

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Diplomová práce

2015

Bc. Tomáš Lipták



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Tomáš Lipták

Model zatížení RF pásma 1090 MHz

Diplomová práce

2015



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Tomáš Lipták

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Model zatížení RF pásma 1090 MHz**

Název tématu (anglicky): 1090 MHz RF Band Load Model

Zásady pro vypracování

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

- Úvod
- Vytvoření modelu pro simulaci přenosu zpráv v RF pásmu 1090MHz
- Konfigurace simulačního prostředí a vstupních parametrů pro oblast České republiky
- Posouzení validity modelu porovnáním s reálně naměřenými daty v oblasti ČR
- Extrapolace dat o prostředí ČR a nasimulování budoucího scénáře
- Závěr

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)


Seznam odborné literatury: ICAO: Doc 9871 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, 2011
ICAO: Doc 9863 Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual, 2005
ICAO Annex 10: Aeronautical Telecommunication Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance Systems, Ed. 4, 2007


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

Datum zadání diplomové práce: **31. července 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

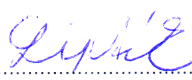
Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Daniel Hanus, CSc.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy


.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty



Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Tomáš Lipták
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....31. července 2014

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D., bez jehož cenných rad, četných konzultací a ochoty by tato diplomová práce nikdy nemohla vzniknout. Mé další poděkování patří nepochybně i rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studií podporovali a pomáhali mi.

Prohlášení

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

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

Nemám závažný důvod proti 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 29. května 2015

.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Model zatížení RF pásma 1090 MHz

diplomová práce

červen 2015

Bc. Tomáš Lipták

ABSTRAKT Cílem této diplomové práce bylo navržení počítačového simulačního programu, jehož výsledky budou popisovat zatížení RF pásma 1090 MHz ve specifikované oblasti během časového intervalu. Program se skládá ze dvou modelů: RF Load Modelu a RF Re-Interrogation Modelu. Zatímco RF Load Model je vytvořen v prostředí MATLAB a poskytuje pouze výsledky o základním zatížení RF pásma, RF Re-Interrogation Model pracuje v Simulinku a vypočítává velikost re-interrogation rate hodnoty. Analýza zátěže RF pásma zahrnuje činnost Mode A/C odpovídačů, Mode S odpovídačů, ACAS technologie a ADS-B vysílání. Výsledky zatížení jsou prezentovány včetně rozlišení formátových skupin.

KLÍČOVÁ SLOVA simulace, re-interrogation rate, Mode S, Mode A/C, ACAS, odpovídač, rádio-frekvenční zatížení, vysílání, přenos

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF TRANSPORTATION SERVICES

1090 MHz RF Band Load Model

Diploma Thesis

June 2015

Bc. Tomáš Lipták

ABSTRACT The aim of this Diploma Thesis was to develop a computer simulation program that would sufficiently estimate the RF Load of 1090 MHz band over a specified time period. The program consists of two main parts: RF Load Model and RF Re-Interrogation Model. While the RFL Model is based on Matlab platform and estimates radio-frequency load only, the RFR Model is created in Simulink and derives the amount of radar re-interrogation within the specified environment from RFL Model results. The contribution of Mode A/C transponders, Mode S transponders, ACAS and ADS-B is covered within the simulation. The results are presented with regard to the message downlink format groups.

KEY WORDS simulation, re-interrogation rate, Mode S, Mode A/C, ACAS, transponder, radio-frequency load, transmission

Obsah

1 RF Load Model	14
1.1 Run Modul	15
1.2 Input Modul	16
1.2.1 Vstupní data a uživatelské rozhraní	16
1.3 Environment Modul	21
1.3.1 Vytvoření modelového prostředí	21
1.3.2 Vybavení letadel	21
1.3.3 Přidělení letové hladiny	21
1.3.4 Přidělení letěného kurzu	22
1.3.5 Vyjádření rychlostí letadla	22
1.3.6 Vektor letadla	23
1.4 SSR Modul	23
1.4.1 Vlastnosti sekundárního přehledového radaru	23
1.4.2 Metoda určení počtu odpovědí na SSR za dobu simulace	24
1.4.3 Příprava dat pro RF Re-Interrogation Model	29
1.4.4 Matice středních hodnot parametrů SSR	31
1.4.5 Výsledková matice zatížení od SSR	31
1.5 ACAS Modul	32
1.5.1 Programové pojetí funkce ACAS	32
1.5.2 Vyjádření matematických výrazů pro ACAS výpočty	33
1.5.3 Sledovací režimy	34
1.5.4 Výsledková matice zatížení od ACAS	35
1.6 Acquisition Squitter Modul	36
1.6.1 Výsledková matice zatížení od AS	36
1.7 ADS-B Modul	36
1.7.1 Výsledková matice zatížení od ADS-B	37
1.8 Virtual Receiver Modul	37
1.8.1 Výsledková matice celkového zatížení oblasti	37
1.9 Vytvořené externí funkce	38
1.9.1 Výpočet plochy pro simulaci	38
1.9.2 Transformace souřadného systému	39
1.9.3 Převod letové hladiny na AMSL	40
1.9.4 Radarový horizont	41

1.9.5	Násobné vyslýchání radary	42
2	RF Re-Interrogation Model	45
2.1	Programové pojetí problematiky	46
2.2	Stavební bloky RFR Modelu	46
2.2.1	Constant	47
2.2.2	Time-based Entity Generator	47
2.2.3	Entity Sink	47
2.2.4	Path Combiner a Replicate	47
2.2.5	Set Attribute	48
2.2.6	Single Server a N-Server	48
2.2.7	Infinite Server	48
2.2.8	FIFO Queue	48
2.2.9	Release Gate	49
2.2.10	Output Switch	49
2.3	Popis funkčních částí RFR Modelu	49
2.3.1	Generator sekce	50
2.3.2	Limiter sekce	56
2.3.3	Processor sekce	57
2.3.4	Re-Interrogation vazba	60
2.3.5	Re-Interrogation distributor	61
2.4	Propojení s MATLAB modelem	61
3	Konfigurace simulačního prostředí	
	pro oblast České republiky	63
3.1	Vybraná geografická oblast	63
3.2	Palubní vybavení letadel	64
3.3	Definování parametrů letového provozu v oblasti	64
3.3.1	Vertikální charakteristika vzdušného prostoru	64
3.3.2	Hustota provozu	65
3.4	Přehledová síť sekundárních radarů	67
4	Posouzení validity modelu	70
4.1	Vstupní hodnoty	70
4.2	Implementace letu do prostředí	71
4.3	Výsledky zatížení RF pásma dle RFL Modelu	71
4.4	Výpočet korekčního koeficientu dotazování	71
4.4.1	Definování použitých proměnných	72
4.4.2	Posouzení stability	72
4.4.3	Vyhodnocení korekčního dotazování	73
4.5	Použití opravných koeficientů	74
4.6	Posouzení výsledků modelu	75
5	Nasimulování budoucího scénáře	76

5.1	Extrapolace dat o prostředí	76
5.2	Výsledky predikce	77
5.2.1	Výstup modelu	77
5.2.2	Vyhodnocení budoucího scénáře pro rok 2025	78

Seznam zkratek

A/C	Označení módu odpovídače
ACAS	Airborne Collision Avoidance Systém / Palubní protisrážkový systém
ACC	Area Control Centre / Oblastní středisko řízení
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast / Automatické závislé sledování
AMSL	Above mean sea level / Výška nad střední hladinou moře
AS	Aquisition Squitter / Akviziční squitter
ATA	Air Transport / Obchodní letecká doprava
BDS	B-Comm Data Selector
CPA	Closest Point Of Approach / Bod největšího sblížení
ČR	Česká republika
DF	Downlink Format / Sestupný formát
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed
ELM	Elementary
ENU	East-North-Up
EQP	Aircraft Equipment / Palubní vybavení
ES	Extended Squitter
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
FIFO	First-in-first-out
FL	Flight level / Výška letové hladiny
ft	Feet / Stopa
GS	Ground Speed / Traťová rychlost
Hz	Hertz
IC	Interrogator Code / Kód dotazovače
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Flight Rules / Pravidla pro let podle přístrojů
kts	Knots / Uzly
LAT	Latitude / Zeměpisná šířka
LKAA	Označení oblasti České republiky
LKPR	Letiště Praha / Ruzyně
LON	Longitude
LOOP	Atribut určující opakování zprávy

MHz	Megahertz
MSA	Mezinárodní standardní atmosféra
NM	Námořní míle
PRF	Repetition Frequency
RC	Related Call / Příslušející dotazy
RF	Rádiová frekvence
RFL	RF Load
RFR	RF Re-Interrogation
ŘLP	Řízení letového provozu
SMOD	Parametr pro sledování cíle s Mode S odpovídačem
SSR	Secondary Surveillance Radar / Sekundární přehledový radar
TAS	True Airspeed / Prává vzdušná rychlost
TR	Virtual Receiver / Virtuální přijímač
UF	Uplink Format / Vzestupný spoj
URC	Unrelated Calls / Příslušející dotazy
WGS 84	World Geodetic System from 1984

Úvod

Kooperativní přehledové systémy jsou pro současný systém řízení letového provozu neodmyslitelnou součástí. Řadíme do nich palubní odpovídače Mode A/C či Mode S, protikolizní systém ACAS a automatické závislé vysílání ADS-B, které společně sdílí rádio-frekvenční pásma 1030/1090 MHz. V oblastech s vysokou hustotou provozu, jakou je například evropský či severoamerický region, poskytují tyto technologie dnes již nepostradatelná data. Přínos ve využití kooperativních systémů je tak znatelný z pohledu řídicích letového provozu, kteří mohou na základě přenášených informací o letu lépe koordinovat lety. Podobně i posádky letadel mají díky těmto technologiím větší situační vědomí o okolním provozu (např. použití protisrážkového systému ACAS).

Motivací k rozšiřování využití kooperativních systémů v rámci globálního leteckého provozu je nepochybně snaha o zvýšení úrovně bezpečnosti. Kvalita přehledové informace společně s varovnými systémy do velké míry snižují pravděpodobnost vzniku chyby při řízení letů ve vzdušném prostoru. Dalším podnětem je však i potřeba efektivního řízení v oblastech s neustále rostoucí hustotou provozu. Rozšíření primární přehledové informace pak umožňuje řídicím lépe predikovat jednotlivé lety v čase. Snahy o bezpečné a efektivní provozování letecké dopravy společně s technickým pokrokem zároveň vedou k navyšování přenášených informací.

V evropském prostoru je možné sledovat rostoucí trend ve využití těchto technologií. Nicméně snaha přenášet velké množství informací z letadel vede za určitých podmínek k problémům vyplývajících z rádio-frekvenčního zatížení používaných pásem a zatížení palubních odpovídačů. Množství zpráv, které je možné přenášet a zpracovat, je omezené. V Evropě je zatížení této domény, především RF 1090 MHz, předmětem několika výzkumů. Metody pro analýzu přenosů v rámci sestupného spoje jsou založeny na reálném měření, ale i modelováním. Modely se v mnoha ohledech jeví jako přínosné z hlediska vyhodnocování budoucích scénářů vývoje leteckého provozu.

Cílem této diplomové práce je vytvoření a popsání struktury modelu, který bude na základě vstupních dat poskytovat informaci o počtu přenášených zpráv v RF pásmu 1090 MHz. Model bude vytvořen na základech simulačního programu, který byl představen v bakalářské práci (2013). Na rozdíl od předěšlé verze bude simulovat přenosy v rámci definovatelného časového intervalu, zohledňovat stochastický charakter interakcí a zároveň umožní hodnotit simulované prostředí z hlediska hodnoty re-interrogation rate. V diplomové práci bude popsána struktura modelu, použité výpočty a aplikovaný přístup k řešení problematiky. Následně bude v modelu definován prostor České republiky, v rámci něhož bude testována validita programu. Na závěr budou uvedeny výsledky predikce modelu pro rok 2025.

Očekává se, že výsledky modelu nebudou v rozporu s hypotézou, že se dnešní zatížení rádio-frekvenčního pásma 1030/1090 MHz pohybuje kolem kritické hranice, po jejíž překročení dochází degradaci celého systému.

Kapitola 1

RF Load Model

RF Load Model (RFL Model) je simulační program, který byl vytvořen v prostředí MATLAB[®] za účelem odhadování množství přenosů na sestupném spoji 1090 MHz v nadefinovaném prostředí. Výsledky simulace popisují zátěž rádiové frekvence (RF) v určité oblasti ve formě počtu přenesených zpráv za jednu sekundu. Model zahrnuje interakce palubních odpovídačů letadel s pozemní přehledovou infrastrukturou sekundárních radarů, s jiným letadly v rámci protisrážkového systému ACAS, ale i automatické vysílání Acquisition či Extended Squitteru.

Program souhrnně určuje množství přenesených zpráv na sestupném spoji v těchto skupinách odpovědí:

1. Odpovědi typu A/C,
2. DF4/5/20/21,
3. DF0/16,
4. DF11,
5. DF17.

Předcházející verzi pro RFL Model, byl model RFLM 2014, jehož první podoba byla představena v bakalářské práci [12]. Současná verze již pracuje v kvazi-dynamickém režimu a poskytuje mimo jiné i základní vstupní data pro RF Reinterrogate Model, který je popsán v další kapitole. Označení modelu jako kvazi-dynamický je použito, neboť simulování pohybu ve virtuálním prostředí po stanovený čas je částečné a týká se pouze letadel. Tím je možné určit, kolik jednotlivá letadla vyslala na sestupném spoji zpráv za danou dobu letu v daném vzdušném prostoru. Jelikož všechny zprávy kromě squitteru vychází z interakcí letadla s okolním prostředím, je pohyb a vzájemná poloha významným faktorem. Na straně druhé některé charakteristiky systému v modelu jsou ponechány statické a k výpočtu je použita statistická metoda. Jedná se například o otáčení paprsků radarů. Použitím statistiky získané z parametrů program určí vliv radaru na vyslýchání letadla. Nicméně samotnou rotaci laloků nesimulujeme. Z hlediska navýšení výpočetní složitosti by aplikování dynamiky radarů do modelu pravděpodobně nepřineslo adekvátně přesnější výsledky. Kvazi-dynamický přístup, který model aplikuje, tak představuje kompromis mezi přesností získaných dat a výpočetními nároky.

Model se skládá z následujících sedmi základních modulů, které globálně spouští Run Modul:

1. INPUT MODUL
2. ENVIRONMENT MODUL
3. SSR MODUL
4. ACAS MODUL
5. AS MODUL
6. ADS-B MODUL
7. VIRTUAL RECEIVER MODUL

Každý z modulů tvoří funkční celek, nicméně pořadí není zcela zaměnitelné. Jedná se především o první moduly Input a Environment, které jsou nezbytné k vytvoření simulačního prostředí a připravují vstupní data pro následující moduly. Pomocí nich se následně simulují interakce na RF 1030/1090 MHz. Naopak modul Virtual Receiver, který shrnuje zatížení sestupného spoje, pro své výpočty používá data poskytnutá předchozími moduly. Je tedy zcela nutné, aby byl tento modul zařazen v rámci simulace až jako poslední.

Rozdělení na moduly je především motivováno snahou zpřehlednit zdrojový kód. Následující kapitoly se budou věnovat modulům jednotlivě a přiblíží jejich strukturu.

1.1 Run Modul

Tento modul je základním skriptem pro spuštění celé simulace. Postupně vyvolává moduly, jejichž pořadí je pevně dáno. Tento modul je řídicím modulem pro ostatní a představuje pro uživatele jediný modul, se kterým pracuje. Je pouze nutné, aby se moduly nacházely ve stejném adresáři. V tabulce 1.1 je uveden základní přehled o modulech spouštěných při simulaci Run Modulem.

Tabulka 1.1: Posloupnost modulů včetně jejich názvů a popisů funkcí

	Programový název modulu	Název modulu	Popis funkce
1.	INPUT_FCE	INPUT Modul	importuje proměnné nadefinované uživatelem ze vstupního souboru INPUT.xls
2.	ENVIRONMENT_FCE	ENVIRONMENT Modul	vytvoří simulační prostředí generováním pozemní infrastruktury a letadel
3.	SSR_MOD	SSR Modul	určí zatížení plynoucím z interakce sekundárních přehledových radarů s letadly, re-interrogation není zahrnut
4.	ACAS_MOD	ACAS Modul	určí zatížení sestupného spoje zprávami souvisejícími s činností protisrážkového systému
5.	SQUITTER_MOD	AS Modul	přihadí periodické vysílání typu Acquisition Squitter těm letadlům, jejichž odpovídače mají danou funkci
6.	ADS-B_MOD	ADS-B Modul	přihadí vysílání Extended Squitteru všem letadlům, které mají tuto technologii
7.	TR_MOD	Virtual Receiver Modul	vypočte zatížení RF 1090 MHz vybrané oblasti pomocí virtuálního přijímače

1.2 Input Modul

Input Modul slouží k propojení prostředí MATLAB, kde probíhá simulace, s externím souborem. Soubor INPUT.xls představuje rozhraní mezi simulací a uživatelem, pomocí kterého lze definovat vybrané parametry a vlastnosti simulovaného systému. Možnost měnit prostředí RFL modelu umožňuje sledovat závislost zatížení na nastavených parametrech a testovat tak různé scénáře. Bez ní by přínos modelu byl velmi malý.

Modul pouze data načte do prostoru proměnných programu MATLAB. Dále transformuje souřadnice pozic sekundárních radarů a virtuálních přijímačů z referenčního systému WGS 84 do systému ENU.

1.2.1 Vstupní data a uživatelské rozhraní

Soubor INPUT.xls je rozdělen na několik pracovních listů: Environment, Equipment, SSR a TR. Každý z listů představuje vstupní formulář, do něhož se zapisují hodnoty vybraných parametrů, které souvisí s danou oblastí. Pro přehlednost uvedeme základní popisy použitých parametrů, které se v souboru definují, a použijeme obecné značení pomocí indexované proměnné p . Formulářová okna, do nichž se jednotlivé parametry vkládají, jsou ilustrovány tabulkami. Nicméně při vyplňování uživatelem jsou do formulářových polí vkládány již číselné hodnoty z definičního oboru. V této části textu se budeme věnovat popisu parametrů z pohledu uživatele a jeho práce se souborem INPUT.xls. Podrobnější charakteristika modelového prostředí bude následovat v kapitole 1.3 Environment Modul na straně 21.

Použité proměnné se zpravidla týkají obecných vlastností systémů (např. technické parametry), některé proměnné však souvisí výhradně s definováním virtuálního prostoru, a proto budou znovu podrobněji vysvětleny v Environment Modulu.

Listy souboru Input.xls pro zadávání parametrů jsou:

1. ENVIRONMENT
2. EQP
3. SSR
4. TR

Parametry listu Environment

První částí, kterou uživatel RFL Modelu definuje, jsou charakteristiky prostředí, ve kterém se budou modelovat interakce v rámci prostředí RF pásma 1030/1090 MHz. Horizontální vymezení simulační plochy je provedeno uživatelem skrze zadání dvojice rovnoběžek a poledníků. Mezi těmito hraničními křivkami bude vytvořen virtuální prostor zahrnující letadla, sekundární přehledové radary a virtuální přijímače. Formulář pro horizontální definování prostoru je zobrazen tabulkou 1.2.

Znaménková konvence V rámci modelu je dodržována znaménková konvence, která nahrazuje písmenné označení zeměpisných polokoulí (jižní/severní a západní/východní). Zeměpisná šířka směrem na sever nabývá kladných hodnot, na jih potom nabývá hodnot naopak záporných. V případě zeměpisné délky přiřazujeme k východní délce kladné znaménko a k západní záporné.

Tabulka 1.2: Horizontální vymezení simulačního prostoru

AREA	LAT1	LON1	LAT2	LON1
	[°]	[°]	[°]	[°]
Mezní hodnoty	$p_{lat1} \in (-90; 90)$	$p_{lon1} \in (-180; 180)$	$p_{lat2} \in (-90; 90)$	$p_{lon2} \in (-180; 180)$

Další část formuláře tvoří pole pro zadávání hustoty letadel, která je vztažena na objem kvádrů se specifikovanými rozměry (tab. 1.3). Rozměry jeho hran jsou 5 NM x 5 NM x 1000ft. Normováním počtu letadel na tento objem se připouští, že je parametr hustoty reálné číslo. Program následně v části Environment modul provede zaokrouhlení konečného počtu letadel v simulačním prostoru na přirozené číslo.

Tabulka 1.3: Parametr hustoty letadel v prostoru

Počet letadel v elementu 5 NM x 5 NM x 1000 ft	$p_{dens} \in \mathbb{R}^+$
---	-----------------------------

Následně uživatel vyplní poslední část Environment listu, která souvisí s vertikálním popisem simulačního prostředí. Základní struktura této části formuláře je opět ilustrována tabulkou 1.4. Parametry jsou vždy spojeny s jedním ze tří vertikálních zón vzdušného prostoru. Jsou rozděleny na spodní, střední a horní zónu. Ke každé zóně je nutné zadat vymežující spodní a horní letovou hladinu. Zároveň je doplněn rozestup sousedních hladin pro každé z vertikálních pásem. Standardně je to jedna letová hladina tj. 1000 ft nebo 2 letové hladiny pro horní vzdušný prostor.

Dále se zadává parametr, který přiděluje podíl z celkového množství letadel v simulaci do zvolené vertikální zóny. Je důležité, aby součet hodnot v řádku *Poměrné využití letadly* udávající podíl letadel byl vždy roven 1 (tj. 100%). Tato závislost parametrů v rámci řádku je v rozebíraném listu jediná. Nicméně u definování letových hladin, které vymežují vertikálně zóny, je nutné zachovat alespoň následující vztahy:

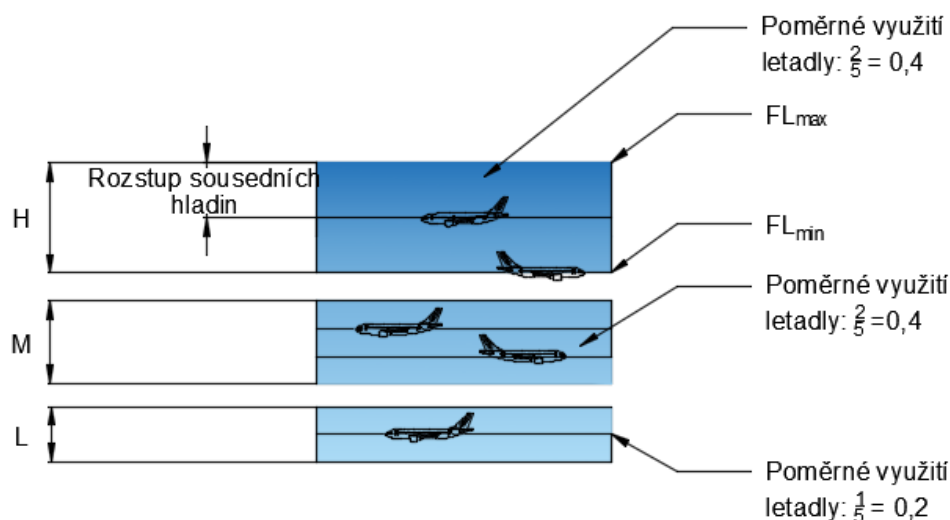
$$(p_{L_{\max}} \leq p_{L_{\min}}) \wedge (p_{M_{\max}} \leq p_{M_{\min}}) \wedge (p_{H_{\max}} \leq p_{H_{\min}})$$

$$(p_{L_{\max}} \leq p_{M_{\min}}) \wedge (p_{M_{\max}} \leq p_{H_{\min}})$$

Závěrem jsou definovány střední traťové rychlosti, které jsou typické pro každé vertikální pásmo. Současná verze modelu zatím nezahrnuje proudění vzduchu, tudíž je tato rychlost shodná i s pravou vzdušnou rychlostí (TAS). Nicméně pro další rozvoj modelu je volena právě rychlost traťová, která je vhodnější, uvažujeme-li interakce s pozemními zařízeními.

Tabulka 1.4: Vertikální definování prostředí

Parametry	Jednotky	Interval		
		Spodní (L)	Střední (M)	Horní (H)
Min FL	[-]	$p_{L_{\min}} \in \mathbb{N}$	$p_{M_{\min}} \in \mathbb{N}$	$p_{H_{\min}} \in \mathbb{N}$
Max FL	[-]	$p_{L_{\max}} \in \mathbb{N}$	$p_{M_{\max}} \in \mathbb{N}$	$p_{H_{\max}} \in \mathbb{N}$
Rozstup sousedních hladin	[1000 ft]	$p_{L_{sep}} \in \mathbb{N}$	$p_{M_{sep}} \in \mathbb{N}$	$p_{H_{sep}} \in \mathbb{N}$
Poměrné využití letadly	[-]	$p_{L_{usg}} \in \langle 0; 1 \rangle$	$p_{M_{usg}} \in \langle 0; 1 \rangle$	$p_{H_{usg}} \in \langle 0; 1 \rangle$
Traťová rychlost (GS)	[kts]	$p_{L_{GS}} \in \mathbb{R}^+$	$p_{M_{GS}} \in \mathbb{R}^+$	$p_{H_{GS}} \in \mathbb{R}^+$



Obrázek 1.1: Parametry pro vertikální definování prostoru (měřítko není zachováno)

Parametry listu EQP

Ve druhém listě souboru INPUT.xls se nachází formulářové okno, které souvisí s palubní výbavou letadel, která pro svou činnost využívá vzestupného a sestupného rádiového spoje. Simulace rozlišuje čtyři základní varianty, jakými může být letadlo vybaveno (tabulka 1.5). Napříč celou simulací se pak k těmto variantám odkazujeme jako na EQP1, EQP2, EQP3 a EQP4.

Letadlo může být vybaveno kombinací těchto technologií:

1. Mode A/C Only – letadlo má na palubě pouze odpovídač Módu A/C a pracuje s neadresnými dotazy
2. Mode S Only – letadlo je vybaveno pouze technologií odpovídače Módu S,
3. Mode S a ACAS – letadlo je kromě základní funkce odpovídače módu S vybaveno i protisrážkovým systémem,
4. Mode S, ACAS a ADS-B – letadlo používá odpovídač Módu S včetně protisrážkového systému ACAS a technologie Extended Squitteru.

Tabulka 1.5: Možnosti vybavení letadel v rámci modelu

Identifikátor	Funkce 1	Funkce 2	Funkce 3
EQP1	Mode A/C odpovídač	—	—
EQP2	Mode S odpovídač	—	—
EQP3	Mode S odpovídač	ACAS	—
EQP4	Mode S odpovídač	ACAS	ADS-B

Uživatel definuje podíl zastoupení dané varianty vybavení vůči celé množině letadel jak je zobrazeno v tabulce 1.6. Jelikož se opět jedná o poměrné množství, musí být řádkový součet roven jedné (100%).

Tabulka 1.6: Varianty palubního vybavení

	Mode A/C Only	Mode S Only	Mode S ACAS	Mode S ACAS ADS-B
Programová zkratka	EQP1	EQP2	EQP3	EQP4
Zastoupení vybavení	$p_{E1} \in \langle 0; 1 \rangle$	$p_{E2} \in \langle 0; 1 \rangle$	$p_{E3} \in \langle 0; 1 \rangle$	$p_{E4} \in \langle 0; 1 \rangle$

Parametry listu SSR

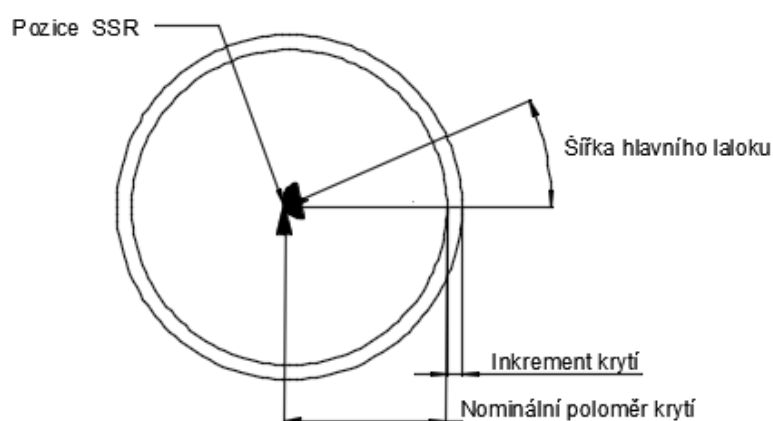
Pro nastavení simulačního prostředí v souvislosti s rádiovým přenosem na RF 1090 MHz slouží list s názvem SSR. V něm se nastavují fyzické i dotazovací vlastnosti sekundárních přehledových radarů. Každý řádek obsahuje kompletní charakteristiku jednoho radaru.

