



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

PETR LUKEŠ

POKROČILÉ ASPEKTY MODELOVÁNÍ ZATÍŽENÍ
RF PÁSMO 1030/1090 MHz

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....**Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Petr Lukeš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Pokročilé aspekty modelování zatížení RF pásma
1030/1090 MHz**

Název tématu (anglicky): **Advanced Aspects of 1030/1090 MHz RF Band Load
Simulation**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Pokročilé metody a techniky vedoucí ke snížení zatížení RF pásma 1030/1090 MHz.
- Popis (model) chování palubního SSR odpovídače s ohledem na interferenci (současný příchod) více dotazů.
- Fast time simulace k ověření tezí pro globální matematický model popisující datovou výměnu v rámci kooperativní přehledové infrastruktury.
- Zhodnocení vhodnosti použitých modelů a přístupů.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Annex 10 Volume IV Surveillance and Collision Avoidance Systems
EUROCAE ED-73E MOPS for SSR Mode S Transponder
RTCA DO-260B MOPS for 1090 Extended Squitter ADS B and TIS-B

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
vedoucí děkan fakulty
Ústavu letecké dopravy

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Petr Lukeš
jméno a podpis studenta

V Praze dne 30. prosince 2016

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě při tvorbě této práce podporovali. Zvláštní poděkování patří panu Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph. D. za cenné rady, odborné vedení a poskytování kvalitních informačních zdrojů. Poděkování patří také Ing. Tomášovi Liptákovi za odborné rady a recenzi této práce. V neposlední řadě patří velké poděkování mým rodičům, jež mě při celém studiu podporovali a umožnili mi se plně věnovat tomu, co mě zajímá.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání 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 28. srpna 2017



.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

POKROČILÉ ASPEKTY MODELOVÁNÍ ZATÍŽENÍ RF PÁSMO 1030/1090 MHz

bakalářská práce

srpen 2017

Petr Lukeš

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je tvorba nelineárního stochastického modelu zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz zohledňujícího MSSR, XPDR, TCAS a ADS-B. Výsledný model umožňuje určit reinterrogation rate mezi libovolnou dvojicí radar-letadlo nebo letadlo-letadlo v jakékoli oblasti zájmu. Odvození modelu předchází specifikace chování XPDR a popis Dataflash aplikace. Tvorbu matematického modelu následuje jeho simulační implementace, kdy je prozkoumáno šíření nestability a je proveden výpočet reinterrogation rate pro 96 radarů v oblasti centrální Evropy.

KLÍČOVÁ SLOVA

odpovídač, TCAS, ADS-B, sekundární přehledový radar, mód A/C, mód S, simulace, Poissonův proces, reinterrogation rate, Dataflash, interference, nelineární

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

ADVANCED ASPECTS OF 1030/1090 MHz RF BAND LOAD SIMULATION

Bachelor Thesis

August 2017

Petr Lukeš

ABSTRACT

The aim of this Bachelor Thesis is a development of a non-linear stochastic model of 1030/1090 MHz radiofrequency band load factoring in MSSR, XPDR, TCAS and ADS-B. The resulting model allows to determine reinterrogation rate between any radar-aircraft or aircraft-aircraft pair in arbitrary area of interest. The derivation of the model is preceded by a XPDR behaviour specification and a description of Dataflash application. The development of the mathematical model is followed by a simulation where the propagation of instability is examined and the reinterrogation rate for 96 radars in Central Europe region is calculated.

KEY WORDS

transponder, TCAS, ADS-B, secondary surveillance radar, mode A/C, mode S, simulation, Poisson process, reinterrogation rate, Dataflash, interference, non-linear

Obsah

Seznam použitých zkratek	8
Použitá značení	11
Glosář	12
1 Úvod	13
2 Chování XPDR	15
2.1 Zprávy a jejich charakteristiky	15
2.1.1 Dotazy	15
2.1.2 Odpovědi	17
2.2 Frekvence odpovědí	18
2.2.1 Mód A/C	18
2.2.2 Mód S	18
2.2.3 Omezení citlivosti	20
2.3 Sekvence zpracování dotazu	21
2.3.1 Sekvence mód A/C	21
2.3.2 Sekvence mód S	22
2.3.3 Shrnutí časů zatížení	24
3 Dataflash aplikace	26
3.1 Obecný popis	26
3.2 Specifické služby módu S	27
3.3 Rozbor činnosti	28
3.3.1 Ověření dostupnosti Dataflash aplikace	28
3.3.2 Zahájení a ukončení služby	28
3.3.3 Potvrzení aktivace kontraktu a náhlé ukončení	29
3.3.4 Kontraktní číslo a překrytí více radarů se stejným II kódem	30
3.3.5 Zahlcení systému	30
3.3.6 Struktura vzestupné zprávy	30
3.3.7 Struktura sestupné zprávy	33
3.4 Aktuální využití Dataflash aplikace	35
3.5 Další metody	36
4 Principy a předpoklady matematického modelu	37
4.1 Poissonův proces	37
4.2 Pure Aloha protokol	38
4.3 Obecné předpoklady	41
4.4 Model letadla	42
4.4.1 XPDR	42
4.4.2 ADS-B	43

4.4.3	TCAS	44
4.5	Model radaru	46
5	První rovnice	48
5.1	Schéma a odvození	48
5.2	Ověření platnosti	51
6	Soustava rovnic	54
6.1	Vzájemná provázanost	54
6.2	Konkrétní případ	55
7	Pravděpodobnost kolize dotazů	58
7.1	Sjednocení pravděpodobností	58
7.1.1	De Morganův zákon	59
7.2	Pravděpodobnost čtení	60
7.2.1	Dotazování od radaru a TCAS	60
7.2.2	Monitorovací zprávy TCAS	60
7.2.3	Whisper Shout metoda	61
7.2.4	Celková pravděpodobnost čtení	63
7.3	Pravděpodobnost odpovědi	63
7.3.1	Periodické vysílání zpráv	65
7.3.2	Celková pravděpodobnost odpovědi	66
7.4	Pravděpodobnost All-Call	66
8	Postranní laloky	68
8.1	Pravděpodobnost přijímání z postranního laloku	68
8.2	Celková pravděpodobnost kolize dotazů	69
9	Adresnost	70
9.1	Návrat zpráv	70
10	Pravděpodobnost kolize odpovědí	71
10.1	Popis situace	71
10.2	Pravděpodobnost kolize odpovědí	71
10.2.1	Squitter	72
10.3	Rozšíření rovnice	73
11	Obecný zápis	74
11.1	Matice intenzit $\mathbf{L}(n + 2)$	74
11.2	Matice požadovaných intenzit \mathbf{L}_0	75
11.3	Matice pravděpodobností kolize dotazů $\mathbf{P}(\mathcal{U})$	75
11.3.1	Pravděpodobnost čtení $P(cte_{i,j})$	75
11.3.2	Pravděpodobnost odpovědi $P(odp_{i,j})$	76
11.3.3	Pravděpodobnost All-Call $P(ac_{i,j})$	77

11.3.4	Pravděpodobnost čtení adresného dotazu z postranního laloku $P(cte_{sl_{i,j}})$.	77
11.3.5	Pravděpodobnost čtení All-Call periody z postranního laloku $P(ac_{sl_{i,j}})$. .	77
11.4	Matice intenzit $\mathbf{L}(n + 1)$	77
11.5	Matice pravděpodobností kolize odpovědí $\mathbf{P}(\rho_l)$	78
11.6	Matice intenzit úspěšných dotazů $\mathbf{L}_{si}(n)$	78
11.7	Výsledná rovnice systému	79
12	Simulace	80
12.1	Vstupní parametry	80
12.2	Simulace malého rozsahu	82
12.2.1	Výsledky	82
12.3	Simulace velkého rozsahu	83
12.3.1	Simulační prostředí	83
12.3.2	Výpočetní náročnost	86
12.3.3	Výsledky	87
13	Závěr	89
	Reference	91
	Seznam obrázků	94
	Seznam tabulek	96
	Přílohy	97
A	Simulace malého rozsahu	97
A.1	Grafický výstup - stabilní	97
A.2	Grafický výstup - nestabilní	99
B	Simulace velkého rozsahu	106
B.1	Seznam radarů	106
B.2	Grafický výstup	109
C	CD	119
C.1	Simulace malého rozsahu	119
C.2	Simulace velkého rozsahu	119

Seznam použitých zkratk

ac		All – Call
ACAS	Palubní protisrážkový systém	Airborne collision avoidance system
ad	Adresná zpráva	Addressed message
ADLP	Palubní procesor přenosu dat	Aircraft data link processor
ADS-B	Automatický závislý přehledový systém - vysílání	Automatic dependent surveillance - broadcast
AICB	Palubní protokol Comm-B módu S	Air-initiated Comm-B
ANSP	Poskytovatel letových navigačních služeb	Air navigation service provider
AS		Acquisition Squitter
ATS	Letové provozní služby	Air traffic services
BDS		Comm-B Data Selector
CI	Kontraktní informace	Contract Information
CNS	Podpole kontraktního čísla	Contract Number Subfield
cod		mode C-only All-Call + Dead Time
cos	potlačená zpráva mód C-only All-Call	mode C-only All-Call suppressed
CPDLC	Komunikace datovým spojem mezi řídicím a pilotem	Controller-pilot data link communications
CQ	Pole kvanta změny	Change quanta field
CR	Kontraktní zpráva	II Code Contract Report
ČR	Česká republika	Czech Republic
CT	Pole prahové změny	Change threshold field
DAPs	Požadované parametry letadla přenášené prostřednictvím sestupného spoje	Downlink aircraft parameters
DF	Sestupný formát	Downlink format
DH	Dataflash hlavička	Dataflash Header
DP	Typ datového paketu	Data packet type
DPSK	Diferenciální klíčování fázovým posuvem	Differential phase shift keying
EC	Kritérium události	Event Criterion
EHS	Zdokonalený přehledový systém módu S	Mode S Enhanced Surveillance
ELM	Zpráva prodloužené délky	Extended length message
ES		Extended Squitter
ESRA	Statistická referenční oblast organizace EUROCONTROL	The EUROCONTROL Statistical Reference Area

EUROCAE	Evropská organizace pro civilní leteckou elektroniku	European Organization for Civil Aviation Equipment
EUROCONTROL	Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FRUIT		False Replies Un-synchronised In Time
GAT	Let prováděný v souladu s pravidly a postupy ICAO	General air traffic
GICB	Protokol pozemní stanice typu Comm-B	Ground-initiated Comm-B
IC		Interrogator Code
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví	International Civil Aviation Organization
IFF	Identifikace přítel/nepřítel	Identification friend/foe
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů	Instrument flight rules
ii	Kolize dotazů	Interrogation interference
II		Interrogator Identifier
LAT	Zeměpisná šířka	Latitude
LONG	Zeměpisná délka	Longitude
LSB	Nejméně významný bit	Least significant bit
M/CH	Číslo kanálu MSP	MSP channel number
MLAT	Multilaterace	Multilateration
MP	Typ paketu MSP	MSP packet type
MSB	Nejvýznamnější bit	Most significant bit
MSP	Specifický protokol módu S	Mode S Specific Protocol
MSSR	Monopulsní sekundární přehledový radar	Monopulse secondary surveillance radar
MT	Minimální čas	Minimum Time Interval
nad	Neadresná zpráva	Non addressed message
oc	Zatížení	Occupancy
odp	Odpovídá	Is replying
PAM	Pulsně amplitudová modulace	Pulse amplitude modulation
PPM	Pulsně polohová modulace	Pulse position modulation
proc	Zpracování	Process
PSR	Primární přehledový radar	Primary surveillance radar
rcv		Recovery / Dead Time
rdly	Požadované zpoždění	Required delay
RDS	Podpole žádosti dat	Request Data Subfield
rec	Přijímání	Receive
rep	Odpovídání	Reply
RF	Radiofrekvenční	Radiofrequency

ri	Kolize odpovědí	Reply interference
RTCA	Americká radiotechnická komise (USA)	Radio Technical Commission for Aeronautics
s.p.	Státní podnik	
SARPs	Standardy a doporučené postupy (ICAO)	Standards and Recommended Practices (ICAO)
SI		Surveillance Identifier
si	Úspěšný dotaz	Successful interrogation
sl	Postranní lalok	Side lobe
slk	mód S, lockout	mode S, lockout
SLM	Zpráva standardní délky	Standard length message
SLS	Potlačení postranního laloku	Side Lobe Suppression
SPI	Speciální polohový identifikační impuls	Special position indicator
SPR	Synchronizační fázový obrat	Sync phase reversal
SR	Hlavička služební žádosti	Service Request
ss	Úspěšná odpověď na dotaz	Super successful
SSE	Objekt specifických služeb módu S	Mode S specific services entity
SSPAR	Sekundární přehledový radar s fázovanou anténní řadou	Secondary Surveillance Phased Array Radar
SSR	Sekundární přehledový radar	Secondary surveillance radar
ST	Stabilní čas	Stable Time
TCAS	Provozní výstražný protisrážkový systém	Traffic alert & collision avoidance system
TMA	Koncová řízená oblast	Terminal control area
UF	Vzestupný formát	Uplink format
UHF	Ultrakrátké vlny	Ultra high frequency
VHF	Velmi krátké vlny	Very high frequency
WAM	Multilaterace široké oblasti	Wide area multilateration
ws		Whisper Shout
wsi	Whisper Shout interval	Whisper Shout interval
XPDR	Odповідаč	Transponder

Použité značení

\circ	Hadamardův součin
\setminus	množinové minus
\approx	přibližně se rovná
A^c	doplněk množiny A
$\mathbf{A} = (a_{i,j})_{m,n}$	matice A rozměru $m \times n$ s prvky $a_{i,j}$
$\tau P(X)$	zranitelná doba pro výpočet pravděpodobnosti jevu X
\mathbb{N}	přirozená čísla bez 0
\mathbb{N}_0	přirozená čísla včetně 0
$\mathbb{P}(\Lambda)$	charakteristický polynom
\mathbb{R}	reálná čísla

Glosář

Asynchronní Garbling Interference odpovědí módu A/C z důvodu malé separace letadel. Nedochází k interferenci jednotlivých pulsů.

Comm-B 112 bitová odpověď obsahující 56 bitové pole zprávy MB. Toto pole se využívá v protokolech přenosu zpráv SLM spojením vzduch-země iniciovaného ze země a rozhlasového vysílání.

Comm-C 112 bitový dotaz obsahující 80 bitové pole zprávy MC. Toto pole se využívá v protokolu přenosu zprávy prodloužené délky ELM spojem země-vzduch.

Comm-D 112 bitová odpověď obsahující 80 bitové pole zprávy MD. Toto pole se využívá v protokolu přenosu zprávy prodloužené délky ELM spojem vzduch-země.

False Replies Un-synchronized In Time (FRUIT) Asynchronní interference žádaných odpovědí s odpovědmi, které vyvolal jiný dotazovač.

Hadamardův součin Necht' \exists matice $\mathbf{A} = (a_{i,j})_{m,n} \wedge \exists$ matice $\mathbf{B} = (b_{i,j})_{m,n}$. Hadamardovým součinem $\mathbf{A} \circ \mathbf{B}$ je matice $\mathbf{C} = (c_{i,j})_{m,n}$ pro níž platí $c_{i,j} = a_{i,j}b_{i,j} \quad \forall i, j$.

Palubní protokol Comm-B módu S (AICB) Postupy spuštěné odpovídačem módu S, které zajistí vyslání jednoho segmentu Comm-B palubním zařízením.

Palubní procesor přenosu dat (ADLP) Palubní procesor, který je speciálně určen pro konkrétní spoj „letadlo – země“ (např. Mód S) a který zabezpečuje nastavování kanálů. Také provádí členění dat na segmenty pro přenos a zpětné sestavování zpráv ze segmentů.

Pokročilé protokoly datového spoje Protokoly umožňující zvýšit kapacitu datového spoje. Navýšení je dosaženo povolením současných transakcí dat s více než jedním mód S dotazovačem bez nutnosti koordinace.

Synchronní Garbling Interference odpovědí módu A/C z důvodu malé separace letadel. Dochází k interferenci jednotlivých pulsů.

1 Úvod

I pro do letectví nezasvěcenou veřejnost je obecně známé, že se letecká doprava stále rozrůstá co do počtu přepravených cestujících či nákladu. Výrazný růst je i ve vývoji nových technologií. Tento trend si většina lidí uvědomuje vzhledem k informacím o výrobě nových letadel, jako je například Airbus A380, který svou přepravní kapacitou dává jasně najevo, že zájem o leteckou dopravu neklesá. Toto tvrzení o rostoucím přepravním objemu potvrzují také různé studie, kdy například organizace EUROCONTROL ve své každoročně vydávané sedmileté predikční zprávě uvádí předpokládaný nárůst IFR pohybů o 14 % k roku 2023, oproti roku 2016. Je ale nutné si také uvědomit nároky a dopady na leteckou infrastrukturu a veškeré s letectvím spojené procesy, které nárůst počtu pohybů v omezeném vzdušném prostoru způsobuje.[1]

Letectví je velmi rozmanité odvětví průmyslu, kde se propojují různé technické obory a využívají nejpokročilejší technologie. Zaplněný vzdušný prostor proto nepředstavuje pouze nároky na kapacitu vzletových a přistávacích drah či letových tras. Značné požadavky jsou kladeny i na frekvenční spektrum rádiových vln, jehož zatížením, respektive možným přetěžováním, se budeme zabývat.

Frekvenční spektrum rádiových vln jako celek obsahuje frekvence v rozmezí otevřeného intervalu od 0 do ∞ Hz. Do tohoto spektra spadají veškerá frekvenční pásma a s tím i spousty různých vynálezů a jejich problematiky. V letectví se například vydalo značné úsilí na přechod z 25 kHz kanálové separace na pásmu VHF 118,000-136,975 MHz pro hlasovou komunikaci na separaci 8,33 kHz. Toto umožnilo vytvoření více kanálů na daném frekvenčním pásmu a zabránilo to tak již častým vznikům kolizních kanálů. Ke snížení zatížení hlasové komunikace také začíná přispívat CPDLC.[2]

Námi zkoumaná problematika se však nezaměří na hlasovou komunikaci, ani na pásmo VHF, ale na pásmo UHF, pod které spadají dvě v moderním letectví velmi zajímavá pásma 1030/1090 MHz. Tyto pásma využívá přehledová infrastruktura.

Uvažujme modelovou situaci, na které si představíme problematiku, s kterou se tato práce zabývá. Mějme řídicího letového provozu na oblastním středisku řízení. Řídící sleduje lety na displeji pracovní stanice a dává pilotům dle aktuální letové situace příkazy, povolení a poskytuje informace. Informaci o poloze a případné další údaje mu jsou poskytovány z přehledové infrastruktury, která je tvořena převážně primárními radary (PSR), sekundárními radary (SSR), přijímači ADS-B a multilaterací (MLAT). Pokud by se jednalo o vojenské středisko řízení, mohou být zdroje informací navíc doplněny o vojenské systémy IFF. Kromě primárních radarů, které dnes v civilním sektoru slouží spíše jako zálohování ostatních částí infrastruktury, komunikují všechny ostatní výše jmenované systémy na frekvencích 1030/1090 MHz.

Sekundární radary, respektive MSSR, fungují na principu vyslání dotazu na letadlo na frekvenci 1030 MHz. Odpovědač letadla tento dotaz přijme, zpracuje a následně vyšle odpověď. Radar dle rozdílu dob vyslání a doby příjmu a s využitím známé rychlosti šíření elektromagnetických vln určí šikmou vzdálenost. Z natočení antény radaru se určí azimut a výšku radar obdrží v odpovědi.

Nyní nastává problém, co se stane, pokud se dva radary dotáží jednoho letadla ve stejnou dobu. Na přijímači letadla dojde k interferenci jednotlivých pulsů dotazů a odpovědač letadla

nebude s velkou pravděpodobností schopen zprávy dekodovat. To vyvolá na straně radarů, které nedostaly žádanou odpověď, reakci, kdy vyšlou dotaz znovu. Pokud by byla pravděpodobnost kolize zpráv velmi nízká, dá se předpokládat, že k tomuto jevu dojde ojedinele. Bohužel však praxe ukazuje, že k těmto kolizím výjimečně nedochází. Toto je přesně druh problému, s kterým se v této práci budeme zabývat.

Momentálně v centrální Evropě dochází i k 28 násobnému krytí sekundárními radary.[3] Přidáme-li k vysílání sekundárních radarů ADS-B, které vysílá z každého letadla s frekvencí alespoň 1 Hz, protisrážkový systém letadel TCAS, který také vysílá na frekvencích 1030/1090 MHz, a případně i aktivní multilaterace, je pochopitelné, že ke kolizím zpráv může docházet poměrně často. V krajním případě může vysoká frekvence dotazů vyslaných na odpovídač způsobit jeho přetížení, kdy se odpovídač na určitou dobu zablokuje, a řídicím letového provozu tak zmizí zdroj polohových informací a dalších dat. Následně je řídicím poloha poskytována pouze z primárních radarů. Ty ale již nejsou uzpůsobeny na vysoké požadavky, které co nejnižší separační limity ve vzdušném prostoru nad Evropou požadují.

Hlavní zaměření této práce bude kombinace systémů MSSR, TCAS, ADS-B a jejich vzájemná interference. V první části této práce bude popsáno chování palubního odpovídače. Cílem bude určit důvod možného přetěžování odpovídače a přesně specifikovat sekvence dotaz \rightarrow odpověď, včetně určení dob zatížení neboli zaneprázdnění těmito sekvencemi. Dále bude následovat soupis a charakterizace Dataflash aplikace a některých dalších metod, které by mohly sloužit ke snížení zatížení na frekvenčních pásmech 1030/1090 MHz.

Po těchto kapitolách se podíváme na hlavní část této práce a to tvorbu a specifikaci matematického modelu zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz. V průběhu tvorby se seznámíme s veškerými kolizními i nekolizními vazbami, které se v tomto komplexním systému, skládajícím se z MSSR, XPDR, ADS-B a TCAS, vyskytují. Cílem tohoto modelu bude tyto vazby popsat, abychom je mohli následně využít jako model pro zkoumání chování systému a byli schopni vypočítat takzvaný reinterrogation rate, který představuje počet skutečně vyslaných zpráv ku počtu požadovaných odpovědí. Vytvoření modelu nám také umožní sledovat šíření nestabilit způsobených předotazováním některých prvků systému.

Po sestrojení matematického modelu provedeme jeho aplikaci simulací, k čemuž využijeme programovací jazyk a program Matlab. K ověření šíření nestabilit v systému využijeme simulační program Simulink. V závěru práce poté provedeme zhodnocení důvěryhodnosti modelu a vyhodnocení zjištěných poznatků.

2 Chování XPDR

Ať palubní odpovídač přijme dotaz od sekundárního radaru, jiného letadla nebo aktivního multilateračního systému, vždy se jedná o stejný sled událostí. Kromě formátu zprávy není pro odpovídač rozdíl mezi příjmem dotazů z různých zdrojů. Odpovídač zprávu přijme, dekóduje a po přesně definovaném intervalu na ní vyšle odpověď. V této části si tento proces podrobněji specifikujeme, abychom mohli na znalost chování odpovídače v dalších úvahách navázat.

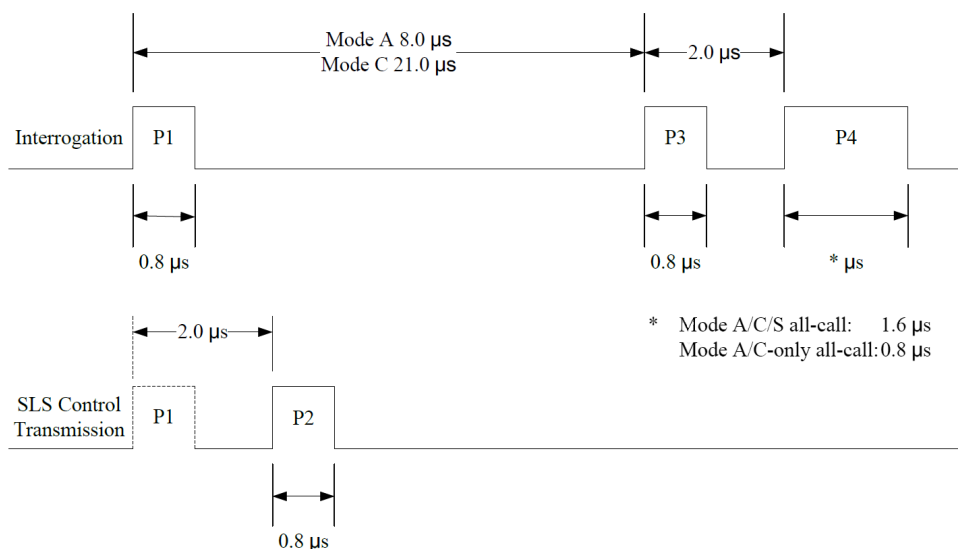
2.1 Zprávy a jejich charakteristiky

Množinu všech zpráv, které jsou vysílány na frekvenčních pásmech 1030/1090 MHz, můžeme rozdělit do dvou základních kategorií. Jedná se o dotazy, na frekvenci 1030 MHz a odpovědi na frekvenci 1090 MHz.

2.1.1 Dotazy

Dotazy můžeme dále rozdělit na dvě kategorie a to podle modulace signálu.

PAM neboli pulsně amplitudová modulace je využívána dotazy módů A/C případně všeobecnými dotazy módů A/C/S. Pro přenos informace je využíváno amplitudy jednotlivých pulsů. Dotazy využívající tuto modulaci jsou charakterizovány 4 pulsy P_1 až P_4 přičemž, aby odpovídač rozpoznal zprávu, musí přijmout minimálně puls P_1 a P_3 ve správné vzdálenosti a se vzájemně stejnou relativní amplitudou s odchylkou maximálně ± 1 dB. Toto kritérium amplitudní odchylky musí být splněno i pro puls P_4 , který je využíván u All-Call zpráv. Schéma tohoto typu dotazů je možné vidět na obrázku 1.[4][5]

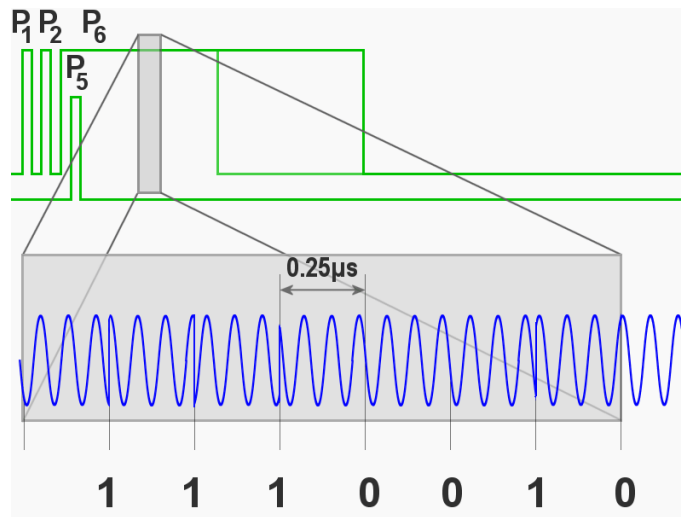


Obrázek 1: Múd A/C dotazy (PAM) [4]

DPSK neboli diferenciální klíčování fázovým posuvem je používáno ve všech dotazech módu S. DPSK využívá pro přenos informace změnu fáze nosné vlny mezi takzvanými čipy, neboli oblastmi neměnné fáze. Pro případ dotazů módu S je využívána velikost čipu 0, 25 μ s.[4]

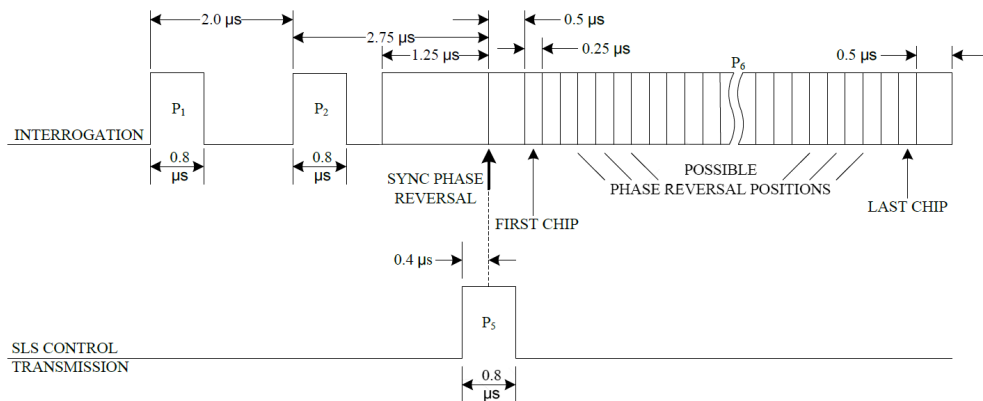
Dotazy módu S se skládají z pulsů P_1, P_2, P_5, P_6 , kde puls P_6 představuje puls, obsahující veškeré datové informace a využívající právě DPSK modulaci. Ostatní pulsy využívají modulaci PAM. Puls P_6 může mít délku 56 nebo 112 čipů, kdy délka závisí na formátu dotazu, zdali se jedná o krátký dotaz módu S (např. UF 4,5) nebo dlouhý dotaz módu S (např. UF 20,21).[4]

Na obrázku 2 je možné vidět schéma signálu části bloku P_6 . Pokud dojde ke změně fáze o 180° na rozmezí předcházejícího čipu a čipu aktuálního, představuje tento čip 1_2 . Pokud ke změně fáze nedojde, zastupuje tento čip 0_2 . [6]



Obrázek 2: Mód S DPSK [7]

Pro úspěšné přijetí a dekódování zprávy je nutné, aby odpovídač přijal pulsy P_1, P_2, P_6 s tím, že je velmi důležité, aby byl správně přijat první fázový obrat, neboli synchronizační fázový obrat (SPR). Tento synchronizační fázový obrat zajistí, jak již jeho název napovídá, synchronizaci pro dekódér, který poté následně může rozpoznávat fázové posuny mezi jednotlivými čipy. Nedojde-li k rozpoznání tohoto synchronizačního fázového posunu, jako je tomu například při přítomnosti pulsu na potlačení postranních laloků P_5 , nemůže odpovídač dotaz dekódovat. Schéma mód S dotazu je možné vidět na obrázku 3. [7]



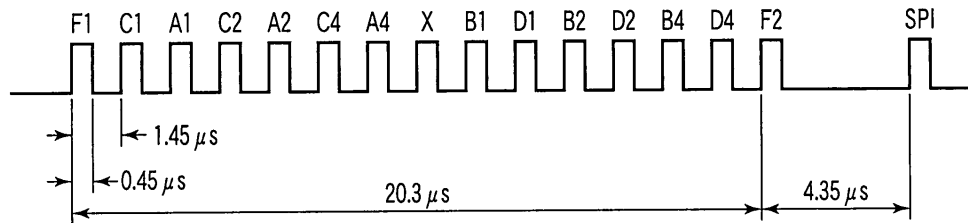
Obrázek 3: Mód S dotazy (DPSK) [4]

Při porovnání schémat mód A/C a mód S dotazů si lze všimnout, že puls P_2 , sloužící pro potlačení vysílání v postranních lalocích u módu A/C, je u mód S dotazů zastoupen vždy a to ve stejné vzdálenosti jako u dotazů módu A/C. Toto je jeden z základních principů, který umožnil vývoj mode S verze sekundárních radarů. Přítomnost pulsu P_2 v mode S dotazech zajistí automatické potlačení tohoto dotazu odpovídači módů A/C a nedojde k nežádoucí odpovědi od letadel s XPDR módů A/C, které by následně mohly způsobovat synchronní garbling.[4][8]

2.1.2 Odpovědi

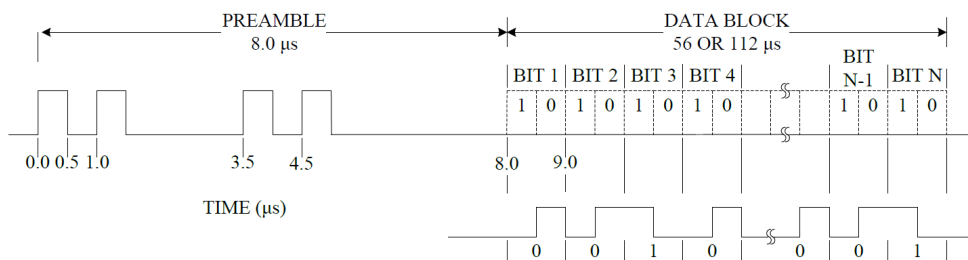
Odpovědi můžeme rozdělit taktéž do dvou skupin dle modulace.

PAM modulace je využívána odpovědmi odpovídačů módů A/C. Tyto odpovědi se skládají z 2 rámcových pulsů F_1 , F_2 a 12 informačních pulsů (puls X není využíván). Případně mohou být doplněny o puls SPI. Schéma odpovědi módů A/C je možné vidět na obrázku 4.[4]



Obrázek 4: Mód A/C odpovědi (PAM) [9]

PPM či pulsně polohová modulace je využívána pro kódování datového bloku odpovědi módu S. Jedná se o modulaci, jež hledí na sled pulsů v určitém časovém intervalu. V případě mód S odpovědi se jedná o interval délky $1 \mu s$. Bude-li puls v první polovině intervalu, jedná se o bit 1. Naopak bude-li puls v druhé polovině intervalu, jedná se o bit 0. Zprávy módu S se skládají z preamble a datového bloku. Datový blok může mít délku 56 nebo $112 \mu s$ v závislosti, jestli se jedná o krátkou (např. DF 4,5) nebo dlouhou zprávu módu S (např. DF 20,21). Schéma odpovědi módu S je možné vidět na obrázku 5.[4]



Obrázek 5: Mód S odpovědi (PPM) [4]

2.2 Frekvence odpovědí

Frekvence odpovědí, neboli počet odpovědí, který musí být schopen odpovídač vyslat za určitý časový interval, je specifikovaná dokumenty standardizačních organizací EUROCAE[10] a RTCA[4]. Jelikož musí být odpovídač schopný použití bez jakýchkoliv úprav po celém světě, jsou specifikace v obou dokumentech z tohoto ohledu totožné.

V této sekci si uvedeme shrnutí těchto frekvencí a základních charakteristik s tím souvisejících, které nám umožní porozumění vzniku samotné problematiky přetěžování odpovídačů sekundárních radarů.

2.2.1 Mód A/C

Pro odpovídač módu A/C vysílající PAM odpovědi platí následující specifikace.[4]

- a) Odpovídač musí být schopen kontinuálně generovat alespoň 500 mód A/C odpovědí za sekundu.
- b) Pro palubní zařízení 1. třídy musí být odpovídač schopen špičkové frekvence odpovědí 1200 zpráv za sekundu po dobu 100 ms.
- c) Pro palubní zařízení 2. třídy musí být odpovídač schopen špičkové frekvence odpovědí 1000 zpráv za sekundu po dobu 100 ms.

Za palubní zařízení 1. třídy se považuje zařízení, jež mimo jiné bude použito v letadlech, která se provozují ve výškách nad 15 000 ft, nebo jejich maximální cestovní pravá vzdušná rychlost přesahuje 175 kt. Za palubní zařízení 2. třídy se považuje zařízení, které může být využito v letadlech, jejichž provozní výška se nachází pod 15 000 ft a cestovní pravá vzdušná rychlost nepřekročí 175 kt.[10]

2.2.2 Mód S

Pro odpovídače módu S platí následující kritéria.[4]

- a) Odpovídač schopen pouze krátkých mód S formátů odpovědí (DF) musí splňovat následující minimální frekvence odpovědí:
 - 50 mód S odpovědí v jakémkoli 1 s intervalu.
 - 18 mód S odpovědí v 100 ms intervalu.
 - 8 mód S odpovědí v 25 ms intervalu.
 - 4 mód S odpovědi v 1,6 ms intervalu.
- b) Odpovídač schopen dlouhých mód S DF musí být schopen vyslat jako dlouhé formáty:
 - Alespoň 16 z 50 mód S odpovědí v jakémkoli 1 s intervalu.
 - Alespoň 6 z 18 mód S odpovědí v 100 ms intervalu.
 - Alespoň 4 z 8 mód S odpovědí v 25 ms intervalu.

- Alespoň 2 z 4 mód S odpovědi v 1,6 ms intervalu.
- c) Odpovídač schopen pokročilých protokolů datového spoje musí být schopen vyslat jako dlouhé formáty:
- Alespoň 24 z 50 mód S odpovědi v jakémkoli 1 s intervalu.
 - Alespoň 9 z 18 mód S odpovědi v 100 ms intervalu.
 - Alespoň 6 z 8 mód S odpovědi v 25 ms intervalu.
 - Alespoň 2 z 4 mód S odpovědi v 1,6 ms intervalu.

Mód S neboli „selective“, jakožto nadstavba módů A/C, musí být taktéž schopen odpovědi na dotazy módů A/C, aby bylo možné zajistit plynulý přechod palubních a pozemních zařízení mezi těmito módy při implementaci módu S. Pro mód S odpovídač proto platí, že musí být schopen veškerých těchto kritérií a zároveň musí být schopen veškerých kritérií platících pro odpovídače módu A/C zmíněných v předchozí sekci 2.2.1.[4]

Dále pro všechny 3 módy odpovídačů platí, že jakékoli squitter zprávy, které musí vyslat, musí být schopny vyslat navíc k předchozím stanoveným kritériím.[4]

Platí tedy:

$$f_{celk_{ac}} = f_{ac} + f_{sq} \quad (2.1)$$

$$f_{celk_s} = f_s + f_{ac} + f_{sq}, \quad (2.2)$$

kde f_{ac} jsou frekvence odpovědi pro módy A/C, f_s pro mód S a f_{sq} pro squitter.

Navíc pokud je letadlo vybaveno protisrážkovým zařízením TCAS, musí být odpovídač schopen:

- Kontinuálně přijímat dlouhé dotazy módu S (UF 16) a generovat dlouhé odpovědi módu S (DF 16) s frekvencí alespoň 60 zpráv za sekundu.[4]

Pokud naopak letadlo zařízením TCAS vybaveno není, musí být vzestupné rozhraní v odpovídači módu S, které zajišťuje přesun obsahu přijatých zpráv do dalších protokolů systému (přehledových či jiných), schopno přesunu dat dotazu během předem definovaného zpoždění mezi příjmem synchronizačního fázového obratu dotazu a vysláním prvního pulsu preambule odpovědi. Tento požadavek platí v případě bezpaměťového návrhu vstupního rozhraní odpovídače. Pro návrh vstupního rozhraní využívajícího nějaký druh uložště musí zajištěna schopnost přesunu obsahu dlouhých nebo krátkých mód S zpráv s frekvencemi alespoň:[4]

- 50 dotazů dlouhého formátu v jakémkoli 1 s intervalu.
- 18 dotazů dlouhého formátu v 100 ms intervalu.
- 8 dotazů dlouhého formátu v 25 ms intervalu.
- 4 dotazů dlouhého formátu v 1,6 ms intervalu.

2.2.3 Omezení citlivosti

Jak bylo v úvodní části této práce zmíněno, pokud by byl odpovídač letadla zatížen přesprášením velkým množstvím dotazů, může dojít až ke zkolabování odpovídače, kdy nebude po určitou dobu odpovídat.

Již v červnu roku 2014 došlo z důvodu předotazování k detekčním ztrátám nad centrální Evropou. Zasažena byla střediska oblastního řízení letového provozu Praha, Bratislava, Karlsruhe, Mnichov, Varšava a Budapešť do míry, že bylo nutno snížit kapacitu v postižených sektorech. To následně vedlo i k nárůstu zpoždění v letovém provozu.[11]

Jak je to možné? Nelze v případě velkého množství dotazů například lineárně snižovat citlivost přijímače a limitovat tak počet přijatých odpovědí? Ano, možné to je. Standard EUROCAE[10] či RTCA[4] toto dokonce specifikuje. Problém je však v tom, jak to specifikuje.

Specifikace omezení citlivosti přijímače, která zajistí nižší počet přijatých dotazů a následně nižší počet vyslaných odpovědí, se znovu rozděluje dle módu odpovědi. Omezení citlivosti pro módy A/C a pro mód S musí být oddělené a nezávislé. Tento požadavek zajistí, že může být u mód S odpovídače způsobeno snížení citlivosti na mód A/C dotazy, nikoli však na mód S dotazy.[4]

Pro mód A/C platí následující:

- Snížení citlivosti pro zajištění omezení počtu vyslaných odpovědí musí být obsaženo v odpovídači pro mód A/C odpovědi. Omezení musí být schopno nastavení hodnoty mezi 500 mód A/C odpovědmi za sekundu a maximální kontinuální frekvencí odpovědí, nebo 2000 odpovědmi za sekundu, podle toho co je méně, bez ohledu na počtu pulsů v každé odpovědi. Snížení citlivosti musí být vztahováno pouze pro příjem mód A/C, mód A/C/S All-Call, nebo mód A/C-only All-Call dotazů.[4]

V této specifikaci je možné si všimnout, že standard požaduje snížení citlivosti pro zajištění omezení počtu vyslaných odpovědí, v originále „Reply Rate Limiting“. Lze z toho usoudit, že pravděpodobně hlavní myšlenkou bylo limitovat počet odpovědí, na rozdíl od ochrany odpovídače před předotazováním. To je pochopitelné, vzhledem k tomu, že mód A/C odpovědi nejsou adresné a tedy o to více zatěžují frekvenční pásmo 1090 MHz.

Pro mód S platí následující:

*„If a reply rate limiting device is provided for Mode S replies, it shall permit at least the reply rates required in 2.2.2. A limiting device **may** be used to protect the transponder from accidental over-interrogation.“*[4]

Ve volném překladu:

- **Pokud** je zařízení na snížení citlivosti pro zajištění omezení počtu vyslaných odpovědí poskytnuto pro mód S odpovědi, musí dovolit alespoň požadované frekvence odpovědí stanovených v sekci 2.2.2. Toto zařízení **může** být použito pro ochranu před neúmyslným předotazováním.

A právě tato slova „pokud“ a „může“ způsobí, že ne všechny odpovídače toto snížení citlivosti umožňují. Lze navíc předpokládat, že odpovídačů s touto funkcí, jejíž vývoj a implementace zajisté zvýší náklady zařízení, je spíše méně než více.

Podobnou úvahou také můžeme aplikovat na limity frekvencí odpovědí. Ačkoli standard uvádí minimální hodnoty, s větší pravděpodobností to budou právě tyto hodnoty, kterých odpovídače budou schopny, nikoli hodnoty vyšší.

