



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VYUŽITÍ KMITOČTOVÝCH PÁSEM VKV, UKV, SKV A EKV V LETECKÝCH CIVILNÍCH A VOJENSKÝCH RADARECH (STUDIJNÍ POMŮCKA)

EXPLOATATION OF VHF, UHF, SHF, AND EHF FREQUENCY BANDS IN CIVIL & MILITARY AERONAUTIC
RADARS (HANDBOOK)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Rafah Jasimová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Studentka: **Rafah Jasimová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Profesionální pilot
Vedoucí práce: **doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech (studijní pomůcka)

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoření studijní pomůcky pro přípravu profesionálních pilotů a obecných bakalářů leteckého provozu.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat učební pomůcku – přehled využívání zadaných kmitočtových pásem pro leteckou komunikaci a rádiovou navigaci, usnadňující studium předmětů Základy letecké navigace (OLN), Obecná navigace (DLG), Radionavigace I (DRN) a Radionavigace II (ERN), studovaných v oborech BS (B-PRP) a MS (M-LPR a M-LPRP) na LÚ FSI VUT.

Seznam doporučené literatury:

Letecký zákon (ICAO) - příloha 10

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem předkládané bakalářské práce je vytvořit studijní pomůcku na téma Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech. Hlavní důraz je kladen především na stručný přehled zadaných kmitočtových pásem pro leteckou komunikaci a rádiovou navigaci. Práce má dále sloužit jako studijní pomůcka pro přípravu profesionálních pilotů a bakalářů leteckého provozu.

ABSTRACT

The aim of presented bachelor thesis is produce study aid on the topic Exploitation of VHF, UHF, SHF, and EHF frequency bands in civil and military aeronautical radars. The main aim of this thesis is to brief overview of specified frequency bands for air communication and radio navigation. The thesis is to serve as a study aid for the preparation of professional pilots and bachelors of air traffic.

KLÍČOVÁ SLOVA

aktivní radiolokátory, EKV, elektromagnetická vlna, pasivní radarový systém, radar, SKV, šíření vln, UKV, VKV

KEYWORDS

active radiolocators, EHF, electromagnetic wave, passive radar system, radar, SHF, UHF, VHF, wave propagation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JASIMOVÁ, Rafah. Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech (studijní pomůcka) [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133191>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech (studijní pomůcka) jsem vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne: 7.4.2022

.....
Rafah Jasimová

PODĚKOVÁNÍ

Velmi ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Slavomíru Voseckému, CSc., za cenné rady a připomínky, které mi pomohly tuto práci zkompletovat, a hlavně za odborné vedení této práce.

V Brně dne: 7.4.2022

.....
Rafah Jasimová

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 11 |
| 1 ÚVOD DO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ | 13 |
| 1.1 Způsoby šíření vln | 14 |
| 1.2 Pásmo velmi krátkých vln | 15 |
| 1.3 Pásmo ultra krátkých vln | 15 |
| 1.4 Pásmo super krátkých vln..... | 15 |
| 1.5 Pásmo extrémně krátkých vln | 16 |
| 2 VLIV ZEMSKÉ ATMOSFÉRY NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY | 17 |
| 2.1 Troposféra | 17 |
| 2.2 Ionosféra | 17 |
| 3 KMITOČTOVÁ PÁSMATA VYUŽÍVANÁ RADIOLOKÁTORY | 19 |
| 3.1 Klasifikace pásem VKV/UKV | 19 |
| 3.2 VKV | 19 |
| 3.3 UKV | 20 |
| 3.4 L pásmo | 20 |
| 3.5 S pásmo | 21 |
| 3.6 C pásmo | 21 |
| 3.7 X pásmo..... | 22 |
| 3.8 Ku pásmo..... | 22 |
| 4 RADIOLOKAČNÍ TECHNIKA..... | 25 |
| 4.1 Funkce základních komponentů radaru | 25 |
| 4.2 Základní druhy antén..... | 25 |
| 4.3 Směrový vyzařovací diagram antény radaru | 26 |
| 4.4 Metoda snímání prostoru | 26 |
| 4.5 Vzdálenost cíle | 26 |
| 4.6 Délka jednoho pulzu..... | 27 |
| 4.7 Minimální dosah..... | 27 |
| 4.8 Frekvence opakování impulzů..... | 27 |
| 5 AKTIVNÍ RADIOLOKÁTORY | 29 |
| 5.1 Primární radary v letectví | 29 |
| 5.1.1 <i>Základy impulsní radiolokace</i> | 29 |
| 5.1.2 <i>Dopplerovské zpracování v primárních radarech</i> | 30 |
| 5.1.3 <i>Druhy primárních radarů</i> | 31 |
| 5.1.4 <i>Přesný přibližovací radar</i> | 32 |
| 5.1.5 <i>Meteorologický radar</i> | 33 |
| 5.1.6 <i>Palubní meteorologický radar</i> | 35 |
| 5.1.7 <i>Radiovýškoměr</i> | 36 |
| 5.2 Sekundární radary..... | 37 |
| 5.2.1 <i>Mód S</i> | 38 |
| 5.2.2 <i>Zvláštní kódy SSR</i> | 38 |
| 5.2.3 <i>Překrývání odpovědí SSR</i> | 39 |
| 5.2.4 <i>CRC (Cyclic redundancy check)</i> | 39 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6 | PASIVNÍ RADIOLOKÁTORY | 41 |
| 6.1 | Multilaterace | 41 |
| 6.2 | PSS Věra | 43 |
| 7 | VOJENSKÉ RADARY | 45 |
| 7.1 | Využití podle kmitočtových pásem | 46 |
| 7.2 | Přehledové radary | 46 |
| 7.3 | Trackové radary | 46 |
| 7.3.1 | <i>PAR-E</i> | 47 |
| 7.4 | Dělostřelecké radary | 49 |
| 8 | KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE | 51 |
| 8.1 | Frekvenční spektra využívaná pro komunikaci | 51 |
| 8.2 | Satelitní telefonie | 51 |
| 8.3 | Metody určování polohy pomocí komunikačních signálů..... | 51 |
| 8.4 | VCS GAREX..... | 52 |
| 8.5 | Climax..... | 52 |
| 8.6 | VDF | 52 |
| | ZÁVĚR | 55 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 57 |
| | SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ | 63 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 69 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 71 |

ÚVOD

Téma bakalářské práce jsem zvolila tak, aby bylo spojeno s předmětem Radionavigace, který mě během mého bakalářského studia velmi zaujal, chtěla jsem tak ještě výrazně rozšířit znalosti, které jsem v tomto předmětu získala. O oblast letectví se zajímám již od mého studia na základní škole a ráda bych našla v tomto oboru uplatnění po studiu na Vysokém učení technickém v Brně.

Prvním krokem pro realizaci této bakalářské práce bylo spojení s doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc., se kterým jsem se dohodla na tématu Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech, tedy poměrně moderním a komplexním tématu. Obdobná práce, ve které jsou souhrnně popsány radarové systémy obecně a následně i uceleně na praktických příkladech a zástavbách byla sice již v minulosti vytvořena, ale tato práce přistupuje k problematice více z praktického hlediska a taktéž popis a význam užitých frekvencí na jednotlivých systémech je zde odlišný. Jelikož se jedná o moderní a v současné době poměrně řešené téma, může tato práce mít i reálné využití, jelikož bude taktéž popsán právě i praktický význam. V případě primárních radarů instalovaných na moderních letadlech (palubní meteorologický radar a radiovýškoměr) taktéž obecné provozní postupy, které provozovatelé pro používání těchto systémů využívají. Díky čemuž lze obecně nastínit a popsat jaký význam mají příslušné systémy v jednotlivých situacích.

Cílem této práce je tedy utvoření obecného přehledu radarových a přehledových systémů, které využívají definované frekvenční spektrum. V této práci bude taktéž definováno, jaký význam má daná frekvence pro konkrétní systém – tedy proč se využívá právě specifikovaná frekvence. Dále bude v této práci taktéž většina systémů hodnocena pomocí dalších parametrů jako například šířka využívaného paprsku, dosahu systému apod. Dalším z cílů je popis komunikačních technologií a frekvencí využívaných v letectví. U všech přehledových systémů lze taktéž nalézt poměrně podrobný rozsah praktického využití. Pro tyto účely byli osloveni jak odborníci na přehledové systémy, tak zejména komerční piloti, kteří mají s využitím některých systémů poměrně bohaté zkušenosti.

Výstupem této práce bude určitá příručka, kterou bude moci čtenář využít jak pro přípravu na zkoušky z některých předmětů na Vysokém učení technickém, tak v rámci přípravy na zkoušky z teorie dopravního pilota na Úřadu civilního letectví.

1 ÚVOD DO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ

Šíření elektromagnetických vln v prostoru závisí na tom, zda je vlna vyzářena bodovým zdrojem nebo se nachází v dostatečné vzdálenosti od zdroje, a proto může být vnímána jako rovinná vlnoplocha. Bez ohledu na to je důležité, že se elektromagnetické vlnění tvoří dvěma klíčovými složkami, a to magnetickou (H) a elektrickou (E), které jsou na sebe vždy kolmé. Pokud jde o základní parametry elektromagnetického vlnění, obvykle jde o amplitudu, fázi, kmitočet, vlnovou délku a časový průběh [1].

V ideálních podmínkách se elektromagnetické vlnění šíří rychlostí světla, ale ve skutečnosti toto vlnění prochází různými prostředími a rychlost jeho šíření, stejně jako vlnová délka každého nového prostředí, se mění. K určitým změnám dochází i u elektromagnetických vln, které disponují elektromagnetickou intenzitou klesající kvůli pohlcování rádiových vln. Není možné opomenout i to, že každá elektromagnetická vlna se charakterizuje svou délkou. Když je kratší, pak se nejčastěji šíří prostorovou či přímou vlnou a je výrazně tlumena v atmosféře. Jinak je to u delších vln, které se dobře ohýbají, ale mohou ztlumit při procházení ionosférou. K základním druhům ohybů vln patří difrakce, refrakce a super refrakce [1][50].

