

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Jakub Nosek

**MODELOVÁNÍ MNOŽSTVÍ PŘENOSŮ
GENEROVANÝCH SYSTÉMEM ACAS V REÁLNÉM
PROSTŘEDÍ**

Bakalářská práce

2016



K621..... **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Jakub Nosek

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Modelování množství přenosů generovaných
systémem ACAS v reálném prostředí**

Název tématu (anglicky): Modelling of a Number of Transmissions Generated by
ACAS in a Real Environment

Zásady pro vypracování

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

- Popsání chování systému ACAS s ohledem na množství komunikace v pásmu 1030/1090 MHz.
- Pokročilé metody sledování/dotazování okolního provozu (Hybridní sledování, Whisper-Shout, ...), jejich užití a modelování v reálném prostředí.
- Vytvoření modelu k odhadu množství přenosů (množství dotazů a odpovědí) generovaných systémem ACAS/TCAS v reálném prostředí.
- Implementace ACAS modelu do celkového modelu popisující prostředí kooperativních přehledových systémů.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ICAO Annex 10 Volume IV Surveillance and Collision Avoidance Systems
ICAO Doc 9863 ACAS Manual
RTCA DO-185B MOPS for TCAS II

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

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

Datum odevzdání bakalářské práce: **25. srpna 2016**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



Jakub Nosek
jméno a podpis studenta

V Praze dne 25. října 2015

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Stanislavu Pleningerovi, PhD., za cenné připomínky a rady, které mi při tvorbě této práce poskytl. Dále pak Ing. Petrovi Jonášovi za konzultování bakalářské práce a poskytnuté informace.

Čestná prohlášení

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

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).

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.

V Praze dne: 25. srpna 2016

Podpis:

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MODELOVÁNÍ MNOŽSTVÍ PŘENOSŮ GENEROVANÝCH SYSTÉMEM ACAS V REÁLNÉM
PROSTŘEDÍ

bakalářská práce

srpen 2016

Jakub Nosek

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsání funkce sledování systémem ACAS se zaměřením na počet dotazů a odpovědí odeslaných na frekvenci 1030/1090 MHz za danou časovou jednotku. Postup sledování v jednotlivých módech je zobrazen pomocí vývojových diagramů, pomocí níž bude možné v budoucnu celý model chování počítačově namodelovat a poté naimplementovat do celkového modelu zatížení frekvence 1030/1090 MHz.

Klíčová slova:

ACAS/TCAS, odpovídač, 1030 MHz, 1090 MHz, mód C, mód S, hybridní sledování

Abstract

The aim of this Bachelor Thesis is to describe a function of ACAS surveillance focused on a number of interrogations transmitted on 1030/1090 MHz frequency per given time. The process of surveillance in different modes is shown with help of block diagrams which will be used in the future projects to model the described behavior.

Key terms:

ACAS/TCAS, transponder, 1030 MHz, 1090MHz, mode C, mode S, hybrid surveillance

Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých zkratek.....	8
1 Úvod.....	10
2 Sledování systémem ACAS	11
3 Sledování v módu C.....	12
3.1 Dotaz	12
3.2 Odpověď.....	13
3.3 Průběh sledování.....	14
3.3.1 Zahájení sledování	14
3.3.2 Průběh nominálního sledování	15
3.3.3 Sledování letadel nacházejících se na zemi	16
3.3.4 Perioda vysílání.....	16
3.3.5 Překrývání odpovědí	16
3.3.5.1 Whisper Shout	17
3.3.5.2 Směrové antény.....	18
3.3.6 Znázornění průběhu sledování pomocí diagramu	19
4 Sledování v módu S.....	22
4.1 Dotaz	22
4.2 Odpověď.....	23
4.3 Zprávy generované systémem ACAS.....	24
4.3.1 Formáty zpráv	24
4.3.2 Pole zpráv	26
4.4 Squitter zprávy	28
4.4.1 Acquisition squitter	28
4.4.2 Extended squitter	29
4.5 Monitorování okolního provozu	29
4.6 Vysílání informace o aktivním RA.....	30
4.7 Průběh sledování s využitím AS.....	30
4.7.1 Zahájení sledování	31
4.7.2 Nominální sledování.....	32
4.7.3 Sledování letadel nacházejících se na zemi	33
4.7.4 Znázornění průběhu sledování	33
4.7.5 Perioda vysílání.....	34
4.7.6 Znázornění průběhu sledování pomocí diagramu	36
4.8 Průběh sledování s využitím ES.....	39
4.8.1 Zahájení sledování	39
4.8.2 Průběh sledování	40
4.8.3 Zprávy DF=17 (ES)	41
4.8.4 Ověřovací zprávy	42
4.8.5 Znázornění průběhu pasivního sledování pomocí diagramu.....	43
5 Model	46
5.1 Konkrétní příklad modelové situace	46

5.2 Výsledky	48
6 Závěr	51
Použité zdroje informací	52
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek.....	54
Seznam příloh	55

Seznam použitých zkratk

AA	Address, Announced	Pole pro oznámení adresy
AC	Altitude Code	Kód výšky
ACAS	Airborne Collision Avoidance System	Palubní protisrážkový systém
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	Automatické závislé sledování-vysílání
AGL	Above Ground Level	Výška nad zemí
AQ	Acquisition, Special	Akviziční pole
AS	Acquisition Squitter	Akviziční squitter
CA	Capability	Způsobilost odpovídače
DF	Downlink Format	Formát odpovědi
ES	Extended Squitter	Rozšířený squitter
FS	Flight Status	Status letu
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální navigační družicový systém
ME	Message Extended Squitter	Extended Squitter zpráva
MTL	Minimum Triggering Level	Minimální úroveň intenzity signálu pro jeho přijetí odpovídačem
MU	Message, Comm-U	Zpráva Comm-U
MV	Message, Comm-V	Zpráva Comm-V
NA	Not Available	Není dostupný(á)
NM	Nautical Mile	Námořní míle
PI	Parity Field	Parity pole

RA	Resolution Advisory	Doporučení úhybného manévru
RI	Air-to-Air Reply Information	Informační odpověď vzduch-vzduch
RL	Reply Length	Délka odpovědi
SL	Sensitivity Level	Úroveň citlivosti
SSR	Secondary Surveillance Radar	Sekundární přehledový radar
TA	Traffic Advisory	Výstraha o provozu
TC	Type Code	Typový kód
TCAS	Traffic Collision Avoidance System	Palubní protisrážkový systém
UF	Uplink Format	Formát dotazu
VS	Vertical Status	Vertikální status

1 Úvod

Letecká doprava je druhem dopravy, jejíž objem má dlouhodobě rostoucí tendenci a na jejíž bezpečnost jsou kladeny vysoké nároky. Z tohoto důvodu je důležité, aby měli řidiči letového provozu, ale také samotná letadla a jejich posádky, neustále aktualizované informace o poloze letadel v jejich blízkosti. Řidiči tyto informace využívají pro poskytování letových provozních služeb a letadla a jejich posádky pro zvýšení situačního povědomí.

Všechna patřičně vybavená letadla využívají pro komunikaci s pozemními sekundárními radary, stejně jako pro komunikaci s letadly v okolí, frekvenční pásmo 1030/1090 MHz. S rostoucím objemem letecké dopravy však hrozí přetížení tohoto pásma a díky tomu i ztráta přehledových dat, která by mohla v krajních případech způsobit leteckou katastrofu.

Jedním ze systémů, který pro komunikaci a sledování okolního provozu využívá frekvenční pásmo 1030/1090 MHz, je ACAS. Jedná se o systém, který sleduje okolní provoz a v případě nebezpečného sblížení s letadlem v okolí posádku o takové skutečnosti nejdříve informuje a v pokročilé fázi konfliktu i vypočítává a navrhuje úhybné manévry pro bezpečné vyhnutí letadel a zamezení srážky. Při sledování okolního provozu je tedy zapotřebí mít neustále aktualizované polohové informace přijaté od okolních letadel. To je umožněno odesláním dotazů a následným přijímáním odpovědí, ve kterých jsou polohové informace zakódovány. Typ takových dotazů a odpovědí, které jsou generovány odpovídáčem SSR a systémem ACAS, závisí na módu, ve kterém daný odpovídáč pracuje.

V současnosti se stále více využívá takzvaného hybridního sledování, které pro sledování okolního provozu využívá informace získané pomocí GNSS a ty následně pomocí ADS-B vysílá do svého okolí, aniž by bylo letadlo dotazováno. Díky tomu lze částečně snížit zátěž pásma 1030/1090 MHz.

Cílem této práce je podat podrobný popis postupu dotazování a odpovídání v jednotlivých módech a zjistit periodu odesílání jednotlivých dotazů a odpovědí tak, aby se chování systému dalo na základě této práce počítačově namodelovat. Výsledný model bude poté součástí celkového modelu zatížení frekvenčního pásma 1030/1090 MHz.

2 Sledování systémem ACAS

Pro sledování okolního provozu a v některých případech i varování pilotů o blízké hrozbě je zapotřebí, aby bylo letadlo vybaveno systémem ACAS a odpovídačem. Tyto dvě, do jisté míry samostatné a nezávislé jednotky, společně umožňují sledovat provoz v okolí vlastního letadla.

Odpovídač je zařízení, které dokáže odpovídat na dotazy pozemních radarů, nebo okolních letadel. Podle formátů zpráv, které dokážou přijímat a odesílat, říkáme, že odpovídače pracují v několika módech. Módy, využívané odpovídačem, ale i systémem ACAS pro sledování okolního provozu jsou:

- ✗ mód C,
- ✗ mód S.

Rozdíly mezi těmito módy a jejich funkce jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

ACAS je systém, který dokáže okolní letadla dotazovat, na tyto dotazy přijímat odpovědi a ty poté využít pro stanovení polohy cíle. Součástí systému ACAS jsou antény, které jsou popsány v kapitole o sledování v módu C, a výpočetní jednotka, která na základě přijatých odpovědí dokáže propočítávat polohy sledovaných letadel.

Odpovídač a ACAS jsou navrženy tak, aby se navzájem potlačovaly, pokud jeden z nich vysílá dotazy/odpovědi.

V současné době existují 3 verze systému ACAS:

- ✗ ACAS I,
- ✗ ACAS II,
- ✗ ACAS III (navrhuje úhybné manévry ve vertikálním i horizontálním směru, zatím však nedošlo k jeho implementaci).

Jelikož je v současné době téměř výhradně používán ACAS II, bude se tato práce věnovat pouze popisu sledování touto verzí systému. V této souvislosti je tak třeba zmínit, že ACAS II funguje pouze v případě, že je letadlo vybaveno odpovídačem pracujícím v módu S. Pokud je letadlo vybaveno starším typem odpovídače, poté nemá ACAS II na palubě a okolní letadla v tom případě nedotazuje. Dalším důležitým faktem je, že je systém ACAS II schopen vydávat úhybné manévry pouze ve vertikálním směru. Z toho důvodu je případná informace o azimutu letadla pouze informativní a při sledování slouží pouze pro informování pilota o směru, ze kterého se narušitel přibližuje. Při navrhování úhybných manévrů není tato informace brána v potaz.

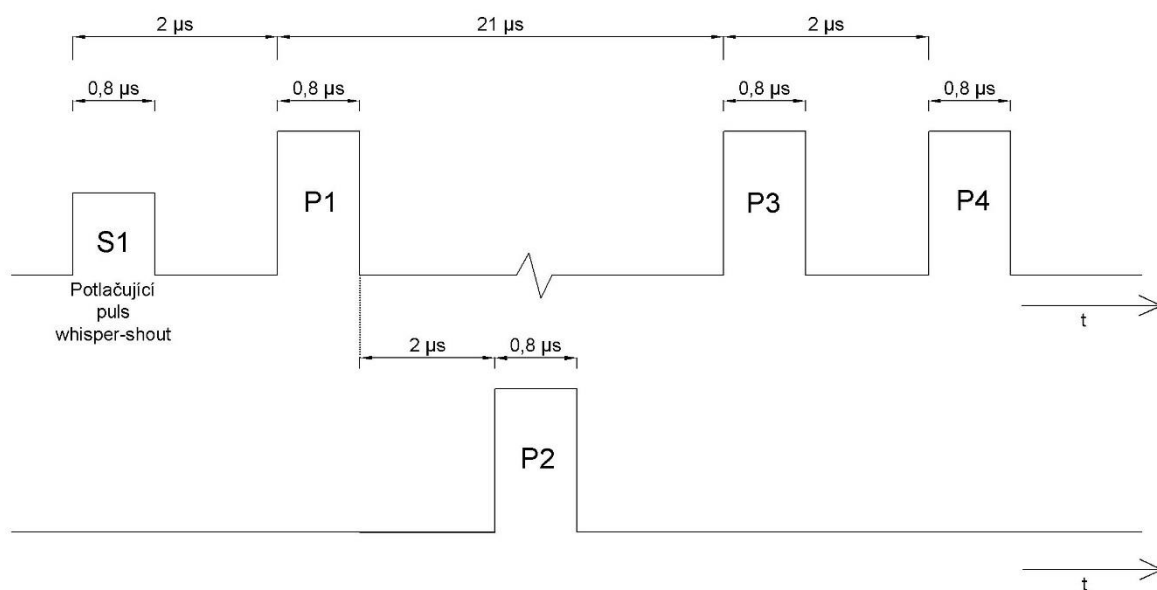
3 Sledování v módu C

Pokud je letadlo vybaveno starším typem odpovídače, pracujícím pouze v módu C, nemá takové letadlo na palubě systém ACAS II. Z toho důvodu nemůže dotazovat okolní letadla, sledovat jejich polohu a vydávat upozornění před hrozící kolizí. Takové letadlo pomocí odpovídače pouze odpovídá na dotazy v módu C vysílané okolními letadly, která jsou vybavená novějším odpovídačem umožňujícím pracovat v módu C i S (letadla s odpovídačem pracujícím v módu S mají na palubě ACAS II a jsou tak schopna dotazovat okolní provoz dotazy v módu S i v módu C).

Dotazy a odpovědi v módu C jsou na rozdíl od těch v módu S neadresné. To znamená, že na ně odpovídají všechna letadla v okolí, která mají příslušné vybavení.

3.1 Dotaz

Jednotlivé módy dotazů se od sebe liší počtem pulsů, délkou pulsů a vzdálenostmi mezi nimi. Dotaz, využívaný systémem ACAS pro dotazování v módu C (odesílaný na frekvenci 1030 MHz) se vyznačuje čtyřmi pulsy - P1, P2, P3 a P4. Těmto pulsům předchází potlačující puls S1, který se využívá při dotazování pokročilou metodu dotazování zvanou „Whisper-Shout“. Tato metoda dotazování je podrobně popsána v jedné z následujících kapitol. Puls P4 slouží k tomu, aby na tento dotaz neodpovídala letadla vybavená odpovídačem pracujícím v módu S. Pokud takové letadlo přijme tento dotaz, podle délky pulsu P4 si vyhodnotí, že odpověď neodešle a odešle ji až na případný adresný dotaz v módu S. Na dotaz v módu C tedy odpovídají pouze letadla vybavená starším typem odpovídače pracujícím pouze v módu C.



