

S. Grubeša, M. Suhanek, A. Petošić, I. Đurek*

AKUSTIČKA RJEŠENJA ZA DETEKCIJU DRONOVA S CILJEM POVEĆANJA OPĆE SIGURNOSTI

UDK 629.735:621.395.623
PRIMLJENO: 13.3.2020.
PRIHVAĆENO: 1.7.2020.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: U današnje doba male bespilotne letjelice postaju sve popularnije. Postoje njihove razne inačice, ali po svojoj popularnosti prednjače kvadrokopteri odnosno dronovi. Primjenu nalaze većinom u komercijalnim svrhama ili kao nečiji hobi, međutim mogu biti korišteni i u ilegalne svrhe poput krijumčarenja ili prijenosa eksploziva. Veliki problem predstavljaju i ako se koriste na točno određenim lokacijama poput zračnih luka. Dronove je iznimno teško detektirati zbog njihovih relativno malenih dimenzija, prednjeg dijela napravljenog od plastike te električnih motora koji emitiraju vrlo male količine toplinske energije. U tom smislu konvencionalni radari ili infracrvene kamere jednostavno nisu dovoljne u detekciji dronova. Cilj istraživanja opisanog u ovom članku je ustanoviti koje su mogućnosti akustičkog rješenja za detekciju dronova, odnosno utvrditi zvučne razine malih UAV letjelica i na temelju te zvučne razine odrediti koja je teoretska granica udaljenosti na kojoj je moguće akustički detektirati dron. Također je istraženo koliko ta udaljenost raste ako se kao akustički detektor koristi akustička kamera. Očekuje se da će ishodi ovog istraživanja poboljšati opću sigurnost jer optimiziraju nekoliko vrsta pristupa u svrhu bolje detekcije dronova.

Cljučne riječi: male bespilotne letjelice, akustička rješenja, detekcija, sigurnost

UVOD

Male bespilotne letjelice (engl. *Unmanned Aerial Vehicle*) postaju sve popularnije i koriste se u različite svrhe, posebice kvadrokopteri odnosno dronovi, kako se popularno nazivaju. Iako se takav tip letjelica najčešće koristi u komercijalne svrhe ili kao hobi pojedinaca, izvješća ukazuju na povećanje njihove uporabe za ilegalne aktivnosti (*Tsiamis et al., 2019.*). Dronovi relativno malenih dimenzija (tj. posebna i popularna UAV inačica dizajna koja uključuje četiri motora) potencijalno bi mogli predstavljati ozbiljnu prijetnju sigurnosti i često se koriste u svrhe krijumčarenja. Nadalje, dronovi većih dimenzija mogli bi nositi male ko-

ličine eksploziva. Postoji nekoliko slučajeva gdje je „mali“ dron uzrokovao zatvaranje zračnih luka i kašnjenja te otkazivanja letova (*Gatwick Airport drone incident*). Dronove je vrlo teško detektirati, a glavni uzrok tome je upravo njihova veličina. Njihova mala prednja površina napravljena od plastike dodatno otežava njihovo detektiranje pomoću konvencionalnih radara. S druge strane, mali električni motori emitiraju vrlo male količine topline, a samim time i detekcija infracrvenom kamerom postaje praktički nemoguća. Sustavi koji prate radiofrekvencije ograničeni su na otkrivanje dronova koji su daljinski upravljani. Zaključak je da GPS kontrolirani dronovi jesu stvarna i istinska prijetnja sigurnosti koja se teško otkriva s bilo kojim od postojećih sustava detekcije. Imajući na umu sve navedeno, metoda koja je nedavno stekla veliko zanimanje je detekcija dronova analizom zvuka koji emitiraju. Analiza emitiranog zvuka u kombinaciji s radarskim si-

*Dr. sc. Sanja Grubeša, (sanja.grubesa@fer.hr), dr. sc. Mia Suhanek, (mia.suhanek@fer.hr), izv. prof. dr. sc. Antonio Petošić, (antonio.petosic@fer.hr), prof. dr. sc. Ivan Đurek, (ivan.djurek@fer.hr), Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektroakustiku, Unska 3, 10000 Zagreb.

