



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

www.foi.unizg.hr

A2.2. Klasifikacija komunikacijskih tehnologija kod uljeznih dronova

D2.2. Izrađen izvještaj: komunikacijski trendovi kod najpopularnijih dronova

Autori: Ivan Magdalenić, Nikola Ivković

Datum: 25. Svibnja 2020.

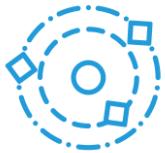
Mjesto: Fakultet organizacije i informatike - FOI, Varaždin

1. Uvod

Kod klasifikacije komunikacijskih tehnologija kod bespilotnih letjelica potrebno je obratiti pažnju na sve moguće tehnologije za komunikaciju između bespilotnih letjelica i osobe ili sustava koji ih nadziru i upravljaju njima. Raspon metoda koje se mogu koristi za komunikaciju je veliki i u drugom poglavlju je napravljen kratki prikaz tehnologija koje se koriste kod bežične komunikacije.

Sjedeći korak u ovom projektu je odrediti tehnologije koje će se najvjerojatnije koristiti kod neovlaštenog upada za upravljanje bespilotnim letjelicama i tu više nije najznačajniji tehnološki faktor nego dostupnost, cijena i popularnost određenih proizvođača i modela bespilotnih letjelica. Odgovor na to pitanje daje isporuka „A1.2. Analiza najpopularnijih dronova za šиру javnost“ i veća pažnja bit će posvećena u ovom projektu upravo tim modelima bespilotnih letjelica. Pregled i klasifikacija tehnologija za upravljanje bespilotnim letjelicama dana je u trećem poglavlju. Pritom su korištene znanstvene baze članaka WoS s pretraživanjem po ključnim riječima „UAV“ i „communication“ te također google tražilica s istim ključnim riječima i ograničenjem na akademske članke te je uzeto u obzir prvih 100 članaka.

Također je važno staviti naglasak na izvedivost lociranja bespilotne letjelice i upravljačkog modula u okvirima sredstva odobrenih u sklopu ovog projekta. Četvrto poglavlje daje preporuku u kojem smjeru treba staviti naglasak kod odabira tehnologija koje će se koristiti u ovom projektu.



2. Pregled radio komunikacijskih tehnologija

Pregled radio komunikacijskih tehnologija započet je analizom strukture bežične komunikacijske poveznice prikazana na slici 1.

Izvor informacije daje analogni ili digitalni signal. U slučaju analognog signala potrebno je napraviti konverziju u digitalni signal primjenom analogno-digitalnog pretvarača.

Koder izvorne informacije koristi informacije o izvořnim podacima i smanjuje ponavljanje tj. redundanciju u izvornom signalu primjenom različitim tehnikama kompresije i/ili kodiranja. Npr. MPEG kod multimedije. U svrhu ostvarivanja privatnosti podaci se mogu kriptirati u ovom koraku.

Koder kanala dodaje redundanciju u podatke radi zaštite podataka od grešaka u prijenosu. U ovom koraku se dodaju i različite signalizacijske informacije npr. uspostava i prekid komunikacije. U nekim primjenama u ovom koraku se osim signalizacijskih informacija multipleksiraju informacije od više korisnika.

Modulator modulira osnovni signal u ovisnosti o podacima primljenim od kodera kanala. Signal se pretvara iz digitalnog u analogni signal i prolazi kroz filter koji eliminira spektralne komponente izvan željenog područja. Zatim se spaja sa sinusoidalnim signalom noseće frekvencije te na kraju prolazi filter koji eliminira spektralne komponente van željenog područja.

