



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

Modelování prostředí kooperativních přehledových systémů v civilním letectví

Dizertační práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích
Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy
Školitel: doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
Školitel-specialista: Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Ing. Tomáš Lipták

2023

Abstrakt

Kooperativní přehledové systémy představují v současnosti nezbytnou technologii využívanou civilním letectvím, bez níž by nebylo možné zachovat bezpečnost ani efektivitu civilní letecké dopravy při jejím neustálém nárůstu. Množství sdílených informací po rádiové frekvenci (RF 1030/1090 MHz) mezi letadly nebo mezi letadly a přehledovou pozemní infrastrukturou má rostoucí tendenci, jejímž projevem je degradace kvality těchto přenosů. V této dizertační práci je popsán vytvořený model, v němž je možné simulovat prostředí kooperativních přehledových systému a provádět různé simulační experimenty za účelem testování výzkumných hypotéz. Konfigurovatelnost modelu umožňuje jeho přizpůsobení pro různé provozní scénáře a různé nastavení přehledové infrastruktury.

Klíčová slova

Kooperativní přehledové systémy, zatížení 1030/1090 MHz, sekundární přehledová informace, komunikační model, modelování RF prostředí

Abstract

Nowadays, cooperative surveillance systems are necessary technology used by civil aviation. It would not be possible to maintain the safety and efficiency of civil air transport without this technology as it continues to grow. The amount of information shared by radio frequency (RF 1030/1090 MHz) between aircraft, and between aircraft and the surveillance ground infrastructure has a growing tendency, which leads to degradation of the quality of these transmissions. In this doctoral thesis, a created model is described. Moreover, it is possible to simulate the environment of cooperative overview systems and perform various simulation experiments in order to test hypotheses in this model. The configurability of the model allows the model to be adapted for different operational scenarios and different settings of the overview infrastructure.

Keywords

Cooperative surveillance systems, 1030/1090 band load, secondary surveillance information, communication model, RF modelling

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem Modelování prostředí kooperativních přehledových systémů v civilním letectví vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k dizertační 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 31. března 2023

.....

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Jakobovi Krausovi, Ph.D. za vedení a metodologickou pomoc při zpracování práce, za trpělivost a množství času, které věnoval konzultacím a revizím pracovních textů. Děkuji také školiteli Ing. Stanislavovi Pleningerovi, Ph.D. za odbornou přípravu a konzultace v oblasti ATM/CNS systémů. Poděkování za velkou podporu patří také mé rodině a kolegům z katedry, kteří se mnou v rámci mého doktorského studia spolupracovali.

Obsah

1.1	Analýza dopadů selhání odpovídače	16
1.2	Ztráta přehledové informace vlivem přetížení odpovídačů	19
1.3	Využití 1030/1090 MHz	20
1.4	Současná výzkumná řešení definovaného problému.....	22
1.5	Potřeba řešení kapacity pásma 1030/1090MHz	23
2.1	Cíl práce	27
2.2	Výzkumné hypotézy	27
3.1	Model.....	31
3.1.1	Model rádiového prostředí.....	33
3.1.2	Model Mode S zprávy	36
3.1.3	Elementy	39
3.1.4	Podpůrné modely.....	62
3.1.5	Simulace.....	64
3.1.6	Použití modelu	65
3.2	Příprava vstupních dat	65
3.2.1	Příprava vzdušné situace	66
3.2.2	Příprava pozemní přehledové infrastruktury	69
3.2.3	Strojové zpracování vstupních dat	70
3.3	Konfigurace modelu	71
3.3.1	Struktura konfiguračních souborů.....	71
3.3.2	Konfigurace modelu pro verifikaci.....	77
3.3.3	Konfigurace modelu pro testování hypotézy H1.....	78
3.3.4	Konfigurace modelu pro testování hypotézy H2.....	80
3.3.5	Konfigurace modelu pro testování hypotézy H3.....	81
3.4	Verifikace výstupu	81
3.5	Testovací scénáře	86
3.5.1	Testování hypotézy H1.....	86
3.5.2	Testování hypotézy H2.....	88
3.5.3	Testování hypotézy H3.....	89
4.1	Výsledky testování hypotézy H1	93
4.2	Výsledky testování hypotézy H2.....	101
4.3	Výsledky testování hypotézy H3.....	108

Seznam obrázku

Obrázek 1 Naznačení překrytí zpráv z různých zdrojů v časové oblasti.....	21
Obrázek 2 Propustnost pásma: vodorovná osa G, svislá S [10].....	22
Obrázek 3 Blokové schéma modelu.....	32
Obrázek 4 Model letadla jako platforma pro další modely.....	40
Obrázek 5 Obrázek dotazovacího plánu All-Call periody (zdroj: [34]).	43
Obrázek 6 Obrázek střídání All-Call a Roll-call periody (zdroj: [34], upraveno autorem).....	44
Obrázek 7 Obrázek zobrazující dotazovací plán (zdroj: [34], upraveno autorem)..	45
Obrázek 8 Aktivní list pro dotazování.....	45
Obrázek 9 Logika modelu SSR.....	48
Obrázek 10 Rekonstrukce vzdušné situace z nahrávky EMIT	67
Obrázek 11 Rekonstrukce vzdušné situace z nahrávky OpenSky.....	68
Obrázek 12 Rozmístěné SSR v modelu.....	70
Obrázek 13 Horizontální Anténní charakteristika SSR (normalizovaná).....	74
Obrázek 14 Poloha vybraných letadel a RX	82
Obrázek 15 Výsledky Verifikace pro MS=48C229/ID=142	83
Obrázek 16 Výsledky Verifikace pro MS=70COEF/ID=177	84
Obrázek 17 Výsledky Verifikace pro MS=70COEF/ID=165	85
Obrázek 18 Srovnání provozu prvního a posledního testovacího případu hypotézy H2.....	88
Obrázek 19 Průběh četnosti dotazů a odpovědí na množství provozu.....	94
Obrázek 20 Průběh četnosti zpráv UF=4 a DF=4 na množství provozu.....	95
Obrázek 21 Průběh četnosti zpráv UF=5 a DF=5 na množství provozu.....	96
Obrázek 22 Průběh četnosti zpráv UF=4 Comm-B a DF=20 na množství provozu	97
Obrázek 23 Průběh četnosti zpráv UF=5 Comm-B a DF=21 na množství provozu	98
Obrázek 24 Průběh četnosti zpráv UF=11 All-Call a DF=11 All-Call na množství provozu.....	99
Obrázek 25 Průběh četnosti zpráv UF=0 a DF=0 na množství provozu.....	100

Obrázek 26 Průběh četnosti zpráv UF=16 a DF=16 na množství provozu	101
Obrázek 27 Průběh četnosti zpráv UF=0/DF=0 v čase (pro ACFT ID=246)	103
Obrázek 28 Průběh četnosti zpráv UF=4/DF=4 v čase (pro ACFT ID=246)	103
Obrázek 29 Průběh četnosti zpráv UF=4 Comm-B/DF=20 v čase (pro ACFT ID=246)	104
Obrázek 30 Průběh četnosti zpráv UF=5/DF=5 v čase (pro ACFT ID=246)	104
Obrázek 31 Průběh četnosti zpráv UF=5/DF=21 v čase (pro ACFT ID=246).....	105
Obrázek 32 Průběh četnosti zpráv UF=11 All-Call/DF=11 All-Call v čase (pro ACFT ID=246).....	105
Obrázek 33 Průběh četnosti zpráv UF=16/DF=16 v čase (pro ACFT ID=246)	106
Obrázek 34 Nestabilní průběh přenosů při testování TC8-H2 (odpovědi)	107
Obrázek 35 Výpadky vysílání ACFT ID=246 při TC8-H2 v důsledku FAILURE stavu	107
Obrázek 36 Četnost dotazu v čas 0-60s nestabilního prostředí.....	108
Obrázek 37 Celkové množství příchozích zpráv a ztracených zpráv dle formátu	109
Obrázek 38 Vývoj počtu ztracených zpráv na počtu příchozích zpráv dle formátu a typu zprávy.....	110
Obrázek 39 Poměr ztracených zpráv	110

Seznam tabulek

Tabulka 1 Analýza dopadů úplného selhání palubního odpovídače na výkon funkce řídicího letového provozu (zdroj: [8])	16
Tabulka 2 Ukázka možností zmírnění dopadů úplného selhání odpovídače (zdroj: [8]).....	18
Tabulka 3 Množina informací přenášených ve zprávách v simulaci.....	37
Tabulka 4 Zprávy vzestupného a sestupného spoje 1030 MHz	39
Tabulka 5 Testy aktivního sledování	59
Tabulka 6 Testy pasivního sledování modelem TCAS	60
Tabulka 7 Konfigurace pro RX pro úlohu verifikace RX-CFG1-VF.....	68
Tabulka 8 Porovnání dostupných položek v nahrávkách EMIT a OpenSky Network	68
Tabulka 9 Seznam konfiguračních položek modelu letadla ACFT	71
Tabulka 10 Seznam konfiguračních položek modelu sekundárního přehledového systému	72
Tabulka 11 Seznam konfiguračních položek modelu jednoduchého přijímače	74
Tabulka 12 Seznam konfiguračních položek simulace	75
Tabulka 13 Popis významu parametrů v srovnávací tabulce pro SSR-CFG.....	76
Tabulka 14 Popis významu parametrů v srovnávací tabulce pro ACFT-CFG.....	76
Tabulka 15 Relativní porovnání jednotlivých konfigurací pro SSR pro celé simulované prostředí.....	77
Tabulka 16 Relativní porovnání jednotlivých konfigurací nastavení hybridního sledování a ADS-B verze.....	77
Tabulka 17 Konfigurace pro SSR pro testování hypotézy H1.	78
Tabulka 18 Konfigurace pro ACFT pro testování hypotézy H1 (2 části).....	79
Tabulka 19 Konfigurace pro RX pro testování hypotézy H1.	79
Tabulka 20 Konfigurace SSR pro testování hypotézy H2 (2 části).....	80
Tabulka 21 Konfigurace ACFT pro testování hypotézy H2.....	81
Tabulka 22 Matice konfiguračních souborů pro testovací případy (TC)	82

Tabulka 23 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 48c229 / ID 142.....	83
Tabulka 24 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 70C0EF / ID 177.....	84
Tabulka 25 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 4BCDA1 / ID 165.....	85
Tabulka 26 Testovací scénář pro H1	87
Tabulka 27 Testovací scénář pro H2	89
Tabulka 28 Položky obsažené v záznamech dotazů (UF) a odpovědí (DF)	92
Tabulka 29 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost dotazů a odpovědí.....	94
Tabulka 30 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=4 a DF=4.....	95
Tabulka 31 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=5 a DF=5.....	96
Tabulka 32 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=4 Comm-B a DF=20.97	
Tabulka 33 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=5 a DF=21	98
Tabulka 34 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF= 11 All-Call a DF=11 All-call	99
Tabulka 35 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=0 a DF=0.....	100
Tabulka 36 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=16 a DF=16.....	101
Tabulka 37 Korelační matice a p-value matice pro proměnné T, F, G, a I.....	111
Tabulka 38 Chyba odhad původního množství zpráv u prvního vzorku dat	111
Tabulka 39 Chyba odhadu původního množství zpráv u druhého vzorku dat	112
Tabulka 40 Chyba odhadu původního množství zpráv u třetího vzorku dat.....	112
Tabulka 41 Typové parametry SSR pro TC1	124
Tabulka 42 Typové parametry SSR pro TC1 (pokračování).....	124
Tabulka 43 Typové parametry SSR pro TC3 (pokračování).....	125
Tabulka 44 Typové parametry SSR pro TC3 (pokračování).....	125

Zkratky

ACAS	Palubní protisrážkový systém	Airborne Collision Avoidance System
ACFT	Model letadla	Aircraft Model
ACQS	Model jednotky Acquisition Squitter	Acquisition Squitter Model
ADS-B	Automatické závislé sledování – vysílání	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
ANSP	Poskytovatel letových navigačních služeb	Air Navigation Service Provider
AS	---	Acquisition Squitter
ATC	Řízení letového provozu	Air Traffic Control
ATL	Skutečná úroveň spouštění	Actual Triggering Level
BDS	Binární datové pole	Binary Data Store
CAS	Protisrážkový systém	Collision avoidance system
CFG	Konfigurace	Configuration
CIR	Konstantní dotazování	Constant Interrogation Rate
COMM-B	Zprávy typu Comm-B	Comm-B message types
CRC	Cyklický redundantní součet	Cyclic redundancy check
dBW	Decibel-Watt	Decibel-Watt
DEAD	Stav potlačení	Deadtime
EASA	Agentura pro bezpečnost letectví Evropské Unie	European Union Aviation Safety Agency
ES	---	Extended Squitter
EMIT	Evropský monitoring dotazovačů a odpovídačů	European Monitoring of Interrogators and Transponders
FAIL	Chybový stav	Fail
FIR	Letová informační oblast	Flight Information Region
FL	Letová hladina	Flight Level
FRUIT	---	False Replies Unsynchronised to Interrogator Transmissions
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	International Civil Aviation Organization
IDLE	Stav nečinnosti	Idle
IFF		Identification Friend or Foe
II	Identifikátor dotazovače	Interrogator Identifier
LKAA	Vzdušný prostor ČR	Czech Airspace
LOGS	Záznamový modul	Logs Modul
MHz	Megahertz	Megahertz
MLAT	Multilaterace	Multilateration

MOPS	Standard minimální provozní výkonnosti	Minimum Operational Performance Standards
MSG	Zpráva	Message
MSRX	Mode S přijímač	Mode S receiver
MSSR	Monopulzní sekundární radar	Monopulse Secondary Surveillance Radar
MTL	Minimální spouštěcí úroveň	Minimum Triggering Level
NM	Námořní míle	Nautical Mile
OOP	Objektový přístup programování	Object-oriented Programming
PROC	Stav zpracování	Processing
RA	Rada k vyhnutí se srážce	Resolution Advisory
RECOV	Stav obnovy	Recovery
RECV	Stav příjmu	Receiving
RF	Radiofrekvenční	Radiofrequency
RX	Jednoduchý přijímač	Receiver
ŘLP	Řízení letového provozu	Air Traffic Control
RNAV	Prostorová navigace	Aera Navigation
RNP	Požadovaná navigační výkonnost	Required Navigation Performance
RWY	Dráha	Runway
SI	Identifikátor přehledového systému	Suri
SIEM	Model prostředí SSR	SSR/IFF Environment Model
SISSIM	Simulátor SSR	SSR IFF System Simulator
SLS	Potlačení bočního laloku	Side Lobe Suppression
SMOD	Korekční parametr pro mírně sbíhavé tratě	---
SSR	Sekundární radar	Secondary surveillance radar
STCA	Krátkodobé varování před konflikty	Short-term conflict alert
TA	Informace o provozu	Traffic Advisory
TCAS	Palubní protisrážkový systém	Traffic collision avoidance system
TOA	Čas přiletu	Time of arrival
TRNS	Stav vysílání	Transmission
UF/DF MSG	Zprávy vzestupného a sestupného spoje	Uplink/Downlink messages
μs	mikrosekunda	microsecond
UTC	Universální koordinovaný čas	Coordinated Universal Time
VF	Verifikace	Verification
WGS	Světový geodetický systém	World Geodetic System
XDPR	Palubní Mode S odpovídače	Transponder

Úvod

Kooperativní přehledové systémy představují v současnosti nezbytnou technologii využívanou v civilním letectví, bez níž by nebylo možné zachovat bezpečnost ani efektivitu civilní letecké dopravy při jejím neustálém nárůstu. Množství sdílených informací po rádiové frekvenci (RF) mezi letadly, a mezi letadly a přehledovou pozemní infrastrukturou má rostoucí tendenci, jelikož dochází k výměně nejen aktuálních letových informací, ale i budoucích záměrů ve vedení letu a dalších informací např. snímaných meteorologických informací. Nicméně s navyšováním přenosů dochází k saturaci RF pásem a tím k výrazné degradaci výkonosti těchto systémů, které v konečném důsledku může vést až k jeho dočasnému výpadku. Z hlediska vysokých nároků na bezpečnost provozu je balancování na hranici takové hrozby nepřijatelné. Jedná se proto o velmi aktuální problém v evropském, ale i celosvětovém měřítku.

Omezení výkonosti přehledových systému plyne především z velkého množství zpráv přenášených na RF 1030/1090 MHz. Na výstupu z dekodéru (přijímače) se tím zvyšuje pravděpodobnost, že bude zpráva přijata zkomolená a identifikována jako chybná prostřednictvím CRC algoritmu. Výše uvedená radiofrekvenční pásma jsou totiž mezi různými přehledovými systémy sdíleny náhodně, a tedy přenášené zprávy se mohou na příjmu překrývat, což následně způsobuje chyby v dekódování jejich obsahu. S narůstajícím provozem je tento problém mnohem závažnější. Mnoho zpráv musí být opakovaně přenášeno, což má za následek vznik dalšího negativního zatížení RF pásem. Podobně je i zaneprázdnění palubního odpovídače důvodem pro opakování dotazu. Problém může za určitých podmínek překročit hranici, kdy se systém stává nepoužitelný.

Při přetížení rádiové frekvence může dojít ke ztrátě přehledové informace o letadlech, jelikož pokud jsou odpovídače předotazovány, dochází k jejich zablokování. Z pohledu kritických aplikací, které jsou založeny na využívání kooperativních přehledových systémů v současné civilní letecké dopravě, je popsany problém zcela neakceptovatelný a měl by být předmětem výzkumu.

Stále se tak ukazuje jako nutné vytvořit kvalitní model, který umí simulovat interakce v rámci daného prostředí a popsat jeho charakteristiky. V současnosti národní poskytovatelé letových navigačních služeb nedisponují nástrojem, kterým by mohli v závislosti na zatížení hodnotit aktuální výkonnostní parametry

přehledového systému v oblastech, které spravují. Postrádají tak aparát, pomocí něhož by bylo možné řídit rizika plynoucí z přetížení komunikačních spojů. Model by zároveň mohl být použit v aplikacích souvisejících s hodnocením dopadu zavedení nových kooperativních technologií nejen ze strany poskytovatelů letových navigačních služeb, ale i ze strany firem, které se zabývají vývojem těchto systémů.

1 Současný stav řešeného problému

Omezení výkonnosti přehledových systémů plyne z velkého množství zpráv přenášených na radiofrekvenčním (RF) pásmu 1030/1090 MHz. Výše uvedená radiofrekvenční pásma jsou totiž přehledovými systémy využívána nezávisle, čímž může docházet k vzájemnému překrytí zpráv od různých zdrojů na straně příjmu. Tím roste pravděpodobnost, že bude zpráva přijata zkomolená a identifikována jako chybná prostřednictvím CRC algoritmu. S narůstajícím provozem se tento jev stává z pohledu přenosů frekventovanější, a tedy i závažnější. Množství zpráv, ať už dotazů či odpovědí, musí být opakovaně vysíláno, což má za následek vznik dalšího negativního zatížení RF pásem [4–6].

Palubní odpovídače jsou v takovém případě vystaveny vysokému toku dotazů, v důsledku čehož se zvyšuje jejich zaneprázdnění. V krajním případě, kdy dojde k tzv. předotazování, přepne odpovídač dočasně do neaktivního stavu, aby nedošlo k jeho fyzickému poškození vlivem přehřátí. Tím dojde ke ztrátě přehledové informace o letadle v rámci kooperativního sledování [2, 7].

Výpadek odpovídače a tím i přehledové informace v přetíženém prostředí může nastat u jednoho, ale i více letadel. Je nutné zdůraznit, že v takové situaci jsou bezpečnostní systémy založené na kooperativním sledování neúčinné (především palubní protisrážkový systém ACAS). Jak vyplývá z návrhu kooperativních technologií, ani množství dostupných dotazovačů monitorující danou oblast nemůže nijak situaci ovlivnit, selže-li odpovídač. Taková situace představuje zvýšenou zátěž na řídicího z důvodu snížení jeho situačního povědomí, přechod na procedurální řízení/hlasový reporting, a též výrazně sníženou schopnost poskytování taktických informací. Řídicí je v takové situaci odkázán pouze detekci cíle primárními přehledovými radary.

Selhání odpovídače vyvolané zatížením přenosového prostředí je velmi závažným problémem ve srovnání s individuálními technickými závadami, jelikož postihuje správně fungující zařízení. Z pohledu kritických aplikací, které jsou založeny na využívání kooperativních přehledových zařízení v současné letecké dopravě, je znalost a popis zatížení RF pásem, přenosových limitů, ale i predikce pro různé scénáře potřebná.

1.1 Analýza dopadů selhání odpovídače

Organizace EUROCONTROL v roce 2014 zveřejnila studii zaměřující se na rizika plynoucí z provozu bez odpovídače nebo s nefunkčním odpovídačem [8]. Analýza byla provedena ve spolupráci se zástupci národních poskytovatelů letových navigačních služeb a jejím cílem bylo ohodnotit rizika s ohledem na existující pomocné nástroje používané v řízení letového provozu a posoudit jejich účinnost, modifikace či zavedení nových. Dokument tímto reagoval na jednu z pěti nejvyšších provozních priorit pro rok 2013 (Top 5 Network Manager operational safety priorities), které definoval EUROCONTROL. Tyto priority byly shledány jako aktuální i v následujících letech. Jedná se o:

- Rizika provozu bez odpovídače nebo s nefunkčním odpovídačem
- Přistání bez povolení řídicího letového provozu
- Detekce obsazené RWY
- „Slepé místo“ – neúčinná detekce konfliktu s nejbližším letadlem (ztráta rozestupů)
- Detekce konfliktu na rozhraní sektorů

Nesprávné fungování palubního odpovídače je možné rozdělit do 4 kategorií.

- Úplné selhání odpovídače
- Poškození módu A
- Poškození módu C
- Duplikátní Mode S 24-bitová ICAO adresa

Ačkoliv se studie EUROCONTROLU nezabývá příčinami dysfunkce odpovídačů, může nám poskytnout odborné posouzení důsledků. V souvislosti s možným selháním odpovídače vlivem jeho přetížení v saturovaném RF prostředí, je pro naše pochopení důsledku relevantní kategorie „úplného selhání odpovídače“.

V prvním přiblížení jsou identifikované důsledky na úrovni jednotlivých nástrojů řídicího letového provozu vrstev [8] zobrazené v Tabulka 1.

Tabulka 1 Analýza dopadů úplného selhání palubního odpovídače na výkon funkce řídicího letového provozu (zdroj: [8])

Fáze řízení letového provozu	Důsledky úplného selhání odpovídače
Taktické řízení	Nástroje řídicího – Nedostupnost sekundární přehledové informace způsobí nefunkčnost všech nástrojů pracujících s těmito

	<p>daty. Dotčeny budou například nástroje kontrolující shodu s letovým plánem a jeho dodržování z pohledu trati i výšky.</p> <p>Řídicí letového provozu – Schopnost řídicího letového provozu vydávat letová povolení a poskytovat instrukce na taktické úrovni bude značně snížena. To je dáno ztrátou komunikace s odpovídačem letadla, v důsledku čehož není k dispozici přehledová informace obsahující především track, výšku a identifikaci letu. To vede k zvýšení pracovní zátěže řídicího, jelikož je nutné řídit letadlo postižené selháním odpovídače procedurálně. Dalším rizikem je velmi omezená možnost detekce letadla, nejsou-li procedury na předávání letadel mezi sektory účinné.</p>
ATC protisrážkový systém	<p>Pozemní bezpečnostní síť – Bez aktualizované informace od odpovídače letadla jsou tyto síť nefunkční. Nebude vydána žádná výstraha.</p> <p>Řídicí letového provozu – Schopnost řídicího poskytnout pokyny k odvrácení srážky letadel bude výrazně snížena vlivem ztráty tracku a parametrů letu, která jsou za normálních podmínek uváděny v tzv. labelu (štítek s doplňujícími informacemi k cíli). Tato pomocná vrstva bude z pohledu pracoviště řízení letového provozu téměř neúčinná. V této fázi je možné použít pouze hlasové hlášení a procedurální udělování povolení jako např. nestoupat, povoleno stoupat do letové hladiny atd.</p>
Palubní protisrážkový systém	<p>Palubní systémy – ACAS a jiné protisrážkové systémy (CAS) nebudou při selhání odpovídače letadla nebo narušitele schopny detekovat možnou kolizi. Systémy neposkytnou ani TA, ani nevydají RA.</p>

Téměř všechny pomocné nástroje zvyšující v dnešním leteckém provozu řízení efektivity jsou závislé na výměně dat s palubním odpovídačem. V případě jeho selhání dochází k degradaci řízení letového provozu na úroveň primární přehledové informace a/nebo procedurálního řízení. Jinými slovy lze říci, že současně používané pomocné nástroje jsou založeny převážně na kooperativní přehledové technologii, a proto jsou nefunkční v případě selhání datové komunikace [1, 2, 8].

Operační studie EUROCONTROLU [8] dále uvádí možnosti, kterými lze negativní dopady úplného selhání palubního odpovídače zmírnit či eliminovat (viz Tabulku 2).

Tabulka 2 Ukázka možností zmírnění dopadů úplného selhání odpovídače (zdroj: [8])

Fáze řízení letového provozu	Posílení existujících postupů	Existující a nové postupy
Uspořádání letového provozu a strategické plánování	MB04: Uplatňování procedury pro kontrolu funkčnosti odpovídače při prvním radarovém kontaktu	MB01: Systematické, a z pohledu separací nekonfliktní, navržené letových tratí RNAV/RNP MB02: Procedury pro případ selhání odpovídače MB03: Účinné nástroje pro upozornění řídicího na ztrátu tracku, odchýlení od letového plánu
Řízení kapacity prostoru	N/A	MB08: Plánování kapacity sektoru zajistí, že řídicí dokáže bezpečně zvládnout daný počet letadel, dojde-li k selhání jednoho či více odpovídačů letadel v daném sektoru
Plánování a koordinace provozu	MB09: Efektivnější práce s letovým plánem a jeho údaji	MB10: Použití hlasové komunikace a hlášení v souvislosti s letadlem, ale i s předáním mezi sektory Upozornění řídicího při změně statusu tracku (zahrnuje i ztrátu tracku)
Taktické řízení	MB12: Pravidelné skenování obrazovky pro řídicím za účelem odhalení ztráty sekundární přehledové informace MB13: Souběžné používání primární přehledové informace MB15: Posílení Fail-safe indikace odpovídače pro lepší detekci selhání posádkou	MB14: Upozornění řídicího při změně statusu tracku (zahrnuje i ztrátu tracku) MB10: Použití hlasového hlášení
ATC protisrážkový systém	N/A	MB16: Zabránění srážce letadel pomocí procedurálního řízení (vertikální rozstup je zajištěn na základě hlasového hlášení výšky posádkou letadla)
Palubní protisrážkový systém	N/A	MB19: Uplatňování praktiky „See and Avoid“ podporované instrukcemi výkonného řídicího.

Z pohledu navržených opatření je zřejmé, že udržet kvalitu provozu na stejné úrovni i v případě selhání kooperativních systémů je velmi náročné. Je to za cenu postupů, které zvyšují vytížení řídicích a pilotů. Jiné preventivně omezují využitelnou kapacitu vzdušného prostoru.

Například vrstva MB01 přispívá k zmírnění dopadů při ztrátě odpovídače, nicméně její aplikace představuje protichůdný krok například ke konceptu Free Flight, který je považován za budoucnost ve vedení letů. Podobně vrstva MB08 může zapříčinit snížení kapacity sektoru. Je tedy zřejmé, že fungující kooperativní

přehledové systémy umožňují zvládat rostoucí množství letadel v daném čase. To ovšem pouze za předpokladu, že pracují správně. V případě selhání kooperativního sledování zatím neexistuje paralelní technologické řešení, které by zabránilo v degradaci situačního povědomí.

Samozřejmě další navržené postupy toto provázání nutně nemají a vznášejí požadavky na technologická vylepšení, důkladné proškolení a trénink řídicích a pilotů, a nutné procedury ke zvládnutí kritické situace.

Závěr studie pro případ úplného výpadku odpovídače označil jako neúčinnější postupy MB03 (účinné nástroje pro upozornění řídicího na ztrátu tracku, odchýlení od letového plánu) a MB10 (hlasové hlášení) [8].

Studie dále doporučila přezkoumání dalších existujících funkčních vrstev, a to především s ohledem na primární přehledové radary, které představují velmi účinnou bariéru při těchto kritických situacích. Právě jejich stav má být předmětem zkoumání, jelikož v posledních letech bylo mnoho primárních radarů, především traťových, postaveno mimo provoz. V tomto směru je také posuzována možnost sdílení radarových dat s vojenskými složkami.

Výše zmíněné hodnocení popisovalo selhání fungování jednoho letadlového odpovídače. V případě výpadku více zařízení v sektoru vlivem jejich přetížení v saturovaném RF prostředí lze přirovnat situaci k selhání pomocných nástrojů na úrovni každého prvku a ke znásobení negativních dopadů provozu.

1.2 Ztráta přehledové informace vlivem přetížení odpovídačů

Totální výpadek odpovídačů vlivem přetížení prostředí kooperativních přehledových systémů není v evropském vzdušeném prostoru pouze teoretickým rizikem. Dne 5. a 10. června 2014 postihla střediska řízení letového provozu ve Vídni, Praze, Bratislavě, Karlsruhe, Varšavě a Budapešti ztráta přehledové informace. Ačkoliv se výpadek přehledových dat netýkal všech letadel v postižené oblasti, ale pouze určité části tohoto provozu, poukázal incident na slabinu kooperativní přehledové infrastruktury, která je závislá na správném fungování odpovídačů. Navrácení do normálního stavu, tj. do obnovení všech tracků, proběhlo u jednotlivých letadel v rozmezí dvou až 20 minut [2, 3].

Během doby, kdy došlo k částečné až úplné ztrátě přehledových informací, byli řídicí vystaveni vysoké pracovní zátěži. Nejenže došlo k výrazné degradaci jejich

situačního povědomí, ale u dotčených letů nebylo možné získat podporu ze strany ochranných funkcí STCA či ACAS. Sekundárními důsledky výpadku bylo snížení kapacity postižených sektorů, změny toků a zpoždění letů.

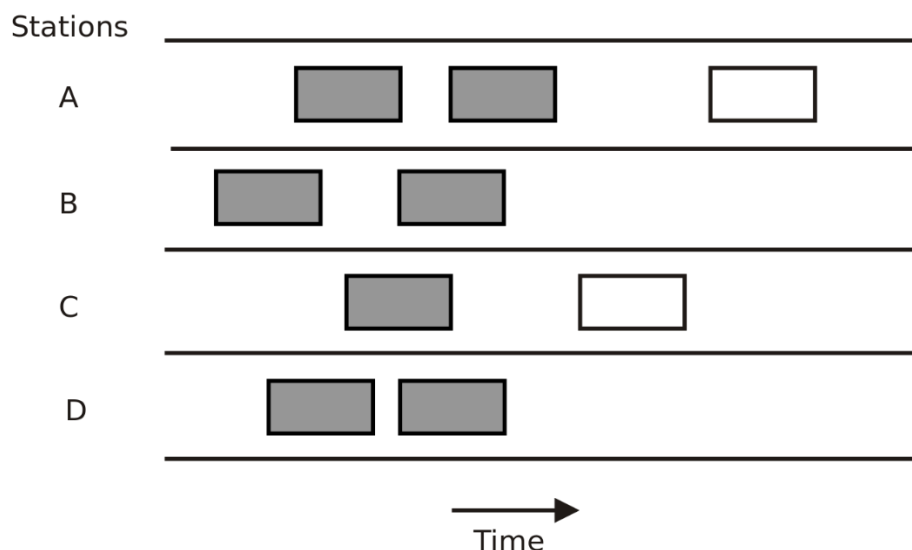
Vyšetřování tohoto incidentu, které provedla EASA společně s EUROCONTROLEM a národními poskytovateli leteckých navigačních služeb, označilo za příčinu výpadku odpovídačů jejich předotazování na RF 1030 MHz. Závěr zprávy označil za pravděpodobný zdroj interference a navýšení přenosů na vzestupném spoji činnost testovacího radaru v nestandardním operačním módu. Umístění tohoto zařízení bylo určeno na oblast jihovýchodně od Prahy v okruhu 60 NM. Zároveň bylo vyloučeno, že by byl incident způsoben vojenskou činností, meteorologickým nebo jiným přírodním jevem [2].

Vyšetřování též poukázalo, že v oblasti, která byla postižena výpadkem, je obecně velké množství dotazovacích technologií a že se i za průměrných podmínek pohybuje zatížení RF 1030 MHz až na 80 % celkové kapacity. Z toho lze usuzovat, že k překročení hranice stability kooperativních systémů nemusí být pouze v budoucnu natolik vzácné [3].

1.3 Využití 1030/1090 MHz

Propustnost RF pásem není neomezená a při určité aproximaci ji lze vyjádřit matematicky. Tento přístup použila společnost BOEING pro zhodnocení zatížení pásma 1030 MHz ve Spojených státech. Práce měla poskytnout poklady pro získání povolení na instalaci a provoz vlastního sekundárního radaru, jelikož bylo dlouhodobě blokováno právě regulačními předpisy stanovených pro ochranu těchto pásem [9].

Představíme-li si zprávy přicházející vybraný přijímač, existuje pravděpodobnost, že dvě či více zpráv od různých zařízení přijdou ve stejném okamžiku. To znamená, že v okamžiku, kdy je čtena jedna zpráva, přijde zpráva jiná, čímž dojde k překrytí jejich obsahu (tzv. garbling, viz Obrázek 1). V důsledku toho může být obsah zpráv, které takto kolidovaly, poničen. Navíc, není-li přijata odpověď, opakuje zařízení opět svůj dotaz, dokud není úspěšné.



Obrázek 1 Naznačení překrytí zpráv z různých zdrojů v časové oblasti.

Protokol vysílání, který je založen na nekoordinovaném vysílání jednotlivých prvků, je nazýván PURE ALOHA protokol. Často se je využíván pro popis přenosů packetů v bezdrátových sítích atd. Zmíněná analýza pro BOEING aplikovala tento model pro popis přenosů zpráv na RF 1030/1090 MHz.

Pure ALOHA protokol umožňuje zhodnotit propustnost pásma, nicméně je nutné určitě zobecnění. Zmíněné zjednodušení spočívá v určení převládající délky zpráv přenášených na vybraném spoji.

Nechť M je počet zpráv za 1 sekundu, jejichž intenzita je nad zvoleným prahem šumu. Proměnná L je pak časová délka jedné zprávy. Součinem těchto hodnot získáme tzv. Timeline occupancy označený písmenem G (výraz 1). Tento parametr v podstatě vyjadřuje časovou délku rámce, který by byl tvořen daným počtem zpráv poskládaných na časové ose za sebou.

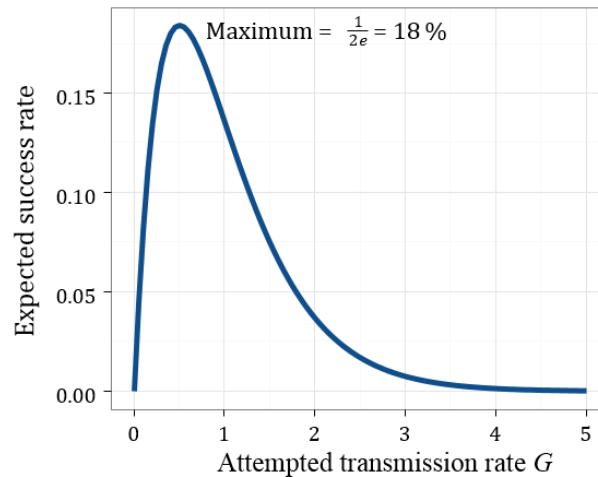
$$G = M \cdot L \quad (1)$$

Bude-li v prostředí vysílán tok zpráv G , tok úspěšně přijatých zpráv (propustnost při daném G) bude roven hodnotě S (výraz 2).