gnalom mogla bi omogućiti precizno i pouzdano otkrivanje dronova. Dronovi s malim rotorima imaju karakterističan širokopojasni zvuk, odnosno zvuk lopatica rotora je impulsni zvuk bogat harmonicima (*Schmitz et al., 1991.*) te se razne metode detekcije oslanjaju na tu činjenicu i već postoji nekoliko radova koji opisuju različite studije provedene s ciljem otkrivanja dronova. Primjerice, Shi et al. (2018.) predlažu metodu za detekciju dronova na temelju skrivenog Markovljevog modela korištenjem MFCC koeficijenata (engl. *Mel Frequency Cepstral Coefficient*). Ova metoda pokazala je relativno dobre rezultate u bučnim zvučnim okruženjima. S druge strane, ova metoda zahtijeva bazu podataka određenih zvukova, što istovremeno ograničava primjenu spomenute metode. Druge metode koje opisuju Mezei i koautori (2015.), koje koriste korelaciju signala za detekciju zvučnog signala drona, također zahtijevaju prethodno snimljene uzorke signala. U stvarnim situacijama, kada je potrebno detektirati dron na relativno velikoj udaljenosti, njegov zvučni signal imao bi nizak omjer signala prema šumu te bi njegova usporedba s uzorcima signala uvijek rezultirala niskim koeficijentom korelacije. Analiza zvučnog signala ključan je dio svakog tipa detekcije zvuka te u većini slučajeva uključuje određivanje signifikantnih akustičkih značajki na temelju frekvencijskog spektra (*Bernardini et al., 2017.*). S obzirom da je frekvencijski spektar drona širok i bogat harmonicima, postojeće metode detekcije uglavnom se oslanjaju na otkrivanje harmonika u zvučnom signalu. U bučnim zvučnim okruženjima to može predstavljati velik izazov jer omjer signala i šuma mora biti visok kako bi se takvi signali detektirali (*Jeon et al., 2017.*). To podrazumijeva idealne uvjete, međutim u "stvarnim" ili realnim zvučnim okruženjima to obično nije slučaj. Prilikom razvijanja pouzdanog sustava za detekciju dronova (posebice onih sa zlonamjernom svrhom) najvažnija je pravovremena detekcija. Ako se kao metoda detekcije koristi otkrivanje zvuka drona, u trenutku kada je dron daleko od sustava za detekciju koji se temelji na mikrofONU, omjer signala i šuma vrlo je nizak. Razina okolne buke, primjerice oko zračnih luka, mogla bi biti puno viša od razine zvuka drona, čak i ako se koristi mikrofON visoke usmjerenosti. Zbog svega navedenoga, izvlačenje zvučnog signala drona iz realnog zvučnog okruženja zahtijeva detaljniju analizu njegovog zvuč-

nog signala. Cilj studije opisane u ovom članku je ustanoviti zvučne razine malih UAV letjelica i na temelju te zvučne razine odrediti koja je teorijska granica udaljenosti na kojoj je moguće akustički detektirati dron s konačnim ciljem povećanja opće sigurnosti. Dodatno je istraženo koliko ta udaljenost raste ako se koristi akustička kamera kao akustički detektor.

SMJERNICE EU-a O SIGURNOSTI ZRAČNOG PROMETA ORIJENTIRANE NA BESPILOTNE LETJELICE

Vijeće Europske unije 26. lipnja 2018. prihvatilo je ažurirana pravila o sigurnosti zračnog prometa (*Bespilotne letjelice: reforma sigurnosti zračnog prometa u EU-u*) koja obuhvaćaju revidirani mandat Europske agencije za sigurnost zračnog prometa (EASA). Pravila o bespilotnim letjelicama uvode osnovna načela za osiguravanje sigurnosti, zaštite, privatnosti, zaštite osobnih podataka i zaštite okoliša te utvrđuju prag za registraciju operatora bespilotnih letjelica.

Detaljnija pravila o bespilotnim letjelicama utvrdila je Europska komisija uz pomoć EASA-e te izdala brošuru *Safe operation of drones*. Preporuke EASA-e koje se tiču dronova su sljedeće:

- bespilotnu letjelicu uvijek imajte u vidokrugu,
- isplanirajte let i za njega odaberite lokaciju na kojoj nema prepreka,
- ako se svojom bespilotnom letjelicom želite koristiti za obavljanje plaćenog posla, pribavite odobrenje,
- pažljivo pročitajte upute proizvođača,
- nikad letom ne ugrožavajte druge,
- ne usmjeravajte bespilotnu letjelicu da leti iznad 50 metara ili na udaljenosti manjoj od 50 metara od ljudi, imovine ili vozila,
- ne puštajte bespilotnu letjelicu da leti više od 150 metara iznad tla,
- klonite se zračnih luka i uzletišta helikoptera.

Nadalje, pravila definiraju takozvani U-prostor (engl. *U-Space*) koji prikazuje slika 1. Pojam U-prostora je pojam koji je Komisija Europske unije

prihvatila za niz usluga koje podržavaju bespilotne letjelice niske razine operacije, tj. bespilotne letjelice koje lete ispod 120 m visine. Planiran je razvoj potpuno automatizirane infrastrukture koja će moći pružiti bespilotnim letjelicama sve potrebne informacije za siguran let, uključujući i upravljanje u zračnom prometu te osiguranje da dronovi ne ulaze u zone ograničenja. Predviđeno je postupno razvijanje U-prostora, s početkom razvoja 2019. godine kada su definirani osnovni elementi potrebni za registraciju dronova, elektronička identifikacija dronova i geosvijest. Dodatne funkcije U-prostora postupno će se razvijati, a planirano je da prostor postane potpuno operativan do 2025. godine.