2.3 Sekvence zpracování dotazu

Od přijetí prvního pulsu dotazu do možného přijetí prvního pulsu následujícího dotazu proběhne v odpovídači sekvence činností dle předem definovaných algoritmů a protokolů. Tento proces zabere odpovídači určitý čas, ve kterém nemůže přijímat žádné další dotazy, ani vysílat žádné odpovědi, kromě odpovědi na dotaz, který tuto konkrétní sekvenci vyvolal. Nemohou být tedy v tomto intervalu vysílány ani Squitter zprávy. Tento interval můžeme označit jako dobu zatížení odpovídače T_{oc} .

Tato sekvence se skládá z 4 základních intervalů, které se vyskytují jak u módů A/C tak i u módu S. Při příchodu dotazu se jedná o dobu příjmu zprávy T_{rec} , dále je tento dotaz zpracován v době zpracování zprávy T_{proc} . Po zpracování následuje doba, kdy je vysílána odpověď T_{rep} . Na závěr po vyslání odpovědi přijímači chvíli trvá, než dosáhne opět požadované citlivosti na příchozí signál. Tento čas se označuje jako tzv. Dead Time T_{rcv} . [4][12]

I když jsou sekvence zpracování dotazů pro jednotlivé módy téměř totožné, jsou v nich jisté odchylky. V následujících sekcích si je podrobněji specifikujeme.

2.3.1 Sekvence mód A/C

Pro odpovídače na dotazy módů A/C je sekvence vcelku přímočará a jednotlivé intervaly na sebe postupně navazují. Nejprve se přijme dotaz v době T_{rec} , jejíž velikost závisí na módu dotazu a dosahuje buď hodnoty $8,8 \mu s$ pro mód 3/A, nebo hodnoty $21,8 \mu s$ pro mód C. Tyto doby lze vyčíst ze schématu mód A/C dotazu na obrázku 1.

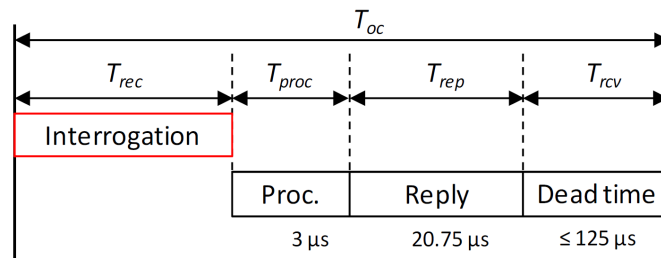
Následuje doba zpracování, během které odpovídač zprávu přečte, a dle rozpoznání módu vyšle odpověď. Doba zpracování je standardem stanovena na dobu o velikosti $3 \pm 0,5 \mu s$ mezi příchodem náběžné hrany pulsu P_3 dotazu a vysláním náběžné hrany pulsu F_1 odpovědi. Přesné stanovení této doby je důležité pro umožnění výpočtu vzdálenosti podle rovnice 2.3. Pro zajímavost je možné podotknout, že přesnost $\pm 0,5 \mu s$ zajišťuje přesnost šikmé dálky sekundárního radaru $\pm 150 m$. [10]

$$R = c\left(\frac{t}{2} - \Delta t\right) \quad (2.3)$$

Δt značí předepsanou dobu zpoždění na straně odpovídače mezi přijetím dotazu a vysláním odpovědi.

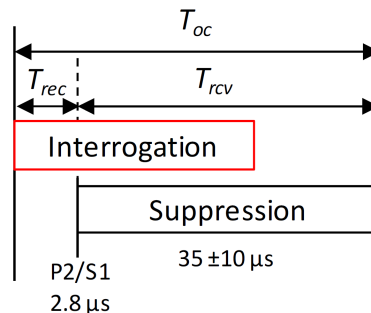
Doba vyslání odpovědi je pro mód 3/A i mód C shodná a nabývá hodnoty $20,75 \mu s$, nebo $25,10 \mu s$ pokud uvažujeme i vyslání pulsu SPI. Po vyslání odpovědi následuje T_{rcv} , která pro

módy A/C musí být maximálně $125 \mu\text{s}$. Schéma sekvence příjmu dotazu módu A/C lze vidět na obrázku 6.[10][9]



Obrázek 6: Sekvence zpracování dotazu módu A/C [12]

Pokud odpovídač přijme mód A/C dotaz z postranního laloku, dojde k procesu potlačení dotazu ihned po příjmu pulsu P_2 . Doba potlačení musí být $35 \pm 10 \mu\text{s}$. Schéma sekvence příjmu dotazu módu A/C doplněného o puls P_2 je možné vidět na obrázku 7.[6]



Obrázek 7: Sekvence zpracování potlačeného dotazu módu A/C [12]

2.3.2 Sekvence mód S

Sekvence odpovídače na dotazy módu S se od sekvence pro mód A/C převážně liší v definici doby zpracování a rozdílných velikostech dílčích dob.

Doba příjmu dotazu T_{rec} pro mód S má rozměry $19,75 \mu\text{s}$ nebo $33,75 \mu\text{s}$ v závislosti na délce pulsu P_6 . [4]

Doba zpracování T_{proc} taktéž přímo navazuje na dobu příjmu dotazu. Její hodnota však není definována přímo standardem, jak tomu je u sekvence pro módy A/C. Definice u módu S je stanovena pomocí předepsané doby zpoždění, jejíž funkce je u mód A/C sekvence zastoupena přímo dobou zpracování.

Předepsaná doba zpoždění T_{rdly} je pro dotazy módu S definovaná jako doba od synchronizačního fázového obratu v dotazu do vyslání náběžné hrany prvního pulsu preamble odpovědi. Její přesné stanovení zajišťuje možnost určit šikmou dálku s přesností $\pm 75 \text{ m}$. Velikost doby zpoždění je stanovena na $128 \pm 0,25 \mu\text{s}$. Během této doby dojde například k již zmiňovanému přesunu dat dotazu k dalším protokolům uvnitř odpovídače. Oproti dotazům módu A/C se jedná o delší dobu z důvodu nutného dekódování dotazu a sestavení odpovědi.[6]

Předepsaná doba zpoždění se částečně překrývá s dobou příjmu dotazu a lze tedy definovat dobu zpracování T_{proc} jako:[12]

$$T_{proc} = T_{rdly} + T_{spr} - T_{rec}, \quad (2.4)$$

kde T_{spr} představuje dobu od první náběžné hrany preamble dotazu, k synchronizačnímu fázovému obratu.

Po dosazení hodnot do předchozí rovnice dostaneme délku doby zpracování pro krátký dotaz módu S:

$$T_{proc} = 128 + 4,75 - 19,75 \quad (2.5)$$

$$T_{proc} = 113 \mu s \quad (2.6)$$

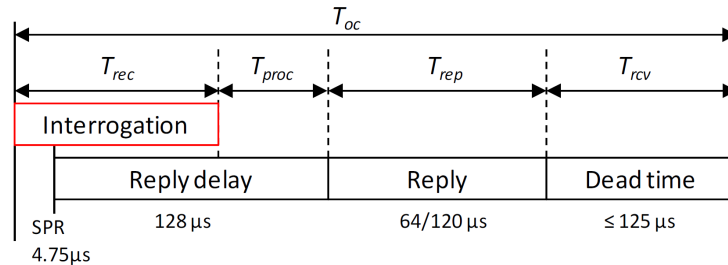
Pro dlouhý dotaz dostaneme:

$$T_{proc} = 128 + 4,75 - 33,75 \quad (2.7)$$

$$T_{proc} = 99 \mu s \quad (2.8)$$

Po době zpracování následuje doba vysílání, která pro mód S dotaz činí hodnoty $64 \mu s$. V případě dlouhé odpovědi módu S nabývá výše $120 \mu s$. Následně je odpovídači umožněna doba na regeneraci citlivosti T_{rcv} , která by měla být co nejkratší. Nesmí však překročit hodnotu $125 \mu s$. [10]

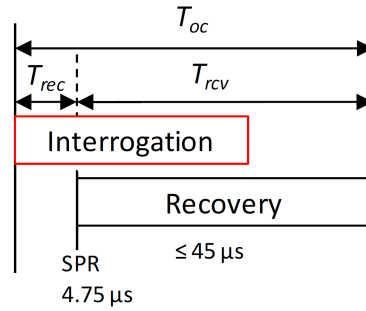
Schéma sekvence pro dotaz módu S je možné vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Sekvence zpracování dotazu módu S [12]

Přijme-li odpovídač módu S dotaz módu S, který buď obsahuje puls P_5 na potlačení postranních laloků, nebo jde o dotaz, který je adresován na jiné letadlo, musí se odpovídač obnovit do schopnosti příjmu následujícího dotazu do doby $45 \mu s$ po synchronizačním fázovém obratu. [4]

Schéma této sekvence je možné vidět na obrázku 9.



Obrázek 9: Sekvence zpracování potlačeného/neadresného dotazu módu S [12]

2.3.3 Shrnutí časů zatížení

V tabulce 1 je možné vidět dílčí doby zpracování dotazu odpovídačem módu A/C v μs . Doby T_{rcv} a T_{oc} byly převzaty z [12] a jsou zjištěny experimentálně měřením. Vyjadřují tedy doby reálné, nikoli pouze maximální hodnoty stanovené standardem. V [13] bylo provedeno měření a statistické vyhodnocení váženým průměrem jednotlivých času vzhledem k počtu prodaných odpovídačů od různých výrobců. Pokud tedy byly poskytnuty nové hodnoty v [13], byly do tabulky vloženy tyto.

Tabulka 1: Mód A/C odpovídač - časy zatížení [μs]

Mód	Dotazování v hlavním laloku					Postranní lalok	
	T_{rec}	T_{proc}	T_{rep}	T_{rcv}	T_{oc}	T_{rec}	T_{oc}
1	3,8	-	-	-	20,2	2,8	39,01
3	5,8	-	-	-	20,2	2,8	39,01
3/A	8,8	3	20,75	56,65	89,2	2,8	39,01
C	21,8	3	20,75	56,65	102,2	2,8	39,01
A-only	8,8	3	20,75	56,65	89,2	2,8	39,01
C-only	21,8	3	20,75	56,65	102,2	2,8	39,01
S	2,8	-	-	-	34,2	2,8	39,01

V tabulce 2 je možné vidět totéž pro mód S odpovídač a jednotlivé formáty dotazů. Zkratka „ad“ představuje doby pro adresné dotazy. „nad“ znamená neadresné dotazy. Jsou-li uvedeny 2 časy v poli doby zatížení T_{oc} , pak první hodnota platí pro odpovědi krátkého formátu mód S a druhá hodnota pro odpovědi dlouhého formátu módu S. U dotazů formátu UF 11, jež představují dotazy All-Call, první řádek zastupuje úplné zpracování dotazu a druhý řádek zpracování dotazu, pokud je odpovídač ve stavu IC lockout.

Tabulka 2: M3d S odpov3da3 - 3asy zat3žení [μs]

M3d/Form3t	Dotazov3n3 v hlavn3m laloku					Postrann3 lalok	
	T_{rec}	T_{proc}	T_{rep}	T_{rcv}	T_{oc}	T_{rec}	T_{oc}
1	3,8	-	-	-	20,2	2,8	34,2
2	5,8	-	-	-	20,2	2,8	34,2
3/A	8,8	3	20,75	16	48,55	2,8	34,2
C	21,8	3	20,75	16	61,55	2,8	34,2
A-only	10,8	-	-	-	25,3	2,8	34,2
C-only	23,8	-	-	-	38,4	2,8	34,2
UF 0 <i>ad</i>	19,75	113	64	16,24	212,99	5,15	33,48
UF 0 <i>nad</i>	19,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 4 <i>ad</i>	19,75	113	64/120	16,24	212,99/268,99	5,15	33,48
UF 4 <i>nad</i>	19,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 5 <i>ad</i>	19,75	113	64/120	16,24	212,99/268,99	5,15	33,48
UF 5 <i>nad</i>	19,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 11	19,75	113	64	16,24	212,99	5,15	33,48
UF 11 <i>lk</i>	19,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 16 <i>ad</i>	33,75	99	120	16,24	268,99	5,15	33,48
UF 16 <i>nad</i>	33,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 20 <i>ad</i>	33,75	99	64/120	16,24	212,99/268,99	5,15	33,48
UF 20 <i>nad</i>	33,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 21 <i>ad</i>	33,75	99	64/120	16,24	212,99/268,99	5,15	33,48
UF 21 <i>nad</i>	33,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
UF 24 <i>ad</i>	33,75	99	64/120	16,24	212,99/268,99	5,15	33,48
UF 24 <i>nad</i>	33,75	-	-	-	34,21	5,15	33,48
DF 11 (Acq. Squitter)	-	-	64	16,24	80,24	-	-
DF 17 (Ext. Squitter)	-	-	120	16,24	136,24	-	-

3 Dataflash aplikace

Problematika snížení zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz je velmi aktuální téma. Řeší se však už delší dobu, jelikož první problémy nastaly s použitím sekundárních radarů módů A/C v oblastech s vysokou hustotou provozu. Základním principem pro snížení zatížení na těchto pásmech byla z počátku aplikace monopulsní techniky u sekundárních radarů. Tato technika umožňuje úhlové zaměření cíle i z jednoho pulsu. Následně proběhl velký pokrok a byl vyvinut mód S MSSR, který zajistil kromě i jiných velmi důležitých vlastností odstranění garblingu u mód S zpráv a velké snížení FRUIT. Bohužel však pouze koncept mód S MSSR nestačí pro zajištění dostatečné kapacity těchto pásem při stále rostoucím objemu letecké dopravy. Bylo proto vynaloženo značné úsilí pro vývin různých metod, které by mohli pomoci v této oblasti.[8]

V této kapitole se podrobně podíváme na jednu metodu nazvanou Dataflash aplikace. Ač by se mohla zdát následná specifikace až přespříliš podrobná, cílem je získat popis, který by umožnil v budoucnu implementaci Dataflash aplikace buď do matematického modelu, jako ten, který bude rozebírán v následujících kapitolách, nebo do nějaké exaktní simulace softwarově implementující konkrétní algoritmy všech mód S procesů.

V závěru této kapitoly se zmíníme i o dalších principech, které by mohli umožnit snížení zatížení těchto pásem.

3.1 Obecný popis

Každá odpověď módu S vyslaná letadlem, pokud je dlouhého formátu (112 bitů), obsahuje nějaký z 255 datových registrů odpovídače o délce 56 bitů, označených kódem BDS. Každý datový registr obsahuje jeden či více parametrů letadla nebo letu. Požadovat však z odpovídače všech 255 datových registrů je přehnané a ne všechny informace, které poskytují, jsou pro všechny ANSP důležité. Organizace EUROCONTROL stanovila tabulku datových registrů (DAPs), které musí být odpovídači poskytovány a střediska řízení pak informace využijí ke zlepšení svých činností.[4][14][15]

Získání DAPs může být uskutečněno jedním z dvou protokolů.[4]

- Ground initiated Comm-B (GICB)
- Dataflash

GICB protokol využívá pro získání Comm-B odpovědi (112 bitů dlouhé odpovědi módu S) dotaz z pozemní ho radaru, či jiného dotazovače. Do Comm-B odpovědi je vložen jeden z 255 datových registrů. Jedná se tedy o typický provoz SSR mód S.[4][15]

Dataflash protokol, zvaný též Dataflash aplikace, umožňuje uzavření kontraktu mezi pozemní stanicí a letadlem. Tento kontrakt zajistí, že v mód S odpovědích bude radaru, či jinému dotazovači, který si tento kontrakt sjedná, poskytnuta informace, zdali se změnil konkrétní parametr, dle specifikovaných kritérií kontraktu.[4]

Dataflash aplikace není navržena jako úplná náhrada GICB protokolu. Data, o kterých se ví, že se mění mezi dobami ozáření radaru, nebo mezi několika dobami ozáření radaru, se budou extrahovat pomocí GICB protokolu klasickými dotazy na jednotlivé datové registry. Používat ale

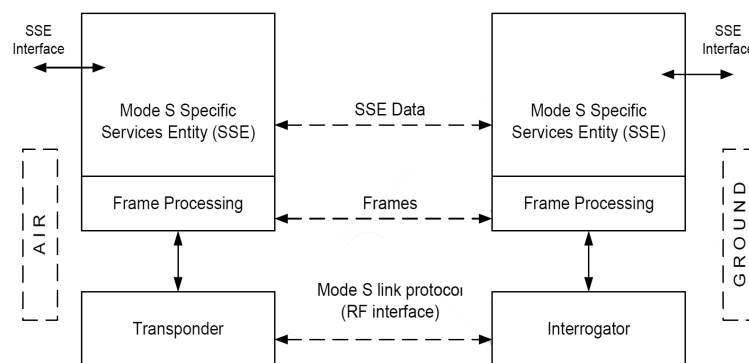
GICB pro všechny datové registry, i ty které se mění například průměrně jednou za několik minut, je velmi nevýhodné z hlediska zatížení radiofrekvenčního pásma. Právě proto byla navržena Dataflash aplikace, umožňující efektivní snížení tohoto zatížení. Není pak nutno se v každé době ozářením radarem ptát na datové registry, které se nezměnily.[4]

Než se pustíme do samotného konkrétního popisu Dataflash aplikace, je potřeba se obecně seznámit se specifickými službami módu S a specifickým protokolem módu S, který Dataflash aplikace využívá.

3.2 Specifické služby módu S

Mode S specific services, neboli specifické služby módu S jsou služby datového spoje, poskytující standardní komunikační rozhraní a služby, umožňující aplikačním procesorům avioniky vyměňovat data s aplikačními procesory pozemních systémů a opačně. Tyto služby pracují s minimální režií (overhead) a zpožděním, což je dělá velmi vhodnými pro použití v ATS. [4][15]

Zjednodušeně lze říci, že je to soubor služeb, které umožňují vzájemnou výměnu dat mezi palubními a pozemními systémy využívajícími mód S. Pouze pro ilustraci je možné na obrázku 10 vidět architekturu těchto specifických služeb.



Obrázek 10: Architektura Specifických služeb módu S [4]

Specifické služby módu S se dělí na 3 základní kategorie:[15]

- Ground initiated Comm-B (GICB) protokol
- Specifický protokol módu S (Mode S specific protocol - MSP)
- Rozhlasový protokol módu S (Mode S broadcast protocol)

Specifický protokol, který je využíván Dataflash aplikací, umožňuje vzestupný a sestupný přenos dat mezi pozemním a palubním procesorem datového spoje a opačně. Pro tento přenos se využívá jeden nebo více z 63 vzestupných nebo sestupných kanálů, na kterém se zasílají data ve formě krátkých nebo dlouhých MSP paketů.[15]

Zvláštěností tohoto protokolu je, že umožňuje zasílání až 159 bitů dlouhých zpráv formovaných do MSP paketů. Pakety o délce do 26 bitů jsou formovány do Comm-B zpráv. Pakety v rozmezí 27 až 159 bitů jsou zaslány buď s využitím ELM (Comm-C/Comm-D) protokolu nebo sdružením

několika Comm-B segmentů, není-li ELM odpovídačem podporován. Dalším specifíkem tohoto protokolu je, že využívá extrémně nízkou režii, která je umožněna vynecháním různých diagnostických a řídicích procedur. Tyto procedury by poté měly být zajištěny uvnitř dílčích aplikací, využívající tento protokol.[4][15][16]

3.3 Rozbor činnosti

Jak již bylo zmíněno, Dataflash aplikace je založena na tzv. kontraktu, který zajišťuje jednoznačnou dohodu o tom, na jaké parametry má být dohlíženo. Změna parametrů může být specifikována i velikostí odchylky od stávající hodnoty, nikoli pouze binárně změněno/nezměněno.[15][17]

Tento kontrakt je zaslán z pozemní stanice palubnímu zařízení ve formě tzv. služební žádosti, přes odpovídač módu S a ADLP s využitím kanálu 6 výše zmiňovaného specifického protokolu módu S. Pokud nastane událost, kterou kontrakt definoval, dojde k oznámení změny nebo přímo k zaslání příslušného datového registru, obsahujícího změněný parametr, pomocí AICB protokolu pozemní stanici identifikované daným II kódem obsaženým v žádosti. Tato sekvence oznámení AICB protokolem proběhne jako reakce na nezávislé dotazování UF 4, 5, 20 nebo 21 dotazy dané pozemní stanice.[15][17]

Zaslání informací proběhne formou MSP paketu na sestupném kanálu 3, složeného z jednoho nebo dvou propojených Comm-B segmentů. První segment obsahuje MSP hlavičku, Dataflash hlavičku a kontrolní informace pro daný kontrakt. Druhý segment obsahuje přímou kopii relevantního datového registru specifikovaného ve stanoveném kontraktu. Je-li požadováno zaslání pouze informací o změně, mohou být data následně získána přímou extrakcí daného registru dotazovačem s využitím GICB.[15][17]

3.3.1 Ověření dostupnosti Dataflash aplikace

Pozemní systém se zabudovanou Dataflash aplikací rozpozná, zdali dané letadlo podporuje Dataflash aplikaci, následujícím způsobem:[15]

- Pokud bude bit 25 registru 10_{16} nastaven na hodnotu 1, tak systém extrahuje registr odpovídače $1D_{16}$, poté
- pokud bude bit 6 a bit 31 registru $1D_{16}$ nastaven na hodnotu 1, tak systém podporuje Dataflash aplikaci.

3.3.2 Zahájení a ukončení služby

Služba dataflash je zahájena nebo ukončena služební žádostí. Žádost je obdržena na kanálu 6 vzestupného spoje MSP a s hodnotou 1 v hlavičce služební žádosti. Tato hodnota indikuje, že zbytek uživatelských dat obsahuje služební žádost.[17]

Ukončení služby může proběhnout třemi způsoby:[17]

- a) Pozemní stanice pošle zprávu s EC^1 polem nastaveným na hodnotu 0, což znamená, že služba bude ukončena palubní instalací.

¹Strukturu vzestupných a sestupných zpráv a popis jejich polí je možné vidět v sekcích 3.3.6, 3.3.7.

- b) Palubní instalace ukončí službu bez jakékoli indikace na zem, pokud žádná zpráva není extrahovaná z odpovídače pozemním dotazovačem do 30 sekund od události, která by měla způsobit zaslání změny pozemní stanici.
- c) Pokud odpovídač nebyl selektivně dotazován mód S dotazovačem s příslušným II kódem po dobu 60 sekund, všechny dataflash kontrakty související s daným II kódem budou ukončeny bez indikace pozemnímu systému.

Preferovaná je možnost a), tedy ukončení inicializované pozemní stanici. Tento způsob zajistí jednoznačnou terminaci kontraktů na obou stranách spoje. Musí však být brán v potaz prostor pokrytí radarem a případné opouštění tohoto prostoru letadlem. Navíc nelze toto ukončení dovolit v určitých konfiguracích, jako je více blízkce umístěných radarů s dataflash aplikací zabudovanou ve svém softwaru pracujících se stejným II kódem.

Pokud by byla obdržena nová žádost na kontrakt, který již probíhá, je stávající kontrakt ukončen a ihned nahrazen novým.

3.3.3 Potvrzení aktivace kontraktu a náhlé ukončení

Jako potvrzení úspěšného doručení služební žádosti je ihned na zem vyslána sestupná zpráva bez ohledu na kritéria a nastavení pole RDS (viz 3.3.7). Tato potvrzující zpráva se skládá pouze z jednoho Comm-B segmentu, který obsahuje daný datový registr. Hodnota pole CI je nastavena na hodnotu 1, což indikuje úspěšné vytvoření kontraktu. Neobdrží-li pozemní stanice během 30 sekund po vyslání služební žádosti potvrzení, proběhne v Roll-Call periodě zkouška, zdali je letadlo pořád dostupné. Pokud je dostupné, tak je vyslána žádost nová. Aby se zabránilo opakování služebních žádostí, které neprodukují žádnou odpověď a tím nadbytečně zvyšují zatížení radiofrekvenčního pásma, je limitován počet těchto žádostí na 3.[15][17]

Je-li podána žádost o nedostupný, nebo nepodporovaný registr, tak odpovídač zašle zprávu obsahující pouze bity 1-40 struktury sestupné zprávy, kde pole CI bude nastaveno na hodnotu 2. Tato hodnota indikuje, že nemohlo být žádosti vyhověno z důvodu nedostupnosti registru odpovídače. Služba je ihned poté ukončena palubním zařízením a pozemní systém indikuje uživateli, který podal žádost na daný datový registr, že palubní zařízení nemůže žádosti vyhovět.[15]

Pokud by doposud monitorovaný datový registr přestal být dostupný, je tato skutečnost oznámena pomocí zprávy sestupného spoje obsahující pouze bity 1-40 a pole CI nastaveného na hodnotu 7. Tato hodnota indikuje, že daný registr odpovídače již není obsluhován. Náležící kontrakt je ukončen palubní částí aplikace a pozemní systém oznámí uživateli, který podal služební žádost o daný registr, že byla služba ukončena palubní instalací. Další možnost jak by pozemní systém zjistil, že registr odpovídače již není dostupný, je analyzovat registr 10_{16} , který bude vyslán odpovídačem na zem jako indikace, že se změnil registr 17_{16} . Mód S dotazovač poté extrahuje registr 17_{16} a pozemní aplikace zjistí z obsažených dat, že registr monitorovaný Dataflash kontraktem již není podporovaný palubní instalací.[15]

3.3.4 Kontraktní číslo a překrytí více radarů se stejným II kódem

Každému Dataflash kontraktu je přiděleno jedno kontraktní číslo pro každý datový registr - II kód pár. Toto umožní až 16 kontraktů pro jeden konkrétní datový registr s tím, že každý kontrakt může mít nastaveno jiné kritérium změny.[17]

V oblastech, kde vysílá více radarů se stejným II kódem a jejichž oblasti pokrytí se překrývají, je nezbytné řídit přidělování kontraktních čísel. Důvodem je nutnost zajistit, že nikdy nebude použito stejné kontraktní číslo na stejný registr pro radary se stejným II kódem. Pokud by se tak stalo, pak by pozemní stanice nedokázala zjistit zda kontrakt, který vytvořila, nebyl přepsán jinou pozemní stanicí používající identický II kód. Také by mohla nastat situace, kdy by jedna pozemní stanice zrušila kontrakt z důvodu blízkého opuštění prostoru pokrytí letadlem. Žádná další pozemní stanice by se poté nedozvěděla, že k tomuto ukončení došlo.[15]

Nejlepší možností, jak účinně řídit distribuci kontraktních čísel, se jeví centrální řízení ATC systémem podporujícím Dataflash aplikací. Systém ATC, by poté řídil distribuci kontraktních čísel pro pozemní stanice se stejným II kódem, jejichž oblasti pokrytí se překrývají. Systém ATC má také globálnější přehled o trase letadel, na rozdíl od jednoho konkrétního radaru, a může tedy lépe řídit inicializaci a ukončení jednotlivých kontraktů podle toho, jak je to nejvhodnější při přechodu mezi oblastmi pokrytí jednotlivých radarů.[15]

3.3.5 Zahlcení systému

Jako prevence proti zahlcení systému Dataflash zprávami je stanoven maximální počet 10 zpráv, které mohou být vyslány během 6 sekund. Dosáhne-li se tento limit, tak jsou další zprávy zařazeny do fronty na odeslání. Pokud po sestavení sestupné zprávy, která má být vyslaná na zem, nastane znovu změna vyžadující vyslání další zprávy a původní zpráva je stále ve frontě, je tato zpráva nahrazena novou s nejaktuálnějšími informacemi.[17]

3.3.6 Struktura vzestupné zprávy

Strukturu vzestupné zprávy obsahující služební žádost je možné vidět na obrázku 11.

Význam jednotlivých polí je následující:[17]

- *SR – hlavička služební žádosti*

První bajt pole uživatelských dat stanovuje hlavičku služební žádosti, jejíž hodnota je nastavena na hodnotu 1₁₀ pro Dataflash aplikaci. Po poli SR následuje jedna, nebo více služebních žádostí.

- *DH - dataflash hlavička*

Hlavička dataflash představuje 16 bitové pole, rozdělené do 4 podpolí, separované 3 rezervovanými bity (14-16). Samé nuly v DH indikují, že v MSP paketu nejsou žádné další služební žádosti.

- *CNS – podpole kontraktního čísla*

Podpole CNS umístěné v bitech 9-12 představuje kontraktní číslo dovolující 16 různých kontraktů, které mohou být přiřazeny k registru specifikovaným podpolemi BDS1 a BDS2

Bits 1 to 40

	DP = 0 (1 BIT)	MSB
	MP = 0 (1 BIT)	
	M/CH = 6 (6 BITS)	
	LSB	
1	MSB	
2	SERVICE REQUEST (SR) = 1	
3		
4		
5		
6	LSB	
7		
8		
9		
10	CONTRACT	
11	NUMBER	
12	SUBFIELD	
13	LSB (CNS)	DATAFLASH
14	REQUEST DATA (RDS)	
15	RESERVED	
16	HEADER	
17	MSB	LSB
18	BDS1	
19	CODE	
20	LSB	
21	MSB	LSB
22	BDS2	
23	CODE	
24	LSB	
25	MSB	
26	MINIMUM	
27		
28		
29		
30	TIME (MT)	
31		
32		
33		
34	LSB = 1 second	
35	MSB	
36	EVENT	
37	CRITERION (EC)	
38	LSB	
39	MSB	
40	STABLE TIME (ST)	

Bits 41 — 96 (if required)

41	MSB
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	CHANGE
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	QUANTA
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	FIELD (CQ)
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	LSB
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	
82	
83	
84	
85	
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	LSB

Bits 97-152 (if required)

97	MSB
98	
99	
100	
101	
102	
103	
104	
105	
106	
107	
108	
109	
110	
111	
112	
113	THRESHOLD
114	
115	
116	
117	
118	
119	
120	
121	FIELD (CT)
122	
123	
124	
125	
126	
127	
128	
129	LSB
130	
131	
132	
133	
134	
135	
136	
137	
138	
139	
140	
141	
142	
143	
144	
145	
146	
147	
148	
149	
150	
151	
152	LSB

Obrázek 11: Vzestupná zpráva Dataflash aplikace - služební žádost[17]

dané služební žádosti. Dostupná kontraktní čísla v rozmezí 0-15 musí být propojena s II kódem kontraktní žádosti.

- *RDS – podpole žádosti dat*

Podpole RDS představuje 1 bit v pozici bitu číslo 13. Toto podpole udává požadavek na délku pole uživatelských dat sestupné zprávy, která je odeslána v okamžiku dosažení kritérií stanovených kontraktem. Pokud bude pole RDS nastaveno na hodnotu 0, bude v sestupném spoji pozemní stanici zasláno pouze oznámení o změně, tj. bity 1-40 pole uživatelských dat sestupné zprávy. Pokud bude podpole nastaveno na hodnotu 1, bude následovat i obsah datového registru.

- *BDS1 a BDS2*

Tyto dvě pole obsahují BDS1 a BDS2 kódy označující konkrétní datový registr, který je předmětem služební žádosti.

- *MT – minimální čas*

Pole minimálního času o rozměru 8 bitů reprezentuje minimální čas v desítkové hodnotě v sekundách. Tento čas musí uplynout po zaslání zprávy pozemní stanici, před sestavením zprávy nové.

- *EC – kritérium události*

Pole kritéria události o rozsahu 4 bitů reprezentuje jedno z pravidel, podle kterých se rozhoduje, zdali bude vyslána zpráva o změně registru. Pokud nastane více událostí pro jeden monitorovaný registr, přičemž každá žádost by vyvolala zprávu, bude odeslána pouze jedna zpráva. Hodnota pole EC a jejích význam je uveden v tabulce 3.

- *ST – stabilní čas*

4 bity za polem EC jsou zastoupeny polem ST. Hodnota v tomto poli indikuje, jak dlouho mají být data stabilní uvnitř daného kvanta změny, specifikovaného v poli CQ, než se odešle zpráva se změnou. Hodnota 0 v tomto poli představuje informaci o tom, že není žádný minimální stabilní čas a jakákoli změna musí být ihned odeslána. Pokud se jedná o sledování, zdali je hodnota nad/pod určitou prahovou hodnotou, musí být zprávy vysílány, dokud hodnota nespadne zpět pod/nad stanovenou prahovou hodnotu, bez ohledu na čas specifikovaný v tomto poli ST.

- *CQ – pole kvanta změny*

Pole kvanta změny zastupuje bity 41-96 v poli uživatelských dat MSP paketu. Hodnota kvanta změny je uvedena ve stejných jednotkách jako parametry monitorované v odpovídajícím registru. Toto pole specifikuje množství, o které se parametr musí změnit z hodnoty, kdy byl kontrakt vytvořen a poté z naposledy oznámené hodnoty, aby bylo vyvoláno vyslání sestupné zprávy.

- *CT – pole prahové změny*

Pole prahové změny je zastoupeno bity 97-152 v poli uživatelských dat. Určuje hladinu

parametru daného registru. Překročení této hladiny, způsobí vyslání sestupné zprávy. Podmínky vyslání jsou ovlivněny hodnotou v poli EC.

Tabulka 3: Vzestupná zpráva Dataflash - pole EC [17]

Hodnota	Význam
0	Není požadována žádná zpráva. Ukončení služby pro kontrakt specifikovaný v poli DH.
1	Oznam jakoukoli změnu.
2	56-bitové pole CQ následuje ST. Pouze oznamuj změny bitů zastoupených hodnotou 1 v poli CQ
3	56-bitové pole CQ následuje pole ST. Pro každý parametr oznam všechny změny větší než kvanta změny uvedené v poli CQ. Pokud je v poli CQ 0 rozumí se, že žádná zpráva není požadovaná.
4	112 bitové pole CQ a CT následuje pole ST. Prvních 56 bitů je stejných jako pro hodnotu $EC = 3$. Druhých 56 bitů představuje pole CT určující hladinu parametru. Oznam všechny změny nad hladinou, kdy pole CQ udává velikost nutné změny.
5	112 bitové pole CQ a CT následuje pole ST. Stejný význam jako pro $EC = 4$, s tím, že se oznamují všechny změny pod hladinou.
6	112 bitové pole CQ a CT následuje pole ST. Platí to stejné, jako pro $EC=4$ a $EC=5$, s tím, že se oznamují všechny změny nad i pod hladinou.
7-14	Nepřiděleno.
15	Zrušení všech kontraktů pro daný II kód v této žádosti.

3.3.7 Struktura sestupné zprávy

Strukturu sestupné zprávy je možno vidět na obrázku 12. Tato zpráva se dělí na 2 základní části o velikostech 56 bitů, čímž každá část odpovídá jednomu Comm-B segmentu. První část začínající MSP hlavičkou a končící polem CI oznamuje pozemní stanici, že došlo ke změně. Druhá část pak obsahuje konkrétní datový registr.[15]

Pole sestupné zprávy jsou následující:[17]

- *DH – Dataflash hlavička*

První dva bajty pole uživatelských dat tvoří Dataflash hlavička, která je identická s Dataflash hlavičkou zaslanou ve vzestupné zprávě.

- *CR – kontraktní zpráva*

Pole CR indikuje, zdali je kontrakt s daným II kódem aktivní. Toto je reprezentováno nastavením příslušného bitu na hodnotu 1. Každý bit tohoto pole představuje jeden kontrakt. Jsou-li všechny bity nastaveny na hodnotu 0, znamená to, že není žádný aktivní kontrakt pro daný II kód.

Bits 1 to 40		Bits 41 to 96	
	MSB LINKED COMM B SUBFIELD (LBS) (2 BITS)		41 MSB
	LSB		42
	DP = 1 (1 BIT)	MSB	43
	MP = 0 (1 BIT)		44
	MSB		45
	MCH = 3 (6 BITS)		46
			47
		MSP	48
		HEADER	49
	LSB		50
	MSB		51
	FILL 1 = 0 (6 BITS)		52
			53
			54
			55
	LSB	LSB	56
1	MSB CONTRACT	MSB	57
2	NUMBER		58
3	SUBFIELD		59
4	LSB (CNS)		60
5	REQUEST DATA SUBFIELD (RDS)		61
6			62
7	RESERVED		63
8		DATAFLASH	64
9	MSB	HEADER (DH)	65
10	BDS1		66
11	CODE		67
12	LSB		68
13	MSB		69
14	BDS2		70
15	CODE		71
16	LSB	LSB	72
17	II=1		73
18	II=2		74
19	II=3		75
20	II=4		76
21	II=5		77
22	II=6		78
23	II= 7		79
24	II= 8		80
25	II= 9		81
26	II=10		82
27	II=11		83
28	II=12		84
29	II=13		85
30	II=14		86
31	II=15		87
32			88
33			89
34	NOT ASSIGNED		90
35			91
36			92
37	MSB		93
38	CONTRACT		94
39	INFORMATION (CI)		95
40	LSB		96 LSB

Obrázek 12: Sestupná zpráva Dataflash aplikace[17]

- *CI – kontraktní informace*

Toto pole obsahuje především informace, zdali byl úspěšně navázán kontrakt, či byl z nějakého důvodu ukončen. Hodnoty a jejich význam je možné vidět v tabulce 4. Při hodnotě 0 v poli CI je odpověď vyslaná pozemnímu zařízení strukturována tak, jak je požadováno v poli RDS vzestupné zprávy. Pokud má pole CI jinou hodnotu, odpověď obsahuje pouze bity 1-40 pole uživatelských dat.

Tabulka 4: Sestupná zpráva Dataflash - pole CI [17]

Hodnota	Význam
0	Odpověď existujícímu kontraktu.
1	Nový kontrakt vytvořen.
2	Nový kontrakt není přijat nebo existující kontrakt je ukončen z důvodu nepodporování služby pro daný registr.
3	Nový kontrakt není akceptován z důvodu naplnění maximální kapacity kontraktů.
4	Kontrakt je ukončen pro danou Dataflash hlavičku z důvodu žádosti o ukončení vyslané pozemním zařízením.
5	Všechny kontrakty jsou ukončeny pro daný II kód, který doručil MSP paket s hodnotou v poli EC nastavenou na 15.
6	Odpověď byla zařazena do fronty k odeslání z důvodu limitu 10 dataflash zpráv v časovém období 6 sekund.
7	Kontrakt ukončen z důvodu selhání služby registrů.
8-14	Nepřiděleno.
15	Nový kontrakt neakceptován z důvodu invalidního čísla v poli EC žádosti.

3.4 Aktuální využití Dataflash aplikace

V předchozích částech jsme si podrobně specifikovali Dataflash aplikaci a uvedli zřejmé výhody, které přináší pro snížení zatížení patřičných radiofrekvenčních pásem. Navíc je tato aplikace specifikovaná přímo organizací ICAO, kdy byla požadována po nově instalovaných palubních zařízeních schopnost simultánního provozu 64 kontraktů. Zajisté tedy musí být tato aplikace využívána. Není tomu tak. [17]

V průběhu vývoje byl mód S navržen tak, aby umožňoval velké využití jako datový spoj země-letadlo. MSP protokol toho může být důkazem. Problém však nejspíše nastal při rozhodování, jak provádět akvizici mód S letadel, která se nově dostala do prostoru pokrytí radarem. Mód S k tomuto využívá All-Call periody, kdy požaduje od všech odpovídačů módu S, které má v dosahu, jejich 24 bitovou adresu.

Toto dotazování i několikrát během doby ozáření by bylo pro každé letadlo nadbytečné a podkopávalo by důvod, ke kterému byl mód S vytvořen. Byla proto také vyvinuta metoda multisite II lockout, která po prvním úspěšném dotázání mod S-only All-Call zprávou zajistila „uzamčení“ odpovídače na daný II kód a na další mód S-only All-Call zprávy odpovídač nereagoval.

V tento moment by vše bylo stále kompatibilní s Dataflash aplikací. S růstem letectví a pořizováním dalších mód S radarů došlo k nárůstu překrytí některých oblastí na více než 15 a tomu již množství II kódů nestačilo. Byly proto zavedeny kódy SI, které poskytují navíc 63 možností. A právě zavedení SI kódů způsobilo nemožnost využití Dataflash aplikace, která požaduje pro svoje použití kód II.[4]

Jak uvádí standard [4] nebo ICAO dokument [14], SI kódy nejsou určeny pro použití s multi-site komunikačními protokoly, které vyžadují použití kódů II. Z tohoto důvodu budou dotazovače používající SI kódy limitovány na datové spoje pouze ve formě protokolů:

- Unlinked Comm-A
- Broadcast Comm-A
- Ground initiated Comm-B (GICB)
- Broadcast Comm-B
- ACAS/TCAS Downlink Transactions

A jak je ve standardu dále uvedeno:

*„This specifically **excludes** the use of air-initiated Comm-B (AICB) protocol, which is required for **data flash** and downlink MSPs.“[4]*

Neboli ve volném překladu:

- Toto obzvláště **vylučuje** použití AICB protokolu, který je zapotřebí pro **Dataflash aplikaci** a sestupý spoj MSP protokolu.

3.5 Další metody

Dataflash aplikace není jedinou metodou navrženou pro snížení zatížení frekvenčních pásem 1030/1090 MHz. Mezi další metody a přístupy patří například:

- Vývoj nových algebraických algoritmů pro separaci kolizních zpráv.[18]
- Použití směrových antén u aktivních WAM systémů.[19]
- Využití původní tolerance nosné frekvence 1090 ± 3 MHz k tvorbě více kanálů pro současný přenos zpráv z letadel a vozidel v prostoru letiště.[20]
- Použití SSPAR na rozdíl od MSSR.[21]

Podrobný rozbor těchto metod je nad rámec této práce.

4 Principy a předpoklady matematického modelu

Hlavní částí této bakalářské práce je tvorba modelu interakcí mezi MSSR, XPDR, ADS-B a TCAS z hlediska interference, neboli současného příchodu více dotazů či odpovědí. Cílem modelu je poznat chování tohoto velmi komplexního systému a stanovit reinterrogation rate, jehož výpočet je možné vidět v rovnici 4.1.

$$\xi = \frac{\lambda_c}{\lambda_0} \quad (4.1)$$

λ_c představuje celkovou intenzitu, neboli celkový počet vyslaných dotazů za sekundu. λ_0 představuje požadovanou intenzitu.

K řešení tohoto problému připadají v úvahu dvě základní cesty. První cestou je exaktní model softwarově implementující konkrétní prvky a algoritmy daného prostoru problému. Druhou cestou, kterou se vydáme zde, je matematický přístup. Matematických pohledů na tento problém bude jistě více. Pro nás bude základem Pure ALOHA protokol, který je dobře popsateľný Poissonovým procesem. Na tento protokol navážeme a odvodíme nelineární stochastický systém n -tého řádu.

V této části se zaměříme na popis základních principů a předpokladů, které zohledníme v následující tvorbě.

