



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Optimalizace sběru kondenzačních stop
Optimization of Contrails Collection

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Mgr. Iveta Kameníková

Bc. Ondřej Kahoun

Praha 2023



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Ondřej Kahoun

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Optimalizace sběru kondenzačních stop**

Název tématu (anglicky): Optimization of Contrails Collection

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je návrh alternativního systému sběru dat kondenzačních stop ke stávajícímu systému a vyhodnocení získaných dat vzhledem k meteorologickým podmínkám získaných aerologickým měřením.
- Proveďte analýzu současného stavu vzniku kondenzačních stop, dopadů provozu proudových motorů na atmosféru a radiačního působení kondenzačních stop.
- Zjistěte souvislosti meteorologické situace s tvorbou perzistentních kondenzačních stop.
- Popište možnosti získávání meteorologických informací v cestovních hladinách.
- Navrhněte alternativní systém sběru dat kondenzačních stop.
- Ověřte teorii vzniku kondenzačních stop na získaných datech.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Setvák M. a kol.: Fyzika oblaků a srážek, Academia, 2007
Kenneth B. Mc Cool: Aviation Meteorology Unscrambled
Gossling S.: Climate Change and Aviation, Issues, Challenges and Solutions
Kopáček J., Bednář J., Žák M.: Jak vzniká počasí, Karolinum, 2019
- Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

Datum zadání diplomové práce: **16. července 2021**
(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 diplomové práce: **15. května 2023**

- 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



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Ondřej Kahoun
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. prosince 2022



Abstrakt

Předmětem diplomové práce „Optimalizace sběru kondenzačních stop“ je návrh možného řešení systému, který by umožňoval automatický sběr dat o kondenzačních stopách, které se vytvořily v blízkosti aktivní aerologické sondy. Teoretická část práce obsahuje popis vzniku, vývoje a působení kondenzačních stop a exhalací leteckých motorů na klima, jsou popsány vlivy meteorologické situace na tvorbu perzistentních kondenzačních stop a také vybrané zdroje informací o stavu atmosféry a zdroje informací z letadel, tvořících kondenzační stopy ve sledovaném prostoru. Praktická část práce obsahuje možné řešení systému sběru dat o kondenzačních stopách, ověření koncepce navrhovaného systému měřením kondenzačních stop v terénu, testování změřených kondenzačních stop Schmidt–Applemanovým kritériem a vyhodnocení získaných dat.

Klíčová slova: aerologická sonda, kondenzační stopa, radiační působení, relativní vlhkost, Schmidt–Applemanovo kritérium, sekundární radiolokace



Abstract

The subject of the diploma thesis „Optimalization of Contrails Collection“ is the proposal of a possible system solution, that would enable the automatic collection of data on condensation trails, that have formed in the vicinity of an active aerological probe. The theoretical part of the work contains a description of formation, development and effect of condensation trails and aircraft engine exhaust on the climate, the effects of the meteorological situation on the formation of persistent condensation trails are described, as well as selected sources of meteorological information and information from aircraft forming the condensation trails in the monitored area. The practical part of the work includes a possible solution of the system verifying the concept of the proposed system by measured condensation trails in the field, testing of the measured condensation trails by the Schmidt–Appleman criterion and evaluation of the obtained data.

Keywords: aerological probe, condensation trail, radiative forcing, relative humidity, Schmidt–Appleman criterion, secondary radiolocation



Poděkování

Velmi rád bych zde poděkoval své vedoucí diplomové práce paní Mgr. Ivetě Kameníkové za její vstřícnost a ochotu, cenné rady a trpělivost. Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich podporu.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Optimalizace sběru kondenzačních stop vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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 11. května 2023

.....
Podpis



Obsah

Úvod	11
1. Kondenzační stopy	13
1.1 Vznik kondenzačních stop.....	13
1.1.1 Spalování leteckého paliva	15
1.1.2 Vlhkost vzduchu	16
1.1.3 Kondenzace a depozice vodních par	19
1.1.4 Mísení.....	20
1.2 Vývoj kondenzačních stop.....	23
1.3 Dopady na klima	25
1.3.1 Dopady na klima–kondenzační stopy	28
1.3.2 Dopady na klima–CO ₂	31
1.3.3 Dopady na klima–NO _x	31
1.3.4 Dopady na klima–vodní pára	32
1.3.5 Dopady na klima–saze	33
1.3.6 Dopady na klima–SO _x	34
1.4 Perzistentní kondenzační stopy vzhledem k meteorologické situaci.....	34
2. Vybrané zdroje informací o atmosféře a informace ze systémů letadel	39
2.1 Aerologická sondáž.....	39
2.2 Systém AMDAR	40
2.3 SSR, ADS–B.....	43
2.3.1 Sekundární radiolokace	46
2.3.2 SSR Mód S.....	47
2.3.3 Ochrana proti chybám módu S	54
2.3.4 ADS–B.....	56
3. Návrh alternativního systému pro sběr kondenzačních stop	57
3.1 Stávající systém výzkumu kondenzačních stop.....	57
3.1.1 Kamerový systém	58
3.1.2 Data z přijímačů zpráv módu S	58
3.1.3 Přiřazení kondenzačních stop k informacím ze zpráv módu S	59
3.2 Koncept alternativního systému	59



3.3	Vstupní část systému	61
3.3.1	Příjem signálu sondy RS 41 SG.....	62
3.3.2	Příjem zpráv módu S	64
3.3.3	Příjem dat z ČHMÚ.....	64
3.3.4	Kamerový systém	65
3.4	Výpočetní část.....	65
3.4.1	Dekódování zpráv sondy RS 41 SG	65
3.4.2	Filtrace zpráv módu S.....	68
3.4.3	Dekódování zpráv s DF 4	71
3.4.4	Dekódování zpráv s DF 17	72
3.4.5	Dekódování výšky ze zpráv s DF 17	72
3.4.6	Dekódování polohy ze zpráv s DF 17	73
3.4.7	Dekódování zpráv s DF 17 a TC 19.....	75
3.4.8	Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21	76
3.4.9	Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21 s datovou paritou.....	77
3.4.10	Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21 s adresní paritou.....	78
3.4.11	Řízení polohy kamery	83
3.4.12	Stanovení prostoru zabíraného kamerou	85
3.5	Výstupní část	91
3.5.1	Matice sondy RS 41 SG	91
3.5.2	Matice zpráv módu S	91
3.5.3	Matice meteorologických dat	92
3.5.4	Matice kondenzačních stop	92
3.6	Sběr dat a jejich vyhodnocení	92
3.6.1	Ověření dat Schmidt–Applemanovým kritériem	95
3.6.2	Diskuse.....	99
4.	Závěr	100
	Seznam použité literatury	102
	Seznam obrázků	109
	Seznam grafů.....	110



Seznam tabulek111

Příloha A Měření kondenzačních stop112



Seznam zkratek

ACARS	(Aircraft Communications Addressing and Reporting System)
ADS	Automatické závislé sledování (Automatic Dependent Surveillance)
AMDAR	(Aircraft Meteorological Data Relay)
AOSFR	(AMDAR Onboard Software Functional Requirements Specification)
ATC	Řízení letového provozu (Air Traffic Control)
BDS	(Comm-B Data Selector)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav (Czech hydrometeorological Institute)
ECEF	Souřadný systém ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed)
ELS	Základní sledování (Elementary Surveillance)
EHS	Rozšířené sledování (Enhanced Surveillance)
ENU	Souřadný systém ENU (East-North-Up)
ERF	Efektivní radiační působení (Effective Radiative Forcing)
FIR	Letová informační oblast (Flight Information Region)
FL	Letová hladina (Flight Level)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organisation)
IFR	Pravidla pro let dle přístrojů (Instrument Flight Rules)
IPCC	Mezivládní panel pro změny klimatu (Intergovernmental Panel On Climate Change)
ISA	Mezinárodní standardní atmosféra (International Standard Atmosphere)
MRAR	(Meteorological Routine Air Report)
MTOW	Maximální vzletová hmotnost (Maximum Take-Off Weight)
RF	Radiační působení (Radiative Forcing)
SSR	Sekundární přehledový radar (Secondary Surveillance Radar)
TAS	Pravá vzdušná rychlost (True Air Speed)
WMO	Světová meteorologická organizace (World Meteorological Organization)
XOR	Exklusivní disjunkce (Exclusive disjunction)



Úvod

Od dob, kdy výkony letadel začaly umožňovat dosahování výšek nad 7 km, je možné pozorovat umělý oblak tvořený vysoko letícími letadly. Tento umělý oblak se nazývá kondenzační stopa a vzniká jako důsledek spalování leteckého paliva ve výškách, ve kterých je dostatečně chladná atmosféra, aby voda v plynném skupenství, obsažená ve výfukových plynech, mohla zkondenzovat a díky nízké teplotě prostředí následně přejít v ledové krystaly.

Ernst Schmidt v roce 1941 předložil první vědecké vysvětlení tohoto jevu na základě termodynamického principu, v roce 1953 na něj navázal Herbert Appleman, který definoval podmínku pro vznik kondenzační stopy v podobě nutnosti dosažení nasycení vzhledem k vodě během procesu mísení výfukových plynů s okolním vzduchem. Tento vědecký základ je označován jako Schmidt–Applemanovo kritérium.

Se stoupajícím zájmem o působení člověka na klima vzrostl i vědecký zájem o kondenzační stopy, který se odrazil v mnoha studiích, řešících zejména radiační působení na klima dlouhodobých kondenzačních stop a stop, které přecházejí v oblačnost podobnou přírodní cirrovité oblačnosti, krátkodobé kondenzační stopy mají na klima jen minimální dopad. Zatímco vznik kondenzačních stop je dobře vědecky popsán, odhady v působení kondenzačních stop na klima se velmi liší, zejména z důvodu obtížně popsatelného chování dlouhodobých stop, které setrvávají na obloze dlouhou dobu a rozšiřují se.

V souvislosti s omezováním vlivu dlouhodobých kondenzačních stop na klima jsou v poslední době diskutovány zejména strategie založené na změně letového profilu, úpravě leteckého paliva a případně úpravě pohonné jednotky.

Ústav letecké dopravy FD ČVÚT provozuje systém sběru dat o kondenzačních stopách, který má přispět k objasnění některých nejasností ve výzkumu kondenzačních stop, jako je např. zjištění souvislosti délky trvání kondenzačních stop a fuel flow, nebo zjištění statisticky příhodných letových hladin k tvorbě dlouhodobých stop. Systém je založen na sběru dat z kamer, umístěných v Děčíně a přiřazování informací z letadel, získaných z odpovídáčů módu S z letadel, která stopu vytvořila. V odpovědích módu S se mohou nacházet i meteorologická data, avšak jen velmi malé množství odpovědí tyto data obsahuje. K zaznamenaným kondenzačním stopám je také možné přiřadit údaje z aerologické sondáže, nejbližší místo vypouštění sond je však asi 100 km vzdálené a proto přiřazení těchto dat může trpět prostorovým a také časovým zkreslením.



Cílem této diplomové práce je kromě podání přehledu o vzniku a vývoji kondenzačních stop, jejich působení na klima, vlivu meteorologické situace na tvorbu kondenzačních stop a dostupných zdrojích informací k výzkumu, navrhnout možné řešení systému tak, aby bylo možné automaticky zaznamenávat kondenzační stopy, které se tvoří v blízkosti aerologické sondy, za účelem minimalizace zkreslení přiřazovaných meteorologických dat. V rámci ověření zamýšleného řešení systému bylo prováděno měření kondenzačních stop v terénu. Data z tohoto měření sloužila jak k vyhodnocení použitelnosti navrhovaného řešení systému, tak i k ověření shody naměřených kondenzačních stop se Schmidt–Applemanovým kritériem.



1. Kondenzační stopy

Kondenzačními stopami jsou nazývány většinou světlé pruhy na obloze, tvořící se za prolétávajícím letadlem nebo raketou ve výškách 7 až 12 km, tedy ve vyšších hladinách troposféry a nižších hladinách stratosféry, jako důsledek činnosti leteckých spalovacích motorů. Jsou považovány za umělá oblaka horního patra oblačnosti [1].

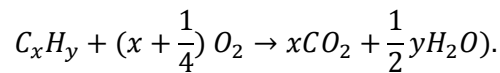
Jejich vznik, vývoj a doba trvání jsou závislé na parametrech vzduchové hmoty, kterou letadlo prolétá. Pokud má vzduchová hmota takové vlastnosti, že umožňuje kondenzačním stopám na obloze vzniknout a přetrvávat v řádu desítek minut až hodin, dále se rozrůstat a vzájemně spojovat, označují se pak jako perzistentní kondenzační stopy, v opačném případě se jedná o kondenzační stopy krátkodobé. Perzistentní kondenzační stopy mohou pokrýt dlouhodobě značnou část oblohy, a protože je kondenzační stopa svým složením a výškou výskytu podobná druhu oblaků Cirrus, označuje se takto vzniklá oblačnost jako indukovaná cirrovitá oblačnost. Světová meteorologická organizace WMO přiřazuje kondenzačním stopám, které trvaly více než 10 minut název Cirrus homogenitus, přičemž přídavné jméno homogenitus označuje obecně oblačnost tvořící se antropogenní činností člověka [2].

Zatímco krátkodobé kondenzační stopy ovlivňují radiální bilanci Země minimálně, u perzistentních kondenzačních stop a vzniklé indukované oblačnosti se naopak předpokládá značná míra tohoto vlivu. Na rozdíl od poměrně dobře zpracované teorie vzniku a vývoje kondenzačních stop přetrvávají nedostatky ve znalostech procesu přechodu perzistentních stop na indukovanou oblačnost a v nejistotách predikcí jejich radiálního působení na klima [3].

Kromě kondenzačních stop generovaných leteckými motory existuje ještě jiný typ kondenzačních stop, objevující se jako důsledek prudkých změn tlaků na křídlech a vrtulích letounů. Protože je životnost těchto stop v řádu vteřin, nemají významný vliv na atmosféru.

1.1 Vznik kondenzačních stop

Kondenzační stopy vznikají při spalování paliva v leteckých motorech a následném mísení vzniklých horkých výfukových plynů vystupujících z motoru letadla s okolní, dostatečně chladnou atmosférou, tj. -40 až -60 °C. Dokonalým spalováním leteckého paliva coby směsi uhlovodíků, vyjádřené obecným vzorcem 1.1, vznikají dvě sloučeniny, a to oxid uhličitý a voda v plynném skupenství:



(1.1)

Po výstupu horkých a vlhkých výfukových plynů z motoru dochází při mísení s okolní vzduchovou hmotou k ochlazení směsi a tedy k nárůstu relativní vlhkosti této směsi. V případě, že relativní vlhkost směsi během procesu mísení překročí mez nasycení vodní parou vzhledem k vodě a směs se stane přesycenou, dojde k energeticky nevyváženému stavu směsi, která má ale snahu tuto nevyváženost co nejkratší cestou opět vyrovnat kondenzací či depozicí. Protože spalování paliva dokonale nikdy neprobíhá, a navíc palivo není složeno jen z uhlovodíků ale i z přidaných aditiv, vystupující výfukové plyny obsahují kromě H₂O a CO₂ i další látky jako saze a oxidy síry. Díky přítomnosti těchto aerosolů, které slouží jako kondenzační jádra, molekuly vody v plynném skupenství v přesycené směsi kondenzují, případně i deponují a tím uvádějí energeticky nevyváženou směs opět do rovnováhy, což trvá do té doby, dokud je okolní vzduch přesycený vzhledem k vodě. Zkondenzované a přechlazené kapičky vody poté velmi rychle mrznou a v tento okamžik se stává kondenzační stopa viditelnou. Aerosoly obsažené ve výfukových plynech nejsou nutnou podmínkou k vytvoření kondenzační stopy, neboť aerosoly se vyskytují (v mnohem menším počtu) i ve vzduchu neovlivněném exhalacími z motoru. Celý proces tvorby kondenzační stopy však urychlují a mají vliv na počet a velikost vzniklých kapiček vody a ledových krystalů [4, 5].

Proces formování kondenzačních stop je možné rozdělit na několik fází. První fází představuje proud spalin z motoru v čase stáří kondenzační stopy 0–0,1 s. Během této fáze jsou do okolního prostředí dodány horké a vlhké výfukové plyny spolu s emitovanými aerosolovými částicemi. Ve druhé fázi v čase stáří kondenzační stopy 0,1–1 s se výfukové plyny ochlazují, a pokud je teplota okolního prostředí dostatečně nízká, aerosolové částice slouží jako kondenzační jádra, na kterých kondenzuje vlhkost obsažená ve směsi výfukových plynů a okolního prostředí. Ve třetí fázi v čase stáří kondenzační stopy 1–10 s vzniklé kapičky vody mrznou a zároveň se začíná projevovat účinek indukovaných vírů z konců křídla letadla. Tyto víry se spojují s proudy z motorů a způsobují vírové proudění v oblasti vzniklé kondenzační stopy. Poslední fází v čase stáří kondenzační stopy 10–100 s představuje pokračující vírové proudění, při kterém ledové krystaly, které se dostaly do nižších hladin, mohou sublimovat a naopak krystaly ve vyšších hladinách mohou dále růst v závislosti na stavu okolního prostředí. Organizovaný pohyb vzduchu vyvolaný



indukovanými víry ustává asi po několika minutách, proces formování kondenzační stopy končí a nastává fáze rozptylu [3].

1.1.1 Spalování leteckého paliva

Vzhledem k rozsahu výšek, ve kterých se kondenzační stopy vyskytují, připadají u letecké dopravy v úvahu pohonné jednotky vrtulové a tryskové. Vrtulové pohonné jednotky jsou používány především v regionální dopravě, kde letadla těchto výšek běžně nedosahují, proto je dále uvažováno jen s motory tryskovými. Typickým představitelem takového motoru je v letecké dopravě motor CFM56 v různých verzích, používaný mj. u letadel Boeing 737 NG a rodiny letadel Airbus A320 ceo [6].

Motor CFM56 spaluje letecký petrolej, což je složitá směs uhlovodíků petrolejové frakce s destilačním rozmezím 180 – 190 °C a obvyklým počtem 9 – 16 atomů uhlíku v řetězci a dále přidaných aditiv. Platnými předpisy není dáno přesné chemické složení, jsou však přísně předepsány fyzikální parametry a stanoven maximální obsah alkenů a aromátů. Většinu leteckého petroleje tvoří alkeny, které mají obecný sumární vzorec C_nH_{2n+2} , zjednodušený sumární vzorec se střední hodnotou uhlíku leteckého petroleje lze psát $C_{12}H_{26}$. [7, 8].

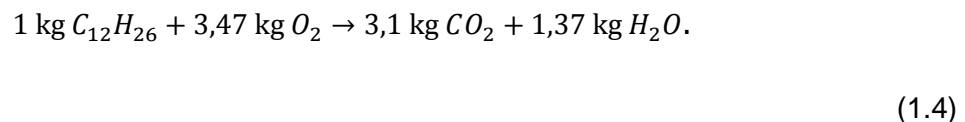
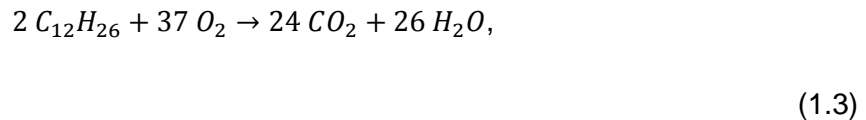
V případě ustáleného přímočarého letu platí, že vztlak je roven tíze letadla a tah je roven odporu. Potřebný tah pro ustálený přímočarý let pak lze odvodit z rovnice 1.2 pro aerodynamický odpor D :

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot c_D \cdot S \cdot v^2 \quad (1.2)$$

kde ρ je hustota vzduchu v dané výšce, c_D je součinitel odporu, S je plocha křídla a v je rychlost. Ve výšce 10 000 m je hustota vzduchu dle ISA přibližně $0,413 \text{ kgm}^{-3}$, c_D dopravních letadel bývá okolo 0,03, plocha křídla B737–800 je $124,6 \text{ m}^2$ a uvažovaná rychlost je 800 kmh^{-1} , tedy $222,22 \text{ ms}^{-1}$. Pak po dosazení do rovnice 1.2 vychází potřebný tah $38\,118 \text{ N}$. Měrná spotřeba paliva TSFC je definovaná jako spotřeba paliva na jednotku tahu. Celkovou spotřebu lze získat vynásobením měrné spotřeby potřebným tahem. Pohonná jednotka CFM56–7B27 má měrnou spotřebu paliva $17,8 \text{ gs}^{-1}\text{kN}^{-1}$, spotřeba jednoho motoru dvoumotorového letounu na polovinu potřebného tahu za daných podmínek je $339,25 \text{ gs}^{-1}$, celková spotřeba letounu činí $678,5 \text{ gs}^{-1}$, tj. $2442,6 \text{ kgh}^{-1}$ [9, 10].



Po úpravě obecného vzorce spalování uhlovodíků 1.1 do tvaru alkanu s 12 atomy uhlíku ve vzorci 1.3 a dosazení relativních atomových hmotností ve vzorci 1.4 vychází na 1 kg spáleného paliva vyprodukování 1,37 kg vodní páry ve výfukových plynech:



Jestliže je uvažován výtok výfukových plynů z motorů ve tvaru kuželů s vrcholovým úhlem dle fotografií autora asi 3° , je výška kuželů přibližně rovna uletěné vzdálenosti za 1 s, tj. 222,22 m a poloměr základny 5,82 m. Objem takového kuželu činí přibližně 7882 m^3 pro každý motor, tzn. že B737–800 s uvedenými motory za daných podmínek za 1 s letu v souladu s 1.4 exhuluje 464,77 g vodní páry jedním motorem do objemu 7882 m^3 , což znamená navýšení hustoty vodní páry v tomto objemu přibližně o $0,06 \text{ gm}^{-3}$.

Výsledkem spalování leteckého petroleje je tedy kromě jiných složek jisté množství vodní páry ve výfukových plynech, toto množství u pohonných hmot udává tzv. emisní index vodní páry, tj. hmotnost vyprodukované vodní páry vzhledem k hmotnosti spáleného paliva. Skutečné množství vyprodukované vodní páry je závislé zejména na druhu použitého paliva, typu motoru a pracovním režimu motoru, resp. velikosti produkovaného tahu.

1.1.2 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu prostředí, ve kterém prolétá letadlo, má zásadní vliv na možný vnik a případný následný vývoj kondenzační stopy. Míra nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě rozhoduje spolu s ostatními faktory o vzniku kondenzační stopy, míra nasycení vodní párou vzhledem k ledu spolu s ostatními faktory rozhoduje o vývoji kondenzační stopy.

Vzduch lze dělit na skupinu plynů, které do výšky asi 100 km nad zemským povrchem nemění své procentuální zastoupení, tj. dusík a kyslík, které společně zaujímají 99 % v daném objemu vzduchu a skupinu plynů, které mají proměnnou koncentraci v čase i prostoru. Mezi tyto plyny patří oxid uhličitý, ozon a vodní pára. Kromě těchto skupin plynů obsahuje vzduch i pevné a kapalné částice, které se označují jako atmosférický aerosol.



Vodní pára a její chování je zcela zásadní pro vznik vodních kapek či ledových krystalů, potažmo pro vznik oblačnosti a tedy i kondenzačních stop.

Z hlediska termodynamiky atmosféry je možné vzduch chápat jako směs dvou plyných složek, suchého vzduchu a vodní páry, tato směs je označována jako vlhký vzduch. Pro běžné aplikace v meteorologii se suchý vzduch i vodní pára považují za termodynamický ideální plyn. Stavovou rovnici ideálního plynu pro suchý vzduch 1.5 lze psát:

$$p_d = \rho_d \cdot \frac{R}{m_d} \cdot T = \rho_d \cdot R_d \cdot T, \quad (1.5)$$

kde p_d [Pa] je tlak suchého vzduchu, ρ_d [kgm^{-3}] hustota suchého vzduchu, T [K] teplota, m_d efektivní molekulární hmotnost suchého vzduchu, R [$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$] univerzální plynová konstanta a R_d [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] je měrná plynová konstanta pro suchý vzduch. Pro vodní páru lze stavovou rovnici ideálního plynu 1.6 psát:

$$e = \rho_v \cdot R_v \cdot T, \quad (1.6)$$

kde e [Pa] je parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu, ρ_v [kgm^{-3}] hustota vodní páry, R_v [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] měrná plynová konstanta vodní páry a T [K] teplota. Součet rovnic 1.5 a 1.6 pak je stavovou rovnicí ideálního plynu pro vlhký vzduch 1.7:

$$p = p_d + e = (\rho_d \cdot R_d + \rho_v \cdot R_v) \cdot T = \rho \cdot R_m \cdot T, \quad (1.7)$$

kde p [Pa] je tlak vlhkého vzduchu, ρ [kgm^{-3}] hustota vlhkého vzduchu jako součet hustoty suchého vzduchu a hustoty vodní páry, R_m je měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu definovaná jako vážený průměr měrných plynových konstant suchého vzduchu a vodní páry, kde váhou je hustota (lze ji vyjádřit pomocí veličin pro vlhkost) [11].

Procesy při tvorbě kondenzačních stop probíhají právě ve vlhkém vzduchu. K popisu míry vlhkosti, tj. množství vodní páry ve vlhkém vzduchu, se užívá několik veličin:

- absolutní vlhkost (hustota vodní páry je definovaná jako hmotnost vodní páry v objemové jednotce vlhkého vzduchu,



- parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu (napětí vodní páry) je dán stavovou rovnicí 1.6,
- směšovací poměr vodní páry je definovaný jako poměr hustoty vodní páry a hustoty suchého vzduchu,
- měrná vlhkost je definovaná jako poměr hustoty vodní páry a hustoty vlhkého vzduchu,
- relativní vlhkost je definovaná jako poměr parciálního tlaku vodní páry ve vlhkém vzduchu o dané teplotě a tlaku syté vodní páry o stejné teplotě, za předpokladu platnosti stavové rovnice pro vodní páru 1.6, lze vyjádřit i poměrem hustoty vodní páry ve vlhkém vzduchu a hustoty syté vodní páry vzhledem k vodě či ledu za stejných podmínek, bezrozměrná veličina nebo se udává v procentech [11].

Maximální parciální tlak vodní páry nad vodou nebo ledem ve vlhkém vzduchu pro teplotu T při běžných výpočtech lze určit pomocí Magnusenova vztahu (1.8):

$$e_{max} = e_0 \cdot \exp\left[\frac{C(T-T_0)}{T-D}\right], \quad (1.8)$$

kde e_0 je parciální tlak vodní páry při 273,15 K (610,7 Pa pro vodu a 610,64 Pa pro led), T_0 je 273,15 [K], T je teplota vzduchu [K], C je bezrozměrná konstanta 17,15 pro vodu a 21,88 pro led a konečně konstanta D [K] 38,25 pro vodu a 7,65 pro led. Po dosazení e_{max} do stavové rovnice pro vodní páru 1.6 lze pak určit hustotu syté páry pro konkrétní teplotu atmosféry a při známé relativní vlhkosti vyjádřit hustotu vodní páry ve vlhkém vzduchu. [11]

Např. dne 9. 8. 2022 byl v nadmořské výšce 10 668 m změřen tlak 250 Pa, teplota $-49,3$ °C a relativní vlhkost 34 %. Pro tuto teplotu vychází e_{max} dle vztahu 1.8 hodnota 6,42 Pa. Po dosazení e_{max} za e do stavové rovnice pro vodní páru pak vychází maximální hustota vodní páry $0,062$ gm⁻³. Z definice relativní vlhkosti jako poměr hustoty vodní páry ve vlhkém vzduchu k hustotě nasycené vodní páry lze určit hustotu vodních par v konkrétním případě, tedy $\rho_v = 0,062 \cdot 0,34 = 0,021$ gm⁻³. V předchozí kapitole byla stanovena hustota vodní páry v uvažovaném kuželu dodaná prolétávajícím letadlem na $0,06$ gm⁻³, po přičtení hustoty obsažené v atmosféře $0,021$ gm⁻³ je celková hustota vodní páry ve směsi asi $0,081$ gm⁻³, což představuje překročení maximální hustoty vodní páry o $0,019$ gm⁻³ a proto by v uvažovaném kuželu při dané teplotě muselo dojít ke kondenzaci, v tomto případě se utvořila kondenzační stopa za letounem B737 trvající 7 s.



1.1.3 Kondenzace a depozice vodních par

Při ochlazování vlhkého vzduchu roste relativní vlhkost a při určité teplotě dojde k dosažení vyšší hodnoty parciálního tlaku vodní páry než je hodnota parciálního tlaku nasycené vodní páry při téže teplotě. Vzduch se v tuto chvíli stává přesycený vzhledem k vodě. Protože jde o energeticky nevyvážený stav, vzniká nové skupenství, které nevyváženost eliminuje. Vznikají zárodečné vodní kapky, proces se nazývá nukleace vody. Pokud zárodečné kapky vznikají pouze náhodnými kolizemi molekul vody, jedná se o homogenní nukleaci. Pokud kapky vody vznikají na kondenzačních jádrech, jedná se o heterogenní nukleaci. Pro vznik kapek homogenní nukleací je potřeba vysokých přesycení, kterých v případě exhalace výfukových plynů proudovými motory sice lze dosáhnout, nicméně běžně se s homogenní nukleací neuvažuje. Kapky vznikající na jádrech jako kapalná vrstva na povrchu jádra mají větší poloměr křivosti než kapky tvořené stejným počtem molekul vody a zároveň větší pravděpodobnost, že překonají kritickou velikost a stanou se zárodečnými kapkami schopnými dalšího růstu. Rychlost nukleace závisí na teplotě a přesycení vodní párou, při dané teplotě roste nukleační rychlost s přesycením od zanedbatelných hodnot k extrémně velkým hodnotám ve velmi úzkém rozsahu hodnot přesycení. Jakmile vznikne kapka nadkritické velikosti, začíná spontánně růst difuzí vodní páry ke kapce. Protože teplota směsi výfukových plynů a okolního vzduchu v hladinách tvorby kondenzačních stop je po smíchání velmi nízká, dojde při případné kondenzaci k tvorbě ledových krystalů [11].

Vznik ledových krystalů začíná podobně jako vznik kapek u kondenzace nukleací. Krystaly mohou vznikat mrznutím přechlazených vodních kapek nebo přímou depozicí z vodní páry. Oba způsoby mohou probíhat jak homogenní nukleací ledu, tak i heterogenní nukleací. Homogenní mrznutí vodní kapky je podobné homogenní nukleaci kapky z vodní páry. Stejně jako u homogenní kondenzace je homogenní mrznutí určeno velikostí kritického zárodku a pravděpodobností jeho vzniku náhodným uspořádáním molekul vody. Velikost kritického zárodku ledu v kapce je funkcí teploty. Ukazuje se, že homogenní nukleace ledu nastává při teplotách nižších než asi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rychlost tvorby zárodků ledu ve vodě přechlazené o $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ je přibližně $0,4\text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$, při přechlazení o $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ roste rychlost až na $10^{18}\text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$. Pro homogenní depozici ledových krystalů je zapotřebí velmi nízkých teplot pod $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vysokých přesycení. Při prahu homogenního mrznutí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ nukleace vodních kapek z vodní páry a jejich následné mrznutí nastává dříve než homogenní depozice. Nad teplotou $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází výhradně k heterogenní nukleaci ledu. Jader, která podporují vznik ledu je v atmosféře podstatně méně než jader kondenzačních, protože povrch ledového jádra musí podporovat uspořádání krystalické mřížky ledu, je vhodné, aby ledové jádro vykazovalo



alespoň částečnou krystalografickou podobu s ledem. Když se během mísení výfukových plynů a okolního vzduchu objevují první ledové krystaly, je parciální tlak vodní páry ve směsi roven nebo vyšší než parciální tlak nasycení vzhledem k vodě, tzn., že vzduch je přesycený vzhledem k ledu a zárodečné krystalky se nacházejí v příhodném prostředí pro jejich další růst a to do té doby, dokud se všechny přechlazené zkondenzované vodní kapky nevypaří nebo nezmrznou [11].

Zpočátku je ve vytvářející se stopě koncentrace ledových částic 10^4 v cm^3 až 10^5 v cm^3 , přičemž částice dále rostou a turbulentně se mísí s okolním vzduchem. Jejich koncentrace dále klesá na hodnotu 10^3 v cm^3 až 10^4 v cm^3 a rozměry částic se pohybují do $1 \mu\text{m}$, při stáří stopy okolo jedné minuty jsou rozměry částic $2 \mu\text{m}$ a při stáří jedné hodiny $8 \mu\text{m}$ za poklesu koncentrace na hodnotu 10–15 částic v cm^3 [12, 13].

1.1.4 Mísení

Hodnota tlaku spalin za výtokovou tryskou je přibližně podobná hodnotě tlaku vzduchu vstupujícího do motoru. Za předpokladu, že směs okolní atmosféry a výfukových plynů nepřijímá teplo z okolí, lze proces mísení obou složek považovat za adiabaticko–izobarický. Pokud dochází k mísení dvou nenasycených vzduchových hmot o jiných teplotách a vlhkostech, závisí vlhkost výsledné směsi na hmotnosti a vlastnostech obou složek. Promíchávání probíhá při konstantním tlaku vzduchu. Pak z definice měrné vlhkosti vyplývá rovnice 1.9:

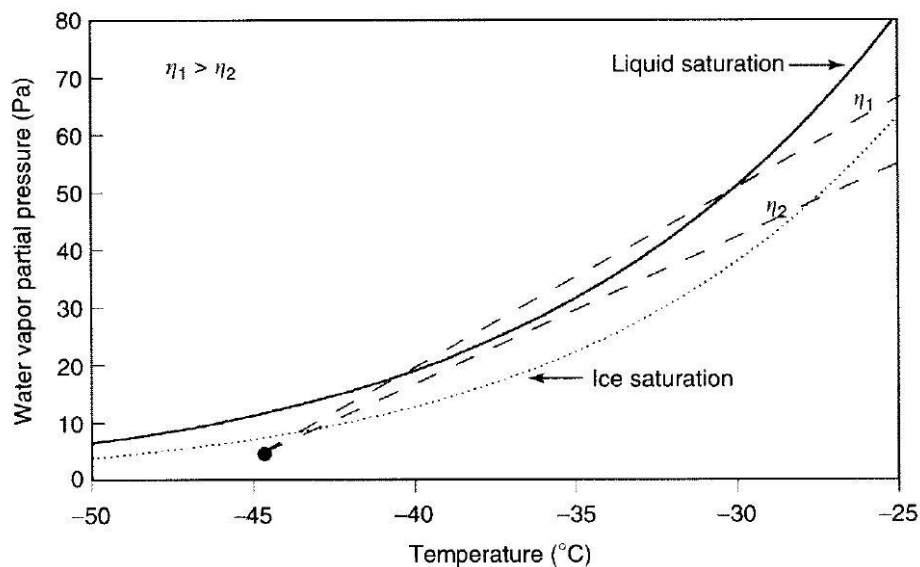
$$q_v = \frac{m_1 \cdot q_{v1} + m_2 \cdot q_{v2}}{m_1 + m_2}, \quad (1.9)$$

kde q_v je měrná vlhkost směsi, m_1 a m_{2v} hmotnosti složek, q_{v1} a q_{v2} měrné vlhkosti složek. Pokud je proces adiabatický, tzn. všechno teplo teplejší složky je beze ztrát odevzdáno složce chladnější, lze psát bilanční rovnici 1.10:

$$m_1(c_{pd} + q_{v1} \cdot c_{pv})(T_1 - T) = m_2(c_{pd} + q_{v2} \cdot c_{pv})(T - T_2), \quad (1.10)$$

kde c_{pd} [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] je měrné teplo suchého vzduchu při konstantním tlaku a c_{pv} [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] je měrné teplo vodní páry při konstantním tlaku, T_1 a T_2 jsou teploty složek a T je výsledná teplota směsi [K] [6, 11].