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (2)$$

Matematická závislost mezi parametrem G a S je zobrazen na Obrázku 2. Charakteristickým znakem této funkce je maximum pro hodnotu $G=0.5$, kdy je

$S=18\%$. Za těchto přenosových podmínek bude dosažen největší tok úspěšně dekódovaných zpráv. Při dalším zvyšování vysílání dochází již k poklesu počtu zpráv, které jsou úspěšně dekódovány. Zvážíme-li skutečnost, že dotazovač opakuje svůj dotaz v případě neúspěchu a tím ještě více zvyšuje hodnotu G , lze toto maximum vnímat jako bod mezi stabilitou a nestabilitou přenosového prostředí.



Obrázek 2 Propustnost pásma: vodorovná osa G , svislá S [10]

Tato studie ukázala mimo jiné, že zatížení 1030/1090 MHz je aktuální nejen v Evropě, ale i ve Spojených státech a matematicky dokazuje existenci maximální propustnosti. Zároveň představuje kvalitní nástroj pro rychlý odhad propustnosti pásma. Nevýhodou tohoto přístupu je ovšem nemožnost posoudit vliv jednotlivých prvků na zatížení a nutnost zvolit jednotnou délku zprávy. To může být překážkou pro kvalitní posouzení komplexního prostředí kooperativních přehledových systémů touto metodou.

1.4 Současná výzkumná řešení definovaného problému

Zatížení pásma 1030/1090 MHz byla v posledních letech a v současné době stále je věnována pozornost. Primárně se danou otázkou zabývá výzkumné centrum společnosti EUROCONTROL, lze však nalézt i několik dalších týmů, které problematiku řeší. Hlavní zaměření je možné nalézt v oblasti snahy o zjištění zatížení pásma 1030/1090 MHz pomocí měření aktuálního počtu vysílaných zpráv. Tento přístup je podporován organizací EUROCONTROL a jejím evropským monitoringem dotazovačů a odpovídačů EMIT (European Monitoring of Interrogators and Transponders). Jedná se o centralizovaný monitorovací systém,

který prostřednictvím sítě přijímačů dokáže nepřetržitě poskytovat údaje o přenosech na 1030/1090 MHz a tím o aktuálním zatížení pásma [20, 21]. Výzkumné otázky vztažené ke snaze o zvýšení kapacity pásma 1030/1090 MHz, či v kontextu zatížení tohoto pásma jsou řešeny následovně:

- Metody měření a odhadů zatížení 1030/1090 MHz v reálném prostředí:
 - Rekonstrukce přenosů z geograficky distribuovaných přijímačů [22]
 - Analýzy zatížení a jammingu spektra [23, 24],
 - Redukce ztrát při měření použitím degarblovacích technik [25],
- Modelovací přístupy pro odhad přenosů na 1030/1090 MHz:
 - statistický model [20] a
 - dynamický model [20].
- Laboratorní testování pro popis chování prostředí:
 - simulace interferenčních signálů [26],
 - emulace signálového prostředí [27].
- Metody sledování kooperativních cílů a návrh pozemní přehledové infrastruktury:
 - Dynamické přizpůsobení výkonu, hybridní techniky sledování, směrové dotazování [28].
- Dopady integrace dalšího ADS-B provozu při stávajících limitech [29].
- Indikátory okamžitého stavu nebo kvality přenosového prostředí [30].

1.5 Potřeba řešení kapacity pásma 1030/1090MHz

Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA) vydala pro oblast 1030/1090MHz 7 doporučení s vysokou a 4 doporučení se střední prioritou. S odkazem na Nařízení (EU) č. 1207/2011 [16] připomenula a zdůraznila povinnost členských států chránit přenosová spektra 1030/1090 MHz. To v praxi znamená, že členské státy musí regulovat množství vysílání dotazů ve svém vzdušném prostoru z pozemních zařízení lokalizovaných na jejich území tak, aby množství vyžádaných odpovědí na jednom odpovídáči nepřekročilo limit stanovený v dokumentu Minimum Operational Performance Standards [2].

Regulaci zatížení RF přenosového prostředí používaného kooperativními přehledovými systémy na úrovni členských států lze vnímat spíše jako preventivní strategické opatření, jelikož se jedná udržování rádiových přenosů na co nejmenší možné hodnotě. Kritická hodnota zatížení například pro průměrný provoz v dané

oblasti je ovšem neznámým parametrem. Chybí zde nástroje, které by dokázaly v závislosti na zatížení přenosových pásem hodnotit výkonnostní parametry kooperativních systémů, a proto není možné kvalitně řídit rizika plynoucí z přetížení komunikačních spojů.

Zdrojem pro dat pro analýzu zatížení RF 1090 MHz mohou být např. měřicí lety, které provádí organizace EUROCONTROL v rámci evropského vzdušného prostoru. Výhodou tohoto postupu je získání reálných hodnot popisující množství přenosů na sestupném spoje v dané oblasti, nicméně tato měření jsou prováděna pouze v omezeném rozsahu, jelikož jsou technicky náročná a finančně nákladná. Takto získaná data ovšem podléhají aktuální provozní situaci, což může při malém množství měřících vzorků komplikovat pochopení potřebných závislostí k efektivní ochraně RF pásma před přetížením a při predikování budoucích scénářů. Subjekty, jichž se týká regulace vysílání na 1030/1090 MHz, obecně projevují zájem o detailnější a v častějších intervalech aktualizovanou analýzu pro svůj region, která ovšem nemůže být postihnuta jen na základě měření, které provádí EUROCONTROL [11]. EUROCONTROL zároveň v posledních letech vybudoval síť přijímacích stanic v pásmu 1090 MHz, kterou nazval evropským monitoringem dotazovačů a odpovídačů EMIT. Žádné, z výše zmíněných, však není ideálním řešením.

Vhodným nástrojem pro subjekty, které jsou pověřené regulací zatížení 1030/1090 MHz, by byl počítačový model, který umožní simulovat komunikační vazby mezi prvky v rámci použití kooperativních přehledových zařízení a využívat reálných měření pro kvalitní predikci. Takovýto nástroj by mohl sloužit například pro národní poskytovatele letových navigačních služeb nebo firmy, které přehledové systémy vyvíjí.

Modelování přenosového prostředí využívaného přehledovými kooperativními systémy může napomoci k pochopení RF zatížení, přenosových limitů a predikci pro různé scénáře. Na rozdíl o pasivního měření množství přenosu, simulace umí zkoumat chování vybraných prvků. Je nutné zdůraznit, že právě provázanost jednotlivých prvků v rámci komunikace na 1030/1090 MHz může mít na stabilitu přenosového prostředí značný vliv. Lokální přenosové výkyvy mohou snadno šířit přes sousedící prvky do jiné části sítě, kde mohou za určitých podmínek destabilizovat přenosy a dále zesílit. Právě kvalitní model, který zahrnuje kritické

vazby mezi prvky, může být použit v aplikacích souvisejících s objasněním výkonnostních omezení a hodnocení dopadu zavedení nových kooperativních technologií nejen ze strany poskytovatelů letových navigačních služeb, ale i ze strany firem, které se zabývají vývojem těchto systémů kooperativních přehledových systémů.

Vývoj kooperativních přehledových zařízení je historicky definován požadavkem na zpětnou kompatibilitu, která umožňuje současné použití modernějších zařízení spolu s těmi původními. S ohledem na současný stav poznání (přenosové protokoly, výpočetní výkonnost) se jedná o značné omezení vývoje výrazně sofistikovanějších technologií, které by mohly být šetrnější k využívání přenosových pásem. Dnešní kooperativní systémy jsou v podstatě modifikacemi Mode S technologie, jelikož odklon od této koncepce na celosvětové úrovni by si vyžádal neúměrné finanční náklady neakceptovatelné pro celou leteckou komunitu.

Se zaváděním různých technologií do reálného provozu bylo v posledních třech desetiletích vytvořeno několik modelů, které byly úzce zaměřené, vyvíjeny pro konkrétní zadavatele a sehrály svou úlohu při hodnocení implementace tehdy nových technologií (Mode S, ADS-B). Kromě modelů, které byly použity ve Spojeném království (SIEM – SSR/IFF Environment Model, 1980) nebo v Německu (SISSIM) pro národní účely, disponoval podobným nástrojem také EUROCONTROL. V rámci dílčích výzkumných aktivit byly vytvořeny i další metody a modely, které se ovšem zpravidla zaměřovaly na velmi specifickou a úzkou část problematiky výměny dat mezi kooperativními zařízeními [12, 13].

Program pro odhad zatížení, který využila organizace EUROCONTROL například v roce 2002 pro simulaci dopadu vysílání Extended Squitter, byl vyvinut na zakázku společností HELIOS a později vylepšen EEC. Model je označen jako Constant Interrogation Rate (CIR), jelikož předpokládá stejný tok dotazů bez ohledu na výšku letadla a je primárně zaměřen na přenosy mezi letadly [14, 15].

Nevýhodou těchto modelů je ovšem jejich neaktuálnost, specifikace jejich výstupů, ale i nedostupnost. Pro správnou predikci stability přenosového prostředí je nutné, aby model navíc simuloval zpětnou vazbu, která představuje tzv. re-interrogation rate (opakování dotazu v důsledku nezískání odpovědi). Předpoklad konstantní hodnoty dotazování totiž neodpovídá charakteristikám,

které jsou získány měřením skutečného prostředí RF 1030/1090 MHz. Proto je využití těchto modelů značně omezeno. V současné době je tak možné pouze využívání historických hodnot reálného letového měření nebo pozemního měření EMIT.

2 Cíl práce

2.1 Cíl práce

Cílem disertační práce je vytvoření softwarového modelu prostředí kooperativních přehledových systémů na úrovni datové komunikace a provedení simulačního experimentu pro zjištění kauzálních vztahů mezi vybranými prvky nebo veličinami. Simulační experiment provedený na modelu prostředí má přispět k hlubšímu poznání a popisu problematiky výkonnosti přehledových systémů v definovaném prostředí. Výkonná část modelu simulující vzájemné komunikační interakce mezi prvky dle dostupných technických specifikací bude vytvořena v jazyce C++. Analýza dat a prezentace výstupů bude prováděna v prostředí aplikace MATLAB. Nedílnou součástí je navržení metody měření zatížení sestupného spoje prostřednictvím sítě pozemních komerčně dostupných ADS-B přijímačů, která umožní kalibraci a ověření modelu.

Simulační experimenty budou sloužit k otestování stanovených hypotéz v této disertační práci.

2.2 Výzkumné hypotézy

Zatížení vzestupného a sestupného spoje spolu úzce souvisí, a proto je pro pochopení přenosových souvislostí vhodnější tuto problematiku zkoumat společně a nerozdělovat ji. Pravděpodobnost neúspěšného příjmu dotazu či odpovědi roste s počtem přenosů na RF pásmech, a to samo je důvodem pro další navyšování přenosů. V současném provozu lze sledovat ustálení hodnoty na zvýšené hodnotě, na které pro daný provoz setrvává. Incident v roce 2014 ovšem poukázal na skutečnost, že existují podmínky, za nichž je možné uvést tento systém k nestabilitě. Za daných okolností se přenosy v prostředí neustálí, ale rostou nade všechny meze, což může vést až k přetížení odpovídačů.

V současnosti prováděná měření reálného zatížení RF 1030/1090 MHz umožňují popsat právě ustálenou hodnotu přenosů v daném provozu. Vývoj této hodnoty za jiného provozu (zvýšení počtu letadel, množství vyslýchaných parametrů) ovšem spolehlivě poskytnout nedokáže.

Ve studii vydané organizací EUROCONTROL zabývající se dopadem implementace vysílání Extended Squitteru je uvedeno, že nárůst úrovně celkové interference

na RF 1090 bude pravděpodobně přímo úměrný nárůstu množství letadel [8]. To vyplývá z podstaty vysílání ADSB zpráv, které jsou automaticky vysílány v určených intervalech a nejsou podmíněny dotazem. Otázkou ovšem zůstává, jaká je funkční závislost množství přenosů (či úrovně interference) při určitém počtu letadel, pozemní přehledové infrastruktury, použitých kooperativních přehledových systémech atd.

Pro disertační práci jsou proto definovány tři výzkumné hypotézy:

1. Nárůst celkového množství přenosů na RF 1030 MHz a 1090 MHz není lineární v závislosti na zvýšení počtu letadel ve sledované oblasti.
2. Existuje kritické množství dotazů na RF 1030 MHz, po jehož překročení začne docházet k samovolnému a neomezenému růstu přenosů mezi ovlivněnými systémy na RF 1030/1090 MHz, aniž by se měnily výchozí podmínky.
3. Z úspěšnosti příjmu zpráv Extended Squitteru od jednoho letadla na přijímač lze určit koeficienty pro odhad úspěšnosti příjmu jiných formátů sestupných zpráv přijatých na tento přijímač.

3 Metodika řešení

Disertační práce byla zpracovávána ve 4 základních částech, které na sebe navazují:

1. Návrh a vytvoření softwarového modelu 1030/1090 MHz
2. Konfigurace testovacího prostředí pro simulaci
3. Kalibrace a validace modelu s použitím měření sestupného spoje
4. Testování hypotéz s použitím simulace

Návrh a vytvoření softwarového modelu 1030/1090 MHz

Pro definování softwarového modelu komunikace kooperativních přehledových systémů na úrovni jednotlivých modulů bylo použito modelování skrze formalizaci expertních znalostí pomocí matematických funkcí. Pro simulování přenosů na RF 1030/1090 MHz bylo využito objektově orientované programování ve vývojovém jazyce C/C++. Model bude synchronní s časovým krokováním o velikosti 1 mikrosekundy.

V návrhu modelu byla rozlišena a určena základní množina objektů v modelu (reálných i abstraktních), tj. např. model odpovídače, přenosového prostředí, funkce ACAS a ADS-B. Tato část zahrnovala analýzu stavů, přechodů, parametrů a rozhraní jednotlivých objektů tak, aby bylo možné vytvořit návrh relevantních tříd a metod v C/C++.

Třídy a jejich instance odráží reálná zařízení, ale i např. charakteristiky přenosového spektra, kde se jedná především o vytvoření třídy pro abstraktní předlohu. Modulární členění modelu dále umožňuje snazší modifikaci jednotlivých částí a redukuje riziko narušení integrity ve všech jeho částech. Pro efektivnější analýzu výsledků bylo vytvořeno rozhraní s platformou MATLAB na úrovni dat.

Počítačový model složený z jednotlivých modulů simuluje fungování a interakce systémů pracujících na 1030/1090 MHz. Podmínky vysílání mezi zařízeními byly do matematického popisu odvozeny z technických specifikací zařízení a současných leteckých předpisů. Simulace zahrne sekundární přehledové radary A/C/S, palubní odpovídače Mode S, systém TCAS a technologii ADS-B. Model simuluje automatické vysílání i vazbu dotaz-odpověď s ohledem na aktuální podmínky ve virtuálním prostředí a definovaná pravidla, podle nichž zúčastněná zařízení komunikují.

Program nabízí konfigurační soubory pro definování vybraných volitelných parametrů.

Konfigurace testovacího prostředí pro simulaci

V této části bylo nutné do simulačního programu nakonfigurovat virtuální prostředí, tak aby v dostatečné míře odpovídalo vybranému vzdušnému prostoru. V případě této disertační práce byl namodelován vzdušný prostor České republiky. Pro tuto fázi byla shromážděna statistická data o zkoumaném vzdušném segmentu a definovány vstupní parametry modelu. To zahrnuje:

1. Provozní charakteristiku
2. Vybavení letadel v souvislosti s kooperativními přehledovými systémy
3. Pozemní přehledovou infrastrukturu sekundárních radarů

Přesnost a dostupnost vstupních dat je pro model klíčová, a to především v případě kalibrace nebo hodnocení zatížení pro daný region. Nicméně, hledáme-li obecné kritické hodnoty zatížení z pohledu kapacity RF pásem, závislosti počtu přenosů na počtu zúčastněných kooperativních zařízení, či jiné souvislosti vycházející z interakcí, může být simulační prostředí konfigurováno na základě průměrných parametrů vystihující prostředí.

Co se týká definování pozemní sítě dotazovacích zařízení, zde je počítáno s poměrně velkým krytím přehledových radarů, kdy jejich činnost ovlivňuje vzdušný prostor České republiky, přestože jsou umístěné na území jiných států. Proto byla zahrnuta všechna taková zařízení.

Kalibrace a validace modelu s použitím měření sestupného spoje

Implementace vhodné kalibrační procedury využitím reálného měření je realizována přidáním kalibračního modulu spolu s optimální metodou kalibrace.

Nezbytné pro tuto fázi je navržení a vytvoření statické infrastruktury pozemních přijímačů pro měření aktuálních dat souvisejících s množstvím přenášených zpráv na sestupném spoji tj. 1090 MHz. Kromě hardwarového řešení umístění přijímačů, je součástí také softwarové řešení pro fúzování výsledků měření získaných na výstupech jednotlivých přijímačů v terénu, aby bylo možné překonat ztráty plynoucí z překrývání dvou a více zpráv.

Měřená data a z nich plynoucí statistiky jsou používány ke kalibraci a validaci modelu pro prostor České republiky.

Testování hypotéz s použitím simulace

Poslední část modelu je stěžejní pro tuto disertační práci. Ověřený model je použit jako nástroj pro zkoumání zatížení 1030/1090 MHz v závislosti na změnách vstupních parametrů.

3.1 Model

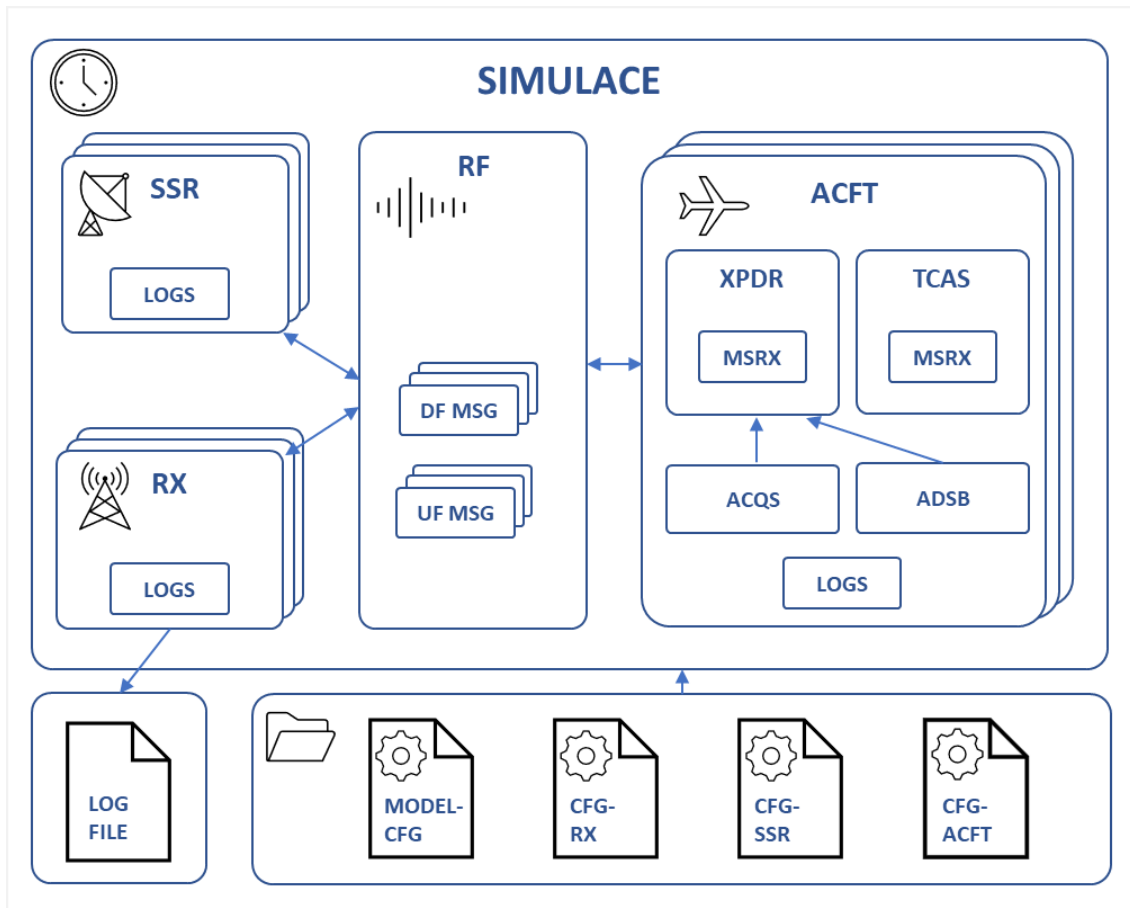
Model pro evaluaci zatížení pásma 1030 MHz a 1090MHz je založen na simulaci přenosů úrovně zpráv v modelovaném signálovém prostředí mezi definovanými jednotlivými elementy dle stanovených pravidel. Tato pravidla postihují například fyzikální omezení pro šíření rádiového signálu v prostoru, funkce kooperativních technologií, včetně technických nebo standardy určených omezení, ale také navozují v modelu princip náhodnosti v těch případech, které nejsou deterministické ani v reálném prostředí.

Model se stanovenou mírou abstrakce reality vytváří prostředí kooperativních technologií, mezi nimiž probíhá datová výměna a které se vzájemně ovlivňují. Jedná se o implementaci formou multiagentního modelu, kde jsou definovány vnější a vnitřní pravidla chování jednotlivých agentů na různé události, a lze sledovat, jak se prvky chovají v každé mikrosekundě. Oproti reálnému prostředí je v modelu možné sledovat větší počet parametrů popisujících stav nebo činnosti prvků či prostředí celkově. Výchozím zdrojem byly technické specifikace přehledových kooperativních zařízení organizací ICAO, EUROCONTROL nebo EUROCAE [17, 18, 19, 20, 21, 31, 34].

Architektura modelu se dělí na dílčí modely, které reprezentují fyzické objekty (letadlo), abstraktní objekty (zprávy), fyzikální vlastnosti (RF prostředí) nebo například komplexnější funkčnosti či technologie (palubní odpovídač). Model zahrnuje všechny elementy, které se v tomto prostředí vyskytují, a je schematicky zobrazen na Obrázku 3. Těmi hlavními jsou:

- Letadla (ACFT)
- Sekundární přehledové systémy (SSR)
- Palubní Mode S odpovídače (XDPR)
- Palubní protisrážkové systémy (TCAS)
- Jednotka ADS-B vysílání (ADSB) vysílání
- Rádiové prostředí 1030/1090 MHz (RF)
- Zprávy vzestupného a sestupného spoje (UF/DF MSG)

Model využívá objektový přístup programování (OOP) jazyka C++ pro provádění simulace a vytvoření základních záznamů (logů). Simulací je myšlen proces, který vnáší do modelu faktor času, v důsledku čehož nastávají interakce mezi elementy v modelované prostředí a realizují se jejich funkce. Krok simulace je zvolen pevně na 1 μ s, naopak délka simulovaného intervalu je konfiguračním parametrem.



Obrázek 3 Blokové schéma modelu

Jednou z výhod OOP využitou v modelu je princip dědičnosti tříd, která nyní i v budoucnu umožní jednotlivé dílčí modely modifikovat a zohlednit tak lepší poznání jejich technických vlastností, nebo definovat více typů (například více typů odpovídačů), při zachování definovaných rozhraní.

Široce je zároveň využit přístup, kdy je jeden objekt přiřazen jako vnitřní atribut objektu jiného a tvoří tak cílovou hierarchii. Příkladem může být vložení objektu palubního odpovídače do objektu letadla. V palubním odpovídači je pak vložen Mode S přijímač, který reprezentuje ohraničenou funkcionalitu spojenou s přijímací částí odpovídače. Letadlo s danou unikátní identifikací a polohou v simulovaném prostoru tvoří letící platformu pro technologie, které jsou mu

přirazeny. Těm už není přiřazena poloha, protože ji přebírají od modelu letadla, se kterým jsou vázány, a naopak parametry související s příjmem signálu nemusí být duplikovány na modelu letadla.

3.1.1 Model rádiového prostředí

Model přenosového prostředí (značen dále RF) zajišťuje šíření a výměnu zpráv mezi elementy simulace s vybranými omezeními, které vychází z podstaty šíření rádiového signálu ve skutečném prostoru. Jednotlivé elementy simulovaného prostředí mezi sebou nemají přímé rozhraní pro předávání zpráv (dotazů a odpovědí), a tato výměna je zajištěna modelem přenosového prostředí.

Model RF poskytuje svému okolí v simulaci tyto funkce:

- Převzetí zpráv z vysílajících elementů E_{Tx}
- Předání zpráv na elementy v prostoru E_{Rx}

Implementace v modelu RF zahrnuje soubor pravidel, která definují způsob, jakým jsou zprávy mezi elementy nacházejícími se v simulačním prostoru prostřednictvím modelu RF předávány. Pravidla předávání zpráv modelem RF jsou realizovány následujícími funkcemi:

- určení příjemců signálu (E_{Rx}),
- vytvoření samostatné zprávy pro každého z příjemců (E_{Rx}),
- určení útlumu signálu v důsledku šíření prostorem,
- určení času příchodu zprávy ke všem přijímajícím elementům (E_{Rx}),
- dočasné uchování zpráv do okamžiku předání na přijímající elementy (E_{Rx}).

V průběhu běhu simulace model RF udržuje v paměti:

- seznam dotazů (vzestupných zpráv) k předání na elementy (E_{Rx})
- seznam odpovědí (sestupných zpráv) k předání na elementy (E_{Rx})
- seznam a komunikační vazby se všemi elementy v simulačním prostředí

Model RF v každém časovém kroku simulace prochází jednotlivě všechny elementy a ověřuje, zda jsou připraveny nové zprávy k převzetí. Je-li připravena nová zpráva k převzetí, odpovídá to situaci, kdy element inicializuje vysílání této zprávy. Model RF nově připravenou zprávu převezme a zajistí její distribuci v prostoru. Tento krok odpovídá šíření elektromagnetického vlnění v prostoru.

Model RF při převzetí nové zprávy od vysílajícího prvku získá také parametry vysílání, na základě rádiového horizontu je určena množina prvků v simulačním

prostoru, ke kterým se zpráva bude v prostředí šířit. Ke každému prvku této množiny je z původní zprávy vytvořena nová, duplikátní zpráva, která je dále upravena na odpovídající úroveň signálu a čas příchodu v závislosti na vzdálenosti mezi vysílajícím a přijímajícím prvkem. Stanovení koncové úrovně signálu zohledňuje případnou směrovost antény a vychází z vyzařovacích diagramů, které jsou součástí konfigurace modelu.

Distribuce zpráv zaručuje, že převzaté zprávy z vysílajících prvků (E_{Tx}) budou předány na jiné elementy v odpovídajícím čase a úrovni signálu. Jak bylo již uvedeno v rámci popisu distribuční funkce, na základě vyzařovacích charakteristik každého elementu je určena úroveň signálu v daném směru, čas příchodu a útlum signálu v důsledku šíření prostorem. Je nutné zdůraznit, že model RF neprovádí distribuci na základě vnitřní adresace zpráv. Zpráva je naopak distribuována na všechny elementy, ke kterým se rádiový signál šíří bez ohledu na to, zda je zpráva těmto elementům adresována nebo nikoliv. To je podstatné pro simulování podmínek v prostředí, v němž je rádiové pásmo sdíleno více uživateli (v tomto případě elementy) a jejich komunikace na úrovni výměny zpráv se může překrývat, nebo si alokovat část kapacity, než je rozhodnuto, že je daná zpráva určena jinému elementu.

Jedná-li se o adresnou zprávu, je identifikace původně adresovaného prvku ponechána. Tím je zachováno, že elementy z množiny, kterým není zpráva určena, nebudou generovat odpověď. Na druhé straně čtení dotazu určenému jinému letadlu zvyšuje zatížení jejich odpovídače a snižuje tím kapacitu odpovídat na jiné dotazy.

V konečné množině přijímajících elementů (E_{Rx}) jsou zařazeny pouze ty elementy, které splnily zároveň obě následující podmínky:

- nacházejí se v takovém směru od antény vysílajícího prvku, který zaručuje příjem signálu nad globálně stanovenou minimální úrovní,
- nacházejí se od vysílajícího elementu v takové vzdálenosti, která je menší nebo rovna maximální rádiové viditelnosti vzhledem k jejich geografické poloze.

Model RF nezohledňuje šíření signálu odrazem a zavádí zjednodušení, že všechny přijímací antény použité na elementech jsou všesměrové.

Čas příchodu zprávy (Time of Arrival, TOA) na daný element je určen ze znalosti času vyslání zprávy z elementu, rychlosti šíření rádiové vlny v atmosféře a vzájemné vzdálenosti vysílajícího elementu a přijímajícího elementu, viz rovnici (3).

$$TOA = t_{tx} + \frac{D_{i,j}}{c} = t_{tx} + \frac{|\vec{r}_{Q_i} - \vec{r}_{Q_j}|}{c} \quad (3)$$

kde:

- TOA ... čas příchodu signálu na přijímající element
- T_{Tx} ... čas vyslání signálu z vysílajícího elementu
- $D_{i,j}$... vzdálenost mezi i-tým a j-tým elementem
- C ... rychlost šíření elektromagnetického vlnění v prostoru
- \vec{r}_{Q_i} ... polohový vektor i-tého elementu
- \vec{r}_{Q_j} ... polohový vektor j-tého elementu

Vypočtený čas TOA je použit jako čas předání zprávy z modelu RF na element E_{Rx} . Do doby předání je dočasně uchován v seznamu zpráv k předání v modelu RF.

V každém časovém kroku simulace projde model RF dočasně uložené zprávy k předání a podle aktuálního času rozhodne, které z nich je nutné předat na přijímající elementy. Takové zprávy model RF předá na odpovídající elementy a odstraní je ze svého seznamu. Tato akce odpovídá situaci, kdy na přijímající element přijde náběžná hrana prvního pulsu zprávy.

Za určitých podmínek může být element zaneprázdněn a přichozí zprávu, kterou mu předává model RF nedokáže přijmout. Toto je v modelu řešeno na straně přijímajícího elementu nikoliv modelu RF. Ten zprávu vždy předá a smaže ze svého seznamu.

Model RF v rámci distribuce zajišťuje výpočet úrovně signálu na straně příjmu. Ten je prováděn na základě znalosti úrovně signálu zprávy na vysílajícím elementu (E_{Tx}) a jeho vzdálenosti od elementu přijímajícího (E_{Tx}).

Pro modelování útlumu signálu v prostoru je použito zjednodušení ve formě Friisovy rovnice (4) a dále rovnice rádiové viditelnosti cíle (5).

$$SPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \frac{4\pi}{c} - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (4)$$

kde:

- d ... vzdálenost mezi anténami
- f ... frekvence

- G_{TX} ... zisk vysílající antény
- G_{RX} ... zisk přijímací antény
- C ... rychlost světla ve vakuu [m/s]

$$D = \sqrt{2 \cdot k \cdot R_e} \cdot (\sqrt{h_{TX}} + \sqrt{h_{RX}}) \quad (5)$$

kde:

- d ... rádiová viditelnost cíle
- k ... konstanta pro šíření rádiových vln v atmosféře (3/4)
- R_e ... poloměr Země
- h_{TX} ... nadmořská výška vysílače
- h_{RX} ... nadmořská výška přijímače

3.1.2 Model Mode S zprávy

V simulaci jsou definovány modely vzestupných a sestupných zpráv, které jsou přenášeny prostřednictvím modelu rádiového prostředí mezi jednotlivými elementy.

Vzestupné zprávy reprezentují zprávy vzestupného spoje 1030 MHz, které jsou v tomto textu zkráceně označovány také jako dotazy. Naopak označení sestupné zprávy je použito pro zprávy sestupného spoje 1090 MHz, v textu též zkráceně označeny jako odpovědi. Dále je rozlišován formát zprávy (například UF=0) a typ zprávy (56 bitové krátké a 112 bitové dlouhé zprávy).

Zvláštním druhem sestupných zpráv jsou zprávy krátkého squitteru (Acquisition Squitter) nebo dlouhého squitteru (Extended Squitter), které nejsou vyvolané dotazem, ale jsou vysílány automaticky.

Prostřednictvím zpráv jsou přenášeny informace mezi odesílatelem a příjemcem nebo adresátem. Rozdíl v označení příjemce nebo adresáta v kontextu modelu je následující:

- Příjemce – element, který přijme zprávu. Nezáleží, zda je elementu zpráva adresována či nikoliv.
- Adresát – element, kterému je zpráva adresována. Případ selektivního dotazování, kdy je v adresném poli určen cíl, kterému je zpráva určena.

S ohledem na modelovací přístup je ve zprávách přenášená zúžená množina informací, které jsou na jedné straně odvozeny ze skutečných parametrů těchto zpráv, na straně druhé jsou přidány parametry, které jsou nutné pro běh simulace nebo vytváření statistik. Tyto jsou sepsány v Tabulce 3. Nicméně základní principem je nevyužívat přidané informace ve prospěch úspěšnosti nebo efektivity komunikace mezi elementy na 1030/1090 MHz.

Tabulka 3 Množina informací přenášených ve zprávách v simulaci

Parametr	Jednotky	Popis	Dotaz	Odpověď
Identifikace odesílatele	-	Jedinečný identifikátor elementu napříč simulací, který zprávu vytvořil.	ANO	ANO
Identifikace adresáta	-	Jedinečný identifikátor elementu napříč simulací, kterému je zpráva adresována. Tento parametr není povinný a může být prázdný.	ANO	ANO
Identifikace dotazovače	-	Jedinečný identifikátor elementu napříč simulací, jehož dotaz vyvolal konkrétní odpověď. Jedná se o pomocný parametr, protože tyto informace právě v reálném prostředí nejsou součástí zpráv.	NE	ANO
Formát zprávy	-	Specifikace formátu zprávy např. UF=11, DF=11, DF=4, apod.	ANO	ANO
Výchozí vysílací výkon	decibel-Watt	Hodnota vysílacího výkonu v dBW k anténě. Definuje se při vysílání a zůstává neměnná i při další distribuci v modelu RF.	ANO	ANO
Aktuální výkon	decibel-Watt	Hodnota výkonu signálu v dBW po započtení útlumu v důsledku šíření. Tato hodnota je vypočtena v modelu RF při výpočtu distribučního seznamu a je specifická pro každého z příjemců.	ANO	ANO
Lock-out řídicí bit	-	Řídicí bit, který aktivuje (L=1) Lock-out na palubním odpovídáči.	ANO	NE

Čas předání zprávy na příjemce	mikrosekunda	Vypočtený čas, kdy má být zpráva předána z modelu RF na přijímající element.	ANO	ANO
Pravděpodobnost odpovědi	-	Parametr, který je použit v technice stochastického dotazování během All-Call periody. Hodnota definuje, s jakou pravděpodobností má být dotaz vygenerován.	ANO	NE
Úroveň pulzu P5	decibel-Watt	Úroveň pulzu P5, která je použita sekundárními radary pro potlačení odpovědí na dotazy, které cíl přijme cestou postranního svazku. V rámci modelu tento signál není přenášen samostatně, ale je vložen mezi parametry vzestupné zprávy.	ANO	NE

Model zprávy představuje statický soubor parametrů, které jsou použity při běhu simulace i statistické účely. Funkce, které jsou v modelu zprávy k dispozici, zajišťují bezpečné nastavení nebo získání hodnot těchto parametrů. Jsou to například funkce umožňující:

- Získat aktuální výkon
- Získat adresáta zprávy
- Získat formát zprávy (viz Tabulka 4)
- Získat čas předání zprávy
- Získat výchozí výkon
- Získat pravděpodobnost vyvolání odpovědi
- Získat odesílatele zprávy
- Získat nastavení lock-out bitu
- Nastavit aktuální výkon
- Nastavit čas předání zprávy
- Nastavit P5 puls pro dotaz postranním svazkem (změní formát)

Modely zpráv mohou být zařazeny do dvou formátů. Krátkými zprávami jsou označeny zprávy o délce 56 bitů, dlouhými zprávy o délce 112 bitů. Délka zprávy ovlivňuje potřebnou dobu na její přečtení přijímacím blokem a jedná se o dobu, během které se může projevit negativně interference s jiným signálem náležející jiné zprávě.

