



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Marek Žaloudek

**NÁVRH APLIKACE DETEKČNÍHO SYSTÉMU
PRO OCHRANU LETIŠŤ**

Bakalářská práce

2020



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Marek Žaloudek

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Návrh aplikace detekčního systému pro ochranu letišť**

Název tématu (anglicky): Proposal of Application of Airport Detection System

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout aplikaci vhodného systému detekce bezpilotních prostředků za účely ochrany řízených letišť v ČR.
- Současný stav poznání v oblasti detekce bezpilotních prostředků
- Výběr vhodného detekčního systému pro ochranu letiště
- Aplikace systému na konkrétní letiště v ČR
- Návrh využití informací z detekčního systému do procesů letiště
- Doporučení využití detekčních systémů pro řízená letiště v ČR

- 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: Commission Implementing Regulation (EU) 2019/945. European Commission, 2019.
Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947. European Commission, 2019.
JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA). 1. JARUS, 2017.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Kleczatský**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 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: **1. prosince 2020**
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.



Marek Žaloudek
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....11. září 2020

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli s vytvořením této bakalářské práce. Zvláště bych rád poděkoval Ing. Adamu Kleczatskému a doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za poskytnutí odborných konzultací a vedení práce. Dále bych rád poděkoval Jiřímu Hejdukovi, Petru Potiškovu a Danielu Urbanovi za podnětné konzultace. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za morální a materiální podporu během celého mého studia.

Prohlášení

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

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 27. 11. 2020



.....
Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

NÁVRH APLIKACE DETEKČNÍHO SYSTÉMU PRO OCHRANU LETIŠŤ

Bakalářská práce

Prosinec 2020

Marek Žaloudek

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce „Návrh aplikace detekčního systému pro ochranu letišť“ je průzkum možností v oblasti detekčních systémů bezpilotních letadel. Následně za pomoci získaných zkušeností vybrat a navrhnout aplikaci vhodného detekčního systému pro ochranu řízeného letiště v České republice.

Klíčová slova

Dron, bezpilotní prostředek, UAV, detekční systém, detekce, letiště Pardubice

Abstract

The subject of the bachelor thesis „Proposal of Application of Airport Detection System“ is the search for possibilities in the area of detection system of unmanned aerial vehicle. Then choose and apply suitable system for the controlled airport in the Czech Republic, based on these pieces of knowledge.

Key words

Drone, unmanned aerial vehicle, UAV, detection system, detection, aerodrome Pardubice

Obsah

Seznam použitých zkratk	6
Úvod	7
1 Základní rozdělení a změny legislativy	8
1.1 Obecná charakteristika	8
1.1.1 Základní definice	8
1.1.2 Rozdělení bezpilotních systémů	9
1.2 Rozdělení vzdušného prostoru	10
1.3 Blížící se legislativní změny	12
2 Současný stav poznání v oblasti detekce bezpilotních prostředků	14
2.1 Možnosti detekce	14
2.1.1 GPS tracker	15
2.1.2 Sekundární přehledový radar a systémy ADS	15
2.1.3 Primární přehledový radar	16
2.1.4 Monitoring spektra	17
2.1.5 Akustický senzor	17
2.1.6 Kamerový systém	17
2.2 Porovnání způsobů detekce	18
2.3 Aktuální nabídka detekčních systémů	20
2.3.1 Skylock	20
2.3.2 DeTect	20
2.3.3 Robin radar system	22
2.3.4 Dedrone	23
2.3.5 Antidrone	24
2.3.6 Aaronia	24
2.3.7 DJI	25
2.3.8 Další firmy	25
2.4 Postup pro výběr systému	25
3 Aplikace systému na konkrétní letiště	28

3.1	Popis letiště.....	28
3.1.1	Vzdušný prostor v okolí letiště	29
3.1.2	Provoz na letišti.....	29
3.1.3	Ochranná pásma letišť.....	29
3.1.4	Sestupové cesty.....	30
3.2	Výběr systémů pro budoucí práci.....	30
3.3	Parametry vybraných systémů pro budoucí práci	31
3.3.1	System AARTOS X9 PRO	31
3.3.2	Mobilní verze radaru ELVIRA	33
3.4	Umístění systémů	33
3.5	Předpokládaná efektivita.....	36
3.6	Možné nedostatky a problémy	37
4	Návrh využití informací z detekčních systémů	39
4.1	Software používaný systémem AARTOS X9 PRO	39
4.2	Software používaný systémem ELVIRA	41
4.3	Zapojení systémů do provozu letiště.....	42
5	Doporučení pro využití detekčních systémů na řízených letištích v ČR.....	45
5.1	Srovnání LKPD s dalšími letišti v ČR.....	45
5.2	Zhodnocení informací o detekčních systémech.....	45
	Závěr	47
	Zdroje	48
	Seznam obrázků	53
	Seznam tabulek.....	54

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický název	Český název
ADS	Automatic Dependent Surveillance	Automatické závislé sledování
AMSL	Above mean sea level	Nad střední hladinou moře
ATS	Air Traffic Service	Služba letového provozu
ATZ	Aerodrome Traffic Zone	Letištní provozní zóna neřízeného letiště
CTR	Control Zone	Řízený okrsek letiště
DRS	Drone Surveillance Radar	Přehledový radar dronů
FIR	Flight Information Region	Letová informační oblast
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla pro let podle přístrojů
ILS	Instrument Landing System	Systém pro přesné přiblížení a přistání
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
MCTR	Military control zone	Vojenský řízený okrsek
MTMA	Military Terminal Maneuvering Area	Vojenská koncová řízená oblast
MTWR	Military aerodrome control tower	Vojenská letištní řídicí věž
PSR	Primary Surveillance Radar	Primární přehledový radar
RPA	Remotely Piloted Aircraft	Dálkově řízené letadlo
RPS	Remote Pilot Station	Dálkově řídicí stanice
RVR	Runway Visual Range	Dráhová dohlednost
ŘLP	Air Navigation Services	Řízení letového provozu
SSR	Secondary Surveillance Radar	Sekundární přehledový radar
TMA	Terminal Maneuvering Area	Koncová řízená oblast
UAS	Unmanned Aircraft System	Bezpilotní systém
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Bezpilotní letadlo
ÚCL	Civil Aviation Authority	Úřad pro civilní letectví
UTM	UAS Traffic Management	Systém řízení provozu bezpilotních prostředků
VFR	Visual Flight Rules	Pravidla pro let za viditelnosti
XML	Extensible Markup Language	Rozšiřitelný značkovací jazyk

Úvod

Provoz bezpilotních prostředků je v poslední době výrazně vyšší, než tomu bylo dříve. Ať už se jedná o systémy používané armádou, policií, záchranáři, hasiči, či k jiným pracím, nebo o dostupné verze pro širokou veřejnost, slova bezpilotní systém nebo dron přestávají být pouze odbornými termíny a stávají se součástí běžné mluvy. Cenová dostupnost těchto systémů, technické možnosti provozu na vzdálenost několika kilometrů mimo přímý dohled pilota a pokročilé technologie s možností létání i bez předchozích zkušeností z těchto prostředků tvoří hrozbu, a to v různých podobách. Příkladem ohrožení je pohyb dronů v oblasti letiště. Konkrétně lze uvést narušení prostoru druhého nejvytíženějšího britského letiště Gatwick, kde pohyb dronů způsobil koncem roku 2018 pozastavení provozu na více než jeden den.

Řízená letiště v České republice nevykazují tak velká provozní čísla jako výše uvedené letiště, nicméně k pohybu dronů v jejich oblasti a následnému ohrožení a omezení provozu může dojít také. Konkrétním příkladem může být pohyb dronů na pražském letišti Václava Havla, které v posledních letech zaznamenalo několik nepovolených letů dronů v jeho okolí a v některých případech bylo donuceno omezit svůj provoz. Pro vyřešení takových situací je třeba důkladný průzkum, komplexní návrh a následná aplikace detekce, identifikace a případná eliminace bezpilotních systémů.

Cílem práce je vytvořit část řešení sloužící k ochraně letiště, a to pomocí návrhu aplikace vhodných detekčních systémů bezpilotních prostředků pro řízená letiště v ČR, konkrétně pro letiště Pardubice. První kapitola bude zaměřena na základní charakteristiku a kategorizaci bezpilotních prostředků a nástin současné legislativy s nimi spojené. V další kapitole budou rozebrány způsoby detekce a současná nabídka trhu v oblasti detekce bezpilotních prostředků. V následujících dvou kapitolách bude navrženo umístění a zapojení do provozu vybraných systémů na konkrétním řízeném letišti. Poslední kapitola bude určitým zhodnocením získaných informací, které budou obecně generalizovány na řízená letiště v ČR.

1 Základní rozdělení a změny legislativy

V úvodní kapitole bude rozebrána obecně problematika bezpilotních systémů (UAS – Unmanned Aerial Vehicle) pro jednodušší orientaci v budoucí práci budou uvedeny základní definice spojené s UAS. Dále budou nastíněny základní změny v legislativě, které zahrnují nová pravidla o technických i provozních požadavcích pro UAS a jejich provozovatele.

1.1 Obecná charakteristika

V posledních letech bezpilotní prostředky nabyly velké popularity a to, mimo jiné, i díky dobré cenové dostupnosti. Bepilotní letouny bývají velmi často označovány neodbornou veřejností výrazem dron z anglického slova *drone* (hučet, bzuchet). V Evropě se také můžeme setkat s označením *Dálkově ovládané letecké systémy*. Toto označení vyvrací představu, že bezpilotní prostředky nemají pilota vůbec.

Ve většině případů (výjimku často tvoří vojenské bezpilotní letouny) se totiž jedná o dálkově řízené letadlo s pilotem na zemi. S rozšířením komerčně používaných bezpilotních letadel ale narůstá i nebezpečí ve vzdušném prostoru. [1]

1.1.1 Základní definice

Autonomní letadlo

Bepilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu. [2]

Bepilotní letadlo (UAV – Unmanned Aerial Vehicle)

Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. [2]

Dálkově řízené letadlo (RPA – Remotely Piloted Aircraft)

Bepilotní letadlo, které je řízeno z dálkové řídicí stanice. [2]

Bepilotní systém (UAS – Unmanned Aircraft System)

Skládá se z jednoho nebo více bezpilotních letadel, řídicích stanic a čehokoli dalšího, co je nezbytné, pro umožnění letu. [2]

Dálkově řídicí stanice (RPS – Remote Pilot Station)

Součástí systému dálkově řízeného letadla obsahující vybavení k řízení dálkově řízeného letadla. [2]

Model letadla

Letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používáno pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu. [4]

1.1.2 Rozdělení bezpilotních systémů

Bezpilotní prostředky lze dělit podle mnoha způsobů. Jedno ze základních dělení je na drony civilní a vojenské. Lze je samozřejmě kategorizovat i podle jiných kritérií. Jako příklad lze uvést:

Podle toho, pro koho jsou určeny

- pro běžného uživatele
- pro pokročilé
- profesionální

Drony pro běžného uživatele se od těch profesionálních liší menší hmotností, velikostí, materiálem, ze kterého jsou vyrobeny, ale také i cenou, z čehož často plyne snížená spolehlivost. Drony pro pokročilé jsou jakousi hranicí mezi těmi levnými a určenými pro profesionály. V současné době se výrobci běžných dronů snaží co nejvíce vyrovnat dronům pro profesionály. [1]

Podle druhu pohonu

- elektrické
- se spalovacím motorem

Většina dostupných dronů určených pro běžného uživatele je poháněna elektromotorem. Drony poháněné spalovacím motorem se liší hmotností, hlučností, ale třeba také dobou letu. [1]

Podle maximální vzletové hmotnosti

- ≤0,91 kg
- >0,91 kg a <7 kg
- >7 kg a <25 kg
- >25 kg

Pro rozdílné maximální hmotnosti platí různá pravidla, týkající se například evidence letadla, povolení k letu nebo praktického a teoretického otestování pilota. Veškeré informace jsou v současnosti uvedeny v Doplňku X leteckého předpisu L 2.

Podle typu

- multikoptéry
- letouny
- vrtulníky
- vzducholodě
- balony
- ostatní

Toto rozdělení reflektuje rozdíly v typu konstrukce, druhu pohonu, letových vlastnostech atd. mezi bezpilotními systémy. Například multikoptéra, jak název udává, značí koptéru s možností vertikálního startu, která je poháněna více motory a vrtulemi (4 = kvadrokoptéra, 6 = hexakoptéra, 8 = oktakoptéra).

Oproti tomu bezpilotní letouny, zvané někdy křídla (z anglického wings), startují buď hodem z ruky, nebo horizontálním startem z odpalovací rampy. Letoun je schopný letu na základě působení aerodynamických sil na jeho nepohyblivá křídla. [1][2]

1.2 Rozdělení vzdušného prostoru

Vzdušný prostor je v základu dělen horizontálně a vertikálně. Horizontální dělení rozčleňuje prostor na jednotlivé letové informační oblasti (FIR – Flight Information Region), které jsou dále rozděleny na sektory. Letové informační oblasti s hustším provozem mohou být pro jednodušší řízení rozděleny i vertikálně na nižší a vyšší.