Slika 1. U-prostor (U-Space Blueprint)

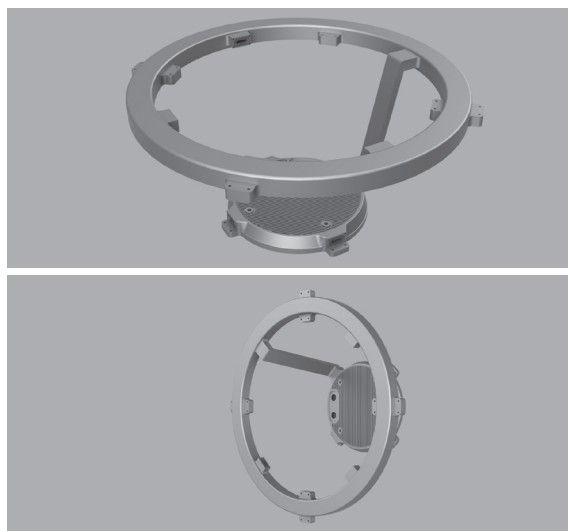
Figure 1. U-Space Blueprint

Kako bi se omogućila potpuno automatizirana infrastruktura koja će moći pružiti bespilotnim letjelicama sve potrebne informacije za siguran let, potrebno je razviti pouzdan detektor bespilotnih letjelica koji će moći s velikom točnošću utvrditi samu poziciju letjelice, i to na relativno velikoj udaljenosti. S akustičkog gledišta, uređaj koji je sposoban zadovoljiti sve navedene zahtjeve i samim time uvelike utjecati na opću sigurnost populacije je pravilno i kvalitetno konstruirana akustička kamera.

NAČELO RADA AKUSTIČKE KAMERE

Akustička kamera je uređaj koji omogućuje vizualizaciju zvučnog polja promatranog izvora zvuka na temelju *Beamforming* metode (Benesty et al., 2008., Veen et al., 1988.). Pomoću kamere mogu-

će je analizirati realne složene situacije u kojima postoji više izvora zvuka koji svojim istovremenim radom onemogućuju utvrđivanje dominantnih zvučnih izvora – izvora koji najviše utječu na ukupnu razinu buke. Koristeći se akustičkom kamerom moguće je vizualizirati refleksije zvuka od čvrstih ploha. Akustičkom kamerom dobivaju se vizualni akustički prikazi iz kojih je moguće analizirati pojedinačne zvučne izvore. Osnovno načelo temelji se na preciznom mjerenju i izračunu specifičnih vremenskih kašnjenja zvučnih signala emitiranog zvuka iz različitih izvora, u odnosu na mikrofone u nizu, postavljene na istom nosaču. Akustički vizualni prikaz lokalne raspodjele zvučnog tlaka na definiranoj udaljenosti od izvora računa se na osnovi akustičkih podataka svih istovremeno snimljenih mikrofonskih kanala. Razine zvučnog tlaka prikazuju se bojama, slično kao kod termovizijskog snimanja. Preklapanjem fotografije određene situacije i lokalne raspodjele zvučnog tlaka mogu se dobiti pouzdani podaci o položajima dominantnih izvora buke i njihovim akustičkim karakteristikama. Postojeće kamere razvijene u *Norsonic*, *GFAI Tech GmbH* ili *B&K* zamišljene su kao vrlo skupi uređaji koji služe prvenstveno za mjerenje zvučnih razina i nisu prilagođene za detekciju dronova. Stoga je za potrebe projekta ERDF KK.01.2.1.01.0103 4D Akustička kamera razvijen prototip akustičke kamere, prikazan na slici 2. Razvoj same kamere detaljno je opisan u člancima autora (Stamać et al., 2019., Grubeša et al., 2019.).



Slika 2. Prototip akustičke kamere

Figure 2. The prototype of the acoustic camera

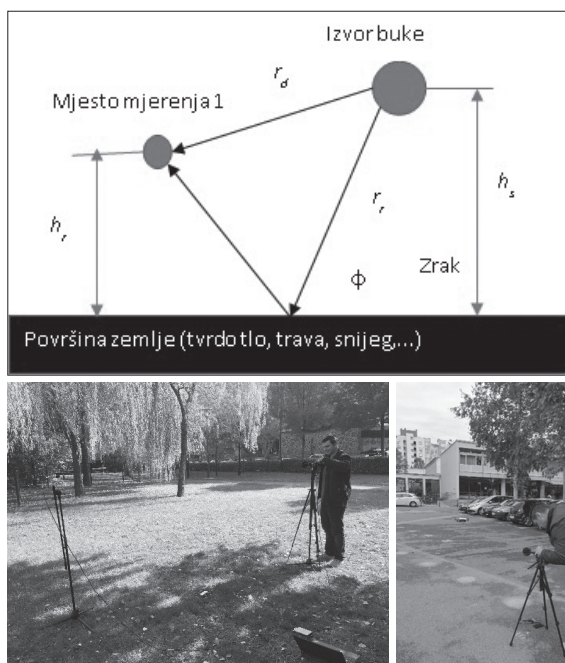
PROVEDENA AKUSTIČKA MJERENJA

U svrhu određivanja teoretske granice udaljenosti na kojoj je moguće akustički detektirati dron analiziran je zvučni signal prilikom lebdenja za jedan model male UAV letjelice odnosno preciznije model 1, dron DJI Spark, koji se pokreće sa četiri motora s dvije elise, a prikazan je na slici 3. Razine zvučnog tlaka drona mjerene su iznad travnatog terena i asfalta na udaljenosti od 1 metra od drona. Mjerenja su provedena pomoću zvukomjera B&K 2250, u frekencijskom području terci od 12 Hz do 20 kHz. Sve izmjerene razine iskazane su u decibelima prema $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$, uz osjetljivost mikrofona 45,7 mV/Pa.