Tabulka 4 Zprávy vzestupného a sestupného spoje 1030 MHz

Zprávy vzestupného spoje 1030 MHz	
Označení	Popis
Uf0	Formát UF=0, zjišťovací dotaz TCAS,
Uf11AllCall	Formát UF=11, všeobecný dotaz v rámci All-Call Mode S Only dotazování
Uf4	Formát UF=4, adresný dotaz iniciující krátkou odpověď DF=4
Uf5	Formát UF=5, adresný dotaz iniciující krátkou odpověď DF=5
Uf4CommB	Formát UF=4, adresný dotaz s Comm-B technikou iniciující dlouhou odpověď DF=20
Uf5CommB	Formát UF=5, adresný dotaz s Comm-B technikou iniciující dlouhou odpověď DF=21
Uf16	Formát UF=16, koordinační dotaz TCAS
Uf20	Formát UF=20, dlouhý adresný dotaz (nepoužit)
Uf21	Formát UF=20, dlouhý adresný dotaz (nepoužit)
UF11AllCallP5	Formát UF=11 s proprietárním příznakem pulzu P5 (All-Call dotaz)
Zprávy sestupného spoje 1090 MHz	
Df0	Formát DF=0, odpověď na sledovací dotaz TCAS
Df11AllCall	Formát DF=11, odpověď na všeobecný All-Call Mode S only dotaz
Df11As	Formát DF=11, automatická zpráva Acquisition Squitter
Df4	Formát DF=4, krátká odpověď na krátký adresný dotaz UF=4
Df5	Formát DF=4, krátká odpověď na krátký adresný dotaz UF=5
Df16	Formát DF=16, odpověď na dotaz TCAS
Df17Es	Formát DF=17, automatická zpráva Extended Squitter
Df20	Formát DF=20, Comm-B odpověď nebo odpověď na UF=20
Df21	Formát DF=21, Comm-B odpověď nebo odpověď na UF=21
NotAMessage	Proprietární formát pro deaktivaci zprávy

3.1.3 Elementy

Datová komunikace v rámci kooperativního sledování je simulována výměnou dat mezi tzv. elementy, které jsou realizací některého z definovaných modelů popsaných v této podkapitole. Modely elementů představují určitou míru abstrakce reálného objektu a/nebo technologie. V rámci objektového programování modely představují třídy, z nichž jsou při simulaci odvozeny jednotlivé instance.

Hlavní modely, včetně zavedených zkratk, jsou následující:

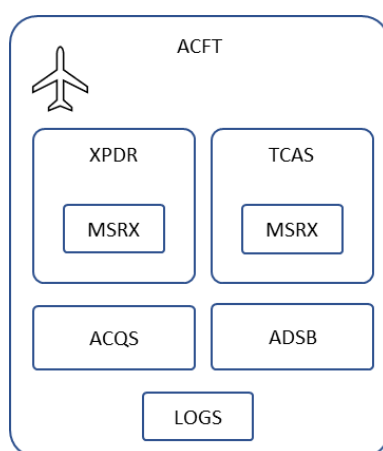
- Model letadla (ACFT)
- Model sekundárního přehledového systému (SSR)
- Model jednoduchého přijímače (RX)
- Model jednotky Acquisition Squitteru (ACQS)
- Model jednotky ADS-B (ADSB)

- Model palubního odpovídače (XPDR)
- Model palubního protisrážkového systému (TCAS)
- Model Mode S přijímače (MSRX)

3.1.3.1 Model letadla

Model letadla ACFT zastupuje zjednodušením reálný objekt letadla. V rámci simulačního prostoru je modelu letadla přiřazena poloha, vektor rychlosti, vysílací a přijímací antény, jsou mu přiřazeny kooperativní technologie zahrnující palubní Mode S odpovídač, který sdílí datovou sběrnici s funkcí Acquisition Squitteru, s protisrážkovým systémem TCAS nebo funkcí Extended Squitteru. Vybavení modelu letadla lze ovlivnit konfiguračně. Z pohledu architektury lze model charakterizovat jako vzdušnou platformu pro jednotlivé modely kooperativních technologií.

Atributy modelu letadla ACFT popisují především jeho polohu v prostoru a vektor pohybu. Model ACFT nemá definován stavový model a jeho funkce jsou zaměřeny na zajištění převzetí zpráv z modelu RF a jejich předání na nesené kooperativní technologie a naopak (viz Obrázek 4).



Obrázek 4 Model letadla jako platforma pro další modely.

Událost příjmu zprávy je vyvolána externě modelem rádiového prostředí RF, který ve vypočteném čase předá zprávu na model letadla, které přesměruje zprávu na základě jejího typu na model palubního odpovídače (v případě vzestupné zprávy) nebo model palubního protisrážkového systému (v případě sestupné zprávy).

Příchozí zpráva je v rámci modelu letadla vždy předána na palubní odpovídač nebo palubní protisrážkový systém bez ohledu na to, zda se tyto technologie nachází ve vnitřním stavu, který umožní příchozí signál přijmout a dekodovat.

Dále je v každém časovém okamžiku simulace ověřováno, zda není na letadle připravena zpráva k vysílání. Protože letadlo nemá vlastnost plánování a přípravy zpráv, je nutné toto ověřit na úrovni jednotlivých modelů spojených s ním jako platformou. Jinými slovy model letadla ověřuje stav vysílání na svém palubním odpovídači, který kromě odpovědí na dotazy také připravuje k vysílání Squittery. Pokud v daný čas dochází k vysílání sestupné zprávy na 1090 MHz, je předána z palubního odpovídače na letadlo, a to jej předá modelu rádiového prostředí. Vysílání zprávy z palubního odpovídače vyvolá související potlačení na letadlové datové sběrnici, která omezí schopnost příjmu jednotky TCAS.

Obdobně je provedeno i ověřování, zda není připraven nový dotaz k vysílání. V tomto případě je stav ověřen na modelu TCAS, který používá dotazy ke sledování okolního provozu a případně koordinaci k vyhnutí se srážce. Připravený dotaz je přes model letadla předán do modelu RF

V každém časovém okamžiku simulace je na modelu letadla vyvolána hlavním simulačním kódem aktualizace stavů. Ta vyvolá:

- aktualizaci stavu palubního odpovídače,
- aktualizaci stavu palubního protisrážkového systému,
- ověření vysílacích plánů Acquisition nebo Extended Squitteru.

U modelu letadla je nezbytné, aby distribuci přijatých zpráv z okolí a přebírání zpráv od jeho vnitřních technologií prováděl dle definovaných pravidel, které vychází z priorit jednotlivých procesů. Zároveň iniciuje aktualizaci vnitřních stavů nesených modelů (XPDR, TCAS, ACQS, ADS-B) a stav společné sběrnice, kterými se řídí vzájemné potlačování modelu XPDR a TCAS.

Současný provoz palubního odpovídače a palubního protisrážkového systému je nutné koordinovat. Zatímco palubní odpovídač přijímá dotazy z okolí a vysílá odpovědi, palubní jednotka protisrážkového systému zpracovává odpovědi z okolí a sama generují dotazy.

Model palubního odpovídače a palubní protisrážkový systém jsou zapojeny do společné letadlové sběrnice. Po této sběrnici mohou oba modely komunikovat a potlačit dočasně činnost druhého.

3.1.3.2 Model sekundární přehledového systému

Model SSR v simulaci představuje činnost sekundárního přehledového systému. Princip sledování cílů v prostoru krytí je založen na vysílání dotazů a příjmu odpovědí, který je prováděn tak, aby docházelo k akvizici nových neznámých cílů a aktualizaci přehledových informací o zavedených a sledovaných cílech. Výchozí technologií, na které budou popsány základní vlastnosti a funkce modelu SSR, je monopolzní sekundární radar (MSSR). Ten využívá ke sledování anténní řadu, která se otáčí rovnoměrně kolem své svislé osy a svou vyzařovací charakteristikou s úzkým hlavním svazkem dotazuje cyklicky cíle v prostoru krytí. Je však nutné podotknout, že možnosti uživatelské konfigurace umožňují upravit model také na sektorový nebo všesměrový dotazovač.

V této podkapitole věnované modelu SSR jsou vysvětleny způsoby implementace následujících oblastí:

- vnitřní stavy a sledovací módy All-Call a Roll-Call,
- všeobecné dotazy a akvizice nového cíle,
- selektivní dotazy a aktualizace sledovaných parametrů,
- vyzařovací charakteristika a oblasti krytí a sledován.

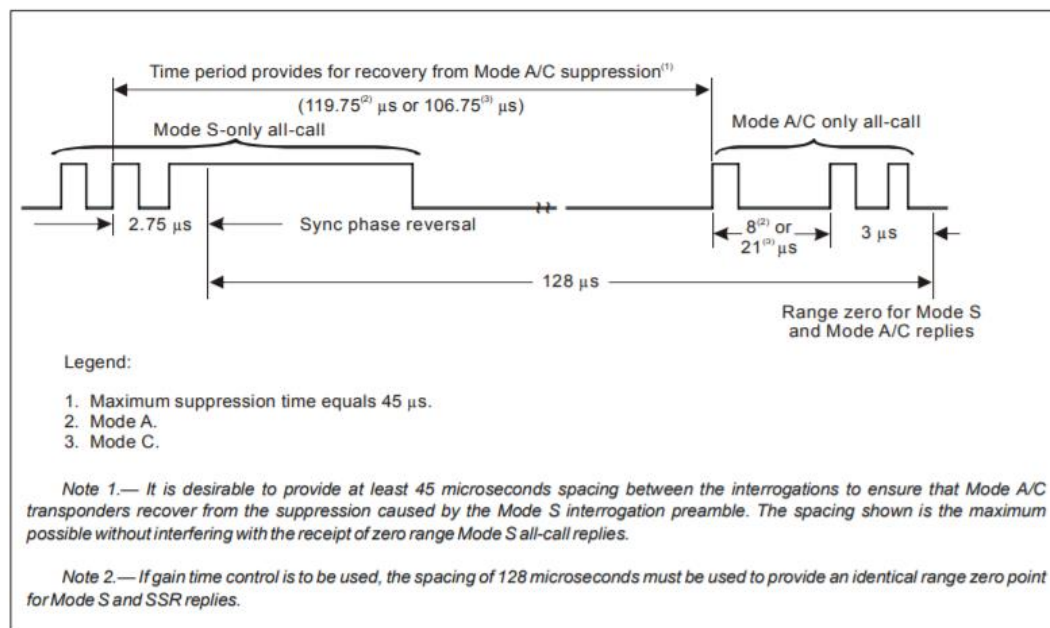
Model SSR má definovanou sadu vnitřních stavů a přechodů mezi nimi, kterými se řídí nebo spouští definované funkce a módy. Pro model je typické, že přechody mezi jeho vnitřními stavy nejsou spouštěny externími událostmi, ale řídí se výhradně časem. Stavový model SSR obsahuje stavy, během nichž probíhá:

- plánování a vysílání všeobecných a selektivních dotazů,
- poslech (příjem) a zpracování sestupných zpráv od cílů.

Každý sledovací mód je rozdělen na část vysílací, během které přehledový systém vysílá dotazy na 1030 MHz dle připraveného dotazovacího plánu, a část přijímací (poslechovou), kdy systém přechází na 1090 MHz pro zachycení odpovědí, které svými dotazy vybudil.

Model SSR současně provádí střídání dvou sledovacích módů, které se označují jako All-Call Perioda a Roll-Call Perioda, které jsou použity s cílem akvizice nových cílů, resp. sledování zavedených cílů. Všeobecné dotazy vysílané v rámci All-Call periody vyvolají u všech letadlech, které přijmou tento dotaz a nejsou proti němu blokovány nebo daný dotaz nepříjde cestou postranního svazku (dle úrovně

pulzu P5), odpověď. Pokud odpověď letadla spadá do oblasti krytí a je úspěšně přijata letadlem, zahrne SSR tento nový cíl do selektivního sledování.

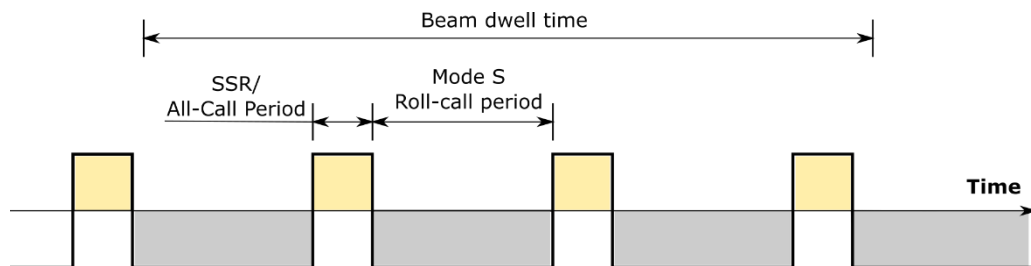


Obrázek 5 Obrázek dotazovacího plánu All-Call periody (zdroj: [34]).

Dotazovací plán All-Call periody je velmi jednoduchý a obsahuje kombinaci All-Call Mode S Only dotaz (dále jen All-Call dotaz), následovaný dotazem Mode A (viz Obrázek 5). Vzhledem ke konceptu celého modelu, je relevantní pouze Mode S komunikace. Po odeslání dotazu přepíná model SSR do stavu příjmu na 1090 MHz a sleduje, které zprávy zachytí v rámci stanovených časových bran. Koncová brána vymezuje délku poslechového stavu a je dána největší vzdáleností, na kterou má být prováděna akvizice.

Za účelem zlepšení rozlišení blízkých cílů při akvizici je namodelován také tzv. stochastický princip dotazování. Ten spočívá v stanovení pravděpodobnosti, s jakou má být všeobecný dotaz zodpovězen. Samozřejmě musí zároveň platit, že byl signál odpovídačem přijat úspěšně a jsou splněny podmínky pro generování odpovědi. Odpovídač v takovém případě načte z dotazu hodnotu pravděpodobnosti a na základě náhodného čísla a této hranice rozhodne, zda vygeneruje odpověď. Tím je zajištěno, že ne všechna letadla, která přijala úspěšně všeobecný dotaz a nacházejí se společně v hlavním svazku radaru odpovědí. Model SSR, resp. konfigurace musí zároveň zohlednit tím, že jsou cíle při přechodu hlavním svazkem dotazovány víckrát, aby od nich byla získána alespoň jedna odpověď, která umožní jejich akvizici.

Opakování All-Call periody je stanoveno konfiguračním parametrem, který vyjadřuje frekvenci, s níž se All-Call period opakuje a má vliv na to, kolikrát je letadlo při přechodu hlavním svazkem dotazováno všeobecným dotazem a zároveň, jak bylo uvedeno, stanovuje maximální vzdálenost cíle, který je systém schopen sledovat. Koncová hrana poslechového intervalu All-Call period totiž musí umožnit příjem odpovědi od nejvzdálenějšího cíle, tj. na hranici požadovaného provozního krytí. All-Call periody se pravidelně opakují, přičemž časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími All-Call periodami je využit pro Mode S Roll-Call periodu (viz Obrázek 6).



Obrázek 6 Obrázek střídání All-Call a Roll-call periody (zdroj: [34], upraveno autorem).

Je nutné zároveň doplnit, že na všeobecné dotazy generují odpovědi pouze ty cíle, které mají aktivní blokování na daný SSR. Jedná se o tzv. Lock-out, který bude popsán v části věnované selektivním dotazům. Pomocí této techniky se redukuje množství odpovědí na všeobecné dotazy u těch letadel, které jsou SSR již známé.

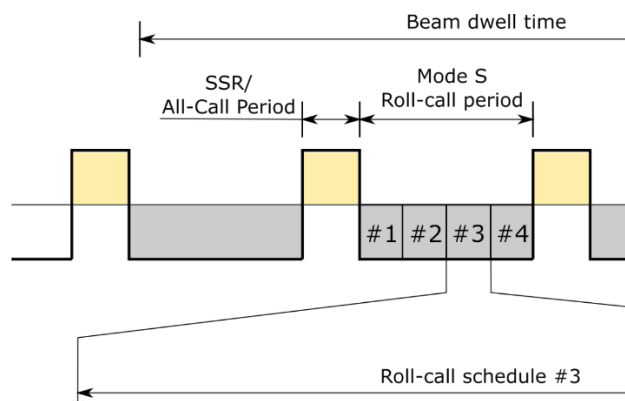
Po All-Call periodě přechází model do módu selektivního sledování pod tzv. Roll-Call periodou, během níž připraveny dotazy pro ty cíle, které se nacházejí v hlavním svazku SSR, eventuálně ve směru aktivního sektoru, jedná-li se o zobecněný dotazovač. Roll-Call perioda vyplňuje čas mezi po sobě jdoucími All-Call periodami. Kromě detekce a určení polohy cíle umožňuje dotazování získat z odpovědi odpovídače aktuální hodnoty parametrů, které SSR sleduje. Důležité pro dotazování Roll-Call periody také je, aby se cíl nacházel v oblasti krytí, kde je prováděno selektivní dotazování (Tracking nebo Lock-out range).

Klíčovým pro selektivní dotazování je sestavení dotazovacího plánu, který udává, jaký cíl bude dotazován, kdy a jaký typ dotazu bude použit. Jeho sestavení se řídí dále uvedenými pravidly.

V okamžiku, kdy je vyvolána funkce sestavení dotazovacího plánu, vybere model SSR ze seznamu cílů (Target List) ty vedené cíle, které se nacházejí ve směru hlavního svazku a zařadí je do seznamu aktivních cílů (Active Target List). U

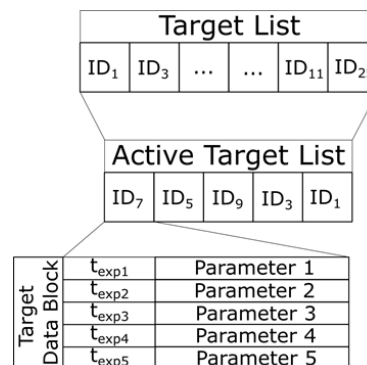
každého z nich prověří jejich datový blok (Target Data Block), zda u nich nastala expirace některého ze sledovaných BDS registrů. Nastala-li taková situace je splněna podmínka pro vytvoření selektivního dotazu, který bude využit právě pro získání aktuální hodnoty tohoto BDS registru. Pokud je toto provedeno pro všechny cíle v Active Target List vzniká dotazovací plán s maximálně jedním dotazem pro každý z cílů, u nichž je potřeba dotazovat aktuální hodnoty.

Dotazovací plán (Obrázek 7) je vytvořen tak, aby vznikl interval pro dotazovací okno, během něhož budou naplánované dotazy vysílány (1030 MHz), a následně poslechové okno (interval), během něhož musí přehledový systém přejít do módu poslechu odpovědí (1090 MHz).



Obrázek 7 Obrázek zobrazující dotazovací plán (zdroj: [34], upraveno autorem).

Trvání Roll-Call periody zpravidla umožňuje odvyšlat více než jeden dotazovací plán pro cíle v Active Target List (viz Obrázek 8), což je využito pro případ, kdy je u cíle evidováno více expirovaných BDS registrů nebo nebyla úspěšně přijata odpověď a je nutné dotaz zopakovat.



Obrázek 8 Aktivní list pro dotazování.

Transakci mezi SSR a ACFT uzavírá příjem odpovědi na straně SSR, který je možný pouze v rámci stavu SSR označeným jako poslech. Pokud je odpověď od daného cíle přijata v očekávaném čase s tolerancí pro tzv. Jitter a úspěšně zpracována,

dojde k aktualizaci příslušného BDS registru v datovém bloku cíle. Platnost této hodnoty je dána konfiguračně a po expiraci je spouštěčem pro opakování dotazu. Model SSR hodnotí pouze shodu cíle, času příchodu a formátu zprávy. Fenomén označovaný jako BDS swap, kdy v důsledku FRUIT dojde k zaměnění odpovědi daného cíle na cizí dotaz, rozeznat nedokáže. Zároveň na modelu SSR není zaveden modul pro rozhodování čitelnosti signálu v důsledku interferencí na rozdíl od modelu XPDR nebo TCAS. Důvodem je to, že SSR mají pokročilé algoritmy pro zpracování a degarbling signálu, které se při zvolené úrovni zjednodušení v modelu SSR simulují jako příjem s minimální pravděpodobností ztráty odpovědi v důsledku interference.

Důležitou funkcí modelu SSR je také nastavování Lock-out bitu v dotazu. To umožňuje předat adresovanému letadlu příkaz, aby se zablokovalo na stanovenou dobu (nastaveno na 18 s) a neodpovídalo na všeobecné dotazy tohoto radaru. S každým novým dotazem, kde je tento bit nastaven dojde k prodloužení blokování. Nastavení Lock-out bitu a jeho využití je závislé na tom, jaké oblasti krytí SSR se cíl nachází.

V modelu SSR jsou používány tři typy dosahů (angl. ranges). Jsou jimi Lock-out Range, Tracking Range a Instrumental Range, které lze znázornit v horizontální rovině jako soustředné kružnice.

Při sledování v Lock-out Range je cíl dotazován selektivně a dochází k blokování odpovědí cíle na akviziční dotazy vysílaných v rámci All-Call módu, pokud byla akvizice úspěšná. V shodě s reálným dotazováním je toto blokování aktivováno nastavením Lock-out bitu v dotazu. Nově vstupující cíle do tohoto krytí jsou přehledovými systémy zařazeny mezi selektivně sledované cíle a jsou dotazovány potlačením odpovědí na All-Call Mode S only dotazy.

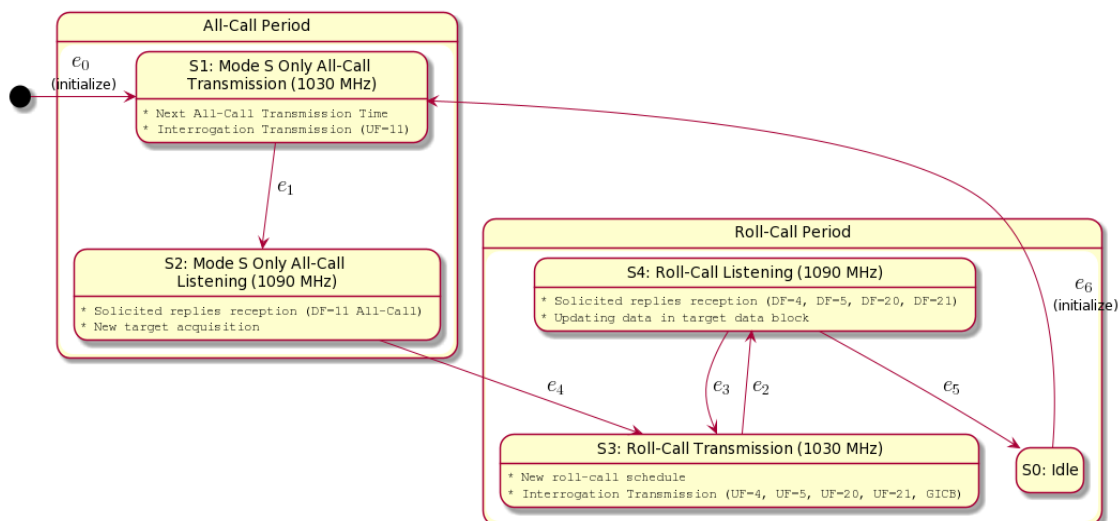
Pokud se nachází cíl v oblasti krytí odpovídající Tracking Range, sleduje jej sekundární přehledový systém také prostřednictvím selektivních dotazů. Rozdílem oproti Lock-out Range však je, že v dotazech není nastaven Lock-out bit pro blokování odpovědí daného cíle na akviziční dotazy vysílaných v rámci All-call módu. V důsledku toho cíl generuje odpovědi na přijaté selektivní dotazy, které jsou mu určeny, ale také na obecné akviziční dotazy (UF=11AllCall), kterými odpovídá zprávou DF=11AllCall. Nově vstupující cíle do tohoto krytí jsou

přehledovými systémy zařazeny mezi selektivně sledované cíle bez potlačení odpovědí na All-call dotazy.

Horní hranice dosahu ve smyslu maximální vzdálenosti od sekundárního přehledového systému reprezentována tzv. Instrumental Range, je dána výhradně útlumem signálu v prostoru a citlivostí přijímačů komunikující dvojice. Jedná se o cíle, které zachytí akviziční dotaz, vygenerují odpověď, avšak jejich následné selektivní sledování přehledovým systémem není uskutečněno. Nachází se totiž mimo oblast sledování, pro kterou je přehledový systém provozován. Nicméně dotazy systému jsou i na danou vzdálenost nad úrovní šumu, aby byly cíli zaznamenány a vyvolaly u nich reakci. Vzhledem k výše uvedenému lze vyjádřit hodnotu Instrumental Range pro stanovené pro zvolenou prahovou úroveň signálu.

Jak bylo v kontextu předešlých popisů zmíněno, nezanedbatelnou vlastností s ohledem na problematiku šíření RF signálu v prostoru, je vyzařovací charakteristika elementů. Model SSR používá v simulaci horizontální a vertikální vyzařovací charakteristiku, která je definována pomocí konfigurace uživatelem. Vyzařovací charakteristiky jsou asociované s konkrétním radarem, avšak jsou zpřístupněny modelu rádiového prostředí RF. Ten při distribuci dotazů v prostředí určí odpovídající úroveň signálu nejen na základě vzdálenosti cíle od SSR, ale započte také vliv relativní polohy cíle vůči ose hlavního svazku, resp. vůči jeho vyzařovací charakteristice.

Logika modelu SSR je na Obrázku 9, který zobrazuje přechody modely mezi módy All-Call a Roll-Call, u kterých přepíná mezi vnitřními stavy vysílání a poslechem.



Obrázek 9 Logika modelu SSR.

3.1.3.3 Model jednoduchého přijímače

Model jednoduchého přijímače (RX, model dále označován RX) je určen v simulaci k měření zatížení spektra 1030/1090 MHz. Libovolné umístění RX v simulačním prostoru umožňuje sledovat přenosy zpráv v požadovaném místě. Během simulace jsou ukládány na základě stanovených pravidel zprávy, které jsou zachyceny tímto přijímačem, včetně jejich původního obsahu a přidané časové značky, kdy byly přijaty.

Model RX zajišťuje následující funkce:

- příjem zpráv vzestupného spoje,
- příjem zpráv sestupného spoje,
- poskytnutí záznamů zachycených zpráv k exportu do souborů.

Model RX je začleněn do simulace stejně jako ostatní elementy, které mají schopnost příjmu signálu. Model rádiového prostředí RF tedy při distribuci zpráv v prostoru zahrnuje právě i modely RX shodně jako to provádí při distribuci na modely ACFT. Pokud je záměrem provést analýzu množství dotazů pro konkrétní letadlo v prostoru, je to možné zajistit umístěním přijímače RX do shodného místa, ve kterém se nachází letadlo, které má být předmětem analýzy. Vysílané adresné dotazy, které jsou vysílány úzkými svazky do směru, kde se letadlo nachází, je tímto přístupem je možné na modelu RX zachytit.

Důležitou vlastností je zaznamenávání všech přichozích zpráv pouze s podmínkou, že jejich úroveň překročila minimální spouštěcí úroveň (MTL). Naopak okolnosti, které mohou vést k neúspěšnému příjmu zprávy, například garbling, nejsou

v modelu zohledněny záměrně. Díky tomu je možné získat kompletní přehled přenosů v daném místě a řešit případné ztráty na příjmu až na úrovni analýzy z dostupných dat v záznamu.

3.1.3.4 Model jednotky Acquisition Squitteru

Model funkcionality Acquisition Squitter ACQS (model označován ACQS) zajišťuje při simulaci plánování a přípravu zpráv automatického vysílání zpráv Acquisition Squitteru (AS) na úrovni modelu letadla, se kterým je spojený.

Základním vlastností zpráv Acquisition Squitteru je vysílání s pseudo-periodickým opakováním. Zprávy AS jsou vysílány v sestupném formátu DF = 11.

Narozdíl od plánování vysílání zpráv Extended Squitteru, kde existuje více typů zpráv, v případě plánování Acquisition Squitteru se jedná o jeden typ zprávy. Vysílací plán je tedy jednopoložkový a obsahuje čas vysílání nejbližší zprávy AS.

Při simulaci je model ACQS ze strany modelu ACFT žádán o předání AS zprávy pro vysílání. Na základě tohoto požadavku provede model ACQS nejprve kontrolu výše zmíněného vysílacího plánu. V případě, že se čas plánovaného vysílání shoduje s aktuálním časem simulace nebo je dokonce starší, předá tento připravený AS na externí rozhraní modelu ACFT. Model ACFT tento připravený AS přepoše přes společnou sběrnici na model odpovídače XPDR, který zajistí formální zpracování a vyvolání vysílání AS s úplným obsahem. Tento krok využívající model odpovídače je důležitý kvůli vyvolání jeho zátěže.

V okamžiku, kdy byla připravená zpráva AS předána k na externí rozhraní modelu ACQS, dochází k aktualizaci vysílacího plánu, kdy je původní čas smazán a nahrazen nově vypočteným časem příštího vysílání AS.

V případě, že v době požadavku není dle vysílacího plánu záměr vysílat AS, je žádajícímu elementu, tj. modelu ACFT, předána prázdná zpráva, která se nevysílá.

3.1.3.5 Model jednotky ADS-B

Model jednotky ADS-B (model dále značen ADSB) zajišťuje přípravu zpráv automatického vysílání zpráv Extended Squitteru (ES) dle pravidel dané verze ADS-B vysílání. Základním principem modelu ADSB je příprava jednotlivých typů zpráv Extended Squitteru s dodržáním pseudo-periodického opakování. Zprávy ES jsou vysílány v sestupném formátu DF = 17. Implementace je podobná modelu ACQS

s tím rozdílem, že v ADSB je použito více typů zpráv, jejichž plánování a opakování je nutné provádět individuálně. Vysílání zpráv ES je namodelováno pouze pro letadla ve vzduchu, vysílání na zemi je vynecháno, protože se žádné cíle v simulaci na zemi nepohybují.

V rámci modelu ADSB jsou dále popsány následující oblasti:

- příprava vysílacího plánu každého typu zprávy ES,
- předání připravené zprávy ES k vysílání,
- aktualizace vysílacího plánu po odvysílání daného typu ES,
- typy zpráv ES a periody jejich opakování.

Pro každý typ zprávy ES je vypočten nejbližší čas vysílání a s těmito časy jsou jednotlivé ES zprávy zařazeny do vysílacího plánu.

Vysílací plán je tvořen seznamem zpráv ES seřazených vzestupně dle časů, kdy mají být vysílány. Plán je řazen vzestupně dle plánovaného času vysílání. Vzestupné řazení vysílacího plánu dle plánovaného času vysílání zajišťuje, že se na první pozici seznamu dostane typ zprávy, který bude vyslán nejdříve.

Model ADSB je externě dotazován modelem letadla ACFT, zda je připravena zpráva ES k vysílání. Pokud je na první pozici vysílacího plánu zaplánována zpráva ES, která je plánována k aktuálnímu času simulace nebo dokonce k dřívějšímu času, předá model ADSB připravenou zprávu dotazujícímu se modelu ACFT. Následuje aktualizace vysílacího plánu. V opačném případě, kdy není žádná zpráva plánována k vysílání, vrátí požadujícímu elementu prázdnou zprávu, která se nevysílá.

Každý typ zprávy ES je do vysílacího plánu zařazen pouze jednou. Aktualizace vysílacího plánu je prováděna v okamžiku předání zprávy ES na palubní odpovídače. To je realizováno odstraněním původní časové značky u typu zprávy, nahrazením novým časem a seřazením podle času.

Z výše uvedeného vyplývá, že zpráva ES daného typu může být odvysílána v plánovaný čas nebo později v závislosti na tom, kdy přijde ADSB modelu požadavek na ES zprávu. Za řízení priorit vysílání je zodpovědný element, který od modelu ADSB požaduje. Důvodem ke zpoždění požadavku je vyšší priorita k vysílání jiného typu zpráv (odpověď na dotaz nebo potlačující pulz TCAS jednotky).

Typy zpráv a jejich parametry vysílání jsou součástí standardu minimální provozní výkonnosti DO-260 [18], DO-260B [19].

3.1.3.6 Model palubního odpovídače

Model palubního odpovídače (model dále značen XPDR) patří společně s modelem SSR ke klíčovému elementům pro simulování přenosů 1030/1090 MHz. Palubní odpovídač má interakce s modelem letadla, ve kterém je umístěn, a také modely ACQS, ADSB nebo TCAS, které jsou k modelu letadla přiřazeny.

V této části věnované modelu XPDR jsou vysvětleny způsoby implementace následujících oblastí:

- vnitřní stavy a přechody mezi nimi,
- příjem a zpracování všeobecných a selektivních dotazů,
- vytvoření a vysílání odpovědí,
- vysílání zpráv Acquisition a Extended Squitteru,
- omezení maximálního počtu odpovědí a potlačení na sběrnici,
- správa Lock-out seznamu.

Typické pro odpovídač je, že existuje základní sekvence stavů, která odpovídá úspěšnému přijetí, zpracování a zodpovězení přijatého dotazu. Nicméně model zároveň zohledňuje okolnosti, které nastávají v reálném prostředí (garbling, zpráva adresovaná jinému letadlu) a které vedou k odchylkám od této ideální sekvence stavů. Jinými slovy model palubního odpovídače je připraven spustit v definovaných stavech různé přechody, a to na základě naplnění s tím spojeným kritériem. Stavy, které jsou implementovány v modelu XPDR jsou následující.

- Stav nečinnosti (Idle State, zkr. IDLE)
- Stav příjmu (Receiving State, zkr. RECV)
- Stav zpracování (Processing State, zkr. PROC)
- Stav vysílání (Transmission State, zkr. TRNS)
- Stav potlačení (Dead State, zkr. DEAD)
- Stav obnovy (Recovery State, zkr. RECOV)
- Chybový stav (Failure State, zkr. FAIL)

Stavy modelu palubního odpovídače a přechody mezi nimi lze rozdělit do dvou skupin. Do první lze řadit stavy, do nichž je přechod vyvolán externím spouštěčem, kterým může být například příchod nové zprávy, požadavek na vysílání zprávy squitteru nebo splněná podmínka pro aktivaci některého spouštěče. Do druhé skupiny lze zařadit stavy, u nichž je přechod řízen časovým kritériem. Příkladem

může být ukončení stavu zpracování, vysílání nebo potlačení, které má mají stanovenou délku trvání a nejsou ovlivnitelné externími události (příchod zprávy). Model XPDR se nachází ve stavu nečinnosti (IDLE) za předpokladu, že není zaneprázdněný příjmem, zpracováním nebo vysíláním zprávy. V tomto stavu model XPDR monitoruje frekvenci 1030 MHz a může zachytit příchozí signál s dotazem, pokud je nad úrovní šumu.

Do stav příjmu (RECV) přechází model ze stavu nečinnosti na základě vnější události, kterou je příchod signálu na 1030 MHz, je-li nad úrovní šumu. Trvání stavu je dáno délkou příchozího signálu, resp. typem dotazu.

Přechod do stavu zpracování dat (PROC) nastává na modelu odpovídače po úspěšném příjmu dotazu na 1030 MHz. Tento stav je vymezen pro další zpracování informací pro odpověď a její sestavení. V rámci modelu je do délky trvání stavu zpracování započtena i pevně definované zpoždění vysílání odpovědi (128 μ s).

Do stavu vysílání (TRNS) přechází model odpovídače po úspěšném zpracování příchozího signálu na 1030 MHz, jde-li o dotaz, na který má být odeslána odpověď. V každém časovém okamžiku je model odpovídače dotazován, zda je připravena odpověď k vysílání. Je-li palubní odpovídač ve stavu (TRNS) vrací na tento dotaz přes model letadla ACFT do modelu rádiového prostředí RF sestavenou odpověď. To odpovídá začátku vysílání odpovědi.

Stav (TRNS) může být také vyvolán přímo ze stavu nečinnosti externí událostí, kterou je požadavek na vysílání Acquisition nebo Extended Squitteru, který plánují a připravují model ACQS, resp. ADSB.

Během stavu vysílání (TRNS) je na modelu palubního odpovídače zahájeno potlačení na sběrnici, které blokuje model TCAS v příjmu 1090 MHz.