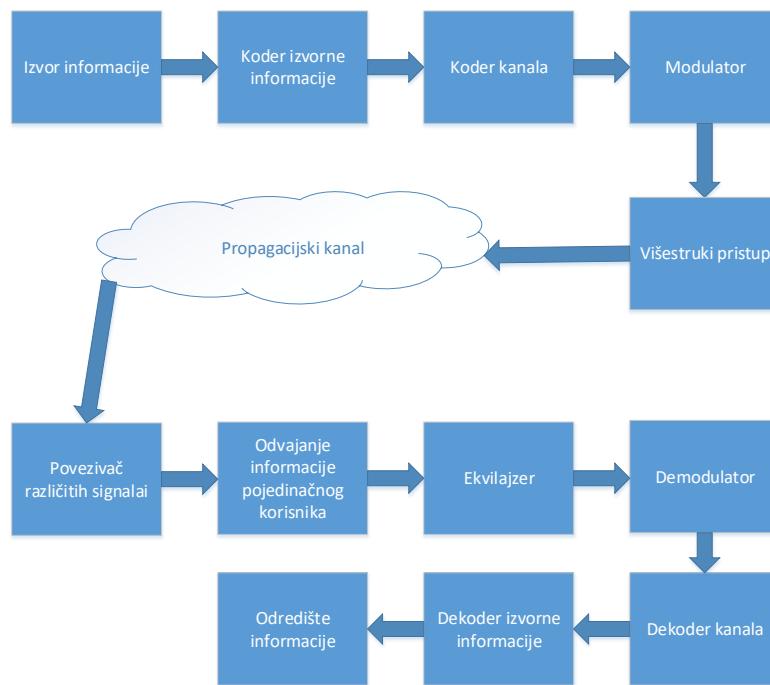
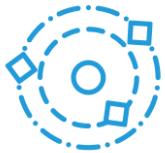
Višestruki pristup multipleksira informacije od više korisnika i signalne informacije. U praksi se koristi u pravilu kod baznih stanica.

Propagacijski kanal prigušuje signal i dovodi do kašnjenja i frekvencijske disperzije. Okolina dodaje smetnje. Različite pojave utječu na propagacijski kanal: zasjenjenja, refleksija, interferencija, višestruke putanje signala itd.

Povezivač različitih signala (eng. diversity combiner) grubo selektira željeni spektar i pojačava signal. Uzima u obzir različite propagacijske putanje kanala.

Odvajanje informacije pojedinačnog korisnika provodi se postupkom izdvajanja signala pojedinog korisnika iz sinusoidalnog signala noseće frekvencije. Eliminira se neželjeni frekvencijski spektar filtriranjem signala. Radi se analogno-digitalna pretvorba signala.

Ekvilajzer uzima u obzir informacije koje su putovale različitim propagacijskim kanalima i dodjeljuje im odgovarajuće težine.



Slika 1. Struktura bežične komunikacijske poveznice

Demodulator odradjuje meko odlučivanje digitalnih podataka i predaje ih dekoderu kanala.

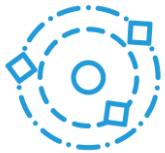
Dekoder koristi predložene granice od demodulatora za određivanje izvornih podataka. Ispravljaju se pogreške, ako se koristila neka od tehnika za detektiranje i ispravljanje pogrešaka.

Dekoder izvorne informacije rekonstruira izvornu informaciju. Po potrebi se radi pretvorba u analogni signal digitalno analognim pretvaračem.

Kod specifikacije opreme za bežičnu komunikaciju uobičajeno se izdvajaju sljedeće značajke:

- Modulacijski formati
- Višestruki pristup zajedničkom mediju
- Protokol i radio frekvencijski spektar

Modulacijski formati



Modulacija je postupak kojim se informacija poruke ugrađuje u nosač radio frekvencije. Takve informacije mogu se prenosit u amplitudi, frekvenciji ili fazi nosača ili u njihovoj kombinaciji, dakle bilo u analognom ili digitalnom formatu. Analogne modulacijske sheme uključuju amplitudnu modulaciju (AM) i frekvencijsku modulaciju (FM). Analogne modulacijske sheme danas se koriste za radio stanice AM / FM i građanski spektar (CB) radija. Svi ostali komunikacijski i radiodifuzni sustavi sada koriste digitalnu modulaciju. Sheme digitalne modulacije prenose informacije koristeći konačni skup valnih oblika. Općenito se modulacijski formati mogu interpretirati kao varijante Pulsne amplitudne modulacije (PAM), Višepulsne modulacije i Kontinuirane fazne modulacije.

