozenbeek 2020). Primjena navigacijskog sustava pruža pilotu informaciju o položaju letjelice u svakom trenutku, a omogućuje i druge funkcionalnosti poput automatskog povratka letjelice na početnu točku (engl. *Return To Home* – RTH) te stabilno lebdenje kompenzirajući utjecaj vjetera. Osobito važna funkcionalnost koju omogućuje GNSS komponenta je praćenje unaprijed definiranog plana leta, što je neophodno za primjenu UAS-a za potrebe snimanja iz zraka te ostvarivanja pokrivenosti područja od interesa i preklopa između snimaka. Napredni UAS sustavi za snimanje iz zraka obično su opremljeni RTK (engl. *Real Time Kinematic*) modulom koji omogućuje prikupljanje faznih mjerenja na dvije frekvencije te određivanje položaja letjelice u trenutku snimanja s točnošću od nekoliko centimetara. Takvi sustavi daju elemente vanjske orijentacije snimaka, povećavaju relativnu točnost unutar modela te smanjuju potrebu za zemaljskim kontrolnim točkama (engl. *Ground Control Point* – GCP). Međutim, primjena RTK tehnologije zahtjeva korištenje korekcija s permanentne mreže GNSS stanica ili s vlastite bazne stanice koje se prenose korištenjem GSM (engl. *Global System for Mobile communications*) mreže ili putem radio veze, stoga i ti signali mogu biti ometani. Ovaj problem moguće je zaobići korištenjem PPK (engl. *Post-Processed Kinematics*) obrade podataka na temelju pohranjenih opažanja bespilotne letjelice.

Komunikacija između letjelice i kontrolne stanice odvija se u dva smjera. Kontrolna stanica odašilje naredbe pilota, konfiguraciju leta, RTK korekcije i drugo, putem RC veze (engl. *Remote Control*) obično kao male pakete na redundantan način kako bi se postigla stabilnost i smanjili problemi kašnjenja (Rozenbeek 2020). Bespilotna letjelica kontrolnoj stanici odašilje telemetrijske i video podatke. Telemetrijski podaci odnose se na stanje baterije, položaj i orijentaciju bespilotne letjelice, brzinu letjelice, brzinu vjetera i ostalo. Video veza prenosi video s ugrađene kamere bespilotne letjelice do kontrolne stanice, odnosno do pilota. RC, telemetrijski i video podaci mogu se prenositi korištenjem različitih kanala i protokola ili se mogu prenositi jednim kanalom i protokolom što je slučaj za WiFi sustave bespilotnih letjelica (Rozenbeek 2020).

3. Ometanje GNSS i radio signala

Prema definiciji ometanja radio signala moguća je namjerna interferencija, poremećaj i blokiranje autentične radio komunikacije između odašiljača i prijemnika (Rozenbeek 2020). Osnovni princip ometanja je povećati šum unutar signala kako prijemnik ne bi mogao raspoznati autentični signal. Ometanje radio signala može se napraviti različitim tehnikama među koje spadaju Barage, Sweep, Tone i Protocol-aware (slika 2).



Slika 2. Tehnike ometanja signala (Rozenbeek 2020).

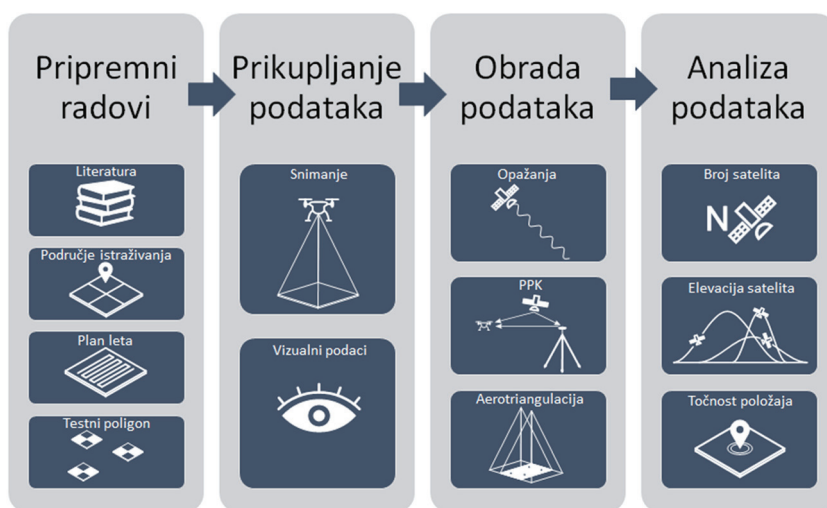
Barrage tehnika ometa cijelo frekvencijsko područje i može ometati bilo koju vrstu signala te utječe na sve uređaje koji koriste frekvencije u ometanom području. Glavni nedostatak je što zahtjeva veliku količinu energije koja se povećava s povećanjem širine ometanog frekvencijskog područja. Sweep tehnika odašilje signal uskog područja koji varira unutar cijelog frekvencijskog područja koje se ometa (Rozenbeek 2020). Uz dovoljno veliku brzinu kojom se mijenja frekvencija moguće je postići efekt barrage tehnike. Tone tehnika koristi jedan ili više strateški postavljenih diskretnih tonova (Heuschamps 2022), koji se emitiraju istovremeno ili naizmjenično. Položaj i broj tonova uvjetuje učinak ometanja. Protocol-aware tehnika odašilje lažne signale slične izvornim signalima kako prijemnik ne bio u mogućnosti filtrirati šum. Primjena ove tehnike zahtjeva da signali budu konstruirani za određenu vrstu komunikacije.

Potpuno blokiranje signala UAS-a može polučiti različite scenarije ovisno o tome jesu li blokirani GNSS signali ili komunikacija između letjelice i kontrolne stanice ili su blokirani svi signali. Potpunim blokiranjem signala između bespilotne letjelice i kontrolne stanice, ako pritom GNSS signal nije u potpunosti blokiran moguće je nekoliko scenarija. Bespilotna letjelica će se autonomno vratiti na početnu točku (RTH), ostat će lebdjeti u zraku, izvest će sigurnosno slijetanje ili će dovršiti snimanje prema planu leta. U slučaju potpunog blokiranja GNSS signala, ako signal između bespilotne letjelice i kontrolne stanice nije blokiran izgubit će se informacije o položaju, brzini i vremenu i sve funkcije koje koriste GNSS. Pilot će letjelicom moći manualno upravljati, ali RTH funkcija neće raditi. Ovakav scenarij odgovara letu u zatvorenom prostoru. Potpuno blokiranje svih signala dovelo bi do sigurnosnog slijetanja bespilotne letjelice ako je opremljena sustavima za potpomognuto slijetanje ili bi došlo do pada letjelice. U slučaju da je ometanje GNSS signala djelomično, bespilotna

letjelica može završiti snimanje iz zraka, ali će pri tome biti smanjena točnost vanjske orijentacije snimaka.

4. Metodologija istraživanja

U ovom istraživanju testirano je ponašanje GNSS-a i BPL-a na utjecaj ometača GNSS i radijskih signala. Istraživanje se sastojalo od četiri dijela: planiranje i pripremni radovi (proučavanje literature i prethodnih istraživanja, definiranje lokacije istraživanja, izrada plana leta i postavljanje testnog poligona); prikupljanje podataka (snimanje fotografija prema planu leta i prikupljanje vizualnih podataka); obrada podataka (obrada sirovih podataka opažanja, PPK izjednačenje, aerotriangulacija i skupno izjednačenje bloka); analiza podataka (analiza broja satelita i SNR (engl. *Signal-to-Noise Ratio*) vrijednosti, analiza točnosti položaja pojedine metode pozicioniranja, analiza utjecaja ometanja signala na satelite različitih elevacija). Grafički prikaz metodologije istraživanja nalazi se na slici 3.



Slika 3. Dijagram istraživanja.

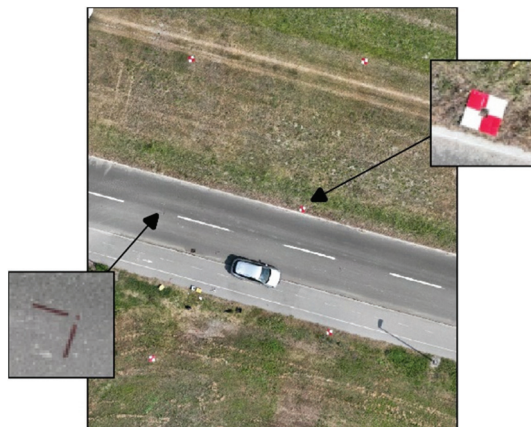
Metoda kojom je ispitan utjecaj ometača na točnost položaja letjelice temelji se na usporedbi prikupljenih podataka o položaju letjelice različitim GNSS tehnikama s koordinatama dobivenim aerotriangulacijom u odnosu na zemaljske kontrolne točke (GCP). S obzirom da se aerotriangulacijom dobivaju koordinate projekcijskih središta fotografija iz fotografija na kojima su označene točke s poznatim koordinatama (GCP), ti podaci nisu opterećeni utjecajem ometača iako su fotografije prikupljene tijekom ometanja signala.