Obrázek 1 Znárodnění pulsů dotazu využívaného systémem ACAS pro dotazování v módu C

Délka všech pulsů dotazu v módu C je 0,8 μ s. Vzdálenost mezi náběžnou hranou pulsu P1 a náběžnou hranou pulsu P3 je 21 μ s, což je také vzdálenost, díky níž je dotaz v módu C jednoznačně identifikován odpovídačem. Vzdálenosti mezi náběžnými hranami pulsů S1 a P1 a mezi náběžnými hranami pulsů P3 a P4 jsou shodně 2 μ s.

Puls P2, který je vysílán jinou anténní vyzařovací charakteristikou, nežli ostatní zmiňované pulsy, slouží pro potlačení příjmu dotazů od postranních laloků antény při dotazování pozemním SSR radarem. Pokud je dotaz SSR radarem odeslán z hlavního laloku antény, mají pulsy P1 a P3 větší amplitudu než puls P2 a odpovídač takový dotaz přijme (pulsy P1 a P3 musí mít amplitudu větší než je amplituda pulsu P2 alespoň o 9 dB). Pokud je dotaz přijat postranními laloky, větší amplitudu má puls P2 a dotaz v tomto případě nebude odpovídačem akceptován. Jednotlivé pulsy dotazu v módu C jsou znázorněny na Obrázku 1 a časové vzdálenosti (v mikrosekundách) v Tabulce 1. [1] [6]

Tabulka 1 Časové vzdálenosti pulsů dotazu v módu C

Puls	Délka pulsu	Tolerance	Doba náběhu	Doba doznění
S1, P1, P2, P3, P4	0,8	$\pm 0,05$	0,05-0,1	0,05-0,2

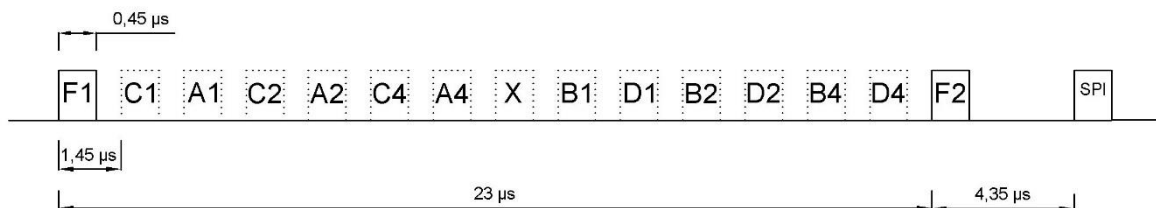
3.2 Odpověď

Odpověď v módu C (odesílaná na frekvenci 1090 MHz) sestává z 2 rámujičích pulsů F1 a F2, jejichž náběžné hrany jsou od sebe vzdáleny 23 μ s. Mezi pulsy F1 a F2 jsou poté umístěny jednotlivé datové pulsy. Náběžná hrana prvního datového pulsu je od náběžné hrany rámujičího pulsu F1 vzdálena 1,45 μ s, což je zároveň také vzdálenost náběžných hran jednotlivých datových pulsů. Délka všech pulsů je 0,45 μ s. Logická jednička je v odpovědi znázorněna přítomností pulsu, logická nula vynecháním pulsu. Jednotlivé pulsy odpovědi v módu C jsou znázorněny na Obrázku 2 a časové vzdálenosti (v mikrosekundách) v Tabulce 2. [1] [6]

Tabulka 2 Časové vzdálenosti pulsů odpovědi v módu C

Puls	Délka pulsu	Tolerance	Doba náběhu	Doba doznění
Všechny zmíněné	0,45	0,1 ¹	0,05-0,1	0,05-0,2

¹ Tolerance 0,1 μ s se vztahuje ke vzdálenosti mezi náběžnou hranou každého datového pulsu a náběžnou hranou pulsu F1. Tolerance vzdálenosti mezi jednotlivými datovými pulsy je 0,15 μ s.



Obrázek 2 Znáznornění pulsů odpovědi v módu C

3.3 Průběh sledování

Dotazy v módu C jsou formátu „Mode C Only All Call“, což znamená, že nejsou adresné (neobsahují adresu odpovídače letadla, pro které je dotaz určen) a tak na ně odpovídají všechna letadla v okolí, která dotaz přijmou.

Odpověď v módu C obsahuje pouze jedinou informaci a tou je nadmořská výška letadla. Neobsahuje tedy kód odpovídače letadla, díky kterému by bylo možné letadlo identifikovat stejně, jako je tomu v případě sledování v módu S.

Vzdálenost sledovaného letadla (letadla narušitele) se určí na základě výpočtu pomocí známé informace o čase a rychlosti šíření signálu. Čas se určí tak, že se změří doba trvání od odeslání dotazu k přijetí odpovědi. Rychlost signálu je v tomto případě známa a je přibližně rovna rychlosti šíření světla.

Azimut letadla se přibližně určí pomocí vícesegmentové antény. Jelikož je však ACAS II schopen navrhovat úhybné manévry pouze ve vertikálním směru, jsou pro tyto účely nejdůležitější informace o nadmořské výšce a vzdálenosti letadla narušitele.

3.3.1 Zahájení sledování

Ještě před zahájením nominálního sledování daného cíle (v pravidelných intervalech), ACAS II nejdříve určuje a ověřuje počáteční polohu tohoto cíle během takzvaného počátečního určování polohy, při kterém musí být splněny následující podmínky.

- A. Vlastní (dotazující) letadlo musí na své dotazy přijmout 3 odpovědi ve 3 sledovacích intervalech určených pro přijetí odpovědí, tzn. tři odpovědi během tří sekund a:
 - ✗ tyto odpovědi nesmí korelovat s již ustanovenými cíli, které jsou již sledovány,
 - ✗ rychlost sblížování vlastního letadla a letadla narušitele, odvozená ze dvou posledních odpovědí, je menší než 1200 uzlů, [1]
 - ✗ vzdálenost cíle vypočtená z příjmu první (nejstarší) odpovědi, odpovídá výše zmíněné rychlosti sblížování (vzdálenost cíle určená na základě příjmu první odpovědi musí odpovídat vzdálenosti, kterou určí výpočetní jednotka systému ACAS

na základě rychlosti sblížení obou letadel odvozené z přijetí dvou posledních odpovědí), [1]

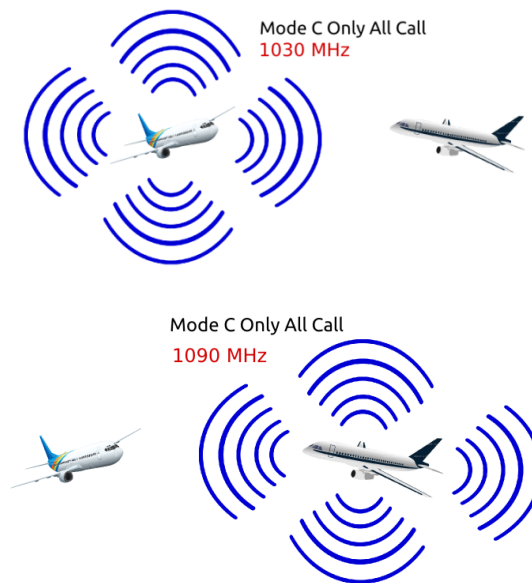
- ✗ bity, které v těchto odpovědích udávají nadmořskou výšku letadla, jsou souvztažné (to znamená, že nadmořská výška udávaná v jednotlivých odpovědích musí odpovídat nadmořské výšce, kterou určí výpočetní jednotka systému ACAS – výpočetní jednotka systému ACAS si po přijetí každé odpovědi určí předpokládanou nadmořskou výšku letadla narušitele, která by měla přibližně odpovídat nadmořské výšce tohoto letadla udávané v následující odpovědi).
- B. Odpověď na čtvrtý dotaz je přijata během 5 sledovacích intervalů, tzn. během 5 sekund. Nadmořská výška udávaná v této odpovědi se musí nacházet v intervalu ± 200 ft od předpokládané nadmořské výšky, kterou systém ACAS určí logickým výpočtem při uvažování předchozích odpovědí (výpočetní jednotka systému ACAS si po přijetí každé odpovědi určí předpokládanou polohu letadla narušitele, která by měla přibližně odpovídat poloze tohoto letadla udávané v následující odpovědi). [1]
- C. Nadmořská výška sledovaného letadla (narušitele) udávaná ve všech čtyřech výše zmíněných odpovědích leží v intervalu ± 10000 ft vzhledem k nadmořské výšce vlastního letadla. [1]

3.3.2 Průběh nominálního sledování

Pokud má již ACAS II určený validní cíl (na základě přijetí čtyř odpovědí zmíněných v předchozí kapitole a splnění všech podmínek), dotazuje tento cíl za účelem pravidelné aktualizace jeho polohy nominálně frekvencí jedenkrát za sekundu a to opět dotazy ve formátu „Mode C Only All Call“ (viz Obrázek 3).

Aby mohly být informace obsažené v odpovědích odesílaných narušitelem použity pro aktualizaci polohy tohoto letadla (narušitele), musí splňovat následující kritéria:

- ✗ vzdálenost letadel (vlastního letadla a letadla narušitele) určená změřením času od odeslání dotazu do přijetí odpovědi, musí ležet v intervalu, který systém ACAS určí logickým výpočtem na základě vzdáleností získaných z předešlých (již dříve přijatých) odpovědí, [1]
- ✗ nadmořská výška indikovaná v odpovědi musí ležet v intervalu ± 200 ft od předpokládané nadmořské výšky, kterou určí výpočetní jednotka systému ACAS na základě nadmořských výšek obsažených v předešlých (již dříve přijatých) odpovědích. [1]



Obrázek 3 Průběh sledování v módu C

3.3.3 Sledování letadel nacházejících se na zemi

Letadla, která jsou díky přijaté nulové nadmořské výšce v odpovědi identifikována jako cíle nacházející se na zemi, jsou dále sledována, ale informace obsažené v jejich odpovědích nejsou poskytovány výpočetní jednotce ACAS II. [1]

3.3.4 Perioda vysílání

Perioda dotazování (i odpovídání) letadel v módu C je znázorněna v Tabulce 3. [1]

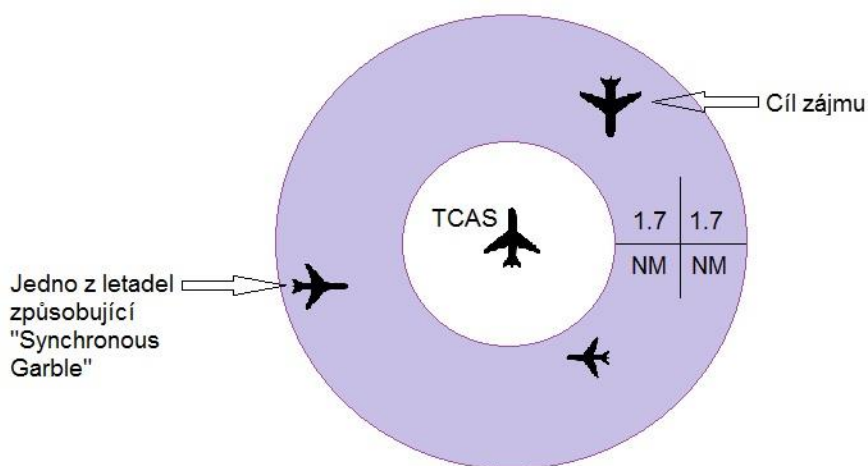
Tabulka 3 Perioda vysílání (mód C)

Zpráva	Perioda vysílání (s)	Průměr (s)	Frekvenční pásmo
Mode C Only All Call	1	1	1030/1090 MHz

3.3.5 Překrývání odpovědí

Překrývání odpovědí (tzv. Synchronous Garble) je problém, kdy na jeden dotaz odpoví více letadel, která se nacházejí v přibližně stejné vzdálenosti od dotazujícího letadla, a přijaté odpovědi se tudíž překryjí.

Podle Obrázku 4 se tedy odpovědi překryjí, pokud se dotazovaná letadla nachází od sebe ve vzdálenosti do 1,7 námořních mil. Tato vzdálenost je zvolena na základě uvažování délky odpovědi v módu C a její rychlosti šíření. Za čas, který odpovídá délce $\leq 1,7$ NM a rychlosti šíření signálu, se odpověď díky své délce nestačí odeslat celá a dotazující letadlo tak její část přijme současně s odpovědí od jiného letadla. [10]



Obrázek 4 Synchronous Garble

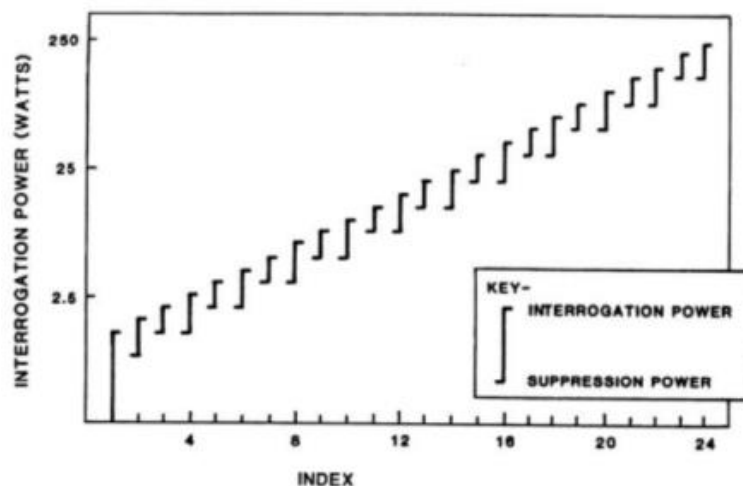
Překrývání odpovědí lze výrazně omezit použitím metody dotazování Whisper Shout společně s využitím směrových antén. Stupeň omezení závisí na hustotě provozu, sekvenci Whisper Shout dotazů a azimutech směrové antény.

3.3.5.1 Whisper Shout

Tato metoda je založená na sekvenci několika dotazů během jedné dotazovací periody (maximálně jedné sekundy). Každý z dotazů v sekvenci má odlišnou intenzitu pulsu S1 a P1, P3 a P4. Dotazy jsou odesílány v určeném pořadí od těch s nejnižší intenzitou až po ty s největší intenzitou. Využívá se tedy také rozdílné citlivosti příjmu jednotlivých odpovídačů. Maximální počet dotazů v jedné sekvenci je 24 (takový počet dotazů je však využíván minimálně) a podle standardu musí jedna sekvence obsahovat alespoň šest dotazů. Minimální čas mezi jednotlivými dotazy v sekvenci musí být 1 milisekunda, avšak všechny dotazy se musí stihnout odeslat v jedné dotazovací periodě. [1]

Každý ze sekvence dotazů (kromě prvního dotazu) musí obsahovat puls S1, který se v odpovědi nachází 2 μ s před pulsem P1 a má nižší intenzitu (viz Obrázek 1). Puls S1 slouží k potlačení odpovědí od letadel, která již v dané dotazovací periodě odpověděla. Intenzita všech pulsů se s každým dalším dotazem v sekvenci zvyšuje. [1]

Každé letadlo přijímá pouze jeden až dva dotazy v jedné sekvenci. Letadla, která jsou blíže k dotazujícímu letadlu, přijímají dotazy s nižší intenzitou, zatímco ta vzdálenější přijímají dotazy o vyšší intenzitě (dotazy o nižší intenzitě se k nim nedostanou). Pokud dané letadlo přijme dotaz o určité intenzitě, další dotaz, který má vyšší intenzitu, již nepřijme, jelikož jeho příjem bude potlačen pulsem S1, který bude mít vyšší intenzitu než předcházející dotaz, který toto letadlo přijalo. První dotaz neobsahuje puls S1 z toho důvodu, aby bylo zajištěno, že v dané dotazovací periodě odpoví alespoň jedno letadlo v okolí.