Učestalo korišteni modulacijski formati su:

- Binary Phase Shift Keying (BPSK) – najjednostavnija modulacijska metoda, faza nosača se mijenja za $\pm\pi$, ovisno da li se šalje +1 ili -1.
- Quadrature-Phase Shift Keying (QPSK) – ima četiri moguće promjene u fazi i svaka promjena je oznaka za jednu kombinaciju od dva bita.
- $\pi/4$ -Differential Quadrature-Phase Shift Keying – varijanta QPSK kod koje su dopuštene promjene u fazi samo za $\pi/4$
- Quadrature Amplitude Modulation (QAM) – QAM signal dobije se zbrajanjem dva signala iste frekvencije (sinusoida i kosinusoida). Dobiveni signal ima promjenjivu amplitudu i fazu u odnosu na nemodulirani signal. Ovisno o broju razina amplitude i faze postoje:
 - 4 – QAM
 - 16-QAM
 - 64-QAM
 - 256-QAM

Kod boljeg omjera signal/šum koriste se QAM više reda.

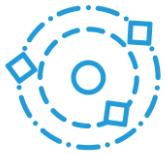
- Binary Frequency Shift Keying (BFSK) – svaki simbol je prezentiran kao sinusoidalni signal čija frekvencija ovisi o simbolu koji se prenosi. Inačica višepulsne modulacije.
- Minimum Shift Keying (MSK) – faza se mijenja za $\pm\pi$ za vrijeme trajanja 1 bita
- Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) – varijanta MSK kojom se dobijaju najbolji rezultati
- Pulse Position Modulation (PPM) – varijanta višepulsne modulacije kod koje se ne koriste pulsevi različite centralne frekvencije (FSK) nego pulsevi različitog trajanja. Rijetko se koristi u bežičnom prijenosu zbog male spektralne efikasnosti.

Višestruki pristup zajedničkom mediju



Budući da je radio frekvencijski spektar ograničen postoje različite metode pristupa i zajedničkog dijeljenja raspoloživog spektra frekvencija:

- Frequency Division Multiple Access – svakom korisniku se dodjeljuje zasebni frekvencijski pojas (dio od ukupno raspoloživog pojasa). Uobičajeno se kombinira s Frequency Domain Duplexing (FDD) gdje se dva frekvencijska pojasa dodjeljuju pojedinom korisniku: jedan za slanje (uplink), a drugi za primanje podataka (downlink).
- Time Division Multiple Access – svaki korisnik ima svoj vremenski odsječak u kojem može slati podatke. Ukupno vrijeme je podijeljeno na N vremenskih odsječaka i u svakom vremenskom odsječku korisnik može slati većom brzinom jer ima veći frekvencijski pojas na raspolaganju.
- Random access – podaci su podijeljeni u pakete i svaki paket se prenosi neovisno. Svaki paket se bori za svoje resurse. Pogodno za prijenos podataka u snopu. Za pristup mediju koriste se metode ALOHA, CSMA, CSMA-CD, CSMA-CA.
- Spread Spectrum – tehnika širi informaciju preko jako velikog frekvencijskog pojasa. U pravilu je pojas puno veći nego inverzna brzina prijenosa podataka.
 - Frequency Hopping Multiple Access (FHMA) – je metoda promjene nosačke frekvencije na način da se jedan frekvencijski spektar koristi kratko vrijeme. Postoje dva tipa skakanja frekvencija (FH): brza i spora. Kod brzog FH nosačka frekvencija se promijeni nekoliko puta za vrijeme trajanja jednog simbola čime se simbol raspršuje preko velikog pojasa. Spori FH prenosi jedan simbol na jednoj frekvenciji.
 - Code Division Multiple Access (CDMA) – temelji se na tehnici Direct Sequence-Spread Spectrum (DS-SS) kod koje se signal širi tako da se množi signal koji šaljemo s drugim signalom koji ima jako veliki frekvencijski pojas. Dobiveni frekvencijski pojas je otprilike veliki kao i frekvencijski pojas šireg signala. S obzirom da je frekvencijski pojas veliki, a snaga odašiljanja je konstantna, spektralna gustoća snage je jako mala i može biti čak u razini šuma što ovu tehniku čini prikladnom za vojne primjene. Na ovaj način nije moguće detektirati odašiljanje signala. CDMA koristi tehniku širenja na način da svaki korisnik dobije različit kod širenja (signal širokog frekvencijskog spektra). Odgovarajućim odabirom koda (ortogonalni kodovi) više korisnika može komunicirati istovremeno.
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) – modulacijska shema koristi veći broj paralelnih prijenosa preko uskih kanala. Naročito je pogodna za visoke brzine prijenosa podataka. U različitim varijantama dozvoljava višestruki istovremeni pristup mediju.