Průběh takového mísení je zřejmý z grafu 1, na vodorovné ose je vynesena teplota, na svislé ose parciální tlak vodní páry. Plná křivka v grafu reprezentuje mez nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě, tečkovaná křivka znázorňuje mez nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k ledu. Čerchované úsečky představují průběh mísení pro dvě různé účinnosti motoru a to z bodu ležícího mimo graf do bodu představující podmínky okolního vzduchu. Jestliže směs v průběhu mísení překročí křivku kondenzace, vytvoří se ze z kondenzovaných kapiček ledové krystaly.



Graf 1 Průběh mísení pro dvě různé účinnosti [12]

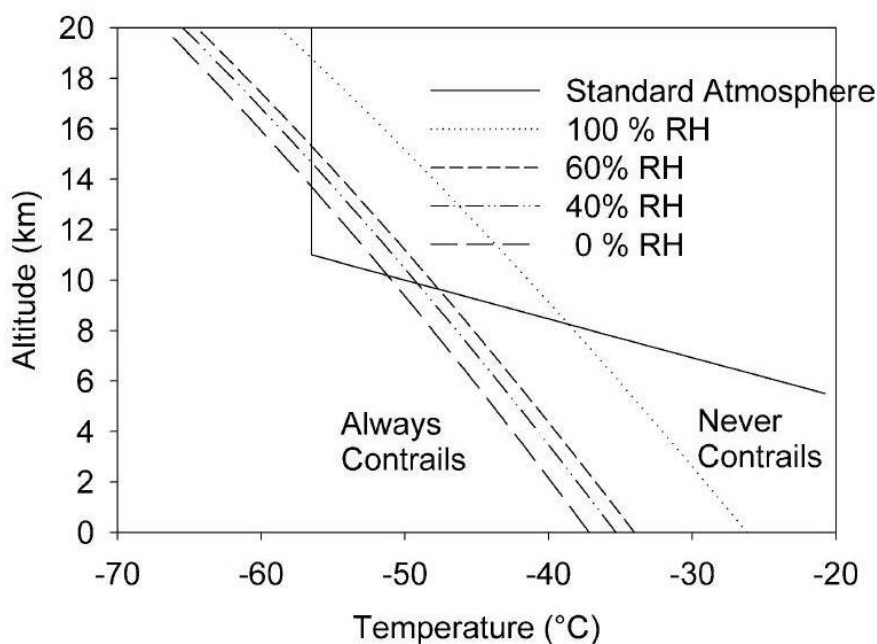
Poloha bodu vlastností okolního vzduchu (bod konečného stavu směsi) ovlivňuje průběh mísení následovně:

- bod leží pod křivkou nasycení vzhledem k ledu, tj. konečný stav směsi je nenasycen vzhledem k ledu i vodě, pokud během mísení bylo dosaženo křivky nasycení vzhledem k vodě a došlo ke vzniku kondenzační stopy, tak vytvořené krystaly ledu přecházejí zpět do plynné fáze sublimací rychlostí, závisející zejména na absolutní vlhkosti okolního prostředí, jedná se o krátkodobé až dlouhodobé kondenzační stopy,
- bod leží mezi křivkami nasycení vzhledem k ledu a vodě, tj. konečný stav směsi je nasycený vzhledem k ledu a nenasycený vzhledem k vodě, pokud došlo ke vzniku kondenzační stopy, tak vzniklé krystaly ledu dále rostou depozicí z přítomné vodní páry a to do té doby, dokud nedosáhnou kritické velikosti a nezačnou vypadávat do nižších hladin, kde sublimují, nebo do té doby, dokud se směs nestane jen



nasyčenou a nikoliv přesycenou vzhledem k ledu, jedná se o perzistentní kondenzační stopy.

Z grafu 1 je také patrný dopad účinnosti motoru na tvorbu kondenzačních stop. Při vyšší účinnosti motoru stoupá teplota výfukových plynů, při stejném množství uvolněné vodní páry se sklon přímky bude zvětšovat a účinnější motor při stejných podmínkách okolního prostředí může způsobit vznik kondenzační stopy, na rozdíl od motoru méně účinného. Z grafu je dále možné vyvodit, že pro vznik kondenzačních stop během mísení nestačí překročit křivku nasycení vzhledem k ledu, ale je nutné minimálně dosáhnout křivky nasycení vzhledem k vodě, tento poznatek je znám jako Schmidt–Applemanovo kritérium. Toto kritérium je splněno, pokud není teplota okolního vzduchu vyšší než prahová, což je teplota prostředí ve fázovém diagramu mísení, ze které vedená přímka mísení tvoří tečnu k saturační křivce vzhledem k vodě. Pro každý jednotlivý případ mísení existuje nejvyšší teplota (prahová teplota) okolního vzduchu, při které se může kondenzační stopa vytvořit za daného parciální tlaku vodní páry ve vzduchu, teploty výfukových plynů a parciálního tlaku vodní páry obsažené ve výfukových plynech. Při znalostech kritických teplot pro jednotlivé případy lze sestavit graf kritické teploty jako funkci výšky a relativní vlhkosti. [11, 12].



Graf 2 Závislost prahové teploty na výšce a relativní vlhkosti [14]

Z grafu 2, sestrojeného pro motory spalující kerosin s emisním indexem vodní páry 1,223 a spalným teplem $43,2 \text{ MJkg}^{-1}$ a pracující s celkovou účinností 0,3, je možné určit nejvyšší



možnou teplotu, při které může kondenzační stopa vzniknout za uvedených relativních vlhkostí a podmínkách standardní atmosféry ISA. Vodorovná osa reprezentuje teplotu prostředí, svislá osa reprezentuje tlak prostředí přepočtený na výšku. [14, 15, 16].

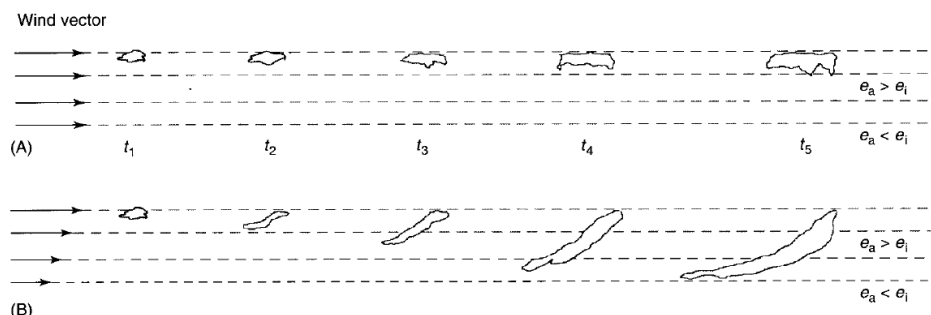
1.2 Vývoj kondenzačních stop

Přestože proces mísení začíná okamžikem, kdy spaliny opouštějí hnací trysku motoru, není kondenzační stopa viditelná bezprostředně za motorem letadla. To je způsobeno vysokou teplotou spalin, při které směs udrží obsaženou vodní páru. K dostatečnému ochlazení pro započítání kondenzace a mrznutí vzniklých kapek dochází několik desítek metrů za motory.

Pokud je teplota okolního vzduchu nižší než prahová, dojde během mísení k nasycení vzhledem k vodě a tudíž ke vzniku kondenzační stopy. V závislosti na míře přesycení vzhledem k vodě bude stopa obsahovat odpovídající množství zkondenzovaných kapek vody, které ihned mrznou. Míra přesycení tedy ovlivní koncentraci i velikost ledových částic v kondenzační stopě. Po vzniku ledových krystalů záleží další vývoj stopy na relativní vlhkosti konečného stavu směsi. Jestliže konečná směs není přesycena vzhledem k ledu, budou vzniklé krystaly přecházet zpět do plynné fáze a kondenzační stopa se rozplyne, a to tím rychleji, čím menší je v okolní atmosféře absolutní hustota vodní páry. Doba rozplynutí se udává v jednotkách sekund až jedné minuty, tato stopa se označuje jako krátkodobá. Jestliže však je konečná směs vzhledem k ledu přesycená, kondenzační stopa může setrvat dlouhou dobu v řádu desítek minut až několik hodin. V případě že relativní vlhkost konečné směsi vzhledem k ledu je jen těsně nad 100 %, bude růst krystalů ledu depozicí omezený a stopa se bude rozšiřovat jen difuzí a pomalu bude slábnout. Pokud bude konečný stav mísení významněji přesycený vzhledem k ledu, budou ledové krystaly dále růst depozicí z vodní páry. Taková kondenzační stopa se označuje jako perzistentní, její další vývoj závisí na meteorologických parametrech okolních vzduchových hmot.

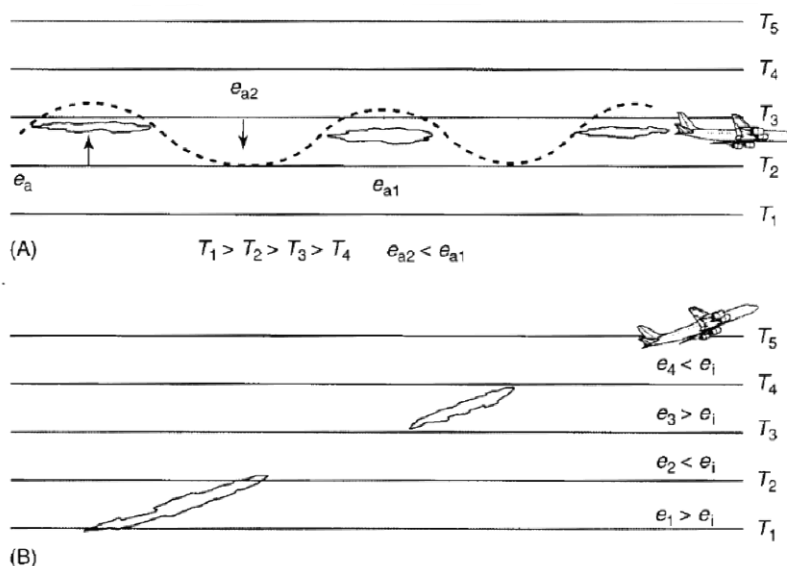
Za předpokladu konstantní výšky letu při nerušené okolní atmosféře klesavými proudy nebo horizontálně neměnné vrstvě ohledně vlhkosti a při slabém větru by si stopa dlouho zachovávala svůj původní tvar a byla jen pomalu rozšiřována a unášena. Za přítomnosti bočního větru je stopa větrem zvětšována především v horizontálním směru. Při působení stříhu větru se pak stopa nejen rozšiřuje, ale zvětšuje i vertikálně. Jestliže se vzniklé krystaly dostanou do nižších vrstev, kde se nachází přesycený vzduch vzhledem k ledu, budou dále růst, pokud se však dostanou do nepřesycené vrstvy, budou sublimovat. Působením stříhu větru se kondenzační stopa zdeformuje a vzhledem se začne blížit přirozené cirrovité

oblačnosti. Působení stříhu větru lze vidět na obrázku 1, schéma (a) znázorňuje rozšiřování bez stříhu větru, schéma (b) se stříhem větru v pěti časových okamžicích [12].



Obrázek 1 Působení stříhu větru na kondenzační stopu [12]

Při stoupavém nebo klesavém letu je možné, že se letadlo dostává do vrstev s menší relativní vlhkostí, je tedy možné že se v některých vrstvách stopa vůbec nevytvoří nebo během mísení dojde jen k malému přesycení a ledových krystalů vznikne méně, případně bod konečného stavu směsi v této vrstvě leží pod křivkou nasycení vzhledem k ledu a ledové krystaly vysublimují. Obdobně se projevují vertikální rozrušení rozložení relativní vlhkosti v příslušné hladině, kde v klesajících proudech dochází k poklesu relativní vlhkosti a naopak ve stoupajících proudech k nárůstu relativní vlhkosti. Tyto faktory se na vzhledu projeví tak, že kondenzační stopa bude přerušovaná, viz obrázek 2.



Obrázek 2 Vznik přerušované kondenzační stopy [12]



Perzistentní kondenzační stopy jsou často pozorovány v podmínkách, ve kterých se vyskytuje přírodní cirrovitá oblačnost, ale není to nutností. Perzistentní stopa trvající i několik hodin se může značně rozrůst, horizontálně v jednotkách kilometrů a vertikálně může dosahovat výšky 200–400 m [17].

Perzistentní stopy lze dále dělit na stopy rozšiřující se a nerozšiřující se. V případě rozšiřujících se perzistentních stop v průběhu času stopa ztrácí svůj lineární tvar a stává se obtížně rozlišitelnou. V přesycených vzduchových hmotách vzhledem k ledu v oblastech s hustým leteckým provozem dochází ke spojování jednotlivých stop za vzniku indukované cirrovité oblačnosti, která se svým složením odlišuje od přírodní z hlediska mikrofyzikálních, optických a geometrických vlastností. Indukovaná cirrovitá oblačnost může být přemístována na vzdálenost až stovek km od zdrojové oblasti, a to i do oblastí, ve kterých nejsou splněny podmínky pro vznik kondenzačních stop. Nad přeplněnými vzdušnými prostory se mohou vyskytovat oblasti indukované cirrovité oblačnosti o rozloze až 100 000 km⁻². Takto vzniklé oblačnosti je přisuzován největší vliv na radiční bilanci Země v oblasti letectví [3].

1.3 Dopady na klima

Klimatický systém Země získává téměř veškerou energii ze slunečního záření. Zhruba třetina tohoto elektromagnetického záření je odražena od atmosféry a povrchu Země zpět do kosmického prostoru. Zbylé dvě třetiny slunečního záření jsou pohlcovány zemským povrchem a atmosférou a následně vyzařovány v podobě dlouhovlnného záření. Vyrovnaná energetická bilance Země, tedy rovnovážný stav příjmu energie s odraženou a vyzářenou energií od Země, je nutný pro zachování stálé globální průměrné roční teploty. Působení člověka však tuto rovnováhu porušuje a dochází ke globálnímu oteplování Země se souvisejícími extrémními projevy počasí a jinými environmentálními dopady. Současné vědecké poznání globálního oteplování přisuzuje největší podíl na globálním oteplování zvyšování obsahu skleníkových plynů v atmosféře pohlcující dlouhovlnné tepelné záření, získanou energii poté vyzařují, čímž atmosféru ohřívají. Tyto oteplující účinky jsou částečně maskovány ochlazujícími účinky vypouštěných aerosolů. Ze zatím dostupných kapitol nedokončené šesté zprávy IPCC vyplývá pozorovaný relativní vzrůst povrchové teploty v letech 2010–2019 proti letům 1850–1900 o 1,09 °C [18].

V roce 2016 vstoupila v platnost tzv. Pařížská dohoda přijatá smluvními stranami Rámcové úmluvy Organizace spojených národů. Dohoda mimo jiné formuluje cíl udržet nárůst průměrné globální teploty pod 2 °C ve srovnání s obdobím před průmyslovou revolucí



a usilovat o to, aby nárůst nepřekročil 1,5 °C. Podle zvláštní zprávy IPCC z roku 2018 by nepřekročení této hranice vyžadovalo snížení emisí skleníkových plynů o polovinu do roku 2030 a dosažení nulových emisí do roku 2050. Letecká doprava, jako kterákoliv jiná lidská činnost, při které se využívá spalování fosilních paliv, přispívá tedy přímo i nepřímo ke globálnímu oteplování Země dlouhodobým působením emisí CO₂ v řádu stovek let a krátkodobým působením v řádu let až desítek let působením ostatních emisí. Od dob počátků letecké dopavy její objem vykazuje vytrvalý růst až na výjimky v podobě krizí jako byla např. ropná krize či nedávný nástup pandemie Covid19. Právě z důvodu dopadů pandemie Covid19 na leteckou dopravu, byly poněkud sníženy odhady růstu ukazatele RPK letecké dopavy v období do roku 2050, v případě středně optimistického scénáře ICAO uvádí hodnotu 3,6 %, v případě ukazatele FTK 3,5 %. Přestože moderní pohonné jednotky vykazují lepší hodnoty ohledně spotřeby paliva, lze očekávat, že pokud se nepřijmou významná technická opatření ohledně snížení dopadu letecké dopavy na klima, porostou i objemy emisí. V roce 2005 přispělo letectví přibližně 5% dílem k celkovému působení na klima. Globální rozložení letecké dopavy je velmi nerovnoměrné, v roce 2006 bylo 93 % leteckého paliva spáleno na severní polokouli, 26 % globální produkce CO₂ z letectví pochází z USA, 15 % z Evropy a 11 % z východní Asie [19, 22, 23].

Zatímco výpočet množství produkovaných emisí z antropogenních činností člověka není příliš obtížné určit na základě dostupných údajů o spotřebě, je vyjádření míry ovlivnění radiační bilance jednotlivých faktorů značně komplikované pro jejich vzájemné ovlivňování se, pro odezvu klimatu a pro nejistoty v některých fyzikálních parametrech. IPCC se opírá o odhady dopadů z mnoha vědeckých studií, které kontinuálně zlepšují své odhady, přesto je u některých faktorů zatím téměř nemožné výpočetně dostatečně spolehlivě simulovat odezvu klimatu na jednotlivý faktor, což je případ i indukované cirrovité oblačnosti. Ke kvantifikování míry vlivu na radiační bilanci soustavy zemský povrch–atmosféra nějakého konkrétního faktoru IPCC používá koncept radiačního působení RF (Radiative Forcing), nově pak koncept efektivního radiačního působení ERF (Effective Radiative Forcing), které IPCC představilo v páté hodnotící zprávě z let 2013–2014, přičemž obě veličiny jsou uváděné v jednotkách Wm⁻² a obě se vyjadřují jako hodnota působení v důsledku změn mezi konkrétním obdobím a obdobím předindustriálním. RF vyjadřuje čistou změnu energetické bilance Země konkrétním radiačním faktorem, v případě kladných hodnot tak faktor přispívá k oteplení a v případě hodnot záporných k ochlazení. Okamžité RF označuje okamžitou změnu rozdílu čistého energetického toku ve směru k povrchu a ve směru od povrchu Země, a vztahujícího se k vrcholu atmosféry nebo tropopauze. Definice RF vylučuje zahrnutí



odezvy klimatického systému v energetickém toku na radiační působení faktoru. Předpokládaný vztah přírůstku globální teploty povrchu a trvalé RF je dán vztahem 1.11:

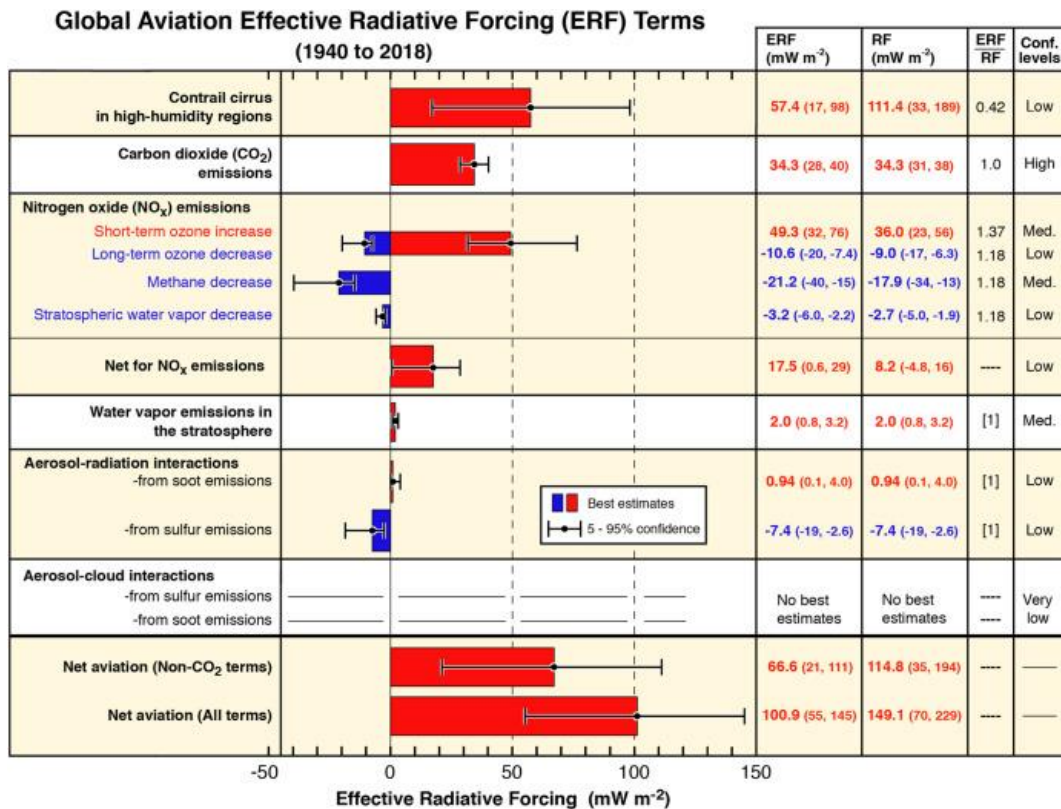
$$\Delta T = \lambda \cdot RF, \quad (1.11)$$

kde λ značí parametr klimatické citlivosti. RF v páté hodnotící zprávě přejímá definici z předchozích zpráv stratosféricky upraveného RF, tj. okamžité RF se zahrnutím přizpůsobení se změně stratosférické teploty a bez zahrnutí odezvy zemského povrchu a troposféry. ERF vylepšuje koncept RF tím, že zahrnuje i krátkodobé odezvy atmosféry při působení radiačního faktoru [20].

IPCC v poslední zprávě uvádí celkové ERF z antropogenní činnosti $2,72 \text{ Wm}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; 1,96 až 3,48], z čehož na letectví připadá podle odhadu ERF uvedeném ve studii Lee et al. 2020 $100,9 \text{ mWm}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; 55 až 145]. To znamená, že letectví se na celkovém antropogenním ERF podílí asi 3,7 %. [18, 21]

V kapitole 1.1.1 bylo popsáno dokonalé spalování uhlovodíkového paliva, jehož produkty jsou oxid uhličitý a voda. Ve skutečnosti však letecký petrolej obsahuje i jiné chemické látky a spalování dokonale neprobíhá, tzn., že při spalování jsou do atmosféry uvolňovány i další chemické produkty, tj. radiační faktory s různými dopady na klima, z nichž nejvýznamnější jsou oxid uhličitý, vodní pára, oxidy dusíku, oxidy síry a saze. V případě, že let probíhá v podmínkách vhodných pro tvorbu dlouhodobých kondenzačních stop, je nutné k těmto uvedeným faktorům započítat i faktor samotných dlouhodobých kondenzačních stop, které si udržují lineární tvar, a případně faktor indukované cirrovité oblačnosti pokud se ze stop vyvine, přičemž pro oba faktory se udává kombinovaná hodnota ERF označená jako contrail cirrus. IPCC se ohledně hodnot odhadů jednotlivých ERF z leteckého odvětví aktuálně opírá o studii Lee et al. z roku 2020, přehled jednotlivých odhadovaných ERF za období 1940–2018 je vidět na grafu 3, studie pracuje s následujícími emisními indexy na 1 kg paliva:

- CO_2 $3,16 \text{ kgkg}^{-1}$,
- NO_x $15,4 \text{ gkg}^{-1}$,
- vodní pára $1,231 \text{ kgkg}^{-1}$,
- saze $0,03 \text{ gkg}^{-1}$ při koncentraci $2 \cdot 10^{14}$ částic na m^2 ,
- oxidy síry $1,2 \text{ gkg}^{-1}$.



Graf 3 Přehled odhadů ERF a RF v období 1940–2018 [21]

Černé úsečky v grafu označují 90% interval spolehlivosti, červená barva znázorňuje kladné působení mající oteplovací účinek, modrá barva záporné působení s ochlazujícím účinkem. Hodnota ERF je získána vynásobením hodnoty RF hodnotou z předposledního sloupce, tam kde je uvedena hodnota [1] není doposud odhad k dispozici, poslední sloupec udává úroveň spolehlivosti dle definic této studie. Je vhodné zdůraznit, že v soulasu s jinými studiemi je vliv indukované oblačnosti dle odhadů vyšší než vliv emisí CO₂ [21].

1.3.1 Dopady na klima–kondenzační stopy

Kondenzační stopa může mít na radiační bilanci vliv přímý a nepřímý. Přímý vliv je založen na faktu, že kondenzační stopa a indukovaná oblačnost je tvořena krystaly ledu stejně jako cirrovitá oblačnost, přičemž koeficient odrazivosti a mohutnost vrstvy určují její optickou tloušťku. Na optické tloušťce, koncentraci a velikosti ledových krystalů, globálním pokrytí stopami nebo indukovanou oblačností a dalších méně významných faktorech závisí jejich výsledné radiační působení, které spočívá v odrazení krátkovlnného slunečního záření, čímž přispívají k ochlazení, ale také v pohlcování dlouhovlnného záření které přispívá

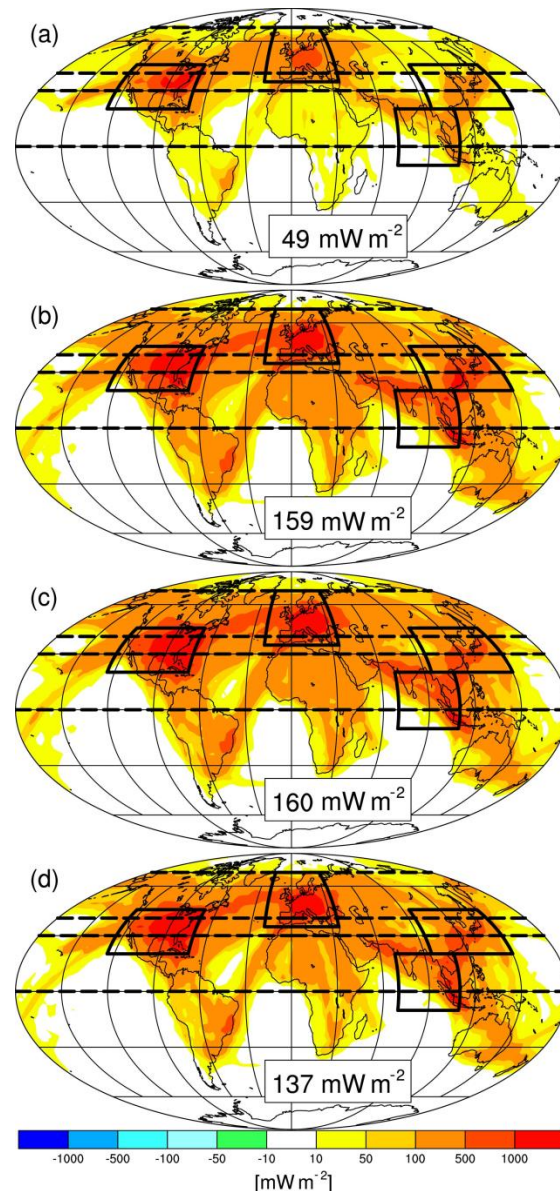


k oteplování. Které radiační působení převládá, je dáno uvedenými faktory a prostředím, ve kterém a nad kterým se stopa nebo cirrovitá oblačnost vyskytuje. Nad jinak bezoblačnou atmosférou převládá efekt ochlazení, nad oblačnou vrstvou se bude vždy atmosféra oteplovat, v noci je efekt vždy oteplující. Podle dosud známých závěrů publikovaných studií globálně převládá oteplující efekt. Studie Lee et al. uvádí hodnotu ERF pro kondenzační cirrus, což je kombinace perzistentních stop a indukované cirrovité oblačnosti, $57,4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; 17 až 98]. To představuje asi 39,9% podíl na celkovém kladném ERF z letecké dopravy [18, 24].

Ohledně působení na klima jsou důležité především dlouhodobé kondenzační stopy a indukovaná cirrovitá oblačnost, které patří k málo prozkoumaným faktorům a tudíž trpí malou spolehlivostí odhadu. Stále je třeba zlepšovat vědecké poznání o tomto faktoru a okolnostech vzniku indukované oblačnosti z dlouhodobých kondenzačních stop. Přestože se klimatické modely stále zlepšují (např. vyvinutím modulu CCMod a jeho použití v klimatickém modelu ECHAM5, který umožňuje simulovat celý životní cyklus od vzniku kondenzační stopy po tvorbu indukované oblačnosti), stále existuje mnoho nejistot v odhadu ERF dlouhodobých kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti.

Studie Bock a Burkhardt 2019 se zabývá odhadem RF contrail cirru na rok 2050, pracuje s přibližně stejným globálním rozložením letecké dopravy, jako bylo v roce 2006, mírném posunutí provozu do vyšších hladin a očekávanému nárůstu provozu vycházejícím z databáze emisí z letecké dopravy vyvinuté Volpe National Transportation Systems Center s využitím nástroje AEDT (Aviation Environmental Design Tool) úřadu FAA. Simulace byly provedeny pomocí emisních scénářů v klimatickém modelu ECHAM5 za použití modulu contrail cirru CCMod. Byly provedeny čtyři simulace s následujícími parametry:

- simulace s letovým provozem z roku 2006 (simulace C2006–T06),
- simulace se zvýšeným provozem pro rok 2050 dle odhadů AEDT (simulace C2006–T50),
- simulace se zvýšeným provozem zohledňující změnu klimatu v roce 2050 (simulace C2020–T50),
- simulace se zvýšeným provozem zohledňující změnu klimatu, změnu v palivové účinnosti a změnu v emisích používáním alternativních paliv (simulace C2050–T50M).



Obrázek 3 Grafická prezentace simulace Bock a Burkhardt 2019 [23]

Výsledky simulace lze vidět na obrázku 3, kde část (a) zobrazuje simulaci C2006–T06 část (b) zobrazuje simulaci C2006–T50 část (c) zobrazuje simulaci C2050–T50 část (a) zobrazuje simulaci C2050–T50M. Ze studie mj. vyplývá, že nárůst letecké dopravy povede k většímu pokrytí kondenzačními cirry, nárůstu optické mohutnosti a zvýšení hodnoty RF. Se čtyřnásobným zvýšením leteckého provozu v roce 2050 se radiční působení zvýší asi třikrát z 49 mW m^{-2} na 159 mW m^{-2} [23].

Nepřímo se kondenzační stopy mohou podílet na radičním působení tím, že pravděpodobně oddalují tvorbu přírodní oblačnosti nebo zmenšují jejich optickou tloušťku.



Přetrvávající kondenzační stopa, resp. vzniklé ledové krystaly, spotřebovávají další vlhkost obsaženou ve vzduchu, která poté není k dispozici pro potenciální vznik přírodních cirrů. Zmenšená optická tloušťka se projeví na převažujícím záporném působení přírodních cirrů, což by mohlo částečně kompenzovat pozitivní radiační působení kondenzačních stop [26].

1.3.2 Dopady na klima–CO₂

Z 1 kg leteckého petroleje je vyprodukováno 3,16 kg CO₂. Patří mezi skleníkové plyny, tj. plyny, které se podílí na celkovém radiačním působení skleníkového efektu tím, že molekuly CO₂ pohlcují infračervené (dlouhovlnné) záření emitované zemským povrchem a nižší atmosférou, získanou energii poté zpět vyzařuje a tím ohřívá atmosféru. Naopak velmi dobře propouští krátkovlnné sluneční záření. Vertikální rozložení koncentrace CO₂ v atmosféře není stejnorodé, s rostoucí výškou výrazně klesá. To je způsobeno tím, že jde o relativně těžký plyn a také tím, že je velmi účinně vymýván vypadávajícími srážkami, čímž tyto srážky okyseluje. Hlavním zásobníkem CO₂ jsou oceány, kde je rozpuštěn jako kyselina uhličitá H₂CO₃, do kterých přechází výměnou z atmosféry. Účinky CO₂ v atmosféře na rozdíl od kondenzačních stop jsou přímé, dobře popsitelné a závisí pouze na koncentraci oxidu uhličitého v atmosféře. Emise tohoto plynu spalováním leteckého paliva se v atmosféře chovají shodně jako emise z jiných odvětví. Množství emitovaných molekul CO₂ závisí pouze na obsahu uhlíku v palivu a jeho radiační působení je snadno predikovatelné na základě predikcí spotřeby pohonných hmot [25, 27]

IPCC uvádí, že z celkového množství CO₂ vyprodukovaného antropogenní činností v letech 2010–2019 připadá na spalování fosilních paliv 91 %. Antropogenní CO₂ zůstává ze 46 % akumulované v atmosféře, 23 % je pohlceno oceánem a 31 % je spotřebováno suchozemskou vegetací. Emise CO₂ ze spalování fosilního paliva trvale rostou od období průmyslové revoluce a v posledních desetiletích se přírůstek zrychluje. V letech 2010–2019 způsobily emise CO₂ z antropogenní činnosti průměrně uvolnění 9,6.10¹⁵ g uhlíku ročně, z toho připadá 86 % na spalování fosilních paliv [28].

Studie Lee et al. 2020 odhaduje ERF CO₂ na 34,3 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; 28 až 40], to představuje asi 23,8% podíl na celkovém kladném ERF z letecké dopravy [18, 21].

