



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Karel Ryšavý

Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky

Bakalářská práce

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621**Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Karel Ryšavý

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

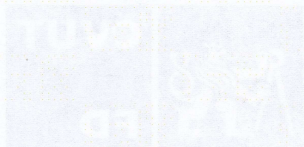
Název tématu (česky): **Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky**

Název tématu (anglicky): Anti-Collision System for Unmanned Aerial Vehicles

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Vymezení pojmů bezpilotní prostředek a antikolizní systém
- Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní prostředky v zahraničí a ČR
- Návrh požadavků na antikolizní systém pro zvolenou kategorii bezpilotních prostředků
- Porovnání současně dostupných zařízení
- Implementace zařízení na konkrétní typ bezpilotního prostředku



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: BEHAR, M. Drones in a Busy Sky: Can technology protect airplanes from the new threat?. Air & Space Magazine. 2016.
HOLCOMBE, R. G. Integrating Drones into the US Air Traffic Control System. Arlington, VA, 2016.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Hůlek, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **18. září 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **2. prosince 2019**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Karel Ryšavý
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 18. září 2019

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Čestně prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 2. prosince 2019

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Jmenovitě děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Davidu Hůlkovi, Ph.D., za odborné a trpělivé vedení. Dále děkuji panu Ing. Martinovi Saskovi, Dr. rer. nat. za poskytnutí přístupu k internímu výzkumu, Ing. Milanu Rollovi, Ph.D. za informace k technologii ADS-B a Ing. Zdeňkovi Svatému, Ph.D. za informace k univerzitním bezpilotním systémům.

Děkuji velmi svým rodičům a velkému klanu přátel za pevnou a stále trvající morální podporu po celou dobu studia i nadále.

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce „Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky“ je nejprve definovat veškeré nezbytné pojmy a přiblížit základní fungování klíčových systémových prvků zamýšleného antikolizního systému. Poté klasifikovat různorodé bezpilotní systémy dle aktuálního legislativního rámce. Následně poskytnout přehled evropských a amerických programů zabývajících se problematikou ‚detect and avoid‘ a obecnou integrací bezpilotních systémů do sdíleného vzdušného prostoru. Poté analyzovat probíhající výzkum této problematiky v rámci ČVUT a partnerských univerzit a na základě všech těchto poznatků navrhnout koncept antikolizního systému, který bude kompatibilní s poměrnou částí bezpilotních systémů a bude modulární, tedy v budoucnu jednoduše inovovatelný. Na závěr zhodnotím přínos mé práce a předložím další možné kroky.

Abstract

The subject of this bachelor thesis “Anti-Collision System for Unmanned Aerial Vehicles” is to first and foremost define all the necessary terms and to give an idea of basic operation of key system components of the intended detect and avoid system. Afterwards to classify diverse UAS according to the current legislative framework. Thereafter to provide an overview of European and American programs engaged in detect and avoid systems testing and that address the overall integration of UAS into shared airspace. Subsequently to analyze the ongoing research of detect and avoid solutions at CTU and partner universities and based on all these findings come up with a concept of detect and avoid system that would be compatible with the majority of UAS and be as well modular, which would enable easy upgrades in the future. I will conclude with assessing the contribution of my work and I will lay out further steps.

Klíčová slova

Antikolizní systém, bezpilotní systém, UAS, UAV, UTM, EASA

Keywords

Anticollision system, detect and avoid, sense and avoid, unmanned aerial vehicle, UAS, UAV, UTM, EASA

Obsah

Úvod.....	12
1. Vymezení a vysvětlení pojmů.....	12
1.1. Antikolizní systém	14
1.2. ADS-B.....	16
1.2.1. Systémové fungování.....	16
1.3. LiDAR.....	18
1.4. Bezpilotní letadlo (UA)	18
1.5. Bezpilotní systém (UAS)	19
2. Klasifikace UAS	20
2.1. Agentura Evropské unie pro bezpečnost v letectví.....	20
2.1.1. ‚otevřená‘ kategorie.....	21
2.1.1.1. Subkategorie A1	21
2.1.1.2. Subkategorie A2	22
2.1.1.3. Subkategorie A3	22
2.1.1.4. Třída C0	22
2.1.1.5. Třída C1	23
2.1.1.6. Třída C2	24
2.1.1.7. Třída C3	25
2.1.1.8. Třída C4	25
2.1.2. ‚specifická‘ kategorie.....	26
2.1.3. ‚certifikovaná‘ kategorie	27
3. Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní systémy v zahraničí a ČR	28
3.1. Evropa: U-Space	29
3.2. Spojené státy: NASA FAA UTM.....	30
3.2.1. Vývojová stadia	31
3.2.2. Technologie a testování	32
3.3. UTM v ČR.....	33
3.4. Evropa: MIDCAS	34
3.4.1. Technologie a testování	34
3.4.2. Princip fungování	37
3.5. Spojené státy: NASA UAS-NAS	38
4. Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT	40
4.1. Soutěžní konfigurace při MBZIRC 2017	41
4.1.1. Přehled použitého hardwaru	41

4.1.2.	Pravidla pohybu bezpilotních systémů při soutěži.....	43
4.2.	Vzájemná relativní lokalizace bezpilotních systémů za použití LED značek.....	45
4.2.1.	Motivace pro vývoj systému	45
4.2.2.	Fungování systému	45
4.2.3.	Výhody a nevýhody detekce UV LED značek.....	46
5.	Antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAS	47
5.1.	Koncept antikolizního systému	48
5.1.1.	Kooperativní detekce letadel s posádkou	49
5.1.1.1.	Využití frekvencí systému ADS-B.....	50
5.1.1.2.	Požadavky na modul ADS-B.....	50
5.1.2.	Nekooperativní detekce letadel a statických překážek	51
5.1.2.1.	Požadavky kameru	52
5.1.2.2.	Požadavky na LiDAR	52
5.1.3.	Komponenty tvořící jádro antikolizního systému	53
5.1.3.1.	Požadavky na autopilota	53
5.1.3.2.	Požadavky na palubní počítač	54
5.1.3.3.	Požadavky na senzor vzdálenosti AGL	54
5.2.	Analýza a výběr jednotlivých komponent antikolizního systému.....	55
5.2.1.	ADS-B.....	55
5.2.2.	LiDAR.....	56
5.2.3.	kamera pro strojové vidění – pro fotogrammetrii	57
5.2.3.	Autopilot	59
5.2.4.	palubní počítač.....	61
5.2.4.1.	hardwarová akcelerace fotogrammetrie pro strojové vidění.....	63
5.2.5.	senzor vzdálenosti AGL	65
5.3.	Implementace antikolizního systému	66
5.3.1.	Parametry testovacích bezpilotních systémů	66
5.3.2.	Tarot X6.....	67
5.3.2.1.	Umístění komponent antikolizního systému na Tarot X6.....	69
5.3.2.2.	Schéma propojení komponent antikolizního systému pro Tarot X6	71
5.3.3.	Telink 720 Grid	72
5.3.3.1.	Umístění komponent antikolizního systému na Telink 720 Grid	74
5.3.3.2.	Schéma propojení komponent antikolizního systému pro Telink 720 Grid	75
5.3.4.	DJI S900 Pro.....	76
5.3.4.1.	Umístění komponent antikolizního systému na DJI S900 Pro.....	78
5.3.4.2.	Schéma propojení komponent antikolizního systému pro DJI S900 Pro	79

5.4.	Změna parametrů a výkonů UAS po implementaci antikolizního systému	80
5.4.1.	Čas letuschopnosti po implementaci antikolizního systému	81
6.	Diskuse a závěr	83
	Seznam literatury	85

Použité zkratky

Tabulka 1 - seznam použitých zkratek

ACAS	Airborne Collision Avoidance System	standard přístroje TCAS
AFIS	aerodrome flight information service	letištní informační služba
ATM	Air Traffic Management	management letového provozu
BVLOS	beyond visual line of sight	za hranicí vizuálního dohledu pilota
CNS	communication, navigation, surveillance	komunikace, navigace, dozor
CPU	Central processing unit	centrální výpočetní jednotka PC = procesor
EDA	European Defence Agency	
FAA	Federal Aviation Administration	Úřad letectví v USA
FOV	field of view	zorné pole
fps	frames per second	snímky za sekundu
FSM	Finite-state Machine	
GA	General Aviation	všeobecné letectví
GNSS	Global Navigation Satellite System	
GPS	Global Positioning System	
IFF	Identification friend or foe	identifikace přítel / nepřítel
IMU	Inertial Measurement Unit	inerční měřicí jednotka
INS	Inertial Navigation System	inerční navigační jednotka
IR	infrared	infračervené
LED	light-emitting diode	světelná dioda
LiDAR	Light Detection and Ranging	technologie detekce odrazu paprsků světla
MAV	micro aerial vehicles	kategorie mikro bezpilotních systémů
MBZIRC	Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge	mezinárodní soutěž konaná v Abu Dhabi
MIDAS	Mid Air Collision Avoidance System	termín pro druh systému ‚sense and avoid‘
MRS	Multi-robot Systems	Katedra Fakulty elektrotechnické
MTOM	Maximum takeoff mass	maximální vzletová hmotnost

NextGen	Next Generation Air Transportation System	program „jednotného nebe“ v USA
NUC	Next Unit of Computing	další generace výpočetní jednotky
RA	resolution advisory	upozornění na nutnost akce (provedení úhybného manévru)
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	
RTK	Real Time Kinematic	
S & A; D & A	Sense and Avoid; Detect and Avoid	souhrnný název pro antikolizní systém
SESAR	Single European Sky ATM Research	program jednotného evropského nebe
SSR	secondary surveillance radar	sekundární přehledový radar
TA	traffic advisory	upozornění na okolní provoz
TCAS	Traffic Collision Avoidance System	
TCL	technology capability levels	úrovně schopností technologií
UAS-NAS	Unmanned Aircraft Systems Integration in the National Airspace System	integrace bezpilotního provozu do vzdušného prostoru USA
UAT	Universal Access Transceiver	název pro frekvenční pásmo 978 MHz systému ADS-B
UAS	Unmanned aerial system	bezpilotní systém
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	bezpilotní letadlo
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management	řízení bezpilotního provozu
UV	ultraviolet	ultrafialové
VLL	very low level	velmi nízká hladina
VLOS	visual line of sight	vizuální dohled pilota
VPU	Vision processing unit	výpočetní jednotka PC pro účely zpracování obrazu

Úvod

V této závěrečné práci se zabývám antikolizním systémem pro bezpilotní systémy. Definicí bezpilotních systémů a uvedení klíčových technologií navrhovaného antikolizního systému se zabývám v kapitole 1 – Vymezení a vysvětlení pojmů.

K bezpilotním systémům mě vedla především přirozená zvědavost, ale také různorodost a obrovský a zatím naštěstí jen částečně zkrocený potenciál bezpilotních systémů, který vnímám. Zejména široké možnosti uplatnění bezpilotních systémů v armádním i civilním průzkumu, ve stavebnictví při kontrole těžko dostupných míst staveb, při mapování terénu, v urbanistickém plánování, ve slibném konceptu ‚precision agriculture‘, v široké oblasti krajinného rozvoje a hospodářství a v integrovaném záchranném systému. Inspirativním příkladem plného využití potenciálu bezpilotních systémů je společnost Zipline, jenž zachraňuje lidské životy v rozsáhlé, hornaté a infrastrukturou nedotčené Rwandě a v Ghaně [1].

Motivace pro zabývání se antikolizním systémem pro bezpilotní systémy byl nevalný stav české, potažmo i Evropské legislativy na počátku roku 2018, v době počátku psaní této práce. Legislativa nerespektovala rychlý technologický pokrok v oblasti bezpilotních systémů a dle mého názoru byla příliš svazující. Tato situace se naštěstí změnila na jaře 2019 s příchodem dvou evropských legislativních nařízení pro klasifikaci a provoz dronů na území EU. Obě nařízení rozebírám, spojuji a právnícký jazyk zjednodušuji v kapitole 2 – Klasifikace UAS.

Velký potenciál bezpilotních systémů a vysoká poptávka po nich přinesla výzvu v podobě nutnosti integrace UAS do stávajícího vzdušného prostoru s poměrně vytíženou kapacitou. Z toho důvodu vzniklo na nadnárodní úrovni několik zastřešujících programů pro komplexní reformu organizace provozu vzdušného prostoru. O přiblížení globální problematiky bezpečné integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru, se kterou antikolizní systém úzce souvisí, jsem se pokusil v kapitole 3 – přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní systémy v zahraničí a ČR. V této kapitole rozebírám jak stěžejní evropský koncepční a operační program SESAR U-Space, jehož členem je i Česká republika, tak čistě operační a koncepční programy ve Spojených státech a Evropě. Více v kapitole 3.

Úspěšný vývoj a cenné testování antikolizních systémů pro bezpilotní systémy probíhá na univerzitách a po celém světě, a to včetně ČVUT. Na tomto poli zaznamenal domácí tým Multi-robot systems z Fakulty elektrotechnické mezinárodní úspěch: vítězství v soutěži bezpilotních systémů MBZIRC 2017 v Abu Dhabi. Poznatky z výzkumu týmu MRS představuji v kapitole 4 – Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT.

Celá tato práce vyústila v návrh hardwarového konceptu spolehlivého, efektivního a ,flight centric' respektive ,operation centric' antikolizního systému, kompatibilního s poměrnou částí bezpilotních systémů do maximální vzletové hmotnosti 25 kg. Tento antikolizní systém jsem dále v teoretické rovině implementoval na tři univerzitní hexakoptéry. Více v kapitole 5 – Antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAS.

V kapitole 6 – Diskuse a závěr shrnuji přínos mé práce a zamýšlím se nad dalšími kroky, které by se měli učinit pro optimalizaci navrhovaného technologického řešení a případného uvedení do praxe.

1. Vymezení a vysvětlení pojmů

V této kapitole se zabývám definicí pojmů antikolizní systém, bezpilotní letadlo, bezpilotní systém a vysvětlení rozdílů mezi nimi. Dále představuji fungování klíčových technologií ADS-B a LiDAR.

1.1. Antikolizní systém

„Systém nezávislý na pozemním řízení letového provozu, který dokáže včas upozornit piloty na hrozící srážku“ [2]. V dnešní době jde systém o několik kroků dál a vydává pilotům všech zúčastněných letadel pokyny k zamezení srážky. U nejnovějších strojů, např. Airbus A380, je celý úhybný manévr v režii autopilota.

U dopravních letadel se jedná o dobře známý ACAS – Airborne Collision Avoidance, a TCAS – Traffic Alert and Collision Avoidance System. Oba termíny jsou zdánlivě podobné, ale nejsou zaměnitelné. ACAS je standard, souhrn pravidel, a TCAS je jejich reálná implementace – tedy samotné fyzické zařízení a software v letadle. V dnešní době je v praxi používán TCAS 7.0 a 7.1, který splňuje standard ACAS II. Jedná se o systém, který je založen na principu vydání příkazu a koordinaci vzájemného vertikálního úhybného manévru letadel [3].



Obrázek 1 - typické grafické zobrazení systému TCAS na displeji v kokpitu (pozn. minimální bezpečný vertikální rozestup mezi letovými hladinami je 1000 ft - ATC) [4]

Obrázek ilustruje vizuální rozhraní systému TCAS. Náš letoun se nachází v oblasti nad letištěm v Denveru. V bezpečné vzdálenosti od letadla letí dva stroje; letadlo v přímém letu 1000 ft nad naší letovou hladinou a klesající letoun 1000 ft pod naší letovou hladinou. V bezprostředním okruhu letadla do 2,5 NM se nachází dva tzv. narušitelé (z angl. „intruders“); vlevo od letadla je žlutě zobrazené tzv. TA (Traffic Advisory), upozornění na letoun, který se nachází 200 ft pod naším letadlem a stoupá. Pokud tento letoun výrazně nezmění trajektorii svého letu, tak neletí v kolizním kurzu, a proto na něj systém pilota pouze upozorňuje. Vpravo je červeně vyznačené tzv. RA („Resolution Advisory“) – letoun se nachází 200 ft nad naším letadlem v přímém letu a letí v potenciálně kolizním kurzu – pro naše letadlo představuje možnou bezprostřední hrozbu. V takovém případě vydá systém TCAS několik desítek vteřin před srážkou pokyn oběma letadlům k provedení úhybného manévru.

„Resolution“ znamená v překladu také „řešení“, proto na základě různých parametrů zavelí systém TCAS jednomu letadlu stoupat a druhému klesat, a dále průběžně upravuje strmost manévru v závislosti na přesnosti jeho provedení piloty, dokud není bezprostřední nebezpečí odvráceno – v takovém případě systém zahlásí „clear of conflict“.

Pro své fungování musí systém TCAS znát polohu a výšku okolních letadel. Data o okolním provozu doposud poskytoval odpovídač módu S, pasivní kooperativní systém, který je postupně nahrazován vyspělejším systémem ADS-B, který bude povinně instalován u velké části letounů v Evropě od 7. června 2020 a ve Spojených státech již od 1. ledna 2020 [5].

1.2. ADS-B

Systém ADS-B, neboli Automatic Dependent Surveillance – Broadcast, je klíčová komponenta evropské transformace vzdušného prostoru SESAR (z angl. ‚Single European Sky ATM Research‘) a obdoby ve Spojených státech NextGen (z angl. ‚The Next Generation Air Transportation System‘).

Vize SESAR staví na konceptu ‚trajectory-based operations‘, tedy spoléhá na poskytování služeb letecké navigace tak, aby letouny mohly létat po efektivních přímých trasách bez omezení současného vzdušného prostoru [6]. Díky ADS-B dojde v širokém kontextu ke značné úspoře času, paliva, a peněz. Přesnější data a menší rozestupy mezi letadly zároveň povedou ke zvýšení bezpečnosti a kapacity vzdušného prostoru [7].

1.2.1. Systémové fungování

Klíčové pro tuto práci je, že ADS-B je navržen pro fungování ve **dvou frekvenčních pásmech**:

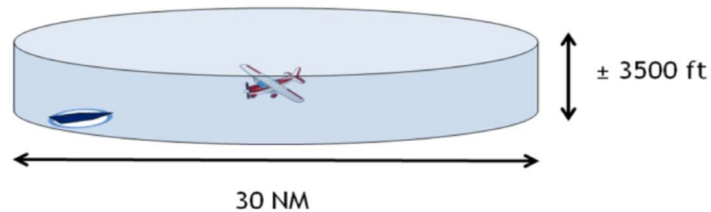
- 1090 MHz (mód 1090ES, stejný jako v případě odpovídače módu S)
- 978 MHz (známá pod zkratkou UAT – Universal Access Transceiver)

Systém byl od začátku koncipován jako globální, přičemž je postupně zaváděn ve většině světových regionů. Nicméně, simultánní využití obou dvou frekvencí je jen ve vzdušném prostoru Spojených Států. Původní hlavní frekvence 1090 MHz, používaná ve zbylých státech Světa, byla doplněna o frekvenci UAT 978 MHz převážně z kapacitních důvodů. Na stejné frekvenci totiž operuje i sekundární přehledový radar a dále ve Spojených státech tato frekvence slouží pro veškerý letový provoz nad letovou hladinou 18 000 ft., jehož objem navíc stále narůstá. UAT slouží tedy převážně pro provoz GA – pro menší letadla ve vzdušném prostoru s horní hranicí 18 000 ft [8].

Systém ADS-B doplňuje **několik dalších funkcionalit** [9]:

- ADS-R = ‚rebroadcast‘, tedy pozemní stanice, které mají za úkol rozšířit povědomí o okolním provozu všem klientům v dosahu přesahujícím 250 NM. Další funkcí pozemních stanic v USA je interoperabilita obou dvou frekvenčních pásem, tedy že systém vysílá data obdržená na UAT 978 MHz frekvenci na 1090 MHz a naopak. Nutno podotknout, že přístup k této službě mají letadla s ADS-B IN pouze na jedné z frekvencí, protože se počítá s tím, že letouny schopné přijímat obě frekvence obdrží informace o okolním provozu přímo ‚air to air‘.

- TIS-B = ‚traffic information services – broadcast‘. Služba, která poskytuje situační povědomí o okolním provozu letounům bez ADS-B OUT. Služba funguje tím způsobem, že kolem letounů vybavených ADS-B IN/OUT vytvoří prostor ve tvaru hokejového puku, ve kterém je aktuální obraz o okolním provozu sdílen se všemi letouny vybavenými pouze ADS-B IN v tomto prostoru.