Utjecaj ometača na broj opažanih satelita i kvalitetu primljenog signala ispitan je metodom analize sirovih podataka pohranjenih u letjelici tijekom sni-

manja. Na identičan način napravljena je analiza utjecaja elevacije satelita na prijem signala uz prethodno povezivanje podataka elevacije s podacima opažanja. Ponašanje letjelice tijekom ometanja analizirano je primjenom vizualne metode.

4.1. Područje istraživanja i korištena oprema

Ispitivanje utjecaja ometača na bespilotnu letjelicu provedeno je uz nasip na desnoj obali rijeke Save na području naselja Blato u Novom Zagrebu (slika 4). Područje ispitivanja udaljeno je od naselja i glavnih prometnica kako ometanje signala ne bi utjecalo na korisnike GNSS-a te kako bi se izbjegle moguće interferencije koje bi utjecale na rezultate istraživanja.



Slika 4. Poligon za testiranje ometača.

Na terenu je postavljeno 15 zemaljskih kontrolnih točaka od kojih je dio označen bojom, a dio s kartonskim oznakama što je vidljivo na slici 4. Koordinate zemaljskih kontrolnih točaka određene su GNSS RTK metodom korištenjem korekcija s CROPOS servisa. Opažanje je obavljeno korištenjem Topcon Hiper SR prijemnika i Topcon FC5000 kontrolera u deset epoha. Koordinate točaka određene su u HTRS96/TM koordinatnom sustavu i kartografskoj projekciji te HVR571 visinskom sustavu. U središte područja ispitivanja parkiran je osobni automobil u kojem je bio uključen jednofrekvencijski ometač, a u neposrednoj blizini postavljen je i višefrekvencijski ometač, specifikacije kojih su predstavljene u tablici 2.

Za ispitivanje utjecaja interferencije signala korištene su BPL DJI Phantom 4 i DJI Mavic 3E čiji su opisi i specifikacije dani u tablici 1. Phantom 4 opremljen je tehnologijom izbjegavanja prepreka Vision system (naprijed i ispod), a za pozicioniranje se koriste infracrveni senzori, ultrazvučni sonar i GNSS (GPS + GLONASS). Upravljanje letjelicom provodi se korištenjem Phantom 4 SDK kontrolera koji omogućuje korištenje aplikacija trećih proizvođača ili vlastito

razvijenih aplikacija na pametnom telefonu (URL 1). Za izradu plana leta i snimanje korištena je Pix4DCapture aplikacija (URL 2).

Mavic 3E letjelica je Enterprise serije namijenjena fotogrametrijskom snimanju. Za pozicioniranje i navigaciju u prostoru koristi GNSS (GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS), Vision system u horizontalnom (naprijed, natrag i bočno) i vertikalnom smjeru (iznad i ispod), infracrveni sustav i barometar. PSDK port omogućuje montiranje RTK modula koji osigurava položajnu točnost na centimetarskoj razini kao i naknadnu obradu podataka (PPK). Upravljanje letjelicom omogućeno je preko kontrolera DJI RC Pro, a izrada plana leta i snimanje izvedeno je korištenjem DJI Pilot 2 aplikacije (URL 3).

Tablica 1. *Karakteristike korištenih bespilotnih letjelica (URL 1, URL 3).*

Specifikacije bespilotnih letjelica		
Tip	DJI Phantom 4	DJI Mavic 3E
Masa	1380 g	915 g
Klasa UAS	-	C2
Max brzina snimanja	15 m/s	15 m/s
Max vrijeme leta	28 min	39 min
GNSS	GPS, GLONASS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
GNSS format podatka	-	RINEX 3.05
GNSS frekvencija podataka	-	5 Hz
Točnost položaja	HZ: 1,5 m, V: 0,5 m	HZ: 1 cm + 1 ppm V: 1,5 cm + 1 ppm
WiFi (prijenos videa, telemetrijskih podataka i radio kontrola)	2,400–2,4835 GHz 5,725–5,850 GHz	2,400–2,4835 GHz 5,150–5,250 GHz 5,725–5,850 GHz
Bluetooth	2,400–2,4835 GHz	2,400–2,4835 GHz
Max udaljenost prijenosa podataka (bez interferencije i prepreka)	10 km (FCC), 6 km (CE/SRRC/MIC)	15 km (FCC), 8 km (CE/SRRC/MIC)

Ometanje signala provedeno je korištenjem jednofrekvencijski (SF) i višefrekvencijski (MF) ometača (tablica 2). SF ometač djeluje samo na GNSS signale u L1, dok ne utječe na GNSS signale u drugim područjima, kao ni na WiFi i GSM signale. SF ometač opskrbljuje se energijom iz 12V utičnice automobila. Domet ometača je od 2 do 15 metara. MF ometač djeluje na GNSS signale u svim frekvencijskim područjima, kao i na WiFi signale. Signali ometača odašilju se preko 5 više smjernih antena, a moguć je odabir frekvencija koje će se ometati. Ometač se napaja energijom iz interne baterije. Domet MF ometača je od 2 do 30 metara. Na temelju prethodnih istraživanja Huline (2018) i Gudelj (2023), definirane su udaljenosti ometača za testiranja. Prema navedenim istraživanjima SF i MF ometači imaju black-out zonu od 13 m, odnosno u tom rasponu u potpunosti blokiraju prijem GNSS signala i onemogućuju navigac-

iju i određivanje pozicije. Na većim udaljenostima, do 300 m, ometači smanjuju broj opažanih satelita, degradiraju vrijednosti SNR-a i povećavaju PDOP (engl. *Position Dilution Of Precision*). Također, do 60 m udaljenosti ometači onemogućuju inicijalizaciju RTK mjerenja dok MF ometač također ometa bluetooth i WiFi komunikaciju prijamnika i kontrolne stanice.

Tablica 2. *Karakteristike korištenih ometača signala (URL 4, URL 5).*

Specifikacije ometača		
Tip	Jednofrekvencijski ometač	Višefrekvencijski ometač
Ukupna izlazna snaga	do –10 dBm	do 4,2 W
Radna frekvencija	1500–1600 MHz	173 MHz, 1170–1180 MHz 1370–1380 MHz, 1220–1260 MHz 1570–1620 MHz, 2400–2500 MHz
Dimenzije	75 × 20 × 20 mm	125 × 75 × 35 mm
Napajanje	DC 12 V	AC 100–240 V i DC 12 V
Radna temperatura	–30 °C do +60 °C	–20 °C do +50 °C
Antena	1 Omnidirectional	5 High Gain Omnidirectional
Domet	2–15 m	2–30 m

4.2. Prikupljanje i obrada podataka

Prikupljanje podataka napravljeno je 17. srpnja 2024. na testnom poligonu. Podaci su prikupljeni vizualno (praćenjem ponašanja BPL za vrijeme rada ometača) i s bespilotnim letjelicama kroz pripadajuće aplikacije. Obrada podataka napravljena je primjenom različitih komercijalnih i otvorenih programa.

Plan leta za Mavic 3E izrađen je u aplikaciji DJI Pilot 2. Visina leta odabrana je 12 i 20 metara iznad točke polijetanja, a pripadni GSD (engl. *Ground Sample Distance*) bio je 0.32cm, odnosno 0.54cm. GSD je veličina koja definira prostornu veličinu slikovnog elementa, odnosno definira prostornu rezoluciju o kojoj ovisi razina detalja koja se može raspoznati na fotografijama. Uzdužni preklop fotografija je 80% dok je poprečni preklop 70%, a za visinu 20 metara poprečni preklop je 80%. Okidač za prikupljanje snimaka je postavljen na jednake vremenske intervale. Kontrolna stanica letjelice povezana je na CROPOS servis s kojeg su preuzimane diferencijalne korekcije za RTK pozicioniranje. Uz RTK pozicioniranje uključena je i opcija RTK *maintain position accuracy*, koja u slučaju lošijeg signala održava točnost RTK do 10 minuta uz postepeno smanjenje točnosti. U slučaju gubitka signala postavljeno je da letjelica lebdi na mjestu, a po završetku misije da se vrati na početnu točku (RTH). Mavic 3E automatski je prikupljao navigacijsku poruku, opažanja satelita i pomake projekcijskog središta fotografija u odnosu na fazni centar RTK modula. Plan leta za Phantom 4 napravljen je u aplikaciji Pix4D Capture u obliku double grid mission (dvostruki prelet preko područja interesa) s nagibom kamere 20°

u odnosu na nadir. Let je izvođen na 12, 20, 25 i 30 metara visine s pripadnim GSD vrijednostima 0.33cm, 0.55cm, 0.69cm i 0.82cm.