4.1 Poissonův proces

Poissonův proces je jeden ze základních a nejpoužívanějších stochastických procesů pro modelování časů příchodu nějakého subjektu do určitého systému. Je založen na počítání počtu příchodů daného subjektu do určitého časového okna $\langle 0, t \rangle$ a hodí se pro použití jako aproximace k značnému množství dějů v reálném světě. Příkladem mohou být průjezdy automobilů neomezeným dopravním proudem nebo příchody zákazníků do obchodu. Často se používá právě v komunikačních sítích pro simulaci příchodu paketů na přijímače. Definice s předpoklady Poissonova procesu je následující:

Čítací proces $\{A(t), t \geq 0\}$, kde $A(t)$ je počet jevů, které nastaly v čase $\langle 0, t \rangle$, se nazývá Poissonův proces s intenzitou $\lambda, \lambda \geq 0$ pokud:[22][23]

1.

$$A(0) = 0 \quad (4.2)$$

2. Počty jevů, které nastanou v disjunktních časových úsecích jsou vzájemně nezávislé.

3. Pro malý časový interval dt je pravděpodobnost jednoho jevu v daném časovém úseku dána dle

$$P(A(t+dt) - A(t) = 1) = \lambda dt + o(dt), \quad (4.3)$$

kde $o(dt)$ je nějaká funkce, pro kterou platí

$$\lim_{dt \rightarrow 0} o(dt) = 0 \quad (4.4)$$

4. Pravděpodobnost, že dva a více jevů nastanou v malém časovém úseku je zanedbatelná, neboli

$$P(A(t + dt) - A(t) \geq 2) = o(dt) \quad (4.5)$$

5. Počet jevů v jakémkoli intervalu o délce t má Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti se střední hodnotou λt . Tedy $\forall \tau, t \geq 0$

$$P(A(t + \tau) - A(t) = n) = P(A(\tau) = n) = \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} e^{-\lambda \tau}, \quad n \in \mathbb{N}_0 \quad (4.6)$$

Intenzitou λ se rozumí počet realizací daného jevu za jednotku času. Například počet příchodů za sekundu. Dále je dobré uvést, že jednotlivé Poissonovy procesy jsou aditivní.

Platí:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.7)$$

4.2 Pure Aloha protokol

Pure Aloha protokol byl vyvinut v 70. letech 20. století na Havaii. Jedná se o jeden z nejjednodušších komunikačních protokolů, který pro zaslání dat využívá společnou frekvenci a mezi vysílači a přijímači nedochází k synchronizaci. Tedy:[24][25]

- Jakmile má vysílač nějaká data k vyslání, tak je vyšle.
- Pokud dojde ke kolizi, počká se náhodnou dobu a data budou vyslána znovu.

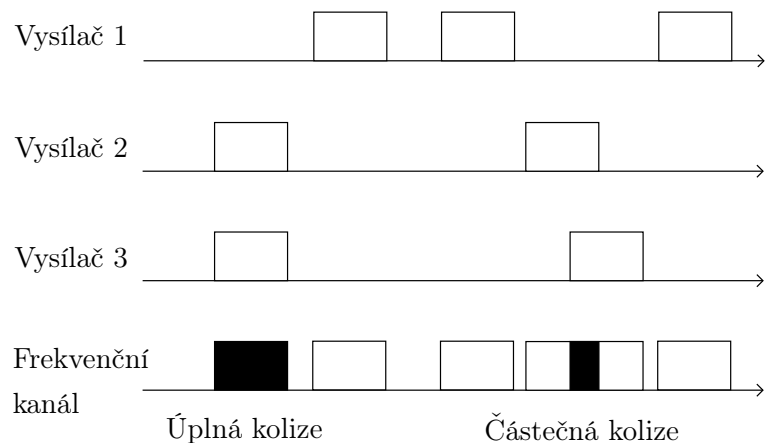
Tento základní princip je stejný i pro námi zkoumanou situaci, jelikož předpokládáme, že všechny radary a letadla vysílají nezávisle na sobě a pokud dojde ke kolizi, tak musí být dotazy vyslány znovu. Například u radarů pravděpodobně opětovné vyslání zpráv náhodné nebude. Není však v našich silách zjistit přesné algoritmy řazení zpráv v Roll-Call periodě. Navíc tyto algoritmy závisí na výrobci radaru. Lze tedy toto zjednodušení brát za oprávněné.

Kolizí se v tomto případě myslí jakékoli částečné překrytí zpráv a není uvažováno zvýšení úspěšnosti doručení zpráv s využitím algoritmů zpracování signálu pro separaci kolizních zpráv. Toto je další z důležitých předpokladů, s kterým budeme v našem systému uvažovat. Schéma kolizí je možné vidět na obrázku 13.

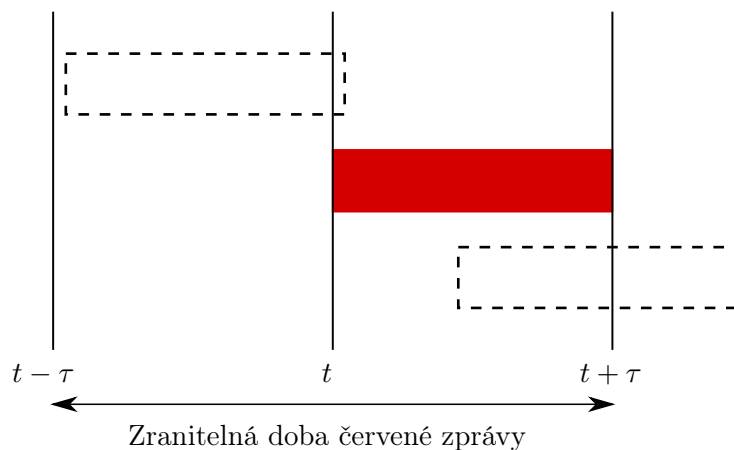
Mezi další předpoklady Pure Aloha protokolu patří:[25]

- Všechna data (rámce, zprávy...) mají stejnou délku τ .
- Stanice nemohou generovat nová data, pokud vysílají, nebo se snaží vysílat.
- Pokusy o vyslání (nových dat i kolizních) probíhají podle Poissonova rozdělení.

Kolize zpráv i při částečném překrytí způsobí, že úspěšné doručení jedním zdrojem bude zajištěno, pokud nebude žádná zpráva od jiného zdroje v intervalu o délce 2τ . Tento interval se nazývá zranitelná doba a jeho schéma je možné vidět na obrázku 14.



Obrázek 13: Překrytí zpráv



Obrázek 14: Zranitelná doba

Ačkoli se při matematickém popisu komunikačních systémů s různorodou délkou zpráv často používá jako aproximace průměrná délka, bude to jeden z parametrů, pro který budeme muset naše výpočty upravit.[26]

Jak bylo výše zmíněno a jak plyne z principu nezávislosti jevů v disjunktních časových intervalech Poissonova procesu, lze pro popis tohoto protokolu využít Poissonův proces. Dle rovnice 4.6 můžeme říci, že pravděpodobnost žádné zprávy v čase o délce zranitelné doby (2τ) je

$$P(A(2\tau) = 0) = \frac{(\lambda 2\tau)^0}{0!} e^{-\lambda 2\tau} = e^{-\lambda 2\tau}, \quad (4.8)$$

kde pro λ platí rovnice 4.7. Vezmeme-li v úvahu, že pravděpodobnost nějaké zprávy ve zranitelné době je

$$P(A(2\tau) > 0) = 1 - P(A(2\tau) = 0) = 1 - e^{-\lambda 2\tau}, \quad (4.9)$$

pak tato rovnice představuje pravděpodobnost kolize.

Základní schéma systému Pure Aloha protokolu je zobrazeno na obrázku 15. Pro tento systém platí rovnice

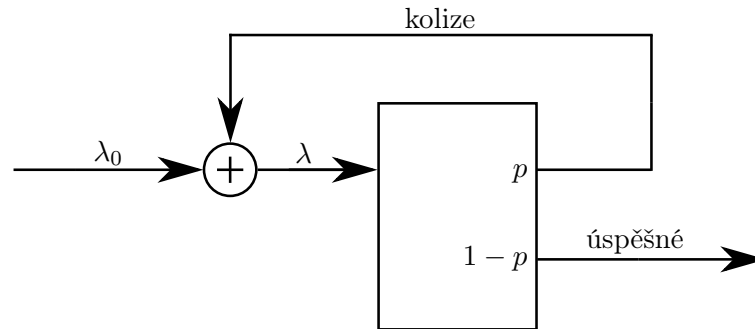
$$\lambda = \lambda_0 + P(A(2\tau) > 0)\lambda, \quad (4.10)$$

kde λ je celková intenzita včetně retransmise, λ_0 je původní bezkolizní intenzita. Proměnná p zastupuje pravděpodobnost kolize $P(A(2\tau) > 0)$, pro kterou platí

$$P(A(2\tau) > 0) = 1 - e^{-\lambda 2\tau} \quad (4.11)$$

Analogicky k tomu pravděpodobnost žádné zprávy v zranitelné době je

$$P(A(2\tau) = 0) = e^{-\lambda 2\tau} \quad (4.12)$$



Obrázek 15: Schéma Pure Aloha protokolu

Pokud si vyjádříme kapacitu kanálu jako

$$C = \frac{1}{\tau}, \quad (4.13)$$

lze vyjádřit normalizovanou intenzitu jako

$$\rho = \frac{\lambda}{C} = \lambda\tau \quad (4.14)$$

Propustnost je poté

$$S = \rho P(A(\tau) = 0) = \rho e^{-\lambda 2\tau} = \rho e^{-2\rho} \quad S \in \langle 0, 1 \rangle \quad (4.15)$$

Maximální propustnost dostaneme následovně.

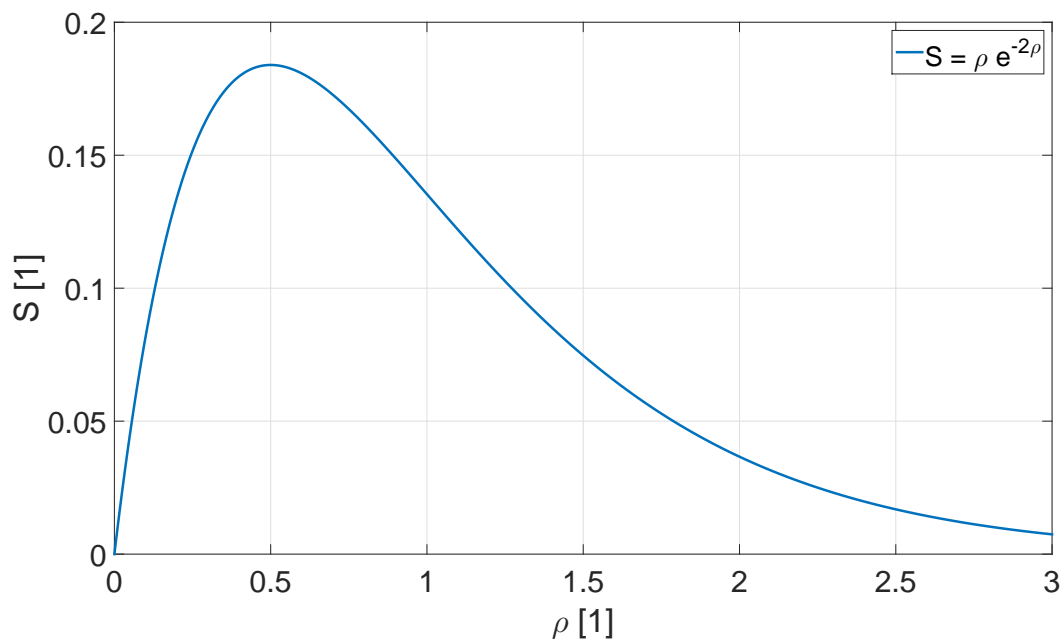
$$\frac{\partial S}{\partial \rho} = 0 \quad (4.16)$$

$$e^{-2\rho} - 2\rho e^{-2\rho} = 0 \quad (4.17)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \quad (4.18)$$

$$S = \rho e^{-2\rho} = \frac{1}{2} e^{-2 \cdot \frac{1}{2}} \approx 0,1839 \quad (4.19)$$

Maximální možná propustnost daného frekvenčního kanálu je 18,39%. Závislost průběhu propustnosti kanálu na normalizované intenzitě je možné vidět na obrázku 16.



Obrázek 16: Průběh propustnosti

4.3 Obecné předpoklady

Pro vytvoření správného matematického modelu systému si musíme stanovit přesné předpoklady chování radarů a odpovídačů letadel, se kterými budeme při tvorbě uvažovat. Jelikož se odpovídače i radary liší svou konkrétní implementací dle výrobce, budeme v následujících předpokladech vycházet z chování specifikovaného standardy.

Některé z následujících předpokladů způsobí určitou simplifikaci skutečného fungování systému. Toto je klasický přístup při tvorbě matematických modelů reálného světa, jemuž se nelze ve většině případů plně vyhnout. I tak bude při tvorbě snaha o vytvoření adaptivního modelu, který by umožnil některé z následujících předpokladů způsobujících zjednodušení do budoucna odstranit.

Základní předpoklady aplikované na radary a letadla jsou:

- **Platí veškeré předpoklady Poissonova procesu a Pure Aloha protokolu pokud není uvedeno jinak.**
- **Jak TCAS, tak i radary nikdy nezpůsobí překrytí vlastních dotazů/odpovědí.**
- **Radar i TCAS si svými algoritmy zajistí vyhrazenou dobu pro příjem odpovědi na své dotazy.**

Druhý předpoklad si z části odporuje s předpokladem prvním, jelikož při určité intenzitě jednoho radaru, který vysílá dle Poissonova procesu s intenzitou λ , jehož zprávy mají zranitelnou

dobu 2τ platí

$$P(A(2\tau) > 1) = P(A(2\tau) > 0) - P(A(2\tau) = 1) \quad (4.20)$$

$$P(A(2\tau) > 1) = 1 - P(A(2\tau) = 0) - P(A(2\tau) = 1) \quad (4.21)$$

$$P(A(2\tau) > 1) = 1 - e^{-\lambda 2\tau} - \frac{(\lambda 2\tau)^1}{1!} e^{-\lambda 2\tau} \quad (4.22)$$

$$P(A(2\tau) > 1) = 1 - e^{-\lambda 2\tau} (1 + 2\lambda\tau) > 0 \quad (4.23)$$

Z čehož plyne pro n radarů,

$$P(A(2\tau) > n) > 0 \quad n \in \mathbb{N} \quad (4.24)$$

Což znamená, že je nenulová pravděpodobnost kolize radaru se sebou samým. Stejná úvaha platí i pro vysílání TCAS letadla.

Tato vlastnost by se mohla zdát jako velmi problematická. Je nutné si uvědomit, že vzhledem k tvaru funkce hustoty pravděpodobnosti Poissonova rozdělení platí

$$\lim_{2\lambda\tau \rightarrow 0} P(A(2\tau) > n) = 0 \quad (4.25)$$

Totéž lze dokázat přímo z rovnice 4.23.

Protože hodnoty zranitelných dob (2τ) dosahují řádově desítek až stovek μs a intenzity vysílání zpráv λ se pohybují ve stovkách až tisících zpráv za sekundu, v závislosti na počtu letadel v hlavním laloku, lze předpokládat

$$P(A(2\tau) > n) \approx 0 \quad (4.26)$$

pro námi uvažované λ .

4.4 Model letadla

Pro lepší identifikaci chování odpovídače letadla si odpovídač rozdělíme na 3 subsystémy. XPDR umožňující odpovědi radarům, ADS-B a TCAS zajišťující funkci protisrážkového systému.

4.4.1 XPDR

Chování odpovídače na dotaz od radaru předpokládáme následující:

- **Všechna letadla jsou vybavena odpovídačem módu S.**

Matematický model bude zaměřen na pokrytí kategoricky co největší části provozu v Evropě. Jelikož jsou v dnešní době téměř všechna letadla vybavena módem S odpovídačem, kromě menšiny ve všeobecném letectví, lze tento předpoklad považovat za oprávněný.

- **Odpovědi na dotazy radarem budou pouze formátu DF 11, DF 20, DF 21.**

Zanedbání odpovědí formátu DF 4 a DF 5 je způsobeno zavedením Mode S Enhanced surveillance (EHS) neboli zdokonaleným přehledovým systémem módu S v mnoha oblastech Evropy. EHS požaduje u IFR letů v souladu s pravidly GAT letadly nad 5700 kg nebo

pravou vzdušnou rychlost přesahující 250 kt vybavení mód S odpovídačem druhé úrovně umožňující extrakci stanovených DAPs. V souladu s touto implementací lze očekávat, že všechny dotazy budou sloužit i k vyčítání těchto informací.[27]

- **Pokud dojde k současnému příchodu více dotazů, odpovídač na žádný neodpoví.** Toto je jeden z poměrně zásadních předpokladů modelu. Je možné, že některé XPDR využívají do jisté míry algoritmy zpracování signálů pro separaci kolizních zpráv. Není však cílem této práce se podrobně snažit zjistit jejich podobu a úspěšnost. Navíc bude konkrétní implementace závislá na výrobci.
- **Všechna letadla jsou ve stavu IC lockout.** Zanedbání prvotní lokace letadla pomocí All-Call periody zavede do modelu určitou simplifikaci. Dá se však předpokládat, že k této prvotní lokaci dochází vůči ostatnímu dotazování tak zřídka, že je její vliv zanedbatelný. Matematický model však bude vytvořen s myšlenkou případného budoucího rozšíření i o inicializační fázi lokace mód S radary.
- **Platí sekvence zpracování dotazu dle sekce 2.3.**

4.4.2 ADS-B

Automatic dependent surveillance - broadcast je systém, který pravidelně zasílá zprávy formátu DF 17 s různými datovými registry z letadla do okolí, aniž by bylo třeba dotazu. Hlavní předpoklady v oblasti ADS-B pro nás budou:[28]

- **Všechna letadla jsou vybavena systémem ADS-B 1090ES.** Momentálním trendem v poskytování přehledových informací je stále větší důraz na systém ADS-B 1090ES. Do budoucna se dá předpokládat, že většina informací bude z letadel poskytována tímto systémem automaticky a proto lze tento předpoklad považovat za oprávněný.
- **Všechna letadla jsou ve vzduchu.** Jak již bylo zmíněno, hlavním zájmem tohoto modelu je určit reinterrogation rate sekundárních přehledových radarů. Tyto radary nejsou využívány k sledování provozu na pozemních plochách a lze tedy uvažovat toto zjednodušení.

Druhy zpráv, jejich periody a periody, které budeme v modelu uvažovat je možné vidět v tabulce 5. Hodnoty v závorkách u Surface Position Squitter a Aircraft Identification Squitter udávají periody vysílání, pokud se letadlo nepohybuje, respektive jeho rychlost nepřesahuje 10 m za 30 s. Z předpokladu všech letadel ve vzduchu automaticky plyne, že pro nás tyto periody neplatí. Zároveň Surface Position Squitter nebude vůbec vysílán.[29]

Tabulka 5: Periody ADS-B

Typ zprávy	T [s]	\bar{T} [s]	Použité \bar{T} [s]
Airborne Position Squitter	0,4-0,6	0,5	0,5
Surface Position Squitter	0,4-0,6	0,5(5)	0
Aircraft Identification Squitter	4,8-5,2	5(10)	5
Airborne Velocity Squitter	0,4-0,6	0,5	0,5
Event Driven Squitter	max. 0,5	max. 0,5	1

4.4.3 TCAS

Palubní protisrážkový systém TCAS zajišťuje varování a případně vydává doporučené úhybné manévry při sblížení letadel. Tato funkce je umožněna díky meziletadlové komunikaci dotazy a odpovědi na pásmech 1030/1090 MHz přes XPDR. Hlavní předpoklady pro tento systém budou:

- **Všechna letadla jsou vybavena systémem TCAS II odpovídajícím ACAS II SARPs.**

Opět všechna letadla tímto systémem vybavena nejsou. Je však pravdou, že tento systém bude pouze rozšiřovat svůj podíl v palubním vybavení letadel a proto lze tento předpoklad považovat za oprávněný.

- **Mezi žádnými letadly nedochází k Traffic Advisory ani Resolution Advisory.**

Při tvorbě modelu budeme uvažovat s normálním provozem a tokem letového provozu. K Traffic Advisory a Resolution Advisory v běžném provozu nedochází. Nemusíme je proto v modelu uvažovat.

Způsob dotazování okolí systémem TCAS II závisí na druhu vybavení okolních letadel. Ačkoli jsou v našich úvahách veškerá letadla vybavena stejně, musíme zohlednit, že tento fakt systém TCAS II neví. Některé dotazy tedy bude muset vysílat, i když na ně nedostane odpověď. Níže jsou stručně popsány průběhy dotazování systémem TCAS II s ohledem na naše simulační prostředí.[29]

Mód A/C

Sleduje-li letadlo vybavené systémem TCAS II letadlo, které je pouze vybaveno mód A/C odpovídačem, provádí tuto činnosti pomocí tzv. Whisper Shout metody a směrových antén.[29]

Whisper Shout metoda využívá konstantní „aktivační hladiny“ (trigger level) letadel a postupného snižování síly signálu se vzdáleností. Průběh této metody spočívá ve vyslání sekvence dotazů během jedné dotazovací periody (1 s). Veškeré dotazy kromě prvního dotazu jsou doplněny pulsem S_1 , který předbíhá puls P_1 . Dotazy jsou také doplněny o krátký puls P_4 , což zabrání odpovídání letadel vybavených módem S.[29]

První dotaz v sekvenci má maximální intenzitu a následující dotazy vzestupně zvyšují intenzitu od předem definované nejnižší úrovně. Počet dotazů v sekvenci může být od 6 do 24, s tím že mezi každým dotazem musí být prodleva minimálně 1 ms.[29]

Přijme-li letadlo dotaz, kde zachytí i puls S_1 , tak na tento dotaz neodpoví. V odpovídači to vyvolá stejnou reakci, jako kdyby byla přijat dotaz od radaru včetně pulsu na potlačení postranních laloků.

Parametry této metody je možné vidět v tabulce 6.

Tabulka 6: Parametry Whisper Shout

Druh parametru	Hodnota	Použitá hodnota
Dotazovací perioda	max. 1s	1s
Počet zpráv	6-24	15
Prodleva mezi dotazy	min. 1 ms	1 ms

Při vysílání metodou Whisper Shout předpokládáme:

- **Laloky směrových antén pro Whisper Shout metodu jsou ideální kvadranty kružnice.**

Tento předpoklad způsobuje také jistou míru simplifikace. Zjištění konkrétní vyzařovací charakteristiky směrových antén TCAS je mimo rozsah této práce a proto lze tento předpoklad považovat za oprávněný. Model však bude vytvořen tím způsobem, aby bylo v budoucnu umožněno případné rozšíření na složitější tvary vyřazovacích charakteristik.

Mód S

Pokud sleduje letadlo vybavené systémem TCAS II 1090ES ostatní letadla, která jsou vybavená taktéž TCAS II 1090ES, tak navíc k vysílání dotazů metodou Whisper Shout musí získávat informace o parametrech letadel vybavených módem S. Systém TCAS II má rozdílné průběhy sledování pro letadla vybavena pouze verzí Acquisition Squitter a pro letadla vlastníci i nadstavbu k tomuto systému, kterou je Extended Squitter. Popis algoritmu sledování letadel s AS zde nebude rozebrán, pouze budou zmíněny vybrané části, které v našem modelu musíme zohlednit.[29]

Letadlo vybaveno TCAS II vysílá jednou za 10 s monitorovací zprávy formátu UF 16, na které se neočekává odpověď a které slouží ke kalibraci intenzity zpráv vzhledem k hustotě provozu. Dále letadlo vysílá automaticky každou sekundu Acquisition Squitter zprávy na frekvenci 1090 MHz, které mají formát DF 11. Navíc k těmto zprávám je automaticky vysíláno systémem ADS-B, jak bylo popsáno v sekci 4.4.2.[29]

Pro zahájení a následné průběžné sledování letadel vybavených TCAS II 1090ES se přijímají zprávy formátu DF 17 ze systému ADS-B 1090ES, ze kterých se podle obsažených informací určuje poloha. Navíc se ověřuje správnost získaných informací jednou za 60 s pomocí dotazů formátu UF 0 a následných odpovědí DF 0.[29]

Aktivní dotazování mezi letadly pro nás zavádí další předpoklady:

- **Pokud letadlo nedostane odpověď na dotaz, vyšle ho po náhodné době znovu.**
Zjišťování konkrétních algoritmů řazení dotazů v systému TCAS II je mimo rozsah této publikace a proto lze tento předpoklad považovat za oprávněný.
- **Pokud dojde ke kolizím odpovědí, musí letadlo vyslat dotaz znovu.**
Neboli pokud dojde k současnému příchodu chtěné odpovědi s odpovědí jiného letadla na jiný zdroj, musí být vyslán dotaz znovu. Tento předpoklad souvisí s již zmiňovanými předpoklady, kdy nejsme schopni zjistit podrobné algoritmy zpracování signálu pro dekodování kolizních dotazů a tedy i odpovědí.

Souhrn vysílaných zpráv letadlem s 1090ES sledujícím letadla s 1090ES je možné vidět v tabulce 7.[29]

Tabulka 7: Periody TCAS II

Formát	T [s]	\bar{T} [s]	Použité \bar{T} [s]
UF 0	60	60	60
UF 16	10	10	10
DF 11	0,8-1,2	1	1

4.5 Model radaru

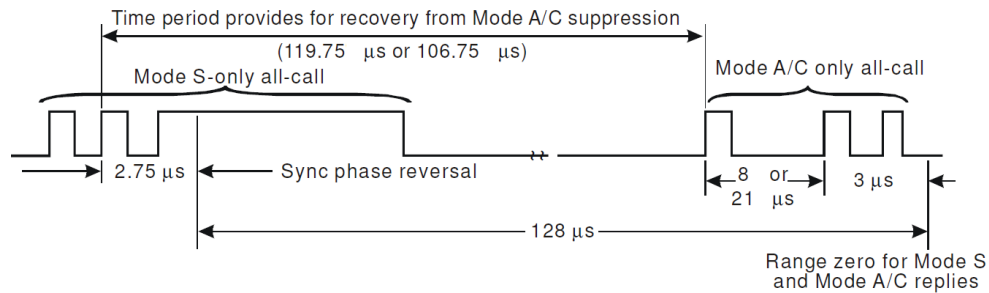
Pro radar budeme uvažovat následující předpoklady:

- **Všechny radary jsou typu mód S MSSR.**
Tento předpoklad lze považovat za oprávněný, vzhledem k souvisejícím předpokladům ve vybavení letadel odpovídající módu S a zavedením EHS v Evropě.
- **Neuvažujeme vojenské radary IFF.**
Ne všechny radary v Evropě jsou civilní. S tím souvisí problém, jak přistupovat k vojenským radarům. Bohužel není pro veřejnost možné zjistit specifikace vojenských systémů, které podléhají režimu utajení. Můžeme pouze předpokládat, že vojenských radarů IFF bude oproti civilním radarům značně menší počet a proto je lze při tvorbě modelu zanedbat.
- **Dotazy jsou pouze formátu UF 4, UF 5, UF 11, mód A/C-only All-Call.**
Ačkoli mód S MSSR radary umožňují zasílání dotazů i dlouhého formátu mód S UF 20, UF 21, nejsou tyto formáty využívány.
- **Pokud radar nedostane odpověď na dotaz, vyšle ho po náhodné době znovu.**
Pokud se radaru v provozu nepodaří získat odpověď na vyslaný dotaz, musí se dotázat znovu. Moderní radary mají jistě přesně stanovené algoritmy, jak probíhá řazení jednotlivých zpráv. Konkrétní sekvence řazení se liší podle výrobce a proto je nelze veřejně zjistit.
- **Radar získá všechny požadované odpovědi během jednoho přechodu hlavního laloku přes letadlo.**

Moderní radary si umí hlídat úspěšné obdržení odpovědi a případně se znovu adaptivně dotázat ještě ve stejné době ozáření letadla radarem. Zjištění podílu radarů, které tuto schopnost mají a které ne, je mimo rozsah této publikace.

- **Řazení dotazů v All-Call periodě odpovídá schématu na obrázku 17.**

Mohou být různé kombinace řazení dotazů v All-Call periodě. Zjišťování konkrétních řazení pro jednotlivé radary různých ANSP je mimo rozsah této publikace. Bude proto uvažována běžná sekvence uvedena v [14].



Obrázek 17: Řazení dotazů v All-Call periodě [14]

- **All-Call periody se opakují s konstantní frekvencí, kdy mezi dvěma All-Call periodami je jedna Roll-Call perioda.**

Tento předpoklad odpovídá typickému chování MSSR.

- **Pokud dojde ke kolizím odpovědí, musí radar vyslat dotaz znovu.**

Toto je poměrně zásadní předpoklad na straně radaru. Radar, jako nákladné zařízení, které má veliké infrastrukturní zázemí na rozdíl od XPDR, je určitě schopen část kolizních odpovědí dekodovat. Zjištění konkrétních algoritmů a jejich úspěšnost jednotlivých radarů je mimo rozsah této publikace. Tyto algoritmy navíc ve většině případů budou spadat pod výrobní tajemství a není to tedy veřejně dostupná informace. Při tvorbě modelu budeme uvažovat s možným budoucím zavedením úspěšnosti dekodování kolizních odpovědí.

5 První rovnice

Po seznámení s základními principy a předpoklady následujících úvah v předchozím textu můžeme přistoupit k samotné tvorbě matematického modelu.

5.1 Schéma a odvození

K tomu abychom mohli určit reinterrogation rate nějakého radaru potřebujeme dle rovnice 4.1 celkovou intenzitu (zde označíme λ) a počáteční intenzitu λ_0 . Počáteční intenzita je z matematického pohledu snadno zjistitelná. Jedná se o konstantu stanovující počet zpráv, který daný radar požaduje. Určení celkové intenzity je naopak značně problematické a bude to hlavní náplní všech následujících úvah.

V první úvaze si představme modelovou situaci, kdy chceme zjistit celkovou intenzitu jednoho radaru vysílajícího na jedno letadlo. Pro zjednodušení následujícího výkladu si tento radar označíme Γ a budeme předpokládat, že se dotazuje pouze jedním druhem dotazů, jehož zranitelná doba je 2τ . Dané letadlo, na které vysílá radar Γ , je zároveň dotazováno dalšími radary a letadly, jejichž počet označíme jako n a také předpokládáme, že vysílají pouze tentýž druh dotazů se stejnou zranitelnou dobou. Uvažujeme-li pouze s kolizemi dotazů, pak je pravděpodobnost kolize dotazu vyslaného radarem Γ popsána rovnicí 4.9. Intenzita λ je stanovena dle vzorce 4.7, kde λ_i představují intenzity n radarů a letadel vysílajících na námi sledované letadlo. Intenzitu radaru Γ nezapočítáváme, jelikož předpokládáme, že kolize s vlastními zprávami není možná.

Vraťme se nyní na moment k úvahám o kolizi radaru s sebou samým. V sekci 4.3 jsme popisovali, že při jakékoli intenzitě radaru je nenulová pravděpodobnost kolize vlastních zpráv a nelze tento nedostatek vyloučit. Pouze musíme předpokládat, že se tato chyba blíží 0. Výše však uvádíme, že pro zabránění kolize vlastních zpráv nezapočítáme vlastní intenzitu do celkové intenzity v pravděpodobnosti kolize a tudíž pravděpodobnost kolize radaru s sebou samým není možná.

Ve výsledku platí obě ustanovení. Pokud máme 2 radary vysílající zároveň na jedno letadlo a chceme určit pravděpodobnost kolize dotazu radaru Γ_1 s dotazy radaru Γ_2 , tak nás zajímá situace, kdy je ve zranitelné době jedna či více zpráv od radaru Γ_2 .

Pravděpodobnost kolize je poté

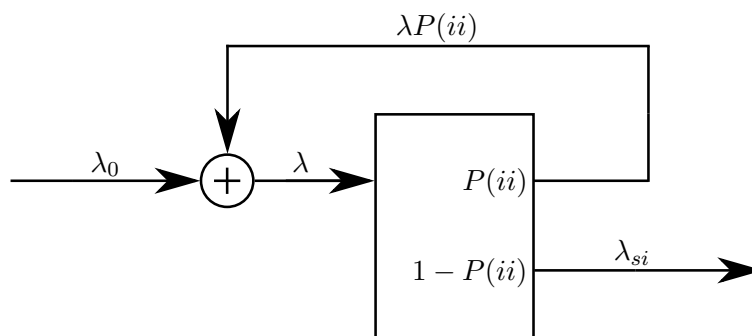
$$P(A(2\tau) > 1) = 1 - e^{-2\lambda_{\Gamma_2}\tau} \quad (5.1)$$

A jak bylo v sekci 4.3 rovnicí 4.24 dokázáno, stále je nenulová pravděpodobnost, že ve zranitelné době 2τ může být 2 a více zpráv, ačkoli se ve skutečnosti radar Γ_2 za tuto dobu dotáže maximálně jednou zprávou.

Ve shrnutí lze tedy říci, že radar, z jehož pohledu určujeme pravděpodobnost kolize nemůže způsobit kolizi vlastních zpráv. Ostatní radary ale tuto kolizi způsobit mohou. Uvažujeme však stále, že je výše této pravděpodobnosti přibližně rovna 0. Analogická úvaha platí i pro vysílání systémem TCAS.

Mějme schéma na obrázku 18, kde λ_0 značí požadovanou intenzitu stanovištěm, λ celkovou intenzitu a λ_{si}^2 intenzitu úspěšných zpráv. Pravděpodobnost kolize dotazů popsanou rovnicí 4.9

²si - succesful interrogation



Obrázek 18: Úvodní schéma

zde pro zjednodušení označíme jako $P(ii)$, kde ii představuje zkratku interrogation interference. Lze si všimnout, že v prvním kroku bude

$$\lambda = \lambda_0 \quad (5.2)$$

Z této intenzity se nám část požadovaných zpráv z důvodu kolize vrátí a budou zprávy vyslány znovu. Celková intenzita v následujícím kroku proto bude

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 P(ii) \quad (5.3)$$

Dále však můžeme pokračovat stejným způsobem

$$\lambda = \lambda_0 + (\lambda_0 + \lambda_0 P(ii))P(ii) \quad (5.4)$$

$$\lambda = \lambda_0 + (\lambda_0 + (\lambda_0 + \lambda_0 P(ii))P(ii))P(ii) \quad (5.5)$$

⋮

Pokud roznásobíme rovnici 5.5 dostaneme

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 P(ii) + \lambda_0 P^2(ii) + \lambda_0 P^3(ii), \quad (5.6)$$

což vede na nekonečnou řadu

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 P(ii) + \lambda_0 P^2(ii) + \dots + \lambda_0 P^k(ii) \quad k \in \mathbb{N} \quad (5.7)$$

Konkrétně se jedná o geometrickou řadu. Jelikož z definice pravděpodobnosti víme, že $P(ii) \leq 1$, tak tato řada konverguje a můžeme provést její součet podle vzorce

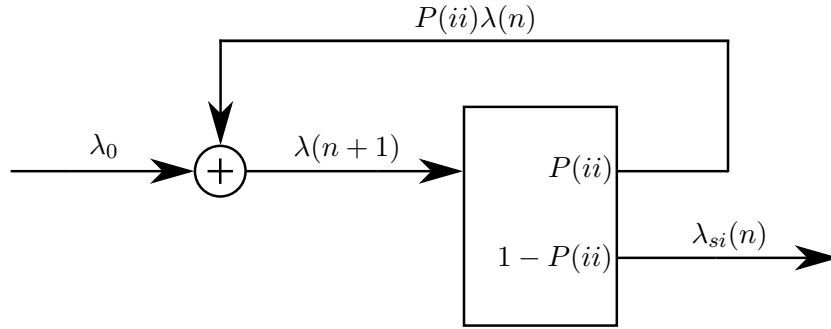
$$\sum_{k=0}^{\infty} \lambda_0 P^k(ii) = a_1 \frac{1}{1 - q}. \quad (5.8)$$

Pro naši situaci dostaneme

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{1 - P(ii)} \quad (5.9)$$

Vrátíme-li se však k nekonečné řadě 5.7 a ke schématu na obrázku 18, je vidět, že lze toto schéma také popsat diferenční rovnicí

$$\lambda(n+1) = \lambda_0 + P(ii)\lambda(n) \quad (5.10)$$



Obrázek 19: Schéma diferenční rovnice

Budeme-li považovat $P(ii)$ za konstantní, lze říci, že rovnice 5.10 je lineární diferenční rovnice 1. řádu s konstantními koeficienty a speciální pravou stranou. Řešení nalezneme následovně:

$$\lambda(n) = \lambda_H(n) + \lambda_N(n) \quad (5.11)$$

λ_H :

$$\lambda(n+1) - P(ii)\lambda(n) = 0 \quad (5.12)$$

$$\mathbb{P}(\Lambda) = \Lambda - P(ii) = 0 \quad (5.13)$$

$$\Lambda = P(ii) \quad (5.14)$$

$$\lambda_H = cP^n(ii) \quad c \in \mathbb{R} \quad (5.15)$$

λ_N :

$$\lambda_N(n) = A \quad (5.16)$$

$$\lambda_N(n+1) = A \quad (5.17)$$

$$A - P(ii)A = \lambda_0 \quad (5.18)$$

$$A(1 - P(ii)) = \lambda_0 \quad (5.19)$$

$$A = \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.20)$$

$$\lambda_N = \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.21)$$

Dle rovnice 5.11 dále dostaneme

$$\lambda(n) = cP^n(ii) + \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.22)$$

Počáteční podmínka dle schématu na obrázku 19 je $\lambda(0) = \lambda_0$ a tedy dostaneme

$$\lambda_0 = cP^0(ii) + \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.23)$$

$$c = \lambda_0 \left(1 - \frac{1}{1 - P(ii)}\right) \quad (5.24)$$

Řešením rovnice 5.10 je

$$\lambda(n) = \lambda_0 \left(1 - \frac{1}{1 - P(ii)}\right) P^n(ii) + \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.25)$$

Jelikož nás zajímá, na jaké hodnotě se $\lambda(n)$ ustálí, provedeme

$$\lambda(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_0 \left(1 - \frac{1}{1 - P(ii)}\right) P^n(ii) + \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} = \frac{\lambda_0}{1 - P(ii)} \quad (5.26)$$

Uvažujeme-li konstantní $P(ii)$, pak se řešení diferenční rovnice 5.10 rovná součtu nekonečné řady 5.9. Tato aproximace však není pro naše účely možná, jelikož by bylo značně změněno chování popisovaného problému. Pro popis je nutno sestavit rovnici nelineární. Důsledky případné aproximace a správnost sestavení diferenční rovnice si ověříme v následující sekci.

5.2 Ověření platnosti

Dosadíme-li do 5.10 pravděpodobnost kolize 4.9 ve správném tvaru, dostaneme nelineární diferenční rovnici popisující námi zkoumaný problém

$$\lambda(n+1) = \lambda_0 + (1 - e^{-2\lambda_p(n)\tau})\lambda(n), \quad (5.27)$$

kde součet intenzit k prvků přispívajících k pravděpodobnosti kolize je

$$\lambda_p(n) = \sum_{i=1}^k \lambda_i(n) \quad (5.28)$$

a

$$P(ii) = 1 - e^{-2\lambda_p(n)\tau} \quad (5.29)$$

je pravděpodobnost kolize dotazů.

Nalezení obecného řešení nelineární diferenční rovnice je obtížné a ve velké části případů i nemožné. Budeme proto v modelu hledat řešení iterační metodou.

Princip iterativního řešení spočívá ve zvolení hodnoty λ_0 a iterativním opakování tohoto výpočtu dokud nedojde k ustálení hodnoty $\lambda(n+1)$. Ustálená hodnota $\lambda(\infty)$ poté představuje řešení nelineární diferenční rovnice pro konkrétní počáteční hodnotu λ_0 .

Pro ověření, zda je využití diferenční rovnice v nelineárním tvaru správná úvaha, provedeme porovnání nelineární diferenční rovnice odpovídající Pure Aloha protokolu s již zjištěnými výsledky z rovnice 4.19.

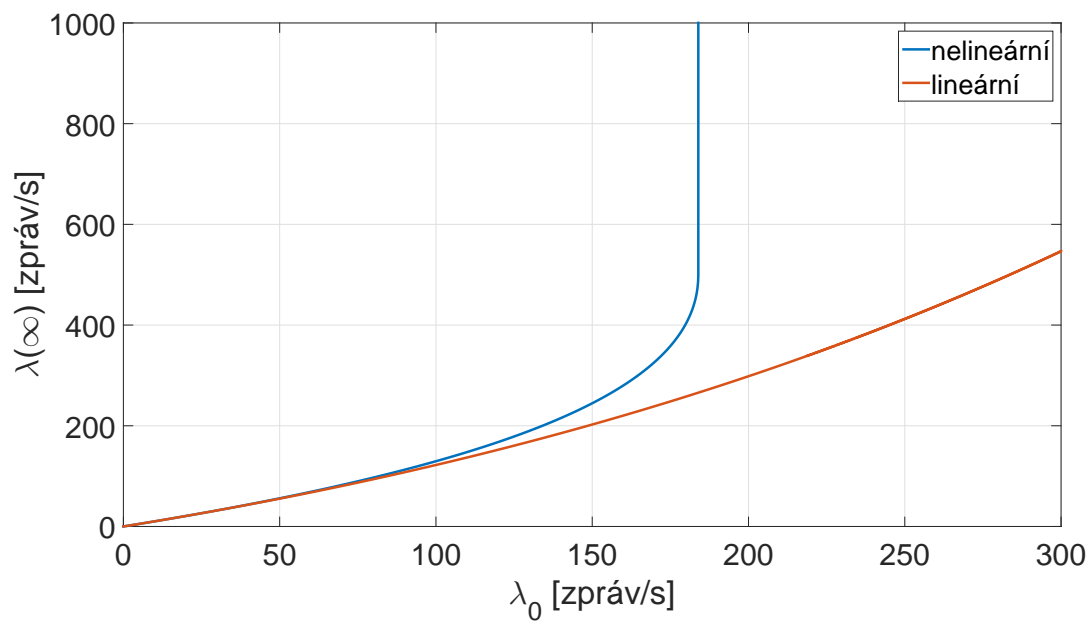
Uvažujme nelineární rovnici popisující Pure Aloha protokol

$$\lambda(n+1) = \lambda_0 + (1 - e^{-2\lambda(n)\tau})\lambda(n) \quad (5.30)$$

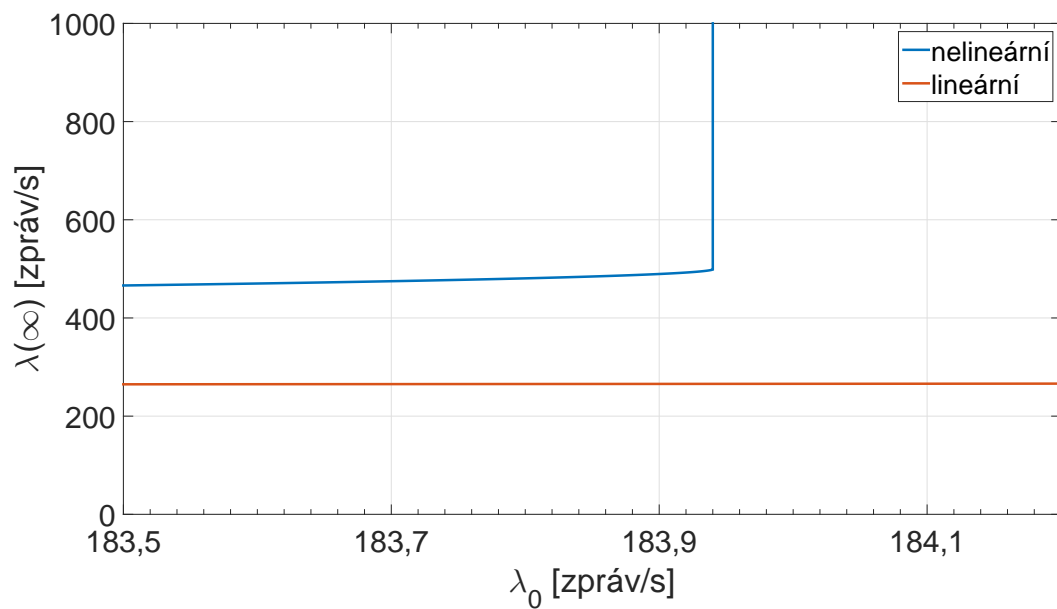
Na obrázku 20 je možné vidět průběh závislosti ustálené hodnoty $\lambda(\infty)$ na počáteční zvolené hodnotě λ_0 . Druhá křivka v grafu představuje tutěž závislost při použití lineární diferenční rovnice 5.26. Z přiblížení bodu ostrého zlomu křivky zobrazující nelineární závislost na obrázku 21 si lze všimnout, že zlom se nachází v bodě $\lambda_0 \approx 183,9$ zpráv/s.

