

ANTI-COLLISION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

PROTIZRÁŽKOVÉ SYSTÉMY BEZPILOTNÝCH PROSTRIEDKOV

Kristián Višnai
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
visnai@stud.uniza.sk

Branislav Kandra
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
kandra@fpedas.uniza.sk

Abstract

The main goal of the paper is to summarize the knowledge about anti-collision systems of unmanned aerial vehicles. In the work are also described currently used anti-collision systems of unmanned aerial vehicles. The work contains practical research in which we tested anti-collision systems of DJI Mavic 2 Pro. The purpose of the research was to find out how this unmanned aerial vehicle can avoid static obstacles. The second part of practical research is the analysis and comparison of systems that provide anti-collision activity between unmanned aerial vehicle and aircraft in the vicinity. Part of the work is also the evaluation and selection of a cooperative anti-collision system for DJI Inspire 2. The conclusion of the paper contains a summary of the findings that we have obtained based on the analysis of available facts and using operational experience.

Keywords

UAV, UAS, Anti-collision

1. Úvod

Za posledné roky značne narástlo využívanie bezpilotných prostriedkov (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) na amatérske, komerčné aj vojenské účely. Následkom toho sa s UAV začalo lietať v nízkych výškach nad terénom, vo vnútri budov a rovnako v blízkosti letísk a v zdieľaných vzdušných priestoroch. UAV môžu ľahko ohroziť ľudské životy, bezpečnosť iných lietadiel, či spôsobiť značné materiálne škody. Preto je zavedenie protizrážkových systémov pre bezpilotné prostriedky veľmi užitočnou pomôckou pri predchádzaní kolíznym situáciám medzi UAV a objektmi v okolí. V dnešnej dobe poznáme mnoho systémov, ktoré bezpilotným prostriedkom poskytujú aspoň minimálnu ochranu pred rizikom zrážky. Mnoho týchto systémov pracuje na rovnakých princípoch ako protizrážkové systémy v riadených lietadlách. Avšak vzhľadom k vysoko narastajúcemu využívaniu bezpilotných leteckých systémov (UAS – Unmanned Aircraft Systems) sa mnoho výrobcov zameriava na vývoj protizrážkových systémov určených primárne pre potreby UAS.

Cieľom tejto práce je sumarizovať poznatky o protizrážkových systémoch bezpilotných prostriedkov. V práci sa zameriame na súčasne využívané protizrážkové systémy. Svoju pozornosť sústredíme najmä na protizrážkové senzory, vďaka ktorým UAS získavajú informácie o okolí. Protizrážkové systémy rozdelíme na základe vzájomnej schopnosti spolupráce. V praktickom výskume vyhodnotíme ako sú protizrážkové senzory komerčné využívaného DJI Mavic 2 Pro schopné plniť ich funkciu, takže poskytovať protizrážkovú činnosť medzi UAV a statickými prekážkami v okolí. Naším ďalším zámerom bude nájsť kooperatívny protizrážkový systém, ktorý bude vhodný pre bezpilotný prostriedok DJI Inspire 2, ktorý využíva Žilinská univerzita v Žiline na vykonávanie leteckých prác. Bližšie

popíšeme niektoré na trhu dostupné systémy a vyhodnotíme ich vhodnosť pre DJI Inspire 2.

2. Protizrážkové systémy bezpilotných prostriedkov

Hlavnou úlohou protizrážkových systémov je zabezpečiť, aby sa bezpilotné prostriedky (UAV) mohli bezpečne pohybovať v spoločnom vzdušnom priestore. V spoločnom vzdušnom priestore sa UAV stretávajú s mnohými prekážkami, medzi ktoré patria napríklad aj lietadla s posádkou.

Počas letu môžu byť bezpilotné letecké systémy vysoko autonómne, čiastočne autonómne alebo plne riadené pilotom na diaľku, ktorý ho riadi cez diaľkové ovládanie. V závislosti od úrovne autonómie UAS sa úloha protizrážkového systému môže pohybovať od jednoduchého zisťovania a varovania pred konfliktmi až po úplne autonómne zisťovanie a riešenie konfliktov. Za konflikt sa považuje ak medzi dvoma lietadlami, alebo akýmkoľvek objektmi nachádzajúcimi sa vo vzdušnom priestore, nie je dodržaná minimálna požadovaná separačná vzdialenosť.

2.1. Činnosť protizrážkových systémov UAV

Protizrážkový systém vysoko autonómnych UAS, poskytujúci Sense and Avoid musí byť schopný zabezpečiť základne funkcie, vďaka ktorým bude predchádzať zrážkam. Medzi tieto funkcie patrí snímacia funkcia, detekčná funkcia a funkcia riešenia konfliktov.

- a) Snímacia funkcia predstavuje schopnosť systému vnímať jeho okolité prostredie a zhromažďovať potrebné informácie. Použitím vhodných komunikačných zariadení a senzorov (napr. kamery,

radary), môže UAS získať prehľad o súčasnom prostredí, v ktorom sa nachádza. Vďaka tomu môže UAS zaznamenať polohu blízkeho lietadla, stromov, stĺpov vysokého napätia a podobne.

- b) Detekčná funkcia umožňuje, aby UAS odhalil budúce riziká konfliktov. Polohová informácia o cudzom objekte sa premieta do blízkej budúcnosti. Súčasná a budúca poloha sa potom skombinujú. Na základe toho je vytvorený najbližší bod priblíženia. Pomocou tejto metódy sa rozhodne, či existuje skutočné riziko konfliktu, a či je potrebný vyhýbací manéver.
- c) V prípade, ak je zistené riziko konfliktu v blízkej budúcnosti, spustí sa funkcia riešenia konfliktov. Túto funkciu majú hlavne vysoko autonómne UAS. Hlavnou úlohou funkcie riešenia konfliktov je vyhnutie sa novej kolízii s cudzím objektom primeraným manévrom. Nebezpečenstvo konfliktu možno vyriešiť horizontálnym manévrom, vertikálnym manévrom alebo zmenou rýchlosti UAV [1].