Vzdušný prostor může být dělen také na třídy (A–G), pro které platí rozdílné podmínky pro vstup a služby udělované letadlům. Nad Českou republikou je rozdělen do čtyř tříd: C, D, E a G. První tři uvedené vzdušné prostory jsou řízené vzdušné prostory. To znamená, že je zde poskytována služba řízení letového provozu v rozsahu daného prostoru. Oproti tomu vzdušný prostor třídy G je neřízený a je zde poskytována pouze informační a pohotovostní služba. [6]

Mimo těchto tříd je vzdušný prostor v České republice vertikálními a horizontálními hranicemi rozdělen na následující druhy.

Letištní provozní zóna (ATZ – Aerodrome Traffic Zone)

Tento prostor slouží k ochraně letištního provozu. ATZ se nachází na letištích bez služby řízení letového provozu. Pokud není Úřadem pro civilní letectví stanoveno jinak, je vymezen kružnicí o poloměru 5,5 km (3 NM) a se středem ve vztažném bodě letiště a sahá do výšky 1200 m (4000 ft) od povrchu země. [2]

Řízený okresek (CTR – Control Zone) a Vojenský řízený okresek (MCTR – Military Control Zone)

Jedná se o řízený vzdušný prostor v okolí letiště, který sahá do výšky stanovené úřadem, a je vymezen kružnicí o poloměru minimálně 9,3 km od středu letiště. [2]

Koncová řízená oblast (TMA – Terminal Maneuvering Area) a Vojenská koncová řízená oblast (MTMA – Military Terminal Maneuvering Area)

Nachází se nad letišti, kde se sbíhá více letových tratí, a to obvykle v rozmezí mezi výškou 300 m a letovou hladinou FL 125 (3800 m). V České republice je tato oblast v okolí velkých letišť (Praha, Brno nebo Ostrava). [2]

Nebezpečný prostor

V tomto vymezeném vzdušném prostoru mohou probíhat situace nebezpečné pro let. Příkladem může být například vypouštění plynu nebo likvidace výbušnin. Takovému prostoru je doporučeno se vyhnout. [6]

Zakázaný prostor

Vymezený vzdušný prostor, ve kterém jsou lety zakázány. Výjimku mohou tvořit lety s povolením od Úřadu pro civilní letectví (ÚCL), případně lety záchranné služby, hasičů nebo policie, a lety za účelem bezprostřední záchrany lidského života. [6]

Omezený prostor

Vymezený vzdušný prostor, ve kterém je během aktivace tohoto prostoru let možný pouze s povolením od příslušného stanoviště služby letového provozu (ATS – Air Traffic Service). [6]

Dočasně vyhrazený prostor

Jedná se o vymezený prostor, ve kterém probíhá letecká činnost a průlet je zakázaný během aktivace tohoto prostoru. [6]

Dočasně rezervovaný prostor

Jedná se o vymezený prostor, ve kterém probíhá letecká činnost a průlet bez zvláštního letového povolení je zakázán během aktivace tohoto prostoru. [2]

1.3 Blížící se legislativní změny

Na konci roku 2020 jsou v plánu reorganizace týkající se provozu bezpilotních letadel v České republice a celé Evropské unii. Evropa bude prvním regionem na světě, který bude mít komplexní soubor pravidel zajišťující bezpečnost, zabezpečení a udržitelnost provozu dronů jak pro komerční, tak pro volnočasové aktivity. To by mělo pomoci podpořit investice, inovace a růst v tomto sektoru. [3]

Hlavní změnou bude registrace provozovatelů dronů v novém registru (pro ČR bude registrace v rámci ÚCL), která se bude týkat většiny provozovatelů dronů (již pro drony od 250 g maximální vzletové hmotnosti; dron s maximální vzletovou hmotností pod 250 g a s kamerou, co není dle práva EU hračkou; nebo také drony s dopadovou energií nad 80 joulů). [4] Provozovatel získá unikátní identifikační číslo, kterým bude povinen označit všechny jím provozované drony. Takto označenému dronu, bude umožněno pohybovat se dle možností kategorie (viz níže), a to na území všech členských států EU. Účelem zavedení těchto nových předpisů je bezpečný provoz UAV, ochrana soukromí občanů EU a ochrana prostředí. Zároveň je cílem dronům lépe zpřístupnit vzdušný prostor. [3]

Tato nová pravidla zahrnují technické i provozní požadavky pro UAV a jejich provozovatele. Na základě míry rizik plynoucích z provozu, hmotnosti a aplikace budou definovány tři kategorie: „otevřená“, „specifická“ a „certifikovaná“. Kategorie označená jako „otevřená“ je určena pro provoz dronu bez předchozího povolení úřadu, samozřejmě za splnění všech daných podmínek. Provoz bude prováděn ve vizuálním dohledu, do 120 m nad terénem a v dostatečné vzdálenosti od dalších lidí. Otevřená kategorie se dále dělí do tří podkategorií (A1, A2, A3) s odlišnými požadavky na maximální hmotnost dronu, minimální vzdálenost od lidí, úroveň proškolení pilota apod.). [5] Pro kategorii „specifická“ bude umožněno překročení některých z limitů platících pro nižší kategorii. Bude vyžadovat rozbor rizik letu dronu ze strany provozovatele a jejich následné posouzení a vydání povolení od ÚCL. Do budoucna bude také existovat možnost vytvoření tzv. „standardního scénáře“ nebo také získání dlouhodobého oprávnění schvalovat vlastní provoz. Poslední kategorie je plánovaná především pro sofistikovaný provoz certifikovaných bezpilotních letadel například pro provoz nad větším množstvím osob nebo přepravu zásilek, osob apod. Bude vyžadovat

získání osvědčení pro techniku a personál na úrovni srovnatelné s dnešními letadly s posádkou.[4]

Prostory, kde je létání dronů nějak omezeno, by měly být více méně zachovány. Jejich úprava je plánována až v následujících fázích. Omezení dronů se týká také technických parametrů a jejich vybavení. Ty, které nebudou nové podmínky splňovat, budou moci být provozovány po dobu dvou let. Výjimky mohou platit pro provozovatele bezpilotních letadel registrovaných ve Svazu modelářů České republiky. Za předpokladu splnění dodatečných požadavků konkrétního státu umožní pravidla provoz dronů napříč státy Evropské unie. [8]

2 Současný stav poznání v oblasti detekce bezpilotních prostředků

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé možnosti detekce bezpilotních prostředků a srovnány jejich výhody a nevýhody. Dále bude proveden průzkum aktuálních dostupných detekčních systémů, který bude dále využit pro výběr konkrétního systému pro budoucí práci.

2.1 Možnosti detekce

Drony by se bez patřičného povolení neměly do prostoru letišť vůbec dostat. Může ovšem dojít k neúmyslnému, ale i vědomému vstupu do oblasti letiště a následnému ohrožení leteckého provozu. Z tohoto důvodu je nutná detekce, identifikace, a pak případně následná eliminace bezpilotních systémů.

V současné době se na trhu nachází mnoho firem, které se zabývají různými způsoby detekce bezpilotních prostředků. Stejně tak i možností detekce je spousta. Může se jednat o detekci pomocí radaru, zvukového senzoru, vysokofrekvenční detekce, detekce kamerovým systémem nebo třeba termická detekce.

Tyto různé způsoby mohou být použity buď jednotlivě, nebo se kombinují pro větší přesnost, případně použití detekčního systému i v rozdílných podmínkách (například při snížené viditelnosti, zhoršeném počasí apod.) [7]

Detekce může být rozdělena na detekci kooperujících a nekooperujících cílů. Zjednodušeně řečeno, detekce kooperujících cílů je taková, kde bezpilotní systém sám vysílá informace o své poloze, výšce, rychlosti atd. Pozemní jednotka je pak už pouze vybavená pro příjem takového signálu. Příkladem je například GPS tracker, odpovídač sekundárního radaru (SSR – Secondary Surveillance Radar) nebo ADS (Automatic Dependent Surveillance) systém.

Oproti tomu detekce nekooperujících cílů slouží k odhalení takových systémů, které pro určení jejich pozice nevysílají potřebné množství dat, a proto musí být lokalizovány jinak. Takový způsob detekce je pro obranu před cíleným útokem na letiště důležitější. U bezpilotních systémů vznikají často potíže tím, že drony pro běžného uživatele bývají s menšími specifickými rozměry a většinou plastové. To komplikuje odraz například rádiových vln primárního radaru (PSR – Primary Surveillance Radar). Problémem taky může být zaměnitelnost s ptáky. Příkladem detekce nekooperujících dronů je již zmiňovaný primární radar, akustický senzor, infračervený senzor nebo kamerový systém. [16]

Dalším možným rozdělením detekčních systémů je rozdělení na detekci aktivní a pasivní. Aktivní detektor vysílá signál a následně zanalyzuje odpověď. Tou může být třeba odraz tohoto signálu, nebo i signál, který vyslal cíl po přijetí informace z detektoru. Příkladem může být například PSR. Oproti tomu pasivní detektory pouze sledují své okolí. Nedochází u nich k žádnému vysílání signálu a pouze zpracovávají informace. Příkladem takové detekce může být monitoring spektra, akustická detekce nebo kamerový systém. [16]

Jednotlivé způsoby detekce budou v následujících podkapitolách popsány.

2.1.1 GPS tracker

Jedná se o malé zařízení, které může být využito k odesílání polohy dronu. To slouží k nalezení dronu v případě poruchy a nouzového přistání, nebo pomáhá k řízení bezpilotních systémů. Bývá buď přímo vestavěný nebo extérní. Dnešní extérní GPS trackery mohou být umístěny na většinu typů dronů. Jak bylo již naznačeno, tento malý lokátor neodesílá polohu pouze uživateli dronu, ale i službě pro řízení letového provozu (ŘLP). Díky SIM kartě, která je umístěna v tomto zařízení, umí odesílat data nejen do mobilního zařízení provozovatele, ale i do systému řízení provozu bezpilotních prostředků (UTM – UAS Traffic Management). [10]

UTM je systém k řízení provozu dronů. Díky tomuto systému mohou být drony viditelné pro ŘLP v reálném čase. U nás k tomu aplikaci poskytuje firma Upvision. Ta využívá buď toho, že dron pro svůj provoz používá chytrý mobilní telefon, a pak pomocí aplikace firmy Upvision odesílá data i pro ŘLP, nebo je chytrý telefon propojen s ovladačem a odesílá data pro řízení provozu dronu. K odesílání informací pro aplikaci však mohou být využívány i jiné způsoby (datové sítě, Bluetooth atd.). [9]

2.1.2 Sekundární přehledový radar a systémy ADS

Tyto způsoby detekce jsou opět závislé na zařízení uložené na palubě bezpilotního systému. SSR funguje na principu vyslání odpovědi na signál, který přijde ze země. Není tedy závislý na tvaru, velikosti ani materiálu detekovaného UAV. Systémy ADS pracují na podobném principu jako SSR. Systém buď periodicky vysílá informace o poloze (potom jde o systém ADS-B), nebo vyšle informace po zaslání dotazu (potom jde o systém ADS-C).

Největší nevýhodou je velikost odpovídáče SSR a systémů ADS. Z tohoto důvodu je tato možnost obzvláště pro menší komerční drony nepoužitelná. V případě menších provedení těchto systémů narůstá cena, což použití pro drony pro běžného uživatele vylučuje. [11]

2.1.3 Primární přehledový radar

Princip primárního přehledového radaru je založený na odrazu elektromagnetických vln od objektu. Radiofrekvenční energie je vyslána a její malá část se od objektu odrazí nazpět. Této odražené energii se říká ECHO. Vzhledem k tomu, že je známá rychlost šíření vln, je možné určit směr, vzdálenost a případně i rychlost objektu, od kterého se vlny odrazily. Hlavní výhodou primárního radaru je, že k určení polohy nepotřebuje jakékoli další zařízení na palubě letadla.