Za potrebe PPK obrade podataka izvan područja ometanja na nasipu postavljen je bazni prijemnik Topcon Hiper VR koji je prikupljao podatke tijekom ispitivanja. Koordinate baznog prijemnika određene su CROPOS RTK metodom opažanjem u 30 epoha. Opažanja baze prikupljena su za sve dostupne satelite s frekvencijom 1Hz i pohranjena su u *.tps formatu koji je preveden u RINEX 3.05 format. Računanje koordinata projekcijskih središta PPK metodom provedeno je u besplatnoj aplikaciji Emlid studio. U računanju korištene su RINEX datoteke opažanja i efemeride baznog prijemnika i datoteka opažanja letjelice te datoteka s vremenskim oznakama fotografija i ofsetima projekcijskog središta u odnosu na fazni centar RTK modula. Radi osiguravanja kvalitetnog i pouzdanog rješenja korištena je elevacijska maska od 15°, kombinirani filtar i SNR maska od 35dBHz. Nakon obavljenog računanja dobivena je datoteka s položajima letjelice u trenutku svakog opažanja i datoteka s koordinatama projekcijskih središta fotografija.

Fotogrametrijska obrada snimaka provedena je u programu Agisoft Metashape, gdje je napravljena aerotriangulacija skupnim izjednačenjem u bloku. Pri obradi podataka korištene su isključivo zemaljske kontrolne točke, dok podaci o položaju projekcijskih središta fotografija nisu korišteni. Na taj način dobiveni su stvarni položaji fotografija na koje nije utjecala interferencija GNSS signala. Za Mavic 3E korištena je kompenzacija mehaničkog zatvarača i parametri kalibracije kamere zapisani u exif podacima. Nakon računanja veznih točaka provedeno je filtriranje rijetkog oblaka točaka s obzirom na pogrešku rekonstrukcije, pogrešku reprojektije i točnost projekcije. Za sve letove korišteni su jednaki parametri filtriranja. Za Phantom 4 korištene su jednake postavke uz razliku onemogućene kompenzacije mehaničkog zatvarača. S obzirom da je Phantom 4 za pojedine letove snimio nedovoljan broj fotografija za fotogrametrijsku obradu, snimljene fotografije pridružene su fotografijama snimljenog nultog stanja i napravljena je zajednička obrada.

Za referentne koordinate projekcijskih središta snimljenih fotografija uzeti su podaci dobiveni aerotriangulacijom. Iako su dobiveni podaci opterećeni pogreškom određivanja položaja zemaljskih točaka (GCP) u odnosu na koje se provode računanja, druga metoda određivanja stvarnog položaja letjelice nije bila dostupna, a i pretpostavka je da pogreške položaja neće biti značajne u odnosu na očekivane pogreške zbog ometanja signala. Za koordinate dobivene RTK, PPK metodom i GNSS-om letjelice određene su razlike za koje su provedena statistička računanja minimuma, maksimuma, srednje vrijednosti i srednje kvadratne pogreške. Za Phantom 4 usporedba koordinata definirana je samo za podatke projekcijskih središta fotografija dobivenih GNSS-om letjelice. Točnost pozicioniranja pojedine metode analizirana je i grafički preklapanjem putanja leta bespilotne letjelice.

Analiza broja opažanih satelita i SNR vrijednosti napravljena je na temelju pohranjenih datoteka s opažanjima u RINEX formatu za letjelicu Mavic 3E. Izrađen je niz grafičkih prikaza prikupljenih podataka koji su omogućili detaljnu analizu utjecaja ometača na GNSS signale. Grafički prikazi pokazuju ovisnost broja satelita, SNR-a i prosječnog SNR-a u odnosu na vrijeme sniman-

ja te ovisnost dostupnosti satelita u odnosu na elevaciju u pojedinom trenutku snimanja fotografije.

Detaljni podaci o svakom letu zabilježeni su u .txt datoteci DJIFlightRecord. Ova datoteka je svojevrsna crna kutija koja sadrži veliku količinu podataka koji se u slučaju problema prilikom leta mogu analizirati. Na taj način proizvođač može unaprjeđivati sustav bespilotne letjelice kako bi se smanjile mogućnosti sličnih problema. Vizualizacija podataka crne kutije provedena je online aplikacijom Airdata u kojoj su iščitani podaci o brzini leta, visini, stanju baterije, udaljenosti od početne točke, kvaliteti radio signala, broju satelita, modu leta kao i sve obavijesti koje su prikazane na ekranu kontrolera prilikom leta. U KML (engl. *Keyhole Markup Language*) obliku preuzeta je putanja leta letjelice kao i položaji snimljenih fotografija određeni GNSS-om letjelice. Podaci su prikupljeni samo za letjelicu Mavic 3E, dok su datoteke za Phantom 4 bile oštećene i nije bilo moguće prikupiti podatke o letu.

5. Rezultati istraživanja

Nakon obavljenog prikupljanja i obrade podatka dobiveni su podaci o broju opažanih satelita, SNR vrijednosti, točnosti položaja pojedine metode pozicioniranja, vrsti RTK/PPK rješenja i ponašanju letjelice za različite scenarije ometanja signala. DJI Phantom 4 pružio je manji broj podataka koji su uglavnom vizualni dok je DJI Mavic 3E letjelica dala velik broj različitih informacija koje su omogućile detaljnu analizu utjecaja ometača na bespilotnu letjelicu.

5.1. DJI Phantom 4

Za letjelicu DJI Phantom 4 provedeno je ukupno sedam testova. Prvi test je let bez ometanja signala u kojoj je letjelica obavila cijelu planiranu misiju. Usporedbom podataka dobivenih aerotriangulacijom i podataka iz GNSS-a letjelice vidljiva je pogreška apsolutnog položaja od 3 metra (tablica 3). Relativna položajna točnost je ispod 1 metra. Za sve letove rezultati apsolutne položajne točnosti lošiji su od relativne uz tendenciju povećanja točnosti za svaki sljedeći let. Usporedbom položajne i visinske točnosti potvrđena je specifikacija proizvođača da je visinska točnost veća od položajne.

U drugom testu upaljen je SF ometač prije polijetanja i blokiran je prijem svih GNSS signala. Ometač je ugašen i ponovno upaljen nakon što je letjelica započela misiju. Zbog interferencije signala misija je prekinuta na 10%, a letjelica je lebdjela u zraku na zadanoj visini od 12 metara. Nakon gašenja ometača nije bilo moguće dovršiti let, stoga je izvedeno ručno slijetanje. Po završetku testa nije bilo moguće ponovno pokrenuti isplanirani let, jer je letjelica poletjela do visine 2 metra i lebdjela. Svaki prekid leta zbog interferencije signala doveo je do potrebe ponovnog definiranja plana leta u aplikaciji Pix4DCapture. Rezultati prethodnog testa sugerirali su izvođenje ponovnog testa na većoj visini leta, stoga su izvođeni testovi dok se nije došlo do visine na kojoj letjelica

može obaviti misiju unatoč djelovanju ometača. Let na visini 20 metara uz ometanje SF ometačem Phantom 4 letjelica izvela je do razine oko 40% kada je došlo do prekida. Pokrenuta je naredba RTH (Return to Home), no letjelica se nije vratila na početnu točku, nego je samo vertikalno sletjela.

Test na visini 25 metara prekinut je odmah na početku sa snimljenih samo 5 fotografija, a letjelica je sletjela korištenjem RTH naredbe. Let na visini 30 metara uz ometanje SF ometačem obavljen je u cijelosti bez prekida, a letjelica je sletjela korištenjem RTH naredbe.