1.3.3 Dopady na klima–NO_x

Oxidy dusíku vznikají při spalování leteckého petroleje oxidací dusíku, který je přirozenou součástí vzduchu vstupujícího do proudového motoru a také je obsažen v palivu. Z celkem



pěti oxidů dusíku jsou ve spalinách proudových motorů zastoupeny převážně oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO₂. Přibližně 66 % NO_x je leteckou dopravou emitováno ve výškách 6–12 km. Emise NO_x se zvyšují úměrně tahu motoru. Obecně platí, že se vyprodukované množství NO_x u leteckých motorů pohybuje v rozmezí 4 g (±1 g) na kilogram spáleného paliva při volnoběhu a až 29 g (± 12g) na kilogram spáleného paliva při vzletovém režimu podle typu motoru. Z některých studií vyplývá, že zastoupení primárního NO₂ v celkových emisích NO_x moderních dvouproudových motorů s vysokým obtokovým poměrem převažuje při volnoběhu a naopak při výkonnějších režimech převládá emise NO. Po uvolnění výfukových plynů do troposféry nejprve NO reaguje s O₃ za vzniku sekundárního NO₂ a molekulárního O₂, čímž působí počáteční lokální pokles ozonu. Následně se NO₂ tvoří reakcí NO s peroxylovými radikály, vzniklý NO₂ může být fotochemickou reakcí rozkládán zpět na NO a atomární kyslík O, který se poté může sloučit s molekulárním kyslíkem O₂ za vzniku ozonu O₃. Krátkodobě je tak množství ozonu zvyšováno. Dalšími důsledky přítomnosti NO_x v troposféře jsou redukce skleníkového plynu metanu CH₄ jako následek reakcí při kterých vzniká ozon, a dále úbytek stratosférické vodní páry a dlouhodobý pokles ozonu související s chemickými reakcemi při redukci CH₄. Souhrnně mají oxidy dusíku radiačním působením oteplující efekt [24, 29].

Dle odhadů Lee et al. 2020 je celkové ERF pro oxidy dusíku z letecké dopravy 17,5 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; 0,6 až 29]. Krátkodobý vzrůst ozonu má oteplující efekt s ERF 49,3 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; 32 až 76] s asi 34,2% podílem na celkovém kladném ERF, dlouhodobý pokles ozonu s ochlazujícím efektem ERF -10,6 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; -20 až -7,4], ochlazující snížení CH₄ ERF -21,2 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; -40 až -15] a u ochlazujícího snížení stratosférické vodní páry je uváděn odhad ERF -3,2 mWm⁻² [90% interval spolehlivosti; -6 až -2,2] [21].

1.3.4 Dopady na klima–vodní pára

Pokud není dosaženo při mísení výfukových plynů podmínek kondenzace, je vodní pára pouze vyloučena do atmosféry a přidává se k přirozenému hydrologickému cyklu. Vodní pára je velmi silný skleníkový plyn, v troposféře je jí vyloučena většina a v ní se vyznačuje krátkou průměrnou dobu setrvání. Ve stratosféře je vyloučena menší část celkového množství a setrvává déle, což může vést k její akumulaci. Většina letů v troposféře se ale odehrává v blízkosti tropopauzy a vodní pára přechází do troposféry. Emitovaná vodní pára, kromě toho, že může být zdrojem vlhkosti pro tvorbu kondenzačních stop, se také podílí na řadě chemických reakcí při chladnutí výfukového oblaku. Jako faktor radiační bilance týkající se



vodní páry je ve studii Lee et al. 2020 uváděno pouze zvýšení vodní páry ve stratosféře s odhadovaným ERF $2,0 \text{ mWm}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; 0,8 až 3,2], což představuje asi 1,4% podíl na celkovém kladném ERF letecké dopravy. [21, 25].

1.3.5 Dopady na klima–saze

Saze zahrnují všechny primární netěkavé produkty obsahující uhlík z nedokonalého spalování uhlovodíkových leteckých pohonných hmot, řadí se mezi aerosoly. Obecně se dělí na částice elementárního uhlíku a organické sloučeniny. V cestovních hladinách se podle měření vyskytuje asi 40–80 % elementárního uhlíku z celkového počtu sazí, v případě vzletu to může být více jak 90% podíl. Naopak ve volnoběžném režimu může tento podíl činit pouze 10 %. Poměr obou základních frakcí závisí na teplotě spalování paliva. Zdá se, že jsou částice elementárního uhlíku v sazích hydrofobní v důsledku povlaku z HNO_3 nebo H_2SO_4 a proto mohou sloužit jako kondenzační jádra, frakce organických sloučenin uhlíku v sazích jako kondenzační jádra slouží vždy, pokud to okolní podmínky umožňují. V případě elementárního uhlíku se zdá, že bez organického povlaku není vhodný ani jako ledové jádro. Emise sazí jsou u moderních proudových motorů specifikovány ICAO pomocí tzv. kouřového čísla. Průměrná hodnota emisního indexu se udává $0,04 \text{ gkg}^{-1}$ spáleného paliva. Množství emitovaných sazí závisí na typu motoru, nastaveném výkonu a letové hladině. Částice sazí jsou složeny z jednotlivých téměř sférických částic se středním poloměrem 40 až 70 nm, přičemž počet emitovaných částic sazí se udává v rozmezí 10^6 až 10^7 na cm^3 . Primární význam tohoto aerosolu spočívá v tom, že v příhodných podmínkách slouží jako kondenzační nebo ledová jádra ve vznikajících kondenzačních stopách. Sekundární efekt spočívá v působení aerosolu jako kondenzační nebo ledová jádra, ovlivňující nebo aktivující přírodní oblačnost. Několik provedených měření ukazují, že počet ledových částic v čerstvě utvořených kondenzačních stopách se přibližně rovná počtu emitovaných částic sazí. Přímé radiační působení sazí je dáno vysokou schopností pohlcovat sluneční záření, čímž způsobují oteplení atmosféry. Za nepřímé působení se považuje možný podíl na tvorbě oblačnosti bez vzniku kondenzačních stop, protože saze jsou schopné aktivovat kondenzační nebo depoziční procesy za nižších hodnot supersaturace, než přirozené aerosoly obsažené ve vzduchu, při kterých by jinak přírodní oblačnost nevznikla. Saze rovněž snižují kontaminací albedo zasněžených oblastí zemského povrchu [13, 24, 25, 32].

Studie Lee et al. 2020 hodnotí přímé radiační působení sazí obsažených ve výfukových plynech a uvádí odhad ERF $0,94 \text{ mWm}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; 0,1 až 4,0], což představuje asi 0,7% podíl na celkovém kladném ERF letecké dopravy [21].



1.3.6 Dopady na klima–SO_x

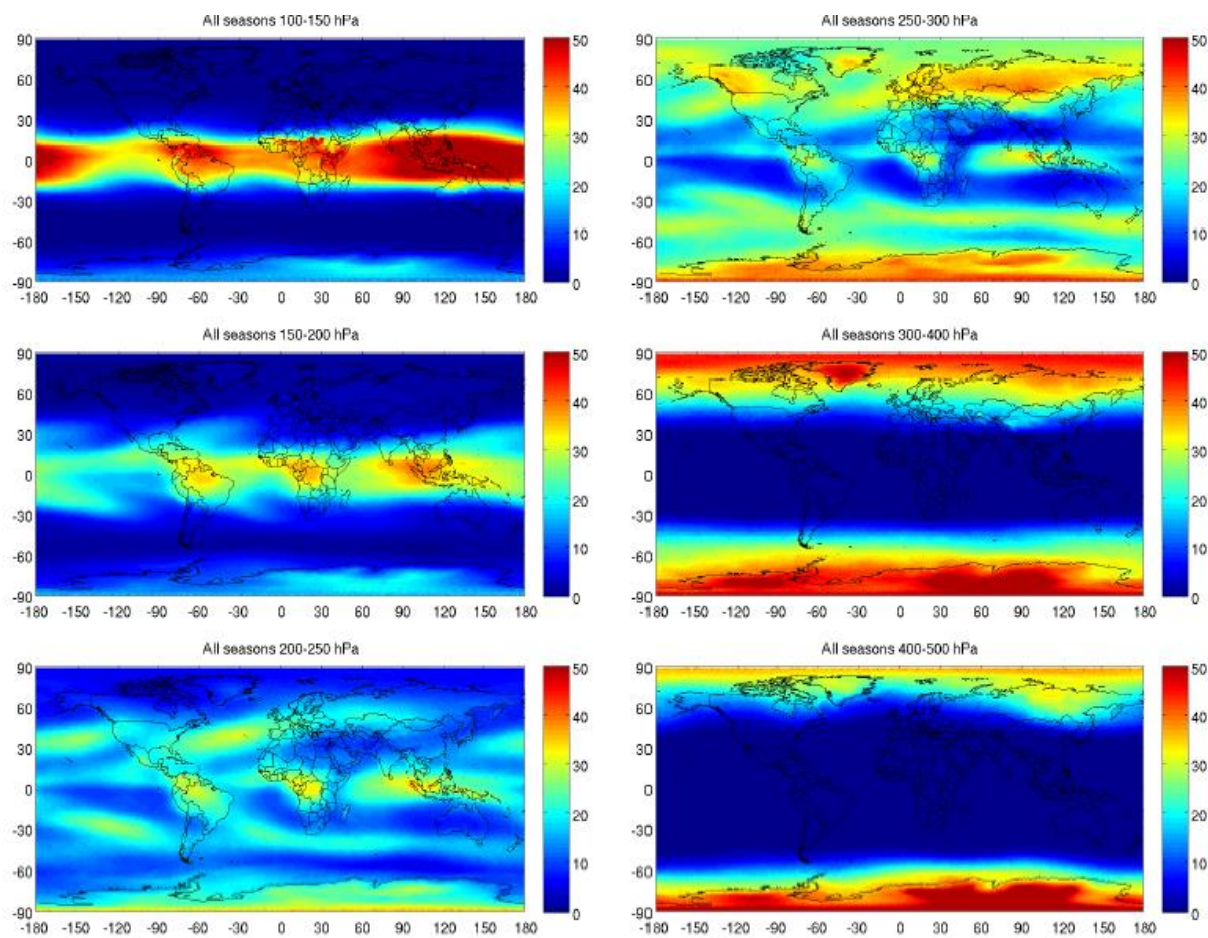
Většina síry, obsažená v leteckém petroleji, je při spalování ve spalovací komoře proudových motorů oxidovaná na SO₂, menší část (méně než 3 %) je oxidovaná na H₂SO₄. V turbíně motoru je zlomek SO₂ oxidován na SO₃. Po výstupu ze spalovací komory probíhá další oxidace SO₂ pomocí OH radikálů. Ve stáří výfukového oblaku do 10 ms se SO₃ reakcí s vodní párou mění na plynnou kyselinu sírovou. Molekuly kyseliny mají podíl na přeměně původně hydrofobních částicích elementárního uhlíku přítomného v sazích na hydrofilní částice a umožňují tak elementárnímu uhlíku sloužit jako kondenzační jádra. SO₂ se řadí mezi těkavé částice aerosolů, dalšími reakcemi v atmosféře vznikají sulfáty, které mohou sloužit jako kondenzační jádra. Tento sulfátový aerosol způsobuje rozptyl slunečního záření a působí tak na atmosféru ochlazováním [21, 24].

Studie Lee et al. 2020 odhaduje přímé radiační působení sulfátového aerosolu na hodnotu ERF $-3,2 \text{ mWm}^{-2}$ [90% interval spolehlivosti; -6 až $-2,2$] [21].

1.4 Perzistentní kondenzační stopy vzhledem k meteorologické situaci

Aktuální meteorologická situace je vyjádřena měřenými meteorologickými prvky, mj. tlakem, teplotou, vlhkostí vzduchu, rychlostí a směrem větru, a je zakreslována v tzv. synoptických mapách, které zobrazují popis nebo předpokládaný vývoj frontálních a termobarických útvarů a proudění vzduchových hmot nad určitou větší geografickou oblastí. Všechny uvedené prvky podléhají neustálým časovým a prostorovým změnám, které jsou spojeny s pohybem vzduchových hmot různých vlastností a se změnami těchto hmot v důsledku energetického působení na ně. Teplota vzduchové hmoty rozhoduje především o případném vzniku kondenzační stopy, aby stopa vznikla, musí být teplota vzduchové hmoty nižší než kritická teplota. Pokud je teplota vzduchové hmoty dostatečně nízká a kondenzační stopa vznikne, o jejím dalším vývoji rozhoduje vlhkost obsažená ve vzduchové hmotě a směr a rychlost proudění.

Aby se kondenzační stopa stala perzistentní, musí vzniknout v oblasti přesycené vzhledem k ledu a oblast musí být dostatečně chladná, oblasti se označují jako chladné přesycené oblasti vzhledem k ledu a obvykle jsou definovány jako oblast s větší relativní vlhkostí vzhledem k ledu než 100 % a prahovou teplotou 233 K. Tyto oblasti bývají horizontálně různě rozsáhlé v řádu stovek kilometrů, ale většinou bývají velmi mělké, tj. vertikální rozměr přesycené oblasti bývá řádově v rozsahu jedné letové hladiny a nachází se obvykle blízko tropopauzy. [27,29,30]



Obrázek 4 Průměrný výskyt chladných přesycených oblastí vzhledem k ledu za období 2003–2009 [31]

Na obrázku 4 je znázorněn průměrný výskyt chladných přesycených oblastí vzhledem k ledu pro všechna roční období v letech 2003–2009 v %, získaný analýzou satelitních dat z programu AIRS agentury NASA pro jednotlivé rozsahy tlakových hladin. V levém sloupci náleží od shora části obrázku rozsahům tlakových hladin 100–150 hPa, 150–200 hPa a 200–250 hPa, v pravém sloupci náleží jednotlivé části od shora rozsahům tlakových hladin 250–300 hPa, 300–400 hPa a 400–500 hPa. Z obrázku je zřejmé, že v hladinách 100–150 hPa se vyskytuje intenzivní pásmo výskytu přesycených oblastí vzhledem k ledu v rovníkové oblasti, související s mohutným vzestupným prouděním v této oblasti, výskyt přesycených oblastí s klesající výškou slábne, až zcela vymizí v hladinách 300–400 hPa. V hladinách 300–500 hPa se vyskytují přesycené oblasti vzhledem k ledu pouze v polárních oblastech. V hladinách 200–250 hPa, typických pro lety v cestovních hladinách, jsou rozeznatelné jednotlivé oblasti s asi 30% výskytem přesycených oblastí jak v rovníkovém pásu, tak i ve středních zeměpisných šířkách. Některé oblasti v cestovních hladinách s častějším výskytem



chladných přesycených oblastí kolidují s oblastmi silného letového provozu a způsobují tak v těchto regionech zvýšenou tvorbu perzistentních kondenzačních stop [31].

Tvorba chladných přesycených oblastí souvisí s existencí vzestupných proudění vzduchových hmot. Typicky se chladné přesycené oblasti nacházejí v oblastech spojených s frontálními systémy, na severní polokouli ve středních zeměpisných šířkách jižně od trajektorií jetstreamů, v anticyklonálním proudění v blízkosti hřebenů vysokého tlaku, v teplých přenosových pásech cyklon a také v blízkosti trajektorií bouřkových systémů [30, 31, 33].

Atmosférická fronta znamená úzkou přechodovou zónu mezi vzduchovými hmotami různých vlastností. Frontální plocha je vůči horizontální rovině skloněna ne více než o 1° . Podle délky a významu pro cirkulační děje se fronty rozlišují na základní, podružné. Základní fronty dosahují délek tisíců km, tvoří se na nich cyklony nebo rodiny cyklon a vzájemně oddělují vzduchové hmoty různého zeměpisného původu, na povětrnostních mapách je lze sledovat alespoň několik dní. Základní fronty mohou být v některých částech stacionární, v jiných teplé nebo studené fronty. Podružné fronty mají menší délku obvykle velikosti jedné cyklony a oddělují různé vzduchové hmoty stejného základního typu, ve vertikálních řezech se jeví méně výrazné a obvykle se rozpadají během jediného dne.

Teplé fronty se objevují především v počátečních stádiích vývoje cyklon. Teplý vzduch se při výstupu po frontální ploše ochlazuje a rozpíná, dochází ke kondenzaci či depozici vodní páry a vzniku vrstevnaté oblačnosti, která je nad rozsáhlým územím pro teplou frontu charakteristická. Při vzestupu teplé vzduchové hmoty po frontální ploše díky nárůstu relativní vlhkosti spojené s ochlazováním vzduchové hmoty může způsobit tento vzestup vznik chladné přesycené oblasti vzhledem k ledu. Pásmo oblačnosti teplé fronty bývá ve směru jejího postupu široké asi 1000 km, v zimě i více, rychlost postupu teplé fronty bývá obvykle přibližně 40 kmh^{-1} .

Studená fronta uzavírá teplý sektor cyklony a odděluje od sebe teplý vzduch před sebou a studený vzduch v týlu tlakové níže, studený vzduch proniká směrem k teplému a na svém čele ho vytlačuje do výšky. Frontální plocha je v oblasti dotyku se zemským povrchem deformována vlivem tření do podoby jazyku. Rychlost postupu studené fronty bývá obvykle okolo 80 kmh^{-1} . Rozlišují se studené fronty prvního (anafronta) a druhého druhu (katafronta). Anafronta je ve vertikálním řezu podobná zrcadlově obrácené teplé frontě a za čarou fronty může vznikat rozsáhlá chladná přesycená oblast díky vytlačování vzduchové hmoty do



vyšších hladin, anafronty se vyskytují převážně v chladné části roku. Katafronta je typická pro teplé části roku, při postupu katafronty je na jejím čele intenzivně vytlačována teplejší hmota za vzniku bouřkové činnosti s možným vznikem chladných přesycených oblastí. Pásmo oblačnosti katafront je podstatně užší než u anafront, rychlost postupu je oproti anafrontě razantnější.

Během vývoje cyklony dochází vlivem rozdílných rychlostí postupu teplé a studené fronty k jejich postupnému spojení, přičemž jako důsledek stáčení baroklinní vlny a jejího protažení vlivem deformace a rotace proudění kolem středu cyklony vzniká okluzní fronta. Teplý vzduch nejdříve proniká v teplém sektoru směrem k centru tlakové níže a vystupuje podél frontálních ploch. S postupným spojováním frontálních ploch původní teplé a studené fronty dochází k oddělování teplého vzduchu od zemského povrchu, v průběhu času se délka okluzní fronty zvětšuje a teplý sektor se vzdaluje od středu cyklony více na okraj, až ztratí pro další vývoj cyklony význam. Teplá vzduchová hmota se svojí původní teplotou frontou (již výškovou frontou) projevují dále již jen na výškových povětrnostních mapách. Podle teplot obou původně studených vzduchových hmot se rozlišují teplé a studené okluzní fronty. U obou typů okluzních front je původní teplejší vzduch vytlačen do vyšších hladin troposféry a nad čarou okluzní se může vyskytovat chladná přesycená oblast vzhledem k ledu.

Mezi základní tlakové útvary se řadí tlaková níže (cyklona), tlaková výše (anticyklona), brázda nižšího tlaku a hřeben vyššího tlaku. Rychlost a směr postupu přízemních tlakových útvarů přibližně odpovídá rychlosti a směru geostrofického proudění v hladině asi poloviny troposféry. Názvosloví tlakových útvarů vychází z tvaru tlakového nebo geopotenciálního pole na synoptických mapách, tlaková níže a výše je charakterizovaná alespoň jednou uzavřenou izobarou, naopak brázda nižšího tlaku a hřeben vyššího tlaku představují oblasti, které uzavřené izobary neobsahují. V cykloně se vzestupné proudění nachází v široké oblasti jejího středu s maximy nad oblastí maximálního poklesu tlaku vzduchu před teplou frontou v oblasti teplé advekce, ve stadiu maximálního rozvoje cyklony lze pozorovat za studenou frontou oblast významných sestupných proudů. Na přední straně studené fronty se v cyklonách formuje teplý přenosový pás v podobě souvislého vzestupného proudu, táhnoucí se v řádu stovek kilometrů do hladin vyšší troposféry, kam transportuje teplý a vlhký vzduch z teplého sektoru cyklony, který při jeho ochlazení při výstupu k tropopauze způsobuje vznik chladných přesycených oblastí. V anticykloně v široké oblasti kolem jejího středu se nachází sestupné proudění s maximy v oblasti přední části anticyklony, kde jsou v oblasti studené advekce největší vzestupy tlaku. V pozdějších stádiích vývoje anticyklony lze v řadě případů nalézt na zadní straně anticyklony slabé vzestupné proudění. Rychlost postupu



cyklon a anticyklon se mění v rozsahu $0\text{--}100\text{ kmh}^{-1}$, průměrná rychlost postupu cyklon nad Evropou bývá $30\text{--}40\text{ kmh}^{-1}$. Rychlost postupu anticyklon bývá podobná, avšak anticyklona se častěji stává málo pohyblivou. Při vhodných podmínkách se mohou utvořit cyklony a anticyklony ve střední a horní troposféře, které se ale neprojevují na přízemních mapách, tyto cyklony a anticyklony se označují jako výškové. Jejich vývoj může probíhat nezávisle na situaci ve spodní troposféře, počátkem vývoje je vždy nestabilní vlna ve výškovém proudění. Výskyt chladných přesycených oblastí vzhledem k ledu v případě cyklon je dán jejich stádiem vývoje a s ním souvisejícím frontálním systémem. V případě anticyklon se většinou frontální systémy nevyskytují.

Hřeben vyššího tlaku vzduchu je projevem počasí podobný tlakové výši, která se často z tohoto výběžku tvoří. Hřeben vzniká v místech, kde se nacházejí vhodné podmínky pro anticyklonální zakřivování izobar nebo izohyps např. v místech, kde dochází k ochlazování vzduchové hmoty. Byly zaznamenány případy, kdy v anticyklonálním proudění na západní straně výběžku stoupající teplý vzduch způsobil výskyt chladných přesycených oblastí.

Brázda nižšího tlaku vzduchu může vzniknout v tlakové níži, která se nepravidelně vyplňuje, v závětrí horských překážek, nebo za situací, které generují cyklonální zakřivení izobar nebo izohyps např. v místě s intenzivní teplou advekcí. Cyklonální zakřivení izobar má za následek konvergenci proudění s velkoprostorovými výstupnými pohyby vzduchu a jeho adiabatické ochlazování, proto se chladné přesycené oblasti mohou nad brázdami nízkého tlaku vyskytovat [27, 30, 31, 33, 34].

Na vznik chladných přesycených oblastí může mít i vliv původu vzduchových hmot, které jsou ve vyšších hladinách nad dané místo transportovány. Horizontální rozměry vzduchových hmot bývají v řádu 10^3 km , vertikální rozsah pak v jednotkách kilometrů, v některých případech může vzduchová hmota zasahovat celý vertikální rozsah troposféry. Při delším setrvávání vzduchové hmoty v místě jejího vytvoření přijímá tato hmota určité vlastnosti díky turbulentní výměně tepla a vlhkosti s podkladem a také díky radiačním dějům oteplování nebo ochlazování samotné vzduchové hmoty v celém jejím vertikálním rozsahu. Vzájemná rozhraní různých vzduchových hmot vytvářejí atmosférické fronty. V termické klasifikaci se rozlišují teplé vzduchové hmoty, tj. hmoty, které se při postupu nad danou oblast postupně ochlazují, studené vzduchové hmoty, tj. hmoty, které se při postupu nad danou oblast oteplují a místní vzduchové hmoty, které se v dané oblasti nachází delší dobu a mají charakteristické vlastnosti pro tuto oblast a roční období. Zeměpisná klasifikace rozlišuje v závislosti na zeměpisné poloze zdrojové oblasti vytvoření vzduchové hmoty



arktický vzduch, vzduch mírných šířek, tropický vzduch a ekvatoriální vzduch. Kromě ekvatoriálního vzduchu se dále dělí na oceánský a pevninský. Ve všech typech vzduchových hmot oceánského typu je obsah vodní páry vyšší než u kontinentálního typu. Nejvíce vlhkosti obsahuje ekvatoriální a tropický vzduch, nejméně vlhkosti obsahuje arktický vzduch [27].

2. Vybrané zdroje informací o atmosféře a informace ze systémů letadel

Pro výzkum kondenzačních stop je nutné znát aktuální parametry vzduchových hmot, ve kterých se konkrétní pozorované kondenzační stopy tvoří. Je možné využít nejbližší aerologickou sondáž, radarová a satelitní měření, případně data z numerických předpovědních modelů a data ze systému AMDAR. Dále je třeba získávat informace o letadlech, která stopu vytvořila a to ze zpráv odpovídačů sekundárního radaru módu S a zpráv ADS-B, s jejichž pomocí lze kromě letových parametrů získat i některé přímé meteorologické informace nebo je stanovit nepřímo výpočtem.

2.1 Aerologická sondáž

K získání vertikálního průběhu meteorologických prvků v atmosféře se využívají především aerologické sondy, aerologická měření jsou důležitou komponentou globálního pozorovacího systému organizace WMO pro numerické předpovědní modely. Aerologický systém se skládá z nosiče sondy v podobě vodíkem nebo heliem plněného balonu a ze sondy, zavěšené v dostatečné vzdálenosti pod balónem, která vysílá naměřené meteorologické parametry i svou polohu do pozemního vyhodnocovacího zařízení.

Aerologická sondáž je prováděna globálně denně ve standardizovaných, tzv. synoptických, termínech 0000, 0600, 1200 a 1800 UTC. Standardně měřenými meteorologickými prvky jsou tlak, teplota a vlhkost, směr a rychlost větru jsou určovány dle typu sondy typicky na základě pohybu sondy prostřednictvím systému GPS, obvykle bývá výstup z posledních aerologických měření volně přístupný na webových stránkách národních meteorologických úřadů v podobě aerologických diagramů. Celosvětově je používáno několik typů radiosond různých výrobců, v Evropě je převážně zastoupen systém firmy Vaisala. V ČR se nachází dvě stanoviště pro vypouštění aerologických sond, Vojenský geografický a hydrometeorologický ústav provozuje stanoviště v Prostějově a ČHMÚ provozuje stanoviště v Praze–Libuši, z obou stanovišť je na webových stránkách ČHMÚ k dispozici výstup z měření za poslední tři dny ve formě několika typů grafu a tabulky vybraných hladin, ČHMÚ provádí měření v synoptických termínech 0000, 0600 a 1200 UTC. Dle AIP ENR 5.3–1 se koordinace mezi provozovateli meteorologických balónů a ATC nepožaduje, neboť



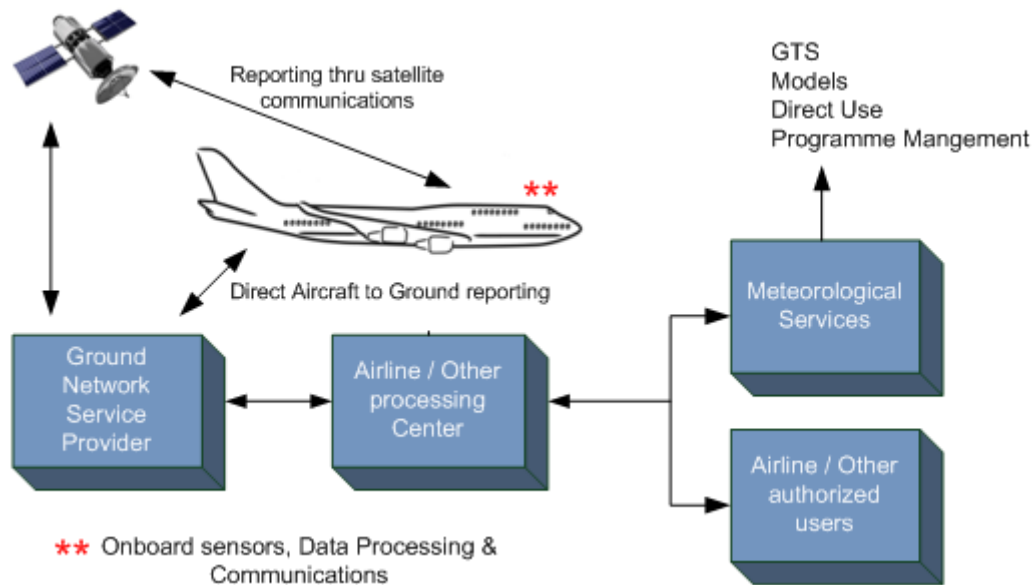
ICAO považuje meteorologické balóny a příslušné nesené sondy za nízké nebezpečí pro letadla. Tento předpis dále uvádí termíny vypouštění sond ČHMÚ v 0530, 1115 a 2315 UTC a příležitostně v 1730 UTC, v případě sond vypouštěných z Prostějova se jedná o časy 1115 a 2315 UTC, dále jsou zde uvedeny termíny vypouštění sond pro měření radioaktivity ve standardních časech.

ČHMÚ v současnosti používá radiosondy Vaisala RS41 SG a pozemní vyhodnocovací systém Vaisala MW41. RS41 SG vysílá v pásmu 400 MHz frekvenčně modulovaný (GFSK) signál s četností vysílání zpráv jednou za sekundu, obsahující v datovém bloku naměřená data z teplotního a vlhkostního senzoru, GPS polohu a další pomocné informace, tento typ sondy nenesení senzor tlaku, tlak je vypočítáván pozemní stanicí. Pozemní stanice přijímá data vysílaná sondou, po zpracování dat programové vybavení pozemní stanice umožňuje vytvoření grafických výstupů a sestavení meteorologických zpráv BUFR a TEMP [35, 36].

Jako oprávněný uživatel je možné odebírat distribuovaná data v síti WMO, případně je možné odebírat data ze sondáže ČHMÚ v podobě uživatelsky definovaných formátů se zpožděním v řádu jednotek minut za měření na základě smlouvy s ČHMÚ. Signál vysílaný sondou RS41 SG je také možné přijímat např. pomocí SDR rádia a poté ho dekodovat, tato problematika je blíže rozebrána v kapitole 3.4.1.

2.2 Systém AMDAR

Systém AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), iniciovaný organizací WMO, je součástí globálního pozorovacího systému, který je definovaný a udržovaný v rámci programu WMO World Weather Watch Programme. Data získaná systémem AMDAR primárně slouží jako doplňková data k aerologickým měřením a měřením z pozemních stanic a jsou asimilována do předpovědních numerických modelů. V evropském prostoru systém AMDAR provozuje EUMETNET ve spolupráci s leteckými společnostmi, program je známý pod názvem E-AMДАР nebo E-ABO (Eumetnet-Aircraft Based Observation), v současnosti je do evropského programu zapojeno 14 leteckých společností. Celosvětově se počet zpráv AMDAR před vypuknutím pandemie onemocnění covid-19 pohyboval do 800 tisíc za den [37, 38].



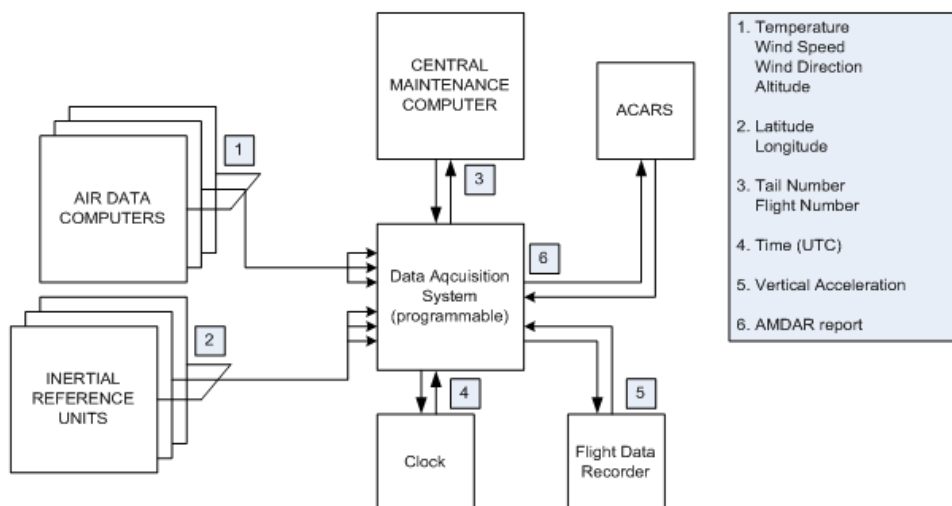
Obrázek 5 Schéma systému AMDAR [39]

Na obrázku 5 je znázorněna struktura systému AMDAR. Data pro systém AMDAR jsou získávána z běžně instalovaných systémů letadel, která jsou dovybavena řídicím softwarem AOS (AMDAR Onboard Software). V současnosti WMO podporuje dvě specifikace pro AOS, AMDAR Onboard Software Functional Requirements Specification (AOSFR), nahrazující specifikaci ACARS AMDAR ACMS (AAA), a ARINC 620 Meteorological Report, definovanou v rámci AEEC 620–8 Data Link Ground System Standard and Interface Specification. V těchto specifikacích je mj. uveden i formát meteorologických zpráv přenášených pomocí ACARS. Mezi hlavní funkce řídicího softwaru patří příjem a zpracování dat z různých systémů letadla, kontrola vstupních dat, výpočet odvozených dat, příjem zpráv z pozemních stanišť k řízení chování softwaru (typicky řízení intervalu měření). Data jsou po předběžném zpracování řídicím softwarem nejčastěji odesílána na pozemní stanice prostřednictvím zpráv systému ACARS a to buď VHF nebo HF datalinkem, případně se využívá SATCOM, v případě E-AMDAR je 90 % zpráv do GTS doručeno do 30 minut. Některé AOS jsou nastaveny pouze k využívání ACARS přes VHF a HF spojení, což může v odlehlých oblastech způsobovat zdržení hlášení až několik hodin. Po odeslání zpráv na pozemní stanici poskytovatele datových služeb (ARINC, SITA) jsou zprávy doručovány buď přímo, nebo prostřednictvím leteckých společností do národních meteorologických služeb ve formátu zprávy ACARS, kde jsou po dekódování a kvalitativní kontrole sestavovány do standardních zpráv BUFR a prostřednictvím WMO globální telekomunikační sítě GTS

distribuovány oprávněným uživatelům. Standardní hlášení AMDAR obsahuje mj. následující parametry:

- fáze letu,
- identifikace letadla v programu AMDAR,
- čas měření a zeměpisnou šířku a délku,
- směr a rychlost větru,
- statickou teplotu,
- tlakovou výšku,
- a pokud lze tak i turbulence.

Menší počet letadel je také vybaven senzorem vlhkosti, v Evropě je takto vybaveno 9 letadel rodiny A320 společnosti Lufthansa, v Severní Americe je senzorem osazeno 139 letadel společností Southwest Airlines a UPS. Na obrázku 6 je znázorněno typické uspořádání palubní části systému AMDAR [38, 40, 41].



Obrázek 6 Palubní část systému AMDAR [40]

Měření meteorologických parametrů doplněných o ostatní informace jako např. poloha letadla, probíhá ve stanovaných intervalech, přičemž se rozlišuje fáze letu, tzn. stoupání, let v cestovní hladině a klesání, intervaly měření mohou být definované časem nebo tlakovou změnou. Obvykle jsou během fází stoupání a klesání vysílány zprávy obsahující jedno měření, ve fázi letu v cestovní hladině jsou vysílány zprávy obsahující několik měření. Např. specifikace AOSFR stanovuje intervaly měření, které lze vidět v tabulce 1 [39].