Protokol i radio frekvencijski spektar

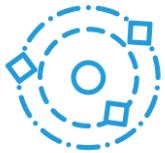
Većina bespilotnih letjelica koristi neku od varijanti IEEE 802.11 protokola koji koriste nelicencirani 2.4GHz i 5 GHz radio frekvencijski spektar, ali ovisno o protokolu mogu se koristiti i frekvencijski spektar za mobilnu telefoniju Cellular 3G - 800-1900MHz, Cellular 4G/LTE 700-2500. Također je moguće koristiti IEEE 802.16 (WiMAX) 2-66GHz te Satellite 1.53-31 Ghz.

3. Klasifikacija komunikacijskih tehnologija

U [1] i [2] dan je pregled komunikacija i arhitektura koje se koriste kod bespilotnih letjelica. Sažeti pregledi dani su u tablicama 1. i 2.

Tablica 1. Različiti mrežni protokoli korisni za bespilotne letjelice [1]

Protokol	Fizički sloj	Sloj poveznice	Brzina prijenosa	Doseg
IEEE 802.15.1. (Bluetooth)	2.4 GHz Band, FHSS/FSK	Master/Slave, TDD	1 Mbps	10 m
IEEE 802.11a	5 GHz Band, OFDM	CSMA/CA, DCF/PCF Mechanisms	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps	120 m na otvorenom
IEEE 802.11b	2.4 GHz Band, DSSS	CSMA/CA, DFS/PFS Mechanisms	1, 2, 5.5, 11 Mbps	140 m na otvorenom
IEEE 802.11g	2.4 GHz Band, DSSS, OFDM	CSMA/CA, DFS/PFS Mechanisms	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps	1-40 m na otvorenom
IEEE 802.11n	2.4 GHz i 5 GHz Band, DSSS, OFDM	CSMA/CA, DFS/PFS Mechanisms	15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150 Mbps	250 m na otvorenom
IEEE 802.16 (WiMAX)	2–66 GHz Band, MIMO-OFDMA	TDD, FDD	2 to 75 Mbps	do 56 km



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

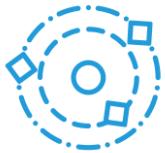
Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

www.foi.unizg.hr

Cellular 3G	800–1900 MHz	CDMA, HSDPA	144 Kbps do 42 Mbps	1 km do nekoliko km
Cellular 4g/LTE	700–2500 MHz	LTE i LTE Advanced	300 Mbps do 1 Gbps	1 km do nekoliko km
Satellite	1.53–31 GHz	FDMA i TDMA	10 Mbps (upload) i 1 Gbps (download)	Satelit je repeater i pokriva 100njak

Tablica 2. Usporedba bežičnih tehnologija za bespilotne letjelice [2]