Testiranje MF ometača napravljeno je na visini 12 i 20 metara. Prije polijetanja upaljen je ometač postavljen u blizini letjelice koji je blokirao sve GNSS signale. Zbog interferencije signala bilo je potrebno izraditi novi plan leta za istu visinu od 12 metara. Kada je letjelica započela misiju upaljen je ometač i snimljene su 54 fotografije, nakon čega je došlo do prekida misije. Letjelica je vertikalno sletjela na mjestu prekida snimanja. Letom na visini 20 metara uz ometanje MF ometačem snimljeno je 49 fotografija kada je snimanje prekinuto. Letjelica je sletjela identično kao u prethodnom testu.

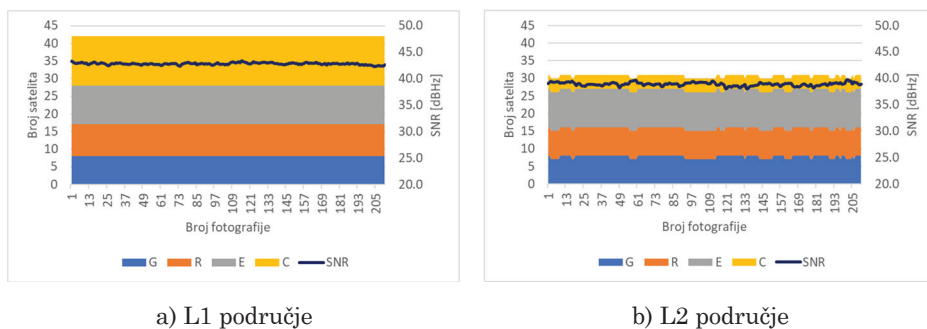
Tablica 3 prikazuje rezultate položajne i visinske točnosti Phantom 4 letjelice dobivene usporedbom koordinata projekcijskih središta fotografija izračunatih aerotriangulacijom i određenih GNSS-om letjelice. Iz dobivenih rezultata vidljivo je povećanje točnosti položaja letjelice protekom vremena, prema tome testovi koji su prije izvođeni daju lošiju točnost položaja dok posljednje izvođeni testovi daju točnost položaja identičnu onoj koju specifikacijama daje proizvođač (tablica 1). Analizom točnosti položaja GNSS-a letjelice nije moguće detektirati utjecaj ometača, jer je letjelica prekinula misiju snimanja kada je došlo do interferencije signala.

Tablica 3. *Položajna i visinska odstupanja Phantom 4 letjelice.*

Test	Odstupanje	Max	Min	Avg	RMSE
Bez ometanja	ΔH_z	4,647	2,771	3,623	3,638
	ΔV	3,426	0,937	2,458	2,516
SF ometač 12 m	ΔH_z	5,302	4,416	4,898	4,903
	ΔV	3,221	2,339	2,807	2,820
SF ometač 20 m	ΔH_z	1,863	1,308	1,508	1,514
	ΔV	2,504	0,634	1,619	1,666
SF ometač 25 m	ΔH_z	1,881	1,776	1,841	1,841
	ΔV	1,555	1,109	1,337	1,350
SF ometač 30 m	ΔH_z	1,409	0,759	1,099	1,112
	ΔV	2,275	0,547	1,699	1,726
MF ometač 12 m	ΔH_z	2,205	0,920	1,464	1,498
	ΔV	1,183	0,057	0,544	0,626
MF ometač 20 m	ΔH_z	1,627	0,961	1,312	1,326
	ΔV	1,188	0,259	0,697	0,734

5.2. DJI Mavic 3E

Testiranje interferencije signala za Mavic 3E provedeno je u šest različitih testova. Prvi test se odnosi na let bez korištenja ometača koji je izveden na visini 12 metara. Na slici 5 prikazani su rezultati prvog testa letjelicom Mavic 3E iz koje je vidljiv broj opažanih satelita (kodnih pseudoudaljenosti) u trenutku snimanja fotografije za GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) i BeiDou (C) satelitske sustave i prosječna SNR vrijednost tijekom izvođenja testa. Ukupan broj opažanih signala satelita u L1 području je 42 tijekom cijelog leta. Broj opažanih satelita u L2 području je 30 – 31 s prekidima opažanja satelita izrazito niskih elevacija. SNR vrijednost lošija je za satelite nižih elevacija. Prosječne vrijednosti SNR-a pokazuju bolju kvalitetu signala u L1 području, nego u L2 području s iznosima 42.8dBHz i 38.9dBHz. Broj satelita i SNR vrijednost identičnih su iznosa u svim položajima letjelice, što upućuje da ne postoji ometanje signala iz drugih izvora na području testiranja.



Slika 5. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za prvi test letjelicom Mavic 3E.

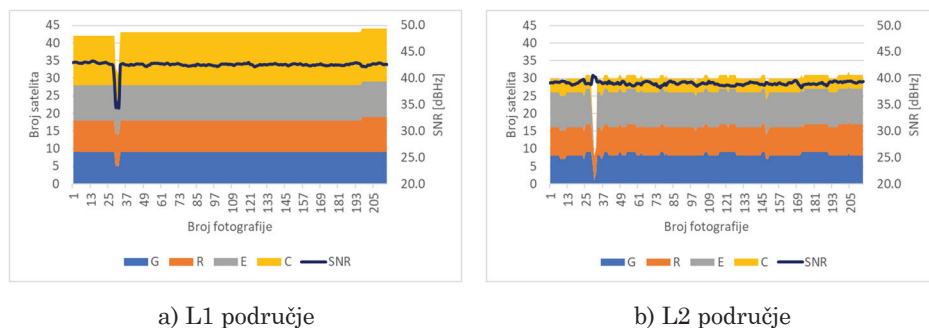
RTK i PPK rješenje je fiksno za sve položaje projekcijskih središta fotografija. Tablica 4 prikazuje rezultate položajne i visinske točnosti pojedine metode pozicioniranja u odnosu na podatke aerotriangulacije. Podaci PPK daju najkvalitetnije podatke, RTK daje neznatno lošije rezultate dok su podaci GNSS-a letjelice na sub-metarskoj razini.

Tablica 4. Položajna i visinska odstupanja Mavic 3E letjelice za prvi test.

	RTK		PPK		GNSS
Odstupanje	ΔH_z	ΔV	ΔH_z	ΔV	ΔH_z
Max	0,065	0,085	0,066	0,028	1,269
Min	0,001	0,029	0,001	0,000	0,075
Avg	0,018	0,054	0,017	0,010	0,634
RMSE	0,023	0,055	0,023	0,012	0,687

Drugim testom analiziran je utjecaj SF ometača na visini 12 metara. Početna točka polijetanja postavljena je 2 metra od upaljenog ometača. SF ometač blokirao je sve satelite u L1 području dok signali satelita u L2 području nisu

značajno degradirani. RTK rješenje nije fiksno, stoga nije bilo moguće poletjeti. Isključenjem RTK pozicioniranja letjelica je mogla poletjeti unatoč djelovanju ometača. Ometač je zatim ugašen dok letjelica nije došla na početnu točku prema planu leta pa je ponovno upaljen. Let je izvođen prema planu leta do snimanja 30. fotografije kada je došlo do snažne interferencije signala i letjelica je stala. Prekinuta misija ručno je ponovno pokrenuta od točke prekida i dovršena je do kraja bez ikakvih prekidanja. Na slici 6 jasno je vidljiv trenutak prekida misije, kada broj opažanih satelita i SNR vrijednost u L1 području naglo padaju, a u L2 području dolazi samo do pada broja opažanih satelita. Broj opažanih satelita u L1 do prekida signala je 42, dok je broj opažanih satelita u trenutku prekida 31. Do kraja misije opažano je 43, odnosno 44 satelita. U L2 području u trenutku najsnažnije interferencije došlo je do pada opažanih satelita sa prosječnih 30 na 8. SNR vrijednost u L1 u trenutku prekida za sve satelite pada za 10dBHz, dok SNR u L2 za opažane satelite ostaje jednak tijekom cijelog snimanja. U trenutku prekida misije došlo je do gubitka signala sa satelita neovisno o njihovoj elevaciji.



Slika 6. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za drugi test letjelicom *Mavic 3E*.