3. Rozdelenie protizrážkových systémov UAV

Prvým a základným krokom pri zabránení zrážke s cudzím objektom je spozorovanie daného objektu. Je to veľmi dôležitý krok, bez ktorého by nebolo možné vyhnúť sa zrážke. Z toho dôvodu je potrebné, aby bol bezpilotný prostriedok vybavený jedným alebo viacerými senzormi (systémami). Tieto senzory musia byť schopné odhaliť všetky prekážky v blízkosti.

Protizrážkové systémy využívajú mnohé typy senzorov (systémov), ktoré pracujú na rozličných princípoch. Senzory (systémy), ktoré môžu byť použité sú napríklad vizuálne kamery, infračervené kamery, laserové radary, ultrazvukové radary, ADS-B, TCAS [2]. Tieto rôzne druhy senzorov je možné rozdeliť do dvoch kategórií :

- Nekooperatívne protizrážkové systémy (senzory)
- Kooperatívne protizrážkové systémy (senzory)

Kooperatívne systémy musia byť vybavené komunikačnými systémami, ktoré umožnia, aby si mohli bezpilotné prostriedky medzi sebou vymieňať potrebné letové informácie. Bepilotné prostriedky, ktoré nie sú vybavené takýmito komunikačnými systémami pracujú na princípe nekooperatívnych systémov. V tomto prípade sú okolité lietadla snímané priamo, bez potreby vzájomnej výmeny informácií [3]. Z toho vyplýva, že senzory takýchto bezpilotných prostriedkov musia byť schopné samostatne detegovať okolie.

3.1. Nekooperatívne protizrážkové systémy

Tieto systémy (senzory) si nevyžadujú žiadnu spoluprácu s inými lietadlami, čo je ich veľkou výhodou. Zatiaľ čo kooperatívne systémy dokážu detegovať len pohyblivé prekážky, vybavené komunikačnými zariadeniami, nekooperatívne snímajú všetky prekážky v okolí, či už pohyblivé alebo nepohyblivé. Tieto systémy sa delia na dve skupiny:

- Pasívne systémy
- Aktívne systémy

Ich výber závisí najmä od požiadaviek kladených na využitie [4]. Nekooperatívne systémy sú taktiež často využívané pri UAV, ktoré lietajú vo vnútri budov. Je to z toho dôvodu, že nekooperatívne systémy dokážu snímať steny, stroje, kancelársku techniku a rovnako aj ľudí [5].

3.1.1. Pasívne systémy

Zaznamenávajú žiarenie alebo rôzne typy vln. Prijímajú informácie tak, ako sú zobrazované v reálnom svete. Je možné ich prirovnať k ľudským očiam a ušiam, ktoré taktiež prijímajú svetelné alebo zvukové vlny [6]. Väčšina z pasívne využívaných systémov sú infračervené kamery a optické kamery. Optické alebo taktiež nazývané vizuálne kamery pracujú vo viditeľnom svetle. Termálne alebo infračervené kamery predstavujú zariadenia, ktoré dokážu vytvárať obraz pomocou infračerveného svetla. Rozdiel medzi infračervenými a optickými kamerami je v tom, že infračervené využívajú svetlo s vyššou vlnovou dĺžkou [7]. Infračervené kamery dokážu pracovať aj pri zhoršených podmienkach viditeľnosti a slabom svetle.

Všetky tieto kamery získavajú užitočné informácie z **kúskov** nespracovaných dát, ktoré zaznamenávajú pomocou senzorov. Spracovávanie obrazu si vyžaduje samostatný algoritmus. Okrem toho je potrebný ďalší algoritmus na výpočet vzdialenosti prekážok a potrebných parametrov, ktoré s tým súvisia. To si vyžaduje veľkú výpočtovú kapacitu. Jednou z hlavných nevýhod pasívnych senzorov je obmedzenie zorného poľa snímacích kamier [8].

Optické senzory - Optické senzory (kamery) fungujú na princípe zachytávania obrazu okolitého prostredia. Výhodou využívania tohto typu senzorov je, že kamery majú malé rozmery, nízku hmotnosť, nízku spotrebu energie a dajú sa ľahko pripojiť k bezpilotnému prostriedku. Na druhej strane je ich veľkou nevýhodou závislosť na meteorologických podmienkach, citlivosť na svetlo, vplyv farby pozadia na kvalitu obrazu. Taktiež môže byť jas ich obrazu nedostatočný. Tieto faktory majú značný dopad na kvalitu zaznamenávaného obrazu. Z hľadiska poskytovania informácii je taktiež ich nevýhodou fakt, že neposkytujú presné informácie o vzdialenosti a rýchlosti prekážok [9].

Infračervené senzory - Sú to infračervené (termálne) kamery snímajúce infračervenú žiarenie, ktoré tvorí časť elektromagnetického spektra. Infračervené žiarenie je vyžarované z každého telesa, ktorého teplota je vyššia ako hodnota absolútnej nuly (-273,15 °C). So zvyšujúcou sa teplotou telesa rastie množstvo žiarenia, ktoré teleso vyžaruje. Infračervené senzory zaznamenávajú rozdielne hodnoty žiarenia objektov v okolí. Na základe toho vytvárajú obraz [10]. Zvyčajne sú využívané pri podmienkach zlej viditeľnosti. Zvyknú sa používať v kombinácii s optickými senzormi, keďže optické senzory sú za nedostatočnej viditeľnosti slabo spoľahlivé. Kombináciu infračervených a optických senzorov je možné vidieť u UAV od výrobcu DJI. Taktiež existuje veľa výrobcov, ktorí sa zameriavajú na externé plug-and-play duálne infračervené a optické senzory. Na nasledujúcom obrázku môžeme vidieť spomínanú kombináciu optického a infračerveného senzora .



Obrázok 1: TMS7138A – Duálny senzor. Zdroj: [11].