Co se týká rozdělení vln, nejčastěji hlavním kritériem jejich klasifikace je frekvence, respektive vlnová délka. Díky nim lze vymezit vlny velmi dlouhé (VDV), které začínají frekvencí 3 kHz a mají délku 100 km, a vlny extrémně krátké (EKV), které končí frekvencí 300 GHz a mají délku 1 mm. Velmi krátké a extrémně krátké vlny se obvykle nevyužívají v civilním letectví. Účel aplikace vln o jiné délky záleží na druhu komunikace. Rozdělení těchto vln je zobrazena v tabulce 1 [1].

Tabulka 1: Základní rozdělení rádiových vln [2]

| Frekvenční pásmo | Frekvence | Vlnová délka | Použití v civilním letectví |
|----------------------------|--------------|--------------|--|
| Ultra dlouhé vlny (UDV) | 300–3000 Hz | 1000–100 km | žádné |
| Velmi dlouhé vlny (VDV) | 3–30 kHz | 100–10 km | žádné |
| Dlouhé vlny (DV) | 30–300 kHz | 10–1 km | NDB/ADF, LORAN C |
| Střední vlny (SV) | 300–3000 kHz | 1000–100 m | NDB/ADF, komunikace na velké vzdálenosti |
| Krátké vlny (KV) | 3–30 MHz | 100–10 m | komunikace na velké vzdálenosti |
| Velmi krátké vlny (VKV) | 30–300 MHz | 10–1 m | komunikace na krátké vzdálenosti, VDF, VOR, ILS LLZ, markery |
| Ultra krátké vlny (UKV) | 300–3000 MHz | 100–10 cm | ILS GP, DME, SSR, Satelitní komunikace, GNSS, radary s dlouhým dosahem |
| Super krátké vlny (SKV) | 3–30 GHz | 10–1 cm | RAD ALT, AWR, MLS, radary s krátkým dosahem |
| Extrémně krátké vlny (EKV) | 30–300 GHz | 10–1 mm | žádné |

1.1 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ VLN

Šíření jednotlivých vln závisí na daných frekvencích, a tedy i na vlnových délkách viz tabulka 2. Mezi nejrozšířenější z nich lze vymezit:

- přízemní povrchovou vlnu, která se pohybuje v blízkosti Země, snadno se ohýbá, těžko podléhá útlumu a má větší dosah nad vodní hladinou;
- přízemní prostorovou vlnu, která je složena z přímé vlny a vlny reflektované od povrchu Země, případně jiné překážky; nejčastěji se využívá u radionavigačních zařízení s frekvencí vyšší než 30 MHz;
- přímou vlnu šířenou pouze do těch míst, které se nachází v přímé viditelnosti od vysílače; tato vlna je omezena jak horizontem, tak i překážkami v okolí;
- ionosférickou vlnu, která se nejčastěji využívá v pásmu od 3 MHz do 30 MHz a ohýbá se prostřednictvím refrakce a super refrakce;
- šíření vlnovodným kanálem, který je přítomen u vlnění s frekvencí vyšší než 500 MHz;
- troposférickou vlnou vznikající reflektováním elektromagnetické vlny od útvarů v troposféře, hlavně v kmitočtovém pásmu ultra krátkých vln [1].

Tabulka 2: Způsob šíření vln podle kmitočtových pásem [3]

| Kmitočtové pásmo | Způsob šíření vln |
|--------------------------------|--|
| VDV (3–30 kHz) | Přízemní a odražená prostorová vlna |
| DV (30–300 kHz) | Přízemní vlna ve dne, odražená prostorová a přízemní vlna v noci |
| SV (300–3000 kHz) | Přízemní vlna ve dne, odražená prostorová a přízemní vlna v noci |
| KV (3–30 MHz) | Hlavně prostorová odražená (vlna ve dne i v noci) |
| VKV, UKV, SKV (30 –30 000 MHz) | Přímá vlna, někdy vlnovodným kanálem nebo rozptylem v troposféře |

1.2 PÁSMO VELMI KRÁTKÝCH VLN

Pásmo VKV, anglicky Very High Frequency wave (VHF). S frekvencí v rozsahu od 30 do 300 MHz a délkou vlny od 10 do 1 m. Vlny se šíří přímou vlnou pronikající přes ionosféru do kosmického prostoru. Vysílače musí být umístěny na kopcích a jiných vyvýšených místech, aby byl zajištěn přímý výhled na vysílač. Jsou využívány pro komunikaci na malou vzdálenost [4].

1.3 PÁSMO ULTRA KRÁTKÝCH VLN

Pásmo UKV, anglicky Ultra High Frequency wave (UHF). S frekvencí v rozsahu od 300 do 3000 MHz a vlnovou délkou 100 až 10 cm. Vlny se šíří přímými povrchovými vlnami, které se odrážejí od většiny překážek. Toto kmitočtové pásmo pracuje s radiokomunikačními službami, pozemními mobilními službami, leteckými mobilními službami atd. [4].

1.4 PÁSMO SUPER KRÁTKÝCH VLN

Pásmo SKV, anglicky Super High Frequency wave (SHF). S frekvencí v rozsahu od 3 do 30 GHz a vlnovou délkou 10 až 1 cm. Velmi často dojde k odrazům vln mezi překážkami a mezi odstíněným místům. Na dosah a kvalitu signálu má zásadní vliv počasí. Za špatného počasí dochází k výraznému útlumu. Toto pásmo je používáno pro radiolokaci, satelitní spojení, družicovou službu [4].

V tomto pásmu se obvykle používají menší antény než ve výše uvedených pásmech. Vzhledem k účinkům atmosférické absorpce je spodní konec pásma SKV vhodnější pro sledování středního dosahu oproti vyššího. Toto frekvenční pásmo je taktéž vhodnější než EKV pro rozpoznávání jednotlivých cílů a jejich atributů. V SKV pásmu se pro pozorování Země používají např. radary jako SAR, výškoměry, a meteorologické radary [44].

1.5 PÁSMO EXTRÉMNĚ KRÁTKÝCH VLN

Pásmo EKV, anglicky Extremely High Frequency wave (EHF). Do tohoto spektra spadá dle Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) frekvence v rozsahu od 30 do 300 GHz. Vlnová délka spadající do tohoto frekvenčního spektra se pohybuje od 10 do 1 mm [4].

V tomto pásmu je těžké generovat vysoký výkon. Nicméně v EKV pásmu dochází k pozorování Země pomocí radarů, jako jsou např. výškoměry.

Dopplerův radar lze rozdělit do několika různých kategorií v závislosti na vlnové délce radaru. Jeho pásmy se nazývají L, S, C, X a K, přičemž tyto názvy pocházejí z období Druhé světové války. Tyto jednotlivá pásma budou rozebrány v kapitole 3 [44].

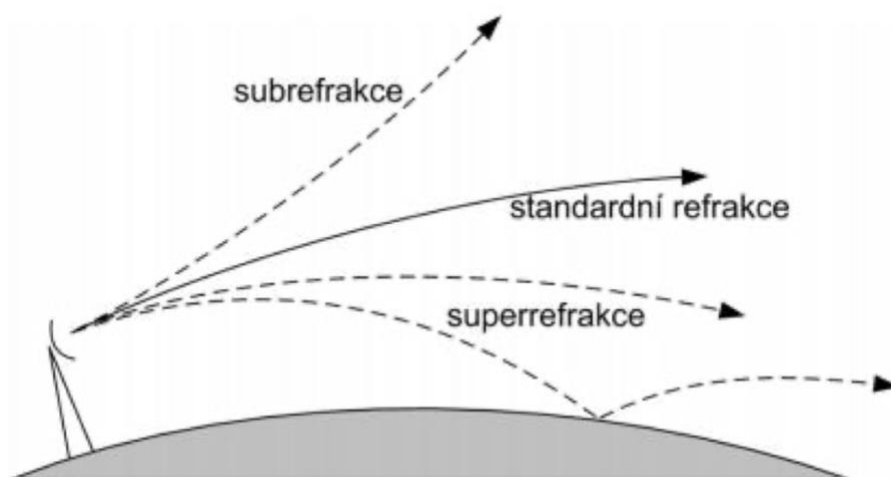
2 VLIV ZEMSKÉ ATMOSFÉRY NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY

Zemská atmosféra ovlivňuje šíření elektromagnetických vln různě. Dělíme ji na troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru a exosféru. V následující podkapitole si stručně rozebereme troposféru a ionosféru.

2.1 TROPOSFÉRA

Je nejnižší vrstvou atmosféry, sahá do výšky 10 až 18 km. Její složení je většinou homogenní, protože je promíchávána větrem, který způsobuje malé lokální nesourodosti. Postupná změna indexu lomu, který klesá s rostoucí výškou, je příčinou vzniku atmosférickému lomu (refrakce).

Typy tohoto křivočarého šíření můžeme vidět na obrázku 1. Standardní refrakce je případ, kdy se paprsek, představující vlnu, pomalu ohýbá směrem k Zemi. Subrefrakce je případ, kdy dochází k pomalému ohybu, nebo až výraznému odklonu od Země. Při superrefrakci dochází naopak k velkému zakřivení vlny [5].



Obrázek 1: Základní typy troposférických refrakcí [5]

2.2 IONOSFÉRA

Je ionizovaná část atmosféry, sahající od 60 km do 600 až 800 km. Nachází se v oblastech mezosféry a termosféry. Výskyt elektricky nabitých částic a iontů je způsobena různými faktory, hlavně působením UV zářením ze Slunce [7].

Ionosférické vrstvy dělíme na dočasné (D) a trvalé (vrstvy E a F) viz obrázek 2:

Vrstva D

Je to nejnižše položená vrstva a vzniká ve výšce 50 až 90 km pouze ve dne. Způsobuje absorpci vln na kmitočtech přibližně pod 10 MHz. Bez přítomnosti slunečního ionizujícího záření tato vrstva v noci zaniká. Vysílače v pásmu VDV, DV tak mají v noci stejný dosah při menším výšlacím výkonu.