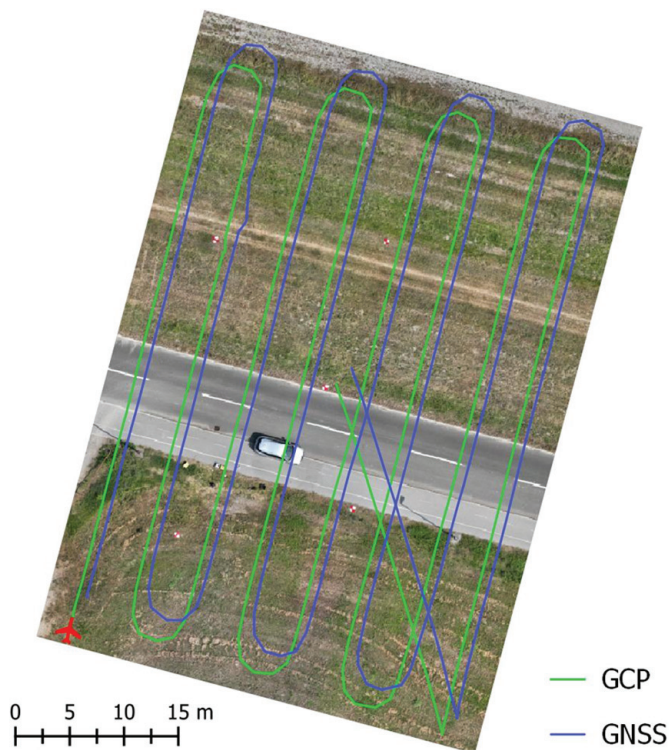
RTK rješenje fiksno je za sve položaje projekcijskih središta, dok PPK rješenje nije fiksno za tri projekcijska središta u trenutku najjače interferencije. Točnost pozicioniranja PPK je najtočnija, dok je RTK neznatno lošiji (tablica 5). Pozicioniranje GNSS-om odstupa u prosjeku više od 2 metra, stoga je utjecaj ometača najveći na GNSS prijamnik letjelice.

Tablica 5. Položajna i visinska odstupanja *Mavic 3E* letjelice za drugi test.

	RTK		PPK		GNSS
Odstupanje	ΔH_z	ΔV	ΔH_z	ΔV	ΔH_z
Max	0,116	0,111	0,117	0,046	3,439
Min	0,002	0,037	0,001	0,000	1,130
Avg	0,027	0,072	0,027	0,015	2,186
RMSE	0,034	0,074	0,034	0,019	2,281

Planirana putanja leta identična je kao u prethodnom testu, ali zbog pogreške GNSS-a stvarna putanja po kojoj je obavljen let pomaknuta je jugozapadno u

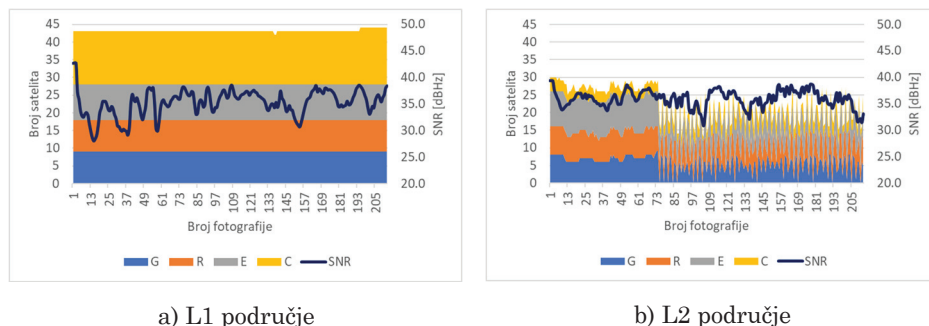
iznosu oko 2 metra. Ovaj pomak vidljiv je na slici 7 gdje je zelenom linijom prikazana stvarna putanja leta, dok je plavo prikazana putanja dobivena GNSS-om letjelice koji se koristi za navigaciju. Na slici je vidljiv i trenutak prekida misije na početku druge linije gdje položaj fotografije odstupa od pravca snimanja. Za sve letove početak misije nalazi se u jugozapadnoj točki putanje označeno crvenom oznakom.



Slika 7. Stvarna putanja i putanja leta određena GNSS-om za drugi test letjelicom *Mavic 3E*.

Nakon testa SF ometača napravljeno je testiranje MF ometača na visini 12 metara. Prije početka testiranja letjelica je postavljena 2 metra od ometača koji je blokirao sve signale GNSS-a i nije bilo moguće poletjeti. Ometač je ugašen dok letjelica nije došla do početne točke snimanja. Cijeli let obavljen je bez prekida, a prilikom slijetanja na visini 2.5 metra u blizini ometača došlo je do značajnog pada broja opažanih satelita. Broj opažanih satelita u L1 je 43, a pri završetku leta 44. Broj opažanih satelita u L2 pokazuje manje varijacije od 26 do 30 satelita do opažanja 75. fotografije. Nakon toga broj satelita se visokofrekvencijski mijenja od 12 do 26 što daje vrlo nazubljen grafički prikaz koji je vidljiv na slici 8. SNR vrijednosti u L1 značajno su degradirane u trenutku paljenja ometača. Tijekom cijelog leta prosječna SNR vrijednost nije

konstantnog iznosa već varira za više od 10dBHz. Signali svih satelita jednako su degradirani, odnosno SNR u istim trenucima opada i raste identično za sve satelite. SNR vrijednosti u L2 pokazuju slično ponašanje kao u L1. Analizom elevacije satelita i prijema signala vidljivo je da kodne pseudoudaljenosti u L1 području nisu prekinute u prijemu samo je došlo do već spomenute degradacije signala. Fazne pseudoudaljenosti u L1 prekidane su u prijemu uglavnom za satelite nižih elevacija. U L2 području utjecaj ometača jednak je na fazna i kodna mjerenja i ne ovisi o elevaciji satelita.



Slika 8. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za treći test letjelicom Mavic 3E.

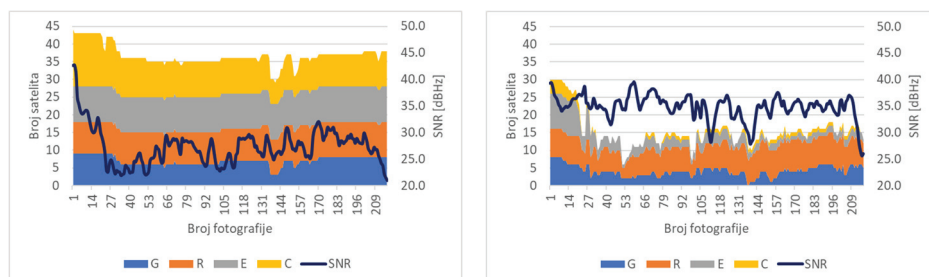
Položaj projekcijskih središta fotografija određen s PPK nije fiksna samo za četiri fotografije u trenutku kada je i prosječna SNR vrijednost najmanja. S obzirom na primijenjeni SNR filter u tom trenutku nije opažan dovoljan broj kvalitetnih signala za računanje pozicije. RTK pozicija fiksna je za prve 92 fotografije, a nakon toga rješenje je float, ali ipak visoke točnosti zbog korištenja RTK *maintin position accuracy*. Prema tablici 6 vidljiva je visoka točnost položaja identična kao u slučaju leta bez ometanja.

Tablica 6. Položajna i visinska odstupanja Mavic 3E letjelice za treći test.

	RTK		PPK		GNSS
Odstupanje	ΔH_z	ΔV	ΔH_z	ΔV	ΔH_z
Max	0,098	0,100	0,112	0,068	1,328
Min	0,001	0,028	0,001	0,000	0,064
Avg	0,039	0,068	0,030	0,016	0,662
RMSE	0,044	0,069	0,038	0,020	0,713

Četvrti test ispituje utjecaj oba ometača na bespilotnu letjelicu na visini leta 12 metara. Ometači su upaljeni kada je letjelica došla na početnu točku snimanja prema planu leta. Tijekom leta dogodila su se četiri prekida misije koja je ručno ponovno pokrenuta od točke prekida misije. Posljednji prekid dogodio se prilikom snimanja posljednje fotografije kada zbog jake interferencije nije bio moguć nastavak misije pa je pokrenuta RTH naredba. Prilikom slijetanja broj opažanih satelita pao je na nulu, a letjelica nije sletjela na točku polijetanja, nego otprilike 1 metar dalje. Sa slike 9 vidljivo je da je broj opažanih satelita

u L1 prije paljenja ometača 43 i taj broj ostaje do prvog prekida kada broj opažanih satelita pada na 35. Kod svakog prekida misije vidljiv je značajan pad broja opažanih satelita (slika 9). Fazna mjerenja u L1 području blokirana su značajno više od kodnih. Nakon prvog prekida misije do kraja snimanja broj opažanih faza je više nego dvostruko manji od kodnih mjerenja. Broj satelita u L2 nakon paljenja ometača smanjuje se s početnih 30 i varira u rasponu od 5 do 17 satelita (slika 9). Ometači su na fazna i kodna mjerenja u L2 području djelovali podjednako. Prosječna SNR vrijednost u L1 području nalazi se u rasponu od 21 do 32 dBHz, dok je u L2 manje degradiran i varira u rasponu od 26 do 39 dBHz. Signali su blokirani neovisno o elevaciji satelita iako su u pojedinim slučajevima više blokirani signali sa satelita nižih elevacija.