Pro celkovou přehlednost textu bylo zobrazení formulářové tabulky rozděleno do tří částí. První část popisuje pozici radaru, tj. její zeměpisné souřadnice a nadmořskou výšku.(tabulka 1.7)

Tabulka 1.7: Parametry sekundárních přehledových radarů (1. část)

LAT	LON	AMSL
[°]	[°]	[m]
$p_{lat} \in \langle p_{lat1}; p_{lat2} \rangle$	$p_{lon} \in \langle p_{lon1}; p_{lon2} \rangle$	$p_{lat} \in \mathbb{R}^+$

Následují parametry, které definují převážně výkonnostní charakteristiky sekundárního radaru (tab. 1.8). Technické údaje o poloměru krytí, šířce hlavního laloku či o počtu otáček za minutu doplňují parametry All-Call Pulse Repetition Frequency (PRF) a Inkrement poloměru krytí. Zmíněná PRF popisuje frekvenci, se kterou radar vysílá všeobecný dotaz Mode A/C Only v rámci All-Call periody. Na tento druh vyslýchání odpovídají letadla, která jsou vybavena pouze odpovídačem Módu A/C, či. V případě Mode Only dotazu v All-call periodě se předpokládá, že na ni žádná letadla s odpovídačem Módu S v krytí radaru neodpovídají, neboť jsou na ni blokována.



Obrázek 1.2: Základní parametry radaru

Simulace v současnosti nabízí testovací parametr, který umožňuje definovat oblast za hranicí nominálního dosahu radaru, kde letadla s odpovídačem Módu S mohou vlivem kolísání kvality vzestupného spoje s určitou pravděpodobností odpovídat na Mode S Only All-Call periody. Blízká oblast, kde letadla mohou

vykazovat popsané chování, nastavuje uživatel parametrem Inkrement poloměru krytí. Standardně je nastaven na hodnotu 0.

Tabulka 1.8: Parametry sekundárních přehledových radarů (2. část)

Poloměr krytí	Šířka hlavního laloku	RPM	All-CAII PRF	Inkrement poloměru krytí
[km]	[°]	[ot./ min]	[Hz]	[km]
$p_r \in \mathbb{R}^+$	$p_b \in (0; 90)$	$p_{RPM} \in \mathbb{R}^+$	$p_{PRF} \in \mathbb{R}^+$	$p_i \in \mathbb{R}^+$

Parametry pomyslné třetí části popisují vyslychající charakteristiku Roll-Call periody sekundárního přehledového radaru. Formulář obsahuje typy dotazů, které radar může vysílat. Hodnota, kterou uživatel zadá, odpovídá periodě, s níž je dotaz na vzestupném spoji opakován pro jedno letadlo. Ačkoliv nejsou velikosti period nikterak omezené z hlediska výpočtového algoritmu, je vhodné, aby byly násobkem základní periody otáčení radaru (1.1). Tím je docíleno, že je dané letadlo dotazováno pouze v násobku period a tudíž i v okamžiku, kdy přes něj přechází paprsek.

$$P_{int_i} = k \cdot \frac{1}{\frac{p_{RPM}}{60}} = \frac{60 \cdot k}{p_{RPM}} = k \cdot T_{scan} \quad (1.1)$$

kde: $k = 1, \dots, n$

p_{int_i} – perioda opakování i-tého typu dotazu pro 1 letadlo

p_{RPM} – počet otáček radaru za minutu

T_{scan} – perioda jedné otočky radaru v sekundách

Náhled hlavičky formulářového okna pro dotazovací charakteristiku Roll-Call periody zobrazuje tabulka 1.9. Z důvodu programového omezení je u nevyslychaných kódů či registrů nutné zadat parametr rovný nule, navzdory tomu, že perioda je naopak rovna nekonečnu. Program při načítání hodnot je nastaven tak, aby interpretoval nulu jako nepoužitý druh dotazu nikoliv jako periodu. Navíc i z hlediska uživatelského rozhraní je možné předpokládat, že vložení nuly je přehlednější než symbolu nekonečna.

Tabulka 1.9: Parametry sekundárních přehledových radarů (3. část)

Periody dotazování												
Kód Módu A/C	Kód Módu S	BDS 1.0	BDS 1.7	BDS 2.0	BDS 3.0	BDS 4.0	BDS 5.0	BDS 6.0	BDS 0.5	BDS 4.4	BDS 4.5	BDS 0.7
[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
$p_{int_i} \in \langle 0; k \cdot T_{scan} \rangle$ kde $k \in \mathbb{N}$												

Parametry listu TR

Poslední list TR umožňuje definovat virtuální přijímače. Slouží k měření zatížení RF 1090 MHz v oblasti, která je vymezena jeho dosahem. Je nutné zadat pouze polohu v prostoru, která se skládá ze zeměpisných souřadnic a nadmořské výšky, a poté dosah přijímače. V původní verzi RFL Modelu byly tyto přijímače označovány jako pozemní (Terrestrial Receivers), proto byla použita zkratka TR. Použití nového označení virtuální přijímače (virTual Receivers) vystihuje lépe skutečnost, že je můžeme virtuálně umístit v simulačním prostoru naprosto libovolně. Především volený parametr p_{AMSL} nám umožňuje posoudit zátěž pro různé výšky ovlivněné i rádiovým horizontem.

Tabulka 1.10: Parametry virtuálních přijímačů

LAT	LON	AMSL	Poloměr dosahu
[°]	[°]	[m]	[km]
$p_{lat} \in \langle p_{lat1}; p_{lat2} \rangle$	$p_{lon} \in \langle p_{lon1}; p_{lon2} \rangle$	$p_{AMSL} \in \mathbb{R}^+$	$p_{vr} \in \mathbb{R}^+$

1.3 Environment Modul

Environment Modul je z pohledu simulace prvním výkonným modulem. Připravená data pro generování prostředí získává od *Input modulu*, který je načten do prostoru proměnných v programu MATLAB. Modul Environment stanoví počet letadel ve vymezeném prostoru a přiřadí jim dle stanovených pravidel výchozí polohu, letovou hladinu, rychlost, letěný kurz a palubní vybavení související s využíváním RF 1030/1090 MHz. Výsledkem je matice TARGET, která shrnuje přiřazené vlastnosti každého letadla v modelovém prostoru. Zároveň požádá o zadání doby trvání simulace, po kterou simulujeme pohyb letadel. V této části textu popíšeme základní pravidla, kterými model vytvoří prostředí a data pro následné testování RF interakcí.

1.3.1 Vytvoření modelového prostředí

Doposud jsme definovali prostředí pouze skrze oddělené parametry. Číselně byla popsána absolutní velikost prostoru, vertikální pásma, charakteristické hodnoty popisující let, vybavení letadel atd. V této fázi již postupujeme dále. Provádíme syntézu informací a ty odpovídajícím způsobem přiřazujeme generovaným prvkům tj. vytváříme prostředí. Každý prvek nacházející se v něm je poté popsán souborem vlastností, které jsou v souladu se zadáním modelované úlohy.

Nejdříve je vypočtena plocha, která je uzavřena dvojicí poledníku a rovnoběžek. Poté je z dat dopočten vertikální rozměr prostoru, který odpovídá součtu velikostí (tloušťky) jednotlivých vertikálních pásem (popsáno v 1.4 na str. 17). Výsledkem je celkový objem, ve kterém bude simulace probíhat a který je nezbytný pro výpočet počtu letadel, jež se v prostoru budou nacházet.

Zeměpisné souřadnice jsou všem letadlům v čase $t = 0$ přiděleny náhodně pod rovnoměrným pravděpodobnostním rozdělením. Hodnoty souřadnic jsou však generovány v rozmezí daném hraničními křivkami, resp. hodnotami $\langle LAT1, LAT2 \rangle$ a $\langle LON1, LON2 \rangle$.

1.3.2 Vybavení letadel

Podíl (procento) zastoupení variant palubního vybavení v celé množině letadel je v rámci tohoto modelu zcela nezávislý na ostatních parametrech tj. nezávisí na poloze, výšce či rychlosti letadla. Program pro přidělení jedné ze čtyř variant vybavení nejprve rozdělí množinu letadel na 4 podmnožiny. Základním požadavkem je pouze to, aby podíl velikosti podmnožin odpovídal definovanému podílu zastoupení palubního vybavení z EQP listu (1.6 na str. 19).

1.3.3 Přidělení letové hladiny

V modelu předpokládáme, že se všechna letadla pohybují rovnoměrně a přímočaře. Jelikož nejsou v režimu stoupání ani klesání (vertikální rychlost je rovna nule), udržují v průběhu celé simulace přiděle-

nou letovou hladinu. Proto k přidělení letové hladiny dochází pouze na začátku simulace v Environment modulu.

Přidělování letové hladiny se řídí určitými pravidly. V předešlém textu jsme se již zabývali třemi zónami, na které se simulační vzdušný prostor dělí. Jedná se o nízký (L-Low), střední (M-Medium) a vysoký (H-High) vzdušný prostor, přičemž ze vstupních dat navíc známe, jaké procento (podíl) letadel se v nich nachází a jaká je střední traťová rychlost. Program tedy rozdělí celkovou množinu letadel na tři podmnožiny v určeném podílu. Poté je jim přidělena konečná letová hladina, která leží v odpovídající vertikální zóně. Stejně je přistoupeno i k přidělení traťové rychlosti, jelikož ta opět souvisí s vertikální zónou. Přidělení letové hladiny je provedeno náhodným výběrem při rovnoměrném rozložení pravděpodobnosti.

1.3.4 Přidělení letěného kurzu

Ve srovnání s reálnými postupy lze říci, že simulační program volí opačnou cestu. Letadlům je totiž přiřazen kurz na základě lichosti či sudosti letové hladiny. Z pohledu simulace je tato záměna přijatelná, jelikož generujeme prostředí, kde nedefinujeme reálné lety po letových cestách. Dva případy, které se hodnotí pro přidělení kurzu v rámci Environment modulu je následující:

- a. číslo letové hladiny je sudé, přidělený náhodný kurz směrem na západ tj. $\mathcal{U}(180, 359)^\circ$
- b. číslo letové hladiny je liché, přidělený náhodný kurz směrem na východ tj. $\mathcal{U}(0, 179)^\circ$

1.3.5 Vyjádření rychlostí letadla

K závěru modul provede transformaci zeměpisných souřadnic z referenčního systému WGS 84 do ENU, který je výchozím pro celý model. Spolu s touto transformací skrze speciální funkci definuje pravoúhlé složky traťové rychlosti ve směru osy X a Y v základních jednotkách m/s. To je provedeno ze znalosti již dříve přidělené traťové rychlosti a kurzu.

Nejdříve je převedena rychlost z uzlů do základních jednotek.

$$V_{m/s} = V_{kts} \cdot 0,514 \quad (1.2)$$

Poté se dopočtou složky vektoru rychlosti.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{m/s} \cdot \sin(HDG) \\ V_{m/s} \cdot \cos(HDG) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

kde: $V_{m/s}$ – traťová rychlost [m/s]

V_{kts} – traťová rychlost [kts]

V_x – x-ová složka traťové rychlosti [m/s]

V_y – y-ová složka traťové rychlosti [m/s]

HDG – letěný kurz

1.3.6 Vektor letadla

Shrneme-li průběh Environment Modulu, je zřejmé, že vytvoření prostředí souviselo významně s vlastními letadly ve smyslu jejich polohy a pohybu v prostoru a také palubním vybavením. Byla vytvořena základní matice TARGET, v níž i -tý řádek představuje vektor popisující právě tyto vlastnosti i -tého letadla. Složky vektoru představují nezbytná data pro výpočet interakcí na RF 1030/1090 MHz. Význam složek ve vektoru i -tého letadla je popsány výrazem 1.4.

$$\vec{a}_i = (X \ Y \ FL \ V_x \ V_y \ EQP) \quad (1.4)$$

Výsledná matice TARGET složená z jednotlivých vektorů náležejících n letadlům.

$$\text{TARGET} = \begin{bmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \\ \vdots \\ \vec{a}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & FL_1 & V_{x_1} & V_{y_1} & EQP_1 \\ X_2 & Y_2 & FL_2 & V_{x_2} & V_{y_2} & EQP_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & FL_n & V_{x_n} & V_{y_n} & EQP_n \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Index (řádek) letadla je unikátním identifikátorem v rámci celého modelu a propojuje tak výsledkové matice s daným letadlem.

1.4 SSR Modul

SSR modul je určen k výpočtu zatížení RF 1090 MHz spojený s komunikací mezi palubními odpovídači a nadefinovanou sítí sekundárních přehledových radarů. Z pohledu zatížení

RF 1090 MHz se jedná o zprávy ve formátu DF4/5/20/21. Ačkoliv je primárním cílem stanovit zatížení sestupného spoje, odpovídající namodelování vzestupného spoje je pro model také zcela nezbytné. V rámci RF Load Modelu, který nyní popisujeme, předpokládáme ideální podmínky, při kterých radar dostane všechny odpovědi na své selektivní dotazy. Výsledky za ideálních podmínek jsou dále použity jako výchozí vstupní data pro RF Re-Interrogation modul, který již analyzuje zatížení RF kanálu při zahrnutí dalších vlivů reálného prostředí.

1.4.1 Vlastnosti sekundárního přehledového radaru

Parametry každého radaru jsou vyjádřeny v matici SSR. Ta je složena z řádkových vektorů \vec{s}_m , kde m je index radaru. Celkový počet radarů v simulaci je roven w . Složky vektoru jsou uvedeny výrazem 1.6.

$$\vec{s}_m = (LAT_m \ LON_m \ AMSL_m \ \theta_m \ RPM_m \ PRF_m \ INC_m \ \vec{T}_{RC_m}) \quad (1.6)$$

kde: LAT – x-ová souřadnice v ENU

LON – y-ová souřadnice v ENU

$AMSL$ – nadmořská výška [m]

θ – šířka hlavního laloku [°]

RPM – počet otáček za minutu [$ot.min^{-1}$]

PRF – Pulse Repetition Frequency parametr [Hz]

INC – inkrement poloměru krytí [km]

\vec{T}_{RC} – 13-ti složkový vektor s periodami dotazování na mód A, C a BDS registry

Matice SSR popisující vlastnosti všech radarů v simulaci má tvar:

$$SSR = \begin{bmatrix} \vec{s}_1 \\ \vdots \\ \vec{s}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & \theta_1 & RPM_1 & PRF_1 & INC_1 & \vec{T}_{RC1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_w & Y_w & Z_w & \theta_w & RPM_w & PRF_w & INC_w & \vec{T}_{RCw} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

1.4.2 Metoda určení počtu odpovědí na SSR za dobu simulace

Pro odhad zatížení RF pásma 1090 MHz, které je výsledkem interakcí mezi sekundárními radary a letadly, je nutné, aby program ve výpočtu zohlednil následující:

1. délku doby letu letadla v krytí radaru
2. variantu Módu palubního odpovídače
3. charakteristiku dotazování All-Call a Roll-Call periody

Simulování pohybu letadla v průběhu simulace vede k potřebě určit dobu, po kterou bylo letadlo v krytí radaru a odpovídalo na jeho dotazy. Postupem, který je podrobně uveden v části *Výpočet časů interakce se SSR*, získáme čas vstupu a výstupu letadla do prostoru krytí a to pro všechna letadla vůči všem radarům v prostředí. Je samozřejmé, že existují i triviální řešení, v nichž letadlo nevlétne do prostoru krytí vůbec a výsledkem je nulový časový interval.

Informaci o módu palubního odpovídače n -tého letadla získáváme z EQP, které je zahrnuto v 6. složce vektoru \vec{a}_n . V modelu primárně předpokládáme následující. Veškerý provoz vybavený Módem S v krytí již získal IC radaru, v důsledku čehož je blokován na odpovídání Mode S Only All-Call periodě. Jinými slovy, letadla vybavená módem A/C jsou vyslýchána standardně při All-Call periodě, zatímco letadla s odpovídačem módu S odpovídají na Roll-Call periodu. Odpovídání odpovídače Módu S na All-Call periodu je simulováno pouze tehdy, je-li letadlo ve vnější zóně krytí definované parametrem *Inkrement poloměru krytí*.

Tabulka 1.11: Rozhodovací tabulka pro SSR dotazy

		DRUH DOTAZOVACÍ PERIODY		
		Mode A/C Only All-Call perioda	Mode S Only All-Call perioda	Roll-Call perioda
ODPOVÍDAČ	Mode A/C	vždy v době přechodu hlavního paprsku	nikdy	nikdy
	Mode S	nikdy	pouze pokud je v oblasti vymezené INC parametrem, jinak blokováno	pouze je-li adresován letadlu a v době přechodu hlavního laloku

Dále je pro každý radar vypočítána charakteristika jeho Mode A/C Only All-Call a Roll-Call periody. Pro další operace v cyklu je dotazovací charakteristika vztažena na interval jedné sekundy. Ta je odvozena z četnosti dotazů při přechodu cíle lalokem a rychlosti otáčení. Použitím takto normovaných charakteristik

jsme schopni programem odhadnout počet vyžadovaných odpovědí za dobu letu v krytí radaru.

Výpočet časů pro sekundární přehledový radar

V této části blíže představíme postup, kterým program vypočte časy vstupu a výstupu letadla do krytí radaru. Modul SSR pomocí cyklů provede popsané výpočty u všech letadel vůči všem radarům. Pro přehlednost je uveden příklad, ve kterém zkoumáme pouze jediné letadlo vůči jednomu radaru. Proto nejsou u proměnných použity indexy k rozlišení konkrétního letadla či radaru. Nejdříve jsou programem použity polohové vektory letadel a radarů vůči absolutnímu počátku z importovaných matic a poté je vypočítán polohový vektor radar-letadlo (cíl):

Polohový vektor letadla:

$$\vec{r}_{AC}(t) = \begin{bmatrix} X_{AC.0} + V_x \cdot t & Y_{AC.0} + V_y \cdot t & Z_{AC.0} + V_z \cdot t \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Polohový vektor radaru, který je oproti polohovému vektoru letadla v čase konstantní:

$$\vec{r}_{RD} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Maximální dosah radaru při započítání vlivu radarového horizontu:

$$R_{max} = \min\{R_{RNG}; R_{HZN}\} \quad (1.10)$$

kde: $X_{AC.0}, Y_{AC.0}, Z_{AC.0}$ – výchozí souřadnice cíle v ENU

X, Y, Z – výchozí souřadnice radaru v ENU

V_x, V_y, V_z – x-ová, y-ová a z-ová složka vektoru rychlosti letadla [m/s]

R_{RNG} – nominální poloměr krytí radaru [m]

R_{HZN} – hodnota radarového horizontu [m]

Polohový vektor radar-letadlo, dále označován jako polohový vektor cíle, je doložen ze vztahů 1.8 a 1.9:

$$\vec{r}(t) = \begin{bmatrix} X_{AC.0} + V_x \cdot t & Y_{AC.0} + V_y \cdot t & Z_{AC.0} + V_z \cdot t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Vzdálenost cíle od radaru je roven velikosti $|\vec{r}(t)|$:

$$|\vec{r}(t)| = \sqrt{(X_{AC.0} - X + V_x \cdot t)^2 + (Y_{AC.0} - Y + V_y \cdot t)^2 + (Z_{AC.0} - Z + V_z)^2} \quad (1.12)$$

Pro časy vstupu a výstupu letadla (cíle) do krytí radaru odpovídá situaci, kdy je velikost polohového vektoru $\vec{r}(t)$ rovna dosahu radaru:

$$\sqrt{(X_{AC.0} - X + V_x \cdot t)^2 + (Y_{AC.0} - Y + V_y \cdot t)^2 + (Z_{AC.0} - Z + V_z)^2} = R_{max} \quad (1.13)$$

Postupnou úpravou rozložíme výraz 1.13 a vytkneme proměnnou času t . Jelikož letadla v modelu udržují

konstantní letovou hladinu, je člen V_z roven nule.

$$t^2(V_x^2 + V_y^2) + t[2V_x(X_{ac.0} - X) + 2V_y(Y_{ac.0} - Y)] + (X_{ac.0} - X)^2 + (Y_{ac.0} - Y)^2 + (Z_{ac.0} - Z)^2 - R_{max}^2 = 0 \quad (1.14)$$

Následuje úprava na členy kvadratické rovnice a její řešení:

$$a = V_x^2 + V_y^2$$

$$b = 2V_x(X_{ac.0} - X) + 2V_y(Y_{ac.0} - Y)$$

$$c = (Y_{ac.0} - Y)^2 + (Z_{ac.0} - Z)^2 - R_{max}^2$$

Výše zmíněné vztahy popisují odvození. Nejedná se o postup, který by SSR Modul prováděl kompletně při každém cyklu. Program počítá kořeny z připravených členů ve vektorovém zápisu:

$$a = \begin{pmatrix} V_x^2 & V_y^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$b = 2\{ \begin{bmatrix} X_{ac.0} & Y_{ac.0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X & Y \end{bmatrix} \} \times \begin{bmatrix} V_x^2 \\ V_y^2 \end{bmatrix}$$

$$c = \{ \begin{bmatrix} X_{ac.0} & Y_{ac.0} & Z_{ac.0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \}^2 \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - R_{max}^2$$

Čas vstupu a výstupu z krytí dostaneme ze standardního předpisu pro řešení kvadratické rovnice. Pro přehlednost kód MATLABU nejdříve spočte hodnoty členů a pak již počítá s konkrétními hodnotami. Důležitá je hodnota diskriminantu:

$$t_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

Pokud je diskriminant menší než nula, letadlo nevlétne do rozsahu. Kořeny rovnice odpovídají času vstupu/výstupu do oblasti krytí daného radaru. Absolutní hodnota rozdílů kořenů pak odpovídá délce letu v oblasti krytí. Je-li vstup/výstup mimo časový interval vymezený simulační dobou, není dosažen vypočtený kořen, ale pouze krajní hodnota intervalu.

Počet odpovědí na All-Call periodu

V RFL modelu na All-Call periodu odpovídají pouze letadla s odpovídačem Módu A/C. Hodnota M_{AC} potom odpovídá počtu dotazů, které letadlo v průměru přijme od Mode A/C Only All-Call periody za jednu sekundu. Jedná se o odvozený parametr, jelikož je cíl dotazován s předdefinovanou frekvencí (PRF) pouze v době přechodu paprsku. Proto je pro odvození nezbytné zahrnout nejen zmíněné PRF, ale i otáčky radaru a šířku hlavního laloku.

Pro odvození hodnoty parametru M_{AC} potřebujeme nejdříve určit počet přechodů paprsku přes cíl za dobu trvání simulace (N_{scan}) a odpovídající počet dotazů při přechodu (N_{HPS}). V přístupu k problematice

zahrnujeme pohyb letadla jen v souvislosti se vstupem/opuštěním oblasti krytí.

Počet přechodů paprsku přes cíl za dobu simulace:

$$N_{scan} = n \cdot \frac{1}{60} \cdot t \quad (1.15)$$

Doba přechodu paprsku přes cíl (Dwell Time):

$$t_{dwell} = \frac{\Theta}{360^\circ} \cdot \frac{1}{\frac{n}{60}} \quad (1.16)$$

Počet dotazů při přechodu paprsku přes cíl (Hits Per Scan):

$$N_{HPS} = \frac{\Theta \cdot 60}{360^\circ \cdot n} \cdot PRF \quad (1.17)$$

kde: N_{scan} – celkový počet přechodů paprsku [-]

N_{HPS} – počet dotazů při přechodu paprsku [-]

t_{dwell} – délka trvání přechodu paprsku přes cíl [s]

θ – šířka hlavního paprsku [$^\circ$]

n – počet otáček radaru [$ot.min^{-1}$]

PRF – Pulse Repetition Frequency [s^{-1}]

Počet vyžádaných zpráv SSR za dobu simulace vyjádříme jako součin hodnoty počtu dotazu při přechodu paprsku (1.17) a celkového počtu přechodů za dobu simulace (1.15)

$$M_{AC} = \frac{\Theta \cdot 60}{360^\circ \cdot n} \cdot PRF \cdot \frac{n}{60} \cdot t = \frac{\Theta}{360^\circ} \cdot PRF \cdot t \quad (1.18)$$

Pokud vyjádříme čas t jako rozdíl časových okamžiků odpovídajících vstupu (t_{in}) a výstupu (t_{out}) z krytí radaru získáme výraz:

$$M_{AC} = \frac{\Theta}{360^\circ} \cdot PRF \cdot (t_{out} - t_{in}) \quad (1.19)$$

Obecná hodnota $M_{AC_{uv}}$ udává počet dotazů, které u -té letadlo získalo při All-Call periodě v -tého radaru za celou dobu simulace.

$$M_{AC_{uv}} = \frac{\Theta_v}{360^\circ} \cdot PRF_v \cdot (t_{out_{uv}} - t_{in_{uv}}) \quad (1.20)$$

Celkový počet dotazů All-Call periody, které přijalo u -té letadlo od w radarů v simulačním prostoru.

$$M_{AC_u} = \sum_{v=1}^w \frac{\Theta_v}{360^\circ} \cdot PRF_v \cdot (t_{out_{uv}} - t_{in_{uv}}) \quad (1.21)$$

kde: θ_v – šířka hlavního paprsku v -tého radaru [$^\circ$]

PRF_v – Pulse Repetition Frequency v -tého radaru [s^{-1}]

$t_{in_{uv}}$ – čas vstupu u -tého letadla do krytí v -tého radaru [s]

$t_{out_{uv}}$ – čas výstupu u -tého letadla z krytí v -tého radaru [s]

Pozn.: Časy vstupu a výstupu (t_{in} a t_{out}) jsou stanoveny vzhledem k počátku času simulace, kdy $t = 0$.

Počet odpovědí Roll-Call periodu

K výpočtu počtu odpovědí na Roll-Call periodu radaru je aplikován velmi podobný postup jako u All-Call (Mode A/C Only) periody. Zprvu je odvozeno kolik radar vyšle průměrně adresných dotazů na jedno letadlo za 1 sekundu. Ze znalosti doby letu v krytí radaru lze již dopočítat počet dotazů a tedy i odpovědí, které souvisí s daným letadlem. Opět zde platí předpoklad, že letadlo (s odpovídáčem Módu S) odpoví vždy dotaz, který mu je adresován. Degradující vlivy na komunikaci jsou analyzovány až v RFR Modelu.

Počet dotazů za sekundu od v -tého radaru v rámci Roll-Call periody je označen jako f_{RC_v} . K výpočtu SSR Modul použije subvektor T_{RC_v} (1.22), jehož složky obsahují periody, se kterými se radar dotazuje. Bližší popis subvektoru byl již uveden na str. 23. Složky vektoru nejdříve vyjádřeny jako převrácené hodnoty a poté sečteny. Tím získáme průměrný počet adresovaných dotazů na letadlo v krytí za interval jedné sekundy (1.23).

$$\vec{T}_{RC_v} = \left(Q_{RC_{v,1}} \quad Q_{RC_{v,2}} \quad \dots \quad Q_{RC_{v,n}} \right) \quad (1.22)$$

$$f_{RC_v} = \left[\frac{1}{Q_{RC_{v,1}}} \quad \frac{1}{Q_{RC_{v,2}}} \quad \dots \quad \frac{1}{Q_{RC_{v,n}}} \right] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Ke stanovení zatížení sestupného linku od Roll-Call dotazování v -tého radaru v interakci s u -tým letadlem použijeme následující vztah aplikující dobu letu v krytí:

$$M_{S_{uv}} = f_{RC_v} \cdot (t_{out_{uv}} - t_{in_{uv}}) \quad (1.24)$$

K určení celkového počtu odpovědí u -tého letadla na adresné dotazy je nutné ohodnotit interakce se všemi radary, jejichž počet je roven w .

$$M_{S_u} = \sum_{v=1}^w f_{RC_v} \cdot (t_{out_{uv}} - t_{in_{uv}}) \quad (1.25)$$

Pro správnost výsledků je nutné, aby letadlo volené za index u bylo vybavené Módem S. Nicméně podobné omezení není nezbytné aplikovat na výběr indexu radaru. Výpočet dle rovnice 1.25 totiž provádíme přes všechny radary. V případě, že letadlo nebylo v krytí některého z radaru, jsou časy vstupu a výstupu rovny nule, a tudíž výsledek neovlivní.

Tabulka 1.12: Vyslýchací schéma radaru

All-Call perioda		Roll-Call perioda
Mode A/C Only	Mode S Only	Adresné dotazy

1.4.3 Příprava dat pro RF Re-Interrogation Model

Dosud jsme se v textu zabývali výhradně odvozením počtu odpovědí na dotazy sekundárních radarů. Z uvedených výpočtů jsme byli schopni stanovit, jaké množství každé z letadel vyslalo v souvislosti s dotazováním radarů. Nicméně z hlediska SSR Modulu se nejedná o jedinou úlohu, kterou provádí. Modul totiž sekundárně poskytuje i zdrojová data pro RFR Model.

V souvislosti s RFR Modelem je nutné určit i o množství dotazů od SSR, které letadlo přijalo, ale nezodpovědělo je. Dotazování radaru se periodicky opakuje dle schematu (tab. 1.12). V době, kdy přes cíl přechází lalok, přijme na frekvenci i dotazy, které pro něj nejsou určeny a na které je blokováno. V tabulce 1.13 jsou shrnuty druhy dotazů, které odpovídač letadla při přechodu laloku obdrží, ale na které neodpovídá. Množství neadresných dotazů je nezávislé počtu a poloze cílů. Naopak počet adresných dotazů je úměrný počtu letadel, které leží v šířce laloku. Radar totiž musí generovat odpovídající počet (unikátních) adresných dotazů, proto čím více letadel s Módem S bude na stejném azimutu, tím více dotazů bude radar daným směrem vysílat.