Vrstva E

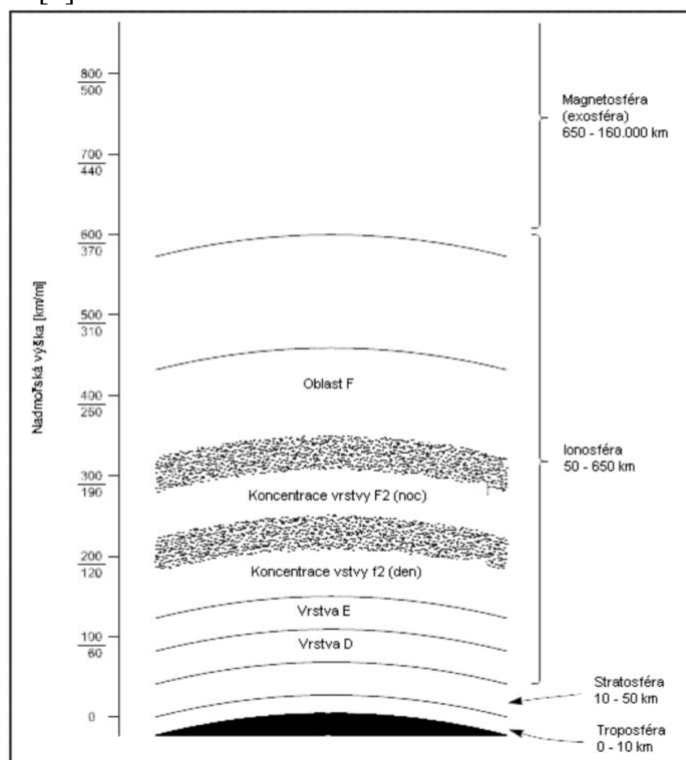
Nachází se ve výšce 90 až 130 km. Odráží zejména střední vlny. Její účinek se v noci sníží. Tato vrstva často odráží rádiové vlny do 10 MHz.

Vrstva Es

Nazývána jako sporadická vrstva. Nachází se hlavně ve středních zeměpisných šířkách, jako malé oblaky. Tato vrstva může odrážet vlny do 50 MHz.

Vrstva F

Se nachází ve výškách od 150 do 300 km. Ve dne v létě se dělí na dvě vrstvy F1 a F2. V první vrstvě F1 dochází k odrazu kmitočtu do 5,5 MHz. Druhá vrstva F2 odráží kmitočty pod 13 MHz [7].



Obrázek 2: Jednotlivé vrstvy ionosféry [6]

3 KMITOČTOVÁ PÁSMATA VYUŽÍVANÁ RADIOLOKÁTORY

V této kapitole se budu zaměřovat na kmitočtová pásma od VKV až po Ku pásma, vzhledem k zadání práce, kde jsou vypracovány podle jednotlivých kmitočtových pásem a jejich využití radiolokátory.

3.1 KLASIFIKACE PÁSEM VKV/UKV

Mnoho přístupů ke klasifikaci cílů nebo druhů cílů v klasických radarových pásmech je založeno na metodách vizualizace, které buď poskytují jednodimenzionální obrázek s rozptýleným centrem cíle a technikami vysokého rozlišení, nebo využívají cílové manévry pro generování inverzní syntetické clony radarového obrazu (ISAR), které zobrazují dvoudimenzionální rozložení rozptýleného centra cíle.

Při nízkých radarových frekvencích však požadovaná šířka pásma o velikosti několika set megahertzů není, ani není možné dosáhnout potřebného úhlového rozlišení, aby se zajistilo, že v buňce bude detekován pouze jeden cíl bez použití extrémně velkých antén.

Kromě toho dostatečné dopplerovské rozlišení pro zobrazování ISAR by vyžadovalo hodně času na integraci při srovnatelně malých dopplerovských směnách při nízkých frekvencích, během nichž zůstává stabilita cílového letadla pod otázkou. Proto je třeba hledat jiné způsoby, jak rozlišovat jednu třídu nebo typ cílů od jiného. Použití charakteristických rysů cíle, jako je polarizační vlastnosti, nebo modulace radarového signálu otáčením díly jsou nejvhodnější parametry pro analýzu radarových cílů v nízkofrekvenčních pásmech [57].

3.2 VKV

Tabulka 3: Způsob využití pásma VKV podle kmitočtu [8]

| Kmitočet | Využití |
|------------------------|--------------------------------|
| 30,005–30,01 MHz | Radary nad horizontem |
| 74,8–75,2 MHz | ILS polohové návěstidlo |
| 108–117,975 MHz | VOR/ILS LLZ, GBAS |
| 117,975–137 MHz | VKV komunikace |
| 121,5, 123,1 a 243 MHz | Tísňové frekvence |
| 216–225 MHz | SPASUR (vojenské služby v USA) |

Toto frekvenční pásmo není příliš využívané radary. Radary s velkým dosahem pro detekci letadel nebo družic však mohou být ve VKV pásmu konstruovány úspěšněji než při vyšších frekvencích. Práce radarů na těchto frekvencích není ovlivněna rušením deště, ale polární záře a meteory vytvářející silné echo signály, které by mohly zabránit detekci cíle. V tomto frekvenčním pásmu není mnoho možností aplikace radaru, protože jeho nedostatky často převažují nad výhodami. Viz tabulka 3.

3.3 UKV

Tabulka 4: Způsob využití pásma UKV [8]

| Kmitočet | Využití |
|-----------------|----------------------------|
| 328,6–335,4 MHz | ILS GP |
| 406–406,1 MHz | SAR |
| 420–450 MHz | Přehledové vojenské radary |
| 960–1 215 MHz | DME, GNSS, SSR |

Na spodním konci pásma UKV jsou zpravidla vyžadovány větší antény než na horním konci. Ve srovnání s pásmem VKV je získání větší šířky pásma méně náročné, zatímco vnější přirozené zvuky a efekty počasí představují mnohem menší problém. Na spodním konci pásma je obzvláště užitečné sledovat letadla, kosmické lodě a balistické rakety nacházející se na velké vzdálenosti. Střední rozsah tohoto pásma je využíván leteckými a kosmickými SAR. Vyšší konec pásma UKV je vhodný pro radary sledující objekty na blízké a střední vzdálenosti, viz tabulka 4 [44].

3.4 L PÁSMO

Tabulka 5: Způsob využití pásma L [8]

| Kmitočet | Využití |
|-----------------|----------------------------|
| 1 030–1 090 MHz | SSR, MLAT, ACAS, 1090ES |
| 1 215–1 350 MHz | PSR |
| 1 559–1 610 MHz | GNSS, satelitní komunikace |

Radary v pásmu L pracují s vlnovou délkou 15–30 cm a frekvenci 1–2 GHz (tabulka 5). Pásmo má širší šířku paprsku, a proto nevyžaduje kvalitní anténu s přesnou směrovostí, kterou vyžadují vyšší pásma.

Radary v tomto pásmu se používají pro studie čisté turbulence vzduchu a družice na nízké oběžné dráze k poskytování viditelnosti v reálném čase pro monitorování stavu zařízení ze vzdáleného místa a pro komunikaci mezi stroji.

Použití pásma L netrpí vysokou ztrátou signálu, ke které dochází u vysokých frekvencí při přepravě po měděných koaxiálních kabelech. Je méně náchylný na přerušení a poskytuje spolehlivé spojení. Díky těmto vlastnostem je pásmo L vhodný pro použití při vzdáleném monitorování a řízení provozu.

Výhody pásma L:

- Menší rušení způsobené deštěm;
- Levnější vybavení;
- Využívá menší antény.

Nevýhody pásma L:

- V Inmarsatu je pro kmitočtové pásmo L přidělena velmi malá šířka pásma. Jsou přiděleny frekvence od 1,3 do 1,7 GHz. Toto spektrum je velmi nákladné.

3.5 S PÁSMO

Tabulka 6: Způsob využití pásma S [8]

| Kmitočet | Využití |
|-----------------|---------|
| 2 700–3 300 MHz | PSR |

Radary v tomto pásmu pracují na vlnové délce 7,5–15 cm a frekvenci 2–4 GHz (tabulka 6). Vzhledem k vlnové délce a frekvenci nejsou radary s tímto pásmem snadno utlumeny. Díky tomu jsou užitečné pro pozorování počasí v blízkém a vzdáleném dosahu. Nevýhodou tohoto radarového pásma je však to, že je potřeba velká anténní parabola a velký motor k jejímu napájení.

Pásmo S je flexibilní a výkonné. Technologie může být použita pro vydávání tísňových signálů v nehodových situacích a pro poskytování dat a stavu v reálném čase pro dopravní a povětrnostní podmínky. Tyto služby pak mohou být integrovány s navigačními technologiemi, které jsou nyní velmi rozšířené ve vozidlech a mobilních zařízeních, a umožňují uživatelům zobrazovat aktualizovaná data v reálném čase a místní informace.

Výhody pásma S:

- V porovnání s pásmy Ku a Ka je méně citlivý na déšť.

Nevýhody pásma S:

- Podporuje nižší propustnost;
- Má úzké pásmo spektra;
- Velikosti antén jsou větší.

3.6 C PÁSMO

Tabulka 7: Způsob využití pásma C [8]

| Kmitočet | Využití |
|-----------------|---------------|
| 4 200–4 400 MHz | Radiovýškoměr |
| 5 030–5 150 MHz | MLS |
| 5 350–5 470 MHz | AWR systém |

Radary v pásmu C pracují na vlnové délce 3,8–7,5 cm a frekvenci 4–8 GHz (tabulka 7). Vzhledem k vlnové délce a frekvenci nemusí být anténní parabola příliš velká, což dělá radary pracující v tomto pásmu cenově dostupnými pro televizní stanice. Signál je snadněji utlumen, takže tento typ radaru se nejlépe používá pro pozorování počasí na krátké vzdálenosti. Frekvence umožňuje radarům v kmitočtovém pásmu C vytvořit menší šířku paprsku pomocí menší satelitní paraboly.

Výhody pásma C:

- Má širší a globální pokrytí;
- Má nižší zpoždění šíření;
- V porovnání s jinými pásmy má menší útlum.