3.1.2. Aktívne systémy

Aktívne systémy majú svoje vlastné vysielacie, ktoré slúžia ako zdroje svetelných vln, elektrického signálu alebo akustického signálu. Vysielaný signál sa pri kontakte s cudzím objektom odrazí naspäť a je zachytený prijímačom/detektorom. Signál je schopný prechádzať cez atmosféru za takmer všetkých podmienok. Jednou z výhod aktívnych systémov je, že kontrolujú rozsiahly priestor za pomerne nízky čas. Ďalšou výhodou je rýchle spracovanie informácií, ktoré si nevyžaduje veľké nároky na výkon procesora. Dokážu pracovať za rôznych meteorologických podmienok, takže sú málo ovplyvnené počasím. Aktívne systémy sú schopné s vysokou presnosťou zobrazovať informácie ako rýchlosť približovania prekážky, vzdialenosť prekážky a smer prekážky. Avšak nevýhodou týchto systémov je vysoká cena, veľká hmotnosť a rozmery. To z nich robí malo využiteľné pri malých bezpilotných prostriedkoch, akými sú napríklad malé batériou poháňané UAV [12].

Radar - Je to druh aktívnych senzorov, využívajúci elektromagnetické žiarenie, prevažne z mikrovlnnej oblasti. Radar vysielá elektromagnetické vlny a následne zaznamenáva ich odraz od objektov, ktoré sú schopné tieto vlny odrážať. Takto vie radar zistiť relatívny smer kde sa objekt nachádza, a to podľa uhla, pod ktorým sa vlny odrážajú. Ak je radaru poskytnutá informácia o rýchlosti svetla v danom prostredí, dokáže zmerať vzdialenosť UAV od objektu. Aplikovaním dopplerovho princípu radar vypočíta relatívnu rýchlosť snímaného objektu [13] [28] [29].

Ultrazvukový radar (Sonar) - Detegujú prekážky vysielaním a následným prijatím zvukových vln. Na základe času, ktorý uplynie od vyslania zvukovej vlny do jej návratu, sa vypočíta vzdialenosť objektu. Pracujú na podobnom princípe ako radary. V porovnaní s radarmi sú cenovo dostupnejšie. Ich hlavnou nevýhodou oproti radarom je, že zvukové vlny nedokážu prechádzať vzduchom rovnako vysokou rýchlosťou ako elektromagnetické vlny. To spôsobuje, že nevedia poskytnúť taký presný výsledok ako klasické radary. Je možné zvýšiť ich presnosť, a to vylepšením hardvérových komponentov a pomocnými výpočtovými metódami. Avšak týmto stúpa ich cena [14] [15].

Laserový radar (LiDAR) - princípom práce podobné radarom a ultrazvukovým radarom. V rýchlom slede vysielajú do okolia laserové impulzy, ktoré majú presne definované smery. Tieto laserové impulzy sa pri strete s prekážkou odrazia späť a skener laserového radaru ich zaznamená. Laserový radar následne na základe zmerania času uplynutého od vyslania až po príjem impulzu vypočíta vzdialenosť a smer prekážok obklopujúcich UAV [16]. Údaje, ktoré sú získane pomocou laserových radarov

sú mimoriadne presné a rýchlo dostupné. Dnešné laserové radary sú ľahké a majú malé rozmery. Vďaka tomu je možné namontovať ich aj na najmenšie typy UAV [12]. Ich využitie je primárne pre UAV, ktoré lietajú v nízkych výškach nad terénom [17].

3.2. Kooperatívne protizrážkové systémy

Protizrážkové systémy využívajúce kooperatívne systémy (senzory) spoliehajú na skupinu zariadení, ktoré poskytujú výmenu informácií medzi UAS a ostatnými lietadlami. Aby mohla byť výmena informácií zabezpečená, musia byť vybavené rovnakými druhmi systémov, ktoré medzi sebou nadviažu komunikáciu. Vymieňané informácie zahŕňajú napríklad pozíciu, smer, rýchlosť a určené body na trase jednotlivých UAV.

Kooperatívne systémy sú viac využívané v riadených lietadlách ako v bezpilotných prostriedkoch. Vyžadujú relatívne veľký priestor na inštaláciu, preto nie všetky sú vhodné pre stredné a malé UAV [18]. Avšak momentálne už poznáme množstvo výrobcov a dodávateľov, ktorí sa venujú miniaturizácii kooperatívnych protizrážkových systémov.

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) je sledovacia technológia pre lietadla s posádkou a taktiež pre bezpilotné prostriedky. Táto technológia bola zavedená ako potencionálna náhrada za sekundárny prehľadový radar (SSR-Secondary Surveillance Radar) v riadení letovej prevádzky. Taktiež je to metóda, ktorou je možná integrácia UAS do riadeného vzdušného priestoru. Poskytuje informácie riadeniu letovej prevádzky a taktiež lietadlám navzájom.

ADS-B vysielateľ umožňuje lietadlám bezpečne zdieľať spoločný vzdušný priestor vysielaním polohy lietadla, vypočítanej vďaka signálu z GPS alebo akéhokoľvek iného typu GNSS. Poloha spolu s identifikačnou značkou, rýchlosťou a výškou je pravidelne vysielaná pomocou *ADS-B Out*.

ADS-B In je príjem tejto informácie iným lietadlom pomocou prijímača ADS-B In. Umožňuje pilotovi na diaľku alebo vysoko autonómnemu UAS vykonať bezpečný let, bez rizika zrážky s iným dopravným prostriedkom vo vzdušnom priestore. Táto skutočnosť z neho robí nevyhnutný prvok bezpečnosti letov v systémoch leteckej dopravy. Pre UAS sa často využívajú ADS-B prijímače vo forme USB. Sú malé, ľahké a pomerne lacné, taktiež dokážu poskytovať vysokokvalitné údaje o sledovaní lietadiel v okolí UAS [19] [20].

TCAS - je kooperatívny typ protizrážkového systému, ktorý využíva signály odpovedača sekundárneho radaru (SSR). Je široko využívaný a osvedčený ako spoľahlivý prostriedok v rámci protizrážkových systémov riadených lietadiel. TCAS II funguje na princípe požadovania informácií (dotaz) na špecifickej komunikačnej frekvencii. Ostatné lietadla v okolí, vybavené systémom TCAS II, po prípade len odpovedačom módu A/C, alebo S na túto požiadavku zareagujú a odošlú odpoveď. Následne TCAS II, ktorý dotaz vyslal, prijme odpoveď od okolitých lietadiel. Pomocou prijatých informácií je TCAS II schopný vyhodnotiť polohu týchto lietadiel a upozorniť na možnú kolíziu. Taktiež môže navrhnúť manéver, ktorým vyrieši možné riziko kolízie. Zvyčajne sa jedná o vertikálny manéver [21]. TCAS II nie je vhodný pre malé UAV, vzhľadom na jeho pomerne vysokú hmotnosť. Okrem toho, TCAS II si vyžaduje

hlavne vertikálne manévry. Avšak väčšina UAV nie je vo vertikálnej zložke dostatočne rýchla a obratná. Ich rýchlosť a obratnosť je primárne v horizontálnych smeroch.