Použití primárního radaru pro detekci bezpilotních systémů je velmi obtížné vzhledem k jejich současné velikosti. Jelikož radarová odrazová plocha je u UAV velmi malá, může být těžké jej pomocí PSR detekovat. K odrazu vln totiž dochází pouze v případě, že velikost sledovaného objektu je přibližně stejná nebo větší, než je vlnová délka šířících se vln. Proto se pro sledování UAS používají takové radary, které jsou pro to upraveny. Mezi ně patří například radar s milimetrovou vlnovou délkou nebo MIMO radar (Multiple-Input Multiple-Output). [12]

Radar s milimetrovou vlnovou délkou je vhodný pro detekci UAV i za snížené viditelnosti. Prostupnost těchto vln mlhou nebo deštěm je vysoká. Radar je tedy schopný pracovat nezávisle na osvětlení nebo denní době. Je schopný detekovat i multikoptéry menších rozměrů (od 0,1 m² odrazové plochy). Díky širokému vlnovému rozsahu poskytuje tento typ radaru vysoké rozlišení usnadňující detekci bezpilotních systémů. [13]

MIMO radar (multiple-input multiple-output) obsahuje více vstupů a více výstupů. Tento typ je plně elektronický, což ve srovnání s mechanicky se pohybujícími radary snižuje nároky na údržbu. Díky velkému rozsahu pevných úhlů je možné detekovat i velké množství bezpilotních systémů najednou. Je schopný detekovat dron stojící ve vzduchu i pomalu letící. Měření i těch nejmenších pohybů pomocí mikro-doplerovské analýzy umožňuje určení například počtu rotorů. To pomáhá vyhodnotit, zda se jedná o dron, který je schopný nést nějaké těžší břemeno (například výbušninu). [14]

FMCW radar (Frequency-Modulated Continuous Wave radar) vyzařuje trvalý přenos energie, u kterého ale během měření může měnit svoji provozní frekvenci. To znamená, že přenosový signál je modulován na frekvenci (nebo ve fázi). Při tomto způsobu se vysílá signál, který periodicky zvyšuje nebo snižuje frekvenci. Když je přijat echo signál, tato změna frekvence získá zpoždění. Radar FMCW pak měří rozdíly ve fázi nebo frekvenci mezi skutečně vyslaným a přijatým signálem. Hlavní výhodou tohoto typu radaru je měření rychlosti a polohy cíle současně s velmi velkou přesností. [12]

2.1.4 Monitoring spektra

Tato možnost detekce využívá sledování okolního prostředí. Nevysílá tedy žádné elektromagnetické vlny, ale pouze sleduje signály, které jsou v pozorovaném prostředí vysílány. Největší výhodou tohoto způsobu detekce je, že lze zaznamenat bezpilotní systém ještě před startem. Stačí, když bude zapnutý a vysílat signál. Většina současných dronů odesílá data (obraz z kamery, signál pro řízení UAV atd.) pilotovi. Tyto signály pak mohou být zachyceny a využity k určení pozice bezpilotního letadla. V současnosti se ve většině případů frekvence využívaná pro komunikaci s pilotem pohybuje mezi 2,4 a 5,8 GHz.

Nevýhodou je, že není možné detekovat autonomní letadlo. Pokud má systém předem nastavenou trasu a nedochází ke komunikaci s pilotem, je tato možnost detekce nevyužitelná. [16]

2.1.5 Akustický senzor

Tento typ detekce je praktický v tom, že kromě kluzáků a balónů vydává každý bezpilotní systém typický zvuk od pohonné jednotky. To umožňuje využít tento typ detekce, který může v dobrých podmínkách dosahovat i stovek metrů. Velkou výhodou tohoto typu senzoru je, že nemůže dojít k záměně bezpilotního systému například s ptákem, a také že dron nemusí být přímo ve viditelném poli, ale může být detekován i za překážkou.

Nevýhodou může být, kromě již zmíněné nemožnosti detekování kluzáků a balónů, krátký dosah a problematická detekce vlastnoručně sestavených strojů, které mají atypický zvuk v porovnání s těmi sériově vyrobenými. Mezi další nevýhody patří i snížení efektivity senzorů v hlučném prostředí a falešný poplach při záznamu podobného zvuku.

Pro zefektivnění akustických senzorů se používá pro detekci víc jak jeden akustický senzor. Při využití dvou a více senzorů lze pak určit kromě směru i výšku daného bezpilotního systému. [15]

2.1.6 Kamerový systém

Tento způsob detekce je spíše určitým doplněním dalších senzorů. Samotná detekce pomocí kamerového systému je velmi nepřesná. Je závislá na dobrém počasí a v případě, že není vybavena infračerveným senzorem, je použitelná pouze za denního světla. Lze jej využít jen na krátké vzdálenosti. Mezi výhody patří možnost přesně identifikovat bezpilotní systém, a to i ten, který nevysílá žádné signály do okolí, a určit tak nebezpečí, které může způsobit. To je vyhodnocováno buď automaticky (pak je potřeba software, který to umožňuje) nebo to vyhodnotí příslušný pracovník. [15]

2.2 Porovnání způsobů detekce

Porovnání detekčních technologií na základě literární rešerše je shrnuto v tabulce 1.

Tabulka 1. Výhody a nevýhody jednotlivých typů detekce [47]

Typ detekce	Výhody	Nevýhody
Radar	Dlouhý dosah PSR	Dosah detekce závisí na velikosti dronu a průřezu radaru
	Detekce většiny dronů bez ohledu na autonomnost letu	Nutnost speciálního radaru pro detekci UAV
	Schopnost rozlišení dronu od jiného objektu jako je pták	Vysoké pořizovací náklady
	Přesné sledování v úhlu rozsahu	Nutnost kontroly frekvence pro zamezení rušení okolí
	Schopnost sledovat více cílů současně při vícestopém pokrytí	Obtížná detekce nízko letících nebo stojících UAV
	Nezávislost na okolních podmínkách (den, noc, počasí, aj.)	Nemožnost lokalizace pilota UAV
	Nezávislost na signálech vysílaných dronem	Nutnost školeného personálu (nedostatečná automatizace)
Monitoring spektra	Schopnost zachycení RF signálu	Neschopnost detekovat autonomní lety
	Schopnost zachycení dronů vysílající Wi-Fi	Elektromagnetické rušení zhoršuje přesnost detekce
	Možnost detekovat pilota	Přesnost závislá na typu dronu a frekvenčním pásmu
	Vysoká přesnost detekce	Může detekovat pouze několik UAV najednou
	Detekce dronu před vzletem	Méně efektivní v prostředí s velkým množstvím frekvencí
	Triangulace signálu při použití více senzorů	Omezená detekce roje dronů
	Možnost algoritmu pro učení se identifikace dronů	Některé pasivní systémy mohou vyzařovat RF signály, přestože jsou charakterizovány jako pasivní systémy
	Pasivní detekce – není nutná žádná licence	

Typ detekce	Výhody	Nevýhody
Akustické senzory	Klasifikace dronu podle zvuku	Nutná knihovna zvukových signálů
	Detekuje autonomní dron	Časté falešné poplachy
	Detekce bez nutnosti přímé viditelnosti	Nízký dosah
	Triangulace signálu při použití více senzorů	Závislost na okolním prostředí
	Nízká cena	Omezená detekce roje dronů
	Poskytuje směr blížícího se dronu	Nemožnost lokalizace pilota UAV
Kamerový systém	Možnost infračervené kamery pro detekci tepelného podpisu	K detekci nutný speciální systém nebo člověk
	Nezávislost na signálech vysílaných dronem	Omezená detekce roje dronů
	Infračervené kamery jsou nezávislé na okolním prostředí	Nutnost přímé viditelnosti
	Možnost záznamu pro další použití	Optické kamery jsou závislé na okolním prostředí

Je zde poukázáno na výhody a nevýhody jednotlivých typů detekčních technologií. Je zřejmé, že pro maximální ochranu je vhodné kombinovat různé detekční metody, pro vzájemné vykompenzování nevýhod jednotlivých systémů. Zejména detekce v oblasti letiště s hustým provozem vyžaduje vysokoprocentní přesnost, kterou jeden senzor nemůže poskytnout. Vzhledem k tomu, že je možné využít UAV k plnění konkrétních úkolů v oblasti letiště, je nutné, aby komplexní detekční systém byl schopný dostatečně identifikovat pohybující se dron, aby bylo možné určit, zda má k tomuto pohybu potřebné povolení. [47]

V blízké době by mělo dojít k vývoji a zavedení řízení letového provozu dronů (UTM), což by umožnilo díky požadavku na dálkovou identifikaci oddělit legálně pohybující se drony od těch nelegálních. UTM by mělo být odděleno od klasického ŘLP. Veškeré služby, protokoly, odpovědnosti a požadavky jsou však zatím pouze ve fázi návrhu, proto je dobré uvažovat o zavedení detekčních systémů, které zvládnou poskytnout dostatečné informace pro současné ŘLP. [47]

2.3 Aktuální nabídka detekčních systémů

V současné době existuje velké množství firem zabývajících se detekcí bezpilotních systémů. V následující části práce bude představeno několik konkrétních detekčních systémů od současných výrobců.

2.3.1 Skylock

Jedná se o izraelskou společnost zabývající se vývojem systémů proti dronům. Příkladem jejich systému je 360 RF Detector & Direction Finder, který funguje na principu sledování spektra. Vyhledává pomocí směrových antén komunikaci s pilotem (nejčastěji používané frekvence) a je schopný detekovat UAS a jeho pilota až na vzdálenost 3 km. Je vhodný pro využití v zastavěném prostředí.

Firma poskytuje také detekci pomocí radaru (zobrazený na obrázku 1), který je schopný detekovat drony s odrazovou plochou 0,5 m² až na vzdálenost 10 km. Malé drony zvládá detekovat do vzdálenosti 3 km. Jedná se o lehký přenosný radar schopný detekovat až 200 bezpilotních letadel najednou v pokrytí celých 360°. Jeho využití je spíše pro ochranu dočasně vyhrazeného prostoru. [17]



Obrázek 1. 360° radar od společnosti Skylock [17]

2.3.2 DeTect

Jedná se o americkou firmu prvotně zabývající se detekcí ptáků. V roce 2016 tato společnost rozšířila svoje zaměření i na detekci bezpilotních systémů. Společnost

vyvinula detektor Drone Watcher, který se skládá ze tří technologií, které mohou pracovat samostatně nebo společně pro vícevrstvou ochranu.

První z možností, co firma DeTect nabízí je DroneWatcherAPP. Jde o technologii dostupnou pro mobilní zařízení (chytrý telefon nebo tablet), která je schopná detekovat až 95 % komerčně vyráběných dronů na vzdálenost 400 – 800 m (1/4 – 1/2 míle). Aplikace zaznamenává i data o dronech a jejich pilotech, která mohou být dále využita. Více zařízení může vytvořit datovou síť, která je schopna zobrazovat pohyb dronů v reálném čase.

Určitým druhem rozšíření této aplikace je DroneWatcherRF, který pracuje stejně, ale s delším dosahem a to až 1,6 – 3,2 km (1–2 míle). Jedná se o nenápadnou skříňku, která má malé požadavky na napájení (existuje i samostatně solárně napájená verze) a může být nainstalována téměř kdekoli (příklad umístění je na obrázku 2).

Posledním ze stupňů vícevrstvé ochrany může být Harrier DRS (drone surveillance radar), který je na obrázku 3. Je to primární sledovací radar navržený pro detekci malých nízkoletících dronů. Schopnost zachytit cíle je do vzdálenosti 3,2 km (2 míle) pro malé komerčně používané drony a až do vzdálenosti 22,5 km (14 mil) pro velké drony, jako je Global Hawk. Systém může být propojen i se senzory třetí strany (akustické senzory, kamerové senzory atd.) pro zefektivnění zobrazení. [18]



Obrázek 2. DroneWatcherRF [18]



Obrázek 3. Harrier DRS [18]

2.3.3 Robin radar system

Jedná se o nizozemskou firmu také začínající v oblasti detekce ptáků, která se postupně rozšířila i na detekci bezpilotních systémů. Jejich systém s názvem ELVIRA je schopný automaticky detekovat, sledovat a klasifikovat různé typy dronů, a to multikoptéry na vzdálenost až 3 km a bezpilotní letadla s pevnými křídly až na 5 km.

Rotační radar, který pokrývá celých 360°, má schopnost sledovat trasu letících dronů a dokáže také automaticky klasifikovat drony a rozlišit je od jiných létajících objektů, jako jsou ptáci. Na mapových podkladech barevně rozlišuje červeně drony a jejich cestu, oranžově podezřelé drony a zeleně ptáky a další létající objekty.

Tento typ radaru může být buď statický, nebo existuje mobilní verze (viz obrázek 4), která je schopna sestavení do pěti minut. Tento systém může být vybaven i dalšími senzory, jako je například kamera pro získání vizuálního obrazu detekovaného cíle. Na obrázku 5 je vidět průřez systémem ELVIRA, kde lze spatřit rotační části radaru, které jsou ukryté v obalu. [19]



Obrázek 4. mobilní verze detekčního systému ELVIRA [19]



Obrázek 5. Průřez detekčním systémem ELVIRA [19]

2.3.4 Dedrone

Německá firma Dedrone se specializuje na detekci a identifikaci dronů pomocí monitoringu rádiového signálu. Jejich modely RF 160 a RF 300 jsou schopné detekovat a klasifikovat (určit model a výrobce) většinu komerčních dronů současného trhu. Tyto systémy mohou být rozšířeny ještě o kameru, která umožňuje automatické sledování

detekovaného dronu. Kamera je vybavena i termálním zobrazením pro snímání za snížené viditelnosti a vysokým rozlišením.

I tato firma nabízí radary s různým dosahem pro detekci autonomních systémů a dronů, které nejsou schopné radiofrekvenční senzory zachytit. Nemají ovšem pokrytí 360°, a proto je třeba instalace více takovýchto radarů pro pokrytí oblasti v okolí radaru. [20]

2.3.5 Antidrone

Tato španělská firma nabízí spoustu variant v oblasti detekce, eliminace a zabezpečení proti dronům. Dostupné jsou možnosti různě silných druhů pasivní detekce uvedené v kapitole 2.1. Díky velkému množství nabídky dává možnost kombinace radaru, akustických senzorů, kamerových systémů i sledování rádiové frekvence pro určení typu dronu a nalezení pilota.