Přechodem ze stavu vysílání (TRNS) se model palubního odpovídače dostává do stavu potlačení (DEAD). Během tohoto stavu jsou potlačeny veškeré činnosti odpovídače, na jeho konci dochází k obnově citlivosti. Přechod do stavu nečinnosti (IDLE) je vyvolán na základě časové podmínky.

Použité délky stavu potlačení v modelu jsou maximální přípustné dle [31], které jsou určeny jako minimální požadavky. V praxi bývají tyto doby kratší.

Do stavu obnovy (RECOV) přechází model palubního odpovídače ze stavu příjmu tehdy, pokud platí jedno z následujících:

- Přijatý dotaz je adresován jinému letadlu (nesouhlasí Mode S adresa);
- Přijatý dotaz je s krátkým pulzem P4 (v modelu nejsou dotazovače, které by generovaly tento typ dotazů);
- Byly přijaty pouze pulzy P1 a P2.

Chybový stav (FAIL) je vyvolán překročením schopnosti odpovídače generovat odpovědi v požadované četnosti. Jedná se o jev předotazování. V modelu XPDR je přechod do chybového stavu vyvolán ze stavu vysílání v okamžiku, kdy má být vyslána zpráva, jejímž odovysláním dojde k překročení jeho kapacity.

Pokud dojde k úspěšnému přijetí All-Call Mode S only dotazu, palubní odpovídač XPDR nejdříve ověří, zda je:

- identifikátor dotazujícího zařízení není veden v Lock-out seznamu a
- úroveň pulzu P5 potvrzuje, že nejde o dotaz postranním svazkem a
- náhodný generátor potvrdil zodpovězení dotazu (pozn. princip stochastického dotazování kdy dotazovač určuje, s jakou pravděpodobností má být vygenerována odpověď).

Jsou-li splněny současně všechny výše uvedené podmínky, připraví model XPDR odpověď na dotaz a zaplánuje její vysílání.

Obdobný postup je i v případě úspěšného přijetí selektivního dotazu, při kterém je ověřeno, že adresa obsažená v dotazu odpovídá adrese palubního odpovídače. Pokud je potvrzena shoda, je připravena odpověď a také je provedeno její zaplánování pro vysílání. Současně je identifikátor dotazovače předán do Lock-out seznamu.

Připravené odpovědi jsou plánovány s definovaným zpožděním (128 μ s od reference) a náhodnou odchylkou simulující nepřesnost technického řešení (tzv. jitter). Nastane-li ovšem překročení maximální kapacity modelu odpovídače (maximální počet odpovědí za časový interval), dojde ke zrušení vysílání a model odpovídač přejde do chybového stavu.

Množství transakcí, které je palubní odpovídač schopen zajistit, je limitováno technickými možnostmi. V případě, že dojde k překročení kapacit modelu XPDR, přechází palubní odpovídač dočasně do chybového stavu. Při tomto chybovém stavu v důsledku přetížení potlačí palubní odpovídač veškeré své činnosti. V modelu XPDR je nastavena délka trvání chybového stavu na 5 sekundy.

S vysíláním odpovědi je vyvoláno potlačení na sběrnici k blokování činnosti TCAS po dobu vysílání odpovědi a přesahem 20 μ s.

Obdobou je zajištění vysílání zprávy Acquisition Squitter (AS) a, je-li letadlo vybaveno touto technologií, také zpráv Extended Squitteru (ES). Plánování a přípravu těchto zpráv zajišťují modely ACQS a ADSB. Avšak jimi připravené zprávy jsou předány podle stanovených pravidel modelu odpovídače XPDR, který provede jejich vysílání. Vedlejším efektem je, že i tento typ zpráv si alokuje část kapacity XPDR.

Model XPDR provádí nepřetržitou správu Lock-out seznamu, jehož podstatou je evidovat dotazovače (SSR), kterým nejsou poskytovány odpovědi na jejich všeobecné dotazy. Zařazení na seznam se děje na základě řídicího bitu v selektivních dotazech. Model XPDR při správě provádí přidávání nových identifikátorů, prodlužování platnosti zavedených identifikátorů a odstraňování identifikátorů s prošlou platností.

3.1.3.7 Model palubního protisrážkového systému (TCAS)

Základní činností modelu palubního protisrážkového systému (model dále značen TCAS) je vyhledávání blízkého provozu poslechem vysílání AS a ES zpráv, průběžné pasivní či aktivní sledování okolních cílů a vyhodnocování rizika sblížení nebo srážky vlastního letadla s okolními cíli na základě vzájemné polohy a pohybu. Při řešení situace odvrácení nebezpečného sblížení nebo srážky s okolním zájmovým cílem může docházet, v závislosti na jeho vybavení, k výměně koordinačních zpráv.

Popis implementace modelu TCAS je v popsán v následujících částech:

- vnitřní stavy a přechody,
- akvizice nových cílů pro sledování,
- plán sledování a mód sledování,
- příprava a vysílání dotazů a potlačení na sběrnici,
- příjem odpovědí, aktualizace datového bloku cílů a opakování dotazů,
- testy hrozeb.

V modelu TCAS je definována sada vnitřních stavů, přičemž některé přechody jsou vyvolány externí událostí (např. příchod zprávy), jiné interním spouštěčem vyvolaný dosažením času. Oproti modelu XPDR a jeho činnosti, je potřeba nahlížet na model TCAS jako na dotazovač. Jednotka generuje dotazy, vyvolává odpovědi u odpovídačů dotazovaných letadel a zpracovává jejich odpovědi.

V modelu TCAS jsou definovány tyto vnitřní stavy, které jsou dále detailněji popsány:

- Stav nečinnosti (Idle state, zkr. IDLE)
- Stav příjmu (Receiving state, zkr. RECV)
- Stav zpracování (Processing State, zkr. PROC)
- Stav vysílání (Transmission State, zkr. TRNS)
- Stav obnovení (Recovery State, zkr. RECOV)
- Stav potlačení (Dead State, zkr. DEAD)

Výchozím stavem, při kterém model TCAS není zaneprázdněn žádnou probíhající transakcí mezi jím a zájmovým cílem, je stav (IDLE). Během stavu nečinnosti je model TCAS v režimu příjmu a monitoruje přenosy na sestupném linku 1090 MHz. Pokud neočekává příjem odpovědi, zaměřuje se na zprávy Acquisition Squitter nebo Extended Squitter. V případě, že model TCAS odeslal odpověď a očekává příchod odpovědi, sleduje zprávy ve formátu DFO nebo DF16.

Spouštěčem pro přechod do stavu příjmu (RECV) ze stavu nečinnosti (IDLE) je příchod signálu na 1090 MHz, který je nad spouštěcí úrovní. Trvání tohoto stavu je závislé na délce přijímaného signálu. V době stavu příjmu je v modelu zohledněna situace interference s jiným signálem či více signály na 1090 MHz, které mohou znemožnit úspěšný příjem přenášené informace.

Přechod do stavu zpracování (PROC) může být vyvolán dvěma událostmi, kterými jsou úspěšný příjem sestupné zprávy nebo příprava dotazu před vysláním.

Pokud dojde k úspěšnému přijetí celého obsahu sestupné zprávy, vyvolá tato událost přechod modelu TCAS ze stavu příjmu do stavu zpracování zprávy (PROC). Během tohoto stavu dochází ke zpracování informací přenesených ve zprávě, aktualizaci seznamu sledovaných cílů, testování úrovně hrozby sblížení či srážky a aktualizaci datového bloku cíle (Target Data Block).

Druhou událostí, která vede k přechodu modelu TCAS do stavu zpracování zprávy, je případ nutnosti provést dotazování zájmového cíle za účelem obnovy přehledové informace nebo v krajním případě koordinačních zpráv pro vyhnutí se sblížení či srážce.

Přechod modelu TCAS do stavu vysílání (TRNS) je vyvoláno dosažením času pro vysílání dotazu. S přechodem do stavu (TRNS) jsou vyvolány procesy související

s vysíláním připraveného dotazu, tedy jeho předání do modelu RF přes model ACFT.

Do stavu obnovení (RECOVERY) přechází model TCAS tehdy, dojde-li v důsledku interference ke ztrátě čitelnosti příchozího signálu, a není proto možné obsah zpracovat. Model TCAS se tímto stavem připravuje na návrat do stavu nečinnosti (IDLE) k příjmu nových zpráv.

Po úspěšném přijetí odpovědi nebo úspěšném provedení vysílání dotazu, je vyvolán přechod do stavu potlačení (DEAD), který je následován přechodem do výchozího stavu nečinnosti (IDLE).

Zároveň je nutné řešit způsob, jakým model TCAS provádí zařazování blízkých cílů na seznam sledovaných cílů. Sledovaný cíl, který potenciálně představuje určitý stupeň hrozby v podobě sblížené, je označován jako narušitel.

Model TCAS ve stavu nečinnosti (IDLE) provádí pasivní sledování přenosů na sestupném spoji 1090 MHz, konkrétně na krátké a dlouhé zprávy squitteru (AS a ES). Na základě získání Mode S adres okolních letadel kandidátů-narušitelů připravuje první dotazy, kterými ověří, zda se nachází v oblasti jeho sledování a zda mají být předmětem průběžného sledování

Pokud se jedná o nezavedený cíl, je v rámci zjednodušení simulace, modelem TCAS rovnou ověřeno, zda relativní vzdálenost spadá do zájmové oblasti pro další sledování. Zjednodušení plyne i z toho, že v simulaci není vzdálenost, oproti reálnému systému, odvozena ze zpoždění příjmu odpovědi, ale přímo z předání informace o pozici zájmového cíle. Je-li podmínka splněna, je pro cíl vytvořen datový blok cíle, který sdružuje informace o cíli. Vytvořený datový blok cíle je zařazen do seznamu cílů ke sledování.

Klíčovým prvkem pro sledování okolního provozu modelem TCAS je v čase spravovaný seznam uspořádaných dvojic, které jsou tvořeny identifikátorem zájmového cíle a dobou platnosti jeho datového bloku. Součástí datového bloku cíle je také mód sledování, který obsahuje, s jakou periodou bude narušitel dotazován a jakým formátem dotazu (UF=0 nebo UF=16). Mód sledování je pravidelně ověřován a aktualizován na základě čehož provádí sady testů označených jako Threat Tests, které zohledňují:

- relativní horizontální a vertikální polohu narušitele a změnu této polohy v čase,

- čas posledního dotazu a četnosti jeho opakování.

Plán sledování je řazen vzestupně, v důsledku čehož jsou cíle s nejbližším koncem platnosti nebo již po konci platnosti, na prvních pozicích. To umožňuje připravit dotaz prioritně pro ten cíl, který je v plánu sledování na první pozici, aniž by bylo nutné ověřovat platnosti dalších cílů.

V modelu TCAS jsou implementovány následující dva módy sledování:

- mód aktivního sledování a
- mód pasivního sledování.

Aktivní sledování zájmového cíle spočívá v jeho pravidelném dotazování dle stanovených pravidel na vzestupném spoji (1030 MHz), které umožňuje výpočet aktuální relativní polohy, resp. času do největšího sblížení, a další využití informací přenášených v ní. Opakovaným dotazování zájmových cílů získává model TCAS aktualizované informace nezbytné pro vyhodnocení potenciálního rizika sblížení nebo srážky nebo zahájení koordinace pro vyhnutí se srážce.

Umožňuje-li to technologie vlastního letadla a poskytuje-li zájmový cíl informace o své poloze a dalších parametrech prostřednictvím automatického závislého sledování, je takový zájmový sledován hybridně (kombinace pasivního a aktivního sledování). Model zjednodušuje situaci tím, že informace poskytované ve vysílání ES zájmového cíle je považována vždy za důvěryhodnou. Jinými slovy verifikace ES vysílání, které je podmínkou pro pasivní sledování, je v simulaci vždy splněna. Takový zájmový cíl je sledován pasivně příjmem jeho ES a dotazován s nižší četností, nevytváří-li bezprostřední nebezpečí (je stanoveno podmínkami).

K přípravě dotazu používá model TCAS sledovací plán, ze kterého lze získat identifikace cíle a platnost jeho datového bloku. Příprava dotazu je provedena pouze za těchto podmínek:

- model TCAS je ve stavu nečinnosti,
- není připraven žádný jiný dotaz,
- čas platnosti datového bloku daného cíle je starší než aktuální čas.

Příprava dotazu je iniciována modelem letadla ACFT, který se dotazuje v každém časovém kroku simulace modelu TCAS, zda byly naplněny podmínky pro přípravu nového dotazu k vysílání, vyjma těch časových kroků, kdy je aktivní potlačení na letadlové sběrnici od modelu odpovídače XPDR. Realizace přípravy dotazu se projevuje přechodem modelu TCAS do stavu příprava dotazu (PROC). Ty mohou být

vytvořeny teprve po dokončení předcházející transakce. Zároveň je zaplánováno potlačení na letadlové sběrnici, které začíná 20 μ s před a končí 20 μ s po provedení vysílání tohoto dotazu.

Poté, co model TCAS dokončí přípravu dotazu, nastane přechod do stavu vysílání (TRNS). V rámci tohoto přechodu je připravený dotaz předán na nadřazený model ACFT, který zajistí vysílání zprávy do modelu RF.

Kromě předání připraveného dotazu z modelu proběhne výpočet časové brány, v níž bude od daného narušitele očekáván příchod odpovědi na tento dotaz. Do tohoto času jsou zablokovány všechny funkcionality modelu TCAS. Kromě očekávaného času příchodu zprávy je ještě zaznamenán vzestupný formát odpovědi a identifikátor narušitele.

Při úspěšném příjmu odpovědi od sledovaného cíle na základě dotazování nebo pasivního příjmu jeho vysílání ADS-B, dochází k aktualizaci datového bloku cíle. Primární je aktualizace údajů o poloze sledovaného cíle a vektoru rychlosti. V současné verzi, v níž se modely letadel nepohybují zůstávají hodnoty shodné i po aktualizaci. Jedná se ovšem o přípravu na verzi modelu s dynamickými modely letadel. Oproti skutečnosti je tedy využita výhoda dostupnosti informací mezi modely, a proto poloha ani vektor rychlosti sledovaného cíle není výsledkem nezávislého výpočtu na straně vlastního modelu TCAS.

Zároveň je po aktualizaci datového bloku provedeno testování hrozby a určen způsob sledování daného cíle v další iteraci. V seznamu sledování je zajištěno doplnění aktuální hodnoty platnosti datového bloku daného cíle-narušitele.

Stěžejní funkcí modelu TCAS je rozhodování o způsobu sledování jednotlivých narušitelů v definovaném okolí. Namodelování způsobu testování vychází z diplomové práce Jakuba Noska [32].

Funkce modelu TCAS, která je zodpovědná za výpočet parametrů, na jejichž základě je určena stupeň hrozby, je označena jako Test hrozby (Threat Test). S ohledem na skutečnost, že popisovaná verze simulace nezahrnuje cíle vybavené pouze Mode A/C odpovídačem, je popsán test pro Mode S cíle.

Základní rozdělení algoritmu pro testování hrozby (Threat Test) je dáno módem sledování zájmového cíle, které může být buď aktivní nebo hybridní.

Dotazování v případě aktivního módu může v reálném provozu odpovídat situacím, kdy vlastní letadlo nepodporuje hybridní mód, letadlo-narušitel nevysílá

ADS-B, nebo nejsou splněna kritéria pro sledování hybridním módem. S ohledem na představený model je zohledněna pouze možnost, kdy vlastní letadlo nepodporuje hybridní mód sledování.

Model TCAS v případě aktivního módu provádí opakovaně sadu testů (Tabulka 5), kterými ověřuje míru hrozby sblížení s letadlem-narušitelem. Ačkoliv jsou uvedené řazeny v závislosti na stupňující se hrozbě, je implementace provedena v opačném pořadí, kdy začíná ověřením nejbližší hrozby reprezentované Testy 4A a 5A.

Tabulka 5 Testy aktivního sledování

Označení testu	Podmínka	Způsob dotazování
Test 1A	Obě letadla v letové hladině nižší než FL180	UF=0 každých 5 sekund
Test 2A	Obě letadla v hladině vyšší než FL180 nebo jedno z letadel v letové hladině nižší než FL180	UF=0 každých 5 sekund
Test 3A	Vertikální vzdálenost mezi letadly větší než 10 000 stop	UF=0 každých 10 sekund
Test 4A	Hodnota τ (tau) je menší nebo rovna 60 sekundám	Ruší se výše uvedená pravidla vyplývající z testu 1A až 4A, dotazování nastaveno na UF=0 každou sekundu
Test 5A	Hodnota τ (tau) nižší než 48 sekund, TA nebo RA výstraha je aktivní.	Ruší se výše uvedená pravidla vyplývající z testu 1A až 4A, dotazování nastaveno na UF=16 každou sekundu

Z uvedených testů vyplývá důležitost neustálého ověřování parametru τ (tau) vyjadřujícího čas k bodu nejbližšího sblížení. Matematický vztah pro vyjádření parametru τ (tau) je uvádí Rovnice 6.

$$\tau = \frac{r - \frac{SMOD^2}{r}}{\min(-3m/s, \dot{r})} \quad (6)$$

Kde:

- r – vzdálenost mezi letadla-narušitele [m]
- SMOD – korekční parametr pro mírně sbíhavé tratě (5600 m)
- \dot{r} – sblížovací rychlost [m/s]

V případě hybridního módu sledování jsou letadla-narušitelé posuzováni sadou testů, které uvádí Tabulka 6.

Tabulka 6 Testy pasivního sledování modelem TCAS

Označení testu	Podmínka	Způsob dotazování
Test 1H	$ a \leq 10\,000 \text{ ft}$	Základní podmínka ověřující vertikální rozestup
Test 2H	$\left(a \leq 3000 \text{ ft} \vee \frac{ a - 3\,000 \text{ ft} }{ \dot{a} } \leq 60s \right)$	Podmínka ověřující vertikální blízkost a čas do budou největšího sblížení ve vertikální směru
Test 3H	$\left(r \leq 3 \text{ NM} \vee \frac{r - 3 \text{ NM}}{\dot{r}} < 60s \right)$	Podmínka ověřující vertikální blízkost a čas do budou největšího sblížení ve vertikální směru
Test 4H	Hodnota τ (tau) je menší nebo rovna 60 sekundám	Ruší se výše uvedená pravidla vyplývající z Testu 1H až 3H, UF=0 každou sekundu
Test 5H	Hodnota τ (tau) nižší než 48 sekund, TA nebo RA výstraha je aktivní.	Ruší se výše uvedená pravidla vyplývající z Testu 1H až 4H, UF=16 každou sekundu

Další části textu přibližují, přes která kritéria je jednotkou TCAS určováno, jak velkou hrozbu představují. Sledování v pasivním módu má tyto úrovně:

- Nominální ověřování (UF=16 každých 60 sekund)
- Hrozba (UF=16 každých 10 sekund)
- Blízká hrozba (UF=0 každou sekundu)
- Aktivní výstraha TA nebo RA (UF=16 každou sekundu)

Nominální ověřování je prováděno dotazování zprávami UF=16 každých 60 sekund u těch okolních letadel, u kterých není splněn ani jeden z testů uvedených v Tabulka 6.

V případě, že je splněna logická podmínka (7), je zájmový cíl považován za blízkou hrozbu a je dotazován zprávami UF=0 každou sekundu.

$$If (Test\ 1H \wedge \{Test\ 2H \vee Test\ 3H\}) == TRUE \quad (7)$$

V případě, že je splněna logická podmínka (8), je zájmový cíl považován za hrozbu a je dotazován zprávami UF=16 každých 10 sekund.

$$If (Test\ 1H \wedge \{Test\ 2H \wedge Test\ 3H\}) == TRUE \quad (8)$$

Po odeslání dotaz čeká model TCAS příchod maximálně jediné odpovědi, kterou vyvolal svým dotazem. Pro tento účel spravuje jednopoložkový seznam očekávaných odpovědí, který obsahuje detaily o očekávané odpovědi, kterými je především:

- identifikátor sledovaného cíle,
- formát zprávy,
- odhadovaný čas příchodu, z něhož se připočtením maximálního povoleného náhodného zpoždění (tzv. jitteru) vytvoří časová brána, v níž je příchod odpovědi očekáván.

Přijatá odpověď je modelem TCAS prohlášena za očekávanou, jsou-li současně splněny následující podmínky:

- identifikátor přijaté zprávy odpovídá očekávanému identifikátoru, a zároveň
- formát přijaté zprávy odpovídá očekávanému formátu, a zároveň
- zpráva byla přijata uvnitř očekávané časové brány.

Po potvrzení, že se jedná o očekávanou odpověď dojde k aktualizace informací v datovém bloku cíle a odstranění vzoru očekávané odpovědi z jednopoložkového seznamu očekávaných odpovědí.

Jinou, avšak reálnou situací v zatíženém přenosovém prostředí může být nepřijetí očekávané odpovědi. Model TCAS v každém kroku simulace, pokud je očekávána odpověď na dotaz, ověřuje, zda nedošlo k překročení časové brány, v níž byl očekáván příchod této zprávy. Pokud nebyla přijata očekávaná odpověď od dotazovaného narušitele, je modelem TCAS zaplánováno opakování dotazu se zohledněním souboru pravidel. Mezi ně patří:

- maximální četnost opakování v rámci jedné nominální sledovací periody,
- maximální četnost opakování v rámci N po sobě jdoucích nominálních sledovacích period.

Principem výše uvedených omezení je při opakovaně neúspěšném pokusu o odpověď prodlužovat časové mezery mezi dotazy, a tím se vyhnout nestabilnímu nárůstu dotazu kvůli jednomu cíli, se kterým nelze navázat úspěšnou transakci na úkor sledování zbylých cílů-narušitelů.

Při dosažení stanovených maxim pro opakování dotazu je cíl vyřazen ze seznamu sledování a je zaveden pouze tehdy, je-li od něj zachycen zpráva AS nebo ES. I zde

je provedeno zjednodušení v rámci modelu, protože opětovné zavedení je provedeno okamžitě na základě přijetí těchto zpráv.

3.1.4 Podpůrné modely

3.1.4.1 Model Mode S přijímacího modulu (MSRX)

V rádiovém prostředí s vyšší četností vzestupných a sestupných zpráv na 1030/1090 MHz roste také pravděpodobnost vzájemného překrytí signálů na příjmu. Tím dochází ke snížení pravděpodobnosti úspěšného přijetí a dekódování zprávy. Tím klesá obecně úspěšnost transakcí mezi elementy a roste nutnost opakování dotazů.

Aby bylo možné v simulaci navodit některá omezení při přenosu zpráv mezi jednotlivými elementy modelu, je vytvořen model přijímacího modulu MSRX. Tento modul je součástí modelu palubního odpovídače XPDR a palubního protisrážkového systému TCAS.

Model MSRX zajišťuje při dané úrovni zjednodušení funkcionality, které souvisí s příjmem zpráv v signálovém prostředí. V následujících odstavcích jsou popsány klíčové funkce, kterými jsou:

- rozhodování o přijetí signálu,
- řízení dynamické citlivosti pro příjem a jeho obnovení,
- pravděpodobnostní rozhodování o čitelnosti zprávy při překrytí jinou příchozí zprávou,
- určení trvání garblujícího stavu.

Základní funkcionalitou MSRX je rozhodování o tom, zda je úroveň příchozího signálu dostatečná k jeho přečtení. K tomu je použito porovnání s hodnotou spouštěcí úrovně v modelu označenou jako Actual Triggering Level (ATL). Ta ve stavu nečinnosti modelu MSRX odpovídá minimální spouštěcí úrovni (MTL), která je dána technickým návrhem palubního odpovídače nebo protisrážkového systému. Tento stav trvá do okamžiku, než jsou splněna kritéria pro obnovení původní spouštěcí úrovně (MTL) a modul MSRX, a tedy také nadřazený XPDR nebo TCAS, přechází do stavu nečinnosti (IDLE).

Sledování signálového prostředí modelem MSRX probíhá v každém kroku simulace, tedy i v intervalech, kdy se nadřazený XPDR nebo TCAS nachází ve stavu, který signál přijímat neumožňuje.

Model MSR_X dále pokrývá situace, kdy je XPDR nebo TCAS ve stavu příjmu a dojde k příchodu dalšího signálu, je provedeno otestování dopadu interference na původně přijímaný signál. V závislosti na poměru úrovně původního a interferujícího signálu je vrácena funkcí pravděpodobnost jevu, že interference neznemožní úspěšně dekódovat původně přijímaný signál. Náhodnost tohoto jevu je simulačně realizována funkcí s generátorem pseudonáhodného čísla při rovnoměrném rozdělení.

Modelem MSR_X je zohledněna také situace, kdy přijde nový signál do intervalu, kdy přijímač již ovlivňuje jiný signál, nikoliv však čitelný signál.

3.1.4.2 Model záznamového modulu (LOGS)

Ačkoliv se nepodílí na přenosech nebo neovlivňuje interakci mezi elementy, je záznamový modul (LOGS) významný pro získávání dat z průběhu simulace, které jsou vstupem pro následné analýzy a vyhodnocení.

Ve stávající verzi modelu mají vybrané elementy záznamový modul, který ukládá do paměti společně s časovou značkou hodnotu vybraných parametrů, vnitřní stavy nebo, v případě zpráv, celé objekty. Při ukončení simulace jsou z uložených hodnot vygenerovány soubory v otevřeném formátu csv.

Pomocí konfiguračních parametrů lze u příslušných elementů aktivovat záznamový modul obecně ve dvou módech:

- kumulativní záznam, nebo
- detailní záznam.

Kumulativní záznam spočívá v tom, že je sledována četnost výskytu nějaké události u elementů stejného typu, u nichž je tento záznam konfiguračně aktivován. Výstupní soubor následně obsahuje jednotlivé elementy v řádcích a ve sloupcích uvádí počty výskytu. Například se může jednat o počet přijatých dotazů, počet přijatých odpovědí apod.

Detailní záznam se odlišuje od souhrnného tím, že zaznamenává hodnotu sledovaného parametru ve spojení s časovou značkou, a to zvláště pro každý element, u kterého je detailní záznam požadován. Výstupem je pak soubor nebo soubory, z nichž každý v názvu nese identifikátor, ke kterému elementu patří. Jednotlivé soubory obsahují v řádku časovou značku a je k ní doplněn vektor hodnot parametrů, které v daném čase platily. Tyto záznamy jsou nezbytné pro popis vývoje sledovaných parametrů v čase.

Pro zpracování a vyhodnocení výše uvedených souborů jsou vytvořeny skripty v prostředí MATLAB, které nabízí řadu již hotových funkcí pro analýzy.

3.1.5 Simulace

V textu dříve uvedené dílčí modely a samostatné funkcionality tvoří v rámci běhu programu simulaci datové výměny na 1030/1090 MHz s krokováním po 1 mikrosekundě. Simulační běh lze popsat jako vrcholový program, který zajišťuje:

- načtení jednotlivých konfiguračních souborů, nastavení simulace a vytvoření prostředí,
- plynutí času (v prostoru simulace) a aktualizaci vnitřních stavů elementů,
- vyvolávání interakcí na rozhraní, které nejsou řízeny vnitřními stavy,
- načtení záznamu (logů) a vytvoření výstupních souborů se statistikami nebo logy,
- ukončení simulace.

Po spuštění programu se načtou ze zadaného konfiguračního souboru klíčové parametry stanovující například délku simulace, cesty k dílčím konfiguračním souborům elementů nebo cest pro výstupní soubory se záznamy. Na základě těchto informací je připravena simulace a její virtuální prostředí, jehož elementy jsou vytvořeny dle načtených konfiguračních parametrů. Vytvoření prostředí zároveň zahrnuje přípravu rozhraní mezi jednotlivými modely, a to včetně vložení stupně náhodnosti, aby jednotlivé inicializované objekty simulace nebyly totožné (například natočení hlavních svazků radarů do rozdílných azimutů).

Jakmile je prostředí vytvořeno, vstupuje program do smyčky s inkrementem simulačního času s již uvedeným krokem 1 μ s. V rámci smyčky se opakují následující procesy spojené:

- s výměnou zpráv:
 - předání všech dotazů z elementů do modelu RF,
 - předání všech dotazů či odpovědí z modelu RF na elementy,
 - předání všech odpovědí z ACFT do modelu RF,
- s aktualizací vnitřních stavů elementů,
- průběžné vypisování stavu a odhad reálného času skončení simulace.

Po doběhnutí smyčky simulující běh času simulace je vyvolán proces sběru uložených záznamů na modelech elementů. Z nich jsou pak vytvořeny výstupy do

souborů s „csv-like“ strukturou. V závěru se vypíše do konzole požadované informace, které mají pomocný charakter.

3.1.6 Použití modelu

Případ užití (use case) představeného modelu spočívá v definování virtuálního prostředí skrze předvybranou sadu konfiguračních parametrů a parametrů vlastní simulace. Tato kombinace představuje jeden testovací scénář, který se provede opakovaně za účelem provedení metody Monte Carlo.

K vysledování trendu v závislosti na změnách některého parametru je vytvořeno postupně více scénářů, které mohou sdílet shodné konfigurační soubory a zvláště načítat pouze ty, které jsou pro daný testovací scénář odlišné. V této práci je například provedeno zvyšování počtu cílů při zachování ostatních vlastností modelu. V takovém případě je cílem sdílet nastavení virtuálních přijímačů, přehledové infrastruktury apod. V konfiguraci uživatel může připravit maximální scénář a pouze příznakem určí, které elementy se v simulaci realizují. Výhodou je, že se zachová indexace elementů, tudíž vybraný element si udržuje ve všech scénářích své číslo. To je vhodné pro následné analýzy, aby bylo možné výsledky různých scénářů ztotožnit vždy se stejnými elementy.

3.2 Příprava vstupních dat

Pro provedení simulací k otestování stanovených hypotéz byla připravena sada konfiguračních souborů, kterými byly definovány modelované prostředí včetně simulovaných elementů a jejich schopností a vlastností souvisejících s komunikací na 1030/1090 MHz.

Externí vstupní data byla použita pro níže uvedené oblasti:

- příprava provozní situace,
- příprava pozemní přehledové infrastruktury.

Některé konfigurační soubory byly vytvořeny na základě externích dat, které bylo nutné napřed zpracovat takovým způsobem, aby odpovídaly tomu, jak jsou jednotlivé konfigurační položky definovány např. datový typ, jednotky, rozsah nebo znaménková konvence. Vstupní data, která byla přejímána z externích zdrojů, představují obraz provozní situace z ADS-B dat a základní databázi přehledové infrastruktury.

3.2.1 Příprava vzdušné situace

Pro přípravu simulovaného vzdušného obrazu byla použita externí data z palubních odpovídačů pořízená prostřednictvím pozemních Mode S nebo jen ADS-B přijímačů. V této práci byly použity data ze dvou různých zdrojů:

- záznamy z měření systémem EMIT,
- záznamy z měření OpenSky Network.

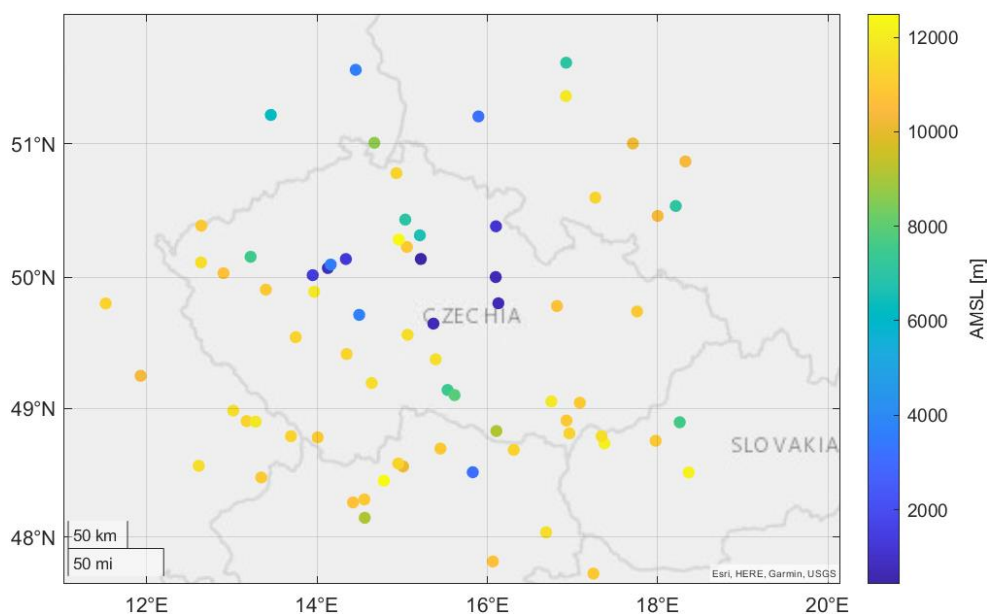
Platforma OPENSKY umožňuje získat s časový odstupem ADS-B nahrávky z pozemních přijímačů, které pokrývají provoz na celém světě.

Každý z výše uvedených zdrojových dat měl některé odlišné vlastnosti, ačkoliv se jedná podobné o nahrávky zpráv v dekodované podobě z ADS-B přijímačů.

Mode S nahrávka z EMIT

První uvedeným zdrojem byl záznam ze systému EMIT, který je tvořen rozsáhlou sítí podzemních Mode S přijímačů pod hlavičkou organizace EUROCONTROL. Tento systém umožňuje jednotlivým provozovatelům letových navigačních služeb členských států, případně dalším oprávněným subjektům, získat a sledovat zatížení sestupného spoje 1090 MHz s velkou přesností. Klíčovou vlastností výstupů z EMIT je fúzování informací z více pozemních přijímačů, aby byla redukována ztrátovost zpráv na jednotlivých měření, která roste s rostoucím množstvím přenosů.

Minutová nahrávka ze systému EMIT poskytnutá prostřednictvím Řízení letového provozu ČR zachycovala vysílání provozu ve vzdušném prostoru České republiky (FIR LKAA). Rekonstrukce nahrávky je vidět na Obrázku 10.



Obrázek 10 Rekonstrukce vzdušné situace z nahrávky EMIT

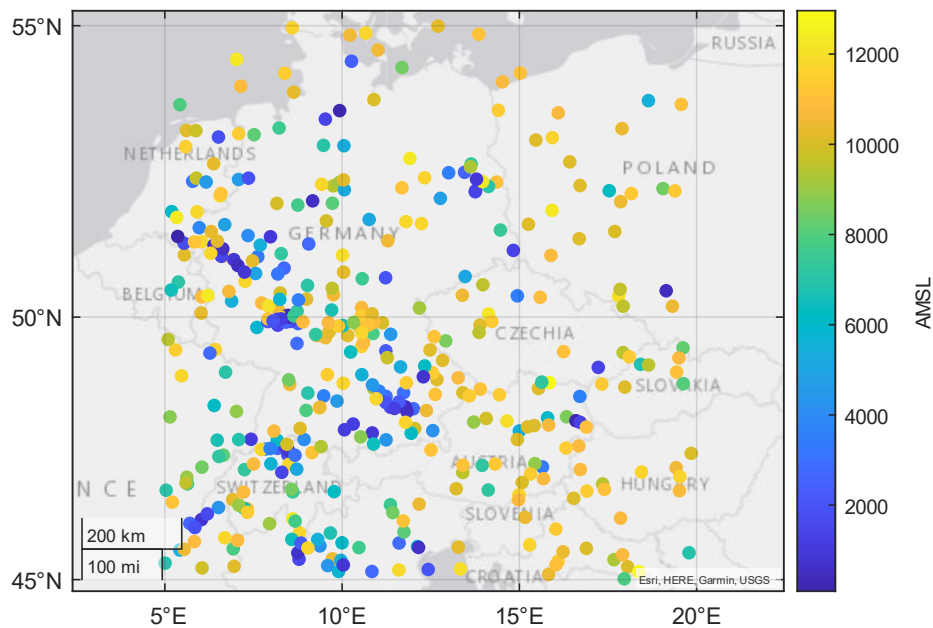
Soubor nahrávky obsahuje záznam přijatých zpráv od letadel ve všech existujících sestupných formátech (DF=0, DF=4, DF=5, aj.) včetně ADS-B dat (DF=17), z nichž bylo možné kromě množství zpráv využít s výhodou i polohu těchto letadel.