Obrázek 5 Whisper Shout sekvence [10]

Sekvence dotazů metody Whisper Shout je zobrazena na Obrázku 5. Jedná se o sekvenci 24 dotazů, tedy maximálního počtu dotazů, který může být během jedné dotazovací periody odeslán. Na obrázku lze vidět, že se s každým dalším dotazem zvyšuje intenzita jak potlačujícího pulsu S1, tak i ostatních pulsů určených pro dotaz. Intenzita potlačujícího pulsu dosahuje vždy stejné nebo vyšší hodnoty než intenzita dotazu, který byl v sekvenci odeslán před tímto potlačujícím pulsem a jemu předcházejícím dotazem. To je z toho důvodu, aby každé letadlo odpovědělo maximálně na 2 dotazy.

3.3.5.2 Směrové antény

Další metodou, která se používá pro zamezení překrývání odpovědí, společně s Whisper Shout dotazováním, je metoda dotazování pomocí směrových antén.

Součástí systému ACAS II jsou dvě antény, z nichž jedna je směrová a druhá všesměrová. Směrová anténa se nachází nahoře, zatímco všesměrová dole na trupu letadla. [1]

Směrová anténa umožňuje vysílat signál ve čtyřech směrech- dopředu, dozadu, doprava a doleva a tudíž se využívá při dotazování, zejména pak v módu C (při dotazování všesměrovou anténou může díky jejímu umístění dole na trupu letadla docházet k odrazům signálu od země a tudíž vytváření falešných dotazů). V žádném případě však nesmějí být dotazy ani odpovědi odesílány oběma anténami najednou. Odpověď na dotaz je přijímána anténou, která dotaz odeslala.

Díky vysílání signálu směrově lze snížit pravděpodobnost, že na dotaz v módu C odpoví letadla nacházející se přibližně ve stejné vzdálenosti od dotazujícího letadla a jejich odpovědi se překryjí. Odpovědi se v tomto případě překryjí, pouze pokud se letadla budou nacházet ve stejném kvadrantu směrové antény. Tomu lze však zabránit, nebo alespoň snížit pravděpodobnost, že se tak stane, pokud jsou letadla dotazována metodou Whisper Shout.

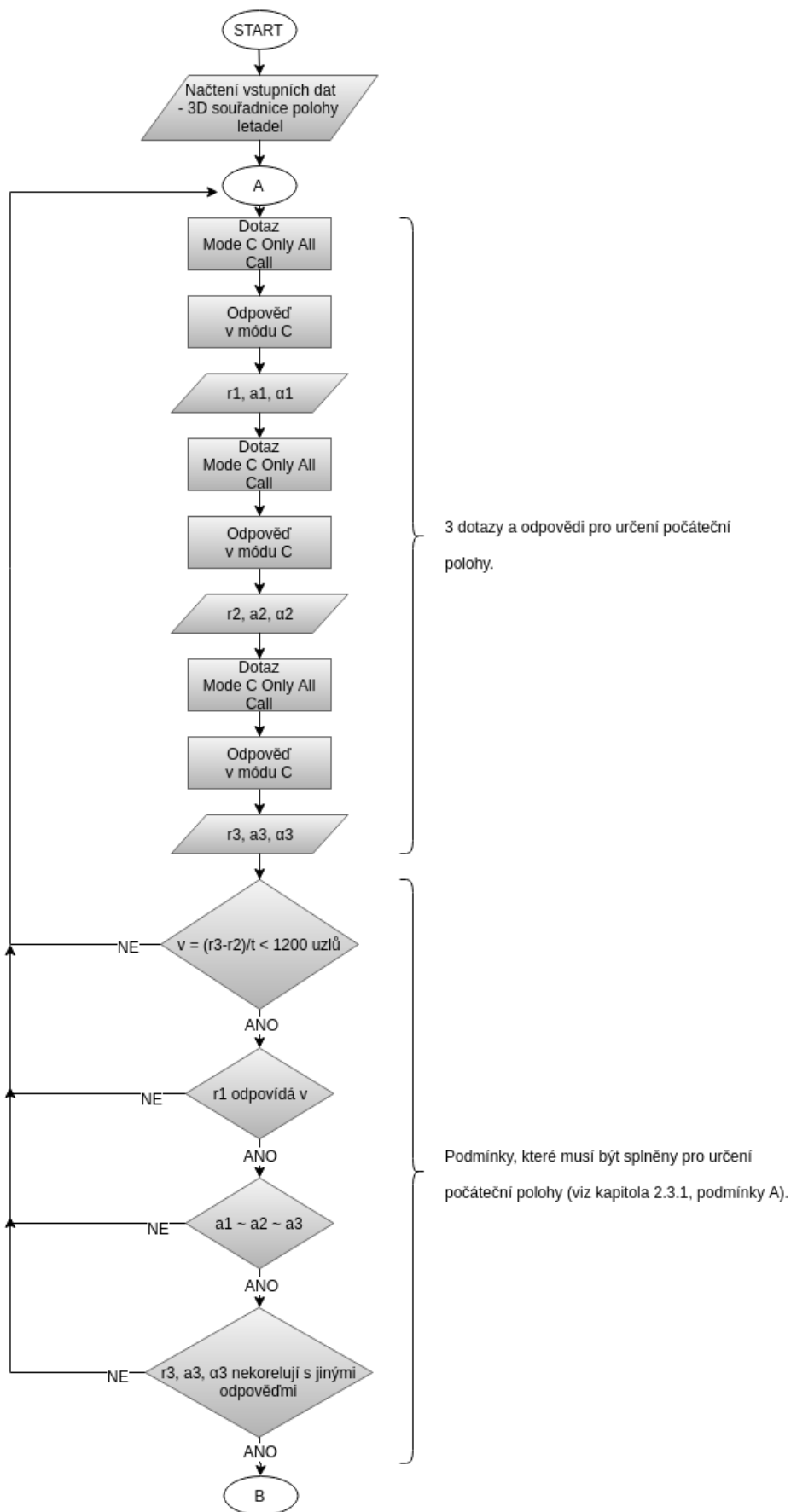
3.3.6 Znázornění průběhu sledování pomocí diagramu

Průběh sledování v módu C je pomocí diagramů zobrazen na Obrázcích 6 a 7. Jedná se o průběh komunikace mezi dvěma letadly, z nichž jedno je vlastní letadlo a druhé je letadlo narušitel. Sekvence dotazů a odpovědí a jednotlivé podmínky v diagramu odpovídají podrobnému popisu v předešlých kapitolách.

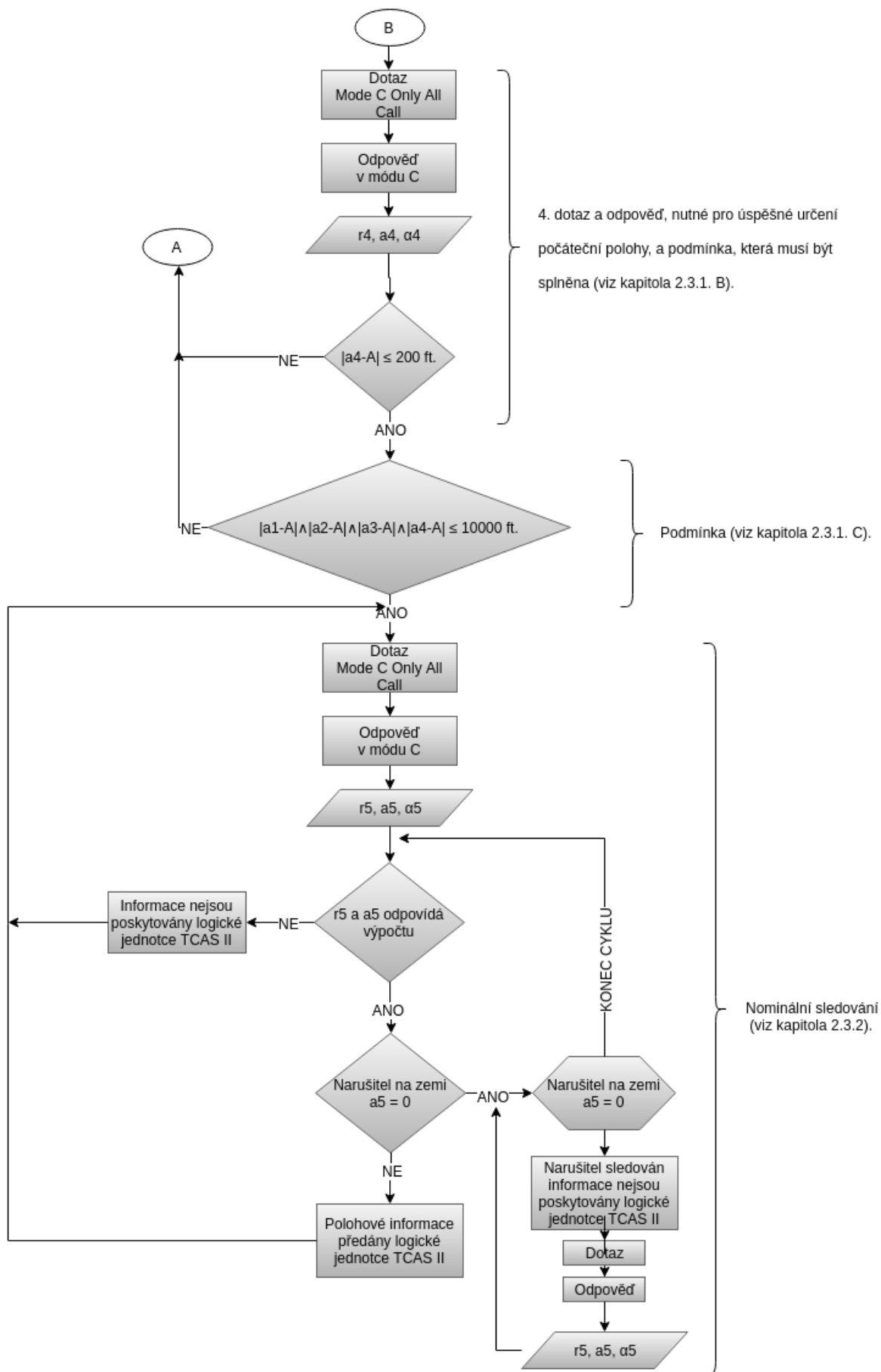
Pro přehlednost je bráno v úvahu pouze sledování jedním letadlem (vlastním letadlem), zatímco funkce sledování druhým letadlem (narušitelem) je zanedbána. Pro větší přehlednost diagramu je také předpokládáno, že na každý dotaz vždy vlastní letadlo obdrží odpověď a daný dotaz tedy není nutné opakovat.

Význam jednotlivých veličin v diagramu je následující:

- ✗ r = vzdálenost vlastního letadla od letadla narušitele,
- ✗ a = nadmořská výška letadla narušitele,
- ✗ α = azimut letadla narušitele,
- ✗ t = čas,
- ✗ v = rychlost sblížení vlastního letadla a letadla narušitele,
- ✗ A = nadmořská výška vlastního letadla.



Obrázek 6 Diagram: Počáteční určení polohy v módu C



Obrázek 7 Diagram: Nominální sledování v módu C

4 Sledování v módu S

Letadlo vybavené odpovídačem pracujícím v módu S dotazuje okolní letadla za účelem určení jejich polohy dotazy v módu C (které byly popsány v předešlé kapitole) i dotazy v módu S. Na dotazy v módu C mu odpovídají pouze letadla vybavená starším odpovídačem pracujícím v módu C, zatímco na dotazy v módu S odpovídají letadla vybavená novějším typem odpovídače pracujícím v módu S.

Dotazy a odpovědi v módu S jsou adresné a tudíž může každou zprávu přijmout pouze letadlo, pro které je dotaz určen. Díky tomu lze pro každé jednotlivé letadlo měnit periodu dotazování v závislosti na jeho poloze (letadla narušitelé, která se nacházejí v blízkosti vlastního letadla, jsou dotazována častěji, než letadla, která jsou dostatečně vzdálená), čímž lze značně snížit zatížení pásma 1030/1090 MHz.

4.1 Dotaz

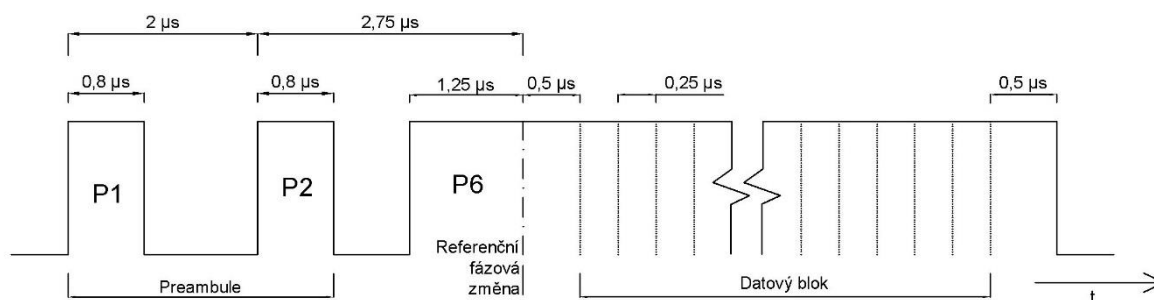
Dotazy v módu S (odesílané na frekvenci 1030 MHz) se skládají z preambule a datového pulsu, ve kterém je pomocí binární fázové modulace kódována datová zpráva o velikosti 56 nebo 112 bitů (velikost závisí na formátu zprávy).

Preambule se skládá z 2 pulsů (P1 a P2) o délce 0,8 μs , jejichž náběžné hrany jsou od sebe vzdáleny 2 μs . Pulsy P1 a P2 jsou vysílány stejnou anténou a mají stejnou amplitudu. Díky vyhodnocení pulsu P2 na tento dotaz neodpovídají letadla vybavená mód C odpovídači.