Slika 3. Dron DJI Spark
Figure 3. DJI Spark drone

Iz izmjerenih vrijednosti određuje se razina zvučne snaga drona, a iz poznate razine zvučne snage na udaljenosti 1 metar od izvora zvuka lako je odrediti razinu zvučne snage izvora na nekoj većoj udaljenosti. Izvor zvuka, odnosno dron uvijek se nalazio na visini $h_s = 1,5$ m, neovisno o vrsti podloge nad kojom je levitirao. Provedena su tri mjerenja za svaku lokaciju (mekana i tvrda podloga) te su rezultati usrednjeni, uz udaljenost izvora od zvukomjera na udaljenosti r_d visini izvora h_s i visini prijammnika h_r . Dijagram mjerenja te prikaz mjerenja za određivanje razine snage zvuka iz izmjerenih razina zvučnog tlaka drona na dvije različite lokacije (mekana i tvrda podloga) prikazani su na slici 4.



Slika 4. Mjerne situacije za određivanje razine zvučne snage iz razine zvučnog tlaka tijekom levitacije drona

Figure 4. Measurement situations for the determination of the sound power level of the drone in levitation from measured sound pressure levels

Razina zvučnog tlaka na višim frekvencijama raste zbog utjecaja refleksije od asfalta i stoga je potrebno korigirati zvučne razine (utjecaj osnovne buke i utjecaj refleksija) na istaknutim tercima. Jednadžba za procjenu razine zvučnog tlaka iz poznate razine zvučne snage i svih efekata uzetih u obzir dana je sljedećim izrazom

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log_{10}(r) - k(\text{dB}) + D - \alpha \cdot r(\text{dB}) \quad [1]$$

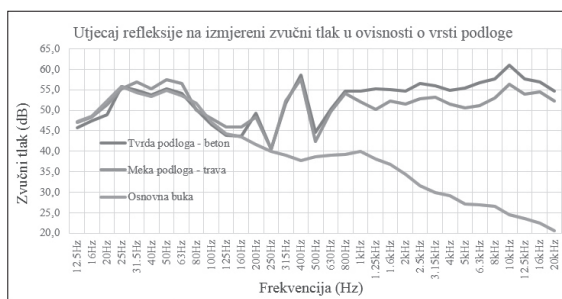
$L_p = L_w - 20 \cdot \log_{10}(r) - 11(\text{dB}) + D - \alpha \cdot r(\text{dB})$ gdje su D usmjerenost zbog reflektivnih ploha oko izvora ili mikrofona, α atmosfersko gušenje, L_w razina zvučne snaga izvora, r udaljenost od izvora, a k (dB) je korekcijski faktor koji uzima u obzir dodatnu refleksiju od podloge i ovisi o vrsti podloge (Bies et al., 2017.).

ANALIZA REZULTATA

Slika 5 prikazuje rezultate mjerenja zvučnog tlaka za model 1 drona ovisno o vrsti podloge nad kojom dron lebdi (mekana podloga – trava i tvrda podloga – beton), u odnosu na srednju vrijednost osnovne buke. Iz rezultata je vidljiv utjecaj podloge na izmjereni zvučni tlak na višim frekvencijama. Na slici 6 vidi se vrijednost izmjenog zvučnog tlaka za model 1 iznad tvrde podloge – betona na dvije udaljenosti od izvora (1 metar i 2 metra), u odnosu na srednju vrijednost osnovne buke. Može se zaključiti da se s povećanjem udaljenosti od izvora zvuka zvučni tlak smanjuje.

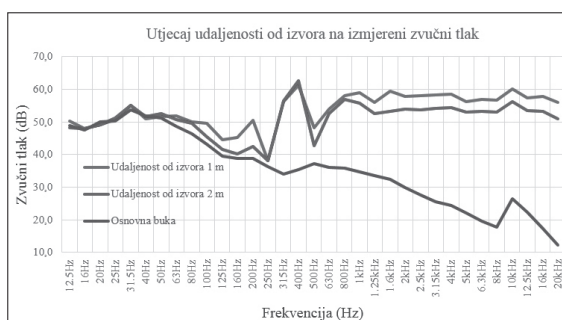
Iz izmjenog zvučnog tlaka za model 1 drona vidljivo je da je istaknuta terca na 400 Hz. Razina zvučnog tlaka u tercnom pojasu oko 400 Hz (uz eliminirani utjecaj refleksije od tla i pozadinske buke) dok dron lebdi na udaljenosti od 1 metra iznosi 60 dB. Iz izmjenog zvučnog tlaka za model 1 drona izračunata razina zvučne snage prema izrazu [1] na toj terci iznosi $L_w = 71$ dB, uz zanemareno atmosfersko gušenje α jer se radi o mjerenju na kraćim udaljenostima (1 metar) te uz $k=11$ dB.