ACAS X (Airborne Collision Avoidance System X) - sa považuje za protizrážkový systém budúcnosti, ktorý budú využívať lietadla s posádkou, rovnako ako aj bezpilotné prostriedky [22]. Tento systém využíva vyspelé technológie, ktoré pri vývoji systému TCAS II neboli k dispozícii. **ACAS Xu** je verzia určená pre bezpilotné prostriedky. Zahŕňa primárne horizontálne manévry. ACAS Xu sa delí na monitorovací a sledovací modul (STM - surveillance and tracking module) a na modul riešenia hrozieb (TRM – threat resolution module). Monitorovací a sledovací modul spracováva informácie z palubných snímacích senzorov a zisťuje polohu okolitých lietadiel. Modul riešenia hrozieb využíva túto polohu na určenie, či je potrebné vykonať manéver, ktorým sa UAV vyhne zrážke. Rovnako poskytne informáciu o tom, aký manéver sa odporúča vykonať [23].

FLARM - je protizrážkový varovný systém, ktorý ponúka riešenia pre lietadla s posádkou, ale aj pre bezpilotné prostriedky. Riešenia zahŕňajú elektronickú identifikáciu, senzory, autonómne vyhýbanie sa kolíziám, sledovanie infraštruktúry terénu, dátové spojenie a poradenstvo v oblasti posudzovania leteckých rizík. **Atom UAV** je komplexný, plne vybavený FLARM systém určený pre UAS. Atom UAV obsahuje FLARM rádiový vysielač-prijímač, ADS-B prijímač a Wi-fi vysielač pre priame vysielanie diaľkovej identifikácie. Princíp elektrickej identifikácie (eID) spočíva v tom, že UAS pravidelne vysielajú svoj jedinečný identifikačný kód a aktuálnu pozíciu prostredníctvom vysokofrekvenčnej digitálnej správy. To umožňuje oprávneným stranám detegovať, identifikovať, lokalizovať a sledovať bezpilotné prostriedky kdekoľvek a kedykoľvek, a to aj pri absencii sieťového pripojenia [24] [25] [26].

Softvérové aplikácie poskytujúce vzdialenú identifikáciu - Mnoho firiem pracuje na technológiách, ktoré umožnia každému, kto má smartphone/tablet, aby mohol sledovať UAV, ktoré lietajú v blízkosti. Jedná sa o sledovacie mobilné aplikácie, ktoré poskytujú zvýšenie bezpečnosti vo vzdušných priestoroch. Tieto aplikácie vyžadujú, aby boli mobilné zariadenia vybavené systémom GPS a aby mali prístup na internet. Sú navrhnuté tak, aby spĺňali požiadavky oprávnených orgánov v oblasti bezpečnosti, dodržiavali zásady ochrany súkromia a zároveň rešpektovali práva užívateľov UAV. Vzhľadom k tomu, že sa na trhu objavuje čoraz viac výrobcov UAV, tak sa zvyšuje aj počet takýchto aplikácií. Medzi tieto aplikácie patria napríklad DroneRadar alebo DJI diaľková identifikácia.

4. Praktický výskum

V tejto časti práce sme sa zamerali na protizrážkové systémy komerčne využívaného DJI Mavic 2 Pro. Mavic 2 Pro je vybavený optickými systémami, ktoré sa nachádzajú v jeho nosovej časti, chvostovej časti, po bokoch a v spodnej časti. Vpredu, vzadu a zospodu je dokopy šesť optických kamier, ktoré sú doplnené dvoma bočnými optickými kamerami (na každej strane jedna). Na spodnej strane sa nachádza pomocné osvetlenie, ktoré pri zlých svetelných podmienkach pomáha zlepšiť viditeľnosť pre spodnú optickú kameru. Taktiež je vybavený jedným vrchným a jedným spodným 3D infračerveným senzorom. Za vhodných svetelných podmienok je táto kombinácia optických a infračervených kamier schopná poskytnúť všesmerové snímanie prekážok [27].



Obrázok 2: DJI MAVIC 2 PRO. Zdroj: Autori.

Testovali sme protizrážkové systémy DJI Mavic 2 Pro na základe ich schopnosti zachytiť statické objekty (stromy, stĺpy, elektrické káble). Vyskúšali sme ich činnosť pri rôznych meteorologických a svetelných podmienkach. Opísali sme činnosť optických snímacích senzorov pri aktivovanom inteligentnom móde Active Track 2.0. Rovnako sme zhodnotili možnosť prevádzky DJI Mavic 2 Pro v zdieľanom vzdušnom priestore.

Mavic 2 sme skúšali v P-mode, ktorý je z hľadiska bezpečnosti letu najlepší. Sú v ňom aktívne všetky protizrážkové systémy, okrem bočných optických systémov. Meteorologické podmienky pre let boli v súlade s VFR, bol slnečný deň a takmer bezvetrie. Pri horizontálnom lete smerom vpred sme testovali funkciu nosových optických senzorov. UAV sme pri rýchlosti približne 12 kilometrov za hodinu nasmerovali priamo na stenu budovy. UAV v dostatočnej vzdialenosti od prekážky samostatne zabrzdil a vznášal sa na mieste. Opakovaný pokus spraviť pohyb vpred smerom k prekážke nám UAV neumožnil, keďže optický systém detegoval prekážku.