Obrázek 2 - prostor, ve kterém klient TIS-B / ADS-R vysílá data letounům pouze s ADS-B IN [9]

V neposlední řadě umožňuje tato služba předávání přesnějšího situačního povědomí o okolním provozu systému TCAS.

- FIS-B = ‚flight information services – broadcast‘, vysílání aktuálního počasí zdarma na frekvenci UAT 978 MHz.
- CDTI = ‚Cockpit display of traffic information‘, obrazovka na panelové desce, na které jsou zobrazená veškerá získaná data.

Výhodou oproti pasivnímu kooperativnímu odpovídáči módu S je systém ADS-B aktivní kooperativní systém (v názvu z angl. ‚Automatic‘), tzn. automaticky vysílá údaje do širokého okolí. Dalším výrazným zlepšením oproti odpovídáči módu S je frekvence poskytování údajů; zatímco odpovídáč se dotazuje na informace jednou za 4-12 sekund, systém ADS-B vysílá údaje každou sekundu [10].

Mezi **vysílané údaje** patří [11]:

- Identifikace letounu (volací znak)
- ICAO 24 bitová adresa letounu
- Pozice (zeměpisné souřadnice)
- Barometrická a geometrická výška
- Vertikální rychlost
- Traťový úhel a traťová rychlost
- Nouzová identifikace (je-li vyhlášen nouzový kód)
- Speciální identifikace letadla na vyžádání (IDENT)

1.3. LiDAR

Další technologií, kterou budu využívat, je technologie LiDAR. Technologie LiDAR (z angl. „Light Detection and Ranging“) je relativně nová metoda dálkového měření vzdálenosti, která se postupně dostává do širšího povědomí, setkat v praxi se s ní může člověk již dnes v případě adaptivního tempomatu u novějších vozidel, kde se tato technologie uplatňuje v udržování rychlosti a bezpečného rozestupu mezi vozidly [12].

LiDAR je aktivní metoda využívající odrazu pulzních laserových paprsků od zemského povrchu a měření času dopadu těchto paprsků zpět ke zdroji. Na rozdíl od analýzy obrazu z kamery (dále jen fotogrammetrie) funguje LiDAR spolehlivě i za tmy a s nižšími výpočetními nároky [13].

Technologie LiDAR vyžaduje ke svému fungování několik komponent [13]:

- Samotný přístroj LiDAR
- GNSS modul
- IMU = Inertial Measurement Unit, také známý pod zkratkou INS = Inertial Navigation System (tedy akcelerometr a gyroskop)
- Počítač pro zpracování dat

1.4. Bezpilotní letadlo (UA)

Dle české legislativy (Doplňku X) se bezpilotním letadlem rozumí:

„letadlo určené k provozu bez pilota na palubě (většinou se jedná o součást bezpilotního systému, viz výše). V kontextu legislativního rámce České republiky se za bezpilotní letadla považují všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg [14].“

Dle evropského legislativního rámce se bezpilotním letadlem rozumí:

„letadlo provozované nebo projektované pro autonomní provoz nebo pro pilotování na dálku bez pilota na palubě [15].“

1.5. Bezpilotní systém (UAS)

Definice dle Doplnku X, předpisu L2 je následující [14]:

„Bezpilotní systém (z angl. zkratky ‚UAS‘) je systém skládající se z bezpilotního letadla (z angl. zkratky ‚UAV‘ či ‚UA‘), řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více [16].“

Rozdíl mezi často zaměňovanými termíny UAS a UA je tedy ten, že UAS zahrnuje celý systém potřebný k provozu, kdyžto UA je označení jen pro samotný letoun.

2. Klasifikace UAS

V současné době (prosinec 2019) jsme v přechodném období, přičemž jednotná EU legislativa začne platit počínaje 20. červencem 2020, čímž pozbyde platnost Doplněk X předpisu L2. V této kapitole se proto budu zabývat právě jednotnou legislativou EU a nejaktuálnější klasifikací podle agentury EASA z jara 2019, ze které budou vycházet předpisy platné v České republice.

2.1. Agentura Evropské unie pro bezpečnost v letectví

Evropská agentura pro bezpečnost v letectví vydala dne 12. března 2019 Nařízení (z angl. ‚delegated act‘) EU 2019/945 ‚O bezpilotních systémech a provozovatelích bezpilotních systémů ze třetích zemí“ následované Prováděcím nařízením (z angl. ‚implementing act‘) EU 2019/947 ‚O pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel“ ze 24. května 2019 [15], [17].

Jak již bylo nastíněno v pracovních dokumentech, které těmto dvěma nařízením předcházely, legislativní rámec EASA se zabývá komplexně jak technologickými požadavky, tak provozními požadavky. V rámci provozních požadavků obsahují obě nařízení i požadavky na kvalifikaci pilotů, jejich povinnosti a povinnosti provozovatele bezpilotního systému [15], [17]. Těmito oblastmi se pro jejich bezvýznamnost pro tuto práci nebudu zabývat.

K rozčlenění bezpilotních systémů přistupuje nařízení velmi inovativně: systémy nedělí již jen podle hmotnosti, ale na základě míry rizika jejich provozu pro okolí a dle dalších podstatných kritérií. Základním dělením vznikly 3 kategorie:

- ‚otevřená‘ kategorie
- ‚specifická‘ kategorie
- ‚certifikovaná‘ kategorie

Z operačního hlediska nevyžaduje ‚otevřená‘ kategorie ani předletové schválení kompetentním orgánem ani letový plán od pilota bezpilotního systému.

‚Specifická‘ kategorie již vyžaduje předletové schválení kompetentním orgánem, přičemž se posuzují zmírňující opatření podniknutá provozovatelem/pilotem UAS, která jsou vyjádřena v předletovém zhodnocení rizik. Výjimkou z povinnosti schválení jsou určité standardní letové scénáře vyjádřené v prováděcím nařízení EU 2019/947 [17], nebo je-li pilot držitelem osvědčení ‚light UAS operator‘ s příslušnými privilegii. V těchto dvou případech stačí oznámení od pilota bezpilotního systému.

Vzhledem k operacím těžkých UAS nad shromážděním osob vyžaduje ‚certifikovaná‘ kategorie jak předletové schválení, tak oznámení od pilota UAS. Navíc je vyžadováno osvědčení pro UAS i jeho pilota.

2.1.1. ‚Otevřená‘ kategorie

Do nejpropracovanější ‚otevřené‘ kategorie spadá většina bezpilotních systémů používaných k rekreačním účelům. „Z toho důvodu by neměly být, dle obou nařízení, bezpilotní systémy spadající do ‚otevřené‘ kategorie předmětem klasických postupů pro zajištění souladu s leteckými předpisy [15].“

Obecná ustanovení [17]:

- Provoz UAS v ‚otevřené‘ kategorii nevyžaduje žádné předchozí oprávnění k provozu ani prohlášení o plánovaném letu od provozovatele UAS před samotným letem
- Maximální vzletová hmotnost UA je nižší než 25 kg
- Pilot UA zajistí bezpečnou vzdálenost UA od osob a nelétá nad shromážděními osob
- Pilot udržuje UAS ve vizuálním dohledu (tzv. lety ‚in VLOS‘) vyjma případů, kdy je UA provozováno v režimu ‚follow me‘, nebo kdy je využit pozorovatel letadla
- Maximální výška letu nesmí překročit hranici 120 m nad zemským povrchem, vyjma přeletů nad překážkami, kdy by tato hranice byla překročena
- UA nepřevážuje nebezpečné zboží a neshazuje za letu žádný materiál

V rámci ‚otevřené‘ kategorie jsou bezpilotní systémy rozděleny na základě provozních omezení, požadavků na dálkově řídicího pilota a základních technických požadavků na bezpilotní systém do **subkategorií** A1 – A3 [17] a na základě rozšířených technologických požadavků do **tříd** C0 – C4 [15].

2.1.1.1. Subkategorie A1

V rámci subkategorie A1 musí provoz bezpilotních systémů splňovat všechny následující podmínky [17]:

- V případě bezpilotních systémů s MTOM a maximální rychlostí nepřesahující 250 g, respektive 19 m/s a bezpilotních systémů třídy C0 smí pilot přelétávat nad neúčastněnými osobami, nikoli však nad shromážděními osob.
- U bezpilotních systémů třídy C1 pilot nepřelétává nad shromážděními osob a důvodně předpokládá, že nepřeletí nad neúčastněnou osobou. V případě neočekávaného přeletu zkrátí pilot čas přeletu nad touto osobou na minimum.

- V případě aktivního režimu ‚follow me‘ je možné provozovat UA mimo vizuální dohled pilota (tzv. lety ‚beyond VLOS‘), nepřekročí-li vzdálenost mezi pilotem a UA 50 metrů.
- V případě UAS třídy C1 absolvoval pilot on-line výcvikový kurz¹

2.1.1.2. Subkategorie A2

V rámci subkategorie A2 musí provoz bezpilotních systémů splňovat všechny následující podmínky [17]:

- Provoz je prováděn UAS třídy C2
- Pilot nepřelétává s UA nad nezúčastněnými osobami a udržuje od osob bezpečný horizontální odstup min. 30 metrů. Pilot smí snížit horizontální vzdálenost na 5 metrů při současném dodržení dvou podmínek:
 1. UA má aktivní nízkorychlostní režim (z angl. ‚low speed mode‘)
 2. Po vyhodnocení a) povětrnostních podmínek, b) výkonu UA a c) segregace přelétávaného prostoru
- Pilot se seznámil s uživatelskou příručkou UAS vydanou výrobcem a je držitelem osvědčení o způsobilosti dálkově řídicího pilota vydaným příslušným orgánem (v ČR Úřadem pro civilní letectví), které získá po splnění podmínek v uvedeném pořadí²

2.1.1.3. Subkategorie A3

V rámci subkategorie A3 musí provoz bezpilotních systémů splňovat všechny následující podmínky [17]:

- Provoz je prováděn UAS tříd C2, C3, nebo C4
- Provoz je prováděn v prostoru, ve kterém pilot důvodně neočekává ohrožení nezapojených osob
- Provoz je prováděn v minimální horizontální vzdálenosti 150 m od obytných, obchodních, průmyslových nebo rekreačních prostor
- Provoz je prováděn pilotem, který absolvoval on-line výcvikový kurz a složil z něj zkoušku

2.1.1.4. Třída C0

Bezpilotní systém třídy C0 musí splňovat tyto podmínky [15]:

- MTOM včetně užitečného zatížení, nižší než 250 g
- Maximální rychlost 19 m/s při vodorovném letu

¹ Obsah on-line výcvikového kurzu je k nalezení v prováděcím nařízení 2019/947 [17].

² Podmínky pro získání osvědčení jsou k nalezení v prováděcím nařízení 2019/947 [17].

- Softwarově omezený dostup 120 m AGL
- UAS je bezpečně říditelný pilotem na dálku, a to i v případě výpadku jednoho, nebo více dílčích systémů
- UA je navrženo a konstruováno s ohledem na co nejmenší možnou míru zranění osob, bez ostrých hran a s co nejbezpečněji navrženými vrtulovými listy
- Není-li zajištěno, že kombinace napětí a proudu bude bezriziková a nezpůsobí úraz elektrickým proudem, a to ani v případě poškození UAS ; tak nesmí jmenovité napětí, jeho přístupné části a vnitřní napětí přesáhnout hodnotu 24 V stejnosměrného proudu nebo ekvivalent střídavého proudu
- Funkce ‚follow-me‘, je-li dostupná, neumožní UA překročit vzdálenost 50 metrů mezi UA a pilotem a umožní kdykoli pilotovi obnovení řízení UA
- UAS je na trh uveden s uživatelskou příručkou³
- Obsahuje informační sdělení agentury EASA, které uvádí použitelná omezení a povinnosti, v souladu s prováděcím nařízením (EU) 2019/947

2.1.1.5. Třída C1

Bezpilotní systém třídy C1 musí splňovat podmínky platné pro třídu C0 a navíc [15]:

- Platná jedna z podmínek; UA je vyroben z takových materiálů a zkonstruován tak, že při nárazu konečnou rychlostí na lidskou hlavu nepřesáhne energie nárazu 80 J, nebo je MTOM nižší než 900 g
- Softwarově omezený dostup 120 m AGL nebo libovolný dostup AGL za předpokladu jasného předání informace o aktuální výšce pilotovi
- UA má požadovanou mechanickou pevnost a stabilitu k bezpečnému odolání veškerým silám, kterým může být UA za letu vystaveno
- V případě ztráty datového spoje je UAS vybaven spolehlivou a předvídatelnou metodou pro účely obnovení datového spoje, nebo za účelem bezpečného přistání
- Nejedná-li se o UA s pevným křídlem, nepřesahuje dle pokynů naměřená hladina akustického výkonu L_{WA} úroveň 85 dB, 83 dB po dvou letech, respektive 81 dB po čtyřech letech od začátku platnosti
- UAS má jedinečné fyzické sériové číslo v souladu s normou ANSI/CTA-2063
- UA má elektronický identifikační systém (z angl. ‚e-identification‘), který:

³ Povinný obsah uživatelské příručky je k nalezení v nařízení 2019/945 [15].

- V reálném čase vysílá s použitím otevřeného a zdokumentovaného přenosového protokolu následující údaje:
 - Registrační číslo provozovatele letadla
 - Jedinečné fyzické sériové číslo
 - Zeměpisné souřadnice UA a jeho výšku AGL
 - Směr letu a pozemní rychlost UA (z angl. „ground speed“)
 - Zeměpisné souřadnice pilota UA, nebo alespoň bodu vzletu
- Zabraňuje pozměnění předchozích údajů
- UAS je vybaven „geo-awareness“ systémem (neboli systémem situačního povědomí), který poskytuje:
 - Rozhraní pro poskytování informací o omezeních vzdušného prostoru v okolí UA pilotovi UAS. Varování pilotovi před možným narušením vzdušného prostoru a informace o stavu UA, jakož i varování při výpadku tohoto systému
- Má-li UAS na základě dat ze systému „geo-awareness“ funkci, která zamezí vletu do zakázaných vzdušných prostor, musí být interakce se systémem řízení letu UA hladká, bez dopadu na bezpečnost letu a pilot musí být informován o aktivaci této funkce
- Pilot UAS musí být jasně varován o nízké hladině energie UA nebo řídicí stanice, a to dostatečně včas pro provedení bezpečného přistání UA
- UA musí být vybaveno světly pro účely říditelnosti a světly pro viditelnost, která musí být pilotem jasně odlišitelná od světel letadel s posádkou na palubě

2.1.1.6. Třída C2

Bezpilotní systém třídy C2 musí splňovat podmínky platné pro třídu C1, a navíc [15]:

- MTOM včetně užitečného zatížení nižší než 4 kg
- V případě upoutaného UA má tažnou délku lanka menší než 50 m a mechanickou pevnost, která není menší než:
 - $10 \times$ maximální hmotnosti letadla, jedná-li se o letoun těžší než vzduch
 - $4 \times$ síly vyvinuté kombinací max. statického tahu a aerodynamické síly max. povolené rychlosti větru za letu, jedná-li se o letoun lehčí než vzduch
- Není-li upoután, je vybaven datovým spojem chráněným proti neoprávněnému přístupu k funkcím velení a řízení
- Nejde-li o UA s pevnými křídly, je UAS vybaven nízko-rychlostním režimem omezujícím provozní rychlost na 3 m/s

2.1.1.7. Třída C3

Bezpilotní systém třídy C3 musí splňovat podmínky platné pro třídu C2, a navíc [15]:

- MTOM včetně užitečného zatížení nižší než 25 kg a maximální charakteristický rozměr menší než 3 metry

2.1.1.8. Třída C4

Bezpilotní systém třídy C4 musí splňovat pouze tyto podmínky [15]:

- MTOM včetně užitečného zatížení nižší než 25 kg
- UAS je bezpečně říditelný pilotem na dálku, a to i v případě výpadku jednoho nebo více dílčích systémů
- UAS není schopen režimů automatického řízení kromě podpory stabilizace letu bez přímého vlivu na dráhu letu a podpory při ztrátě spoje – pokud je při ztrátě spoje k dispozici předem stanovená pevná poloha letových ovládacích prvků
- UAS je na trh uveden s uživatelskou příručkou
- Obsahuje informační sdělení agentury EASA, které uvádí použitelná omezení a povinnosti, v souladu s prováděcím nařízením (EU) 2019/947
- Nejsou požadovány: elektronický identifikační systém, systém ‚geo-awareness‘, varování při nízké hladině energie, světla

2.1.2. ‚Specifická‘ kategorie

Provoz UAS ve ‚specifické‘ kategorii zahrnuje ty druhy provozu, u kterých je vyšší míra rizika než u ‚otevřené‘ kategorie. Tyto druhy provozu podléhají důkladnému posouzení rizik, ze kterého vyplývají požadavky nezbytné pro udržení bezpečného provozu [17].

Obecná ustanovení [17]:

- provoz UAS ve ‚specifické‘ kategorii vyžaduje oprávnění k provozu vydané příslušným úřadem (v ČR ÚCL)
- provozovatel musí společně s žádostí o oprávnění k provozu provést a přiložit posouzení rizik podle článku 11 prováděcího nařízení 2019/947 [17] a předložit opatření ke zmírnění rizik. Posouzení rizik je provedeno s ohledem na následující kritéria:
 - provoz VLOS, nebo provoz BVLOS
 - hustota obyvatelstva v přelétávaných oblastech
 - let nad shromážděním osob
 - rozměry UA
 - přesnou část vzdušného prostoru pro uskutečnění operace rozšířenou o část pro mimořádné postupy
 - třídu vzdušného prostoru
 - rozestup od jiného letového provozu a dopad operace na letový provoz
 - vlastnosti konstrukce a výkonnost UAS, zejména:
 - dostupnost systémů ke zmírnění rizika srážky
 - dostupnost systémů omezujících energii při dopadu nebo křehkost UAS
- projektování, výroba a údržba UAS musí být osvědčovány, jestliže UAS splňuje kteroukoli z podmínek:
 - charakteristický rozměr 3 metry a více a navržený pro provoz nad shromážděními lidí
 - navržen pro přepravu lidí
 - navržen za účelem přepravy nebezpečného zboží a UA vyžaduje vysokou úroveň odolnosti ke zmírnění rizik pro třetí strany v případě nehody
- požadavek od provozovatele UAS na piloty UAS k létání takovým způsobem, aby byla hluková zátěž na obyvatele a zvířata co nejnížší

2.1.3. ‚Certifikovaná‘ kategorie

‚Certifikovaná‘ kategorie počítá s provozem bezpilotních letadel v blízkosti nebo přímo nad shromážděními lidí a spadají do ní veškeré operace, které se vymykají předletovému zhodnocení rizik ‚specifické‘ kategorie. V takovém případě příslušný úřad (v ČR ÚCL) shledá, že riziko nelze přiměřeně zmírnit bez osvědčení UAS a jeho provozovatele a případně bez udělení průkazu způsobilosti pilotovi [15].

Obecná ustanovení [17]:

- provoz UAS v ‚certifikované‘ kategorii vyžaduje osvědčení UAS dle nařízení (EU) 2019/945 [15], osvědčení provozovatele UAS a případně udělení průkazu způsobilosti pilotovi
- osvědčení se vztahuje na jakýkoli UAS splňující kteroukoli z podmínek:
 - charakteristický rozměr 3 metry a více a navržený pro provoz nad shromážděními lidí
 - navržen pro přepravu lidí
 - navržen za účelem přepravy nebezpečného zboží a UA vyžaduje vysokou úroveň odolnosti ke zmírnění rizik pro třetí strany v případě nehody
- provoz UAS se uskutečňuje:
 - nad shromážděními osob
 - zahrnuje přepravu osob
 - zahrnuje přepravu nebezpečného zboží

3. Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní systémy v zahraničí a ČR

Integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru, jejíž podmínkou je spolehlivý a bezpečný antikolizní systém, je globální problém. K porozumění problematice z více perspektiv věcně představím probíhající programy a projekty na evropské úrovni a ve Spojených státech, se kterými úzce souvisí i integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru v České republice.

Následující subkapitoly nejsou členěny podle zeměpisných oblastí, ale podle následujícího klíče: Program SESAR 2020 a jeho součást program U-Space, představené v kapitole 3.1., integrují zároveň jak operačně koncepční, tak operačně technologický přístup. Subkapitoly 3.2. a 3.3. probírají operačně koncepční přístup integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru, zatímco kapitoly 3.4. a 3.5. se zabývají operačně technologickými požadavky – tedy ve zkratce konkrétními letovými testy.