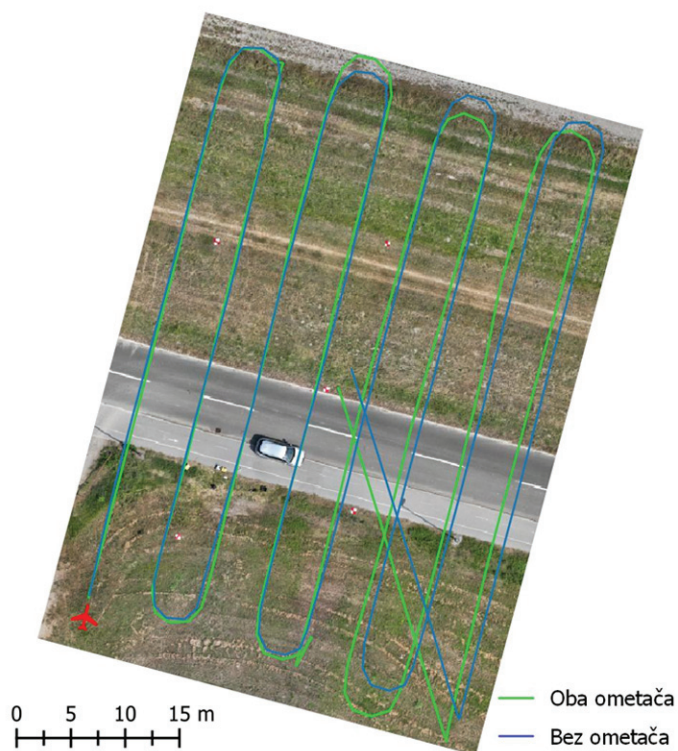


a) L1 područje

b) L2 područje

Slika 9. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za četvrti test letjelicom Mavic 3E.

Na slici 10 zelenom bojom prikazana je putanja leta prilikom ometanja oba ometača i plavom bojom putanja bez ometanja. Usporedbom dviju putanja vidljivo je da je letjelica pratila planiranu putanju do prvog prekida kada dolazi do odstupanja na početku druge linije. Letjelica je dalje pratila planiranu putanju do drugog prekida na početku treće linije kada let počinje sve više odstupati od planirane misije. Na kraju položaj letjelice odstupa više od 2 metra od planiranog.



Slika 10. Putanja leta za četvrti test letjelicom Mavic 3E i putanja bez ometanja.

RTK rješenje fiksno je na početku misije do prvog prekida, kada je letjelica prešla na RTK *maintain position*. Visoka točnost pozicije zadržana je sve do posljednjeg prekida kada je RTK rješenje bilo single point s odstupanjem na razini 2 metra. PPK pozicija fiksna je za mali dio fotografija snimljenih na početku, a nakon prvog prekida rješenje je single point s pogreškom položaja koja poprima vrijednosti veće od 46 metara. S obzirom da su gotovo svi signali imali manju kvalitetu od 35dBHz, nije bilo dovoljno opažanih satelita za dobivanje PPK pozicije. Tablica 7 pokazuje da su podaci RTK najtočniji, zatim dolaze podaci GNSS-a letjelice dok se rezultati PPK ne mogu upotrijebiti niti za određivanje približnog položaja fotografija.

Tablica 7. Položajna i visinska odstupanja Mavic 3E letjelice za četvrti test.

Odstupanje	RTK		PPK		GNSS
	ΔH_z	ΔV	ΔH_z	ΔV	ΔH_z
Max	2,813	0,654	46,539	7,372	4,103
Min	0,004	0,001	0,001	0,000	0,046
Avg	0,065	0,058	23,515	4,047	1,693
RMSE	0,267	0,087	27,262	4,559	2,022

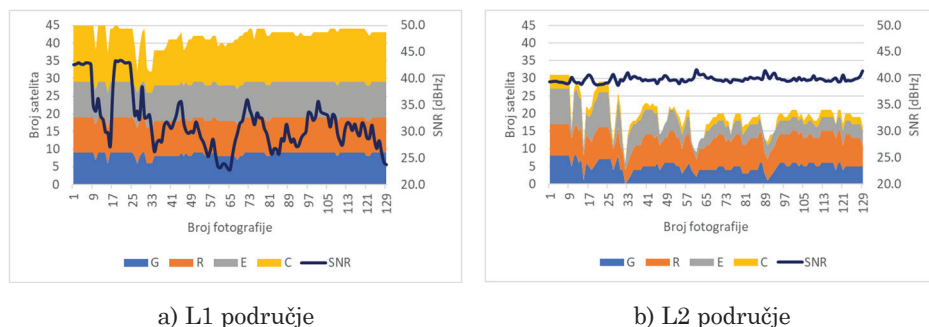
Utjecaj SF ometača na Mavic 3E ispitan je i na visini leta 20 metara kroz peti test. Ometač je uključen u trenutku kada je letjelica došla na početnu točku snimanja. Prilikom snimanja dogodio se jedan prekid misije koja je ručno pokrenuta. Nakon prekida ometač je nakratko ugašen i ponovno upaljen. Tijekom snimanja letjelica je pri najvećoj interferenciji signala odstupila od planirane putanje što je vidljivo na slici 11. Na kraju druge i četvrte linije vidljivo je odstupanje od pravilne putanje za iznose do 2 metra. S obzirom da nije napravljeno testiranje bez ometanja signala na visini 20 metara nije bilo moguće usporediti planiranu i izvedenu putanju leta.



Slika 11. Putanja leta za peti test letjelicom Mavic 3E.

Prilikom slijetanja u blizini ometača došlo je do većeg pada broja opažanih satelita. Slika 12 pokazuje velik broj opažanih kodnih mjerenja u L1 dok je broj faznih mjerenja više nego dvostruko manji za vrijeme djelovanja ometača. SNR vrijednost nakon paljenja ometača značajno opada, a gašenjem ometača odmah se vraća na početnu vrijednost (slika 12). Broj opažanih satelita u L2 pada u pojedinim trenucima snimanja ispod 10, dok ometač nije utjecao na kvalitetu signala onih satelita koji su opažani. Kvaliteta signala u L1 području najviše je narušena u blizini ometača, dok je u L2 neovisna od položaja letjelice. Signali

su blokirani neovisno o elevaciji satelita iako su u pojedinim slučajevima više blokirani signali sa satelita nižih elevacija.



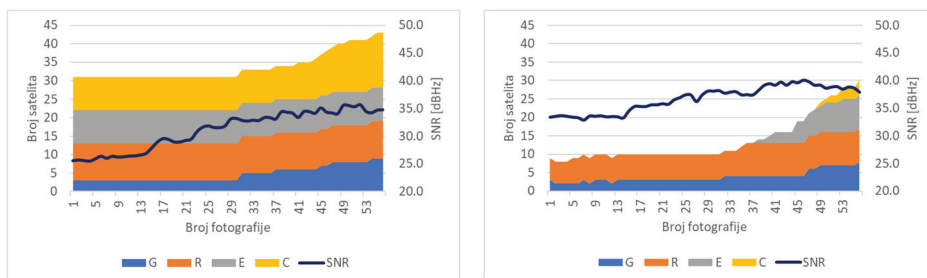
Slika 12. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za peti test letjelicom Mavic 3E.

RTK rješenje fiksno je za gotovo sve fotografije osim 7 položaja projekcijskih središta u području najlošije kvalitete signala. PPK rješenje po cijeloj putanji varira između fiksnog, float i single point. Prema tablici 8 vidljivo je da RTK daje najkvalitetnije rezultate koji su na razini rezultata dobivenih bez ometanja. PPK daje lošije rezultate od unutarnjeg GNSS-a letjelice.

Tablica 8. Položajna i visinska odstupanja Mavic 3E letjelice za peti test.