Tabulka 1.13: Varianty nezodpovězených přijatých dotazy SSR

	Nezodpovězené dotazy
Odpovídač Mode A/C	Všeobecný dotaz Mode S Only All-Call Periody
	Adresný dotaz Roll-Call Periody
Odpovídač Mode S	Všeobecný dotaz Mode A/C Only All-Call Periody
	Všeobecný dotaz Mode S Only All-Call Periody ¹
	Selektivní dotaz adresovaný jinému letadlu

Dotazy, které letadlo přijme na vzestupném spoji, ale nezodpoví je, jsou v RFR Modelu označovány obecně jako Unrelated Calls (URC). Pro přehlednost přejdeme k tomuto označení již v této části textu.

K vyjádření množství dotazů All-Call periody v kategorii URC lze použít již odvozený vzorec (1.18), který byl uveden na straně 27. Jelikož je počet dotazů All-Call periody konstantní a závisí pouze na parametrech radaru, není nutné odvozovat jiný matematický vztah. Naopak v případě množství selektivních dotazů Roll-Call periody v kategorii URC záleží na počtu letadel s Módem S, které se nachází ve vyslýchané oblasti. V dvourozměrné projekci se oblast zobrazí jako kruhová výseč se středem v souřadnicích pozice radaru a velikostí danou dvojnásobkem úhlové šířky hlavního laloku. Simulace k řešení používá pravděpodobnostní přístup namísto reálné analýzy modelového prostředí.

¹V simulaci předpokládáme, že všechna letadla s odpovídačem Módu S jsou již zablokována proti odpovědi na dotazy Mode S Only All-Call periody.

Přijatelnost aproximace lze zdůvodnit s ohledem na tyto vlastnosti systému:

1. rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení výchozí polohy letadla, letové hladiny, traťové rychlosti, kurzu a palubního vybavení
2. údaj o celkovém počtu letadel,
3. údaj o velikosti simulační plochy,
4. řešení úlohy pouze v dvou rozměrech,
5. údaj o poměrech zastoupení palubního vybavení.

Dříve než bude zmíněno programové řešení, bude popsán obecný postup vyjádření hodnoty URC Mode S dotazu. Pravděpodobnost výskytu letadla v kruhové výseči (sektoru) vybaveným odpovídačem Módu S je označena jako $P(A_s)$. Je výsledkem součinu pravděpodobností, že se letadlo bude nacházet právě v uvažované oblasti $P(S)$ a že nebude vybaveno variantou odpovídače Módu A/C, tj. $P(EQP \neq 1)$

$$P(A_s) = P(S) \cdot P(EQP \neq 1) \quad (1.26)$$

Jelikož ze čtyř možností palubního vybavení je pouze jedna neakceptovatelná, nahradíme ji doplňkem pravděpodobnosti.

$$P(A_s) = P(S) \cdot (1 - P(EQP = 1)) \quad (1.27)$$

Oba výrazy pro pravděpodobnost na pravé straně vyjádříme jako poměry proměnných:

$$P(A_s) = \frac{S_{sector}}{S_{env}} \cdot \left(1 - \frac{N_{EQP=1}}{N_{total}}\right) \quad (1.28)$$

Vyjádříme-li vztah pro výpočet plochy kruhové výseče jednotlivými parametry, lze psát pro oblast v -tého radaru:

$$P(A_s)_v = \frac{\pi \cdot R_v^2}{360} \cdot \alpha_v \cdot \frac{1}{S_{env}} \cdot \left(1 - \frac{N_{EQP=1}}{N_{total}}\right) \quad (1.29)$$

$$\alpha_v = 2 \cdot \theta_v \text{ (letadlo ovlivněno v prostoru } \pm \theta \text{)}$$

kde: $P(A_s)_v$ – ppst. výskytu letadel v kruhové výseči se šířkou α od v -tého radaru

R_v – nominální poloměr krytí v -tého radaru [km]

α_v – velikost výseče v -tého radaru [°]

S_{env} – velikost celkové simulační plochy [km^2]

$N_{EQP=1}$ – celkový počet letadel vybavených variantou EQP=1 [-]

N_{total} – celkový počet letadel v simulaci [-]

Počet letadel s odpovídačem Módu S (značeno N_{s_v}) ve vybraném sektoru v -tého radaru je možné spočítat vztahem (1.30). S ohledem na rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení většiny parametrů popisující pohyb a vybavení letadel dostáváme střední hodnotu, jejíž rozptyl je nulový, a tedy nezasahuje nijak do

výpočtů.

$$N_{s_v} = P(A_s)_v \cdot N_{total} \quad (1.30)$$

Vzorec 1.31 je použit pro výpočet množství URC selektivních dotazů, které u -té letadlo přijme v průběhu letu v krytí v -tého radaru. Jelikož je nutné pracovat pouze s počtem okolních letadel v laloku, je nutné odečíst u -té od N_{s_v} .

$$URC_{S_{uv}} = (N_{s_v} - 1) \cdot M_{S_{uv}} = (N_{s_v} - 1) \cdot f_{RC_v} \cdot (t_{out_{uv}} - t_{in_{uv}}) \quad (1.31)$$

kde: $URC_{S_{uv}}$ – počet URC (nepříslušejících) selektivních dotazů na u -té letadlo o v -tého radaru [-]

N_{s_v} – počet letadel vybavených odpovídacím módem S v laloku v -tého radaru [-]

M_{S_v} – počet selektivních dotazů na jedno letadlo při přechodu laloku v -tého radaru [-]

f_{RC_v} – frekvence selektivního dotazování při přechodu laloku v -tého radaru [Hz]

1.4.4 Matice středních hodnot parametrů SSR

Matice SSR_STAT obsahuje střední hodnoty parametrů sekundárních radarů a vzniká jako sekundární produkt SSR Modulu. N -tý řádek matice shrnuje průměrné hodnoty parametrů radarů, které za dobu simulace dotazovaly n -té letadlo. Význam matice je spojený s přípravou dat pro Re-Interrogation Model.

Tabulka 1.14: Popis složek řádkového vektoru z matice SSR_STAT. *Složky vektoru jsou v tabulce prezentovány ve sloupci z důvodu přehlednosti.*

Pole	Značení proměnné	Význam hodnoty
Pole 1	phi	střední šířka hlavního laloku
Pole 2	rpm	střední počet otáček za minutu
Pole 3	prf	střední hodnota Pulse Repetition Frequency
Pole 4	DwellTime	střední doba přechodu hl. laloku přes cíl
Pole 5	HitScanAC	střední počet dotazů All-Call periody
Pole 6	HitScanRC	střední počet dotazů Roll-Call periody
Pole 7	UHitScanRC	střední počet URC dotazů Roll-Call periody
Pole 8	NoComRadar	celkový počet radarů, se kterými letadlo komunikovalo

1.4.5 Výsledková matice zatížení od SSR

Výsledkem SSR modulu je výsledková matice nazvaná SSR_TARGETS (1.32), která je tvořena řádkovými vektory pro každé letadlo. Z nich lze určit, kolik dotazů jednotlivá letadla přijala od radarů. První dvě složky vektoru t_{in} a t_{out} odpovídají časům vstupu a výstupu z krytí radaru. Pro výsledkovou matici nemají žádný význam, jelikož jsou přepisovány v rámci procedur SSR modulu při testování každého radaru. Jejich význam je výhradně programovací.

$$SSR_TARGETS = \begin{bmatrix} \vec{s}_{tgt_1} \\ \vdots \\ \vec{s}_{tgt_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{in_1} & t_{out_1} & RC_{A/C_1} & RC_{S_1} & URC_{A/C_1} & URC_{S_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{in_r} & t_{in_r} & RC_{A/C_r} & RC_{S_r} & URC_{A/C_r} & URC_{S_r} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

kde:

s_{tgt_u} – výsledkový vektor u -tého letadla
 RC_{A/C_u} – počet RC (příslušejících) dotazů Mode A a Mode C na u - té letadlo
 RC_{S_u} – počet RC (příslušejících) selektivních dotazů n u - té letadlo
 URC_{A/C_u} – počet URC (nepříslušejících) dotazů Mode A a Mode C na u - té letadlo
 URC_{S_u} – počet URC (nepříslušejících) selektivních dotazů n u - té letadlo
 v – celkový počet letadel (index)

URC hodnoty jsou připraveny pro RF Re-Interrogation Model, který na základě palubního vybavení vybere příslušné URC hodnoty (rozhodování dle tabulky 1.13, str. 29).

1.5 ACAS Modul

1.5.1 Programové pojetí funkce ACAS

Odhad množství přenosu zpráv DF0/16, které souvisí s technologií ACAS, je založeno na definování přenosových vazeb, vyhodnocení vzájemných poloh a rychlostí letadel v čase a z toho plynoucích interakcí. Model si v cyklu postupně zvolí každé letadlo vybavené systémem ACAS jako referenční, vůči němuž následně vyhodnocuje pohyb ostatních letadel. Do modelu jsou implementovány základní rozhodovací a provozní procedury, podle nichž ACAS na palubě letadla pracuje a hodnotí stav okolí. Jedná se především o parametr času (Tau) do bodu největšího sblížení (CPA), který je funkcí vzájemné polohy a rychlosti testované dvojice letadel.

V modelu se všechna letadla pohybují rovnoměrně přímočaře. Je důležité, že z pohledu zatížení RF pásma hodnotíme pouze vzniklé přenosové vazby a jejich toky. Dopady ACASu na případné změny trajektorie, které by při reálném kolizním provozu nastaly, program nesimuluje, protože reálně takováto situace nastane jen zřídka kdy.

Čas do bodu největšího sblížení lze vyjádřit jako poměr vzdálenosti letadel a jejich sblížovací rychlosti (1.33). Tento vztah lze analogicky zapsat jako poměr polohového vektoru mezi letadly $|\vec{r}_{q/i}|$ a sblížovací rychlosti $|\vec{V}_s|$. Sblížovací rychlost je opačně orientovaný vektor než polohový a vznikne průmětem relativní rychlosti letadel do jejich průvodiče tj. polohového vektoru. V okamžiku nejbližšího sblížení je sblížovací rychlost nulová. Záporné znaménko ve vektorovém zápisu je z důvodu opačné orientace sblížovacího a polohového vektoru.

$$t_{CPA} = - \frac{|\vec{r}(t)|}{\frac{\partial |\vec{r}(t)|}{\partial t}} \quad (1.33)$$

Dokument ICAO [zdroj] upravuje tento výpočet o bezpečnostní hodnotu SMOD, která má zajistit, že i v případě, že letadla poletí po sbíhajících se tratích vzájemně svírajících velice malý úhel. Původní skalární zápis je převeden do vektorové formy, která je nezbytná pro další výpočty (1.34).

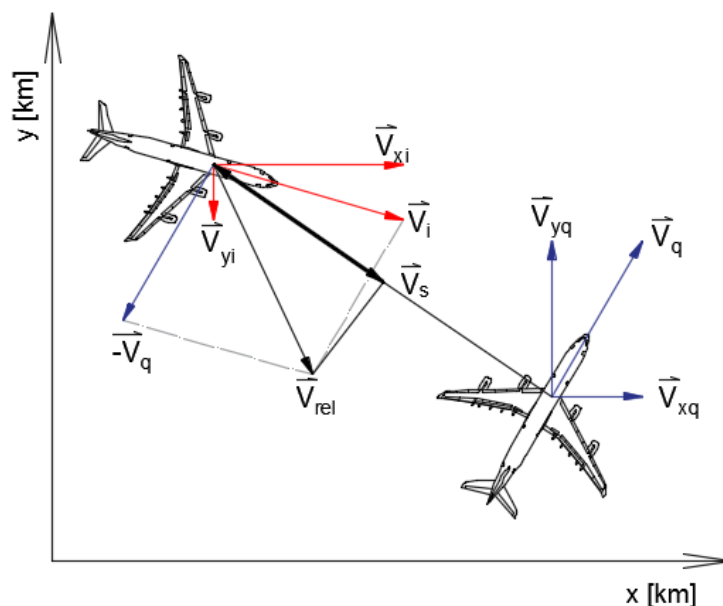
$$\tau = - \frac{r - \frac{SMOD^2}{r}}{\dot{r}} \xrightarrow{\text{vektor.}} \frac{|\vec{r}(t)| - \frac{SMOD^2}{|\vec{r}(t)|}}{\frac{\partial |\vec{r}(t)|}{\partial t}} \quad (1.34)$$

Jak lze vidět na výše uvedených výrazech, τ je funkcí vzájemné polohy a rychlosti, které jsou závislé na čase. Velikost času do CPA je obecně rozhodující pro volbu intenzity dotazů mezi letadlem a narušitelem. Pohybuje-li se velikost τ pod předpisem stanovenou mezí, je zvolena nominální frekvence sledování narušitele, tj. 1 za sekundu. Ta je v rámci ACAS specifikace maximální frekvencí, se kterou se jednotka dotazuje narušitele. V situacích, kdy není nutné dotazovat letadlo s takovou frekvencí, může být snížena. Podmínky pro toto snížení a přesné hodnoty jsou také stanovené předpisem.

Jelikož program řeší vysílání na horizontu celého simulačního času, je aplikována metoda, při níž jsou spočítány významné časy vymezující jednotlivé dotazovací režimy. Metoda využívá matematického popisu pohybu letadel k vyjádření neznámé proměnné, tj. času t . K tomu využívá vzdálenostních či časových podmínek plynoucích ze specifikace fungování ACASu.

Hodnotu τ je možné vypočítat pro každé letadlo-narušitele. Z pohledu mechaniky vždy existuje čas, kdy bude vzájemná vzdálenost mezi letadlem s ACASem a narušitelem nabývat minima (CPA). Pro volbu dotazovacího režimu závisí na velikosti hodnoty TAU. Simulace v prvním kroku určí časy t_1 a t_2 , které ohraničují časový interval, během něhož bude probíhat vzájemná komunikace mezi uvažovanou dvojicí letadel. Letadla jsou ve vzájemném dosahu a předávají si zprávy.

1.5.2 Vyjádření matematických výrazů pro ACAS výpočty



Obrázek 1.3: Popis hlavních proměnných pro matematické odvození činnosti ACAS

Použitá indexace:

q - dotazující letadlo s ACAS (interrogating aircraft)

i - dotazované letadlo narušitel (intruder)

$$\vec{A}\vec{C}_i(t) = \begin{pmatrix} X_{i,0} + V_{xi}t & Y_{i,0} + V_{yi}t & Z_{i,0} + V_{zi}t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i(t) & Y_i(t) & Z_i(t) \end{pmatrix}$$

$$\vec{AC}_q(t) = \begin{pmatrix} X_{q,0} + V_{xq}t & Y_{q,0} + V_{yq}t & Z_{q,0} + V_{zq}t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_q(t) & Y_q(t) & Z_q(t) \end{pmatrix} \quad (1.35)$$

Polohový vektor letadla-narušitele i vůči referenčnímu letadlu q :

$$\vec{r} = \vec{r}_{q/i}(t) = \begin{pmatrix} X_i(t) - X_q(t) & Y_i(t) - Y_q(t) & Z_i(t) - Z_q(t) \end{pmatrix} \quad (1.36)$$

Velikost polohového vektoru odpovídá vzdálenosti letadel od sebe:

$$|\vec{r}_{q/i}(t)| = \sqrt{[(X_{i,0} - X_{q,0}) + (V_{xi} - V_{xq}) \cdot t]^2 + [(Y_{i,0} - Y_{q,0}) + (V_{yi} - V_{yq}) \cdot t]^2 + (Z_i - Z_0)^2}$$

Pro zjednodušení první časové derivace provedeme substituci výrazu za proměnnou u :

$$|\vec{r}_{q/i}(t)| = \sqrt{[(X_{i,0} - X_{q,0}) + (V_{xi} - V_{xq})t]^2 + \dots + (Z_i - Z_0)^2} = u \quad (1.37)$$

První časová derivace polohového vektoru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial |\vec{r}_{q/i}(t)|}{\partial t} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{u} [2(X_{i,0} - X_{q,0}) + (V_{xi} - V_{xq})t] (V_{xi} - V_{xq}) + \\ &+ [2(Y_{i,0} - Y_{q,0}) + (V_{yi} - V_{yq})t] (V_{yi} - V_{yq}) + 0 \end{aligned} \quad (1.38)$$

Vrátíme substituci $u=|\vec{r}_{q/i}(t)|$ a vyjádříme :

$$\begin{aligned} \frac{\partial |\vec{r}_{q/i}(t)|}{\partial t} &= \frac{1}{|\vec{r}_{q/i}(t)|} [(X_{i,0} - X_{q,0}) + (V_{xi} - V_{xq})t] \cdot (V_{xi} - V_{xq}) + \\ &+ [(Y_{i,0} - Y_{q,0}) + (V_{yi} - V_{yq})t] \cdot (V_{yi} - V_{yq}) \end{aligned} \quad (1.39)$$

První časová derivace polohového vektoru odpovídá sblížovací rychlosti. Sblížovací rychlost se dá tedy vyjádřit jako skalární součin jednotkového polohového vektoru a vektoru relativní rychlosti.

$$\begin{aligned} \vec{V}_s(t) &= \frac{\partial |\vec{r}_{q/i}(t)|}{\partial t} \\ \vec{V}_s(t) &= -\frac{1}{|\vec{r}_{q/i}(t)|} \cdot \vec{r}_{q/i} \cdot \vec{V}_{rel} \end{aligned} \quad (1.40)$$

Čas do nejbližšího bodu (1.33) sblížení lze dosazením těchto výrazů napsat vztahem (1.41):

$$t_{CPA} = \frac{|\vec{r}_{q/i}(t)|}{\frac{\partial |\vec{r}_{q/i}(t)|}{\partial t}} = \frac{|\vec{r}_{q/i}(t)|}{-|\vec{V}_s|} = -\frac{|\vec{r}_{q/i}(t)|}{\frac{1}{|\vec{r}_{q/i}(t)|} \cdot \vec{r}_{q/i} \cdot \vec{V}_{rel}} \quad (1.41)$$

1.5.3 Sledovací režimy

Letadlo vybavené technologií ACAS sleduje okolní provoz nejen pasivním poslechem sestupného spoje, ale především aktivním dotazováním. Palubní vybavení je kromě vlivu relativní polohy a rychlosti významným faktorem ovlivňující volbu sledovacího a posléze i dotazovacího režimu. Okolní letadlo, které je v terminologii tohoto modelu označováno jako narušitel, je dotazováno více,:

1. čím menší je přesnost dat o jeho poloze a pohybu nízká (tj. vliv vybavení), a/nebo

2. čím menší je čas do CPA (tj. vliv pohybu).

Sledování narušitele s Mode A/C Only technologií

Pokud je narušitel vybaven odpovídačem Módu A/C je ACAS nucen vyhodnocovat jeho polohu z poměrně nekvalitních informací. Letadlo přijímá odpovědi od narušitele na základě neadresného dotazu. Je zřejmé, že tento způsob dotazování je nevyhnutelně spojen s příjmem i odpovědí stejně vybavených letadel v okolí, která dotaz přijala. Proto je vyhodnocení polohy složitější a i méně přesné než v případě sledování letadel, která jsou vybavena relativně vyspělejšími technologiemi. Dotazovací frekvence pro sledování letadel s Mode A/C Only je tedy 1 Hz, tj. nominální hodnota.

Simulace spočítá čas, po který je narušitel sledován a zvolí nominální frekvenci dotazování. Na základě toho vypočte, kolik odpovědí Mode A/C narušitel po sestupném spoji za dobu simulace vyslal.

Sledování narušitele s Mode S Only nebo ACAS technologií

Sledování narušitele přes adresné dotazy poskytuje letadlu s ACAS přesnější informaci o poloze a eventuálně i pohybu okolního provozu. Narušitel, který je vybavený pouze odpovídačem Mode S, je dotazován stejně jako narušitel, který je navíc vybaven systémem ACAS. Rozdíl je ovšem v tom, že v případě dvojice letadel ACAS-ACAS dochází ke vzájemnému dotazování a vyhodnocování situace, což je pro narušitele s Mode S Only technicky nemožné.

Adresné sledování narušitele s Mode S Only (i včetně Mode S + ACAS) je založeno na výměně zpráv UF0/16 a DF0/16. Frekvence dotazů ke sledování narušitele přechází z redukované f_{red} na nominální f_{nom} , je-li čas TAU menší roven 60s. To vyžaduje, aby bylo v rámci modulu ACAS spočítány celkem 4 časy pro dva intervaly:

1. celkový interval rádiové komunikace s narušitelem t_1 a t_2 ,
2. interval, kdy platí, že TAU je menší rovno 60 s, vymezený t_{1CPA} a t_{2CPA} .

Sledování narušitele s ADS-B technologií

Pokud je narušitel vybaven technologií ADS-B, je v rámci modelu ustanoveno hybridní sledování. Výchozí nastavení programu předpokládá, že všechna letadla vybavena technologií ACAS toto sledování podporují. Pro výpočet jsou použity podobné vzorce, které byly uvedeny pro sledování narušitelem s Mode S Only či ACAS vybavením. Do matematických vztahů jsou ovšem zavedeny příslušné konstanty, které ovlivňují přechody mezi jednotlivými režimy sledování. Sledovací režimy aplikují dotazování dle technických specifikací uvedených v dokumentu Doc 9863 Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual od ICAO [10].

Hybridní sledování ve srovnání s předchozími druhy sledování zatěžuje RF pásmo nejméně.

1.5.4 Výsledková matice zatížení od ACAS

ACAS Modul v závěru vytvoří výsledkovou matici ACAS_TARGETS (1.42), která popisuje zatížení spojenou s technologií ACAS. Matice je opět tvořena řádkovými vektory, které náležejí jednotlivým letadlům. Popisy složek vektorů jsou pro větší přehlednost uvedeny v tabulce 1.15 a zároveň pod sebou.

$$ACAS_TARGETS = \begin{bmatrix} A\vec{C}S_{tgt_1} \\ \vdots \\ A\vec{C}S_{tgt_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{in_1} & t_{out_1} & t_{1CPA_1} & t_{2CPA_5} & Pole\ 4_1 & \dots & Pole\ 11_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{in_r} & t_{out_r} & t_{1CPA_r} & t_{2CPA_r} & Pole\ 4_r & \dots & Pole\ 11_r \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

Tabulka 1.15: Popis vybraných složek vektoru z výsledkové matice ACAS_TARGETS

Pole	Význam hodnoty	Účel
Pole 5	Celkový počet vyslaných odpovědí Mód A/C	Určení zátěže RF 1090 m MHz
Pole 6	Celkový počet vyslaných odpovědí DF0/16	Určení zátěže RF 1090 m MHz
Pole 7	Počet selektivních dotazů	Pomocný parametr
Pole 8	Celkový čas interakce s narušiteli	Pomocný parametr
Pole 9	Celkový počet přijatých URC Mode A/C	Vstupní údaj pro RFR Model
Pole 10	Celkový počet přijatých URC UF0/16	Vstupní údaj pro RFR Model

1.6 Acquisition Squitter Modul

Automatické vysílání Acquisition Squitteru (AS) ve formátu DF11 je přiřazeno všem letadlům, která jsou vybavena Mode S odpovídačem, avšak nevysílají Extended Squitter (ADS-B technologie). Modul tedy na základě střední délky periody vysílání 1 Hz program vypočte celkové množství AS, které letadlo vyslalo na sestupném spoji za simulovanou dobu letu.

1.6.1 Výsledková matice zatížení od AS

Počet zpráv Acquisition Squitter ve formátu DF11, které letadlo odvysílalo na sestupném spoji za dobu simulace, jsou vloženy matice *SQUITTER_TARGETS* do řádku, který odpovídá indexu letadla. Rozměr matice, resp. sloupcového vektoru, je $[r \times 1]$, kde r je počet letadel v simulaci.

1.7 ADS-B Modul

ADS-B Modul je použit k přiřazení vysílání zpráv Extended Squitteru (ES) ve formátu DF17 letadlům, která jsou vybavena technologií ADS-B. Ačkoliv se opět jako u Acquisition Squitteru jedná o automatické vysílání, je množství zpráv odeslané letadlem nutné určit jinak. Technologie ADS-B vysílá periodicky jednotlivé BDS registry v rozmezí proměnlivého intervalu, a to v závislosti nejen na jejich typu, ale i na aktuálním operačním režimu (v letu či pojiždění). Vzhledem ke skutečnosti, že letadla v simulaci jsou vždy v režimu letu, je možné uvažovat pouze vysílání typů zpráv (BDS registrů) uvedených v tabulce 1.16 [12]:

Tabulka 1.16: Vysílací parametry Extended Squitteru

Typ zprávy ES	Perioda opakování vysílání
Airborne Position Message	0,4 - 0,6 s
Target State and Status	1,2 - 1,3 s
Aircraft Identification and Category	4,8 - 5,2 s
Airborne Velocity Message	0,4 - 0,6 s
Aircraft Operational Status Message	2,4 - 2,6 s

Modul každému letadlu vytvoří periodu, se kterou opakovaně vysílá daný BDS registr. Ta je získána jako náhodné číslo generované na vymezeném intervalu s rovnoměrným rozložením pravděpodobnosti. Modul pak odvodí počet zpráv ES za dobu letu. V porovnání s reálným fungováním ADS-B je tedy použito zjednodušení, jelikož pseudonáhodná perioda se generovala pouze jednou nikoliv pro každé následné vysílání zvlášť. Nicméně tato nepřesnost je přijatelná ve spojitosti s úrovní detailu, se kterou sledujeme zátěž frekvence.

1.7.1 Výsledková matice zatížení od ADS-B

Kód modulu nejdříve vygeneruje náhodné periody vysílání ve stanovených intervalech pro každé letadlo a převede je na frekvence. Následně frekvence vysílání jednotlivých BDS registrů sečte. Vzniklá hodnota charakterizuje počet vysílaných zpráv za jednu sekundu. Následným vynásobením délkou doby letu je odvozen celkový počet zpráv odeslaných za simulovaný let. Modul přiřadí zprvu toto vysílání všem letadlům do matice *ADSB_TARGETS*, jejíž rozměr je $[r \times 1]$, kde r je celkový počet letadel v simulaci. V případě, že letadlo není schopné vysílat ES kvůli absenci technologie, je hodnota ve výsledné matici v příslušném řádku změněna na nulu. Index řádku matice je opět shodný s identifikačním indexem letadla.

1.8 Virtual Receiver Modul

Tento modul slouží k vyjádření zatížení sestupného spoje ve vybrané oblasti. Měření je provedeno pomocí virtuálního přijímače, který lze libovolně umístit v prostředí modelu spolu s nastavitelným poloměrem dosahu. Tím je vypočítáno množství zpráv, které letadla vyslala v měřené oblasti za dobu simulace. V současné verzi je přiřazení počtu zpráv provedeno proporcionálně na základě znalosti délky letu letadla v dosahu přijímače.

Virtual Receiver Modul určí formát a počet zpráv, které oblast přijímače zatíží pomocí výsledkových matic SSR, ACAS, Acquisition Squitter a ADS-B modulů, které obsahují data o vysílání všech letadel. Výsledky zatížení jsou vyjádřeny jako počet zpráv přenesených za sekundu a uloženy do matice *TR_TARGETS* (1.43).

1.8.1 Výsledková matice celkového zatížení oblasti

Celkové zatížení oblasti je vyjádřeno maticí *TR_TARGETS*. Každý řádek matice náleží jednomu z virtuálních přijímačů. Pro m přijímačů je matice *TR_TARGETS* zobrazena výrazem 1.43.

$$TR_TARGETS = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & ACFT_1 & A/C_1 & DF11_1 & DF4/5/20/21_1 & DF17_1 & DF0/16_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m & Y_m & ACFT_m & A/C_m & DF11_m & DF4/5/20/21_m & DF17_m & DF0/16_m \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

kde: X_m – x-ová souřadnice virtuálního přijímače v ref. soustavě ENU [m]

Y_m – y-ová souřadnice virtuálního přijímače v ref. soustavě ENU [m]

$ACFT_m$ – počet letadel, která ovlivnila zatížení v oblasti virtuálního přijímače [-]

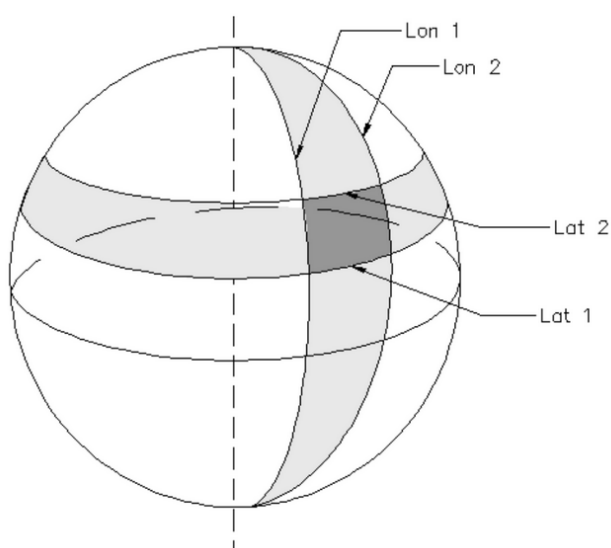
- A/C – četnost odpovědí módu A/C na neadresné dotazy SSR a ACAS [Hz]
- DF_{11} – četnost zpráv AS a odpovědí na SSR Mode S Only All-Call periody [Hz]
- $DF_{4/5/20/21}$ – četnost odpovědí na selektivní dotazy SSR [Hz]
- DF_{17} – četnost zpráv Extended Squitteru (ADS-B) [Hz]
- $DF_{0/16}$ – četnost sestupných zpráv v rámci ACAS [Hz]

1.9 Vytvořené externí funkce

V simulaci jsou některé výpočty prováděny vícekrát. Pro zjednodušení byly převedeny na externí skripty či funkce, které poskytnou požadovaná data na základě vstupních argumentů. V této podkapitole se budeme věnovat jejich popisu s ohledem na odvození.