Již zmíněnou cennou vlastností těchto dat je skutečnost, že se jedná o výsledek fúze dat z více pozemních přijímačů, a tudíž se tyto nahrávky počtem zachycených zpráv blíží k reálnému počtu, jelikož je tímto postupem eliminována ztráta zpráv na straně příjmu. Z tohoto důvodu byla data z EMIT určena pro úlohu verifikace výstupu modelu, která spočívala v porovnání množství přenosů 1030/1090 MHz zachycených v reálném prostředí s počtem přenosů zachycených v simulované období tohoto prostředí.

Pro práci s daty byl vytvořen skript v aplikaci MATLAB umožňující strojové zpracování a další manipulaci s daty při přípravě konfiguračních souborů.

ADS-B nahrávka OpenSky

Nahrávky z databáze OpenSky obsahovaly výhradně ADS-B zprávy a informace obsažené v nich. Neúplnost Mode S dat naopak vyvažoval rozsah zachycené provozní situaci, kterou bylo možné redukovat na cílovou oblast zájmu v Německu, kde byly nejkompletnější informace o rozmístění SSR. Tím byla splněna výchozí podmínka, že je nutné modelovat prostředí včetně přesahu přes zájmovou oblast kvůli omezení okrajových jevů v prostředí. Rekonstrukce nahrávky je vidět na Obrázku 11.



Obrázek 11 Rekonstrukce vzdušné situace z nahrávky OpenSky

Tabulka 7 obsahuje související konfiguraci přijímače RX. Hodnoty parametrů dostupných ze záznamu EMIT nebo OpenSky Network jsou uvedeny v Tabulce 8.

Tabulka 7 Konfigurace pro RX pro úlohu verifikace RX-CFG1-VF.

Parametr	Jednotky	RX-CFG1-VF
Geografická poloha	[°]	50.4058°s.š. 9.7547° v.d.
Nadmořská výška	[m]	10000
Min. spouštěcí úroveň	[dBW]	-120
Záznam 1030 MHz	[1]	Ano
Záznam 1090 MHz	[1]	Ano

Tabulka 8 Porovnání dostupných položek v nahrávkách EMIT a OpenSky Network

Parametr	EMIT	OPENSKY
Časová značka zprávy UTC	Ano	Ne
Časová značka zprávy UNIX	Ano	Ano
Sestupný formát zprávy	Ano	Ne
Barometrická výška (k QNE)	Ano	Ano
Nadmořská výška	Ne	Ano
Frekvenční offset	Ano	Ne
Zpráva v hexadecimální podobě	Ano	Ne
Identifikační kód dotazovače	Ano	Ne
SQUAWK kód	Ano	Ano
Počet přijímačů	Ano	Ne

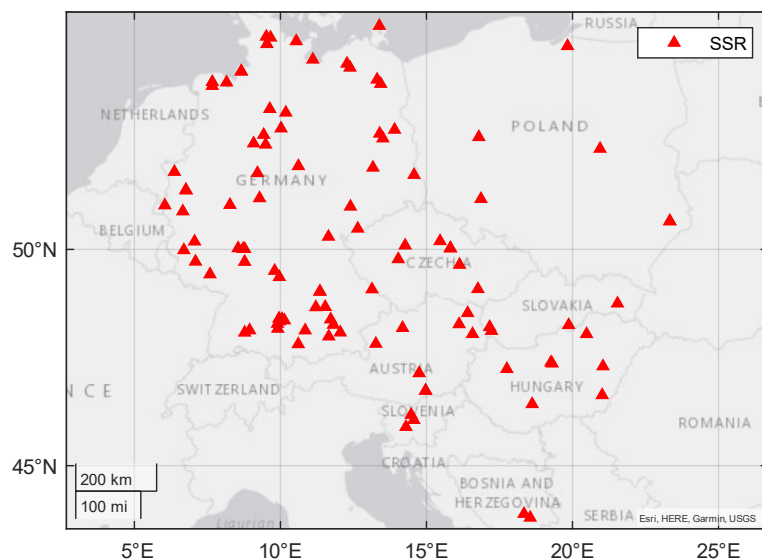
ICAO 24-bitová adresa	Ano	Ano
Zeměpisná délka a šířka	Ano	Ano
Úroveň signálu	Ano	Ne
Horizontální rychlost	Ne	Ano
Vertikální rychlost	Ne	Ano
Volací znak	Ne	Ano
Příznak „Na zemi“	Ne	Ano
Výstraha	Ne	Ano
Poslední update	Ne	Ano
Poslední kontakt	Ne	Ano

3.2.2 Příprava pozemní přehledové infrastruktury

Převzatá databáze přehledových kooperativních radarů [33] obsahovala převážně systémy v oblasti Německa a okolních států střední Evropy a poskytovala základní informace:

- stát,
- zeměpisnou délku a šířku,
- nadmořskou výšku,
- provozní krytí,
- identifikátory SI a II.

V databázi bylo popsáno 111 sekundárních přehledových systémů (viz Obrázek 12). Pro práci s nimi byl připraven skript v MATLABU, který umožnil automatizaci při další přípravě vstupních informací.



Obrázek 12 Rozmístění SSR v modelu

3.2.3 Strojové zpracování vstupních dat

Pro všechny typy zdrojů byly připraveny programy, pomocí kterých bylo možné data načíst a provádět s nimi další automatizované procesy.

Procesy spojené se zpracováním vstupních dat z externích souborů zahrnovaly tři základní kroky:

- formalizaci dat,
- doplnění dat,
- redukci dat.

Formalizace spočívala v transformaci získaných hodnot parametrů na společný formát, který byl používán pro konfigurační soubor.

Některé konfigurační parametry nebylo možné z externích dat získat a muselo být provedeno jejich odhadnutí i s ohledem na technická nebo provozní omezení, která v některých případech mohla poskytnout vodítko pro odhady. V jiných případech byla generována náhodná hodnota v adekvátním oboru hodnot.

Redukce souboru byla prováděna s ohledem na cílový zájmový prostor, který měl být simulován. To se týkalo především souboru z OpenSky Network, jehož velikost přesahovala potřeby simulace provozu nad střední Evropou. Pro tento účel byla vybrána data spadající do geografické oblasti vymezené dvojicemi zeměpisných rovnoběžek a poledníků ([45° s. š., 5° v. d.], [55° s. š., 20° v. d]).

3.3 Konfigurace modelu

Tato kapitola je věnována popisu přípravy konfiguračních souborů, které byly základem pro vytvoření virtuálního přenosového prostředí a provedení testovacích případů pro verifikaci a ověření hypotéz.

První část kapitoly seznamuje se strukturou konfigurací a jejich konfiguračních položek, druhá část pak poskytuje detailnější pohled na přípravu konfigurací s přímou vazbou na provádění testovacích případů pro jednotlivé úlohy.

3.3.1 Struktura konfiguračních souborů

Konfiguraci modelu lze popsat sadou dílčích konfiguračních souborů, které prostřednictvím konfiguračních položek definují vlastnosti vybraných elementů simulace nebo přímo parametry simulace. Lze je rozdělit na:

- Konfigurace letadel a jejich vybavení (CFG-ACFT)
- Konfigurace sekundárních přehledových systémů (CFG-SSR)
- Konfigurace jednoduchých přijímačů (CFG-RX)
- Konfigurace simulace (MODEL-CFG)

Struktura konfigurace elementů je tvořena tabulkovou formou (ve formátu csv), kde sloupce představují jednotlivé parametry, řádky pak jednotlivé elementy. To umožňuje rychlý přehled a nastavení všech elementů daného typu (např. konfigurace všech SSR). Zároveň konfigurační soubory mohou obsahovat předpřipravených více elementů, než které jsou následně použity v simulaci. Zahrnutí daného elementu do simulace je řízeno dedikovanou konfigurační položkou.

Konfigurace letadla (CFG-ACFT) je tvořena konfiguračními položkami dle Tabulky 9, které nedefinují pouze vlastnosti elementu letadla, ale mají přesah i k modelům, které jsou s ním jako platformou spojeny (např. model XPDR, model <ACAS>, aj.) a které se podílí na komunikaci 1030/1090 MHz.

Pozn. Pro lepší srozumitelnost jsou názvy parametrů přepsány do čitelnější podoby oproti konfiguračním souborům (např. „Latitude“ místo „#Latitude_deg_“).

Tabulka 9 Seznam konfiguračních položek modelu letadla ACFT

Název parametru (EN)	Použité jednotky	Popis parametrů
Latitude	Stupeň	Zeměpisná šířka ve WGS-84

Longitude	Stupeň	Zeměpisná délka ve WGS-84
Altitude	Metr	Nadmořská výška
Heading	Stupeň	Kurz letadla
Speed	Metr za sekundu	Rychlost vůči zemi
Sink Rate	Metr za sekundu	Vertikální rychlost
TCAS Range	Námořní míle	Operační dosah TCAS
Hybrid capability	-	Příznak schopnosti hybridního módu u TCAS
Log Control	-	Řídící pole pro zapínání/vypínání záznamu
Pulse Peak Power	Decibel-watt	Špičkový pulzní výkon vysílání
Minimum Triggering Level	Decibel-watt	Minimální spouštěcí úroveň
ATC/TCAS Antenna Gain	Decibel	Zisk antény pro Mode S/TCAS komunikaci
1090 ES Capability	-	Řídící pole pro zapínání/vypínání ADS-B na daném letadle
ES MOPS version	-	Řídící pole pro nastavení verze ADS-B (MOPS)
Include	-	Řídící pole pro zahrnutí/vyjmutí elementu

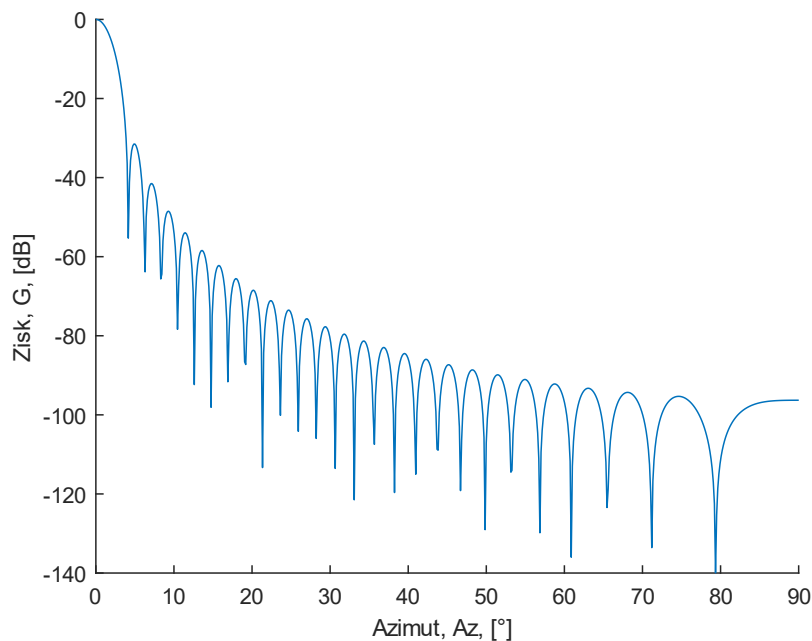
Konfigurace přehledového systému (CFG-SSR) obsahuje položky (Tabulka 10), které jsou charakteristické pro sekundární přehledový radar. Model však připouští také hodnoty, které umožňují definovat sektorový až všesměrový dotazovač.

Tabulka 10 Seznam konfiguračních položek modelu sekundárního přehledového systému

Název parametru (EN)	Použité jednotky	Popis parametru
Latitude	Stupeň	Zeměpisná šířka WGS-84
Longitude	Stupeň	Zeměpisná délka WGS-84
Altitude	Metr	Nadmořská výška
Lock-out Range	Námořní míle	Dosah pro Lock-out mód
Tracking Range	Námořní míle	Dosah pro Tracking mód

BDS Register Periods	Mikrosekunda	Sada hodnot nastavující dobu platnosti jednotlivých dotazem
Log Control	-	Řídící pole pro zapínání/vypínání záznamu na daném elementu
Radar Period	Sekunda	Perioda otáčení hlavního svazku
Stochastic Acquisition Probability	-	Pravděpodobnost odpovědi na všeobecný dotaz
Pulse Peak Power	Decibel-watt	Špičkový pulzní výkon vysílání
Minimum Triggering Level	Decibel-watt	Minimální spouštěcí úroveň
Antenna Gain	Decibel	Zisk antény pro Mode S/TCAS komunikaci
Relative Sidelobe Gain	Decibel	Relativní zisk všesměrové antény k vysílání SLS vůči zisku hlavního
Horizontal Beam Width	Stupeň	Provozní šířka hlavního svazku v horizontální rovině
Beam elevation	Stupeň	Elevace spodní hrany hlavního svazku
Beam Vertical Width	Stupeň	Provozní šířka hlavního svazku ve vertikální rovině
All-Call Rate	Herz	Frekvence (počet opakování) všeobecných dotazů v All-Call
Horizontal Antenna Pattern	-	Cesta k datovému souboru s vertikální vyzařovací
Vertical Antenna Pattern	-	Cesta k datovému souboru s vertikální vyzařovací
Include	-	Řídící pole pro zahrnutí/vyjmutí elementu

Konfigurace CFG-SSR odkazuje na externí soubory, které definují horizontální a vertikální vyzařovací charakteristiku jako funkční závislost zisku na směru příchodu signálu vůči azimutu hlavního svazku, resp. elevaci. V celé simulaci je použita pro SSR shodná zjednodušená vyzařovací charakteristika s šířkou hlavního svazku 3° při poklesu -3 dB v horizontální rovině (viz Obrázek 13) a zjednodušenou kosekantou ve vertikální rovině.



Obrázek 13 Horizontální Anténní charakteristika SSR (normalizovaná)

Méně komplexním, avšak důležitým elementem, je jednoduchý přijímač (RX), který zajišťuje měření množství přenosů v simulovaném prostředí. Jeho konfigurace je popsána v Tabulce 11.

Tabulka 11 Seznam konfiguračních položek modelu jednoduchého přijímače

Název parametru (EN)	Použité jednotky	Popis parametru
Latitude	Stupeň	Zeměpisná šířka ve WGS-84
Longitude	Stupeň	Zeměpisná délka ve WGS-84
Altitude	Metr	Nadmořská výška
Minimum Triggering Level	Decibel-watt	Minimální spouštěcí úroveň
Log Control	-	Řídící pole pro zapínání/vypínání záznamu na daném elementu
Log Downlink Control	-	Řídící pole zapínání/vypínání detailního záznamu sestupného
Log Uplink Control	-	Řídící pole zapínání/vypínání detailního záznamu sestupného
Include	-	Řídící pole pro zahrnutí/vyjmutí elementu

Odlišnou konfiguraci představuje MODEL-CFG, který je tvořen formátem .json a stanovuje základní parametry pro inicializaci programu a vytvoření modelu. Jeho

položky, uvedené v Tabulce 12, zahrnují například i vlastnosti výstupních souborů modelu.

Tabulka 12 Seznam konfiguračních položek simulace

Název parametru (EN)	Použité jednotky	Popis parametru
Statistics (Log) Directory	-	Cílový adresář pro záznamy (logy) simulace
Statistics (Log) File Prefix	-	Nastavení předpony pro soubory se záznamy (logy)
Statistics (Log) File Suffix	-	Nastavení předpony pro soubory se záznamy
Aircraft Configuration File	-	Umístění konfiguračního souboru s pro elementy letadel a souvisejících palubních technologiích
Secondary Surveillance System Configuration File	-	Umístění konfiguračního souboru pro elementy přehledových systémů
Simulation Duration	Sekunda	Parametr nastavuje, jak dlouhý časový interval bude modelem simulován

Následující podkapitoly se věnují již popisu jednotlivých sad konfigurací v závislosti na prováděné úloze. Pro odlišení jednotlivých konfiguračních souborů je použita konvence pro jejich označení [CFG#-ELEMENT-ÚLOHA], například [CFG1-ACFT-H1] jako označení pro první konfiguraci (CFG1) pro element letadla (ACFT) vytvořené pro ověření hypotézy H1.

S ohledem na omezené možnosti prezentace obsáhlých konfiguračních souborů v tomto textu, byla navržena forma shrnutí, která dává pohled na relativní změny, resp. trendy změn, které lze vyzorovat mezi konfiguracemi pro jednotlivé testovací případy. Hodnoty v tabulkách nelze použít pro výpočty, jsou pouze indikátorem relativních změn v konfiguračních souborech. Tabulka 13 popisuje toto srovnání pro SSR-CFG.

Tabulka 13 Popis významu parametrů v srovnávací tabulce pro SSR-CFG

Parametr	Jednotky	Vysvětlení parametru
Počet SSR	[1]	Celkový počet elementů aktivních v simulaci.
Hustota SSR	[1/100km ²]	Vyjádření plošné hustoty SSR sítě vůči referenční ploše. Referenční plocha je vymezena čtveřicí krajních poloh SSR, které ohraničují simulovaný prostor. Pro všechny testovací případy uvedené v této práci byla konstantní.
Násobnost Tracking Range	[1]	Poměr vypočtené kruhové plochy dosahů Tracking Range a referenční plochy.
Násobnost Lock-out Range	[1]	Poměr vypočtené kruhové plochy dosahů Lock-out Range a referenční plochy.
Četnost All-Call dotazů	[MHz]	Průměrný počet All-Call dotazů s vyvolání odpovědi vyjádřených pro sekundový interval.
Četnost UF=4 a UF=5 dotazů	[Hz]	Průměrný počet dotazů vyvolávající krátké odpovědi vyjádřených pro sekundový interval.
Četnost UF=4 a UF=5 s COMMB dotazů	[Hz]	Průměrný počet dotazů vyvolávající dlouhé odpovědi vyjádřených pro sekundový interval.

Stejným způsobem je provedeno také srovnání konfigurací ACFT-CFG pro elementy typu letadlo (Tabulka 14).

Tabulka 14 Popis významu parametrů v srovnávací tabulce pro ACFT-CFG

Parametr	Jednotky	Vysvětlení parametru
Počet letadel	[1]	Celkový počet elementů aktivních v simulaci
Hustota letadel	[1/100km ²]	Vyjádření plošné hustoty ACFT vůči referenční ploše. Definice referenční plochy je v Tabulka 13.
Zastoupení ADS-B MOPS=2	[%]	Poměr zastoupení ACFT se schopností ADS-B ve verzi MOPS=2.
Zastoupení hybridního sledování	[%]	Poměr zastoupení ACFT se schopností hybridního sledování.
Násobnost TCAS	[1]	Poměr vypočtené kruhové plochy dosahů TCAS a referenční plochy.

3.3.2 Konfigurace modelu pro verifikaci

V rámci disertační práce byl pro úlohu verifikace modelu zvolen vzdušný prostor České republiky. Tento výběr byl proveden na základě dat z provozu v českém vzdušném prostoru ze systému EMIT.

V případě pozemní sítě dotazovacích zařízení bylo nutné počítat s poměrně velkým krytím přehledových systému, kdy se jejich vliv může projevovat daleko za hranicí provozní oblasti. Proto je preferováno zahrnout všechna taková zařízení. Model byl v rámci rozsahu této disertační práce nakonfigurován na základě údajů z dostupné databáze sekundárních přehledových radarů vytvořené v rámci bakalářské práce Filipa Konečného [33].

Výchozí konfigurací pro verifikaci (VF) byla SSR-CFG1-VF, která je shrnuta v Tabulce 15. společně s konfiguracemi, které souvisely s adaptací modelu. Rozdíly mezi jednotlivými konfiguracemi jsou v oblasti dosahů a dotazovacích plánů.

Tabulka 15 Relativní porovnání jednotlivých konfigurací pro SSR pro celé simulované prostředí.

Parametr	Jednotky	SSR-CFG1-VF	SSR-CFG2-VF	SSR-CFG3-VF	SSR-CFG4-VF
Počet SSR	[1]	105.0000	105.0000	105.0000	105.0000
Hustota SSR	[1/100km ²]	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069
Násobnost Tracking Range	[1]	26.6643	26.6643	17.0652	17.0652
Násobnost Lock-out Range	[1]	0.4613	26.6643	17.0652	10.9217
Četnost All-Call dotazů	[MHz]	69.1667	40.1667	40.1667	40.1667
Četnost UF=4 a UF=5 dotazů	[Hz]	41.5000	29.2667	29.2667	29.2667
Četnost UF=4 a UF=5 s COMMB dotazů	[Hz]	28.9314	24.4500	24.4500	24.4500

V rámci verifikace byly použity také 3 konfigurace měnící nastavení hybridního sledování a ADS-B verze (viz Tabulku 16).

Tabulka 16 Relativní porovnání jednotlivých konfigurací nastavení hybridního sledování a ADS-B verze.

Parametr	Jednotky	ACFT-CFG1-VF	ACFT-CFG2-VF	ACFT-CFG3-VF
Počet letadel	[1]	75.0000	75.0000	75.0000

Hustota letadel	[1/100km ²]	0.0049	0.0049	0.0049
Zastoupení ADS-B MOPS=2	[%]	0.9467	0.0000	0.9467
Zastoupení hybridního sledování	[%]	0.0000	0.0000	0.5067
Násobnost TCAS	[1]	1.3181	1.3181	1.3181

Pro tyto i následující konfigurace platí, že ačkoliv konfigurace obsahují množství elementů, nepředstavují zcela unikátní konfigurace pro každý z nich. Naopak v konfiguraci lze rozeznat skupiny elementů, které sdílí stejné hodnoty konfiguračních položek. Lze říci, že v rámci konfigurace reprezentují některý z typu elementu. Příkladem mohou být elementy SSR, které sdílí stejné dotazovací plány v závislosti na periodě otáčení (krátko-dosahové/přibližovací radary, dlouho-dosahové radary/traťové apod.). Tímto způsobem je řešena sada potřebných vstupních parametrů, které nejsou zveřejňovány a nebyly tedy dostupné ve vstupních datech.

3.3.3 Konfigurace modelu pro testování hypotézy H1

Testování hypotézy H1 předcházela příprava konfigurační sady (Tabulka 17, 18, 19), která zajišťovala vytvoření simulovaného prostředí zastoupené letadly, přehledovými kooperativními systémy a jednoduchým přijímači pro sběr záznamů o přenosech.

Tabulka 17 Konfigurace pro SSR pro testování hypotézy H1.

Parametr	Jednotky	SSR-CFG1-H1
Počet SSR	[1]	105.000
Hustota SSR	[1/100km ²]	0.007
Násobnost Tracking Range	[1]	26.664
Násobnost Lock-out Range	[1]	26.664
Četnost All-Call dotazů	[MHz]	69.167
Četnost UF=4 a UF=5 dotazů	[Hz]	38.550
Četnost UF=4 a UF=5 s COMM-B	[Hz]	39.825

K testování hypotézy H1 bylo použito 8 konfiguračních souborů ACFT-CFG, které postupně navyšovaly počet letadel v simulovaném prostoru s inkrementem 50.

Tabulka 18 Konfigurace pro ACFT pro testování hypotézy H1 (2 části).

Parametr	Jednotky	ACFT-CFG1-H1	ACFT-CFG2-H1	ACFT-CFG3-H1	ACFT-CFG4-H1
Počet letadel	[1]	69.000	119.000	169.000	219.000
Hustota letadel	[1/100km ²]	0.005	0.008	0.011	0.014
Zastoupení ADS-B MOPS=2	[%]	1.000	1.000	1.000	1.000
Zastoupení hybridního sledování	[%]	0.464	0.462	0.473	0.479
Násobnost TCAS	[1]	1.213	2.091	2.970	3.849

Parametr	Jednotky	ACFT-CFG5-H1	ACFT-CFG6-H1	ACFT-CFG7-H1	ACFT-CFG8-H1
Počet letadel	[1]	269.000	319.000	369.000	419.000
Hustota letadel	[1/100km ²]	0.018	0.021	0.024	0.027
Zastoupení ADS-B MOPS=2	[%]	1.000	1.000	1.000	1.000
Zastoupení hybridního sledování	[%]	0.483	0.495	0.507	0.499
Násobnost TCAS	[1]	4.728	5.606	6.485	7.364

Do prostředí modelu byl konfigurací (Tabulka 19) umístěn jednoduchý přijímač RX s vyšší citlivostí pro sběr dat během simulace. Při následném vyhodnocení byla určena jako referenční hodnota citlivosti -115 dBW. Konfigurace RX byla použita ve všech testovacích scénářích pro hypotézy H1, H2 a H3.

Tabulka 19 Konfigurace pro RX pro testování hypotézy H1.

Parametr	Jednotky	RX-CFG1-H2
Geografická poloha	[°]	50.4058°s.š., 9.7547° v.d.
Nadmořská výška	[m]	10000
Min. spouštěcí úroveň	[dBW]	-120

Záznam 1030 MHz	[1]	Ano
Záznam 1090 MHz	[1]	Ano

Kvůli maximalizaci získání informací na RX byl záměrně využit citlivý přijímač. Při zpracování byla stanovena hodnota pro vyhodnocení. Ta odpovídala -115 dbW.

3.3.4 Konfigurace modelu pro testování hypotézy H2

Pro testování H2 byla připravena sada konfigurací SSR, která navyšovala počty adresných dotazů, největší zatížení představovala poslední konfigurace SSR-CFG8-H2 (viz Tabulka 20).

Tabulka 20 Konfigurace SSR pro testování hypotézy H2 (2 části)

Parametr	Jednotky	SSR-CFG1-H2	SSR-CFG2-H2	SSR-CFG3-H2	SSR-CFG4-H2
Počet SSR	[1]	105.000	105.000	105.000	105.000
Hustota SSR	[1/100km ²]	0.007	0.007	0.007	0.007
Násobnost Tracking Range	[1]	26.664	26.664	26.664	26.664
Násobnost Lock-out Range	[1]	0.461	0.461	26.664	26.664
Četnost All-Call dotazů	[MHz]	69.167	69.167	69.167	69.167
Četnost UF=4 a UF=5 dotazů	[Hz]	41.500	41.500	35.400	35.400
Četnost UF=4 a UF=5 s COMM-B	[Hz]	62.250	62.250	35.400	53.100

Parametr	Jednotky	SSR-CFG5-H2	SSR-CFG6-H2	SSR-CFG7-H2	SSR-CFG8-H2
Počet SSR	[1]	105.000	105.000	105.000	105.000
Hustota SSR	[1/100km ²]	0.007	0.007	0.007	0.007
Násobnost Tracking Range	[1]	26.664	26.664	26.664	26.664
Násobnost Lock-out Range	[1]	26.664	26.664	26.664	0.461
Četnost All-Call dotazů	[MHz]	69.167	69.167	69.167	69.167
Četnost UF=4 a UF=5 dotazů	[Hz]	35.400	34.483	38.550	83.000
Četnost UF=4 a UF=5 s COMM-B	[Hz]	35.400	36.775	39.825	103.750

Pro konfiguraci vzdušné situace byl použit opět snímek provozu z nahrávky OpenSky Network a konfigurace odpovídala Tabulce 21.

Tabulka 21 Konfigurace ACFT pro testování hypotézy H2.

Parametr	Jednotky	ACFT-CFG1-H2
Počet letadel	[1]	419.0000
Hustota letadel	[1/100km ²]	0.0274
Zastoupení ADS-B MOPS=2	[%]	1.0000
Zastoupení hybridního sledování	[%]	0.0000
Násobnost TCAS	[1]	7.3640

Konfigurace přijímače RX byla převzata z konfigurace pro hypotézu H1.

3.3.5 Konfigurace modelu pro testování hypotézy H3

Pro testování hypotézy H3 byla použita výstupní data z modelu, která vznikla v rámci testovacího scénáře pro ověření hypotézy H2. Proto nebyly pro ověření hypotézy H3 připravovány nové konfigurace a testovací případy.

3.4 Verifikace výstupu

Verifikování modelu bylo provedeno na základě porovnání množství zpráv na sestupném spoji od vybraných letadel, které byly zachyceny na systému EMIT za časový interval 60 sekund, s množstvím odpovídajících zpráv, které bylo určeno za základě simulace. Rozložení letadel v simulovaném prostoru odpovídalo rozložení z reálného provozu, které bylo rekonstruováno ze vstupní nahrávky EMIT.

V rámci provádění úlohy bylo nutné řešit existující omezení vstupních dat. Poskytnutá zdrojová nahrávka EMIT obsahovala pouze provoz, který byl ve vzdušném prostoru LKAA nebo jeho blízkosti. Pro účely porovnání byly z nahrávky vybrána tři letadla, které se nacházela v oblasti západních a jihozápadních Čech. Tato poloha letadel byla nejbližší středu simulované přehledové infrastruktury, a tudíž omezovala okrajové podmínky, které nastávají na hranicích simulovaného prostředí.

Srovnání množství zpráv na 1090 MHz bylo přes střední hodnoty počtu zpráv za sekundu jednotlivých sestupných formátů od daného letadla se zohledněním dalších statistických charakteristik. Statistické hodnoty modelu, které byly posuzovány, byly určeny ze sady dílčích výsledků simulací. Celkově se jednalo o 4 opakování.

S ohledem na nepřesnost a neúplnost vstupních dat (např. sledovací plány SSR infrastruktury, vektory letadel, aj.) bylo nutné neznámé hodnoty doplnit ve výchozích konfiguračních souborech generickými hodnotami a zároveň bylo navrženo provést porovnání víceukrově:

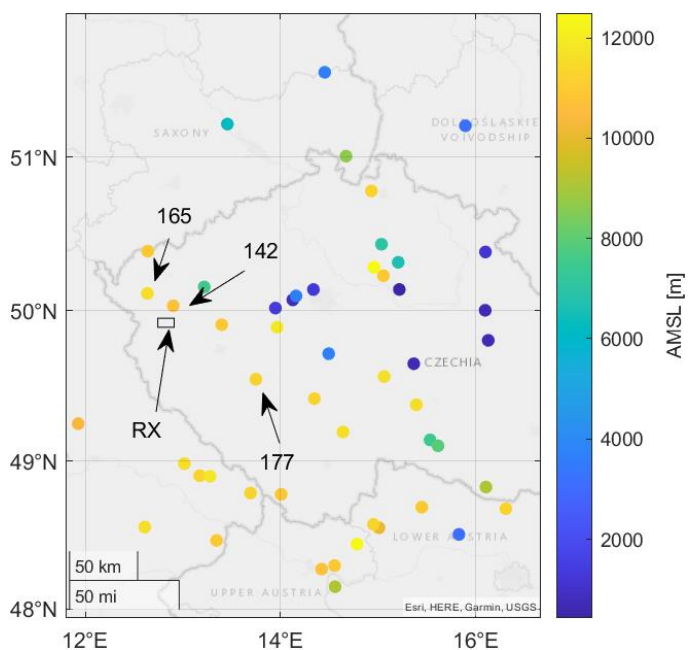
- Porovnání měřených hodnot s výsledky simulace s výchozí konfigurací (TC1VF).
- Porovnání měřených hodnot s výsledky simulace po adaptaci modelu.

Použité kombinace konfiguračních souborů SSR-CFG a ACFT-CFG jsou vyjádřeny formou maticové zápisu (Tabulka 22) s odkazem na související testovací případ.

Tabulka 22 Matice konfiguračních souborů pro testovací případy (TC)

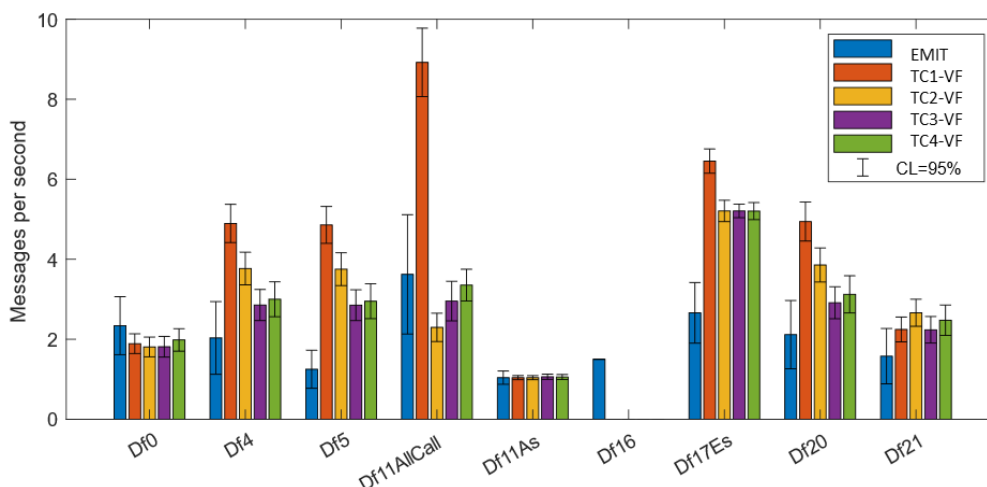
	ACFT-CFG-1	ACFT-CFG-2	ACFT-CFG-3
SSR-CFG1-VF	TC1-VF	-	-
SSR-CFG2-VF	-	TC2-VF	-
SSR-CFG3-VF	-	-	TC3-VF
SSR-CFG4-VF	-	-	TC4-VF

V následující části jsou prezentovány výsledky jednotlivých testovacích případů vyjádřené pro předem vybraná letadla (viz Obrázek 14). Jedná se o střední hodnotu množství zpráv za sekundu zachycených na jednoduchém přijímači simulace od daného letadla v 60 sekundové simulaci se 4 opakováními.



Obrázek 14 Poloha vybraných letadel a RX

Výsledky pro letadlo s ICAO mód S adresou 48C229 a interním identifikátorem ID=142 vyjádřené formou grafu (Obrázek 15).



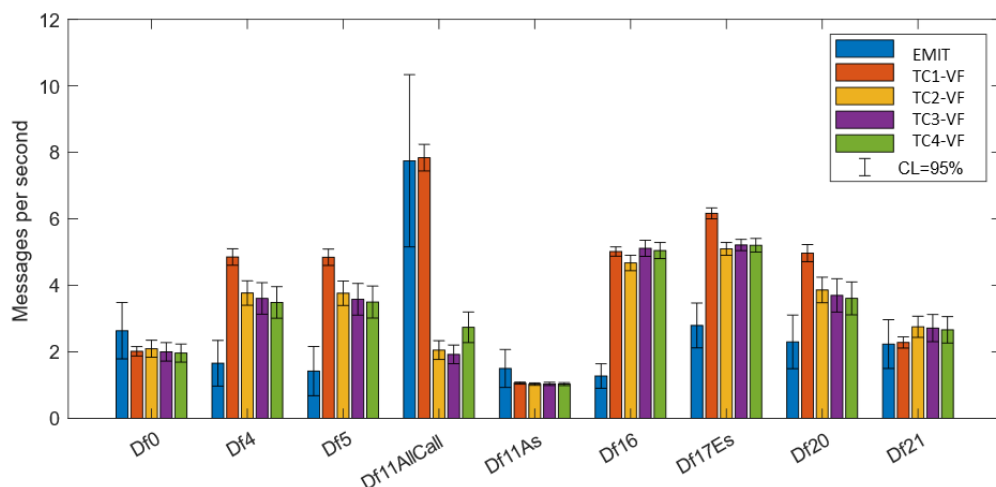
Obrázek 15 Výsledky Verifikace pro MS=48C229/ID=142

Tabulka 23 uvádí hodnoty použité ve sloupcovém grafu (Obrázek 15) s porovnáním s TC3, který byl vyhodnocen jako konfigurace s nejmenší celkovou odchylkou od reálného měření

Tabulka 23 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 48c229 / ID 142

Formát (data)	Střední hodnota četnosti	Směr. odchylka četnosti	Spodní 95% hranice	Spodní 95% hranice
'Df0' (EMIT)	2.340	1.315	1.977	2.702
'Df0' (TC3)	1.813	0.911	1.684	1.943
'Df4' (EMIT)	2.033	1.217	1.579	2.488
'Df4' (TC3)	2.856	1.493	2.661	3.050
'Df5' (EMIT)	1.250	0.447	1.012	1.488
'Df5' (TC3)	2.852	1.485	2.659	3.045
'Df11AllCall' (EMIT)	3.623	2.705	2.877	4.368
'Df11AllCall' (TC3)	2.954	1.857	2.707	3.202
'Df11As' (EMIT)	1.040	0.200	0.957	1.123
'Df11As' (TC3)	1.063	0.244	1.031	1.095
'Df16' (EMIT)	1.500	0.707	-4.853	7.853
'Df16' (TC3)	0.000	0.000	0.000	0.000
'Df17Es' (EMIT)	2.660	1.334	2.281	3.039
'Df17Es' (TC3)	5.208	0.665	5.124	5.293
'Df20' (EMIT)	2.116	1.384	1.690	2.542
'Df20' (TC3)	2.913	1.536	2.713	3.113
'Df21' (EMIT)	1.577	0.857	1.231	1.923
'Df21' (TC3)	2.236	1.237	2.070	2.402

Výsledky pro letadlo s ICAO mód S adresou 70C0EF a interním identifikátorem ID=177 vyjádřené formou grafu (Obrázek 16).