Pri ďalšom pokuse sme si ako prekážku vybrali kmeň stromu, ktorý je priestorovo užší ako stena budovy. Zvolili sme rovnaký letový mód a rovnaké letové parametre ako pri predchádzajúcom pokuse. Výsledok bol takmer rovnaký. UAV zabrzdil v dostatočnej vzdialenosti od prekážky, tentokrát bola vzdialenosť od prekážky o čosi menšia. Pravdepodobne to bolo spôsobené tým, že optický snímací systém neskôr zaznamenal prekážku, keďže bola menšia oproti predchádzajúcej. Výrobca uvádza, že zdvojený nosový optický systém dokáže presne rozoznať prekážku do 20 metrov. Tu však musíme brať do úvahy, že funkcia optického systému mohla byť ovplyvnená slnečným žiarením. Avšak, rýchlosť letu bola len 12 kilometrov za hodinu. Predpokladáme, že pri niekoľkonásobne vyššej rýchlosti letu by optický systém nebol schopný v čas zaznamenať prekážku, tým pádom by nemal dostatok času na zabrzdzenie.

V aktivovanom P-mode sme testovali spoľahlivosť vrchných protizrážkových systémov. Ako bolo vyššie spomenuté, Mavic 2 Pro je na vrchnej strane vybavený optickým systémom doplneným infračervenou kamerou. Pre tento test sme si opäť zvolili dve rôzne prekážky. Prvý test sme vykonávali vo vnútornom priestore hangáru, ako prekážku sme zvolili strop hangáru. Ako druhú prekážku sme si zvolili korunu stromu pozostávajúcu z mnohých konárov bez listia. V oboch prípadoch bol však výsledok rovnaký. Kombinácia optického a infračerveného systému pomerne s vysokou presnosťou zaznamenala prekážku, bola nám poskytnutá zvuková výstraha a UAV v čas zabrzdil svoj vertikálny pohyb. Menšie prekážky sme si z bezpečnostných dôvodov už nevyberali. Analýzou dát zo záznamov o nehodách DJI Mavic 2 Pro sme však zistili, že optické

a rovnako infračervené systémy tohto UAV majú problém zaznamenať prekážky ako napríklad elektrické drôty.

Na záver sme sa rozhodli vyskúšať protizrážkovú činnosť v aktivovanom inteligentnom móde **ActiveTrack 2.0**. Ten umožňuje identifikovať subjekt a nasledovať ho. Tento inteligentný mód je možné aktivovať len počas letového módu P-mode. Na funkčnosť tohto módu nie sú potrebné žiadne externé sledovacie zariadenia. Active Track 2.0 využíva hlavnú kameru a obidva nosové optické senzory. Na základe toho dokáže vytvoriť 3D mapu okolia a identifikovať sledovaný subjekt a taktiež potencionálne prekážky. Najprv sme si nastavili RTH (Return to home) lokáciu, ktorá umožňuje UAV vrátiť sa na pôvodne miesto (napríklad miesto vzletu). Realizovali sme to z dôvodu, ak by pri sledovaní objektu došlo k strate signálu medzi diaľkovým ovládačom a UAV. V takom prípade by sa UAV samostatne vrátil naspäť na miesto vzletu. Počas RTH má DJI Mavic 2 aktívne protizrážkové systémy. Pomocou DJI Smart controller ovládača sme si zvolili subjekt, ktorý sme chceli, aby UAV sledoval. Naším zvoleným subjektom bola tretia osoba, ktorú sme využili pre tieto potreby. Subjekt kráčal z otvoreného priestranstva do lesa. UAV sme mali pod priamym vizuálnym kontaktom, aby sme neporušili legislatívu, ktorá to prikazuje. UAV subjekt sledoval a bez akýchkoľvek problémov sa vyhýbal stromom a kríkom. Pri niektorých prekážkach (stromoch) sa stalo, že pred prekážkou UAV zastavil a krátku chvíľu čakal, či nepríde príkaz skrz diaľkové ovládanie. Ak nedošlo k žiadnej akcii od pilota na diaľku, tak Mavic 2 Pro pokračoval v samostatne vytvorenej trajektórii, zatiaľ čo sa vyhýbal prekážkam a sledoval subjekt. V jednom momente došlo k situácií, kedy UAV zastavil pred prekážkou a ani po dlhšej chvíli nepokračoval v nasledovaní subjektu. Pravdepodobne nebol schopný autonómne vypočítať nasledujúcu trajektóriu, keďže sa okolo neho nachádzalo viac prekážok. Bol nutný manuálny zásah od pilota na diaľku, no napriek tomu test potvrdil správnu činnosť optických senzorov, ktoré dokázali detegovať všetky okolité prekážky.

Z dostupných zistení vyplýva, že DJI Mavic 2 Pro má protizrážkové senzory, ktoré dokážu spoľahlivo poskytovať protizrážkovú činnosť pri malých rýchlostiach, vhodných svetelných podmienkach a dostatočne veľkých prekážkach.

4.1. Porovnanie kooperatívnych protizrážkových systémov

V predchádzajúcej časti práce sme sa zamerali na protizrážkovú činnosť nekooperatívnych senzorov, ktorými je vybavený DJI Mavic 2 Pro. Následne bolo našim pôvodným cieľom sústrediť sa na činnosť kooperatívnych protizrážkových systémov. Avšak na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline nie je k dispozícii žiaden UAS, vybavený kooperatívnym protizrážkovým systémom. Preto sme sa rozhodli, že spravíme analýzu kooperatívnych protizrážkových systémov, ktoré sú dostupné na trhu. Taktiež bolo našim cieľom zvoliť najvhodnejší kooperatívny protizrážkový systém pre UAS, ktorý je vo vlastníctve Katedry leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline.

Vybrali sme si DJI Inspire 2. Dôvodom bolo, že tento bezpilotný prostriedok má pomerne veľké rozmery a má najvyššiu maximálnu povolenú vzletovú hmotnosť v porovnaní s ostatnými UAV s protizrážkovými systémami, ktoré má Žilinská univerzita v Žiline (s povolením pre vykonávanie leteckých prác). Väčšie rozmery a vyššia maximálna vzletová hmotnosť sú

výhodou, keďže niektoré kooperatívne protizrážkové systémy vyžadujú relatívne veľký priestor na inštaláciu.