Nabídka jejich primárních radarů určených pro detekci bezpilotních letadel poskytuje výběr dvou systémů. Jedná se o radary s pokrytím 360° s dosahem detekce až 6 km. Vyrábí se jako mobilní i statické. [21]

2.3.6 Aaronia

Mezi důležité firmy zabývající se výrobou detekčních systémů dronů patří další německá firma Aaronia, která od března 2020 zajišťuje ochranu proti bezpilotním prostředkům na světovém letišti Heathrow. [22]

Firma nabízí detekci sledováním spektra od dostupné mobilní verze spojené s notebookem AARTOS X3 Laptop, až po špičkovou variantu používanou na mezinárodních letištích AARTOS X9 PRO (na obrázku 6) s velkým dosahem a přesností. [23]



Obrázek 6. Detekční systém AARTOS X9 PRO od společnosti Aaronia [23]

2.3.7 DJI

Tato firma, která je jedním z největších výrobců komerčních dronů na světě, nabízí také i možnost pro jejich detekci. Poskytuje platformu AeroScope, která za pomoci sledování vysílaného spektra dokáže rychle identifikovat většinu dronů na trhu. Využívaná anténa G-16 je kombinací čtyř antén sledujících frekvenci 2,4 GHz a čtyř antén sledujících frekvenci 5,8 GHz. Tato sada umožňuje pokrytí v úhlu 90°. Systém existuje i ve formě přenosné jednotky. Firma DJI má také jako jediná českého distributora, kterým je Telink. [24]

2.3.8 Další firmy

Na trhu se vyskytují samozřejmě i další firmy zabývající se vývojem a výrobou systémů detekce. Příkladem může být firma Drone Shield, která je ovšem zaměřena více na eliminaci bezpilotních systémů než na možnosti, jakým způsobem můžou být drony detekovány. [25]

Mimo výrobců detekčních systémů jsou na trhu i firmy zabývající se nastavením a zavedením detekčních systémů pro požadované oblasti. Příkladem může být anglická firma Operational Solutions nebo německá firma ESG. [26]

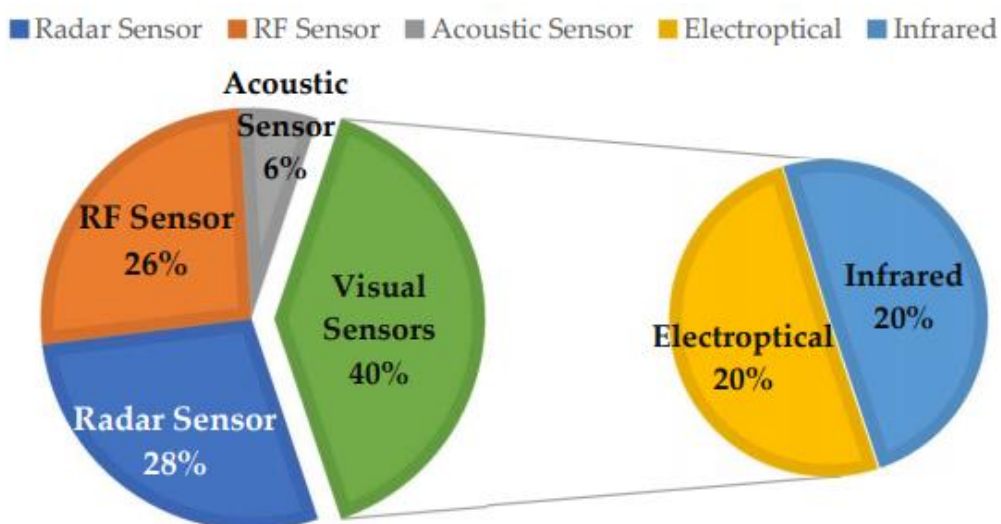
2.4 Postup pro výběr systému

Pro výběr vhodného detekčního systému je v první řadě důležité si uvědomit, v jakém prostředí bude systém používán. Zda se jedná o zastavěnou oblast, malý prostor nebo

velké otevřené prostranství. Je třeba také zvážit, jakým způsobem chceme bezpilotní systémy detekovat. Problém může nastat například při detekci primárním radarem, který může svým vysíláním elektromagnetické energie působit rušení jiných přístrojů, které se v oblasti vyskytují.

Další důležitou otázkou, kterou si je třeba před výběrem detekčního systému položit, je, jak komplexní má detekce být. Protože, jak bylo uvedeno v kapitole 2.2 o porovnání možností detekce, každý ze způsobů detekování má svoje nedostatky. Proto pro nej přesnější detekování a následné určení hrozby je nejlepší zkombinovat více způsobů dohromady. Například sledováním rádiové frekvence je možné detekovat většinu komerčně vyráběných dronů na dostatečně velkou vzdálenost. Ovšem autonomní letadla nebo podomácku vyrobená bezpilotní letadla s frekvencí vysílání mimo běžný rozsah nebudou tímto způsobem detekována. Pokud je požadovaná obrana proti takovýmto útokům, je třeba doplnit systém například o vhodný primární radar pro sledování bezpilotních systémů nebo jiný typ senzoru, který bude schopný nedostatek při monitorování rádiové frekvence nahradit. [26]

Provedením rešerše v oblasti detekčních systémů bylo zjištěno, že v 88 % případů jsou využity maximálně 3 senzory. Využití různých typů senzorů je zobrazeno na obrázku 7, ze kterého lze určit, že mezi nejčastěji používané systémy patří sledování spektra a detekce radarem. Kamerový systém patří mezi nejčastější doplňkové systémy zejména u sledování spektra. Použití elektrooptických a infračervených kamer je stejné. Akustické senzory patří k nejméně používaným a slouží většinou jako doplňkové systémy. [47]



Obrázek 7. Zastoupení typů senzorů použitých k detekci UAV [47]

Důležitou otázkou je samozřejmě ekonomická stránka. Ve většině případech platí, že čím má být detekční systém účinnější (delší dosah, schopnost detekovat více dronů současně, delší životnost atd.), tím také poroste pořizovací cena. Pak je třeba zvážit, s jakou intenzitou má být daná oblast chráněna (jestli je možné očekávat cílený útok dronů, nebo chceme oblast zabezpečit jen před náhodným pohybem dronů pro běžné uživatele) a jak moc komplexní systém je tedy vyžadován. Ekonomický aspekt při výběru detekčního systému je ale nad rámec rozsahu této práce, a proto se jím již nebude dále zabíráno.

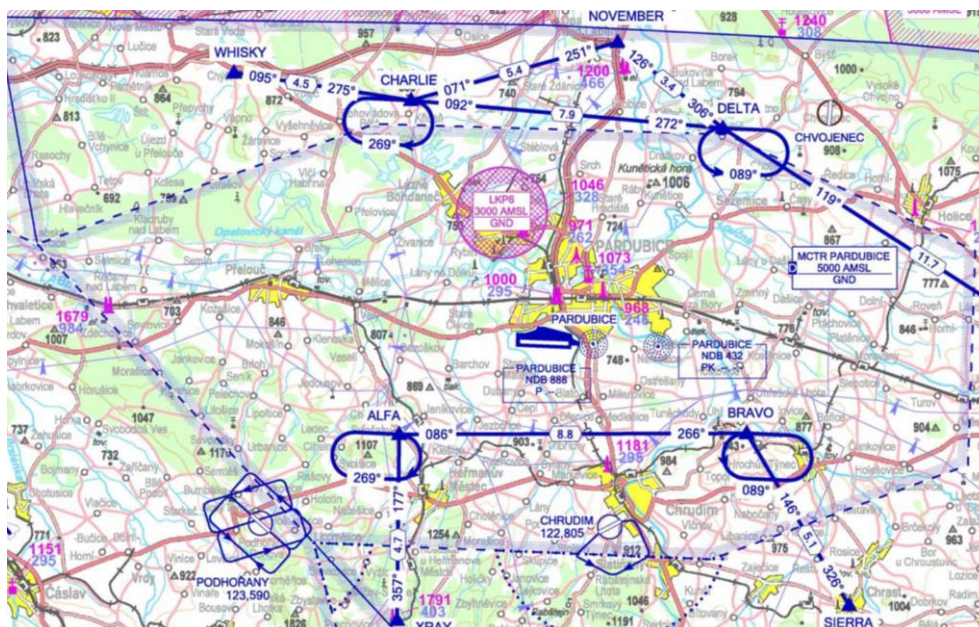
Při výběru detekčních systémů pro řízené letiště je třeba zvážit, jaký způsob detekce bude nejvhodnější. Zároveň je třeba dbát na přijatelnou přesnost detekce (nespouštění planých poplachů, možnost identifikace dronu atd.) a samozřejmě dostatečné pokrytí oblasti, ve které by mohl pohyb bezpilotního letadla způsobit ohrožení provozu. Zároveň je třeba dbát na to, aby detekce nerušila jiné systémy, které jsou nezbytné pro bezpečný provoz letiště. [26]

3 Aplikace systému na konkrétní letiště

Cílem této kapitole bude výběr konkrétního řízeného letiště v ČR a bude vytvořen návrh rozmístění zvoleného detekčního systému. Budou shrnuty parametry jak letiště, tak vybraných systémů.

3.1 Popis letiště

Pro aplikaci detekčního systému bylo vybráno letiště v Pardubicích. Jedná se o vojenské veřejné mezinárodní letiště s povoleným provozem civilních letadel, které má označení LKPD. Letiště leží 4 km jihozápadně od centra města Pardubice (obrázek 8), krajského města pardubického kraje, které má necelých 100 000 obyvatel. Dále má statut letiště „OPEN SKIES“ (Otevřeného nebe) pro ČR¹. Má možnost provozovat lety podle přístrojů (IFR – Instrument Flight Rules) i lety za viditelnosti (VFR – Visual Flight Rules). Správa letiště je v provozu od pondělí do neděle, a to v době od 7 hodin ráno do 18 hodin večer. [27]



Obrázek 8. Poloha pardubického letiště vzhledem k městu (čárkovane je vyznačena MCTR Pardubice) [28]

Na letišti se nachází dráha 09/27. Je to betonová dráha o rozměrech 2500 x 75 m. To znamená, že se jedná o dráhu s kódovým číslem 4 a kódovým písmenem D. [27]

¹ „Open skies“ dohody nebo česky také dohody o otevřeném nebi se snaží eliminovat vládní zásahy do obchodních rozhodnutí leteckých dopravců a podporují liberalizaci letecké dopravy. [29]

Kódová značení slouží k určení parametrů dráhy. Používají se k určení toho, jaký typ letounu smí na dráze přistát. Toto číslo a písmeno musí být určeno při projektování letiště, a to podle odpovídajících tabulek v předpisu L 14 hlavy 1. [32]

3.1.1 Vzdušný prostor v okolí letiště

Nad letištěm je standardně zřízen vzdušný prostor třídy D. Službu ATS pro civilní letištní provoz poskytuje smluvně Řízení letového provozu Armády České republiky. Je-li vojenská letištní řídicí věž (MTWR – Military aerodrome control tower) mimo provoz, MCTR zaniká a třída vzdušného prostoru se mění na G a E. Vertikální hranice vzdušného prostoru letových provozních služeb je 5000 ft (1520 m) nad střední hladinou moře (AMSL – Above mean sea level). [27]

3.1.2 Provoz na letišti

Vzhledem k současné situaci je civilní provoz na letišti značně omezen. Za normálních podmínek odtud však létají pravidelné spoje, a to 5x týdně do Kyjeva a 2x týdně do Alicante ve Španělsku. Provoz na letišti dále přibývá v létě (linky na Rhodos, do Antalye a Burgasu) a v zimě (linky do Moskvy a Petrohradu). [33]

Vojenský provoz na letišti je většinou spojen se zajištěním základního leteckého výcviku posluchačů Univerzity obrany Brno a mladých pilotů leteckých základen Armády České republiky. Zároveň letiště slouží jako náhradní letiště pro vojenské letiště Čáslav. Proto může dojít k zhuštění provozu jako například v období od 7. do 27. července 2020, kdy bylo letiště v Čáslavi z technických důvodů odstaveno a provoz vojenských letounů typu JAS-39 Gripen a L-159 ALCA se odehrával na letišti Pardubice. [34]

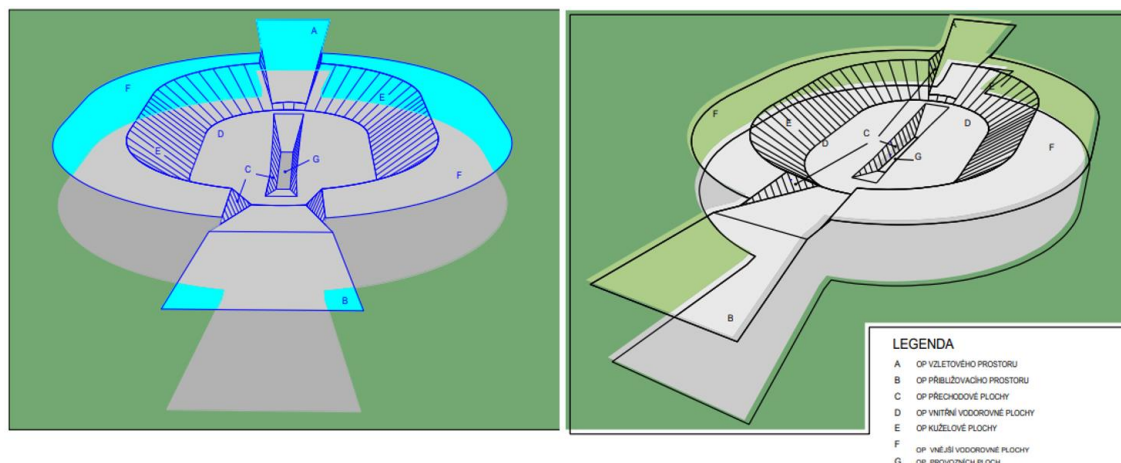
Poslední z důležitých akcí, které se na letišti konají a týkají se nárůstu provozu letiště, je Aviatická pouť, která se pořádá každoročně na přelomu května a června. Jedná se o akci, na které dochází k předvádění různých typů letadel. Letiště je tak celý víkend otevřeno veřejnosti a to od 8:00 do 20:00 hodin. [35]

3.1.3 Ochranná pásma letišť

Ochranných pásem letiště existuje celá řada (ochranné pásmo proti nebezpečným klamavým světlům, ochranné pásmo se zákazem laserových zařízení, ochranná pásma ornitologická atd.), ale pro provoz bezpilotních prostředků je důležité ochranné pásmo s výškovým omezením staveb. To pro přístrojovou dráhu obsahuje ochranná pásma uvedená na obrázku 9.