Kapacita při zvolené hodnotě velikosti zprávy $\tau = 0.001$ s je

$$C = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0.001} = 1000 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.31)$$



Obrázek 20: Vliv nelinearity diferenční rovnice



Obrázek 21: Detail maxima propustnosti

Poté lze říci, že intenzita 183,9 zpráv/s odpovídá propustnosti

$$S \approx 0,1839 \quad (5.32)$$

Tato hodnota přesně odpovídá Pure Aloha protokolu, jak bylo stanoveno rovnicí 4.19, a zlom viditelný na grafu nám říká, že nad hodnotu 18,39% maximální teoretické kapacity pásma se celková intenzita již neustálí a není možno získat ze systému větší požadovanou λ_0 .

Z obou obrázků je viditelné, že metoda využívající lineární diferenční rovnici je stabilní po celém intervalu, neboť platí

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{1 - P(ii)} = \lambda_0 \frac{1}{1 - (1 - e^{-2\lambda_0\tau})}, \quad (5.33)$$

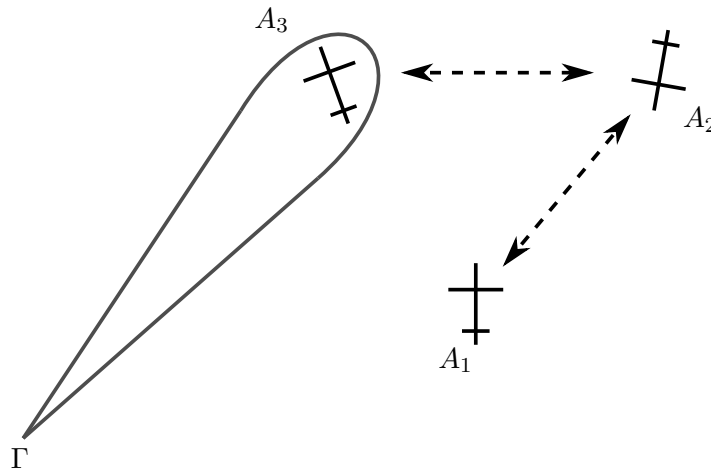
kde $\lambda \rightarrow \infty$ pouze pro $\lambda_0 \rightarrow \infty$. Toto nevyhovuje našemu požadavku na případné zkoumání šíření nestability způsobené přetížením frekvenčního pásma a bude proto v modelu použita nelineární rovnice. Navíc z grafu na obrázku 20 je vidět, že pro větší hodnoty λ_0 je velký rozdíl výsledných hodnot $\lambda(\infty)$ mezi lineární a nelineární diferenční rovnicí. To by následně do výsledných hodnot matematického modelu zavádělo značné chyby.

6 Soustava rovnic

Nyní se vrátíme k úvaze z úvodní části sekce 5.1 a provedeme její podrobnější rozebrání.

6.1 Vzájemná provázanost

Uvažovali jsme radar Γ vysílající dotazy na jedno určité letadlo, které je dotazováno dalšími n radary a letadly. Stále platí, že oblastí zájmu jsou momentálně pouze kolize dotazů, kdy všechny prvky systémů vysílají stejné formáty dotazů. Pro tuto situaci jsme si odvodili nelineární diferenciální rovnici 5.27. Jak bylo již řečeno, pravděpodobnost kolize dotazů $P(ii)$ závisí na všech ostatních intenzitách $\lambda(n)$ vysílajících na dané letadlo, kromě intenzity radaru Γ (rovnice 5.28). Dokud budeme znát veškeré intenzity okolních radarů a letadel, jsme schopni správně vypočítat pomocí nelineární diferenciální rovnice celkovou intenzitu $\lambda(\infty)$. Problém však nastává právě v určení okolních intenzit radarů a letadel.



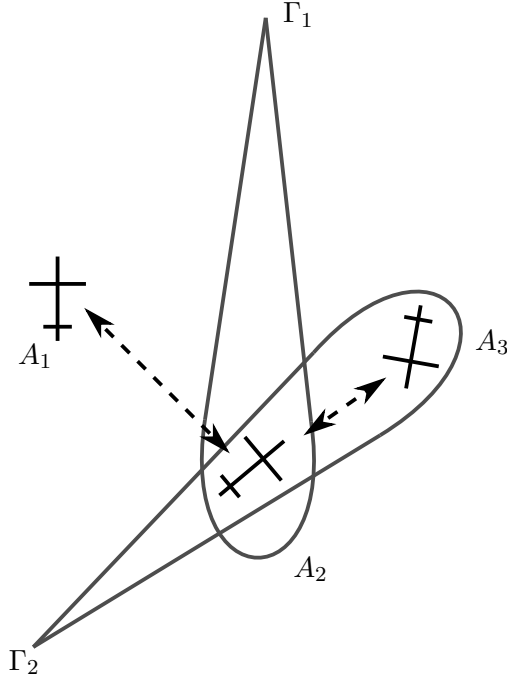
Obrázek 22: Konfigurace prostoru problému 1

Vezměme v úvahu hypotetickou konfiguraci prostoru problému na obrázku 22. Z rovnice 5.28 plyne: budeme-li chtít zjistit přesnou hodnotu celkové intenzity radaru Γ , je nutné spočítat dílčí intenzitu letadla A_2 v kroku n . Celková intenzita tohoto letadla však závisí na počtu dotazů vyslaných letadlům A_1 , A_3 . Pokud se zamyslíme nad tím, jak vzniká kolize dotazů na letadla a tedy nenulová pravděpodobnost kolize dotazů $P(ii)$, zjistíme, že intenzita letadla A_2 závisí také na intenzitě radaru Γ . Letadlo A_2 vysílá na letadlo A_3 , na které vysílá také radar Γ . To způsobí nenulovou pravděpodobnost kolize dotazů pro radar, což způsobí navýšení jeho intenzity. Radar Γ zároveň způsobí nenulovou pravděpodobnost kolize dotazů pro letadlo A_2 a je tedy nutné navýšit i jeho intenzitu. Intenzita dotazů letadla A_2 na letadlo A_1 je v tomto případě konstantní. Pokud by ale byl přítomen nějaký další zdroj vysílající dotazy na letadlo A_1 , tak už konstantní nebude a bude nutné určit i intenzitu tohoto zdroje. Pokud by onen další zdroj byl dotazován dalším zdrojem, bude třeba zjistit intenzitu i zdroje následujícího. Tato vlastnost u prostoru s větší hustotou provozu zajistí jakousi kontinuální provázanost mezi letadly a radary.

Možné řešení této provázanosti leží v soustavě nelineárních diferenciálních rovnic.

6.2 Konkrétní případ

Pro další rozbor vezměme v úvahu prostor o konfiguraci viditelné na obrázku 23.



Obrázek 23: Konfigurace prostoru problému 2

Budeme-li chtít sestavit rovnici pro radar Γ_1 , dostaneme nelineární diferenční rovnici ve tvaru

$$\lambda_{\Gamma_1}(n+1) = \lambda_{0_{\Gamma_1}} + (1 - e^{-2\lambda_{\Gamma_1-A_2}(n)\tau})\lambda_{\Gamma_1}(n), \quad (6.1)$$

kde

$$\lambda_{\Gamma_1-A_2}(n) = \lambda_{A_1}(n) + \lambda_{A_3}(n) + \lambda_{\Gamma_2}(n) \quad (6.2)$$

Předpokládáme, že hodnota λ_0 je pro každé letadlo a radar známá. Značení λ_{Γ_1} znamená, že se jedná o celkovou intenzitu vysílání dotazů radarem Γ_1 . Pokud by radar vysílal na více letadel, obsahovala by tato intenzita součet všech intenzit na jednotlivá letadla. Intenzita vysílaná na konkrétní letadlo bude v následujících úvahách značena $\lambda_{\Gamma_1-A_2}$, kdy se jedná o intenzitu dotazů od radaru Γ_1 pouze na letadlo A_2 . V tomto konkrétním případě je tato intenzita totožná s λ_{Γ_1} . Značení $\lambda_{\Gamma_1-A_2}$ značí celkovou intenzitu, která přispívá k pravděpodobnosti kolize dotazů na přijímači letadla A_2 při vysílání dotazů radarem Γ_1 . Pro letadlo bude značení analogické.

Rovnice 6.2 představuje závislost pravděpodobnosti kolize dotazů na všech intenzitách dotazů přicházejících v předchozím kroku na dané letadlo zájmu A_2 , kromě intenzity vlastní. Abychom byli schopni určit celkovou intenzitu radaru Γ_1 , musíme také vytvořit analogické rovnice jak pro

radar Γ_2 , tak pro letadla A_1 a A_3 .

$$\lambda_{A_1}(n+1) = \lambda_{0_{A_1}} + (1 - e^{-2\lambda_{\alpha_1 - A_2}(n)\tau})\lambda_{A_1}(n) \quad (6.3)$$

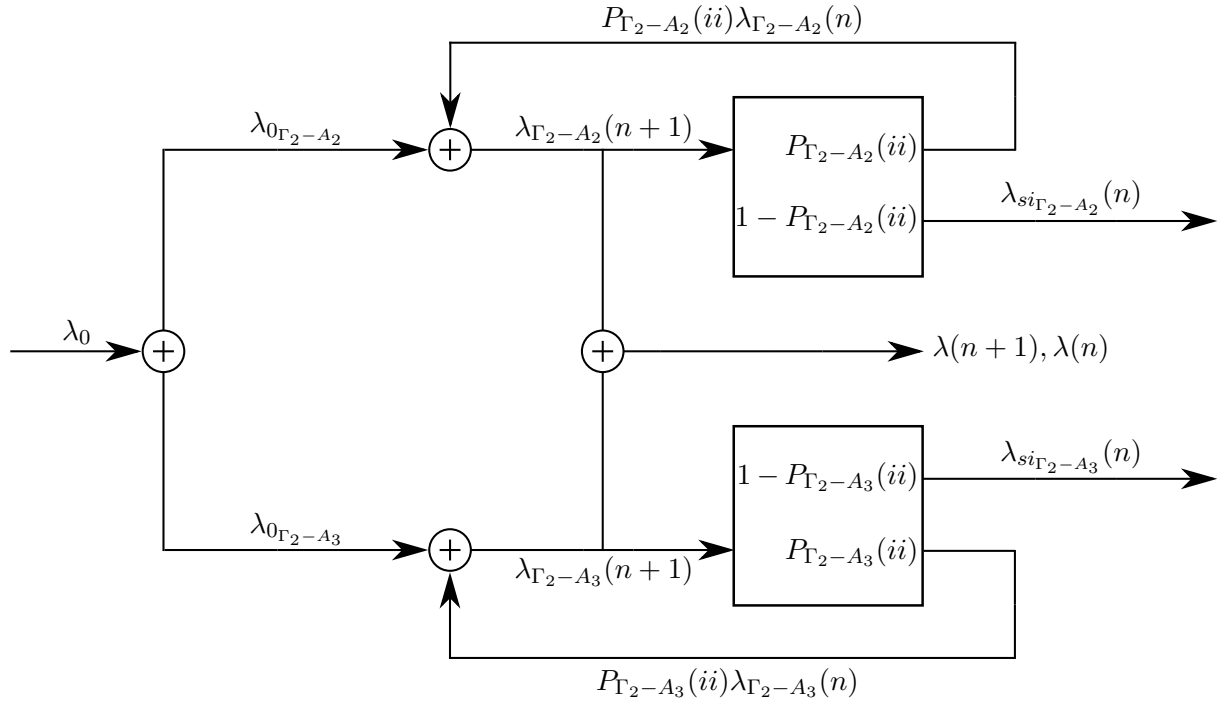
$$\lambda_{\alpha_1 - A_2}(n) = \lambda_{A_3}(n) + \lambda_{\Gamma_1}(n) + \lambda_{\Gamma_2}(n) \quad (6.4)$$

$$\lambda_{A_3}(n+1) = \lambda_{0_{A_3}} + (1 - e^{-2\lambda_{\alpha_3 - A_2}(n)\tau})\lambda_{A_3}(n) \quad (6.5)$$

$$\lambda_{\alpha_3 - A_2}(n) = \lambda_{A_1}(n) + \lambda_{\Gamma_1}(n) + \lambda_{\Gamma_2}(n) \quad (6.6)$$

Pokud bychom dosadili rovnici 6.2 do rovnice 6.1 a provedli stejně i pro následující rovnice, dospěli bychom k 3 diferenčním rovnicím s 4 neznámými. Poslední rovnice, kterou potřebujeme sestavit patří radaru Γ_2 . Můžeme si všimnout, že předchozí diferenční rovnice 6.1, 6.3, 6.5 si jsou velmi podobné a dají se charakterizovat schématy, jako je schéma na obrázku 19 s příslušným indexováním. Jejich podobnost je způsobena komunikací pouze s jedním dalším prvkem prostoru. Touto vlastností se však odlišují od radaru Γ_2 .

Radar Γ_2 komunikuje s letadly A_2 , A_3 . Jeho celková intenzita závisí přes pravděpodobnost kolize dotazů na intenzitách přijímaných těmito letadly. Jelikož nám celkovou intenzitu dotazů na jedno letadlo popisuje jedna nelineární diferenční rovnice, je nutné si vytvořit rovnice pro obě letadla zvlášť.



Obrázek 24: Schéma radaru Γ_2

Na obrázku 24 můžeme vidět schéma radaru Γ_2 , které zohledňuje toto rozdělení. Tomuto schématu odpovídají následující rovnice.

$$\lambda_{\Gamma_2 - A_2}(n+1) = \lambda_{0_{\Gamma_2 - A_2}} + (1 - e^{-2\lambda_{\gamma_2 - A_2}(n)\tau})\lambda_{\Gamma_2 - A_2}(n), \quad (6.7)$$

kde

$$\lambda_{\gamma_2-A_2}(n) = \lambda_{A_1}(n) + \lambda_{A_3}(n) + \lambda_{\Gamma_1}(n) \quad (6.8)$$

Analogicky

$$\lambda_{\Gamma_2-A_3}(n+1) = \lambda_{0_{\Gamma_2-A_3}} + (1 - e^{-2\lambda_{\gamma_2-A_3}(n)\tau})\lambda_{\Gamma_2-A_3}(n) \quad (6.9)$$

$$\lambda_{\gamma_2-A_3}(n) = \lambda_{A_2}(n) \quad (6.10)$$

Navíc pro rovnice 6.7, 6.9 platí

$$\lambda_{\Gamma_2}(n+1) = \lambda_{\Gamma_2-A_2}(n+1) + \lambda_{\Gamma_2-A_3}(n+1) \quad (6.11)$$

$$\lambda_{\Gamma_2}(n) = \lambda_{\Gamma_2-A_2}(n) + \lambda_{\Gamma_2-A_3}(n) \quad (6.12)$$

$$\lambda_{0_{\Gamma_2}} = \lambda_{0_{\Gamma_2-A_2}} + \lambda_{0_{\Gamma_2-A_3}} \quad (6.13)$$

S použitím rovnic 6.11 a 6.13 lze provést úpravu, kde dostaneme

$$\lambda_{\Gamma_2}(n+1) = \lambda_{0_{\Gamma_2}} + (1 - e^{-2\lambda_{\gamma_2-A_2}(n)\tau})\lambda_{\Gamma_2-A_2}(n) + (1 - e^{-2\lambda_{\gamma_2-A_3}(n)\tau})\lambda_{\Gamma_2-A_3}(n) \quad (6.14)$$

Bohužel rovnice 6.14 neposkytuje žádné zjednodušení. V této rovnici se stále vyskytují intenzity $\lambda_{\Gamma_2-A_2}(n)$ a $\lambda_{\Gamma_2-A_3}(n)$. Pro jejich výpočet budeme tedy nadále potřebovat původní rovnice 6.7 a 6.9. Ponecháním rovnic v původním stavu nám navíc bude umožněno zkoumat průběhy celkových intenzit a tedy i reinterrogation rate pro konkrétní vysílač-přijímač páry.

Podařilo se nám vyjádřit celkovou intenzitu radaru Γ_2 . Je nutné si všimnout, že v rovnici 6.10 se vyskytuje $\lambda_{A_2}(n)$, tedy celková intenzita dotazů letadla A_2 . Toto je poslední neznámá, kterou potřebujeme vyjádřit, abychom byli schopni úspěšně zjistit celkovou intenzitu radaru Γ_1 .

Letadlo A_2 je v podobné situaci jako radar Γ_2 . Jeho celková intenzita je závislá na dvou letadlech A_1 , A_3 . Jak schéma pro toto letadlo, tak i tvorba rovnic proběhne analogicky jako tomu bylo u radaru Γ_2 . Dostaneme tedy

$$\lambda_{A_2-A_1}(n+1) = \lambda_{0_{A_2-A_1}} + (1 - e^{-2\lambda_{\alpha_2-A_1}(n)\tau})\lambda_{A_2-A_1}(n) \quad (6.15)$$

$$\lambda_{\alpha_2-A_1}(n) = 0 \quad (6.16)$$

$$\lambda_{A_2-A_3}(n+1) = \lambda_{0_{A_2-A_3}} + (1 - e^{-2\lambda_{\alpha_2-A_3}(n)\tau})\lambda_{A_2-A_3}(n) \quad (6.17)$$

$$\lambda_{\alpha_2-A_3}(n) = \lambda_{\Gamma_2}(n) \quad (6.18)$$

$$\lambda_{A_2}(n+1) = \lambda_{A_2-A_1}(n+1) + \lambda_{A_2-A_3}(n+1) \quad (6.19)$$

$$\lambda_{A_2}(n) = \lambda_{A_2-A_1}(n) + \lambda_{A_2-A_3}(n) \quad (6.20)$$

$$\lambda_{0_{A_2}} = \lambda_{0_{A_2-A_1}} + \lambda_{0_{A_2-A_3}} \quad (6.21)$$

Nyní si lze všimnout důležitého poznatku. Vzájemná provázanost způsobila nutnost popsat celý prostor problému, i když naším cílem bylo pouze vyjádřit celkovou intenzitu jednoho prvku prostoru. Vhodné je také dodat, že pravděpodobnost kolize závisí na adresných i neadresných zprávách, a proto se například v rovnici 6.6 vyskytuje celá $\lambda_{\Gamma_2}(n)$, nikoli pouze $\lambda_{\Gamma_2-A_1}(n)$.

7 Pravděpodobnost kolize dotazů

Pravděpodobnost kolize dotazů $P(ii)$ nám popisuje rovnice 5.29. Tato rovnice, jak již bylo v předchozím textu uvedeno, nám říká, že ke kolizi dojde, pokud ve zranitelné době o délce 2τ , kde τ představuje délku dotazu, je dotaz od cizího zdroje. Jinými slovy umíme vypočítat pravděpodobnost kolize, pouze pokud na odpovídač přicházejí dotazy o délce τ a odpovídač na ně neodpovídá. Tyto dvě vlastnosti jsou pro nás značně nedostačující, vzhledem k tomu, že druhá z nich přímo zakazuje odpovídači vykonávat funkci, po které je pojmenován. V této sekci se proto podíváme na podrobné specifikování $P(ii)$ z hlediska funkce jednotlivých systému letadla a předpokladů zmíněných v sekci 4.

Základní myšlenkou následujících úvah je možnost rozdělení $P(ii)$ na 3 základní části a jejich následné sjednocení. Jedná se o

- Pravděpodobnost čtení dotazu letadlem $P(cte)$
- Pravděpodobnost vysílání odpovědi (nebo jiné zprávy) letadlem $P(odp)$
- Pravděpodobnost zasažení letadla All-Call periodou $P(ac)$

7.1 Sjednocení pravděpodobností

Než se pustíme do samotného definování dílčích částí $P(ii)$ je vhodné poukázat na způsob, jakým bude provedeno zpětné sjednocení těchto pravděpodobností.

Z definice pravděpodobnosti víme, že pro dva vzájemně se vylučující jevy A a B platí

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (7.1)$$

Nyní je však nutné zamyslet se nad jevy v našem okruhu zájmů. Námi uvažovaný odpovídač může být v jeden okamžik zatížen čtením, odpovídáním, nebo All-Call periodou. Může ale také nastat situace, kdy bude odpovídač zatížen čtením a do toho začne přijímat dotaz All-Call periody. Taktéž se může stát situace, kdy bude odpovídat a zároveň se ho bude chtít jiné letadlo na něco dotázat. Je nadbytečné zde všechny kombinace vypisovat. Lze si však z této krátké úvahy všimnout, že naše jevy cte , odp a ac se vzájemně nevylučují a jejich průnik není rovný \emptyset .

Pro dva vzájemně se nevylučující jevy A a B platí

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (7.2)$$

Pro 3 vzájemně se nevylučující jevy A , B , C platí

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(A \cap C) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \quad (7.3)$$

Pro naši situaci by rovnice 7.3 mohla být dostačující. Porovnáme-li tuto rovnici s rovnicí 7.2 zjistíme, že dochází ke značně se rozrůstajícímu rozvoji. Pokud bychom měli zájem rozšířit pravděpodobnost kolize o další částí, tak by nám tento rozvoj způsobil značné komplikace při výpočtech. Vhodné proto bude přistoupit k výpočtu sjednocení pravděpodobností $P(cte)$, $P(odp)$ a $P(ac)$ jinou cestou.[30]

7.1.1 De Morganův zákon

Nechť jevy E a F jsou dva vzájemně se nevyklučující jevy. První De Morganův zákon říká

$$(E \cup F)^c = E^c \cap F^c, \quad (7.4)$$

kde c značí doplněk množiny.

Dále platí axiom, který říká: pokud E_k , kde $k = 1, 2, \dots, \infty$, je posloupnost jevů, pak

$$\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k \quad (7.5)$$

je také jev.

Z De Morganova zákona taktéž plyne, že

$$\bigcap_{k=1}^{\infty} E_k \quad (7.6)$$

je také jev.

Aplikací tohoto zákona a následujících tvrzení na pravděpodobnost dostaneme

$$P\left(\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right)^c\right) = P\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} E_k^c\right) \quad (7.7)$$

$$P\left(\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right)^c\right)^c = P\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} E_k^c\right)^c \quad (7.8)$$

$$1 - P\left(\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right)^c\right) = 1 - P\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} E_k^c\right) \quad (7.9)$$

$$P\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right) = 1 - P\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} E_k^c\right) \quad (7.10)$$

Dále víme, že námi uvažované jevy čtení, odpovídání a All-Call periody jsou vzájemně nezávislé. Proto platí pro pravděpodobnost průniku těchto jevů následující rovnice.

$$P(cte \cap odp \cap ac) = P(cte) \cdot P(odp) \cdot P(ac) \quad (7.11)$$

Uvažujeme-li tedy, že jevy posloupnosti E_k , kde $k = 1, 2, \dots, \infty$, jsou i vzájemně nezávislé, lze rovnici 7.10 upravit do následujícího tvaru

$$P\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right) = 1 - \prod_{k=1}^{\infty} P(E_k^c) = 1 - \prod_{k=1}^{\infty} (1 - P(E_k)) \quad (7.12)$$

Pro pravděpodobnost sjednocení n jevů můžeme výslednou rovnici zapsat jako

$$P\left(\bigcup_{k=1}^n E_k\right) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P(E_k)), \quad (7.13)$$

kde $k = 1, 2, \dots, n$.

Tato rovnice nám oproti komplikovanému rozvoji z rovnice 7.3 umožní spočítat pravděpodobnost sjednocení n vzájemně nezávislých a vzájemně se nevyklučujících jevů pomocí $n - 1$ násobení a $n + 1$ odečítání. Získali jsme tak efektivní výpočet pro sjednocení pravděpodobností.

7.2 Pravděpodobnost čtení

Pravděpodobností čtení $P(cte)$ se rozumí situace, kdy odpovídač přijímá dotaz o nějaké délce a je tedy zatížen. V tomto momentu může do vysílání začít přicházet i další dotaz, což způsobí interferenci, která má za následek nepřijmutí ani jednoho z těchto dvou nebo i více dotazů.

Jelikož uvažujeme s dotazy od radarů a systému TCAS, rozdělíme si tuto pravděpodobnost pro lepší orientaci na 3 části.

7.2.1 Dotazování od radaru a TCAS

Příjem dotazů od radaru nebo systému TCAS nám popisuje rovnice 5.27. V této rovnici je zranitelná doba vyjádřena jako dvojnásobek délky čtení dotazu. Tento předpoklad pro nás není dostačující. Jak víme z sekce 2.3.2, pokud odpovídač zpracovává dotaz, rozlišuje sekvenci na dva druhy: adresné dotazy a neadresné dotazy. U adresných dotazů následuje za dobou příjmu zprávy T_{rec} sekvence, kterou bychom mohli plně zohlednit v pravděpodobnosti odpovědi (obrázek 8). Poté by bylo možné uvažovat se zranitelnou dobou o dvojnásobku délky T_{rec} .

Problém v tomto přístupu nastává u zohlednění neadresných zpráv, které po T_{rec} jsou ještě zatíženy po dobu Recovery. Nejvhodnější způsobem, jak tuto dobu zohlednit, je zahrnout ji již do pravděpodobnosti čtení a o přesah $T_{ocnad} - T_{rec}$ ³ zkrátit následně zranitelnou dobu v pravděpodobnosti čtení odpovědi $P(odp)$.

Z tohoto důvodu bude zde τ určovat celkovou zranitelnou dobu složenou z doby přijímání dotazu T_{rec} , rozšířenou o dobu potlačení neadresného dotazu krátkého formátu mód S.

Momentálně se v reálném prostoru jako dotazy používají pouze krátké formáty UF 0, UF 4, UF 5 nebo UF 11, které mají mezi sebou shodnou dobu příjmu i dobu potlačení neadresných zpráv. Není proto nutno mezi jednotlivými druhy dotazů rozlišovat. Pravděpodobnost čtení vyjádříme jako

$$P(cte_{r+t}) = 1 - e^{-\lambda_p(n)\tau}, \quad (7.14)$$

kde $\lambda_p(n)$ odpovídá 5.28 a platí veškeré úvahy v sekci 6.

7.2.2 Monitorovací zprávy TCAS

V pravděpodobnosti $P(cte)$ musíme zohlednit i situaci, kdy letadlo může číst zprávu UF 16 pravidelně vysílanou letadly v okolí vybavených systémem TCAS II.

Jelikož každé letadlo má pevně stanovenou frekvenci vysílání monitorovacích zpráv UF 16, použijeme pro výpočet pravděpodobnosti, že je letadlo zatíženo čtením této zprávy, rovnoměrné rozdělení.

Nechť má jedno letadlo A_i konstantní frekvenci vysílání monitorovacích zpráv UF 16.

$$\lambda_{UF16A_i} \quad (7.15)$$

poté pravděpodobnost, že v intervalu $\langle 0, \tau \rangle$ bude námi dotazované letadlo číst zprávu UF 16 je

$$P(x \in \langle 0, \tau \rangle) = \int_0^\tau f(x) dx \quad (7.16)$$

³nad - neadresný dotaz

τ představuje zranitelnou dobu o délce čtení zprávy formátu UF 4, rozšířenou o délku čtení zprávy formátu UF 16 a Dead Time po zpracování adresné zprávy UF 16. Tento Dead Time je zde zaveden z důvodu, že se jedná o dotazy, které systémy TCAS pouze poslouchají. Není proto odpovídá zatížen intervaly T_{proc} a T_{rep} .

Funkce $f(x)$ představuje hustotu pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta-\alpha} & \alpha < x < \beta \\ 0 & \text{jinak,} \end{cases} \quad (7.17)$$

kde

$$\beta = T_{UF16_{A_i}} = \frac{1}{\lambda_{UF16_{A_i}}} \quad (7.18)$$

$$\alpha = 0 \quad (7.19)$$

Dosazením hodnot 7.18,7.19 do rovnice 7.17 a následným dosazením této rovnice do 7.16 dostaneme

$$P_{A_i}(UF16) = P(x \in \langle 0, \tau \rangle) = \int_0^\tau \lambda_{UF16_{A_i}} dx \quad (7.20)$$

$$P_{A_i}(UF16) = [\lambda_{UF16_{A_i}} x]_0^\tau \quad (7.21)$$

$$P_{A_i}(UF16) = \lambda_{UF16_{A_i}} \tau \quad (7.22)$$

Jelikož $UF16_{A_i}$ dílčích letadel nejsou vzájemně se vylučující jevy, tj. průnik pravděpodobností $P_{A_i}(UF16)$ více letadel $\neq \emptyset$, musíme pro všechny letadla, jejichž intenzity ovlivňují celkovou pravděpodobnost $P(UF16)$, provést sjednocení formou 7.13. Poté

$$P(UF16) = \bigcup_{i=1}^n P_{A_i}(UF16) \quad (7.23)$$

Sjednocení bude provedeno přes všechny letadla, u kterých je dané letadlo našeho zájmu v okamžiku výpočtu v pokrytí, kromě letadla, z jehož pohledu se snažíme spočítat celkovou intenzitu.

7.2.3 Whisper Shout metoda

Další pravděpodobností, kterou musíme do pravděpodobnosti čtení zohlednit, je $P(ws)$. Tato pravděpodobnost představuje situaci, že v letadle, na které vysíláme, dochází ke čtení dotazu vyslaného metodou Whisper Shout.

Pro metodu Whisper Shout jsme zvolili v sekci 4.4.3 průměrný počet 14 dotazů s proměnnou intenzitou signálu. V závislosti na vzdálenosti námi dotazovaného letadla od letadla, které vysílá Whisper Shout, je určen počet dotazů, které naše letadlo zatíží. Můžeme si představit, že kvadrant, ve kterém se nachází naše letadlo, je rozdělen radiálně na 14 mezikruží. Pro identifikaci ve kterém mezikruží se letadlo, kterého se dotazujeme, nachází, definujeme následující parametr.

$$\eta_{A_i} \in \langle 1, 14 \rangle \quad (7.24)$$

Nyní jsme schopni určit, s jakou pravděpodobností padne naše vysílání do intervalu, kdy je letadlo, na které vysíláme, zatížené dotazy Mode C-only All-Call. Pro tuto pravděpodobnost platí následující vztah.

$$P(x \in \langle \eta_{A_i} - 1, 14 \rangle) = \int_{(\eta_{A_i} - 1)t}^{14t + \tau_{cos}} f(x) dx \quad (7.25)$$

14 představuje délku celého intervalu, kdy je vysláno 14 dotazů proměnné intenzity a t představuje součet časů o délce 1 ms, což je nutná mezera mezi jednotlivými dotazy. Doplňující τ_{cos} ⁴, které k horní mezi integrace připočítáváme, představuje dotaz maximální intenzity, který je vysílán na počátku intervalu Whisper Shout metody. Jedná se délku potlačení dotazu Mode C-only All-Call. Jelikož tento dotaz zatíží každé letadlo v dosahu, je vhodné jej pro výpočet přesunout na konec intervalu, kde způsob výpočtu zajistí, že bude zohledněn jako kdyby byl vyslán na začátku. Výraz $(\eta - 1)t$ představuje počáteční čas z celkového intervalu, od kdy začne být intenzita dotazů dostatečná na to, aby letadlo dotazy zaznamenalo. Od té doby je nuceno dotazy potlačovat. $f(x)$ představuje hustotu pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení podle rovnice 7.17, kde

$$\beta = \frac{1}{\lambda_{ws_{A_i}}} = 1 \quad (7.26)$$

$$\alpha = 0 \quad (7.27)$$

Dosadíme-li do rovnice 7.25 dostaneme

$$P(x \in \langle \eta_{A_i} - 1, 14 \rangle) = 14t + \tau_{cos} - (\eta_{A_i} - 1)t \quad (7.28)$$

Nyní potřebujeme určit, s jakou pravděpodobností dojde ke kolizi dotazu ve zranitelné době o délce τ , která představuje délku čtení dotazu formátu UF 4, rozšířenou o délku potlačení dotazu formátu Mode C-only All-Call τ_{cos} .

Pro výpočet této pravděpodobnosti použijeme vzorec analogický vzorci 7.22, kdy

$$P(wsi) = \lambda_{wsi}\tau, \quad (7.29)$$

kde

$$\lambda_{wsi} = \frac{15}{14t + \tau_{cos}} \quad (7.30)$$

λ_{wsi} ⁵ představuje frekvenci dotazů vysílaných během intervalu vysílání dotazů metodou Whisper Shout.

Jelikož z principu funkce metody Whisper Shout víme, že musí platit

$$P_{A_i}(ws) = P(x \in \langle \eta_{A_i} - 1, 14 \rangle) \wedge P(wsi) \quad (7.31)$$

Platí proto

$$P_{A_i}(ws) = P(x \in \langle \eta_{A_i} - 1, 14 \rangle) \cap P(wsi) = P(x \in \langle \eta_{A_i} - 1, 14 \rangle)P(wsi) \quad (7.32)$$

Tato rovnice představuje pravděpodobnost kolize dotazu s dotazem vyslaným Whisper Shout metodou od i-tého letadla přispívajícího k pravděpodobnosti kolize. Celkovou pravděpodobnost

⁴cos - mode C-only All-Call, suppressed

⁵wsi - whisper shout interval

kolize dotazu s metodou Whisper Shout dostaneme sjednocením jednotlivých $P_{A_i}(ws)$ s využitím rovnice 7.13.

$$P(ws) = \bigcup_{i=1}^n P_{A_i}(ws) \quad (7.33)$$

Je nutné podotknout, že vyzařování pomocí směrových antén nemá na tuto pravděpodobnostní metodu výpočtu vliv, protože průměrně každé letadlo v dosahu jiného letadla, které vysílá Whisper Shout, bude zasaženo právě jedním intervalem Whisper Shout metody. Směrovými anténami bude ovlivněna pouze pravděpodobnost odpovědi $P(odp)$.

7.2.4 Celková pravděpodobnost čtení

Nyní můžeme provést finální sjednocení všech částí $P(cte)$.

$$P(cte) = P(cte_{r+t}) \cup P(UF16) \cup P(ws) \quad (7.34)$$

Pro sjednocení může být využita rovnice 7.13.

7.3 Pravděpodobnost odpovědi

Jak jsme si uvedli v sekci 2.3, odpovídač je po přečtení dotazu na nějakou dobu zaneprázdněn. Schéma sekvence zpracování dotazu módu S je možné vidět na obrázku 8.

Nás nyní zajímá, s jakou pravděpodobností vyšle radar dotaz do doby, kdy je odpovídač zaneprázdněn zpracováváním dotazu. Toto rozmezí představuje interval o délce $T_{oc} - T_{rec}$. Jak je uvedeno na obrázku 13, kolize nastane i pokud se námi vyslaný dotaz překryje pouze z části a tedy musíme T_{rec} znovu k námi určenému intervalu přičíst. Dostaneme zranitelnou dobu o délce T_{oc} . Jak jsme ale uvedli na začátku sekce 7.2.1 je nutné zkrátit tento interval o Recovery zahrnutý již v pravděpodobnosti čtení. Výsledná zranitelná doba tedy bude

$$\tau = T_{oc} - (T_{oc_{nad}} - T_{rec}) \quad (7.35)$$

Nyní bychom mohli zapsat pravděpodobnost odpovědi ve tvaru

$$P(odp) = 1 - e^{-\lambda_{si}(n)\tau} \quad (7.36)$$

Zde by intenzita λ_{si} měla být součet všech adresných intenzit přicházejících na dané letadlo. Zatížení odpovídače zpracováváním odpovědi však nastane pouze, pokud letadlo přijalo dotaz úspěšně. Bude tedy nutné vyjádřit pro každý vysílač, vysílající na odpovídač našeho zájmu, intenzitu úspěšných dotazů pro náš konkrétní odpovídač.

Nechť $P(ii)$ je pravděpodobnost kolize dotazů. Pravděpodobnost úspěchu dotazu je rovna

$$P(si) = 1 - P(ii) \quad (7.37)$$

Poté intenzita úspěšných dotazů nějakého radaru či letadla bude

$$\lambda_{si}(n) = P(si)\lambda(n). \quad (7.38)$$

Vezměme znovu v úvahu prostor na obrázku 23. Nyní se budeme snažit určit pravděpodobnost odpovědi $P(odp)$ na letadle A_2 , která nám bude způsobovat nárůst celkové intenzity na radaru Γ_1 .

Jelikož letadlo A_2 přijímá intenzity od letadla A_1 , A_3 a radaru Γ_2 , bude hodnota intenzity $\lambda_{si}(n)$ rovna součtu úspěšných intenzit těchto dvou letadel a jednoho radaru. Hodnoty jednotlivých úspěšných intenzit jsou dle rovnice 7.38 a 7.37 rovny

$$\lambda_{si_{A_1}}(n) = (1 - P_{A_1}(ii))\lambda_{A_1}(n) \quad (7.39)$$

$$\lambda_{si_{A_3}}(n) = (1 - P_{A_3}(ii))\lambda_{A_3}(n) \quad (7.40)$$

$$\lambda_{si_{\Gamma_2-A_2}}(n) = (1 - P_{\Gamma_2-A_2}(ii))\lambda_{\Gamma_2-A_2}(n) \quad (7.41)$$

Dále platí

$$\lambda_{si}(n) = \lambda_{si_{A_1}}(n) + \lambda_{si_{A_3}}(n) + \lambda_{si_{\Gamma_2-A_2}}(n) \quad (7.42)$$

Pravděpodobnost odpovědi pro radar Γ_1 lze následně zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} P_{\Gamma_1}(odp) &= 1 - e^{-[\lambda_{si_{A_1}}(n) + \lambda_{si_{A_3}}(n) + \lambda_{si_{\Gamma_2-A_2}}(n)]\tau} \\ &= 1 - e^{-[(1-P_{A_1}(ii))\lambda_{A_1}(n) + (1-P_{A_3}(ii))\lambda_{A_3}(n) + (1-P_{\Gamma_2-A_2}(ii))\lambda_{\Gamma_2-A_2}(n)]\tau} \end{aligned} \quad (7.43)$$

Rovnice v tomto tvaru by mohla na první pohled fungovat. Nachází se zde ale další problém. V exponentu exponenciální funkce se nám vyskytuje pravděpodobnost kolize dotazu.

V úvodu této sekce 7 jsme si uvedli, že nyní rozdělujeme pravděpodobnost kolize dotazu $P(ii)$ na dílčí pravděpodobnosti a tedy pravděpodobnost odpovědi $P(odp)$ je její částí. Mohli bychom uvažovat, že pravděpodobnosti kolize dotazu vyskytující se v rovnici 7.43 jsou vždy pravděpodobnostmi jiných prvků prostoru a tedy by tato rovnice mohla být správná. Jak je uvedeno v tvrzení na konci sekce 6.2, tak vzájemná provázanost celého prostoru nás nutí pro řešení jakékoli intenzity sestavit rovnice pro všechny prvky daného prostoru.

Při sestavování rovnice pro letadlo A_1 bychom zjistili, že závisí na pravděpodobnosti kolize dotazu $P_{A_1}(ii)$, což je pravděpodobnost vyskytující se v rovnici 7.43. Tato pravděpodobnost dále závisí na pravděpodobnosti odpovědi $P_{A_1}(odp)$. Sestavili-li bychom si analogickou rovnici podle 7.43, došli bychom k závěru, že tato pravděpodobnost odpovědi letadla A_1 závisí také na pravděpodobnosti kolize dotazu radaru Γ_1 .

Provázanost pravděpodobností odpovědi $P(odp)$ by nám tak způsobovala, že pravděpodobnost $P_{\Gamma_1}(odp)$ v kroku n by závisela sama na sobě. Tím bychom dostali nechtěnou smyčku a nemohli bychom se úspěšně dopočítat jak pravděpodobnosti odpovědi, pravděpodobnosti kolize dotazu, tak i celkové intenzity.

Podívejme se nyní znovu na to, jak vzniká pravděpodobnost odpovědi. Letadlo vyšle na jiné letadlo dotaz v kroku n . Nás zajímá, jestli letadlo odpovídá či nikoli. Letadlo bude ale odpovídat, pouze pokud úspěšně přijalo dotaz. Tento dotaz však muselo již přijmout. Letadlo bude tedy odpovídat, pouze pokud úspěšně přijalo dotaz v kroku $n - 1$. Z tohoto můžeme vyvodit, že pravděpodobnost odpovědi v kroku n závisí na pravděpodobnosti kolize dotazu v kroku $n - 1$.