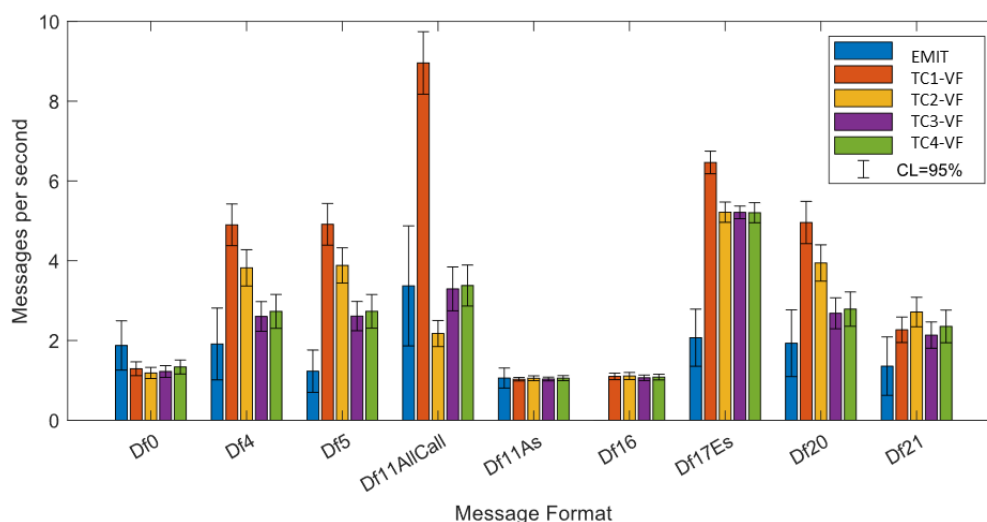
Obrázek 16 Výsledky Verifikace pro MS=70C0EF/ID=177

Tabulka 24 uvádí hodnoty použité v Obrázku 16 s porovnáním s TC1, který byl vyhodnocen jako konfigurace s nejmenší celkovou odchylkou od reálného měření.

Tabulka 24 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 70C0EF / ID 177

Formát (data)	Střední hodnota četnosti	Směr. odchylka četnosti	Spodní 95% hranice	Spodní 95% hranice
'Df0' (EMIT)	2.635	1.521	2.211	3.058
'Df0' (TC1)	2.016	1.010	1.946	2.086
'Df4' (EMIT)	1.657	0.998	1.314	2.000
'Df4' (TC1)	4.852	1.951	4.728	4.976
'Df5' (EMIT)	1.421	0.769	1.051	1.791
'Df5' (TC1)	4.844	1.934	4.721	4.967
'Df11AllCall' (EMIT)	7.746	4.971	6.450	9.041
'Df11AllCall' (TC1)	7.839	3.147	7.639	8.039
'Df11As' (EMIT)	1.500	0.917	1.214	1.786
'Df11As' (TC1)	1.059	0.235	1.043	1.074
'Df16' (EMIT)	1.273	0.517	1.089	1.456
'Df16' (TC1)	5.016	1.093	4.946	5.085
'Df17Es' (EMIT)	2.793	1.281	2.456	3.130
'Df17Es' (TC1)	6.165	1.283	6.083	6.247
'Df20' (EMIT)	2.300	1.418	1.897	2.703
'Df20'(TC1)	4.970	2.012	4.841	5.098
'Df21' (EMIT)	2.233	1.192	1.866	2.599
'Df21'(TC1)	2.282	1.239	2.198	2.367

Výsledky pro letadlo s ICAO mód S adresou 70C0EF a interním identifikátorem ID=177 vyjádřené formou grafu (Obrázek 17).



Obrázek 17 Výsledky Verifikace pro MS=70C0EF/ID=165

Tabulka 25 uvádí hodnoty použité v Obrázku 17 s porovnáním s TC3, který byl vyhodnocen jako konfigurace s nejmenší celkovou odchylkou od reálného měření

Tabulka 25 Numerické shrnutí výsledků pro letadlo 4BCDA1 / ID 165

Formát (data)	Střední hodnota četnosti	Směr. odchylka četnosti	Spodní 95% hranice	Spodní 95% hranice
'Df0' (EMIT)	1.875	1.064	1.566	2.184
'Df0' (TC3)	1.223	0.449	1.150	1.296
'Df4' (EMIT)	1.913	1.041	1.463	2.363
'Df4' (TC3)	2.603	1.414	2.417	2.789
'Df5' (EMIT)	1.231	0.439	0.966	1.496
'Df5' (TC3)	2.612	1.394	2.428	2.795
'Df11AllCall' (TC3)	3.370	2.533	2.617	4.122
'Df11AllCall' (TC3)	3.295	2.069	3.020	3.570
'Df11As' (EMIT)	1.059	0.243	0.934	1.184
'Df11As' (TC3)	1.035	0.185	1.011	1.059
'Df16' (EMIT)	0.000	0.000	0.000	0.000
'Df16' (TC3)	1.066	0.265	1.031	1.100
'Df17Es' (EMIT)	2.070	1.163	1.712	2.428
'Df17Es' (TC3)	5.213	0.621	5.134	5.291
'Df20' (EMIT)	1.931	1.100	1.513	2.349
'Df20' (TC3)	2.683	1.474	2.489	2.877
'Df21' (EMIT)	1.357	0.633	0.991	1.723
'Df21' (TC3)	2.135	1.199	1.971	2.300

Srovnání měřených hodnot s prvními výsledky simulace s výchozí konfigurací poskytlo informaci o tom, kde se model výrazně svými vypočtenými hodnotami odchyluje. Rozdíly byly podkladem pro adaptaci modelu, která spočívala v zavedení korekcí původních, výchozích konfiguračních souborů, respektive vybraných konfiguračních položek. Změny byly prováděny hromadně např. snížení dosahů všech SSR na 80 % původní hodnoty, nebo úprava dotazovacího plánu pro daný typ dotazu u všech SSR. Detailnější adaptace na úrovni jednotlivých elementů nebyla s ohledem vnesené nepřesnosti výchozí konfigurace provedena.

Iterativně provedená několika kroková adaptace potvrdila, že rozdíly mezi měřenými a simulovanými hodnotami je možné redukovat na úrovni změn konfiguračních parametrů, a nikoliv na úrovni návrhu modelu a úpravou jeho zdrojového kódu.

Použitím metody nejmenších čtverců rozdílů mezi měřenými a simulovanými počty zpráv vychází jako nejbližší konfigurace použitá v testovacím případě TC3-VF. Tato kombinace byla pohledem minimalizace rozdílů u dvou ze tří vyhodnocených letadel. Výjimku představuje druhé letadlo ID=177 u něhož byly nejmenší rozdíly v případě výchozího testovacího scénáře, tj. TC1-VF. Rozdíl mohl být způsoben tím, že se letadlo nacházelo oproti dalším dvěma letadlům ve větší vzdálenosti a bylo ovlivněno zčásti jinou množinou SSR.

3.5 Testovací scénáře

Pro testování každé z hypotéz byly připraveny testovací scénáře zaměřené na:

- Nestabilitu přenosového prostředí.
- Horní mez zatížení přenosového prostředí.
- Degradaci úspěšnosti přenosu různých typů zpráv.

Každý testovací scénář se skládal z jednotlivých testovacích případů, Provedení testovací scénáře určovalo pořadí a počet opakování připravených testovacích případů.

3.5.1 Testování hypotézy H1

Pro testování hypotézy H1 byla použita sada 8 testovacích případů, které se lišily pouze na úrovni konfiguračních souborů pro modely letadla (ACFT-CFG1-H1 až

ACFT-CFG8-H1). Testovací scénář pro H1 (**Tabulka 26**) byl proveden 2x, s délkou simulovaného časového intervalu pro každý testovací případu vždy 90 sekund.

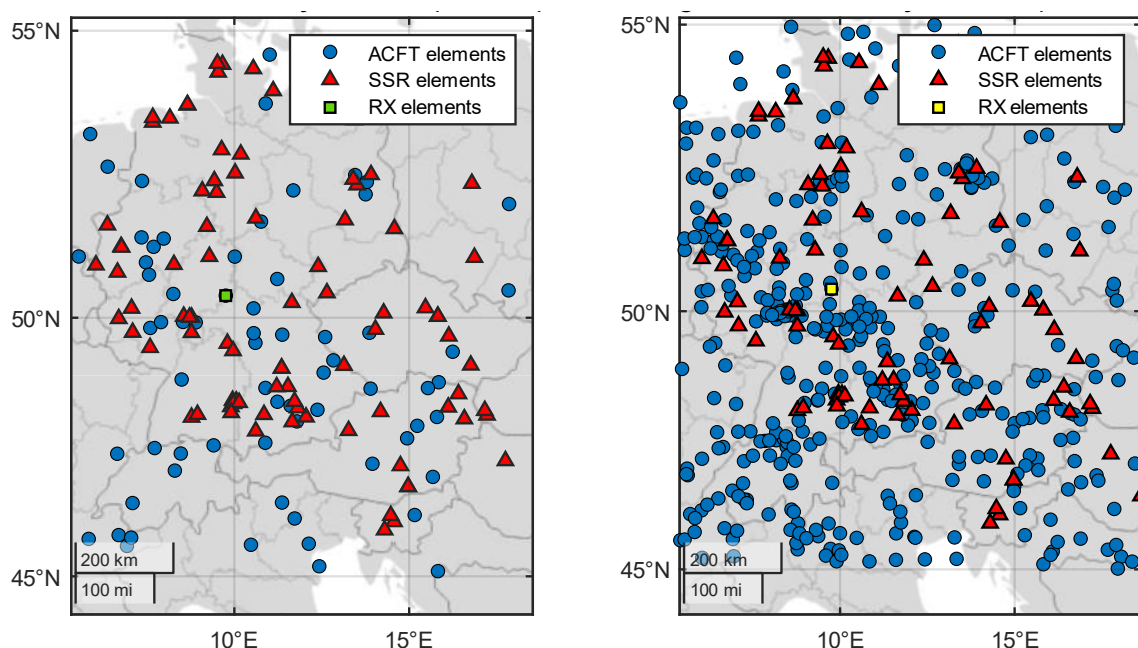
Tabulka 26 Testovací scénář pro H1

	SSR-CFG1-H1
ACFT-CFG1-H1	TC1-H1
ACFT-CFG2-H1	TC2-H1
ACFT-CFG3-H1	TC3-H1
ACFT-CFG4-H1	TC4-H1
ACFT-CFG5-H1	TC5-H1
ACFT-CFG6-H1	TC6-H1
ACFT-CFG7-H1	TC7-H1
ACFT-CFG8-H1	TC8-H1

Vyhodnocení výstupních souborů simulace bylo provedeno těmito kroky:

1. Výběr všech souborů se záznamy náležejících k danému testovacímu případu.
2. Načtení zachycených přenosů vzestupného a sestupného spoje z jednoduchých přijímačů do aplikace MATLAB.
3. Filtrace pro odstranění zpráv, které přišly cestou postranního svazku.
4. Shrnutí počtu zpráv dle formátu, odesílatele, sekundy příchodu, zdrojového soubor.
5. Vypočtení statistických hodnot (např. střední hodnota, střední odchylka, minimum, maximum) přes jednotlivé soubory se záznamy.
6. Vypočtení souhrnných hodnot (např. celkový počet letadel v záznamech)
7. Vykreslení vypočtených hodnot v závislosti na počtu letadel v krytí přijímače.
8. Výpočet koeficientů regresních křivek prvního a třetího stupně pro proložení naměřenými body pro každý formát zvlášť.
9. Vykreslení naměřených hodnot a regresních křivek do grafů s vyjádřením celkového zatížení a následně sdružením těch formátů, které spolu souvisí (dotaz a odpověď).
10. Opakování od kroku č. 1 pro další testovací případ.

Na Obrázku 18 je ukázka srovnání provozu pro první a poslední testovací případ.



Obrázek 18 Srovnání provozu prvního a posledního testovacího případu hypotézy H2

3.5.2 Testování hypotézy H2

Testovací scénář pro H2 byl založen na provedení 8 testovacích případů, které měly postupně zvyšovat počet dotazů od pozemní přehledové infrastruktury. Délka simulovaného intervalu byla vždy 300 s, aby bylo možné rozlišit nestabilitu v počtu dotazů od lokálních maxim.

Obdobně jako u testování H1, byly použity záznamy z modelu jednoduchého přijímače (RX), který byl pro účely H2 umístěn do těsné blízkosti sledovaného letadla ID=264, aby bylo zajištěno sledování počtu těch adresných dotazů pro toto vybrané letadlo, které se šíří pouze směrově (hlavním svazkem).

Vyhodnocení výstupních souborů simulace bylo provedeno těmito kroky:

1. Výběr všech souborů se záznamy náležejících k danému testovacímu případu.
2. Načtení zachycených přenosů vzestupného a sestupného spoje z jednoduchých přijímačů do aplikace MATLAB
3. Filtrace dat pouze na letadlo ACFT ID=264 a pro odstranění zpráv, které přišly cestou postranního svazku.

4. Shrnutí počtu zpráv dle formátu, odesílatele, sekundy příchodu, zdrojového soubor
5. Vypočtení statistických hodnot (např. střední hodnota, střední odchylka, minimum, maximum) přes jednotlivé soubory se záznamy
6. Vykreslení vypočtených hodnot v závislosti na čase do grafů podle formátů
7. Opakování od kroku č. 1 pro výstupy z dalšího testovací případy
8. Zpracování a vyhodnocení dat

Testovací scénář pro H2 je v Tabulce 27.

Tabulka 27 Testovací scénář pro H2

	ACFT-CFG 1-H2
SSR-CFG1-H2	TC1-H2
SSR-CFG2-H2	TC2-H2
SSR-CFG3-H2	TC3-H2
SSR-CFG4-H2	TC4-H2
SSR-CFG5-H2	TC5-H2
SSR-CFG6-H2	TC6-H2
SSR CFG7-H2	TC7-H2
SSR CFG8-H2	TC8-H2

3.5.3 Testování hypotézy H3

Testovací scénář pro ověření hypotézu H3 vyžadoval simulovat příjem zpráv sestupného spoje na jednoduchý přijímač umístěný v prostředí, ve kterém jsou zastoupeny všechny formáty, tj. DF=0, DF=4, DF=5, DF=11, DF=16, DF=17, DF=20 a DF=21. Toto zadání bylo splněno předcházejícími testovacími scénáři pro hypotézy H1 a H2, a proto nebylo nezbytné opakovat vytváření nového testovacího scénáře. Pro testování hypotézy H3 byla vybrána výstupní data z testovacího scénáře TC7-H1, která poskytovala dostatečné zastoupení formátů sestupných zpráv a zároveň pokrývala kratší časový interval (90 sekund) ve srovnání s výstupy z testovacích scénářů určených pro hypotézu H2. I kratší nahrávka ze simulace totiž uchovává informace o zprávách, které by za reálných podmínek mohly být ztraceny. To redukuje problém při hledání závislosti mezi pravděpodobností ztráty dlouhého Extended Squitteru DF=17 a dalších formátů.

Kritéria pro rozhodnutí o tom, zda bude zpráva označena jako ztracená, byla stanovena následující:

1. Došlo během jejího příjmu k interferenci se zprávou s vyšší intenzitou, nebo

2. přišla v intervalu, kdy přijímač zpracovával jinou zprávu, nebo
3. přišla v intervalu, kdy byl přijímač zaneprázdněn zpracováním jiné zprávy.

Vyhodnocení výstupních souborů simulace bude provedeno těmito kroky:

1. Výběr testovacího souboru sestupného spoje.
2. Načtení zachycených přenosů sestupného spoje z jednoduchých přijímačů do aplikace MATLAB.
3. Shrnutí počtu zpráv dle formátu, odesílatele, sekundy příchodu, zdrojového souboru.
4. Přiřazení příznaku ztracené zprávy, pokud došlo k:
 - a. překrytí s jinou zprávou s vyšším výkonem nebo
 - b. zpráva přišla v době čtení jiné zprávy
5. Výpočet počtu ztracených zpráv pro každý formát zprávy.
6. Výpočet opravných koeficientů (popsáno dále)

V následujícím kroku jsou otestovány 2 metody pro určení opravných koeficientů, které jsou navrženy pro odhad původního množství zpráv daného formátu (tj. množství úspěšně přijatých zpráv + množství ztracených zpráv na příjmu). Bude porovnán rozdíl mezi odhadnutou hodnotu pomocí koeficientu (dle rovnice 9) a množstvím skutečným.

Metoda 1:

- Opravný koeficient α_{LONG} je odvozen ze průměrné četnosti vysílání dlouhého squitteru DF=17, který je použit na korekci množství krátkých i dlouhých zpráv.

Metoda 2:

- Opravný koeficient α_{SHORT} je odvozen průměrné četnosti vysílání krátkého squitteru DF=11, který je použit na korekci množství krátkých i dlouhých zpráv.

$$Q_F = \alpha_{LONG/SHORT} \cdot Q_{R,F} \quad (9)$$

Kde: Q_F ...odhad původního množství zpráv daného formátu F
 α_0 ... opravný koeficient formátů odvozený z referenčních hodnot DF=17 ES (zn. LONG) nebo DF=11 AS (zn. SHORT)
 $Q_{R,F}$... počet úspěšně zaznamenaných zpráv formátu F

V případě testování hypotézy H_3 bude proveden ideální odhad opravného koeficientu pomocí dat ze simulace, aby se do opravného koeficientu nevnášel druhý zdroj nepřesnosti, kterým je odhad samotný. Proto chyby odhadu pro $DF=11$ nebo $DF=17$ budou v případě této úlohy nulové v závislosti na použitém koeficientu.

4 Výsledky

Prezentované výsledky v této kapitole byly získány zpracováním výstupních souborů představeného modelu, který je poskytl na základě simulace přenosového prostředí pro jednotlivé sady konfigurací sdružených pod testovacími případy a jim nadřazeným testovacím scénářům.

Vstupními daty pro zpracování vyhodnocení byly detailní výstupní záznamy jednoho nebo více modelů jednoduchého přijímače v simulovaném prostředí (RX), jehož umístění bylo vybráno s ohledem na potřeby testovacího scénáře. Výstupní soubory jsou rozděleny na Uplink a Downlink, podle čehož obsahují záznamy o zachycených zprávách vzestupného spoje, resp. sestupného spoje.

Informace z těchto výstupních souborů byly zpracovány dedikovanými skripty v prostředí MATLAB, které zahrnovalo načtení dostupných dat, a především následnou analýzu, vyhodnocení a prezentaci výsledků. Položky obsažené v záznamech jsou popsány v Tabulce 28.

Tabulka 28 Položky obsažené v záznamech dotazů (UF) a odpovědí (DF)

Parametr	Jednotky	Záznam	Popis
Time	Mikrosekunda	UF, DF	Časová značka příchodu zaznamenané zprávy na přijímač RX
Sender ID	-	UF, DF	
Triggered by ID	-	DF	Identifikátor elementu, který svým dotazem odpověď vyvolal
Message Format	-	UF, DF	Formát zprávy
Intial Power	decibel-Watt	UF, DF	Původní výkon, kterým byla zpráva vyslána
Actual Power	Decibel-Watt	UF, DF	Přijatý výkon zprávy
Addressee ID	-	UF	Identifikátor elementu, kterému je dotaz určený
Probability	1	UF	Pravděpodobnost, se kterou má dotazovaný element odpovědět

Uvedené výsledky jsou založeny na metodě Monte Carlo, kdy byly jednotlivě pomocí představeného počítačového modelu provedeny opakovaně simulační experimenty podle předem stanoveného testovacího scénáře. Výstupy simulačních experimentů z modelu popsaly formou záznamu přenosů simulované prostředí, v němž byly stanoveny výchozí podmínky daným testovacím případem. Výstupy stejných testovacích případů byly zpracovány jako varianty téhož

prostředí a byly z nich vypočteny statistickými metodami sledované metriky, Jednalo se především o výpočet střední hodnoty četnosti zpráv, směrodatné odchylky, případně maximální či minimální hodnoty podle potřeb testovacího scénáře.

4.1 Výsledky testování hypotézy H1

Výsledky z testování H1 popisují průběh četnosti vzestupných a sestupných zpráv v závislosti na počtu letadel v dosahu jednoduchého přijímače (RX) s nastavenou MTL=-115 dBW, který poskytl data o měření (viz Tabulku 28):. Mezi výsledky nejsou uvedeny četnosti krátkých (DF=11) a dlouhých (DF=17) squitterů, jejichž četnosti není závislá na vybuzení dotazem a jejich nárůst byl proto lineární.

Vyhodnocení bylo provedeno z celkem 16 souborů z celkově 8 testovacích případů, které popisovaly 90 sekundové simulace s rozlišením času po 1 μ s. Jejich složení bylo:

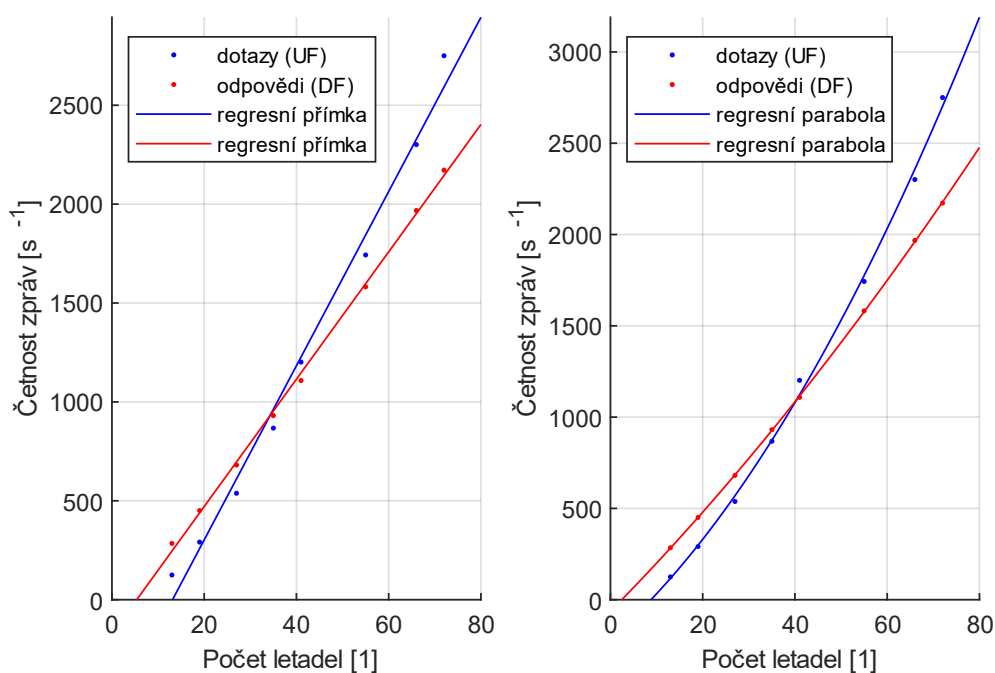
- Dva záznamy přenosů vzestupného spoje pro každý z 8 testovacích případů.
- Dva záznamy přenosů sestupného spoje pro každý z 8 testovacích případů.

Výsledky jsou nejdříve zobrazeny pouze na úrovni dotazů a odpovědí a následuje rozdělení podle jednotlivých dvojic formátů (UF/DF). Výsledky jsou popsány pomocí dvou grafů (sub-grafů), přičemž oba grafy zobrazují tytéž zpracované hodnoty, avšak tímto souborem hodnot jsou proloženy křivky odlišného stupně (regresní křivka prvního a třetího stupně).

Hodnoty koeficientů polynomů a koeficientu spolehlivosti regrese (R^2) jsou uvedeny v souvisejících tabulkách pod grafem. Indexace koeficientů polynomu zachovává následující konvenci:

$$p(x) = p_3x^3 + p_2x^2 + p_1x + p_0$$

$$p(x) = p_1x + p_0$$

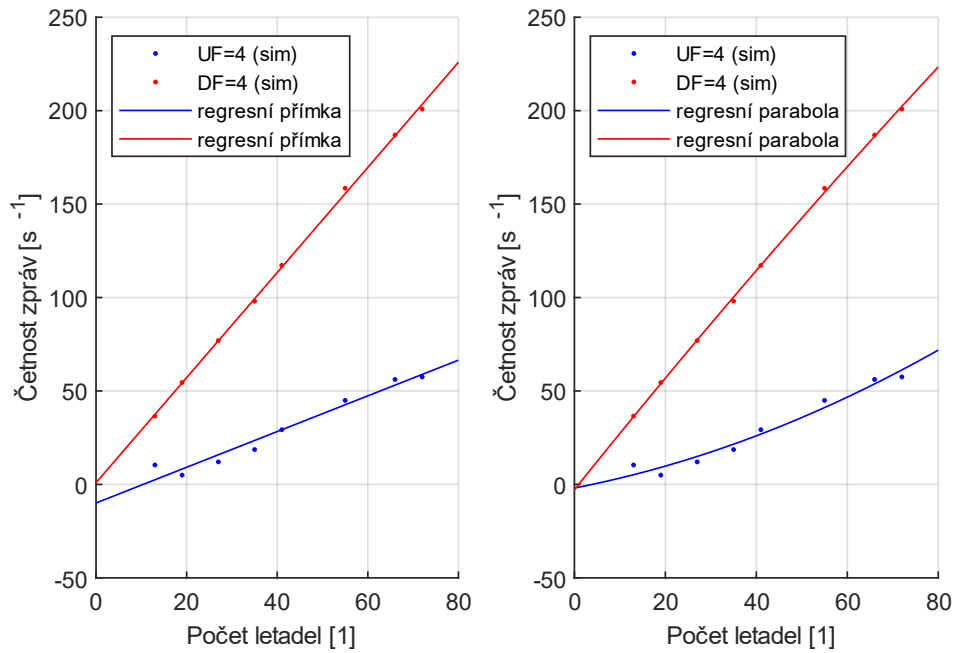


Obrázek 19 Průběh četnosti dotazů a odpovědí na množství provozu bez rozlišení formátu a typu

Obrázek 19 zobrazuje průběh četnosti dotazů a odpovědí ze simulace bez rozlišení formátu nebo typu v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 29).

Tabulka 29 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost dotazů a odpovědí bez rozlišení formátu a typu

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
Dotazy (UF)	Lineární	0.0000	44.040	-578.479	0.9893
Odpovědi (DF)	Lineární	0.0000	32.196	-173.015	0.9985
Dotazy (UF)	Parabolická	0.2550	22.152	-214.333	0.9978
Odpovědi (DF)	Parabolická	0.0767	25.6120	-63.4793	0.9999

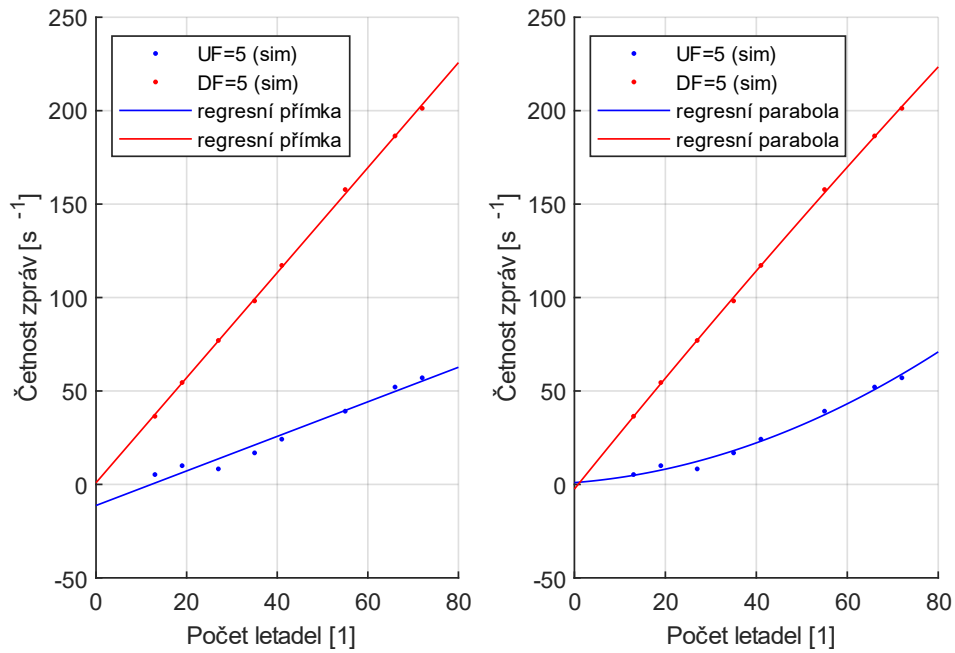


Obrázek 20 Průběh četnosti zpráv UF=4 a DF=4 na množství provozu

Obrázek 20 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=4 a příslušných odpovědí DF=4 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 30).

Tabulka 30 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=4 a DF=4

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
UF=4	Lineární	0.0000	0.9554	-9.9322	0.9591
DF=4	Lineární	0.0000	2.8127	0.8932	0.9993
UF=4	Parabolická	0.0056	0.4747	-1.9350	0.9676
DF=4	Parabolická	-0.0026	3.0363	-2.8274	0.9995

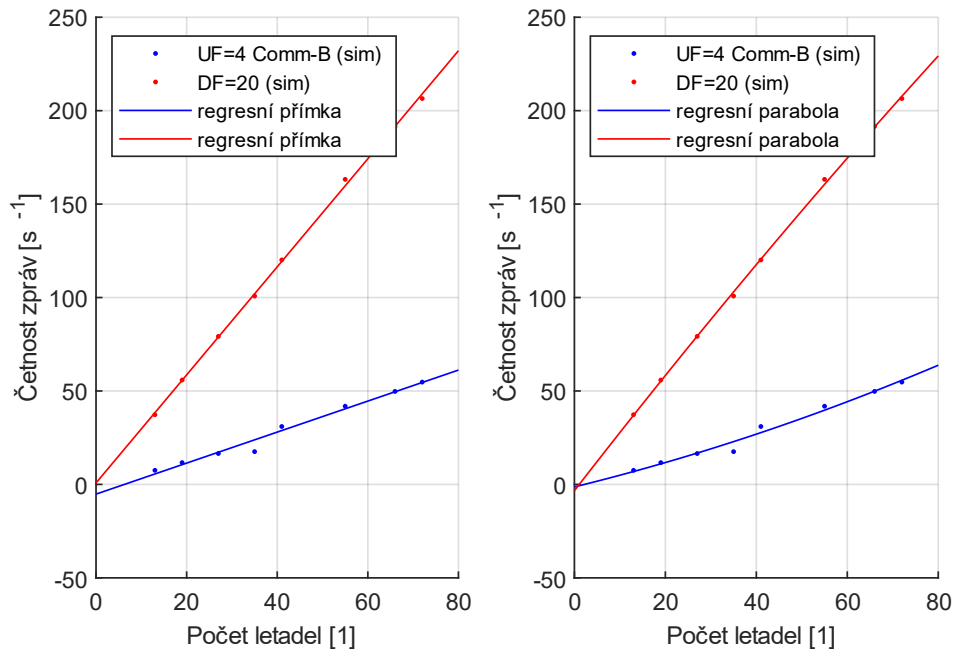


Obrázek 21 Průběh četnosti zpráv UF=5 a DF=5 na množství provozu

Obrázek 21 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=5 a příslušných odpovědí DF=5 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 31).

Tabulka 31 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=5 a DF=5

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
UF=5	Lineární	0.0000	0.9245	-11.2781	0.9669
DF=5	Lineární	0.0000	2.8101	0.9025	0.9995
UF=5	Parabolická	0.0087	0.1890	0.9603	0.9883
DF=5	Parabolická	-0.0024	3.0139	-2.4883	0.9997

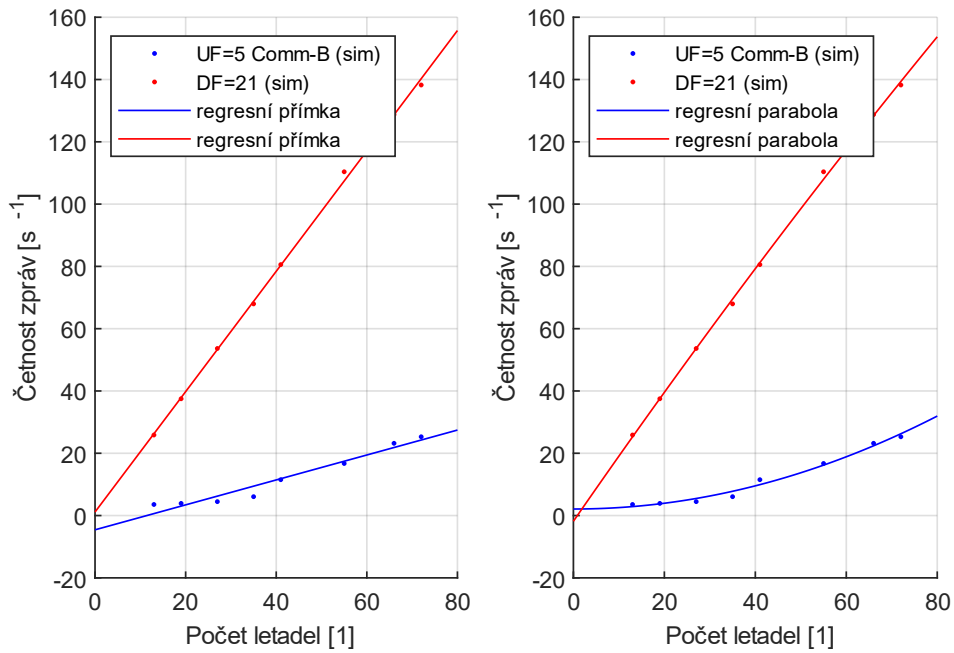


Obrázek 22 Průběh četnosti zpráv UF=4 Comm-B a DF=20 na množství provozu

Obrázek 22 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=4 Comm-B a příslušných odpovědí DF=20 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 32).

Tabulka 32 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=4 Comm-B a DF=20

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
Uf=4 Comm-B	Lineární	0.0000	0.8298	-5.1953	0.9775
DF=20	Lineární	0.0000	2.8911	0.7921	0.9992
Uf=4 Comm-B	Parabolická	0.0027	0.5975	-1.3303	0.9802
DF=20	Parabolická	-0.0029	3.1405	-3.3572	0.9995

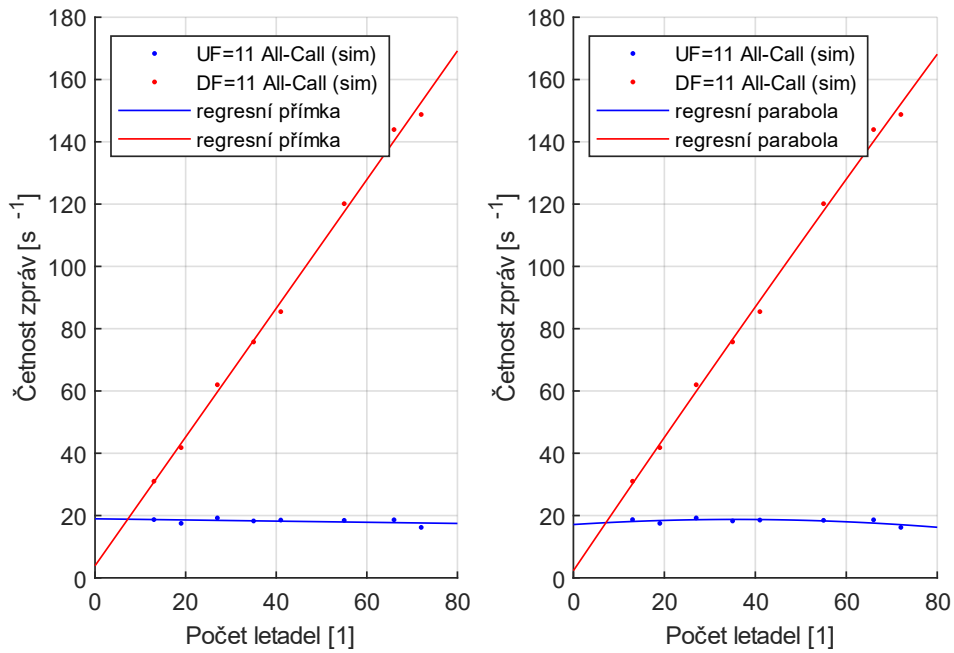


Obrázek 23 Průběh četnosti zpráv UF=5 Comm-B a DF=21 na množství provozu

Obrázek 23 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=5 Comm-B a příslušných odpovědí DF=21 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (**Tabulka 33**).