Po preambuli následuje puls P6, který nese datovou zprávu. Tento datový puls může mít velikost 16,25 nebo 30,25 μs v závislosti na délce zprávy (16,25 μs odpovídá krátké zprávě o velikosti 56 bitů, zatímco 30,25 μs dlouhé zprávě o velikosti 112 bitů). 1,25 μs od náběžné hrany pulsu P6 se nachází referenční fázová změna, která slouží pro synchronizaci odpovídače. Ve vzdálenosti 0,5 μs od referenční fázové změny se již nachází samotný datový blok. Každý jednotlivý bit má v pulsu velikost 0,25 μs . Pro rozeznání, zda bit obsahuje logickou jedničku nebo nulu slouží změna fáze o 180°. Logické jedničky pak odpovídá změna fáze o 180° a logické nule vynechaná fázová změna. Jednotlivé pulsy dotazu v módu S jsou znázorněny na Obrázku 8 a časové vzdálenosti (v mikrosekundách) v Tabulce 4. [1] [5]

Tabulka 4 Časové vzdálenosti pulsů dotazu v módu S

Puls	Délka pulsu	Tolerance délky	Doba náběhu	Doba doznění
P1, P2	0,8	±0,05	0,05-0,1	0,05-0,2
P6 (krátký)	16,25	±0,125	0,05-0,1	0,05-0,2
P6 (dlouhý)	30,25	±0,125	0,05-0,1	0,05-0,2



Obrázek 8 Znázornění pulsů dotazu v módu S

4.2 Odpověď

Odpověď v módu S (odesílaná na frekvenci 1090 MHz) se stejně jako dotaz v módu S skládá z preamble a datového bloku. Preamble, jejíž délka je 8 μs, obsahuje 4 pulsy (P1, P2, P3 a P4), každý o délce 0,5 μs. První a druhý a zároveň i třetí a čtvrtý puls jsou od sebe vzájemně vzdáleny 0,5 μs. Za preambulí následuje datový blok, jehož velikost může být buď 56, nebo 112 bitů, v závislosti na délce zprávy. Datový blok je rozdělen na jednotlivé intervaly o délce 1 μs, z nichž každý obsahuje puls o délce 0,5 μs. Každý interval lze tak vyplnit dvěma pulsy. Pokud je puls přenesen v první polovině intervalu, značí přenos logickou jedničku. Naopak pokud je puls přenesen ve druhé polovině intervalu, přenos značí logickou nulu. Jednotlivé pulsy odpovědi v módu S jsou znázorněny na Obrázku 9 a časové vzdálenosti (v mikrosekundách) v Tabulce 5. [1] [5]

Tabulka 5 Časové vzdálenosti pulsů odpovědi v módu S

Puls	Délka pulsu	Tolerance	Doba náběhu	Doba doznění
Všechny zmíněné	0,5 ²	0,05	0,05-0,1	0,05-0,2

² V případě spojení dvou pulsů v datovém bloku vznikne puls o délce 1 μs.



Obrázek 9 Znáznornění pulsů odpovědi v módu S

4.3 Zprávy generované systémem ACAS

4.3.1 Formáty zpráv

Zprávy určené pro sledování okolního provozu v módu S existují v různých formátech, lišících se účelem zprávy, svou velikostí a v neposlední řadě také informací, kterou nesou.

Vzestupné formáty mód S zpráv jsou následující:

- ✘ UF,
- ✘ DF.

UF je vzestupný formát zprávy určený pro přenos informací od vlastního letadla k narušiteli, zatímco DF je vzestupný formát zprávy, který slouží pro přenos informací od narušitele k vlastnímu letadlu. Zprávy UF jsou odesílány na frekvenci 1030 MHz, zprávy DF na frekvenci 1090 MHz.

Nejpoužívanější formáty zpráv využívané pro komunikaci mezi letadly (v některých případech i mezi letadly a pozemními sekundárními radary) vybavenými systémem ACAS II a zároveň nejdůležitější formáty zpráv pro účely této práce jsou uvedeny v Tabulce 6. [1] [3]

Tabulka 6 Formáty zpráv

Formát zprávy	Velikost	Popis, účel	Důležitá pole
DF=11	56 bitů	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Acquisition squitter- zpráva je samovolně vysílána a obsahuje unikátní kód odpovídače. ✘ Múd S all-call odpověď na dotaz sekundárního radaru. 	AA, PI, II, SI, CA Capability
DF=17	112 bitů	Extended squitter- zpráva je samovolně vysílána pomocí ADS-B a mimo jiné obsahuje unikátní kód odpovídače a informaci o poloze.	AA, ME, PI, CA Capability
DF=0	56 bitů	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Krátká acquisition odpověď (pole AQ=1), která obsahuje kód mód S odpovídače, informaci o nadmořské výšce letadla a informaci o tom, zda se letadlo nachází na zemi nebo ve vzduchu. ✘ Krátká odpověď (pole AQ=0) na dotaz UF=0 udávající nadmořskou výšku letadla. Dále obsahuje kód mód S odpovídače a informaci o tom, zda se letadlo nachází na zemi nebo ve vzduchu. 	VS, RI, SL, AC, AQ
UF=0	56 bitů	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Krátký acquisition dotaz (pole AQ=1) pro zjištění polohy letadla. ✘ Krátký dotaz (pole AQ=0) pro aktualizaci polohy letadla. 	AQ, RL

DF=16	112 bitů	Dlouhá odpověď na dotaz UF=16 udávající adresu mód S odpovídače, nadmořskou výšku letadla, informaci o tom, zda se letadlo nachází na zemi nebo ve vzduchu a koordinační zprávu v případě aktivní výstrahy RA.	VS, RI, AC, MV, SL
UF=16	112 bitů	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Dlouhý dotaz na nadmořskou výšku letadla obsahující koordinační zprávu v případě aktivní výstrahy RA. ✘ Zpráva odesílaná pro potřeby monitorování okolního provozu. ✘ Zpráva odesílaná pozemním stanovištím v případě aktivního RA. 	AQ, MU, RL
DF=4	56 bitů	Krátká odpověď na dotaz pozemního radaru, která může být přijata letadlem v okolí při pasivním monitorování zpráv.	AC, FS

4.3.2 Pole zpráv

Každá zpráva odesílaná v módu S obsahuje několik polí, která nesou určitou informaci a v závislosti na délce této informace mají přiřazenu určitou velikost. Všechny zprávy mají stejné následující 2 pole:

- ✘ pole udávající formát zprávy (UF nebo DF) a
- ✘ 24 bitové parity pole (sloužící ke kontrole parity).

Nejdůležitější pole a pole, která jsou důležitá pro účely této práce, jsou uvedena v Tabulce 7.

[1] [3]

Tabulka 7 Pole zpráv

Pole	Velikost	Popis, účel
AA	24 bitů	Obsahuje adresu mód S odpovídače.
AC	13 bitů	Obsahuje zakódovanou nadmořskou výšku letadla.
AQ	1 bit	Slouží k určení, zda se v případě zprávy UF=0 nebo UF=16 jedná o acquisition zprávu.
CA Capability	3 bity	Informace o typu (vybavenosti) odpovídače a informace o tom, zda je letadlo na zemi nebo ve vzduchu.
ME	56 bitů	Informace o poloze a identifikaci letadla.
MU	56 bitů	Udává informace pro koordinaci v případě aktivního RA a informaci o aktivním RA při vysílání speciálních RA zpráv letadlo-země.
MV	56 bitů	Odpověď na koordinační zprávy.
PI	24 bitů	Parity pole. Kontrola zprávy (kódu odpovídače).
VS	1 bit	Nese informaci o tom, zda je letadlo na zemi nebo ve vzduchu.
RI	4 bity	Nese informaci o tom, zda je letadlo vybaveno jednotkou ACAS a případně jaké verze. Je zde také zakódována maximální skutečná rychlost letadla, pokud je k dispozici.
RL	1 bit	Požadavek na odpověď ve specifickém formátu (DF=0 nebo DF=16).
SL	3 bity	Informace o zvolené úrovni citlivosti systému - „Sensitivity level“.
FS	3 bity	Informace o stavu letu (mimo jiné informace o tom, zda se letadlo nachází ve vzduchu nebo na zemi).
II	4 bity	Identifikační kód. V případě AS se pole rovná nule.

4.4 Squitter zprávy

Při sledování okolního provozu v módu S využívají letadla squitter zprávy. Jsou to odpovídačem automaticky odesílané zprávy do okolí, aniž by bylo letadlo dotazováno. V této souvislosti je třeba rozlišovat typ mód S odpovídače, kterým je dané letadlo vybaveno. Odpovídač může odesílat a přijímat tzv. acquisition (AS) nebo extended (ES) squitter. Zmíněné dva typy squitter zpráv se liší velikostí informace (množstvím bitů), kterou přenáší (viz Tabulka 6). AS odesílají všechna letadla vybavená odpovídačem pracujícím v módu S, zatímco ES je „nastavba“ ke klasickému mód S odpovídači potřebná pro vysílání ADS-B dat. V případě systému ACAS II se používá pro hybridní sledování, které je popsáno dále.

Letadlo může být tedy vybaveno buď pouze mód S odpovídačem schopným odesílat AS, nebo mód S odpovídačem schopným odesílat AS i ES (v takovém případě se odpovídač označuje 1090ES). V případě ES je třeba odpovídače ještě rozdělit na ty, které ES mohou pouze odesílat (v takovém případě mluvíme o odpovídači s funkcí ADS-B OUT) a odpovídače, které ES mohou odesílat i přijímat (ADS-B OUT i ADS-B IN). Není tedy možné, aby bylo letadlo vybaveno mód S odpovídačem schopným odesílat nebo přijímat pouze ES, bez možnosti odesílat i přijímat AS.

4.4.1 Acquisition squitter

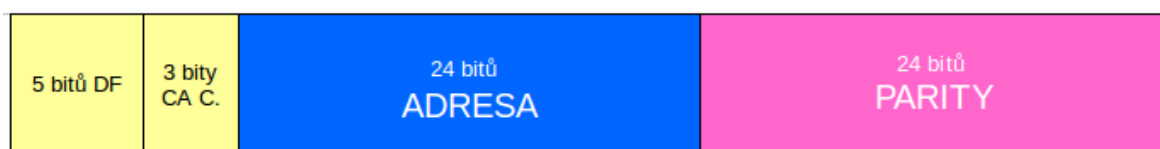
AS (DF=11) je zpráva, která je složena z 56 bitů, z nichž 8 bitů je použito pro pole CONTROL (skládající se z polí DF a CA Capability), 24 bitů pro pole ADRESA (AA) a dalších 24 bitů pro pole PARITY (PI). [1]

Pole CONTROL je složeno z polí DF (určuje formát zprávy) a CA Capability. Formát AS je vždy DF=11.

Pole ADRESA v sobě nese adresu mód S odpovídače.

Pole PARITY, které se nachází na konci zprávy, slouží pro kontrolu dat.

AS a pole, která jsou v něm obsažena, je zobrazen na Obrázku 10. [1]



Obrázek 10 Acquisition squitter

4.4.2 Extended squitter

ES (DF=17) je zpráva, která je složena ze 112 bitů. Pole CONTROL, ADRESA a PARITY jsou v ES stejná a slouží ke stejnému účelu jako v případě AS. ES však navíc obsahuje 56 bitové pole ADS-B ZPRÁVA. [1]

Formát zprávy se může lišit v závislosti na účelu letu a typu vysílání polohových informací zakódovaných v 56 bitovém poli ADS-B ZPRÁVA. Možné formáty zpráv jsou následující: DF=17 (ADS-B), DF=18 (TIS-B) a DF=19 (military - pro vojenské účely). V civilním letectví se však téměř výhradně využívá DF=17.

ES a pole, která jsou v něm obsažena, je zobrazen na Obrázku 11. [1]



Obrázek 11 Extended squitter

4.5 Monitorování okolního provozu

Každé letadlo, které se nachází v letové hladině FL180 a níže, a které je vybaveno systémem ACAS II, monitoruje okolní provoz (počítá množství letadel ve svém okolí) za účelem redukce počtu dotazů změnou intenzity vysílaného signálu. Omezení počtu a intenzity dotazů je tedy funkcí okolí letadla (okolního provozu). Monitorování probíhá tak, že každé letadlo jednou za 10 sekund vyše maximální možnou intenzitou zprávu UF=16, která indikuje, že je dané letadlo (odesílající zprávu) vybaveno systémem ACAS II. Okolní letadla tyto zprávy monitorují a v závislosti na jejich množství poté mění intenzitu vysílaného signálu. Čím více monitorovacích zpráv UF=16 letadlo přijme, tím více sníží intenzitu vysílaného signálu (zprávy odesílané tímto letadlem nezachytí vzdálenější letadla). Perioda vysílání zpráv a frekvenční pásmo, na kterém jsou zprávy odesílány, jsou znázorněny v Tabulce 8. [1] [4]

Zprávy UF=16 obsahují 24 bitovou adresu mód S odpovídače, díky které lze letadlo odesílající zprávu jednoznačně identifikovat. Díky této informaci a informaci o poloze letadla narušitele, která se získá nominálním sledováním (které bude vysvětleno dále), lze poté také určit přibližné rozmístění letadel ve vzdušném prostoru kolem vlastního letadla. Postup určení rozmístění letadel je však pro potřeby této práce nepodstatný a proto zde nebude dále popisován. [1]

Pokud je množství letadel v okolí na základě výše zmíněného postupu rovno nebo vyšší stanovenému limitu a vlastní letadlo se nachází níže než FL180, parametry dotazování v módu C i v módu S jsou upraveny následovně.

Mód C

Je snížena intenzita dotazů a zvýšen MTL během periody odposlouchávání zpráv.

Mód S

Také je snížena intenzita dotazů a zvýšen MTL během periody odposlouchávání zpráv.

Maximální povolený limit pro snížení intenzity dotazů pro každý lalok horní antény je 10 dB v případě dotazování v módu S a 7 dB v případě dotazování v módu C. [1]

Tabulka 8 Perioda monitorování okolního provozu

Zpráva	Perioda monitorování (s)	Frekvenční pásmo
UF=16	10	1030 MHz

4.6 Vysílání informace o aktivním RA

Každé letadlo vybavené systémem ACAS II vysílá v případě aktivní výstrahy RA tuto informaci pozemním radarům.

Informace o aktivním RA je standardně zakódována do odpovědí na dotazy pozemních sekundárních radarů. Kromě toho je tato informace také maximální intenzitou odesílána každých 8 sekund spodní anténou v tzv. RA zprávě (zpráva ve formátu UF=16). Zpráva kromě informace o aktivním RA, která je obsažena v poli MU, obsahuje i identifikační kód letadla (squawk) a nadmořskou výšku letadla. [1] [9]

Vysílání zprávy začíná ihned po vydání výstrahy RA, poté je zpráva periodicky vysílána každých 8 sekund. Po ukončení RA je ve zprávě obsažena informace o takové skutečnosti. Perioda vysílání zprávy a frekvenční pásmo, na kterém je vysílána, jsou znázorněny v Tabulce 9. [1] [9]

Tabulka 9 Perioda vysílání RA zprávy

Zpráva	Perioda vysílání (S)	Frekvenční pásmo
UF=16	8	1030 MHz

4.7 Průběh sledování s využitím AS

V této kapitole bude popsán postup sledování okolního provozu letadly, která nejsou vybavena ADS-B (odpovídač je schopen odesílat pouze krátké AS).

4.7.1 Zahájení sledování

Každé letadlo samovolně a pravidelně vysílá jednou za sekundu zprávy DF=11 (AS) na frekvenci 1090 MHz a letadla v okolí vybavená systémem ACAS tyto zprávy pasivně přijímají (zprávy DF=11 jsou tedy odesílány, aniž by bylo dané letadlo dotazováno). Vlastní letadlo, které AS pasivně přijme, se ze zprávy dozví kód odpovídače letadla, které AS odeslalo.