Pro pravděpodobnost odpovědi radaru Γ_1 naší situace na obrázku 23 dostaneme rovnici ve tvaru

$$P_{\Gamma_1}(odp)(n) = 1 - e^{-\lambda_{si}(n-1)\tau}, \quad (7.44)$$

kde

$$\lambda_{si}(n-1) = \lambda_{si_{A_1}}(n-1) + \lambda_{si_{A_3}}(n-1) + \lambda_{si_{\Gamma_2-A_3}}(n-1) \quad (7.45)$$

Analogicky rovnici 7.38 platí

$$\lambda_{si_x}(n-1) = P_x(si)(n-1)\lambda_x(n-1) \quad (7.46)$$

V konkrétním tvaru tedy

$$\lambda_{si_{A_1}}(n-1) = (1 - P_{A_1}(ii)(n-1))\lambda_{A_1}(n-1) \quad (7.47)$$

$$\lambda_{si_{A_3}}(n-1) = (1 - P_{A_3}(ii)(n-1))\lambda_{A_3}(n-1) \quad (7.48)$$

$$\lambda_{si_{\Gamma_2-A_2}}(n-1) = (1 - P_{\Gamma_2-A_2}(ii)(n-1))\lambda_{\Gamma_2-A_2}(n-1) \quad (7.49)$$

$P(ii)(n-1)$ značí, že je pravděpodobnost kolize dotazu vypočtena pomocí intenzit z kroku $n-1$.

Jelikož jsme ještě nevyjádřili úplnou formu pravděpodobnosti kolize dotazu, nebudeme zde konkrétní pravděpodobnosti $P(ii)$ rozepisovat. Lze si však již všimnout, že po dosazení pravděpodobnosti odpovědi do obecné diferenční rovnice 5.27 získáme nelineární diferenční rovnici druhého řádu.

7.3.1 Periodické vysílání zpráv

Pravděpodobnost $P(odp)$, jejíž výpočet popisuje rovnice 7.44, musíme rozšířit o pravděpodobnost, že letadlo vysílá periodicky zprávy formátu UF 16, DF 11, DF 17.

Jelikož u $P(UF16)$, $P(DF11)$, $P(DF17)$ nemůže nastat, že by jedno letadlo vysílalo zároveň například zprávu UF 16 a DF 11, je proto průnik libovolných dvojic nebo celé trojice těchto pravděpodobností roven \emptyset . Sjednocení těchto 3 pravděpodobností můžeme vypočítat jako

$$P(UF16) \cup P(DF11) \cup P(DF17) = P(UF16) + P(DF11) + P(DF17) \quad (7.50)$$

Dílčí pravděpodobnosti jsou vypočítány pomocí rovnoměrného rozdělení, kde je odvození analogické odvození v sekci 7.2.2 a platí pro ně tedy analogie vzorci 7.22. Jednotlivé zranitelné doby jsou vytvořeny stejným způsobem jako v předchozích částech. Jedná se tedy o součet doby přijímání dotazu UF 0/4/5/11 a doby vysílání zprávy UF 16, DF 11 nebo DF 17 rozšířené o Dead Time potřebný pro přepnutí odpovídače zpět do příjmu.

Dále je nutné rozšířit pravděpodobnost o to, že letadlo vysílá metodou Whisper Shout. Dopad směrových antén má za následek, že každé letadlo je zatíženo vysíláním 4 Whisper Shout intervalů během 1 s. Pravděpodobnost, že letadlo je zatíženo Whisper Shout intervalem můžeme vypočítat jako

$$P(x \in WSinterval) = \int_0^{14t+\tau_{cod}} f(x)dx = \int_0^{14t+\tau_{cod}} \frac{1}{\frac{1}{4}-0} dx = 56t + 4\tau_{cod}, \quad (7.51)$$

kde $t = 1 \text{ ms} + \tau_{cod}$ a τ_{cod} je doba vysílání zprávy Mode C-only All-Call rozšířená o následný Dead Time. $\frac{1}{4}$ ve jmenovateli hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ představuje převrácenou hodnotu frekvence vysílání Whisper Shout intervalů letadlem.

Dále platí

$$P(ws_{odp}) = P(x \in WSinterval) \wedge P(wsi), \quad (7.52)$$

kde $P(wsi)$ představuje pravděpodobnost, že bude letadlo zatíženo vysláním dotazu v intervalu Whisper Shout metody. Platí

$$P(wsi) = \lambda_{wsi}\tau, \quad (7.53)$$

kde

$$\lambda_{wsi} = \frac{15}{14t + \tau_{cod}} \quad (7.54)$$

a τ je zranitelná doba o velikosti délky čtení dotazu formátu UF 4 rozšířená o τ_{cod} .

Pro $P(wsodp)$ tedy platí

$$P(wsodp) = P(x \in WSinterval) \cap P(wsi) = P(x \in WSinterval)P(wsi) \quad (7.55)$$

7.3.2 Celková pravděpodobnost odpovědi

Celkovou pravděpodobnost odpovědi poté dostaneme jako

$$P(odp) = P(odpr) \cup P(wsodp) \cup (P(UF16) + P(DF11) + P(DF17)), \quad (7.56)$$

kde $P(odpr)$ odpovídá pravděpodobnosti podle rovnice 7.44.

Je možné si všimnout, že zde již nesjednocujeme dílčí pravděpodobnosti $P(UF16)$, $P(DF11)$, $P(DF17)$, $P(wsodp)$ přes všechna letadla. Důvodem je, že pravděpodobnost odpovědi závisí pouze na tom, co vysílá samotné letadlo. Zatížení těmito 4 formáty závisí pouze na intenzitě vysílání daným konkrétním letadlem.

7.4 Pravděpodobnost All-Call

Další část pravděpodobnosti kolize dotazů $P(ii)$ tvoří pravděpodobnost zohledňující All-Call periodu.

Podívejme se na schéma All-Call periody na obrázku 17 a do tabulky 2 na dobu zatížení mód S odpovídáče All-Call dotazy formátu UF 11 při stavu IC lockout a doby zatížení od mód A/C-only All-Call dotazů. Lze si všimnout, že mezi mód S All-Call dotazem a mód A/C-only All-Call dotazem bude volný prostor, kdy nebude odpovídáč zatížen. V této době může přijímat dotazy od jiných radarů nebo systémů TCAS. Provedeme-li výpočet pro konkrétní hodnoty

$$T_{free_A} = 128 + 4,75 - 25,3 - 34,21 = 73,24 \mu s \quad (7.57)$$

$$T_{free_C} = 128 + 4,75 - 38,4 - 34,21 = 60,14 \mu s \quad (7.58)$$

lze vidět, že se jedná o relativně dlouhé intervaly. Hodnota $4,75 \mu s$ představuje dobu vysílání prvních dvou pulsů $P1$ a $P2$ dotazu.

Nutné je si uvědomit, že dotazy vyslané do těchto intervalů nebudou úspěšné pokud přijdou v prvních nebo posledních $19,75 \mu s$ z důvodu definice zranitelné doby (obrázek 14). Tyto intervaly se nám sníží na hodnoty

$$T_{free_A} = 73,24 - 2 \cdot 19,75 = 33,74 \mu s \quad (7.59)$$

$$T_{free_C} = 60,14 - 2 \cdot 19,75 = 20,64 \mu s \quad (7.60)$$

$19,75 \mu s$ je doba čtení dotazu krátkého formátu módu S.

Stále se jedná o intervaly, ve kterých může dojít k úspěšnému přečtení dotazu, a proto musíme s těmito dobami uvažovat. Zanedbáme-li období prvotního zjištění cíle, kdy letadlo musí na All-Call periodu odpovědět, dostaneme výslednou dobu zranitelnosti τ jako

$$\tau = T_{oc_{stk}} + T_{oc_{a/c}} + 2T_{rec_{UF0/4/5}}, \quad (7.61)$$

kde $T_{oc_{stk}}$ je doba zatížení mód S All-Call dotazem při IC lockout, $T_{oc_{a/c}}$ je doba potlačení dotazu módu A nebo C a $T_{rec_{UF0/4/5}}$ je doba čtení dotazu krátkého formátu módu S.

Výpočet $P(ac)$ je následně analogický s výpočtem čtení monitorovací zprávy systému TCAS v sekci 7.2.2. Máme-li konstantní frekvenci vysílání All-Call periody

$$\lambda_{ac} \quad (7.62)$$

a

$$\beta = T_{ac} = \frac{1}{\lambda_{ac}} \quad (7.63)$$

$$\alpha = 0 \quad (7.64)$$

Poté

$$P_{A_i}(ac) = \lambda_{ac_{A_i}} \tau \quad (7.65)$$

Celková pravděpodobnost kolize dotazu s zatížením All-Call periodou je ve výsledku

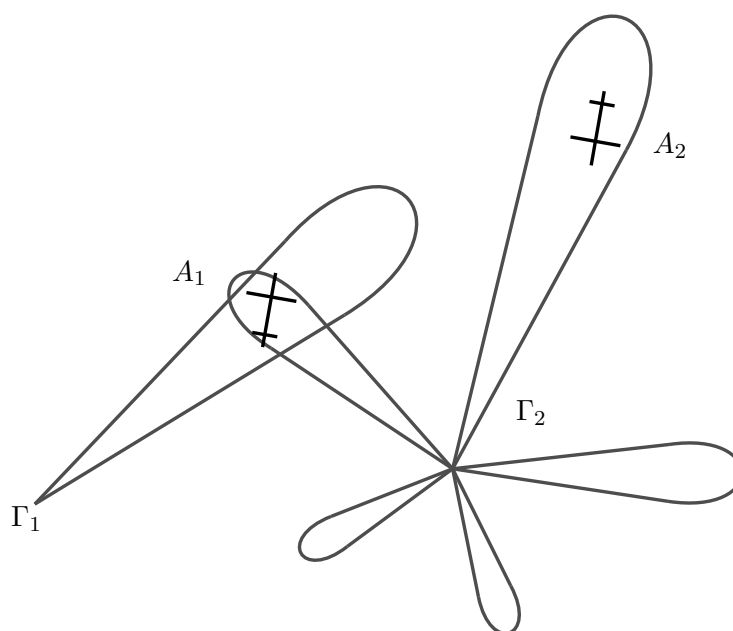
$$P(ac) = \bigcup_{i=1}^n P_{A_i}(ac), \quad (7.66)$$

kde sjednocení proběhne dle rovnice 7.13.

8 Postranní laloky

Po určení celkové pravděpodobnosti kolize dotazů z hlavních laloků se musíme podívat na to, jakou roli hraje přijímání dotazů z postranních laloků na zatížení odpovídače.

Vezměme v úvahu konfiguraci prostoru na obrázku 25. Pokud radar Γ_1 vyšle dotaz na letadlo A_1 , bude nenulová pravděpodobnost kolize dotazu s případným dotazem radaru Γ_2 na letadlo A_2 . Jelikož letadlo A_1 zachytí dotaz z postranního laloku, dojde k potlačení a nebude radaru vyslána odpověď. Veškeré rovnice odvozené v sekci 7 pro dotazování v hlavním laloku a dotazování systémem TCAS stále platí. Nutné je však vytvořit mechanismus, který nám umožní zohlednit přijímání dotazů z postranních laloků.



Obrázek 25: Konfigurace prostoru problému - postranní laloky

8.1 Pravděpodobnost přijímání z postranního laloku

Pravděpodobnost, že letadlo čte dotaz z postranního laloku, se bude skládat z dvou částí.

- Letadlo čte adresný dotaz z postranního laloku.
- Letadlo čte All-Call periodu z postranního laloku.

V prvním případě platí analogie rovnici 5.29 a tedy

$$P(cte_{sl}) = 1 - e^{-\lambda_p(n)\tau}, \quad (8.1)$$

kde τ je doba zatížení zprávou krátkého formátu módu S z postranního laloku rozšířená o dobu čtení krátkého formátu módu S. $\lambda_p(n)$ je součet celkových intenzit všech radarů, u nichž je letadlo v daný okamžik v postranním laloku.

Výpočet pravděpodobnosti kolize dotazů s All-Call periodou přijímanou postranním lalokem je totožný s výpočtem kolize dotazů s All-Call periodou v hlavním laloku v sekci 7.4. Jediná změna je v hodnotě zranitelné době, kde pro postranní lalok platí

$$\tau = T_{oc_{sls}} + T_{oc_{a/c-sls}} + 2T_{rec_{UF0/4/5}} \quad (8.2)$$

kde $T_{oc_{sls}}$ je doba potlačení mód S All-Call dotazu při IC lockout a přijmutí z postranního laloku. $T_{oc_{a/c-sls}}$ je doba potlačení mód A/C-only All-Call dotazu přijatého z postranního laloku.

8.2 Celková pravděpodobnost kolize dotazů

Celkovou pravděpodobnost kolize dotazů včetně rozšíření na postranní laloky dostaneme jako

$$P(ii) = P(cte) \cup P(odp) \cup P(ac) \cup P(cte_{sl}) \cup P(ac_{sl}) \quad (8.3)$$

Pro sjednocení bude využita rovnice 7.13.

9 Adresnost

Dosud se nám podařilo odvodit všechny části nelineárních diferenčních rovnic se strukturou

$$\lambda(n+2) = \lambda_0 + P(ii)\lambda(n+1), \quad (9.1)$$

které následně budou tvořit celou soustavu nelineárních diferenčních rovnic popisujících prostor našeho zájmu. Nyní je potřeba si ujasnit problematiku adresnosti dotazů.

9.1 Návrat zpráv

V sekci 7.2 jsme si odvodili, jak lze vypočítat pravděpodobnost, že radar nebo TCAS vyšle dotaz do okamžiku, kdy již bude odpovídač něčí dotaz přijímat. To má za následek, že dotaz bude neúspěšný a bude vyslán znovu. Jakou roli v této situaci hraje adresnost již čteného dotazu?

Pro jednoduchost vezměme v úvahu situaci na obrázku 22. Na první pohled by se mohlo zdát, že pokud budeme vysílat na letadlo A_3 radarem Γ a došlo by ke kolizi s dotazem od letadla A_2 , museli bychom rozlišit, jestli dotaz od letadla A_2 byl adresný či nikoli. Případně o neúspěšný adresný dotaz navýšit tok dotazů letadla A_2 . Ačkoli je možné tento tok vyjádřit a letadlu A_2 přičíst, není to správná cesta. Uvědomíme-li si, že pro každé letadlo máme jednu či více rovnic, které navyšují jednotlivé toky na dílčí letadla dle toho, zda dojde ke kolizi při vyslání adresného dotazu, tak bychom dalším navyšováním přičítali rekurentní tok, který je již zohledněn těmito rovnicemi.

Dále je dobré podotknout, že v $P(cte)$ (rovnice 7.14) počítáme v toku $\lambda_p(n)$ jak s adresnými, tak i neadresnými dotazy, jelikož nám jde o pravděpodobnost, kdy dojde k překrytí adresného dotazu s dotazem cizím. Zda je cizí dotaz adresný či nikoli, na způsobení kolize nehraje roli.

10 Pravděpodobnost kolize odpovědí

Doposud jsme se zabývali kolizí dotazů. Nyní je také nutné se zaměřit na kolize na straně odpovědí.

10.1 Popis situace

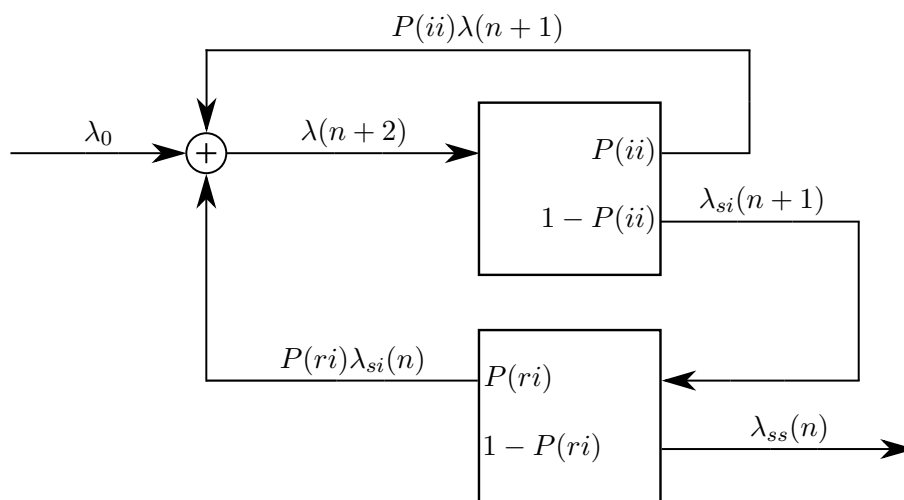
Vezměme v úvahu schéma prostoru na obrázku 23. Zatím jsme vyřešili situaci, kdy například dotaz vyslán radarem Γ_2 na letadlo A_2 může interferovat s dotazem od letadla A_1 , A_3 , nebo radaru Γ_1 . Zde však naše úvaha nemůže skončit, jelikož nám chybí popsat značnou část systému.

Pokud byl dotaz radaru Γ_2 úspěšně přijat, tak na něj letadlo A_2 bude odpovídat. V momentě kdy bude radar Γ_2 přijímat odpověď, však může dojít k interferenci této odpovědi s odpovědí vyslanou letadlem A_3 , jako reakcí na dotaz vyslaný letadlem A_2 . Dochází tím k problému zvanému FRUIT. Tento stejný problém ale nemusí nastat pouze na straně radaru. Pokud letadlo A_2 vyšle dotaz letadlu A_1 , tak odpověď letadla A_1 může na příjmu letadla A_2 interferovat s odpověďmi letadla A_3 na dotaz radaru Γ_2 .

A co odpověď letadla A_3 na dotaz letadla A_2 , interferující s odpovědí letadla A_1 na dotaz letadla A_2 ? Doposud a i nadále předpokládáme, že jakýkoli prvek prostoru si vždy pomocí svých algoritmů ohlídá dostupnost pro příjem odpovědi na svůj dotaz.

10.2 Pravděpodobnost kolize odpovědí

Podívejme se nyní na matematické vyjádření této kolize. Pokud dojde ke kolizi dotazů, musí se celkový tok dotazů navýšit o kolizní část. Tuto situaci znázorňuje schéma 19. Analogicky tomu tak bude i v případě, pokud dojde ke kolizi odpovědí. Systém, který chce získat určitý počet úspěšných zpráv od nějakého prvku prostoru nezohledňuje rozdíl mezi tím, zda ke kolizi došlo už při dotazu, nebo až při odpovědi. Tak či onak musí danou zprávu vyslat znovu. Nové schéma, znázorňující i kolizi odpovědí, můžeme vidět na schématu 26.



Obrázek 26: Schéma včteně kolize odpovědí

První důležitá změna na schématu, na kterou je nutné upozornit, je posun krokování do „kladných“ n . Tedy došlo k posunutí n o $+1$ pro všechny proměnné závislé na n . Proto například označení $\lambda_{si}(n)$ odpovídá $\lambda_{si}(n-1)$ v sekci 7.3.

Další změnou na schématu je vznik nového bloku s $P(ri)$ ⁶. Je možné si všimnout, že rekurentní tok, který se musí znovu vyslat z důvodu kolize odpovědi, je ve výši $\lambda_{si}(n)P(ri)$. Intenzita λ_{si} představuje tok dotazů, které byly úspěšně přijaty odpovídači a bude se na ně odpovídat. Jak bylo naznačeno v sekci 7.3, dotazy v kroku $(n+1)$ jsou dotazy, které jsou čteny a dochází tak k interferenci dotazů. Krok (n) je zde uveden, protože představuje již odpovědi na dotazy. To je právě tok, ve kterém může docházet k interferenci odpovědí. Tedy $\lambda_{si}(n)$ představuje tok (intenzitu) odpovědí.

Samotná pravděpodobnost kolize odpovědí vychází ze stejného principu jako pravděpodobnost kolize dotazů 5.29. Bude tedy ve tvaru

$$P(ri) = 1 - e^{-2\lambda_{si}(n)\tau}, \quad (10.1)$$

kde τ představuje dobu vysílání odpovědi formátu DF 20, DF 21 odpovídačem. 2τ pak zranitelnou dobu.

$\lambda_{si}(n)$ představuje celkovou intenzitu odpovědí, které mohou způsobit interferenci. Pro lepší představu, z čeho se tato celková intenzita skládá, si přiblížíme situaci na obrázku 23 a interferenci odpovědí letadla A_2 na příjmu radaru Γ_2 .

Celková intenzita se bude skládat z dílčích, tj. $\lambda_{si_{A_2-A_3}}(n)$ nikoli celkových $\lambda_{si_{A_2}}(n)$, intenzit odpovědí všech prvků (A_2) mimo přijímač našeho zájmu Γ_2 vysílajících odpovědi na všechny ostatní prvky (A_3) v pokrytí přijímače našeho zájmu Γ_2 . Je nutné upozornit, že tok odpovědí značený $\lambda_{si_{A_2-A_3}}(n)$ ve skutečnosti představuje tok odpovědí letadla A_3 na dotazy letadlem A_2 . Důvodem tohoto značení je, že rovnice výsledné soustavy nelineárních diferenčních rovnic jsou sestavovány ve směru dotazů, nikoli odpovědí.

10.2.1 Squitter

Výše odvozená pravděpodobnost kolize odpovědí $P(ri)$ pokrývá pouze kolize odpovědí vyvolaných dotazy radaru nebo systému TCAS. Je nutné rozšířit tuto pravděpodobnost o pravděpodobnost kolize odpovědí se zprávami Acquisition a Extended Squitteru DF 11 a DF 17.

Přístup bude podobný jako v předchozích sekcích. Vzorec pro výpočet můžeme napsat následovně.

$$P(ri) = P(ri_{r+t}) \cup \left(\bigcup_{i=1}^n (P_{A_i}(DF11) + P_{A_i}(DF17)) \right), \quad (10.2)$$

kde $P_{A_i}(DF11) + P_{A_i}(DF17)$ představuje sjednocení pravděpodobností dvou vzájemně se vylučujících jevů letadla A_i . Sjednocení bude provedeno přes všechny letadla, která jsou v oblasti pokrytí a mohou tedy přispět ke kolizi odpovědí, kromě letadla od kterého se odpověď očekává. Výraz $P(ri_{r+t})$ představuje pravděpodobnost kolize s odpověďmi vyvolanými radarem nebo systémem TCAS podle rovnice 10.1. Dílčí $P_{A_i}(DF11)$ a $P_{A_i}(DF17)$ jsou vypočítány pomocí analogického vzorce ke vzorci 7.22. Zranitelná doba τ pro DF 17 je dvojnásobek doby čtení odpovědí

⁶reply interference

dlouhého formátu módu S. Pro DF 11 je τ součet doby čtení odpovědí krátkého a dlouhého formátu módu S.

V pravděpodobnosti $P(ri)$ neuvažujeme s Dead Time. Pokud dojde k úspěšnému přijetí odpovědi a dostane se radar nebo letadlo do Dead Time, tak už nevádí, jestli přijde další odpověď. Radar či letadlo si vždy pohlíká volnost pro příjem odpovědi na svůj dotaz a proto je jakákoli odpověď mimo výše zmíněnou zranitelnou dobu neadresná.

10.3 Rozšíření rovnice

Finální nelineární diferenční rovnice popisující schéma 26 má tvar:

$$\lambda(n+2) = \lambda_0 + P(ii)\lambda(n+1) + P(ri)\lambda_{si}(n) \quad (10.3)$$

11 Obecný zápis

Běžně se používá pro soustavy diferenčních rovnic zápis pomocí vektorů a vektorových funkcí

$$\mathbf{x}(n) = \begin{pmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_k(n) \end{pmatrix}, \quad (11.1)$$

kde $k \in \mathbb{N}$. Vzhledem k struktuře našich diferenčních rovnic pro nás bude výhodnější zapsat rovnice pomocí maticového zápisu.

Nechť \exists množina

$$\Omega = \{1, 2, \dots, i\} \quad \forall i, \quad (11.2)$$

kde $i \in \mathbb{N}$ a každý prvek množiny Ω značí jeden prvek námi popisovaného prostoru.

Nechť \exists množina

$$I_i = \{1, \dots, j\} \quad \forall j, \quad (11.3)$$

kde $j \in \Omega$ a každý prvek množiny I je jeden prvek množiny Ω , pro který platí, že je v prostoru pokrytí transmise dotazů prvku i . Platí

$$I_i \subset \Omega. \quad (11.4)$$

Nechť \exists množina

$$\Theta_i = \{1, \dots, p\} \quad \forall p, \quad (11.5)$$

kde $p \in \Omega$ a každý prvek množiny Θ je jeden prvek množiny Ω , pro který platí, že provádí transmissi dotazů na prvek i . Platí

$$\Theta_i \subset \Omega. \quad (11.6)$$

Nechť \exists množina

$$\Psi_i = \{1, \dots, q\} \quad \forall q, \quad (11.7)$$

kde $q \in \Omega$ a každý prvek množiny Ψ je jeden prvek množiny Ω , pro který platí, že provádí transmissi dotazů na prvek i skrz postranní lalok. Platí

$$\Psi_i \subset \Omega \quad (11.8)$$

11.1 Matice intenzit $\mathbf{L}(n+2)$

Mějme matici

$$\mathbf{L}(n+2) = \begin{pmatrix} \lambda_{1,1}(n+2) & \lambda_{1,2}(n+2) & \cdots & \lambda_{1,j}(n+2) \\ \lambda_{2,1}(n+2) & \lambda_{2,2}(n+2) & \cdots & \lambda_{2,j}(n+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{i,1}(n+2) & \lambda_{i,2}(n+2) & \cdots & \lambda_{i,j}(n+2) \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.9)$$

kde

$$\lambda_{i,j}(n+2) = \begin{cases} \lambda_{i,j}(n+2) & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.10)$$

a $\lambda_{i,j}(n+2)$ představuje pro velké n celkovou intenzitu prvku i vysílanou na prvek j .

11.2 Matice požadovaných intenzit \mathbf{L}_0

Mějme matici

$$\mathbf{L}_0 = \begin{pmatrix} \lambda_{0,1} & \lambda_{0,2} & \cdots & \lambda_{0,1,j} \\ \lambda_{0,2,1} & \lambda_{0,2,2} & \cdots & \lambda_{0,2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{0,i,1} & \lambda_{0,i,2} & \cdots & \lambda_{0,i,j} \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.11)$$

kde

$$\lambda_{0,i,j} = \begin{cases} \lambda_{0,i,j} & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.12)$$

a $\lambda_{0,i,j}$ představuje požadovanou intenzitu prvku i vysílanou na prvek j .

11.3 Matice pravděpodobností kolize dotazů $\mathbf{P}(\mu)$

Mějme matici

$$\mathbf{P}(\mu) = \begin{pmatrix} P_{1,1}(\mu) & P_{1,2}(\mu) & \cdots & P_{1,j}(\mu) \\ P_{2,1}(\mu) & P_{2,2}(\mu) & \cdots & P_{2,j}(\mu) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i,1}(\mu) & P_{i,2}(\mu) & \cdots & P_{i,j}(\mu) \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.13)$$

kde

$$P_{i,j}(\mu) = \begin{cases} P_{i,j}(\mu) & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.14)$$

a $P_{i,j}(\mu)$ představuje pravděpodobnost kolize dotazů prvku i vysílajícího na prvek j .

Dále platí

$$P_{i,j}(\mu) = P\left(\bigcup_{k \in K} E_k\right) = 1 - \prod_{k \in K} (1 - P(E_k)), \quad \forall k \quad (11.15)$$

kde $K = \{cte_{i,j}, odp_{i,j}, ac_{i,j}, ctesl_{i,j}, acsl_{i,j}\}$.

11.3.1 Pravděpodobnost čtení $P(cte_{i,j})$

Pro $P(cte_{i,j})$ platí

$$P(cte_{i,j}) = P\left(\bigcup_{l \in L} E_l\right) = 1 - \prod_{l \in L} (1 - P(E_l)), \quad \forall l \quad (11.16)$$

kde $l = \{cte_{r+t_{i,j}}, UF16_{i,j}, ws_{i,j}\}$.

Dále platí

$$P(cte_{r+t_{i,j}}) = 1 - e^{-\Lambda_{i,j}(n+1)\tau}, \quad (11.17)$$

kde

$$\Lambda_{i,j}(n+1) = \sum_{m \in \Theta_j} \sum_{o \in I_m} \lambda_{m,o}(n+1) - \sum_{p \in I_i} \lambda_{i,p}(n+1), \quad \forall m, \forall o, \forall p \quad (11.18)$$

a τ je zranitelná doba, jejíž velikost je popsána v sekci 7.2.1.

Pro $P(UF16_{i,j})$ platí

$$P(UF16_{i,j}) = \bigcup_{m \in \Theta_j} P(UF16_{i,j_{A_m}}), \quad \Theta_j \setminus \{i\} \quad (11.19)$$

$$P(UF16_{i,j_{A_m}}) = \int_0^\tau \lambda_{UF16_{i,j_{A_m}}} dx = \lambda_{UF16_{i,j_{A_m}}} \tau \quad (11.20)$$

$\lambda_{UF16_{i,j_{A_m}}}$ představuje konstantní intenzitu vysílání UF 16 letadla m vysílajícího na letadlo j . τ je zranitelná doba, jejíž velikost je popsána v sekci 7.2.2.

Pro $P(ws_{i,j})$ platí

$$P(ws_{i,j}) = \bigcup_{m \in \Theta_j} P(ws_{i,j_{A_m}}), \quad \Theta_j \setminus \{i\} \quad (11.21)$$

$$P(ws_{i,j_{A_m}}) = P(x \in \langle \eta_{A_m} - 1, 14 \rangle) \cap P(wsi) = P(x \in \langle \eta_{A_m} - 1, 14 \rangle) P(wsi) \quad (11.22)$$

$$P(x \in \langle \eta_{A_m} - 1, 14 \rangle) = \int_{(\eta_{A_m} - 1)t}^{14t + \tau_{cos}} f(x) dx = 14t + \tau_{cos} - (\eta_{A_m} - 1)t \quad (11.23)$$

$$P(wsi) = \lambda_{wsi} \tau, \quad (11.24)$$

kde

$$\lambda_{wsi} = \frac{15}{14t + \tau_{cos}}, \quad (11.25)$$

Hodnoty t a τ_{cos} jsou specifikovány v sekci 7.2.3. Také platí

$$\eta_{A_m} \in \langle 1, 14 \rangle \quad (11.26)$$

11.3.2 Pravděpodobnost odpovědi $P(odp_{i,j})$

Pro $P(odp_{i,j})$ platí

$$P(odp_{i,j}) = P(odpr_{i,j}) \cup P(ws_{odp_{i,j}}) \cup (P(UF16) + P(DF11) + P(DF17)) \quad (11.27)$$

$$P(odpr_{i,j}) = 1 - e^{-\Lambda_{si_{i,j}}(n)\tau}, \quad (11.28)$$

kde

$$\Lambda_{si_{i,j}}(n) = \sum_{l \in \Theta_j} \lambda_{si_{l,j}}(n) - \lambda_{si_{i,j}}(n), \quad \forall l \quad (11.29)$$

$$\lambda_{si_{l,j}} = (1 - P_{l,j}(u)(n)) \lambda_{l,j}(n), \quad (11.30)$$

Hodnota zranitelné doby τ je specifikována v sekci 7.3.

$$P(ws_{odp_{i,j}}) = P(x \in WSinterval) \cap P(wsi) = P(x \in WSinterval) P(wsi) \quad (11.31)$$

$$P(x \in WSinterval) = \int_0^{14t + \tau_{cod}} f(x) dx = 56t + 4\tau_{cod} \quad (11.32)$$

$$P(wsi) = \lambda_{wsi}\tau, \quad (11.33)$$

kde

$$\lambda_{wsi} = \frac{15}{14t + \tau_{cod}} \quad (11.34)$$

Hodnoty t a τ_{cod} jsou specifikovány v sekci 7.3.1.

$$P(UF16) + P(DF11) + P(DF17) = \lambda_{UF16}\tau_{UF16} + \lambda_{DF11}\tau_{DF11} + \lambda_{DF17}\tau_{DF17} \quad (11.35)$$

Popis určení velikostí zranitelných dob τ_{UF16} , τ_{DF11} a τ_{DF17} je popsán v sekci 7.3.1.

11.3.3 Pravděpodobnost All-Call $P(ac_{i,j})$

$$P(ac_{i,j}) = \bigcup_{m \in \Theta_j} P(ac_{i,j_{A_m}}), \quad \Theta_j \setminus \{i\} \quad (11.36)$$

$$P(ac_{i,j_{A_m}}) = \lambda_{ac_{i,j_{A_m}}}\tau \quad (11.37)$$

Velikost zranitelné doby τ je popsána v sekci 7.4.

11.3.4 Pravděpodobnost čtení adresného dotazu z postranního laloku $P(cte_{sl_{i,j}})$

$$P(cte_{sl_{i,j}}) = 1 - e^{-\Lambda_{i,j}(n+1)\tau}, \quad (11.38)$$

kde

$$\Lambda_{i,j}(n+1) = \sum_{m \in \Psi_j} \sum_{o \in I_m} \lambda_{m,o}(n+1), \quad \forall m, \forall o \quad (11.39)$$

Zranitelná doba τ je popsána v sekci 8.1.

11.3.5 Pravděpodobnost čtení All-Call periody z postranního laloku $P(ac_{sl_{i,j}})$

$$P(ac_{sl_{i,j}}) = \bigcup_{m \in \Psi_j} P(ac_{sl_{i,j_{A_m}}}), \quad (11.40)$$

$$P(ac_{sl_{i,j_{A_m}}}) = \lambda_{ac_{sl_{i,j_{A_m}}}}\tau \quad (11.41)$$

Velikost zranitelné doby τ je popsána v sekci 8.1.

11.4 Matice intenzit $\mathbf{L}(n+1)$

Mějme matici

$$\mathbf{L}(n+1) = \begin{pmatrix} \lambda_{1,1}(n+1) & \lambda_{1,2}(n+1) & \cdots & \lambda_{1,j}(n+1) \\ \lambda_{2,1}(n+1) & \lambda_{2,2}(n+1) & \cdots & \lambda_{2,j}(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{i,1}(n+1) & \lambda_{i,2}(n+1) & \cdots & \lambda_{i,j}(n+1) \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.42)$$

kde

$$\lambda_{i,j}(n+1) = \begin{cases} \lambda_{i,j}(n+1) & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.43)$$

a $\lambda_{i,j}(n+1)$ představuje intenzitu prvku i v kroku $(n+1)$ vysílanou na prvek j .

11.5 Matice pravděpodobností kolize odpovědí $\mathbf{P}(\rho\iota)$

Mějme matici

$$\mathbf{P}(\rho\iota) = \begin{pmatrix} P_{1,1}(\rho\iota) & P_{1,2}(\rho\iota) & \cdots & P_{1,j}(\rho\iota) \\ P_{2,1}(\rho\iota) & P_{2,2}(\rho\iota) & \cdots & P_{2,j}(\rho\iota) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i,1}(\rho\iota) & P_{i,2}(\rho\iota) & \cdots & P_{i,j}(\rho\iota) \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.44)$$

kde

$$P_{i,j}(\rho\iota) = \begin{cases} P_{i,j}(\rho\iota) & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.45)$$

a $P_{i,j}(\rho\iota)$ představuje pravděpodobnost kolize odpovědí prvku i vysílajícího na prvek j .

Dále platí

$$P_{i,j}(\rho\iota) = P(ri_{r+t_{i,j}}) \cup \left(\bigcup_{m \in \Theta_j} (P(DF11_{ri_{A_m}}) + P(DF17_{ri_{A_m}})) \right), \quad \Theta_j \setminus \{i\} \quad (11.46)$$

$$P(ri_{r+t_{i,j}}) = 1 - e^{-2\Lambda_{si,j}(n)\tau}, \quad (11.47)$$

kde

$$\Lambda_{si,j}(n) = \sum_{l \in I_i} \sum_{m \in \Theta_l} \lambda_{si_{m,l}}(n) - \sum_{o \in \Theta_j} \lambda_{si_{o,j}}(n), \quad \forall l, \forall o (o \neq i), \forall m (m \neq i) \quad (11.48)$$

kde pro $\lambda_{si_{m,l}}(n)$ platí analogická rovnice rovnici 11.30. τ je popsána v sekci 10.2.

$$P(DF11_{ri_{A_m}}) + P(DF17_{ri_{A_m}}) = \lambda_{DF11_{A_m}} \tau_{DF11_{ri}} + \lambda_{DF17_{A_m}} \tau_{DF17_{ri}} \quad (11.49)$$

Velikost zranitelných dob $\tau_{DF11_{ri}}$ a $\tau_{DF17_{ri}}$ je popsána v sekci 10.2.1

11.6 Matice intenzit úspěšných dotazů $\mathbf{L}_{si}(n)$

Mějme matici

$$\mathbf{L}_{si}(n) = \begin{pmatrix} \lambda_{si_{1,1}}(n) & \lambda_{si_{1,2}}(n) & \cdots & \lambda_{si_{1,j}}(n) \\ \lambda_{si_{2,1}}(n) & \lambda_{si_{2,2}}(n) & \cdots & \lambda_{si_{2,j}}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{si_{i,1}}(n) & \lambda_{si_{i,2}}(n) & \cdots & \lambda_{si_{i,j}}(n) \end{pmatrix}, \quad \forall i, j \in \Omega \quad (11.50)$$

kde

$$\lambda_{si_{i,j}}(n) = \begin{cases} \lambda_{si_{i,j}}(n) & \forall j \in I_i \\ 0 & \forall j \notin I_i \end{cases} \quad (11.51)$$

a $\lambda_{si_{i,j}}(n)$ představuje úspěšnou intenzitu prvku i v kroku (n) vysílanou na prvek j . Pro $\lambda_{si_{i,j}}(n)$ platí analogická rovnice rovnici 11.30.

11.7 Výsledná rovnice systému

Platí-li předcházející vztahy, pak platí rovnice

$$\mathbf{L}(n+2) = \mathbf{L}_0 + \mathbf{P}(u) \circ \mathbf{L}(n+1) + \mathbf{P}(\rho u) \circ \mathbf{L}_{si}(n), \quad (11.52)$$

kde \circ značí Hadamardův součin.

Počáteční podmínky jsou

$$\mathbf{L}(0) = 0 \quad (11.53)$$

$$\mathbf{L}(1) = \mathbf{L}_0 \quad (11.54)$$

12 Simulace

V několika předchozích sekcích jsme si odvodili obecný matematický model umožňující zjištění celkových intenzit pro libovolnou dvojici radar - letadlo nebo letadlo - letadlo. Tuto celkovou intenzitu využijeme k výpočtu reinterrogation rate libovolného prvku v jakékoli oblasti zájmu, kterou si definujeme a na kterou tento matematický model aplikujeme. Podívejme se nyní na prozkoumání chování systému, který tento model popisuje a na praktickou aplikaci tohoto modelu na provoz v oblasti střední Evropy.

Pro prozkoumání chování systému není vhodné využít simulaci pro celou oblast střední Evropy z důvodu výpočetní náročnosti. Budou proto provedeny simulace dvě.

- Simulace malého rozsahu
- Simulace velkého rozsahu

12.1 Vstupní parametry

Vstupní parametry do obou simulací nejsou totožné z důvodu odlišnosti definice a konfigurace analyzované oblasti. Většina vstupních parametrů však pro obě simulace shodná je a proto si zde uvedeme jejich shrnutí.

Za referenční hodnotu požadované intenzity odpovědí radarů λ_0 se bude pro všechny radary považovat hodnota odpovídající nastavení sekundárních přehledových radarů Řízení letového provozu České republiky z roku 2012. Nastavení period extrakce jednotlivých datových registrů pro radary Řízení letového provozu České republiky je možné vidět v tabulce 8.[19]

Tabulka 8: Periody extrakce datových registrů ŘLP ČR, s.p. 2012 [19]

Typ dotazu	Popis	Perioda T [s]
BDS 17 ₁₆	Využití GICB protokolu	300
BDS 40 ₁₆	Vybrané vertikální záměry	5
BDS 44 ₁₆	Meteorologické zprávy	10
BDS 45 ₁₆	Nebezpečné meteorologické jevy	10
BDS 60 ₁₆	Zprávy o rychlosti	5

Z tabulky si lze všimnout, že veškeré hodnoty jsou násobky 5 a lze tedy považovat periodu 5 s jako periodu rotace radaru. Počet odpovědí vyžadovaných po jednom letadlu během doby ozáření poté odpovídá

$$n = 5\left(\frac{1}{300} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10} + \frac{1}{5}\right) = 3,0167 \text{ zpráv} \quad (12.1)$$

Z této hodnoty bude dopočítána požadovaná intenzita na jedno letadlo následovně.

Pro úhlovou rychlost platí:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{r_i}}, \quad (12.2)$$

kde T_{r_i} značí periodu konkrétního radaru i . Také platí

$$\omega = \frac{\varphi_i}{t} \quad (12.3)$$

Kombinací předchozích rovnic dostaneme pro dobu ozáření letadla radarem i s šířkou hlavního laloku φ_i vztah

$$t = \frac{\varphi_i T_{r_i}}{2\pi} \quad (12.4)$$

Jelikož budeme v simulacích předpokládat hlavní laloky o tvaru kruhových výsečí, bude tato hodnota platit po celé délce hlavního laloku. Pro výslednou požadovanou intenzitu na jedno letadlo dostaneme

$$\lambda_0 = \frac{n}{t} = \frac{2\pi n}{\varphi_i T_{r_i}} \quad (12.5)$$

Pro frekvenci All-Call period zvolíme standardní hodnotu

$$\lambda_{ac} = 100 \text{ s}^{-1} \quad (12.6)$$

Jako intenzity vysílání systémů letadel zvolíme hodnoty odpovídající periodám v tabulkách 5, 6 a 7. Intenzity jsou tedy následující

$$\lambda_{0_{UF0}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{60} = 0,0167 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.7)$$

$$\lambda_{0_{UF16}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.8)$$

$$\lambda_{0_{DF11}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{1} = 1 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.9)$$

$$\lambda_{0_{DF17}} = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{T} = 5,2 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.10)$$

Zranitelné doby jsou sestaveny z časů zatížení v tabulce 2. Jejich hodnoty označeny pravděpodobností, které se týkají jsou následující:

$$\tau|P(cte_{r+t}) = 19,75 + 34,51 = 54,26 \mu\text{s} \quad (12.11)$$

$$\tau|P(UF16) = 19,75 + 33,75 + 16,24 = 69,74 \mu\text{s} \quad (12.12)$$

$$\tau|P(ws) = 19,75 + 29,2 = 48,95 \mu\text{s} \quad (12.13)$$

$$\tau|P(odpr) = 268,99 - (34,21 - 19,75) = 254,53 \mu\text{s} \quad (12.14)$$

$$\tau|P(ws_{odp}) = 19,75 + 23,8 + 16,24 = 59,79 \mu\text{s} \quad (12.15)$$

$$\tau|P(DF11) = 19,75 + 80,24 = 99,99 \mu\text{s} \quad (12.16)$$

$$\tau|P(DF17) = 19,75 + 136,24 = 155,99 \mu\text{s} \quad (12.17)$$

$$\tau|P(ac) = 34,21 + 38,4 + 2 \cdot 19,75 = 112,11 \mu\text{s} \quad (12.18)$$

$$\tau|P(cte_{sl}) = 19,75 + 33,48 = 53,23 \mu\text{s} \quad (12.19)$$

$$\tau|P(ac_{sl}) = 33,48 + 34,2 + 2 \cdot 19,75 = 107,18 \mu\text{s} \quad (12.20)$$

$$\tau|P(ri_{r+t}) = 2 \cdot 120 = 240,00 \mu\text{s} \quad (12.21)$$

$$\tau|P(DF11_{ri}) = 120 + 64 = 284,00 \mu\text{s} \quad (12.22)$$

$$\tau|P(DF17_{ri}) = 2 \cdot 120 = 240,00 \mu\text{s} \quad (12.23)$$

$$\tau_{cos} = 29,20 \mu s \quad (12.24)$$

$$\tau_{cod} = 23,8 + 16,24 = 40,04 \mu s \quad (12.25)$$

12.2 Simulace malého rozsahu

Simulace malého rozsahu slouží pro zkoumání vzájemné provázanosti a šíření nestability v systému. Jako referenční konfigurace je použita konfigurace na obrázku 23. Pro prozkoumání vzájemné provázanosti nás zajímá výsledná celková intenzita po určitém počtu iterací a není proto nutno zavádět rotaci laloků radarů a pohyb letadel.