Operačně koncepční a operačně technologický přístup jsou vzájemně provázány a doplňují se. Neplatí nutně, že koncept předchází technologie; technologie mohou být natolik převratné, že mohou pozměnit koncept. Nicméně většinou platí, že programy započaté kvalitním zastřešujícím konceptem jsou dlouhodobě spolehlivější.

3.1. Evropa: U-Space

V Evropě probíhá inovativní program SESAR 2020, který staví na svém předchůdci SESAR1 a má za cíl do roku 2024 dodat leteckému průmyslu „vysoce výkonnostní operačně technologická řešení“. S rozpočtem 1,6 miliardy Eur bude podporovat projekty ve 4 oblastech [6]:

- Airport operations (letecké operace)
- Network operations (síťové operace)
- Air traffic services (služby řízení letového provozu)
- Technology enablers (zavádění technologií)

Pod program SESAR 2020 spadá odnož U-Space, jejíž záměr je následující: „Jasný rámec na úrovni Evropské unie umožní vytvoření pravého evropského trhu pro služby bezpilotních prostředků, čímž ‚zkrotí‘ potenciál růstu a vzniku nových pracovních míst v tomto ekonomickém odvětví“ [6].

Tuto misi projekt U-Space naplňuje postupně prostřednictvím 4 vývojových pilířů [6]:

U1: základy služeb pokrývající e-registraci, e-identifikaci a geofencing

U2: iniciace služeb pro řízení operací bezpilotních prostředků zahrnující: letové plánování, sledování a napojení na konvenční řízení letového provozu

U3: pokročilé služby podporující složitější operace ve vzdušných prostorech s hustým provozem, jako např. funkce ‚detect and avoid‘ (= antikolizní systém)

U4: plně vyvinuté služby schopné vysoké míry automatizace, konektivity a digitalizace jak pro bezpilotní systém, tak ekosystém U-Space.

Dle definice tak U-space zahrnuje sadu služeb, které spoléhají na vysoký stupeň digitalizace a automatizace funkcí a dále na konkrétní postupy navržené za účelem podpory bezpečného a efektivního přístupu do vzdušného prostoru velkým počtem bezpilotních systémů. To činí U-Space zastřešujícím rámcem navrženým k usnadnění jakéhokoli druhu rutinní mise, ve všech třídách letového prostoru a ve všech prostředích – i těch nejvíce zahlcených – při současném adresování vhodného rozhraní letů s posádkou a při řízení letového provozu [6].

3.2. Spojené státy: NASA FAA UTM

Na základě předpovědi o stavu vzdušného prostoru mezi lety 2018-2038 vydané americkým FAA bude z dnešních 1,1 mil. vzdušný prostor Spojených států již v roce 2023 brázdit na 2,4 mil. modelářských bezpilotních systémů (týká se strojů do 25 kilogramů v soukromém vlastnictví) [18]. Jejich bezpečná integrace do vzdušného prostoru je proto klíčová. Za tímto účelem vytváří NASA ve spolupráci s FAA a dalšími partnery koncept UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management). Jako platforma pro spolupráci slouží výzkumné středisko NASA Ames Research Center v Silicon Valley [19]. Schéma níže zobrazuje rozsah vzdušného prostoru UTM:



Obrázek 3 - pole působnosti konceptu UTM se týká bezpilotních systémů do 25 kg MTOM létajících do maximální výšky 400 ft AGL [20]

Tento projekt má, na rozdíl od operačně technologických programů: evropského MIDCAS (kapitola 3.4.) a amerického UAS-NAS (kapitola 3.5.), za cílovou kategorii UAV do 25 kilogramů letících ve výšce do 400 ft AGL a **za hranicí** vizuálního dohledu pilota (BVLOS) [20].

Po dokončení výzkumu předá NASA výsledky své práce regulačnímu úřadu FAA pro následnou implementaci [20], [19].

3.2.1. Vývojová stadia

Výzkum je rozdělen na 4 vývojová stadia – TCL (technology capability levels), z nichž poslední nedávno proběhlo na konci srpna 2019. Stadia 1 a 2 obsahují úplné základy a jsou integrována ve stádiích 3 a 4, nebudu je proto ani zmiňovat.

TCL3: dokončeno v květnu 2018; stadium se soustředilo na vytváření a testování technologií pro bezpečné rozestupy bezpilotní systémů. Byl vytvořen systém D&A umožňující detekci a úhybný manévr kooperujících i nekooperujících bezpilotní systémů nad středně hustě obydlenými oblastmi.

TCL4: dokončeno na konci srpna 2019; na výsledky 3. vývojového stadia bude použit pákový efekt a testování bude zaměřeno na operace v hustěji obydlených oblastech, jako např. zpravodajskou činnost nebo doručování balíků. Tyto testy také ověří technologie, které by mohly být použity ke zvládnutí eventualit širokého rozsahu – tedy ostrého provozu.

V mezičase v lednu 2019 přišla FAA, zadávající instituce a partner, s následujícím návrhem změny pravidel pro získání povolení pro lety nad shromážděními osob a pro lety v noci [21]:

Co se týká letů nad shromážděními, úřad navrhl rozdělení bezpilotních systémů podle míry následků zranění, které by padající bezpilotní systém způsobil – velmi podobně tomu je v případě rozdělení do subkategorii A1 – A3 v rámci ‚otevřené‘ kategorie nové evropské legislativy;

- Bepilotní systémy do hmotnosti 0,25 kg nevyžadují žádné povolení pro lety nad shromážděním osob
- Nad touto hmotností je výrobce povinen prokázat relativní bezpečnost při pádu; například tyto stroje nesmí mít nechráněně točící se vrtule. Ukáže-li se, že bezpilotní systém je schopen způsobit vážná zranění, tak smí nad lidmi létat jen za zvláštních podmínek.

Co se týká nočních letů, nebylo by dle návrhu nutné povolení za podmínek, kdy rekreační pilot bezpilotních systémů každé 2 roky absolvuje teoretický výcvik a vybaví stroj osvětlením viditelným na vzdálenost 3 mil (4,83 km).

3.2.2. Technologie a testování

V rámci UTM chce NASA představit dva typy možných systémů:

1. Přenosný UTM systém, který by umožnil operaci bezpilotních systémů v odlehlých oblastech, např. při vojenských operacích, pomoci po živelných pohromách nebo při konceptu ‚precision agriculture‘ [20].
2. Stálý UTM systém, který by poskytoval podporu při letech v nízké výšce nad terénem a souvisle by pokrýval určitou geografickou oblast. Oba dva systémy by vyžadovaly stálé pokrytí CNS [20].

V rámci NASA UTM jsou bezpilotní systémy testovány při letech BVLOS, tedy za hranicí vizuálního dohledu pilota. Testy probíhají na šesti letištích napříč Spojenými státy – ve státech New York, Virginia, Texas, Severní Dakota, Aljaška a Nevada. Tedy, co je důležité zdůraznit, v geografických oblastech s různorodým klimatem a světelnými podmínkami, které tak poskytují prostor pro vyladění systémů.

Testy ve stadiu TCL3, které probíhaly od 15 května do 19 června 2018, se zabývaly třemi výzvami:

- zohledněním poryvů větru, které mají velký vliv na přesnost úhybných manévrů u lehkých bezpilotní systémů
- ochranou bezpilotních systémů před ptactvem
- kyberbezpečností jednotlivých bezpilotních systémů i systému jako celku [22].

3.3. UTM v ČR

Vývoj a správa systému UTM v České republice spadá pod Řízení letového provozu ČR. ŘLP se podílí na programu „jednotného evropského nebe“ SESAR [23]; Single European Sky ATM Research, který cílí na proměnu evropského vzdušného prostoru v modulárně propojený, moderní a integrovaný ekosystém s ‚flight a flow-based‘ přístupem. Jedním z takových modulů je program U-Space, který byl blíže představen v kapitole 3.1. [6].

V srpnu 2018 „zvítězilo sdružení firem AirMap a UpVision v tendru na poskytování služby řízení bezpilotního letového provozu pro řízený vzdušný prostor v České republice. UTM Platforma společnosti AirMap bude nasazena za účelem poskytování situačního povědomí a možnosti podávání žádostí o provedení letů rostoucí komunitě provozovatelů dronů [24].“

Na českém poli pracuje na integraci bezpilotních systémů kromě ŘLP také mnoho dalších subjektů, které zaštiťuje UAV aliance. Počínaje rokem 2015 pořádá v Plzni každoročně konferenci, která poskytuje platformu pro sdílení plánů, poznatků a technologií zástupců ze státního, akademického a soukromého sektoru [25].

3.4. Evropa: MIDCAS

Jedná se o evropskou spolupráci pod názvem Mid Air Collision Avoidance System, započatou v roce 2009 pod záštitou agentury EDA – European Defence Agency – s celkovým rozpočtem 50 milionů Eur⁴. Cílem projektu je bezpečná integrace bezpilotních systémů do společného vzdušného prostoru. Na projektu se podílí 5 členských států EU – Francie, Německo, Itálie a Španělsko, pod vedením Švédska. Průmyslové konsorcium tvoří 11 následujících firem: švédský SAAB, francouzský Sagem and Thales, německé: Airbus Defense and Space, Diehl BGT Defense, DLR a ESG, italské: Alenia Aermacchi⁵, CIRA, španělské: Selex ES a Indra [26].

Předpokládaný harmonogram z roku 2015⁶:

- 2018 – UAV vybavené systémem MIDCAS budou moci užívat vzdušné prostory určitých tříd
- 2023 – fungující systém MIDCAS ve vzdušných prostorech všech tříd se stejnou úrovní přístupu jako u letadel s lidskou posádkou [26]

3.4.1. Technologie a testování

Pro vyšší robustnost systému těžší ‚detect and avoid‘ mechanismus jak z kooperativního, tak nekooperativního přístupu; většina dopravních letadel bude od roku 2020 povinně vybavena systémem ADS-B, přesto největší hrozbu představuje kategorie GA a lehká letadla, nebo letadla, která budou mít systém ADS-B nebo odpovídač z různých důvodů vypnutý [27].

Na palubě testovacího UAS bylo umístěno 5 senzorů:

- kooperativní
 - ADS-B + IFF (Identification friend or foe interrogator – slouží ke klasifikaci okolních letadel jako přítel-nepřítel a k určení jejich relativní polohy a vzdálenosti)
- nekooperativní
 - Radar + elektrooptický senzor + IR kamera
 - FOV senzorů dosahovalo +/- 110 ° horizontálně a +/- 15 ° vertikálně

⁴ Pro orientaci: rozpočet evropského projektu U-Space je 38 krát vyšší

⁵ Alenia Aermacchi od roku 2016 známá jako Leonardo Aircraft Division

⁶ Od roku 2015 jsou o projektu MIDCAS jen kusé nebo vágní zprávy

Úspěšné testování systému ‚detect and avoid‘ proběhlo na vojenské letecké základně Grazzanise v Itálii. V prvním kole testování byl použit letoun CASA C212 (obrázek 5) jako simulace UAS a Dassault Falcon 20 (obrázek 4) jako narušitel. Pro další testovací kola byl použit první evropský UAS s MTOM přesahující 1000 kg; Alenia Sky-Y společně s vojenským transportním letounem C-27J Spartan. Nejvyšší dosažená sblížovací rychlost se pohybovala okolo 240 kt, přičemž testování probíhalo ve dne [27].



Obrázek 4 - Dassault Falcon 20 simulující narušitele v 1. testovacím kole [68]



Obrázek 5 - CASA C212 simulující UAS v 1. testovacím kole [67]



Obrázek 6 – UAS Alenia Sky-Y použitá v dalších kolech testování [69]



Obrázek 7 - Alenia C-27J Spartan použitý v dalších kolech testování [70]

3.4.2. Princip fungování

Systém MIDCAS reaguje ve 3 fázích:

1. Informuje pilota UAS o okolním provozu a potenciálním narušiteli (hrozbě).
2. Upozorní pilota na nutnost úhybného manévru. Pilot má v této chvíli možnost aktivovat automatický úhybný manévr.
3. Upozorní pilota na setrvávající hrozbu srážky. V této chvíli může pilot stále s předstihem aktivovat automatický úhybný manévr. V případě, že to neudělá, systém včas aktivuje automatický úhybný manévr [27].

„Detect and avoid“ v 1. fázi má paralelu s TA generovaným aktuálně rozšířeným TCAS II. Fáze 2 a 3 má paralelu s RA u AP/FD TCAS systému, kterým je vybaven např. Airbus A380 [28].

Navíc, oproti aktuálně používané verzi systému TCAS, má systém MIDCAS dvě nesporné výhody:

- horizontálního úhybný manévr kombinuje se stoupáním, nebo klesáním⁷.
- bez posádky je možné provést agilnější úhybný manévr, na samotné hraně letové obálky UAS [27]. Tím jsou dosaženy menší, a přitom stále bezpečné rozestupy mezi letadly, což v důsledku vede ke zvýšení kapacity vzdušného prostoru.

⁷ TCAS II umožňuje jen manévry ve vertikální rovině, TCAS III i v horizontální, jeho přínos byl však v testech minimální, a jeho vývoj byl proto zastaven. TCAS IV využívá dodatečné informace z odpovídače módu S, jeho vývoj však byl ukončen s příchodem systému ADS-B.

3.5. Spojené státy: NASA UAS-NAS

Americkou operačně technologickou paralelou pro propracovaný evropský MIDCAS je studie vedená agenturou NASA pod zkratkou UAS-NAS; ‚Unmanned Aircraft Systems Integration in the National Airspace System‘. Program odstartoval v roce 2011 ve spolupráci s FAA, komisí RTCA a podobně jako v Evropě firmami z komerčního sektoru se společným cílem; kombinací nejlepších dostupných technologií vyvinout ‚minimum operational performance standards‘ pro bezpečný pohyb bezpilotních systémů [22].

V rámci této studie testovala NASA v dubnu 2016 na Edwards Air Force Base v Kalifornii ‚detect and avoid‘ schopnosti systému ADS-B [22]. K testování byla použita Ikhana (NASA modifikace armádního dronu General Atomics MQ-9 Reaper/Predator B); bezpilotní systém s rozpětím 20 m, dostupem 40 000 ft a MTOM přesahující 4500 kg; a Beechcraft King Air 200; desetimístný turboprop s MTOM 5700 kg [10].



Obrázek 8 - Ikhana a Beechcraft King Air 200, na kterých byly prováděny testy [10]

Byly navrženy a testovány různorodé scénáře vzájemných sblížení obou strojů, při kterých se role narušitele mezi Ikhanou a Beechcraftem střídaly. Oba letouny byly osazeny jednotkou ADS-B – modelem Garmin GDL-90, která zásobovala daty systém TCAS [10], [22].

V průběhu 11 týdnů testování nalétala Ikhana 98 letových hodin, při kterých úspěšně proběhlo 325 těsných úhybných manévřů [22].

Zásadní rozdíl mezi evropským MIDCAS a UAS-NAS je ten, že v rámci evropského programu MIDCAS byly na UAS použity i nekooperativní technologie: radar + elektrooptický senzor + IR kamera (FOV 220 ° H / 30 ° V); zatímco program UAS-NAS ve Spojených státech testoval jen kooperativní systém ADS-B. Nicméně, oba dva programy jsou pro tuto práci relevantní a přínosné.

4. Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT

Úspěšný výzkum nejen na poli antikolizních systémů probíhá ve spolupráci s University of Pennsylvania a University of Lincoln na Katedře kybernetiky FEL i v rámci ČVUT pod samostatnou Katedrou Multi-robot Systems (MRS). Tým MRS, vedený Martinem Saskou, vybojoval čelní umístění v prestižní soutěži bezpilotních systémů MBZIRC 2017, která se konala v Abu Dhabi ve Spojených arabských emirátech. Soutěž se skládala ze tří disciplín; tým MRS vyhrál ze 143 soutěžících týmů první místo v disciplíně kooperativního sběru objektů skupinou autonomních helikoptér a druhé místo v kategorii autonomního přistání na jedoucím vozidle. Tato umístění umožnila týmu účast ve finální soutěži, ve které se umístil společně s italskou University of Padua na 2. místě [29]. Tento velký úspěch přinesl prestiž celému týmu a ČVUT, výzkum týmu MRS byl přínosem pro robotickou komunitu a v neposlední řadě zajistil financování dalšího výzkumu.

Z těchto pádných důvodů jsem se rozhodl kompletně přeložit a v této kapitole představit práci týmu MRS, na jejíž výsledky úzce navazuji v kapitole 5 „Antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAS“. Za velmi cenná považuji pravidla antikolizního systému, o kterých budu psát již v kapitole 4. 1. 2. Nejen ta, ale i poměrně detailní popis komplexnosti problematiky a popis průběhu testování bezpilotních systémů považuji za velmi hodnotný.

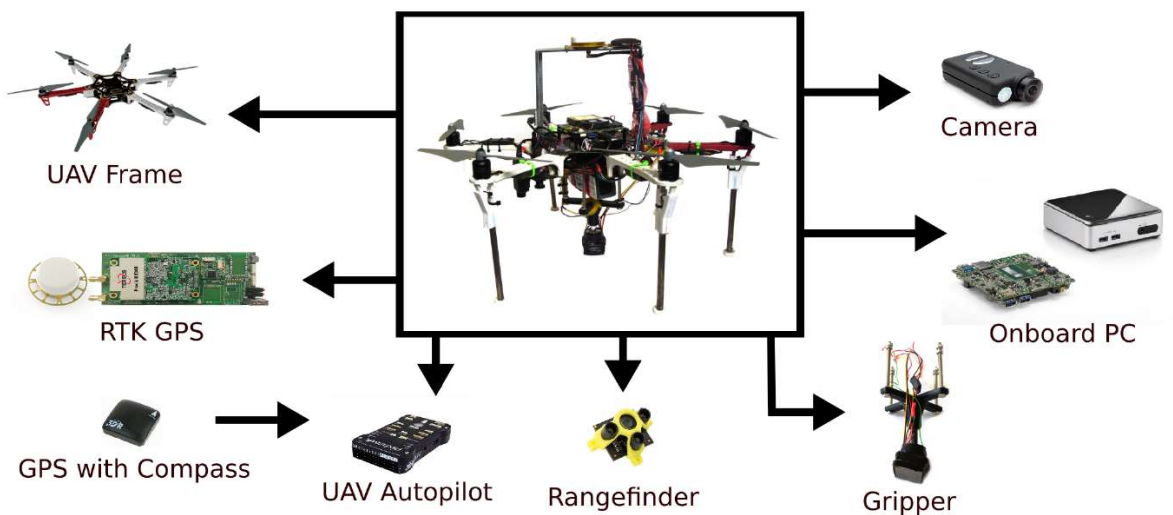
4.1. Soutěžní konfigurace při MBZIRC 2017

V této kapitole se zabývám bezpilotním systémem, který byl nasazen Martinem Saskou a kolektivem při soutěži MBZIRC 2017. Rozebírám jak jednotlivé komponenty bezpilotního systému, tak v další podkapitole podmínky a pravidla pro operaci těchto bezpilotních systémů ve společném omezeném vzdušném prostoru.

4.1.1. Přehled použitého hardwaru

Jako konstrukce byla zvolena tzv. off the shelf setup, již hotová konstrukce osazená senzory, která je schopna autonomního letu. Dále bylo nutné vytisknout několik součástí na 3D tiskárně.

Schéma sestavy bezpilotního systému zobrazuje následující obrázek:



Obrázek 9 - sestava bezpilotní systému použitého v soutěži MBZIRC 2017 a dalším výzkumu [30]

- Rám DJI hexakopter F550 (rozměry bezpilotního systému 120 x 120 x 50 cm)
- Elektromotory DJI E310
- Autopilot PixHawk flight controller
 - Tříosý akcelerometr
 - Gyroskop
 - Barometr
 - Přijímač signálu GPS
 - Magnetometr
- Radio-modul XBee-Pro

Lokalizaci zajišťoval GNSS modul připojený na autopilota Pixhawk, který ale samotný nezajišťuje dostatečnou přesnost pro bezkolizní let. Proto byla použita pozemní stanice RTK-GNSS (Real Time Kinematic) Tarsus Precis-BX305, která správně kalibrovaná umožnila přesnost s chybou jen 10 mm v horizontálním směru a 15 mm ve vertikálním. Pro funkci RTK GPS musí mít systém RTK FIX, který záleží na síle signálu GNSS a kvalitě spojení mezi pozemní stanicí a bezpilotním systémem [30].