Nevýhody pásma C:

- Velikost antény je velká;
- Propustnost je menší ve srovnání s jinými pásmy.

3.7 X PÁSMO

Tabulka 8: Způsob využití pásma X [8]

| Kmitočet | Využití |
|-----------------|-----------------|
| 8 750–8 850 MHz | Dopplerův radar |
| 9 345–9375 MHz | AWR |
| 9 000–9 200 MHz | PAR, ASDE |

Radary v tomto pásmu pracují na vlnové délce 2,5–3,8 cm a frekvenci 8–12 GHz (tabulka 8). Vzhledem k menší vlnové délce jsou tyto radary citlivější a dokážou detekovat i menší částice. Tyto radary se používají k pozorování vývoje mraků, protože mohou detekovat malé částice vody a také slouží k detekci lehkých srážek, jako je sníh.

Radary pracující v pásmu X se také velmi snadno utlumují, takže se používají pouze pro velmi krátké pozorování počasí. Většina velkých letadel je vybavena radary využívané v pásmu X, které zachycují turbulenci a další jevy počasí. Toto pásmo se také využívá některými vojenskými radary rychlosti a některými kosmickými radary.

Výhody pásma X:

- Útlum deště je dominantní na rádiových frekvencích nad 10 GHz. V porovnání s jinými vyššími frekvenčními pásmy, jako je pásmo Ku, tedy pásmo X nemá mnoho rušení ze slábnutí deště;
- Menší antény;
- Vyšší výkon;
- Pásmo X podporuje detekci menších částic v radaru;
- Náklady na zařízení v pásmu X jsou nižší.

Nevýhody pásma X:

- Má větší útlum v důsledku deště, sněhu, ledu atd.;
- Radar podporuje velmi omezené měření čistého vzduchu.

3.8 KU PÁSMO

Tabulka 9: Způsob využití pásma Ku [8]

| Kmitočet | Využití |
|----------------|-----------------|
| 13,25–13,4 GHz | Dopplerův radar |
| 15,4–15,7 GHz | ASDE |

Radary pracují s vlnovou délkou 1,7–2,5 cm a s frekvencí 12–18 GHz. Toto pásmo je rozděleno uprostřed kvůli silné absorpční lince vodní páry. Je podobné pásmu X, ale je ještě citlivější. Kromě toho se také používá vojenskými radary.

Výhody pásma Ku:

- Menší antény;
- Poskytuje široké pokrytí paprsku ve srovnání s jinými pásmy;
- Poskytuje vyšší propustnost ve srovnání s nižšími pásmy a menší než Ka pásmo.

Nevýhody pásma Ku:

- Také trpí útlumem deště v důsledku absorpce elektromagnetických vln kapkami vody. Toto je vyšší než C pásmo.

[31], [35], [43], [44], [56], [57]

4 RADIOLOKAČNÍ TECHNIKA

Princip fungování radaru je velmi podobný principu odrazu zvukových vln. Když se vykřikne směrem k objektu, který dokáže odrazit zvuk (například, kaňon nebo jeskyně), pak je možné slyšet ozvěnu. Podobně tomu, když je známá rychlost šíření zvuku ve vzdušném prostoru, lze určit směr a vzdálenost k objektu. Je to možné díky tomu, že vyžadovaný čas pro slyšení ozvěny může být hrubě přepočítán do vzdálenosti, pokud zase je známá rychlost šíření zvuku.

Radar používá elektromagnetické impulzy takovým způsobem, že elektromagnetická energie prochází od emitoru k reflexnímu objektu, přičemž malá část odražené energie se vrací do bodu instalace emitoru. Tato energie se nazývá echo, stejně jako v případě zvukové vlny. Radiolokátory používají echo k určení směru a dosahu reflexního objektu [10].

4.1 FUNKCE ZÁKLADNÍCH KOMPONENTŮ RADARU

Přestože radarové systémy s pulzní modulací se značně liší ve svých detailech, jsou jejich provozní principy v podstatě stejné pro všechny systémy. Funkční obvod základního pulzního radaru obvykle obsahuje šest hlavních komponentů, mezi nimiž jsou následující:

Napájecí zdroj – zajišťuje napětí střídavého a stejnosměrného proudu potřebné pro provoz součástí radarového systému. Nemusí však být představen v podobě jednoho bloku. Často se stává, že funkce napájení se provádí různými typy napájecích zdrojů distribuovaných mezi součástmi radarového obvodu.

Modulátor – vydává synchronizační signály, které spouštějí vysílač tolikrát, kolik je potřeba za sekundu. Modulátor taktéž spouští indikátor a koordinuje další související obvody, což umožňuje nastavit řízení frekvence opakování impulzů (PRR) a zajišťuje spojení doby přenosu impulzu k cíli a jeho návratu jako ozvěny.

Vysílač – generuje vysokofrekvenční energii ve formě krátkých silných impulzů. Vzhledem k požadovaným frekvencím a výstupnímu výkonu se generátor vysílače vztahuje ke zvláštním typům a je známý jako MAGNETRON.

Anténní systém – přijímá radiofrekvenční energii z vysílače, vyzařuje ji ve vysoce cíleném paprsku, přijímá všechny vracející se echa a přenáší je do přijímače.

Přijímač – zesiluje slabé rádiové frekvence, které se vracejí k cíli, a přehrává je jako video impulzy přenášené na indikátor.

Indikátor – vydává vizuální indikaci echo impulzů takovým způsobem, aby se poskytla požadovaná informace [11].

4.2 ZÁKLADNÍ DRUHY ANTÉN

Anténa může pracovat jako vysílač nebo přijímač. Rozdělujeme podle:

- SVD – všesměrová, směrová;
- Konstrukce – parabolická, dipólová, tyčová, fázová atd.;
- Šířky kmitočtového pásma – úzkopásmové, širokopásmové;
- Použití – základová, mobilní, přenosná [12].

4.3 SMĚROVÝ VYZAŘOVACÍ DIAGRAM ANTÉNY RADARU

Směrový vyzařovací diagram vyjadřuje směrovost vlastností antény a ozařuje ten prostor, ve kterém se nachází cíle k detekci. Anténní systém se otáčí kolem vertikální osy, přičemž rychlost otáčení se musí nastavit takovým způsobem, aby radar zachytil odrazy ve směru azimutu a od objektů, které se nachází ve vzdálenosti blízké dosahu radaru. Ideální tvar diagramu antény je přitom v azimutu velmi úzký. Prostor výskytu cílů se taktéž omezuje několika aspekty (vertikálně), k nimž patří maximální předpokládaná výška letu cílů, maximální dosah radaru, nejmenší velikost polohového úhlu daná pozemními překážkami a největší velikost polohového úhlu [11].

4.4 METODA SNÍMÁNÍ PROSTORU

Radar je možné používat pro prohledávání prostoru krytí neboli snímání prostoru, protože vysílá a přijímá energii anténou. Azimutem cíle se nazývá úhel mezi směrem na sever a horizontální projekcí směru k cíli. Tento úhel se počítá ve vodorovné rovině od směru na sever ve směru hodinových ručiček. Azimut se také může počítat ze podélné osy letadla, ze které probíhá měření (tzv. relativní azimut) [14].

Azimut cíle se měří ve směru hlavního paprsku antény v okamžiku příchodu signálu odraženého od cíle. Směr antény, který je charakterizován hodnotou směrového koeficientu, je schopnost antény soustředit energii v daném směru. Anténa s vysokým poměrem směrového svazku se nazývá směrovou. Podle pozice směrové antény v okamžiku příjmu odraženého impulzu je možné určit azimut a úhel místa cíle. Přesnost měření úhlových souřadnic závisí na směrových vlastnostech antény [14].

Antény většiny radarů jsou navrženy tak, aby vytvořily paprsek směrového diagramu v zadaném směru. Změnou úhlové polohy antény je tedy možné posouvat paprsek v prostoru. Tvar paprsku je takový, že amplituda echa se mění při průchodu paprsku směrem k cíli. V reálných radarech se anténa pohybuje neustále, kdyžto bod maxima odraženého signálu se sleduje speciálním vybavením nebo operátorem vizuálně a je právě bodem, ve kterém paprsek ukazuje přímo na cíl. Radarová zařízení pro sledování nebo řízení výzbroje obvykle řeší úkol hledání maximální amplitudy echo signálu, po kterém se provede přidržení paprsku v tomto směru ručně nebo pomocí automatických systémů sledování [11].

4.5 VZDÁLENOST CÍLE

Rádiové impulzy vysílané radarem mají velmi vysoký výkon a jsou zaměřeny jedním konkrétním směrem, a to směrem rychlostí světa. Pokud se v prostoru nachází překážka, pak část energie impulzu se rozptýlí do všech směru a jen velmi malá část původního impulzu se odráží v opačném směru, tedy ve směru antény radaru. Tato informace může být přijata a použita k dalšímu zpracování, zatímco vzdálenost cíle pomocí radaru může být měřena běžným osciloskopem [13].

Pro výpočet minimální vzdálenosti, na kterou se cíl může být detekován, je třeba přesně určit časový interval mezi vyslaným impulzem a přijatým echem. K tomu se využívá

doba zpoždění vysokofrekvenčního vysílaného signálu a rychlost šíření světla c_0 zaokrouhlená do $3 \cdot 10^8$ m/s. Vzorec pro výpočet vzdálenosti cíle tedy bude mít podobu:

$$2r = c \cdot \Delta t,$$

kde r je vzdáleností radaru od cíle, c je rychlostí světla, zatímco Δt je časovou prodlevou mezi vysláním signálu a příjmem odrazu [13].

4.6 DÉLKA JEDNOHO PULZU

Pod pojem délka jednoho pulzu se rozumí doba trvání vysílaného radarového impulzu, která se obvykle měří v mikrosekundách. Právě délka pulzu určuje minimální vzdálenost, na které může být cíl vyhledáván a identifikován. Pokud je cíl tak blízko vysílače, že se ozvěna vrátí do přijímače před ukončením přenosu, ozvěna bude zřejmě maskována vysílaným impulzem. Ku příkladu radarová jednotka s impulzem o délce $1 \mu\text{s}$ bude mít minimální dosah 150 m, tudíž ozvěnu cíle v rámci této vzdálenosti nebude vidět na radaru kvůli maskování vysílaného impulzu. Aby cíl byl detekován, musí se pro tuto vzdálenost použít krátký impulz o cca $0,1 \mu\text{s}$ [11].