Tabulka 1 Intervaly měření systému AMDAR dle specifikace AOSFR

Fáze	Interval dle tlaku	Interval dle času
Stoupání 1	5 nebo 10 hPa do poklesu tlaku o 100 hPa	3 až 20 s pro prvních 30 až 200 s od vzletu
Stoupání 2	25 nebo 50 hPa nad poklesem tlaku o 100 hPa	20 až 60 s pro dalších 490 až 1050 s
Cestovní hladina	1 až 60 min	
Klesání 1	25 nebo 50 hPa od zahájení klesání do o 100 hPa nižšího tlaku než v místě přistání	20 až 60 s od zahájení klesání
Klesání 2	5 nebo 10 hPa pro posledních 100 hPa	

Informace ze systému AMDAR lze získávat jako oprávněný uživatel v podobě zpráv distribuovaných v síti WMO, nebo lze přijímat zprávy ACARS prostřednictvím SDR a následně zprávy ACARS dekódovat, tato problematika však přesahuje rámec této práce. Data AMDAR mohou doplňovat informace o kondenzačních stopách, bohužel ve většině případů bez hodnot vlhkosti vzhledem k počtu letadel vybavených v Evropě tímto senzorem a způsobem jejich nasazování.

2.3 SSR, ADS-B

Protože jsou oba systémy zásadní pro pozdější návrh systému pro sběr dat o kondenzačních stopách, jsou v této části podrobně představeny. Pro sběr meteorologických informací a letových informací z konkrétního letadla, pohybujícího se ve FIR Praha za pravidel IFR, lze využít povinnosti mít ve výbavě a v provozu odpovídač sekundárního radaru pracujícího v módu S s funkcionalitou EHS, a to u letadel s pevnými křídly se schválenou MTOW větší než 5 700 kg nebo cestovní TAS větší než 250 kt. Povinnost mít ve výbavě a v provozu odpovídač sekundárního radaru, pracující v módu S s funkcionalitou ELS (včetně SI kódu), platí pro vrtulníky bez ohledu na MTOW a pro letouny se schválenou MTOW menší než 5 700 kg nebo cestovní TAS menší než 250 kt letících ve FIR Praha podle pravidel IFR, dále pro všechny lety VFR nad FL 95 a také pro VFR lety v TMA Praha a CTR Ruzyně. Pro všechny motorové letouny, vrtulníky a balóny, provádějící lety VFR nad FL 60 (včetně), nebo nad 5 000 ft AMSL (včetně), pokud je převodní hladina FL 70, a pro všechna letadla



provádějící traťový let v noci, platí ve FIR Praha do FL 95 (kromě TMA Praha/CTR Ruzyně) povinnost vybavení odpovídačem, schopným odpovídat na dotazy v módu A ve 4 096 kódech s hlášením tlakové nadmořské výšky v módu C. Podstatný pro sběr informací je také fakt, že pro letadla se schválenou MTOW nad 5 700 kg nebo cestovní TAS nad 250 kt, letících ve FIR Praha podle pravidel IFR, platí povinnost vybavení letadla technologií ADS-B OUT. Výjimky a detaily pro povinné vybavení ve FIR Praha jsou uvedeny v AIP GEN 1.5 a v Prováděcím nařízení komise (EU) č. 1207/2011 ve znění pozdějších nařízení [42, 43].

Evropský program implementace módu S je rozdělen podle požadavků na funkcionalitu odpovídačů na základní sledování ELS (Elementary Surveillance) a rozšířené sledování EHS (Enhanced Surveillance). Odpovídače ELS musí být schopné předávat:

- 24bitovou ICAO adresu,
- kód módu A,
- tlakovou nadmořskou výšku,
- status letu (zem/vzduch),
- zprávu o možnosti použití datového spoje,
- zprávu o možnosti použití GICB protokolu,
- identifikaci letadla (Call Sign),
- speciální identifikační pulz (SPI),
- nouzový stav včetně využívání speciálních kódů módu A,
- aktivní rady k vyhnutí systému ACAS.

Odpovídače úrovně EHS musí být schopné poskytovat funkcionalitu úrovně ELS a navíc musí být schopné předávat tzv. DAPs (Downlink Airborne Parameters) parametry, přičemž ty se dále dělí na CAPs (Controller Access Parameters) parametry zobrazované řídicímu letového provozu, a SAPs (System Access Parameters) parametry, využívané ke zlepšení funkce ATM systémů. Povinně přenášené DAPs jsou:

- nadmořská výška zvolená na MCP/FCU,
- úhel příčného náklonu,
- traťová úhlová rychlost,
- traťová rychlost,
- magnetický kurz,
- indikovaná rychlost letu nebo Machovo číslo,
- barometrická nebo baroinerciální vertikální rychlost,



- nastavení barometrického tlaku (po odečtení 800 hPa),
- rychlost změny traťového úhlu nebo pravá vzdušná rychlost, pokud není rychlost změny traťového úhlu k dispozici.

Kromě výše uvedených požadavků v evropském vzdušném prostoru platí, že odpovídače IFR letů letadel se schválenou MTOW nad 5 700 kg nebo cestovní TAS nad 250 kt musí být schopné ADS-B vysílání prostřednictvím protokolu rozšířeného dotazovacího signálu ES (Extended Squitter), mj. musí být schopné tímto protokolem přenášet:

- ICAO 24bitovou adresu,
- Identifikaci letadla,
- kód módu A,
- číslo verze ADS-B,
- kategorii vysílače ADS-B,
- geodetickou horizontální polohu v souladu s WGS84 a to ve vzduchu i na zemi,
- tlakovou nadmořskou výšku,
- geometrickou výšku v souladu s WGS84,
- a další.

Další položky výše zmíněné povinnosti jsou uvedeny v Prováděcím nařízení komise (EU) č. 1207/2011 ve znění pozdějších nařízení. [36]

Dle ICAO Annex 10 Part IV musí být všechny odpovídače módu S v souladu s jednou z pěti úrovní. V případě módu S s funkcionalitou ELS a EHS je minimální úroveň odpovídače úroveň 2s, pro splnění požadavku vysílání ADS-B je nutný odpovídač minimální úrovně 2es [43, 45].

Po získání zpráv módu S a zpráv ADS-B z konkrétního odpovídače letadla tvořícího kondenzační stopu je nutné tyto zprávy dekodovat a z těchto dekodovaných zpráv je pak možné získat jak letová data (rychlosti, výšky, pozice), tak i meteorologická data a to buď meteorologická data přímá, vysílaná jako odpověď na dotazovačem požadovaný přenos BDS registru 44_{hex} (rychlost a směr větru, teplota, statický tlak, vlhkost) a BDS registru 45_{hex} (turbulence, námraza, stříh větru, Microburst, turbulence v úplavu), nebo nepřímá meteorologická data (teplota, statický tlak), která lze vypočítat na základě znalosti přenášených hodnot pravé vzdušné rychlosti, Machova čísla a výšky. Bohužel zmíněné meteorologické registry, přestože jsou ve FIR Praha dotazovány (pouze BDS registr 44_{hex}),



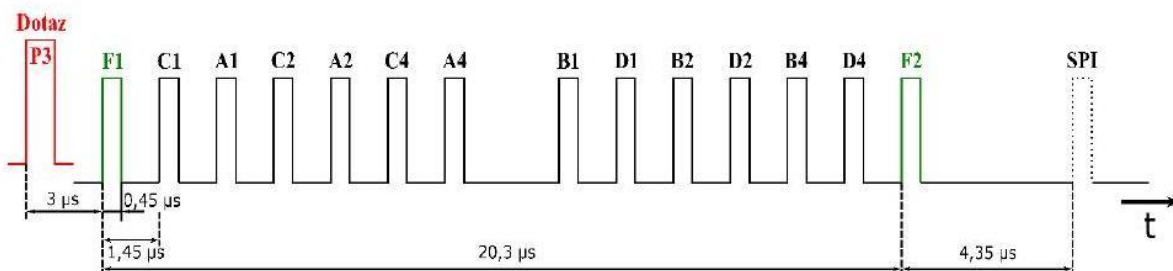
nemusí být v odpovědích povinně přenášeny a na žádost výpisu těchto registrů odpovídá jen velmi malý počet letadel.

2.3.1 Sekundární radiolokace

Sekundární radiolokace, na rozdíl od primární, je založena na principu dotaz–odpověď, tzn. řadí se mezi nezávislé kooperující přehledové systémy, kdy nezávislé značí systémy, u kterých je poloha cíle určena bez informací přijatých od cíle, v případě SSR je šikmá vzdálenost k cíli určena z časové prodlevy mezi vysláním dotazu a přijetím odpovědi a azimut je určen polohou antény dotazovače, a kooperující značí systémy, u kterých je nutnost přítomnosti konkrétního zařízení na palubě letadla.

Systém SSR se skládá z pozemního dotazovače, vysílajícího dotazy na frekvenci 1 030 Mhz a přijímajícího odpovědi na frekvenci 1 090 Mhz, a palubního odpovídače (transponderu), který na frekvenci 1 030 MHz přijímá dotazy a po vygenerování odpovědi v závislosti na požadovaných informacích vysílá odpověď na frekvenci 1 090 MHz. Anténní systém dotazovače je složen z hlavní antény s úzce směrovou vyzařovací charakteristikou pro vysílání řídicích pulzů dotazu a potlačovací antény s vyzařovací charakteristikou ve tvaru kardiody, která vysílá potlačovací pulzy za účelem potlačení odpovědí na dotazy vyvolanými postranními laloky hlavní antény, vývojem původního SSR dotazovače vznikl monopolní SSR (MSSR), řešící problémy s nepřesností detekce polohy a překrýváním cílů pomocí fázové nebo amplitudové komparace signálu. Vyzařovací charakteristika antén odpovídačů je všesměrová. S postupným vývojem systému SSR byly do civilního provozu zavedeny tři módy, neadresné módy A a C a selektivní mód S, který dotazuje neadresně i adresně. V případě módů A a C se řídicí impulzy P1 a P3 doplňují potlačovacím impulzem P2, vyzařovaným potlačovací anténou, v případě módu S se používá potlačovací impulz P5. Rozdíl mezi sledem impulzů módů A C rozdíl spočívá v délce prodlevy mezi impulzy P1 a P3. Odpovědí na dotaz módu A je jeden z 4 096 možných čtyřmístných identifikačních kódů letadla v osmičkové číselné soustavě (některé kódy jsou vyhrazeny pro zvláštní účely), převedený do binárně přenášené informace, odpovědí na dotaz módu C je binárně přenášená informace o barometrické výšce letadla s krokem 100 ft, přičemž binární kód pro příslušné rozmezí barometrických výšek je tabelizován a uveden v předpisu L10/IV. Sled impulzů odpovědí obou módů je ohraničený bránovými impulzy F1 a F2 s odstupem 20,3 μ s, mezi bránovými impulzy se nachází 12 bitových impulzů. Sled impulzů odpovědí módů A a C je vidět na obrázku 7, je pro oba módy totožný s výjimkou bitu D1, který se u odpovědi

módu C trvale nachází v logické nule. Odpovědač módu A/C musí ignorovat dotaz, v jehož signálu je amplituda impulzu P2 rovna nebo větší než amplituda impulzu P1 [44, 45].

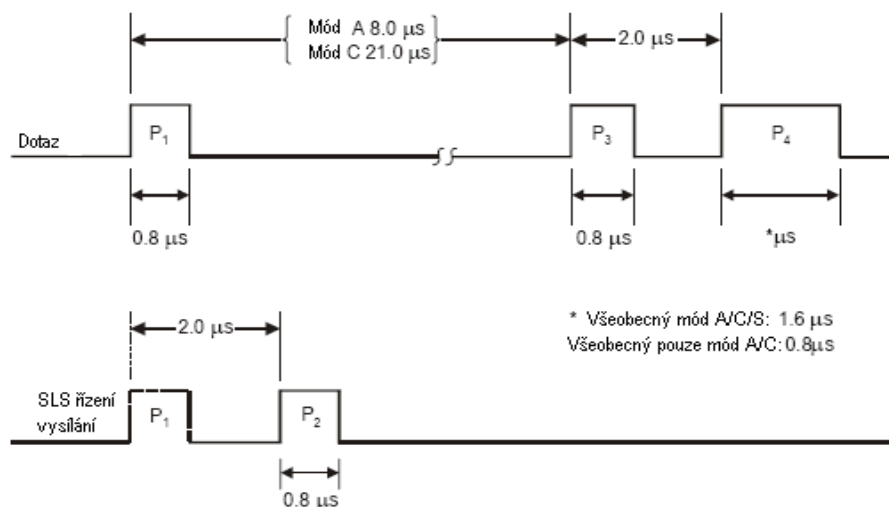


Obrázek 7 Sled impulzů odpovědi módu A [44]

2.3.2 SSR Mód S

Se stoupající hustotou leteckého provozu došlo i k nárůstu počtu odpovědí módů A/C a tím i k zahlcování dotazovače, překrývání odpovědí a dalším problémům. Tyto problémy zmírňuje zavedení selektivního módu S, který přinesl výhody v podobě snížení počtu odpovědí díky adresné komunikaci s letadly, možnosti kontroly korektnosti přijímaných zpráv, zvýšení počtu identifikačních kódů letadel a možnosti přenášet další informace o stavu letadla. Mód S využívají i některé další technologie jako ADS-B, ACAS a A-SMGCS. Dotazování v módu S probíhá ve dvou střídajících se periodách, v All-Call periodě vysílá dotazovač neadresné všeobecné dotazy, v Roll-Call periodě vysílá dotazovač adresné dotazy na základě znalosti 24bitové ICAO adresy v hexadecimální soustavě, přidělené pevně každému letadlu vybaveným mód S transponderem. ICAO adresu může dotazovač získat buď z odpovědi na všeobecný dotaz vyslaný v All-Call periodě, nebo z tzv. squitteru, což je samovolně vysílaná všeobecná odpověď odpovídačem, a dále vyslychá konkrétní odpovídač již jen v Roll-Call periodě. Jakmile získá dotazovač ICAO adresu letadla, vysílá v adresných dotazech v příslušném poli datové zprávy požadavek na blokování odpovědí na všeobecné dotazy módu S tohoto dotazovače s příslušným identifikačním kódem (IC), existují však oblasti, kde může být funkce blokace regulována místními předpisy. Aby byla zaručena možnost vyslychání odpovídačů módů A/C dotazovačem módu S, byly zavedeny tzv. všeobecné společné dotazy módu A/C/S a pouze módu A/C. V současné době jsou dle ICAO Annex 10 IV přípustné pouze všeobecné společné dotazy módu A/C a všeobecný dotaz módu S, všeobecný společný dotaz módu A/C/S se od 1. 1. 2020 nesmí používat a u odpovídačů certifikovaných po tomto datu není tento dotaz podporován, tzn. ke zjištění

nového odpovídače v All-Call periodě se při dotazování využívá již jen všeobecného dotazu módu S [45].



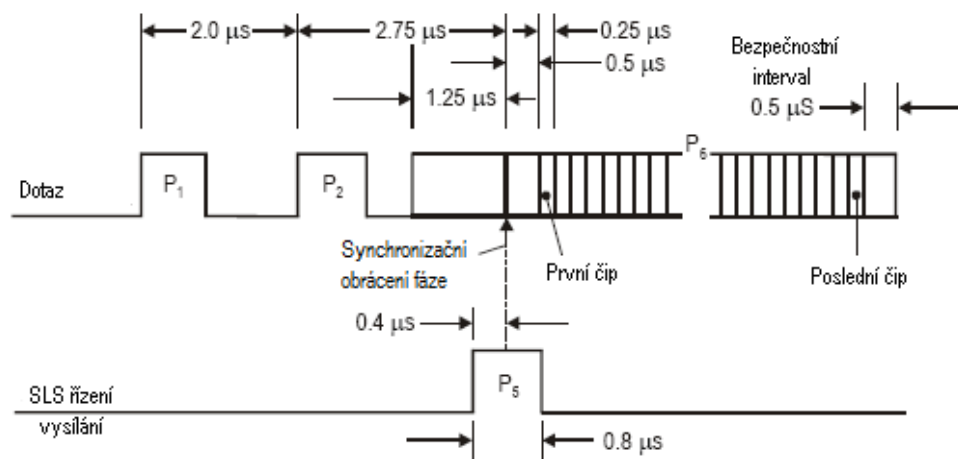
Obrázek 8 Sled impulsů společných dotazů [45]

Na obrázku 8 je znázorněn sled impulsů společných dotazů, v případě společného dotazu módu A/C (zda jde o společný dotaz s módem A nebo C určuje vzdálenost impulsů P1 a P3) je přidán krátký impuls P4, pokud odpovídač nepodporuje mód S odpovídá v módu A/C (impuls P4 nerozezná), pokud odpovídač mód S podporuje, je odpověď v módu A/C díky krátkému impulsu P4 potlačena. Potlačovací anténa vysílá buď samostatně impuls P2 nebo pár impulsů P1 a P2.

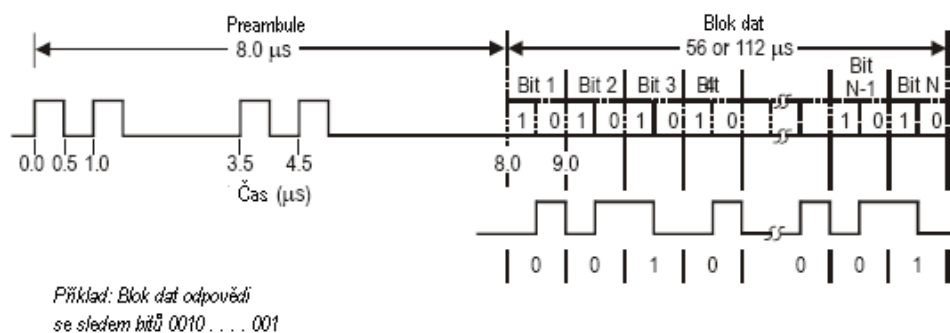
Obrázek 9 znázorňuje sled impulsů dotazu módu S, dotaz se skládá celkem ze čtyř impulsů P1, P2, P5 a P6, impuls P5 je vysílán potlačovací anténou v době synchronizačního obrácení fáze impulsu P6, ostatní impulsy jsou vysílány hlavní anténou. Protože impuls P2 má stejně velikou amplitudu jako impuls P1, odpovídače módu A/C neodpovídají, pokud je amplituda impulsu P5 větší než ostatních impulsů, vyhodnotí odpovídač mód S dotaz jako dotaz vyslaný postranními laloky a neodpoví. Po impulsu P2 následuje impuls P6, obsahující datový blok, kódovaný pomocí binární fázové modulace. Krátký impuls P6 obsahuje maximálně 56 fázových obrácení, tedy 56 bitů, dlouhý impuls P6 obsahuje maximálně 112 fázových obrácení, tedy 112 bitů, přičemž přítomnost fázového obrácení značí logickou jedničku. První čip datové zprávy následuje 0,5 μs po synchronizačním obrácením fáze.

Na obrázku 10 lze vidět strukturu odpovědi módu S, která se skládá z tzv. preamble o délce 8 μs sestávající ze 4 impulsů dlouhých 0,5 μs v pevných vzdálenostech od prvního impulsu,

a bloku dat o délce 56 nebo 112 μs , sestávajícího z 56 nebo 112 bitů dat kódovaných ve dvojkové impulzní polohové modulaci, impuls vysílaný v první polovině příslušného intervalu bitu znamená dvojkovou jedničku, impuls vysílaný ve druhé polovině intervalu znamená dvojkovou nulu. V případě sousedících impulsů jednotlivých bitů je vysílán spojený impuls trvající 1 μs .



Obrázek 9 Sled impulsů dotazu módu S [45]



Obrázek 10 Sled impulsů odpovědi módu S [45]

Odpovědač módu S obsahuje binární úložiště dat pro uchovávání informací ze senzorů a systémů letadla a dalších informací, které je rozděleno na 56bitové tzv. BDS registry. K dispozici je 255 registrů označených dvojmístným hexadecimálním číslem (např. BDS



20_{hex} nebo BDS 2,0), ke kterým se přistupuje právě pomocí 8bitového BDS kódu (Comm–B Data Selector), rozděleného na BDS1 (4 bity nejvyššího významu) a BDS2 (4 bity nejnižšího významu), obsah dotazovačem požadovaného registru je přenášen dotazovači v poli ME odpovědi Comm–B stanovenou bitovou strukturou odpovědi v poli MB dle ICAO Doc 9871, která je shodná s bitovou strukturou příslušného registru, tento dokument také uvádí maximální interval obnovy dat jednotlivých registrů.

Pro službu základního sledování ELS jsou povinně přístupné registry uvedené v tabulce 2, pro službu rozšířeného sledování EHS jsou (včetně registrů požadovaných v ELS) povinně přístupné registry uvedené v tabulce 3.

Tabulka 2 Povinné registry ELS

Registr	Účel
BDS 10 _{hex}	Hlášení o možnosti využití datového spoje
BDS 17 _{hex}	Zpráva o možnosti běžného použití GICB protokolu
BDS 20 _{hex}	Identifikace letadla
BDS 30 _{hex}	Aktivní informace – doporučení na vyřešení konfliktu

Tabulka 3 Povinné registry EHS (včetně ELS)

Registr	Účel
BDS 40 _{hex}	Vertikální záměr letadla
BDS 50 _{hex}	Úhel příčného náklonu, pravý traťový úhel, GS, TAS aj.
BDS 60 _{hex}	Magnetický kurz, Mach, IAS aj.

Kromě informací z povinně přístupných registrů je možné využít informací z nepovinných meteorologických registrů BDS 44_{hex} MRAR (Rutinní meteorologické hlášení) a BDS 45_{hex} MHR (Hlášení o výskytu nebezpečných meteorologických jevů), pokud jsou radarem dotazovány a registry obsahují příslušná data (např. všeobecná absence senzoru vlhkosti), v současné době však na požadavek výpisu těchto registrů reaguje velmi malý počet letadel v jednotkách procent. MRAR registr obsahuje údaje o rychlosti a směru větru, teplotě, tlaku



a vlhkosti, MRAR registr obsahuje údaje o turbulenci, námraze, stříhu větru, výskytu Microburst a turbulenci v úplavu [46].

Každý blok dat vysílání módu S musí obsahovat dvě hlavní pole. Prvním hlavním polem je deskriptor umístěný na začátku bloku dat vzestupných i sestupných spojů, který musí jednoznačně určovat formát vysílání, je určen poli UF (Uplink Format) a DF (Downlink Format). V obou případech má u všech formátů kromě formátu 24 délku 5 bitů, u formátu 24 jej tvoří v prvních dvou bitech jedničky a zbylé tři bity se mění podle obsahu dotazu/odpovědi. Druhým hlavním polem je 24bitové pole na konci bloku dat s označením polí AP (ukazující paritu adresy odpovídače) nebo PI (ukazující paritu identifikačního kódu dotazovače). Sled 24 bitů kontroly parity se tvoří kombinací sledu kontroly parity (vytvořeného polynomicky jako zbytek nižšího stupně než 24 ze sledu 32 nebo 88 informačních bitů) a adresy letadla (obsah pole AP) nebo kódu dotazovače (obsah pole PI). Podrobnosti k vytváření polí AP a PI jsou uvedeny v ICAO Annex X/IV. Pole AP musí být použito u všech vzestupných a u určených sestupných formátech kromě DF11, pole PI musí být použito v sestupných formátech DF11, DF17 a DF18. Zbývající prostor bloku dat je využit pro ostatní pole se strukturou v závislosti na formátu vysílání, pro vzestupný i sestupný kanál je definováno 25 formátů vysílání s označením 0 až 24. Přehled všech definovaných formátů dotazů a odpovědí je uveden v příloze [45].

Ke všeobecným dotazům módu S se v All-Call periodě využívá krátký formát dotazu UF11, bitová struktura polí datového bloku je uvedena v tabulce 4.

Tabulka 4 Bitová struktura všeobecného dotazu módu S UF11

Bit č.	1–5	6–9	10–13	14–16	17–32	33–56
Pole	UF	PR	IC	CL		AP

Pole PR udává odpovídači pravděpodobnost odpovědi na tento dotaz, používanou pro stochastické dotazování k zamezení ztrát překrývajících se dopovědí blízko sebe se pohybujících cílů. Pole IC udává buď 4bitový kód identifikátoru dotazovače (II), nebo nižší 4 bity 6bitového kódu identifikátoru pozorování (IS). Pole CL určuje obsah pole IC. Pole AP je v případě všeobecného dotazu tvořeno adresní paritou, kde k vygenerování kódu parity je použita adresa letadla se samými jedničkami.



Odpovědi na všeobecný dotaz módu S (nebo vysíláním squitteru odpovídáčem) je krátká všeobecná odpověď odpovídáče DF11, bitová struktura polí je uvedena v tabulce 5.

Tabulka 5 Bitová struktura všeobecné odpovědi módu S DF11

Bit č.	1–5	6–8	9–32	33–56
Pole	DF	CA	AA	PI

Pole CA sestupného spoje předává informaci o úrovni odpovídáče, a zda se letadlo nachází na zemi či ve vzduchu. Pole AA oznamuje ICAO adresu letadla.

Adresné dotazy spojení standardní délky (SLM) se provádí krátkými (UF4 a UF5) i dlouhými (UF20 a UF21) typy dotazů. V případě dlouhých typů obsahuje blok dat navíc 56bitové pole MA, které obsahuje zprávu Comm–A datového spoje pro odpovídáče. Zprávy Comm–A jsou předány přímo odpovídáči a jedinou transakcí. Prodloužené zprávy vzestupným spojem se mohou předávat protokoly prodloužených zpráv (ELM) s použitím formátu Comm–C (UF24). Protokol vzestupného spoje prodloužených zpráv umožňuje předání 16 segmentů zprávy po 80 bitech před vyžádáním odpovědi odpovídáče.

Pro adresné odpovědi spojení standardní délky (SLM) se používají krátké typy odpovědi formátů DF4 a DF5 nebo dlouhé typy odpovědi formátů DF20 a DF21, kde blok dat navíc obsahuje 56bitové pole MB zprávy Comm–B datového spoje. Zprávy Comm–B jsou v případě zahájení z letadla nejdříve oznámeny dotazovači a v následné transakci přenášeny. V případě zahájení dotazovačem jsou zprávy Comm–B přenášeny na základě požadavku v poli RR vzestupného spojení, ve kterém je uveden BDS kód registru, obsah kterého se ve zprávě Comm–B musí vyslat. Odpověď spojení prodloužené délky (ELM) se předává formátem DF24 a to opět po souhlasu dotazovače.

V tabulce 6 je jako příklad krátkého typu odpovědi uvedena bitová struktura polí odpovědi na požadavek výšky DF4, generované na dotaz UF4 nebo UF20 s hodnotou pole RR (požadavek odpovědi) v rozsahu 0–15.



Tabulka 6 Struktura odpovědi módu S na požadavek výšky DF4

Bit č.	1–5	6–8	9–13	14–19	20–32	33–56
Pole	DF	FS	DR	UM	AC	AP

Pole FS značí status letu, tj. obsahuje informace o přítomnosti signálu nouze a signálu SPI a dále zda se letadlo nachází na zemi nebo ve vzduchu. V poli DR je uveden požadavek sestupného spoje, např. požadavek na vysílání zprávy Comm–B. Pole UM je určeno pro služební zprávu a obsahuje informaci o statusu spojení odpovídáče. Pole AC obsahuje kódování výšky ve ft v krocích po 25 nebo 100 ft, nebo v metrech.

V tabulce 7 je jako příklad dlouhého typu odpovědi uvedena bitová struktura polí odpovědi výšky, generované na dotaz UF4 nebo UF20 s hodnotou pole RR 16–31. Pole MB obsahuje zprávu Comm–B, které se musí použít pro vyslání dat na zem datovým spojením.

Tabulka 7 Struktura odpovědi výšky Comm–B DF20

Bit č.	1–5	6–8	9–13	14–19	20–32	33–88	89–112
Pole	DF	FS	DR	UM	AC	MB	AP

Z odpovědí módu S spojení standardní délky (SLM) jsou důležité jako zdroj dat pro sběr meteorologických informací a informací o letadlech (které jsou po dekódování ICAO adresy z pole AP přiřaditelné ke konkrétnímu letu) krátké odpovědi DF4, ze kterých je možné bez nutnosti dekódování pole MB získat výšku. V případě dlouhých odpovědí DF20 a DF21 lze po dekódování pole MB získat informace z BDS registrů, jako je indikovaná vzdušná rychlost, Machovo číslo, magnetický kurz a přímé meteorologické informace z registru BDS 44_{hex}, z Machova čísla a pravé vzdušné rychlosti lze vypočítat teplotu. Dekódování obsahu BDS registrů přenášených v odpovědích DF20 a DF21 však komplikuje fakt, že v odpovědích na rozdíl od dotazů není (kromě registrů BDS 10_{hex}, BDS 20_{hex} a BDS 30_{hex}) obsažen v poli MA BDS kód přenášeného registru a není tedy možné jinými příjemci zpráv módu S, než těch, které vyslaly pokyn k výpisu BDS registru, přímo registry dekódovat. Proto se pro dekódování informací z nejběžnějších registrů používají techniky založené na



rozdílech v bitové struktuře jednotlivých registrů s využitím znalosti o rezervovaných a stavových bitech a porovnávání hodnot parametrů v těchto registrech [45, 46].

2.3.3 Ochrana proti chybám módu S

V přenosu zpráv módu S se jako ochrana proti chybám používá kontrola parity, která je obsažena v posledních 24 bitech celé zprávy a tvoří se odlišně pro vzestupné a sestupné spoje a odlišně u parity adresy (pole AP), parity identifikace dotazovače (pole PI) i datové parity (pole DP). Parita adresy se používá u všech využívaných formátů odpovědí kromě DF 11 a DF 17, kde se používá parita identifikace dotazovače. U odpovědí s DF 20 a 21, pokud to dotazovač požaduje a odpovídač umožňuje, se používá datová parita.

Znalost mechanismu tvorby paritních polí je nutná pro další nakládání s přijatou zprávou, adresní parita umožňuje kontrolu chyb a získání ICAO adresy z odpovědí DF 4, DF 5, DF 20, DF 21, parita identifikace dotazovače umožňuje pouze kontrolu chyb u odpovědí DF 11 a DF 17 (adresa letadla je přenášena přímo ve zprávě v poli AA), datová parita umožňuje kontrolu chyb a za předpokladu znalosti kódů BDS1 a BDS2 v přenášené zprávě i získání adresy u odpovědí s DF 20 a DF 21. Vzhledem k tomu, že z každé přijaté zprávy uvedených DF lze získat ICAO adresu letadla, je možné sestavit kolekci zpráv patřící letadlu, které se pohybuje v prostoru zabíraného kamerou na základě testování polohy přenášené ve zprávách DF 17.

Základní sled bitů paritní kontroly (p_1, p_2, \dots, p_{24}) se tvoří ze sledu informačních bitů (m_1, m_2, \dots, m_K) dlouhého 32 bitů u krátkých zpráv a 88 bitů u dlouhých zpráv, tj. z celé zprávy bez posledních 24 bitů. Užitím dvojkové polynomické algebry se součin x^{24} s informačním sledem $M(x)$ dělí generujícím sledem $G(x)$ za vzniku kvocientu a zbytku $R(x)$, kde $G(x)$ je polynomicky vyjádřen vztahem 2.1:

$$G(x) = 1 + x^3 + x^{10} + x^{12} + x^{13} + \dots + x^{24}, \quad (2.1)$$

a $M(x)$ je polynomicky vyjádřen vztahem 2.2:

$$M(x) = m_K + m_{K-1}x + m_{K-2}x^2 + \dots + m_1x^{K-1}. \quad (2.2)$$

Výsledným paritním bitem p_i (pro i od 1 do 24) základního 24bitového sledu parity je koeficient x^{24-i} ve zbytku $R(x)$.



Výsledné pole AP sestupných spojů se vytvoří kombinací základního 24bitového sledu parity s 24bitovým sledem ICAO adresy odpovídače podle vztahu 2.3:

$$t_{k+1}, t_{k+2} \dots t_{k+24} = a_i \oplus p_i, \quad (2.3)$$

kde t_{k+1} představuje první vysílaný bit pole AP, $a_{i=1}$ značí první vysílaný bit v poli AA odpovědi na všeobecný dotaz módu S, \oplus představuje doplnění modulo-2 a $p_{i=1}$ značí první bit základního paritního sledu.

Pokud se u přijaté zprávy s DF 4, DF 5, DF 20 nebo DF 21 vypočítá základní paritní sled a provede doplnění modulo-2 se sledem z paritního pole AP, je v případě neporušení zprávy výsledkem ICAO adresa letadla.

Výsledné pole PI sestupných spojů se tvoří kombinací základního 24bitového sledu parity podle stejného vztahu 2.3, ovšem se sledem a_i bitů, kde prvních 17 bitů tvoří samé nuly, následující 3 bity jsou opakováním pole CL a poslední 4 bity jsou opakováním pole IC.

Pokud se u přijaté zprávy s DF 11, vysílané jako squitter, nebo zprávy s DF 17 vypočítá základní paritní sled a provede doplnění modulo 2 se sledem z paritního pole PI, je v případě neporušení zprávy výsledkem sled 24 nulových bitů, neboť za pole CL a IC jsou při generování pole PI dosazeny samé nuly, resp. u zpráv s DF 11 jako squitter a zpráv s DF 17 je v poli PI přenášen přímo základní sled kontroly parity. Pokud se u zprávy s DF 11 vysílané jako odpověď na všeobecný dotaz provede stejný postup, je výsledkem identifikace dotazovače.

Datová parita u odpovědí s DF 20 nebo DF 21 se tvoří stejným postupem jako parita adresní, je však použita modifikovaná ICAO adresa. Modifikovaná ICAO adresa se získá provedením součtu modulo-2 8 bitů nejnižšího významu ICAO adresy s 4bitovými kódy BDS1 a BDS2, jejichž hodnota závisí na dotazovačem požadovaném registru zahrnutém do odpovědi.

Pokud se u odpovědí s DF 20 nebo DF 21 provede výpočet základního sledu kontroly parity, je možné po doplnění modulo-2 základního sledu kontroly parity se sledem datové parity z pole DP získat modifikovanou ICAO adresu. Po doplnění modulo-2 získané modifikované ICAO adresy s kódy BDS1 a BDS2 získanými testováním datové struktury přenášeného registru, je v případě neporušení zprávy získána ICAO adresa letadla [45].



2.3.4 ADS–B

ADS (Automatic Dependent Surveillance) patří mezi závislé kooperující přehledové systémy, u kterých je poloha cíle získávána ze systémů letadla nebo pozemních provozních prostředků (typicky GNSS, ale mohou se využívat i jiné navigační systémy). Data nejen o poloze jsou automaticky vysílána nebo přijímána prostřednictvím datového spoje. ADS je rozdělen na dvě kategorie:

- ADS–C (Contract, nebo také označovaný jako ADS–A Addressed), kdy je přenos dat režimem point to point mezi letadlem a pozemní stanicí uskutečňován na základě předem specifikovaného plánu (kontraktu), využívá se v odlehlých oblastech prostřednictvím SATCOM,
- ADS–B (Broadcast), kdy je přenos dat uskutečňován plošně automatickým vysíláním všem uživatelům v dosahu.