Přístup týmu MRS počítal s nasazením svých bezpilotních systémů v krizových situacích, při kterých signál GNSS může být ztracen nebo nemusí být vůbec k dispozici. V takovém případě je bezpilotní systém vybaven záložními systémy k určení výšky a vzájemné polohy bezpilotních systémů od okolních překážek [30].

Druhým způsobem určení nadmořské výšky v případě nedostupnosti GNSS je pomocí barometru, který je součástí autopilota PixHawk. Pro přesný úchop objektů nebo přistání nestačí znát výšku AMSL, jež navíc z podstaty měření není dostatečně přesná. ale je zapotřebí znát výšku AGL, která je určena laserovým měřičem TeraRanger One. Laserový měřič ovšem není možné použít v případě, kdy je zakryt neseným objektem⁸ [30].

V případě, kdy nebyl dostupný signál GPS a laserový měřič byl zakryt neseným objektem zajišťoval určení výšky klíčový prvek navigačních a antikolizních systémů – kamera Highres Mobius ActionCam (mvBlueFOX-MLC200w v následném vývoji [31]), která v soutěži sloužila k detekci přepravovaných objektů a na základě fotogrammetrie k relativní vizuální lokalizaci [30].

Parametry kamery musely zpočátku splňovat pouze požadavky na senzor s centrální uzávěrkou (z angličtiny ‚global shutter‘) a frekvenci snímání více než 50 snímků za sekundu. Zvolená kamera disponovala rozlišením 752 x 480 pixelů a 93 snímky za sekundu. V kombinaci s objektivem rybí oko (z angl. ‚fisheye lens‘) Sunex DSL215 a senzorem o velikosti 1/3“ disponovala kamera úhlem záběru o velmi slušných 185 ° [31]. Další testy ukázaly, že ve srovnání s předchozí kamerou s centrální uzávěrkou a nízkým rozlišením je detekce objektů spolehlivější při osazení kamerou vybavenou senzorem se šterbinovou uzávěrkou (z angl. ‚rolling shutter‘) a vysokým rozlišením. Na druhou stranu, tento přístup vyžaduje vývoj na míru vytvořeného algoritmu pro zpracování obrazu [32].

⁸ Zde se nabízí řešení umístit laserový senzor na pomocné rameno mimo plochu neseného objektu.

Ke zpracování obrazu a koordinaci pohybů UAV dodával výpočetní výkon kapesní počítač Intel NUC osazený čtyřjádrovým procesorem Intel i7 5557U v konjunkci s 8 GB paměti RAM, přičemž pro zpracování obrazu bylo využito jen jedno procesorové vlákno a zbylá tři vlákna sloužila pro výpočty algoritmů. Vzájemnou komunikaci mezi bezpilotními systémy zajišťoval integrovaný WiFi čip [31].

4.1.2. Pravidla pohybu bezpilotních systémů při soutěži

Cílem týmu bylo vytvořit decentralizovaný (terminologií U-Space a MIDCAS: ‚flight centric‘ respektive ‚operation centric‘) a ‚off the shelve‘ antikolizní systém, který bude možné nasadit v reálných situacích. Takový systém, dle autorů, do té doby neexistoval [33].

Pro urychlení vzájemné komunikace mezi bezpilotními systémy a pro její co nejvyšší efektivitu byl systém navržen k fungování bez potvrzování a opakování příkazů, což umožnilo vzájemnou komunikaci na frekvenci 5 Hz (pětkrát za sekundu) a predikci trajektorií v horizontu 8 sekund. V reálném použití tyto parametry umožňují bezpečný let bezpilotních systémů až do rychlosti 50 km/h, tedy při vzájemné maximální rychlosti sblížení 100 km/h funguje predikce trajektorie na vzdálenost 222 metrů [33].

Komunikace mezi bezpilotními systémy byla založena na přístupu ‚Finite-state machine‘⁹ s následující základní podmínkou pro sblížení [30]:

„Vyhnutí se budoucím kolizím je založeno na předpovědích sblížení v časoprostoru v rámci předpokládaných trajektorií bezpilotních systémů.“ [33]

Tato podmínka dále vedla k určení následujících pravidel a vlastností systému:

Systém jako celek je navržen pro maximální počet 3 bezpilotních systémů, pohybujících se ve stejném vzdušném prostoru. Pro jednoduchost má každý bezpilotní systém přiřazenou dedikovanou letovou hladinu, ve které se smí pohybovat. To znamená, že kolize může nastat jedině v případě, kdy bezpilotní systém opustí svou letovou hladinu, při soutěži tedy například při sběru objektu ze země [30].

⁹ FSM neboli Finite-state machine je výpočetní model pro simulaci sekvenční logiky. FSM sestává z konečného počtu (ze slova ‚finite‘) stadií (states) a přechodů (transitions). Najednou může být aktivní pouze jedno stadium. Při určitém vstupu dochází k přechodu do nového stadia [66].

Pokud bezpilotní systém stoupá do cílové letové hladiny, která je obsazená jiným bezpilotním systémem, je zvolena dočasná hladina co nejbližší původní cílové hladině. V této dočasné hladině stoupající bezpilotní systém buď vyčkává po dobu max. 90 sekund do uvolnění cílové hladiny, po uplynutí této doby čekající bezpilotní systém označí detekci bezpilotního systému v cílové hladině jako ‚false positive‘ a pokračuje ve stoupání [30].

Ke zvýšení agility bezpilotních systémů a zmenšení ochranné zóny kolem každého z nich na minimum jsou při úhybném manévru v ovladači PixHawk deaktivovány vestavěné limity pro akceleraci, což umožní vyhýbajícímu se bezpilotní systému provést hbitější manévr – podobně jako v případě evropského projektu MIDCAS. Zároveň bezpilotní systém s vyšší prioritou spolupracuje tím, že naopak dočasně zpřísní rychlostní omezení [33].

Cílem týmu bylo vyvinout antikolizní systém, který bude bezpečný i v případě, že nastane výpadek vzájemné komunikace mezi bezpilotními systémy. V případě, že tato situace nastane, jsou poslední známé polohy bezpilotní systémů a jejich předpokládané trajektorie brány systémem jako platné po dobu 5 sekund.

V soutěži měly bezpilotní systémy sesbírat objekty rozmístěné po aréně a doručit je do ohraničeného čtvercového prostoru. Nad tímto prostorem bezpilotní systémy neshazovaly objekt z původní letové hladiny, ale sestoupaly níže – podobně jako v reálné situaci při sběru zboží z firemního skladu. Aby nedošlo ke srážce bezpilotních systémů nad tímto prostorem, měl v případě výpadku komunikace každý bezpilotní systém přiřazené časové okno, ve kterém se nad tímto prostorem směl pohybovat [30].

4.2. Vzájemná relativní lokalizace bezpilotních systémů za použití LED značek

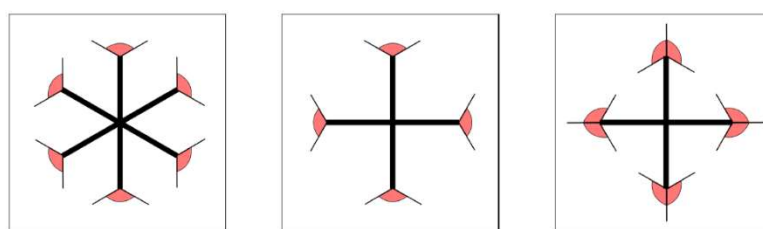
Přístup představený v předchozí podkapitole nebyl jediným, který tým MRS vyvinul a otestoval. Novější, po soutěžní výzkum z roku 2018 se spoléhal jen na fotogrammetrii a soustředil se na vzájemnou lokalizaci bezpilotních systémů za použití LED pruhů umístěných na rámech bezpilotních systémů [34].

4.2.1. Motivace pro vývoj systému

Podobně jako v případě vývoje systému do soutěže MBZIRC 2017 se i tentokrát tým zaměřil na vývoj robustního, na infrastrukturu nezávislého systému pro relativní lokalizaci většího počtu bezpilotních systémů, který by fungoval uvnitř i venku. Navíc si přidal podmínku na nízké výpočetní požadavky. Využil k tomu vlastností ultrafialového světla, které lze za pomoci kamery se speciálním UV filtrem (Midopt) spolehlivě detekovat [34].

4.2.2. Fungování systému

Každý UAS byl osazen LED pruhy ProLight PM2B-1LLE, jejichž maximální vyzařování se pohybovalo kolem vlnové délky 395 nm¹⁰. Rozmístění diod na rámu co nejdále od sebe se ukázalo jako klíčové. Celý rám bezpilotního systému tak fungoval jako značka k rozpoznání.



Obrázek 10 - rozmístění a úhel vyzařování UV LED diod na hexakoptérech a kvadroptérech [34]

Při nejvhodnějším rozložení se šesti diodami byl cíl detekován na vzdálenost 15 metrů a nižší.

¹⁰ Vlnová délka 395 nm se nachází na spodní hranici ultrafialového záření a viditelného světla

4.2.3. Výhody a nevýhody detekce UV LED značek

- + Bezpilotní systém je detekovatelný i v suboptimálních světelných podmínkách, např. bezpilotní systém letící před nekонтastním pozadím, např. lesem
- Nutnost pre-instalace externí infrastruktury, např. kamer zachytávajících pohyb nebo pozemní stanice RTK-GNSS
- Bezdrátová komunikace přes WiFi má omezený dosah a je náchylná k interferencím od nesouvisejících zdrojů, ale i od samotných bezpilotních systémů v případě velkého roje¹¹
- Nízká robustnost systému; nutnost osazení všech bezpilotních systémů různých tvarů a velikostí LED pásky

¹¹ Roj = z angl. ‚swarm‘ / rojení = ‚swarming‘

5. Antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAS

Antikolizní systém budu navrhovat pro UAS rozčleněné dle nejnovější klasifikace agentury EASA (viz kapitola 2), která začne platit od července roku 2020, ze které bude vycházet i česká legislativa. Největší přínos návrhu bude pro kategorie ‚specifická‘ a ‚certifikovaná‘, jelikož tyto kategorie podléhají předletovému zhodnocení rizik dané operace. Jedním z posuzovaných kritérií je „dostupnost systému ke zmírnění rizika srážky“ (viz kapitola 2.2.2.) a právě zde vidím prostor, kde by mohl spolehlivý antikolizní systém přispět ke snížení rizika, respektive ke zvýšení bezpečnosti veškerých operací.

V zásadě by ale neměl být problém osadit navrhovaný antikolizní systém na jakékoli bezpilotní letadlo za podmínek:

- **pokud jej UA s rezervou unese tak, že se přidaná hmotnost nadlimitně neprojeví na letuschopnosti a ovladatelnosti bezpilotního letadla**
- že se komponenty antikolizního systému šikovně umístí dovnitř UA, případně vně konstrukce, při současném zachování požadované letuschopnosti a ovladatelnosti UA
- že elektronická a energetická síť bezpilotního letadla umožní bezpečnou implementaci a napájení antikolizního systému

Funkcí antikolizního systému pro UAS je zabránění střetům mezi bezpilotními letadly navzájem, bezpilotními letadly a letadly s posádkou a mezi bezpilotními letadly a pozemními překážkami.

Jedině spolehlivý antikolizní systém, splňující níže uvedené požadavky, umožní bezpečný a harmonický pohyb bezpilotních systémů ve městech a nad shromážděními osob a přispěje k plynulému začlenění bezpilotních letadel do společného vzdušného prostoru.

Antikolizní systém by měl splňovat následující požadavky:

- Systém musí být spolehlivý a funkční – předpokládá se určitá robustnost
- Systém musí být efektivní
 - přímočarý ve způsobu detekce hrozby a následných akcí
 - lehký
 - úsporný
- Systém musí být ‚flight centric‘ respektive ‚operation centric‘, tedy nezávislý na pozemní infrastruktuře a řízení letového provozu

5.1. Koncept antikolizního systému

Návrh systému vychází primárně ze zkušeností týmu MRS – viz kapitola 4, z proběhlých testů ve Spojených státech a v Evropě – viz kapitola 3, a je doplněn a inovován použitím nejnovějších veřejně dostupných technologií.

Systém musí fungovat v jakémkoli prostředí a být schopný detekovat jak létající, tak statické překážky. Systém by měl proto pracovat ve **dvou prolínajících se rovinách**:

- 1) Kooperativní detekce letadel s posádkou
 - a. Micro ADS-B transponder (viz kapitola 1.2.)
- 2) Nekooperativní detekce letadel a statických překážek
 - a. Relativní lokalizace
 - i. Analýza obrazu kamery – fotogrammetrie → kamera
 - ii. Technologie LiDAR (viz kapitola 1.3.)

Pro úplnou funkčnost antikolizního systému musí být doplněn o vhodné komponenty tvořící jádro celého systému.

- 3) Dalšími komponentami tvořícími jádro jsou:
 - a. Autopilot
 - b. Palubní počítač
 - c. Senzor vzdálenosti AGL

Definováním požadovaných parametrů všech zmíněných zařízení se budu věnovat v následujících třech subkapitolách.

5.1.1. Kooperativní detekce letadel s posádkou

S ohledem na vývojové trendy v civilní letecké dopravě je volba ideální komponenty pro kooperativní detekci letadel s posádkou poměrně jasná. Jedná se o systém ADS-B (detailní popis viz kapitola 1.2.), kterým budou v evropském vzdušném prostoru povinně vybavena všechna letadla s maximální vzletovou hmotností přesahující 5700 kg a cestovní rychlostí přesahující 250 kt. Konkrétně se nařízení v Evropě týká na téměř osmi tisíc letadel a začne platit počínaje 7. červnem 2020.

Ve vzdušném prostoru Spojených států začne podobné nařízení platit již od počátku roku 2020 s tím rozdílem, že se nařízení vztahuje na jednotlivé vzdušné prostory; tříd A, B, C. Konkrétně se nařízení bude týkat většiny letadel pohybujících se nad 10 000 ft AMSL [35].

Varianty jak v Evropě, tak USA mají společného jmenovatele; nařízení se týká pouze ADS-B OUT, tedy schopnosti letounů vysílat data o aktuální výšce, rychlosti, poloze a směru letounů a jejich identifikaci do okolí minimálně 100 NM. Funkce ADS-B IN, která by umožnila data ostatních letounů přijímat, předávat systému TCAS a zobrazovat je pilotům v kokpitu, není zatím požadována. Nicméně díky praktickým informacím a úspoře času a paliva, kterou systém přináší, počítá většina aerolinek rovnou se zavedením ADS-B OUT/IN [35].

Pro moji práci z těchto nadcházejících chystaných změn **vyplývá následující:**

- a)** Z podstaty nařízení budou letadla povinně vybavena jen ADS-B OUT; bude proto na bezpilotních letadlech vysílanou informaci na frekvenci 1090 MHz *zachytit a provést úhybný manévr, zejména z těchto důvodů:*
 - a. Lehké bezpilotní letouny bez posádky provedou hbitější manévr nežli letadla s posádkou
 - b. Při úhybném manévru lehkého bezpilotního letadla dojde ke zdaleka menší spotřebě paliva a ztrátě času na osobu než v případě, že by úhybný manévr prováděl těžký letoun s posádkou
- b)** Ani v Evropě, ani v USA nepokrývá chystaná implementace ADS-B letouny kategorie *ultralight a malá GA letadla, která tak zůstanou pro UA z hlediska ADS-B neviditelná;*
 - a. Bude proto stále nutné pro UA dodržovat bezpečný perimetr v okolí letišť.
 - b. S ohledem na současné schopnosti strojového vidění a fotogrammetrie, kdy je možné detekovat objekt na v podstatě stejnou vzdálenost, na kterou by byl spatřen lidským okem, tak by v případě hrozby srážky a vzájemné sblížovací

rychlosti $69 \frac{m}{s}$ ($250 \frac{km}{h}$, $135 \frac{kt}{h}$) a detekci malého GA letadla (např. Cessny) na vzdálenost 750 m měl bezpilotní letoun více než 10 sekund na ověření detekce a provedení úhybného manévru. Úhybný manévr by měl být v rámci deseti sekund při současném vypnutí omezení pro akceleraci UAS bez problémů stihnutelný.

- c. V neposlední řadě je třeba dbát na křehkost konstrukce bezpilotních letounů, která vychází z nařízení EASA, aby v případě srážky došlo k co nejmenšímu možnému ohrožení a škodám jak druhému letadlu, tak třetím osobám na zemi.

5.1.1.1. *Využití frekvencí systému ADS-B*

Jak bylo předesláno v kapitole 1.2. o systému ADS-B, systém je navržen pro současné fungování ve dvou frekvenčních pásmech: 1090 MHz (1090 ES) a 978 MHz ¹²– druhé pásmo je funkční jen ve Spojených státech a je určeno pro menší letadla pohybující se do maximální letové hladiny 18 000 ft.

Této zdvojené funkcionality bych chtěl využít následovným způsobem:

- Aby velký objem bezpilotního provozu dále nezahlcoval hlavní frekvenci 1090 MHz, bezpilotní systémy by na této frekvenci pouze *přijímaly* informace o okolním civilním provozu
- Veškerá vzájemná komunikace mezi bezpilotními systémy by probíhala na v Evropě nepoužívané frekvenci 978 MHz:
 - Přičemž by bezpilotní systémy vybavené ADS-B IN na 1090 MHz předávaly informace o civilním provozu všem bezpilotním systémům v ekosystému 978 MHz, které by nebyly vybaveny ADS-B přijímačem schopným přijímat informace na hlavní frekvenci 1090 MHz

5.1.1.2. *Požadavky na modul ADS-B*

Vzhledem k výše zmíněnému musí modul ADS-B splňovat požadavky:

- Přijímat informace na frekvencích 1090 MHz i 978 MHz a vysílat na 978 MHz
- Co nejnižší energetický odběr
- Co nejmenší rozměry
- Co nejnižší hmotnost

¹² Návrh předkládám i přesto, že je využití pásma 978 MHz v současnosti nelegální.

5.1.2. Nekooperativní detekce letadel a statických překážek

V legislativě podle agentury EASA se počítá s pohybem lehkých bezpilotních letadel ve výšce do 120 m AGL. Hlavní výzvou pro antikolizní systém tedy zůstává spolehlivá detekce překážek nízko u země a detekce nekooperujících letadel, tedy letadel s posádkou i bez posádky, která nebudou vybavena systémem ADS-B OUT.

Možné scénáře vyžadující relativní lokalizaci jsou například:

- Signál GNSS, na kterém závisí systém ADS-B, nebude dostupný
- Výpadek systému ADS-B
- Operace UAS uvnitř budov a skladů
- Manévrování mezi budovami, vysokými stromy, v okolí vedení vysokého napětí a kolem dalších statických překážek
- Zamezení kolize s UAS nevybaveným ADS-B OUT
- Zamezení kolize s letadlem nevybaveným ADS-B OUT

V těchto a dalších případech je zapotřebí, aby antikolizní modul disponoval určitou formou nekooperativní relativní lokalizace (tedy polohou bezpilotního letadla vzhledem k okolnímu prostředí).

Jak již bylo nastíněno, možnosti relativní lokalizace jsou podle mého názoru dvě:

1. Analýza obrazu kamery – fotogrammetrie, nezbytnými komponenty je kamera a počítač
 - V současné době platí, že pomocí fotogrammetrie je možné detekovat objekt v podstatě na stejnou vzdálenost, na kterou by jej spatřilo lidské oko
2. Technologie LiDAR – nezbytnými komponentami je LiDAR; INS / IMS, GNSS; kamera a počítač

5.1.2.1. Požadavky na kameru

Aby mohla kamera v souladu s požadavky v úvodu do kapitoly 5 spolehlivě a včas detekovat okolní objekty – statické, nebo v letu – musí kamera disponovat:

- Rozlišením minimálně 1280 x 720 pixelů
- Frekvencí snímání minimálně 90 fps
- Kvalitním senzorem s vysokou citlivostí
- Objektivem:
 - s vysokou světelností pro rozlišení barev a detekci ve zhoršených světelných podmínkách; hodnota světelnosti max. F2.0
 - s širokým úhlem záběru (z angl. zkratky FOV) pro poskytnutí co nejširšího situačního povědomí, minimálně 160 ° horizontálně a 90 ° vertikálně
- rychlým rozhraním USB 3.0

Požadavek na vysoké rozlišení, kvalitní senzor a světelný objektiv jsou důležité zejména v obzvláště náročné detekci letícího malého bezpilotního letadla oproti nekонтрастnímu pozadí, tedy např. za oblačného dne.

Dosah detekce takové kamery nelze jednoznačně definovat, jelikož záleží na mnoha faktorech, např. na rozměrech a tvaru detekovaného objektu, světelných podmínkách a dalších. Spolehlivost detekce proto záleží velmi na experimentálním měření a postupném vyladování.