Po úspěšném přijetí AS zná vlastní letadlo adresu odpovídače sledovaného letadla (letadla, které AS odeslalo). Může tak již zahájit adresné dotazování tohoto letadla. Sledované letadlo je však již s velkou pravděpodobností dotazováno i jiným letadlem ve svém okolí nebo pozemním SSR radarem. Ještě před samotným dotazováním se tak vlastní letadlo, za účelem snížení počtu dotazů, snaží odpovědi narušitele na tyto dotazy zachytit. Pokud zprávy zachytí (zprávy typu DF=0 - odpověď jinému letadlu, nebo DF=4 - odpověď pozemnímu radaru), dozví se z nich mimo jiné informaci o nadmořské výšce letadla narušitele a informaci o tom, zda se letadlo narušitel nachází na zemi nebo ve vzduchu.

Pokud je vlastní letadlo v pasivním monitorování (odposlechu zpráv) neúspěšné (sledované letadlo zprávy DF=0 nebo DF=4 ještě žádnému jinému letadlu nebo pozemnímu radaru ve svém okolí neodesílá), zahajuje aktivní dotazování acquisition dotazem UF=0 na frekvenci 1030 MHz. Tento dotaz slouží pro počáteční určení polohy letadla. Sledované letadlo na tento dotaz odpovídá acquisition zprávou DF=0 na frekvenci 1090 MHz, ve které je zakódována nadmořská výška letadla a informace o tom, zda se letadlo nachází na zemi nebo ve vzduchu.

Pro rozeznání, zda jsou UF=0 a DF=0 klasickými zprávami, nebo zda se jedná o acquisition zprávy, slouží jednobitové pole AQ. Pokud se jedná o acquisition zprávy, pole AQ se rovná 1, pokud se o acquisition zprávy nejedná, pole AQ se rovná 0. Většinou je pro počáteční určení polohy odesílán pouze jeden acquisition dotaz, který je dostačující. Přesný počet acquisition dotazů však závisí na volbě konkrétního výrobce systému. [1]

Jestliže letadlo při prvotním dotazování úspěšně přijme 2 odpovědi (kterými může být klasická i acquisition odpověď), ve kterých se udávaná nadmořská výška neliší více než o 500 ft, a které obsahují správnou adresu mód S odpovídače, poté je nadmořská výška a vzdálenost považována za prokázanou a na řadu přichází pravidelné nominální dotazování cíle. [1]

Sledované letadlo není dále nominálně dotazováno tehdy, pokud vlastní letadlo aktivními dotazy zjistí, že se narušitel nachází ve vertikální vzdálenosti více než ± 10000 ft. Nadmořská výška letadel, která se nacházejí vně tohoto intervalu, musí být ale stále monitorována, aby mohla být včas identifikována v případě, že se již sledované letadlo dostane na hranice tohoto intervalu. Monitorována je buď pasivním poslechem zpráv DF=0, nebo (při absenci

těchto zpráv) aktivním dotazováním dotazy UF=0 každých 10 sekund. Naopak, pokud se letadlo nachází uvnitř tohoto intervalu, nazývá se „validní cíl“ a nominálně dotazováno je. [1]

4.7.2 Nominální sledování

Perioda nominálního dotazování, poté kdy má již vlastní letadlo určenou počáteční polohu letadla narušitele, se liší v závislosti na vzájemné poloze letadel následovně.

- ✗ Perioda dotazování je ROVNÁ 5 sekundám, pokud se sledované letadlo nachází ve FL180 a níže a pokud je hodnota TAU rovna 60 sekundám a více. [1] [10]
- ✗ V případě, že je cíl vyhodnocen jako hrozba (tj. hodnota TAU odpovídá spuštění TA nebo RA), přechází letadlo na dotazování frekvencí jednou za sekundu. Typ zpráv se v tomto případě mění na dlouhé zprávy UF=16 (respektive DF=16), které obsahují 56 bitové pole obsahující informace potřebné pro koordinaci RA. [1]
- ✗ Ve všech ostatních případech je základní perioda dotazování „validních cílů“ zprávami UF=0 ALESPON 5 sekund.

Pokud vlastní letadlo přijímá odpovědi od sledovaného letadla (narušitele), ve kterých však z nějakého důvodu není zahrnuta informace o nadmořské výšce, ale jinak tyto zprávy neobsahují chyby, mělo by i tak být toto letadlo dotazováno. [1]

Vzdálenost letadel se určuje stejně jako v případě dotazování v módu C na základě změření času, během kterého došlo k odeslání dotazu a přijetí odpovědi (předpokládáme, že známe rychlost šíření signálu, která přibližně odpovídá rychlosti světla). Pokud je na jeden dotaz přijato více odpovědí, v potaz je brána pouze ta odpověď, která udává nejkratší vzdálenost letadel. [1] [9] [10]

Pokud letadlo na svůj dotaz nedostane žádnou odpověď, dotaz opakuje. Celkový počet opakovaných dotazů v jednom dotazovacím cyklu nesmí být podle standardu více než 3 a více než 9 dotazů v 6 cyklech. [1]

První dotaz je odesílán horní anténou. Pokud letadlo na první dva dotazy odeslané horní anténou nedostane žádnou odpověď, následující dva dotazy jsou již odesílány spodní anténou. [1]

V případě, že letadlo nedostane odpověď ani po těchto 6 cyklech, dotazování je ukončeno, a to až do doby, kdy letadlo přijme dostatek AS zpráv, které již zaručují úspěšnost přijetí odpovědi na potencionální dotaz. [1]

Všechny informace o sledovaném letadle, které jsou získány sledováním, zůstávají po určitou stanovenou dobu uloženy, a pokud nejsou data během dané doby aktualizována, odpovídač je vymaže. Každý odpovídač by měl mít takovou paměť, aby byl schopen si uchovat alespoň 150 mód S adres. [1]

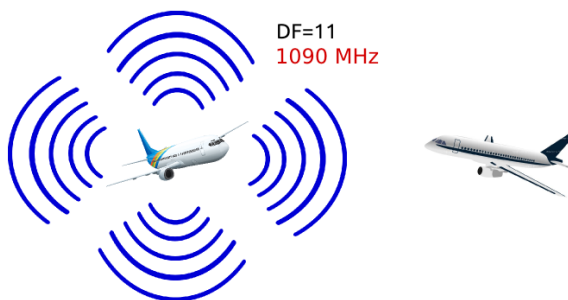
Po přijetí každé zprávy probíhá vyhledávání a korekce případných chyb, které by zpráva mohla obsahovat, tak aby se zabránilo nadbytečnému dotazování. Chybné zprávy, které obsahují samé jedničky, samé nuly nebo adresu odpovídače totožnou s adresou vlastního odpovídače, jsou vyřazeny.

4.7.3 Sledování letadel nacházejících se na zemi

Pokud je sledované letadlo identifikováno jako letadlo na zemi, to znamená, že se pole VS v odpovědích DF=0 rovná 1 a vlastní letadlo se nachází méně než 2000 ft (AGL) nad tímto letadlem, je toto letadlo monitorováno buď pasivním poslechem zpráv DF=0 nebo při absenci těchto zpráv nominálním aktivním dotazováním alespoň jednou za 5 sekund a to po celou dobu, kdy se cíl nachází na zemi nebo až do té doby, kdy přestane odesílat zprávy. [1]

4.7.4 Znázornění průběhu sledování

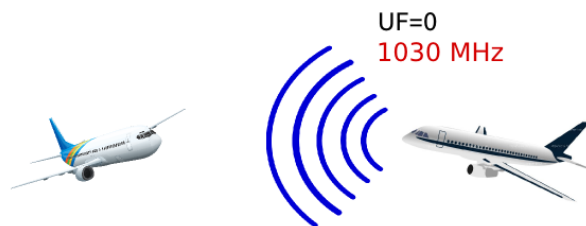
V následujícím příkladu průběhu sledování uvažujme 2 letadla (vlastní letadlo a letadlo narušitel) vybavená shodně odpovídačem pracujícím v módu S. V první fázi sledování odesílá letadlo narušitel jednou za sekundu DF=11 (AS) na frekvenci 1090 MHz (viz Obrázek 12). Tato zpráva je vysílána odpovídačem a obsahuje mimo jiné pole AA (adresa mód S odpovídače).



Obrázek 12 První fáze dotazování- vysílání DF=11

Vlastní letadlo zprávu přijme a přečte si adresu odpovídače. Nyní, když zná adresu odpovídače letadla narušitele, odešle tomuto letadlu adresný acquisition dotaz UF=0 na frekvenci 1030 MHz (viz Obrázek 13), ve kterém je zakódována daná adresa odpovídače a mimo jiné také následující pole:

- ✘ AQ=1,
- ✘ RL=0 (značí, že letadlo na tento dotaz vyžaduje krátkou odpověď DF=0).



Obrázek 13 Druhá fáze dotazování- odeslání UF=0

Po přijetí dotazu UF=0, odpovídá narušitel krátkou odpovědí DF=0 na frekvenci 1090 MHz (viz Obrázek 14). V této odpovědi je zahrnuta nadmořská výška letadla a také jeho adresa mód S odpovídače. Dále jsou v odpovědi obsaženy mimo jiné i následující pole:

- ✕ AQ=1,
- ✕ SL (udává tzv. „sensitivity level“),
- ✕ RI (v tomto případě jsou použity pouze pole 8-15).



Obrázek 14 Třetí fáze dotazování- odeslání odpovědi DF=0

Po přijetí acquisition odpovědi zahajuje vlastní letadlo nominální dotazování narušitele dotazy UF=0, ve kterých se již pole AQ=0. Narušitel na tyto dotazy odpovídá zprávami DF=0 (ve kterých se pole AQ též rovná nule).

4.7.5 Perioda vysílání

Perioda vysílání jednotlivých typů zpráv v případě letadla vybaveného odpovídačem pracujícím v módu S je znázorněna v Tabulce 10. [1] [9] [10]

Tabulka 10 Perioda vysílání zpráv (mód S)

Zpráva	Perioda vysílání (s)	Průměr (s)	Frekvenční pásmo
DF=11	0,8 – 1,2	1	1090 MHz
UF=0	Závislá na pozici cíle vůči vlastnímu letadlu. Periody dotazování za daných podmínek jsou uvedeny v Tabulce 11.	-	1030 MHz
DF=0	Periody sledování za daných podmínek jsou uvedeny v Tabulce 11.	-	1090 MHz
UF=16	0,8 – 1,2	1	1030 MHz
DF=16	0,8 – 1,2	1	1090 MHz

Tabulka 11 Perioda vysílání zpráv UF/DF=0

Perioda vysílání (s)	Podmínka
Letadlo není dotazováno	Cíl se nachází na zemi a vlastní letadlo více než 2000 ft nad zemí.
10	Cíl není validním cílem. To znamená, že se nachází vně intervalu ± 10000 ft od vlastního letadla.
1	Cíl je vyhodnocen jako hrozba. To znamená, že hodnota TAU splňuje podmínky pro spuštění TA nebo RA.
= 5	Cíl se nachází ve FL180 nebo níže a hodnota TAU je rovna nebo vyšší než 60 sekund.
≤ 5	Ve všech ostatních případech.

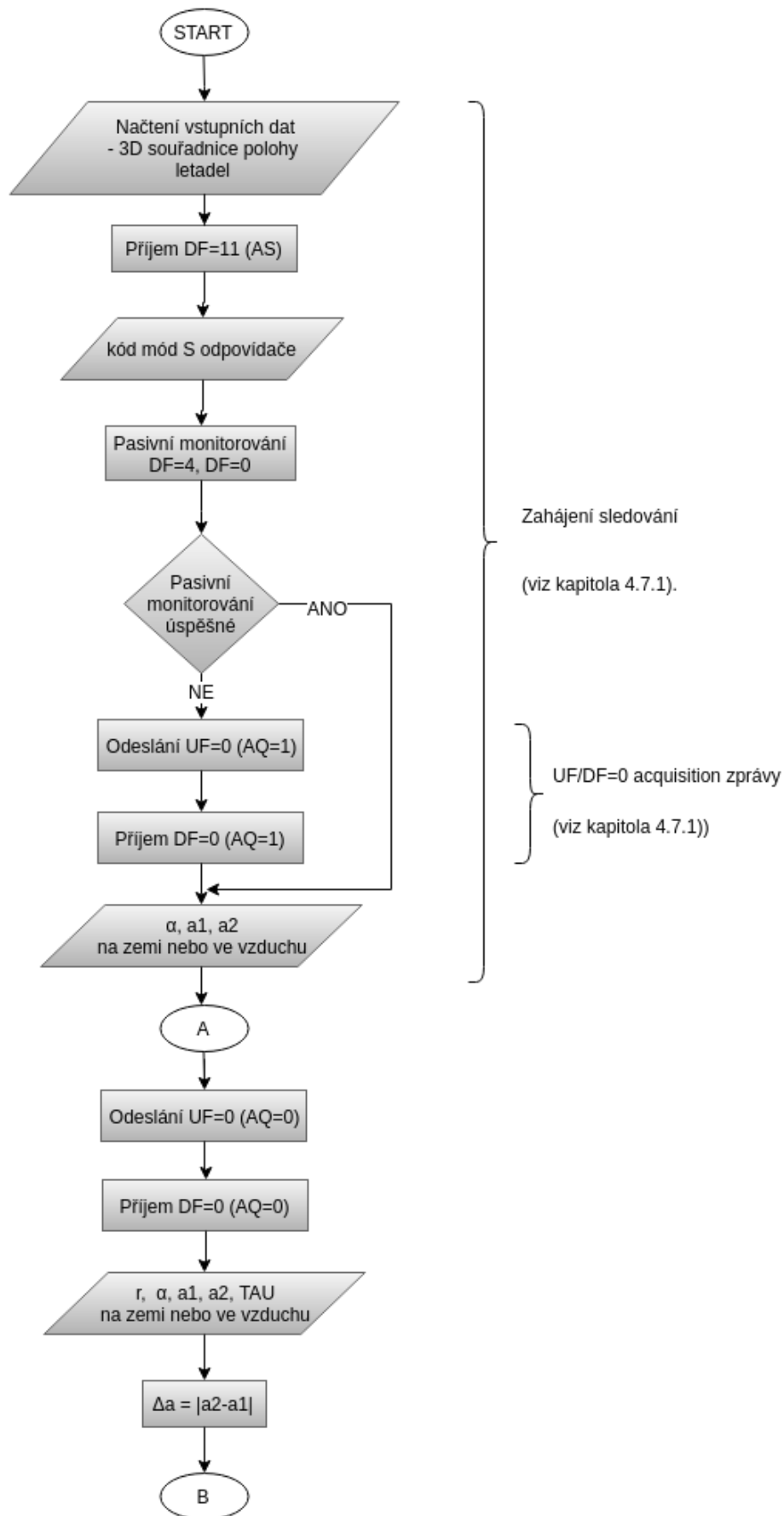
4.7.6 Znázornění průběhu sledování pomocí diagramu

Průběh sledování v módu S je pomocí diagramů zobrazen na Obrázcích 15 a 16. Jedná se o průběh komunikace mezi dvěma letadly, z nichž jedno je vlastní letadlo a druhé je letadlo narušitel. Sekvence dotazů a odpovědí, jejich periody a jednotlivé podmínky v diagramu odpovídají podrobnému popisu v předešlých kapitolách.