Tabulka 33 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=5 a DF=21

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
Uf=5 Comm-B	Lineární	0.0000	0.4003	-4.5751	0.9505
DF=21	Lineární	0.0000	1.9322	1.1455	0.9989
Uf=5 Comm-B	Parabolická	0.0047	-0.0010	2.1023	0.9839
DF=21	Parabolická	-0.0021	2.1109	-1.8279	0.9992

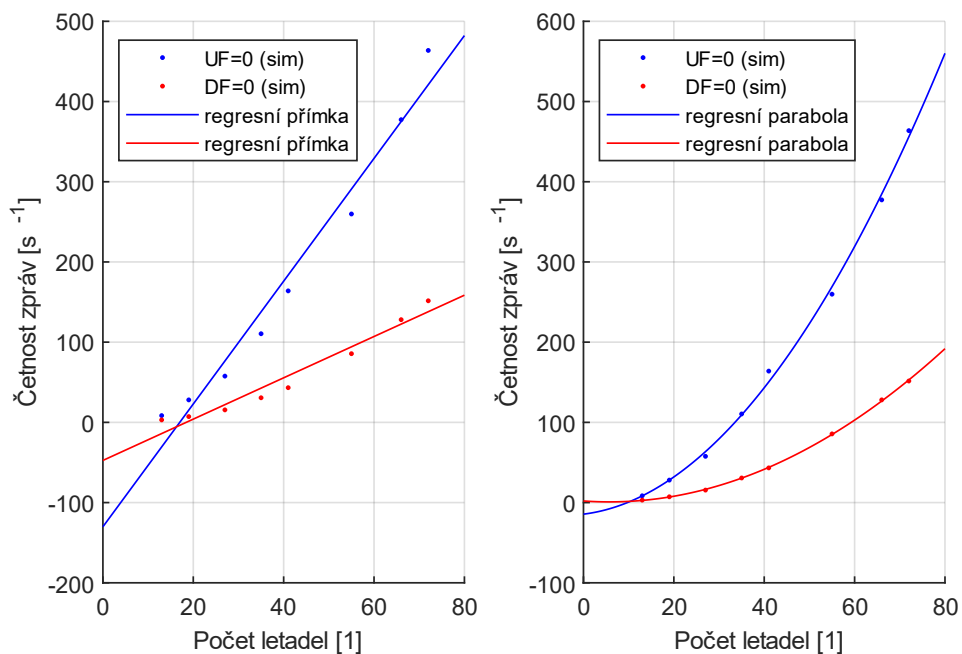


Obrázek 24 Průběh četnosti zpráv UF=11 All-Call a DF=11 All-Call na množství provozu

Obrázek 24 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=11 All-Call a příslušných odpovědí DF=11 All-Call ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 34).

Tabulka 34 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF= 11 All-Call a DF=11 All-call

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
UF=11 All-Call	Lineární	0.0000	-0.0186	18.9548	0.1824
DF=11 All-Call	Lineární	0.0000	2.0663	3.8903	0.9963
UF=11 All-Call	Parabolická	-0.0013	0.0917	17.1203	0.4079
DF=11 All-Call	Parabolická	-0.0011	2.1622	2.2960	0.9963

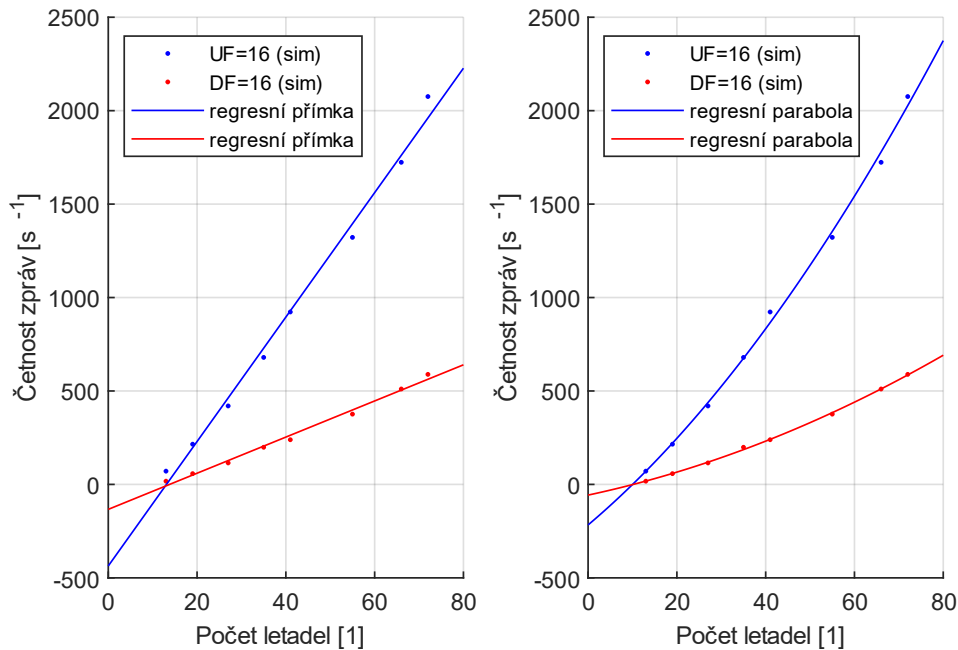


Obrázek 25 Průběh četnosti zpráv UF=0 a DF=0 na množství provozu

Obrázek 25 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=0 a příslušných odpovědí DF=0 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (Tabulka 35).

Tabulka 35 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=0 a DF=0

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
DF=0	Lineární	0.0000	2.5756	-47.455	0.9552
UF=0	Lineární	0.0000	7.6545	-130.155	0.9699
UF=0	Parabolická	0.0810	0.6986	-14.426	0.9979
DF=0	Parabolická	0.0346	-0.3977	2.006	0.9997



Obrázek 26 Průběh četnosti zpráv UF=16 a DF=16 na množství provozu

Obrázek 26 zobrazuje průběh četnosti adresných dotazů UF=16 a příslušných odpovědí DF=16 ze simulace v závislosti na zvyšujícím se počtu letadel prostoru. Příslušné regresní koeficienty jsou uvedeny níže (**Tabulka 36**).

Tabulka 36 Hodnoty regresních koeficientů pro četnost UF=16 a DF=16

Formát zprávy	Typ regrese	Koeficient p2	Koeficient p1	Koeficient p0	Koeficient spolehlivosti R ²
UF=16	Lineární	0.0000	33.2933	-436.298	0.9918
DF=16	Lineární	0.0000	9.6687	-133.494	0.9914
UF=16	Parabolická	0.1537	20.1019	-216.825	0.9973
DF=16	Parabolická	0.0534	5.0831	-57.201	0.9992

4.2 Výsledky testování hypotézy H2

Výsledky testování hypotézy H2 popisují vývoj četnosti vzestupných a sestupných zpráv čase. Data z modelu byla opět pořízena jednoduchým přijímačem (RX), který byl použit pro vytvoření záznamu a přenosech na 1030/1090 MHz. V případě této hypotézy H2 bylo využito umístění RX v blízkosti letadla ID=264 aby bylo možné data poskytnout bližší pohled na závislost mezi dotazy a jimi vyvolanými odpověďmi. Jeho pozice vůči letadlu zajišťovala úspěšně zachycení a synchronní zachycení směrově vysílaných dotazů pozemní sítě SSR.

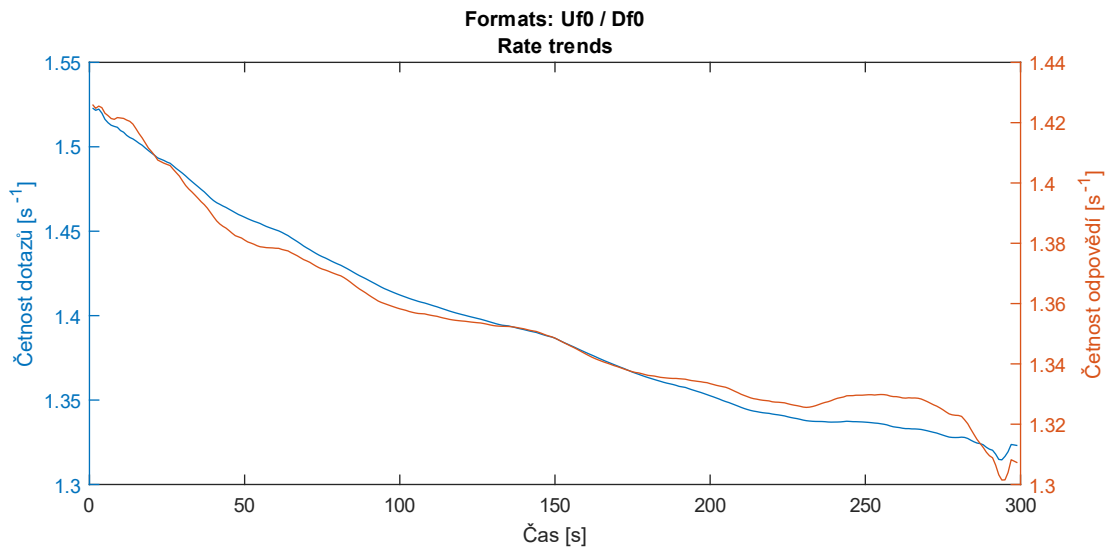
Vyhodnocení bylo provedeno celkem na 20 souborech, které zahrnovaly 300 sekundové simulace s rozlišením 1 μ s. Soubory zahrnovaly:

- 24 záznamů přenosů vzestupného spoje z testovacích případů TC1-H1 až TC1-H7,
- 24 záznamů přenosů sestupného spoje z testovacích případů TC1-H1 až TC1-H7,
- 8 záznamů přenosů vzestupného spoje posledního testovacího případu TC8-H1,
- 8 záznamů přenosů sestupného spoje z posledního testovacího případu TC8-H1.

Vyhodnocení bylo provedeno pro každý testovací scénář individuálně. V rámci těchto dílčích výsledků byla posuzována stacionarita četnosti množství zpráv na obou spojích v závislosti na tom, jak každý testovací případ zvýšil množství dotazů SSR v prostředí. Největší dynamika byla pozorována u posledního testovacího případu TC8-H1, který byl následně opakován, aby poskytl výsledky do této práce, Vyhodnocení je jako u předešlé kapitoly rozděleno podle dvojic formátů tvořící dotaz-odpověď a vývoj jejich četnosti v intervalu 300 sekund je zobrazen formou grafu.

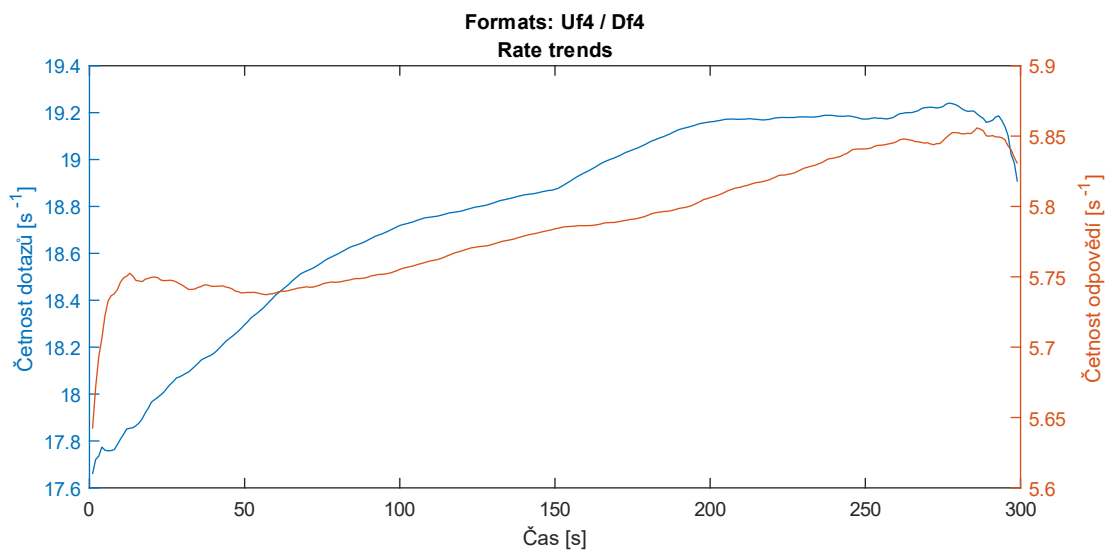
Pro zobrazení četnosti dvojice formátů v jednom grafu bylo přistoupeno k použití grafů se dvěma svislými osami pro každý z formátů. Důvodem byly velmi malé relativní rozdíly, které zanikaly v rámci společného měřítka společné osy. Vyhodnocení je provedeno pro TC8-H1 a zahrnuje pouze ty zprávy, které byly adresovány nebo odeslány letadlem ID=246 a dále neadresné dotazy.

Obrázek 27 zachycuje matematicky vyhlazený průběh četnosti zpráv UF=0 a D=0 na časovém intervalu 300 s, které byly letadlu ACFT ID=246 adresovány nebo jím vyslány. U obou formátů je mírný dlouhodobý pokles četnosti. Následují grafy pro ostatní formáty související taktéž s přenosy spojené s ACFT ID=246.



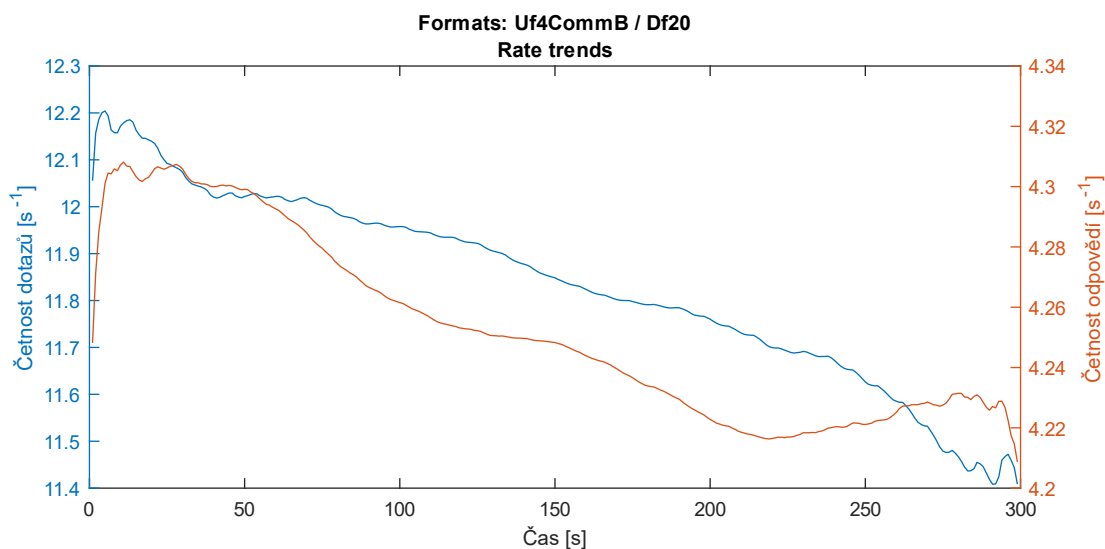
Obrázek 27 Průběh četnosti zpráv UF=0/DF=0 v čase (pro ACFT ID=246)

Obrázek 28 ukazuje mírně rostoucí, matematicky vyhlazený průběh četnosti zpráv UF=4 a DF=4 na časovém intervalu 300 s, které byly letadlu ACFT ID=246 adresovány nebo jím vyslány.



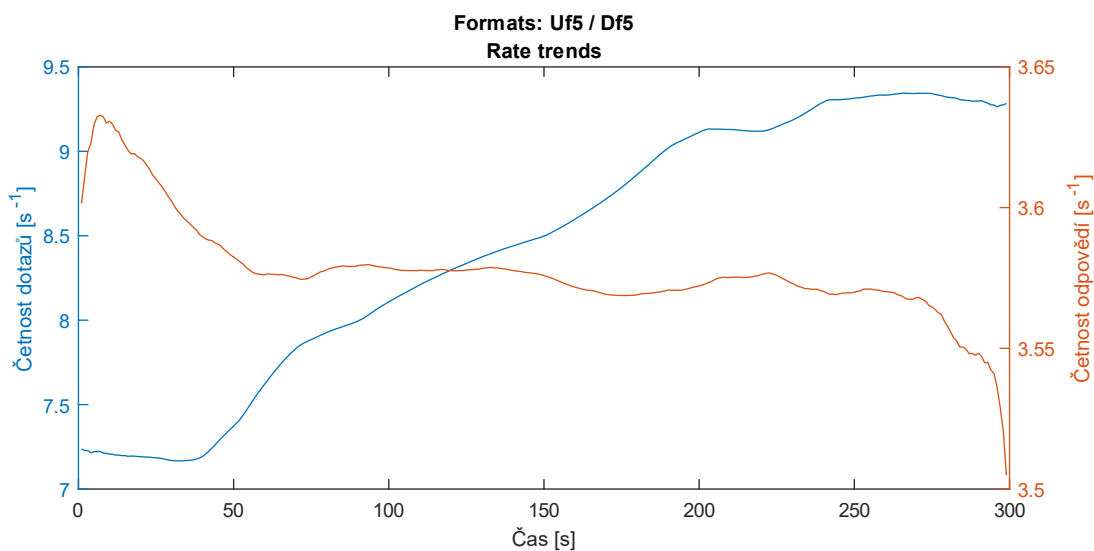
Obrázek 28 Průběh četnosti zpráv UF=4/DF=4 v čase (pro ACFT ID=246)

V případě dotazu UF=4 Comm-B a související odpovědi DF=20 je matematicky vyhlazený trend opačný, klesající, který je také pozorovatelný téměř po celou dobu nahrávky (Obrázek 29).



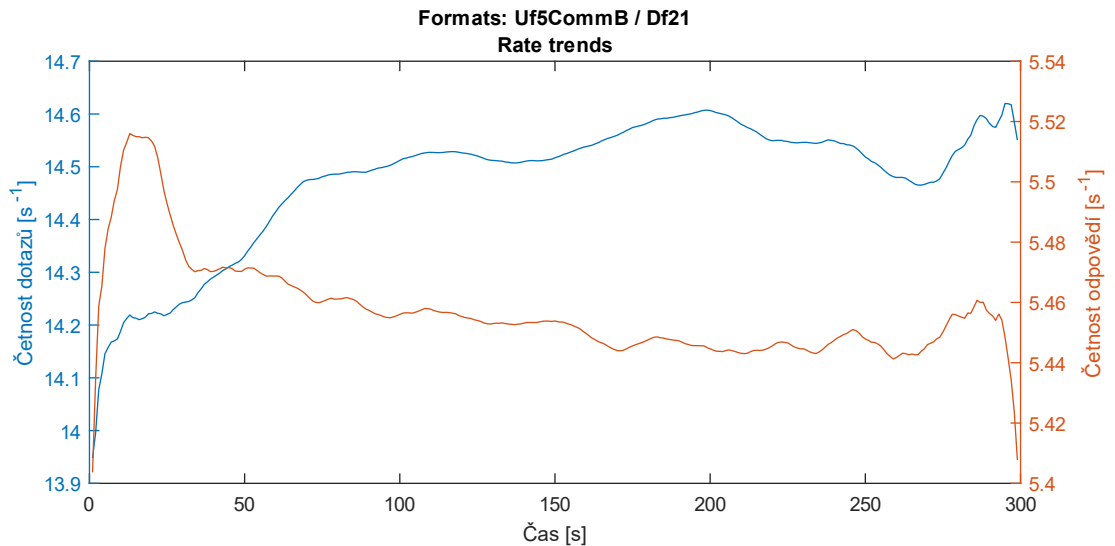
Obrázek 29 Průběh četnosti zpráv UF=4 Comm-B/DF=20 v čase (pro ACFT ID=246)

Obrázek 30 zachycuje průběh matematicky vyhlazeného trendu četnosti zpráv UF=5 a DF=5 v stejném časovém intervalu jako u předešlých obrázků.



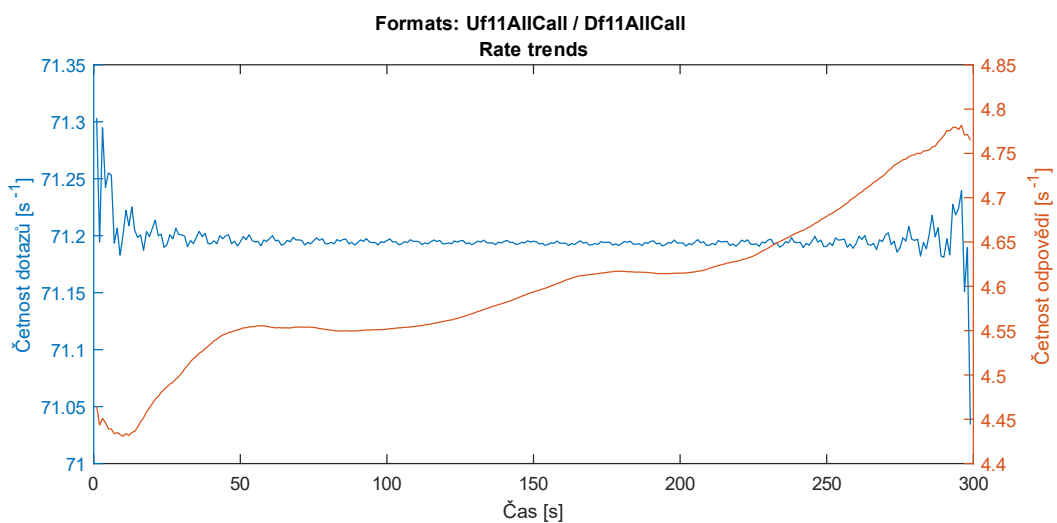
Obrázek 30 Průběh četnosti zpráv UF=5/DF=5 v čase (pro ACFT ID=246)

Obrázek 31 zachycuje matematicky vyhlazený průběh četnosti zpráv UF=5 Comm-B a DF=21, kdy dochází k mírnému zvyšování četnosti dotazů, ale četnost odpovědí od letadla ID=246 relativně klesá.



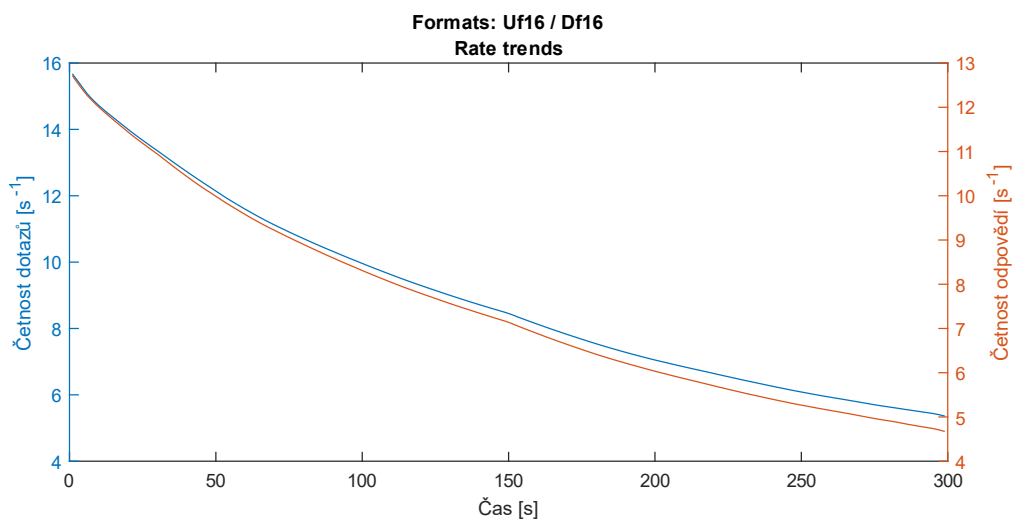
Obrázek 31 Průběh četnosti zpráv UF=5/DF=21 v čase (pro ACFT ID=246)

Jak ukazuje Obrázek 32 matematicky vyhlazeným trendem, v době sledování interakcí letadla ID=246 s okolním prostředím, docházelo k mírném zvyšování odpovědí DF=11 All-Call při téměř konstantním všeobecném dotazování.



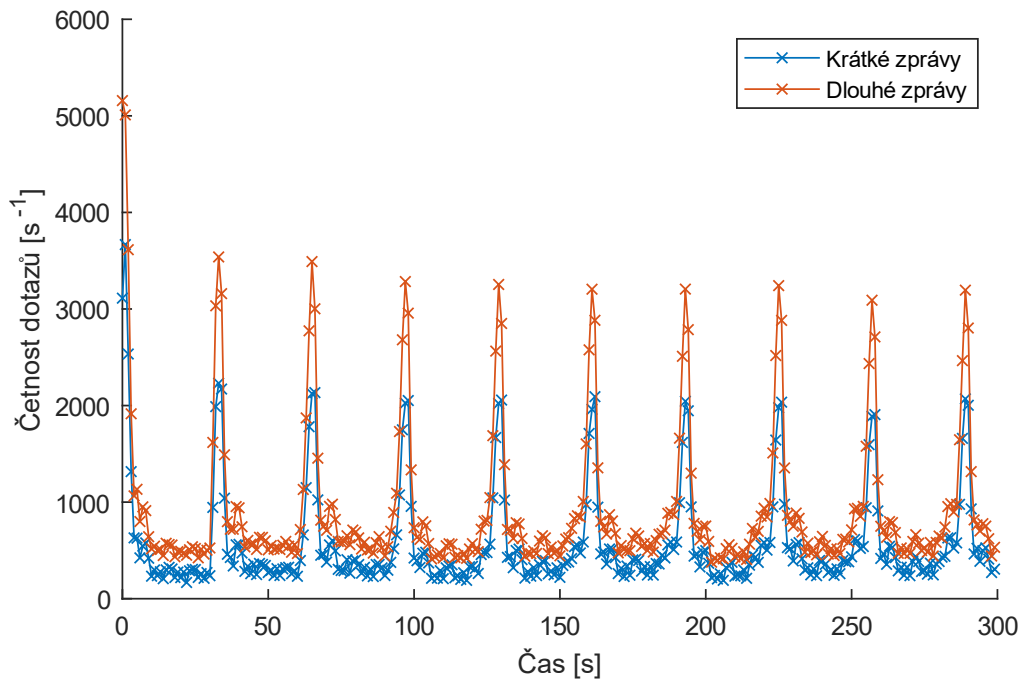
Obrázek 32 Průběh četnosti zpráv UF=11 All-Call/DF=11 All-Call v čase (pro ACFT ID=246)

Poslední Obrázek 33 nabízí pohled na ustálený pokles UF=16 a DF=16 k čtvrtinovým četnostem oproti výchozímu stavu na začátku simulace.



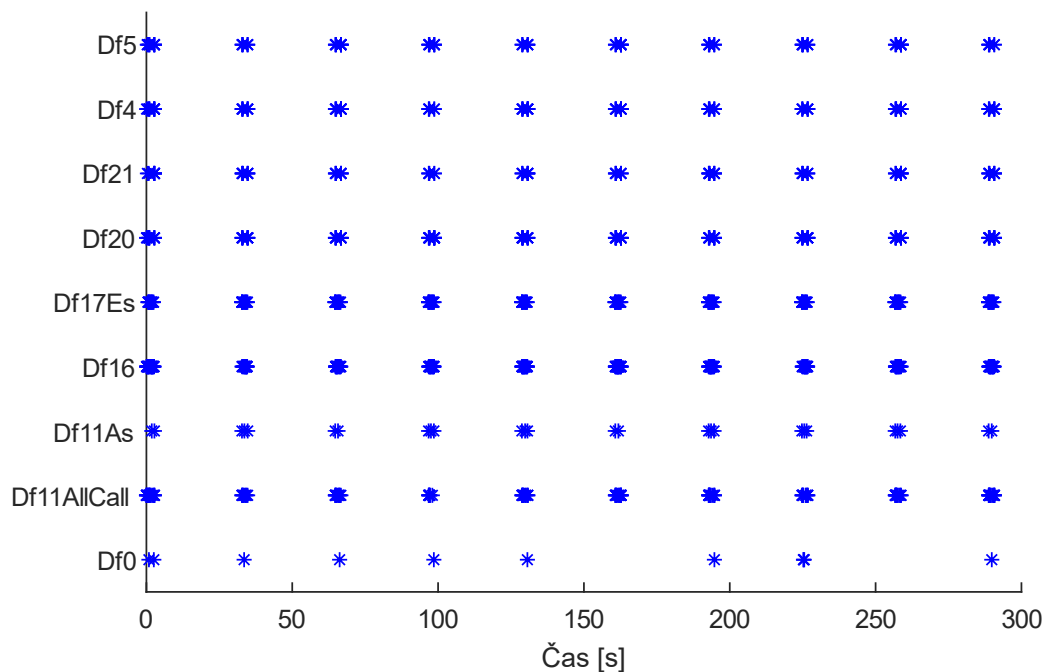
Obrázek 33 Průběh četnosti zpráv UF=16/DF=16 v čase (pro ACFT ID=246)

Obrázek 34 ukazuje pohled na testovací případ (TC8-H2) k hypotéze H2, během něhož se simulované prostředí dostalo nad kritické hodnoty dotazování. Na obrázku jsou patrné skokovité změny v četnosti, které vyvolávají nestability v dané části prostoru.



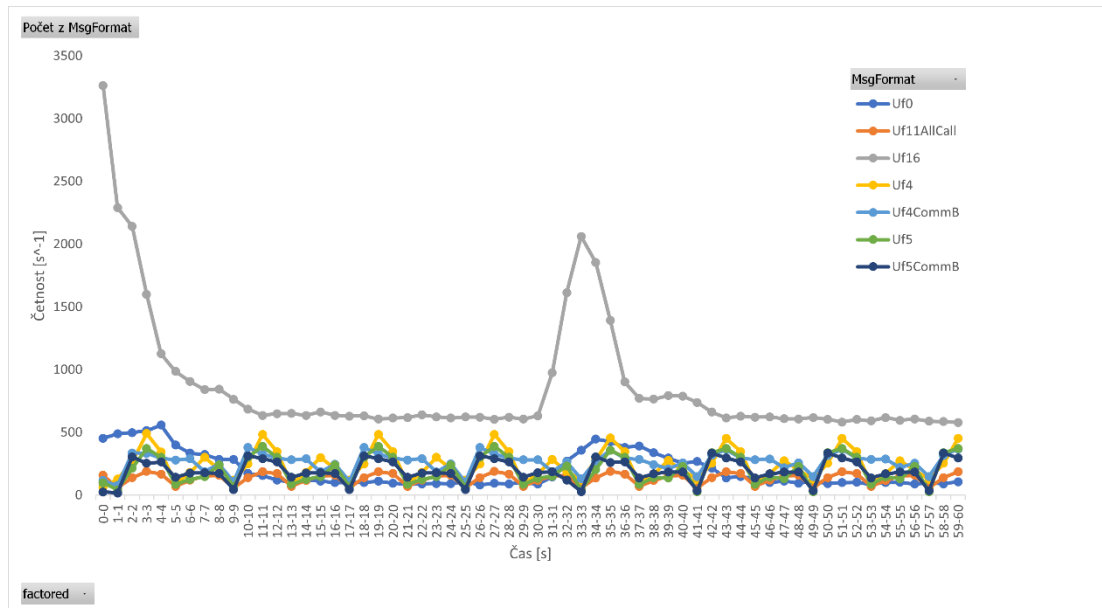
Obrázek 34 Nestabilní průběh přenosů při testování TC8-H2 (odpovědi)

Podíváme-li se na detailní záznam vysílací činnosti odpovídáče letadla ID=246 můžeme zřetelně identifikovat výpadky ve vysílání (viz Obrázek 35). Ty jsou spojeny se simulováním výpadků odpovídáče v důsledku předotazování.



Obrázek 35 Výpadky vysílání ACFT ID=246 při TC8-H2 v důsledku FAILURE stavu

Následuje Obrázek 36 s četností dotazu, kde lze identifikovat podezřelé UF=16, které jsou výrazně na vyšší četnosti než ostatní typu dotazů.

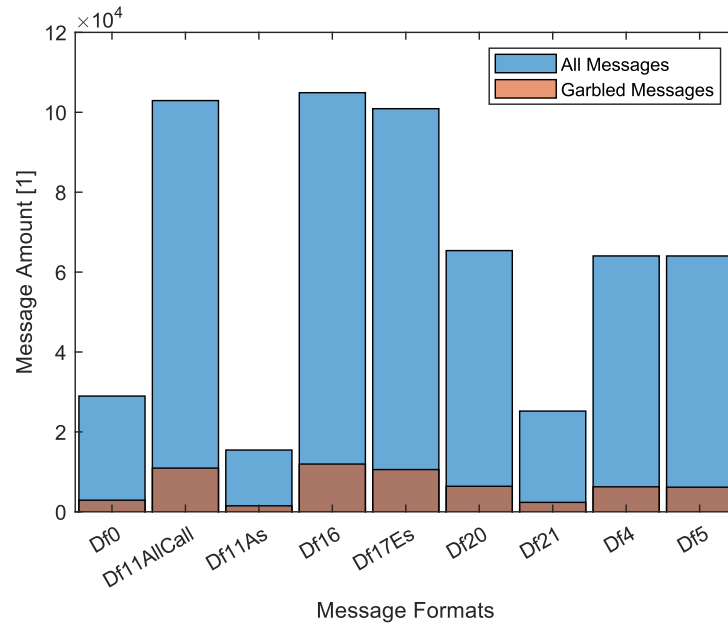


Obrázek 36 Četnost dotazu v čas 0-60s nestabilního prostředí.

4.3 Výsledky testování hypotézy H3

Výsledky testování hypotézy H3 lze rozdělit na dvě části. První se věnuje popisné analýze dat z výstupních souborů simulace a vychází z informací o přesném počtu ztracených zpráv na straně příjmu, které poskytl model. Druhá část se zaměřuje na ohodnocení navržených metod k odhadu pravděpodobnosti ztráty s použitím pouze dostupných informací z reálného měření a porovnává je se simulačními přesnými hodnotami.

Vyhodnocení se v první části zaměřilo na základní parametry o přenosech jednotlivých příchozích formátů na přijímač v době simulace z testovacího případu. Výstupem byly dva sloupcové grafy umístěné přes sebe, které ilustrují celkové množství příchozích zpráv a množství zpráv, které z tohoto celkového množství jsou ztraceny v důsledku překrytí s jinou zprávou nebo v důsledku zaneprázdnění přijímače zpracování zprávy (viz Obrázek 37). Délka zaneprázdnění jednoduchého přijímače po úspěšném přijetí zprávy byla stanovena na 84 μ s.