Technology	Standard	Spectrum	Device Mobility	Comm. Range	Maximum PHY Rate	Latency	Maximum # of Cell Nodes	Network Topology
Bluetooth v4	802.15.1	Unlicensed	Yes	150 m	1 Mbps (gross air data rate), up to 3Mbps (with Enhanced Data Rate)	3 ms	Not defined; implementation dependent	Ad hoc piconets
Zigbee	802.15.4	Unlicensed	Yes	10 -100 m	250 kbps	Channel access: 15 ms	<65000	Ad hoc, star,mesh hybrid
Wi-Fi	802.11a	Unlicensed	Yes	35 - 120 m	54 Mbps	Slot time: 9 µs SFIS: 16 µs DIFS: 34 µs Propagation Delay: 1µs	-	-
Wi-Fi	802.11b	Unlicensed	Yes	38 - 140 m	11 Mbps	Slot time: 20 µs SFIS: 10 µs DIFS: 50 µs Propagation Delay: 1µs	-	-
Wi-Fi	802.11n	Unlicensed	Yes	70 - 250 m	600 Mbps	Slot time: 9 µs SFIS: 16 µs DIFS: 34 µs Propagation Delay: 1µs	-	-
Wi-Fi	802.11ac	Unlicensed	Yes	-	6933 Mbps	-	-	-
WAVE	802.11p	Licensed	Yes	1000 m	27 Mbps	100 ms	-	Ad hoc
WiMAX	802.16	Unlicensed	No (Line of Sight)	48 km	32 – 134 Mbps	-	-	



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

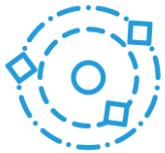
www.foi.unizg.hr

WiMAX	802.16a	Licensed	No	48 km	75 Mbps	-	-	Single last hop access, mesh mode
WiMAX	802.16e	Licensed	Yes (Limited)	1 - 5 km	15 Mbps	-	-	
GPRS	GPRS	Licensed	Yes	-	115 kbps	500 ms	-	-
EDGE	EDGE	Licensed	Yes	-	384 kbps	300 ms	-	-
UMTS/ WCDMA	UTRA	Licensed	Yes	-	2 Mbps	280 ms	-	-
UMTS/ HSPA	HSUPA, HSDPA	Licensed	Yes	-	14.4 Mbps	38 ms	-	-
LTE	LTE	Licensed	Yes	-	DL: 300 Mbps	User Plane: 5 ms	-	-
LTE Advanced	LTE Advanced	Licensed	Yes	-	DL: 1 Gbps	User Plane: 10 ms	-	-

Očekuje se da će dolazeća 5G mreža (IMT-2020) biti također korištena za komunikaciju s bespilotnim letjelicama. 5G mreža radi u nekoliko radio frekvencijskih pojaseva FR1: 450 MHz – 6000 MHz i FR2: 24250 MHz – 52600 MHz [3]. Doseg je različit ovisno o korištenoj frekvenciji i ide od nekoliko stotina metara za frekvencije iznad 24GHz do nekoliko kilometara za frekvencije ispod 6 GHz.

Prema rezultatima istraživanjima (isporuka „A1.2. Analiza najpopularnijih dronova za širu javnost“) najzastupljenija proizvođač u kategoriji potrošačkih bespilotnih letjelica DJI i on za komunikaciju koristi nekoliko protokola [4]:

- DJI Wi-Fi: DJI Spark and Mavic Air – radi na radio frekvencijskim pojasevima 2.4 i 5.8 GHz i ima domet do 500 m, a s pojačanom verzijom Wi-Fi domet ide do 2000m. Jeftinija varijanta u usporedbi s OcuSync i Lightbridge.
- OcuSync: DJI Mavic Pro and Phantom 4 Pro V2.0. – radi na radio frekvencijskim pojasevima 2.4 i 5.8 GHz te ima domet do 4 km i podržava prijenos videa u rezoluciji 1080p 30 fps.
- Lightbridge: DJI Phantom 4 Pro and Phantom 4 Advanced. - radi na radio frekvencijskim pojasevima 2.4 i 5.8 GHz te ima domet do 3.5 km.



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

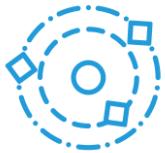
www.foi.unizg.hr

- Lightbridge 2: DJI Inspire 2, Matrice 200 Series and Matrice 600 Pro- radi na radio frekvencijskim pojasevima 2.4 i 5.8 GHz te ima domet do 3.5 km.