5.1.2.2. Požadavky na LiDAR

Požadavky na technologii LiDAR:

- Dosah detekce alespoň 250 m, viz úvaha k modelové sblížovací situaci v kapitole 5.1.1., bodě b)
- Úhel detekce minimálně 180 °
- Co nejvyšší možná frekvence snímání
- Co nejnižší hmotnost
- Co nejnižší energetický odběr

5.1.3. Komponenty tvořící jádro antikolizního systému

Jádro antikolizního systému tvoří rozhraní autopilota, které umožňuje zapojení některých prvků systému a poskytuje senzory IMU a senzor GNSS, které jsou klíčové pro fungování LiDARu. Dále je jádro tvořeno kapesním počítačem, který podobně jako autopilot poskytuje rozhraní pro zapojení některých systémových prvků a dále jejich současné napájení. Počítač poskytuje nezbytný výpočetní výkon pro zpracování velkého objemu dat z LiDARu a z kamery. Poslední důležitou komponentou je laserový senzor namířený kolmo k zemi, který do určité výšky poskytuje systému přesný údaj o výšce nad zemským povrchem.

5.1.3.1. *Požadavky na autopilota*

Autopilot musí splňovat požadavky:

- Open source
- Přímá integrace zvolené komponenty ADS-B
- Co nejnižší hmotnost
- Co nejmenší rozměry
- IMU a GNSS senzor jako zdroj dat pro LiDAR
 - IMU, neboli „Inertial Measurment Unit“ sestává z akcelerometru a gyroskopu

5.1.3.2. *Požadavky na palubní počítač*

Kapesní počítač je klíčovou komponentou celého systému. Je nezbytný pro zpracování poměrně velkého množství obrazových dat získaných z kamery a ještě většího množství dat z LiDARu, pokud je jím daný bezpilotní systém osazen. S ohledem na základní požadavky z kapitoly č. 5 jsou požadavky na palubní počítač následující:

- Co nejvyšší výpočetní výkon při co nejnižší spotřebě energie
- Co nejnižší hmotnost
- Co nejmenší rozměry
- Min. 3 vstupy USB

S ohledem na dostupnost hardwarové akcelerace pro strojové vidění by měl být PC rozšiřitelný o AI modul (viz. Kapitola 5.2.4.). Musí tedy disponovat slotem:

- M.2 slot

5.1.3.3. *Požadavky na senzor vzdálenosti AGL*

Laserový senzor je komponenta poskytující data o přesné výšce nad zemským povrchem, zejména užitečná v případech, kdy není dostupná výška ze systému GPS (např. uvnitř budov) a barometrická výška by byla pro tyto účely velmi nepřesná. Požadavky na laserový senzor jsou:

- Dosah alespoň poloviční z max. povolené výšky provozu AGL, tedy 60 m
- Co nejnižší hmotnost
- Co nejnižší energetický odběr
- Co nejmenší rozměry

5.2. Analýza a výběr jednotlivých komponent antikolizního systému

V návaznosti na definované požadavky všech komponent v předchozí kapitole přecházím v této kapitole na analýzu vybraných dostupných přístrojů každé komponenty a dále na základě požadavků přecházím k výběru nejvhodnějších zařízení z každé kategorie.

5.2.1. ADS-B

Na nařízení o povinném vybavení systémem ADS-B OUT vstupující v platnost v roce 2020 přirozeně zareagovali velcí výrobci leteckých přístrojů jako např. Garmin, Rockwell Collins, Honeywell a další, a zaplavili trh ADS-B přístroji. Žádná z těchto velkých zavedených firem však nenabízí micro ADS-B vhodné pro UAS. Příležitost k zaplnění díry na trhu naštěstí využilo několik nových firem, parametry produktů americké firmy uAvionix a polské firmy Aerobits předkládám v tabulce níže:

Tabulka 2 - srovnání dostupných ADS-B IN / OUT řešení vhodných pro UAS [36], [37]

	uAvionix ping 2020i	Aerobits TR-1W
Frekvence [MHz]	1090 a 978 IN / 978 OUT 1090 OUT S/W disabled	1090 IN / 1090 OUT
Hmotnost	26 g	30 g
Rozměry [mm]	40 x 25 x 16	45,5 x 28 x 10
Spotřeba energie	0,5 W / 6 – 14 V	1 W / 5 V
Funkce	SBAS GPS + barometr	SBAS GNSS + barometr
Rozhraní	GDL 90 / MAVLink	AERO / MAVLink
poznámky	Přímá integrace s autopilotem Pixhawk a produkty DJI	
Cena	47 372 CZK	15 296 CZK

Po důkladné analýze jsem vybral produkt od americké společnosti uAvionix, zejména z těchto důvodů (seřazené sestupně dle váhy v rozhodování):

- Produkt od firmy uAvionix přijímá a vysílá na frekvenci 978 MHz, která je v mém konceptu stěžejní (viz kapitola 5.1.1.1.)

- uAvionix má poloviční spotřebu energie
- uAvionix slibuje přímou integraci s autopilotem Pixhawk a produkty DJI
- uAvionix má lépe zpracovanou technickou dokumentaci
- uAvionix je lehčí a má kratší délku a šířku

5.2.2. LiDAR

Na základě přehledového článku z webu DroneZon ze srpna 2019 [12] (tedy 4 měsíce staré informace v době odevzdání této práce) jsem provedl analýzu nejlepších současně dostupných LiDAR technologií a došel k závěru, že žádný produkt na 100 % nevyhovuje stanoveným požadavkům. Vybral jsem proto dvě zařízení, která se požadovaným parametřům nejvíce blíží; jejich specifikace porovnávám v tabulce níže:

Tabulka 3 - srovnání produktů technologie LiDAR [38], [39]

	Riegl miniVUX-2UAV	LeddarTech Vu8
Hmotnost	1,6 kg	128,5 g
Rozměry	243 x 111 x 85 mm	73 x 40 x 65 mm
Spotřeba energie	18 W / 11 – 34 V	2 W
FOV	360 ° H / 90 ° V	100 ° H / 3 ° V
Dosah detekce	170 - 330 m při 100 Hz	215 m
Přesnost	15 / 10 mm	5 cm
Max. Frekvence snímání	100 / 200 Hz	100 Hz
Výbava	IMU & GNSS Applanix APX-20 UAV Stream dat via LAN-TCP/IP	
Cena	1 276 794 CZK	nezjištěno

Zásadní rozdíl mezi oběma zařízeními je účel, pro který byla navržena. Přístroj Riegl byl navržen speciálně pro integraci do bezpilotních systémů, na rozdíl od přístroje LeddarTech, který byl navržen pro použití v automobilech, čemuž odpovídá i značně omezený úhel záběru 100 ° horizontálně a pouhé 3 ° ve vertikálním směru. I přes jinak velmi působivé parametry, především nízkou hmotnost, kompaktní rozměry, nízkou spotřebu energie a slušný dosah detekce je kvůli malému úhlu záběru přístroj Vu8 nevyhovující. Švýcarský Riegl miniVUX-2UAV je tedy pro naše použití vhodnější, i přes velmi vysokou pořizovací cenu.

5.2.3. Kamera pro strojové vidění – pro fotogrammetrii

Kamera je na rozdíl od ADS-B a LiDARu na trhu obrovské množství. Pohybujeme se v kategorii průmyslových kamer a speciálně kamer pro strojové vidění, respektive z anglického ekvivalentu ‚computer vision‘ nebo také ‚machine vision‘. Stěžejním omezujícím prvkem při výběru byl požadavek na USB 3.0 rozhraní, které je z možností rozhraní pro přenos obrazu nejnovější, má nejvyšší propustnost a zároveň v sobě integruje jak přenos dat, tak napájení.

I přes poměrně jasně vymezené požadavky je na trhu nespočet podobných produktů od různých firem. Záleží tedy velmi na sympatiích k určité značce, nebo také například na softwarové podpoře a dostupnosti příslušenství, které konkrétní firma nabízí.

Tabulka níže porovnává vybrané kamery od německé firmy Basler, německé Matrix Vision a chorvatské Smartek. Všechny zmíněné firmy nabízejí kamery se stejnými senzory a srovnatelnými parametry, záměrně jsem však vybral kamery s různými senzory.

Tabulka 4 - srovnání kamer pro fotogrammetrii – strojové vidění [40], [41], [42]

	Basler acA2000-165uc	Matrix Vision mvBlueFOX3-2024C/G	Smartek UCC2061C
Senzor	Cmosis CMV2000	Sony IMX 174	Sony IMX 252
Velikost senzoru	2/3“	1 / 1.2“	1 / 1.8“
Technologie	Global shutter	CMOS, Global shutter	Global shutter
Rozlišení	2048 x 1088	1936 x 1216	2048 x 1536
Frekvence snímání	165 fps	164 fps	117 fps
Spotřeba	3,2 W	Max. 4 W	3,1 W
Rozměry	29,3 x 29 x 29 mm	39,8 x 39,8 x 37,7 mm	29 x 29 x 42 mm
Hmotnost	80 g	94 g	90 g
Rozhraní a poznámky	Konfigurační programy Přehledné stránky	Konfigurační program + SDK	Komplexní SDK pro Windows a Linux Podrobný manuál
Cena	25 190 CZK	nezjištěno	nezjištěno

Z možností uvedených výše je pro naše použití nejvhodnější kamera Basler acA2000-165uc, která vyniká:

- Senzorem od úzce specializované značky
- Senzorem o vel. 2/3“, s čímž souvisí vysoká citlivost
- Vysokou frekvencí snímání 165 fps
- Druhou nejnižší spotřebou 3,2 W
- Nejmenšími rozměry a nejnižší hmotností
- Komplexní podporou značky

Aby kamera jako celek mohla fungovat, potřebuje objektiv, konkrétně se závitem C-mount. Výběr z velkého množství objektivů usnadňuje požadavek na velký úhel záběru 160 ° H / 90 ° V a vysokou světelnost F2.0. V praxi takto široký úhel záběru splňují jen objektivy typu ‚fisheye‘, kterých není mnoho.

Ideálním objektivem vhodným pro senzory o velikosti 2/3“ je objektiv Matrix Vision MV-001814-5M-FU, jehož parametry uvádím v tabulce níže:

Tabulka 5 - parametry objektivu Matrix Vision [43]

	Matrix Vision MV-001814-5M-FU
Kompatibilní velikost senzoru	2/3“
Ohnisková vzdálenost	1.8
Světelnost objektivu	F1.4
Minimální vzdálenost objektu	100 mm
Úhel záběru (FOV)	185 ° H / 185 ° V
Hmotnost	135 g
Cena	15 000 CZK

Tento objektiv má vynikající hodnotu světelnosti a velmi široký a symetrický úhel záběru.

S mírnými kompromisy v některých parametrech jsem zvolil variantu kamery a objektivu v jednom celku. Produkt Mobius Maxi ActionCam od americké firmy, jehož parametry uvádím v tabulce na další straně:

Tabulka 6 - parametry kamery s integrovaným objektivem Mobius Maxi [44]

	Mobius Maxi ActionCam
Rozlišení / frekvence snímání	1920 x 1080 / 60 fps nebo 1280 x 720 / 120 fps
Světelnost objektivu	F1.5
Úhel záběru (FOV)	150 ° H / V
Rozměry	71 x 35 x 18 mm
Hmotnost	52 g
Integrovaná baterie	950 mAh
Rozhraní	USB 2.0
Cena	1 650 CZK

Zmíněné kompromisy jsou v počtu snímků za sekundu, kterých je při rozlišení FullHD pouze 60. Nicméně při rozlišení HD jich je již 120, což vstupní požadavek splňuje. Může se stát, že rozlišení HD bude pro fotogrametrii dostatečné, a také se může stát, že nebude – v takovém případě by, alespoň dle vstupních parametrů týmů MRS (viz kapitola 4.1.1.), mělo být 60 fps při rozlišení FullHD dostatečných. Pakliže by tomu tak nebylo, bylo by nutné zvolit předchozí variantu kamery a objektivu zvlášť.

Mobius Maxi má ale také nesporné výhody: První z nich je integrovaná baterie, která vystačí na přibližně 100 minut záznamu. Druhá z nich je čtvrtinová hmotnost, která činí pouhých 52 g včetně baterie oproti 215 g u předchozího setu. Posledním podstatným argumentem je pouze zlomková cena, která nečiní ani 4 % z ceny varianty kamery a objektivu zvlášť.

Diskutabilní je kvalita záznamu, která bude dle mých předpokladů oproti dedikované kameře a dedikovanému objektivu horší. Bude proto velmi záležet na konkrétní aplikaci. Vzhledem na slušné parametry a zlomkovou cenu je pro běžné účely kamera Mobius jasným vítězem.

5.2.3. Autopilot

Požadavkům výborně vyhovuje firma Pixhawk, která definuje hardwarový standard pro open source autopiloty. Kořeny firmy jsou na ETH v Zurichu, kde firma začala jako studentský projekt [45]. Parametry nejnovějšího produktu autopilota Pixhawk 4, který splňuje nový standard FMUv5, uvádím v tabulce níže:

Tabulka 7 - parametry autopilota Pixhawk [46]

	Holybro Pixhawk 4
Rozměry	84 x 44 x 12 mm
Hmotnost	15,8 g
Spotřeba energie	2,5 W
Další výbava	2x akcelerometr / gyroskop, barometr, GPS/GLONASS s magnetometrem
Podporovaná rozhraní	MAVLink
Cena	5 300 CZK

Autopilot má úctyhodně kompaktní rozměry a minimální hmotnost. Disponuje akcelerometrem a gyroskopem jakožto kvalitní jednotkou IMU od firmy Bosch a samostatným GPS/GLONASS přijímačem, které jsou oboje zapotřebí pro funkci LiDARu. Posledním argumentem je propojení s ADS-B uAvionix ping 2020i via MAVLink protokolu, tedy v následujícím schématu konektor 5: „Telemetry 2“



Obrázek 11 - popis jednotlivých vstupů / výstupů autopilota Pixhawk 4

5.2.4. Palubní počítač

Výběr počítače je nejpodstatnější. S výjimkou LiDARu se totiž jedná o nejtěžší a také nejdražší komponentu celého systému. Komponentu, na jejíž parametrech – tedy hmotnosti, spotřebě a výkonu závisí výkon celého antikorozního systému.

S ohledem na poměrně vysoké a přesně nedefinované výpočetní nároky pro fotogrammetrii, stejně tak jako vysoké výpočetní nároky pro palubní zpracování dat z LiDARu v reálném čase, je vhodné mít co možná největší výkonovou rezervu.

Je žádoucí, aby počítač podával co nejvyšší výkon při co nejnižší spotřebě energie. Výkon a spotřebu počítače obecně určuje zejména procesor (z angličtiny ‚central processing unit‘, neboli CPU), u něhož nás bude zajímat směrodatný údaj spotřeby TDP, neboli ‚thermal design profile‘. Dále platí, že výkon procesoru zpravidla roste a spotřeba klesá s vývojem – čehož je dosaženo všestranným vývojem a menším výrobním procesem samotného čipu. Je tedy vhodné vybrat počítač osazený nejnovější řadou procesorů, jejichž hlavními výrobci jsou Intel a AMD.

Na trhu existuje standard přímo od výrobce Intel; Intel NUC; mini všestranný počítač o rozměrech 10 x 10 cm [47] se standardní konektorovou výbavou, na kterou jsme zvyklí u běžných počítačů. Intel NUC je osazen procesory řady U, která je orientovaná na úspornost, a tedy i nízké nároky na chlazení. Z hlediska výkonu nás u firmy Intel zajímá nejvýkonnější řada i7 a písmenem U v názvu. Aktuálně firma Intel vydává 10 generaci procesorů nazvanou ‚Comet Lake‘. Bohužel, vydání platformy NUC s touto nejnovější řadou procesorů přímo od výrobce plánuje firma Intel na 12. 12. 2019, tedy týden po odevzdání této práce. Nicméně již teď jsou k dispozici uniklé specifikace procesoru Intel i7-10710U [48], které integrují do tabulky níže k produktu MSI – viz další odstavec.

Naštěstí ve světě hardwaru často platí, že výrobci třetích stran mají nejnovější technologie od výrobců procesorových a grafických výpočetních čipů k dispozici dříve, a mohou tak vydat svůj produkt na trh s předstihem – jako je tomu u firmy MSI, jejíž produkt společně s informacemi o nejnovějším procesoru analyzuji v tabulce níže.

Dlouholetý rival Intelu, firma AMD, nemá zatím v nabídce podobný vlastní malý počítač, jako má Intel. Nicméně jsou zprávy o tom, že by v blízké době měla vydat podobný, ale vlastní standard [49]. Naštěstí, podobně jako tomu bylo u firmy MSI a Intelu, výrobce PC komponent ASRock přišel na trh s velmi podobným standardem osazeným čipsetem AMD.

Obě dvě řešení porovnávám v tabulce na další straně:

Tabulka 8 - srovnání mini PC řešení s čipsetem od Intel vs. AMD [48], [50], [51], [52]

	MSI Cubi 10M	ASRock 4X4 BOX-V1000M
Model procesoru	Intel i7 – 10710U	AMD Ryzen V1605B
Spotřeba energie TDP max.	25 W	25 W
Počet fyzických vláken	6	4
Frekvence	1,1 – 4,7 GHz	2 - 3,6 GHz
Grafická karta	Intel UHD 0,3 - 1,15 GHz	AMD Vega 8 1,1 GHz
Operační paměť RAM	až 64 GB	Až 32 GB
Relevantní sloty	M.2 AI / SSD	M.2 AI / SSD
Výstupy USB	4 x USB 3.2, 2 x USB 2.0	3 x USB 3.1, 2 x USB 2.0
Další výstupy a výbava	HDMI, DisplayPort, LAN, WLAN	HDMI, 2 x DisplayPort, 2 x LAN, WLAN
Rozměry	124 x 124 x 54 mm	110 x 119 x 67 mm
Hmotnost	0,55 kg	0,7 kg
Cena	11 101 CZK	9 131 CZK

Vybral jsem podobnou modelovou řadu procesorů, které mají společné nejnižší dostupné TDP o 25 wattech. Na základě vyšší maximální frekvence a většího počtu výpočetních vláken lze předpokládat, že čipset od Intelu bude výkonnější, což potvrzují i data z benchmarku PassMark [53], kdy se procesor AMD umístil na 677 místě, kdyžto procesor Intel na 249. místě.

Spotřebu energie lze v této fázi jen předpokládat, bylo by nutné provést reálné měření u obou mini počítačů. Lze očekávat, že díky nižší možné frekvenci u procesoru Intel (Intel 1,1 vs. AMD 2 GHz) bude reálná spotřeba čipu od Intelu nižší.

Z hlediska výbavy konektory jsou oba počítače vybaveny velmi podobně. Z hlediska výpočetního výkonu a předpokládané spotřeby tedy jednoznačně vítězí řešení od Intelu. Kartami ale mohou zamíchat další faktory:

Ukáže-li se výpočetní výkon řešení od AMD jako dostačující a rozdíl ve spotřebě nízký, tak může být rozhodujícím faktorem pořizovací cena, která u produktu od ASRock činí 394 USD a u produktu MSI s procesorem Intel čerstvé ceny na australském trhu činí 479 USD. Dále se situace pravděpodobně změní, až firma AMD představí vlastní standard mini počítačů s plnohodnotnými procesory.



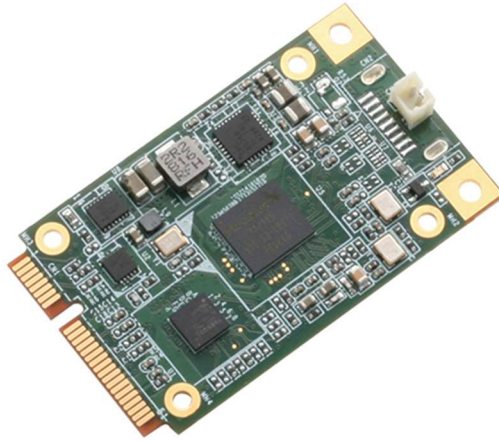
Obrázek 12 - MSI Cubi 10 M s čipsetem Intel 10. generace [50]

Prozatímní favorit je MSI Cubi 10 M, který kromě vyššího výpočetního výkonu a předpokládané nižší spotřeby exceluje také velmi nízkou hmotností (o 350 g lehčí než mateřský Intel NUC předchozí generace a o 150 g lehčí než PC od ASRock-u).