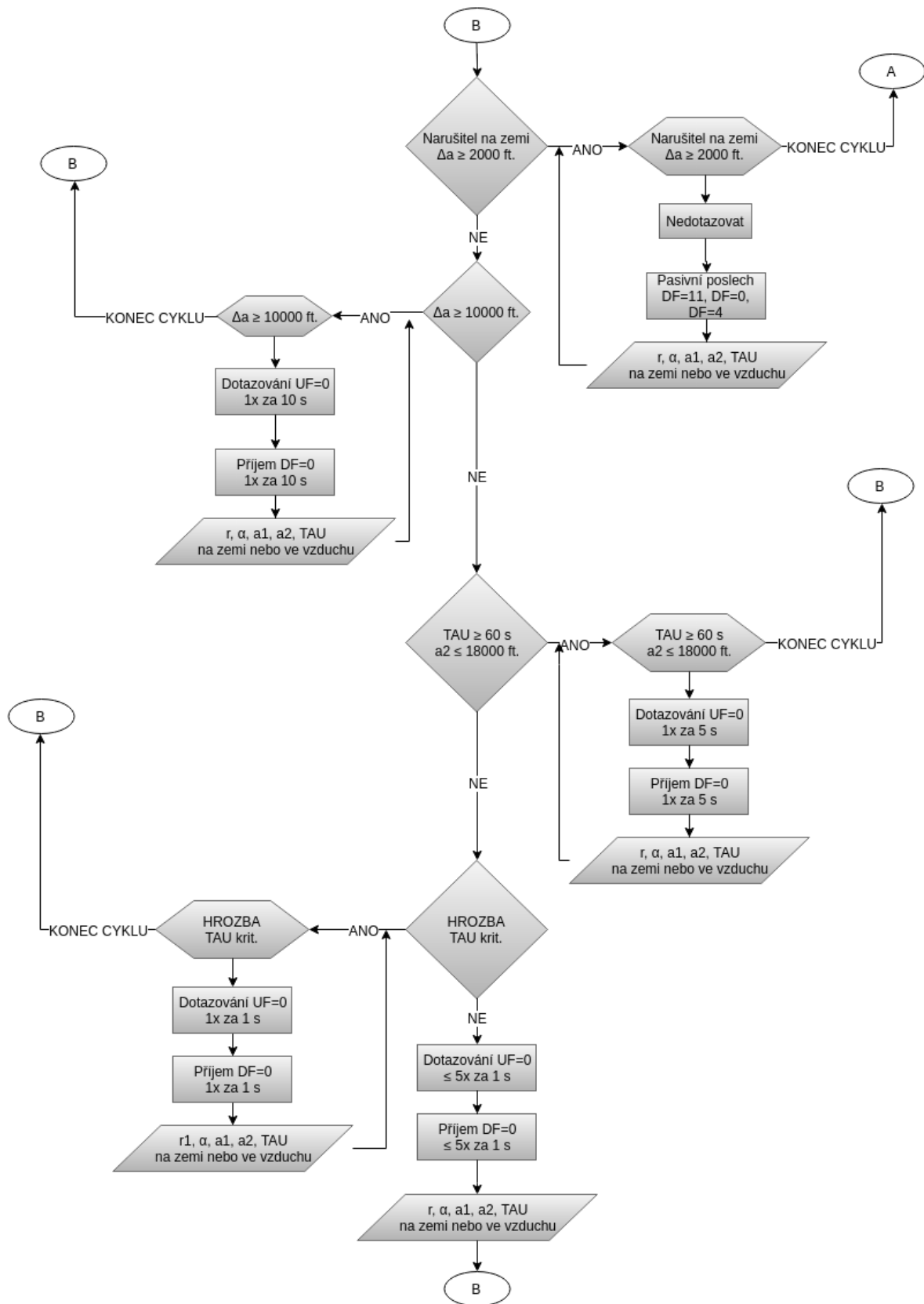
Pro přehlednost je bráno v úvahu pouze sledování jedním letadlem (vlastním letadlem), zatímco funkce sledování druhým letadlem je zanedbána. V reálném případě by byl diagram doplněn také o bloky zobrazující postup sledování vlastního letadla narušitelem. Pro větší přehlednost diagramu je také předpokládáno, že na každý dotaz vždy vlastní letadlo obdrží odpověď a daný dotaz tedy není nutné opakovat.

Význam jednotlivých veličin v diagramu je následující:

- ✗ r = vzdálenost vlastního letadla od letadla narušitele,
- ✗ a_1 = nadmořská výška vlastního letadla,
- ✗ α = azimut letadla narušitele,
- ✗ a_2 = nadmořská výška letadla narušitele,
- ✗ TAU = čas do kritického sblížení (srážky).



Obrázek 15 Diagram: Průběh sledování v módu S (1)



Obrázek 16 Diagram: Průběh sledování v módu S (2)

4.8 Průběh sledování s využitím ES

V této kapitole bude popsán postup sledování okolního provozu letadly, která jsou vybavena odpovídačem v módu S schopným odesílat a přijímat dlouhé ES.

Sledování s využitím ES, které bývá nazýváno jako hybridní sledování, bylo zavedeno za účelem snížení počtu aktivních dotazů tak, aby se ulevilo zatížení frekvenčního pásma 1030/1090 MHz. Společně s AS (DF=11), je pomocí ADS-B odesílán také ES (DF=17), který je složen z několika zpráv obsahujících informace o poloze a identifikaci letadla. Díky tomu již nemusí být letadlo nominálně dotazováno aktivními dotazy (UF=0) a na tyto dotazy odpovídat (DF=0).

Schéma technologie ADS-B je vyobrazeno na Obrázku 17.

4.8.1 Zahájení sledování

Sledování začíná příjmem DF=17 (ES) obsahujícím 24 bitovou adresu letadla. Díky znalosti adresy letadla může být narušitel aktivně sledován zprávami UF/DF=0. Polohové informace získané aktivním sledováním jsou poté porovnávány s polohovými informacemi obsaženými ve zprávách DF=17.

Nominální hybridní sledování je zahájeno, pokud jsou rozdíly hodnot získané aktivním (UF/DF=0) a pasivním (DF=17) sledováním následující:

- ✗ $|\Delta r| \leq 200 \text{ m}$,
- ✗ $|\Delta a| \leq 100 \text{ ft}$,
- ✗ $|\Delta \alpha| \leq 45^\circ$.

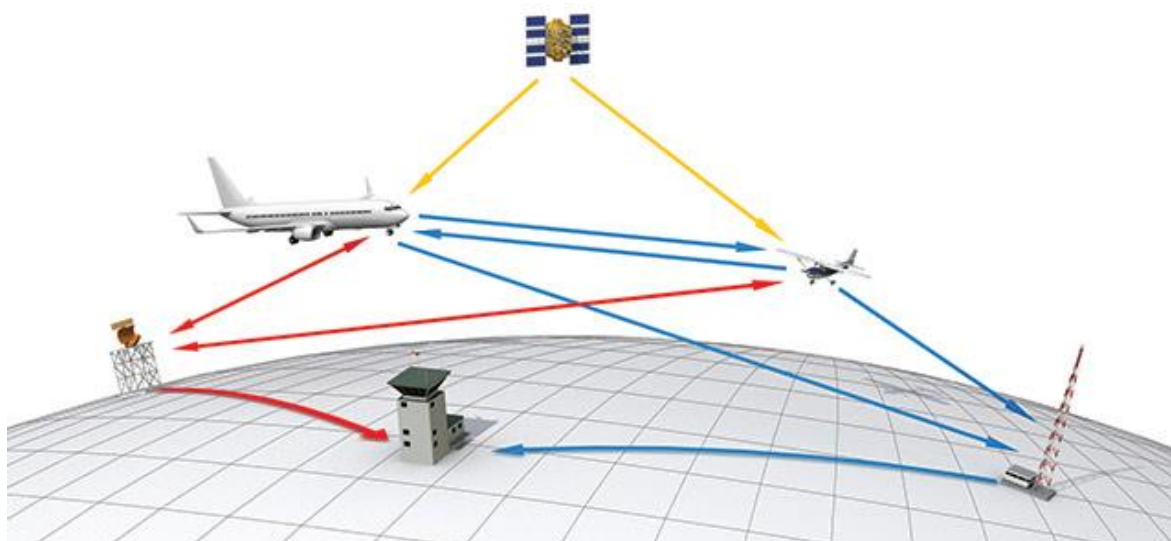
Kde:

r = vzdálenost vlastního letadla od narušitele,

a = rozdíl nadmořských výšek letadla a narušitele,

α = relativní směrník (azimut).

Jestliže jsou všechny tyto rovnice splněny, nominální hybridní sledování může být zahájeno. V opačném případě musí být zahájeno klasické aktivní sledování v módu S.



Obrázek 17 Schéma ADS-B

Zdroj: <https://www.aopa.org>

4.8.2 Průběh sledování

Pokud bylo sledování zahájeno a byla tak určena počáteční poloha letadla, další průběh sledování je již založen na pasivním příjmu zpráv DF=17. Polohové informace obsažené v těchto zprávách jsou ale v pravidelných intervalech ověřovány aktivním dotazováním. Základní frekvence ověřování polohových informací aktivními dotazy je jedenkrát za 60 sekund. Frekvence ověřování polohových informací je ale zvýšena v případech, kdy jsou splněny následující podmínky. [4] [11]

- ✘ HROZBA: letadlo narušitel je považováno za hrozbu, pokud se vůči vlastnímu letadlu nachází v blízké vzdálenosti NEBO výšce, jinými slovy musí být splněna následující rovnice (Rovnice 1): [4]

$$|a| \leq 10\,000 \text{ ft AND } \left\{ \left(|a| \leq 3000 \text{ ft OR } \frac{|a - 3000 \text{ ft}|}{|\dot{a}|} \leq 60 \text{ s} \right) \text{ OR } \left(r \leq 3 \text{ NM OR } \frac{r - 3 \text{ NM}}{|\dot{r}|} \leq 60 \text{ s} \right) \right\}$$

Kde:

a= separace letadla narušitele v nadmořské výšce [ft],

á= hodnota změny nadmořské výšky ve [ft/s],

r= šikmá vzdálenost narušitele v [NM],

ř= hodnota změny vzdálenosti v [NM/s].

V případě hrozby je frekvence ověřování polohových informací aktivními dotazy jedenkrát za 10 sekund.

- ✘ **BLÍZKÁ HROZBA:** letadlo narušitel je považováno za blízkou hrozbu, pokud se vůči vlastnímu letadlu nachází v blízké vzdálenosti A výšce, jinými slovy musí být splněna následující rovnice (Rovnice 2): [4]

$$|a| \leq 10\,000 \text{ ft AND } \left\{ \left(|a| \leq 3000 \text{ ft OR } \frac{|a - 3000 \text{ ft}|}{|a|} \leq 60 \text{ s} \right) \text{ AND } \left(r \leq 3 \text{ NM OR } \frac{r - 3 \text{ NM}}{|r|} \leq 60 \text{ s} \right) \right\}$$

Kde význam jednotlivých veličin je stejný jako v případě Rovnice 1.

V případě blízké hrozby je narušitel sledován standardně prostřednictvím aktivního dotazování s nominální frekvencí dotazů jedenkrát za sekundu.

Frekvence ověřování polohových informací aktivními dotazy pro každý z uvedených případů jsou znázorněny na Obrázku 18.



Obrázek 18 Ověřování polohových informací aktivními dotazy

4.8.3 Zprávy DF=17 (ES)

ES je odeslán v několika zprávách, které se liší svým typovým kódem (TC). Podle TC lze tedy jednoznačně určit, o kterou konkrétní zprávu se jedná. Nejdůležitější zprávy pro potřeby systému ACAS jsou popsány níže. Perioda jejich vysílání a frekvenční pásma jsou uvedeny v Tabulce 12. [2]

- ✘ *Aircraft Identification Squitter* slouží pro identifikaci letadla pomocí volací značky, například CSA123. [7] [8]
- ✘ *Airborne Position Squitter* je používán pro udání 3D polohy letadla ve vzduchu. Udává zeměpisnou šířku (latitude), zeměpisnou délku (longitude) a nadmořskou výšku (altitude). [7] [8]

- ✘ *Surface Position Squitter* je používán pro udání polohy a rychlosti letadla na zemi. Na rozdíl od situace, kdy se letadlo vyskytuje ve vzduchu, je pro letadlo na zemi vysílána informace o jeho pozici a rychlosti v jedné zprávě. Pro obě informace je tedy používán pouze jeden registr a to z toho důvodu, že není potřeba kódovat informaci o nadmořské výšce. [8]
- ✘ *Airborne Velocity Squitter* určuje horizontální rychlost, vertikální rychlost a kurz letadla. Existují 4 subtypy těchto zpráv. Subtypy 1 (podzvukové rychlosti) a 2 (nadzvukové rychlosti) udávají horizontální rychlost vůči zemi, zatímco subtypy 3 (podzvukové rychlosti) a 4 (nadzvukové rychlosti) udávají horizontální rychlost vůči vzduchu. V naprosté většině případů se však používá subtyp 1. [7] [8]
- ✘ *Event Driven Squitter* slouží pro přenos dodatečných informací. [8]

Tabulka 12 Periode ES zpráv a frekvenční pásma, na kterých jsou odesílány

Zpráva	Perioda (s)	Průměr (s)	Frekvenční pásmo
Airborne Position Squitter	0,4 – 0,6	0,5	1090 MHz
Surface Position Squitter	0,4 – 0,6 ³	0,5 (5) ³	1090 MHz
Aircraft Identification Squitter	4,8 – 5,2 ⁴	5 (10) ⁴	1090 MHz
Airborne Velocity Squitter	0,4 – 0,6	0,5	1090 MHz
Event Driven Squitter	Max. 0,5	0,5	1090 MHz

4.8.4 Ověřovací zprávy

Jak již bylo zmíněno, poloha letadla určená pomocí pasivního sledování, je ověřována aktivními dotazy. Typy zpráv aktivních dotazů a jejich frekvenční pásma jsou uvedeny v Tabulce 13 a v Tabulce 14. V případě, kdy je letadlo narušitel vyhodnoceno jako blízká hrozba, přechází pasivní sledování na sledování aktivní, jehož sekvence dotazů a jejich perioda jsou popsány v kapitole o sledování s využitím AS.

³ Perioda odesílání zpráv Surface Position Squitter závisí na tom, jestli je letadlo v pohybu, či nikoli. Pokud se letadlo po zemi pohybuje alespoň rychlostí 10 m za 30 s, poté je perioda odesílání squitteru 0,5 s. Pokud se letadlo nepohybuje, nebo se pohybuje rychlostí nižší než 10 m za 30 s, poté odešle zprávu každých 5 sekund.

⁴ Stejně jako v případě Surface Position Squitteru závisí perioda odesílání zpráv na tom, zdali se letadlo pohybuje, či nikoli. Pokud se letadlo pohybuje alespoň rychlostí 10 m za 30 s, poté je perioda odesílání zpráv 5 s, v opačném případě je perioda 10 s.