Pri výbere sme sa rozhodovali medzi kooperatívnymi systémami, ktoré už v tejto práci boli podrobnejšie rozobraté, a to TCAS II, ADS-B, FLARM a softvérové aplikácie poskytujúce diaľkovú identifikáciu. Pri analýze informácií z viacerých zdrojov sme dospeli k záveru, že pre zabezpečenie vysokej informatívnosti o okolitých lietadlách bude pre nás najvhodnejšie, aby sme náš bezpilotný prostriedok DJI Inspire 2 vybavili kooperatívnym systémom ADS-B. Naším ďalším cieľom bolo nájsť ADS-B zariadenie pre UAS, ktoré je vhodné z hľadiska efektívnosti, ceny, veľkosti a pár ďalších faktorov.

Na trhu je možné zakúpiť množstvo ADS-B transpondérov, prijímačov, vysielačov a kombinovaných vysielač-prijímačov, ktoré sú určené pre UAS. Pre požiadavky našej práce sme sa však zamerali na troch výrobcov, ktorými sú uAvionix Corporation, Sagetech Avionics a Aerobits. Vybrali sme týchto výrobcov, pretože sú na trhu pomerne známi, osvedčení a ich technológie majú vysokú kompatibilitu s väčšinou UAS.

Tabuľka 1: Porovnanie ADS-B zariadení pre UAS. Zdroj: Autori.

Názov	Ping20Si	PingRX Pro	MXS	TR-1F
Výrobca	uAvionix	uAvionix	Segatech	Aerobits
Typ	transpondér	prijímač	transpondér	prijímač - vysielač
Rozmery (mm)	50 x 25 x 17	32 x 31 x 9	86 x 64 x 25	35 x 25 x 8,5
Dosah (km)	nezistený	278 (príjem)	nezistený	10 (vysielanie)
Spotreba energie (Watt)	1	0,15	8	1
Cena (Eur)	2500	290	8000	1150
Teplotný rozsah (°C)	-45 do 80	-55 do 85	-40 do 70	-50 do 80
Spolupráca (okrem ADS-B)	TCAS (mód S)	žiadna	TCAS (mód S)	FLARM

Ak sa pozrieme na jednotlivé technológie, ktoré sme si rozobrali vyššie, tak môžeme zhodnotiť, že na trhu máme k dispozícii rôzne varianty ADS-B systémov pre UAS. Ping20Si a MXS sú ADS-B transpondéry, ktoré majú z vyššie spomenutých najviac funkcií. Vzhľadom k tomu majú väčšie rozmery, vyššiu spotrebu energie a niekoľkonásobne vyššiu cenu. Môžeme s určitou povedať, že vzhľadom na ich výhody, akými sú napríklad spolupráca so systémom TCAS (mód S), dokážu poskytnúť vyššiu bezpečnosť pre UAS. Na druhej strane vyššia cena a spotreba energie (hlavne u MXS) sú dôvodom, prečo nie sú vhodné pre

všetky typy UAS. Cena samotného MXS je vyššia ako cena väčšiny bežne využívaných UAS.

Najpriateľnejšiu cenu má PingRX Pro, ktorý však dokáže informácie len prijímať. To považujeme za nevýhodu, keďže ostatné lietadla by neboli informované o našej prevádzke. Z toho dôvodu si myslíme, že bezpečnosť takéhoto zariadenia je polovičná oproti systému ADS-B, ktorý informácie dokáže aj vyslať (transpondér, vysielateľ). Ak je výmena informácii vzájomná, je vyššia pravdepodobnosť, že sa dokáže predísť zrážke. V prípade ADS-B prijímača, kedy by okolitá prevádzka nemala informácie o našej polohe, by napríklad pri zlyhaní ľudského faktora (nepozornosť pilota na diaľku), mohlo dôjsť k zrážke. Ak by sme vysielali informácie, okolitá prevádzka by bola oboznámená s našou pozíciou, čo by mohol byť kľúčový faktor pri predchádzaní kolíznym situáciám.

PingRX Pro má taktiež najnižšiu spotrebu energie z vyššie spomenutých ADS-B zariadení. Z hľadiska dĺžky výdrže UAV vo vzduchu je najvhodnejší, keďže najmenej ovplyvňuje spotrebu energie.

TR-1F informácie o UAV vysielajú aj prijíma. Jeho cena je oproti PingRX Pro niekoľkonásobne vyššia, na druhej strane je oveľa priateľnejšia ako u MXS a Ping20Si. Spotreba energie TR-1F je podobná ako u Ping20Si, no TR-1F na rozdiel od Ping20Si nedokáže reagovať na dotazy systému TCAS.

Porovnávali sme rôzne typy ADS-B zariadení (transpondéry, prijímač, prijímač-vysielateľ), ktoré majú rozličné funkcie a parametre. Vybrať jedno z nich z hľadiska najvhodnejšej ceny, veľkosti, hmotnosti, spotreby energie, efektívnosti je veľmi náročné. Všetky z vyššie spomenutých ADS-B zariadení majú svoje výhody a nevýhody. Nie je možné s presnou určitosťou uviesť, ktoré by z nich bolo najvhodnejšie pre DJI Inspire 2.

5. Záver

Jedným z hlavných cieľov bolo zhrnúť poznatky o protizrážkových systémoch používaných v bezpilotných leteckých systémoch. Vymenovali sme jednotlivé kroky, ktoré protizrážkové systémy bezpilotných prostriedkov vykonávajú, aby predišli zrážke s okolitými prekážkami. Zhrnuli sme informácie o protizrážkových systémoch používaných v UAS. Poukázali sme na dôležitosť snímacej funkcie, ktorú zabezpečujú protizrážkové senzory. V tejto kapitole sme taktiež rozdelili dané senzory na nekooperatívne a kooperatívne, na základe schopnosti vzájomnej spolupráce.

Pri nekooperatívnych senzoch sme si bližšie ukázali pasívne aj aktívne pracujúce senzory. Dostupné informácie ukazujú, že všetky z týchto vyššie spomenutých nekooperatívnych senzorov (optické senzory, infračervené senzory, radary, laserové radary, ultrazvukové radary) majú limity a nedostatky. Z toho vyplýva, že pre spoľahlivé zabránenie vzniku kolízie medzi UAV a iným objektom nie je možné použiť len jeden senzor. Je potrebné, aby boli UAS vybavené viac ako jedným senzorom. Využívajú sa buď kombinácie viacerých senzorov (systémov) jedného typu alebo kombinácie viacerých senzorov (systémov) rôzneho typu. To umožňuje pokryť väčšiu oblasť okolo UAV a odstrániť slepé uhly.