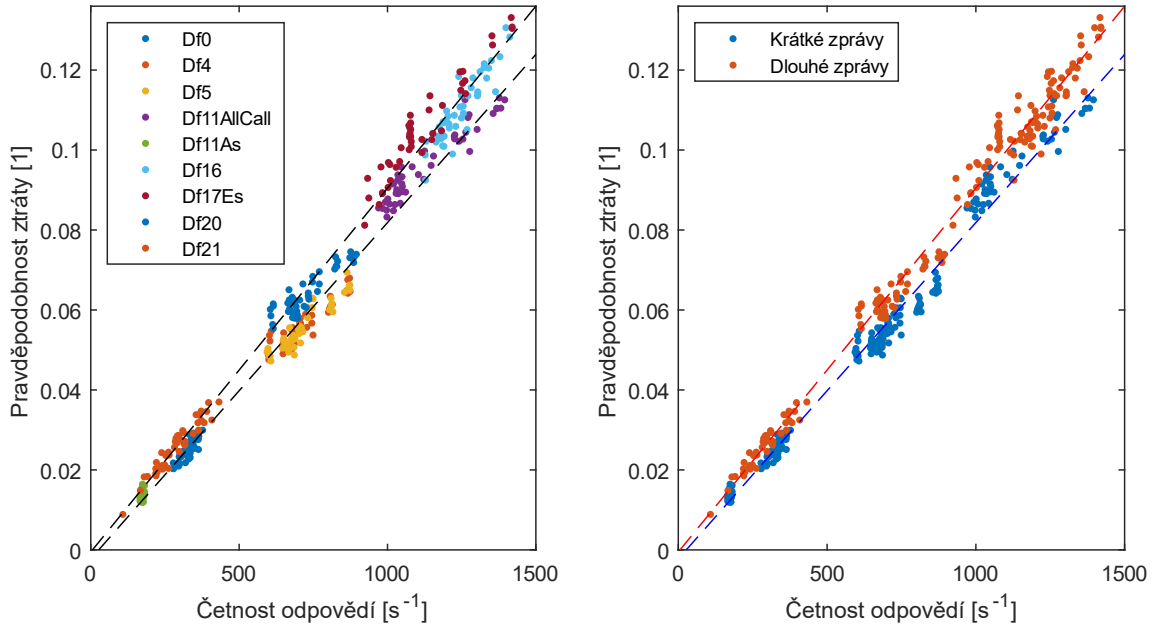


Obrázek 37 Celkové množství příchozích zpráv a ztracených zpráv dle formátu

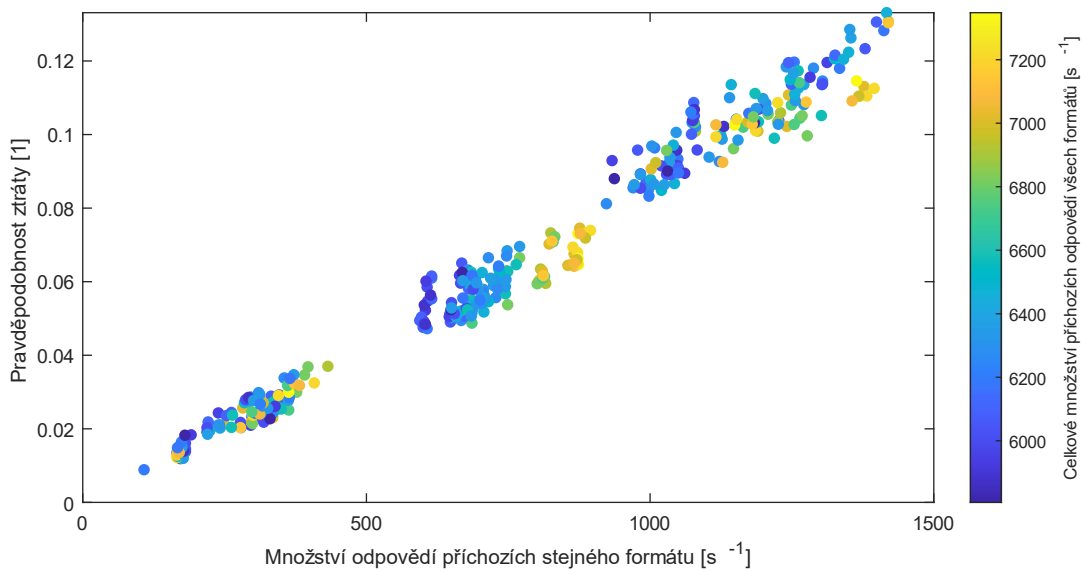
Použitím Dickey-Fullerova testu byla potvrzena stacionarita časové řady příchodu krátkých a dlouhých zachycených sestupného spoje, která byla nutným předpokladem pro výběr referenčního testovacího vzorku.

V dalším kroku bylo provedeno vyhodnocení, jaký vztah je mezi celkovým počtem přijatých zpráv za sekundu daného formátu na pravděpodobnost ztráty na příjmu v důsledku překryvu s jinou příchozí nebo právě zpracovávanou zprávou. Vztah mezi těmito parametry zobrazuje Obrázek 38. Navazující graf (Obrázek 39)

zobrazuje stejná data, avšak pomocí barveného gradientu vyjadřuje celkové množství příchozích zpráv za sekundu bez ohledu na jejich formát.



Obrázek 38 Vývoj počtu ztracených zpráv na počtu příchozích zpráv dle formátu a typu zprávy



Obrázek 39 Poměr ztracených zpráv

Ke grafům (Obrázek 38 a Obrázek 39) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** byla vypočtena korelační matice (Tabulka 37) mezi 4 proměnnými: mezi okamžikem měřením (označeno T), celkovým počtem všech příchozích zpráv za sekundu bez ohledu na jejich formát (v matici značeno G), počtem příchozích zpráv ve stejném formátu (v matici značeno F) a počtem ztracených zpráv za sekundu (v matici značeno L). Z testu korelace vyplývá jako statisticky významný lineární vztah mezi proměnnými F a L.

Tabulka 37 Korelační matice a p-value matice pro proměnné T, F, G, a L

RHO	T	G	F	L
T	1.00	-0.07	-0.01	-0.01
G	-0.07	1.00	0.12	0.17
F	-0.01	0.12	1.00	0.99
L	-0.01	0.17	0.99	1.00

p-value	T	G	F	L
T	1.00	1.00	-0.07	-0.01
G	-0.07	-0.07	1.00	0.12
F	-0.01	-0.01	0.12	1.00
L	-0.01	-0.01	0.17	0.99

Výše uvedené kroky byly provedeny i pro jiné datové vzorky, k

Druhá část vyhodnocení prezentuje použitelnost korekčních koeficientů pro rekonstrukci původního množství zpráv, které na přijímač, ze kterého jsou získána data, mohlo v celém sledovaném intervalu přijít. Pro určení těchto tzv. korekčních koeficientů byly použity krátké a dlouhé zprávy squitteru, tedy DF=11 resp. DF=17. Korekční koeficienty byly určeny pro celou nahrávku, nicméně posuzování rozdílu mezi skutečným množstvím příchozích zpráv v simulaci a množstvím odhadnutém pomocí koeficientů bylo provedeno přes všechny 1 sekundové intervaly nahrávky. Tabulka 38 ukazuje procentuální chybu odhadnutého množství zpráv v prvním vzorku dat. Hodnoty opravných koeficientu byly $\alpha_{LONG} = 0.71$, $\alpha_{SHORT} = 0.79$.

Tabulka 38 Chyba odhad původního množství zpráv u prvního vzorku dat

Formát	Přijato zpráv	Ztraceno zpráv	Celkem zpráv	Chyba odhadu přes α_{LONG}	Chyba odhadu přes α_{SHORT}
DF=0	16	11	27	58%	25%
DF=4	123	55	178	51%	12%
DF=5	119	59	178	52%	15%
DF=11 All-Call	257	104	361	49%	10%
DF=11 AS	71	19	90	44%	0%
DF=16	712	451	1163	56%	22%
DF=17 ES	416	166	582	49%	9%
DF=20	115	67	182	55%	20%
DF=21	43	28	71	57%	23%

Tabulka 39 a Tabulka 40 obsahují další nahledy na výsledky odhadu přes opravné koeficienty v případě 2. a 3. datového vzorku. Hodnoty opravných koeficientu byly $\alpha_{LONG} = 0.87$, $\alpha_{SHORT} = 0.91$, resp. $\alpha_{LONG} = 0.36$, $\alpha_{SHORT} = 0.79$,

Tabulka 39 Chyba odhadu původního množství zpráv u druhého vzorku dat

Formát	Přijato zpráv	Ztraceno zpráv	Celkem zpráv	Chyba odhadu přes α_{LONG}	Chyba odhadu přes α_{SHORT}
DF=0	8	1	9	2%	2%
DF=4	360	22	382	8%	4%
DF=5	331	49	380	0%	4%
DF=11 All-Call	617	42	659	8%	3%
DF=11 AS	81	8	89	5%	0%
DF=16	164	26	190	1%	5%
DF=17 ES	506	76	582	0%	4%
DF=20	331	53	384	1%	5%
DF=21	126	28	154	6%	10%

Tabulka 40 Chyba odhadu původního množství zpráv u třetího vzorku dat

Formát	Přijato zpráv	Ztraceno zpráv	Celkem zpráv	Chyba odhadu přes α_{LONG}	Chyba odhadu přes α_{SHORT}
Df0	19	1	20	166%	21%
Df4	258	68	326	121%	1%
Df5	257	70	327	120%	0%
Df11AllCall	527	160	687	115%	2%
Df11As	70	19	89	120%	0%
Df16	155	44	199	118%	1%
Df17Es	208	374	582	0%	55%
Df20	250	85	335	109%	5%
Df21	105	34	139	111%	4%

5 Diskuse testování a vyhodnocení hypotéz

Testování výzkumné hypotézy 1

Výsledky testování hypotézy H1 poskytly pohled na průběhy středních hodnot četnosti zpráv vzestupného (1030 MHz) a sestupného (1090 MHz) spoje v závislosti na zvyšování počtu letadel ve sledované oblasti. V simulaci naměřené hodnoty vyjádřené střední hodnotou jsou proloženy regresním polynomem prvního a druhého stupně. Mezi skupinami formátů lze identifikovat základní podobnosti i rozdíly, které jsou dále uvedeny.

Zaměříme-li se v úvodu na výsledky formátů sestupného spoje DF=4, DF=5, DF=20 a DF=21, které souvisí s dotazováním pozemních přehledových systémů, lze na nich potvrdit, že se se zvyšujícím počtem letadel v prostoru jejich četnost zvyšovala a vykazovala konvexně parabolický průběh.

Nelineární nárůst lze vysvětlit dvěma složkami, které určují počet dotazů. První z nich je počet sledovaných letadel, které SSR pravidelně jednotlivě dotazuje. S ohledem na dotazovací plán, podle něhož jsou letadla dotazována, je tedy počet plánovaných adresných dotazů lineárně závislý na počtu sledovaných letadel. Druhou složkou, která do problematiky přináší právě nelinearitu, je opakování adresných dotazů v důsledku nezískání odpovědi od letadla. S vyšším počtem dotazů roste zatížení odpovídače a tedy pravděpodobnosti, že v důsledku interference nebo zaneprázdnění odpovídače, dojde k nezodpovězení dotazu.

V případě souvisejících odpovědí DF=4, DF=5, DF=4 Comm-B a DF=5 Comm-B docházelo při zvyšování provozu také k nárůstu četnosti, který byl slabě konkávně parabolický, velmi blízký lineárnímu průběhu. Ačkoliv je ve výsledcích simulace nelinearita zvyšování četnosti velmi slabá, lze ji potvrdit u všech formátů odpovědí na selektivní dotazy SSR. Zde je nelinearita spojena se zvyšující se pravděpodobností, že dotaz nebude úspěšně přečten a nebude tedy vyvolána ani odpověď, která by zatížila přenosové pásmo.

Poslední dvojicí dotaz-odpověď, která souvisí s činností sekundárních přehledových radarů, je všeobecný dotaz UF=11 All-Call a související odpověď DF=11. Podle výsledku pro UF=11 All-Call vyplývá, že je četnost všeobecných dotazů ovlivněna počtem letadel v provozu. To je ovšem v rozporu s popsáním způsobem implementace All-Call periody v modelu, která se opakuje pravidelně a

vysílá právě jeden dotaz bez ohledu na počet letadel v hlavním svazku. Při porovnání regresního koeficientu druhého řádu s ostatními formáty, je jeho hodnota nejnižší. Více dat a tedy bodů pozorování by pravděpodobně vyloučilo tuto parabolickou závislost ještě více zeslabilo a regresní koeficient by konvergoval k nule.

Ve výsledcích spojených s přenosy mezi letadly a sekundárním radarem lze zaznamenat vyšší četnost odpovědí než dotazů. Jedná se o důsledek směrového dotazování pozemního radaru, kdy jsou všechny dotazy zachyceny jen během krátkém intervalu, kdy svazek přechází přes přijímač, na rozdíl od odpovědí, které se šíří prostorem všesměrově a jejich příjem je v čase rovnoměrný. Pozorované zvýšení četnosti dotazů je tedy výsledkem zvyšování dílčích četností dotazů od jednotlivých SSR, které do prostoru hlavního svazku vysílají všeobecné i adresné dotazy a které zároveň svým hlavním svazkem ozářily přijímač RX.

Pokud by se do modelu přidaly dotazovače, které vysílají všesměrově nebo sektorově (např. MLAT systémy), je předpoklad, že by se na RX naměřené četnosti adresných dotazů a jejich růst zesílily.

U výsledků souvisejících s přenosy mezi letadly v rámci protisrážkových systémů, realizovaných ve formátech $UF=0/DF=0$ a $UF=16/DF=16$, lze na jejich průběhu četnosti v závislosti na počtu letadel jednoznačně potvrdit nelineární nárůst, jak v oblasti dotazů, tak v oblasti odpovědí. Díky všesměrovému šíření těchto zpráv je synchronně zachyceno vysílání oběma spoji, které umožňuje popsat 3 zásadní vlastnosti této komunikace. Prvním z nich jsou vyšší četnosti dotazů ve srovnání s odpověďmi, které kompenzují ztráty zpráv. Narůstající rozdíl mezi oběma křivkami pro dotazy a odpovědi se zvyšujícím se provozem naznačuje nelineární nárůst četnosti ztracených zpráv při přenosech. Třetí je konvexně parabolický nárůst četnosti na straně dotazů. Důvodem jsou situace, kdy dotazované letadlo přijme dotaz a vyšle odpověď, ale dojde ke ztrátě na straně dotazujícího letadla. Tato situace může proběhnout opakovaně a má dopad na zvyšování četnosti nejen dotazů, ale i odpovědí. Jev ztráty odpovědi na straně dotazovače není v této verzi modelován u SSR elementu, kde se v rámci modelu očekávaly ideální degarblovací algoritmy, a proto je tento jev navyšování četnosti odpovědí v důsledku zatíženého prostředí pozorovatelný pouze u interakce elementů typu letadlo-letadlo a je mimo jiné také umožněn rovnoměrnějším rozložením dotazů v čase oproti modelu

radaru, kde probíhá v omezeném časovém intervalu, při němž je letadlo v ozáření hlavního svazku.

Potvrzení výzkumné hypotézy 1

Výzkumná hypotéza H1 byla definována jako: „Nárůst celkového množství přenosů na RF 1030 MHz a 1090 MHz není lineární v závislosti na zvýšení počtu letadel ve sledované oblasti.“ Výsledky testování potvrdily stanovenou výzkumnou hypotézu H1.

Testování výzkumné hypotézy 2

Testování druhé výzkumné hypotézy H2 se zaměřilo na sledování vývoje středí hodnoty četnosti dotazů a odpovědí. V rámci testovacího scénáře pro H2 byly v simulovaných prostředích postupně zvyšovány počty dotazů od SSR. Tyto modifikace byly provedeny vždy shodně pro celé skupiny sekundárních radarů (periody otáčení).

Do výsledků byly vybrány výstupy z testovacích případů TC7-H2 a TC8-H2, v rámci nichž došlo v důsledku dotazování k dvěma projevům, které vykazovaly odlišné, nestabilní chování, které omezovalo schopnost detekce kooperativních cílů. Ostatní testovací případy vykazovaly stabilní podmínky v přenosovém prostředí, ve kterém množství dotazů ani odpovědí nevykazovaly skokové změny.

Všechny vyhodnocené výstupy provedené dle testovacího případu TC7-H2 vykazovaly stabilní podmínky v přenosovém prostředí, ve kterém množství dotazů ani odpovědí nevykazovaly skokové změny. Nicméně na vyhodnocovaném intervalu si lze povšimnout některých postupných změn v dotazování SSR, kdy dochází k mírnému zvyšování četnosti UF=4, UF=5 a UF=5 Comm-B. Zatímco v případě souvisejících odpovědí ve formátu DF=4 dojde také ke zvyšování, četnost zpráv ve formátu DF=5 a DF=21 vykazují sestupný trend. Je nutné ovšem upozornit, že grafy s popisovanými výsledky používají dvou svislých os pro vyjádření četnosti dotazů a odpovědí, které nesdílí stejné měřítko. V případě četnosti formátu UF=4 Comm-B lze pozorovat shodný klesající trend i u odpovědí DF=20.

Vezme-li úvahu změny v četnosti dotazování bez ohledu na jejich formát, lze výpočtem ilustrovat, že v součtu tyto hodnoty oscilují kolem střední hodnoty a došlo spíše k alokaci dotazovacích kapacit SSR na některé dotazy v neprospěch jiných formátů.

Za pozornost stojí průběh četnosti DF=11 All-Call, který v průběhu sledovaného intervalu 300 sekund vykazoval v průměru mírný nárůst, který naznačuje, že se letadlo mohlo nacházet v několikanásobně v krytí Tracking Range, kde nebylo blokováno na všeobecné odpovědi a okolní podmínky (souběh ozaření více svazky) vyvolal toto chování.

Pokud se ovšem zaměříme na dotazy a odpovědi používané protisrážkovým systémem TCAS můžeme vypožorovat, že jejich četnost za dobu sledování plynule klesala. Zatímco je pokles u UF=0/DF=0 mírný, u koordinačních zpráv typu UF=16/DF=16 došlo k poklesu relativně většímu. Snížení jejich četnosti může souviset s tím, že se byla přerušena postupně řada komunikací letadla s letadlem-narušitelem a nebyla systémy navázaná ani po opakovaném dotazování. Dle pravidel pak došlo k ukončení sledování tohoto letadla. Nicméně nepodařila se ani opětovná akvizice, která by se projevila opětovným navýšením četnosti DF=0 a následně i DF=16.

Dočasná nestabilita UF=11 All-Call na začátku a konci grafu je dána omezením na okrajových částech datového souboru při hledání trendu v grafu. Podobných projevů si lze všimnout i na předešle diskutovaných grafech. Druhým faktorem je inicializace simulace, kdy se rozběhnou interakce mezi elementy skokově v čase $t=0$, a to i navzdory snaze v modelu tyto projevy redukovat částečnou inicializací před zahájením simulační smyčky.

Z pohledu požadavků SSR na aktualizaci informací z ACFT byl nejnáročnější testovací případ TC8-H2.

Na grafu průběhu celkové četnosti dlouhých a krátkých odpovědí lze vypožorovat lokální maxima, která jsou daná maximální schopností elementů v prostředí. Kritická úroveň množství dotazu byla důvodem předotazování hned po zahájení simulace, které způsobila v krátkém časovém intervalu přechodu dotčených letadel do stavu FAILURE, který byl kompilačně nastaven na hodnotu 30 sekund. V této době byly v prostoru přijímány zprávy na sestupném spoji pouze zprávy od zbylých letadel v prostoru, která nebyla díky své poloze ovlivněna vysokou četností dotazů a hladina odpovědí byla stabilní. Po postupném obnovení činnosti odpovídačů ze stavu FAILURE do IDLE, začal opět strmě narůstat počet dlouhých a krátkých odpovědí a v krátkém čase došlo opět k předotazování.

Potvrzení výzkumné hypotézy 2

Výzkumná hypotéza H2 byla definována jako: „Existuje kritické množství dotazů na RF 1030 MHz, po jehož překročení začne docházet k samovolnému a neomezenému růstu přenosů mezi ovlivněnými systémy na RF 1030/1090 MHz, aniž by se měnily výchozí podmínky.“ Výsledky testování potvrdily stanovenou výzkumnou hypotézu H2.

Testování výzkumné hypotézy 3

Testování výzkumné hypotézy 3 využilo výhody simulace, ve které je možné zaznamenat i zprávy, které byly v důsledku interference nebo zaneprázdnění přijímače jinou zprávou ztraceny. Zpracováním dat z vznikl testovací vzorek, který poskytoval pro každou sekundu:

- celkový počet příchozích zpráv (značeno G),
- počet jednotlivých příchozích formátů (značeno F),
- počet ztracených zpráv daného formátu (značeno L).

Syntetická nahrávka RX z modelu poskytla vhodný datový vzorek pro testování návrhů opravných koeficientů, kterými by mělo být možné určovat původní množství zpráv, které bylo vybraným letadlem v prostředí odvysíláno

Histogramy potvrdily předpoklad, že ve zkoumaném přenosovém prostředí jsou sice jednotlivé formáty zastoupeny různě, ale existuje podobnost v poměrném zastoupení ztracených zpráv v závislosti na délce zprávy.

Na datových souborech (nahrávkách) vykazoval souhrně lepší výsledky opravný koeficient α_{SHORT} odvozený z $DF=11$ AS, který na celkovém množství 8365 zprávách vykazoval odchylku 10% v případě α_{LONG} to bylo 13% Testování poukázalo na vhodnost hlubší analýzy této problematiky, jelikož prezentované výsledky odpovídají předpokladu správně odhadnutého koeficientu..

Potvrzení výzkumné hypotézy 3

Výzkumná hypotéza H3 byla definována jako: „Z úspěšnosti příjmu zpráv Extended Squitteru od jednoho letadla na přijímač lze určit koeficienty pro odhad úspěšnosti příjmu jiných formátů sestupných zpráv přijatých na tento přijímač.“ Výsledky testování potvrdily stanovenou výzkumnou hypotézu H3.

6 Závěr

Dizertační práce v úvodu nastínila problematiku kooperativního přehledových technologií, které tvoří jednu ze základních vrstev přehledové informace v civilním letectví. Ta spočívá v nutnosti kvalitní datové komunikace na RF 1030/1090 MHz, které ovšem degraduje s přibývajícím množstvím přenosů a vyvolává potřebu stav přenosového prostředí umět popsat, predikovat nebo identifikovat jeho krajní podmínky.

Pro řešení stanovených výzkumných hypotéz byl navržen a v práci popsán softwarový nástroj, který využívá multiagentní přístup k modelování a simulaci přenosů v prostředí kooperativních technologií. Model byl verifikován na datovém vzorku z reálného měření a následně byl použit k otestování tří výzkumných hypotéz, k nimž poskytl potřebná data.

Omezení modelu, které bylo již v návrhové fázi identifikováno, je závislost kvality výstupu modelu na kvalitě či dostupnosti vstupních dat. Příkladem mohou být provozní parametry přehledové infrastruktury zasahující do simulovaného prostředí nebo popis chování a výkonnosti palubních odpovídačů nebo protisrážkových systémů přímo od výrobců nebo testovacích laboratoří. Proto bylo nutné simulace provádět na zčásti odhadnutých nebo generalizovaných parametrech odvozených například z technických standardů.

Nedostupnost informací a jejich zobecnění omezuje rozsah verifikace, má-li být založena na porovnání výstupu se skutečným prostředím. V případě verifikace nebyla například objasněna příčina malé četnosti ADS-B vysílání v reálných datech. Koncept představeného modelu nicméně počítá a umožňuje budoucí zpřesňování v různých jeho částech.

I přes výše zmíněné limitace práce byl vytvořen plně konfigurovatelný simulační model prostředí 1030/1090 MHz, který je využitelný pro analýzy zatížení pásma 1030/1090 MHz s libovolnou konstelací přehledových systémů a libovolným provozem. Přínosem je využití multiagentního přístupu v modelování, které umožňuje sledovat vývoj stavu prostředí na několika úrovních rozlišení. Přínosem oproti statistickému přístupu je zahrnutí zpětnovazebního charakteru komunikace mezi prvky. Dalším aspektem je pak zahrnutí popisu vzestupného spoje 1030 MHz,

který je v reálných podmínkách komplikované měřit pozemními přijímači a je spíše realizován měřícími lety.

Vytvořený model poskytuje platformu pro několikaúrovňové zkoumání problematiky přenosů na dedikovaných pásmech. Jeho architektura umožňuje další zpřesňování nebo přizpůsobení na požadavky simulační experimentů. Dalším krokem v rozvoji modelu může být vhodnější implementace multilateračních systému z pohledu jejich dotazování nebo zavedení pohybu letadel v prostředí, které může přinést do modelu další změny v interakcích.

7 Reference

- [1] EUROCONTROL. Transponders in aviation. *NET ALERT - the Safety Nets newsletter* [online]. 2014, (May) [vid. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2711.pdf>
- [2] EUROCONTROL. Surveillance infrastructure - the backbone for safety nets. *NET ALERT - the Safety Nets newsletter* [online]. 2016, (21), 1–7 [vid. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3393.pdf>
- [3] EASA. *Annual Safety Review* [online]. 2014 [vid. 2017-01-05]. Dostupné z: doi:10.2822/541561
- [4] STROHMEIER, Martin, Matthias SCHAFER, Rui PINHEIRO, Vincent LENDERS a Ivan MARTINOVIC. On Perception and Reality in Wireless Air Traffic Communication Security. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. 2016. ISSN 15249050 [vid. 2017-01-05]. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2016.2612584
- [5] SCHÄFER, Matthias, Martin STROHMEIER, Vincent LENDERS, Ivan MARTINOVIC a Matthias WILHELM. Bringing up OpenSky: A large-scale ADS-B sensor network for research. *IPSN 2014 - Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (Part of CPS Week)* [online]. 2014, 83–94. Dostupné z: doi:10.1109/IPSN.2014.6846743
- [6] PANKEN, A.D., W.H. HARMAN, C.E. ROSE, A.C. DRUMM, B.J. CHLUDZINSKI, T.R. ELDER a T.J. MURPHY. Measurements of the 1030 and 1090 MHz Environments at JFK International Airport. *Project Report ATC-390* [online]. 2012. Dostupné z: https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Panken_2012_ATC-390_WW-25379.pdf
- [7] ICAO. *DOC 9871 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter* [online]. 1st vyd. 2008. ISBN 9789292311179. Dostupné z: <http://www.cats.com.kh/download.php?path=vdzw4dHS08mjtKi6vNi31Mbn0tnZ2eycn6ydmqPE19rT7Mze4cSYpsetmdXd0w==>
- [8] EUROCONTROL. Operational Safety Study: Risk of operation without a transponder or with a dysfunctional one [online]. 2014. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/top-5-Safety-n3-study-risk-of-ops-without-transponder.pdf>
- [9] PEI, Guangyu, Arun AYYAGARI, James FARRICKER a Sue-lynn YIM. Boeing Technical Journal 1030 / 1090 MHz Relative Margin Analysis [online]. 2017. Dostupné z: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/specialty/innovation-quarterly/February-2017/BTJ_frequency_FULL.pdf
- [10] ORSI, Robert J., John B. MOORE a Robert E. MAHONY. Spectrum estimation of interleaved pulse trains. *IEEE Transactions on Signal Processing* [online]. 1999,

- 47(6), 1646–1653. ISSN 1053587X. Dostupné z: doi:10.1109/78.765135
- [11] SILLARD, L.; VERGNE, F.; DESART, B. EUROCONTROL MODE-S Specific Services Installation on A300/600ST Belugua Aircraft [online]. 2000, 12(13), 93–129. ISSN 0014-0139. Dostupné z: doi:10.1177/1090820X10391211
- [12] PANTELIDES, Ralph. AN SSR/IFF ENVIRONMENT MODEL. *92 International Conference on Radar, Brighton*. 1992, 134–136.
- [13] EUROCONTROL. ACAS PROGRAMME Final Report on Electromagnetic Environmental Effects of, and on, ACAS [online]. 2002, (March). Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/safety/ACAS/acas-acasa-finalreportonelectromagneticenvironmentaleffectsofandonacas-workpackage5-2002.pdf>
- [14] PARK, Pangun a Claire TOMLIN. Investigating Communication Infrastructure of Next Generation Air Traffic Management. *Cyber-Physical Systems (ICCPs), 2012 IEEE/ACM Third International Conference on* [online]. 2012, 35–44. Dostupné z: doi:10.1109/ICCPs.2012.12
- [15] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION AND EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE. 1090 MHz Extended Squitter Assessment Report June 2002 [online]. 2002, (June), 1–121. Dostupné z: www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/...SSP.../FAA_EEC_1090report.pdf
- [16] 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. [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32011R1207>
- [17] EUROCONTROL: EMIT Documentation - European Monitoring of Interrogators and Transponders. 2022. Dostupné z: <https://emit.sero-systems.de/doc/>
- [18] RTCA: DO-260 - Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B). 2000.
- [19] RTCA: DO-260B - Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services - Broadcast (TIS-B). 2009.
- [20] EUROCONTROL. Guidelines on the Assessment of Ground-based Surveillance Interrogations [online]. 2020 [cit. 2023-04-02]. 2.0. ISBN 978-2-87497-104-4. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-09/eurocontrol-guidelines-assessment-ground-based-surveillance-interrogations-ed-2-0.pdf>
- [21] POTIER, Eric a Stuart MCKAY. EUROCONTROL. Monitoring Surveillance: NM User

- Forum, Monitoring CNS Infrastructure Performance. In: EUROCONTROL: Network manager user [online]. 02-2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-02/eurocontrol-nm-user-forum-eric-potier-stuart-mckay.pdf>
- [22] Honda, J., Kakubari, Y., & Otsuyama, T. (2019). Estimation of 1090 MHz signal environment on airport surface by using multilateration system. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 34(2).
- [23] Otsuyama, T., Naganawa, J., Honda, J., & Miyazaki, H. (2018). Measuring Signal Environment in the Aircraft Surveillance Frequency by Flight Experiments. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2018-August. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485178>
- [24] LEONARDI, Mauro a Emilio GIUSEPPE PIRACCI. ADS-B degarbling and jamming mitigation by the use of Blind Source Separation. 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, 2018, 2018, 1-5. ISBN 978-1-5386-4112-5. Dostupné z: [doi:10.1109/DASC.2018.8569598](https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569598)
- [25] BERNHART, Stephan a Erich LEITGEB. Evaluations of Low-Cost Decoding Methods for 1090 MHz SSR Signals. 2018 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom). IEEE, 2018, 2018, 1-5. ISBN 978-1-5386-4157-6. Dostupné z: [doi:10.1109/COBCOM.2018.8443986](https://doi.org/10.1109/COBCOM.2018.8443986)
- [26] RAEKOW, Roman, Michael KUHN a Bernd-Ludwig WENNING. Packet Injection System to Estimate Transmission Loss on Surveillance Radar Channels. 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). IEEE, 2021, 2021-12-9, 1-6. ISBN 978-1-6654-4231-2. Dostupné z: [doi:10.1109/ICECET52533.2021.9698590](https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698590)
- [27] RITA, Vitor Augusto Ferreira Santa. An architecture for a real time emulator of mode S transponders implemented all in software. 2016, 4D4-1-4D4-9. Dostupné z: [doi:10.1109/ICNSURV.2016.7486350](https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2016.7486350)
- [28] Kim, E., & Sivits, K. (2015). Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance. *Aerospace Science and Technology*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.05.018>
- [29] JONAS, Petr, Marian JANCIK, Simon HOLODA a Jerome BODART. Impact of SUAS Equipped with ADS-B on 1090MHz Environment. 2020 New Trends in Civil Aviation (NTCA). IEEE, 2020, 2020-11-23, 63-67. ISBN 978-80-01-06727-7. Dostupné z: [doi:10.23919/NTCA50409.2020.9291095](https://doi.org/10.23919/NTCA50409.2020.9291095)
- [30] SUN, Junzi a Jacco HOEKSTRA. Analyzing Aircraft Surveillance Signal Quality at the 1090 Megahertz Radio Frequency [online]. In: . 2020 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:fd9913cb-7041-4606-a150-1eb073021de2>
- [31] ICAO: Annex 10 Aeronautical Telecommunications Volume I to V. 2022.

- [32] Nosek, J.: Modelování množství přenosů generovaných systémem ACAS v reálném prostředí. Diplomová práce. 2016. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65560>
- [33] Konečný, F.: Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů. Bakalářská práce. 2016. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66085>
- [34] ICAO, International Civil Aviation Organization. ICAO Doc 9924 AN/474: Aeronautical Surveillance Manual [PDF]. 1. International Civil Aviation Organization, 2010 [cit. 2023-04-02]. ISBN 978-92-9231-690-7.

8 Přílohy

Tabulka 41 Typové parametry SSR pro TC1

Index	Lock-out Range	Tracking Range	Radar period	All-Call Rate	Uf4 Rate	Uf5 Rate	Uf4 CommB	Uf5 CommB	Stochastic Probability
-	[NM]	[NM]	[s]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[1]
1	25	65	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
2	25	80	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
3	25	85	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
4	25	100	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
5	25	110	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
6	25	120	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
7	25	130	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
8	25	150	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
9	25	160	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
10	25	200	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
11	25	205	4	100	0.2500	0.2500	0.2533	0.0833	0.6
12	25	220	8	50	0.1250	0.1250	0.1283	0.0625	0.6
13	25	250	8	50	0.1250	0.1250	0.1283	0.0625	0.6
14	25	256	8	50	0.1250	0.1250	0.1283	0.0625	0.6
15	25	256	8	50	0.1250	0.1250	0.1283	0.0625	0.6

Tabulka 42 Typové parametry SSR pro TC1 (pokračování)

Index	Pulse Peak Power	MTL	Antenna Gain	Relative Sidelobe Gain	Horizontal Beam Width	Beam Elevation	Vertical Beam Width
-	[dBW]	[dBW]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[°]
1	10	-95	27	-4	3	0	65
2	10	-95	27	-4	3	0	65
3	10	-95	27	-4	3	0	65
4	10	-95	27	-4	3	0	65
5	10	-95	27	-4	3	0	65
6	10	-95	27	-4	3	0	65
7	10	-95	27	-4	3	0	65
8	10	-95	27	-4	3	0	65
9	10	-95	27	-4	3	0	65

10	10	-95	27	-4	3	0	65
11	10	-95	27	-4	3	0	65
12	10	-95	27	-4	3	0	65
13	10	-95	27	-4	3	0	65
14	10	-95	27	-4	3	0	65
15	10	-95	27	-4	3	0	65

Tabulka 43 Typové parametry SSR pro TC3 (pokračování)

Index	Lock-out Range	Tracking Range	Radar period	All-Call Rate	Uf4 Rate	Uf5 Rate	Uf4 CommB	Uf5 CommB	Stochastic Probability
-	[NM]	[NM]	[s]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[1]
50	52	52	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
51	64	64	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
52	68	68	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
53	80	80	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
54	88	88	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
55	96	96	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
56	104	104	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
57	120	120	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
58	128	128	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
59	160	160	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
60	164	164	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6
61	176	176	10	40	0.1000	0.1000	0.1033	0.1000	0.6
62	200	200	10	40	0.1000	0.1000	0.1033	0.1000	0.6
63	205	205	10	40	0.1000	0.1000	0.1033	0.1000	0.6
64	2045	205	6	50	0.1667	0.1667	0.1700	0.0833	0.6

Tabulka 44 Typové parametry SSR pro TC3 (pokračování)

Index	Pulse Peak Power	MTL	Antenna Gain	Relative Sidelobe Gain	Horizontal Beam Width	Beam Elevation	Vertical Beam Width
-	[dBW]	[dBW]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[°]
50	10	-95	27	-4	3	0	65
51	10	-95	27	-4	3	0	65
52	10	-95	27	-4	3	0	65

53	10	-95	27	-4	3	0	65
54	10	-95	27	-4	3	0	65
55	10	-95	27	-4	3	0	65
56	10	-95	27	-4	3	0	65
57	10	-95	27	-4	3	0	65
58	10	-95	27	-4	3	0	65
59	10	-95	27	-4	3	0	65
60	10	-95	27	-4	3	0	65
61	10	-95	27	-4	3	0	65
62	10	-95	27	-4	3	0	65
63	10	-95	27	-4	3	0	65
64	10	-95	27	-4	3	0	65