Tyto podmínky se berou v úvahu moderními radary. Mnoho z nich je navrženo tak, aby pracovalo jak s krátkými, tak s dlouhými impulzy. Takže pokud je vzdálenost krátká, zařízení se automaticky přepne na kratší délku impulzu [11].

4.7 MINIMÁLNÍ DOSAH

Při použití různých antén pro přenos snímacího impulzu a příjem impulzu odraženého od cíle je minimální dosah impulzního radaru téměř nulový. Nicméně při použití společné antény pro přenos a příjem impulzu může vysílač a přijímač radaru pracovat pouze střídavě. To je způsobeno tím, že jako vysoce citlivé zařízení je radarový přijímač vystaven silnému snímacímu impulzu a kvůli němu může selhat. Aby se tomu zabránilo, v době záření snímacího impulzu se přijímač uzavírá a dosah úměrný této době se nazývá minimálním dosahem radaru. Jinak řečeno, minimální dosah radaru je minimálně možnou měřící vzdáleností od antény, kterou musí mít cíl, aby byl detekován. Tento dosah určuje rozměry takzvané slepé neboli mrtvé zóny [14].

4.8 FREKVENCE OPAKOVÁNÍ IMPULZŮ

PRI (Pulse Repetition Frequency) je frekvencí opakování impulzů radarové jednotky, která označuje počet vysílaných impulzů za jednotku času, nejčastěji sekundu. Radar vysílá každý vysokofrekvenční impulz v průběhu času přenosu (nebo délky trvání impulzu τ), očekává vrácení echo signálu v průběhu času slyšení nebo intervalu příjmu a poté vysílá další impulz. Čas mezi začátkem jednoho impulzu a začátkem dalšího impulzu se nazývá dobou opakování impulzů (PRT – Pulse Repetition Time) nebo periodou opakování impulzů (PRP – Pulse Repetition Period). Doba opakování impulzů je veličinou, která je inverzní frekvenci opakování impulzů. To znamená, že $PRT = 1/PRP$ [15].

Tady je možné podotknout, že interval příjmu je časový interval mezi vyzařovanými impulzy. Interval příjmu je vždy menší než rozdíl mezi dobou opakování impulzů a dobou

trvání impulzu. Někdy je omezen takzvaným klidovým intervalem, během něhož je přijímač již vypnutý těsně před dalším vyzařovaným impulzem [11].

5 AKTIVNÍ RADIOLOKÁTORY

Charakteristikou aktivního systému je vyzařovat vlastní elektromagnetické vlny. Podle pracovního principu lze aktivní radar dále rozdělit na primární radar a sekundární radar. Primární radar používá odraz vysílané vlny k určení požadované polohy cíle a charakteristických údajů a sekundární radar přijímá odezvu od objektu osvětleného přenášenou vlnou.

5.1 PRIMÁRNÍ RADARY V LETECTVÍ

Dnes všude rozšířené slovo RADAR vzniklo na konci 30. let minulého století jako zkratka z anglického výrazu Radio Detection And Ranging. Radary se původně využívaly pro potřeby včasného varování před nepřátelskými letadly v okolí. Zpravidla letecké radary fungují v pásmech UKV či SKV a jejich podstatou je překonávání dvojité vzdálenosti mezi cílem a zdrojem vysokofrekvenční energie. Funguje tak, že se silný vysokofrekvenční signál odesílá do prostoru a následně se v něm setkává s letadlem. Kvůli tomu se malá část signálu odraží zpět, tudíž prostřednictvím tohoto malého procenta vrácené energie je možné objekt detekovat. Kromě toho, pokud se změří čas od odeslání signálu do přijetí zpětné energie, pak je možné definovat, na jaké vzdálenosti se letadlo nachází. Přesná poloha objektu se definuje prostřednictvím několika primárních radarů, přičemž podobné uspořádání je známo jako multi–statický primární přehledový radar. Při shrnutí výše uvedených informací vychází, že pod pojmem radiolokace je chápáno měření časového intervalu mezi vysláním signálu a příjmem jeho odražené části. Konkrétní kurzový a elevační úhel se pak měří použitím směrových antén.

Na základě konstrukce lze radiolokátory klasifikovat na radiolokátory s impulsní modulací a frekvenční modulací. První typ radiolokátorů je v současném letectví nejrozšířenější a funguje na výše zmíněném principu, v rámci, kterého se měří časový interval mezi vysláním a přijetím impulzu, zatímco vzdálenost se určuje přes ukazatel změny času, který je znásoben rychlostí světa. Radiolokátory druhého typu využívají vysílaný signál, který periodicky mění kmitočty. Vzdálenost se tak měří nepřímou, ale s ohledem na změny času, tj. rozdíly mezi frekvencí přijímaného a současně vyslaného signálu. Takové radiolokátory se využívají v situacích, kdy je zapotřebí definovat objekt na krátké vzdálenosti. Klasickým příkladem radiolokátoru s frekvenční modulací je radiovýškoměr [16] [17].

5.1.1 Základy impulsní radiolokace

V oblasti impulsní radiolokace jsou stanoveny některé základní aspekty, ukazatele a parametry. Jedním z takových parametrů je šířka impulzu, která představuje čas trvání vysokofrekvenčního impulzu udávaného v mikrosekundách. Pokud je impulz krátký, znamená to, že má lepší rozlišovací schopnosti ve vzdálenosti. Jinak řečeno, takový impulz může rozlišit dva různé objekty, i když se nachází na stejném azimutu od radaru.

Za významný parametr je v radiolokaci označen PRI (z angličtiny Pulse Repetition Interval), což je interval mezi vysláním dvou po sobě následujících impulzů. Obráceným ukazatelem tohoto intervalu je PRF (z angličtiny Pulse Repetition Frequency), který znamená

frekvenci impulzů radaru čili počet impulzů, které radar vysílá za jednu sekundu. Ne méně závažným parametrem je nosná frekvence a jeho vlnová délka, která se definuje jako podíl rychlosti světla a použité frekvence. Hodnoty a nastavení těchto parametrů mají vliv na výsledné vlastnosti a chování radaru [17].

Na výslednou energii, která je radarem přijímána, působí použitá frekvence neboli vlnová délka. Například při krátkých vlnových délkách lze evidovat dostatečně velký útlum kvůli vlivu počasí. To znamená, že pokud při letovém provozu bude posádka upozorněna na nepříznivé meteorologické podmínky, které jsou zaznamenány pozemním meteorologickým radarem, může se jednat o ještě horší počasí. Je to způsobeno tím, že při měření se využívala poměrně vysoká frekvence, tedy frekvence vyšší než frekvence palubního meteorologického radaru [17].

Vyšší frekvence může vést k tomu, že se na radaru zachytí menší cíl. Kromě toho za takové frekvenci se implementuje menší anténa, která znamená širší paprsek radiolokátoru. Její další předností je možnost zasažení do impulzu více cyklů, která zvětší energii impulzu, tudíž i dosah radaru. Zvětšování vlnové délky naopak může způsobit to, že menší cíl bude radarem míjen.

Dosah radaru pak závisí na energii impulsu (vlivem počasí). Čím větší je délka pulsu, tím je následně i větší jeho energie a tím pádem i dosah. S vyšší délkou impulsu je tak možné použít nižší nosnou frekvenci, která má menší útlum v prostředí. Vzdálenost, ve které je radar schopen detekovat objekty lze aproximovat pomocí tzv. radiolokační rovnice:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_v G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{p \min}}}$$

- G – výkonový zisk antény [–]
- $P_{p \min}$ – minimální detekovaný přijatý výkon [W]
- P_v – vyzářený impulsní výkon [W]
- R – délka dosahu radaru [m]
- λ – vlnová délka vysílání [m]
- σ – efektivní odrazná plocha cíle [m²]

V tomto kontextu je možné zmínit, že pro dvojitě zvětšení dosahu radaru, jeho výkon se musí zvětšit 16krát. Frekvence impulzů a interval mezi impulzy pak určuje maximální teoretický dosah. Nemělo by se však zapomenout na to, že dosah radaru se vypočítává jako polovina času mezi dvěma po sobě následujícími impulzy, protože vysílač musí dočkat přijetí odraženého signálu. Za přední vlastnost primárních radiolokátorů lze považovat to, že nevyžadují zařízení na palubě letadel [17].

5.1.2 Dopplerovské zpracování v primárních radarech

Toto zpracování umožňuje s přijatým (odraženým) signálem dále pracovat v závislosti na radiální složce rychlosti cíle (tedy například složku, která je nutná v určitém rozsahu radiálních rychlostí potlačit). Podle způsobu vyhodnocení přijatého signálu lze dopplerovské zpracování rozdělit na několik typů, přičemž to nejrozšířenější se nazývá MTI (Moving Target Indication). Toto zpracování bývá také někdy v české literatuře nazýváno jako

indikace pohyblivých cílů. Účelem této funkce je potlačení signálů s nulovým Dopplerovým kmitočtem, lze tak eliminovat například tzv. „ground clutter“ čili odrazy od země. Využívá se zde tak Dopplerova jevu, kdy cíl, který má určitou složku radiální rychlosti, způsobí po přijetí odraženého signálu změnu kmitočtu, tato změna se taktéž někdy nazývá Dopplerova frekvence. Nevyužívá se však typicky přímo změny frekvence, ale změny fáze výsledného přijatého signálu. U pohyblivých cílů se totiž bude měnit rozdíl ve fázi mezi vyslaným a přijímaným signálem (amplituda se bude měnit puls od pulsu). Vzhledem k tomu, že tuto změnu lze taktéž nastavit na určitý práh, došlo v minulosti k úsměvným situacím, kdy například na ruzyňském letišti přistál „nepozorovaně“ kluzák [18].