ADS–B zařízení se podle schopnosti přijímat či vysílat data označuje jako ADS–B IN a ADS–B OUT. Ve FIR Praha za podmínek IFR platí povinnost vybavení letadla zařízením ADS–B OUT u letadel se schválenou MTOW nad 5 700 kg nebo cestovní TAS nad 250 kt. Pro přenos dat ADS–B na úrovni fyzické vrstvy existují tři technologie: 1090 ES (Extended Squitter), VDL mód 4 a UAT, globálně se využívá pouze technologie 1090 ES.

Vysílání dat ADS–B se v případě 1090 ES realizuje dlouhým typem odpovědi módu S protokolem SLM sestupným formátem DF17 (případně DF18, pokud zařízení není odpovídáčem), označovaných jako Extended squitter zprávy (v současnosti certifikovaných ve třech verzích formátů zpráv, lišících se hlášenými parametry kvality sledování). Využití downlikové frekvence a formátů módu S umožňuje technologii ADS–B implementovat do odpovídáčů módu S jako rozšíření jeho funkcionality. Extended squitter zprávy musí být podporovány BDS registry 05–0A_{hex} a 61–6F_{hex} a musí vyhovovat jedné ze tří výše zmíněné verzi formátu zpráv. Bitová struktura 112bit datového bloku odpovědi formátu DF17 je znázorněna v tabulce 8.

Tabulka 8 Struktura odpovědi módu S DF17

Bit č.	1–5	6–7	9–32	33–88	89–112
Pole	DF	CA	AA	ME	PI



Význam polí DF, CA, AA, PI byl popsán v předcházející kapitole, dále je rozebrána struktura pole ME. V tomto 56bitovém poli se nachází vlastní ES zpráva s vloženým obsahem příslušného BDS registru, přičemž prvních 5 bitů určuje typ formátu zprávy TC (Type Code), u některých typů zpráv následují 3 bity určující podtyp formátu zprávy SC (Subtype Code), přičemž TC a SC odpovídá tomu, jaké informace je v příslušném registru dostupná a z jakého pochází zdroje. TC rozděluje ES zprávy do tříd podle druhu přenášené informace, polohové přesnosti a způsobu udání výšky, 1090 ES využívá celkem 33 typů formátu zpráv dle TC, z nichž pro výzkum kondenzačních stop jsou důležité následující typy:

- Airborne position, TC 9–18 s barometrickým udáním výšky,
- Airborne position, TC 20–22 s udáním výšky GNSS (HAE),
- Airborne velocity, TC 19, ze které je možné extrahovat rychlost vůči zemi, rozdíl GNSS a barometrické výšky, případně magnetický kurz.

V případě zpráv s TC 9–18 a 20–22 je v poli ME předáván obsah BDS registru 05_{hex} s obnovou dat v registru do 0,2 s, u zpráv s TC 19 dochází k předání BDS registru 09_{hex} a obnově dat do 1,3 s. [39]

Předpis L10 uvádí četnost vysílání polohových ES zpráv letadla ve vzduchu i zpráv ES vzdušné rychlosti v náhodně vybraných intervalech v rozmezí 0,4 až 0,6 s a s využitím časové kvantizace po max. 15 ms vzhledem k předchozímu vysílání, a to kromě případů, kdy přenos musí být zpožděn (ustanovení 3.1.2.8.7.6.4.7 předpisu L10/IV) [45].

Zprávy ES jsou pro výzkum kondenzačních stop důležité zejména pro možnost snadného dekódování polohy a ICAO adresy, na základě těchto dvou informací je možné testovat polohu letadla a tyto zprávy kompletovat s ostatními zachycenými zprávami módu S, generovanými konkrétním letadlem ve sledovaném prostoru a čase.

3. Návrh alternativního systému pro sběr kondenzačních stop

3.1 Stávající systém výzkumu kondenzačních stop

Stávající systém pro sběr dat výzkumu kondenzačních stop Ústavu letecké dopravy FD ČVUT se začal připravovat v roce 2014, od října 2015 probíhá sběr dat. Základ systému tvoří sběr kamerových záznamů, sběr dat z přijímačů zpráv módu S, a následné párování zaznamenaných kondenzačních stop s daty z přijímačů. Získaná data mohou být v případě tvorby perzistentních kondenzačních stop doplněna o data ze satelitního pozorování Země



spektroskopem MODIS. Systém prošel několika změnami především ohledně nastavení kamer a postupné optimalizace programu pro dekódování a zpracování zpráv, zachycenými přijímači zpráv módu S [47].

3.1.1 Kamerový systém

Tři kamery jsou umístěné na střeše budovy ČVUT v Děčíně, každá z kamer je fixně nastavená do požadovaného směru a zaznamenává část oblohy. Původní směřování kamer se několikrát změnilo, přičemž poslední známé nastavení kamer respektovalo změnu v používání horního vzdušného prostoru ve FIR Praha v souvislosti s přechodem na koncept volných tratí. Poslední známé směrové nastavení kamer je uvedeno v tabulce 9.

Tabulka 9 Směřování kamer současného systému

Kamera	Magnetický směr [°]	Elevační úhel [°]
1	124	24
2	298	37
3	55	25

Obraz kamer je možné sledovat v reálném čase pomocí vzdáleného přístupu přes webové rozhraní dodávaným výrobcem kamer, nebo je možné záznamy sledovat zpětně po stažení ze serveru pomocí vhodného přehrávače. Detekce vzniklých kondenzačních stop probíhá manuálně a je velmi časově náročná, při dobrých meteorologických podmínkách je nutné analyzovat 8 hodin záznamu z každé kamery, nejnáročnější je tento proces u kamery č. 1, která zabírá více používaných tratí. Výstupem je soubor objevených kondenzačních stop s údaji o čase vzniku stopy (UTC, zobrazovaný v záznamu), číslem kamery a o naměřených vlastnostech kondenzačních stop, zaznamenaný v různých formách dle jednotlivých uživatelů.

3.1.2 Data z přijímačů zpráv módu S

Ústav letecké dopravy FD ČVUT provozuje přijímače zpráv odpovídáči sekundárního radaru módu S Radarcape, které jsou rozmístěné v Praze v lokalitách Strahov, Pankrác, Letňany a Albertov. Přijaté zprávy na server jsou ukládány do souborů po 20min blocích, k souborům lze přistupovat vzdáleným přístupem. V těchto souborech jsou v řádcích uloženy jednotlivé



zachycené zprávy, přičemž řádek obsahuje unixový čas přijetí zprávy na server, číslo přijímače, časovou značku UTC přijetí zprávy přijímačem a vlastní zprávu v hexadecimálním tvaru. Přijímače umožňují i stream surových dat, který podporuje formáty odpovědí DF0, DF4, DF5, DF11, DF17, DF18, DF20 a DF21. K dekódování zpráv se používá program *filtrace_ADSB_SSR_v11_CRC_v7*, vytvořený v prostředí MATLAB. Po vložení souboru se zprávami do složky Archiv a spuštění programu jsou zprávy dekódovány, výsledkem je určitý počet souborů s příponou .csv, nacházejících se ve stejné složce Archiv, každý soubor .csv obsahuje chronologicky řazený záznam jednotlivých zpráv patřících letadlu se stejnou ICAO adresou, které se pohybovalo v definovaných prostorech záběru kamer. Soubory .csv obsahují ve sloupcích unixový čas, nedekódovanou zprávu v hexadecimálním tvaru, a dekódované informace z jednotlivých zpráv, jako je poloha, rychlost, výška a také případné informace z registru BDS 44_{hex}. Pro usnadnění další práce s těmito soubory je v názvu souboru zahrnuto datum a čas vstupu letadla do sledovaného prostoru a také jeho ICAO adresa. Úpravou výše zmíněného skriptu vznikla varianta programu pro dekódování pouze těch průletů letadel, které vysílaly obsah meteorologického registru BDS 44_{hex}.

3.1.3 Přiřazení kondenzačních stop k informacím ze zpráv módu S

Poslední fází přípravy dat pro výzkum kondenzačních stop je manuální spojení informací o objevených kondenzačních stopách s dekódovanými informacemi z letadel. To se většinou provádí na základě porovnávání času vzniku zaznamenané kondenzační stopy a času uvedeným v názvu .csv souboru. Poté je otevřen předpokládaný soubor a z dekódovaných informací obsažených v souboru je rozhodnuto o správnosti souboru, nejčastěji na základě ověření času a magnetického směru. Tento proces je rovněž velice časově náročný. Spárované objevené stopy s informacemi z letadel jsou ukládány na server v podobě tabulkových souborů, avšak neexistuje stanovená podoba těchto souborů a ani jednotné uživatelské prostředí.

3.2 Koncept alternativního systému

Stávající systém pro sběr dat o kondenzačních stopách umožňuje analyzovat kondenzační stopy, které byly zaznamenány fixními kamerami umístěnými v Děčíně a k těmto stopám přiřadit informace získané z přijímačů módu S. Jen velmi malé množství v řádu jednotek procent získaných odpovědí módu S ale obsahuje meteorologické informace. Ke kondenzačním stopám získaným stávajícím systémem je tak možné pouze dodatečně přiřazovat meteorologické údaje o stavu atmosféry z nejbližší aerologické stanice v Praze,



u takto přiřazených údajů však existuje předpoklad zkreslení díky vzdálenosti a časovému odstupu konkrétní aerologické sondáže od naměřených kondenzačních stop. Teoreticky by bylo možné k naměřeným kondenzačním stopám přiřazovat také meteorologická data z programu AMDAR, bohužel vzhledem k tomu, že v evropském prostoru je senzorem vlhkosti vybaveno pouze 9 letadel společnosti Lufthansa a navíc jejich senzory vlhkosti nejsou aktivní v cestovních hladinách, postrádají tato data informaci o relativní vlhkosti vzduchu, která je u výzkumu kondenzačních stop spolu s teplotou a tlakem zásadní.

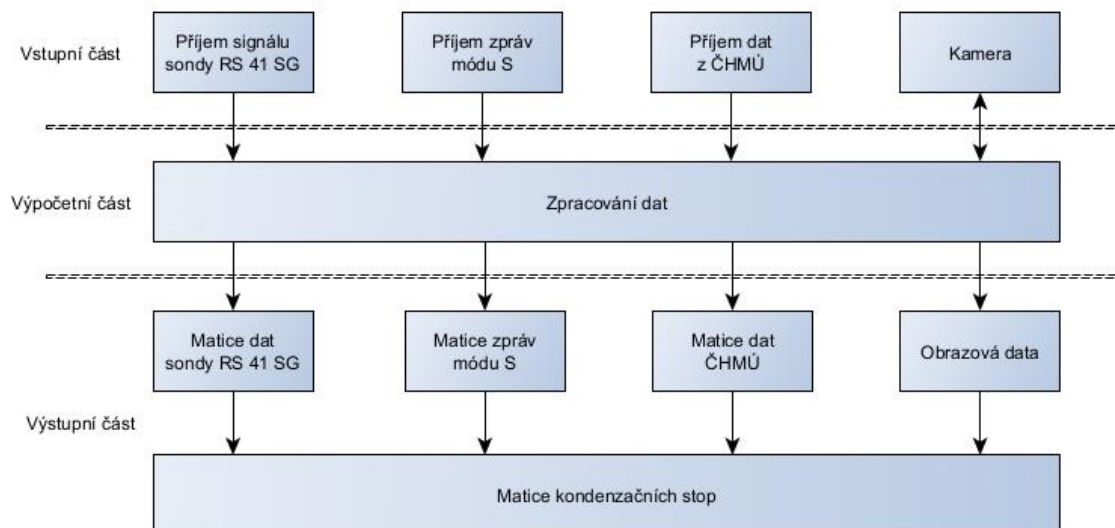
Z uvedených důvodů je v této práci předkládán návrh alternativního systému pro sběr dat o kondenzačních stopách, který popisuje možné řešení automatického zaznamenávání kondenzačních stop, vyskytujících se co nejbližší trajektorii aerologické sondy v době provádění sondáže a způsob získávání a zpracování dostupných doplňujících informací o prostředí a letadlech ve zkoumaném prostoru. Účelem předkládaného návrhu je poskytnout teoretický základ konceptu, který by bylo možné po technickém návrhu jednotlivých částí i realizovat. Předpokládanou výhodou navrhovaného systému vzhledem ke stávajícímu je snížení zkreslení přiřazených meteorologických podmínek v okolí zaznamenané kondenzační stopy a možnost automatického přiřazení meteorologických dat ze sondáže, nevýhodou je řádově menší počet zaznamenaných kondenzačních stop v jednotlivých dnech v době sondáže, závisící na trajektorii letu sondy.

V navrhovaném systému, stejně jako ve stávajícím, je uvažováno s kamerovým záznamem části oblohy a následné analýze kamerového záznamu. K objeveným stopám je pak nutné přiřadit informace z letadel a meteorologické informace. Rozdíl spočívá především v tom, že kamera není fixně nastavená do určitého směru, ale nastavení kamery je v době sondáže průběžně řízeno polohou aerologické sondy až do okamžiku, kdy sonda dosáhne požadované výšky (např. spodní hladina tvorby kondenzačních stop), aby bylo možné analyzovat případné perzistentní stopy. Podle prostoru zabíraného kamerou je možné automaticky filtrovat odpovědi módu S z odpovídačů letadel a k dekodovaným zprávám je možné automaticky přiřazovat podle tlakové výšky dle ISA meteorologické údaje ze sondážního měření. Systém může být provozován jako doplněk k systému stávajícímu a to buď pouze v době provádění sondáže, nebo i v době mezi sondážemi s tím, že kamera je v této době nastavena na předem definovanou pozici, respektující rozložení leteckého provozu v okolí sondážní stanice.

Naměřená data aktivní sondy je možné získat dvojím způsobem, buď z dat poskytovaných ČHMÚ na základě smlouvy, nebo odposlechem signálu sondy. V případě poskytovaných dat

je možné obdržet data se zpožděním cca 5 min od jednotlivých měření vysílaných sondou, tato poskytovaná data ale neobsahují přímo polohu, poloha by se musela zpětně dopočítávat z obdržených vektorů větru. Distribuovaná data však zahrnují opravu údajů senzorů teploty a vlhkosti sondy RS41 SG, prováděnou pozemní vyhodnocovací stanicí MW41. Podle zkušeností s dekódovacími programy radiosond je ve výšce 10 km rozdíl mezi opravenými daty poskytovanými ČHMÚ a dekódovanými daty u teploty asi 0,5 °C a u relativní vlhkosti i více než 10 %.

Data získaná odposlechem sondy RS41 SG obsahují polohová data sondy a měřené údaje teploty a vlhkosti. Jedná se však o neopravené údaje, na které by se musely aplikovat korekční algoritmy, které nejsou veřejně dostupné. Pokud by systém měl využívat pouze meteorologické údaje dekódované ze sondy, muselo by být navíc do systému zařazeno čidlo tlaku, snímající aktuální tlak v místě vypouštění sondy pro určení tlaku v ostatních hladinách.



Obrázek 11 Základní model navrhovaného systému

Proto je v systému navrženo řízení nastavení kamery polohovými daty sondy získanými dekódováním přijímaných zpráv sondy a jako zdroj meteorologických údajů ze sondáže odběr dat na základě smlouvy s ČHMÚ. Základní model navrhovaného systému je znázorněn na obrázku 11.

3.3 Vstupní část systému

Vstupní část systému musí zajišťovat příjem a předzpracování vstupních signálů a dat, konkrétně se jedná o příjem a zpracování signálu sondy RS41 SG, příjem a zpracování



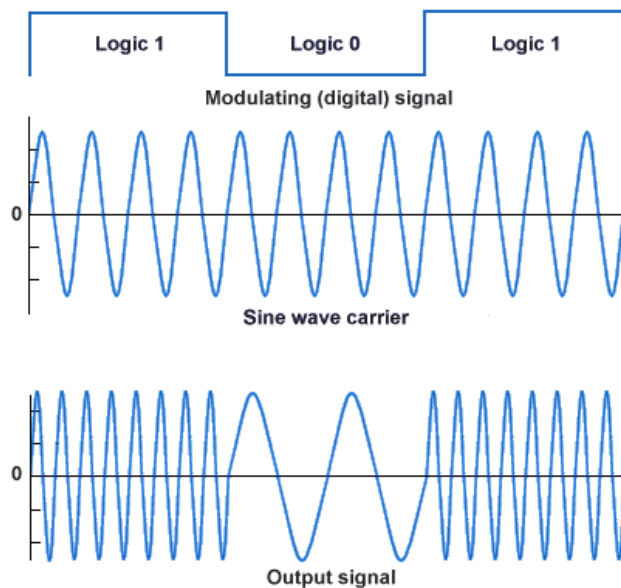
signálu odpovídačů módu S, příjem dat ze sondážního měření distribuovaných ČHMÚ a záznam obrazových dat z kamery.

3.3.1 Příjem signálu sondy RS 41 SG

Pro aerologická měření pomocí radiosond je vyhrazena část frekvenčního pásma 400 MHz, ČHMÚ má přiděleny dvě frekvence, a to 401,1 MHz a 404,2 MHz. Využívání dvou frekvencí je nutné pro případ, kdy v době startu nové sondy ještě vysílá signál sonda předchozí. Neexistuje pevné schéma nasazování konkrétní frekvence, obvykle se střídají, nicméně je nutné zajistit příjem signálu na správné frekvenci. To může být řešeno vyhodnocováním úrovně signálu obou frekvencí na přijímači v době startu sondy a po zjištění přítomnosti silnějšího signálu na jedné z frekvencí konkrétní frekvenci udržovat. Pro příjem signálu musí být použita vhodná anténní soustava přizpůsobená frekvenčnímu pásmu 400 MHz s všesměrovou charakteristikou. Vlastní přijímač může být řešen např. jako USB SDR rádio ve spojení s jednodeskovým počítačem Raspberry, umožňující odesílat jednotlivé zprávy přes síťové rozhraní. Příjem polohových dat ze sondy lze také řešit využitím některé z dostupných webových aplikací, umožňujících stream dekódovaných dat sond.

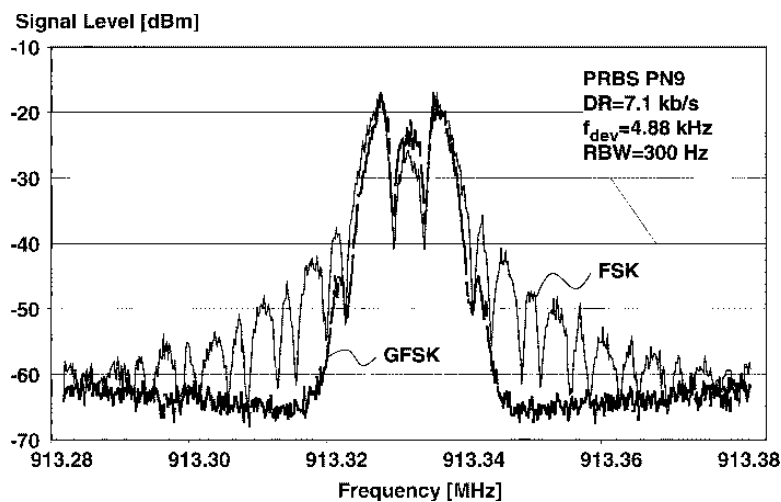
Radiosonda RS41 SG, aktuálně používaná ČHMÚ, vysílá na nastavené nosné frekvenci GFSK modulovaný signál s datovým tokem $4800 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}$ s minimálním vyzařovacím výkonem 60 mW. Vysílanými parametry sondou RS41 SG jsou mj. údaj o teplotě, vlhkosti a GPS polohová data sondy. Tlak, geopotenciální výška, rychlost a směr větru jsou dopočítávány pozemní stanicí z GPS polohových dat [36].

FSK využívá k přenosu datového toku principu frekvenční modulace nosné frekvence modulačním datovým signálem, přičemž logická nula v datovém signálu představuje modulaci nosné frekvence nižší frekvencí a logická jednička představuje modulaci nosné frekvence vyšší frekvencí (tzv. klíčování), což je zřejmé z obrázku 12.



Obrázek 12 FSK modulace [48]

V případě GFSK je datový signál obdélníkového tvaru před modulací upraven Gaussovým filtrem pro zajištění plynulejší změny frekvence, to přináší snížení úrovně laloků bočních pásem zabíraného frekvenčního spektra. Rozdíl ve výsledných frekvenčních spektrech FSK a GFSK modulovaného signálu je vidět na obrázku 13.



Obrázek 13 Frekvenční spektra FSK a GFSK [49]

Přijímaný GFSK modulovaný signál radiosondy je třeba nejdříve demodulovat za účelem získání amplitudy původního modulačního signálu. Záporné segmenty získané amplitudy



demodulovaného signálu představují logické nuly, kladné segmenty amplitudy demodulovaného signálu představují logické jedničky. Je nutné zajistit, aby dekódovaný signál nebyl převrácený, tzn. poslední bit střídajících se jedniček a nul preamble zprávy musí být rozeznán jako jednička. Takto získaný sled bitů každé zprávy může být odeslán do výpočetní části spolu s datumovou a časovou značkou k dalšímu zpracování.

3.3.2 Příjem zpráv módu S

Odpovědače módu S sekundárního radaru vysílají své odpovědi na nosné frekvenci 1 090 MHz. Přijímač s vertikálně polarizovanou všesměrovou anténou musí detekovat na nosné frekvenci jednotlivé zprávy módu S vysílané pomocí impulzů, zpráva se skládá z preamble dlouhé 8 μ s, obsahující 4 impulzy dlouhé 0,5 μ s vysílané v časech 0 μ s, 1 μ s, 3,5 μ s a 4,5 μ s, a z datového bloku dlouhého buď 56 nebo 112 μ s, který je modulován impulzní polohovou modulací, v datovém bloku představuje 1 bit 1 μ s dlouhý interval, impulz vysílaný v první polovině intervalu značí 0 a impulz vysílaný ve druhé polovině intervalu značí 1. Vzhledem k požadavku na minimalizaci chybně přijatých zpráv a tedy vysokých nároků zejména na vzorkovací frekvenci A/D převodníku je vhodné použít hotové řešení jako je např. přijímač Radarcapex, využívaný ve stávajícím systému, který umožňuje přes síťové rozhraní odesílat na úložiště nedekódované zprávy v hexadecimálním nebo binárním tvaru, případně využít již stávající provozované přijímače. Do výpočetní části se odesílá přijatá zpráva doplněná o datumovou a časovou značku UTC přijímače. Při vhodném umístění přijímače jeho dosah plně postačuje, sondy běžně dosahují požadovaných výšek ve vzdálenosti do 100 km od místa vypuštění.

3.3.3 Příjem dat z ČHMÚ

Data z probíhajícího sondážního měření poskytuje ČHMÚ na základě smlouvy s odběratelem. Lze dohodnout konkrétní způsob přenosu dat (např. ftp protokol), formát přenášených souborů a konkrétní obsah. Přenos jednotlivých měření je za skutečným měřením sondy zpožděn asi o 5 min mj. z důvodu korekce měřených veličin, lze sjednat prodlevu menší. V případě teplotního senzoru se aplikuje oprava časové odezvy senzoru, která se zvětšuje s rostoucí výškou s nárůstem odezvy o asi 0,7 s v tlakové výšce 100 hPa, a oprava vlivu slunečního záření, který je však do tlakové výšky 100 hPa pro účely návrhu systému zanedbatelný. U senzoru vlhkosti se především aplikuje oprava časové odezvy senzoru, s klesající teplotou prostředí roste čas odezvy a to z 0,5 s při 20 °C až na méně než 10 s při -40 °C, z důvodu korekce měřených veličin nelze v systému využít meteorologická



data dekodovaná přímo ze sondy. Z celé řady měřených a odvozených prvků, které mohou být poskytovány, je v systému uvažován odběr hodnot teploty, tlaku, relativní vlhkosti, směru a rychlosti větru, a to vztažených k geopotenciální výšce [47, 50].

3.3.4 Kamerový systém

Kamerový systém musí umožňovat pohyb kamery v rozsahu 0 – 360° horizontálně a 0 – 90° vertikálně a rovněž musí být schopený plynule měnit ohniskovou vzdálenost objektivu. Nastavení směru kamery může být řízeno vypočítanými hodnotami horizontálního a vertikálního úhlu v závislosti na přijímaných polohových datech sondy nebo při používání systému mimo dobu aerologické sondáže přednastavenými hodnotami úhlů. Ohnisková vzdálenost objektivu může být řízena vypočítanou vzdáleností sondy od stanoviště kamery. Konkrétní podoba kamerového systému v této práci není řešena, je však možné použít podobný systém jako u stávajícího systému pro sběr dat, tj. IP kameru s HD rozlišením a snímáním obrazu ve viditelné části spektra a síťovým rekordérem, ovšem s použitím motorizovaného objektivu s dálkovým řízením ohniskové vzdálenosti. Obrazová data z kamery by měla být doplněna o zobrazený údaj času UTC a také o hodnotu azimutu aktuálního směru kamery a elevačního úhlu. Pro pohyb kamery by muselo být vyvinuto unášecí zařízení schopné kameru nastavit do požadovaných úhlů a schopné neomezené rotace okolo svislé osy alespoň v několika otáčkách. Obrazová data jsou ukládána na úložiště a opatřena datumovou a časovou značkou záznamu v názvu souboru.

3.4 Výpočetní část

Výpočetní část navrhovaného systému zpracovává dodávaná data vstupní částí. Jedná se především o dekodování zpráv aerologické sondy, dekodování a filtraci zpráv odpovídající módu S a výpočet parametrů pro nastavení kamery a určení prostoru zabíraného kamerou.

3.4.1 Dekodování zpráv sondy RS 41 SG

Každá zpráva vysílání radiosondy RS41, vysílaná v rozestupu 1 s, se skládá z preambule, kterou tvoří sled 320 bitů (střídajících se jedniček a nul, končící jedničkou) o délce přibližně 66,7 ms, a dále z datového bloku, který tvoří v případě standardně dlouhé zprávy sled 320 bajtů o délce přibližně 533,3 ms. Prodloužená délka zprávy se používá v případě přenášení dat externě připojených senzorů např. pro měření ozonu nebo radiace. Základní bajtová struktura zprávy je znázorněna v tabulce 10, v závorce je uvedena hodnota pro prodlouženou zprávu.



Tabulka 10 Bajtová struktura zprávy sondy RS41

Bajt č.	1–40	41–361 (386)
Význam	Preamble	Datový blok

Přenos datového bloku je bitově i bajtově kódován Little–Endian, tzn., že nejvýznamnější bit a bajt se nachází v zápise na posledním místě, navíc je přenos kódován 64 bajtů dlouhou XOR maskou pseudonáhodné posloupnosti bitů, generovanou LFSR. V tabulce 11 je znázorněna bajtová struktura datového bloku zprávy standardní délky, který se skládá z jednotlivých různě dlouhých polí, zkratky polí v dalším textu jsou odvozeny od charakteru přenášených informací [51].

Tabulka 11 Bajtová struktura datového bloku zprávy standardní délky

Bajt č.	1–8	9–56	57	58–101	102–	148–	182–	275–	300–
Pole	HE	EC	FT	ST	ME	GI	GR	GP	EM

Pole HE tvoří hlavičku celého bloku dat o délce 8 bajtů, která je pro všechny sondy RS41 stejná. Pole EC obsahuje Reed–Solomon data pro možnou identifikaci chyb v přenosu a opravu přenesených dat o délce 48 bajtů. Pole FT o velikosti 1 bajtu označuje, zda se jedná o standardní nebo prodlouženou délku datového bloku, v případě standardní zprávy je hodnota pole $0F_{\text{hex}}$ a v případě prodloužené zprávy je hodnota pole $F0_{\text{hex}}$.

Pole ST, ME, GI, GR, GP a EM sdílejí stejnou strukturu, jednotlivá pole začínají vždy hlavičkou o délce 2 bajty, ve které první bajt značí typ pole a druhý bajt označuje počet bajtů pole bez hlavičky a CRC_{16} součtu v poli. Následuje blok dat příslušných podpolí, pole končí CRC_{16} součtem o délce 2 bajty, prováděným nad blokem dat v příslušném poli (tedy bez prvních a posledních dvou bajtů v poli), čehož lze využít pro eliminaci poškozených zpráv.

V poli ST o délce 44 bajtů jsou přenášeny informace o statusu sondy, např. sériové číslo sondy, stav baterie, typ sondy, letová fáze, číslo a data případného podrámce (maximálně je možné odeslat zprávu dlouhou 51 podrámců).



V poli ME jsou přenášena měřená data senzory sondy, v případě sondy RS41 SG se jedná o teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a teplotu senzoru vlhkosti vzduchu.

Pole GI obsahuje informace o stavu systému GPS, mj. týden a počet milisekund v týdnu GPS, a také seznam viditelných satelitů. V poli GR jsou obsažena surová GPS data, pole GP obsahuje GPS polohu a rychlost v souřadném systému ECEF, bajtová struktura datového bloku pole GP je uvedena v tabulce 12 (bez 2 bajtů hlavičky a 2 bajtů CRC součtu). Pole EM neobsahuje žádné informace [51].

Tabulka 12 Bajtová struktura datového bloku pole GP

Bajt č.	3–6	7–10	11–14	15–16	17–18	19–20	21	22	23
Význam pole	Pozice X (ECEF)	Pozice Y (ECEF)	Pozice Z (ECEF)	Rychlost X (ECEF)	Rychlost Y (ECEF)	Rychlost Z (ECEF)	Počet satelitů v konst.	Odhad přesnosti rychlosti	PDOP

Jednotlivá podpole pozice v poli GP jsou deklarována jako datový typ uint o velikosti 32 bitů, podpole rychlosti jsou deklarována jako datový typ uint o velikosti 16 bitů, zbylá podpole jsou deklarovaná jako datový typ uint o velikosti 8 bitů. Pozice je udávána v jednotkách cm, rychlost pak v $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dekódování pole GP je zásadní pro ovládání kamery, případně pro výpočet tlaku, horizontální složky směru a rychlosti větru v jednotlivých hladinách.

Z pole GI je možné dekódovat časové informace, první dva bajty obsahují hodnotu GPS týdne (datový typ uint 16 bitů), třetí až šestý bajt obsahuje čas v GPS týdnu v milisekundách (datový typ uint 32 bitů).

V případě prodloužené zprávy je za pole GI vloženo pole XD o délce 25 bajtů včetně hlavičky a kontrolního CRC součtu.

Získaný binární sled datového bloku musí být převeden po skupinách 8 bitů z formátu s nejvýznamnějším bitem vpravo na formát s nejvýznamnějším bitem vlevo, čímž je v původním binárním řetězci odstraněno bitové kódování Little–Endian. Na takto upravený binární řetězec je operací XOR bitově aplikována 64bajtová maska pseudonáhodné posloupnosti LFSR. Tato maska byla stanovena empiricky a je uvedena na obrázku 14. Takto upravený binární řetězec datového bloku jednoho snímku sondy je dále zpracován



s tím, že je nutné respektovat ještě kódování Little–Endian na úrovni bajtů, např. hodnota 0000 1000 1110 1010 1011 0100 0001 0111 v podpoli Pozice X pole GP se dekoduje jako 0001 0111 1011 0100 1110 1010 0000 1000, což se po převodu do decimální soustavy rovná délce 397732360 cm v kladném směru osy X souřadného systému ECEF [51].

```
0x96, 0x83, 0x3E, 0x51, 0xB1, 0x49, 0x08, 0x98,  
0x32, 0x05, 0x59, 0x0E, 0xF9, 0x44, 0xC6, 0x26,  
0x21, 0x60, 0xC2, 0xEA, 0x79, 0x5D, 0x6D, 0xA1,  
0x54, 0x69, 0x47, 0x0C, 0xDC, 0xE8, 0x5C, 0xF1,  
0xF7, 0x76, 0x82, 0x7F, 0x07, 0x99, 0xA2, 0x2C,  
0x93, 0x7C, 0x30, 0x63, 0xF5, 0x10, 0x2E, 0x61,  
0xD0, 0xBC, 0xB4, 0xB6, 0x06, 0xAA, 0xF4, 0x23,  
0x78, 0x6E, 0x3B, 0xAE, 0xBF, 0x7B, 0x4C, 0xC1
```

Obrázek 14 Bajtová maska pro operaci XOR [51]

Po načtení a dekodování zprávy, pokud jde o zprávy s dekodovanou výškou v nastaveném rozsahu, se údaje o poloze sondy doplněné o datumovou a časovou značku UTC v době provádění sondáže ukládají do výstupní matice sondy a zároveň jsou použity k řízení polohy kamery, pohyb kamery by měl být zastaven při dosažení stanovené hladiny pro možnost analýzy případných perzistentních kondenzačních stop.