Oba radary považujeme za totožné, jejichž šířka laloku má hodnotu

$$\varphi = 2,4 \frac{\pi}{180} = 0,042 \text{ rad} \quad (12.26)$$

Periodu rotace radarů zvolíme

$$T_r = 5 \text{ s} \quad (12.27)$$

Dosazením těchto dvou hodnot do rovnice 12.5 dostaneme požadovanou intenzitu odpovědi od jednoho letadla o velikosti

$$\lambda_0 = \frac{2\pi \cdot 3,0167}{0,042 \cdot 5} = 90,5 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.28)$$

12.2.1 Výsledky

Dosazením vstupních hodnot do simulace dostaneme stabilní chování, pro které vychází celkový reinterrogation rate pro jednotlivé prvky prostoru následující:

$$\Gamma_1 = 1,052 \quad (12.29)$$

$$\Gamma_2 = 1,038 \quad (12.30)$$

$$A_1 = 1,093 \quad (12.31)$$

$$A_2 = 1,040 \quad (12.32)$$

$$A_3 = 1,093 \quad (12.33)$$

Průběh celkových i úspěšných intenzit jednotlivých dvojic radar-letadlo a letadlo-letadlo je možné vidět na obrázcích 31 až 34 umístěných v příloze A.1. Za úspěšnou intenzitu se považuje počet dotazů, na které radar či letadlo úspěšně obdrželo odpověď. Nejedná se tedy pouze o $\lambda_{si}(n)$, ale o intenzitu $\lambda_{ss}(n)$, jejíž schématické vyjádření lze vidět na obrázku 26.

Provedeme-li zavedení nestability do systému, kdy zvýšíme požadovanou intenzitu radaru Γ_1 na

$$\lambda_{0\Gamma_1} = 20000 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12.34)$$

bude se systém nelineárních diferenčních rovnic nacházet v nestabilní oblasti. Na obrázcích 35 až 48 v příloze A.2 lze vidět průběh celkových intenzit $\lambda(n+2)$ a úspěšných intenzit $\lambda_{ss}(n)$. Z těchto průběhů lze vidět, že při přetížení systému jedním prvkem způsobí kontinuální provázanost téměř kompletní destabilizaci systému. Jediné toky, které se ustálí, jsou $\Gamma_2 \rightarrow A_3$ a $A_2 \rightarrow A_1$.

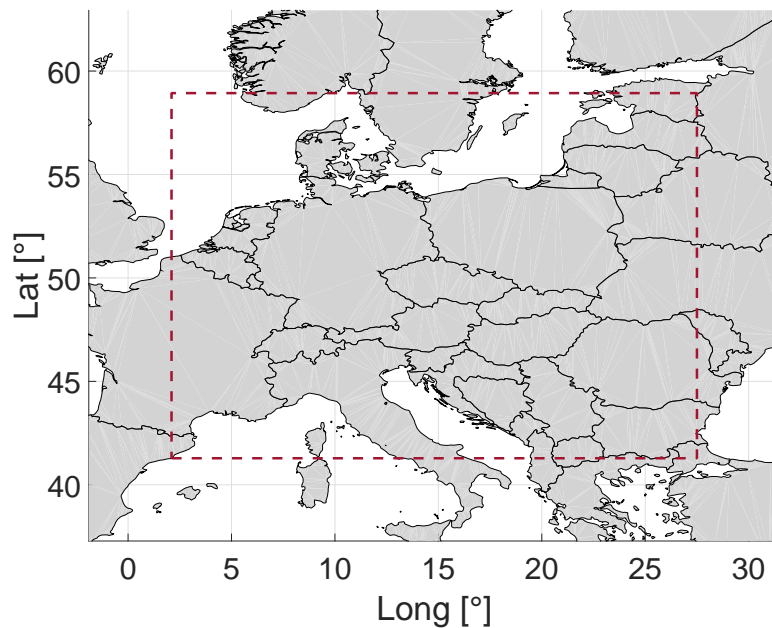
Pro případně ověření dalších kombinací přetížení systému je *.slx* soubor dostupný na příloženém CD.

12.3 Simulace velkého rozsahu

Předchozí simulace ověřovala čistě matematické vlastnosti systému. Nyní přistoupíme k reálné aplikaci. Pro simulaci reálného zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz byla zvolena oblast s přibližným centrem umístěným v České republice. Konkrétní hranice této oblasti jsou:

$$\begin{aligned} 41,28715277^\circ\text{N} - 58,94064047^\circ\text{N} \\ 2,10335666^\circ\text{E} - 27,49999997^\circ\text{E} \end{aligned} \quad (12.35)$$

Mapu oblasti s vyznačenými hranicemi je možné vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Oblast simulace

12.3.1 Simulační prostředí

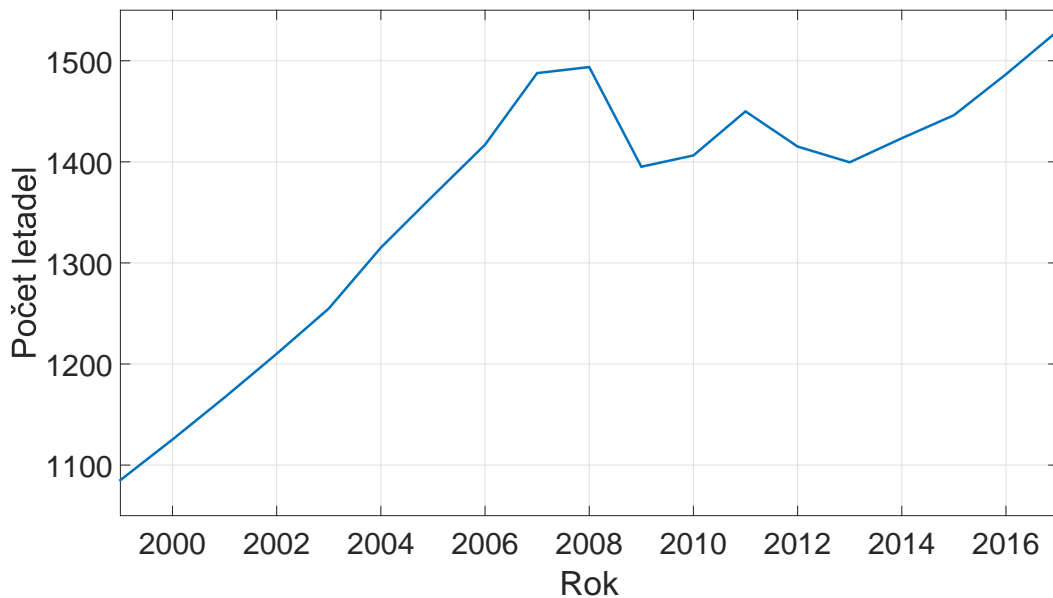
První vstupní parametr, který musíme k vstupním parametrům ze sekce 12.1 doplnit, je plošná hustota letadel v naší oblasti. Jako referenční hodnota byla vzata plošná hustota zjištěná organizací EUROCONTROL ze snímků vzdušného prostoru v oblasti o poloměru 300 NM se středem umístěným v Bruselu. Pod tuto oblast spadá 5 významných TMA a to: Brusel, Londýn, Frankfurt, Paříž a Amsterdam. Tvorba snímků letového prostoru byla provedena v roce 1999, kdy počet letadel ve vzduchu v této oblasti byl 1085.[31]

Abychom dostali hodnotu odpovídající roku 2017 bylo provedeno postupné navýšení hodnot podle meziročního růstu IFR pohybů v oblasti ESRA z predikčních zpráv vydávaných organizací EUROCONTROL. Pro meziroční nárůst k roku 2000 až 2003 nebyla dostupná skutečná historická data a byla proto použita hodnota 3,7%, která odpovídá predikovanému průměrnému ročnímu nárůstu mezi roky 1997 a 2015. Jako meziroční nárůst IFR pohybů pro rok 2017 byla použita predikovaná hodnota z nejaktuálnější dostupné predikce organizace EUROCONTROL. Použité

hodnoty meziročního růstu je možné vidět v tabulce 9. Vývoj počtu letadel v oblasti o poloměru 300 NM je možné vidět na obrázku 28.[1][31][32][33][34]

Tabulka 9: Meziroční nárůst IFR pohybů

Rok	Meziroční nárůst [%]	Rok	Meziroční nárůst [%]
2000	3,7	2009	-6,6
2001	3,7	2010	0,8
2002	3,7	2011	3,1
2003	3,7	2012	-2,4
2004	4,8	2013	-1,1
2005	3,9	2014	1,7
2006	3,7	2015	1,6
2007	5	2016	2,8
2008	0,4	2017	2,9



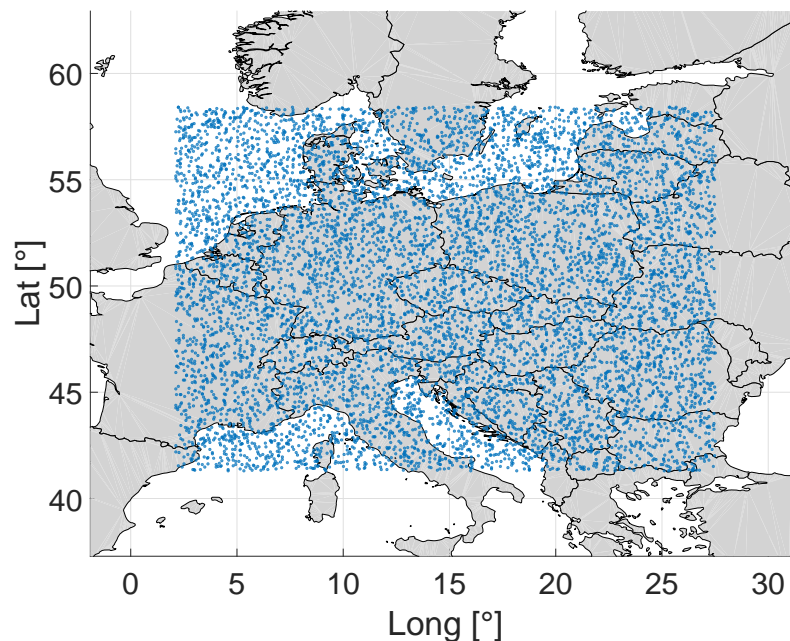
Obrázek 28: Vývoj počtu letadel v oblasti o poloměru 300 NM

S využitím počtu letadel ve výše zmíněné oblasti k roku 2017 dostaneme hodnotu plošné hustoty

$$\rho = \frac{n_{2017}}{\pi r^2} = \frac{1529,73}{\pi \cdot 300^2} = 0,0054 \text{ letadel} \cdot \text{NM}^{-2} \quad (12.36)$$

Samotné rozdělení letadel do námi uvažovaného prostoru na obrázku 27 je provedeno formou rovnoměrného rozdělení do sítě 1 NM × 1 NM čtverců. V jednom čtverci může být pouze jedno letadlo. Pokud by byla letadla v sousedních čtvercích, můžeme předpokládat, že se jedná o jiné letové hladiny. Tento předpoklad zajistí, že mezi letadly nebude docházet k TCAS TA ani RA, jak bylo stanoveno v sekci 4.4.3.

Rozdělení letadel v prostoru je možné vidět na obrázku 29, kdy se celkem jedná o 8732 letadel.



Obrázek 29: Rozmístění letadel

Dosah vysílání systémů TCAS II a ADS-B 1090ES letadel byl stanoven na 50 NM.

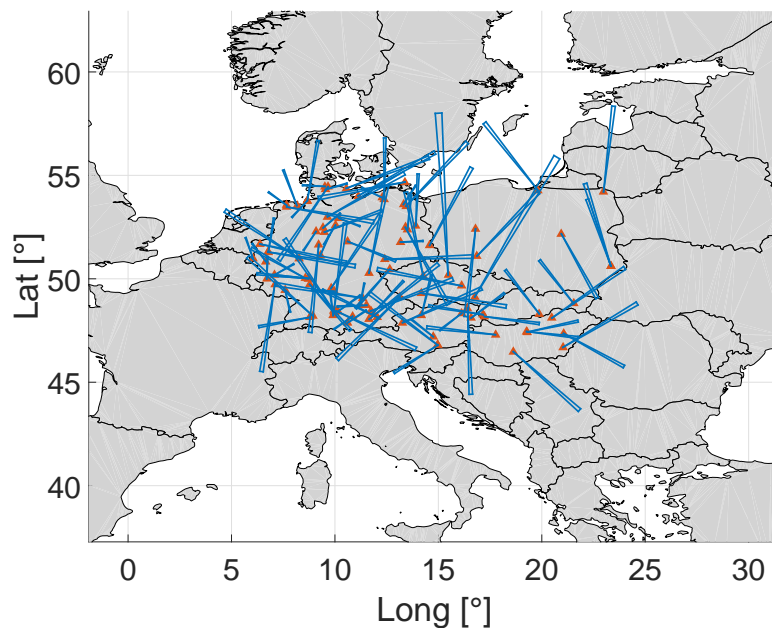
Množina radarů, se kterou se v simulaci uvažuje, byla převzata z databáze radarů z bakalářské práce [3], jež obsahuje shrnutí parametrů radarů z interních dokumentů organizace EUROCONTROL pro Německo, Rakousko, Českou republiku, Maďarsko, Polsko a Slovenskou republiku. V databázi bylo provedeno sjednocení vícenásobně uvedených radarů z důvodu přidělení několika IC kódů. Dále byly odstraněny radary testovací. Pokud nebyly pro radary poskytnuty údaje o dosahu nebo úhlové rychlosti, byl použit modus hodnot ostatních radarů. Rozmístění radarů ve zvolené oblasti je možné vidět na obrázku 30. Seznam výsledných radarů a jejich parametrů je uveden v tabulce 11 v příloze B.1.

Rozmístění radarů a dosah hlavních laloků ovlivnily určení přesných hranic námi zvolené oblasti simulace. Hranice oblasti viditelné v rovnici 12.35 byly určeny tak, aby byly celé hlavní laloky všech radarů při jakémkoli natočení v oblasti rozmístění letadel.

Šířka hlavního laloku radarů se liší dle výrobce a implementace. Jako referenční hodnota byla zvolena šířka $2,4^\circ$. Zjištění konkrétního tvaru a velikosti postranních laloků pro sekundární radary je nad rámec této práce. Náhradou za to byl zvolen tvar kruhové výseče s centrálním úhlem $357,6^\circ$ a poloměrem 2% z dosahu konkrétního radaru.

Další důležitou otázkou, kterou je nutné přesně specifikovat, je zavedení pohybu do simulace. Specifikace modelu pohybu letadel je nad rámec této práce. Můžeme proto při úvaze zvoleného rovnoměrného rozdělení letadel v prostoru uvažovat, že při zvolení náhodného pohybu by stejný počet letadel z určitého sektoru vylétal, jako do něj vlétal. Toto by oproti statickému rozmístění letadel nemělo na výsledky simulace viditelný vliv a proto není pohyb letadel v simulaci zaveden.

Pohyb laloků radarů již hraje na výsledný průběh reinterrogation rate značnou roli a je proto



Obrázek 30: Polohy radarů

v simulaci zaveden. Počáteční natočení radarů je generováno náhodně s využitím rovnoměrného rozdělení. Samotné zavedení pohybu provedeme formou regenerace konfigurace po ustálení celkových intenzit. Tento přístup má sám o sobě jisté nedostatky. Je ale pro naše účely plně postačující. Přepočítávání konfigurace je provedeno po době odpovídající době ozáření letadla radarem s největší úhlovou rychlostí. Tím se zajistí, že nebude docházet k vynechání určitých sektorů prostoru radary s větší ω .

12.3.2 Výpočetní náročnost

Rozsah simulace pokrývá 8732 letadel a 96 radarů. Budeme-li chtít provést výpočty pro tento model, dostaneme se k soustavě o přibližně 353 120 nelineárních diferencních rovnicích 2. řádu. Tato soustava odpovídá řádu systému 706 240. Počet iterací nutných pro ustálení celkových intenzit zjištěný při testování odpovídá 150 iteracím. Toto je značná výpočetní náročnost a bude proto zavedeno zjednodušení ve formě neuvažování kompletní provázanosti celého prostoru pomocí vysílání TCAS UF 0. Ačkoli by se mohlo zdát, že se jedná o rozsáhlé zjednodušení, je nutno podotknout, že frekvence vysílání dotazů UF 0 má hodnotu $0,0167 \text{ zpráv} \cdot \text{s}^{-1}$. Jelikož bude provedena simulace doby odpovídající periodě rotace radaru s nejnižší úhlovou rychlostí, což odpovídá 12 s, nemá tato frekvence viditelný vliv na výsledky simulace.

Zavedení tohoto zjednodušení umožní snížení počet nelineárních diferencních rovnic 2. řádu na 500-1000, v závislosti na aktuální konfiguraci.

12.3.3 Výsledky

Výsledný průměrný celkový reinterrogation rate všech radarů, za celou dobu trvání simulace, je možné vidět v tabulce 10. Celkovým reinterrogation rate se myslí reinterrogation rate vypočtený z kombinace všech dílčích toků radarů na jednotlivá letadla. Tedy

$$\xi_c = \frac{\sum_{j \in I} \lambda(n+1)_{\Gamma-A_j}}{\sum_{j \in I} \lambda_{0_{\Gamma-A_j}}}, \quad (12.37)$$

kde I odpovídá množině dle rovnice 11.3.

Průběh celkových reinterrogation rate pro radary v České republice je možné vidět na obrázcích 49 až 53 v příloze B.2. Jejich název je doplněn o ID odkazující na tabulku se seznamem radarů 11. Průběh celkových reinterrogation rate několika zahraničních radarů je možné vidět na obrázcích 54 až 58 v příloze B.2.

Pohlédneme-li na a hodnoty průměrných ξ_c , lze si všimnout relativně nízkých hodnot. Jak můžeme ale z časového průběhu ξ_c vidět, nejedná se o kontinuální nízké hodnoty. Dochází k značným nárůstům při určitých kombinacích překrytí laloků radarů.

Řízení letového provozu České republiky udává hodnotu reinterrogation rate 1,4. Jedná se o poměrně vyšší hodnotu vůči výsledkům simulace. Hlavním důvodem je značné zjednodušení analyzované oblasti, kdy neuvažujeme systémy jako WAM. Také nebereme v úvahu stálé dotazování formáty módu A/C, různá vybavení letadel a mnoho dalšího. Například při zavedení modelu systému TCAS, který více odpovídá současnému vybavení, můžeme díky kontinuální provázanosti předpokládat celkové zvednutí hladin reinterrogation rate u radarů.

Zvážíme-li tedy vstupní parametry a předpoklady simulace, lze výsledek považovat za odpovídající a simulaci za úspěšnou. Pro dosažení přesnějších výsledků je nutné hlubší poznání skutečného chování dílčích systémů pracujících na pásmech 1030/1090 MHz.

Samotná implementaci matematického modelu v programovacím jazyce Matlab je dostupná v příloze. Implementace je rozšířená i o výsledné hodnoty všech proměnných z 12 s simulace.

Tabulka 10: Průměrný reinterrogation rate všech radarů za 12 s

ID	$\bar{\xi}_c[1]$	ID	$\bar{\xi}_c[1]$	ID	$\bar{\xi}_c[1]$	ID	$\bar{\xi}_c[1]$
1	1,052	25	1,050	49	1,024	73	1,051
2	1,053	26	1,048	50	1,047	74	1,047
3	1,048	27	1,044	51	1,054	75	1,070
4	1,049	28	1,036	52	1,032	76	1,062
5	1,052	29	1,043	53	1,044	77	1,096
6	1,035	30	1,043	54	1,022	78	1,093
7	1,030	31	1,054	55	1,027	79	1,032
8	1,041	32	1,060	56	1,043	80	1,030
9	1,044	33	1,048	57	1,029	81	1,030
10	1,050	34	1,045	58	1,023	82	1,039
11	1,024	35	1,052	59	1,026	83	1,043
12	1,044	36	1,034	60	1,046	84	1,043
13	1,035	37	1,060	61	1,024	85	1,042
14	1,036	38	1,043	62	1,047	86	1,038
15	1,039	39	1,022	63	1,028	87	1,028
16	1,037	40	1,060	64	1,027	88	1,051
17	1,035	41	1,067	65	1,035	89	1,032
18	1,043	42	1,029	66	1,033	90	1,032
19	1,033	43	1,028	67	1,030	91	1,050
20	1,034	44	1,029	68	1,029	92	1,032
21	1,032	45	1,030	69	1,052	93	1,044
22	1,025	46	1,029	70	1,025	94	1,033
23	1,024	47	1,061	71	1,032	95	1,031
24	1,053	48	1,029	72	1,052	96	1,041

13 Závěr

Zaměřením této bakalářské práce bylo na velmi aktuální problematiku v letectví - zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz.

Z počátku byla provedena charakterizace chování palubního odpovídáče letadel, kdy jsme se zaměřili na specifikaci dotazů a odpovědí vzhledem k jejich délce a použitým modulačním technikám. Také jsme uvedli podrobné specifikace limitů počtu odpovědí, které standardy na výrobce odpovídáčů kladou a které by mohly sloužit pro případné budoucí upravení implementace matematického modelu.

Po uvedení požadovaných limitů jsme si odůvodnili, proč je možné dosáhnout přetížení odpovídáčů dotazy. Toto je momentální reálná hrozba, která způsobí neposkytování odpovědí letadly, což představuje velkou bezpečnostní hrozbu z hlediska zajištění služby řízení letového provozu.

Následovalo popsání sekvence zpracování dotazu. Tohoto popisu bylo hojně využito při tvorbě matematického modelu.

Po chování XPDR jsme se zaměřili na metodu umožňující snížení počtu nutných dotazů radaru a tím snížení zatížení radiofrekvenčního pásma 1030/1090 MHz. Jednalo se o aplikaci Dataflash, která by umožňovala uzavírání takzvaných kontraktů mezi radary a letadly. Tento kontrakt by zajistil, že by letadlo poskytovalo radaru informace o změně některých parametrů, u kterých se předpokládá, že k jejich změně dochází zřídka. Ačkoli by se mohlo jednat o poměrně efektivní metodu, není aktuálně využívána z důvodu zavedení identifikačních SI kódů radarů.

Cílem popisu této aplikace bylo porozumění principu funkce a pochopení dopadů použití na zatížení příslušných radiofrekvenčních pásem. Do budoucna by bylo velmi zajímavé implementovat Dataflash aplikaci do modelu zatížení těchto pásem. Umožnilo by to zjistit reálnější odhad dopadu zavedení této aplikace v reálném provozu.

Na závěr popisu Dataflash aplikace bylo uvedeno několik jiných přístupů, které by ke snížení zatížení měli pomoci.

Hlavním zaměřením této práce byla specifikace stochastického modelu ve formě soustavy nelineárních diferenčních rovnic. Nejprve jsme si specifikovali základní principy, jako komunikaci formou Pure Aloha protokolu. Následovalo uvedení předpokladů modelu, včetně jejich odůvodnění.

Sestavení matematického modelu bylo provedeno podrobným odvozením všech částí, kde jsme se od jedné rovnice dostali k celé soustavě nelineárních diferenčních rovnic. Vzájemné vztahy soustavy způsobují kontinuální provázanost v celém systému, kdy při dostatečné hustotě letadel bude nutnost vzájemně rovnicemi provázat celý prostor problému.

Odvození pravděpodobnosti kolize dotazů a odpovědí proběhlo přes jejich dílčí části. Značné úsilí bylo vynaloženo na zohlednění různých délek zpráv, interference s All-Call periodou či vlivem Whisper Shout metody. Snaha byla o co nejpřesnější specifikaci a minimum kompromisů, které by zanášely do výsledné aplikace modelu chyby. Zohledněn byl také vliv postranních laloků a adresnosti zpráv.

Po samotném odvození následoval obecný zápis, který by měl sloužit jako shrnutí veškerých předchozích úvah a usnadnění implementace matematického modelu.

Poslední částí této práce bylo praktické aplikování předešlého matematického modelu. Nej-

prve byla provedena simulace malého rozsahu v simulačním prostředí Simulink. Tato simulace nám umožnila prozkoumat šíření nestability v systému. Následovala simulace velkého rozsahu vytvořená v programovacím jazyce Matlab, kde byla provedena aplikace na oblast centrální Evropy. Matematický model nám umožnil spočítat reinterrogation rate všech zavedených radarů, včetně prozkoumání jejich časového průběhu. Simulaci lze vzhledem k vstupním parametrům považovat za úspěšnou.

Matematický model a následné simulace měly značné množství předpokladů. Je však pravdou, že většinu z nich by mělo být možné do budoucna odstranit a model byl s touto myšlenkou vytvořen. Hlavní překážkou v odstranění těchto předpokladů je nedostatek informací o detailním fungování skutečně implementovaných systému. Tyto informace nejsou firmami poskytovány.

Reference

- [1] *EUROCONTROL SEVEN - YEAR FORECAST FEBRUARY 2017: Flight Movements and Service Units 2017 - 2023*. EUROCONTROL, [online] 2017. Č. 17/01/02 - 100. [cit. 2017-06-11]. Dostupné také z: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/forecasts/seven-year-flights-service-units-forecast-2017-2023-Feb2017.pdf>.
- [2] *EUROCONTROL - VHF 8.33 kHz*. Eurocontrol, [online] c2017. [cit. 2017-06-11]. Dostupné také z: <http://www.eurocontrol.int/services/vhf-833-khz>.
- [3] KONEČNÝ, Filip. *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní.
- [4] *DO-181E: MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE STANDARDS FOR AIR TRAFFIC CONTROL RADAR BEACON SYSTEM/MODE SELECT (ATCRBS/MODE S) AIRBORNE EQUIPMENT*. RTCA/DO-181E. Washington DC: RTCA, 2011.
- [5] OPPENHEIM, Alan V.; VERGHESE, George C. *SIGNALS, SYSTEMS, and INFERENCE: Class Notes for 6.011: Introduction to Communication, Control and Signal Processing Spring 2010*. Boston: Massachusetts Institute of Technology, [online] 2010. [cit. 2017-06-17]. Dostupné také z: https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-011-introduction-to-communication-control-and-signal-processing-spring-2010/readings/MIT6_011S10_notes.pdf.
- [6] *ČESKÁ REPUBLIKA. PŘEDPIS O CIVILNÍ LETECKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SLUŽBĚ SVAZEK IV PŘEHLEDOVÝ RADAR A PROTISRÁŽKOVÝ SYSTÉM: L 10/IV*. Ministerstvo dopravy ČR, 2003, ročník 2014. Dostupné také z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [7] *Mode S - Differential Phase Shift Keying (DPSK)*. Radartutorial.eu [online]. Christian Wolff, 1998-2017. [cit. 2017-06-17]. Dostupné také z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr23.en.html>.
- [8] STEVENS, Michael C. *Secondary surveillance radar*. Boston: Artech House, c1988. ISBN 08-900-6292-7.
- [9] KUJI, Y.; AOKI, Y.; OOTOMO, H. *Secondary surveillance radar system, ground equipment for use therein, and response signal checking method applied thereto*. Google Patents, United States, US20050083226 A1, 2005. Dostupné také z: <https://www.google.cz/patents/US20050083226>. US Patent App. 10/933,210.
- [10] *MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE SPECIFICATION FOR SECONDARY SURVEILLANCE RADAR MODE S TRANSPONDERS*. ED-73E. Malakoff France: EUROCAE, 2011.
- [11] *EASA Annual Safety Review 2014*. [online]. European Aviation Safety Agency, 2015. [cit. 2017-07-01]. Dostupné také z: <http://asndata.aviation-safety.net/industry-reports/EASA-Annual-safety-review-2014.pdf>.

- [12] ICAO, *AERONAUTICAL SURVEILLANCE PANEL (ASP) ASP TECHNICAL SUB-GROUP MEETING In Preparation for the 12 th ASP Working Group Meeting: THE IMPACT ON TRANSPONDER OCCUPANCY GENERATED BY SURVEILLANCE SYSTEMS IN GENERAL*. [online]. Prepared and presented by Steffen Marquard, 2012. [cit. 2017-06-18]. Dostupné také z: <http://adsb.tc.faa.gov/ICAO-TSG/TSG23-Ft.Lauderdale-2012.htm>.
- [13] ICAO, *AERONAUTICAL SURVEILLANCE PANEL (ASP) WORKING GROUP MEETING: Update on the Development of Typical Transponder Occupancy Characteristics*. Presented by Chris Tourigny, United States Federal Aviation Administration, 2013.
- [14] *Doc 9684: Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems*. 3rd ed. Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2004.
- [15] *Doc 9688: Manual on Mode S Specific Services*. 2nd ed. Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2004.
- [16] ČESKÁ REPUBLIKA. *O CIVILNÍ LETECKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SLUŽBĚ SVAZEK III - KOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY: L 10/III*. Ministerstvo dopravy ČR, 2004, ročník 2016. Dostupné také z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [17] *Doc 9871: Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter*. Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2008.
- [18] PETROCHILOS, N.; VEEN, A. J. van der. Algebraic Algorithms to Separate Overlapping Secondary Surveillance Radar Replies. *IEEE Transactions on Signal Processing*. [online]. 2007, roč. 55, č. 7, s. 3746–3759. [cit. 2017-06-24]. ISSN 1053-587X. Dostupné z DOI: 10.1109/TSP.2007.894248.
- [19] NEUMAN, Ondřej. *Optimization of WAM System Interrogation in Mode S*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní.
- [20] GALATI, G.; PIRACCI, E. G.; PETROCHILOS, N.; FIORI, F. 1090 MHz channel capacity improvement in the Air traffic control context. In: *2008 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles*. [online] 2008, 1–5. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z DOI: 10.1109/TIWDC.2008.4649030.
- [21] WEBER, M.E.; WOOD, M.L.; FRANZ, J.R.; CONWAY, D.; CHO, J.Y.N. *Secondary Surveillance Phased Array Radar (SSPAR): Initial Feasibility Study*. [online]. Lincoln Laboratory, MIT, 2014. [cit. 2017-06-24]. Dostupné také z: https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Weber_2014_ATC-416.pdf.
- [22] CLEGG, Richard G. *Lecture 6.5: Continuous time Markov chains*. University of York: [online], [cit. 2017-07-01]. Dostupné také z: http://www.richardclegg.org/previous/networks2/Lecture6.5_06.pdf.
- [23] ROSS, Sheldon M. *Introduction to probability models*. 10th ed. Boston: Academic Press, c2010. ISBN 978-0-12-375686-2.

- [24] KASSAM, Saleem A. *TCOM 370: Principles of Data Communication: LOCAL AREA NETWORKS AND THE ALOHA PROTOCOL*. University of Pennsylvania: [online], [cit. 2017-07-02]. Dostupné také z: https://www.seas.upenn.edu/~kassam/tcom370/n99_12.pdf.
- [25] PAHLAVAN, Kaveh; LEVESQUE, Allen H. *Wireless information networks*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005. ISBN 978-0-471-72542-8.
- [26] CHEN, S. *ELEC3030 Computer Networks: ALOHA Class of Multiple Access Protocols*. University of Southampton: [online], [cit. 2017-07-02]. Dostupné také z: <http://users.ecs.soton.ac.uk/sqc/EL336/CNL-7.pdf>.
- [27] ČESKÁ REPUBLIKA. *LETECKÝ PŘEDPIS EVROPSKÉ (EUR) REGIONÁLNÍ DOPLŇKOVÉ POSTUPY: L 7030*. Ministerstvo dopravy ČR, 2008, ročník 2013. Dostupné také z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [28] *DO-260B: Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)*. RTCA DO-260B. Washington DC: RTCA, 2011.
- [29] NOSEK, Jakub. *MODELOVÁNÍ MNOŽSTVÍ PŘENOSŮ GENEROVANÝCH SYSTÉMEM ACAS V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní.
- [30] SARWATE, Dilip. Can the union (or) probability of many non-mutually exclusive events be calculated recursively? *StackExchange: Cross Validated*. [online]. 2014 [cit. 2017-07-10]. Dostupné také z: <https://stats.stackexchange.com/a/97793/168352>.
- [31] *EUROCONTROL ADS Programme: High-Density 2015 European Traffic Distributions for Simulation*. 1.2. vyd. EUROCONTROL, [online] 2000. [cit. 2017-07-14]. Dostupné také z: http://www.asas-tn.org/library/eatmpsprogrammessandsdom/ads/traffic_distribution1_2.pdf.
- [32] *EUROCONTROL Seven-Year Forecast September 2013: Flight Movements and Service Units 2013 - 2019*. 1.0. vyd. EUROCONTROL, [online] 2013. [cit. 2017-07-14]. Dostupné také z: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/forecasts/seven-year-flights-service-units-forecast-2017-2023-Feb2017.pdf>.
- [33] *EUROCONTROL Medium-Term Forecast: Flight Movements 2006 - 2012 Volume 1*. 1.0. vyd. EUROCONTROL, [online] 2006. [cit. 2017-07-14]. Dostupné také z: http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/official-documents/forecasts/medium-term-forecast-vol1-2006-2012.pdf.
- [34] *EUROCONTROL Medium-Term Forecast: Flight Movements 2009 - 2015 Volume 1*. 1.0. vyd. EUROCONTROL, [online] 2009. [cit. 2017-07-14]. Dostupné také z: http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/official-documents/forecasts/medium-term-forecast-vol1-2009-2015.pdf.

Seznam obrázků

1	Mód A/C dotazy (PAM) [4]	15
2	Mód S DPSK [7]	16
3	Mód S dotazy (DPSK) [4]	16
4	Mód A/C odpovědi (PAM) [9]	17
5	Mód S odpovědi (PPM) [4]	17
6	Sekvence zpracování dotazu módu A/C [12]	22
7	Sekvence zpracování potlačeného dotazu módu A/C [12]	22
8	Sekvence zpracování dotazu módu S [12]	23
9	Sekvence zpracování potlačeného/neadresného dotazu módu S [12]	24
10	Architektura Specifických služeb módu S [4]	27
11	Vzestupná zpráva Dataflash aplikace - služební žádost[17]	31
12	Sestupná zpráva Dataflash aplikace[17]	34
13	Překrytí zpráv	39
14	Zranitelná doba	39
15	Schéma Pure Aloha protokolu	40
16	Průběh propustnosti	41
17	Řazení dotazů v All-Call periodě [14]	47
18	Úvodní schéma	49
19	Schéma diferenční rovnice	50
20	Vliv nelinearity diferenční rovnice	52
21	Detail maxima propustnosti	52
22	Konfigurace prostoru problému 1	54
23	Konfigurace prostoru problému 2	55
24	Schéma radaru Γ_2	56
25	Konfigurace prostoru problému - postranní laloky	68
26	Schéma včetně kolize odpovědí	71
27	Oblast simulace	83
28	Vývoj počtu letadel v oblasti o poloměru 300 NM	84
29	Rozmístění letadel	85
30	Polohy radarů	86
31	Celková intenzita radar - letadlo párů (stabilní)	97
32	Úspěšná intenzita radar - letadlo párů (stabilní)	97
33	Celkové intenzita letadlo - letadlo párů (stabilní)	98
34	Úspěšná intenzita letadlo - letadlo párů (stabilní)	98
35	Celková intenzita $\Gamma_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	99
36	Úspěšná intenzita $\Gamma_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	99
37	Celková intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	100
38	Úspěšná intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	100
39	Celková intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)	101
40	Úspěšná intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)	101

41	Celková intenzita $A_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	102
42	Úspěšná intenzita $A_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	102
43	Celková intenzita $A_2 \rightarrow A_1$ (nestabilní)	103
44	Úspěšná intenzita $A_2 \rightarrow A_1$ (nestabilní)	103
45	Celková intenzita $A_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)	104
46	Úspěšná intenzita $A_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)	104
47	Celková intenzita $A_3 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	105
48	Úspěšná intenzita $A_3 \rightarrow A_2$ (nestabilní)	105
49	Reinterrogation rate - Buchtův kopec (ID = 74)	109
50	Reinterrogation rate - Písek (ID = 75)	110
51	Reinterrogation rate - Praha (ID = 76)	111
52	Reinterrogation rate - Nepolisy (ID = 77)	112
53	Reinterrogation rate - Sokolnice (ID = 78)	113
54	Reinterrogation rate - Goetzenhain (ID = 13)	114
55	Reinterrogation rate - Linz (ID = 67)	115
56	Reinterrogation rate - Medina (ID = 83)	116
57	Reinterrogation rate - Krakow (ID = 87)	117
58	Reinterrogation rate - TAR Bratislava (ID = 93)	118

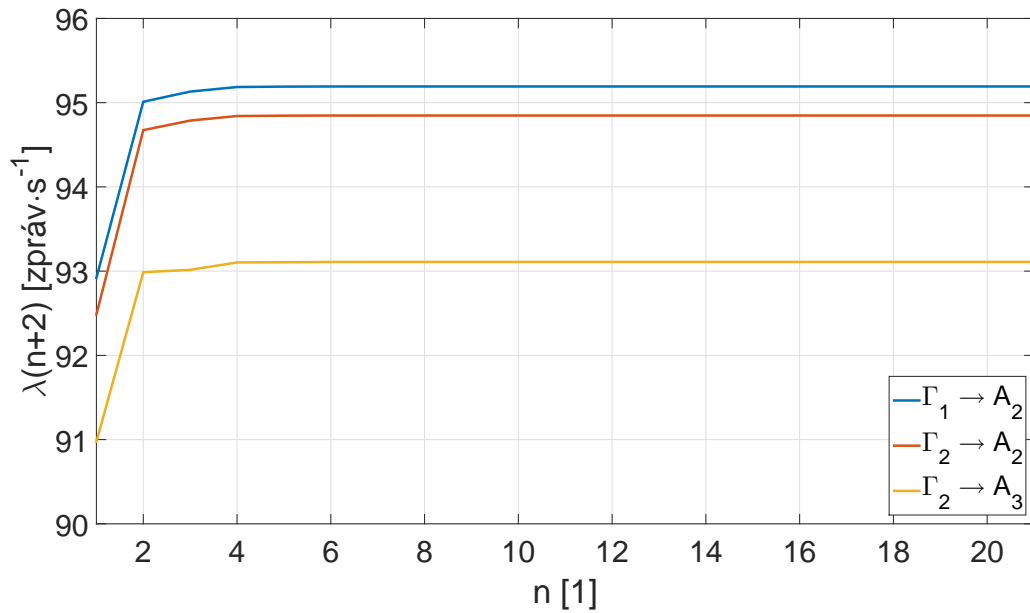
Seznam tabulek

1	Mód A/C odpovídač - časy zatížení [μ s]	24
2	Mód S odpovídač - časy zatížení [μ s]	25
3	Vzestupná zpráva Dataflash - pole EC [17]	33
4	Sestupná zpráva Dataflash - pole CI [17]	35
5	Periody ADS-B	44
6	Parametry Whisper Shout	45
7	Periody TCAS II	46
8	Periody extrakce datových registrů ŘLP ČR, s.p. 2012 [19]	80
9	Meziroční nárůst IFR pohybů	84
10	Průměrný reinterrogation rate všech radarů za 12 s	88
11	Seznam použitých radarů a jejich parametrů	106
11	Seznam použitých radarů a jejich parametrů (pokračování)	107
11	Seznam použitých radarů a jejich parametrů (pokračování)	108