Pro ochranné pásmo vzletového a přistávacího prostoru platí, že má tvar lichoběžníku a pro přístrojové dráhy s kódovým číslem 3 nebo 4 sahá až do vzdálenosti 15 000 m.

Stoupání tohoto ochranného pásma u drah s těmito kódovými čísly je pak 2 % (cože je přibližně úhel $1,15^\circ$) a to až do té doby, než dosáhne výšky 150 m nad úroveň prahu dráhy (zhruba ve vzdálenosti 7 500 m od prahu dráhy). Dále pak ochranné pásmo pokračuje vodorovně. [37]



Obrázek 9. Ochranná pásma s výškovým omezením staveb pro přístrojovou ranvej [37]

3.1.4 Sestupové cesty

Jak již bylo zmíněno, na letišti je možný IFR i VFR provoz, avšak možnost IFR přiblížení je dostupná pouze na dráze 27. V Pardubicích pro přesné přístrojové přiblížení a přistání slouží systém ILS (Instrument Landing System), konkrétně ILS CAT I. CAT I značí první kategorii neboli navádění při dohlednosti alespoň 800 m nebo víc jak 550 m dráhové dohlednosti (RVR – Runway Visual Range) a minimální spodní základně oblačnosti 200 ft (60 m) nad terénem. Úhel sestupu je 3° . [27][36]

3.2 Výběr systémů pro budoucí práci

Jedná se o předběžný návrh, který by v případě jeho praktické aplikace vyžadoval konzultaci s odborníkem pro zajištění vhodného výběru detekčních systémů a zaručení jejich maximální efektivity.

Při výběru systému pro LKPD byl vzhledem k hustotě běžného provozu zvolen statický detektor pracující na principu sledování spektra, u kterého nehrozí, že by docházelo k rušení jiných přístrojů sloužících pro provoz letiště. Tuto možnost nabízí většina z firem uvedených v kapitole 2.3, ale ne všechny nabízené systémy jsou vyhovující. Například firmy Skylock a DEDRONE nabízejí systémy s nedostatečným dosahem pro ochranu tak velké oblasti, jako je letiště Pardubice. Další z požadavků je pokrytí 360° pomocí jedné antény, které zjednoduší jak instalaci, tak i následnou údržbu. Za předpokladu stanovení těchto kritérií zbývají systémy od firem DeTect a AARONIA. Vzhledem k tomu, že systém

je vybíráný pro letiště v České republice, bude vhodnější zvolit evropskou firmu, což zajistí jednodušší logistiku, zvýšenou podporu a sníží se tak výsledná cena. Proto bude dále pracováno se systémem firmy Aaronia: AARTOS X9 PRO.

Systém nabízí dostatečný dosah pokrytí v úhlu 360° a má schopnost detekovat široký rozsah frekvencí bezpilotních prostředků. Může pracovat 24 hodin 7 dní v týdnu. Zároveň je schopný přesné lokalizace už při použití dvou dále popsanych antén. Díky tomuto systému získá letiště přehled o pohybu všech dronů vysílajících signál v rozsahu detekovaného frekvenčního spektra a to prakticky v celé oblasti MCTR Pardubice. [31]

Vzhledem k tomu, že na letišti může dojít k nárůstu provozu, kvůli kterému lze očekávat nutnost rozšíření o jiný způsob detekce, než je sledování spektra, neboť to by v případě cíleného útoku mohlo být nedostatečné, je třeba vybrat přídatný detekční systém. Vhodným doplněním je detekční systém pracující na principu primárního radaru. Protože se jedná o sekundární systém, který slouží jen jako doplňkový ke sledování spektra, bylo by vhodné použít mobilní verzi, kterou lze umístit tam, kde je třeba zvýšení bezpečnosti. Z mobilních systémů pracujících na principu primárního radaru zmíněných v kapitole 2.3 vyhovují systémy firem Robin Radar System a Antidrone. Tyto firmy nabízejí mobilní verzi radaru s 360° pokrytím, které v případě použití pouze jednoho radaru (v porovnání se směrovými radary) zvětší oblast detekce. Radary těchto dvou firem mají podobné technické parametry. Rozhodnutí, který z těchto systémů by byl vhodnější, by muselo být provedeno na základě jiných kritérií (ekonomický aspekt, záruka atd.), která ale přesahují rozsah této práce. Pro další postup byl pro ochranu letiště Pardubice zvolen jako druhý detekční systém radar ELVIRA od firmy Robin radar. Vzhledem k flexibilitě v umístění tohoto mobilního systému a jeho kvalitní schopnosti detekce a klasifikace bezpilotních prostředků, je tento systém vhodný k ochraně prostoru letiště při zvýšených nárocích na bezpečnost. Příkladem takové situace může být dočasný provoz vojenských letadel z letiště Čáslav nebo během každoroční akce, Aviatické pouti, při které je na letišti velké množství návštěvníků a provoz letiště je extrémně větší, a tudíž jsou kladeny specifické nároky na zabezpečení. Pro případ zvýšení přesnosti klasifikace detekovaných dronů může být radar dovybaven kamerou. [19][34]

3.3 Parametry vybraných systémů pro budoucí práci

3.3.1 Systém AARTOS X9 PRO

Tento systém používá k detekci bezpilotních prostředků monitoring spektra. Jedná se o nejlepší verzi systému AARTOS, kterou firma nabízí. Je využíván na mezinárodních letištích ve světě. Tento systém využívá k zachycování radiové frekvence anténu

IsoLOG 3D DF-160 zobrazenou na obrázku 10. Její specifikace jsou zapsané v tabulce 2. [30]

Tabulka 2. Specifikace antény IsoLOG 3D DF-160 [30]

Parametry	
Sektory	16
Antény	32
Rozsah frekvence	400 MHz (20 MHz) – 8 GHz (20 GHz) ²
Přesnost sledování	1° až 3°
Interní GPS	Ano
Interní předzesilovač s nízkým šumem	Ano
Provozní teplota	-30–60 °C
Skladovací teplota	-40–70 °C
Rozměry	960x960x380 mm
Váha	Přibližně 25 kg
RF výstup	N (50 Ohm)



Obrázek 10. Anténa IsoLOG 3D DF-160 využívaná systémem X9 PRO [30]

Systém nabízí ultra-širokopásmové monitorování s neomezeným počtem přijímačů. Jeho dosah je v rozmezí 5–14 km. Jeho pole působení může být buď kopulovité 360°, nebo zaměřeno na 1–16 sektorů (jejich rozdělení je vidět na obrázku 10). V případě skenování jednoho sektoru je dosah až 50 km. V případě rozmístění více antén spojených přes analyzátory s centrálním počítačem systém využívá triangulaci signálů pro maximální přesnost během detekce. [30]

² V závorkách uvedený volitelný rozsah pro velmi dlouhé vlny a centimetrové vlny [23]

System je schopný lokalizovat pilota dronu a s využitím už dvou antén určit výšku, ve které se dron pohybuje, a vzdálenost dronu. Jedna anténa udá azimut, ze kterého se dron blíží. Sledování spektra není závislé na přímé viditelnosti. System umí (pokud je signál dostatečně silný) detekovat dron i za překážkou. Přímá viditelnost ovšem urychluje detekci. [31]

3.3.2 Mobilní verze radaru ELVIRA

Tento system byl popsán v kapitole 2.3.3. Zde jsou přidány specifikace radaru ELVIRA, které jsou uvedeny v tabulce 3. [19]

Tabulka 3. Specifikace radaru ELVIRA [19]

Parametry	
Technologie	FMCW Radar
Frekvence	9650 MHz X-Band
Dosah přístroje	5 km
Dosah detekce malých dronů	3 km
Klasifikace malých dronů	1100 m
Výkon	4 W
Rychlost rotace	45 ot/min
Skenovací rychlost	1.3 s
Rozsah pokrytí	360°
Rozměry	918 mm průměr x 1060 mm výška
Váha radaru	72 Kg

3.4 Umístění systémů

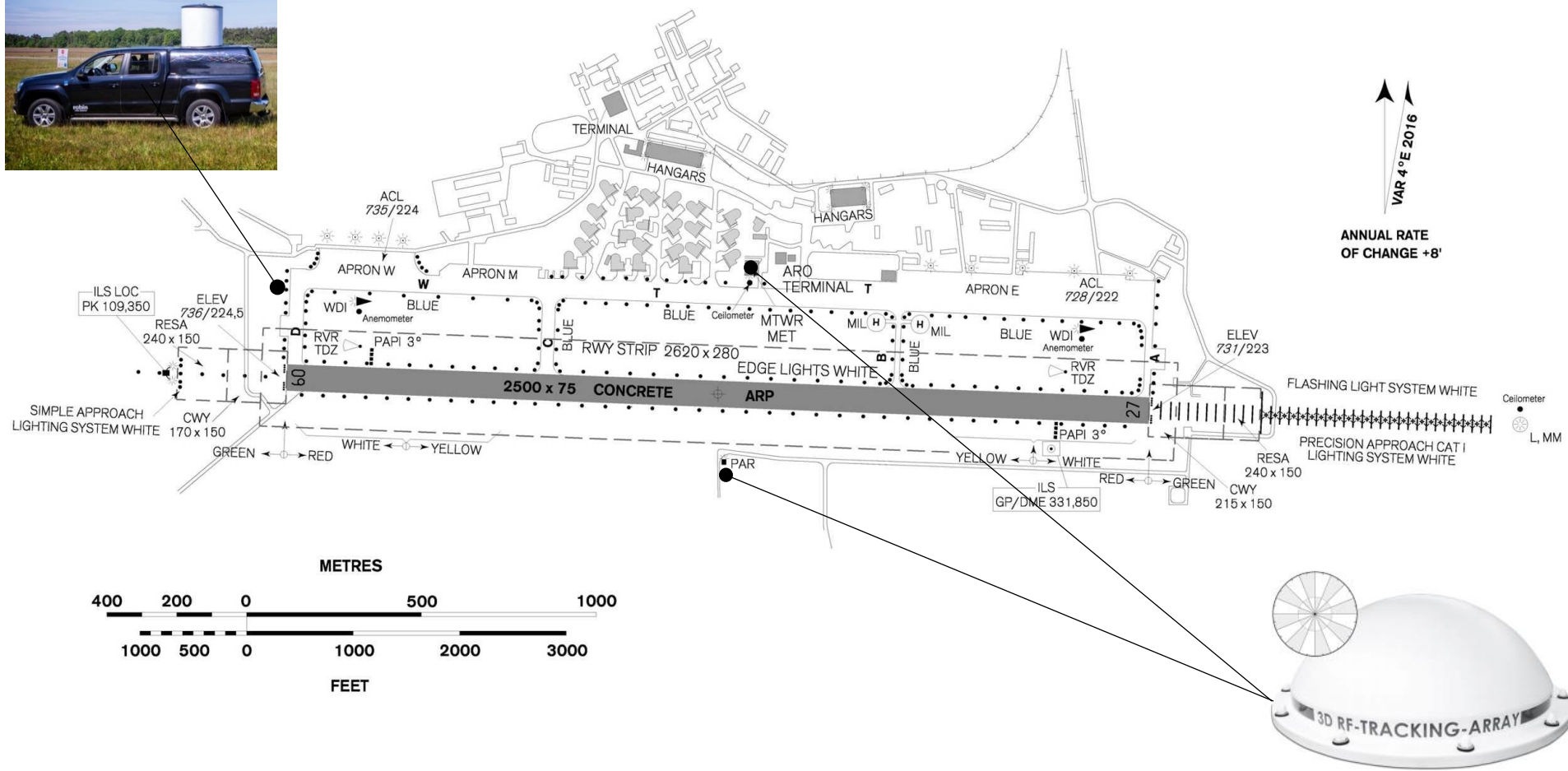
Rozmístění antén systému AARTOS X9 PRO bylo zvoleno takové, aby byla pokrytá oblast letiště a okolí. Umístění systému bylo konzultováno se zaměstnancem společnosti AAronia. Důležité je zajištění dobrého pokrytí detekčními systémy v koncové oblasti dráhy a na sestupových cestách. Z důvodu nutného umístění antén do vyšší výšky (3 m a více) nelze umístit system v těsné blízkosti dráhy. V případě, že by systémy byly umístěny v ose dráhy a v bezpečné vzdálenosti od prahu dráhy, vznikala by komplikace se vzdáleností mezi jednotlivými anténami (ta nesmí být větší než 3 km). [30] Návrh výsledného umístění detekčního systému na LKPD je ukázán na obrázku 11.