3.4.2 Filtrace zpráv módu S

Jednotlivé zprávy z odpovídačů módu S jsou dodávány vstupní částí systému, v případě využití přijímače Radarcap v hexadecimálním nebo binárním tvaru. Hexadecimální tvar má následující podobu dlouhé nebo krátké zprávy:

```
313842184F78;A0001410A33A7534BFDDE32E8855,
```

kde první blok obsahuje časovou UTC značku přijímače v sekundách a nanosekundách a druhý blok dat představuje vlastní zprávu módu S. Alternativně je možné využít stahování souborů ze serveru, do kterých jsou jednotlivé přijaté zprávy z přijímačů laboratoře ATM ukládány ve 20min blocích, v tomto případě je v hexadecimálním tvaru na prvním místě blok obsahující unixový čas přijetí zprávy na server, na druhém místě se nachází blok označující číslo přijímače a následují bloky dat časové značky přijímače UTC a zprávy módu S. Referenční prostor je určován v závislosti na režimu provozu systému, v době mimo aerologickou sondáž je určen fixní přednastavenou polohou kamery, v době sondáže se

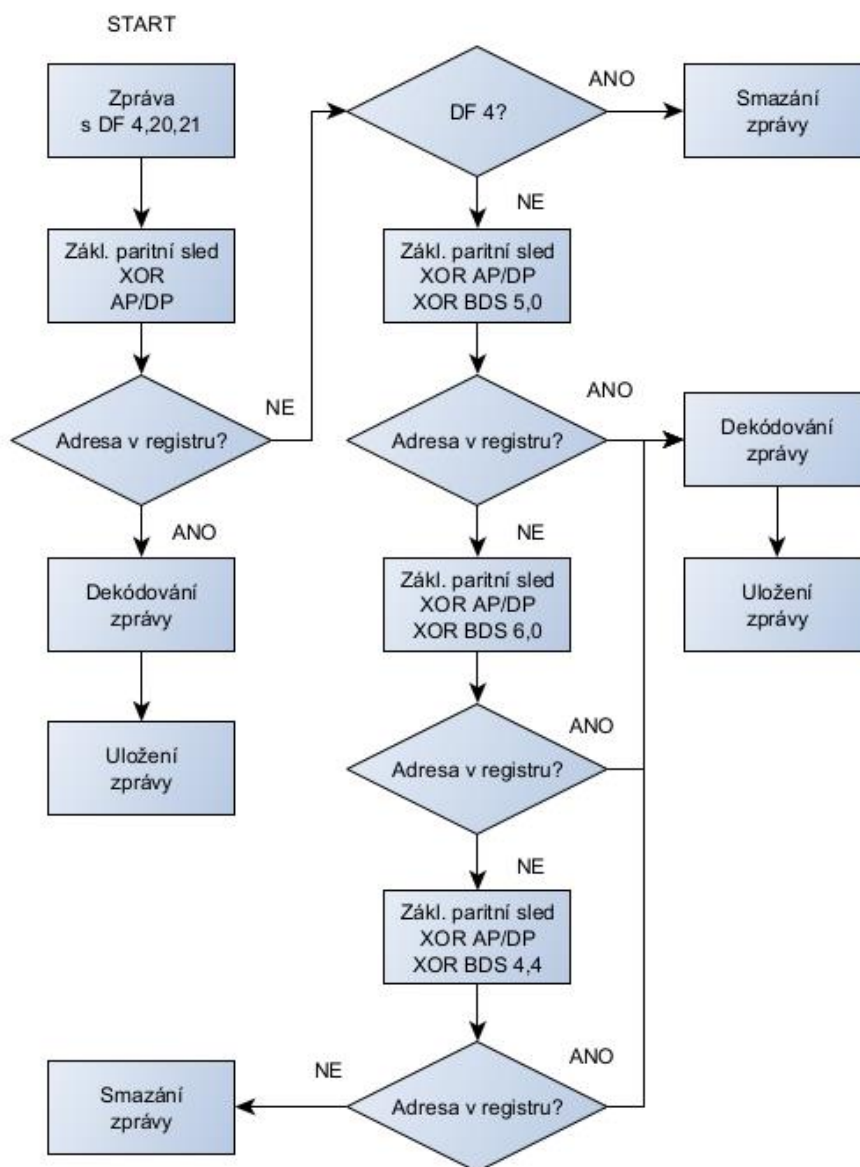


může dynamicky měnit s polohou sondy a prostor je po určenou dobu vypočítáván z obdržených poloh sondy.

Účelem filtračního procesu je z příchozích zpráv módu S selektovat pouze zprávy S DF 4, 17, 20 nebo 21, patřící ICAO adrese letadla, které se vyskytuje ve sledovaném prostoru. Po načtení zprávy je nutné provést test, zda blok zprávy módu S má velikost 56 nebo 112 bitů, v kladném případě by měl být dále proveden test sledu prvních 5 bitů bloku zprávy módu S (pole DF), zda obsahuje hodnotu 4, 17, 20 nebo 21, nevyhovující zprávy je nutné vyřadit z dalšího procesu filtrace.

Další průběh filtračního procesu je závislý na formátu DF přijaté zprávy, filtraci zpráv s DF 17 znázorňuje obrázek 15. U zpráv s DF 17 je nutné po kontrole bezchybně přijaté zprávy módu S určit hodnotu pole TC (38. – 39. bit bloku zprávy módu S). Pokud se jedná o TC 9 – 18 nebo 20 – 22, je z této zprávy dekódována poloha a otestováno, zda se poloha nachází ve stanoveném prostoru. V kladném případě je dále z pole AA dekódována ICAO adresa, jejíž hodnota je spolu s časovou značkou zapsána do registru vyhovujících adres, vybrané dekódované údaje mohou být uloženy do výstupní matice módu S spolu s datumovou a časovou značkou UTC a zpráva je uložena na úložiště. Jestliže dekódovaná poloha nesouhlasí a čas přijetí zprávy je pozdější než čas zprávy, ze které byla uložena ICAO adresa do registru vyhovujících adres, je z tohoto registru adresa odstraněna a zpráva se dále nezpracovává. Pokud se jedná o zprávy s TC 19, je z pole AA dekódována ICAO adresa a v případě, že je dekódovaná adresa obsažena v registru vyhovujících adres a zpráva má časovou značku pozdější než adresa v registru, jsou vybrané dekódované údaje spolu s datumovou a časovou značkou UTC uloženy do matice zpráv módu S a zpráva uložena v úložišti.

Filtrace zpráv s DF 4, DF 20 a DF 21 je znázorněna na obrázku 16. U zpráv s DF 4 je po kontrole bezchybně přijaté zprávy módu S výsledkem 24bitový sled představující možnou ICAO adresu. Pokud je získaná adresa díky přijaté zprávě s DF 17 obsažena v registru vyhovujících adres a čas přijetí zprávy pozdější než u zprávy, ze které byla adresa do registru uložena, vybrané dekódované údaje se uloží do matice zpráv módu S a zpráva se uloží v úložišti, v opačném případě se zpráva dále nezpracovává. U zpráv s DF 20 nebo DF 21 je po kontrole bezchybně přijaté zprávy módu S výsledkem rovněž 24bitový sled s možnou ICAO adresou.



Obrázek 16 Filtrace zpráv s DF 4, 20, 21

3.4.3 Dekódování zpráv s DF 4

Dekódování ICAO adresy tohoto formátu odpovědi je díky přenášenému poli adresní parity AP možné provést výpočtem základního paritního sledu z prvních 32 bitů zprávy, který se operací XOR kombinuje s 24bitovým sledem dekódovaným z pole AP (33. – 56. bit zprávy). Výsledkem je v případě neporušení zprávy existující ICAO adresa odpovídače.

Z pole AC, které se nachází na 20. – 32. bitu, je možné dekódovat tlakovou nadmořskou výšku. Tzv. M bit (26. bit zprávy) označuje jednotky, ve kterých je výška hlášena, v případě



hodnoty 0 tohoto bitu je výška hlášena ve stopách, pokud je tento bit roven 1, výška je hlášena v metrech. Pokud je M bit 0, na 28. bitu se nachází tzv. Q bit, označující krok ve hlášené výšce, pro Q = 0 je krok 100 ft a výška je kódována v souladu s odpověďmi módu C a začíná 20. bitem ve sledu C1, A1, C2, A2, C4, A4, M bit, B1, Q bit, B2, D2, B4, D4, toto kódování se používá pro tlakové nadmořské výšky nad 50187,5 ft. Pro Q = 1 je krok 25 ft.

Pokud M = 0 a Q = 1, je pole z bitů 20–25, 27, 29–32 dvojkově kódované pole s hodnotou 25 ft bitu nejnižšího významu, bit nejvyššího významu tohoto pole se nachází na 20. bitu. Výsledná hodnota dekódované nadmořské výšky h se vypočítá podle vztahu 3.1:

$$h = 25N - 1000, \quad (3.1)$$

kde N značí decimální vyjádření hodnoty dvojkového pole výše uvedených bitů v kladných celých číslech [45].

3.4.4 Dekódování zpráv s DF 17

U vysílání ADS–B prostřednictvím ES zpráv módu S je v poli IP přenášen přímo základní sled parity, pokud se provede výpočet základního sledu parity z prvních 88 bitů zprávy a operací XOR se kombinuje s dekódovanými bity z 24bitového pole IP (89. – 112. bit), musí být v případě neporušení zprávy výsledkem 24 nulových bitů. ICAO adresa je přenášena přímo v 24bitovém poli AA (9. – 32. bit).

Další pole ES zprávy, které je nutné dekódovat, je 56bitové pole ME (33. – 88. bit), ve kterém se přenáší vlastní ADS–B informace. Proces dekódování ES zprávy ovlivňuje obsah dekódovaného pole TC (33. – 37. bit) a pole SC (38. – 39. bit). V navrhovaném systému je uvažováno s dekódováním zpráv s TC 9 – 18 a 20 – 22, a zpráv s TC 19 [45, 46].

3.4.5 Dekódování výšky ze zpráv s DF 17

U zpráv s TC 9 – 18 se jedná o Airborne position zprávu s udáním barometrické nadmořské výšky ve ft na 41. – 52. bitu zprávy a dekóduje se podobně jako u zpráv s DF 4 s tím rozdílem, že se nepoužívá bit M, tzn., že 48. bit je Q bit, který určuje způsob dekódování výšky. Pokud Q = 1, použije se pro výpočet výšky ze zbývajících 11 bitů sledu stejný vztah 3.1 s krokem 25 ft, při Q = 0 se použije stanovení výšky dle specifikace pro hlášení výšky v módu C se sledem C1, A1, C2, A2, C4, A4, B1, Q bit, B2, D2, B4, D4 a s krokem 100 ft.



V případě zpráv s TC 20 – 22 se jedná o Airborne position zprávu s udáním GNSS výšky nad povrchem elipsoidu, definovaným WGS84. Sled 12 bitů reprezentuje decimální hodnotu výšky v metrech, nejvýznamnější bit se nachází na 41. bitu. Takto udaná výška se používá v případě nedostupnosti barometrické výšky [45, 46].

3.4.6 Dekódování polohy ze zpráv s DF 17

Zprávy s TC 9 – 18 a TC 20 – 22 obsahují na 55. – 71. bitu informaci o zeměpisné šířce, na 72. – 88. bitu informaci o zeměpisné délce. Tyto informace jsou však přenášeny v CPR formátu a je nutné je převést na skutečnou zeměpisnou šířku a délku. Koncept CPR se používá z důvodu snížení počtu bitů nutných k přenášení polohy a rozděluje povrch Země na 15 zón zeměpisné šířky na každé polokouli a až 59 zón zeměpisné délky v závislosti na zeměpisné šířce, přičemž rozměry příslušných zón se liší v lichém a sudém formátu CPR kódování. Typ formátu CPR určuje 54. bit, pokud je jeho hodnota 0, jedná se o tzv. lichý formát CPR, hodnota 1 znamená tzv. sudý formát CPR. Kombinací dvou po sobě jdoucích zpráv s lichým a sudým kódováním pocházejících z jedné zóny lze zjistit globálně nezaměnitelnou polohu. Z jedné dekódované zprávy a znalosti referenční polohy lze zjistit lokálně nezaměnitelnou polohu. Jako referenční polohu je možné uvažovat polohu přijímače módu S, protože je předpokládán sběr dat z letadel ve vzdálenosti od přijímače menší, než je polovina z minimální vzdálenosti (360 NM) možných poloh dekódovaných z jedné zprávy při lokálně nezaměnitelné poloze. V navrhovaném systému je tedy uvažováno jen s dekódováním lokálně nezaměnitelné polohy. Pro dekódování zeměpisné šířky je nutné nejprve provést výpočet velikosti zóny zeměpisné šířky (velikost zóny ve směru sever – jih) $Dlat_i$ podle vztahu 3.2:

$$Dlat_i = \frac{360^\circ}{4 \cdot NZ - i}, \quad (3.2)$$

kde NZ značí počet zón zeměpisné šířky (15) a i značí lichý (0) nebo sudý (1) formát CPR formátu z 54. bitu zprávy. Následuje výpočet parametru j (index zóny zeměpisné šířky) podle vztahu 3.3:

$$j = \text{floor}\left(\frac{lat_s}{Dlat_i}\right) + \text{floor}\left(\frac{1}{2} + \frac{\text{MOD}(lat_s, Dlat_i)}{Dlat_i} - \frac{YZ_i}{2^{Nb}}\right), \quad (3.3)$$



kde funkce $\text{floor}(x)$ značí zaokrouhlení hodnoty proměnné x na nejbližší celé číslo dolů, lat_s značí zeměpisnou šířku referenční polohy, funkce $\text{MOD}(x, y)$ značí zbytek po dělení proměnné x proměnnou y (v případě záporných x zbytek po dělení $x + 360^\circ$ proměnnou y), YZ_i značí decimální hodnotu kódované zeměpisné šířky v 17bitovém sledu 55. – 71. bitu zprávy a N_b značí počet bitů použitých ke kódování zeměpisné šířky (17). Výsledná dekódovaná zeměpisná šířka $Rlat_i$ je pak dána vztahem (3.4):

$$Rlat_i = Dlat_i \cdot \left(j + \frac{YZ_i}{2^{N_b}} \right). \quad (3.4)$$

V případě dekódování zeměpisné délky je nejprve nutné vypočítat parametr NL (index zóny zeměpisné délky) podle vztahu 3.5:

$$NL(Rlat_i) = \text{floor} \left(2\pi \cdot \left[\arccos \left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180^\circ} |Rlat_i|\right)} \right) \right]^{-1} \right), \quad (3.5)$$

přičemž platí, že $NZ = 15$ a pro zeměpisné šířky blízko rovníku a pólů jsou dány následující hodnoty NL:

- pro $Rlat = 0^\circ$; $NL = 59$,
- pro $Rlat = \pm 87^\circ$; $NL = 2$,
- pro $Rlat > 87^\circ$; $NL = 1$,
- pro $Rlat < -87^\circ$; $NL = 1$.

Velikost zóny zeměpisné délky (velikost ve směru východ – západ) $Dlon_i$ je pak dána vztahy 3.6 a 3.7:

$$Dlon_i = \frac{90^\circ}{NL(Rlat_i) - i} \quad \text{pro } NL(Rlat_i) - i > 0, \quad (3.6)$$

$$Dlon_i = 90^\circ \quad \text{pro } NL(Rlat_i) - i = 0. \quad (3.7)$$



Následně je nutné vypočítat parametr m dle vztahu 3.8:

$$m = \text{floor}\left(\frac{\text{lon}_s}{D\text{lon}_i}\right) + \text{floor}\left(\frac{1}{2} + \frac{\text{MOD}(\text{lon}_s, D\text{lon}_i)}{D\text{lon}_i} - \frac{XZ_i}{2^{Nb}}\right), \quad (3.8)$$

kde XZ_i značí decimální hodnotu kódované zeměpisné délky v 17bitovém sledu 72. – 88. bitu zprávy, $Nb = 17$.

Výsledná dekódovaná zeměpisná délka $R\text{lon}_i$ je pak dána vztahem 3.9:

$$R\text{lon}_i = D\text{lon}_i \cdot \left(m + \frac{XZ_i}{2^{17}}\right), \quad (3.9)$$

kde proměnné $D\text{lon}_i$, m a XZ_i jsou známé z předchozích vztahů [45, 46].

3.4.7 Dekódování zpráv s DF 17 a TC 19

Zprávy Airborne velocity s TC 19 (33. – 37. bit) obsahují v závislosti na hodnotě pole SC (Subtype Code, 38. – 39. bit) informace o rychlosti vzhledem k zemi GS u SC 1 a 2, nebo v případě nedostupnosti těchto informací obsahují u SC 3 a 4 informace o vzdušné rychlosti (IAS nebo TAS) a magnetickém směru. SC 1 a 3 je určen pro podzvuková letadla s hodnotou nejméně významného bitu 1 ft, SC 2 a 4 je určen pro nadzvuková letadla s hodnotou nejméně významného bitu 4 ft. Dále je možné u zpráv s SC 1 – 4 dekódovat vertikální rychlost, u zpráv s SC 1 a 2 rozdíl GNSS a tlakové výšky, u zpráv s SC 3 a 4 pak geometrický rozdíl výšky od barometrické výšky.

U zpráv s SC 1 a 2 je rychlost vzhledem k zemi přenášena po jednotlivých složkách východ–západ (47. – 56. bit) a sever–jih (58. – 67. bit), 46. bit označuje směr ve východozápadní složce (0 značí na východ, 1 značí na západ), 57. bit označuje směr v severojižní složce (0 značí na sever, 1 značí na západ). Výslednou rychlost vzhledem k zemi je možné určit podle vztahu 3.10, kde V_x a V_y jsou rychlosti jednotlivých složek:

$$V_{GS} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (3.10)$$



Všechny zprávy s TC 19 přenášejí na 70. – 78. bitu informaci o vertikální rychlosti, 69. bit udává, zda se jedná o stoupání (0) nebo klesání (1).

Ze zpráv s TC 19 a SC 1 a 2 je možné dekódovat rozdíl GNSS od barometrické výšky ze sledu 82. – 88. bitu. Nejméně významný bit sledu má hodnotu 25 ft, 81. bit udává kladnou či zápornou hodnotu sledu.

Zprávy s SC 3 a 4 přenášejí na 47. – 56. bitu informaci o magnetickém směru, nejméně významný bit představuje hodnotu 360/1024 stupně, dostupnost informace značí 46. stavový bit (0 není k dispozici, 1 je k dispozici).

Zprávy s SC 3 a 4 přenášejí na 58. – 67. bitu informaci o vzdušné rychlosti, nejméně významný bit v případě zprávy s SC 3 představuje 1 ft, v případě zprávy s SC 4 pak představuje 4 ft, 57. bit udává, zda se jedná o rychlost IAS (0) nebo TAS (1) [45, 46].

3.4.8 Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21

Zprávy módu S s DF 20 a DF 21 mají podobnou strukturu, liší se pouze na 20. – 32. bitu, kde je v případě zpráv s DF 20 v poli AC přenášena tlaková nadmořská výška a v případě zpráv s DF 21 v poli ID identifikace letadla. V navrhovaném systému je uvažováno pouze dekódování výšky z pole AC, které se provádí shodně jako u zpráv s DF 4. Dále je uvažováno s dekódováním těch zpráv s DF 20 nebo DF 21, které v poli MB (33. – 88. bit zprávy) přenáší jeden z BDS registrů BDS 50_{hex}, BDS 60_{hex}, nebo meteorologický registr BDS 44_{hex}.

U zpráv módu S s DF 20 nebo DF 21 je jako ochrana proti chybám používána adresní nebo datová parita v závislosti na schopnostech odpovídače. Pokud se provede výpočet základního sledu parity z prvních 88 bitů zprávy a operací XOR se kombinuje se sledem z 24bitového pole AP/DP (89. – 112. bit), může být výsledkem známá ICAO adresa vzhledem k zájmovému prostoru a pak byla použita adresní parita a je možné rozhodnout o neporušení zprávy a tuto zprávu dále dekódovat. Pokud je výsledkem neznámá ICAO adresa, může se jednat o poškozenou zprávu s použitou adresní paritou, nebo o zprávu s použitou datovou paritou, ve druhém případě je pak výsledkem XOR kombinace vypočítaného základního sledu parity se sledem pole AP/DP modifikovaná ICAO adresa, která je XOR kombinací 8 bitů nejnižšího významu ICAO adresy s 4bitovými kódy BDS1 a BDS2. Jestliže se u zpráv s neznámou ICAO adresou na tuto adresu postupně XOR operací aplikuje 8bitový BDS kód registrů BDS 50_{hex}, BDS 60_{hex} a 44_{hex} a ani v jednom



případě stále není adresa známá, je možné zprávu považovat za poškozenou nebo přenáší obsah jiného registru než registrů uvedených výše, v obou případech lze zprávu vyřadit z dalšího procesu dekódování. Pokud je po aplikaci některého BDS kódu ICAO adresa známá, lze tuto zprávu dekódovat přímo dle bitové struktury příslušného registru. U zpráv s použitou adresní paritou je nutné použít heuristický algoritmus stanovení BDS kódu (resp. dekódování pole MB), založeným na znalosti vyhrazených a stavových bitů v jednotlivých registrech a na porovnávání dekódovaných hodnot vzhledem k rozsahu hodnot jednotlivých parametrů nebo vzhledem k informacím získaných z jiných typů zpráv patřících k téže ICAO adrese. Algoritmus pro identifikaci BDS kódů u zpráv s použitou adresní paritou, uvedený v kapitole 3.4.10, vychází z poznatků obsažených v [53] a [54].

3.4.9 Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21 s datovou paritou

Pokud je při filtračním procesu a ověřování neporušení zprávy zjištěno použití datové parity, je možné pole MB těchto zpráv dekódovat přímo dle bitové struktury příslušných registrů. V této části práce je uvedeno dekódování vybraných parametrů registrů BDS 50_{hex}, BDS 60_{hex} a BDS 44_{hex}.

U zpráv s kódem BDS 50_{hex} je možné dekódovat úhel náklonu RA, pravý traťový úhel TTA, rychlost vůči zemi GS, rychlost změny traťového úhlu TAR a pravou vzdušnou rychlost TAS.

TTA je obsažen ve sledu 46. – 55. bitu zprávy, nejméně významný bit má hodnotu 90/512°. Pro vyjádření záporných čísel se používá dvojkový doplňkový kód, což je u záporných hodnot indikováno přetečením do 45. bitu (0 kladné hodnoty, 1 záporné).

GS je obsažena ve sledu 57. – 66. bitu zprávy, nejméně významný bit představuje hodnotu 1024/512 kt. TAS je obsažena ve sledu 79. – 88. bitu zprávy, nejméně významný bit představuje hodnotu 2 kt.

U zpráv s kódem BDS 60_{hex} je možné dekódovat magnetický směr HDG, indikovanou vzdušnou rychlost IAS a Machovo číslo MACH, rychlost změny barometrické výšky BAR a inerciální vertikální rychlost IVV.

HDG je obsažen ve sledu 35. – 44. bitu zprávy, nejméně významný bit má hodnotu 90/512°. Pro vyjádření záporných čísel se používá dvojkový doplňkový kód, což je u záporných hodnot indikováno přetečením do 34. bitu (0 kladné hodnoty, 1 záporné).



IAS je obsažena ve sledu 46. – 55. bitu zprávy, nejméně významný bit představuje hodnotu 1 kt. Výslednou rychlost IAS představuje decimální vyjádření tohoto sledu.

Machovo číslo je obsaženo ve sledu 57. – 66. bitu zprávy, nejméně významný bit má hodnotu 2,048/512.

U zpráv přenášejících obsah registru MRAR s kódem BDS 44_{hex} je možné dekódovat zdroj informací FOM, rychlost větru WS, směr větru WD, statickou teplotu SAT, průměrný statický tlak ASP, výskyt turbulencí a relativní vlhkost vzduchu HREL, FOM je obsažen v 33. – 36. bitu zprávy.

Rychlost větru WS je obsažena ve sledu 38. – 46. bitu zprávy, nejméně významný bit představuje hodnotu 1 kt. Výslednou rychlost větru představuje decimální vyjádření tohoto sledu. Směr větru je obsažen ve sledu 47. – 55. bitu zprávy, nejméně významný bit představuje hodnotu 180/256°.

Statická teplota vzduchu SAT je obsažena ve sledu 57. – 66. bitu zprávy, nejméně významný bit má hodnotu 0,25°C. Je použit dvojkový doplňkový kód, což je u záporných hodnot indikováno přetečením do 56. bitu (0 kladné hodnoty, 1 záporné).

Průměrný statický tlak ASP je obsažen ve sledu 68. – 78. bitu zprávy s hodnotou nejméně významného bitu 1 hPa, výsledný průměrný statický tlak tedy představuje decimální vyjádření uvedeného sledu. Výskyt turbulencí je obsažen ve sledu 80. – 81. bitu zprávy.

Vlhkost vzduchu je obsažena ve sledu 83. – 88. bitu zprávy s hodnotou nejméně významného bitu 100/64 % [45, 46].

Pozn.: Ve druhém vydání dokumentu ICAO 9871 z roku 2012 jsou uvedeny plánované podoby meteorologických registrů s BDS kódy BDS 44_{hex} a BDS 45_{hex}.

3.4.10 Dekódování zpráv s DF 20 a DF 21 s adresní paritou

Při dekódování těchto zpráv je nutné použít heuristický algoritmus, který využívá ke stanovení obsahu pole MB rozdíly v bitové struktuře běžně přenášených registrů (vyhrazené bity – jejich hodnota musí být 0, stavové bity – pokud je jejich hodnota 0, musí mít hodnotu 0 i příslušný sled bitů za stavovým bitem), testování dekódovaných hodnot vzhledem k jejich předpokládanému fyzickému rozsahu, porovnávání hodnot podobných parametrů a validace dekódovaných hodnot hodnotami z ADS–B zpráv. V uvedeném následujícím postupu je



předpokládáno finální dekódování pouze zpráv přenášející registry BDS 44_{hex} BDS 50_{hex} a BDS 60_{hex}, zprávy přenášející jiný registr jsou nepotřebné. Bitová a hodnotová pravidla jednotlivých BDS registrů jsou uvedena v tabulkách 13 až 20, tabulky byly sestaveny na základě informací obsažených v [45, 46, 53, 54].

Tabulka 13 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS10_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 10 _{hex}
1–8	Decimální hodnota musí být 16
10–14	Vyhrazené bity, bity musí být nastaveny na 0
17–23	Decimální hodnota může být jen 0;3;4;5
29–32	Bity musí být nastaveny na 0
33	Bit musí být nastaven na 1
35	Bit musí být nastaven na 1

Tabulka 14 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 17_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 17 _{hex}
7	Bit musí být nastaven na 1
29–56	Vyhrazené bity, bity musí být nastaveny na 0

Tabulka 15 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 20_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 20 _{hex}
1–8	Decimální hodnota = 32
9–14	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
15–20	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
21–26	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
27–32	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
33–38	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
39–44	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
45–50	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64



51–56	Nesmí obsahovat decimální hodnotu 0;27–31;33–47;58–64
-------	---

Tabulka 16 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 30_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 30 _{hex}
1–8	Decimální hodnota = 48
29–30	Decimální hodnota ≠ 3
29–30	Jestliže decimální hodnota 1, pak bity 55–56 musí být 0
9+28	Jestliže decimální hodnota 1;2;3, pak bity 16–22 musí být 0
9+28	Jestliže decimální hodnota 0, pak bity 10–22 musí být 0

Tabulka 17 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 40_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 40 _{hex}
1	Statusový bit, pokud je 0: bity 2–13 musí být 0
14	Statusový bit, pokud je 0: bity 15–26 musí být 0
27	Statusový bit, pokud je 0: bity 28–39 musí být 0
40–47	Vyhrazené bity, bity musí být nastaveny na 0
48	Statusový bit, pokud je 0: bity 49–51 musí být 0
52–53	Vyhrazené bity, bity musí být nastaveny na 0
54	Statusový bit, pokud je 0: bity 55–56 musí být 0

Tabulka 18 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 50_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 50 _{hex}
1	Statusový bit, pokud je 0: bity 2–11 musí být 0
2–11	Dekódovaná hodnota v intervalu (–45;45)
12	Statusový bit, pokud je 0: bity 13–23 musí být 0
24	Statusový bit, pokud je 0: bity 25–34 musí být 0
25–34	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;660)



35	Statusový bit, pokud je 0: bity 36–45 musí být 0
36–45	Dekódovaná hodnota v intervalu (–10;10)
46	Statusový bit, pokud je 0: bity 47–56 musí být 0
47–56	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;660)

Tabulka 19 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 60_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 60 _{hex}
1	Statusový bit, pokud je 0: bity 2–11 musí být 0
13	Statusový bit, pokud je 0: bity 14–23 musí být 0
14–23	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;660)
24	Statusový bit, pokud je 0: bity 25–34 musí být 0
25–34	Dekódovaná hodnota v intervalu (0,1)
35	Statusový bit, pokud je 0: bity 36–45 musí být 0
36–45	Dekódovaná hodnota v intervalu (–5000;5000)
46	Statusový bit, pokud je roven 0: bity 47–56 musí být 0
47–56	Dekódovaná hodnota v intervalu (–5000;5000)

Tabulka 20 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 44_{hex}

Bit č. pole MB	BDS 44 _{hex}
1–4	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;4)
5	Statusový bit, pokud je roven 0: bity 6–23 musí být 0
6–14	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;200)
24	Statusový bit, pokud je roven 0: bity 25–34 musí být 0
25–34	Dekódovaná hodnota v intervalu (–80;60)
35	Statusový bit, pokud je roven 0: bity 36–46 musí být 0
36–46	Dekódovaná hodnota v intervalu (0;1100)
47	Statusový bit, pokud je roven 0: bity 48–49 musí být 0



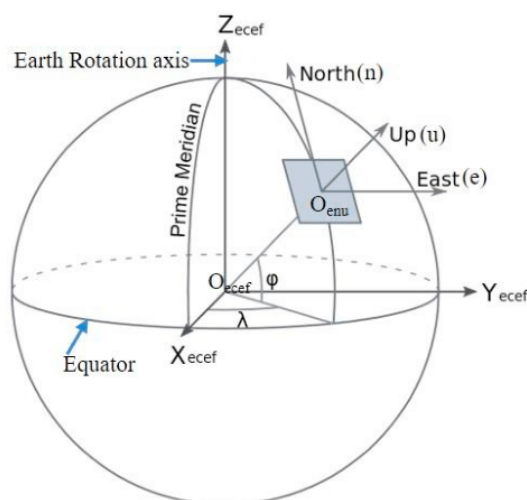
V úvodní fázi dekódování zprávy je vhodné provést test prvních 8 bitů pole MB, zda neobsahuje BDS kódy 10_{hex} , 20_{hex} a 30_{hex} . V kladném případě je zpráva dále testována podle bitových a hodnotových pravidel pro příslušný registr, a pokud příslušnému registru vyhovuje ve všech podmínkách, považuje se test za dostatečný a zpráva je smazána. Pokud všem bitovým a hodnotovým pravidlům nevyhovuje, je nutné zprávu dále otestovat na BDS registry $BDS\ 17_{\text{hex}}$ a $BDS\ 44_{\text{hex}}$, $BDS\ 45_{\text{hex}}$ není uvažován, registry $BDS\ 40_{\text{hex}}$, $BDS\ 50_{\text{hex}}$ a $BDS\ 60_{\text{hex}}$ nemohou obsahovat v prvních 8 bitech BDS kódy 10_{hex} , 20_{hex} a 30_{hex} . V případě, že zpráva vyhovuje pouze jednomu z registrů $BDS\ 17_{\text{hex}}$ nebo $BDS\ 44_{\text{hex}}$, dekóduje se jen zpráva patřící registru $BDS\ 44_{\text{hex}}$. V případě možnosti obou registrů je jako výsledný registr určen $BDS\ 44_{\text{hex}}$, protože se nepředpokládá výskyt registru $BDS\ 17_{\text{hex}}$ s prvními dvěma bity obsahujícími nuly, což je v souladu se zjištěními z provedené analýzy reálných přehledových dat uvedenými v [53]. Jestliže zpráva nevyhovuje ani jednomu z výše uvedených registrů, může být smazána.

Pokud zprávy v poli MB neobsahují v prvních 8 bitech BDS kódy 10_{hex} , 20_{hex} a 30_{hex} , je nutné tyto zprávy otestovat dle bitových a hodnotových pravidel pro všechny zbývající registry. Jestliže testovaná zpráva bitovými a hodnotovými pravidly vyhovuje právě jednomu BDS registru, je v případě registrů $BDS\ 44_{\text{hex}}$, $BDS\ 50_{\text{hex}}$ a $BDS\ 60_{\text{hex}}$ dekódována a v případě jiných registrů smazána, v případě, že nevyhoví ani jednomu registru je zpráva rovněž smazána. Jestliže testovaná zpráva vyhovuje podmínkám registrů $BDS\ 17_{\text{hex}}$ a $BDS\ 44_{\text{hex}}$, je v souladu se zjištěními z provedené analýzy reálných přehledových dat uvedenými v [53] rozhodnuto o dekódování zprávy podle registru $BDS\ 44_{\text{hex}}$. Pokud testovaná zpráva vyhovuje podmínkám registru $BDS\ 50_{\text{hex}}$ nebo $BDS\ 60_{\text{hex}}$ a zároveň některému z ostatních registrů, je nutné potvrdit příslušnost ke zmíněným registrům dodatečným testem. Registr $BDS\ 50_{\text{hex}}$ je možné potvrdit porovnáním dekódovaných hodnot rychlosti vůči zemi GS s pravou vzdušnou rychlostí TAS, stanovených podle vztahů uvedených v předchozí kapitole (rychlosti by se neměly lišit o více jak 200 kt), nebo porovnáním dekódované hodnoty GS a pravého traťového úhlu TTA s dekódovanou hodnotou GS a vypočítanou hodnotou úhlu z rychlostních složek z časově nejbližší ADS–B zprávy. Registr $BDS\ 60_{\text{hex}}$ lze v případě zprávy s DF 20 potvrdit porovnáním dekódovaných hodnot indikované vzdušné rychlosti IAS s kalibrovanou vzdušnou rychlostí CAS, stanovenou z dekódované hodnoty MACH a dekódované barometrické výšky z pole AC za podmínek ISA, rozdíl by neměl překročit 15

kt. V případě zpráv s DF 21 je možné registr BDS 60_{hex} potvrdit porovnáním hodnot IAS a HDG s odpovídajícími hodnotami ze zpráv ADS-B, pokud jsou k dispozici. Jestliže se nepodaří potvrdit příslušnost k registru BDS 50_{hex} nebo BDS 60_{hex}, může být zpráva smazána, pokud zároveň vyhovovala registru BDS 44_{hex}, je dle něj dekódována. V případech, kdy testovaná zpráva vyhovuje jiným kombinacím možných dvou BDS registrů nebo více než dvěma BDS registrům, měla by být zpráva pro účely navrhovaného systému považována za nerozpoznanou a měla by být smazána [45, 46, 53, 54].

3.4.11 Řízení polohy kamery

Poloha aerologické sondy je dekódována ze zpráv v souřadném systému ECEF a je potřeba provést transformaci souřadnic sondy do systému ENU za účelem výpočtu nastavení potřebného elevačního a horizontálního úhlu kamery. Vztah mezi oběma souřadnými systémy znázorňuje obrázek 17.



Obrázek 17 Vztah souřadných systémů ECEF a ENU [52]

Výpočet souřadnic S_e , S_n , S_u polohy sondy v souřadném systému ENU ze souřadného systému ECEF je dán vztahem 3.11:

$$\begin{bmatrix} S_e \\ S_n \\ S_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi\cos\lambda & \cos\phi\sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x - K_x \\ S_y - K_y \\ S_z - K_z \end{bmatrix},$$

(3.11)



kde λ značí zeměpisnou délku stanoviště kamery (počátku souřadného systému ENU), ϕ značí zeměpisnou šířku stanoviště kamery, souřadnice S_x, S_y, S_z náleží dekódované poloze sondy v souřadném systému ECEF a souřadnice K_x, K_y, K_z náleží souřadnicím stanoviště kamery v souřadném systému ECEF [52].