1.9.1 Výpočet plochy pro simulaci

Prostředí, v němž probíhá simulace, je vymezeno pomocí dvojice rovnoběžek a poledníků. Výpočet takto vymezené plochy na kouli, do níž je povrch Země aproximován, je proveden funkcí s názvem *areaquad* [12].



Obrázek 1.4: Způsob vymezení simulační plochy

Postup výpočtu plochy mezi hraničními křivkami [reference na BP]:

$$A = \int_A dA = \int \int dx \cdot dy \quad (1.44)$$

$$A = \int_A dA = \int \int |J| \cdot d\lambda \cdot d\varphi \quad (1.45)$$

Transformační vztahy:

$$x = R \cdot \cos \lambda \cdot \cos \varphi$$

$$y = R \cdot \sin \lambda \cdot \cos \varphi$$

$$z = R \sin \varphi$$

$$|J| = R^2 \cdot \cos \varphi$$

Vyjádření jakobiánu J a substituce za proměnné:

$$A = \int_{LON1}^{LON2} \int_{LAT1}^{LAT2} |J| \cdot d\varphi \cdot d\lambda = R^2 \int_{LON1}^{LON2} \int_{LAT1}^{LAT2} (\cos \varphi \cdot d\varphi) \cdot d\lambda \quad (1.46)$$

Výsledný vztah používaný ve funkci *areaquad*:

$$A = R^2 |\sin Lat_2 - \sin Lat_1| \cdot |Lon_2 - Lon_1| \quad (1.47)$$

1.9.2 Transformace souřadného systému

Vstupním referenčním souřadným systémem modelu je v letectví běžně používaný WGS 84, avšak pro výpočty je prostředí transformováno do vhodnějšího referenčního systému ENU. [reference na YMS]. Jako vstupní hodnoty použijeme:

φ – zeměpisná šířka [°]

λ – zeměpisná délka [°]

h – výška nad referenčním elipsoidem [m]

Dále použijeme hodnoty definované pro WGS 84:

f – zploštění, $f = 1/298.2572221$

a – délka hlavní poloosy [°], $a = 6\,378\,137$ m

Pro aplikování transformačních matic je dále nutné vyjádřit následující hodnoty:

$$b = a - a \cdot f \quad e^2 = \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

Transformace z modelu WGS 84 do konečného ENU není provedena přímo. Nejdříve se souřadnice přepočítají do ECEF referenčního systému.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ECEF} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & 0 \\ \sin \varphi \cos \lambda & \sin \varphi \sin \lambda & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N \\ h \\ N - e^2 \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

endequation Modul poté transformuje souřadnice letadla, radaru či přijímače v ECEF dále. Tato operace navíc požaduje definování referenčního bodu, ke kterému jsou následně všechny polohy vztaženy. Pro účely analyzování zátěže sestupného spoje v vzdušném prostoru České republiky, bylo za tento bod zvoleno Letiště Praha/Ruzyně (LKPR) [19].

$$\varphi_0 = 50\,06\,03\,N$$

$$\lambda_0 = 014\,15\,36\,E$$

$$h_0 = 376\,m$$

Po stanovení odpovídajících hodnot X_0, Y_0, Z_0 modul provede konečnou transformaci do ENU z původního ECEF výrazem (1.49).

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}_{ENU} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ -\cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\cos \varphi_0 \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}_{ECEF} \quad (1.49)$$

1.9.3 Převod letové hladiny na AMSL

Každému letadlu je v modelu přiřazena letová hladina, avšak pro všechny výpočty je použita funkce $FL2AMSL$, která letovou hladinu přepočte na aktuální výšku nad hladinou moře. K tomu použije hodnoty aktuálního tlaku a teploty při hladině moře, které je nutné přednastavit. Funkce $FL2AMSL$ je vytvořena a připravena pro další rozvíjení modelu. V současné verzi zatím uvažujeme aktuální hodnoty shodné s MSA. Nicméně funkce je již zařazena do programového kódu.

Funkční závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce:

$$p_H = p_0 \left(1 - \frac{0,0065 \cdot H}{t_0 + 273,15} \right)^q \quad (1.50)$$

Atmosférický tlak v letové hladině je vyjádřen stejným vztahem jako pro tlak v MSA (1.50)

$$p_{FL} = p_0 \left(1 - \frac{0,0065 \cdot (FL \cdot 100 \cdot 0,3048)}{t_0 + 273,15} \right)^q \quad (1.51)$$

kde: p_H – atmosférický tlak v nadmořské výšce H [hPa]

p_0 – atmosférický tlak na úrovni hladiny moře dle MSA (1013,25 hPa)

H – nadmořská výška [m]

t_0 – teplota vzduchu na úrovni hladiny moře dle MSA (15°C)

q – exponent roven 5,256

p_{FL} – atmosférický tlak v letové hladině dle MSA [hPa]

FL – letová hladina [-]

Pro vyjádření aktuálního (skutečného) atmosférického tlaku p_r ve výšce H_r je nutné dosadit do vztahu 1.50 či 1.51 skutečnou teplotu t_r .

Pro převedení letové hladiny vztážené k MSA parametrům na reálnou nadmořskou výšku při aktuálních hodnotách tlaku a teploty při hladině moře je nutné zavést představu o tlakové hladině p . Letadlo, které v ní letí, má na vstupu tlakoměrných sond statický tlak p . Ačkoliv různě nastavené výškoměry indikují rozdílné výšky, let ve stejné tlakové hladině nám umožní oba vztahy porovnat:

$$p = p_r \left(1 - \frac{0,0065 \cdot H}{t_r + 273,15} \right)^q = \left(1 - \frac{0,0065 \cdot H_{FL}}{t_0 + 273,15} \right)^q \quad (1.52)$$

$$H = H_{AMSL} = \left(1 - \left(\frac{p_0}{p_r} \right)^{\frac{1}{q}} \left(1 - \frac{0,0065 \cdot H_{FL}}{t_0 + 273,15} \right) \right) \cdot \left(\frac{t_r + 273,15}{0,0065} \right) \quad (1.53)$$

kde: p – atmosférický tlak [hPa]

p_r – aktuální atmosférický tlak na úrovni hladiny moře [hPa]

H – nadmořská výška [m]

H_{FL} – nadmořská výška letové hladiny FL dle MSA [m]

t_0 – teplota vzduchu na úrovni hladiny moře dle MSA (15 °C)

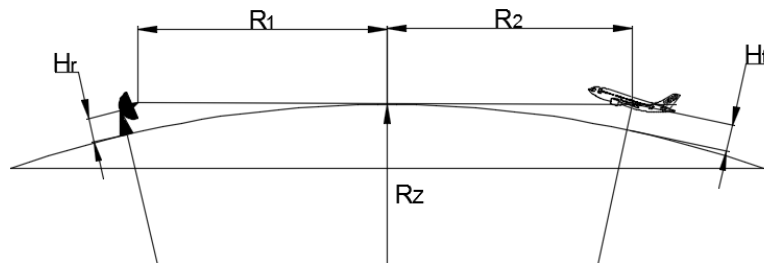
t_r – aktuální teplota na úrovni hladiny moře [°C]

q – exponent roven 5,256

1.9.4 Radarový horizont

Vliv zakřivení zemského povrchu je do modelu zahrnut pomocí funkce *Horizon*. Funkce ze znalosti vertikálních poloh dvou bodů v prostoru určí maximální vzdálenost, při níž mezi nimi bude zachován rádiový (radarový) kontakt. Samozřejmě je pak nutné rozhodnout, zda je signál vyzařován s dostatečným výkonem, aby se mohl šířit na danou vzdálenost. Maximální vzdálenost rádiového spojení mezi letadlem a radarem je potom dána nižší hodnotou, při které porovnáváme dosah z (a) pohledu zakřivení zemského povrchu a (b) z pohledu výkonu vyzařování.

Odvození rádiového je založeno na vyjádření geometrického horizontu. Na obrázku 1.5 je ilustrován vliv horizontu mezi radarem a letadlem (měřítko není reálné). Vzdálenost mezi nimi lze vyjádřit jako součet odvěsen pravoúhlých trojúhelníků R_1 a R_2 . Trojúhelníky mají společnou odvěsnu R_z a společný vrchol ve středu Země.



Obrázek 1.5: Znárodnění vztahů pro radarový horizont

Vyjádření součtu velikosti odvěsen:

$$R_{geom} = R_1 + R_2 = \sqrt{(h_r + R_z)^2 - R_z^2} + \sqrt{(h_t + R_z)^2 - R_z^2}$$
$$R_{geom} = \sqrt{(h_r^2 + 2h_r R_z + R_z^2)} + \sqrt{(h_t^2 + 2h_t R_z + R_z^2)} - R_z^2 \quad (1.54)$$

Pokud platí, že $R_z \gg h_r$ a $R_z \gg h_t$, potom lze 1.54 upravit na:

$$R_{geom} = \sqrt{2h_r R_z} + \sqrt{2h_t R_z} = \sqrt{2R_z} \cdot (\sqrt{h_r} + \sqrt{h_t}) \quad (1.55)$$

Vztah 1.55 odpovídá maximální vzdálenosti vizuálního horizontu pro dva objekty s danou výškou nad povrchem. V případě šíření elektromagnetických vln v atmosféře dochází k jejich lomu za reálný horizont. Rádiový horizont lze tedy vyjádřit z geometrického horizontu vynásobením korekční konstantou k pro

poloměr Země.

$$R_{HZN} = R_{geom} \cdot \sqrt{k} = \sqrt{2R_z \cdot k} \cdot (\sqrt{h_r} + \sqrt{h_t}) \quad (1.56)$$

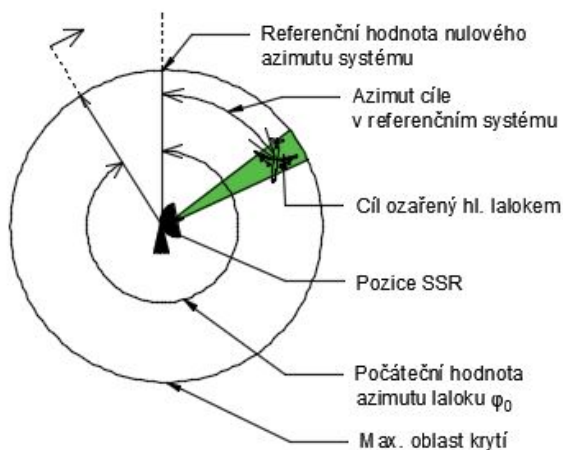
kde: $k = \frac{4}{3}$ [12]

1.9.5 Násobné vyslýchání radary

Obecně platí, že se letadla mohou vyskytovat v místě, které je kryto více než jedním radarem. Násobnost krytí nastává i v případě modelu. Data, která jsou dále použita jako vstupní pro RFR Model, nesou informaci pouze o množství zpráv za časový interval, avšak nevypovídají blíže o jejich rozložení. Proto je nutné statisticky určit střední hodnotu simultánního vyslýchání radary. To nastane, když se laloky dostanou nad stejný cíl ve stejném okamžiku. V prostředí, kde známe násobnost krytí a další parametry, funkce *MultiCov* dopočte průměrný počet přecházejících laloků, které současně ozařují cíl.

Funkce *MultiCov* načte úhlové rychlosti otáčení laloku (ω) všech radarů v oblasti a náhodně přiřadí výchozí úhel (φ_0), který definuje počáteční azimut laloku. Jelikož se jedná o statistický přístup, letadlo je přiřazeno automaticky na azimut $\pi/2$ stupňů vůči náhodně generované výchozí poloze laloku. Náhodné veličiny jsou z rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení. Simulace periodického průběhu skenování i -tého radaru je provedeno funkcí sinus dle vzorce 1.57.

$$y(t)_i = \sin(\omega_i t + \varphi_{0_i}) \quad (1.57)$$



Obrázek 1.6: Znáornění použitých vztahů pro odvození funkce *MultiCov* (měřítko není zachováno, pouze schéma)

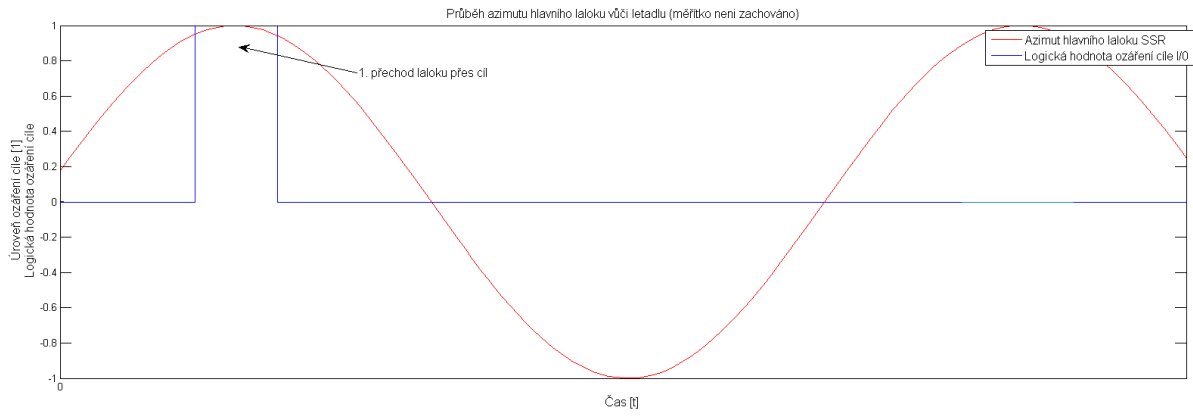
Následně je vytvořena logická funkce, která nabývá hodnoty 1, když je azimut laloku roven $\pi/2$ a $y(t)=1$. Zároveň je oblast zvětšena, aby byla zachována určitá šířka laloku.

Funkce *MultiCov* převede tímto způsobem otáčení laloků těch radarů, které s letadlem komunikují.

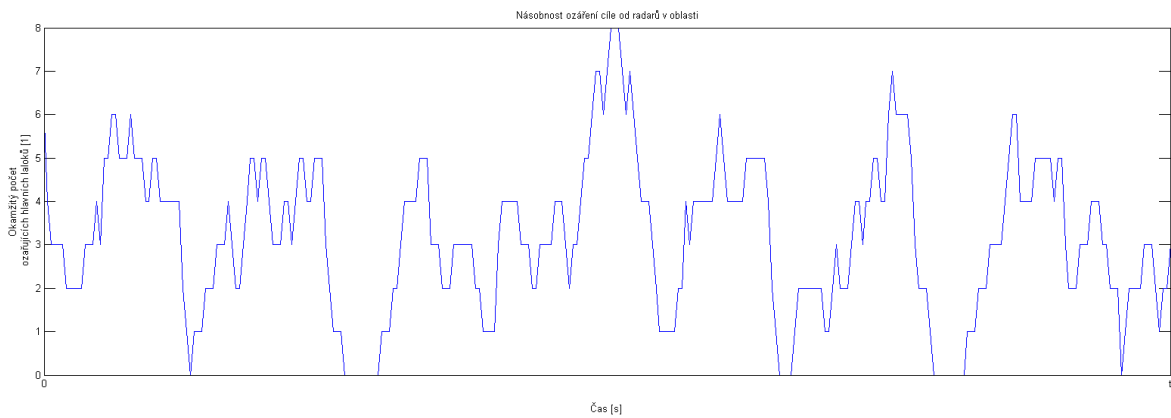
Logické funkce jsou následně sečteny (obrázek 1.8). Metodou Monte Carlo toto cyklicky provedeno pro

500 různých cílů a různé kombinace radarů.

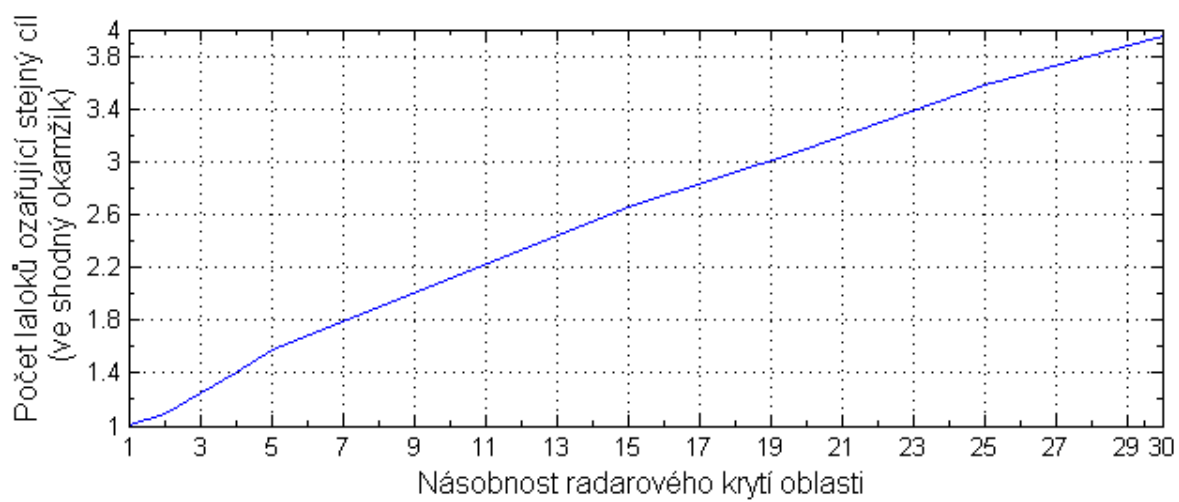
Výstupem funkce je hodnota, která udává průměrný počet laloků, které ve shodný okamžik přechází přes cíl. Funkční závislost lze ilustrovat obrázkem 1.9:



Obrázek 1.7: Modelování přechodu laloku přes cíl (měřítko není zachováno)



Obrázek 1.8: Násobnost ozáření cíle - simulace pro jedno letadlo



Obrázek 1.9: Ilustrace výsledků funkce MultiCov pro různé násobnosti radarového krytí

Kapitola 2

RF Re-Interrogation Model

Dynamický RF Reinterrogate Model (RFR Model) je vytvořen v prostředí Simulink[®] a umožňuje stanovit zatížení RF 1090 MHz, je-li uvažován tzv. re-interrogation rate, který je spojen s dotazovací charakteristikou sekundárních radarů. Jedná se o jev, kdy dochází k opětovnému vyslání selektivního dotazu na vzestupném spoji, pokud radar nezískal odpověď na původní dotaz. Vazba mezi vzestupným a sestupným spojením, která definuje i vlastní rádio-frekvenční zatížení, je modelována pomocí RFR modelu.

RFR Model není nezávislou simulací, ale naopak spolupracujícím modelem, který pro své výpočty využívá výsledky RF Load Modelu jako svá výchozí data. Ta ilustrují prostředí, ve kterém palubní odpovídač odpoví na všechny dotazy, které přijme. Podávají tedy charakteristiku o výchozí velikosti toku požadavků přicházejících na jednotku odpovídače za ideálních podmínek. Proto byly výsledky RFL modelu zvoleny jako vhodné pro definování počátečního stavu pro dynamický model.

S využitím Simulink modelu je možné modelovat náhodný výskyt událostí a zvládnout vzájemné vazby mezi prvky systému. Ty jsou popsány dále v textu této úvodní kapitoly.

Jak bylo zmíněno, důvod k opakování dotazu radarem je nepřijetí odpovědi na selektivní dotaz. Obecně lze uvažovat dvě místa v celém systému, která jsou v tomto smyslu zranitelná. Prvním místem je rozhraní vzestupného spoje a palubního odpovídače. Palubní jednotka totiž může dotaz radaru nepřijmout, je-li momentálně zaneprázdněna vysláním odpovědi a zpracováváním jiného dotazu či požadavku nebo je-li dotaz radaru interferencí znehodnocen. Radar pak neobdrží na sestupném spoji žádnou odpověď. Druhým místem je rozhraní sestupného spoje a přijímače radaru. I zde může dojít k situaci, kdy radar odpověď od letadla nezaznamená, ovšem v důsledku vlivu jejího znehodnocení na příjem.

Re-interrogation rate je veličinou, která blíže popisuje vlastní povahu znovu-dotazování radaru a je definována jako celkový počet opakovaných dotazů vztážený na 1 sekundu. Nejedná se obecně o konstantní frekvenci (rate), jelikož je ovlivněna vlastnostmi rádiového prostředí, které se mění především s ohledem na hustotu provozu, na polohy letadel vůči sobě i vůči radaru, vzájemné interakce letadel na 1030/1090 MHz či s ohledem na další degradační vlastnosti systému. V ideálním případě hodnota re-interrogation rate nesleduje v čase žádný trend. Velikost sama pouze vypovídá o navýšení vyslychajících charakteristik daného radaru tak, aby při aktuální pravděpodobnosti ztráty na rozhraních (se všemi vyslychanými letadly) došlo k zajištění příjmu potřebných odpovědí. Velmi obecně lze pozorovat funkční závislost re-interrogation rate na hodnotě pravděpodobnosti ztrát zpráv v subsystému radaru.

Na druhé straně, jak bylo v úvodu kapitoly uvedeno, ztráty zpráv na rozhraních jsou obvykle výsledkem

zaneprázdnění jinými požadavky či vzájemnou interferencí příchozích zpráv. Proto čím více zpráv na rozhraní přichází, tím i určitým způsobem roste možnost ztráty. Jedná se tedy o opačnou vazbu než tu, která byla popsána v předcházejícím odstavci. Zatímco radar zvýšením re-interrogation frekvence zvyšuje možnost příjmu odpovědi na svůj dotaz, pravděpodobnost pro další radary sdílející stejná rozhraní (letadla) se tím naopak snižuje. Ve výsledku se tedy nutně zvýší i jejich re-interrogation rate. Vzhledem k popsaným vazbám může následovat rostoucí trend na navyšování a úplná destabilizace systému. Je ovšem důležité opět zmínit, že se ani v jednom případě nejedná o funkce jediné proměnné, a proto další faktory mohou mít různě velké podpůrné či tlumící účinky. Například palubní odpovídač přijímá na 1030 MHz dotazy nejen od radarů, ale jeho zaneprázdněnost plyne i z dotazu od jiných zařízení pracujících na vzestupném spoji. Právě tyto základní vazby jsou modelovány v prostředí Simulink. Následující podkapitoly již blíže přibližují strukturu RFR modelu.

2.1 Programové pojetí problematiky

Výchozím termínem pro popis logiky celého modelu je *požadavek*. Ten je směřován na odpovídač a může být buď externí či interní. V prvním případě přichází na vzestupném spoji 1030 MHz od ostatních zařízení v okolí. V případě druhém, odpovídá interní požadavek automatickému vysílání Acquisition nebo Extended Squitteru. Když palubní jednotka přijme požadavek, octne se ve stavu zaneprázdnění až do okamžiku, kdy vyvolaný proces neskončí. Délka procesu závisí na typu přijatého požadavku. Při použití Simulink SimEvents je tento požadavek reprezentován Entitou, která se pohybuje navrženou sítí. Model se tak redukuje pouze na prvky, které s entitami pracují. Jsou zde prvky, které entity generují, a prvky, které entity zpracovávají. Vytváří se tak dvojice dotazující a odpovídající, jejich prvky se vzájemně ovlivňují. Model v Simulinku lze rozdělit funkčně na několik základních sekcí. Ty leží v horizontálním směru, zatímco ve vertikálním směru se pak tyto sektory opakují. Toto opakování základního schématu je provedeno ve vertikálním směru 4krát. Každá z těchto čtyř částí zastupuje v modelu skupinu letadel s daným palubním vybavením. Na druhé straně, i přes tuto podobnost ve schématu modulu platí následující:

- graficky shodné části nejsou zcela identické, protože přiřazují odlišné hodnoty atributů,
- podobnost vystihuje obecný přístup k problematice, kde posloupnost procesů je shodná, ale liší se jejich délkou, která může nabývat hodnot od nuly do nekonečna.

Re-Interrogation Model je složen ze tří částí zapojených za sebe v odpovídajícím pořadí:

1. Generator
2. Processor
3. Re-Interrogation distributor

Kompletní schéma RFR Modelu ve větším provedení je uvedeno v příloze.

2.2 Stavební bloky RFR Modelu

Následující text uvádí vlastnosti elementárních prvků, tzv. bloků, které byly použity v RFR modelu. Popis fungování je uveden v souvislosti s fungováním modelu. Jednotlivých sekce modelu jsou dále rozepsány v části 2.3. Knihovna SimEvents, která byla hlavní knihovnou pro vytvoření modelu, obsahuje bloky, které

jsou výrazně odlišné od běžně používaných. Jejich fungování je spojeno s tzv. událostmi, nikoliv s běžně používaným signálem. Rozdíl spočívá v tom, že bloky knihovny SimEvents pracují v čase nespojitě ve srovnání se základními prvky, které pracují spojitě. Procesy v RFR modelu jsou tedy událostně podmíněné. Událostí je příchod entity na vstup bloku.

Pro základní přehled jsou uvedeny popisy bloků s ohledem na použití v simulaci re-interrogation. Z důvodu přejmenování výchozích názvů ve vlastním modelu jsou následující textové popisy ilustrovány i grafickou podobou každého bloku.

2.2.1 Constant

Blok systému, který předává konstantní hodnotu v průběhu simulace. Téměř všechny použité bloky tohoto typu odkazují na hodnoty mimo prostor Simulinku[®]. Tím je umožněno načítat již vypočtené hodnoty modelu definovaného kódem v prostředí MATLAB[®]. Výstupem bloku *Constant* je signál nikoliv entita, a proto není nutně kompatibilním vstupem pro všechny ostatní bloky.

2.2.2 Time-based Entity Generator

Funkční blok zajišťuje náhodné generování entit na základě exponenciálního pravděpodobnostního rozdělení¹, které je řízeno parametrem *Mean* tj. střední hodnotou výskytu entity. Ta v rámci řešeného problému odpovídá periodě, se kterou je očekáván příchod zprávy na vzestupném spoji či jiný požadavek na zpracování palubní jednotkou. Jelikož se jedná o počítačem řízený náhodný proces, je nutné také věnovat pozornost dalšímu volitelnému parametru *Initial Seed*, jehož unikátnost zajistí, že žádný jiný generátor entit pracujícím pod exponenciálním pravděpodobnostním rozdělením a se stejnou střední hodnotou nebude generovat identicky.

Použití tohoto bloku umožňuje celé simulaci přejít od deterministických procesů k náhodným, které lépe popisují reálné prostředí.

2.2.3 Entity Sink

Entity nacházející se v modelu v průběhu simulace pomocí tohoto bloku odchází. Blok má neomezenou kapacitu a každá příchozí entita je přijata a vyloučena z dalšího oběhu. Zároveň je často použita statistika, která prostřednictvím výstupního signálu z bloku *Entity Sink* udává počet přijatých entit od začátku simulačního času.

2.2.4 Path Combiner a Replicate

Významným rozdílem při použití entit namísto signálu je nemožnost aplikace obvyklých uzlů, kterými je možné signál z několika větví schématu sloučit do jedné či naopak jeden signál rozdělit. V modelu je analogicky použit blok *Path Combiner*, který slučuje entity několika vstupů do jediného výstupu. Naopak pro rozdělení na výstupu ve smyslu vytvoření replik pro více paralelně připojených bloků je vybrán blok *Replicate*.

¹Pro analýzu a modelování stochastických systému je obecně volen Poissonovský tok, který vychází z exponenciálního pravděpodobnostního rozložení. [18]

2.2.5 Set Attribute

Nově vygenerovaná entita ve výchozím stavu nemá žádné vlastnosti. Aplikací bloku *Set Attribute* je entitě přiřazen parametr a jeho hodnota. V případě, kdy entita již v sobě obsahuje definovaný parametr, dojde pouze ke změně jeho hodnoty. Obsahuje-li entita naopak i parametr, který není zahrnut, nedojde průchodem přes blok k jeho změně či odstranění. Tím je možné řazením bloků za sebe nejen měnit hodnotu parametrů, ale také je přidávat.

Parametr neboli atribut entity může obecně nabývat hodnot v oblasti reálných čísel. Nicméně pro účely třídění příchozích entit na základě parametrů v bloku *Output Switch* je nutné, aby hodnota takových parametrů byla z množiny přirozených čísel. Důsledkem tohoto požadavku je pak nutnost přiřadit pouze vhodný index namísto původní hodnoty. Dalším důsledkem je i navýšení hodnot u parametrů s binární charakteristikou, jelikož nelze použít standardně hodnoty 0 a 1.

2.2.6 Single Server a N-Server

Každá příchozí entita je blokem *Server* pozastavena v dalším průchodu sítí po stanovenou dobu, která je označována jako doba obsluhy. V tomto časovém intervalu je entita v bloku *Single Server*, který ji po jeho uplynutí odešle na výstupu. Během této doby, kdy je blok obsazen, není další entita přijímána k obsluze.