Na slikama 5 i 6 mogu se zapaziti maksimalne razine zvučnih tlakova oko frekvencija 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz i 1600 Hz, a razlog tome je što je zvučni signal drona bogat harmonicima. Osnovni harmonici model 1 drona nalaze se na frekvencijama 183 Hz i 366 Hz. Osnovni harmonik na 183 Hz je osnovni harmonik brzine vrtnje električnih motora drona, a osnovni harmonik na 366 Hz je osnovni harmonik brzine vrtnje elisa drona. Iz svega navedenog može se zaključiti da su maksimalne razine zvučnih tlakova koje se vide na slikama 5 i 6 viši harmonici zvučnog signala drona.



Slika 5. Izmjereni zvučni tlak za model 1 u ovisnosti o podlozi

Figure 5. Measured sound pressure level for Model 1, depending on the surface material



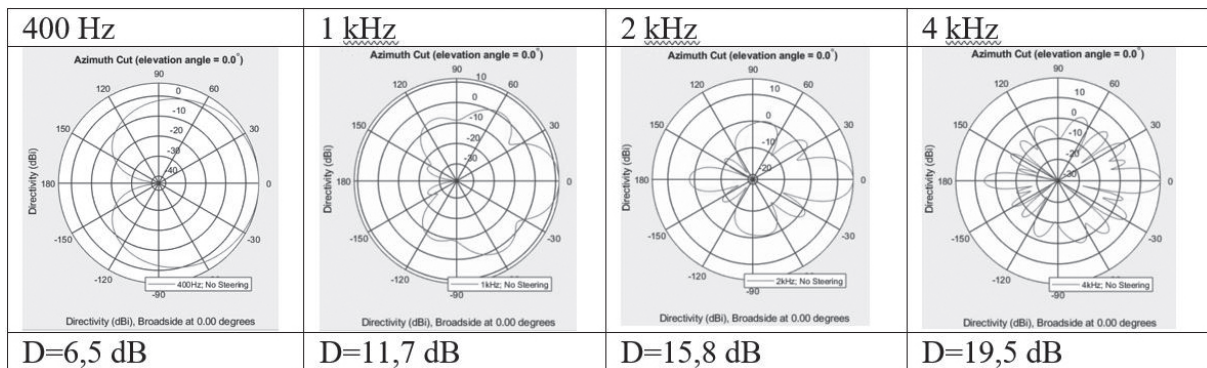
Slika 6. Izmjereni zvučni tlak za model 1 iznad tvrde podloge (beton) za dvije udaljenosti od izvora (1 metar i 2 metra)

Figure 6. Measured sound pressure level for Model 1 over a hard surface (concrete) at the distances of 1 m and 2 m

Upotrebom prototipa akustičke kamere sa slike 2, čije su usmjerne karakteristike prikazane na slici 7 i koja ima veliko pojačanje u frekvencijskom području od interesa, značajno se povećava mogućnost otkrivanja drona, odnosno povećava se udaljenost na kojoj je moguće

detektirati dron. U Tablici 1. vidljiv je proračun udaljenosti na kojoj se može detektirati dron po frekvencijama. Proračun je dobiven korištenjem izraza [1] i izračunate razine zvučne snage po frekvencijama koja je dobivena iz mjerenja razine zvučnog tlaka za mjereni model 1 drona. Prototip akustičke kamere na višim frekvencijama ima veće pojačanje, čime se mogućnost detekcije drona na višim frekvencijama značajno povećava, pogotovo pri mjerenjima nad tvrdom podlogom. Teoret-

ski izračun pokazuje da bi se ovakav mali model 1 drona mogao detektirati upotrebom prototipa akustičke kamere na 100 metara, na frekvenciji 4000 Hz te ako je kamera smještena na tvrdoj podlozi, odnosno na 50 metara ako je kamera smještena na mekanoj podlozi. Uz pretpostavku uzimanja razlike ukupnog zvučnog tlaka između razina dobivenih na mekanoj i tvrdoj podlozi 3 dB, odnosno da je korekcijski faktor $k=11$ dB na mekanoj podlozi, a $k=8$ dB na tvrdoj podlozi.



Slika 7. Usmjerne karakteristike za 400 Hz, 1, 2 i 4 kHz za prototip akustičke kamere

Figure 7. The directivity patterns of the prototype of the acoustic camera at frequencies of 400 Hz, 1 kHz, 2 kHz and 4 kHz

Tablica 1. Proračun udaljenosti na kojoj se može detektirati dron

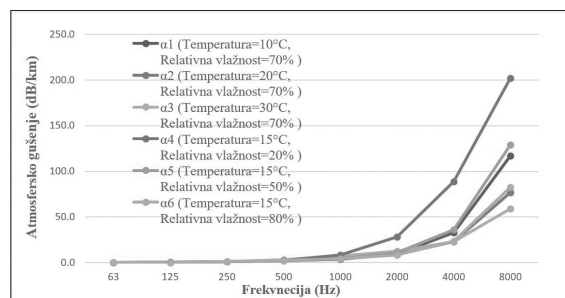
Table 1. The calculation of the limit distance at which a drone can still be detected