Pri spracovávaní informácii o nekooperatívnych senzoch sme zistili, že aktívne senzory majú oproti pasívnym viac výhod. Jednou z nich je potreba menšieho výpočtového výkonu na spracovanie údajov. Je to spôsobené tým, že údaje

zaznamenané aktívnymi senzormi (radar, laserový radar, ultrazvukový radar) sú priame údaje, takže určené na detekciu. Zatiaľ čo pasívne senzory (napr. kamery) zaznamenávajú aj nepotrebné údaje. Vďaka tomu je proces spracovania dát omnoho rýchlejší u aktívnych senzorov. To považujeme za značný benefit. Rýchlejšie spracovanie dát znamená rýchlejšie vyhodnotenie situácie v okolí, tým pádom takýto systém poskytuje viac času na vytvorenie riešenia v prípade rizika zrážky. Aktívne senzory taktiež vynikajú vyššou presnosťou detekcie prekážky a väčším dosahom oproti pasívnym.

Vzhľadom k týmto dostupným informáciám sú pre optimálnu funkciu protizrážkových systémov bezpilotných prostriedkov vhodnejšie aktívne senzory. Avšak v praxi sa oveľa častejšie stretávame s pasívnymi senzormi (optické senzory, infračervené senzory), ktorých cena je oveľa prijateľnejšia.

V praktickom výskume sme sa sústredili na činnosť pasívnych (nekooperatívnych) protizrážkových systémov. Na základe prevádzkových skúseností sme vyhodnotili protizrážkovú činnosť DJI Mavic 2 Pro, ktorý má optické a infračervené senzory. Zistenia nám ukázali, že DJI Mavic 2 Pro je vybavený systémami, ktoré pilotovi na diaľku značne pomáhajú pri činnosti a poskytujú zvýšenie bezpečnosti. Tieto protizrážkové systémy sú spoľahlivé aj pri autonómnej činnosti (ActiveTrack 2.0). Ako bolo v praktickom výskume spomenuté, našli sme aj nedostatky, ktoré ukazujú, že DJI Mavic 2 Pro nedokáže samostatne lietať za každých okolností. Pri nepohyblivých prekážkach boli protizrážkové systémy pomerne presné. Preto možno posúdiť, že väčšina optických a infračervených senzorov spoľahlivo poskytuje informácie o statických objektoch v okolí UAV. Ukázalo sa, že vizuálne (optické) kamery je najvhodnejšie používať len pri dobrej viditeľnosti, takže cez deň alebo pri vhodnom osvetlení, a taktiež za vyhovujúcich meteorologických podmienok. Dosah detekcie pasívnych senzorov je pomerne nízky. Taktiež spracovávanie informácii a vyhodnotenie okolitej situácie je z časového hľadiska nevhodnejšie ako napríklad u kooperatívnych senzorov alebo nekooperatívnych aktívnych senzorov. Pri pohyblivých prekážkach, ktoré sa pohybujú relatívne vyššou rýchlosťou (riadené lietadlá, UAV) sa domnievame, že by optické a infračervené senzory neboli schopné včasnej identifikácie inej prevádzky, čo by mohlo spôsobiť nehodu. Jednak kvôli obmedzenému dosahu detekcie a rovnako kvôli dlhšiemu času spracovania informácii. Preto si na základe toho myslíme, že by bol let s DJI Mavic 2 Pro v priestore s inou leteckou prevádzkou nebezpečný. Nepomáha tomu ani fakt, že DJI Mavic 2 Pro nie je vybavený žiadnym kooperatívnym protizrážkovým systémom, ktorý by mu umožnil nadviazať komunikáciu s iným lietadlom.

V praktickom výskume sme sa taktiež sústredili na kooperatívne protizrážkové systémy. Ako sme našimi analýzami ukázali, v dnešnej dobe poznáme mnoho výrobcov a dodávateľov, ktorí sa venujú problematike zaradenia UAS do spoločných vzdušných priestorov pomocou kooperatívnych systémov. My sme sa bližšie zamerali na výber vhodného ADS-B zariadenia pre DJI Inspire 2. Nevýhodou DJI Inspire 2 je, že UAS od výrobcu DJI majú uzavretú infraštruktúru a kompatibilita s výrobkami od iných výrobcov zvykne byť veľmi nízka. Preto by bolo v prípade väčšiny externých ADS-B zariadení nutné vykonať softvérové úpravy pre zaistenie plnej spolupráce medzi ADS-B systémom a daným UAS. Porovnávali sme dva ADS-B transpondéry, ADS-B prijímač a ADS-B prijímač-vysielateľ a zistili sme, že každé z týchto zariadení sa hodí pre iné účely. Ukázalo sa, že je náročné jednoznačne vybrať

konkrétne zariadenie poskytujúce ADS-B. Preto záleží najmä na požiadavkách užívateľa, aké z týchto zariadení je pre neho najvhodnejšie. Nám sa nepodarilo jednoznačne určiť, ktoré ADS-B zariadenie by bolo pre DJI Inspire 2 najlepšie.

Využitie kooperatívnych protizrážkových systémov má značne využitie hlavne v riadených lietadlách. Myslíme si, že na Slovensku sa takéto systémy v UAS nevyužívajú často hlavne kvôli legislatíve. UAV smú lietať len mimo letísk. Celkovo majú povolené lietať len vo výškach, v ktorých by nemalo žiadne lietadlo lietať, s výnimkou núdzových situácií. Najväčšiu pravdepodobnosť stretu majú UAV s vrtuľníkmi, ktoré zvyknú lietať v nižších výškach. Napriek tomu všetkému si myslíme, že kooperatívne protizrážkové systémy pre UAS majú jednoznačne svoju podstatu. Tieto zariadenia považujeme za malý krok, ktorý môže v budúcnosti pomôcť k zmene legislatívy a tým pádom k postupnej integrácii UAS do väčšiny vzdušných priestorov, a taktiež k znižovaniu minimálnej separačnej vzdialenosti medzi UAV a ostatnými používateľmi vzdušných priestorov.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 046ŽU-4/2019 s názvom „Inovácia vzdelávania v oblasti prevádzky lietadiel spôsobilých lietať bez pilota“.