Prvním ze zvolených míst pro umístění antény detekčního systému AARTOS X9 PRO je střecha řídicí věže letiště. Toto místo je vhodné kvůli umístění v centru letiště

a zároveň dostatečné výšce umístění. Vzhledem k tomu, že se jedná o systém pasivní detekce, nehrozí, že by detektor rušil jiné systémy, které na věži fungují. Místo pro umístění druhé antény detekčního systému bylo vybráno v oblasti okolí přibližovacího radaru, který je umístěn z druhé strany dráhy naproti řídicí věži. Toto místo je vhodné proto, že je v dostatečné vzdálenosti od dráhy a zároveň by zde neměl být problém se zapojením tohoto systému. Vzhledem ke vzdálenosti od dráhy je možné systém bezpečně umístit do minimální výšky (alespoň 3 m).

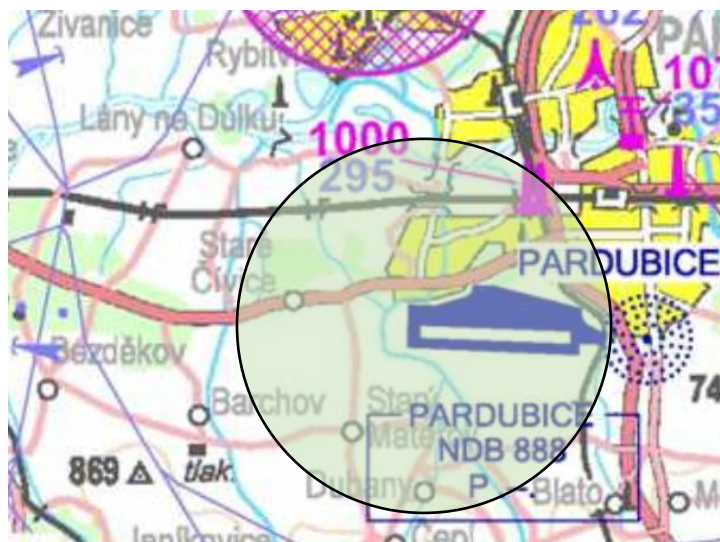
Rozhodnutí o pozici přenosného radaru ELVIRA je třeba nechat na zvážení provozovatele letiště (Armáda České republiky – Správa letiště Pardubice), který musí vyhodnotit rizika a nutnost zvýšení bezpečnosti a na základě těchto faktorů zvolit umístění tohoto doplňkového systému. Zde je uveden příklad návrhu umístění při konání každoročně opakované akce Aviatické pouti.

Vzhledem k tomu, že k pohybu diváků dochází v oblasti okolo MTWR, a to převážně v oblasti na západ od ní, kde se odehrává hlavní program akce (ve východní části je pouze stojánka letadel), bylo zvoleno umístění v úrovni koncové části dráhy 27 (zobrazeno na obrázku 11). Tím bude dosaženo pokrytí oblasti letiště a vzletového pásma dráhy 27 a dočasně přidané dráhy, která se nachází v dráhovém pásu ranveje 09/27 a je s ní rovnoběžná. Tato dráha je přidána z důvodu nutnosti přistání historických letadel na travnatou plochu. Systém zároveň nesmí překážet doprovodnému pozemnímu programu. [35]



Obrázek 11. Rozmístění antén IsoLOG 3D DF-160 a mobilního systému ELVIRA na letišti Pardubice [28]

Pokrytí radarem ELVIRA pro výše uvedené umístění je zobrazeno kružnicí na obrázku 13. Poloměr kružnice je brán z dosahu radaru pro detekci dronů s menšími specifickými rozměry (3 km). V této oblasti dochází díky tomuto systému nejen k detekci, klasifikaci a sledování pohybu bezpilotních prostředků nezávisle na jejich vysílající frekvenci, ale také i ke trasování pohybu jiných létajících objektů, jako je například ptactvo. Tím se snižuje nebezpečí srážky v oblasti, kde by v případě pádu letadla mohlo dojít k největším ztrátám na životech. [19]



Obrázek 13. Pokrytí mobilním radarem ELVIRA [28]

3.6 Možné nedostatky a problémy

S provozem detekčního systému mohou vyvstat také nové problémy, které by mohlo letiště řešit. Antény detekčního systému je třeba zabezpečit proti případné sabotáži nebo poškození. Vzhledem k umístění je ochrana proti nepovolanému vniknutí kvalitní, ale zhoršuje možnost sledovat antény pomocí zabezpečovacího kamerového systému letiště. Další z možných potíží může být skladování mobilního radaru ELVIRA, který musí být uložen na bezpečném místě, jak z hlediska možného odcizení, tak z pohledu skladování bez poškození.

Na základě konzultace s výrobcem systému AARTOS X9 PRO bylo zjištěno, že v případě použití pouze dvou antén dochází k nemožnosti detekce mezi nimi na ose těchto antén. Tudíž v případě, že by se dron pohyboval v této oblasti, nebyl by systémem detekován. K pokrytí takového slepého místa by bylo nutné umístění třetí antény. Nicméně v rámci rozmístění antén bylo toto riziko zmenšeno na minimální hodnotu tím, že antény jsou relativně blízko u sebe a zároveň se tato oblast, kde systém není schopný UAV detekovat, nachází uprostřed letiště, a proto je prakticky nemožné zahájit pohyb dronu právě tam.

Komplikací při využití zvolených systémů by mohlo být nedostatečné radarové pokrytí. V případě trvalého zhuštění provozu by bylo třeba zvážit, zda by z bezpečnostních důvodů nebylo vhodné umístit statické detekční systémy pracující na principu detekce pomocí primárního radaru. Dalším z nedostatků této sestavy je, že je schopná zabývat se pouze detekcí a identifikací bezpilotních prostředků. V případě, že by mělo dojít také k eliminaci je možné systém AARTOS X9 PRO rozšířit o rušičku vyráběnou stejnou firmou, která je schopná letící dron uzemnit. [30] Eliminaci by však bylo třeba podrobněji rozebrat a prozkoumat nabízené možnosti, což přesahuje rozsah a téma této bakalářské práce.

Posledním z problémů spojených s využíváním detekčních systémů v oblasti letiště Pardubice je obsluha a údržba těchto systémů. Obzvláště mobilní radar by vyžadoval proškoleného pracovníka, který by byl schopný s ním manipulovat. Práce spojená s provozem těchto systémů bude rozebrána v následující kapitole.

4 Návrh využití informací z detekčních systémů

Tato kapitole se bude především zabývat softwarovými parametry vybraných systémů a zapojením detekčních systémů do procesů letiště. Cílem je vytvořit návrh pro zapojení do provozu letiště.

4.1 Software používaný systémem AARTOS X9 PRO

Vybraný detekční systém pro sledování spektra používá software s názvem RTSA Suite PRO. Jedná se o software, který umožňuje integraci různých hardwarových komponentů a jejich následné využití pro vyhodnocení analýzy. Pro instalaci jsou dostupné dvě verze. Stabilní, která nabízí oficiální podporu a aktualizace, které opravují pouze drobnosti a chyby, a zaručuje, jak říká název, stabilitu systému. Druhou je nestabilní, která nabízí nové funkce, které ve stabilní verzi být nemusí, a je určena pro jistý druh jejich testování, ale nemůže zaručit takovou stabilitu systému, jako verze stabilní. Pro ostrý provoz a využití systému pro ochranu letiště je vhodná verze stabilní. Pomocí konfigurace za použití bloků systém nabízí možnost optimálního nastavení pro detekci dronů v požadované oblasti. Systémové požadavky jsou uvedené v tabulce 4. [38]

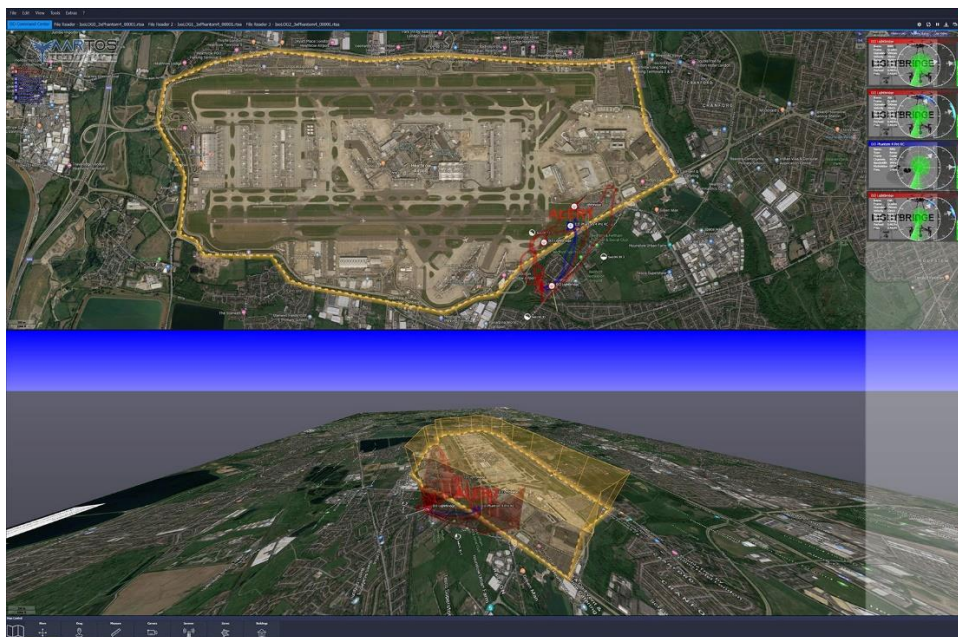
Tabulka 4. Požadavky systému na instalaci RTSA Suite [39]

Systémové požadavky	
Procesor	Nejméně 1,6 GHz nebo rychlejší čtyřjádrový, doporučený 3 GHz nebo rychlejší více jádrový (4+)
Operační systém	Windows 7/8/10 64bit, Linux, MacOS
RAM	Nejméně 2 GB, doporučená 8 GB a více
Místo na pevném disku	500 MB pro instalaci
Open GL	3.0 nebo vyšší
Grafická karta	Alespoň Intel HD nebo podobné, doporučené NVIDIA GPU s CUDA 2.0+
Display	Nejméně 1280x1024, doporučený 1920x1080 a vyšší
USB	Alespoň jeden volný port USB pro připojení PC a spektrálního analyzátoru

V případě použití více jak jedné antény IsoLOG 3D DF je nutné, aby každá z antén měla svůj analyzátor. Firma Aaronia nabízí analyzátor Spektran V6. Jedná se o vysoce výkonný analyzátor spektra v reálném čase. Analyzátor je kompatibilní se všemi běžnými anténami firmy Aaronia. [40]

Software RTSA Suite PRO řídí a zobrazuje všechny dostupné integrované komponenty, jako jsou radiofrekvenční detektory, přidané kamery, rušičky atd. Nabízí nastavení víceúrovňových poplašných zón, které umožňuje jejich konfiguraci v jakémkoli tvaru a výšce. Díky nastavení různých úrovní alarmu může být v každé zóně různá gradace poplachu. Například v některých zónách může probíhat pouze jedna registrace, zatímco v jiných velmi kritických zónách může být spuštěna odpovídající vyšší úroveň alarmu. Vstup bezpilotního letadla do vymezené zóny může kromě spuštění poplachu aktivovat například rušičku (pokud je přidána) pro uzemnění bezpilotního letadla. [38]

Je více možností zobrazení, která software poskytuje. Pravděpodobně nejčastěji používanou vizualizací dronů je 2D perspektiva shora. Je jasně strukturovaná, snadno pochopitelná a navigovatelná díky své podobnosti s běžnými mapovými řešeními založenými na satelitních snímcích. Při využití alespoň dvou antén může být tato vizualizace rozšířená o výšku dronu a tím se z ní stává 3D zobrazení. 3D pohled usnadňuje vyhodnocení vzdáleností mezi různými objekty na mapě. Příklad tohoto typu vizualizace je zobrazen na obrázku 14, kde je také ukázána žlutě vymezená poplašná zóna. [30]



Obrázek 14. 2D a 3D topografické zobrazení v reálném čase [30]

Do 3D zobrazení mohou být také integrovány 3D modely. To umožňuje realistický pohled na sledovanou oblast. Vyžaduje to ovšem přesné vymodelování terénu, přistávací dráhy, pojezdových ploch a budov. Toto bylo využito například při použití na letišti v Anglii. 3D pohled lze pak libovolně otáčet, přibližovat a naklánět ve všech rozměrech. [23]

Software také nabízí simultánní zobrazení všech detekovaných dronů a jejich pilotů, automatickou klasifikaci, zaznamenávání dat v reálném čase. Systém je navíc schopný spolupracovat s aplikací, která kdykoli umožňuje přehled o aktuálním stavu, a také kontrolu celého systému. [38]