5.1.3 Druhy primárních radarů

V této podkapitole budou popsány druhy primárních pozemních radarů, které jsou využívány v letectví. V moderních systémech se však tyto informace typicky dále integrují s dalšími systémy, jako příklad lze uvést v této práci taktéž popsaný multilaterační systém anebo Advanced–Surface Movement Guidance and Control System [17].

Radary, které pracují na dlouhé vzdálenosti, jsou tzv. oblastní anebo traťové radary. Tyto radary monitorují letouny na letových cestách, a umožní tak složkám řízení letového provozu zajišťovat potřebné navigační informace, například rozestupy mezi letadly. Antény těchto radarů se obvykle umísťují na taková místa, kde výsledný signál nebude příliš ovlivněn povrchem. Jako příklad v České republice lze uvést například Buchtův kopec anebo kopec Písek. Informace z traťových radarů jsou následně vedeny do center řízení letového provozu pomocí datových spojů. Nároky na tyto radary jsou poměrně přísné. Je nutná dobrá rozlišovací schopnost, velký dosah (až 300 NM) a taktéž mají být co nejméně ovlivňovány počasím. Aby radar splňoval takové požadavky, byla v minulosti hojně užívána frekvence 600 MHz (vlnová délka 50 cm) [17].

Aby byl vysílací paprsek dostatečně úzký, musí mít radar při takto malé frekvenci však poměrně velkou vysílací anténu. Rychlost rotace antény, a i tedy obnovení radarového obrazu, je malá. Dnešní oblastní radary pracují na frekvenci 600–3000 MHz s vlnovou délkou 10–50 cm. Jejich dosah se pohybuje do 300 NM, šířka paprsku je typicky 3 stupně a rychlost rotace antény 5 až 6 ot/min. Parametr PRF se pohybuje od 270 až do 400 pulsů za sekundu [17].

Další oblastí, kde je potřeba zajistit pokrytí primárním radarem, je koncová oblast řízených letišť TMA. Vzhledem k tomu, že je zde již kladen velký nárok na přesnost a rozestupy jsou již nižší než na tratích, proto je třeba zvýšit obnovení radarové informace a vylepšit rozlišovací schopnosti radaru. Běžné radary TAR (Terminal Area Surveillance Radar) využívají nosné frekvence od 1,2 do 3 GHz s vlnovou délkou mezi 10 až 25 cm s dosahem do 80 NM. Šířka pulsu je 2° a rychlost rotace antény 8 ot/min. Hodnota PRF je pak 360 pulsů za sekundu. Služba řízení letového provozu v Praze používá pro tyto účely přehledové radary s frekvencí okolo 2,8 GHz.

Okřskový radar slouží primárně k poskytování rozestupů letounů na příletu anebo odletu. Je zde ještě přísnější nárok na přesnost určení vzdálenosti, obnovování obrazu cíle anebo rozlišovací schopnost radaru. Tyto radary pracují typicky na frekvenci okolo 3–10 GHz

s vlnovou délkou 3–10 cm a dosahem do 25 NM. Šířka paprsku se $1,5^\circ$ a rychlost rotace antény okolo 15 ot/min, parametr PRF je 700 pulsů za sekundu.

Pojezdový radar, anglicky SMR (Surface Movement Radar) anebo ASDE (Airport Surveillance Detection Equipment). Tento radar pracuje na nejvyšších frekvencích, jaké jsou používány v technice civilního letectví. Požadavek na tento typ radaru je takový, že musí pokrývat za každého počasí pojezdové dráhy, všechny vzletové a přistávací dráhy anebo stojánky. Jeho dosah je omezen pouze na letiště, případně jeho bezprostřední okolí. Má poměrně malou anténu a velice úzký paprsek. Moderní instalace pracují na frekvenci okolo 10 GHz s vlnovou délkou zhruba 3 cm při zachování stejné přesnosti. Díky tomu je tak informace méně ovlivněná počasím. Na ruzyňském letišti je primární pojezdový radar umístěn na řídicí věži a pracuje na nosné frekvenci 16 GHz. Po havárii letounu Concorde, jejíž příčinou byla kovová lamela, která odpadla z motoru DC-10, se uvažovalo o používání velmi vysokých nosných frekvencí, které by umožnily i detekci velmi malých kovových součástek na vzletové dráze [17].

V prostoru na tratích, kde nejsou nároky na přesnost takové, se používá obecně nižších nosných frekvencí. Nižší frekvence není tolik náchylná na vliv počasí, ale neumožní zachytit malé cíle, které ale nejsou ani určitým požadavkem na zachycení v traťové fázi letu, na rozdíl od povrchu letiště, kde je žádoucí zachycení i menších cílů – proto se zde užívá větších frekvencí. Na druhou stranu v případě například silné mlhy již není pojezdový radar tak přesný a mohlo by díky tomu dojít ke snižování kapacity letiště anebo k úplnému přerušení provozu, toto kompenzuje systém A-SMGS [17].

5.1.4 Přesný přibližovací radar

Využití tohoto radaru, který je také známý jako PAR (Precision Approach Radar), je dnes téměř výhradně jen na vojenských letištích, viz obrázek 3. Vzhledem k tomu, že v případě tohoto systému existuje elektronická skluzová rovina, tento systém řadíme mezi přesná přiblížení, v novějším rozdělení mezi 3D přiblížení. Tento systém se skládá ze dvou radarů, které skenují prostor v azimutální a vertikální rovině. Radar pracuje na frekvenci 9150 až 9450 MHz s vlnovou délkou 3 cm. Řídicí má výstup na obrazovkách umístěných nad sebou. Horní zobrazení umožňuje kontrolovat sestupovou rovinu a vzdálenost, dolní osu dráhy a vzdálenost. Řídicí následně vyhodnocuje odchylku letadla od obou os a předává informace o pilotovi. Přiblížení PAR je přiblížení vzhledem k využití vysoké frekvence poměrně citlivé na útlum prostředí čili na počasí. Přiblížení PAR končí ve vzdálenosti 0,25 NM od prahu dráhy [23][24].



Obrázek 3: Přesný přibližovací radar PAR [38]

Základním pokrytím tohoto systému od úvratě azimutální antény je $\pm 10^\circ$ od osy dráhy do vzdálenosti 17 km. Pokrytí sestupové antény je od 1° do 6° nad horizont. Šířka paprsku jak azimutální, tak sestupové antény je $0,5^\circ$. Přesnost v určování azimutu (horizontální přesnost) – maximální přípustná chyba v určování odchylky od osy sestupu může být 0,6 % ze vzdálenosti letadla od antény PAR + 10 % skutečné odchylky nebo 9 m podle toho, co je větší. Maximální přípustná chyba v určování odchylky od osy přiblížení může být 0,4 % ze vzdálenosti letadla od antény PAR + 10 % lineární odchylky od zvolené sestupové osy nebo 6 m podle toho, která hodnota je větší. Chyba v určování vzdálenosti od bodu dotyku maximálně 0,3 % skutečné vzdálenosti + 30 metrů. Obecně tento systém musí umožňovat dobrou detekci cíle a zároveň nesmí být příliš ovlivněn počasím. Z tohoto důvodu se zdá být frekvence 10 GHz optimální.

Jak již bylo zmíněno, tak v dnešní době se můžeme setkat s těmito radary zejména ve vojenství. Poměrně časté jsou radary PAR umožňující přiblížení na letadlové lodi, toto provedení se nazývá CCA (Carrier–Controlled Approach). Příklad systému, který využívá námořnictvo USA se nazývá AN/SPS–46(V) Precision Approach Landing System (PALS) [23][24].

5.1.5 Meteorologický radar

Specifickým typem primárního radaru, jenž bude popsán v této kapitole, je meteorologický radar. Ten slouží k zobrazení počasí nad určitým územím. Rozsáhlejší zobrazení oblačnosti anebo infračerveného záření pak umožní například satelity NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Meteorologický radar je někdy nazýván jako „Weather Surveillance Radar“ (WSR) anebo Dopplerův meteorologický radar. Jeho primárním účelem je detekce srážek a taktéž případně odhadnout typ srážek. Moderní systémy, které využívají taktéž Dopplerova jevu jsou schopny určit kromě intenzity srážek také pohyb vodních kapének (na základě změny frekvence). Veškerá tato data mohou být následně analyzována k posouzení dalšího vývoje meteorologické situace. Níže na obrázku 4 je zobrazen příklad meteorologického radaru nacházející v Oklahomě.



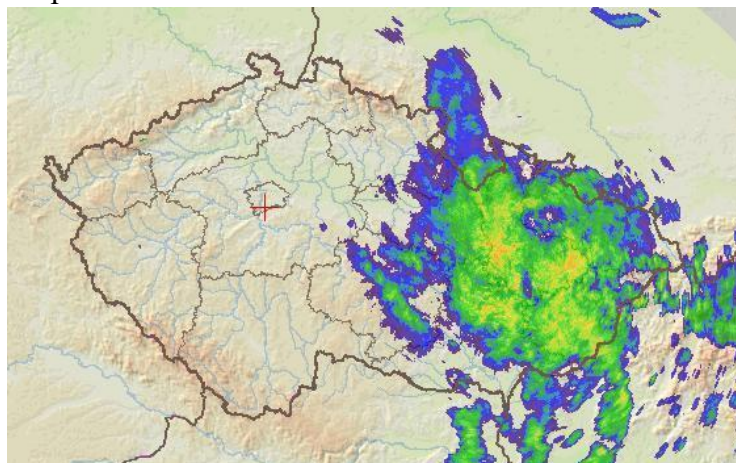
Obrázek 4: Meteorologický radar v Oklahomě [39]

Vzhledem k tomu, aby vlnová délka pulsu nebyla přibližně dlouhá jako délka vodní kapénky, volí se obvykle vlnová délka okolo 1–10 cm. To odpovídá přibližně desetinásobku průměru vodní kapénky. Kratší vlnové délky jsou vhodnější pro menší kapénky, ale signál je taktéž výrazně utlumen vlivem počasím. Díky tomu jsou obvykle použity radary využívající vlnovou délku 10 cm (pásmo S), které jsou však dražší než radary pracující s vlnovou délkou 5 cm (pásmo C). Využití mají taktéž radary operující v pásmu X, které však pracují pouze pro detekce na kratší vzdálenosti. Antény v pásmu Ka jsou použité velmi málo, využití mají pouze pro detekci mlhy anebo lehkého mrholení. Meteorologické radary v pásmu W našly využití pouze pro značně limitované univerzitní výzkumy. Dosah radaru se tak liší v závislosti na tom, v jakém pracuje pásmu, respektive s jakou pracuje nosnou frekvencí, typicky ale bývá dosah maximálně pár set kilometrů.