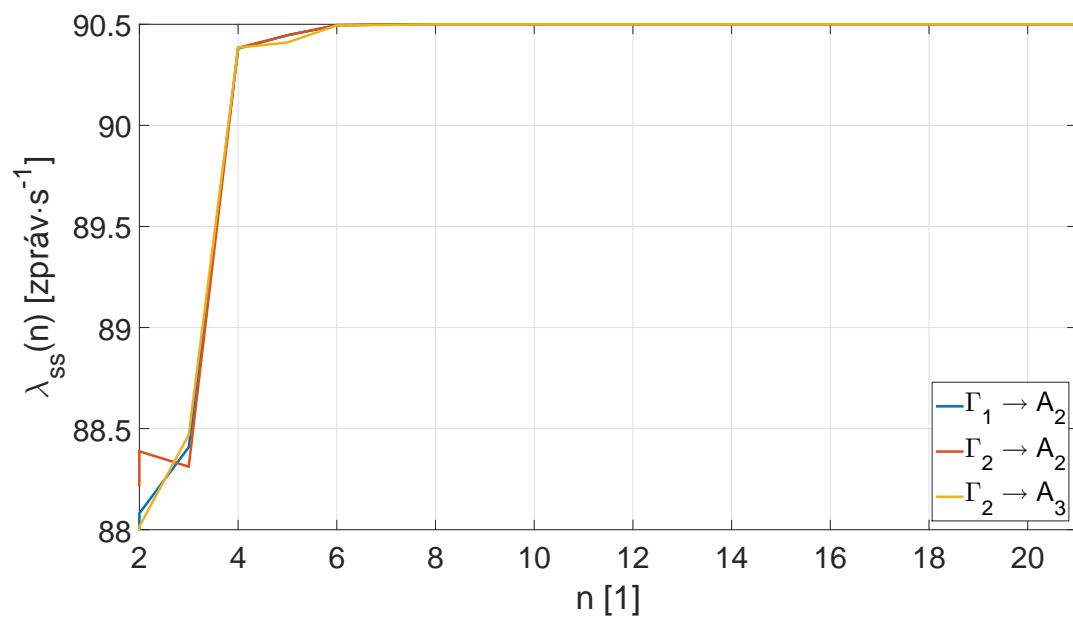
Přílohy

A Simulace malého rozsahu

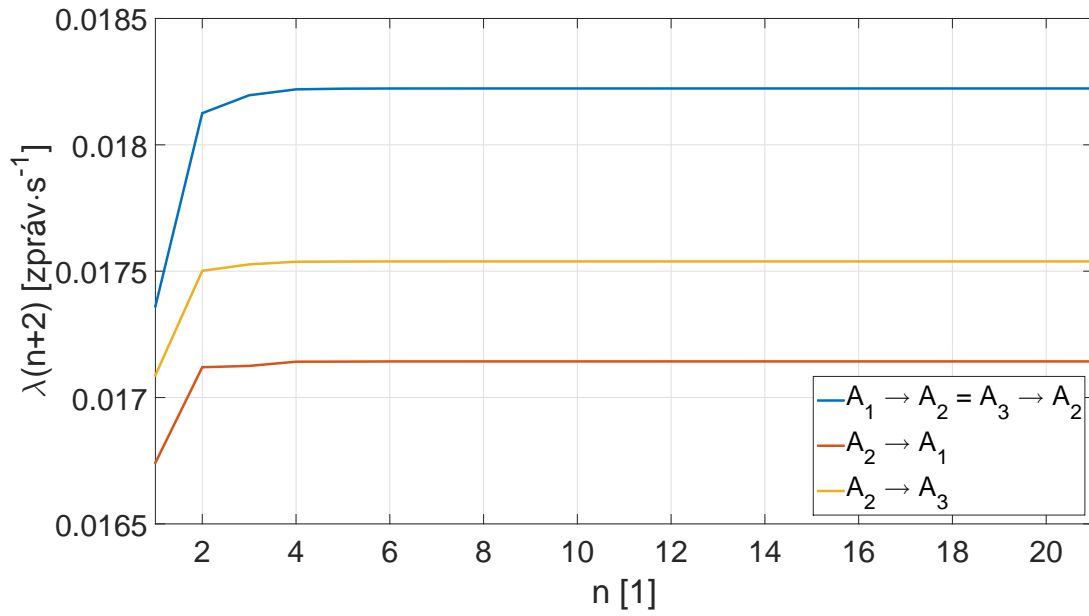
A.1 Grafický výstup - stabilní



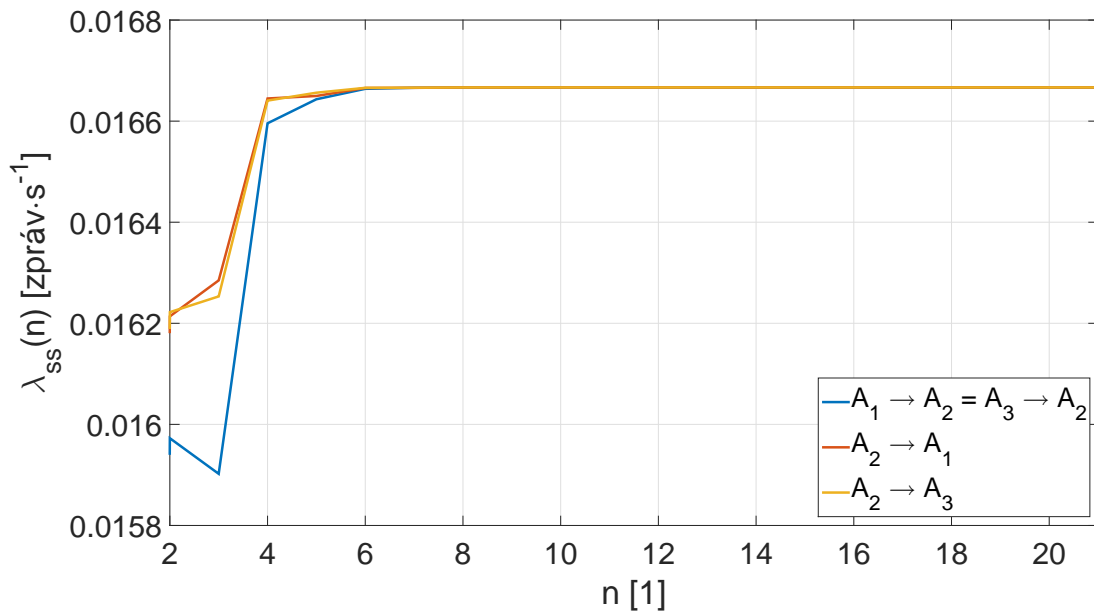
Obrázek 31: Celková intenzita radar - letadlo párů (stabilní)



Obrázek 32: Úspěšná intenzita radar - letadlo párů (stabilní)

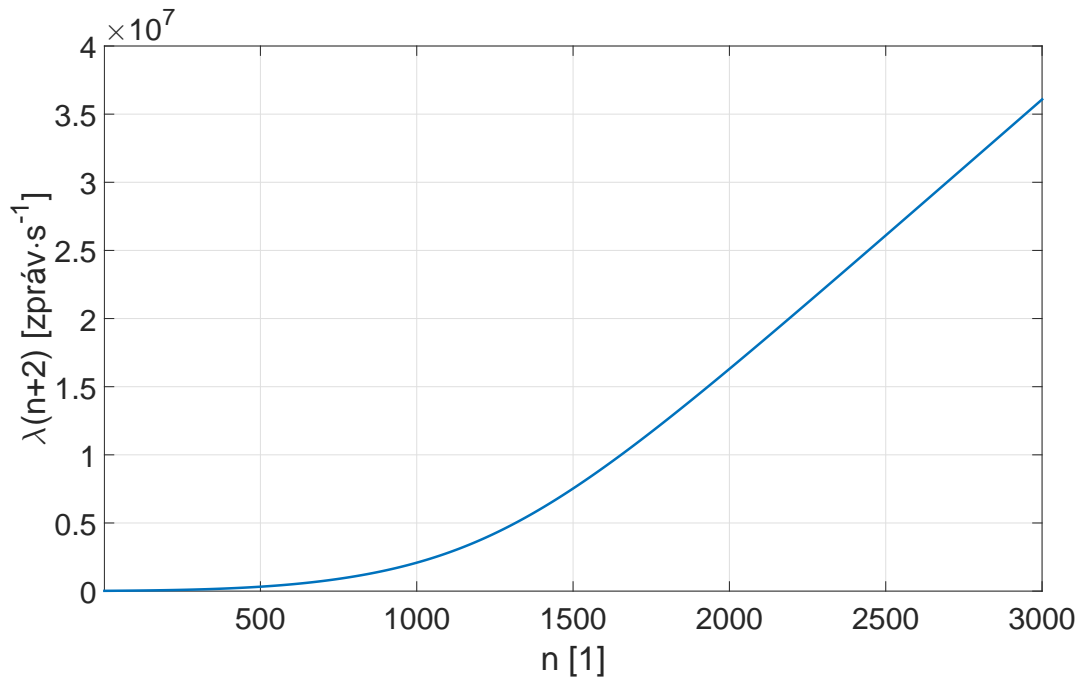


Obrázek 33: Celkové intenzita letadlo - letadlo párů (stabilní)

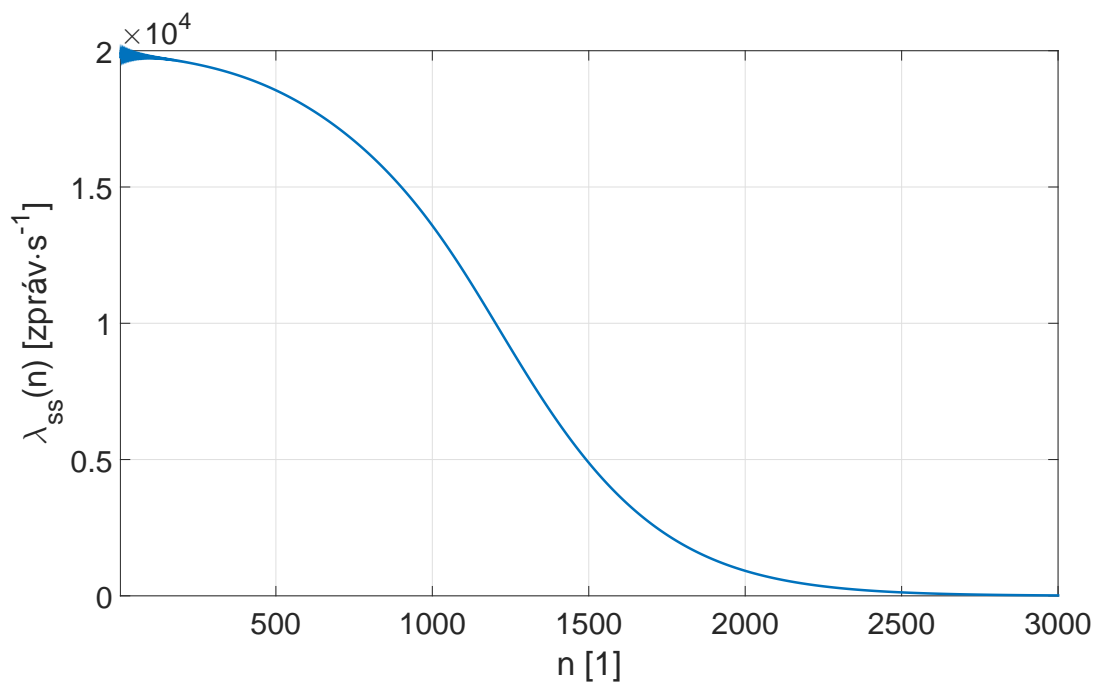


Obrázek 34: Úspěšná intenzita letadlo - letadlo párů (stabilní)

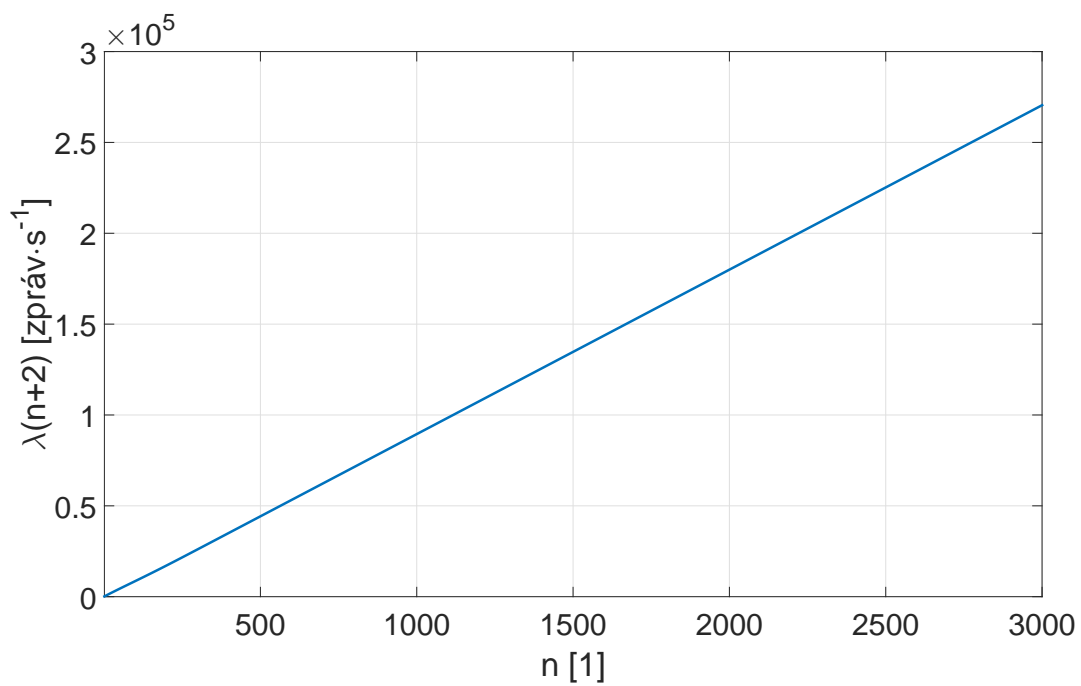
A.2 Grafický výstup - nestabilní



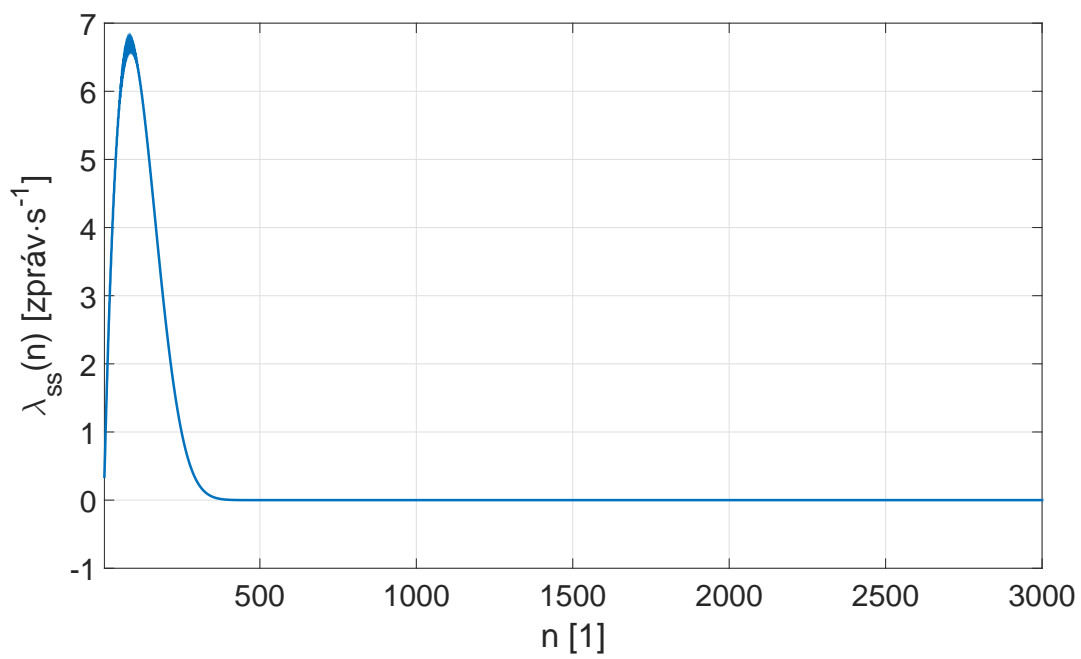
Obrázek 35: Celková intenzita $\Gamma_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



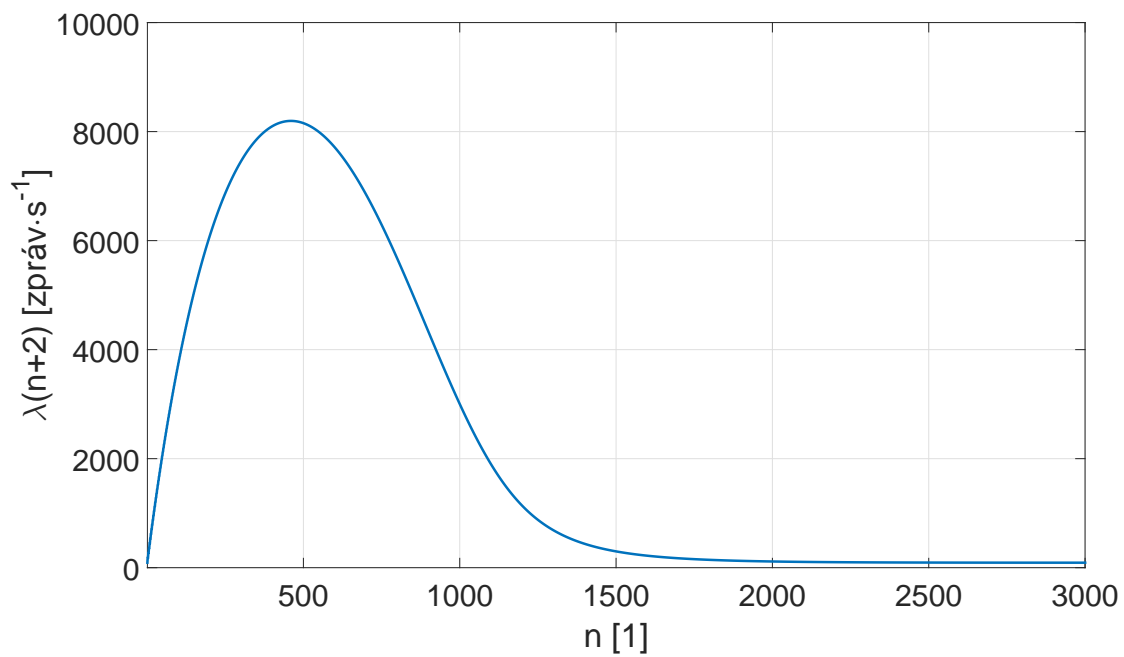
Obrázek 36: Úspěšná intenzita $\Gamma_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



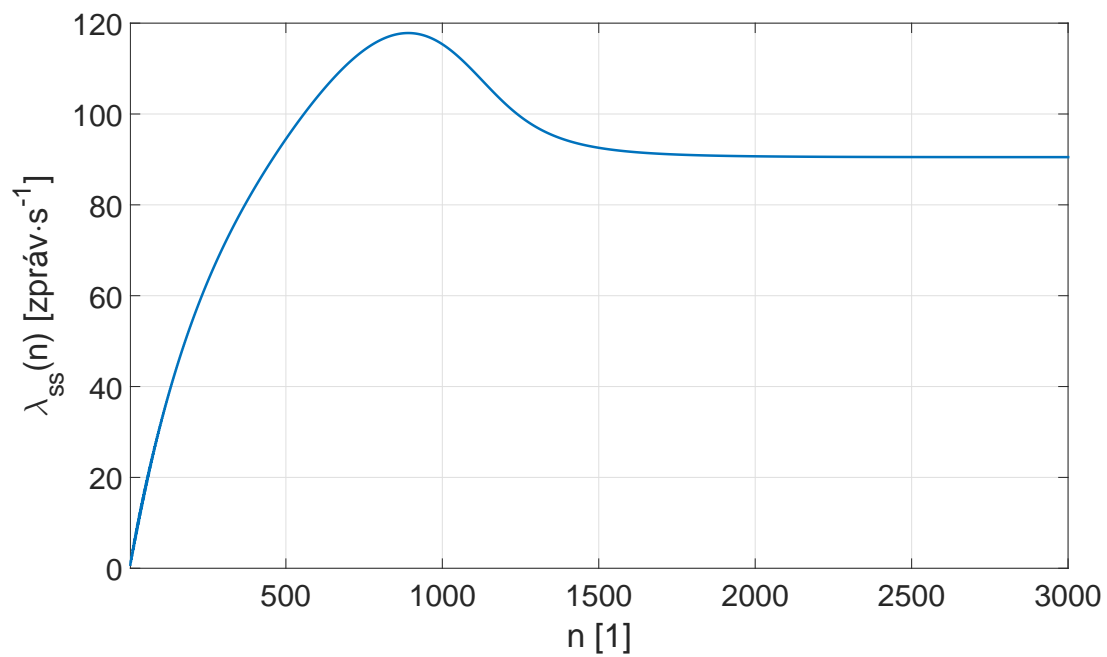
Obrázek 37: Celková intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



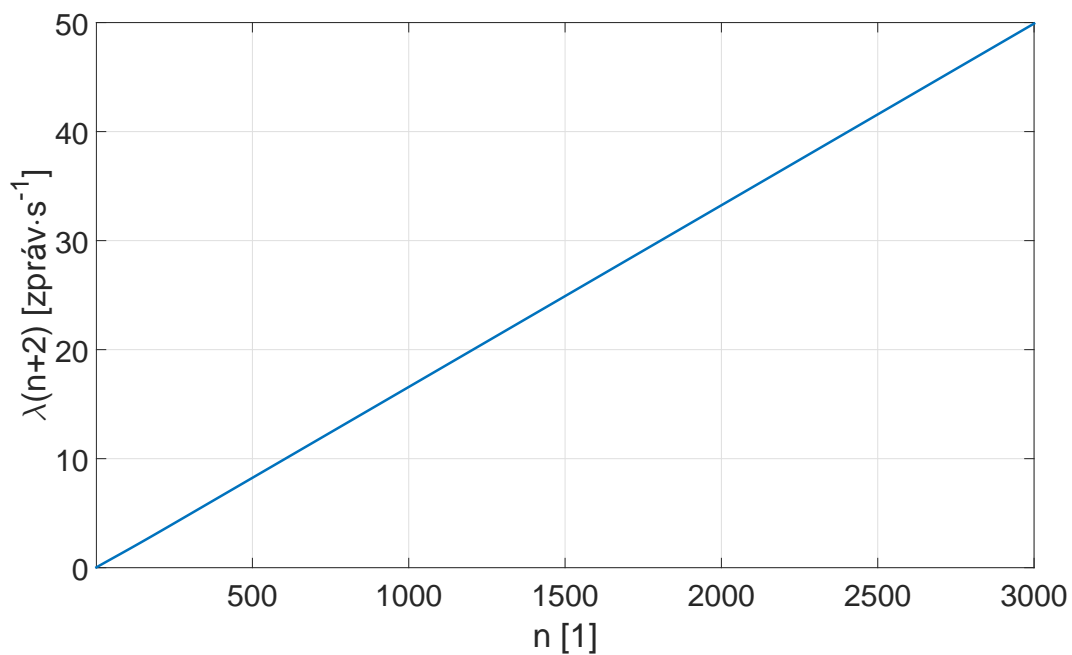
Obrázek 38: Úspěšná intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



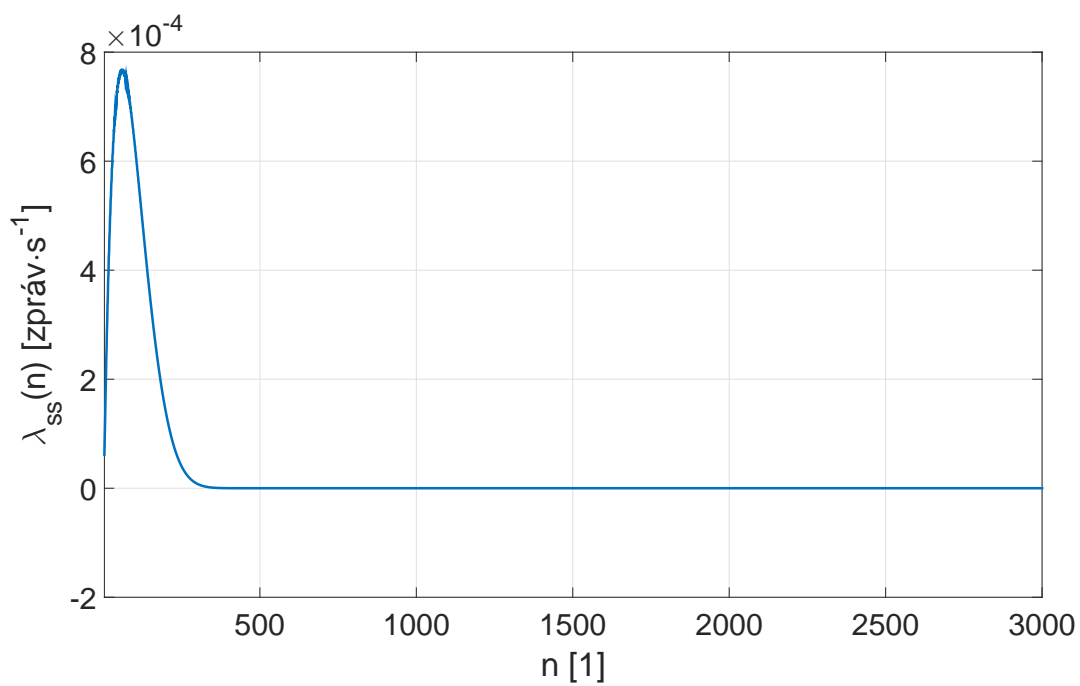
Obrázek 39: Celková intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)



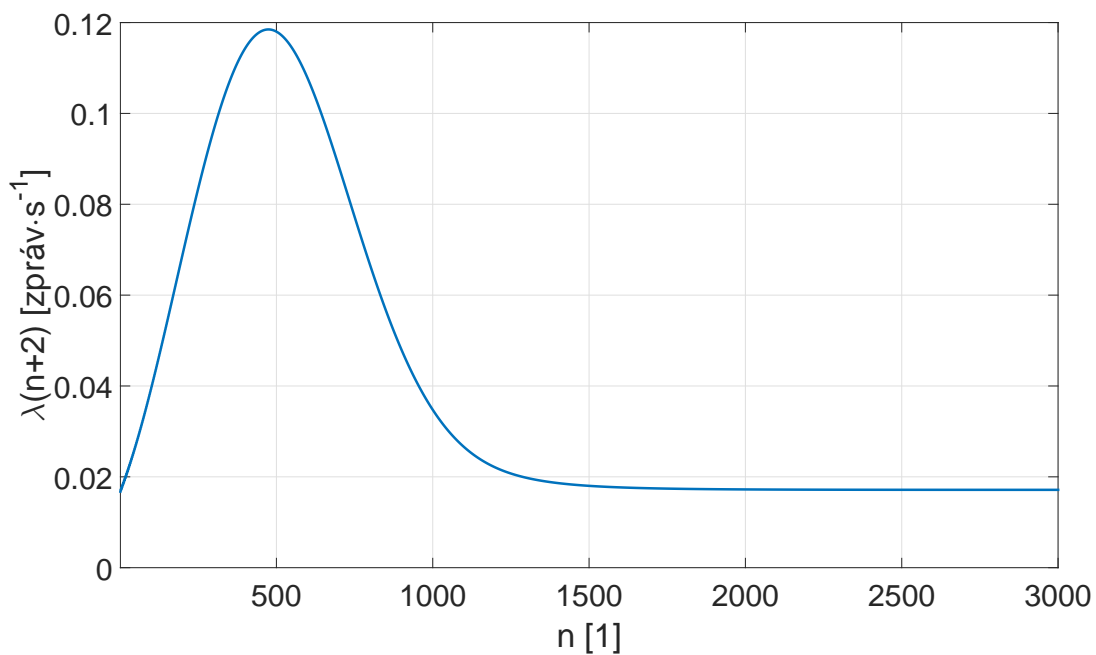
Obrázek 40: Úspěšná intenzita $\Gamma_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)



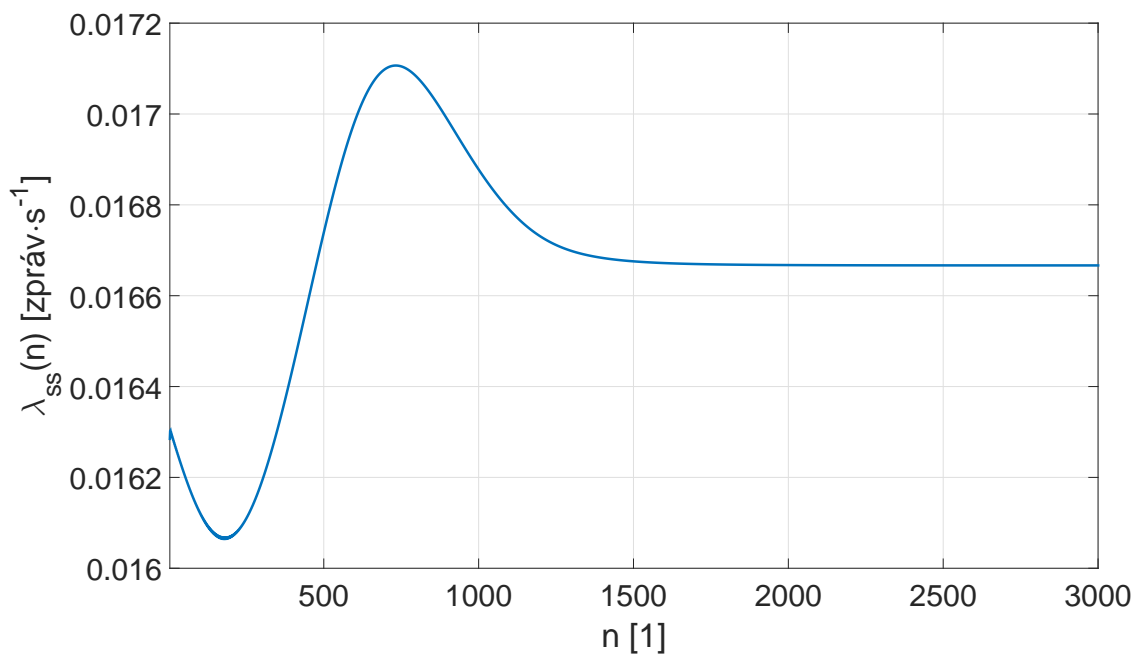
Obrázek 41: Celková intenzita $A_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



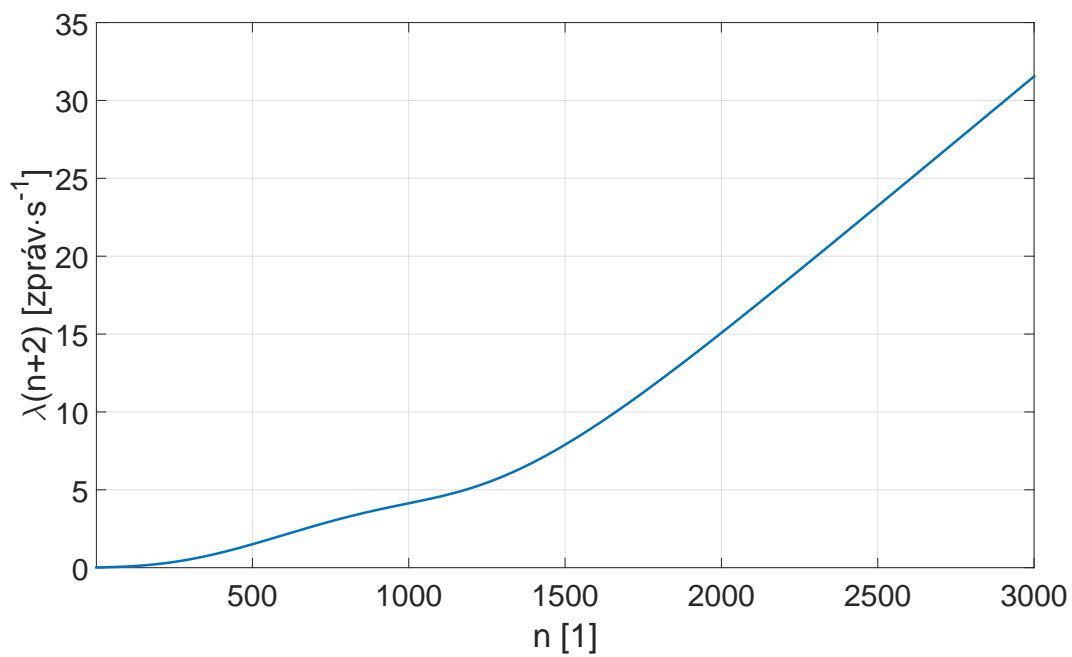
Obrázek 42: Úspěšná intenzita $A_1 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



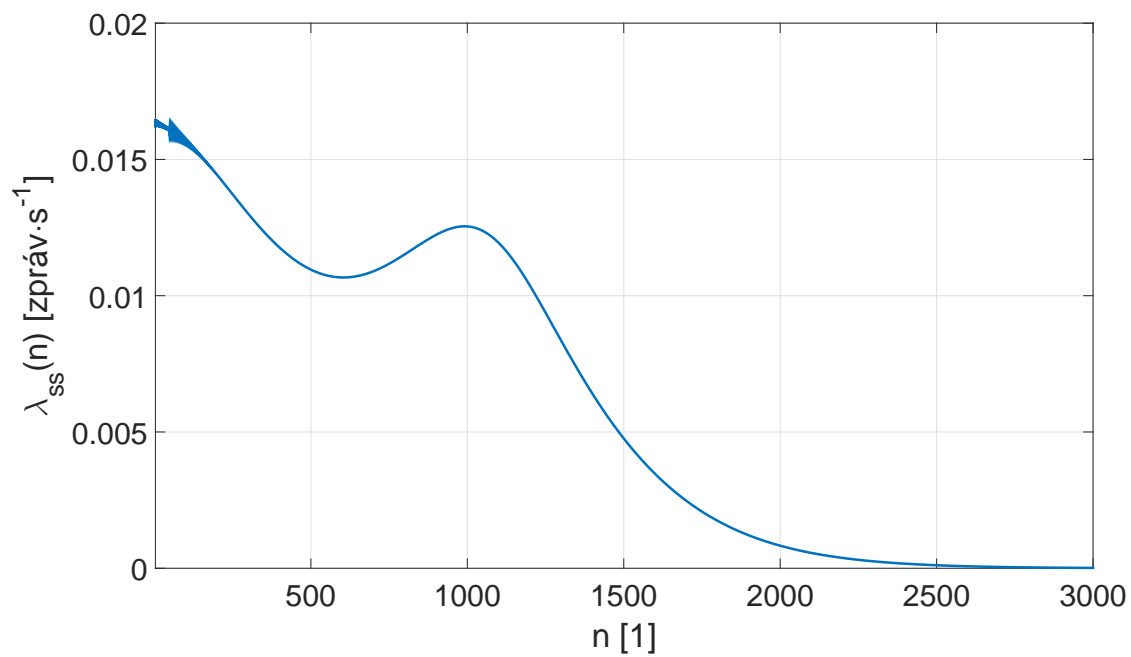
Obrázek 43: Celková intenzita $A_2 \rightarrow A_1$ (nestabilní)



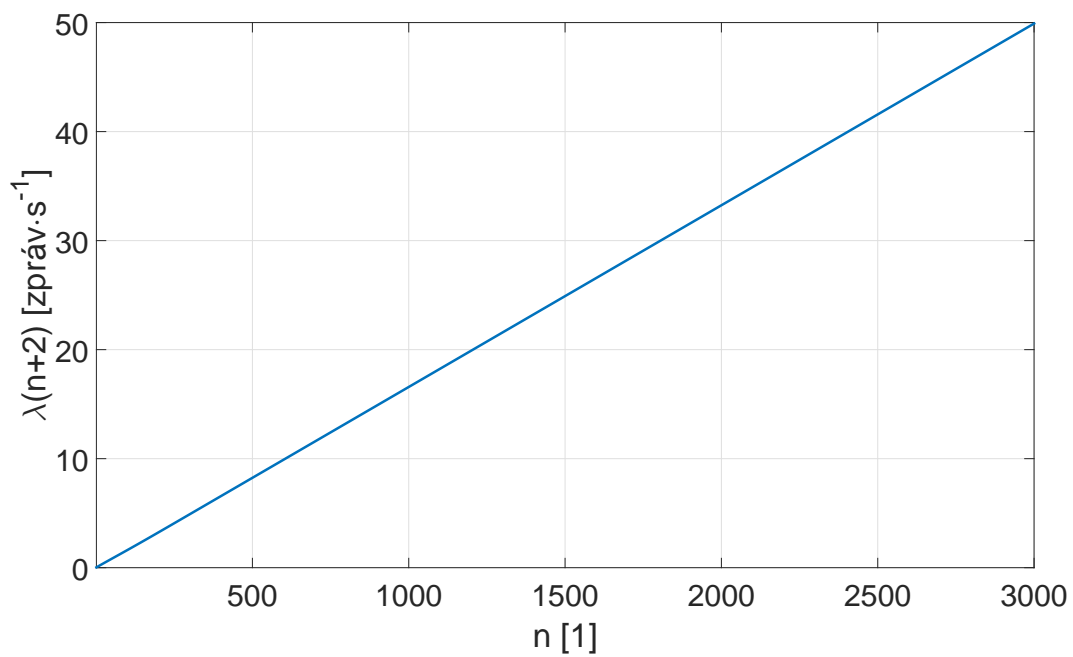
Obrázek 44: Úspěšná intenzita $A_2 \rightarrow A_1$ (nestabilní)



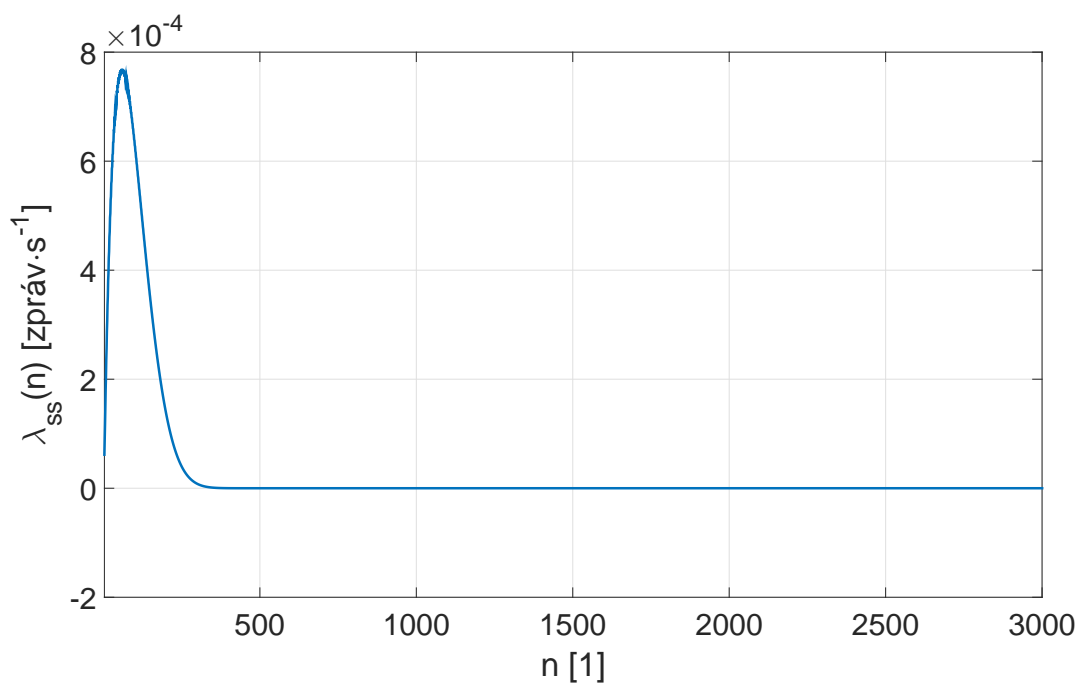
Obrázek 45: Celková intenzita $A_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)



Obrázek 46: Úspěšná intenzita $A_2 \rightarrow A_3$ (nestabilní)



Obrázek 47: Celková intenzita $A_3 \rightarrow A_2$ (nestabilní)



Obrázek 48: Úspěšná intenzita $A_3 \rightarrow A_2$ (nestabilní)

B Simulace velkého rozsahu

B.1 Seznam radarů

Tabulka 11: Seznam použitých radarů a jejich parametrů

ID	Country	Sensor ID	LAT[°]	LON [°]	Dosah [NM]	RPM [ot/min]
1	Germany	Greding	49,06139	11,35222	256	12
2	Germany	ASR Lerchenfeld	48,45238	9,95038	256	15
3	Germany	Ottobrun	48,04472	11,65639	256	12
4	Germany	Thalfigen	48,44083	10,05472	256	15
5	Germany	ULM	48,39147	9,97314	256	12
6	Germany	Auersberg	50,45572	12,64842	150	5,17
7	Germany	BBN	52,38278	13,50786	100	12
8	Germany	Brocken	51,79988	10,61546	150	12
9	Germany	Deister	52,25291	9,49251	178	5,17
10	Germany	Dusseldorf Nord	51,29295	6,76061	256	12
11	Germany	Dusseldorf Sud	51,28039	6,77318	100	12,5
12	Germany	Frankfurt Sud ASR	50,02579	8,55262	178	12,5
13	Germany	Goetzhain	50,00998	8,71970	100	12
14	Germany	Gosheim	48,13244	8,77570	150	12
15	Germany	Grosshaager Forst	48,13591	12,05046	178	5,17
16	Germany	Goetzhain	50,00998	8,71970	150	12
17	Germany	Munchen Sud ASR	48,31108	11,81391	130	12,5
18	Germany	Neukirchner Hohe	49,72568	8,77479	178	5,17
19	Germany	Nordholz	53,75646	8,65793	178	5,17
20	Germany	Schmooksberg	53,83825	12,38307	178	5,17
21	Germany	Tegel	52,56359	13,90900	150	12,5
22	Germany	ASR-S Buchel	50,17389	7,06000	65	13,3
23	Germany	ASR-S Erbach	48,41228	10,13673	80	12
24	Germany	Auenhausen AH	51,65203	9,21413	256	10
25	Germany	Berlin Tempelhof	52,48265	13,39930	256	6
26	Germany	Brekendorf (BD)	54,44162	9,66046	256	10
27	Germany	Brockzetel (BZ)	53,46692	7,66568	256	5
28	Germany	Bueckeburg (BG)	52,27833	9,08222	65	12
29	Germany	Celle (CE)	52,59111	10,02222	65	12
30	Germany	Coelpin CO	53,50839	13,43313	256	6
31	Germany	Dobern DO	51,61255	14,57585	256	6
32	Germany	Dobraberg DB	50,27861	11,64577	256	6
33	Germany	Elmenhorst EH	54,00042	11,11095	256	6
34	Germany	Erbeskopf EK	49,73056	7,09143	256	5

Tabulka 11: Seznam použitých radarů a jejich parametrů
(pokračování)