4.2 Software používaný systémem ELVIRA

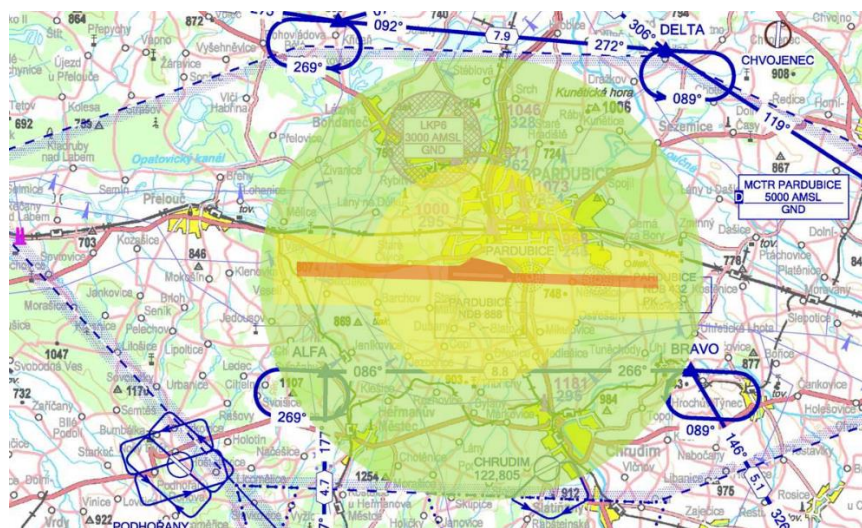
Na mapovém rozhraní, používajícím snímky z aplikace Google Earth, které je automaticky aktualizováno při připojení k internetu, jsou zobrazovány barevně odlišené trasy letících dronů a ptáků. Vizualizaci všech typů zobrazených cest lze vypínat a zapínat dle potřeby. Systém ELVIRA lze snadno integrovat do Security systémů třetích stran. Stopy letících objektů a případné alarmy spuštěné po zachycení radarem tak mohou být přidány jako vrstva do letištních bezpečnostních systémů. Systém posílá data pomocí rozšiřitelného značkovacího jazyka (XML – Extensible Markup Language), který umožňuje jejich strukturování. XML je určen pro přenos dat mezi informačními systémy. V případě vyžádání jsou poskytnuty i jiné formáty, jako je evropský jednotný binární standardizovaný protokol ASTERIX (All-purpose Structured Eurocontrol Radar Exchange). Pro budoucí vyhodnocení jsou všechny zachycené trasy a spuštěné alarmy ukládány do databáze. Příklad výstupu je zobrazen na přenosné jednotce ukázané na obrázku 15. [41]



Obrázek 15. Přenosná jednotka se zobrazením výstupu z radaru ELVIRA [41]

4.3 Zapojení systémů do provozu letišť

Pro integraci statického systému AARTOS X9 PRO je zapotřebí, aby z paralelně zapojených analyzátorů Spektran V6 byla svedena data do centrálního monitorovacího počítače, který bude k dispozici pro MTWR na LKPD. Vzhledem k možnostem, které nabízí nastavení, je systém schopný pracovat prakticky samostatně. Při nastavení víceúrovňových poplašných zón má systém možnost spustit alarm a varovat tak službu ŘLP před potenciálním nebezpečím s dostatečným předstihem. [30] Na základě konzultace se safety/security managerem na letišti Pardubice tato práce navrhuje tři stupně poplašných zón. První by upozornila ŘLP v případě zaregistrování pohybu dronu v dosahu antén v okolí letiště. To poskytne informaci o pohybu dronu s dostatečným předstihem a ŘLP může sledovat jeho pohyb a zvážit hrozbu, kterou by detekovaný dron mohl způsobit. Jednalo by se o takzvanou zelenou zónu, která má za účel pouze informovat ŘLP o pohybu dronu ve vzdáleném okolí letiště. Druhá poplašná zóna by byla tvořena kružnicí se středem ve vztažném bodu letiště o poloměru přibližně 3-4 km a dvěma obdélníky ohraničující větší část okolí sestupových cest (přibližně 1,5 km). Jednalo by se o žlutou zónu, která by v případě spuštění alarmu varovala ŘLP, které by mohlo na základě pohybu dronu vyhodnotit, zda se jedná o hrozbu pro letiště, a mohlo se případně připravit nebo zamezit dalšímu postupu bezpilotního systému. Třetí zóna by byla červenou zónou a pokrývala by areál letiště a sestupové cesty. ŘLP by tak bylo včas informováno, kdyby se dron, pohybující se v okolí, přiblížil nad prostor letiště a mohl by tak ohrozit jeho provoz. Jejich 2D vyobrazení je ukázáno na obrázku 16.



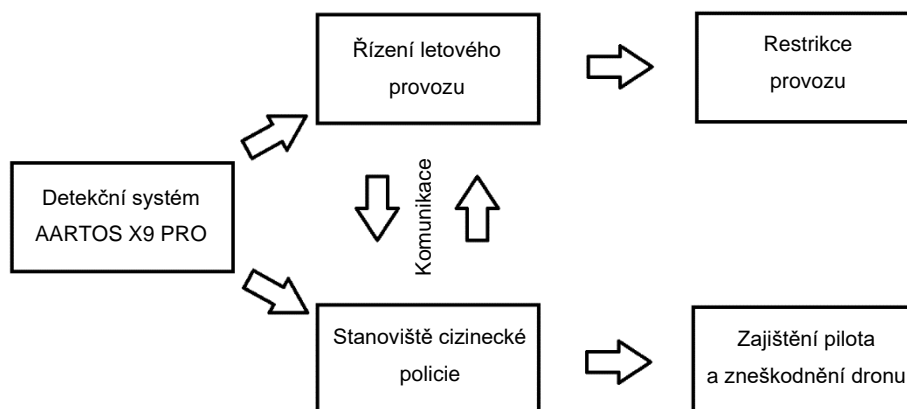
Obrázek 16. Návrh poplašných zón systému AARTOS X9 PRO [28]

Výškové omezení je limitováno dosahem detekčního systému. Červená zóna by teoreticky nemusela sahat až do tak velké vzdálenosti od letiště, protože tam se letadla

pohybují ve vyšších letových hladinách než bezpilotní systémy. Nicméně výhodou vyobrazeného návrhu je, že na drony přibližující se v ose dráhy (tedy v nejméně kritické oblasti) bude upozorněno s maximálním stupněm varování.

Po konzultaci se safety/security managerem na letišti Pardubice bylo rozhodnuto, že vzhledem k vytíženosti stanoviště ŘLP není možné, aby se ŘLP staralo o další činnosti spojené s pohybem dronu v blízkosti letiště (jako je například oznámení na policii nebo eliminace dronu). Z tohoto důvodu je třeba, aby výstup ze systému byl k dispozici na takovém stanovišti, které může tyto činnosti vykonávat, a to 24 hodin 7 dní v týdnu. Možná stanoviště jsou na letišti Pardubice tři. První a nejméně vhodné je vrátnice letiště. Stanoviště vyhovuje požadavku na nepřetržitou službu, nicméně mohlo by dojít k prodloužení, neboť vrátný má povinnost pravidelných obchůzek a zároveň musí zajišťovat pohyby na svém stanovišti. Dalším stanovištěm s nepřetržitým provozem je buď vedoucí vojenského útvaru, nebo stanoviště cizinecké policie, které se nachází přímo v areálu letiště. Obě tyto varianty jsou vhodné, neboť na obou z nich je možné okamžitě provést potřebné kroky k zajištění UAV a jeho pilota. Proto je třeba rozhodnout o umístění na jedno z těchto míst. Toto rozhodnutí by bylo pravděpodobně závislé na tom, jestli by daný systém pořizovala vojenská nebo civilní část letiště, nicméně obě tyto varianty jsou realizovatelné se stejnou efektivitou.

Na následujícím procesním diagramu (obrázek 17) jsou znázorněny navrhované zapojení do procesů letiště zkonultované se safety/security managerem letiště Pardubice. Je zde uveden příklad procesů při detekci dronu v oblasti letiště, kdy výstup ze systému je dostupný pro ŘLP a stanoviště cizinecké policie. Ze schématu je patrné, že ŘLP se v případě pohybu dronu v oblasti letiště bude starat o bezpečnost provozu letiště a řešit jeho případné omezení. Zatímco stanoviště cizinecké policie se může starat o zadržení pilota a odstranění nebezpečí v podobě dronu pohybujícího se v oblasti letiště. V průběhu vykonávání těchto činností bude udržováno mezi stanovišti spojení, kvůli případným povolením a zachování maximální bezpečnosti.



Obrázek 17. Návrh zapojení systémů do procesů letiště [zdroj: autor]

Pro integraci mobilního radaru ELVIRA do provozu LKPD se nabízejí dvě možnosti. V případě umístění na kratší dobu, tak jak bylo uvedeno v kapitole 3.4 (umístění během veřejné akce – Aviatické pouti), by bylo postačující, aby dostatečně proškolený pracovník sledoval výstup dat z radaru přímo na přenosné jednotce a v případě narušení sledovaného prostoru informoval ŘLP. Výhodou této metody je, že příprava systému nevyžaduje zásahy na stanovišti ŘLP a systém je schopný být v provozu během pěti minut. Nevýhodou může být zpoždění v předání informací, které lze vzhledem k nutnosti komunikace mezi dvěma stanovišti očekávat. Druhá možnost, která by byla vhodnější při umístění systému na delší dobu (vícedenní odstávka letiště Čáslav a následný provoz vojenských letounů na LKPD), by byla integrace výstupu z radaru do mapových podkladů přímo na stanovišti ŘLP, což by vzhledem ke kompatibilitě se systémy třetích stran, kterou nabízí firma Robin radar system, mělo být možné. [41] To by umožňovalo sledování výstupu přímo na stanovišti ŘLP a urychlilo by to vyhodnocení hrozby a následné varování letů, které by mohly být ohroženy. V obou případech integrace je samozřejmě vhodné nastavení poplašné zóny, která v případě pohybu dronu v ní spustí alarm a informuje tak buď pracovníka s mobilním systémem, nebo přímo ŘLP. Vzhledem k tomu, že se jedná o sekundární systém, je postačující výstup pouze pro ŘLP.

5 Doporučení pro využití detekčních systémů na řízených letištích v ČR

Poslední kapitola bude vytvářet určité možnosti pro rozšíření celé práce. Bude zde poukázáno na podobnosti a rozdílnosti s ostatními řízenými letišti v ČR. Cílem je zhodnotit získané informace pro případné rozšíření práce či její pokračování.

5.1 Srovnání LKPD s dalšími letišti v ČR

Řízených letišť mimo LKPD je v ČR několik. Civilní letiště jsou: Letiště Václava Havla Praha, letiště Brno-Tuřany, letiště Leoše Janáčka Ostrava, letiště Vodochody, letiště Kunovice a letiště Karlovy Vary. MCTR se nachází v okolí vojenských letišť, a to konkrétně: letiště Kbely, letiště Čáslav a letiště Náměšť. [27] Jak je patrné z této práce, při výběru detekčních systémů pro ochranu letiště je důležitým parametrem letištní provoz. Jeho určitým vypovídajícím měřítkem je počet odbavených cestujících. V tabulce 4 jsou uvedeny jejich počty v minulém roce na mezinárodních letištích v ČR s IFR provozem poskytující osobní přepravu.

Tabulka 5. Počet odbavených cestujících v roce 2019 na vybraných letištích v ČR [42][43][44][45][46]

Letiště	Počet cestujících
Letiště Brno-Tuřany	543 633
Letiště Karlovy Vary	62 434
Letiště Leoše Janáčka Ostrava	323 320
Letiště Pardubice	102 045
Letiště Václava Havla Praha	17 804 900

Dalším parametrem pro srovnání je velikost perimetru, který je třeba chránit. Ten závisí nejen na samotné rozloze areálu letiště, ale také na počtu a rozmístění drah. Rozmístění detekčních systémů bude zajisté jiné, pokud bude na letišti více drah různoběžného směru, jako je tomu na Letišti Václava Havla v Praze. [27]

5.2 Zhodnocení informací o detekčních systémech

LKPD je, vzhledem k tomu že se jedná o mezinárodní vojenské letiště s povoleným provozem civilních letadel, určitým unikátem. Ale jak vyplývá z předchozí kapitoly, může být v určitých ohledech podobné jiným řízeným letišťům v ČR. Pro výběr vhodného detekčního systému je třeba znát specifika provozu letiště. Každý typ detekce má své

výhody i nevýhody. Proto je třeba zvážit, jak přesnou a komplexní detekci daná chráněná oblast vyžaduje. Vzhledem k počtu odbavených cestujících za rok lze podle údajů uvedených v tabulce 4 definovat LKPD jako letiště téměř s dvojnásobným provozem v porovnání s letišťem v Karlových Varech, nebo jako letiště se třetinovým provozem v porovnání s letišťem v Ostravě. Je ale zřejmé, že provoz na konkrétním letišti nezáleží pouze na počtu odbavených cestujících. Příkladem může být provoz rozdílného typu letadel. Za předpokladu, že na letišti v Karlových Varech bude v provozu stejný počet letadel jako v Pardubicích, ale budou mít přibližně poloviční kapacitu pro přepravu osob, čísla zapsaná v tabulce budou stejná, ale provoz co do počtu odbavených letadel bude různý. Zároveň, jak vyplývá z této práce, je třeba brát v úvahu i nárazové zvýšení provozu letiště, jako tomu je na LKPD. Z toho plyne, že v případě aplikace detekčních systémů na jiné řízené letiště v ČR, je třeba zhodnotit konkrétní provoz a na jeho základě následně volit vhodný způsob detekce.