Referencie

- [1] KUCHAR, J.K. – YANG, L.C. 2000. A review of conflict detection and resolution modeling methods. In IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. [online]. 2000. 179-189 s. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/898217>>. ISSN: 1558-0016.
- [2] PHAM, H. et al. 2015. A survey on unmanned aerial vehicle collision avoidance systems. New York: Department of Computer Science, Stony Brook University, 2015. 10 s.
- [3] TOMLIN, C. – PAPPAS, G.J. – SASTRY, S. 1998. Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multiagent Hybrid Systems. In IEEE Transactions on Automatic Control [online]. 1998, vol. 43, no. 4. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/664154/authors#authors>> ISSN: 1558-2523.
- [4] MAHJRI, I. - DHRAIE, A. - BELGHITH, A. 2015. A Review on Collision Avoidance Systems for Unmanned Aerial Vehicles, International Workshop on Communication Technologies for Vehicles, 2015.
- [5] ALTURBEH, H. 2014. Collision avoidance systems for UAS operating in civil airspace: dizertačná práca. Cranfield : Cranfield University, 2014. 210 s.
- [6] Making Sense of Drone-based Sensors. [online]. Dostupné na: <<https://www.dronegenuity.com/making-sense-of-drone-based-sensors/>>.
- [7] CHILTON, A. The Working Principle and Key Applications of Infrared Sensors. [online]. 2013. Dostupné na: <<https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=339>>.
- [8] KÓTA, F. – ZSEDOVITS, T. – NAGY, Z. 2019. Sense-and-avoid system development on an FPGA. In 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). [online]. 2019. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8798265>>. ISBN 978-1-7281-0333-4.
- [9] SAUNDERS, J. - BEARD, R. 2008. Reactive vision based obstacle avoidance camera field of view constraints. In: Guidance Navigation and Control Conference. [online]. 2008. Dostupné na: <<https://scihub.mksa.top/10.2514/6.2008-7250>>.
- [10] UST. Infrared (IR) Imaging System for UAVs. [online]. Dostupné na: <<https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/cameras-imaging-systems/infrared-imaging-systems/>>.
- [11] TMS7138A – Duálny senzor . Dostupné na: <<https://www.guideir.com/product/detail/id/25.html>>
- [12] YASIN, J. D. et al. 2016. Unmanned Aerial Vehicle (UAVs): Collision Avoidance Systems and Approaches. In IEEE Access. [online]. 2016, vol. 8. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9108245>>. ISSN 2169-3536.
- [13] Radartutorial: Radar Basics. [online]. 2009. Dostupné na: <<https://www.radartutorial.eu/druck/Book1.pdf>>.
- [14] PAPA, U. – DEL CORE, G. 2015. Design of sonar sensor model for safe landing of an UAV. In 2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). [online]. 2015. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7180680>>. ISBN:978-1-4799-7569-3.
- [15] HEIDARSSON, H. K. – SUKHATME, G. S. 2011. Obstacle detection and avoidance for an Autonomous Surface Vehicle using a profiling sonar. In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. [online]. 2011. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5980509>>. ISSN 1050-4729.
- [16] WUR. Unmanned Aerial Vehicle for Laser Scanning (LiDAR UAV). [online]. Dostupné na: <<https://www.wur.nl/en/product/Unmanned-Aerial-Vehicle-for-Laser-Scanning-LiDAR-UAV.htm>>.
- [17] RAMASAMY, S. – SABATINI, R. – GARDI, A. 2016. Cooperative and non-cooperative sense-and-avoid in the CNS +A Context: A Unified Methodology. In 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). [online]. 2016. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7502676>>. ISBN 978-1-4673-9334-8.
- [18] GUAN, X. et al. 2020. A survey of safety separation management and collision avoidance approaches of civil UAS operating in integration national airspace system. In Chinese Journal of Aeronautics. [online]. 2020. Dostupné na: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S10093612030220X>>.

- [19] UST. ADS-B Avionics for Drones & UAVs. [online]. Dostupné na: <<https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/navigation-systems/ads-b-avionics/>>.
- [20] EMBENTION. Sense and avoid in UAVs with ADS-B receiver. [online]. 2019. Dostupné na: <<https://www.embention.com/news/sense-avoid-in-uavs-with-adsb-receiver/>>.
- [21] DALAMAGKIDIS, K. – VALAVANIS, K. P. – PIEGL, L. A. 2009. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into National Airspace System. 1.vyd.: Springer Netherlands, 2009, 217 s. ISBN 978-1-4020-8672-4.
- [22] DEATON, J. L. – OWEN, M. P. 2020. Evaluating Collision Avoidance for Small UAS using ACAS X. In AIAA SciTech Forum. [online]. 2020. Dostupné na: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2020-0488>>.
- [23] OWEN, M. P. et al. 2019. ACAS Xu: Integrated Collision Avoidance and Detect and Avoid Capability for UAS. In 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). [online]. 2019. Dostupné na: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9081758>>. ISSN 2155-7209.
- [24] FLARM. Solutions for UAS operators. [online]. Dostupné na: <<https://flarm.com/solutions/for-organizations/uav-drone-operators/>>.
- [25] FLARM. UAS electronic identification. [online]. Dostupné na: <<https://flarm.com/technology/eid/>>.
- [26] FLARM. Atom UAV – FLARM for drones. [online]. Dostupné na: <<https://flarm.com/products/uav/atom-uav-flarm-for-drones/>>.
- [27] DJI. Mavic 2 Pro/Zoom : User Manual. [online]. 2018. Dostupné na: <https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/Mavic+2+Pro+Zoom+User+Manual+V1.4.pdf>.
- [28] Novák, A., Novák Sedlačková, A., Janovec, M., 2020. Komunikačné systémy v letectve EDIS - Žilina, Žilinská univerzita v Žiline, 2020, ISBN 978-80-554-1737-0
- [29] Novák, A., 2015. Komunikačné, navigačné a sledovacie zariadenia v letectve, Bratislava, DOLIS, 2015, ISBN 978-80-8181-014-5