Mjerenja nad tvrdom podlogom	400 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Lp(dB)-mjereno na udaljenosti 1 m	60	55	55	55
D (dB) zvukomjera	0			
α (dB/km)	0			
Lw (dB)	68	63	63	63
D (dB) akustičke kamere	6,5	11,7	15,8	19,5
Osnovna razina buke (dB)	37	40	35	30
Udaljenost (m)	Lp(dB)			
10	46,5	46,7	50,8	54,5
20	40,5	40,7	44,8	48,5
30	37,0	37,2	41,3	45,0
40	34,5	34,7	38,8	42,5
50	32,5	32,7	36,8	40,5
100	26,5	26,7	30,8	34,5
200	20,5	20,7	24,8	28,5
300	17,0	17,2	21,3	25,0
400	14,5	14,7	18,8	22,5
500	12,5	12,7	16,8	20,5

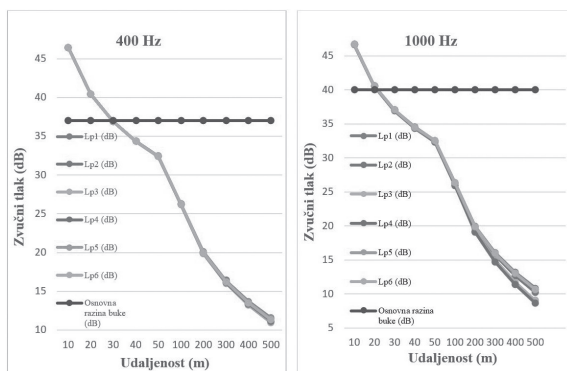
Mjerenja nad mekom podlogom	400 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Lp(dB)-mjereno na udaljenosti 1 m	60	52	52	51
D (dB) zvukomjera	0			
α (dB/km)	0			
Lw(dB)	71	63	63	62
D (dB) akustičke kamere	6,5	11,7	15,8	19,5
Osnovna razina buke (dB)	37	40	35	30
Udaljenost (m)	Lp(dB)			
10	46,5	43,7	47,8	50,5
20	40,5	37,7	41,8	44,5
30	37,0	34,2	38,3	41,0
40	34,5	31,7	35,8	38,5
50	32,5	29,7	33,8	36,5
100	26,5	23,7	27,8	30,5
200	20,5	17,7	21,8	24,5
300	17,0	14,2	18,3	21,0
400	14,5	11,7	15,8	18,5
500	12,5	9,7	13,8	16,5

Iz dobivenih teoretskih rezultata zaključeno je da se dalje razmatraju samo mjerenja nad tvrdom podlogom. Teoretski izračun nije uključio atmosfersko gušenje, koje je nužno uključiti, te su stoga korišteni podaci prikazani na slici 8 (prema normi ISO 9613-1:1993). Vidljivo je da porastom frekvencije raste atmosfersko gušenje, a nadalje ako je relativna vlažnost konstantna (u ovom razmatranom slučaju 70 %), tada se porastom temperature smanjuje atmosfersko gušenje. Ako je pak temperatura konstantna (u ovom razmatranom slučaju 15°C), tada se atmosfersko gušenje smanjuje porastom relativne vlažnosti u zraku. Uvrštavanjem atmosferskog gušenja u model dobivaju se rezultati prikazani na slikama 9 i 10. Na slici 9 prikazan je zvučni tlak za frekvencije 400 Hz i 1000 Hz u ovisnosti o atmosferskom gušenju (slika 8), a na slici 10 vidljiv je zvučni tlak za frekvencije 2000 Hz i 4000 Hz u ovisnosti o atmosferskom gušenju (slika 8). Očekivano, na frekvencijama 400 Hz i 1000 Hz uz razmatrano atmosfersko gušenje nema značajne razlike u udaljenosti na kojoj je moguća detekcija drona. Udaljenost na kojoj je moguća detekcija drona za 400 Hz je 20 metara, a za 1000 Hz je 10 me-

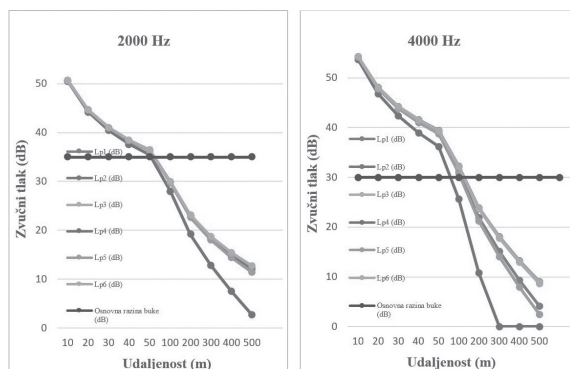
tara. Međutim, na višim frekvencijama gdje zbog veće usmjerenosti akustičke kamere postoji mogućnost detekcije drona na većim udaljenostima, ta udaljenost smanjuje se zbog utjecaja atmosferskog gušenja. Iz svega navedenoga može se zaključiti da je detekcija drona relativno malenih dimenzija moguća na prosječnoj udaljenosti od 70 metara u realnim uvjetima na višim frekvencijama (preciznije 4 kHz). U najlošijem slučaju (uz α_4) spomenuta udaljenost smanjuje se na 60 metara, a u najboljem slučaju (uz α_3) raste na 80 metara.