	RTK		PPK		GNSS
Odstupanje	ΔH_z	ΔV	ΔH_z	ΔV	ΔH_z
Max	0,069	0,095	6,954	0,893	1,977
Min	0,000	0,046	0,006	0,000	0,000
Avg	0,020	0,071	1,010	0,438	0,643
RMSE	0,026	0,071	1,677	0,564	0,715

Posljednji test odnosi se na vertikalni let iznad oba ometača od visine 10 do 120 metara. Let je izveden ručno na način da je letjelica zaustavljena na određenim visinama gdje je snimljena fotografija. Broj opažanih satelita udaljavanjem od ometača, odnosno povećanjem visine raste. Tako u L1 području broj opažanih satelita raste od 31 do 43, a u L2 od 8 do 30 (slika 13). Prosječna SNR vrijednost porastom visine se povećava, ali na najvećoj visini ne dostiže vrijednosti koje poprima u testu bez ometanja signala što je vidljivo na slici 13. Kvaliteta signala u L2 veća je nego u L1 iako je broj satelita veći u L1 području. S obzirom na elevaciju manje su ometani sateliti više elevacije.



a) L1 područje

b) L2 područje

Slika 13. Broj satelita i prosječna SNR vrijednost za šesti test letjelicom Mavic 3E.

RTK rješenje float je za sve fotografije, dok je PPK single point do visine 105 metara kada postaje fiksno za preostale fotografije. Položajna točnost najveća je za RTK, a zatim slijedi PPK i unutarnji GNSS letjelice (tablica 9).

Tablica 9. Položajna i visinska odstupanja Mavic 3E letjelice za peti test.

	RTK		PPK		GNSS
Odstupanje	ΔHz	ΔV	ΔHz	ΔV	ΔHz
Max	0,302	1,077	2,071	19,922	2,702
Min	0,043	0,098	0,039	0,827	1,691
Avg	0,118	0,356	0,959	11,272	2,248
RMSE	0,136	0,469	1,162	13,128	2,262

6. Diskusija rezultata istraživanja

Phantom 4 u slučaju neometanog signala pokazuje položajnu točnost na razni od nekoliko metara i ta točnost položaja raste s vremenom, odnosno svakim novim testom. Uzrok toga može se pripisati činjenici da letjelica nije korištena dugo vremena i da je bilo potrebno određeno vrijeme kako bi se popravila točnost pozicioniranja. Najveći problem uočen kod Phantom 4 je nemogućnost nastavka leta nakon prekida uzrokovanog ometanjem signala. Za svaki slučaj gubitka signala nije bio moguć daljnji nastavak misije, nego samo ručno slijetanje. U pojedinim slučajevima bilo je moguće korištenje RTH naredbe, ali se letjelica nije vratila na početnu točku, nego se samo vertikalno spustila u odnosu na točku prekida snimanja. Nakon prekida misije istu nije bilo moguće ponovno pokrenuti, jer bi letjelica poletjela do visine 2 metra i ostala lebdjeti u zraku, stoga je nakon prekida uvijek iznova bilo potrebno izraditi plan leta. Phantom 4 uz ometanje signala u potpunosti je proveo snimanje tek na visini od 30 metara za SF ometač, a u svim ostalim slučajevima misija nije dovršena. Za razliku od Phantom 4, Mavic 3E letjelica pokazala je puno veću otpornost

na ometanje signala. Uz nekoliko prekida obavljeni su svi letovi u cijelosti što se može pripisati robusnom rješenju na temelju mjerenja s preko 40 satelita na četiri satelitska sustava. Broj opažanih satelita dvostruko je veći nego u slučaju Phantom 4 letjelice. Točnost RTK pozicije za sve testove na razini je nekoliko centimetara zbog mjerenja na dvije frekvencije kao i primjene RTK *maintain position accuracy*. PPK položaj najtočniji je za let bez ometanja signala, te u slučaju leta uz ometanje SF i MF ometačem odvojeno. U slučaju jačeg ometanja PPK pozicija daje najlošije rezultate, odnosno u slučaju najjače interferencije s oba ometača nije uopće bilo moguće dobiti rješenje.

Ometanje SF ometačem na visini 12 metara rezultiralo je jednim prekidom snimanja. U trenutku prekida broj satelita u L1 značajno je pao kao i prosječna SNR vrijednost. U L2 području broj opažanih satelita također je značajno pao, ali prosječna SNR vrijednost preostalih opažanih satelita blago je porasla. Slične rezultate pokazuje SF ometač na visini 20 metara. U L1 broj opažanih satelita je visok, ali SNR vrijednost značajno pada, dok je u L2 značajno pao broj opažanih satelita, ali je kvaliteta preostalih opažanih satelita izrazito visoka. Identični rezultati su u slučaju oba ometača. Kod polijetanja u blizini ometača RINEX datoteka ne sadrži nikakve podatke za L1, dok su podaci u L2 pohranjeni u potpunosti. Također, puno više su ometanjem blokirana mjerenja faza. SF ometač u testovima pokazao je da utječe na signale u L1, ali i u L2 frekvencijskom području iako po specifikacijama ometa samo L1. U frekvencijskom području L1 SF ometač više utječe na kvalitetu opažanih satelita, dok u L2 više utječe na broj opažanih satelita. Podaci mjerenja dok je letjelica mirovala u blizini ometača i kada je letjela pokazuju da ometač različito djeluje u slučaju mirovanja i kretanja GNSS prijemnika.

MF ometač nije utjecao na broj opažanih satelita u L1, nego samo na kvalitetu signala, odnosno ometanje nije bilo dovoljno snažno da GNSS ne bi mogao prikupiti mjerenja. S obzirom da je prvi test pokazao veću kvalitetu signala u L1 području, a prosječni SNR gotovo je jednak na obje frekvencije, može se zaključiti da je ometanjem došlo do smanjenja kvalitete signala u L2 u manjoj mjeri nego u L1. Broj opažanih satelita u L2 stabilan je do trenutka kada počinje visokofrekvencijski varirati. Prilikom polijetanja u blizini ometača bili su blokirani svi signali i letjelica nije mogla započeti misiju. Također kao i u slučaju SF ometača vidljiv je različit efekt ometanja kada se GNSS kreće i kada miruje. MF ometač zbog frekvencijskog raspona ometanja utjecao je na kvalitetu signala u L1 i u L2 području, ali nije bio u mogućnosti blokirati signale zbog dometa i izlazne snage.

Kombinacija oba ometača očekivano daje najveći utjecaj na rezultate ometanja. Broj opažanih satelita na obje frekvencije se smanjio, kao i kvaliteta signala. Iz grafičkog prikaza broja satelita i prosječne SNR vrijednosti može se zaključiti da su se utjecaji ometača na GNSS signale međusobno zbrojili. Oba ometača zajedno dovela su do četiri prekida misije, a posljednji koji se dogodio u neposrednoj blizini ometača onemogućio je nastavak misije leta. Time su oba ometača na kraju snimanja uspjela onesposobiti letjelicu za automatski let, ali nisu onemogućili ručno upravljanje.

Vertikalni let iznad ometača pokazao je kako udaljenost utječe na rezultate ometanja. Očekivano povećavanjem visine leta, odnosno udaljenosti povećava

se broj satelita i kvaliteta signala. S obzirom da je vertikalni let izvođen podizanjem letjelice i njezinim zaustavljanjem na određenoj visini ovaj test ispituje utjecaj ometača na statični GNSS letjelice. U usporedbi s ostalim testovima broj satelita i kvaliteta signala nemaju velike skokove i padove, nego su grafički prikazi glatkog izgleda.

Ometači nisu utjecali na radio vezu između letjelice i kontrolne stanice, stoga je u svakom trenutku bilo moguće preuzeti ručno upravljanje letjelicom. Isto tako nisu utjecali na GSM signale, niti na WiFi hotspot preko kojih su osigurane diferencijalne korekcije za RTK.

7. Zaključak

Utjecaj interferencije GNSS signala na bespilotnu letjelicu do sada nisu ispitivana na način koji je proveden u ovom istraživanju, stoga je bilo teško postaviti hipoteze istraživanja. Metode ispitivanja temeljile su se na specifikacijama ometača i rezultatima koji su dobiveni tijekom ispitivanja. Phantom 4 i Mavic 3E letjelice pokazale su različito ponašanje pri utjecaju ometača, stoga je tijekom ispitivanja i vrsta testa za svaku letjelicu drugačija.