Jestliže by pro ochranu jiného řízeného letiště v ČR byl zvolen stejný statický detekční systém jako v této práci, mohlo by umístění přibližně odpovídat umístění zde zvolenému. Dráhy všech ostatních řízených letišť (výjimku tvoří Letiště Václava Havla v Praze) mají podobné uspořádání a velikost přistávacích a vzletových ploch (v případě většího množství drah jsou buď rovnoběžné nebo téměř rovnoběžné [27]), což umožňuje umístění systémů odpovídající návrhu této práce. Budou tak pokryty sestupové cesty, kde hrozí největší nebezpečí střetu s dronem, a zároveň bude zabezpečena oblast letiště a jeho okolí.

Použití sekundárního detekčního systému k ochraně LKPD na jiných letištích by bylo třeba zvážit vzhledem ke konkrétním rizikům a danému provozu. Na základě těchto informací je pak důležité rozmyslet, zda využít stejný systém, jako byl zvolen v této práci.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření návrhu aplikace detekčních systémů pro ochranu konkrétního řízeného letiště v ČR. V práci bylo popsáno rozdělení bezpilotních systémů a rozebrána základní legislativa týkající se bezpilotních prostředků, zejména její blíží se změny. Dále byly rozebrány různé způsoby detekce bezpilotních prostředků a byl proveden průzkum trhu firem poskytujících detekční systémy. Na základě potřeb a parametrů vybraného letiště Pardubice byly zvoleny systémy sloužící pro ochranu jeho vzdušného prostoru. Pro tyto systémy byl vytvořen návrh aplikace na vybraném letišti, kde bylo popsáno rozmístění zvolených systémů, software těchto systémů a odhadnuta jejich předpokládaná efektivita. Součástí tohoto návrhu bylo i zapojení systémů do procesů letiště, které bylo prodiskutováno přímo se safety/security managerem na letišti Pardubice. V závěru této práce byly získané informace generalizovány na řízená letiště v ČR obecně a bylo poukázáno na specifické prvky týkající se vybraného letiště Pardubice.

Pro zavedení do praxe by musel tento návrh vyhrát soutěž vyhlášenou letištěm Pardubice. K tomu by bylo zapotřebí ho ještě rozšířit. Při psaní bakalářské práce nebyl brán v úvahu ekonomický aspekt. To ovšem nijak nesnižuje efektivnost návrhu, který zajišťuje nárůst bezpečnosti provozu na letišti. Započítání ceny a finančních možností letiště při výběru a umístění systémů by však bylo vhodným rozšířením vytvořeného návrhu pro uvedení do praxe. Určitou limitací práce je absence vhodného systému pro eliminaci bezpilotních prostředků. To by vyžadovalo provést podobný průzkum, jaký byl vykonán v této práci s detekčními systémy, ale v oblasti systémů a možností pro eliminaci. Výběrem vhodného eliminačního systému by byla úroveň bezpečnosti ještě zvýšena. Zároveň by bylo možné práci využít i pro navržení zabezpečení proti bezpilotním letadlům na jiném řízeném letišti v ČR.

I přes zmíněná omezení byl však v rámci této práce cíl vytvoření návrhu detekčních systémů za účelem ochrany řízeného letiště v ČR splněn. Návrh je funkční, a to i bez výše uvedených možností rozšíření práce. Byla provedena dostatečná rešerše v oblasti detekčních systémů dronů, která umožnila výběr vhodných systémů a jejich zapojení do provozu. Zároveň efektivitu návrhu zvyšují konzultace přímo s výrobcí detekčních systémů nebo pracovníky zvoleného letiště.

Zdroje

- [1] KARAS, Jakub a Tomáš TICHÝ. Drony. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.
- [2] KELLER, Ing. Ladislav. Učební texty pro piloty UAS. 3. Praha: Dronim, 2019.
- [3] ASTESJ [online]. Vol.5. Polsko, 2020 [cit. 2020-11-05]. ISSN 2415-6698. Dostupné z:
<https://pdfs.semanticscholar.org/3a97/e45065d7e3baf25f64489dde0ea86100dd67.pdf>
- [4] MINISTERSTVO DOPRAVY: Tiskové zprávy [online]. 2020 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Drony-v-CR-budou-od-pristih-roku-letat-dle-novych>
- [5] EASA: Provisions applicable to both 'open' and 'specific' category [online]. 2020 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/the-agency/faqs/drones-uas#category-understanding-the-'open'-category>
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. VFR příručka. [online]. 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/enr_1_cz.html
- [7] ANTIDRONE: Drone Detection [online]. Spain, 2019 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://anti-drone.eu/applications/drone-detection.html>
- [8] ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU ČESKÉ REPUBLIKY [online]. 2020 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z:
http://www.rlp.cz/spolecnost/tisk/tiskzpravy/Stranky/Drony_v_CR_budou_letat_dle_novych_pravidel.aspx
- [9] UPVISION [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <http://upvision.cz/utm/>
- [10] KARAS, Jakub. 222 tipů a triků pro drony. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4874-7.
- [11] DRÁPAL, Stanislav. VYUŽITÍ SSR MÓDU S PRO ŘÍZENÍ POHYBŮ LETADEL A VOZIDEL PO PLOŠE LETIŠTĚ [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103872.
Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce DOC. ING. SLAVOMÍR VOSECKÝ, CSC.
- [12] GUVENC, Ismail, Ozgur OZDEMIR, Yavuz YAPICI, Hani MEHRPOUYAN a David MATOLAK. Detection, localization, and tracking of unauthorized UAS and

Jammers. *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* [online]. IEEE, 2017, 2017, 1-10 [cit. 2020-11-28]. ISBN 978-1-5386-0365-9. Dostupné z: doi:10.1109/DASC.2017.8102043

[13] DETECTION OF SMALL DRONES WITH MILLIMETER WAVE RADAR: Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques FHR [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/security/Detection-of-small-drones-with-millimeter-wave-radar.html>

[14] DRONE DETECTION WITH MIMO RADAR: Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques FHR [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/security/drone-detection-with-mimo-radar.html>

[15] Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018 [cit. 2020-11-05]. ISSN 01636804. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85045934652&origin=reflist&sort=plf-f&src=s&st1=drone+detection&nlo=&nlr=&nls=&sid=a1479b92a61de4febabc781d0ab1979f&sot=b&sdt=sisr&sl=30&s=TITLE-ABS-KEY%28drone+detection%29&ref=%28airport%29&recordRank=>

[16] DETEKCE A SLEDOVÁNÍ BEZPILOTNÍCH PROSTŘEDKŮ [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80020/F6-BP-2018-Hajek-Martin-Sled_a_detek_bezp_prostredku.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. David Hůlek.

[17] SKYLOCK: Drone detection system [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.skylock1.com/drone-detection/>

[18] DETECT: Intelligent sensors [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://detect-inc.com>

[19] ROBIN: Radar System [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.robinradar.com>

[20] DEDRONE [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.dedrone.com>

[21] ANTIDRONE: Professional UAV Detection and Neutralization System [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://anti-drone.eu/applications/drone-detection.html>

- [22] AARTOS DDS DEPLOYED AT HEATHROW AIRPORT. Aaronia [online]. 2020 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://aaronia.com/aartos-dds-deployed-at-heathrow-airport/>
- [23] AARTOS: Drone detection system [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://drone-detection-system.com>
- [24] DJI [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/aeroscope>
- [25] DRONE SHIELD [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.droneshield.com/view-all-products>
- [26] 9 Counter-Drone Technologies To Detect And Stop Drones Today [online]. 2019 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.robinradar.com/press/blog/9-counter-drone-technologies-to-detect-and-stop-drones-today>
- [27] ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU: LKPD – Pardubice [online]. 2018 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm
- [28] VFR Příručka: LKPD – Pardubice [online]. 2020 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/lkpd_text_cz.html
- [29] Právní regulace letecké dopravy mezi Evropskou unií a Spojenými státy americkými [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/bp9ny/Bakalarska_prace_Jakub_Janicek_final.pdf Bakalářská práce. MUNI Brno. Vedoucí práce Mgr. Bc. Terezie Smejkalová, Ph.D.
- [30] AARTOS DATASHEET: Aaronia [online]. Německo, 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://downloads.aaronia.com/datasheets/solutions/drone_detection/Aaronia_AARTOS_Drone_Detection_System.pdf
- [31] F.A.Q. SHEET: Aartos [online]. Německo: Aaronia drone detection, 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://downloads.aaronia.com/datasheets/solutions/drone_detection/Aaronia_AARTOS_DDS_FAQ.pdf
- [32] LETECKÝ PŘEDPIS L 14 Letiště: Hlava 1 - Všeobecně [online]. Německo, 2016 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/effective/hl1.pdf>
- [33] LETIŠTĚ PARDUBICE: oficiální web [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.airport-pardubice.cz>

- [34] SPRÁVA LETIŠTĚ PARDUBICE [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <http://www.slp.army.cz>
- [35] AVIATICKÁ POUŤ [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: www.aviatickapout.cz
- [36] PLENINGER, Stanislav. Systémy CNS. Praha, 2019/20. Prezentace. ČVUT FD.
- [37] LETECKÝ PŘEDPIS L 14 – Hlava 11 – Ochranná pásma leteckých staveb. Úřad pro civilní letectví [online]. 2016 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/effective/hl11.pdf>
- [38] AARONIA: Software RTSA Suite [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://aaronia.com/software/rtsa-suite/>
- [39] AARONIA: RTSA manual [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: http://www.aaronia.com/rtsa-manual/en/Content/B_Installation/SystemRequirements.htm
- [40] AARONIA: Spectran V6 X [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://aaronia.com/spectrum-analyzers/spectran-v6-usb-real-time/>
- [41] Robin radar system: Brochure [online]. 2018 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.epicos.com/sites/default/files//robinradar-brochure-dronedetectie-lr-nov-2018.pdf>
- [42] Letiště Praha [online]. 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/letiste-vaclava-havla-praha-odbavilo-za-rok-2019-rekordnich-178-milionu-cestujicich>
- [43] PardubiceŽivě [online]. 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.pardubicezive.eu/pocet-odbavenych-cestujicich-v-roce-2019-na-letisti-pardubice-stoupl/>
- [44] Brno-Airport [online]. 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.brno-airport.cz/letiste/tiskove-zpravy/zajem-o-lety-z-brna-roste-v-roce-2019-odbavilo-turanske-letiste-543633-cestujicich/>
- [45] Internationa Airport Karlovy Vary [online]. 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.airport-k-vary.cz/cs/statistika-vykonu/>
- [46] Airport Ostrava: Výroční zpráva [online]. 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: http://www.airport-ostrava.cz/UserFiles/File/Vyrocní_zpravy/Výroční%20zpráva%202019.pdf

[47] LYKOU, Georgia, Dimitrios MOUSTAKAS a Dimitris GRITZALIS. Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies. *Sensors* [[online]. 2020, **20**(12) [cit. 2020-11-05]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20123537

Seznam obrázků

Obrázek 1. 360° radar od společnosti Skylock

Obrázek 2. DroneWatcherRF

Obrázek 3. Harrier DRS

Obrázek 4. mobilní verze detekčního systému ELVIRA

Obrázek 5. Průřez detekčním systémem ELVIRA

Obrázek 6. Detekční systém AARTOS X9 PRO od společnosti Aaronia

Obrázek 7. Zastoupení typů senzorů použitých k detekci UAV

Obrázek 8. Poloha pardubického letiště vzhledem k městu (čárkovaně je vyznačená MCTR Pardubice)

Obrázek 9. Ochranná pásma s výškovým omezením staveb pro přístrojovou ranvej

Obrázek 10. Anténa IsoLOG 3D DF-160 využívaná systémem X9 PRO

Obrázek 11. Rozmístění antén IsoLOG 3D DF-160 a mobilního systému ELVIRA na letišti Pardubice

Obrázek 12. Pokrytí systémem AARTOS X9 PRO

Obrázek 13. Pokrytí mobilním radarem ELVIRA

Obrázek 14. 2D a 3D topografické zobrazení v reálném čase

Obrázek 15. Přenosná jednotka se zobrazením výstupu z radaru ELVIRA

Obrázek 16. Návrh poplašných zón systému AARTOS X9 PRO

Obrázek 17. Návrh zapojení systémů do procesů letiště

Seznam tabulek

Tabulka 1. Výhody a nevýhody jednotlivých typů detekce

Tabulka 2. Specifikace antény IsoLOG 3D DF-160

Tabulka 3. Specifikace radaru ELVIRA

Tabulka 4. Požadavky systému na instalaci RTSA Suite

Tabulka 5. Počet odbavených cestujících v roce 2019 na vybraných letištích v ČR