Entita a obsluha vykonávaná tímto blokem představují analogii ke zprávě/požadavku a procesu, který probíhá po stanovenou dobu v odpovídači. Model předpokládá pevnou dobu obsluhy. Posloupnost procesů probíhající v odpovídači je modelována sérií bloků *Server*. Blok přijímá informaci o délce obsluhy, tj. délce procesu z odpovídajícího atributu každé entity. Není-li proces nutný pro daný typ entity, je doba obsluhy nastavena na nulu.

Jelikož v simulovaném prostředí je zpravidla více než jedno letadlo, a tedy jeden odpovídač, je použit blok *N-Server*. Ten již obsahuje definovatelný počet severů, což v případě této simulace odpovídá počtu letadel s příslušným palubním vybavením. Je-li *N-Server* v daném časovém okamžiku obsazený, je v bloku zpracováváno právě N zpráv.

2.2.7 Infinite Server

Z hlediska funkčního chování v modelu je tento blok podobný již výše popsanému bloku *Single Server*. Počet neobsazených bloků, které mohou vykonávat obsluhu příchozí entity, je ovšem v každém časovém okamžiku simulace neomezený. Jinými slovy nedochází k odmítnutí přicházející entity v důsledku obsazení bloku. Tento blok byl použit pro zdržení průchodu libovolného množství entit po potřebný časový interval. Díky tomu není nutné definovat konkrétní počet entit.

2.2.8 FIFO Queue

V případě, že entita dorazí do tohoto bloku a jeho výstup není uvolněn, tzn. entita nemůže dále pokračovat v průchodu, je zde ponechána do doby, kdy je výstup uvolněn. To platí pro každou další příchozí entitu, čímž blok začne vytvářet frontu entit, ve které navíc platí pravidlo FIFO (First In First Out). Jinými slovy při uvolnění výstupního portu blok *FIFO Queue* dojde k vyexpedování entity, která přišla v rámci simulačního času nejdříve.

V tomto bloku je nutné nastavit jeho kapacitu, což je maximální délka fronty. Je-li dosažena, dojde k uzavření i vstupního portu a celý blok se chová jako obsazený do doby než klesne obsazení pod hodnotu kapacity. V simulaci jsou tyto bloky nicméně použity jako paměťové bloky. Jejich kapacita je rovna jedné a jsou napojeny na podmíněný blok, který řídí jejich výstup. Tudíž je v bloku *FIFO Queue* entita po určitou dobu a ostatní nově příchozí odmítnuty. Je-li uvolněna, dojde k uložení další entity.

2.2.9 Release Gate

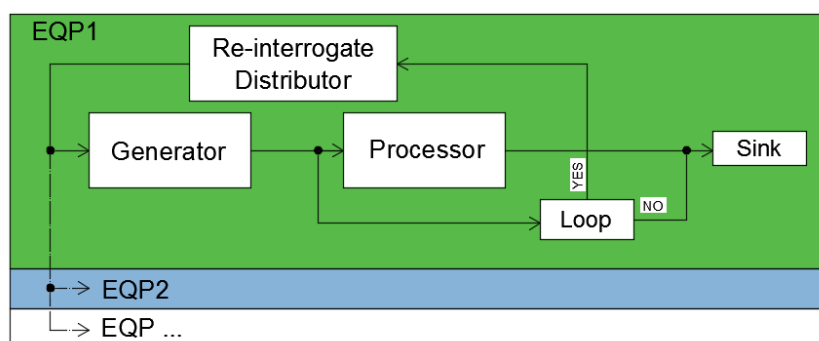
Blok se chová ve smyslu brány pro příchozí entity. V okamžiku, kdy obdrží odpovídající signál na řídicí port, otevře hlavní vstupní port a nechá projít jednu entitu. V opačném případě se blok jeví jako obsazený. V simulaci je tento blok použit ve spojení s *FIFO Queue* a tím modelovat obsazení sériově zapojených *N-Serverů*. Jakmile je entita zpracována i posledním serverem řetězce, je otevřeno spojení s blokem fronty a entita přeposlána dále do sítě.

2.2.10 Output Switch

Namodelovanou sítí prochází entity s definovanými atributy, které nabývají různých hodnot. Z hlediska potřeby rozdělit síťové toky dle stanovených podmínek, v tomto případě atributů, je využito bloku *Output Switch*. Jak již bylo zmíněno v části *Set Attribute*, je nutné, aby atribut nabýval hodnot z oboru kladných přirozených čísel, jelikož přerozděluje entity na výstupy na základě jejich indexu. *Output Switch* jinými slovy vyžaduje, aby tyto indexy byly obsaženy v hodnotě atributu, a proto je počet výstupů roven celkovému počtu hodnot, kterých daný atribut nabývá. Tím je zajištěno, že každé entitě bude moci být přiřazen odpovídající výstup.

2.3 Popis funkčních částí RFR Modelu

V této kapitole je postupně popsán celý RF Re-Interrogation Model. Popis sleduje základní dělení na jeho tři části, kterými jsou Generator, Processor, a Re-Interrogation Distributor. Generator je sekce, která do modelu generuje entity, ekvivalenty požadavků, a předává je do sekce Processor. Processor určuje schopnost celého systému zpracovávat požadavky. Ty požadavky, které jsou adekvátně zpracovány, opouští systém, v opačném případě jsou směrovány dál do Re-Interrogation Distributor sekce. Ta je zodpovědná za správné rozeslání entity (požadavků) zpět na příslušné Generator sekce a tím dotaz opakovat. Tato zpětná vazba do výchozí části Generatoru je stěžejní pro celý RF Re-Interrogation Model.



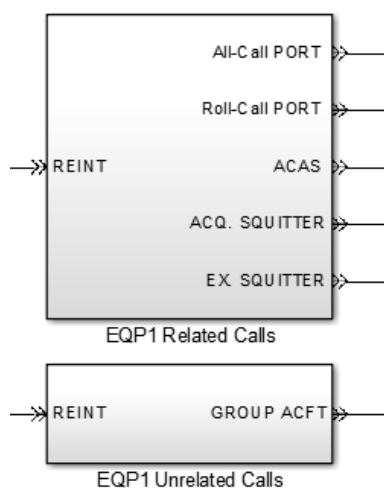
Obrázek 2.1: Náhled propojení sekcí RFR Modelu

Sekce jsou popsány z více úhlů pohledů. Zprvu se text zabývá sekci ve smyslu analogie s reálným prostředím, kde vysvětluje způsob, jakým sekce zastupuje reálná zařízení. Dále se věnuje funkčnímu významu sekce v rámci celého modelu. Nakonec je objasněna vnitřní struktura sekce, její bloky a metody, které byly použity, aby bylo možné programově zajistit požadované fungování.

Ačkoliv se popis vrací i na úroveň rozlišení jednotlivých funkčních bloků, již se nevěnuje jejich podrobnému popisu, který je uveden v části 2.2. Na této zvolené úrovni je primárně vysvětlena logika zapojení a použití prvků.

2.3.1 Generator sekce

Všechny entity, které jsou pro model nezbytné a iniciují v něm další procesy, jsou generované výhradně v sekci Generator. Neexistuje jiné místo, které by do modelové sítě přidávalo další entity. V sekci jsou tvořeny entity, které zastupují dotazy na vzestupném spoji či interní požadavky na odpovídač pro generování automatické zprávy (Squitter). Entity, stejně jako reálné požadavky, jsou odlišných druhů a jsou v čase generovány nezávisle s jinou periodou. Tyto charakteristiky jsou čerpány z dat, které poskytuje RF Load Model. Entity poté odchází z Generator do Processor sekce.



Obrázek 2.2: Generator sekce

Základní druhy generovaných entit

Jelikož platí, že palubní jednotka přijímá na rádiové frekvenci 1030 MHz veškeré dotazy, přičemž ne všechny jsou nutně adresovány jí, existuje v rámci Generator sekce rozlišení požadavků na Related a Unrelated Calls². Related Calls jsou entity, které bude jednotka odpovídače plně zpracovávat. Jedná se o dotazy adresované letadlu a vyžadující od něj odpověď na sestupném linku. Naopak Unrelated Calls jsou entity generované a adresované jiným letadlům, nicméně se po frekvenci šíří společně s Related Calls. Sekce tak simuluje rádiové prostředí, které je všemi letadly sdílené a zprávy v něm jsou časově nekoordinované. Tudiž i v modelu je zajištěno, že odpovídač, získá celou směs dotazů. Poměr Related vůči Unrelated Calls je opět stanoven na základě RFL modelu. Entita si nese odpovídající hodnotu atributu,

podle něhož odpovídač (v simulaci) pozná, zda ji má plně zpracovat či nikoliv.

Vlastní generování a definování vlastností entit je zajištěno pomocí subsystémů:

- All-Call Subsystem³
- UF4/5/20/21 Subsystem
- UF0/16 Subsystem
- DF11 Subsystem
- DF17 Subsystem

Formát entity - Atributy

Simulace v prostředí Simulinku primárně vytváří obecné entity. Mohou se odlišovat frekvencí, se kterou generují, a blokem, který je vytvořil. Nicméně tyto informace nejsou zanesené v pomyslném těle entity. V okamžiku, kdy je potřeba v modelu rozlišovat mezi entitami, může nastat problém. Ve spojitosti s RFR modelem, kde ztotožňujeme entity s různými požadavky, je jejich rozlišení více než nezbytné. Proto jsou entitám přiřazovány atributy s příslušnými hodnotami ještě před tím, než se v síti modelu smísí s jinými. Generator Sekce je obecně jedinou částí, kde se atributy entitám přiřazují. Užívané atributy jsou pak následující:

EQP Atribut, který tvoří imaginární preambuli entity, je EQP. Jeho hodnota odpovídá indexu palubního vybavení v souladu s tím, jak to bylo definované pro RF Load Model. Jedná se o jediný atribut, který je v modelu nevyužit a je tedy spíše formální. Na druhou stranu je EQP jediný atribut, který jedinečně identifikuje příslušnost entity k jedné ze čtyř Generator sekcí. Proto jej lze použít při eventuálním provádění statistiky v libovolném místě sítě modelu.

LOOP Druhým atributem vloženým do těla entity je LOOP. Nabývá pouze dvou hodnot a určuje, zda bude entita v případě nezpracování vrácena zpětnou vazbou. Hodnota atributu reprezentuje programovací 0/1, nicméně z důvodu nemožnosti použít 0 jako hodnotu atributu, jsou voleny hodnoty 1 a 2. Pouze entity odpovídající dotazům sekundárního radaru UF4/5/20/21 se v tomto modelu mohou vracet, a proto je jejich LOOP atribut nastaven na hodnotu 2.

Tx Další 5 atributů a jejich hodnoty, které se entitě přiřazují, definují délky procesů a jsou zásadní pro následnou Processor sekci. Přijatá entita, v tomto případě požadavek, vyvolá v jednotce odpovídače posloupnost procesy. Délky procesů závisí na typu požadavku, který jednotka přijme. Některé procesy jsou za určitých podmínek vynechány. Z pohledu programu jsou jejich délky rovné nule.

¹Call je použito jako slovní ekvivalent pro požadavek v počítačovém prostředí. Do related jsou zahrnuty i požadavky na vysílání squitteru, proto nelze použít slovo interrogation.

²Označení Subsystem je dále v textu vynecháváno.

Pořadí časů odpovídá posloupnosti odpovídajících procesů a vychází z ICAO Annex 10 [zdroj]:

1. Reception Time (příjem zprávy na frekvenci)
2. Processing Time (zpracování přijatých informací)
3. Reply Time (odpověď)
4. Recovery, Dead nebo Suppression Time (přechod do režimu příjmu)

Z formálních důvodů je doplněn entitě i atribut celkového času, což je pouze součet dob trvání jednotlivých procesů.

Výše zmíněných sedm atributů definuje každou entitu v systému. Pouze entity ze stejné Generator Sekce a ze stejného subsystému, ke kterým se vyjadřuje následující kapitola, mají hodnoty všech atributů zcela stejné. Pro přehled vytvořena tabulka (2.1) s použitými atributy včetně zkratk a možných hodnot.

Tabulka 2.1: Použité atributy a jejich hodnoty

Použitá značka	Význam	Jednotky	Hodnoty
EQP	index palubního vybavení	[-]	$x \in \{1, 2, 3, 4\}$
LOOP	opakovaná zpráva	[-]	$x \in \{1, 2\}$
T_{rec}	doba pro příjem zprávy	[s]	$x \in \mathbb{R}^+$
T_{prc}	doba pro zpracování zprávy	[s]	$x \in \mathbb{R}^+$
T_{rep}	doba k vysílání zprávy	[s]	$x \in \mathbb{R}^+$
T_{rcv}	doba obnovení stavu odpovídače pro příjem	[s]	$x \in \mathbb{R}^+$
T_{oc}	celková doba zaneprázdnění odpovídače	[s]	$x \in \mathbb{R}^+$

Vytvořené subsystémy

Pro zjednodušení celkové struktury byly některé části modelu sjednoceny pod samostatný subsystém. Původní předdefinované bloky, které měly vazby na jiné prvky a jsou uzavřeny do takového subsystému jiného, předávají jeho vstupní a výstupní porty. Tím jejich původní vazby na okolí přetrvávají, i když jsou graficky součástí již jiného celku. Vytvoření nových bloků bylo motivováno několika důvody:

1. Funkční celek: Množina propojených prvků působila v modelu jako celek, který ovlivňoval průběh simulace. Bloky v tomto funkčním celku určovaly jeho výstup pro zbytek modelu. Nicméně jejich samostatné fungování a výstupy byly sekundární a mohly být tedy začleněny dohromady pod jediný subsystém.
2. Zpřehlednění struktury: Hlavní schéma modelu bylo výrazně zjednodušeno a nyní umožňuje snazší práci a orientaci v modelu. Navíc vytvořené subsystémy lze editovat v odděleném zobrazení, kde není nutné vidět zbytek modelu, a práce s nimi je tedy také jednodušší. Přehlednější struktura je vhodná i pro identifikaci chyb.
3. Kopírování: Subsystémy mají jako jiné bloky své vstupy, výstupy a své vlastnosti, které se projevují v čase simulace. Oproti množině původně volně položených bloků lze s takovým celkem lépe manipulovat a kopírovat ho ve struktuře.

Umělý blok subsystému nicméně nemá své vlastní dialogové okno, kde by se nastavovaly jeho parametry. Parametry je pořád nutné měnit v dialogových oknech vnořených předdefinovaných bloků. Zahrnuté subsystémy jsou následující:

All-Call Všeobecné dotazy All-Call periody sekundárního přehledového radaru jsou generovány na výstupu tímto subsystémem. Po vytvoření entity jsou doplněny časy délky jednotlivých procesů, informace o otevření zpětné smyčky *LOOP* a druhu vybavení letadla *EQP*. Pro tento a další bloky vytvářející požadavky na odpovídač platí globálně nastavení, že generování entit podléhá náhodnému exponenciálnímu rozdělení (Poissonovský tok [18]).

UF4/5/20/21 Požadavky tohoto typu představují dotazy Roll-Call periody. Po vygenerování entit je každé z nich přidělena informace o délce doby zpracování. Dále je pak přidán index odpovídající palubnímu vybavení *EQP* a možnosti projít smyčkou v případě nezpracování odpovídačem. Jedná se o jediný subsystém jehož entity se v případě nezpracování vrací zpět mezi nové čekající požadavky.

Blok má kromě výstupu také vstup, který je určen pro nezpracované entity, které jež se po určitém zpoždění vrací zpátky. V bloku subsystému pak pouze dojde k jejich přesměrování na výstup a seskupení s nově vygenerovanými entitami.

UF0/16 Subsystém generuje entity odpovídající požadavkům formátu UF0/16 a přiřadí hodnoty parametrů jako např. u *All-Call Subsystem*.

DF11 a DF17 Na výstupu subsystém dodává do sítě modelu entity, které odpovídají požadavkům na vysílání Acquisition a Extended Squitteru. V případě, že je odpovídač zaneprázdněn, je squitter vyslán ihned po jeho přechodu do aktivního stavu.

Generování kompletního spektra požadavků

Aby bylo možné vyhodnotit zatížení palubní jednotky v simulačním programu, je nezbytné určit, jaký je celkový tok dotazů, které letadlo přijme na RF 1030 MHz.

Obecně platí, že palubní jednotka přijímá na rádiové frekvenci 1030 MHz všechny dotazy, které se po ní šíří. Nicméně pouze některé jsou adresovány přímo danému letadlu. Jednotka proto musí rozlišovat, zda je jí dotaz adresovaný či nikoliv. V rámci modelu je toto zastoupeno pomocí bloků Related a Unrelated Calls⁴. Related Calls jsou entity, které bude jednotka odpovídače plně zpracovávat. Jedná se o dotazy adresované letadlu, které vyžadující odpověď na sestupném linku. Naopak Unrelated Calls jsou entity generované a adresované jiným letadlům, nicméně se po frekvenci šíří společně s Related Calls. Sekce tak simuluje rádiové prostředí, které je všemi letadly sdílené a u něhož platí, že zprávy v něm jsou časově nekoordinované. Tudiž i v modelu je zajištěno, že odpovídač, získá celou směs dotazů. Poměr Related vůči Unrelated Calls je opět stanoven na základě RFL modelu.

Každý ze subsystémů bloku *Related Calls* generuje náhodně v součtu právě takový počet entit za sekundu, který je roven počtu požadavků na všechny palubní jednotky definované skupiny letadel za daný časový interval. Jsou použity subsystémy:

- All-Call
- UF4/5/20/21
- UF0/16

⁴Call je použito jako slovní ekvivalent pro požadavek v počítačovém prostředí.

- DF11
- DF17

Naopak *Unrelated Calls Block* tvoří doplněk požadavků do celkového toku na vzestupném spoji. Jedná se dotazy, které spoluvytváří zátěž RF pásma, avšak nejsou určeny pro žádné z letadel, která zkoumáme. Jejich palubní jednotky takové dotazy sice přijmou, ale protože je vyhodnotí jako nepřislušné, nespustí další proces. Blok se liší od *Related Calls* bloku v:

- subsystémech, které obsahuje,
- množstvím generovaných entit v čase,
- hodnotách časových atributů o zpracování entity.

Ná závěr této podkapitoly přiblížíme důvody k odlišnostem mezi bloky *Related* a *Unrelated Calls*, které zajišťují generování kompletního odhadovaného spektra přenosů na vzestupném spoji. Na prvním místě byla uvedena odlišnost v použitých subsystémech (tabulka 2.2). Blok *Unrelated Calls* neobsahuje subsystémy vnitřních požadavků DF11 a DF17. Ať už je daná množina letadel vysílá či ne, jsou zařaditelné pouze do *Related Calls*. Vysílání Acquisition či Extended Squitteru je vlastností přímo odpovídače a je iniciováno interně.

Další odlišnost souvisí s Processor Sekcí. Entitám z bloku *Unrelated Calls* jsou totiž přiřazeny jiné hodnoty definující délku procesů v odpovídači tak, aby bylo zachováno nakládání odpovídače s cizí zprávou, kterou přijme na frekvenci. Atributy reprezentující čas pro zpracování a odpověď jsou nastaveny na nulu. Ponechány jsou pouze časy definující délku procesů připadajících na příjem zprávy a poté obnovení stavu odpovídače pro příjem. Následující rovnice shrnuje zmíněnou problematiku:

$$T_{rej} = T_{OC} = T_{rec} + T_{prc} + T_{rep} + T_{rcv} \quad (2.1)$$

Jelikož nenastanou procesy pro zpracování a odpověď (jejich délka je 0s) pak

$$T_{rej} = T_{OC} = T_{rec} + T_{rcv} \quad (2.2)$$

Tabulka 2.2: Přehled vlastností subsystémů Generate sekce

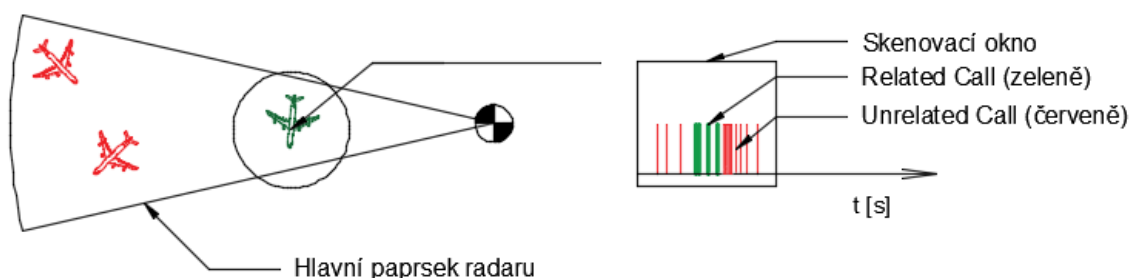
Název subsystému	Dotaz	Zahrnuto v Related Calls	Zahrnuto v Unrelated Call
All-Call	✓	✓	✓
UF4/5/20/21	✓	✓	✓
UF0/16	✓	✓	✓
DF11	x	✓	x
DF17	x	✓	x

Tabulka 2.3: Struktura Generate sekce na různých úrovních rozlišení

I. úroveň	II. úroveň	III. úroveň
Generator sekce	Related Calls Block	All-Call
		UF4/5/20/21
		UF0/16
		DF11
		DF17
	Unrelated Calls Block	All-Call
		UF4/5/20/21
		UF0/16

Odvození skenovacího okna

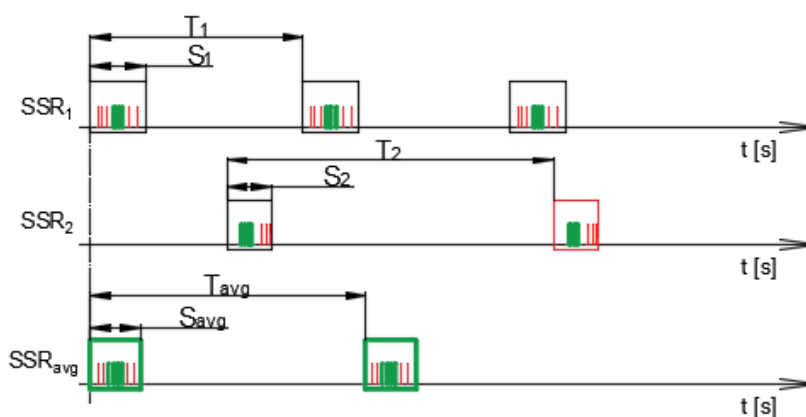
Model získává data o přenosech, které ovlivňují zátěž palubní jednotky, na základě normování přenosů na skenovací okno. Skenovacím oknem je myšlen čas, kdy lalok radaru přechází přes letadlo a vysílá své dotazy. V rámci tohoto času je na přijímači letadla zaznamenán tok dotazů od tohoto letadla. Jsou mezi nimi ovšem i dotazy, které přísluší jiným letadlům, které jsou v rámci šířky laloku vyslýchána (obrázek 2.3) Obrázek 2.3 ilustruje případ, kdy letadlo, zaznamenalo kromě svých dotazů (Related Calls), také dotazy



Obrázek 2.3: Znárodnění vzniku Related a Unrelated Calls při přechodu laloku. Měřítko není zachováno.

cizí (Unrelated Calls), jelikož bylo v oblasti krytí společně vyslýcháno i s jinými letadly. Pokud se letadlo nachází v krytí více radarů, bude situace analogická. Záležen bude pouze na počtu letadel v laloku, jejich vybavení a technických parametrech radaru. Průběh vyslýchání v čase např. pro 2 radary lze ilustrovat obrázkem 2.4.

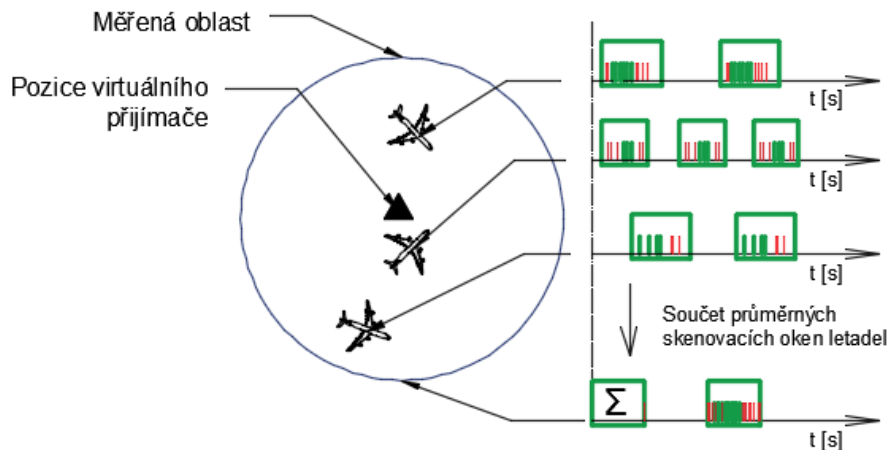
Hodnota T značí periodu skenování, S dobu délky přechodu laloku (skenovacího okna) a avg je použitý index pro průměrnou hodnotu proměnné. Každému letadlu lze na základě těchto úvah přiřadit průměrnou



Obrázek 2.4: Průběh vyslýchání více radary. Měřítko není zachováno.

délku skenovacího okna, jeho opakovací periody. Množství dotazů (related i unrelated) dáno součtem dotazů v dílčích okna radarů. Jelikož tato hodnota odpovídá ozáření všemi radary oblasti najednou, je nutné ji upravit (snížit) koeficientem z funkce MultiCov (str. 42). Ta popisuje pravděpodobnosti, že takový jev nastane při daném počtu radarů v oblasti.

Po aplikaci popsaných úprav vytvoříme sumu těchto hodnot přes všechna letadla v oblasti (obrázek 56). Výsledkem je shrnutí všech požadavků v oblasti do jediného skenovacího okna s průměrnými charakteristikami. Jinými slovy se jedná o normování toku na skenovací okno. Důvod k takovému vyjádření množství je podrobněji uveden v kapitole Programové řešení na str. ??.



Obrázek 2.5: Odvození toku požadavků v oblasti. Měřítko není zachováno.

2.3.2 Limiter sekce

Na základě dokumentů ICAO Annex 10, Volume 4, Amendment 85, ICAO Doc 9683, Doc 9871 a Doc 9924 jsou uvedeny požadavky minimální počet požadavků, které musí jednotka odpovídače zpracovat. Tyto hodnoty jsou označeny jako Minimal Reply Rate Capability. Palubní jednotka odpovídače musí být na základě těchto požadavků schopna generovat alespoň:

- 16 ELM z 50 Mode S odpovědí v libovolném 1-sekundovém intervalu,
- 6 ELM z 18 Mode S odpovědí v 100-milisekundovém intervalu,
- 4 ELM z 8 Mode S odpovědí v 25-milisekundovém intervalu,
- 2 ELM z 4 Mode S odpovědí v 1,6-milisekundovém intervalu.

Tato sekce, kterou tvoří Limiter Block, byla vytvořena jako testovací a není součástí základní struktury RFR Modelu. Entity přicházejí do *Limiter Blocku* náhodně s definovanou střední dobou generace. V této sekci pak dojde k aplikování výše uvedených podmínek, přičemž platí pravidlo First Come - First Served. Je-li dosažena definovaná hodnota je každá další příchozí entita odmítnuta a nezpracována. K obnovení příjmu nových entit dojde ihned, jakmile z plného systému odejde alespoň jedna zpracovaná entita.

V simulaci se nastavují tyto či uživatelem volené Minimal Reply Rate Capability jako hodnoty výchozí a nikoliv minima. Předpokladem je, že charakteristika re-interrogatu bude nabývat maxim, pokud je pravděpodobnost zaneprázdnění jednotky odpovídače vyšší. Jinými slovy, čím méně dokáže jednotka zpracovat požadavků za jednotku času, tím je větší pravděpodobnost, že se zvýší počet opakovaných dotazů radaru, tj. re-interrogatu.

Žádoucího chování je v *Limiteru* dosaženo použitím *N-Serveru*, *FIFO Queue* a *Release Gate*. Doba obsluhy N-Serveru odpovídá střední době vyřízení požadavku, která je odvozená z Minimal Reply Rate Capability hodnot. Počet serverů a kapacita FIFO fronty jsou rovny počtu letadel s daným vybavením.

Do serveru a fronty je přijata zpráva právě tehdy, jsou-li oba bloky volné, tj. mají kapacitu přijmout další entitu. Pokud toho schopné nejsou, je zpráva odmítnuta. Release Gate napojený na statistický výstup N-Serverů čeká, až zaznamená zvýšení v počtu obslužených entit. V okamžiku, kdy skončí pevně definovaná obsluha entity N-Serverem, zvýší se signál statistiky právě o jednu. Signál vedený na Release Gate se uvolní a nechá z fronty odejít jednu entitu, která pokračuje dál a opustí na výstupu Limiter Block.