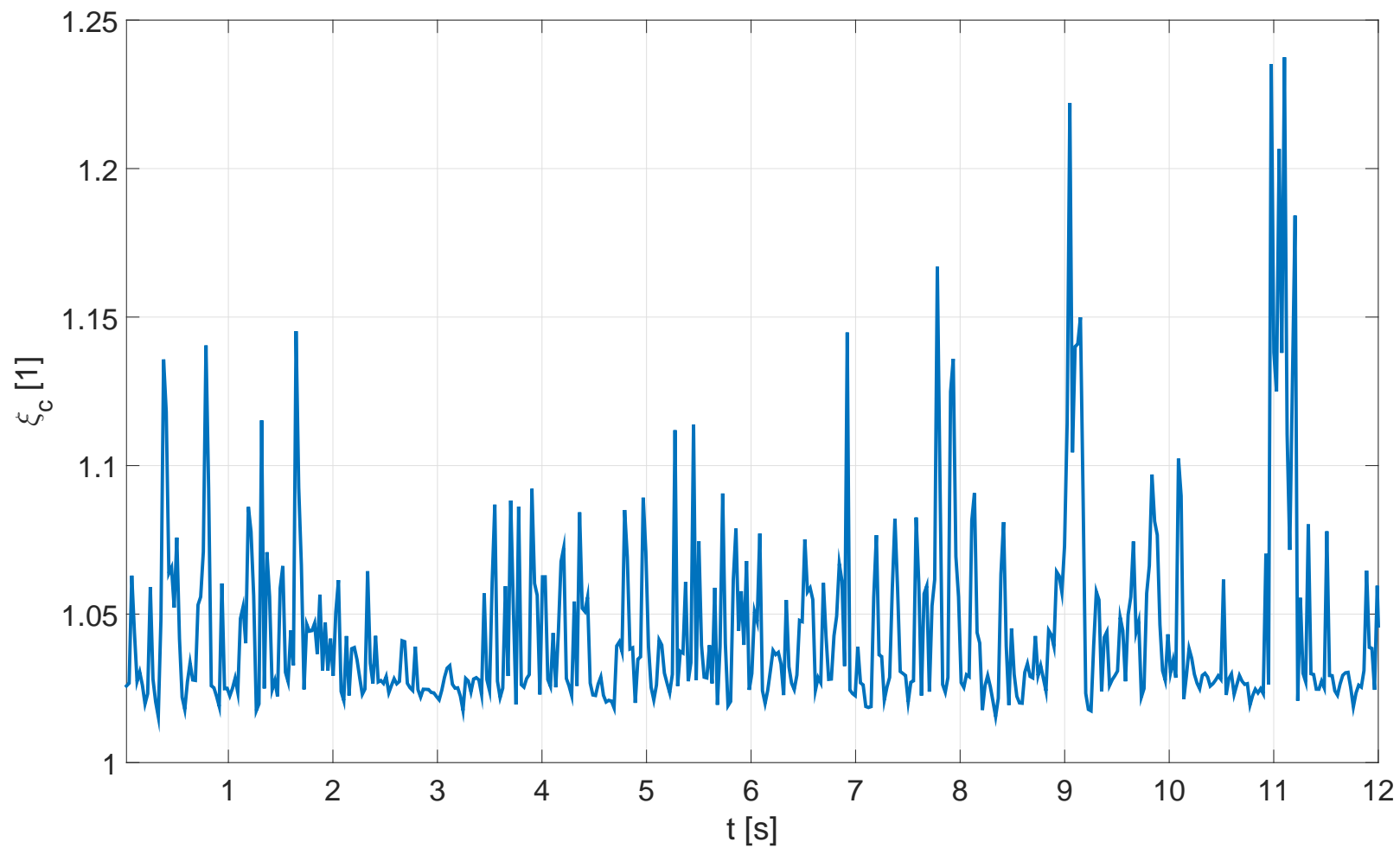
35	Germany	Erndtebrueck (EB)	50,97022	8,27201	256	10
36	Germany	Fassberg (FB)	52,91944	10,18389	65	12
37	Germany	Freising (FS)	48,43452	11,72050	256	10
38	Germany	Fritzlar (FR)	51,11444	9,28583	65	12
39	Germany	Geilenkirchen (GN)	50,96083	6,04167	65	12
40	Germany	Gleina GL	50,93311	12,39766	256	6
41	Germany	Grosser Arber GA	49,11306	13,13600	256	6
42	Germany	Hohn (HN)	54,31222	9,53806	65	12
43	Germany	Holzdorf (HZ)	51,76778	13,16750	65	12
44	Germany	Ingolstadt-Manching	48,71556	11,53361	85	12
45	Germany	Kaufbeuren (KB)	47,86750	10,61139	65	12
46	Germany	Laage (LG)	53,91806	12,27917	65	12
47	Germany	Lauda (LA)	49,52575	9,80139	256	10
48	Germany	Laupheim (LM)	48,22000	9,91028	65	12
49	Germany	Lechfeld (LD) (TSLw)	48,18361	10,84806	65	12
50	Germany	Marienbaum (MA)	51,67733	6,37002	256	5
51	Germany	Messstetten (MS)	48,18555	8,94556	256	5
52	Germany	Neuburg (NG)	48,71111	11,21139	65	12
53	Germany	Niederstetten (NN)	49,38833	9,96194	65	12
54	Germany	Noervenich (NH)	50,83111	6,65806	65	12
55	Germany	Nordholz (NZ)	53,76750	8,65861	65	12
56	Germany	Putgarten PU	54,67397	13,38704	256	6
57	Germany	Ramstein ETAR	49,44832	7,58896	65	12,5
58	Germany	Schleswig-Jagel (SG)	54,45944	9,51639	65	12
59	Germany	Spandahlem ETAS	49,98335	6,69369	65	12,5
60	Germany	Todendorf	54,36917	10,54194	256	12
61	Germany	Trollenhagen (TN)	53,59528	13,31056	65	12
62	Germany	Visselhoevede (VH)	52,99437	9,63649	256	10
63	Germany	Wilhemshaven (WH)	53,53722	8,15611	110	10
64	Germany	Wittmund (WD)	53,54778	7,66750	65	12
65	Germany	Wunstorf (WF)	52,45722	9,42722	65	12
66	Austria	KOR	46,78711	14,97115	150,000	15,00
67	Austria	Linz	48,23903	14,18219	120,000	15,00
68	Austria	Vie2	48,10060	16,57791	120,000	15,00
69	Austria	KOL SSR	47,87692	13,26756	250,000	5,00
70	Austria	LOXT ASR	48,32497	16,11886	80,000	12,00
71	Austria	LOXZ ASR (Zeltweg)	47,19653	14,74986	80,000	8,00
72	Austria	SPK LRR (Speikkogel)	46,78767	14,97050	250,000	5,00

Tabulka 11: Seznam použitých radarů a jejich parametrů
(pokračování)

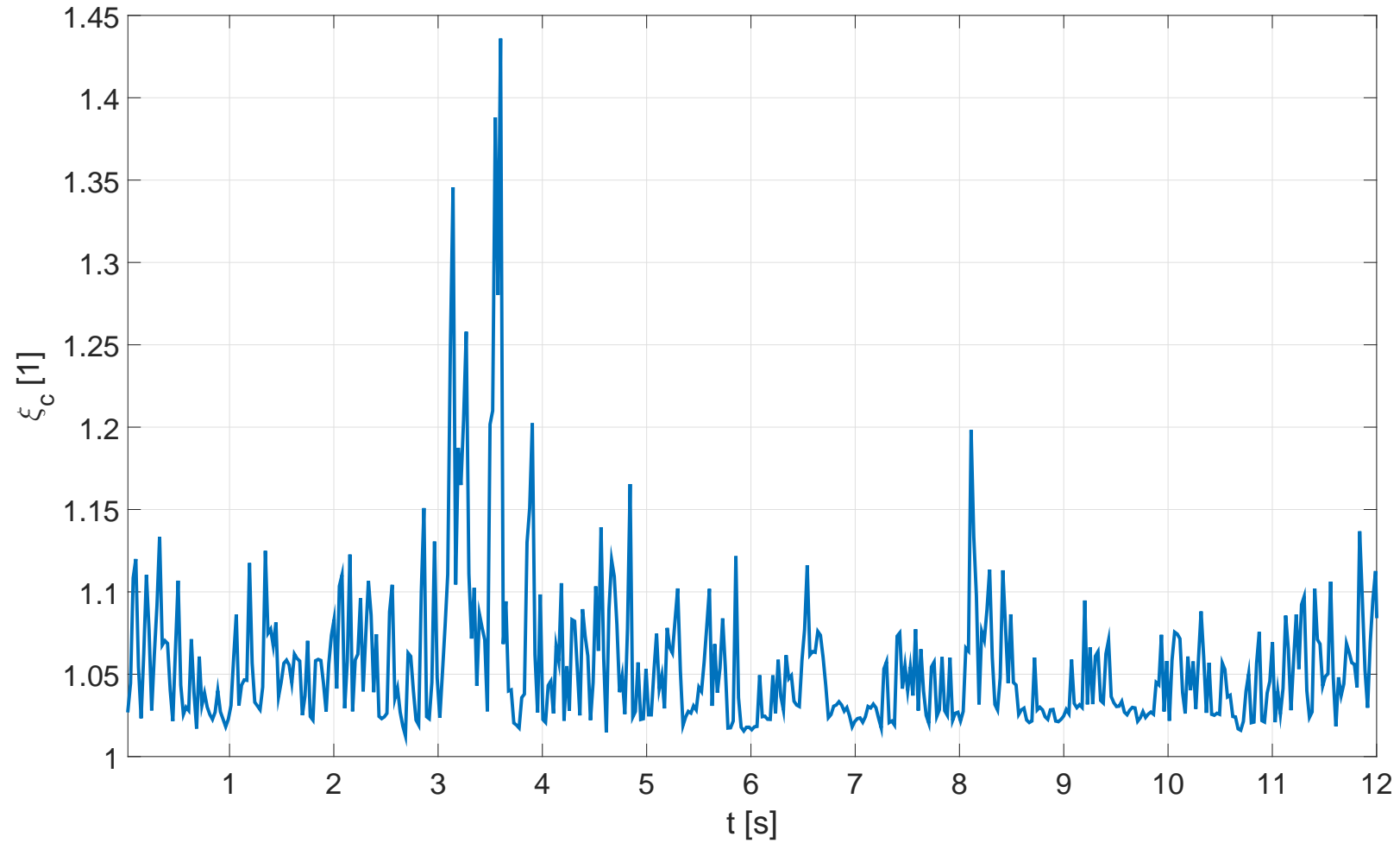
73	Austria	STM LRR (Steinmandl)	48,57833	16,41044	250,000	5,00
74	Czech Republic	Bukop	49,65136	16,13578	250,000	7,50
75	Czech Republic	Pisek	49,30341	14,15829	250,000	7,50
76	Czech Republic	Prague	50,10531	14,26726	250,000	7,50
77	Czech Republic	Nepolisy	50,18251	15,46877	470,000	12,00
78	Czech Republic	Sokolnice	49,12049	16,75910	470,000	12,00
79	Hungary	Puspokladány	47,35636	21,04419	200,000	7,50
80	Hungary	Ferihegy TAR 1	47,44745	19,26297	150,000	15,78
81	Hungary	Ferihegy TAR 2	47,42152	19,30344	150,000	12,00
82	Hungary	Korishegy	47,29396	17,75358	200,000	7,50
83	Hungary	Medina	46,47194	18,61972	256,000	5,00
84	Hungary	Bankut	48,10000	20,48333	256,000	12,00
85	Hungary	Bekescsaba	46,68333	21,01667	250,000	12,00
86	Poland	Chrusciel	54,26667	19,81667	250,000	5,00
87	Poland	Krakow	50,61667	23,33333	205,000	5,00
88	Poland	Poznan	52,41139	16,79361	256,000	12,00
89	Poland	Szypliszki	54,20000	22,98333	250,000	5,00
90	Poland	Warszawa 1	52,16556	20,94444	213,000	12,00
91	Poland	Wroclaw	51,09806	16,86639	256,000	12,00
92	Poland	Labunie	50,61667	23,33333	250,000	5,00
93	Slovak Republic	TAR Bratislava	48,17167	17,22750	160,000	15,00
94	Slovak Republic	Mošník	48,79497	21,54119	160,000	15,00
95	Slovak Republic	Velky Bucen	48,30554	19,87073	160,000	12,00
96	Slovak Republic	Velky Javornik	48,26071	17,16329	160,000	15,00

B.2 Grafický výstup

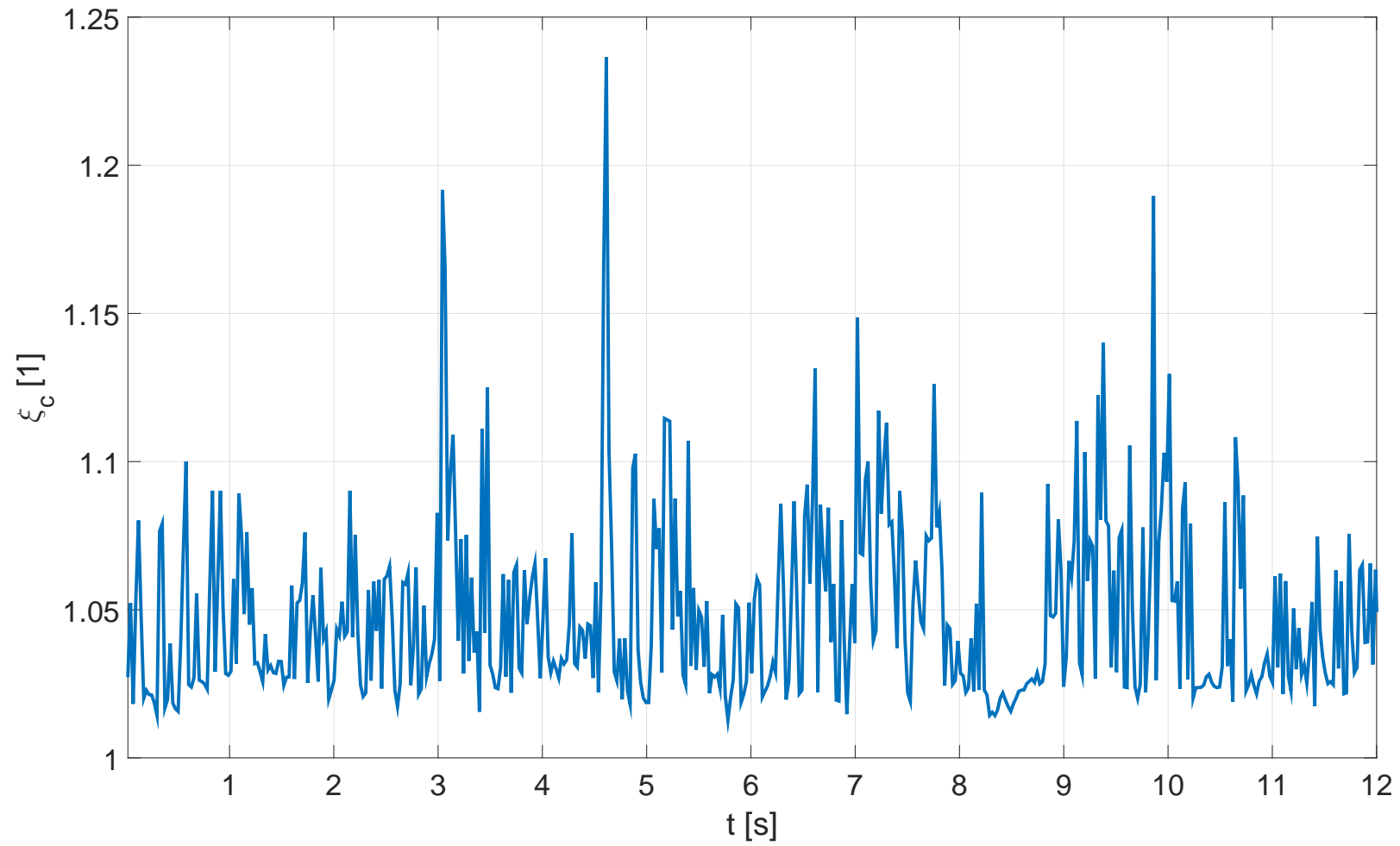
109



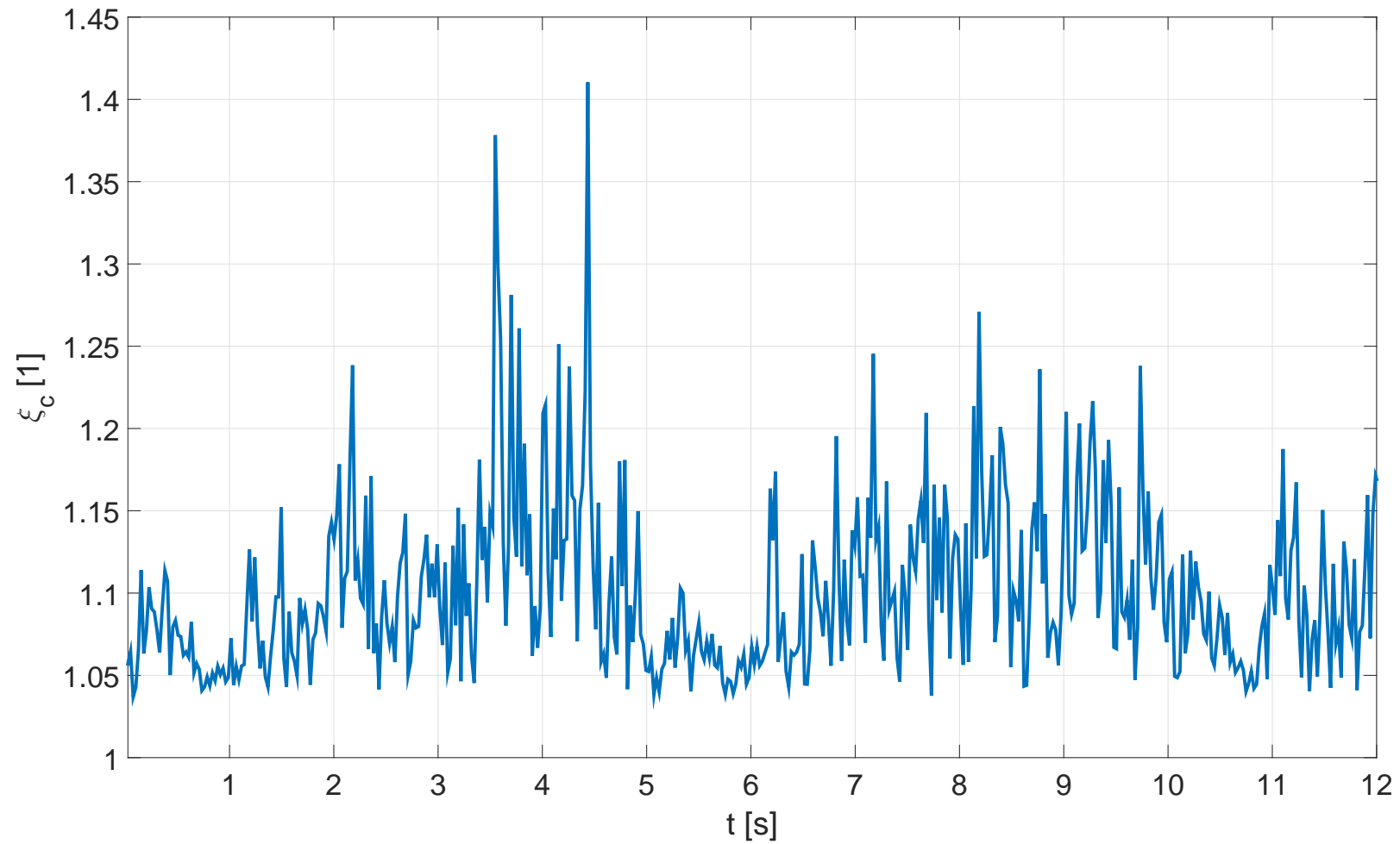
Obrázek 49: Reinterrogation rate - Buchtův kopec (ID = 74)



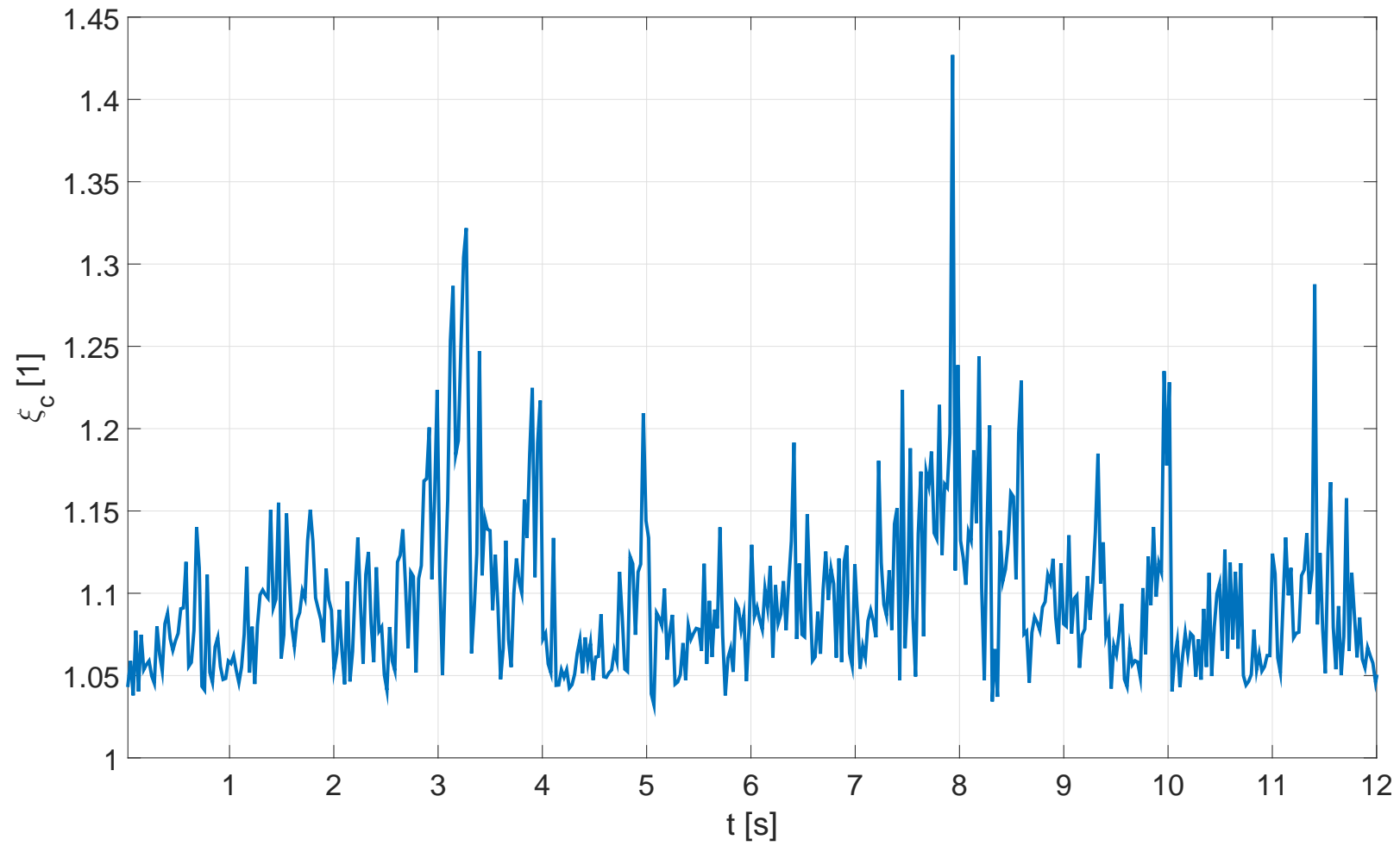
Obrázek 50: Reinterrogation rate - Písek (ID = 75)



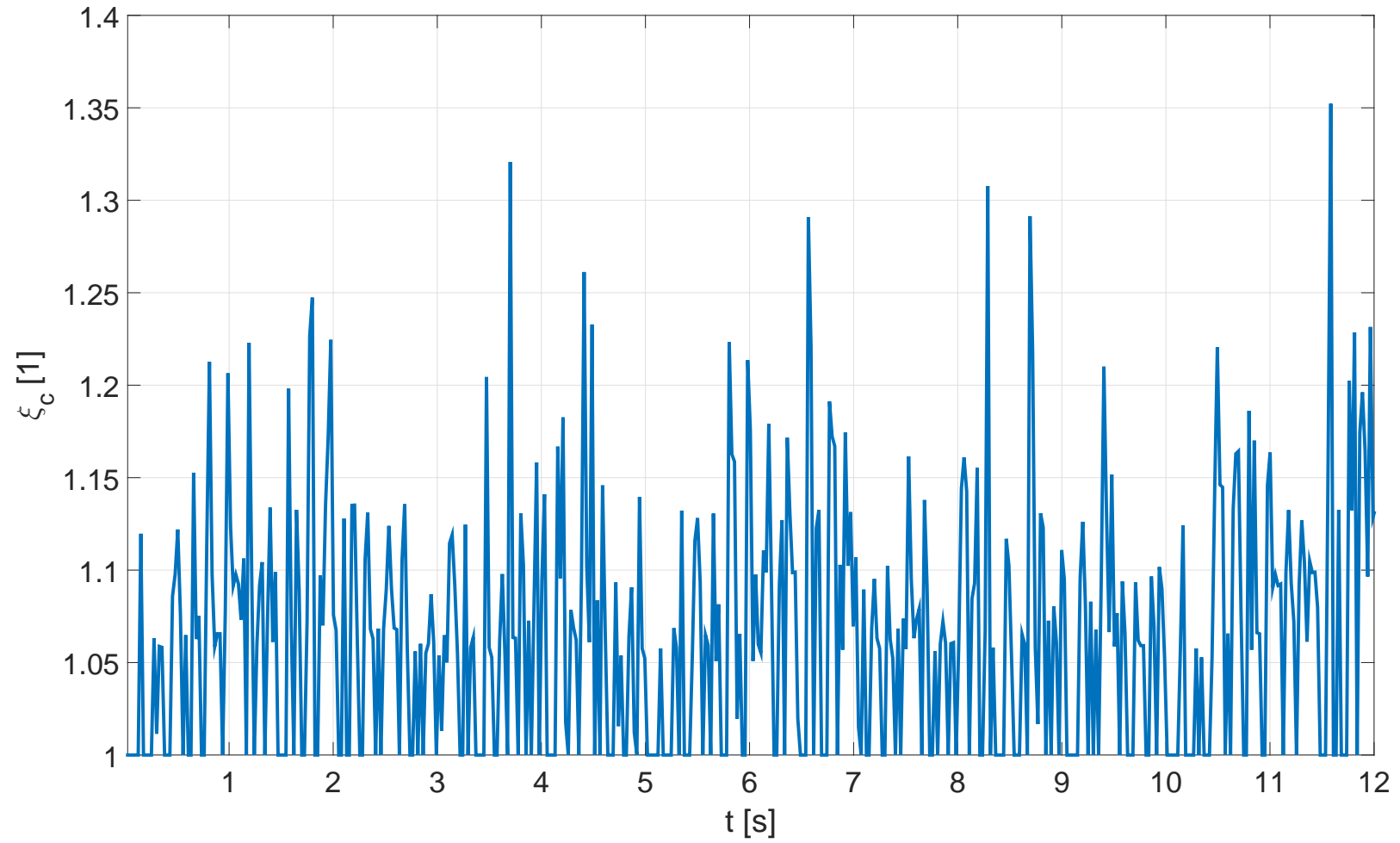
Obrázek 51: Reinterrogation rate - Praha (ID = 76)



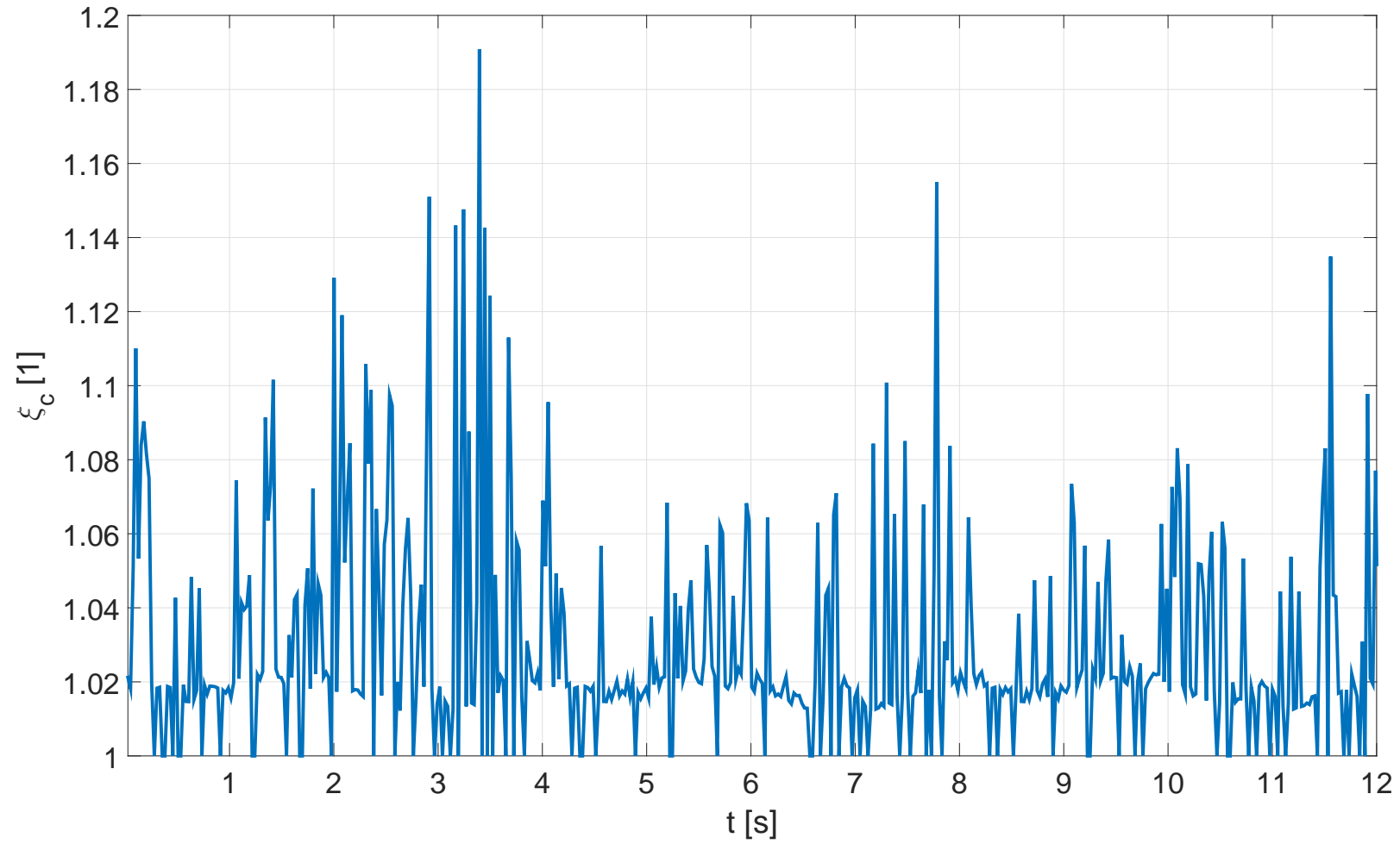
Obrázek 52: Reinterrogation rate - Nepolisy (ID = 77)



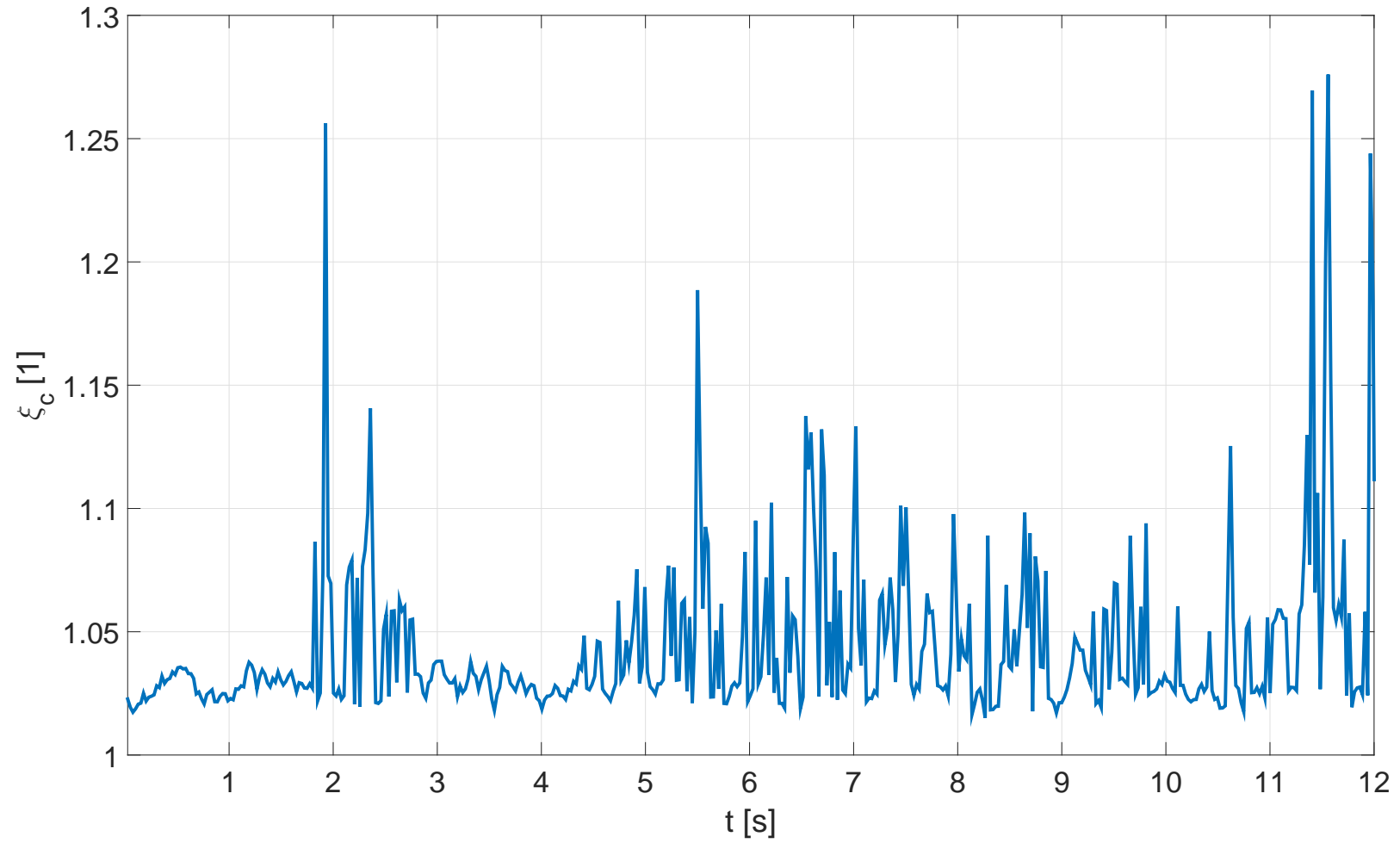
Obrázek 53: Reinterrogation rate - Sokolnice (ID = 78)



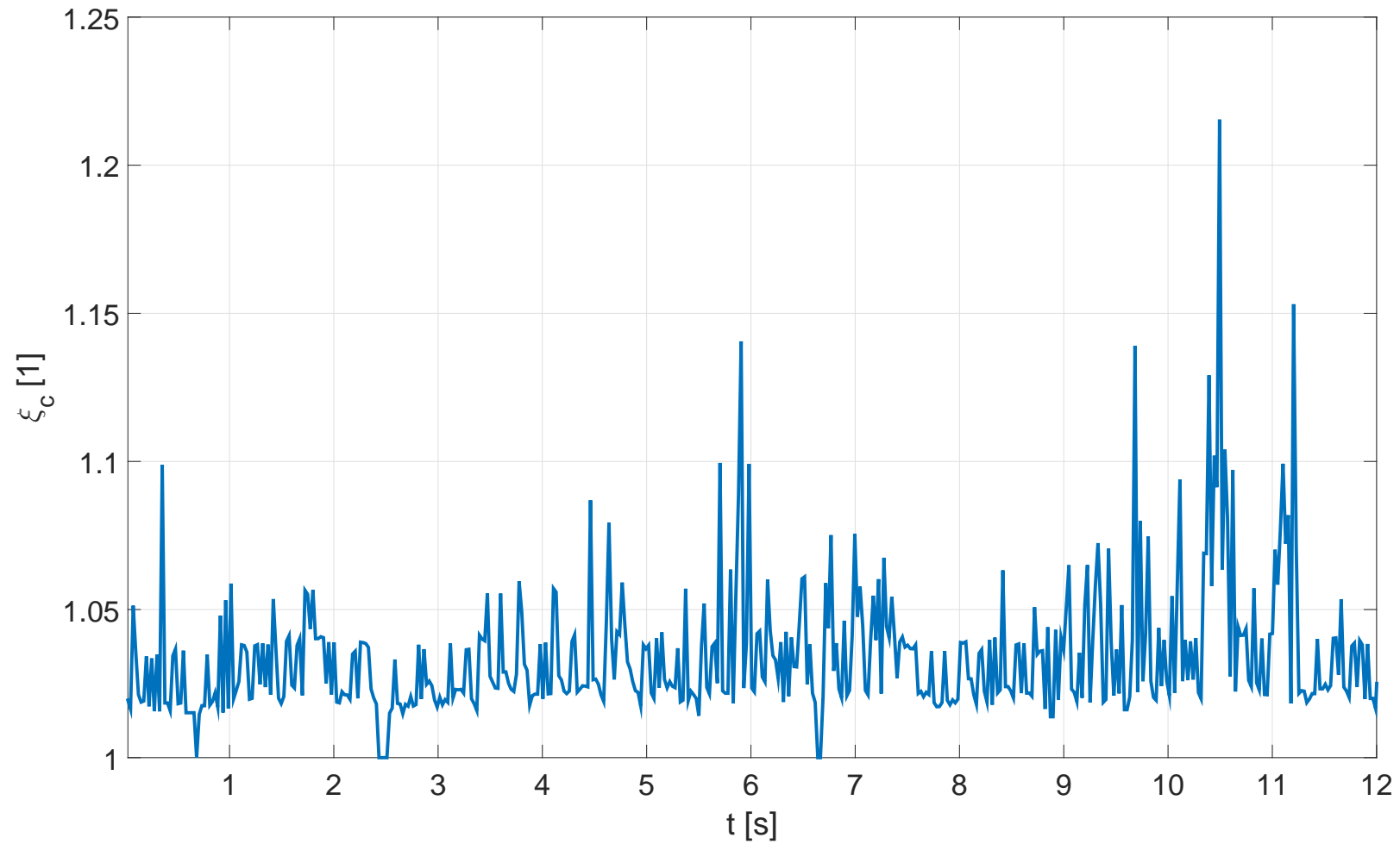
Obrázek 54: Reinterrogation rate - Goetzenhain (ID = 13)



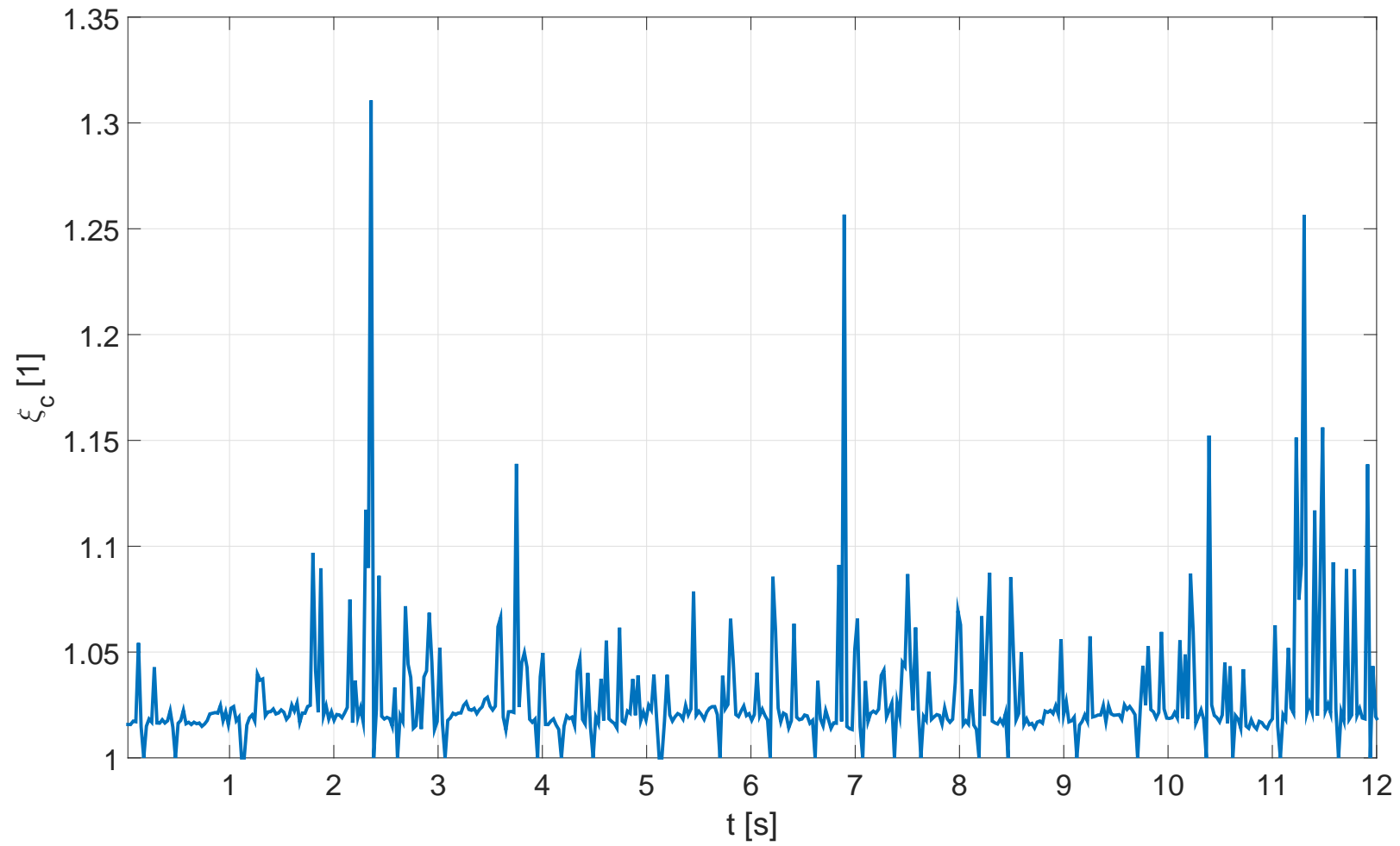
Obrázek 55: Reinterrogation rate - Linz (ID = 67)



Obrázek 56: Reinterrogation rate - Medina (ID = 83)



Obrázek 57: Reinterrogation rate - Krakow (ID = 87)



Obrázek 58: Reinterrogation rate - TAR Bratislava (ID = 93)

C CD

Níže je uveden výpis uživatelsky důležitých souborů umístěných na přiloženém CD.

C.1 Simulace malého rozsahu

small_scale_simulation.slx Simulinkový model
README.txt návod použití

C.2 Simulace velkého rozsahu

1_Radars_Locations.xlsx pozice a parametry radarů, pomocné výpočty
field_plot.m funkce pro vykreslení aktuální konfigurace letadel a radarů ve vnitřních souřadnicích simulace
initial_enviroment.m vstupní parametry a inicializace simulačního prostředí
main.m skript reprezentující hlavní smyčku
output_full.mat výsledky kompletního průběhu simulace
plot_czech_radar_rr_progress.m funkce pro vykreslení časového průběhu reinterrogation rate radarů České republiky
README.txt návod použití