Slika 8. Atmosfersko gušenje ovisno o frekvenciji
Figure 8. Frequency-dependant atmospheric attenuation



Slika 9. Zvučni tlak za frekvencije 400 Hz i 1000 Hz u ovisnosti o atmosferskom gušenju prema slici 8
Figure 9. Sound pressure at the frequencies of 400 Hz and 1000 Hz, depending on the atmospheric attenuation in Figure 8



Slika 10. Zvučni tlak za frekvencije 2000 Hz i 4000 Hz u ovisnosti o atmosferskom gušenju prema slici 8
Figure 10. Sound pressure at the frequencies of 2000 Hz and 4000 Hz, depending on the atmospheric attenuation in Figure 8

ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je zvučni signal za jedan model male UAV letjelice odnosno preciznije model 1, dron DJI Spark (četiri motora i dvije elise) prilikom lebdenja. Mjerenja razine zvučnog tlaka drona provedena su za dva lokacijska scenarija: travnati teren i asfalt (na udaljenosti 1 metra od drona). Nadalje, mjerenja su napravljena pomoću zvukomjera B&K 2250, u frekencijskom području terci od 12 Hz do 20 kHz. Sve izmjerene razine iskazane su u decibelima prema $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$, uz osjetljivost mikrofona 45,7 mV/Pa.

Rezultati studije pokazali su vidljiv utjecaj podloge na izmjereni zvučni tlak na višim frekvencijama, ali se korištenjem korekcije s obzirom na vrstu podloge može dobiti odgovarajuća razina zvučne snage koja se primjenjuje u proračunu detektabilnosti drona s obzirom na vlastiti šum prijamnog sustava, osjetljivosti mikrofona i usmjerenosti sustava. Također može se zaključiti da se s povećanjem udaljenosti od izvora zvuka zvučni tlak smanjuje obrnuto proporcionalno s udaljenosti. Stoga se prilikom postavljanja akustičke kamere mora voditi računa o samoj lokaciji kamere. Teoretski izračun obrazložen u ovom radu pokazuje da bi se ovakav tip drona mogao detektirati upotrebom prototipa akustičke kamere na 100 metara, na frekvenciji 4000 Hz ako je kamera smještena na tvrdj podlozi, tj. na 50 metara ako je kamera smještena na mekoj podlozi.

Uzme li se u obzir prilikom izračuna atmosfersko gušenje, vidljivo je da porastom frekvencije atmosfersko gušenje raste, dok se uz konstantnu relativnu vlažnost i porast temperature smanjuje.

Ako je temperatura konstantna, tada se atmosfersko gušenje smanjuje porastom relativne vlažnosti u zraku. Uvrštavanjem atmosferskog gušenja u model može se zaključiti da nema značajne razlike u udaljenosti na kojoj je moguća detekcija drona na frekvencijama do 1000 Hz. Udaljenost na kojoj je moguća detekcija drona za 400 Hz je 20 metara, a za 1000 Hz je 10 metara. Međutim, na višim frekvencijama atmosfersko gušenje utječe na mogućnosti detekcije drona odnosno smanjuje udaljenost na kojoj je moguća detekcija drona. Iz svega navedenoga može se zaključiti da je detekcija drona relativno malih dimenzija u realnim uvjetima na višim frekvencijama moguća na prosječnoj udaljenosti od 70 metara.

Drugim riječima, uz pretpostavku da je razina buke drona koji se giba veća od razine buke drona koji lebdi te da se dron nalazi u refleksijskoj sredini okruženoj zgradama moguća je i detekcija na većim udaljenostima. Razlog tome je veća ukupna razina zvučnog tlaka te dodatno povećanje razine zvučnog tlaka na višim frekvencijama.

Cilj ove studije kao i mnogih drugih je otkrivanje inovativnih načina detekcije dronova s konač-

nim ciljem poboljšanja sigurnosti cijele populacije. Dronovi, kao što je već utvrđeno, predstavljaju ozbiljnu prijetnju sigurnosti jer se mogu koristiti i za različite maliciozne svrhe. U ovom radu fokus je stavljen na moguća akustička rješenja koja bi omogućila preciznije i pravovremeno otkrivanje dronova i na taj način spriječiti potencijalne prijetnje te samim time povećati sigurnost.

U budućem radu potrebno je razmotriti razinu osnovne buke na većim visinama i provesti dodatna mjerenja s prototipom akustičke kamere kako bi se utvrdile još preciznije mogućnosti detekcije.

Zahvala

Ovaj rad financirala je Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj (ERDF) pod brojem projekta KK.01.2.1.01.0103 4D akustička kamera.

LITERATURA

Benesty, J., Cheng, J., Huang, Y.: *Microphone Array Signal Processing*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.

Bernardini, A., Mangiatordi, F., Pallotti, E., Capodiferro, L.: Drone Detection by Acoustic Signature Identification, *Proceedings of IS&T International Symposium on Electronic Imaging*, 2017., 60-64, San Francisco.