Tabulka 2.4: Podrobnosti o limitování toků

Název vstupu	Název výstupu	Proměnná Reply Rate Capacity	Odmítnuté entity
All-Call Limiter	All-Call Thru	AC_Limit	Entity Sink
Roll-Call Limiter	Roll-Call Thru	RC_Limit	Roll-Call Reint Ouput
ACAS Limiter	ACAS Thru	ACS_Limit	Entity Sink
Short Squitter Limiter	Short Squitter Thru	AS_Limit	FIFO Queue/Entity Sink
Long Squitter Limiter	Long Squitter Thru	ES_Limit	FIFO Queue/Entity Sink

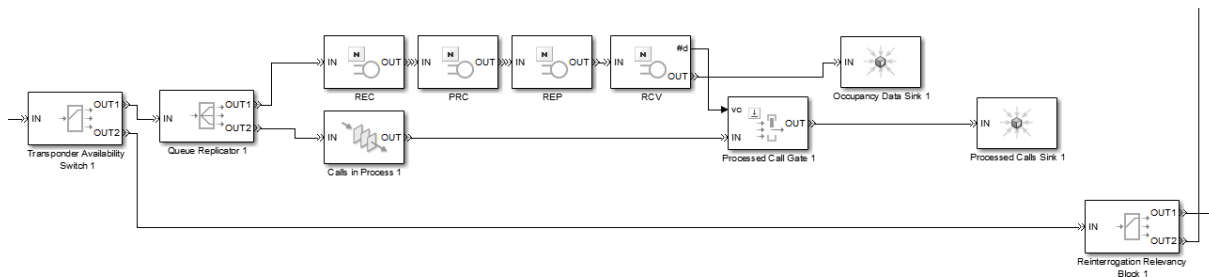
2.3.3 Processor sekce

Druhou částí RF Re-Interrogation modelu je Processor sekce, na jejíž vstup jsou přiváděny entity, které byly vygenerovány odpovídající generátorem. Význam této části modelu spočívá v simulování chování jednotky palubního odpovídače. Příchozí požadavky z Generator sekce jsou odpovídačem přijaty a je zahájeno jejich zpracování. Jak bylo popsáno v části 2.3.1 na straně 51 o attributech entit, každý požadavek iniciuje v jednotce odpovídače obecně čtyři procesy. Jejich délky se liší v závislosti na druhu požadavku a pro simulaci byly přežaty délky trvání jednotlivých procesů z dokumentu ICAO.

V časovém intervalu, kdy jednotka zpracovává požadavek, tj. probíhá jeden ze čtyř procesů, není ve stavu příjmu. Z toho vyplývá, že každý požadavek, který přijde v daném intervalu je nepřijat a z pohledu jednotky ztracen. Je důležité zdůraznit, že ačkoliv simulace definuje více druhů procesů, je rozhodující jejich celková doba v součtu, která vypovídá o zaneprázdnění odpovídače. Z technického pohledu lze říci, že jednotka v libovolném okamžiku může vykonávat pouze jeden proces a nepřijímá jiné požadavky. Navíc pokud definujeme příjem požadavků jako jeden z dalších procesů, pak je tvrzení o vykonávání jediného procesu v libovolném okamžiku zcela platné. Jak již bylo uvedeno, pro určité požadavky je délka procesů nulová, což odpovídá situaci, kdy daný proces vůbec nenastane.

Druh příchozích požadavků, poměr i absolutní velikosti jejich toků dohromady definují pravděpodobnost stavu, že bude jednotka zaneprázdněna ve vybraném okamžiku. Mluvíme-li o dotazech, které jsou opakovány, pokud nenásleduje odpověď, má tato pravděpodobnost přímý vliv na re-interrogation rate.

Ani v této sekci nezkoumáme chování jediného palubního odpovídače, ale celé množiny letadel, které mají shodné vybavení. To zcela odpovídá požadavkům na generující sekci, na kterou je Processor sekce napojena.



Obrázek 2.6: Processor sekce

Procesy

Ačkoliv se v reálném systému hodnoty mohou lišit s ohledem na výkonnosti odpovídače, jsou tyto rozdíly zanedbány. Simulace tak předpokládá výkonnostní charakteristiku všech jednotek shodnou a odpovídající minimu stanovených v tomto dokumentu. Vzhledem k přenosovým vlastnostem se data mohou šířit vzestupným i sestupným spojem pouze definovaným tokem, který již nelze žádným způsobem urychlit. Tento limit pak definuje i minimální délku procesů příjmu a vysílání (Reception a Reply Time). Technické parametry nicméně mohou výrazněji ovlivnit Recovery Time, což je čas spojený s přechodem jednotky ze stavu zpracovávání požadavku a vysílání zpět do stavu příjmu.

Z pohledu programování bylo nutné vyřešit problémy s aplikováním 4 procesů v sérii paralelním blokem fronty, jehož význam bude podrobněji vysvětlen dále.

Programové řešení

Dosud bylo popsáno především předpokládané chování palubního odpovídače, které se Processor sekce snaží co nejlíže nasimulovat. Z pohledu programování byla vytvořena struktura, které dané chování vykazuje, nicméně z omezení plynoucích z použití některých bloků, vyvstala nutnost definovat i určité předpoklady. Ty je nutné brát do úvahy, aby mohly být výsledky simulace interpretovány. V první části popíšeme modelovou strukturu této sekce, zatímco ve druhé přiblížíme důsledky aplikovaných předpokladů.

Fungování *Processor sekce* je založeno na využití bloku *N-Serveru* paralelně zapojeného s *FIFO Queue* blokem. Počet obslužných linek serveru i kapacita fronty je shodná, přičemž hodnota odpovídá počtu letadel v dané skupině palubní výbavy (EQP1, EQP2, EQP3, EQP4). Příchod entit do obou bloků je zajištěn přes *Replicate block*, který umožní entitám projít jen v případě, jsou-li oba následující bloky na jeho výstupu kapacitně volné. Když je entita v serveru obsloužena, odchází ze systému, což uvolní díky vazbě na *Release Gate* právě její kopii z bloku *FIFO Queue*.

Příchod entity, který je spojen se vznikem simulační události, může nastat ve dvou stavech Processor Sekce:

1. odpovídač je v aktivním stavu a entita je přijata a zpracována, nebo
2. odpovídač je zaneprázdněn zpracováváním jiné entity (požadavku) a entita je odmítnuta

Stav zaneprázdnění odpovídače v rámci modelu odpovídá situaci, kdy jsou všechny servery *N-Server bloku*. Když je entita odmítnuta, prochází blokem *Output Switch*, který ji na základě hodnoty atributu *LOOP* směřuje dál. Pokud je *LOOP=1*, pak je entita poslána do *Entity Sink* a ze sítě odchází. Je-li atribut *LOOP=2*, je entita poslána do další sekce *Re-Interrogation Distributoru*. Tato procedura zajišťuje, že

dojde k opakování jen těch požadavků, které jsou spojené s UF4/5/20/21. Požadavky UF4/5/20/21, které byly generovány v rámci Unrelated Calls bloku nejsou opakovány, jelikož nebyly směřovány ani na jednu palubní jednotku vybrané množiny letadel.

Funkční omezení N-Server Bloku N-Server blok umožňuje velice jednoduché propojení s vnější proměnnou, což je výhodné při změnách velikosti zkoumané množiny. Blok sice umí modelovat daný počet serverů, ale nedokáže adresovat entity na konkrétní server, který je "uvnitř".

Představme si následující scénář, ve kterém w je index (adresa) odpovídače a v celém systému se pro jednoduchost nachází pouze dvě letadla. Na vzestupném spoji přichází pouze dvě entity vygenerované těsně po sobě. Oba představují dotaz pro odpovídač $w=1$. V reálném prostředí bude přijat první požadavek a druhý ztracen, jelikož jednotka s adresou $w=1$ bude v době příchodu druhé zprávy ještě zaneprázdněna požadavkem prvním. V reálném případě výsledku bude odpovídačem $w=1$ zpracován tedy pouze první dotaz. Nicméně v simulaci dojde k jinému závěru. První entita bude přijata odpovídačem $w=1$, avšak druhá entita nebude odmítnuta a ztracena, ale bude přijata hned dalším volným odpovídačem, což je v našem příkladě $w=2$ (N-Server nechá entitu zpracovat každým volným serverem). Výsledkem bude zpracování obou entit. Požadované chování (výsledky) blížící se reálnému se podařilo dosáhnout následujícími úpravami:

1. základní toky jsou odvozeny z vlastností skenovacího okna(procedura popsána na str.55)
2. N-Server je zatížen tokem, který odpovídá součtu dílčích toků na jednotlivé palubní odpovídače,
3. dílčí toky jsou normovány délkou doby přechodu laloku, upraveny koeficientem (MultiCov (str. 42)) a posunuty v rámci časové osy na stejný začátek.

Účelem je vytvořit odpovídající zaneprázdnění všech palubních jednotek *N-Serveru*. Sjednocením dílčích toků do stejného časového okamžiku tohoto efektu dosáhneme. Jelikož sledujeme statistiku celé množiny letadel a dotazování je závislé na radaru (nikoliv na letadlech), ukazuje se tato substituce užitá v této verzi modelu jako přijatelné řešení. To je podpořeno tím, že pokud sledujeme množinu palubních odpovídačů jako celek, je nutné přichozí tok požadavků odpovídačím způsobem modifikovat. Požadovaný stav je dosažen tehdy, pracuje-li každá jednotka s odpovídačící intenzitou přichozích požadavků.

System M/D/C/0

Simulink RFR model umožňuje řešit úlohu pomocí simulace, která je pro takto komplexní systém zahrnující velké množství proměnných vhodná. Pro podpoření tohoto tvrzení lze nastínit, jak na uvedený systém pohlíží teorie hromadné obsluhy.

Množina odpovídačů, se kterými pracujeme, se chová jako N serverů zapojených paralelně a připojených na společný vstup z Generator Sekce. Dle Kendallovy klasifikace můžeme definovat tento systém jako M/D/C/0, takzvaně se ztrátami. Klasifikace je často popisována na příkladu obsluhy zákazníka. V textu uvedeme souvislosti s naším systémem pracujícím s požadavky a odpovídači.

První písmeno v Kendallově klasifikaci popisuje charakteristiku vzniku přichozího toku požadavků na zpracování, což jsou v případě našeho modelu entity. Písmenem M definujeme přichozí tok entity jako Poissonovský tok používaný především pro stochastické systémy.

Dále je písmenem D popsána délka obsluhy zákazníka. V našem případě se ovšem jedná o délku pro-

cesu, který je nutný na zpracování požadavku. Jelikož předpokládáme pevné doby procesů, značí písmeno D konstantní dobu procesů.

Třetí písmeno v Kendallově klasifikaci označuje maximální počet požadavků v systému, které se v něm nachází současně. V textech zabývajících se teorií front je na této pozici buď číslo 1, nebo obecně písmeno C, které označuje libovolné přirozené číslo. V rámci našeho modelu je C rovno počtu odpovídačů, které jsme v textu značili písmenem N. Z důvodů zachování běžné notace je v této části použito písmeno C.

Na čtvrté pozici se definuje kapacita zásobníků a je spojena s maximálním počtem požadavků, které čekají na zpracování, je-li obslužný prvek zaneprázdněn. V Systému, kde neexistuje fronta, je označena tato čtvrtá pozice Kendallovy klasifikace nulou. Při analogii s obsluhou zákazníků hovoříme o nulové toleranci čekat. Nulová kapacita zásobníku je typickou pro RFR simulaci, jelikož nepřijatý požadavek je ztracen a je jej nutné vyslat na komunikačním spoji znova.

Teorie hromadné obsluhy nabízí poměrně použitelné vzorce pro stabilní systémy druhu M/M/C/0. U těchto systému je definována délka obsluhy střední dobou a podléhá exponenciálnímu pravděpodobnostnímu rozdělení. Existují přístupy, které aplikují vzorce určené pro M/M/C/0 i na M/D/C/0 bez jakýchkoliv úprav [9].

$$p_k = p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \quad (2.3)$$

kde $k = 0, 1, \dots, n$ - počet požadavků v systému

p_k - pravděpodobnost, že v systému bude k požadavků

p_0 - pravděpodobnost, že systém bude prázdný

λ - intenzita vstupního toku

μ - intenzita obsluhy

$\rho = \lambda/\mu$ - intenzita provozu

První problém, se kterým bychom se potýkali při použití nabízených vzorců, je délka procesu resp. délka obsluhy. Ačkoliv je konstantní, liší se v závislosti na druhu požadavku. Přímé aplikování vzorce není tedy možné.

Další problémem je závislost proměnných na čase: $\lambda(t)$, a tedy i $\rho(t)$. To je dáno skutečností, že odmítnutý dotaz radaru bude opakován, a tedy vlivem re-interrogatu se mění charakteristiky vstupního toku z Generator sekce. Proto se vzorce, které nabízí oblast teorie hromadné obsluhy, nedají použít ve formě, ve které jsou primárně předkládané. Vzhledem k této složitosti, kterou systém vykazuje, je vhodné aplikovat simulační model.

2.3.4 Re-Interrogation vazba

Podstatnou vlastností modelu je vazba, která převádí nezpracované požadavky od sekundárního přehledového radaru zpět mezi čekající požadavky. Dokud není požadavek zpracován odpovídačem, je neustále regenerován a řazen mezi čekající. Dříve než je požadavek zařazen znovu k odeslání z Generator sekce, je po pevně stanovenou dobu pozdržen v síti. Tím je zajištěno, že existuje pevně daný časový odstup do

okamžiku, než je dotaz vyslán znova.

V reálném prostředí se jedná o opakování adresných dotazů ve formátu UF4/5/20/21

2.3.5 Re-Interrogation distributor

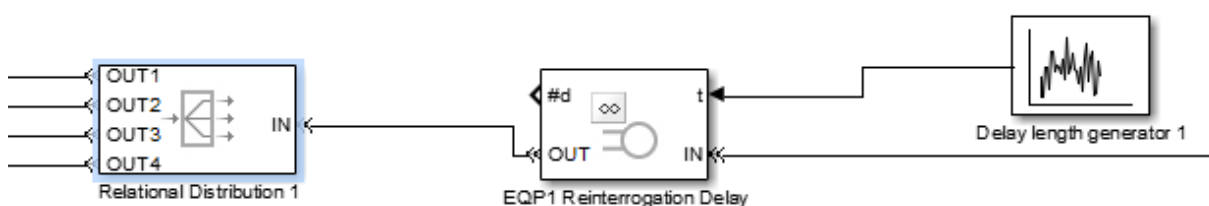
Poslední sekci, která vytváří smyčku napojením zpět na Generator sekci *Re-Interrogation sekce*. Skládá se z Infinity Serveru a Replicate bloku zapojených za sebou. Na vstup serveru přichází entity představující dotazy, které byly odmítnuty a budou tedy vysílány radarem znova. Funkcí serveru je pozdržet entitu po určitou dobu, než bude moci být opět Generátor sekci vyslána.

Replicate Block zapojený do série vytváří kopie příchozí entity, jejíž výstupy jsou napojeny na vstupy jednotlivých Generator sekcí následovně:

1. do Related Calls bloku v případě, že odmítnutá a opakující se entita byla tímto blokem vygenerována
2. do všech Unrelated Calls bloků v případě, že entita byla vygenerována pro jinou množinu letadel

Zpětnou vazbou jsou vedeny jen ty entity, které vznikly v bloku Related Calls a jsou typu UF4/5/20/21. S pomocí Re-Interrogation distributoru je zajištěno, že se entita vrátí do původní generátorové sekce. Zároveň je ale distribucí poslána i do zbylých Generator sekcí náležejících množinám letadel s jiným palubním vybavením (parametr EQP). V tom případě je však distribuována do těchto nepůvodních sekcí jako Unrelated Call, a proto je poslána na vstup tohoto bloku. Tím se zajistí, že opakovaná entita (požadavek) ovlivní i ostatní množiny letadel. Pokud tedy nebudeme rozlišovat, zda požadavky vstupují zpět do Generator sekce přes Related či Unrelated Calls bloky, pak platí, že množství entit vstupujících do všech 4 Generator sekcí je stejné. To je zcela nutné pro správné fungování modelu. Kanály 1030/1090 MHz jsou sdílené všemi zařízeními a nelze tedy aplikovat re-interrogation jen v jediném okruhu, který náleží dané množině letadel.

Velikost toků v souvislosti s re-interrogation jevem musí být v řezu všemi vstupními vazbami do Generator sekcí shodná.



Obrázek 2.7: Re-Interrogation distributor sekce: Směr toku entit je zprava doleva.

2.4 Propojení s MATLAB modelem

RF Re-Interrogation Model lze spustit pouze tehdy, jsou-li k dispozici data, která připravil RF Load Model. Rozhraní mezi oběma částmi, ve smyslu předání dat, je automatizované. Po skončení skriptu *Run Modulu*,

je nutné spustit následující skripty:

1. Simulink_Run.m
2. Simulink_Results.m

První skript provede výpočet RFR Modelu, druhý slouží ke grafickému výstupu vypočtených hodnot.

Kapitola 3

Konfigurace simulačního prostředí pro oblast České republiky

Na rozdíl od předchozích kapitol, ve kterých jsme věnovali struktuře a procesům simulace, přejdeme nyní k popisu vstupních parametrů, které byly použity. Zkoumanou oblastí byl vzdušný prostor České republiky, což vyžadovalo zahrnout částečně i její blízké okolí. To se týkalo nejen letového provozu, ale především přehledové sítě sekundárních radarů. Z pohledu výsledků zatížení frekvence 1090 MHz je definování vstupních dat vždy klíčové.

K posouzení zatížení RF pásma v oblasti České republiky byly nalezeny hodnoty parametrů, které jsou vyžadovány ve vstupním formuláři souboru *INPUT.xlsx*. Jinými slovy, bylo žádoucí popsat s pomocí těchto parametrů současný objem, charakteristiky i uspořádání letového provozu nad územím ČR. Dále v textu budou přiblíženy i postupy související s přehledovou pozemní strukturou sekundárních radarů, která v důsledku své činnosti také přispívá k zátěži sledovaného RF pásma.

3.1 Vybraná geografická oblast

Pro vymezení plochy pro simulaci bylo standardně použito dvojice poledníku a rovnoběžek (tabulka 3.1, obrázek 3.1). Výsledkem byla geografická plocha zahrnující částečně i vzdušné prostory sousedících států. Snahou bylo vybrat co nejvíce homogenní oblast z hlediska vlastností provozu. Přesnost výsledků je velkou měrou závislá na přesnosti vstupních údajů. Jelikož v současnosti model umožňuje definovat pouze jednu simulační plochu, je nutné hodnoty vstupních parametrů vyjádřit globálně. To vede k jejich aproximaci, která roste s rozptylem reálných uvažovaných hodnot. Proto je při vkládání vstupních dat důležité rozhodnout míru přijatelné aproximace, a poté ji zohlednit i při posuzování výsledků.

Tabulka 3.1: Vymezení simulační plochy

LAT1 [°]	LON1 [°]	LAT2 [°]	LON2 [°]
48,024	10,338	51,650	19,412



Obrázek 3.1: Vybraná oblast pro model

3.2 Palubní vybavení letadel

Simulační program rozlišuje čtyři varianty palubního vybavení. V tabulce 3.2 jsou zobrazeny použité podíly zastoupení variant pro evropský vzdušný prostor a tedy i ČR [4, 5, 8, 14, 17].

Tabulka 3.2: Podíl palubního vybavení v rámci simulace

Označení palubního vybavení	Popis varianty	Podíl zastoupení
EQP1	Pouze Mode A/C odpovídač	1,00%
EQP2	Pouze Mode S odpovídač	5,00%
EQP3	Mode S odpovídač a ACAS	12%
EQP4	Mode S odpovídač, ACAS a ADS-B	82%

3.3 Definování parametrů letového provozu v oblasti

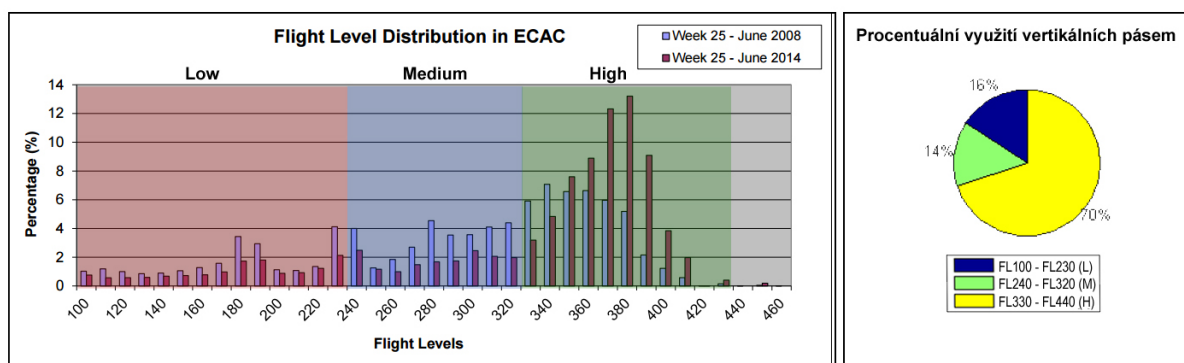
3.3.1 Vertikální charakteristika vzdušného prostoru

Simulační prostor je vertikálně definován třemi zónami společně s parametrem využití a střední traťovou rychlostí.

Využití letových hladin

Pro stanovení parametrů souvisejících s využitím letových hladin v simulačním prostředí byl použit dokument European Route Network Improvement Plan [7]. Letové hladiny byly seskupeny do tří vertikálních zón, jak je zobrazeno na obrázku 3.2.

Vstupní parametry budou nastaveny dle výše uvedeného rozdělení. Důležitou hodnotou, která byla využita v části 3.3.2 ke stanovení hustoty provozu, je vertikální rozměr simulačního prostředí v násobcích 1 000 ft. Tato hodnota je 32 x 1 000 ft.



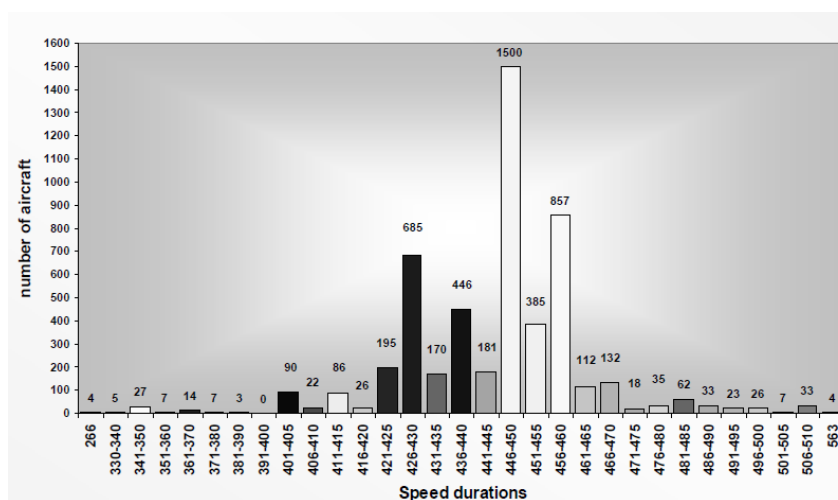
Obrázek 3.2: Procentuální využití letových hladin [7]. Grafické znázornění vertikálních zón bylo do původního obrázku přidáno.

Rozdělení rychlostí

S ohledem na dostupná data o rychlostním rozdělení letů v evropském vzdušném prostoru byly vybrány tři nejvíce zastoupené hodnoty (obrázek 3.3). Ty byly zvoleny za střední traťové rychlosti v jednotlivých vertikálních zónách našeho modelu. Jelikož související statistiky ilustrují, že střední rychlost letu s rostoucí letovou hladinou roste, byla tato zákonitost zachována i v modelu (tabulka 3.3) [1].

Tabulka 3.3: Přidělené střední rychlosti vertikálním zónám

Vertikální zóna	Vymezující letové hladiny	Střední traťová rychlost [kts]
Spodní (L)	FL100 - FL230	426
Střední (M)	FL240 - FL320	448
Horní (H)	FL330 - FL440	460

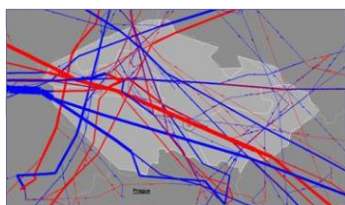


Obrázek 3.3: Zastoupení intervalů rychlostí v evropském vzdušném prostoru [1]

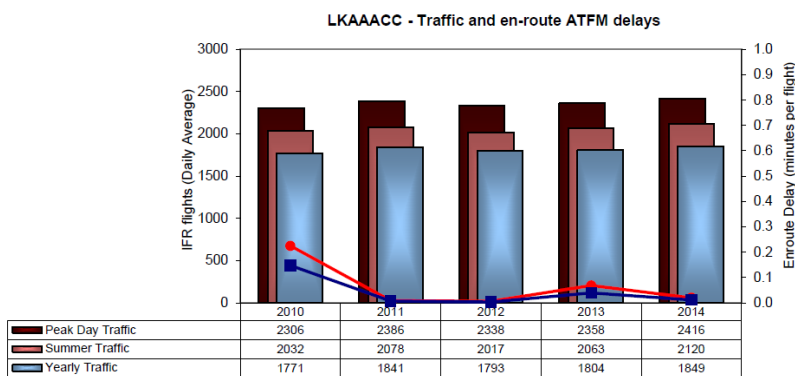
3.3.2 Hustota provozu

Kapacita ACC České republiky (LKAA ACC) byla na základě měření z roku 2014 stanovena na 161 letadel za hodinu. Ve stejném roce byla reálná poptávka po službách LKAA ACC 159 letů za hodinu v 1-hodinové špičce a 146 letů za hodinu ve tří-hodinové špičce. Údaje o celkovém počtu IFR letů provedených v

prostoru z den v těchto provozních podmínkách je 2 416 letů dle posledních dat z roku 2014 (obrázek 3.4b) [13].



(a) Horizontální využití vzdušného prostoru ČR [3]



(b) Provozní výsledky LKAA ACC v roce 2010-2014. [13]

Obrázek 3.4: Provozní statistiky LKAA ACC

Obrázek 3.5 dále ilustruje aktuální vývoj objemu provozu od ledna do dubna 2015. Rostoucí trend je spojený s blížící se letní sezónou, kde můžeme očekávat maximální kapacitní požadavky na vzdušný prostor [7].

LKAA-PRAGUE ACC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY
Daily Average traffic	1534	1554	1663	1875	0

Obrázek 3.5: Vývoj denních pohybů v roce 2015 [3]

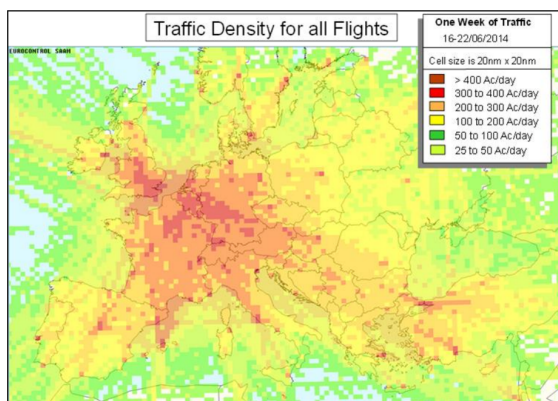
EUROCONTROL na základě svých měření poskytuje přehled o horizontální pohybu letadel nad Evropou připadající na buňku o velikosti 20 NM x 20 NM (obrázek 3.4b) [7]. Prezentovaná data ilustrují zvýšenou hustotu provozu v západní části prostoru České republiky. Pro účely definování parametrů modelu lze očekávat spojitost se zbylým prostorem LKAA ACC, ale i sousedními oblastmi. To připouští i barevná škála na obrázku 3.6a se značně velkým rozptylem hodnot. Pro modelování lze předpokládat, že změna hustoty na hranicích oblastí bude spojitá.

Pro doplnění obrazu o vzdušném prostoru ČR lze dodat, že na celkovém počtu pohybů se obchodní letecká doprava (ATA) v průměru podílí 72 procenty, zbývajících 28 procent připadá na všeobecné a vojenské letectví [8]. Obrázek 3.6b dále vypovídá blíže o druhu letů v prostoru LKAA ACC.

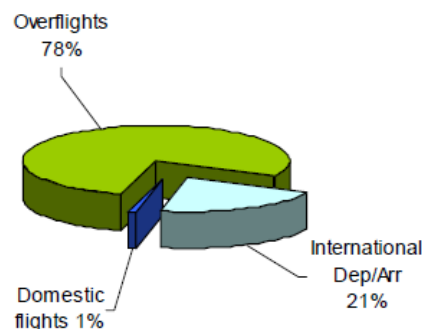
Ve vstupním souboru modelu je vyžadováno definovat hustotu jako počet letadel v kvádru s definovanými rozměry hran. Tato hodnota je spolu s dalšími souvisejícími uvedena v tabulce 3.4. Je důležité zmínit, že pro modelování byla použita hodnota charakterizující prostor, který byl primárně testován, tj. Česká republika. Je tedy pravděpodobné, že přesnost výsledků zatížení rádiové frekvence bude obecně přesnější uvnitř oblasti, jež je popsána vstupními daty. Směrem k hranicím simulačního prostředí může být přesnost výsledných hodnot negativně ovlivněna zvolenou mírou aproximace.

Výpočet počtu letadel v objemovém elementu 5NM x 5NM x 1000ft (vzorec 3.1):

$$N_{elm} = \rho \cdot 25 \cdot \left(\frac{1}{10} \sum_{i=L,M,H} p_{iMAX} - p_{iMIN} \right)^{-1} \quad (3.1)$$



(a) Horizontální hustota letecké dopravy. Zobrazuje denní toky buňkami stanovených rozměrů.