5.2.4.1. *Hardwarová akcelerace fotogrammetrie pro strojové vidění*

Dalším optimalizačním prvkem je PC komponenta speciálně navržená pro hardwarovou akceleraci zpracování obrazu za účelem strojového vidění. Takový čip vyvinula dceřiná firma společnosti Intel a nazvala jej Movidius Myriad X VPU (z angličtiny ,vision processing unit). Jedná se o výkonný specializovaný výpočetní čip, který převezme náročné úlohy zpracování obrazu od hlavního procesoru. V teorii by díky tomuto čipu mělo dojít ke poměrně značnému snížení celkové spotřeby, a to zejména díky efektivnějšímu rozložení výpočetních operací mezi CPU a VPU – kdy **spotřeba energie** čipu Myriad X činí pouze **1 watt** oproti 25 wattům v případě CPU při plné zátěži [54].

Řešení nabízí, kromě samotného Intelu v podobě zařízení ve formě USB ,flashky', firma **AAEON** nazvané **AI Core X** v podobě miniaturní destičky (51 x 30 mm) zasouvatelné přímo do M.2 slotu na základní desce PC [55].



Obrázek 13 - AI modul pro hardwarovou akceleraci zpracování obrazu do M.2 slotu [55]

Je třeba vyzdvihnout nízkou **pořizovací cenu**, která se v době odevzdání práce pohybuje kolem **70 USD** [56]. Cost / Benefit ratio z hlediska výsledné spotřeby energie antikolizního systému by tedy mohlo být značné.

Dále je také možné, že kombinovaný výkon CPU a VPU pro výpočty a zpracování obrazu bude natolik vysoký, že by stačilo mini PC osazené nižší, méně výkonnou, a tedy levnější řadou procesorů Intel / AMD.

Cost / benefit ratio by tak bylo značné nejen z hlediska výsledné spotřeby energie, ale i z hlediska pořizovací ceny palubního PC. Tato miniaturní komponenta hardwarové akcelerace by se tedy projevila v ‚**cost & energy / benefit ratio**‘.

5.2.5. Senzor vzdálenosti AGL

Senzorů, které by měly dosah detekce alespoň 60 m při zachování kompaktních rozměrů a nízké hmotnosti, není mnoho. Vybral jsem senzory dvou typů, které se liší technologií měření, na které závisí další parametry – v tabulce níže:

Tabulka 9 - srovnání dostupných senzorů vzdálenosti AGL [57], [58]

	Terabee TeraRanger Evo 60m	Pepperl+Fuchs VDM70-250-R/20/87/160
Technologie měření	LED Time of Flight (ToF)	Laser Pulse Ranging (PRT)
Dosah	0,5 – 60 m	0,5 – 250 m
Spotřeba energie	5 V / 90 – 330 mA – 1,65 W	18 – 30 V / 190 mA
Hmotnost	12 g	230 g
Rozměry	39 x 39 x 22 mm	93 x 95 x 42 mm
Rozhraní	Data + energie USB 2.0, Pixhawk ready	RS 422, SSI
Cena	3 166 CZK	55 190 CZK

Již z ceny je patrné, že se jedná o produkty zcela jiných kategorií. Terabee je produkt určený přímo pro použití bezpilotními letadly, kdyžto Pepperl+Fuchs je produkt obecněji zaměřený pro jakékoli strojové použití. P+F má dosah až 250 m, který by stačil do dvojnásobné výšky AGL, než která je plánovaná v nově vznikajícím vzdušném prostoru pro bezpilotní letadla.

Ve všech ostatních parametrech ovšem Terabee vyhrává, zejména v oblasti miniaturních rozměrů, téměř nepostřehnutelné hmotnosti, nízké spotřeby a v neposlední řadě i zlomkové ceny.

5.3. Implementace antikolizního systému

V této kapitole se budu zabývat implementací komponent antikolizního systému, tak jak jsou popsány v kapitole 5.2. na konkrétní bezpilotní letadla, a integrací těchto komponent do korespondujícího bezpilotního systému.

5.3.1. Parametry testovacích bezpilotních systémů

Bezpilotními systémy mého návrhu jsou fakulní, respektive univerzitní:

- Tarot X6
 - Fakulta stavební; Katedra hydromeliorací a krajinného inženýr.; doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.
- Telink 720 Grid
 - Fakulta elektrotechnická; Centrum umělé inteligence; Ing. Milan Rollo, Ph.D.
- DJI S900 Pro
 - Fakulta dopravní; Ústav soudního znaleství v dopravě; Ing. Zdeněk Svatý, Ph.D.

Tabulka 10 - srovnání parametrů testovacích UAS [59], [60], [61], [62]

	Tarot X6	Telink 720 Grid	DJI S900 Pro
Základní hmotnost s bateriemi	6 500 g	3 000 g	3 300 g
Technická MTOM	12 000 g	5 200 g	8 200 g
Legislativní MTOM dle ÚCL	8 000 g	4 000 g	7 000 g
Užitečné zatížení	5 500 g	2 200 g	4 900 g
Kapacita / jmenovité napětí baterie	16 000 mAh / 22,2 V 6 ti článků	16 000 mAh / 22,2 V 6 ti článků	12 000 mAh / 21,6 V 6 ti článků
Čas letuschopnosti	10 min @ 9,5 kg	20 min @ 5,2 kg 30 min @ 3 kg	18 min @ 6,8 kg
Výbava	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilizovaný kamerový držák • Výkonnější motory 5008 340kv 	<ul style="list-style-type: none"> • Autopilot Pixhawk 1 • Stabilizovaný kamerový držák 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilizovaný kamerový držák InfinityMR-S s nosností 800 g

5.3.2. Tarot X6

Se základní hmotností 6 500 g je bezpilotní letadlo Tarot X6 je z testovaných hexakoptér nejtěžší, zároveň s tím koresponduje také nejvyšší užitečné zatížení 5 500 g. Hexakoptéra disponuje šestičlánkovou 16 000 mAh baterií o napětí 22,2 V a je vybavena tříosým stabilizovaným držákem pro upevnění kamery pod trupem. Tato hexakoptéra s přehledem unese LiDAR a všechny ostatní komponenty tak, jak jsou specifikovány v kapitole 5.2. Jejich soupis je v tabulce níže:

Tabulka 11 - komponenty antikolizního systému a jejich vybrané parametry pro Tarot X6 [kap. 5.2.], [38]

	název	hmotnost [g]	rozměry [mm]	Cena dle platných kurzů k 11/2019 [CZK]	poznámky
ADS-B	uAvionix ping 2020i	26	40 x 25 x 16	47372	integrace s Pixhawk a DJI
LiDAR	Riegl miniVUX-2UAV	1600	243 x 111 x 85	1276794	stream dat via LAN
LiDAR držák	Riegl integration kit 600	700	Informace nedostupné	nezjištěno	
kamera	Mobius Maxi ActionCam	52	71 x 35 x 18	1650	
autopilot	Pixhawk 4	16	84 x 44 x 12	5300	2 x IMU, barometr, GPS
palubní PC	MSI Cubi 10M	550	124 x 124 x 54	11101	
hardwarová akcelerace	Aaeon AI Core X	15	uvnitř PC	1622	cost & energy / benefit
laserový senzor	Terabee TeraRanger Evo 60m	12	39 x 39 x 22	3166	energie + data do PC
celkem		2971		1299633	

Z tabulky je patrné, že celková hmotnost požadovaných komponent pro tento stroj činí bezmála 3 kilogramy, a to včetně držáku pro LiDAR, který přidal na hmotnosti nemalých 700 gramů. Prostor pro optimalizaci hmotnosti je minimální, vzhledem k již tak vybraným velmi lehkým komponentám. Snad jen právě tento držák by bylo možné nechat vyrobit na míru z lehčích materiálů (např. karbonu) a ušetřit několik stovek gramů. Nicméně i s těžkým držákem LiDARu činí hmotnost komponent antikolizního systému 54 % z maximálního užitečného zatížení.

Dle informací, které jsem sehnal od zástupce firmy Riegl v ČR, činí pořizovací cena LiDARu 50 000 EUR, tedy téměř 1,3 mil. Kč. Z pohledu ceny by použití LiDARu jen pro primární účely antikolizního systému bylo zcela nemyslitelné. LiDAR by musel být primárně výdělečný a bohužel neexistuje mně známý konkurenční produkt splňující požadavky v kapitole 5.2.2. Druhou nejdražší komponentou je mikro ADS-B modul uAvionix, u kterého se naštěstí nabízí varianta snížení pořizovací ceny díky konkurenci.

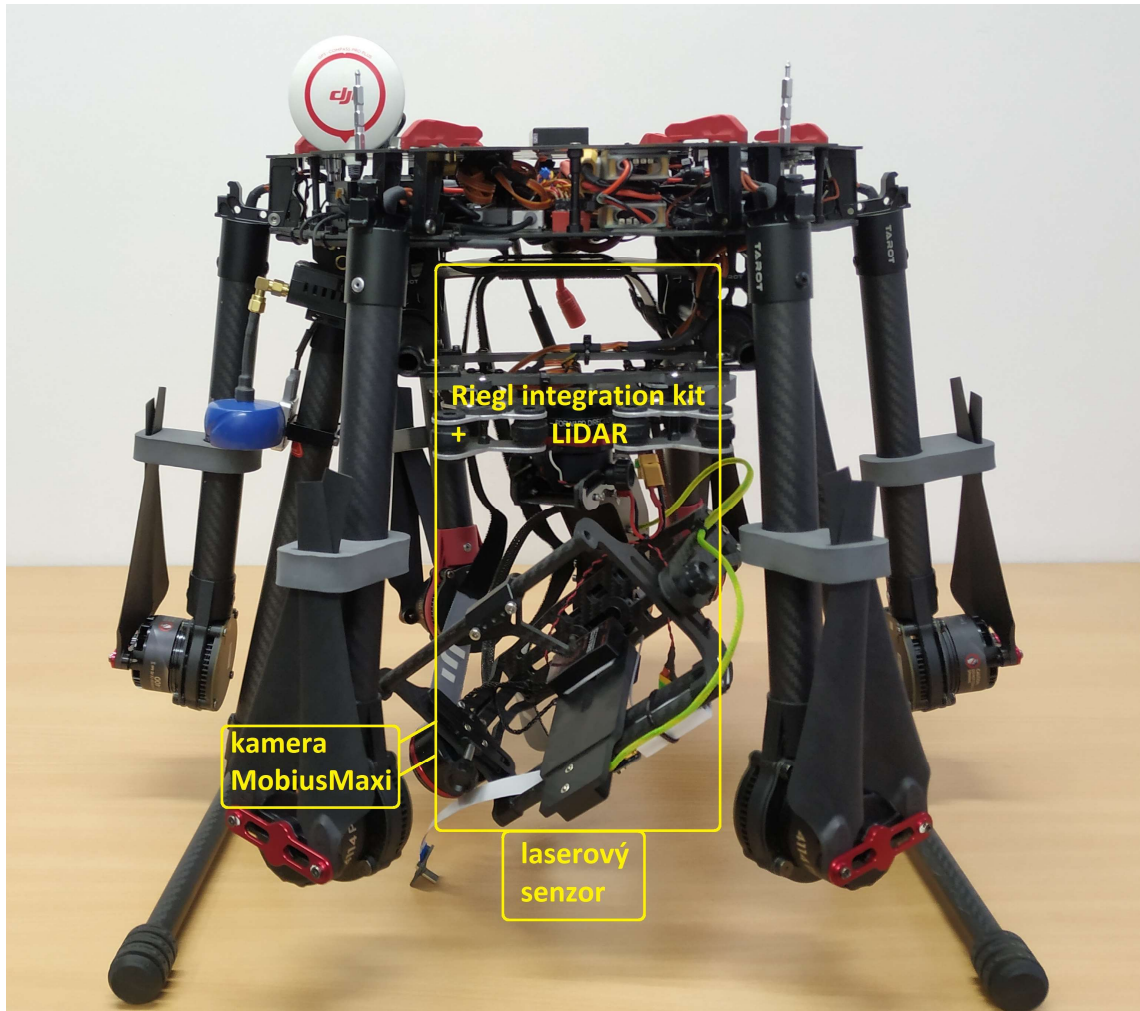
Tato optimalizace by spočívala v podobě požadavku přidání 978 MHz IN / OUT frekvence do mikro ADS-B od polského výrobce Aerobits, jehož cena je přibližně třetinová. Pokud by byl výrobce schopný frekvenci přidat (ať již produkt hardwarově upravit, nebo frekvenci pouze softwarově odemknout), znamenal by tento krok **úsporu téměř 32 tis. Kč.**

Z hlediska umístění komponent je jasné, že stabilizovaný kamerový držák, kterým je Tarot X6 vybaven, bude muset uvolnit místo pro velký a těžký LiDAR. Pro optimální funkci by měl být LiDAR vybaven také kamerou, která by měla být umístěna po boku zařízení. Firma Riegl nabízí vlastní řešení LiDARu včetně kamery, jehož cena je ale přehnaně vysoká. Jako výrazně levnější řešení suplující kamery poslouží kamera Mobius Maxi. Za účelem připevnění této kamery po bok LiDARu bude pravděpodobně třeba sestavit jednoduché rameno, které bude kameru držet.

Podobně jako kameru potřebuje LiDAR pro své fungování také data z INS / IMU, tedy z akcelerometru a gyroskopu. Firma Riegl nabízí jednotku IMU, která není zejména kvůli vysoké hmotnosti 400 gramů a vysoké ceně vhodná. Raději bych volil složitější cestu „feedu“ dat IMU z autopilota Pixhawk, který je IMU nativně vybaven.

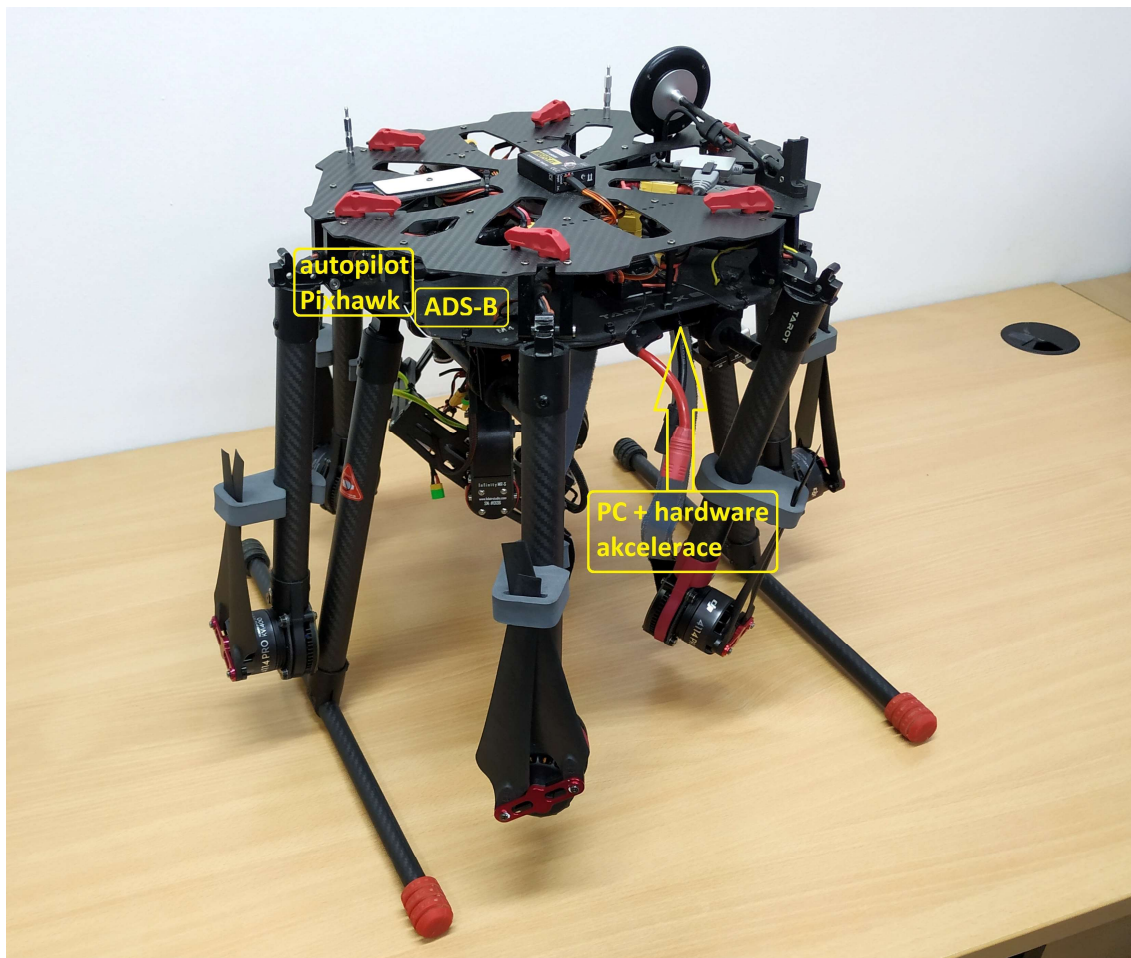
5.3.2.1. Umístění komponent antikolizního systému na Tarot X6

Navrhované umístění schematicky zakresluji do fotografií:



Obrázek 14 - Tarot X6 přední pohled a schéma umístění komponent systému pod trup UA [vlastní foto]

Na pohledu zepředu je schematicky znázorněno umístění držáku na LiDAR, uchycený LiDAR a z tohoto držáku vedené pomocné rameno, které drží kameru. Laserový senzor je nalepen na spodní stranu LiDARu.

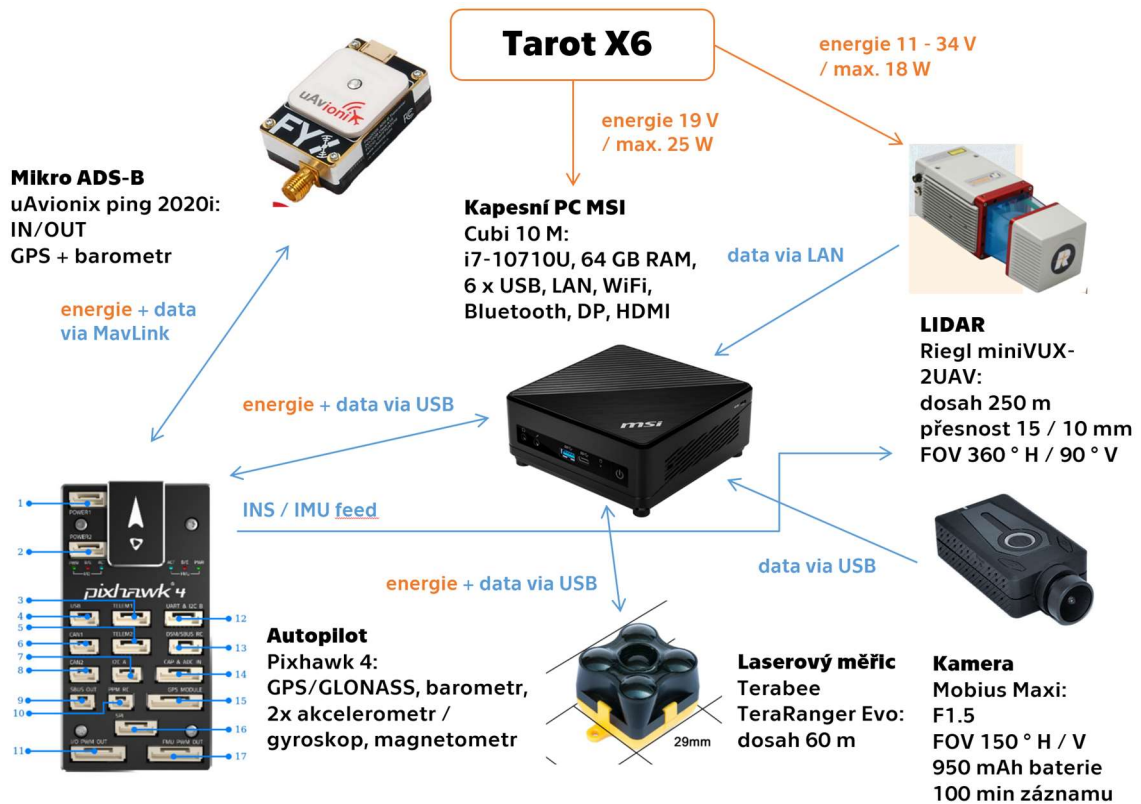


Obrázek 15 - Tarot X6 zadní pohled a schéma umístění komponent pod trup a dovnitř UA [vlastní foto]

Na pohledu zezadu je schematicky znázorněno umístění modulů mikro ADS-B a autopilota Pixhawk dovnitř těla hexakoptéry a dále umístění palubního počítače, který bych umístil ze spodní strany trupu za LiDAR. Výhodou těchto umístění je částečná ochrana komponent před počasím samotným tělem bezpilotního letadla.