Vzdálenost D dvou bodů $A[a_e, a_n, a_u]$ a $B[b_e, b_n, b_u]$ v prostoru, popsaném souřadným systémem ENU, je dána vztahem 3.12:

$$D = \sqrt{(b_e - a_e)^2 + (b_n - a_n)^2 + (b_u - a_u)^2}, \quad (3.12)$$

Při ztotožnění bodu A s počátkem souřadného systému ENU (stanovištěm kamery) a bodu B s polohou sondy, získanou ze vztahu 3.11, je vzdálenost D_{sk} sondy od kamery dána vztahem 3.13:

$$D_{sk} = \sqrt{S_e^2 + S_n^2 + S_u^2}. \quad (3.13)$$

Jestliže je známa vzdálenost D_{sk} , je možné ze vztahu 3.14 vypočítat elevační úhel α [°], svírající podélnou osu objektivu kamery s rovinou danou osami E, N systému ENU:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{S_u}{D_{sk}}\right); D_{sk} \neq 0. \quad (3.14)$$

Potřebný horizontální úhel β [°] natočení kamery (hodnota 0° je v souladu s orientací kladné části osy N) je možné získat použitím goniometrických funkcí ze souřadnic polohy sondy N a E souřadného systému ENU, pro kladné hodnoty souřadnic N i E platí vztah (3.15):

$$\beta = \arctg\left(\frac{S_e}{S_n}\right); S_n \neq 0, \quad (3.15)$$

pro záporné hodnoty souřadnic N a kladné hodnoty E platí vztah 3.16:



$$\beta = \arctg\left(\left|\frac{S_n}{S_e}\right|\right) + 90; S_e \neq 0, \quad (3.16)$$

pro záporné hodnoty souřadnic N i E platí vztah (3.17):

$$\beta = \arctg\left(\frac{S_e}{S_n}\right) + 180; S_n \neq 0, \quad (3.17)$$

a konečně pro kladné hodnoty souřadnic N a záporné hodnoty E platí vztah (3.18):

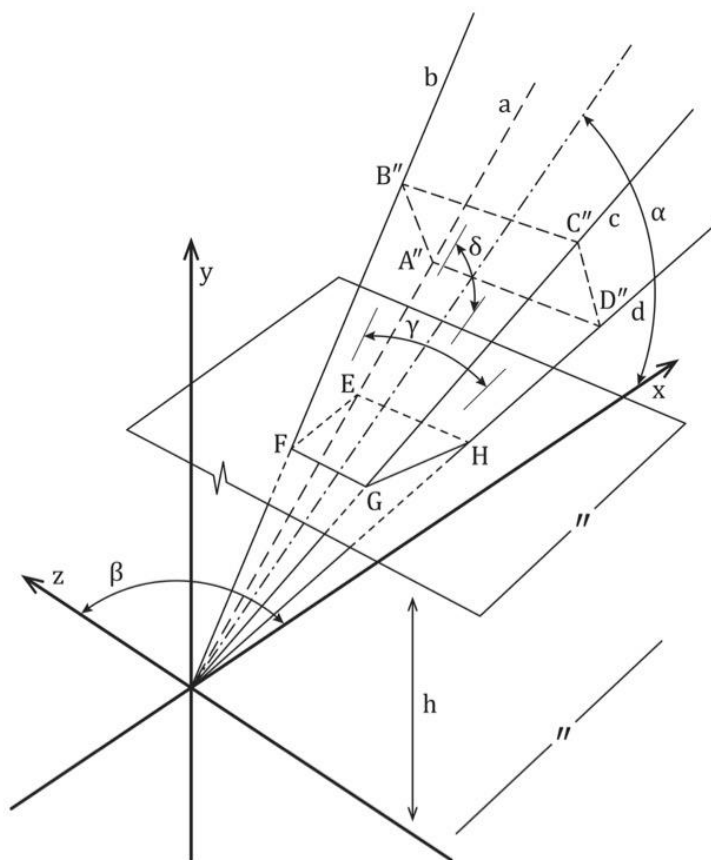
$$\beta = \arctg\left(\left|\frac{S_n}{S_e}\right|\right) + 270; S_e \neq 0. \quad (3.18)$$

Pro velikost úhlu $\alpha = 90^\circ$ platí, že hodnota pro úhel β je přebírána z poslední pozice sondy, ve které $\alpha \neq 90^\circ$.

Řízení ohniskové vzdálenosti objektivu kamery může být realizováno závislostí na vzdálenosti sondy od stanoviště kamery, čím blíže stanovišti kamery se sonda v požadované hladině nachází, tím menší je třeba nastavit ohniskovou vzdálenost. Konkrétní závislost jakož i rozsah ohniskových vzdáleností objektivu by bylo nutné stanovit praktickými zkouškami při realizaci systému.

3.4.12 Stanovení prostoru zabíraného kamerou

Ve zjednodušujícím přiblížení úlohy nalezení zeměpisných souřadnic vytyčujících prostor pro filtraci zpráv módu S (s dostatečnou přesností při zanedbání vlivu vnitřních optických vlastností objektivu, vlivu zakřivení Země a vlivu vzdálenosti soustavy čočka objektivu – snímací prvek od os souřadného systému) se jedná o úlohu nalezení průnikového obrazce jehlanu (o obdélníkové podstavě reprezentované horizontálním a vertikálním zorným úhlem s vrcholem orientovaným do ohniska objektivu kamery, tj. počátku souřadného systému kamery ENU, a podélnou osou jehlanu orientovanou do polohy sondy) s rovinou, představující zvolenou hladinu (např. hladina, ve které se aktuálně sonda nachází, střední hladina rozsahu hladin, ve kterých se tvoří kondenzační stopy, atd.), a to v závislosti na nastaveném směru a elevačním úhlu kamery a nastavené ohniskové vzdálenosti objektivu.



Obrázek 18 Řez prostoru zabíraného kamerou rovinou

Situace je znázorněna na obrázku 18, ve kterém osy x, y, z představují osy souřadného systému kamery ENU, body A'', B'', C'', D'' představují obrazy původních bodů A, B, C, D podstavy jehlanu v referenční poloze (podélná osa jehlanu v souhlasu s kladnou částí osy z , přičemž podstava jehlanu je v jednotkové vzdálenosti od počátku souřadné soustavy). Úhel α značí elevační úhel nastavení objektivu kamery od referenční polohy, úhel β značí horizontální úhel nastavení objektivu od referenční polohy, úhel γ značí horizontální zorný úhel objektivu a úhel δ značí vertikální zorný úhel objektivu. Polopřímky a, b, c, d tvoří v bodech A'', B'', C'', D'' směrové vektory hran jehlanu, přesunutého z referenční polohy nejdříve otočením okolo osy x o úhel α , a poté otočením okolo osy y o úhel β , na polopřímkách musí ležet hledané souřadnice bodů E, F, G, H , které jsou průsečíky přesunutého jehlanu s rovinou ve zvolené výšce h .



Souřadnice x, y, z bodů A, B, C, D v referenční poloze jsou dány goniometrickými funkcemi zorných úhlů v referenční vzdálenosti snímané scény jako jednosloupcové matice (vektory) a platí pro ně vztahy 3.19 až 3.22:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \\ -\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \\ \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \\ \delta \\ \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \\ -\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Souřadnice těchto bodů jsou dále transformovány otočením nejdříve okolo osy x , a poté okolo osy y pomocí vztahů 3.23 až 3.26:

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{TA}, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{B}'' = \mathbf{TB}, \quad (3.24)$$



$$\mathbf{C}'' = \mathbf{TC}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{D}'' = \mathbf{TD}, \quad (3.26)$$

kde $\mathbf{A}'', \mathbf{B}'', \mathbf{C}'', \mathbf{D}''$ jsou jednosloupcové matice souřadnic x, y, z transformovaných bodů A, B, C, D a \mathbf{T} je transformační matice získaná násobením transformační matice pro rotaci okolo osy x ve směru chodu hodinových ručiček transformační maticí pro rotaci okolo osy y ve směru chodu hodinových ručiček, přičemž pro transformační matici \mathbf{T} platí vztah 3.27:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\alpha \cdot \sin\beta & \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\beta & -\sin\alpha \cdot \cos\beta & \cos\alpha \cdot \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Jakmile jsou známy souřadnice bodů A'', B'', C'', D'' , je možné s pomocí parametrického vyjádření přímky v prostoru vyjádřit parametr jako podíl souřadnice y bodů E, F, G, H (tedy výška h , v níž se nachází řezná rovina) se souřadnicí y směrového vektoru pro příslušné přímky a, b, c, d , a vyjádřit zbylé souřadnice x, z pro body E, F, G, H , pro které platí vztahy 3.28 až 3.35:

$$E_x = \frac{h[-\cos\beta \cdot \operatorname{tg}_2^y + \sin\beta(\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \cos\alpha)]}{-\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \sin\alpha}, \quad (3.28)$$

$$E_z = \frac{h[\sin\beta \cdot \operatorname{tg}_2^y + \cos\beta(\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \cos\alpha)]}{-\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \sin\alpha}, \quad (3.29)$$

$$F_x = \frac{h[-\cos\beta \cdot \operatorname{tg}_2^y + \sin\beta(-\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \cos\alpha)]}{\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}_2^\delta + \sin\alpha}, \quad (3.30)$$



$$F_z = \frac{h[\sin\beta \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} + \cos\beta(-\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \cos\alpha)]}{\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \sin\alpha}, \quad (3.31)$$

$$G_x = \frac{h[\cos\beta \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} + \sin\beta(-\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \cos\alpha)]}{\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \sin\alpha}, \quad (3.32)$$

$$G_z = \frac{h[-\sin\beta \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} + \cos\beta(-\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \cos\alpha)]}{\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \sin\alpha}, \quad (3.33)$$

$$H_x = \frac{h[\cos\beta \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} + \sin\beta(\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \cos\alpha)]}{-\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \sin\alpha}, \quad (3.34)$$

$$H_z = \frac{h[-\sin\beta \cdot \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2} + \cos\beta(\sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \cos\alpha)]}{-\cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\delta}{2} + \sin\alpha}. \quad (3.35)$$

Uvedené vztahy platí pro úhel vertikálního nastavení kamery $\alpha > \frac{\delta}{2}$ [°] s tím, že je vhodné zavést omezení pro velikost směrového vektoru pro body E a H . Pokud by velikost vektoru byla větší než maximální velikost daná maximální vzdáleností, ve které je kondenzační stopy při dané ohniskové vzdálenosti možné pozorovat (případně omezením daným dosahem přijímače), pak je nutné souřadnice bodů E a H násobit parametrem, získaným jako podíl maximální pozorovací vzdálenosti s velikostí příslušného vektoru za vzniku bodů E' a H' , pro které platí vztahy 3.36 až 3.39:

$$E'_x = \frac{E_x \cdot m}{\sqrt{E_x^2 + h^2 + E_z^2}}, \quad (3.36)$$



$$E'_z = \frac{E_z \cdot m}{\sqrt{E_x^2 + h^2 + E_z^2}},$$

(3.37)

$$H'_x = \frac{H_x \cdot m}{\sqrt{H_x^2 + h^2 + H_z^2}},$$

(3.38)

$$H'_z = \frac{H_z \cdot m}{\sqrt{H_x^2 + h^2 + H_z^2}},$$

(3.39)

ve kterých m je omezení vzdálenosti dané maximální pozorovací vzdáleností při dané ohniskové vzdálenosti případně dané dosahem přijímače módu S. Pro vertikální úhly nastavení kamery $\alpha < \frac{\delta}{2}$ [°] platí, že souřadnice x, z bodů E' a H' jsou vždy dány následujícími vztahy 3.40 až 3.43:

$$E'_x = \frac{-E_x \cdot m}{\sqrt{E_x^2 + h^2 + E_z^2}},$$

(3.40)

$$E'_z = \frac{-E_z \cdot m}{\sqrt{E_x^2 + h^2 + E_z^2}},$$

(3.41)

$$H'_x = \frac{-H_x \cdot m}{\sqrt{H_x^2 + h^2 + H_z^2}},$$

(3.42)

$$H'_z = \frac{-H_z \cdot m}{\sqrt{H_x^2 + h^2 + H_z^2}}.$$

(3.43)



Pro velikost úhlu $\alpha = \frac{\delta}{2}$ [°] nelze souřadnice bodů E', H' tímto způsobem určit a musí být převzaty z okolních hodnot úhlu α .

Uvedeným postupem lze získat přibližné souřadnice bodů, vytyčujících prostor pro filtraci zpráv módu S v souřadném systému ENU, získané souřadnice poté musí být transformovány do souřadného systému WGS84.

3.5 Výstupní část

Výstupy navrhovaného systému tvoří dílčí matice informací získané systémem, z těchto matic je možné sestavit při analýze kamerových záznamů výslednou matici kondenzačních stop s přiřazenými dostupnými parametry. Celá výstupní část může být řešena jako databázový stroj kombinovaný s prohlížečem kamerových záznamů za účelem maximální automatizace přiřazování dat ke kondenzačním stopám. V základním modelu systému jsou uvažovány matice polohových dat radiosondy, matice filtrovaných zpráv módu S, matice meteorologických dat ze sondážního měření a výstupní matice kondenzačních stop.

3.5.1 Matice sondy RS 41 SG

V této matici jsou v jednotlivých řádcích uloženy dekodované zprávy sondy. Sloupce obsahují datum a UTC čas přijetí zprávy, dekodované parametry polohy sondy v souřadném systému ECEF a transformované hodnoty do ostatních potřebných souřadných systémů, ze kterých jsou vypočítány hodnoty vzdálenosti sondy od počátku souřadného systému pro řízení ohniskové vzdálenosti objektivu kamery a hodnot horizontálních a vertikálních úhlů, nutných pro nastavení kamery a výpočet prostoru pro filtraci zpráv módu S. Data je možné použít také k výpočtu šikmé vzdálenosti mezi polohou sondy a polohami letadel z dekodovaných zpráv módu S v příslušné výšce jako indikátor kvality měření.

3.5.2 Matice zpráv módu S

Matice obsahuje v jednotlivých řádcích záznamy ze zpráv módu S. Sloupce obsahují časovou značku UTC a vybrané dekodované parametry, tyto parametry je možné doplnit o vypočítané parametry teploty a tlaku. Výpočet teploty je nutné provádět z časově nejbližšího páru zpráv se stejnou ICAO adresou s BDS 50_{hex} (TAS) a BDS 60_{hex} (MACH), v případě tlaku je možné provést výpočet z každé zprávy přenášející výšku v kombinaci s vypočítanou teplotou. Postup výpočtu teploty a tlaku je uveden v [55].



3.5.3 Matice meteorologických dat

V této matici jsou v jednotlivých řádcích uloženy záznamy přijatých hodnot meteorologických prvků ze sondážního měření ČHMÚ, vztažené ke geopotenciální nadmořské výšce. Pro potřeby této práce je možné geopotenciální výšku považovat za výšku geometrickou, rozdíl mezi oběma výškami na území ČR činí ve výšce 10 km asi 10 m. Ve sloupcích matice jsou uloženy příslušné hodnoty tlaku, teploty, relativní vlhkosti vzhledem k vodě a směru a rychlosti větru pro jednotlivé udané výšky.

3.5.4 Matice kondenzačních stop

Ve výstupní matici jsou do jednotlivých řádků zaznamenávány objevené jednotlivé kondenzační stopy v kamerovém záznamu. Základní údaje o kondenzační stopě jsou čas zaznamenání UTC (zobrazovaný v záznamu) a doba trvání kondenzační stopy. Na základě zaznamenaného času vzniku stopy mohou být při analýze kamerových záznamů nabídnuty obsluze dostupné ICAO adresy spolu s údajem o vypočítaném směru pohybu v obraze, který lze na základě znalosti směřování kamery, vypočítaného prostoru pro filtraci zpráv módu S a zpráv módu S početně odhadnout. V případě, kdy se v prostoru pohybuje více letadel po stejné trajektorii, je možné rozhodovat na základě času vstupu do prostoru. Záznam ve výstupní matici lze po výběru vhodné ICAO adresy automaticky doplnit o vybrané údaje z časově nejbližších zpráv módu S s příslušnou ICAO adresou a podle tlaku spočítaného dle ISA pro barometricky udanou výšku ze zpráv módu S je možné automaticky doplnit meteorologické prvky z matice sondážního měření.

3.6 Sběr dat a jejich vyhodnocení

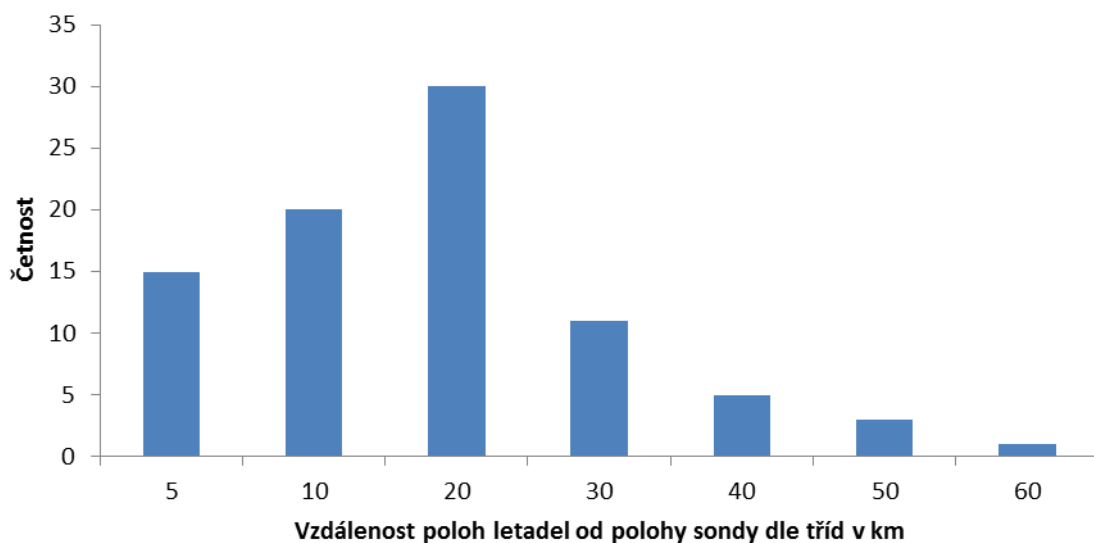
Za účelem získání dat pro ověření teorie vzniku kondenzačních stop a ověření koncepce navrhovaného systému bylo ve vybraných dnech s malou oblačností prováděno měření kondenzačních stop. Měření probíhalo v blízkosti stanoviště vypouštění aerologické sondy ČHMÚ vždy v době od vypuštění sondy do 13 h UTC, data o poloze sondy byla získávána pomocí webových stránek <https://s1.radiosondy.info>, data o poloze letadel pomocí aplikace Flightradar24. Fotoaparát byl průběžně nastavován na udávanou polohu sondy, při dosažení výšky 10 000 m sondou byl fotoaparát zafixován. Měření byly pouze stopy, které se nacházely ve snímaném obraze, záznam nebyl pořizován. Měření se uskutečnilo ve dnech 14. 1. 2022, 23. 3. 2022, 30. 8. 2022, 2. 9. 2022, 5. 9. 2022, 12. 9. 2022, 22. 9. 2022, 23. 9. 2022, 17. 10. 2022, 31. 10. 2022, 12. 11. 2022, 25. 11. 2022 a 9. 2. 2023, zaznamenáván byl čas UTC vzniku stopy, doba trvání stopy a případný jiný zánik stopy než rozpuštění, poloha,



barometrická výška a identifikace letadla, které stopu vytvořilo a zpětně pak byly doplněny údaje polohy sondy v příslušné výšce (bez ohledu na časový rozdíl) a meteorologická data ze sondážního měření ČHMÚ, získaná pomocí webových stránek <https://weather.uwyo.edu/upperair/bufrraob.shtml>, kde jsou k dispozici neřaděná data sondážních měření od roku 2018.

Nejvíce stop bylo zaznamenáno ve dnech, kdy se sonda pohybovala směrem VSV a JV, což koresponduje s využíváním vzdušného prostoru v okolí aerologické stanice. Nejméně stop, a to pouze jedna, byla zaznamenána dne 2. 9. 2022, kdy se v 10 000 m sonda nacházela téměř nad prostorem aerologické stanice, celkem bylo zaznamenáno 86 kondenzačních stop, z toho 10 stop, které trvaly déle jak 10 minut.

Ze získaných poloh letadel a poloh sondy v příslušné výšce byla určena jejich vzájemná vzdálenost. Minimální zaznamenaná vzdálenost byla 1,0 km, maximální zaznamenaná vzdálenost byla 52,6 km. Hodnota mediánu vzdáleností byla 12,05 km a hodnota horního kvartilu byla 18,75 km.



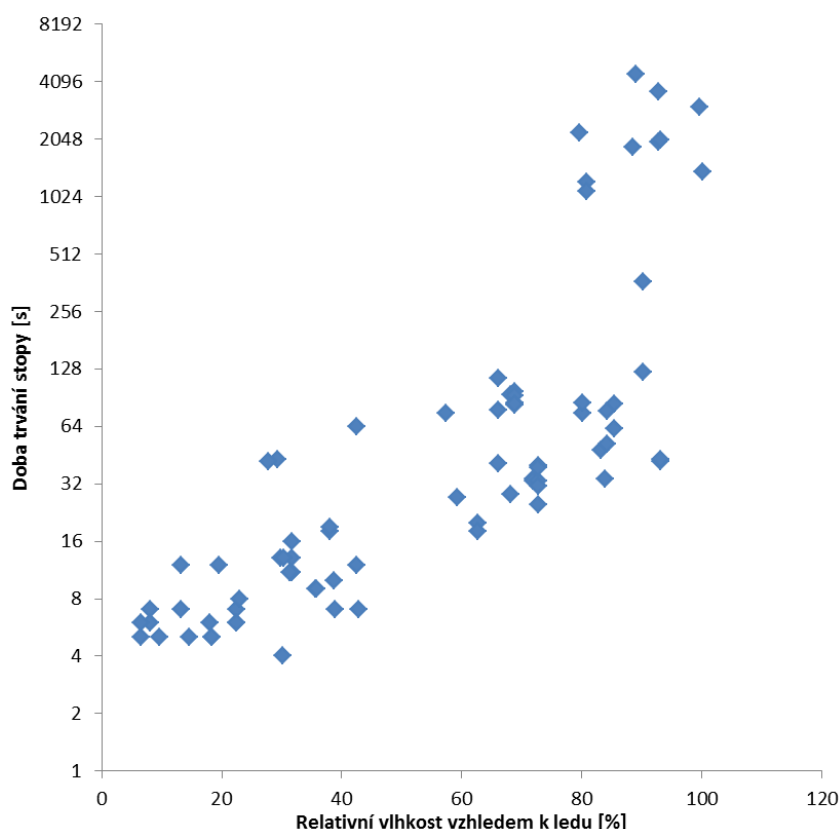
Graf 4 Histogram tříd vzdáleností

V grafu 4 je uveden histogram pro jednotlivé zvolené třídy zaznamenaných vzdáleností, na vodorovné ose jsou vyneseny vzdálenosti letadel od polohy sondy ve stejné výšce jednotlivých měření, na svislé ose četnosti vzdáleností, přičemž data jsou rozdělena do



vybraných tříd vzdáleností. Nejvíce výskytů připadá třídě 10–20 km. Vzhledem k stávajícímu systému sběru informací o kondenzačních stopách by tedy navrhovaný systém přinesl výrazné zlepšení ohledně vzdálenosti přiřazovaných dat z aerologické sondáže ke kondenzačním stopám, která u stávajícího systému činí nejméně asi 100 km.

Na datovém souboru byla rovněž zkoumána souvislost mezi relativní vlhkostí vzduchu vzhledem k ledu a délkou trvání naměřených kondenzačních stop. Protože výška, předávaná letadly je barometricky udaná na základě podmínek ISA atmosféry, byl spočítán tlak odpovídající těmto výškám a na základě jeho hodnoty byly přiřazeny naměřené hodnoty ostatních prvků z aerologického měření. Z datového souboru byly odstraněny záznamy, u kterých změřená stopa nevyhovovala Schmidt–Applemanovu kritériu nebo u nich nebylo možné stanovit přesně délku trvání z důvodu splynutí s ostatními stopami a zároveň ke splynutí došlo dříve než do 5 minut, a údaje relativní vlhkosti vzhledem k vodě byly pomocí Magnusova vztahu převedeny na relativní vlhkost vzhledem k ledu.



Graf 5 Závislost doby trvání stopy na relativní vlhkosti vzhledem k ledu

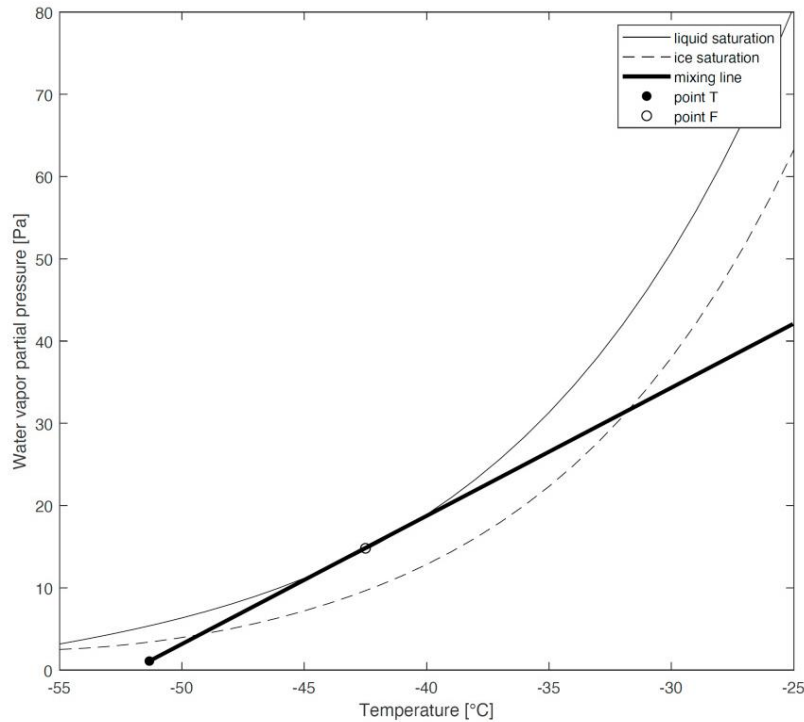


V grafu 5 je na horizontální ose relativní vlhkost vzhledem k ledu prostředí, v němž se kondenzační stopy vytvořily, na vertikální ose je doba trvání kondenzační stopy, svislá osa je pro větší názornost v logaritmické škále. Z grafu 5 je zřejmé, že pro krátkodobé kondenzační stopy trvající asi do 20 s byly typické relativní vlhkosti vzduchu vzhledem k ledu do přibližně 40 %, naopak dlouhodobé kondenzační stopy, trvající déle jak 10 minut, se tvořily výhradně při relativních vlhkostech větších než 80 %. Rozložení bodů v grafu při logaritmickém zobrazení osy doby trvání kondenzační stopy naznačuje exponenciální závislost délky trvání kondenzační stopy na relativní vlhkosti vzhledem k ledu, nicméně k přesnějšímu vyšetření závislosti by bylo třeba shromáždit větší vzorek dat zejména pro hodnoty relativní vlhkosti v rozmezí 50 % až 60 % a nad 80 %, a ideálně použít jen nejméně vzdálené kondenzační stopy od aerologické sondy v příslušné výšce. Veškeré naměřené parametry kondenzačních stop jsou uvedeny v příloze A.

3.6.1 Ověření dat Schmidt–Applemanovým kritériem

Základním poznatkem v teorii vzniku kondenzačních stop je nutnost dosažení hodnoty nasycení vzhledem k vodě ve směsi výfukových plynů a okolního vzduchu během procesu mísení, poznatek je znám jako Schmidt–Applemanovo kritérium. Toto kritérium je splněno, pokud není prahová teplota vyšší než teplota okolního prostředí.

Na grafu 6 je znázorněn průběh mísení výfukových plynů s okolním prostředím, na vodorovné ose je vynesena teplota a na svislé ose parciální tlak vodní páry, plná křivka znázorňuje závislost saturace vzhledem k vodě a čerchovaná křivka znázorňuje závislost saturace vzhledem k ledu. Sklon přímky mísení je dán teplotou a parciálním tlakem vodní páry okolního prostředí v plném bodu T a teplotou a parciálním tlakem výfukových plynů v bodě ležícím mimo graf. Graf představuje hraniční případ, kdy přímka mísení tvoří tečnu k saturační křivce vzhledem k vodě v bodě F, pokud se přímka mísení posune vlevo, stane se sečnou a v grafu vznikne oblast s přesycením vzhledem k vodě, během které v procesu mísení zkondenzované vodní kapky zmrznou, a kondenzační stopa se vytvoří, pokud se přímka mísení posune vpravo, nedojde během mísení ke kondenzaci a stopa se vytvořit nemůže. Teplota v bodě T tak představuje kritickou teplotu za daných podmínek, výpočet této teploty se skládá z dílčích výpočtů uvedených dále.



Graf 6 Fázový diagram mísení při kritické teplotě [56]

Nejdříve je nutné vypočítat sklon přímky mísení dle vztahu 3.44:

$$G = \frac{EI_{H_2O} p c_p}{\epsilon Q (1 - \eta)}, \quad (3.44)$$

kde G je sklon přímky mísení, EI_{H_2O} je emisní index vodní páry ve spalovaném palivu, p je tlak vzduchu [Pa], c_p je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, ϵ je poměr mezi molárními hmotnostmi vodní páry a suchého vzduchu (0,622), Q je spalné teplo paliva $43,2 \text{ MJkg}^{-1}$ a η je celková účinnost. U emisního indexu vodní páry byla při výpočtu použita hodnota 1,223 a u celkové účinnosti byla použita hodnota 0,35. Dalším krokem je výpočet teploty T_F v bodě F dle vztahu 3.45:

$$T_F = -44,46 + 9,43 \cdot \ln(G - 0,053) + 0,72 \cdot [\ln(G - 0,053)]^2. \quad (3.45)$$



Teplotu T_T v bodě T definuje vztah 3.46:

$$T_T = T_F - \frac{e_w(T_F) - U e_w(T_T)}{G}, \quad (3.46)$$

kde $e_w(T_F)$ je parciální tlak nasycené vodní páry vzhledem k vodě při teplotě T_F , U je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k vodě, $e_w(T_T)$ je parciální tlak nasycené vodní páry vzhledem k vodě při teplotě T_T a G je sklon přímky mísení.

Z tohoto vztahu však nelze teplotu T_T přímo vypočítat, protože je závislá na parciálním tlaku nasycené vodní páry vzhledem k vodě při vypočítávané teplotě T_T a musí být vypočtena pomocí iterativního výpočtu za použití Newtonovy metody tečen. Parciální tlak nasycené vodní páry vzhledem k vodě při teplotě T lze vyjádřit polynomicky jako funkci této teploty dle vztahu 3.47:

$$e_{sat}(T) = \sum_{i=0}^6 a_i T^i, \quad (3.47)$$

s koeficienty: $a_0 = 610,7799961$; $a_1 = 44,36518521$; $a_2 = 1,428945805$; $a_3 = 2,650648471 \times 10^{-2}$; $a_4 = 3,031240396 \times 10^{-4}$; $a_5 = 2,034080948 \times 10^{-6}$ a $a_6 = 6,136820929 \times 10^{-9}$. Po dosazení vztahu 3.47 do vztahu 3.46 a použití Newtonovy metody je výsledkem vztah 3.48:

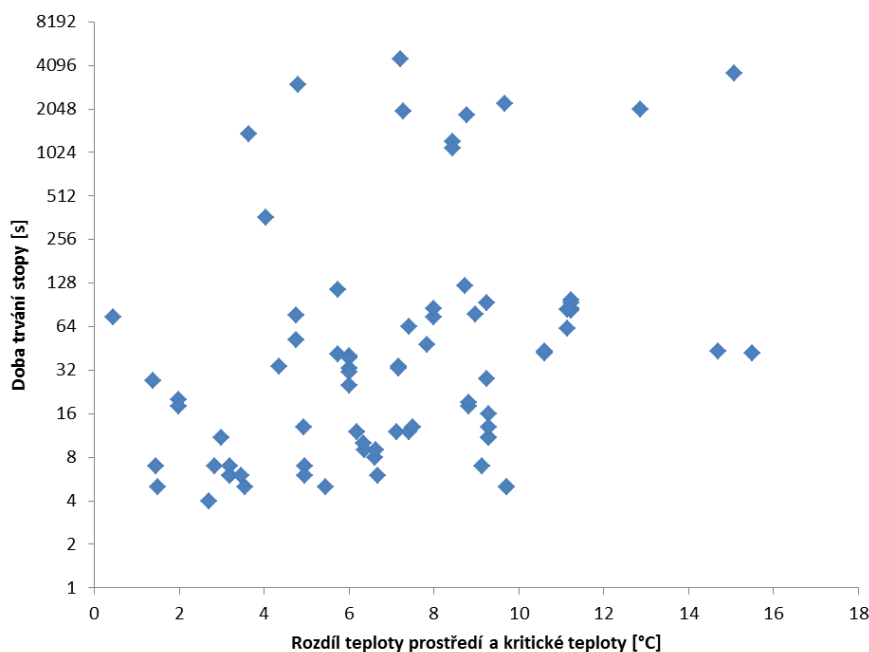
$$T_{T_{k+1}} = T_{T_k} - \frac{T_{T_k} - T_F + \frac{\sum_{i=0}^6 a_i T_F^i - U \sum_{i=0}^6 a_i T_{T_k}^i}{G}}{1 - \frac{U}{G} \sum_{i=0}^6 i \cdot a_i T_{T_k}^{i-1}}, \quad (3.48)$$

kde T_{T_k} představuje odhad hodnoty T_T z předchozí iterace a $T_{T_{k+1}}$ představuje odhad nový, pro získání konečného výsledku je potřeba provést několik iterací. Uvedený výpočet byl proveden u všech naměřených kondenzačních stop, hodnoty jsou uvedeny v příloze A [12, 15, 16, 56, 57, 58].

V grafu 7 vodorovná osa představuje rozdíl teplot mezi teplotou prostředí a kritickou teplotou, svislá osa v logaritmické škále představuje dobu trvání kondenzačních stop. Nebyla prokázána korelace mezi těmito faktory a to ani při porovnávání hodnot při podobných relativních vlhkostech. Korelace nebyla prokázána ani u velmi krátkodobých stop ani



u dlouhodobých. To naznačuje, že doba trvání kondenzační stopy je závislá především na vlhkosti obsažené v prostředí, v němž se stopa vytvořila a rozdíl zmíněných teplot ovlivňuje především velikost a koncentraci vzniklých ledových krystalů během kondenzace v procesu mísení, protože směs se se zvětšujícím rozdílem teploty prostředí a kritické teploty nachází po delší dobu v přesycených podmínkách vzhledem k vodě.