(b) Skladba letů nad územím ČR

Obrázek 3.6: náhled na pohyby ve vzdušném prostoru České republiky [7]

kde: ρ – plošná hustota letadel [$\text{letadel} \cdot \text{NM}^{-2}$]

$p_{i_{MAX}}$ – horní letová hladina i -té vertikální zóny (dle tab. 1.4 na str.17) [–]

$p_{i_{MIN}}$ – spodní letová hladina i -té vertikální zóny [–]

Tabulka 3.4: Údaje souvisejících s hustotou provozu

Celková plocha ČR	22 993	NM^2
Celková simulační plocha		NM^2
Max. hodinová kapacita ŘLP	159	$\text{let} \cdot \text{hod}^{-1}$
Podíl provozní špičky v celkovém denním objemu	7,3	%
Plošná hustota letadel na území ČR (ρ)	$3,47 \cdot 10^{-3}$	$\text{letadel} \cdot \text{NM}^{-2}$
Vertikální rozměr prostoru	32	x 1 000 ft
Počet letadel v elementu (N_{elm}) [6,7,13]	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$(5\text{NM} \times 5\text{NM} \times 1\,000\text{ft})^{-1}$

3.4 Přehledová síť sekundárních radarů

Poslední část, které se v této kapitole budeme věnovat, se týká nastavení parametrů přehledových sekundárních radarů (dále jen radary). Jejich zeměpisná poloha spolu s výkonností a dotazovací charakteristikou ovlivňuje RF zatížení sestupného spoje simulačního prostředí. Přesněji se jedná o přenos odpovědí módu A/C a DF4/5/20/21 na 1090 MHz od letadel, která jsou radarem dotazována.

Obecně lze říci, že poloha radaru by neměla být jediným faktorem, který rozhoduje o jeho zařazení do simulace. Vysílání těchto zařízení totiž ovlivňuje okolní oblast až do vzdálenosti několika stovek námořních mil, a proto může být někdy problematické určit, zda je radar potřeba zařadit či není. Pokud není radar vložen do prostředí, ačkoliv ho svým dosahem ovlivňuje, dostáváme neúplnou informaci o zatížení sestupného spoje. Naopak testování zátěže simulace s radarem, který svým dosahem nikterak neovlivňuje zkoumané prostředí, nepředstavuje důvod ke horšení přesnosti výsledků. Jeho zařazení se pouze projeví na výpočtovém čase, který se v důsledku zvýšení celkového množství operací také navýší. Je tedy na rozhodnutí uživatele, jak databázi radarů sestaví.

V případě námi prezentované simulace, nebyly radary zadávány ručně přes soubor *INPUT.xlsx*, ale celý proces byl pomocí MATLAB skriptu do velké míry automatizován. Pro vytvoření databáze sekundárních radarů pro evropský vzdušný prostor byly použity následující dokumenty:

1. FINAL REPORT AND SUMMARY OF RESULTS OF IC CODE ALLOCATION FRUIT SIMULATIONS [15],
2. RF POLLUTION EVALUATION OF MODE S/SSR INTERROGATOR CONFIGURATION [2],
3. MODE S INTERROGATOR CODE (IC) ALLOCATIONS FOR THE ICAO EUR REGION [11].

Textová data byla pomocí pomocného počítačového kódu transformována do prostředí MATLAB uložena jako matice *SSR_SIM*. Databáze vznikla na základě zmíněných dokumentů, přičemž se množství informací o radarech v jednotlivých zdrojích lišilo. V některých dokumentech byly k dispozici pouze souřadnice.

Pro vytvoření funkční databáze bylo nezbytné u všech radarů doplnit průměrné parametry související s dotazovací charakteristikou Roll-Call periody. Dále u části radarů byly známy jen zeměpisné polohy [2], a proto byly zbývající neznámé parametry nahrazeny předpokládanými středními hodnotami pro evropský prostor [12]. Několik sekundárních radarů bylo dále vyhledáno manuálně na základě dokumentu *Mode S Interrogator Code (IC) Allocations of IC Code Allocation* [11]. Jednalo se o doplnění databáze radarů Polska a Slovenska, které nebyly vůbec zahrnuty v *Final Report and Summary* [15] a *RF Pollution Evaluation* [2]. I těmto radarům byly přiřazeny střední hodnoty parametrů.

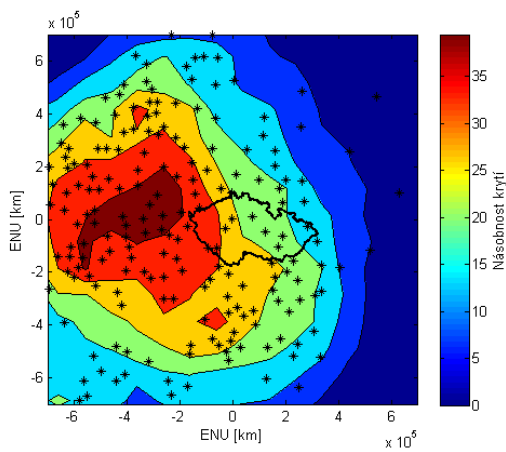
Jelikož byla databáze vytvářena z více zdrojových souborů, bylo následně ověřeno, že neobsahuje duplikátní záznamy. Případné nálezy byly odstraněny. Původní zeměpisné souřadnice ve WGS 84 byly standardně převedeny do ENU soustavy. V případě projekce databáze radarů do mapových podkladů jiné transformace je patrné zkreslení poloh s rostoucí vzdáleností od zkoumané oblasti, tj. v tomto případě Česká republika. Tato skutečnost nicméně nemá žádný vliv na přesnost výsledků.

Vzhledem k přijatelné velikosti databáze nebyl proveden užší výběr, při němž by byly odstraněny radary, které vzhledem ke své poloze nemohou zatížit RF 1090 MHz ve sledovaném prostoru. Do simulace byly započítány všechny lokalizované radary.

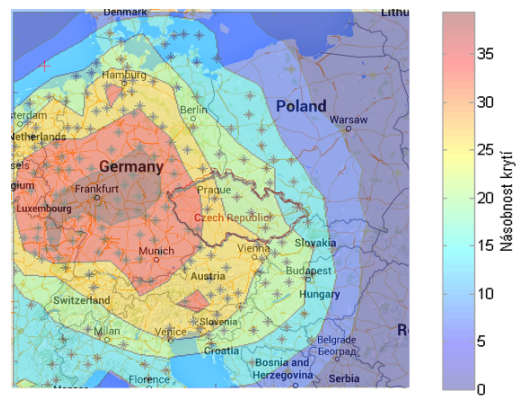
Databáze SSR

Na obrázku 3.7 je ilustrováno krytí sekundárními přehledovými radary se zaměřením na simulovanou oblast.

Na mapovém podkladu je ilustrována namodelovaná přehledová síť sekundárních radarů (případně dalších jiných dotazovacích zařízení), kterou program zahrnul do svých výpočtu při určování zátěže RF pásma 1090 MHz (obrázek 3.8). Databáze byla použita v původním rozsahu, ačkoliv je patrné, že mnohé radary oblast ČR vůbec neovlivní. Jelikož jsou tato radarová data (poloha a další parametry) velice omezeně publikovaná, bude nutné databázi do budoucna rozšiřovat (např. směrem na východ) a dále ji upřesňovat.

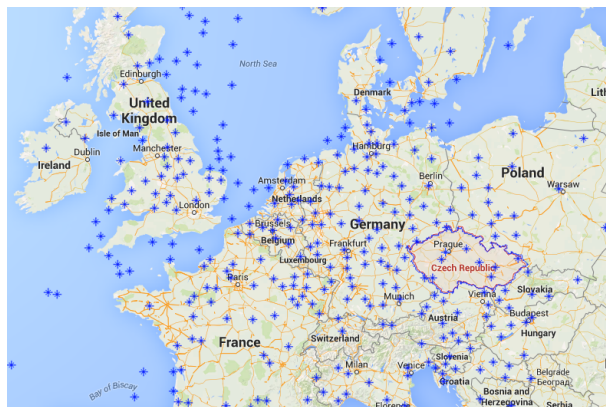


(a) Násobnost krytí SSR ve FL200



(b) Znázornění násobného krytí SSR ve FL200 na mapovém podkladu

Obrázek 3.7: Náhled části databáze přehledové sítě SSR



Obrázek 3.8: Ilustrativní zobrazení pozic SSR modelové databáze (424 pozic). Vlivem použití rozdílných transformací mapy a souřadnic SSR dochází ke zkreslení polohy s rostoucí vzdáleností od zvoleného výchozího bodu, tj. LKPR.

Kapitola 4

Posouzení validity modelu

Tato kapitole se věnuje ověření validity modelu na základě srovnání modelových výstupu s reálně naměřenými hodnotami. Referenčními hodnotami, které byly použity, byly počty zpráv přijaté na sestupném spoji od reálného letadla za časový interval 60 sekund (obrázek 4.1) [16]. Sledovaná část letu byla provedena nad územím ČR mezi známými body. Proces posouzení validity zahrnoval následující kroky:

1. definování vstupních hodnot v souboru *INPUT.xlsx*,
2. přidání sledovaného letadla do simulovaného prostředí,
3. získání primárních výsledků o zatížení 1090 MHz z RFL Modelu,
4. výpočet korekčního koeficientu pomocí simulace RFR Modelu,
5. aplikace korekcí na primární výsledky,
6. srovnání počtu vyslaných zpráv z reálného a modelového letadla.



Obrázek 4.1: Pozice měření části letu (60 sekund)

4.1 Vstupní hodnoty

Vstupní hodnoty pro oblast České republiky byly použity dle kapitoly 3 na straně 63. Databáze SSR je dále uvedena v příloze.

4.2 Implementace letu do prostředí

Jelikož RFL model generuje letadla automaticky, bylo nutné let naprogramovat manuálně, což zahrnovalo vyplnění vektoru letadla (výchozí polohy, letové hladiny, směru letu atd.) a jeho vložení na první pozici matice *TARGETS* k ostatním vygenerovaným letadlům (matice popsána v kapitole 1.3.6, str. 23). Tento krok byl proveden v okamžiku ukončení procesů *Environment Modulu*, v němž byla simulace pozastavena. Výraz 4.1 odpovídá manuálně definovanému vektoru letadla. Složky polohy jsou již po transformaci do ENU systému.

$$\vec{a}_1 = \begin{pmatrix} 50000 & -50000 & 330 & 82 & -227 & 3 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

4.3 Výsledky zatížení RF pásma dle RFL Modelu

Aplikací RFL Modelu byly získány hodnoty o zatížení sestupného spoje související s činností odpovídače zkoumaného letadla v průběhu letu (tabulka 4.1). Virtuálním přijímačem byla dále posouzena i skladba celkové zátěž přilehlé oblasti (tabulka 4.2). V obou případech se ovšem jedná o výstupy modelu, které nezahrnují přenosové ztráty ani znovu-dotazování radaru (re-interrogation). Tato nepřesnost se projeví v počtu zpráv ve formátu DF4/5/20/21.

Tabulka 4.1: Výsledky RFL Modelu za časový interval 60 s

Formát zprávy	Počet zpráv celkem
Kód Módu A/C	0,00
DF11	0,00
DF4/5/20/21	646,03
DF17	327,41
DF0/16	171,94

Hodnoty v tabulce 4.2 ilustrující zatížení sestupného spoje jsou pro větší přehlednost převedeny na počet zpráv za sekundu. Měření bylo provedeno v okruhu o poloměru 200 km. Virtuální přijímač byl umístěn na povrchu země v blízkosti výchozí pozice letadla. Průměrný počet letadel v dosahu přijímače byl 132. Z hodnoty Extended Squitteru, který je vysílán v rozmezí pevně dané periody, lze odhadovat počet letadel s touto technologií.

Tabulka 4.2: Zatížení RF pásma 1090 MHz v měřené oblasti

Formát zprávy	Počet zpráv za dobu simulace [-]	Počet zpráv za sekundu [Hz]
Kód Módu A/C	1 740	26,79
DF11	1 200	20,00
DF4/5/20/21	86 076	1 434,64
DF17	34 860	581,80
DF0/16	24 529	408,82

4.4 Výpočet korekčního koeficientu dotazování

Pro výpočet korekčního koeficientu c_{reint} , jenž souvisí s opakováním dotazů od sekundárních radarů, byl použit RFR Model. Koeficient vyjadřuje, kolikrát je základní množství dotazů UF4/5/20/21 zvýšeno

v důsledku jejich opakování. Ná základě jeho hodnoty lze opravit původní množství radarových dotazů, jež bylo zprostředkováno RFL Modelem. Základním vstupním údajem, se kterým RFR model následně pracuje, je charakteristika zátěže oblasti.

4.4.1 Definování použitých proměnných

Dynamický model v Simulinku simuluje přenosy v oblasti a určí, jaké z dotazů nebyly palubní jednotkou letadla zodpovězeny, a proto byly opakovány. Dle toho vypočte, kolik se jich musí zopakovat. Na výstupu poskytuje informace o:

1. souhrnném množství původních dotazů λ_0 ,
2. souhrnné množství zopakovaných dotazů λ_R ,
3. koeficientu znovu-dotazování c_{reint} (definován vztahem 4.2).

Korekční koeficient je definován vztahem:

$$c_{reint}(t) = \frac{\lambda_0(t) + \lambda_R(t)}{\lambda_0(t)} \quad (4.2)$$

Model na výstupu poskytuje uvedená data v závislosti na čase (standardně za 1 sekundu). Délku časového intervalu je možné změnit v okně simulace. V současné verzi programu je omezena na 4,5 sekund, po nichž je zastaveno generování dotazů. Důvodem pro toto omezení je pouze příprava pro jeho další rozvíjení. Stabilitu modelu lze posoudit i při tomto omezení intervalu. Naopak pro dostatečné zhodnocení prostředí by spodní hranice intervalu neměla být nižší než 0,4 sekundy. To je způsobeno tím, že systém začne simulovat přenos zpráv v zcela nezatíženém prostředí, což vede k výrazným rozptylům sledovaných hodnot. Poté lze na systému pozorovat vývoj v čase a posoudit jeho stabilitu.

4.4.2 Posouzení stability

Systém přehledových radarů a letadel ve vybrané oblasti lze posuzovat z hlediska stability na zvoleném časovém intervalu. Primárním ukazatelem může být časový vývoj počtu zopakovaných dotazů v čase. Jelikož se jedná o sumu, lze aplikovat kritérium posuzující řád regresní křivky. Systém lze pak považovat za:

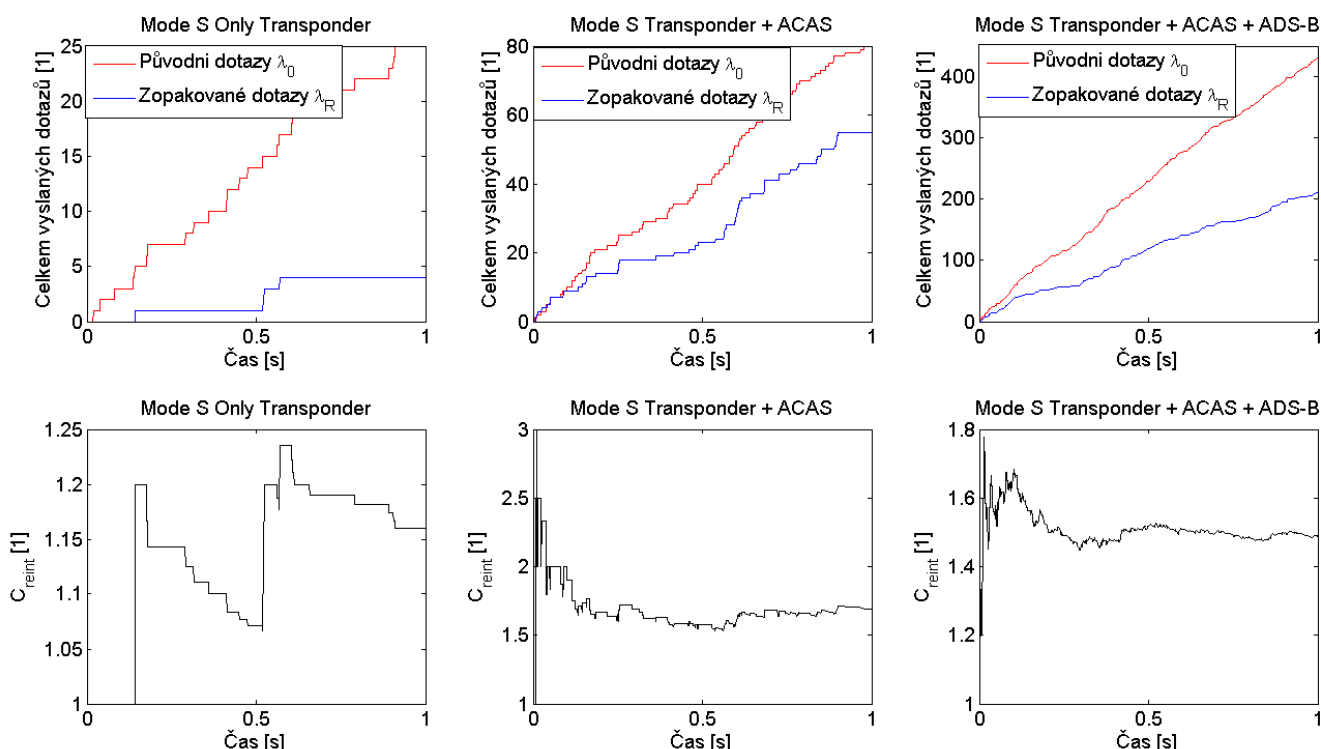
- a stabilní, je-li regresní křivka maximálně 1. řádu (přímka). Narůstá-li v čase počet zopakovaných dotazů lineárně, je první derivace dle času regresní křivky konstanta. V systému potom existuje ustálené opakování dotazů vyjádřené proměnnou c_{reint} . To jinými slovy znamená, že radary musí v daném prostředí opakovat své dotazy, avšak existuje průměrná hodnota navýšení v čase.
- b nestabilní, je-li regresní křivka vyššího než 1. řádu. V případě, kdy počet zopakovaných dotazů v čase kopíruje mocninou křivku, není první derivace dle času konstanta. Jelikož je potom navýšení počtu zopakovaných dotazů závislé na čase, dochází k neustálému nárůstu. Nemění-li se okolní podmínky, překročí sledovaná oblast maximální přenosové možnosti 1030/1090 MHz a navýšení bude v limitě teoreticky růst až do nekonečna. Jinými slovy, výchozí přenosová zátěž oblasti a další faktory jsou takové, že radary překročí mez, kdy vlastním vysíláním zatěžují společné RF pásmo natolik, že je nutné opakovat dotazy ještě častěji. Tato smyčka vede k nestabilnímu stavu systému radarů.

Pro posouzení stability je nicméně také nutné zahrnout skutečnost, že zkoumáme vliv na omezeném časovém intervalu. Proměnné, které ovlivňují re-interrogation se v čase mění a s tím tedy i chování systému. Stejně tak potřeba zohlednit základní vlastnosti většiny vstupů a procesů, které jsou stochastické. Regresní křivky tedy popisují pouze střední hodnoty c_{reint} . Výstupy RFR Modelu dokládají, že okamžitá hodnota koeficientu kolem této hodnoty v čase osciluje.

4.4.3 Vyhodnocení korekčního dotazování

Korekční koeficient pro oblast, v níž byl proveden měřený let, byl určen ze simulování přenosů na časovém intervalu 1 sekundy. Hodnota koeficientu i její vývoj v čase byl posuzován pro každou variantu palubního vybavení zvlášť. Varianta EQP1 není ve výsledcích uvedena, neboť v případě interakce s odpovídačem Módu A/C radar nepoužívá adresné dotazy. Nicméně model tuto variantu zahrnuje a testuje, avšak jedná se výhradně o kontrolní proceduru.

Na obrázku 4.2 je zobrazen výstup RFR Modelu pro testovanou oblast. První řádek obrázku ilustruje celkové množství dotazů (původních i zopakovaných), které bylo naměřeno od počátku simulace, tj. od času $t = 0$. V druhém řádku je uveden vývoj korekčního koeficientu $c_{reint}(t)$. Jak bylo již popsáno dříve, vývoj koeficientu na začátku testovaného intervalu vykazuje zpravidla větší rozptýlení hodnot než je tomu ve zbytku intervalu. V tomto ohledu lze také pozorovat, že rozptýlení jednotlivých koeficientů od střední hodnoty je tím menší, čím větší je zastoupení letadel s danou kategorií vybavení (v našem případě toto platí pro variantu Mode S + ACAS + ADS-B). Na dalším obrázku 4.3 jsou porovnány vývoje koeficientu vzájemně.



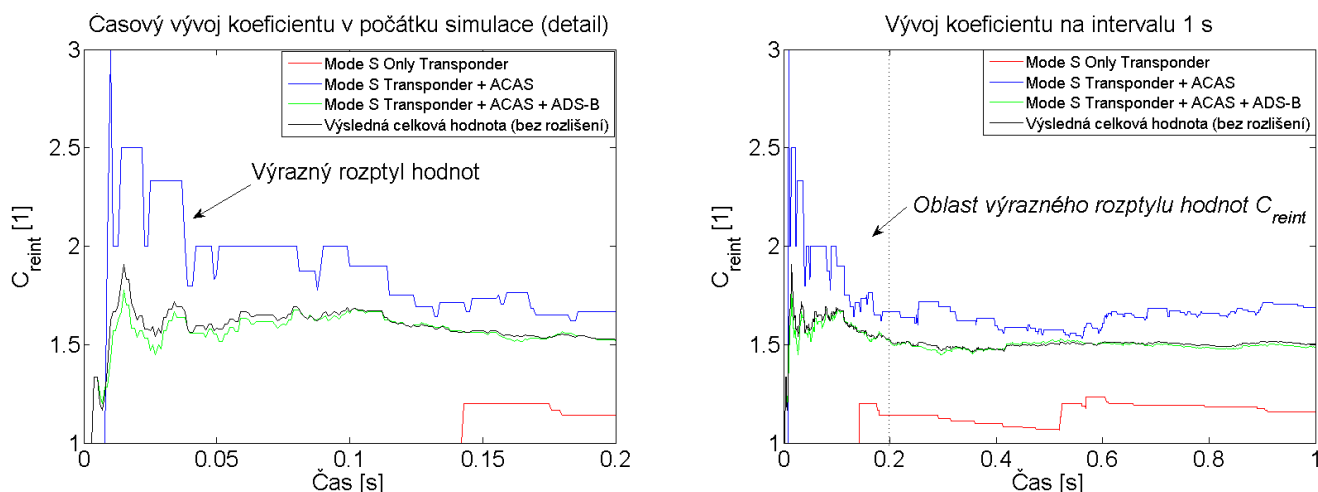
Obrázek 4.2: Vývoj počtu dotazů a koeficientu znovu-dotazování v čase

Dále je doplněn celkový korekční koeficient, který je zobrazen černou barvou. Jeho podobnost s koeficientem varianty EQP4 (tj. Mode S Transponder + ACAS + ADS-B) souvisí opět s nejvyšším zastoupením

Tabulka 4.3: Shrnutí výsledků odhadu korekčního koeficientu C_{reint_2}

Korekční koef.	Kód vybavení	Popis	Střední hodnota	Rozptyl
C_{reint_2}	EQP2	Mode S Only Trans.	1,1371	0,0044
C_{reint_3}	EQP3	Mode S Trans. + ACAS	1,6912	0,0245
C_{reint_4}	EQP4	Mode S Trans. + ACAS + ADS-B	1,5090	0,0031
C_{reint_T}	—	Celkový koeficient	1,5199	0,0039

této varianty. Tabulka 4.3 doplňuje uvedené grafy a shrnuje korekční koeficienty C_{reint} včetně základních statistických vlastností.



Obrázek 4.3: Porovnání průběhů dílčích korekčních koeficientů

4.5 Použití opravných koeficientů

Primární výsledky, které byly získány RF Load Modelem (4.3, str. 4.3), nezapočítávaly proces znovu-opakování dotazu (re-interrogation). Pro korekci je aplikován celkový korekční koeficient C_{reint_T} .

Úpravami analogicky provádíme navýšení dotazovacích charakteristik radarů v testovaném prostředí. Tím se zvyšuje zatížení vzestupného spoje. V závislosti na aktuálním zaneprázdnění odpovídačů letadel je ovlivněn i sestupný spoj. V současném rozsahu model tuto hodnotu nepočítá a zavádí pouze kalibrační konstantu c_{cal} . Ta je stanovena empiricky a slouží k odladění modelu. Ačkoliv zahrnuje nepřesnosti nejen z výpočtu modelu, ale i ze vstupních dat, je použita ke kalibraci výsledků pouze RF Re-Interrogation Modelu (dle vzorce 4.3). Čím je hodnota nižší, tím je validita modelu daného prostředí větší.

$$N_{DF4/5/20/21} = \hat{N}_{DF4/5/20/21} + \left[\hat{N}_{DF4/5/20/21} \cdot (C_{reint} - 1) \right] \cdot c_{cal} \quad (4.3)$$

- kde: $N_{DF4/5/20/21}$ – celkový počet odpovědí na dotazy od SSR získané po korekcích
 $\hat{N}_{DF4/5/20/21}$ – celkový počet odpovědí na dotazy od SSR bez korekcí (RLF Model)
 C_{reint} – koeficient pro dotazovací charakteristiky (re-interrogation rate)
 c_{cal} – koeficient pro odladění programu prostředí

4.6 Posouzení výsledků modelu

Pro posouzení bylo použito reálné měření 60 sekundového letu nad ČR, který byl již zmiňován na začátku kapitoly. Reálná data o množství zpráv byla povýšena o 20% v souvislosti se ztrátou na příjmu, která je v dokumentu odhadována. V tabulce 4.4 je uvedeno množství zpráv, které letadlo vyslalo na základě (1) reálného měření, (2) primárních výsledků z RFL Modelu a (3) výsledků modelu po aplikování koeficientů. Poslední sloupec tabulky potom ilustruje rozdíl kalibrovaných výsledků oproti naměřeným hodnotám.

Tabulka 4.4: Srovnání výsledků modelu s reálným měřením

Formát zprávy	Naměřeno [16]	Výsledky RFL Model	Výsledky po kalibraci	Rozdíl výsledků modelu oproti měření
DF4/5/20/21	784	646	680	-17,60%
DF17	302	327	327	+8,28%
DF0/16	218	171	171	-21,56%

Pro tabulku platí:

1. navýšení naměřených hodnot o 20%
2. koeficient pro dotazování $c_{reint} = 1,5199$. dle tabulky 4.3
3. koeficient pro odladění modelu roven $c_{cal} = 0.1$ (10% souhrnná chyba výpočtu modelu a vstupních dat)

Rozdíly od naměřených hodnot lze odůvodnit i dalšími faktory. Například u zpráv DF0/16 lze uvést, že model obecně pracuje s předpokladem využití hybridního sledování, jsou-li letadla vybavena odpovídajícím způsobem. Proto je namodelované množství zpráv nižší.

Odchylna v množství zpráv Extende Squitteru (DF17) se pohybuje v rámci přijatelného intervalu. Tento interval je dán vlastnostmi ADS-B vysílání, které neprobíhá ve zcela konstantních periodách.

Na základě porovnání výsledků souvisejících s DF4/5/20/21 je nutné pro hodnocení dalších scénářů volit $c_{cal} = 0.4$. Tato hodnota není globální pro celý model, pouze pro toto testování.

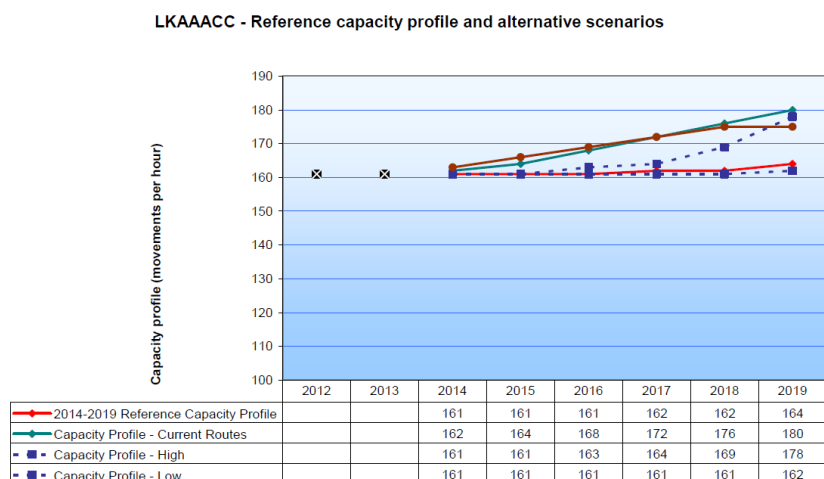
Kapitola 5

Nasimulování budoucího scénáře

Pro modelování budoucího scénáře bylo použito zadání z kapitoly Konfigurace simulačního prostředí pro oblast České republiky na straně 63. Scénář měl za cíl odhadnout zatížení RF 1090 MHz v téže oblasti v roce 2025, kde byl 60 sekundový let proveden. Byly extrapolovány údaje o hustotě provozu a vybavení letadel, přičemž ostatní parametry zůstaly nezměněny.