Tabulka 13 Periody a frekvenční pásma ověřovacích zpráv

Zpráva	Perioda (s)	Frekvenční pásmo
UF=0	60	1030 MHz
DF=0	60	1090 MHz

Tabulka 14 Periody a frekvenční pásma ověřovacích zpráv v případě HROZBY

Zpráva	Perioda (s)	Frekvenční pásmo
UF=0	10	1030 MHz
DF=0	10	1090 MHz

4.8.5 Znázornění průběhu pasivního sledování pomocí diagramu

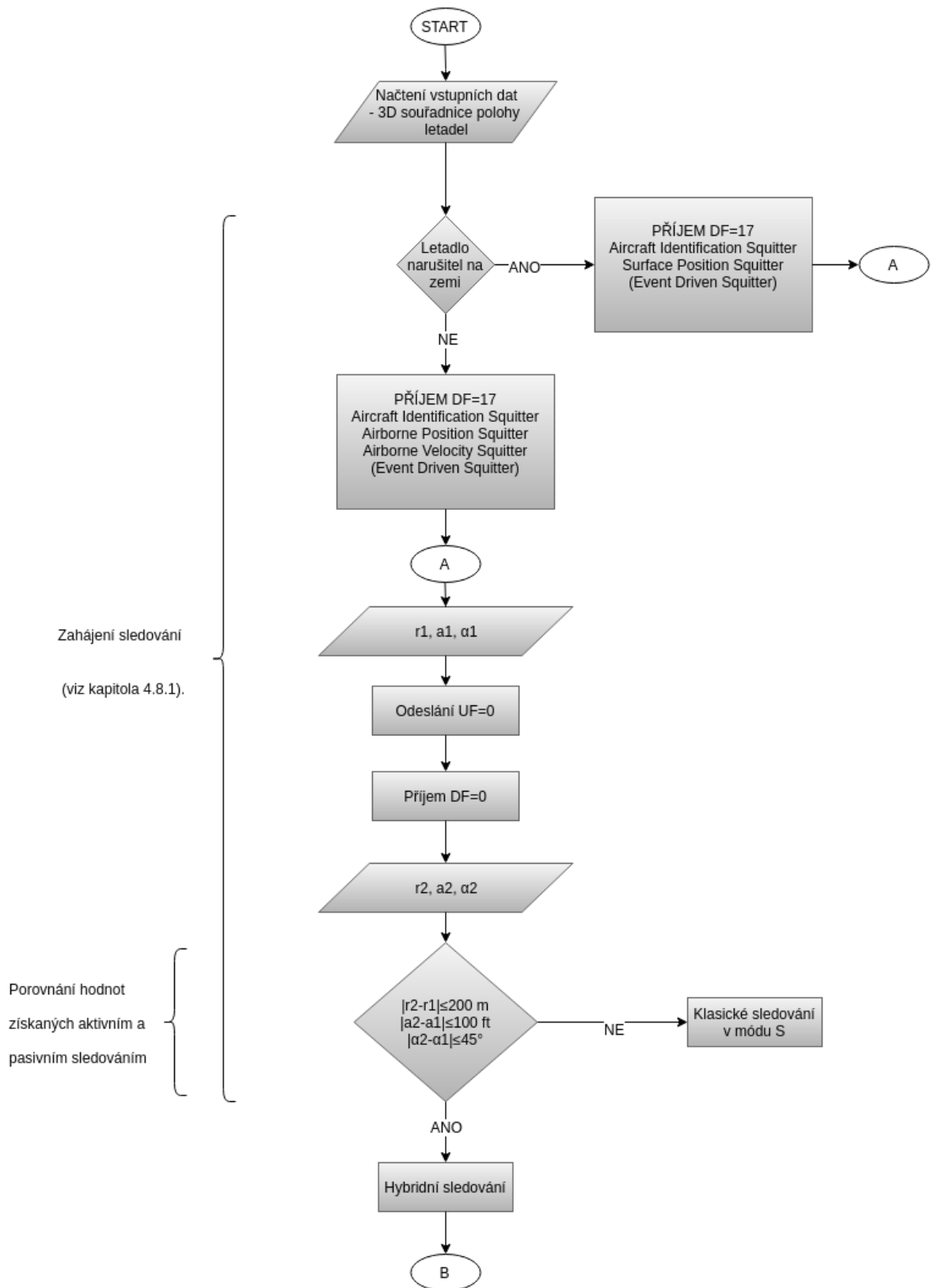
Na Obrázku 19 je pomocí diagramu zobrazen postup počátečního určení polohy v případě využití ES. Na Obrázku 20 je diagram, který navazuje na diagram na Obrázku 19 a zobrazuje průběh hybridního sledování po tom, co již byla určena počáteční poloha.

Diagramy zobrazují celý postup hybridního sledování pro případ 2 letadel, z nichž jedno je letadlo vlastní a druhé letadlo narušitel. Vlastní letadlo sleduje narušitele, a tudíž přijímá ES a odesílá ověřovací aktivní dotazy.

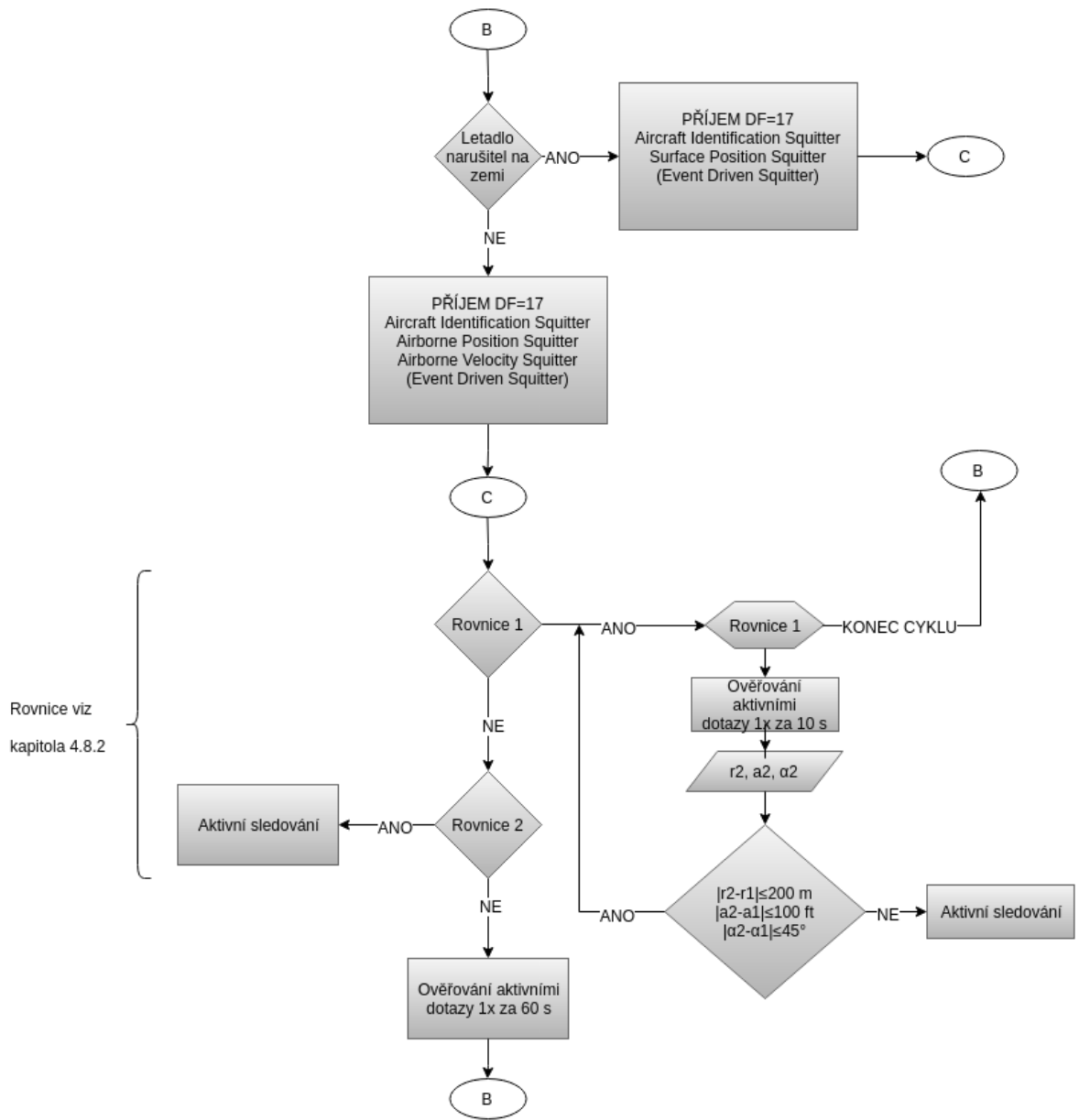
Pro přehlednost je bráno v úvahu pouze sledování jedním letadlem (vlastním letadlem), zatímco funkce sledování druhým letadlem je zanedbána. V reálném případě by byl diagram doplněn také o bloky zobrazující postup sledování vlastního letadla narušitelem. Pro větší přehlednost diagramu je také předpokládáno, že na každý dotaz vždy vlastní letadlo obdrží odpověď a daný dotaz tedy není nutné opakovat.

Význam jednotlivých veličin v diagramu je následující:

- ✗ r = vzdálenost vlastního letadla od letadla narušitele,
- ✗ a = nadmořská výška letadla narušitele,
- ✗ α = azimut letadla narušitele.



Obrázek 19 Diagram: Počáteční určení polohy



Obrázek 20 Diagram: Průběh hybridního sledování

5 Model

Podle popsaného postupu sledování systémem ACAS v jednotlivých módech je nyní možné vytvořit model pro zjištění počtu dotazů a odpovědí za danou časovou jednotku a z něho určit přibližné zatížení frekvenčního pásma 1030/1090 MHz.

5.1 Konkrétní příklad modelové situace

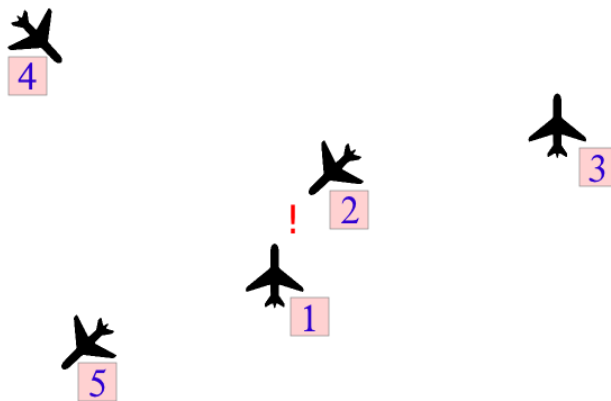
Namodelováno je vzájemné dotazování 5 letadel, jejichž poloha je znázorněna na Obrázku 21. Potřebné informace o všech letadlech jsou uvedeny v Tabulce 15 a v Tabulce 16. Z tabulek je patrné, že 4 letadla jsou vybavena odpovídačem pracujícím v módu S, z nichž 2 letadla jsou vybavena odpovídačem umožňujícím hybridní sledování (1090ES). Jedno letadlo je vybaveno odpovídačem v módu C, a tudíž nedisponuje systémem ACAS II.

Letadla „1“ a „2“ letí ve stejné letové hladině a díky jejich kritické vzájemné vzdálenosti je spuštěna výstraha RA.

Letadlo „3“ je na letišti a má zapnutý odpovídač. Všechna ostatní letadla se nachází ve vzduchu.

Jelikož je situace modelována bez použití počítačového programování, v potaz byly brány následující zjednodušení:

- ✘ Je předpokládáno, že se v prostoru nachází pouze letadla, která jsou zadána. V dosahu systému ACAS (cca 40 NM) jednotlivých zadaných letadel se tedy žádná jiná letadla, která by mohla být potenciálně dotazována nebo dotazovat zadaná letadla, nenacházejí.
- ✘ Je předpokládáno, že každé jednotlivé letadlo již má sledování všech ostatních letadel zahájeno a tudíž má i určenou počáteční polohu všech letadel. Letadla se tedy dotazují nominálně podle pravidel popsaných v předešlých kapitolách (jednotlivé dotazy a odpovědi při zahájení sledování a počátečním určení polohy mají jen minimální vliv na konečný počet přenosů a zatížení frekvenčního pásma).
- ✘ Letadla se nepohybují, nebo se pohybují takovou rychlostí, aby se během časového úseku modelování (1 minuta), nezměnila pravidla pro počet dotazů a odpovědí.
- ✘ Je předpokládáno, že délka trvání výstrahy RA je 30 sekund a poté jsou již letadla navzájem dotazována nominálně.
- ✘ V případě dotazů v módu C se bere v úvahu dotazování metodou Whisper Shout a to s pevně stanoveným počtem dotazů v jedné sekvenci bez ohledu na množství letadel v okolí. Počet dotazů v sekvenci je stanoven na 6. Letadla vybavená odpovídačem pracujícím pouze v módu C odpovídají pouze na 1 dotaz v sekvenci.



Obrázek 21 Poloha letadel

Tabulka 15 Informace o letadlech

ID letadla	Výbava (odpovídač)	Letová hladina	Výstraha
1	S (1090ES)	FL350	RA
2	S	FL350	RA
3	S	FL0	NA
4	S (1090ES)	FL440	NA
5	C	FL310	NA

Tabulka 16 Vzdálenosti mezi zadanými letadly

	1	2	3	4	5
1		3 NM	19 NM	30 NM	15 NM
2	3 NM		10 NM	27 NM	25 NM
3	19 NM	10 NM		40 NM	40 NM
4	30 NM	27 NM	40 NM		21 NM
5	15 NM	25 NM	40 NM	21 NM	

5.2 Výsledky

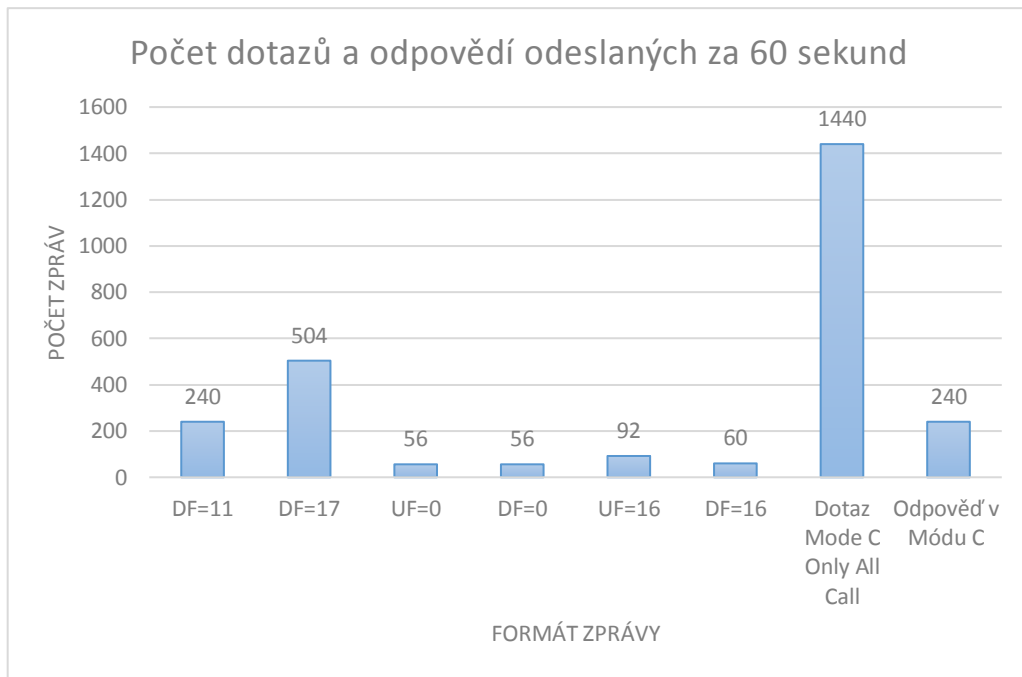
Výsledky modelování (počet dotazů a odpovědí) jsou zobrazeny na Obrázku 22 a na Obrázku 23. Z grafů lze vyčíst počet jednotlivých formátů zpráv, které byly odeslány všemi zadanými letadly za 60 sekund a také porovnat počet zpráv odeslaných na frekvencích 1030 MHz a 1090 MHz.