Moderní systémy taktéž umožní určit výšku hledaného cíle. Díky využití Dopplerova jevu lze taktéž kontinuálně monitorovat pohyb srážek. Využívá se zde opět toho, že odražený puls má odlišnou fázi oproti pulsu vyslanému.

Přijatý signál je taktéž dále analyzován pro posouzení odrazivosti signálu – pro určení intenzity srážek. Vzhledem k odlišné dielektrické konstantě cíle se vyjadřuje odrazivost v dBZ. Pokud je přijatý signál větší jak 65 dBZ, jedná se o extrémně silné srážky a výsledné zobrazení je v purpurové (magenta) barvě. Silné srážky jsou klasifikovány jako silnější než 50 dBZ a jsou označeny červeně. Žluté jsou srážky s dBZ větším než 35 a zelené větší než 20 dBZ. Pro piloty je důležité, že vzhledem k tomu, že meteorologické radary na zemi pracují obvykle na vyšší frekvenci než palubní meteorologický radar, je nutné brát informaci například o velmi silných srážkách vážně. Důvod je ten, že pozemní meteorologický radar pracující na vyšší frekvenci je více vystaven útlumu počasí, kterého může být horší, než dispečer vidí [19][21][22].

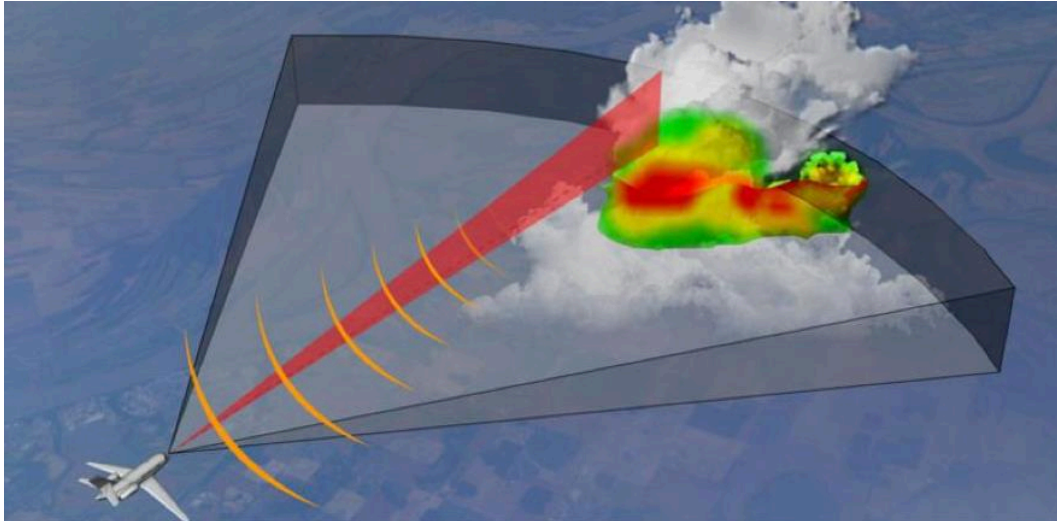
Aktuální srážky a bouřky se v České republice měří na základě dvou meteorologických radarů. První je umístěn v Brdech u Prahy (860 m n.m.), druhý radar je na hoře Skalky (730 m n.m.) [20]. Na obrázku 5 je zobrazena meteorologická situace nad Českou republikou.



Obrázek 5: Zobrazení meteorologické situace [36]

5.1.6 Palubní meteorologický radar

Palubní meteorologický radar (Airborne Weather Radar – AWR) má za cíl zlepšit a rozšířit údaje o počasí, které posádka potřebuje k zajištění hladkého letu v potenciálně nebezpečném počasí pracuje s kmitočtem 9345 MHz až 9405 MHz a patří do pásma X. Tato frekvence je optimální vzhledem k tomu, že systém detekuje vodní kapénky obsažené v ovzduší. Díky tomu lze zobrazit počasí, jaké může být potenciálně nebezpečné pro průběh letu, jako jsou typicky oblaky typu cumulonimbus. Systém tak typicky nebude detekovat mlhu, díky tomu, že vodní kapénky v ní obsažené jsou velmi malé. Na druhou stranu AWR taktéž nemusí detekovat hydrometeory, které budou schované za jiným oblakem typu cumulonimbus. Nicméně moderní systémy jsou již schopny posádku letadla na možnost takové situace upozornit. Palubní meteorologický radar spolehlivě detekuje vodní kapénky, ale také hůře bude detekovat suchý sníh anebo suché kroupy. Na obrázku 6 je zobrazen směrový vyzařovací diagram palubního meteorologického radaru[25][26].



Obrázek 6: SVD palubního meteorologického radaru [41]

Tento systém se skládá z antény, která je společně s přijímači Localizeru a Glideslope umístěná v tzv. radome (v přídi letadla). Tato anténa je na moderních letadlech zejména plochá („flat antenna“), jako tomu je například u letounů Airbus A320 anebo A330. Na starších letadlech se využívá parabolická anténa, která produkuje široký hlavní paprsek, a taktéž velké postranní paprsky, které jsou zdrojem chyb. Z tohoto důvodu se od této antény upustilo a dnes ji můžeme spatřit například na letounech A300, A310 anebo na původních letounech A320.

Díky relativně velkým postranním paprskům má parabolická anténa problém spolehlivě detekovat stříh větru anebo se často zde vyskytoval při přiblížení fenomén tzv. „kočičích očí“, kdy se posádce ve výšce okolo 3 000 ft nad zemí zobrazily dvě „oči“ v úhlu zhruba 45° na každou stranu od směru letu. Z těchto důvodů se na moderních letadlech využívá pro potřeby AWR zejména ploché antény. Stabilizace antény byla na starších systémech zajištěna pomocí gyroskopu, současné systémy využívají informace z inerciálního referenčního systému, díky čemuž může dojít ke stabilizaci antény v klopení a klonění tak, aby byla neustále v poloze paralelně s horizontem. Pokud stabilizace selže, je anténa automaticky nastavena a držena v rovině s křídly letadla. Díky tomu tak může dojít při náklonu k zobrazení pozemních odrazů místo počasí [25][26].

5.1.7 Radiovýškoměr

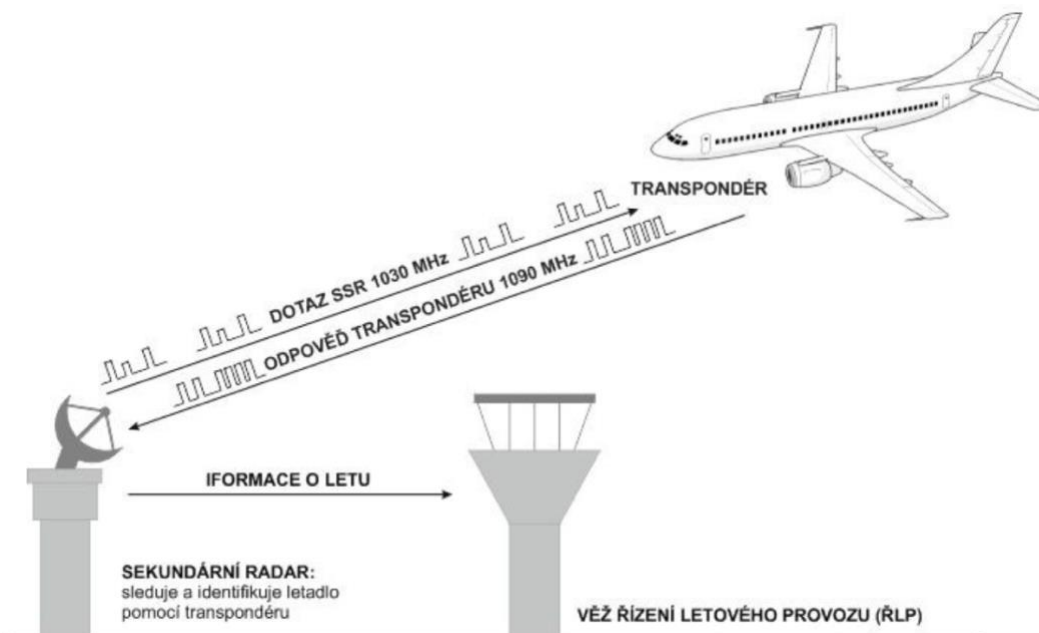
Tento systém je spolu s palubním meteorologickým radarem (AWR) dalším systémem na palubě letadla, který využívá principu primárního radaru. Na rozdíl od AWR tento systém nevyužívá klasickou techniku vyslaného pulzu, který se odrazí od oblačnosti a my ho opět přijmeme. Princip činnosti v případě tohoto systému je takový, že vysílací anténa radiovýškoměru vyšle spojitou vlnu, která periodicky mění svoji frekvenci. Tato vlna se po odrazu od země vrací zpět směrem k letadlu, které vlnu přijme a vyhodnotí rozdíl frekvencí mezi přijímaným a současně vysílaným signálem. Díky této změně frekvence může dojít k velmi přesnému vyjádření výšky letadla na zemi, čehož se využívá například při automatickém přistání [27].

Radiovýškoměr pak pro svoji činnost využívá frekvence 4 400 MHz. Moderní systémy jsou schopny měřit výšku typicky do úrovně 2 500 ft nad povrchem země. Nejčastější provedení je takové, že jsou na letadle dva radiovýškoměry, přičemž jeden se skládá z vysílací antény a současně přijímací antény. Taková zástavba je typická například pro letoun A320. Určitou výjimku představuje letoun A380, jenž nese celkem tři radiovýškoměry, což představuje větší redundanci pro automatické přistání. Dále se také využívá pro určení výšky rozhodnutí (Decision height) pro kategorie přiblížení CATII a CATIII. Vyjádření minim pro CAT I je dle barometrického výškoměru, a proto se označuje jako „decision altitude“.