5.1 Extrapolace dat o prostředí

Hustota provozu v roce 2025 byla primárně odvozena z předpovědi vývoje kapacitních požadavků na LKAA ACC v roce 2019, které EUROCONTROL v současnosti odhaduje (obrázek 5.1). Jelikož jsou data předpovídána pouze pro rok 2019 a nikoliv 2025, byla vybrána nejvyšší hodnota, tj. 180 letadel za hod [6]. Pro rok 2015 byla tato hodnota 161 letadel za hodinu. Parametr hustoty prostředí je uveden v tabulce 5.1



Obrázek 5.1: Očekávaný vývoj kapacit LKAA ACC v roce 2014-2019. [6]

Tabulka 5.1: Parametr hustoty letadel v prostoru v r. 2025

Počet letadel v elementu 5 NM x 5 NM x 1000 ft [?, 4, 6, 17]	$4,07732 \cdot 10^{-3}$
--	-------------------------

Predikce vybavení letadel na rok 2025 je uvedena v tabulce 5.2. Ostatní parametry zůstaly nezměněny.

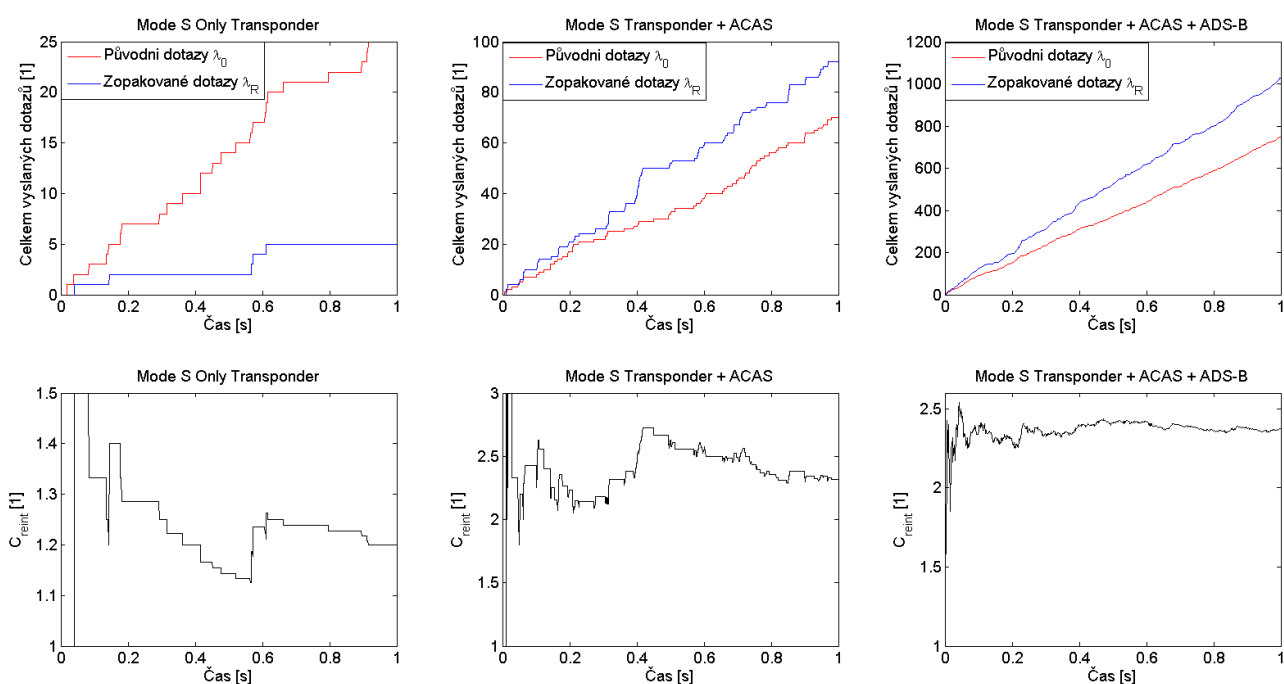
Tabulka 5.2: Predikce podílu palubního vybavení v r. 2025 [4, 5, 8]

Označení palubního vybavení	Popis varianty	Podíl zastoupení
EQP1	Pouze Mode A/C odpovídač	0,00%
EQP2	Pouze Mode S odpovídač	1,00%
EQP3	Mode S odpovídač a ACAS	5,00%
EQP4	Mode S odpovídač, ACAS a ADS-B	94,00%

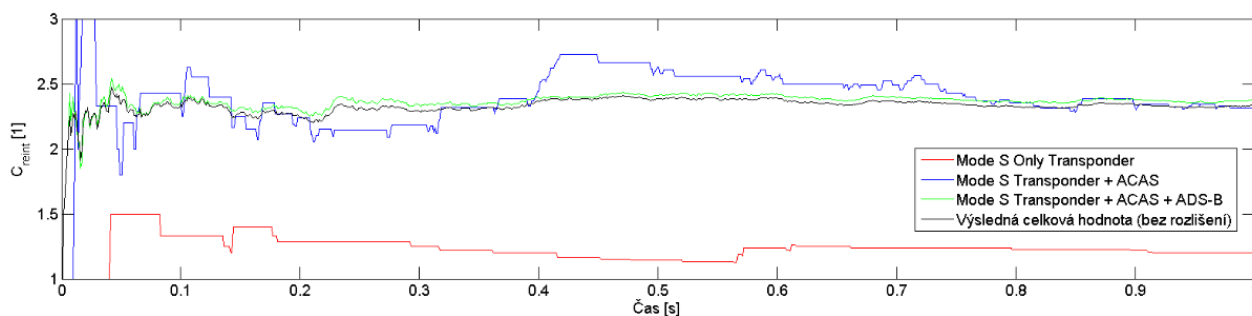
5.2 Výsledky predikce

5.2.1 Výstup modelu

Význam výstupních hodnot a jejich další interpretace byly uvedeny v kapitole ??, ??, na straně ??, a proto je již v této části nebudeme znovu popisovat.



Obrázek 5.2: Predikce vývoje počtu dotazů a koeficientu znovu-dotazování v čase (r. 2025)



Obrázek 5.3: Srovnání dílčích koeficientů znovu-dotazování. Celkový koeficient: $c_{reint} = 2,30$ (rok 2025)

5.2.2 Vyhodnocení budoucího scénáře pro rok 2025

Výsledné hodnoty zatížení RF 1090 MHz jsou pro oblast uvedeny v tabulce 5.3 a pro zkoumaný let trvající 60 sekund v tabulce 5.4. Hodnoty jsou upraveny koeficienty, jejichž hodnoty jsou uvedeny v popisku tabulek.

Tabulka 5.3: Predikce zatížení RF pásma 1090 MHz v měřené oblasti v roce 2025. Použité koeficienty: $c_{reint} = 2,30$ (rok 2025), $c_{cal} = 0.4$

Formát zprávy	Počet zpráv za 60 s	Počet zpráv za sekundu [Hz]
Kód Módu A/C	0,00	0,00
DF11	1 127,00	18,79
DF4/5/20/21	187 001	3 117,52
DF17	52 521,60	875,36
DF0/16	62 378,40	1 039,69

Tabulka 5.4: Výsledky modelu pro rok 2025. Simulování shodného letu po dobu 60 s. Použité koeficienty: $c_{reint} = 1,52$ (rok 2015) $c_{reint} = 2,30$ (rok 2025), $c_{cal} = 0.4$

Formát zprávy	Reálné měření [16] v roce 2015	Výsledky modelu pro r. 2015	Predikce modelu pro r. 2025	Změna zatížení oproti reálnému měření
DF4/5/20/21	784	780	1064	+35,71%
DF17	302	327	335	+10,93%
DF0/16	218	171	313	+43,58%

Mezi výsledky je významným ukazatelem pro ohodnocení prostředí koeficient c_{reint} . Model predikuje jeho hodnotu ve sledované oblasti v roce 2025 na 2,3. Při této hodnotě koeficientu již dochází k opakování každého dotazu alespoň jednou. Znamená to, že pravděpodobnost, při které je dotazované letadlo ve stavu zaneprázdnění, výrazně vzrostla. Je možné očekávat, že pokud by naše prostředí vykazovalo tyto vlastnosti, bylo by téma zatížení spojů 1030/1090 MHz velice významné. Vysoký koeficient c_{reint} znamená, že ačkoliv aktivita dotazování radarů v dané oblasti vzroste, nebude získ informace od letadel vyšší. Proto lze koeficient do určité míry vnímat jako ukazatele efektivity dotazování z pohledu provozování SSR.

Závěr

Využívání kooperativních přehledových systému nepochybně přináší značné množství výhod pro letectví. Instalace těchto technologií na paluby dopravních letadel je dnes běžnou praxí výrobců. Do budoucna lze očekávat jejich výrazné rozšiřování i do dalších odvětví letectví. Příčinou může být na jedné straně legislativní nařízení o povinné výbavě, na straně druhé vlastní iniciativa provozovatelů letadel, kteří se pro výbavu rozhodnou v důsledku pravděpodobného poklesu pořizovacích nákladů. Další motivací může být realizace konceptu přechodu letů z ATS tratí k tzv. Free Flight, pro níž je použití kooperativních přehledových systémů klíčové.

Je velice pravděpodobné, že počet provozovatelů letadel vybavených těmito systémy bude do budoucna přibývat. Ačkoliv kooperativní přehledové systémy umožní nárůst pohybu ve vzdušném prostoru při zachování požadované úrovně bezpečnosti, bude problematika zatížení RF 1090 MHz velice aktuální. Její obsazení totiž je ovlivněno nejen počtem uživatelů technologie, ale i množstvím informací, které po ní bude nutné v budoucím provozu přenášet. Koncept volného přístupu na frekvenci, který byl při zavádění těchto technologií spíše vnímán kladně a který umožnil souběžné použití různých generací zařízení (např. Mode A/C a Mode S), se může představovat výraznou překážkou. Ačkoliv vývoj těchto technologií obecně směřuje k efektivnímu využívání používaného RF pásma redukcí zbytného vysílání, bude i nadále otázkou, zda budou tyto modifikace dostatečné. Z pohledu dopravy je totiž naopak snahou mít o letadlech stále více informací. Reálné měření může odpovědět na současný stav zatížení RF pásma, nicméně správně pracující model umožní pochopit závislosti a vytvářet budoucí scénáře. Ty mohou být použity jako nástroj pro směrování dalšího technického vývoje kooperativních přehledových systémů, jehož výsledkem bude optimální využití frekvenční domény.

Výsledkem této diplomové práce je simulační program, který je tvořen dvěma modely: RFL a RFR modelem. RFL Model pracuje na platformě MATLAB a byl navržen na základech modelu představeného v bakalářské práci (2013). Z původního modelu byla zachována pouze základní struktura, do níž byly implementovány výpočty zahrnující pohyb. Těmito změnami vznikl model, který dokáže přiřadit vysílání jednotlivým letadlům ze znalosti trajektorie jejich letu, a tím určit zatížení rádio-frekvenčního pásma oblast mnohem přesněji. Zvýšení přesnosti je především způsobeno možností vytvoření statistiky na relativně delším časovém intervalu. Naopak vstupní soubor a část modelu, která souvisí s generováním simulačního prostředí, byly použity původního a nezměněny.

Druhým modelem je RFR Model, který byl vytvořen v prostředí Simulinku. Navazuje na RFL Model, od něhož přejímá výstupy, které použije pro svou vlastní simulaci. Jedná se o dynamický model, který v rámci modelu analyzuje zaneprázdnění palubních jednotek v prostoru. Model k tomu využívá speciální knihovnu SimEvent, která nepracuje se signálem, ale tzv. entitou. Tu si lze představit jako signál konečné délky či částičku fyzických vlastností, která se pohybuje sítí modelu, nese informaci a je zpracovávána

jednotlivými bloky. Výstupem RFR Modelu je hodnota re-interrogation rate, která ilustruje opakování dotazů od SSR. Současný model se zatím podařilo vyvinout do fáze, kdy opakování dotazu proběhne pouze v důsledku zaneprázdnění palubního odpovídače. Nejsou tedy započteny ztráty a straně radarů.

Obě části modelu byly v rámci diplomové práce podrobeny testování k zjištění, do jaké míry se budou shodovat s hodnotami reálného měření v prostoru ČR. Toto testování validity vyžadovalo připravení simulační prostředí. Byly proto vyhodnoceny hodnoty vstupních parametrů pro RFL Model, s pomocí nichž prostor ČR do modelu vložen. Jednalo se o charakteristiky provozu, palubního vybavení a databáze radarů. Prostor byl pro simulaci definován ve všech svých parametrech. Nicméně se ukázalo, že určení některých údajů je do jisté míry komplikované. Mnohé informace neexistují či jsou z bezpečnostních důvodů utajeny. Eventuálně již nejsou aktuální. Databáze EUROCONTROLU obsahuje statistiky neveřejné a přístupné jen autorizovaným uživatelům. Některá data bylo tedy nutné dopočítat z více zdrojů, což obecně zvyšuje pravděpodobnost zanesení chyby do charakteristiky prostředí a tedy i výsledků.

Výsledky zatížení RF 1090 MHz, které byly získány simulačním programem se obecně pohybovaly v intervalu reálných hodnot. Přestože při porovnání s reálně měřenými daty byl vykázán rozdíl až kolem 20% v počtu přenesených zpráv, není tento výsledek nutně ukazatelem nepřesnosti vnitřní struktury modelu. V případě přenosu zpráv ve formátu DF4/5/20/21 toto lze částečně přisuzovat ne zcela dokonalému nadefinování prostředí a omezené databázi přehledových radarů. V souvislosti se zprávami ve formátu DF0/16 se na chybě kromě prostředí mohl podílet předpoklad, že všechna letadla vybavená ADS-B jsou za daných podmínek sledována hybridně. Tyto odchylky mohly mít zásadní vliv na výstup modelu.

V případě RFR modelu byl koeficient re-interrogation rate vypočten na hodnotu 1,52, která se velice blíží hodnotě reálné (1,40). Zároveň simulací budoucího scénáře pro rok 2025 podpořil hypotézu, že se přenosové možnosti v dnešním RF prostředí mohou pohybovat blízko limitní hodnoty, jelikož relativně mírné zvýšení objemu provozu pro rok 2025 vyvolalo nárůst koeficientu na hodnotu 2,30.

Závěrem lze říci, že cíle této diplomové práce byly splněny ve všech požadovaných ohledech. Byl vytvořen program, který relevantně simuluje přenosy na RF 1090 MHz, při nichž zohledňuje nejen vliv pohybu letadel v prostředí, ale i neurčitost probíhajících procesů. Tím se model zásadně odlišuje od své předchozí verze. Zahrnutí neurčitosti je dále nezbytné pro výpočet re-interrogation rate koeficientu, který je prováděn v Simulink prostředí. Rozvíjení modelu by se v budoucnu mělo zaměřit na vytvoření kvalitní databáze parametrů prostředí. Dalším krokem by mělo být nepochybně porovnání s dostatečným počtem reálných měření, na základě čehož by byl plně kalibrován a posouzen z hlediska validity znovu. Po úplné kalibraci a společně s reálným měřením mohou být programy RFL Model a RFR Model reálným efektivním nástrojem pro výzkum oblasti zatížení RF pásma 1090 MHz.

Seznam tabulek

1.1	Posloupnost modulů včetně jejich názvů a popisů funkcí	15
1.2	Horizontální vymezení simulačního prostoru	17
1.3	Parametr hustoty letadel v prostoru	17
1.4	Vertikální definování prostředí	17
1.5	Možnosti vybavení letadel v rámci modelu	18
1.6	Varianty palubního vybavení	19
1.7	Parametry sekundárních přehledových radarů 1	19
1.8	Parametry sekundárních přehledových radarů 2	20
1.9	Parametry sekundárních přehledových radarů 3	20
1.10	Parametry virtuálních přijímačů	21
1.11	Rozhodovací tabulka pro SSR dotazy	24
1.12	Vyslyšací schéma radaru	29
1.13	Varianty nezodpovězených přijatých dotazy SSR	29
1.14	Popis složek řádkového vektoru z matice SSR_STAT	31
1.15	Popis vybraných složek vektoru z výsledkové matice ACAS_TARGETS	36
1.16	Vysílací parametry Extended Squitteru	36
2.1	Použité atributy a jejich hodnoty	52
2.2	Přehled vlastností subsystémů Generate sekce	54
2.3	Struktura Generate sekce na různých úrovních rozlišení	54
2.4	Podrobnosti o limitování toků	57
3.1	Vymezení simulační plochy	63
3.2	Podíl palubního vybavení v rámci simulace	64
3.3	Přidělené střední rychlosti vertikálním zónám	65
3.4	Údaje souvisejících s hustotou provozu	67
4.1	Výsledky RFL Modelu za časový interval 60 s	71
4.2	Zatížení RF pásma 1090 MHz v měřené oblasti	71
4.3	Shrnutí výsledků odhadu korekčního koeficientu C_{reint2}	74
4.4	Srovnání výsledků modelu s reálným měřením	75
5.1	Parametr hustoty letadel v prostoru v r. 2025	76
5.2	Predikce podílu palubního vybavení v r. 2025	77
5.3	Predikce zatížení RF pásma 1090 MHz v měřené oblasti v roce 2025	78

5.4	Výsledky modelu pro rok 2025	78
-----	--	----

Seznam obrázků

1.1	Parametry pro vertikální definování prostoru (měřítko není zachováno)	18
1.2	Základní parametry radaru	19
1.3	Popis hlavních proměnných pro matematické odvození činnosti ACAS	33
1.4	Způsob vymezení simulační plochy	38
1.5	Znázornění vztahů pro radarový horizont	41
1.6	Funkce MultiCov a její proměnné	42
1.7	Modelování přechodu laloku přes cíl (měřítko není zachováno)	43
1.8	Násobnost ozáření cíle - simulace pro jedno letadlo	43
1.9	Ilustrace výsledků funkce MultiCov	44
2.1	Náhled propojení sekcí RFR Modelu	49
2.2	Generator sekce	50
2.3	Znázornění vzniku Related a Unrelated Calls	55
2.4	Průběh vyslýchání více radary	55
2.5	Odvození toku požadavků v oblasti	56
2.6	Processor sekce	58
2.7	Re-Interrogation distributor sekce: Směr toku entit je zprava doleva.	61
3.1	Vybraná oblast pro model	64
3.2	Procentuální využití letových hladin [7]. Grafické znázornění vertikálních zón bylo do původního obrázku přidáno.	65
3.3	Zastoupení intervalů rychlostí v evropském vzdušném prostoru [1]	65
3.4	Provozní statistiky LKAA ACC	66
3.5	Vývoj denních pohybů v roce 2015 [3]	66
3.6	náhled na pohyby ve vzdušném prostoru České republiky [7]	67
3.7	Náhled části databáze přehledové sítě SSR	69
3.8	Ilustrativní zobrazení databáze SSR	69
4.1	Pozice měření části letu	70
4.2	Vývoj počtu dotazů a koeficientu znovu-dotazování v čase	73
4.3	Porovnání průběhů dílčích koeficientů	74
5.1	Očekávaný vývoj kapacit LKAA ACC v roce 2014-2019. [6]	76
5.2	Vývoj počtu dotazů a koeficientu znovu-dotazování v čase (r. 2025)	77
5.3	Koeficient znovu-dotazování (rok 2025)	77

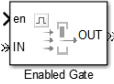
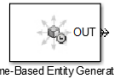
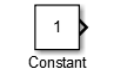

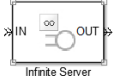
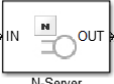
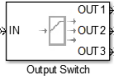

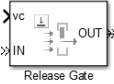
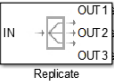
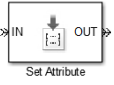

Literatura

- [1] Dravecka, J. Towards the traffic synchronization in Central European upper airspace. In *Intelligent Transportation Systems, 2005. Proceedings. 2005 IEEE*, pages 557–562, Sept 2005. [Online]. 2005. [cit. 2015-04-2].
- [2] ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH. RF Pollution Evaluation of Mode S/SSR Interrogator Configuration. Doc 1EUC-BT-0001, 2002. [Online]. 2002. [cit. 2015-03-12] <<http://www.ssd.dhmi.gov.tr/getBinaryFile.aspx?Type=3&dosyalD=201>>.
- [3] EUROCONTROL. Network Operations Portal. [Online]. 2015. [cit. 2015-3-28] <<https://www.public.nm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html>>.
- [4] Eurocontrol. Cascade News 7, 2009. [Online]. 2009. [cit. 2015-20-3] <<http://www.ssd.dhmi.gov.tr/getBinaryFile.aspx?Type=3&dosyalD=201>>.
- [5] Eurocontrol. ADS-B Ground Surveillance Specifications for Third Iteration, 2012. [Online]. 2012. [cit. 2015-04-10] < [http : //www.sesarju.eu/sites/default/files/solutions/6_Enhanced_Controller_situational_awareness_in_all_weather_conditions_ADS_-_BGround_surveillance_specs.pdf?issuu=sl=ignore](http://www.sesarju.eu/sites/default/files/solutions/6_Enhanced_Controller_situational_awareness_in_all_weather_conditions_ADS_-_BGround_surveillance_specs.pdf?issuu=sl=ignore) >
- [6] Eurocontrol. Local Single Sky Implementation (LSSIP) Czech Republic, 2013. [Online]. 2013. [cit. 2015-1-1] <www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/.../2013-issip-czech.pdf>.
- [7] Eurocontrol. European Route Network Improvement Plan, May 2015. [Online]. 2015. [cit. 2015-4-20] <<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/ernip-part2-arn-v-2013-2015-07062013.pdf>>.
- [8] Eurocontrol Experimental Centre and FAA. 1090 MHz Extended Squitter Assessment Report, June 2002. [Online]. 2015. [cit. 2015-5-14] < [http : //www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/EECS_P_documents/FAA_EEC_1090report.pdf](http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/EECS_P_documents/FAA_EEC_1090report.pdf) >
- [9] Franx, G.J. A simple solution for the M/D/c waiting time distribution. 2001. [Online]. 2001. [cit. 2015-3-3] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637701001080>>.
- [10] ICAO. Doc 9863 Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual, 2005.
- [11] ICAO. European Principles And Procedures For The Allocation Of Secondary Surveillance Radar Mode S Interrogator Codes (IC), 2015. [Online]. 2015. [cit. 2015-1-7] <<http://www.icao.int/EURNAT/EUR/024>>
- [12] Lipták T. Zatížení RF pásma 1090 MHz, 2013. bakalářská práce.
- [13] Network Manager Directorate. NM Annual Network Operations Report - 2014

- (Draft) Edition - Annex II - ACC, 2014. [Online]. 2014. [cit. 2015-4-14] < [https :
//www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/performance/2014_annual_consultation/annual_report_2014.pdf](https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/performance/2014_annual_consultation/annual_report_2014.pdf) > .
- [14] Kieran O'Carroll. Avionic Equipage Survey 2012, 2012. [Online]. 2012. [cit. 2015-5-6] < [http :
//www.icao.int/ESAF/CNSSG5/CNS_SG5.WP20](http://www.icao.int/ESAF/CNSSG5/CNS_SG5.WP20) >
- [15] Adam Parkinson and Helios Technology. Final report and summary of results of IC code allocation FRUIT simulations, 2003. [Online]. 2003. [cit. 2015-1-14].
- [16] Pleninger, S. Měření množství odpovědí generovaných palubním SSR odpovídáčem prostřednictvím pozemní infrastruktury, 2015.
- [17] PPL/IR Europe. Explaining ADS-B and TCAS, 2014. [Online]. 2014. [cit. 2015-2-14] <<http://www.pplir.org/using-the-rating/1006-explaining-ads-b-and-tcas-feb-2014>>.
- [18] Šárka Voráčová. Teorie hromadné obsluhy. Webskriptum. [Online]. 2015. [cit. 2015-3-14] <<http://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/K611THO.html>>.
- [19] Řízení letového provozu České republiky. Letecká informační služba. [Online]. 2015. [cit. 2015-5-10] <<http://lis.rlp.cz/?lang=cz>>.

Příloha

Použité funkční bloky RFR modelu:

Název bloku	Grafická pod/oba
Enabled Gate	
Time-based Entity Generator	
Constant	
FIFO Queue	
Infinite Server	
N-Server	
Output Switch	
Path Combiner	
Release Gate	
Replicate	
Set Attribute	
Sink	

Databáze délky časů procesů v odpovídáči

Mode A/C transponder

Mode/Format	Main Beam Interrogation				
	Trec	Tprc	Trep	Trcv	Toc
Mode S	2,8	0	0	0	34,2

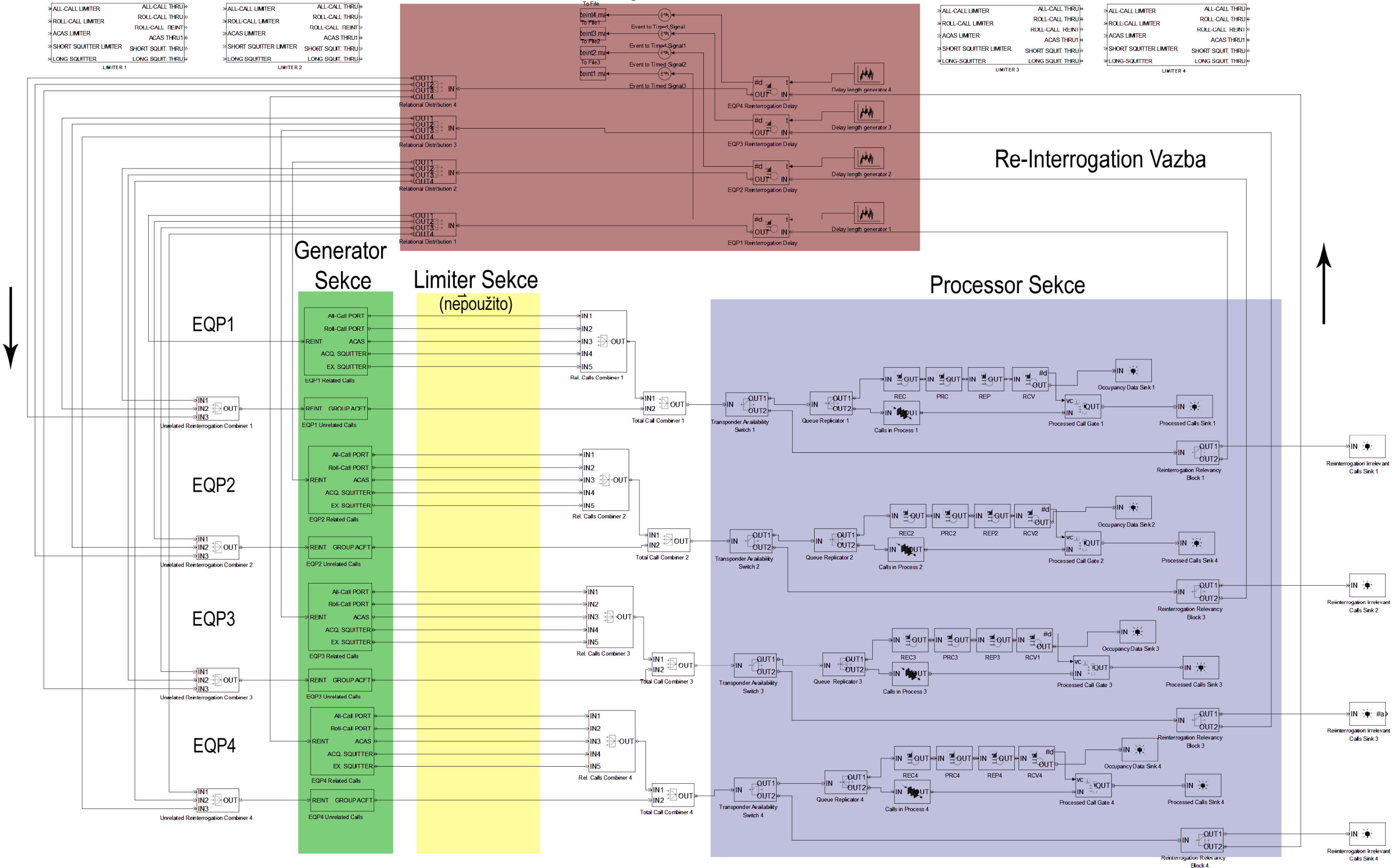
* values in microseconds

Mode S transponder

Mode/Format	Main Beam Interrogation					TYPE INDEX
	Trec	Tprc	Trep	Trcv	Toc	
						-
UF0 - AD	19,75	113	64	33,25	230	1
UF0 - NAD	19,75	0	0	0	30	2
UF4 - SHORT	19,75	113	64	33,25	230	3
UF4 - LONG	19,75	113	120	33,25	286	4
UF5 - SHORT	19,75	4	64	33,25	230	5
UF5 - LONG	19,75	4	120	33,25	286	6
UF11	19,75	113	64	33,25	230	7
UF16 -AD	33,75	99	120	33,25	286	8
UF16 - NAD	33,75	0	0	0	16	9
UF20 - AD SHORT	33,75	99	64	33,25	230	10
UF20 - AD LONG	33,75	99	120	33,25	286	11
UF20 - NAD	33,75	0	0	0	16	12
UF21 - AD SHORT	33,75	99	64	33,25	230	13
UF21 - AD LONG	33,75	99	120	33,25	286	14
UF21 - NAD	33,75	0	0	0	16	15
DF11 - ACQ. SQUITTER	0	0	64	33,25	97,25	16
DF17 - EXT. SQUITTER	0	0	120	33,25	153,25	17

* values in microseconds

Re-Interrogation Distributor



Směr toku entit →