Rezultati su pokazali veliku ranjivost Phantom 4 letjelice na interferenciju GNSS signala dok je s druge strane Mavic 3E zbog mogućnosti primanja signala sa svih dostupnih satelitskih sustava u L1 i L2 području i unaprijeđenih algoritama uz manje prekinde uspio odraditi sve planirane misije. U neposrednoj blizini SF ometača za Mavic broj opažanih satelita se prepolovio, dok su u blizini MF ometača svi signali izgubljeni. Time je vidljivo da je za zaustavljanje letjelice ove vrste potrebno blokirati široki spektar signala, a blokiranje samo L1 nije dovoljno. Domet ispitivanih ometača doveo je do degradacije signala, ali nije onesposobio letjelicu za nastavak misije, odnosno u slučaju Phantom 4 za preuzimanje ručne kontrole.

SF ometač po specifikacijama blokira signale samo u L1, ali se ispitivanjem pokazalo da utječe i na L2 područje. Svako ispitivanje SF ometačem pokazalo je da se u L1 blokira tek manji broj signala, ali dolazi do značajnog pada SNR vrijednosti. Za L2 vidljivo je da se značajno smanjuje broj opažanih satelita, ali se SNR vrijednost za opažane satelite ne mijenja. Na visini od 12 metara utjecaj ometača je manji nego na 20 metara što je činjenica koja bi se mogla pripisati načinu na koji se signal širi, ali to zahtjeva dodatna istraživanja.

MF ometač na ispitivanoj udaljenosti 12 metara pokazuje slične rezultate kao SF ometač. U L1 nije došlo do blokiranja signala, ali je došlo do značajnog pada kvalitete, s druge strane u L2 došlo je do velikog pada broja opažanih satelita, ali je degradacija signala preostalih opažanih satelita manja nego u L1 području. Za oba ometača vidljivo je da se fazna mjerenja blokiraju u većoj mjeri od kodnih mjerenja, što je vezano uz širinu područja u kojoj djeluje ometač.

Ispitivanje u vertikalnom smjeru pokazalo je da ometači imaju utjecaja na broj satelita sve do visine 120 metara, kada broj opažanih satelita je sličan kao bez ometanja signala. SNR vrijednost značajno je degradirana i nakon visine od 120 metara, ali zbog zabrane leta na većim visinama nije ispitano do koje

visine ometači imaju utjecaj na GNSS signale. Broj satelita i SNR vrijednost povećavaju se udaljavanjem od ometača. Vertikalni test daje rezultate slične onima koji se dobiju ispitivanjem utjecaja ometača na statični GNSS-a. Broj satelita i kvaliteta signala nemaju velikih skokova i promjena tijekom ispitivanja. S druge strane ostali testovi pokazuju velike promjene i skokove, stoga se može zaključiti da ometači različito djeluju na GNSS u mirovanju i pokretu u odnosu na ometač. Ovisno o tome je li GNSS u mirovanju ili pokretu u odnosu na ometač, konstrukcija ometača treba se razlikovati. Ometači koji bi onespobili bespilotnu letjelicu trebali bi imati znatno veći domet, odnosno znatno veću izlaznu snagu kao i široki spektar frekvencija.

Provedeno istraživanje polučilo je rezultate koji omogućuju postavljanje hipoteza i provođenje novih istraživanja u ovom području. Zbog velike brzine leta istraživanja su vrlo dinamična i daju rezultate u kojima je teže raspoznati uzročno posljedične veze između karakteristika ometača, prijemnika i svih drugih čimbenika. Za razliku od statičkih ispitivanja interferencije GNSS signala, moguće je postaviti veći broj scenarija ispitivanja, ali i doći do dodatnih zaključaka.

Rezultati istraživanja trebaju skrenuti pozornost korisnika na posljedice ometanja signala na UAS-a s obzirom da se BPL sve češće koriste u svakodnevnom životu bilo u profesionalne ili amaterske svrhe. Ometače signala lako je nabaviti, a njihovo djelovanje može izazvati značajne materijalne štete, a i predstavlja opasnost po ljudsko zdravlje. U slučaju primjene BPL-a u geodetske svrhe potrebno je voditi računa o tome da ometanje može dovesti do loše određenih parametara vanjske orijentacije fotografija, a time i do smanjenja kvalitete 3D modela.

ZAHVALA. Posebna zahvala tvrtki Karašica-Vučica d.d., Donji Miholjac, na ustupljenoj bespilotnoj letjelici DJI Mavic 3E, GNSS prijamniku baze za PPK mjerenja i programu za fotogrametrijsku obradu podataka Agisoft Metashape.

Literatura

- Bažec, M., Dimc, F., Pavlovčić-Prešeren, P. (2020): Evaluating the vulnerability of several geodetic GNSS receivers under chirp signal L1/E1 jamming, *Sensors*, 20 (3), 814.
- Gillins, D. T., Parrish, C., Gillins, M. N., Simpson, C. (2018): Eyes in the sky: Bridge inspections with unmanned aerial vehicles (No.FHWA-OR-RD-18-11), Federal Highway Administration, Washington.
- Gudelj, M. (2023): Testiranje rješenja za smanjenje utjecaja ometača na prijem GNSS signala, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Heuschamps, A. (2022): Master thesis: Study and Design of UAS Jamming Systems, Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées, Liège.

- Hulina, D. (2018): Ispitivanje utjecaja GNSS ometača, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Matić, V., Kosjer, V., Lebl, A., Pavić, B., Radivojević, J. (2020): Methods for drone detection and jamming, Proceedings of the 10th International Conference on Information Society and Technology (ICIST), 16–21.
- Pärilin, K., Alam, M. M., Le Moullec, Y. (2018): Jamming of UAV remote control systems using software defined radio, 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), 1–6.
- Rozenbeek, D. J. (2020): Evaluation of drone neutralization methods using radio jamming and spoofing techniques, School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm.
- Tedeschi, P., Oligeri, G., Di Pietro, R. (2019): Leveraging jamming to help drones complete their mission, IEEE Access, 8, 5049–5064.
- Vidulin, M., Polovina, M., Grgić, M. (2013): Razvoj i primjena uređaja za ometanje signala GNSS satelita, Ekscentar, 16, 76–80.
- Zhouyi, Xiong, W., Zhen, W. (2015): Classification of GNSS interference, ICG Expert meeting, Vienna.

Mrežne adrese

- URL 1: Support for Phantom 4 Pro,
<https://www.dji.com/hr/support/product/phantom-4-pro>, (31. 5. 2025.).
- URL 2: PIX4Dcapture Pro,
<https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture/>, (31. 5. 2025.).
- URL 3: DJI Mavic 3 Enterprise,
<https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>, (31. 5. 2025.).
- URL 4: Mini GPS Satellite Blocker,
<https://www.jammer4uk.com/product/mini-gps-satellite-blocker>,
(31. 5. 2025.).
- URL 5: GPS L1 L2 L5 Jammer,
<https://jammers.store/gps-l1-l2-l5-jammer-3g-gsm-cdma-dcs-pcs-cell-phone-blocker-p-285.html>, (31. 5. 2025.).

Analysis of Signal Interference in UAV Operations

ABSTRACT. *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are becoming an increasingly important part of everyday life for performing tasks in various fields such as rescue missions, natural disaster monitoring, traffic surveillance, agriculture, and more. UAVs are also increasingly used in geodesy, where their main purpose is the mass collection of spatial data with photogrammetric methods or laser scanning, enabling the creation of 3D models for various applications—from GIS analyses and cadasters to spatial planning and surveying of areas that are inaccessible by traditional surveying methods. UAVs are a part of the Unmanned Aerial System (UAS), in which communication between different components, navigation, and positioning is based on radio signals, which are susceptible to interference. Radio signal interference can be intentional or accidental and may disrupt the operation of the UAS, potentially resulting in catastrophic consequences. This paper examines the impact of intentional signal interference (jamming) on UAV radio communication and navigation. The research was conducted using two UAVs, DJI Phantom 4 and DJI Mavic 3E, which are one of most used drones in practice. Jamming was carried out using two different devices (jammers), and the results present a visual analysis of UAV behavior during flight under the influence of jammers, an examination of the accuracy of the coordinates of the photographic projection centers under different positioning methods, and a statistical analysis of parameters affecting positioning accuracy such as the number of visible satellites and signal quality. A total of seven tests were performed with the DJI Phantom 4 and six with the DJI Mavic 3E, showing varying behavior and vulnerability of the UAVs under interference. This study provides valuable insights into UAV susceptibility to signal interference and encourages further research in developing solutions to improve jamming resistance.*

Keywords: UAV, UAS, jammer, GNSS, interference.

Primljeno / Received: 2025-06-10

Prihvaćeno / Accepted: 2025-08-01