Bespilotne letjelice: reforma sigurnosti zračnog prometa u EU-u, dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/drones/>, pristupljeno: 2.3.2020.

Bies, D., Hansen, C., Howard C.: *Engineering Noise Control, Fifth Edition*, CRC Press, University of Adelaide, November 2017.

B&K Acoustic Camera Type 9712-W-FEN, dostupno na: <https://www.bksv.com/en/products/data-acquisition-systems-and-hardware/general-purpose-analyzer-system/Bk-Connect-acoustic-camera-9712>, pristupljeno: 2.3.2020.

Europske agencije za sigurnost zračnog prometa (EASA -European Union Aviation Safety Agency), dostupno na: <https://www.easa.europa.eu/>, pristupljeno: 2.3.2020.

GFAI Tech GmbH – Acoustic Camera, dostupno na: <https://www.cae-systems.de/en/products/acoustic-camera-sound-source-localization.html>, pristupljeno: 2.3.2020.

Grubeša, S., Stamać, J., Suhanek, M.: Acoustic Camera Design with Different Types of MEMS Microphone Arrays, *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 3, 2019., 4, 88-93, dostupno na: <https://doi.org/10.11648/j.ajese.20190304.14>, pristupljeno: 2.3.2020.

HRN ISO 9613-1:1993 Akustika - Prigušenje zvuka pri širenju na otvorenom -- 1. dio: Računanje apsorpcije zvuka u atmosferi

Jeon, S., Shin, J.W., Lee, Y.J., Kim, W.H., Kwon, Y.H., Yang, H.Y.: Empirical Study of Drone Sound Detection in Real-Life Environment with Deep Neural Networks, *Conference proceedings of EUSIPCO*, Greece, January 2017, arXiv:1701.05779v1.

Mezei, J., Flaska, V., Molnar, A.: Drone Sound Detection, *Proceedings of 16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, November 2015, Budapest, Hungary, 333-338.

Norsonic – Akustička kamera 848A, dostupno na: https://web2.norsonic.com/product_single/acoustic-camera/, pristupljeno: 2.3.2020.

Projekt ERDF KK.01.2.1.01.0103 4D Akustička kamera, dostupno na: <https://www.fer.unizg.hr/4dakamera>, pristupljeno: 2.3.2020.

Safe operation of drones, dostupno na: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/217603_EASA_DRONES_LEAFLET%20%28002%29_final.pdf, pristupljeno: 2.3.2020.

Schmitz, F.H.: Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practise, Volume 2: Rotor Noise, *NASA Reference Publication*, 1258, Vol. 1, WRDC Technical Report 90-3052 Ames Research Center, N92-10600, August 1991

Shi, L., Ahmad, I., He, Y., Chang K.: Hidden Markov Model based Drone Sound Recognition using MFCC Technique in Practical Noisy Environments, *Journal of Communications and Networks*, vol. 20, October 2018., No. 5.

Stamać, J., Grubeša, S., Petošić, A.: Designing the Acoustic Camera using MATLAB with respect to different types of microphone arrays, *Second International Colloquium on Smart Grid Metrology*, 2019.

Tsiamis, N., Efthymiou, L., Tsagarakis, K.P.: A Comparative Analysis of the Legislation Evolution for Drone Use in OECD Countries, *Drones*, 3, 2019., 4, 75, dostupno na: <https://doi.org/10.3390/drones3040075>, pristupljeno: 2.3.2020.

U-Space Blueprint, dostupno na: <https://www.dids.eu/u-space-blueprint/>, pristupljeno: 2.3.2020.

Veen, B. D., Buckley, K. M.: Beamforming: A versatile approach to spatial filtering, *IEEE ASSP Mag.*, 5, 1988., 2.

Zrakoplovni incidenti uzrokovani dronom, dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Gatwick_Airport_drone_incident, pristupljeno: 2.3.2020.

ACOUSTIC SOLUTIONS FOR DETECTION OF DRONES WITH THE GOAL OF INCREASING GENERAL SAFETY

SUMMARY: In this day and age, small unmanned aerial vehicles are becoming more and more popular. Different types of these craft have been built over the years, with drones (quadrocopters) being the most popular. They are used mostly for commercial purposes and as a support in different hobbies, but they can also be used for illegal activities such as smuggling or transport of explosives. The use of drones in the vicinity of airports is a major problem. Drones are exceptionally difficult to detect due to their small size, their front end made of plastic, and their electric-powered engines that generate very little heat. For these reasons, conventional radars and infrared cameras are not sufficient for detection of drones. The purpose of this research is to determine the possibilities of acoustic detection of drones. The sound pressure levels of noise emitted by drones have been measured. Based on this data, the theoretical limit distance at which a drone can still be detected acoustically has been determined. A possible increase of this limit distance has been examined, if an acoustic camera is used as the acoustic detector. The outcomes of this research are expected to improve general safety due to the optimization of several different approaches to drone detection.

Key words: *small unmanned aerial vehicles, acoustic solutions, detection, safety*

Preliminary communication

Received: 2020-03-13

Accepted: 2020-07-01