5.3.2.2. Schéma propojení komponent antikalizního systému pro Tarot X6

Pro lepší orientaci níže uvádím schéma propojení jednotlivých komponent antikalizního systému pro hexakoptéru Tarot X6.



Obrázek 16 - schéma propojení komponent antikalizního systému Tarot X6 [vlastní tvorba]

5.3.3. Telink 720 Grid

Telink 720 Grid je z trojice hexakoptér nejlehčí. Celkové technické užitečné zatížení činí 2200 g a stroj disponuje šestičláňkovou 16 000 mAh baterií o napětí 22,2 V. Hexakoptéra je stejně jako ostatní vybavena stabilizovaným kamerovým držákem, a navíc autopilotem Pixhawk 1, díky čemuž se ušetří pořizovací náklad na autopilota činící 5300 Kč. S ohledem na maximální užitečné zatížení je jasné, že stroj neunese LiDAR, a tak bude nutné pro detekci překážek a nekooperujících letadel využít pouze fotogrammetrii – tedy možnost č. 1, tak, jak je popsána v kapitole 5.1.2. Soupis vybraných komponent z kapitoly 5.2. je v tabulce níže:

Tabulka 12 - komponenty antikolizního systému a jejich vybrané parametry pro Telink 720 Grid [kap. 5.2.]

	název	hmotnost [g]	rozměry [mm]	Cena dle platných kurzů k 11/2019 [CZK]	poznámky
ADS-B	uAvionix ping 2020i	26	40 x 25 x 16	47372	integrace s Pixhawk a DJI
kamera	Mobius Maxi ActionCam	52	71 x 35 x 18	1650	
palubní PC	ASRock 4X4 BOX-V1000M	700	110 x 119 x 67	9131	
hardwarová akcelerace	Aaeon AI Core X	15	uvnitř PC	1622	cost & energy / benefit
laserový senzor	Terabee TeraRanger Evo 60m	12	39 x 39 x 22	3162	energie + data do PC
celkem		2971		62937	

Oproti ‚plné‘ konfiguraci u výkonnější a těžší hexakoptéry Tarot X6 byl vyřazen těžký LiDAR, jeho držák a autopilot Pixhawk, kterým je Telink již vybaven. Výsledná hmotnost komponent pro tento stroj činí díky tomu velmi nízkých 805 g, tedy méně než polovinu z technického užitečného zatížení, a stále se vejde do limitu užitečného zatížení omezeného při registraci na ÚCL. Vzhledem k nižším výpočetním nárokům samotné fotogrammetrie jsem záměrně i přes navýšení hmotnosti o 145 g použil méně výkonné řešení počítače od firmy ASRock s procesorem od AMD. Hardwarová akcelerace pro výpočetní rezervu a energetickou úsporu však zůstává zachována. Díky tomuto malému kompromisu ve výkonu a hmotnosti došlo k finanční úspoře 2000 Kč. Samozřejmě, pokud by se ukázal kombinovaný výkon jako nedostačující nebo kdyby bylo potřeba snížit hmotnost, je možné osadit PC s procesorem od Intelu, přičemž by hmotnost klesla na 660 g a cena vzrostla na 65 000 Kč.

I přes úspory se dle platných kurzů měn k 11/2019 výsledná cena komponent vyšplhala na nemalých 63 000 Kč, přičemž nejdražší je mikro ADS-B modul uAvionix. Stejně jako u Tarotu X6 se nabízí optimalizace této ceny v podobě vybrání produktu od konkurenční polské firmy Aerobits a přidání frekvencí výrobcem, nebo někým jiným. Tento krok by se odrazil v úspoře téměř 32 tis. Kč. Výsledná cena komponent by tedy **klesla na přibližně 31 tis. Kč.**

5.3.3.1. Umístění komponent antikolizního systému na Telink 720 Grid

Navrhované umístění schematicky zakresluji do fotografie:



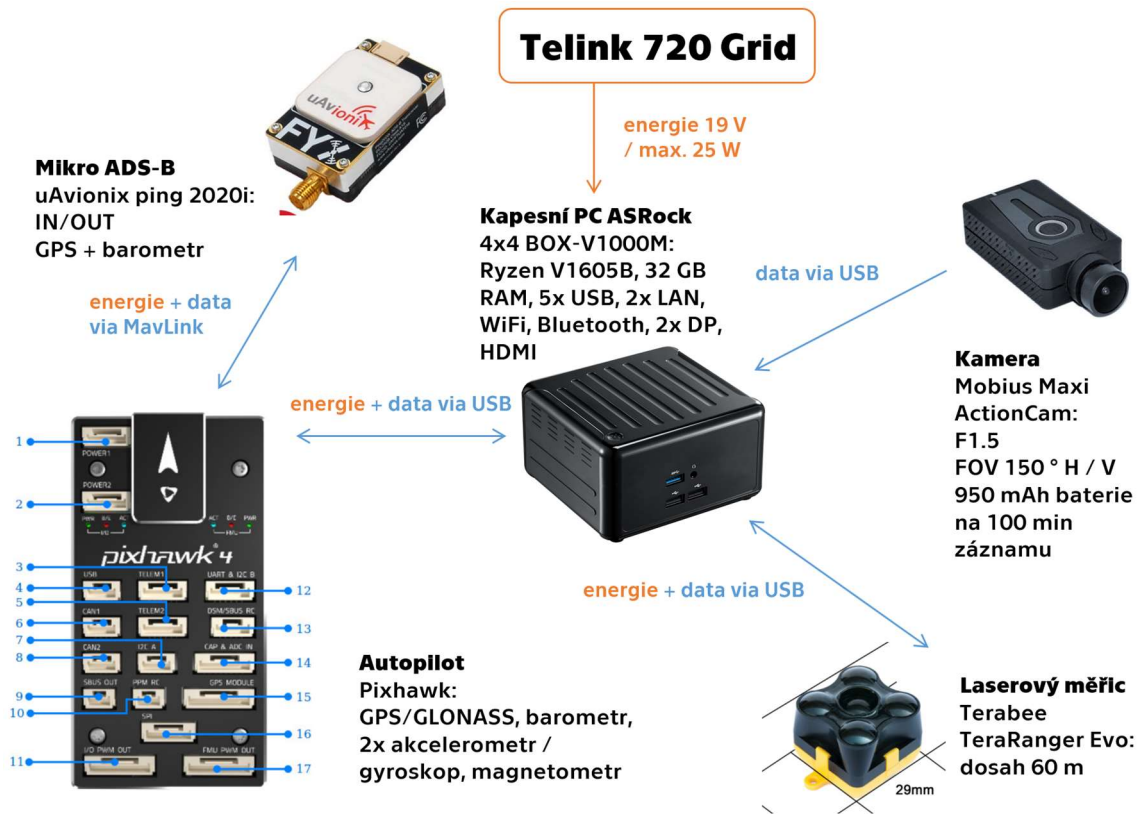
Obrázek 17 - Telink 720 Grid předo-boční pohled a schéma umístění komponent systému [59]

Dle manuálu Telink je voděodolná kabina navržena tak, aby se do ní kromě standardního vybavení vešlo i přídavné PC [60]. Palubní PC ASRock o rozměrech 110 x 119 x 67 a mikro ADS-B modul tedy umístím dovnitř kabiny.

Kamera MobiusMaxi bude umístěna ve stabilizovaném tříosém držáku, kterým je tento bezpilotní systém vybaven, a laserový senzor bude přilepen na spodní stranu trupu hexakoptéry za kameru.

5.3.3.2. Schéma propojení komponent antikolizního systému pro Telink 720 Grid

Pro lepší orientaci níže uvádím schéma propojení jednotlivých komponent antikolizního systému pro hexakoptéru Telink 720 Grid.



Obrázek 18 - schéma propojení komponent antikolizního systému Telink 720 Grid [vlastní tvorba]

5.3.4. DJI S900 Pro

DJI S900 Pro je poměrně velká hexakoptéra, která s přehledem unese dvakrát sama sebe, maximální technické užitečné zatížení činí 4900 g. Hexakoptéra disponuje šestičláčkovou 12 000 mAh baterií o napětí 21,6 V a je vybavena tříosým stabilizovaným držákem pro upevnění kamery pod trupem. Tato hexakoptéra s přehledem unese LiDAR a všechny ostatní komponenty tak, jak jsou specifikovány v kapitole 5.2. Jejich soupis je v tabulce níže:

Tabulka 13 - komponenty antikolizního systému a jejich vybrané parametry pro DJI S 900 Pro [kap. 5.2.]

	název	hmotnost [g]	rozměry [mm]	Cena dle platných kurzů k 11/2019 [CZK]	poznámky
ADS-B	uAvionix ping 2020i	26	40 x 25 x 16	47372	integrace s Pixhawk a DJI
LiDAR	Riegl miniVUX-2UAV	1600	243 x 111 x 85	1276794	stream dat via LAN
LiDAR držák	Riegl integration kit 600	700	Informace nedostupné	nezjištěno	
kamera	Mobius Maxi ActionCam	52	71 x 35 x 18	1650	
autopilot	Pixhawk 4	16	84 x 44 x 12	5300	2 x IMU, barometr, GPS
palubní PC	MSI Cubi 10M	550	124 x 124 x 54	11101	
hardwarová akcelerace	Aaeon AI Core X	15	uvnitř PC	1622	cost & energy / benefit
laserový senzor	Terabee TeraRanger Evo 60m	12	39 x 39 x 22	3166	energie + data do PC
celkem		2971		1299633	

Z tabulky je patrné, že celková hmotnost požadovaných komponent pro tento stroj činí bezmála 3 kilogramy, a to včetně držáku pro LiDAR, který přidal na hmotnosti nemalých 700 gramů. Prostor pro optimalizaci hmotnosti je minimální vzhledem k již tak vybraným velmi lehkým komponentám. Snad jen právě tento držák by bylo možné nechat vyrobit na míru z lehčích materiálů (např. karbonu) a ušetřit několik stovek gramů. Nicméně i s těžkým držákem LiDARu činí hmotnost komponent antikolizního systému 61 % z maximálního užitečného zatížení.

Totožně jako u Tarotu X6, který je osazen stejnými komponentami, i zde je pořizovací cena LiDARu pro primární použití ‚detect and avoid‘ systému velmi vysoká a rovněž se nabízí totožný výběr ADS-B od polské Aerobits a přidání frekvence výrobcem, případně někým jiným – což by se odrazilo v **úspoře téměř 32 tis. Kč.**

Z hlediska umístění komponent je jasné, že stabilizovaný kamerový držák, kterým je Tarot X6 vybaven, bude muset uvolnit místo pro velký a těžký LiDAR. Pro optimální funkci by měl být LiDAR vybaven také kamerou, která by měla být umístěna po boku zařízení. Firma Riegl nabízí vlastní řešení LiDARu včetně kamery, jehož cena je ale velmi vysoká. Jako výrazně levnější řešení spolupracující kamery poslouží kamera Mobius Maxi. Za účelem připnutí této kamery po bok LiDARu bude pravděpodobně třeba sestavit jednoduché rameno, které bude kameru držet.

Podobně jako kameru potřebuje LiDAR pro své fungování také data z INS / IMU, tedy z akcelerometru a gyroskopu. Firma Riegl nabízí jednotku IMU, která není zejména kvůli vysoké hmotnosti 400 gramů a vysoké ceně vhodná. Raději bych volil složitější cestu ‚feedu‘ dat IMU z autopilota Pixhawk, který je IMU nativně vybaven.

5.3.4.1. Umístění komponent antikolizního systému na DJI S900 Pro

Navrhované umístění schematicky zakresluji do fotografie:

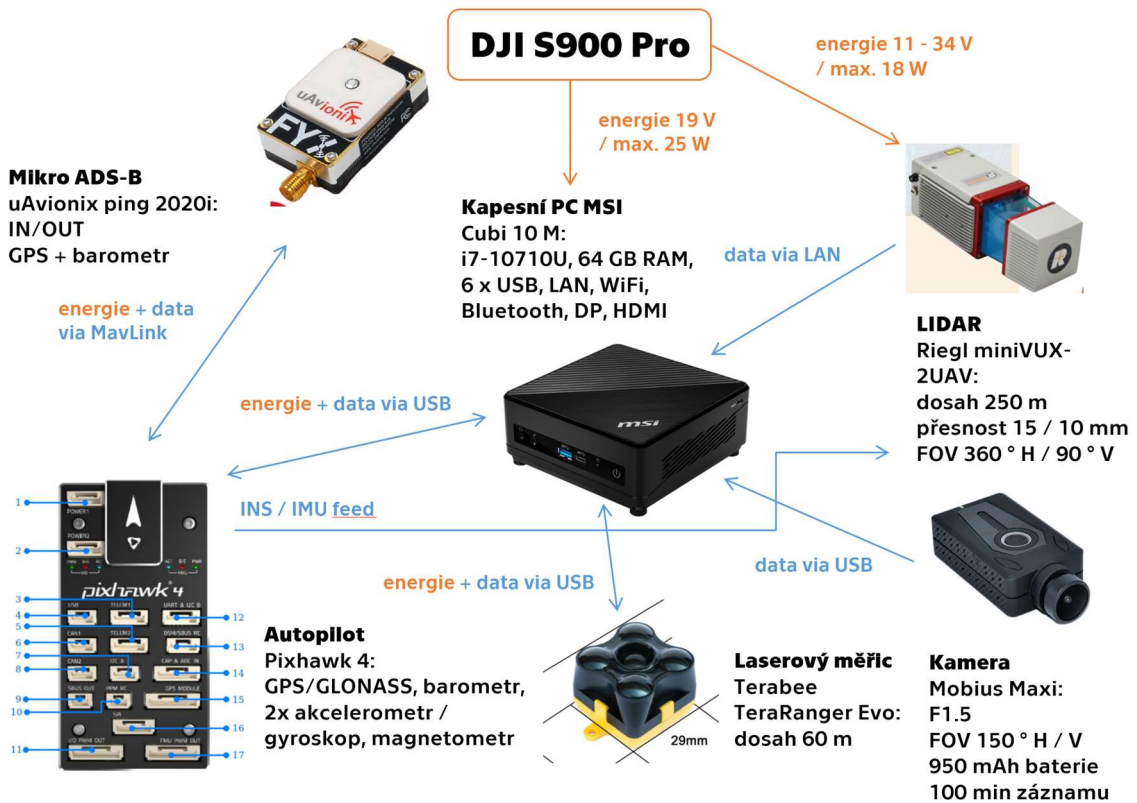


Obrázek 19 - DJI S900 Pro přední pohled a schéma umístění komponent systému [63]

Umístění komponent je totožné jako u velmi podobné hexakoptéry Tarot X6, tedy: LiDAR je umístěn pod trupem v dedikovaném držáku, z držáku LiDARu je vedeno pomocné rameno, které drží kameru. Laserový senzor je nalepen na spodní stranu LiDARu. PC s Aaeon AI Core X uvnitř je umístěn na spodní stranu trupu za LiDAR, takže je tím částečně chráněn před špatným počasím. Komponenta ADS-B a autopilot Pixhawk jsou umístěny na volná místa dovnitř trupu, taktéž částečně chráněny před počasím.

5.3.4.2. Schéma propojení komponent antikalizního systému pro DJI S900 Pro

Pro lepší orientaci níže uvádím schéma propojení jednotlivých komponent antikalizního systému pro hexakoptéru DJI S900 Pro.



Obrázek 20 - schéma propojení komponent antikalizního systému DJI S900 Pro [vlastní tvorba]

5.4. Změna parametrů a výkonů UAS po implementaci antikolizního systému

Po spočítání zvýšení hmotnosti a celkové spotřeby energie bezpilotního systému po implementaci antikolizního systému v řešení jsem považoval za velmi zajímavé spočítat nový předpokládaný čas letuschopnosti s antikolizním systémem na palubě bezpilotního letadla. Základní parametry testovacích bezpilotních systémů, jejich osazení komponentami a hmotnosti a spotřeby energie jednotlivých komponent přebírám z kapitoly 5.2. a 5.3. a uvádím v tabulce níže:

Tabulka 14 - Základní parametry bezpilotních systémů a komponent antikolizního systému [kap. 5.2., 5.3.]

	Tarot X6		Telink 720 Grid		DJI S900 Pro	
Technická MTOM	12 000 g		5 200 g		8 200 g	
Užitečné zatížení	5 500 g		2 200 g		4 900 g	
kapacita / jmenovité napětí baterie	16 000 mAh / 22,2 V		16 000 mAh / 22,2 V		12 000 mAh / 21,6 V	
	hmotnost [g]	max. spotřeba [W]	hmotnost [g]	max. spotřeba [W]	hmotnost [g]	max. spotřeba [W]
ADS-B	26	0,5	26	0,5	26	0,5
LiDAR	1600	18	není osazen		1600	18
LiDAR držák	700	0			700	0
kamera	52	samostatná baterie	52	samostatná baterie	52	samostatná baterie
autopilot	16	2,5	integrován z výroby (neprojeví se)		16	2,5
palubní PC	550	25	700	25	550	25
hardwarová akcelerace	15	1	15	1	15	1
laserový senzor	12	1,65	12	1,65	12	1,65
celkem	2971	48,65	805	28,15	2971	48,65

5.4.1. Čas letuschopnosti po implementaci antikolizního systému

Potřebná vstupní data pro výpočet uvádím v tabulce níže:

Tabulka 15 - vstupní data pro výpočet času letuschopnosti s antikolizním systémem na palubě letadla

	Tarot X6	Telink 720 Grid	DJI S900 Pro
kapacita / jmenovité napětí baterie	16 000 mAh / 22,2 V	16 000 mAh / 22,2 V	12 000 mAh / 21,6 V
čas letuschopnosti minimální - maximální	10 min @ 9,5 kg	20 min @ 5,2 kg 30 min @ 3 kg	18 min @ 6,8 kg
hmotnost komponent / užitečné zatížení	0,54	0,37	0,61
celkový příkon komponent [W]	48,65	28,15	48,65

Výrobce Tarot udává časy letů v přehledné tabulce pro různé kapacity akumulátorů a pro různé vzletové hmotnosti. Počítám tedy rovnou s časem 10 minut pro celkovou hmotnost hexakoptéry o 9,5 kilogramech, včetně komponent na palubě.

Oproti tomu výrobce DJI uvádí pouze jeden čas 18 minut pro vzletovou hmotnost 6,8 kg. Celková hmotnost hexakoptéry včetně komponent na palubě činí 6,3 kg – vzhledem k tomu, že čas 18 minut udávaný čínskou DJI platí pro vznášení se nad zemí, nikoli pro let, tak jej budu považovat pro výpočty za dostatečně přesný. U těchto dvou letadel odpadá 1. krok výpočtu.

Kroky výpočtu:

1. Spočítám čas letuschopnosti UA s přidanou zátěží komponent antikolizního systému

$$\text{čas letuschopnosti max.} - \left[\frac{\text{hmotnost komponent}}{\text{užitečné zatížení}} \cdot (\text{čas letuschopnosti max.} - \text{min.}) \right] \quad (1.)$$

2. Spočítám odebíraný proud UA s přidanou zátěží

$$\frac{\text{kapacita baterie}}{1.} \quad (2.)$$

3. Spočítám celkový odebíraný proud – tedy včetně proudu odebíraného komponentami antikolizního systému

$$2. + \frac{\text{celkový příkon komponent}}{\text{jmen. napětí baterie}} \quad (3.)$$

4. Spočítám předpokládaný čas letuschopnosti s přidanou zátěží a odběrem proudu komponentami antikolizního systému

$$\frac{\text{kapacita baterie}}{3.} \quad (4.)$$

Výpočet jsem provedl v tabulkách Excel. Výsledky přikládám v tabulce níže:

Tabulka 16 - Výsledky výpočtů předpokládaných časů letuschopnosti s přidanou zátěží a odběrem energie antikolizního systému

	Tarot X6	Telink 720 Grid	DJI S900 Pro
1. čas letuschopnosti UA s přidanou zátěží	10 min	26 min 13 sec	18 min
2. odebíraný proud UA s přidanou zátěží komponent	96,4 A	36,6 A	40 A
3. celkový odebíraný proud (včetně proudu odebíraného komponentami)	98,6 A	37,9 A	42,2 A
4. nový předpokládaný čas letuschopnosti	9 min 44 sec	25 min 20 sec	17 min 2 sec
Pokles času letuschopnosti	3 %	3 %	5 %

Výsledky z tabulky ukazují na nárůst spotřeby energie o 2,2 A u hexakoptér Tarot X6 a DJI S900 Pro, které jsou vybaveny shodnými komponentami. Nárůst spotřeby energie u hexakoptéry Telink činí jen 1,3 A.