Posebno su zanimljive karakteristike mreže za upravljanje bespilotnim letjelicama prikazanim u istraživanju [5]. U tablici 2. prikazane su karakteristike kategorije gdje se bespilotne letjelice koriste za napad.

Tablica 3. Kategorizacija bespilotnih letjelica za napad [5]:

Svojstvo	Napad
Ostale generalne primjene u kategoriji	Rat: Napad s više bespilotnih letjelica
UAV pozicija za vrijeme komunikacije	Učestala promjena lokacije
Brzina UAV za vrijeme komunikacije	>od 16 km/sat
Tip mreže	Bazirana na infrastrukturi / Bez infrastrukture / Ad hoc
Topologija	Mesh
Kontrola(komunikacija)	Distribuirana Individualni korisnici kontroliraju svaki UAV
UAV kao klijent ili server	Server (dostavlja upute formaciji) / klijent (za napad)
Usmjeravanje	Mash routing (upravljanje iz centrale, podaci između UAV)
Odgoda / Smetnje (zbog grešaka u čvorovima ili poveznici)	Velika vjerojatnost ($p \geq 0.5$)
Tip komunikacije (K-klijent, I= Infrastruktura)	U2I (naredbe), U2U
Upravljanje (putanja, pozicija)	Daljinski (malo vjerojatno)



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

www.foi.unizg.hr

	Automatski (promatraj, orijentiraj se, odluci, napadni)
	Upravljanje putanjom – koordinacija više UAV u stvarnom vremenu, izbjegavanje kolizija)

4. Analiza i preporuka kod odabira tehnologija za komunikaciju između bespilotnih letjelica i upravljačkog modula

Iz tablica 1 i 2. moguće je zaključiti da se za komunikaciju s bespilotnim letjelicama koristi puno različitih protokola i pripadajućih tehnologija te da je potrebno suziti izbor protokole koji će se najvjerojatnije koristiti kod neovlaštenog upada.

Iz tablice 3. se može iščitati i zaključiti da je mala vjerljivost da će u slučaju namjernog napada UAV biti upravljan daljinski u stvarnom vremenu. Drugim riječima, pomno planirani i namjerni napadi bit će izvedeni tehnologijom automatskog upravljanja.

Projekt bi se trebao usmjeriti na određivanje lokacije osoba koje upravljaju bespilotnim letjelicama koje nemaju mogućnosti automatskog upravljanja unaprijed određenim putanjama.

U pravilu se radi o bespilotnim letjelicama u nižim cjenovnim kategorijama koje koriste neki od 802.11 (wi-fi) verzije protokola za upravljanje što je i vidljivo u [4].

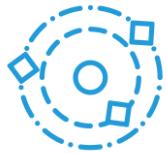
Preporuka je orijentirati se na bespilotne letjelice koje su upravljane u stvarnom vremenu primjenom neke od inačica 802.11 protokola.

5. Reference

[1] Imad Jawhar et al. Communication and Networking of UAV-Based Systems: Classification and Associated Architectures. Journal of Network and Computer Applications · February 2017, DOI: 10.1016/j.jnca.2017.02.008

[2] Samira Hayat et al. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 18 , Issue: 4 , Fourthquarter 2016), DOI: 10.1109/COMST.2016.2560343

[3] ETSI technologies, 5G. <https://www.etsi.org/technologies/5g>, pristupljeno 26.5.2020.



ORKAN

Okvir za kontrolu i nadzor bespilotnih letjelica

IP-2019-04-4864

www.orkan.foi.hr



Koordinira/Coordinated by:

Fakultet organizacije i informatike/

Pavlinska 2/ 42000 Varaždin

www.foi.unizg.hr

[4] David Atkinson. DJI Transmission Systems – Wi-Fi, OcuSync & Lightbridge,
<https://www.heliguy.com/blog/2018/08/20/dji-transmission-systems-wi-fi-ocusync-lightbridge/>, pristupljeno
26.5.2020.

[5] Raj Jain et al. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. IEEE Communications
Surveys & Tutorials · November 2015, DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297