Graf 7 Závislost doby trvání kondenzační stopy na rozdílu teploty prostředí a kritické teploty

Schmidt–Applemanovu kritériu ze všech naměřených kondenzačních stop odporovaly pouze tři záznamy. Konkrétně se jednalo o kondenzační stopu vytvořenou dne 17. 10. 2022 v 12.37 UTC. Podle registrační značky bylo dohledáno příslušné letadlo, jednalo se o Boeing 777F. Hodnota prahové teploty byla asi o 1,4 °C nižší než změřená teplota prostředí, stopa by se tedy neměla utvořit, přesto byla pozorována slabá kondenzační stopa trvající 33 s. Dále dne 22. 9. 2022 byly pozorovány v časech 12.34 a 12. 36 UTC dvě kondenzační stopy trvající 4 s a 5 s, které by se opět v daných podmínkách neměly vytvořit, rozdíl v teplotách byl opět asi 1,4 °C, jednalo se o letadla Airbus A350. Jedním z možných vysvětlení by mohlo být použití ve výpočtu univerzální hodnoty celkové účinnosti oproti skutečné hodnotě. Nicméně bylo spočítáno, že aby se hodnota kritické teploty posunula při daných podmínkách nad teplotu prostředí, musela by mít celková účinnost hodnotu asi 0,5. Této účinnosti je však možné u moderních vysokoobtokových motorů dosáhnout [14]. Dále z naměřených dat byly



zjištěny tři případy, kdy kritická teplota byla nižší než teplota prostředí a kondenzační stopa se skutečně nevytvořila. Spočítané hodnoty kritických teplot jsou uvedené v matici kondenzačních stop v příloze.

3.6.2 Diskuse

Vyhodnocení zaznamenaných kondenzačních stop přineslo mj. zjištění, že přetrvávající kondenzační stopy se vyskytovaly i v prostředí, které nebylo podle sondážního měření přesyceno vzhledem k ledu. Při podobných relativních vlhkostech vzhledem k ledu se však vyskytovaly i stopy výrazně kratší. V datech se nepodařilo nalézt souvislost, která by tuto skutečnost vysvětlovala. Možným vysvětlením výskytu přetrvávajících kondenzačních stop v nepřesyceném prostředí by mohla být skutečnost, uváděná v některých studiích zabývajících se přesností měření vlhkosti sondou Vaisala RS41 SG, že sonda má ve vyšších hladinách tendenci podceňovat úroveň relativní vlhkosti vzhledem k vodě v jednotkách procent, což by mohlo znamenat posun do oblasti přesycení vzhledem k ledu, pokud by ale toto podhodnocování vlhkosti bylo systematickým projevem těchto sond, nevysvětlovalo by to současný výskyt krátkodobých i přetrvávajících stop při podobných hodnotách vlhkosti v oblasti cca 80 až 100 %. Nelze také samozřejmě vyloučit, že podmínky v prostoru kondenzačních stop byly odlišné než v prostoru trajektorie sondy.

Vzhledem k nevyváženému zastoupení krátkodobých a dlouhodobých kondenzačních stop při různých vlhkostech vzduchu v souboru dat a celkově malému počtu naměřených stop nebylo možné provést podrobnější statistickou analýzu, nicméně z naměřených je možné vyvodit, že délka trvání kondenzační stopy je exponenciálně závislá na obsahu vodních par ve vzduchové hmotě a doba trvání kondenzační stopy začíná znatelněji růst při hodnotách relativní vlhkosti vzhledem k ledu nad 80 %. Závislost délky trvání kondenzační stopy na relativní vlhkosti vzhledem k ledu byla vyšetřena proložením dat exponenciální křivkou $f(x) = a * \exp(b * x)$ s koeficienty $a = 0,001776$ a $b = 0,1355$, při 95% hladině spolehlivosti byla hodnota koeficientu detrerminace R^2 0,971 a hodnota směrodatné odchylky RMSE 145,3 s. V naměřených datech se nepodařilo prokázat závislost délky doby trvání kondenzační stopy na diferenci mezi teplotou prostředí a kritickou teplotou pro konkrétní stav.

Je nutné také uvést, že měření kondenzačních stop v terénu mohlo být ovlivněno vnášením chyb do měření doby trvání kondenzačních stop a poloh letadel. V některých případech bylo nutné sledovat více úkonů v jeden okamžik, při oslnění displeje se obtížně stanovovala doba



trvání stop a v neposlední řadě nastavení vertikálního úhlu a směru kamery nemohlo být provedeno zcela přesně.

4. Závěr

Vedlejšími cíli této práce bylo podat přehled o vzniku a vývoji kondenzačních stop a jejich působení na klima, zjistit souvislost meteorologické situace s tvorbou perzistentních kondenzačních stop a popsat možné způsoby získávání meteorologických informací v cestovních hladinách a způsoby získání informací z letadel, což je obsaženo v kapitolách 1 a 2. Kapitola 3 obsahuje možné řešení alternativního systému sběru dat kondenzačních stop k systému stávajícímu.

Návrh alternativního systému se zaměřuje především na zjištění způsobu, jakým by bylo možné zaznamenávat kondenzační stopy vytvořené co nejbližší poloze aerologické sondy v příslušné výšce. V návrhu je popsána zejména vstupní a výpočetní část s důrazem na příjem a dekodování údajů ze zpráv aerologické sondy a zpráv módu S, ze kterých je možné obdržet informace pro nastavení kamery a potřebné informace z letadel, v návrhu je také představen způsob určení prostoru zabíraného kamerou pro filtraci zpráv módu S, který lze použít u stávajícího systému při případné změně směřování kamer. Výstupní část by bylo nejlépe řešit jako aplikaci, která kombinuje prohlížeč kamerových záznamů s databázovým systémem a obsahující ovládací prvky pro přiřazení odpovídající ICAO adresy letadla a automatickým doplněním údajů ze zpráv módu S a hodnot meteorologických prvků, aby proces přiřazení zpráv byl pro obsluhu co nejjednodušší a odpadlo tak mnoho opakujících se časově náročných úkonů jako u stávajícího systému při analýze kamerových záznamů.

Navrhovaný systém by přinesl výrazné zlepšení ohledně vzdálenosti přiřazovaných meteorologických údajů k zaznamenaným kondenzačním stopám. Jestliže by bylo cílem nashromáždit soubor kondenzačních stop s co nejpřesnějšími meteorologickými údaji, byl by navržený systém vhodným řešením, navíc by bylo možné záznamy filtrovat podle vzdálenosti od sondy včetně časového odstupu a vybírat tak jen nejkvalitnější data.

Měřeními kondenzačních stop v terénu obdobou navrhovaného systému bylo ověřeno, že navrhovaný systém by zaznamenal kondenzační stopy, které se nacházely v blízkosti polohy sondy, 75 % zaznamenaných kondenzačních stop se nacházelo ve vzdálenosti od sondy menší než asi 19 km. Počet zaznamenaných stop ve dnech s vhodnými meteorologickými podmínkami pro pozorování je ale závislý na poloze sondy v požadované výšce vzhledem ke stanovišti kamery a hustotě provozu v prostoru zabíraném kamerou. Tento nedostatek by



bylo možné řešit vytipováním prostorů s nízkým provozem na základě statistik využívání vzdušného prostoru v okolí aerologické stanice v Libuši a v případě, že se sonda v těchto prostorech v požadované výšce bude nacházet, použít pro směrování kamery přednastavené hodnoty tak, aby kamera zabírala využívanější vzdušný prostor.



Seznam použité literatury

- 1 DVOŘÁK, Petr. *Atlas oblaků*. Vyd. 3. Cheb: Svět křídel, 2012. ISBN 978-80-87567-16-6.
- 2 International Cloud Atlas: Aircraft condensation trails. *Cloudatlas.wmo.int* [online]. Geneva: World Meteorological Organization, 2017 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://cloudatlas.wmo.int/en/aircraft-condensation-trails.html>
- 3 KÄRCHER, Bernd. Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications* [online]. 2018, 9(1) [cit. 2022-10-18]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-018-04068-0
- 4 DVOŘÁK, Petr. Kondenzační pruhy za letadly, Contrails. Infomet.cz [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2012 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1351335406>
- 5 SETVÁK, Martin. Kondenzační stopy za letadly. Portal.chmi.cz [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2009 [cit. 22-10-18]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/kondenzacni-stopy>
- 6 KOCÁB, Jindřich. *Letadlové motory*. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- 7 BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- 8 Slovaft a.s.: *Bezpečnostní list, letecký petrolej JET A1*. Bratislava, 2006. Dostupné také z: <https://adoc.pub/201015170414356976.html>
- 9 *Učebnice pilota: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2003. ISBN 80-85280-89-2.
- 10 PALT, Karsten. Boeing 737-800 Specifications. *Flugzeuginfo.net* [online]. Leipzig, c2001-2019 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_7378_en.php
- 11 ŘEZÁČOVÁ, Daniela. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1.



- 12 HOLTON, James R., Judith A. CURRY a J. A. PYLE. *Encyclopedia of atmospheric sciences*. Amsterdam; Boston: Academic Press, c2003. ISBN 01–222–7090–8.
- 13 HEYMSFIELD, Andrew, Darrel BAUMGARDNER, Paul DEMOTT, Piers FORSTER, Klaus GIERENS a Bernd KÄRCHER. *Contrail Microphysics*. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2010, **91**(4), 465–472 [cit. 2022-10-20]. DOI: 10.1175/2009BAMS2839.1. ISSN 0003–0007. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2839.1>
- 14 SCHUMANN, Ulrich. *Formation, properties and climatic effects of contrails*. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2005, **6**(4–5), 549–565 [cit. 2022-10-20]. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.05.002. ISSN 16310705. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631070505000563>
- 15 APPLEMAN, Herbert. *The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft*. *Bulletin American Meteorological Society*. 1953, (34), 14–20.
- 16 SCHUMANN, Ulrich. *Influence of propulsion efficiency on contrail formation*. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2000, **4**(6), 391–401 [cit. 2022-10-20]. DOI: 10.1016/S1270–9638(00)01062–2. ISSN 12709638. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1270963800010622>
- 17 U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Aircraft Contrails Factsheet*. Washington, D. C., 2000, 6 s. Dostupné také z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/00000LVU.PDF?Dockey=00000LVU.PDF>
- 18 IPCC, 2021: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 2021. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- 19 *Post COVID Forecast Scenarios*. *Icao.int* [online]. Montreal: ICAO International [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>



- 20 Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang: *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, 2013. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Dostupné z: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- 21 LEE, D.S., D.W. FAHEY, A. SKOWRON, et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment* [online]. 2021, **244** [cit. 2023-10-22]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- 22 WILKERSON, J. T., M. Z. JACOBSON, A. MALWITZ, S. BALASUBRAMANIAN, R. WAYSON, G. FLEMING, A. D. NAIMAN a S. K. LELE. Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2010, **10**(13), 6391-6408 [cit. 2022-10-22]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-10-6391-2010
- 23 BOCK, Lisa a Ulrike BURKHARDT. Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2019, **19**(12), 8163-8174 [cit. 2022-10-22]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-19-8163-2019
- 24 LEE, D.S., G. PITARI, V. GREWE, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment* [online]. 2010, **44**(37), 4678-4734 [cit. 2022-10-23]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.005
- 25 PENNER, Joyce E., David H. LISTER, David J. GRIGGS, David J. DOKKEN a Mack MCFARLAND. *IPCC Special Report – Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policymakers* [online]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999. Dostupné také z: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf>



- 26 BURKHARDT, Ulrike a Bernd KÄRCHER. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* [online]. 2011, 1(1), 54-58 [cit. 2022-10-25]. ISSN 1758-678X. Dostupné z: doi:10.1038/nclimate1068
- 27 KOPÁČEK, Jaroslav, Jan BEDNÁŘ a Michal ŽÁK. *Jak vzniká počasí*. Vydání druhé, rozšířené a upravené. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2019. ISBN 978-80-246-4423-3.
- 28 Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 2021: *Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, doi:10.1017/9781009157896.007 Dostupné z: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf
- 29 MASIOL, Mauro a Roy M. HARRISON. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment* [online]. 2014, 95, 409-455 [cit. 2022-10-23]. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.070
- 30 IRVINE, E. A. a K. P. SHINE. Ice supersaturation and the potential for contrail formation in a changing climate. *Earth System Dynamics* [online]. 2015, 6(2), 555-568 [cit. 2022-10-23]. ISSN 2190-4987. Dostupné z: doi:10.5194/esd-6-555-2015
- 31 LAMQUIN, N., C. J. STUBENRAUCH, K. GIERENS, U. BURKHARDT a H. SMIT. A global climatology of upper-tropospheric ice supersaturation occurrence inferred from the Atmospheric Infrared Sounder calibrated by MOZAIC. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2012, 12(1), 381-405 [cit. 2022-10-23]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-12-381-2012
- 32 SHONIJA, N. K., O. B. POPOVICHEVA, N. M. PERSIANTSEVA, A. M. SAVEL'EV a A. M. STARIK. Hydration of aircraft engine soot particles under plume conditions: Effect of



sulfuric and nitric acid processing. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2007, **112**(D2) [cit. 2022-10-28]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/2006JD007217

33 GIERENS, K. a S. BRINKOP. Dynamical characteristics of ice supersaturated regions. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2012, **12**(24), 11933-11942 [cit. 2022-10-24]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-12-11933-2012

34 DVORÁK, Petr. *Letecká meteorologie 2017*. Cheb: Svět křidel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.

35 Informace o aerologických měřeních. *Chmi.cz* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, c2010-2011 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_info.html

36 Radiosonde RS41-SG Datasheet. *Vaisala.com* [online]. Vaisala, 2020 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://docs.vaisala.com/v/u/B211321EN-K/en-US>

37 E-ABO. *Eumetnet.eu* [online]. Brussels: EUMETNET [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://www.eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/e-amdar/>

38 WMO ABO Newsletter - Volume 23. *Community.wmo.int* [online]. Geneva: WMO, 2022 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/aircraft-based-observations/newsletter/volume-23>

39 WMO. *AMDAR Onboard Software Functional Requirements Specification: (Version 1.0, 16 July 2013)*. Geneva, 2013. Dostupné také z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7360

40 *The AMDAR Observing System Description* [online]. Geneva: WMO, c2020 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/aircraft-based-observations/amdar/amdar-description>

41 WMO. *Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual*. Geneva, 2003. Dostupné také z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9026

42 ŘLP ČR s. p., LETECKÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA. *AIP GEN 1.5-1*. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/g1-5.pdf



- 43 Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1207/2011 ze dne 22. listopadu 2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. *Eur-lex.europa.eu* [online]. [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1396865968400&uri=CELEX:32011R1207>
- 44 ZÁLABSKÝ, Tomáš. Řídké antény pro příjem signálů odpovídačů sekundárních radiolokátorů. Pardubice, 2018. Disertační práce. Univerzita Pardubice
- 45 ICAO, *Annex 10 - Aeronautical Telecommunications - Volume IV- Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems 5th Edition, July 2014*. ISBN 978-92-9249-537-4
- 46 ICAO, Doc 9871: *Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, AN/464*. 1st ed. 2008, ISBN 978-92-9231-117-9.
- 47 HOSPODKA, Jakub. Kondenzační stopy: Contrails. České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN isbn978-80-01-05965-4.
- 48 WELLS, Christopher J. Frequency Shift Keying (FSK). *Technologyuk.net* [online]. 2009 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.technologyuk.net/telecommunications/telecom-principles/frequency-shift-keying.shtml>
- 49 QUINLAN, P., P. CROWLEY, M. CHANCA, et al. A multimode 0.3-200-kb/s transceiver for the 433/868/915-MHz bands in 0.25- μm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* [online]. 2004, **39**(12), 2297-2310 [cit. 2023-02-11]. ISSN 0018-9200. Dostupné z: doi:10.1109/JSSC.2004.836330
- 50 VAISALA. *Vaisala Radiosonde RS41 Measurement Performance*. 2013. Dostupné také z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/White%20paper%20RS41%20Performance%20B211356EN-A.pdf>
- 51 RS41 Decoding. *Github.com* [online]. c2023 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://github.com/bazjo/RS41_Decoding
- 52 KUNA, Devadas, N. SANTHOSH a Naveen Kumar PERUMALLA. Preliminary Analysis of Standalone Galileo and NavIC in the context of Positioning Performance for Low



Latitude Region. *Procedia Computer Science* [online]. 2020, **171**, 225-234 [cit. 2023-02-11]. ISSN 18770509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2020.04.024

53 TOPKOVÁ, Tereza. *Identification of BDS registers*. Praha 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

54 SUN, Junzi. *The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals* [online]. 2. TU Delft OPEN Publishing, 2021 [cit. 2022-12-18]. ISBN 978-94-6366-402-8. Dostupné z: <https://books.open.tudelft.nl/home/catalog/view/11/14/69>

55 PALEČKOVÁ, Lucie. *Analýza kondenzačních stop prostřednictvím dat vysílaných letadly*. Praha 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

56 LÁN, Sébastien a Miroslav ŠPÁK. Contrail formation assessment based on aerological data. *Transportation Research Procedia* [online]. 2020, **51**, 225-231 [cit. 2023-03-06]. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2020.11.025

57 LÁN, Sébastien, ŠPÁK Miroslav. Mathematical Background of Contrail Formation. In: *Transport means 2019, 23rd International Scientific Conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019, s. 1559–1563. [cit. 2023-03-06]. ISSN 1822-296X. Dostupné z: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-3.pdf>

58 SCHUMANN, U. *Atmospheric physics: background, methods, trends*. New York: Springer, 2012. Research topics in aerospace. ISBN 36-423-0182-7.



Seznam obrázků

Obrázek 1	Působení stříhu větru na kondenzační stopu [12].....	24
Obrázek 2	Vznik přerušované kondenzační stopy [12]	24
Obrázek 3	Grafická prezentace simulace Bock a Burkhardt 2019 [23]	30
Obrázek 4	Průměrný výskyt chladných přesycených oblastí vzhledem k ledu za období 2003–2009 [31]	35
Obrázek 5	Schéma systému AMDAR [39].....	41
Obrázek 6	Palubní část systému AMDAR [40]	42
Obrázek 7	Sled impulzů odpovědi módu A [44]	47
Obrázek 8	Sled impulzů společných dotazů [45]	48
Obrázek 9	Sled impulzů dotazu módu S [45].....	49
Obrázek 10	Sled impulzů odpovědi módu S [45]	49
Obrázek 11	Základní model navrhovaného systému	61
Obrázek 12	FSK modulace [48].....	63
Obrázek 13	Frekvenční spektra FSK a GFSK [49]	63
Obrázek 14	Bajtová maska pro operaci XOR [51]	68
Obrázek 15	Filtrace zpráv s DF 17	70
Obrázek 16	Filtrace zpráv s DF 4, 20, 21	71
Obrázek 17	Vztah souřadných systémů ECEF a ENU [52].....	83
Obrázek 18	Řez prostoru zabíraného kamerou rovinou.....	86



Seznam grafů

Graf 1 Průběh mísení pro dvě různé účinnosti [12].....	21
Graf 2 Závislost prahové teploty na výšce a relativní vlhkosti [14]	22
Graf 3 Přehled odhadů ERF a RF v období 1940–2018 [21]	28
Graf 4 Histogram tříd vzdáleností	93
Graf 5 Závislost doby trvání stopy na relativní vlhkosti vzhledem k ledu.....	94
Graf 6 Fázový diagram mísení při kritické teplotě [56]	96
Graf 7 Závislost doby trvání kondenzační stopy na rozdílu teploty prostředí a kritické teploty	98



Seznam tabulek

Tabulka 1 Intervaly měření systému AMDAR dle specifikace AOSFR.....	43
Tabulka 2 Povinné registry ELS	50
Tabulka 3 Povinné registry EHS (včetně ELS)	50
Tabulka 4 Bitová struktura všeobecného dotazu módu S UF11.....	51
Tabulka 5 Bitová struktura všeobecné odpovědi módu S DF11	52
Tabulka 6 Struktura odpovědi módu S na požadavek výšky DF4	53
Tabulka 7 Struktura odpovědi výšky Comm–B DF20.....	53
Tabulka 8 Struktura odpovědi módu S DF17	56
Tabulka 9 Směrování kamer současného systému	58
Tabulka 10 Bajtová struktura zprávy sondy RS41	66
Tabulka 11 Bajtová struktura datového bloku zprávy standardní délky.....	66
Tabulka 12 Bajtová struktura datového bloku pole GP	67
Tabulka 13 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS10 _{hex}	79
Tabulka 14 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 17 _{hex}	79
Tabulka 15 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 20 _{hex}	79
Tabulka 16 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 30 _{hex}	80
Tabulka 17 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 40 _{hex}	80
Tabulka 18 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 50 _{hex}	80
Tabulka 19 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 60 _{hex}	81
Tabulka 20 Bitová a hodnotová pravidla pro BDS 44 _{hex}	81



Příloha A Měření kondenzačních stop

Pořadí	List č. 1/2		Stopa		Letadlo			Sonda					Výpočet		Poznámka
	Datum	Čas UTC	Trvání [s]	Identifikace	Lat	Lon	Výška [ft]	Lat	Lon	Tlak [hPa]	Vlhkost k vodě [%]	Teplota [°C]	Kritická teplota [°C]	Vzdálenost [km]	
1	14.1.2022	11:43	18	A7-BFW	49,8064	14,7899	36000	49,6889	14,9072	227,3	23	-59,8	-50,9831	15,55	
2	14.1.2022	11:46	12	A9C-NB	49,6537	14,8366	35000	49,7018	14,8850	238,4	26	-57,8	-50,3977	6,38	
3	14.1.2022	11:50	11	TC-LSM	49,7266	14,8640	37000	49,6788	14,9248	216,6	19	-60,9	-51,6041	6,88	
4	14.1.2022	11:52	7	LN-NII	49,7497	15,0233	40000	49,6534	14,9707	187,6	8	-59,2	-56,3642	11,36	
5	14.1.2022	11:57	13	EP_IJB	49,4533	15,0178	38000	49,6705	14,9400	206,4	18	-59,6	-52,1075	24,79	
6	14.1.2022	12:18	16	9K_AOH	49,6226	14,8476	37000	49,6788	14,9248	216,6	19	-60,9	-51,6041	8,36	
7	14.1.2022	12:21	12	A6-EVE	49,5309	15,0912	40000	49,6534	14,9707	187,6	8	-59,2	-53,0274	16,15	
8	14.1.2022	12:30	64	D_AIGS	49,2430	15,0632	35000	49,7018	14,8850	238,4	26	-57,8	-50,3977	52,62	
9	14.1.2022	12:30	11	SP_RZK	49,2430	15,0632	37000	49,6788	14,9248	216,6	19	-60,9	-51,6041	49,48	
10	14.1.2022	12:33	13	EI-EFE	49,9922	14,5413	37000	49,6788	14,9248	216,6	19	-60,9	-51,6041	44,39	
11	14.1.2022	12:38	19	EI-EKS	49,5523	14,8462	36000	49,6889	14,9072	227,3	23	-59,8	-50,9831	15,81	
12	23.3.2022	11:59	5	SP-RPK	50,0398	14,4757	37000	50,1269	14,5459	216,7	11	-61,6	-51,886	10,90	
13	23.3.2022	12:01	5	D-ACNV	50,0500	14,4754	37000	50,1269	14,5459	216,7	11	-61,6	-51,886	9,92	
14	23.3.2022	12:53	7	SU-BUJ	50,0817	14,4685	33650	50,1233	14,5410	254	26	-58,9	-49,7763	6,94	
15	30.8.2022	12:44	34	TC-LJJ	50,0253	14,9602	37000	50,0024	14,7368	216,5	44	-57,7	-50,5407	16,16	
16	30.8.2022	12:45	33	SP_RKT	49,9917	14,9190	37000	50,0024	14,7368	216,5	44	-57,7	-50,5407	13,08	
17	30.8.2022	12:52	27	9H-FHY	50,0217	14,9025	34025	50,0007	14,6978	249,8	38	-50,8	-49,4192	14,81	
18	2.9.2022	11:54	5	HA-LYI	50,0142	14,3951	38000	50,0080	14,4490	206,5	6	-54	-52,5153	3,91	
19	5.9.2022	11:30	1980	YR-MXC	49,9701	14,6512	37000	49,9829	14,6284	216,7	57	-57,1	-49,8255	2,16	
20	5.9.2022	12:26	1220	TC-JOK	49,9171	14,7116	38000	49,9840	14,6377	206,5	49	-59,2	-50,7533	9,13	
21	5.9.2022	12:27	1093	TC-JFL	49,7062	14,9039	38000	49,9840	14,6373	206,5	49	-59,2	-50,7533	36,33	
22	5.9.2022	12:55	75	D-AILP	50,0098	14,5344	34000	49,9803	14,6024	250	37	-49,9	-49,4529	5,86	
23	5.9.2022	13:00	120	SP-RKL	49,9741	14,8551	38000	49,9840	14,6377	206,5	49	-59,2	-50,7533	15,58	Splynula
24	12.9.2022	12:00	25	TC-RBJ	49,7400	14,6600	36000	49,7280	14,5910	227,4	45	-56	-50,004	5,14	
25	12.9.2022	12:06	33	EI-SIA	49,7570	14,4540	36000	49,7270	14,5910	227,4	45	-56	-50,004	10,39	
26	12.9.2022	12:09	94	OE-LFD	49,5640	14,6610	38000	49,6970	14,6060	206,4	41	-60,4	-51,1579	15,31	
27	12.9.2022	12:14	31	HA-LPK	49,6570	14,5900	36000	49,7270	14,5910	227,4	45	-56	-50,004	7,78	
28	12.9.2022	12:32	40	TC-NCS	49,7430	14,5260	36000	49,7270	14,5910	227,4	45	-56	-50,004	5,00	
29	12.9.2022	12:33	28	TC-JNP	49,8490	14,5090	38000	49,6970	14,6060	206,4	41	-60,4	-51,1579	18,28	
30	12.9.2022	12:38	39	YR-SUN	49,7450	14,5550	36000	49,7270	14,5910	227,4	45	-56	-50,004	3,27	
31	22.9.2022	11:44	7	HA-LVC	49,7190	14,1760	36000	49,7620	14,2900	227,3	14	-54,5	-51,3198	9,49	
32	22.9.2022	11:45	4	TC-JSZ	49,8020	14,3060	34000	49,7910	14,3050	249,9	19	-52,9	-50,2133	1,23	
33	22.9.2022	12:00	6	ER-AXA	49,7570	14,2470	36000	49,7620	14,2900	227,3	14	-54,5	-51,3198	3,14	
34	22.9.2022	12:19	7	LY-OVL	49,6380	14,2610	32000	49,8220	14,3200	274,4	25	-50,5	-49,0576	20,89	
35	22.9.2022	12:32	0	9H-VUC	49,8230	14,2810	39000	49,7140	14,2780	196,7	3	-51,9	-53,0731	12,12	
36	22.9.2022	12:34	4	A7-AML	49,8280	14,2950	38000	49,7280	14,2800	206,4	3	-50,8	-52,6161	11,17	
37	22.9.2022	12:36	5	VN-A829	49,7690	14,2680	38000	49,7280	14,2800	206,4	3	-50,8	-52,6161	4,64	
38	22.9.2022	12:38	6	A6-BLC	49,8390	14,3250	36000	49,7620	14,2900	227,3	14	-54,5	-51,3198	8,92	
39	23.9.2022	11:41	85	HA-LSA	49,8980	14,5970	38000	49,8730	14,5660	206,4	41	-62,4	-51,1579	3,56	
40	23.9.2022	11:42	5	CL35	49,7910	14,6250	43000	49,8350	14,5960	162,3	4	-58,4	-54,8502	5,32	
41	23.9.2022	11:46	75	LY-MLG	49,8040	14,5900	36000	49,8890	14,5540	227,2	49	-57,8	-49,8051	9,80	
42	23.9.2022	11:48	97	A7-ALU	49,6670	14,6290	38000	49,8730	14,5660	206,4	41	-62,4	-51,1579	23,35	
43	23.9.2022	11:53	93	HA_LYQ	49,8080	14,5570	38000	49,8730	14,5660	206,4	41	-62,4	-51,1579	7,26	
44	23.9.2022	12:17	78	TC-JOH	49,8910	14,5930	37000	49,8810	14,5590	216,6	40	-59,7	-50,7288	2,68	
45	23.9.2022	12:25	85	TC-JGA	49,9300	14,5790	36000	49,8890	14,5540	227,2	49	-57,8	-49,8051	4,90	
46	23.9.2022	12:29	77	TC-LSY	49,6450	14,6910	34000	49,9030	14,5450	249,8	53	-53,4	-48,6385	30,54	
47	23.9.2022	12:38	52	TC_LTE	49,7460	14,5310	34000	49,9030	14,5440	249,8	53	-53,4	-48,6385	17,48	
48	23.9.2022	12:38	83	TC-JIP	49,7410	14,5420	38000	49,8730	14,5660	206,4	41	-62,4	-51,1579	14,78	
49	23.9.2022	12:43	84	9H-QAJ	49,5290	14,7060	38000	49,8730	14,5660	206,4	41	-62,4	-51,1579	39,55	
50	23.9.2022	12:53	34	D-AILW	49,9570	14,5040	33825	49,9050	14,5440	252,1	53	-52,9	-48,5469	6,45	



Pořadí	List č.2/2	Stopa		Letadlo				Sonda				Vypočet		Poznámka	
		Datum	Čas UTC	Trvání [s]	Identifikace	Lat	Lon	Výška [ft]	Lat	Lon	Tlak [hPa]	Vlhkost k vodě [%]	Teplota [°C]		Kritická teplota [°C]
51	17.10.2022	11:26	42	YR-BGM	50,2230	15,0070	37000	50,0950	14,6950	216,6	56	-60,5	-49,8895	26,39	
52	17.10.2022	11:34	0	D-ACNU	50,1370	14,8440	30000	50,0810	14,6080	300,9	56	-42,6	-46,594	17,94	
53	17.10.2022	11:42	48	OE-LBK	50,1300	14,8190	35725	50,0920	14,6750	230,4	51	-57,4	-49,573	11,10	
54	17.10.2022	11:45	62	RYR4034	50,1600	15,1210	38000	50,0950	14,7070	206,4	51	-61,8	-50,6535	30,38	
55	17.10.2022	11:50	0	9A-SHO	50,1120	15,1760	27800	50,0790	14,5860	332,5	58	-37,2	-45,4594	42,25	
56	17.10.2022	11:51	1380	3C6429	50,1180	15,1060	33000	50,0870	14,6400	261,9	64	-51,1	-47,4721	33,41	
57	17.10.2022	12:10	43	TC-JZT	50,1820	15,0810	37000	50,0950	14,6950	216,6	56	-60,5	-49,8895	29,16	
58	17.10.2022	12:15	84	LN-RGN	50,1150	14,7200	38000	50,0950	14,7070	206,4	51	-61,8	-50,6535	2,41	
59	17.10.2022	12:17	41	TC-LSC	50,1000	14,6650	35050	50,0910	14,6670	237,9	41	-55,5	-49,7543	1,01	
60	17.10.2022	12:22	123	D-AECA	50,0190	14,6730	36000	50,0930	14,6820	227,2	55	-58,2	-49,4703	8,25	
61	17.10.2022	12:26	115	TC-NCU	50,0250	14,5170	35050	50,0910	14,6670	237,9	41	-55,5	-49,7543	12,98	
62	17.10.2022	12:37	33	D-AALR	50,1450	14,7910	31000	50,0830	14,6180	287,2	58	-45,5	-46,9392	14,13	
63	31.10.2022	11:24	4500	B-18908	50,1420	14,7480	35000	50,0390	14,5380	238,3	55	-56,2	-48,9935	18,86	
64	31.10.2022	12:01	2220	G-EZUS	50,0450	14,5910	37000	50,0420	14,5550	216,5	48	-60	-50,3375	2,59	Splynula
65	31.10.2022	12:16	2040	TC-JOJ	50,0410	14,6760	39000	50,0480	14,5710	196,4	55	-63,8	-50,9276	7,54	Splynula
66	31.10.2022	12:24	1860	OE-LXA	50,1130	14,8110	36000	50,0410	14,5470	227,4	54	-58,3	-49,5195	20,47	Splynula
67	31.10.2022	12:37	120	YR_BGK	50,1280	14,7910	37000	50,0420	14,5550	216,5	48	-60	-50,3375	19,36	Splynula
68	12.11.2022	11:43	3630	PH-BGI	50,0040	14,3360	41000	49,9660	14,2020	178,8	54	-66,7	-51,6162	10,47	
69	12.11.2022	11:49	20	YL-ABI	49,9990	14,0950	34000	49,9580	14,2560	244,9	40	-51,5	-49,5154	12,38	
70	12.11.2022	11:56	365	D-ACNC	50,0400	13,9050	35000	49,9580	14,2490	238,6	57	-52,9	-48,8615	26,22	
71	12.11.2022	12:38	18	TC-LTI	49,9120	14,0840	34000	49,9580	14,2560	244,9	40	-51,5	-49,5154	13,33	
72	25.11.2022	11:53	5	EW5425	49,9480	15,0830	37000	49,9640	14,7400	216,5	9	-57,4	-51,9631	24,60	
73	25.11.2022	12:03	8	LN-ENM	49,9420	14,9200	36600	49,9650	14,7360	220,8	14	-58,2	-51,6002	13,41	
74	25.11.2022	12:04	10	D-ACKI	50,0250	14,7510	33025	49,9750	14,6890	261,9	24	-55,9	-49,5571	7,11	
75	25.11.2022	12:08	7	SP-RSZ	49,9720	14,6140	38000	49,9610	14,7520	206,3	5	-57,5	-52,5569	9,95	
76	25.11.2022	12:12	6	SP_RKK	50,0490	15,0130	38000	49,9610	14,7520	206,3	5	-57,5	-52,5569	21,06	
77	25.11.2022	12:38	9	OE-ICL	49,9570	14,9490	35000	49,9690	14,7170	238,3	22	-57,2	-50,5613	16,65	
78	25.11.2022	12:43	3000	OE-LBE	49,9730	14,9430	29000	49,9820	14,6400	314,9	64	-50,4	-45,6093	21,69	Splynula
79	25.11.2022	12:57	6	EI-EKI	50,0000	14,5220	39000	49,9590	14,7680	196,7	4	-56,5	-53,0418	18,17	
80	25.11.2022	13:00	6	9H-LMT	49,9670	14,9410	36000	49,9660	14,7310	227,3	11	-58,1	-51,4258	15,02	
81	9.2.2023	12:13	43	TC-JNJ	50,0030	14,1950	39000	49,9740	14,2540	196,7	17	-67,3	-52,6074	5,31	
82	9.2.2023	12:17	13	G-WUKS	49,9160	13,9820	31975	50,0080	14,2860	274,9	19	-54,2	-49,2796	24,03	
83	9.2.2023	12:20	9	I-JEND	50,0380	14,2660	33000	50,0020	14,2780	262	22	-56	-49,6336	4,09	
84	9.2.2023	12:21	11	HB-AZC	49,9910	14,1340	31000	50,0150	14,2970	287,3	20	-51,8	-48,8064	11,95	
85	9.2.2023	12:24	42	EP-IBJ	50,0010	14,2170	40000	49,9720	14,2540	187,5	16	-68,6	-53,1026	4,17	
86	9.2.2023	12:34	12	TC-RBR	49,9740	14,1280	34000	49,9950	14,2720	249,9	12	-57,6	-50,4725	10,56	