Nejvíce se však na času letuschopnosti podepsala přidaná hmotnost komponent, nikoli jejich spotřeba. Přidaná spotřeba energie komponent se podílela na poklesu času letuschopnosti jen o 3 %, respektive 5 %. Tímto dokazuji, že mnou navržený systém je velice úsporný, což byl jeden ze základních požadavků.

6. Diskuse a závěr

V úvodu jsem zmínil různorodé možnosti uplatnění bezpilotních systémů. Na úvod jsem navázal definováním základních pojmů a vysvětlením principů fungování a systémových možností technologií ADS-B a LiDAR, se kterými jsem pracoval v praktické části.

V kapitole 2 jsem klasifikoval bezpilotní systémy podle nejnovějších nařízení EASA. Nařízení jsem zanalyzoval, propojil a právní jazyk přeložil do přístupnější formy. V kapitole jsem sobě i čtenářům poskytl mezinárodní přehled hlavních evropských a amerických programů, které se týkají ‚detect and avoid‘, a související integrace bezpilotních systémů do sdíleného vzdušného prostoru.

V kapitole 4 jsem přiblížil výzkum týmu Multi-robot systems Ing. Martina Sasky z Fakulty elektrotechnické a úspěch téhož týmu v prestižní mezinárodní soutěži MBZIRC 2017, ve které se tým umístil celosvětově na předních příčkách.

Nejen z výzkumu představeného v kapitole 4, ale z veškerých poznatků jsem čerpal v kapitole 5 při návrhu antikolizního systému. Funkce systému jsem rozdělil do dvou rovin – kooperativní detekce letadel s posádkou a detekce překážek a nekooperujících letadel, dle těchto rovin se odvíjel návrh ve zbytku kapitoly. Stanovil jsem požadavky na jednotlivé komponenty systému, provedl jsem analýzu dostupných produktů z každé kategorie a z nich vybral nejvhodnější. Na závěr jsem v teoretické rovině implementoval vybrané komponenty na tři odlišné univerzitní hexakoptéry a spočítal jsem, jakým způsobem by se implementace antikolizního systému podepsala na času letuschopnosti hexakoptér.

Uvedení do provozu předchází mnoho hodin práce a potenciálních změn. Moduly systému je v dalších krocích potřeba fyzicky propojit a vymyslet a naprogramovat pravidla pro jejich harmonické fungování. Například vypnutí vestavěných limitů pro akceleraci v případě úhybného manévru.

V rámci optimalizace se nabízí prostor pro softwarovou úsporu energie; u všech tří hexakoptér jsou k dispozici zdvojené zdroje GPS a barometru (poskytované komponentami ADS-B a autopilotem). Stačí, aby systém pracoval se spolehlivějšími zdroji a zbylé z dvojic je možné vypnout a použít jako záložní, v případně selhání primárních zdrojů.

V neposlední řadě mě tato práce vedla k zamyšlení nad vhodností volby LiDARu jako současné primární technologie pro nekooperativní rovinu ‚detect and avoid‘. Co se týká kooperativní roviny systému, uvažuje se, zda nezahrnout údaje vysílané systémem ADS-B do systému e-identification, kterým bude značná část bezpilotních systémů povinně vybavena.

V dalších krocích bych se rád zaměřil na aktivity a případně se spojil se skupinami EUROCAE WG105 a RTCA 228, které se zabývají standardizací ‚detect and avoid‘ systémů v Evropské unii a ve Spojených státech. Dále bych se v budoucnu chtěl zaměřit na standard ACAS-Xu pro bezpilotní systémy; začít s prací „An Introduction to ACAS Xu and the Challenges Ahead“ [64] a pokračovat s „Comparative Analysis of ACAS-Xu and DAIDALUS“ [65] a rozvinout, případně vyzkoušet technologická řešení v nich obsažená.

Při psaní této práce jsem věnoval poměrně dlouhé úsilí hledání a studiu kvalitních zdrojů, ze kterých jsem při psaní této práci vycházel. Přečetl jsem desítky anglických prací a textů, což pro mě bylo relativním potěšením. 70 důvěryhodných, primárně anglických, zdrojů je uvedeno v seznamu literatury na dalších stranách.

Seznam literatury

- [1] *Zipline: Lifesaving Deliveries by Drone* [online]. United States: Zipline, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://flyzipline.com/about/>
- [2] LKKV, Milan. Letecký antikolizní systém TCAS / ACAS. In: *KMITOCTY.cz: Original OK1ZOO's radiomonitoring website* [online]. ČR: OK1ZOO, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://kmitocty.cz/?p=1979>
- [3] What is the difference between TCAS and ACAS?. In: *Eurocontrol* [online]. Europe, 2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/faq/what-difference-between-tcas-and-acas>
- [4] Integrated TCAS solutions. In: *Rockwell Collins* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://www.rockwellcollins.com/-/media/images/rc2016/products-and-services/corporate/traffic-avoidance-1920x1080.jpg?bc=white&as=0&h=720&la=en&w=1280&lastupdate=20170824152412&hash=b29f326c7325ddddd93989ac23745b7d2154291e3>
- [5] WHERE IS ADS-B OUT REQUIRED?. *AOPA: Your freedom to fly* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/ads-b/where-is-ads-b-out-required>
- [6] *Single European Sky ATM Research Joint Undertaking: High performing aviation for Europe* [online]. Cologne, Germany: EU, 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sesarju.eu/>
- [7] Understanding ADS-B: A Pilot's Guide. In: *YouTube* [online]. United States: Google, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1LvZy59FhQw>
- [8] ADS-B 101: Basics of ADS-B Webinar- Part 1 - Avidyne. In: *YouTube* [online]. United States: Google, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1kE1Kg0JEYs>
- [9] Ins and Outs. In: *Federal Aviation Administration* [online]. United States: U.S. Department of Transportation, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://www.faa.gov/nextgen/equipadsb/capabilities/ins_outs/
- [10] NASA Flight Tests New ADS-B Device on Ikhana UAS. In: *NASA* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/ads-b_tested_on_ikhana.html
- [11] How ADS-B works. In: *Airservices: aircservicesaustralia.com* [online]. Australia: Airservices, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/how-ads-b-works/>
- [12] CORRIGAN, Fintan. 12 Top Lidar Sensors For UAVs, Lidar Drones And So Many Great Uses. In: *DroneZon* [online]. United States: DroneZon, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné

z: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/best-lidar-sensors-for-drones-great-uses-for-lidar-sensors/>

- [13] Understanding LiDAR. *Phoenix LiDAR Systems* [online]. USA: Phoenix LiDAR Systems, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.phoenixlidar.com/lidar-mapping-principles/>
- [14] ČESKÁ REPUBLIKA. Doplněk X - Bezpilotní systémy. In: *Předpis L2*. ČR: Ministerstvo dopravy ČR, 2014, ročník 2014, čj. 153/2014-220. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [15] NAŘÍZENÍ: NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2019/945 ze dne 12. března 2019 o bezpilotních systémech a o provozovateli bezpilotních systémů ze třetích zemí. In: . Brusel: Evropská komise, 2019, EU 2019, číslo 945. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=EN>
- [16] Co je to bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, model letadla?. *Úřad pro civilní letectví* [online]. ČR, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla>
- [17] PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE: (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. In: . Brusel: Evropská Komise, 2019, EU 2019, číslo 947. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN>
- [18] CORNING, Jonathan, Li DING, Nick MILLER, H. BARLETT, Roger SCHAUFELE, Thomas MAROTTA, Michael LUKACS a Dipasis BHADRA. *FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2018-2038*. United States: FAA, 2018. Dostupné z: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2018-38_FAA_Aerospace_Forecast.pdf
- [19] BLAKE, Tiffany, ed. Unmanned Aircraft System Traffic Management: NASA's working to make low-flying air traffic safe. In: *NASA* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/ames/utm>
- [20] BOYLE, Angela. *Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM): Enabling Civilian Low-altitude Airspace and Unmanned Aircraft System Operations* [online]. In: . 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml>
- [21] SHEPARDSON, David. U.S. proposes to allow drone operation at night, over people. In: *REUTERS* [online]. United States: Reuters, 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.reuters.com/article/us-usa-drones/u-s-proposes-to-allow-drone-operation-at-night-over-people-idUSKCN1P828W?feedType=RSS&feedName=technologyNews&utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+reuters%2FtechnologyNews+%28Reuters+Technology+News%29

- [22] BEHAR, Michael. Drones in a Busy Sky: Can technology protect airplanes from the new threat?. *Air & Space Magazine* [online]. 2016 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://www.airspacemag.com/flight-today/drone-tests-180960069/>
- [23] Program SESAR. *Řízení letového provozu České republiky* [online]. Jeneč: ŘLP ČR, s. p., 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/tisk/Stranky/Program-SESAR-Deployment.aspx>
- [24] Sdružení firem AirMap / UpVision zvítězilo v tendru na poskytování služby řízení bezpilotního letového provozu pro řízení vzdušný prostor v České republice. In: *Air Navigation Services of the Czech Republic* [online]. Jeneč, Czech Republic, 2018 [cit. 2018-08-20]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/tisk/tiskzpravy/Stranky/Sdru%C5%BEen%C3%AD-firem-AirMap--UpVision-zv%C3%ADt%C4%9Bzilo-v-tendru.aspx>
- [25] *UAV Aliance pro bezpilotní letecký průmysl: sdružení výrobců, provozovatelů bezpilotních letadel* [online]. 2018 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <https://uavaliance.cz/>
- [26] Important progress has been achieved within the MIDCAS project. In: *SAAB* [online]. 2015 [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <https://saabgroup.com/media/stories/stories-listing/2015-05/midcas-project/>
- [27] ROBINSON, Tim. Unlocking European skies for UAVs. *Royal Aeronautical Society: Advancing aerospace and aviation across the globe* [online]. [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <https://www.aerosociety.com/news/unlocking-european-skies-for-uavs/>
- [28] EASA certifies new "Autopilot/Flight Director" TCAS mode for A380: Enhancing flight safety during TCAS manoeuvres. In: *Airbus* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2009/08/easa-certifies-new-autopilot-flight-director-tcas-mode-for-a380.html>
- [29] *Multi-robot Systems: Czech Technical University in Prague* [online]. Prague: Multi-robot Systems, 2018 [cit. 2018-08-23]. Dostupné z: <http://mrs.felk.cvut.cz/>
- [30] SPURNÝ, Vojtěch, Tomáš BÁČA, Martin SASKA et al. *Cooperative Autonomous Search, Grasping and Delivering in a Treasure Hunt Scenario by a Team of UAVs* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [31] ŠTĚPÁN, Petr, Tomáš KRAJNÍK, Matěj PETRLÍK a Martin SASKA. *Vision techniques for on-board detection, following and mapping of moving targets* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [32] LOIANNI, Giuseppe, Vojtěch SPURNÝ, Justin THOMAS et al. Localization, Grasping, and Transportation of Magnetic Objects by a Team of MAVs in Challenging Desert-Like Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters* [online]. IEEE, 2018, **2018**(3), 1576-1583 [cit. 2018-08-16]. DOI: 10.1109/LRA.2018.2800121. ISSN 2377-3766. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8276269/>

- [33] BÁČA, Tomáš, Daniel HERT, Giuseppe LOIANNI, Martin SASKA a Vijay KUMAR. *Model Predictive Trajectory Tracking and Collision Avoidance for Reliable Outdoor Deployment of Unmanned Aerial Vehicles* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [34] WALTER, Viktor, Martin SASKA a Antonio FRANCHI. Fast Mutual Relative Localization of UAVs Using Ultraviolet LED Markers. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS 2018)* [online]. 2018. Dallas, TX, United States, 2018, June 27, 2018 [cit. 2018-08-16]. hal-01814828, version 1. Dostupné z: <https://hal.laas.fr/hal-01814828>
- [35] BELLAMY, Woodrow. European Operators, Regulators Working on New ADS-B Implementation Plan: Retrofitting the European fleet in time is “just impossible at this point.” Regulators have a plan to address that — including an exemption policy. *Avionics International* [online]. 2019, **2019** [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <http://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/march-2019/european-operators-regulators-working-on-new-ads-b-implementation-plan/>
- [36] UAvionix ping 2020i: PING-2020i ADS-B Transceiver. In: *UAvionix* [online]. USA: uAvionix, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://uavionix.com/downloads/ping2020/docs/uAvionix-ping2020i-data-sheet-ap0.pdf>
- [37] Aerobits TR-1W: 1 Watt ADS-B Transceiver. In: *Aerobits* [online]. Poland: Aerobits, 2019 [cit. 2019-08-25]. Dostupné z: http://aerobits.pl/images/Products_page/Wsady/Technical_Documentation_Datasheet_TR-1W.pdf
- [38] RIEGL miniVUX-2UAV: LiDAR Sensor for Unmanned Laser Scanning. In: *RIEGL: RIEGL Laser Measurement Systems* [online]. Německo: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxprigldownloads/RIEGL_miniVUX-2UAV_Preliminary-Datasheet_2019-10-02.pdf
- [39] LeddarTech: LEDDARVU8. In: *LeddarTech* [online]. Kanada: LeddarTech, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://d2euyppccftd53r.cloudfront.net/prod/app/uploads/2017/12/18144236/Spec-Sheets-LeddarVu-12avril2018-ENG-web.pdf>
- [40] Smartek twenty-nine Camera Family User Manual. In: *FRAMOS* [online]. Německo: FRAMOS GmbH, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://dvd.ilphotonics.com/Smartek%20Vision%20-%20GigE%20&%20USB3%20cameras%20-%20pulsed%20LED%20drivers/Cameras/SMARTEKvision_twentynine_UserManual_v1-1-0.pdf
- [41] USB3 Vision camera with Sony CMOS sensors - mvBlueFOX3-2. *MATRIX VISION GmbH: Industrial image processing* [online]. Německo: MATRIX VISION GmbH, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.matrix-vision.com/USB3-vision-camera-mvbluefox3-2.html>

- [42] Basler ace acA2000-165uc - Area Scan Camera. *Basler AG: Industrial Camera Manufacturer* [online]. Německo: Basler AG, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca2000-165uc/>
- [43] Lens selector: industrial image processing. *MATRIX VISION GmbH: Industrial image processing* [online]. Německo: MATRIX VISION GmbH, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.matrix-vision.com/lens-selector.html>
- [44] Mobius Maxi ActionCam Camera Packages!!. *Mobius ActionCam* [online]. USA: Wordpress, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.mobius-actioncam.com/mobius-maxi/>
- [45] *Pixhawk* [online]. United States: Auterion Ltd., 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://pixhawk.org/>
- [46] Holybro Pixhawk 4. *Dronecode* [online]. United States: Dronecode Project, Inc., a Linux Foundation Collaborative Project, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html
- [47] Intel NUC. *Intel: Data Center Solutions, IoT, and PC innovation* [online]. United States: Intel, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/boards-kits/nuc.html>
- [48] FanlessTech: Frost Canyon NUC leaks. In: *FanlessTech* [online]. United States: FanlessTech, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.fanlesstech.com/2019/11/frost-canyon-nuc-leaks.html>
- [49] FanlessTech: EXCLUSIVE: AMD's "NUC" is coming soon. In: *FanlessTech* [online]. United States: FanlessTech, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.fanlesstech.com/2019/10/exclusive-amds-nuc-is-coming-soon.html>
- [50] MSI Cubi 5 10M Datasheet. In: *MSI Czech* [online]. ČR: Micro-Star Int'l Co.,Ltd., 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://asset.msi.com/pdf/main/global/presale_v2/Cubi-5-10M?
- [51] ASRock Industrial: 4x4 BOX-V1000M. *ASRock Industrial* [online]. United States: ASRock Industrial, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.asrockind.com/overview.asp?Model=4X4%20BOX-V1000M#Specification>
- [52] LAM, William. Hands on with new AMD “NUC” platform from ASRock. In: *VirtuallyGhetto* [online]. United States: virtuallyGhetto, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.virtuallyghetto.com/2019/11/hands-on-with-new-amd-nuc-platform-from-asrock.html>
- [53] PassMark Intel vs AMD CPU Benchmarks - High End. *PassMark Software: PC Benchmark and Test Software* [online]. PassMark® Software, 2019 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: https://www.cpubenchmark.net/high_end_cpus.html
- [54] OH, Nate. Intel Announces Movidius Myriad X VPU, Featuring ‘Neural Compute Engine’. In: *AnandTech: Hardware News and Tech Reviews Since 1997* [online]. United States:

- Future Plc, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z:
<https://www.anandtech.com/show/11771/intel-announces-movidius-myrriad-x-vpu>
- [55] AI Core X. *AAEON* [online]. United States: AAEON, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z:
<https://www.aaeon.com/en/p/ai-edge-computing-board-ai-core-x#downloads>
- [56] UP AI Core X - UP Board. *UP Board* [online]. United States: UP, 2019 [cit. 2019-11-30].
 Dostupné z: https://up-shop.org/featured/261-up-ai-core-x.html?search_query=AI+core+X&results=49
- [57] TeraRanger Evo 60 m. In: *Terabee* [online]. France: Terabee, 2019 [cit. 2019-08-26].
 Dostupné z: <https://www.terabee.com/wp-content/uploads/2019/03/TeraRanger-Evo-60m-Specification-sheet.pdf>
- [58] Distance sensor VDM70-250-R/20/87/160. *Pepperl+Fuchs International* [online]. ČR: Pepperl+Fuchs s.r.o., 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: https://www.pepperl-fuchs.com/czech_republic/cs/classid_53.htm?view=productdetails&prodid=34738#overview
- [59] SVATÝ, Ing. *Provozní příručky pro UAS: B1, B3, B7*. ČVUT v Praze, 2019.
- [60] ŘEŠÁTKO, Jaroslav. *TELINK GRID 720*. TELINK, spol. s r.o. Praha, 2019.
- [61] Spreading Wings S900. *DJI* [online]. Čína: DJI, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z:
<https://www.dji.com/cz/spreading-wings-s900/info#specs>
- [62] Tarot X6 Hexacopter Build Kit. *HeliPal.com* [online]. Hong Kong: helipal.com, 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.helipal.com/tarot-x6-hexacopter-frame-set.html>
- [63] SPREADING WINGS S900 READY TO FLY. In: *Drones Made Easy* [online]. United States: Drones Made Easy, 2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z:
https://www.dronesmadeeasy.com/product-p/dji_s900_rtf.htm
- [64] MANFREDI, Guido a Yannick JESTIN. *An Introduction to ACAS Xu and the Challenges Ahead* [online]. Francie, 2017 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01638049/document>. Conference paper. ENAC - Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
- [65] T. DAVIES, Jason a Minghong G. WU. *Comparative Analysis of ACAS-Xu and DAIDALUS Detect-and-Avoid Systems* [online]. United States, 2018 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z:
<https://www.aviationsystemsdivision.arc.nasa.gov/publications/2018/NASA-TM-2018-219773.pdf>. Interní analýza instituce. NASA.
- [66] BORS, Mátyás. What is a Finite State Machine?. *Medium* [online]. 2018 [cit. 2018-09-14]. Dostupné z: <https://medium.com/@mlbors/what-is-a-finite-state-machine-6d8dec727e2c>
- [67] CASA C 212 Aviocar. In: *Alchetron* [online]. USA: Alchetron, 2019 [cit. 2019-08-21].
 Dostupné z: <https://alchetron.com/CASA-C-212-Aviocar#demo>

- [68] Dassault Falcon 20. In: *Wikipedia* [online]. USA: Wikipedia, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault_Falcon_20#/media/File:A_IRIAF_Dassault_Falco_n_20_lands_at_Mehrabad_Airport.jpg
- [69] Sky-Y, UAV by Alenia. In: *Robotics news* [online]. USA: velocityfarm, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://robotpig.net/_images/posts/sky-y_3.jpg
- [70] This Cockpit Video Of Bulgaria's Two-Ship C-27J Spartan Demo Is Intense. In: *Jalopnik* [online]. USA: Gizmodo Media Group, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <https://foxtrotalpha.jalopnik.com/this-cockpit-video-of-bulgarias-two-ship-c-27j-spartan-1740238257>