Průměrný počet zpráv odeslaných zadanými letadly systémem ACAS i odpovídačem je každou sekundu přibližně 45 (přibližně 9 zpráv za 1 sekundu na jedno letadlo).

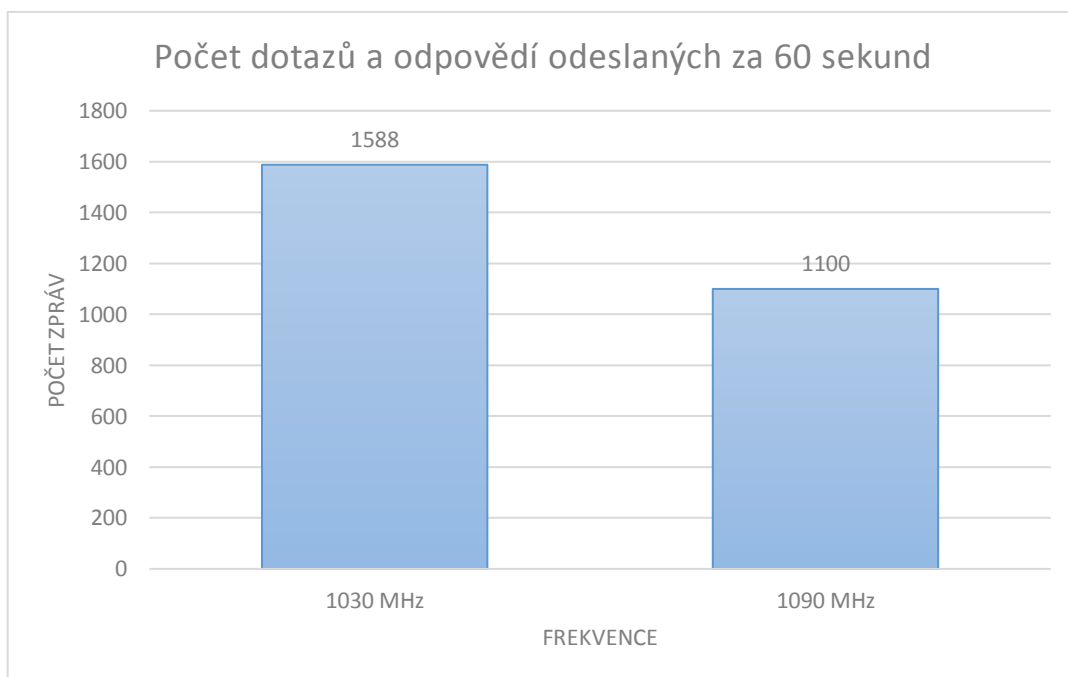
Ve druhém grafu je možné si všimnout značného rozdílu mezi zatížením frekvence 1030 MHz a 1090 MHz. Výrazně vyšší množství přenosů na frekvenci 1030 MHz je způsobeno dotazy metodou Whisper Shout, díky níž odesílají 4 letadla v modelu po 6 dotazech Mode C Only All Call za sekundu.

Jak je patrné z prvního grafu, zátěži frekvence 1090 MHz výrazně přispívají zprávy ES (a to dokonce přibližně dvakrát více než zprávy AS). Mohlo by se zdát, že je tento fakt v rozporu s tvrzením v úvodu této práce, kde je uvedeno, že hybridní sledování bylo zavedeno za účelem snížení zátěže frekvenčního pásma 1030/1090 MHz. Není tomu ale tak, protože je třeba mít v této souvislosti na paměti následující skutečnosti:

- ✘ Díky tomu, že jsou ve zprávách ES zahrnuty všechny potřebné polohové informace (dokonce více informací, než ve zprávách využívaných v případě klasického aktivního dotazování s využitím AS), není letadlo vysílající ES aktivně dotazováno, čímž je sníženo množství odeslaných zpráv UF/DF=0.
- ✘ ADS-B nebylo primárně zavedeno pro účely systému ACAS. Jeho primární funkcí je rozšířit dostupnost polohové informace i pro využití bez pozemní radarové přehledové infrastruktury. ACAS tyto zprávy, které jsou letadly odesílány nezávisle na něm, pouze využívá pro vlastní potřeby. Se zavedením ES se tedy zatížení pásma 1030/1090 MHz snižuje zejména proto, že již není třeba aktivního nominálního dotazování letadla pozemním SSR radarem. Skutečný přínos ES se tak na výsledcích modelování projeví až po implementaci modelu zatížení pásma systémem ACAS do celkového modelu zatížení frekvence 1030/1090 MHz.



Obrázek 22 Graf: Počet dotazů a odpovědí v závislosti na formátu zprávy



Obrázek 23 Graf: Počet zpráv přenesených na frekvenci 1030 MHz a 1090 MHz

Zajímavá jsou také data v Tabulce 17 a v Tabulce 18, která ukazují průměrné vytížení odpovídačů během jedné sekundy na jedno letadlo. Standardně by měl být mód S odpovídač schopen za sekundu odeslat až 500 odpovědí v módu C a až 50 odpovědí v módu S (z toho 16 dlouhých a 34 krátkých). [12]

Tabulka 17 Zatížení odpovídače odpověďmi v módu C

Mód C	Standard	Model	% zatížení odpovídače
Počet odpovědí za sekundu	500	4	0,8

Tabulka 18 Zatížení odpovídače odpověďmi v módu S

Mód S	Standard	Model	% zatížení odpovídače
Počet odpovědí za sekundu	50	1,9	3,8

Z hodnot, které poskytuje tento model, je tedy zřejmé, že zatížení odpovídačů je při takto malém počtu letadel a zvoleném vybavení pouze minimální.

6 Závěr

System ACAS je dnes již standardní výbavou každého dopravního letadla. Všechna dopravní letadla, jejichž vzletová hmotnost je vyšší než 5700 kg, nebo letadla, která jsou schválena pro přepravu více než 19 cestujících, musí být vybavena verzí ACAS II.

Tato verze umožňuje, s pomocí odpovídače, sledování okolního provozu a případné výstrahy a koordinované návrhy úhybných manévru na takové úrovni, že v případě správné kooperace pilota se systémem je pravděpodobnost srážky dvou shodně vybavených letadel ve vzduchu téměř nulová. V souvislosti se zdokonalující se funkcí sledování však rostou nároky na vytižení frekvenčního pásma 1030/1090 MHz, které je využíváno nejen pro komunikaci systému ACAS, ale také pro sledování provozu ve vzdušném prostoru pozemními sekundárními radary. ACAS však svou komunikací do tohoto zatížení přispívá významnou měrou. Jistým opatřením proti přetížení frekvence, které by mohlo mít katastrofální následky, je postupné zavádění ADS-B, které se využívá také pro pokročilé sledování systémem ACAS, zvaným hybridní sledování.

Cílem této bakalářské práce bylo popsání postupu sledování okolního provozu systémem ACAS a jeho namodelování se zaměřením na počet dotazů a odpovědí v pásmu 1030/1090 MHz. Postup sledování byl popsán na základě standardu RTCA, avšak v této souvislosti je třeba zmínit, že systémy jednotlivých výrobců se mohou v postupu dotazování mírně lišit, zejména pak v počtu dotazů a odpovědí, které nejsou standardem přímo stanoveny. Na základě popsaného postupu byl vytvořen vývojový diagram a pomocí něho zjednodušený model pro určení počtu dotazů a odpovědí na frekvenci 1030/1090 MHz pro 5 vzájemně se dotazujících letadel, kde každému letadlu byly přiřazeny jiné počáteční podmínky a jiné vybavení (typ odpovídače). V době dokončování této bakalářské práce však ještě nebyl dokončen celkový model zatížení frekvenčního pásma 1030/1090 MHz a tak nebylo možné model sledování systémem ACAS do celkového modelu zakomponovat.

Jelikož bylo při modelování situace bráno v úvahu několik zjednodušení, je třeba na výsledky nahlížet pouze jako na odhad počtu přenosů. Pro získání přesného počtu dotazů a odpovědí je třeba na základě vytvořeného vývojového diagramu sestavit počítačový model, který by v úvahu nebral téměř žádná zjednodušení. Pro modelování výsledků množství přenosů, blížících se stoprocentní přesnosti, by bylo potřeba z reálného provozu vysledovat přesný postup dotazování systémů jednotlivých výrobců a ty následně zohlednit při přiřazování vybavení jednotlivým letadlům v modelu. Takové naprogramování a rozšíření modelu a jeho následné zakomponování do celkového modelu zatížení pásma 1030/1090 MHz by mohlo být například tématem mé diplomové práce.

Použité zdroje informací

- [1] RTCA/DO-185A: SC-147. *Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II)*. [PDF]. 2007. RTCA, Inc.
- [2] EUROCONTROL. *Clarification Mode S Transponder in an Airport/A-SMGCS Environment*. [PDF]. 2005. [2016-06-27]. Dostupné z:
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-clarification-modes-transponder-in-an-airport-asmgcs-environment-20050403.pdf>
- [3] STAMPER W. *Understanding mode S technology*. [PDF]. 2005. [2016-03-05]. Dostupné z:
<http://defenseelectronicsmag.com/sitefiles/defenseelectronicsmag.com/files/archive/rfdesign.com/mag/512RFDSF3.pdf>
- [4] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *Předpis L10 - O civilní letecké telekomunikační službě svazek IV – Přehledový radar a protisrážkový systém, svazek IV*. [ONLINE]. 2016. [2016-02-02]. Dostupné z:
<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [5] GERTZ J.L. *Fundamentals of Mode S Parity Coding*. [PDF]. 1984. [2016-05-29].
Dostupné z:
https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Gertz_1984_ATC-117_WW-15318.pdf
- [6] DARRYL P. *Mode A and mode C: The straight scoop on how it works*. [ONLINE]. ND. [2016-04-22]. Dostupné z:
<http://www.airsport-corp.com/moddec.htm>
- [7] JUNZI S. *ADS-B Decoding Guide*. [ONLINE]. 2015. [2016-07-02]. Dostupné z:
<http://adsb-decode-guide.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [8] GRAPPEL R.D., WIKEN R.T. *Guidance Material for S-Specific Protocol Application Avionics*. [PDF]. 2007. [2016-07-04]. Dostupné z:
https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Grappel_2007_ATC-334_WW-15318.pdf
- [9] EUROCONTROL. *ACAS II Guide- Airborne Collision Avoidance System II (incorporating version 7.1)*. [PDF]. 2014.
- [10] FAA. *Introduction to TCAS II Version 7*. [PDF]. 2007.
- [11] ICAO. *Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual (Doc 9863)*. [PDF]. 2005.
- [12] KHALID M., MANN S.M. *Exposure to EMFs from Lightweight Aviation Transponders*. [PDF]. 2007. [2016-07-25]. Dostupné z:
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/340117/HpaRpd031.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1 Znázornění pulsů dotazu využívaného systémem ACAS pro dotazování v módu C	12
Obrázek 2 Znázornění pulsů odpovědi v módu C	14
Obrázek 3 Průběh sledování v módu C	16
Obrázek 4 Synchronous Garble	17
Obrázek 5 Whisper Shout sekvence [10].....	18
Obrázek 6 Diagram: Počáteční určení polohy v módu C.....	20
Obrázek 7 Diagram: Nominální sledování v módu C.....	21
Obrázek 8 Znázornění pulsů dotazu v módu S	23
Obrázek 9 Znázornění pulsů odpovědi v módu S.....	24
Obrázek 10 Acquisition squitter	28
Obrázek 11 Extended squitter	29
Obrázek 12 První fáze dotazování- vysílání DF=11	33
Obrázek 13 Druhá fáze dotazování- odeslání UF=0	34
Obrázek 14 Třetí fáze dotazování- odeslání odpovědi DF=0.....	34
Obrázek 15 Diagram: Průběh sledování v módu S (1)	37
Obrázek 16 Diagram: Průběh sledování v módu S (2)	38
Obrázek 17 Schéma ADS-B.....	40
Obrázek 18 Ověřování polohových informací aktivními dotazy	41
Obrázek 19 Diagram: Počáteční určení polohy	44
Obrázek 20 Diagram: Průběh hybridního sledování	45
Obrázek 21 Poloha letadel	47
Obrázek 22 Graf: Počet dotazů a odpovědí v závislosti na formátu zprávy.....	49
Obrázek 23 Graf: Počet zpráv přenesených na frekvenci 1030 MHz a 1090 MHz	49

Seznam tabulek

Tabulka 1 Časové vzdálenosti pulsů dotazu v módu C	13
Tabulka 2 Časové vzdálenosti pulsů odpovědi v módu C.....	13
Tabulka 3 Perioda vysílání (mód C).....	16
Tabulka 4 Časové vzdálenosti pulsů dotazu v módu S	23
Tabulka 5 Časové vzdálenosti pulsů odpovědi v módu S.....	23
Tabulka 6 Formáty zpráv.....	25
Tabulka 7 Pole zpráv	27
Tabulka 8 Perioda monitorování okolního provozu	30
Tabulka 9 Perioda vysílání RA zprávy	30
Tabulka 10 Perioda vysílání zpráv (mód S)	35
Tabulka 11 Perioda vysílání zpráv UF/DF=0.....	35
Tabulka 12 Periody ES zpráv a frekvenční pásma, na kterých jsou odesílány.....	42
Tabulka 13 Periody a frekvenční pásma ověřovacích zpráv.....	43
Tabulka 14 Periody a frekvenční pásma ověřovacích zpráv v případě HROZBY	43
Tabulka 15 Informace o letadlech.....	47
Tabulka 16 Vzdálenosti mezi zadanými letadly	47
Tabulka 17 Zatížení odpovídače odpověďmi v módu C	50
Tabulka 18 Zatížení odpovídače odpověďmi v módu S.....	50

Seznam příloh

Příloha 1 – Vývojový diagram

Přílohy

Příloha 1

V Příloze 1 je znázorněn vývojový diagram popisující postup sledování letadla narušitele vlastním letadlem. Sledování vlastního letadla narušitelem není z důvodu větší přehlednosti bráno v potaz. Ze stejného důvodu je předpokládáno, že vlastní letadlo na svůj dotaz vždy přijme bezchybnou odpověď a nemusí se tedy dotazovat opakovaně.