Radiovýškoměr se také využívá pro automatické přistání známé jako „AUTOLAND“, pro které jsou nutné minimálně dva radiovýškoměry. Z tohoto důvodu jsou právě na letounu A380 instalovány tři radiovýškoměry – v takovém případě nedochází při ztrátě jednoho radiovýškoměru k degradaci systému. Obecně na všech letounech typu Airbus od řady A320 výše dochází při ztrátě všech radiovýškoměrů po vysunutí podvozku k přechodu do tzv. „direct law“, kdy letadlo ztrácí veškeré ochrany letové obálky a taktéž se velmi mění charakteristika a vlastnosti řízení letadel. Posádka si takové skutečnosti musí být velmi dobře vědoma [27].

5.2 SEKUNDÁRNÍ RADARY

Sekundární radary pracují ve dvou kmitočtech 1030 a 1090 MHz, tedy v pásmu L. Princip činnosti spočívá ve vyslání dotazu radarem a vyhodnocení odpovědi vyslané odpovídačem letadla viz obrázek 7. Sekundární radar obecně odstraňuje, případně redukuje chyby, které ovlivňují primární radar.



Obrázek 7: Komunikace radaru s letadlem [45]

5.2.1 Mód S

Z důvodu eliminace vedlejších účinků režimů A a C byl po dlouhou dobu upřednostňován režim S. Jedná se o systém, který pracuje se stejnou frekvencí dotazů a odpovědí jako původní SSR. Rozdíl je v tom, že se používají dvě fáze výslechu a obě se pravidelně střídají. První fáze se nazývá „All-call“, druhá se nazývá „Roll-call“.

Problém v režimu S spočívá v tom, že pozemní dotazovač může být přetížen v oblastech s vysokým radarovým pokrytím, kde se paprsky mnohokrát překrývají. Jedním z možných řešení je seskupit radary do klastrů, kde je volání „All call“ vysláno pouze jedním z radarů, a získaná data jsou odeslána na ostatní radary v klastru prostřednictvím přenosu pozemních dat [28][54].

5.2.2 Zvláštní kódy SSR

- **7700** – indikace nebezpečné situace. Kód se nastaví nejdříve po vzniku nebezpečí. Pokud letadlo již vysílá svůj kód a přijímá signály ATS, tento kód by neměl být dále používán;
- **7600** – indikace poruchy rádiového spojení;
- **7500** – indikace nezákonného zásahu/narušení;
- **7000** – identifikace letadla neřízeného letu, které neobdrželo od ATS žádné instrukce o používání odpovídače (VFR);
- **2000** – identifikace letadla řízeného letu, které neobdrželo od ATS žádné instrukce o používání odpovídače;
- **0000** – porucha odpovídače [1].

5.2.3 Překrývání odpovědí SSR

Garbling

Jedním z hlavních nedostatků tradičního modelu je interference synchronizace způsobená překrývajícími se odezvami způsobenými jedinou pozemní stanicí. Odezvy dvou letadel s rozdílem vzdáleností menším než 20,3 μ s (tj. ekvivalent 1,7 NM) se časově překrývají. Přijímač může vyhodnotit získaný signál jako neplatný. Tato situace se nejčastěji vyskytuje v oblastech se silným leteckým provozem (například TMA) nebo v letadlech letících ve stejném úhlu azimutu, ale v různých výškách letu. Existují dvě hlavní metody pro eliminaci synchronizačního rušení. První metoda se zaměřuje na konstrukci dotazovacího vysílače. V tomto případě je žádoucí, aby šířka paprsku v horizontální rovině byla co nejmenší (obvykle mezi 2°–4°). Dále je nejúčinnějším způsobem, jak se zbavit rušení synchronizace, je snížit počet dotazů a odpovědí, což vede k použití režimu S, který umožňuje odesílání dotazů na adresu [29][55].

Fruiting

Odpovědi na přijaté dotazy budou zaslány do cíle ve všech směrech. Jedním ze způsobů, jak eliminovat asynchronní rušení, je použít potlačení bočního laloku cesty odpovědi. SSR je vybaven druhou anténou, která může přijímat signály ze všech směrů. Ve výsledku jsou získány dva kanály, jeden z hlavní antény SSR a druhý z všesměrové antény, které jsou zpracovávány v porovnávacím obvodu přijímače. Zachovány jsou pouze signály s vyšší amplitudou z hlavního kanálu antény SSR. Všechny odpovědi získané potlačením bočních laloků anténního přijímače budou ignorovat všechny cílové odpovědi způsobené jiným dotazovačem [30].

5.2.4 CRC (Cyclic redundancy check)

Cyklická redundantní kontrola se taktéž využívá v provozu SSR. V zásadě se jedná o to, že tato funkce zjišťuje případně chyby ve vysílaných datech – hledá takové chyby, kdy například číslo v kódu 1 přeskočí na 0. Obecně se vezme datový blok, což je posloupnost jednotlivých bitů, ze kterého zjišťujeme případnou chybu. Datový blok se následně podělí generujícím polynomem (což je známá posloupnost 1 a 0). Následně obdržíme určitý výsledek a zbytek, se kterým se dále pracuje. Zbytek se sečte s 24bit ICAO adresou letadla a tento výsledek se dá následně na konec přenášených dat – toto celé se odešle v rámci 112bitové zprávy. Pozemní stanice tuto odpověď přijme, podělí ji opět generujícím polynomem a po tomto vydělení by měla vyjít 24bit ICAO adresa letadla. Pokud se tak stalo, tak v přenosu dat nedošlo k žádné chybě. CRC se v letectví využívá taktéž například v datovém bloku úseku konečného přiblížení pro LPV anebo GLS přiblížení [51].

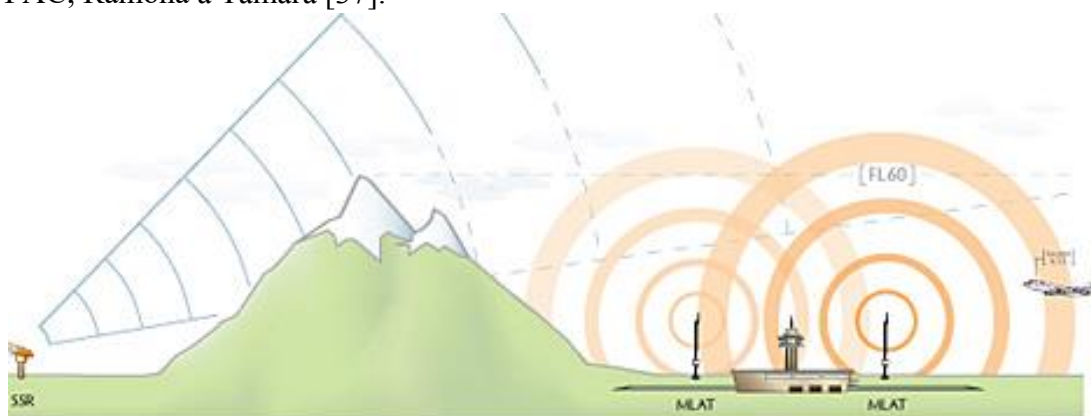
6 PASIVNÍ RADIOLOKÁTORY

Česká republika a bývalé Československo vždy byly světovou jedničkou ve vývoji pasivních sledovacích systémů (PSS). Jedná se o systém odlišný od klasických radarů tím, že neprovádí vysílání a ve své podstatě plně nahrazuje funkce SSR. Výjimku v PSS tvoří modul A/C/S doplňující systém o pozemní dotazovač, který je obzvláště účinný v situacích, kdy sekundární radar není schopen pokrýt nebo nedostatečně pokrývá prostor pro detekování cíle. Kromě svého hlavního cíle dotazovač slouží ke kontrole správnosti a ověřování přesnosti fungování radarového systému. Pasivní radarové systémy používají signály, které generují samotný cíl nebo jiné nespolupracující cíle, k určení dat cíle, a pouze se odrážejí od cíle.

6.1 MULTILATERACE

Princip činnosti multilateračního systému spočívá v tom, že letadlo vysílá na frekvenci 1090 MHz odpovědi SSR anebo zprávy ADS-B (obrázke 8). Stanice, které jsou umístěné na zemi v přesně známé poloze přijmou zprávu ve známý čas. Sice neznáme, kdy byl signál vyslán, ale víme, kdy jsme ho přijali na každé z jednotlivých stanic. Jelikož se každá stanice nachází v jiném místě, tak i signál byl přijatý každou stanicí v jiný čas. Díky nim je možné určit přesnou polohu cíle, která se vypočítává jako rozdíl mezi časem příchodu signálu na každou přijímací stanicí. Poloha letounu je tedy určena průsečíkem hyperbolických ploch, které odpovídají časovým rozdílům vypočítaným u každé stanice.

Přestože rovnice výpočtu nejsou velice složité, jejich praktické provedení je náročné z technického hlediska. Navíc vzhledem k tomu, že se cíle pohybují, tyto výpočty je potřeba provádět s velkou rychlostí opakovaní, což PSS právě dělají. Vedle nejznámějšího pasivního systému Věra mezi rozšířené pasivní sledovací komplexy vyrobené v Československu, patří KOPÁČ, Ramona a Tamara [37].



Obrázek 8: Srovnání SSR a MLAT v hornaté oblasti [40]

Dále se můžeme setkat s pojmy WAM (Wide Area Multilateration) a LAM (Local Area Multilateration). Ty se liší rozsahem pokrytí, jelikož WAM, jak již jeho název napovídá, dokáže pokrýt větší oblasti, typicky určitou část vzdušného prostoru dané země. LAM slouží například pro sledování provozu v okolí letišť. Ať se jedná o název WAM anebo LAM,

tak princip činnosti celého systému je stejný a spočívá v metodě TDOA (Time Difference Of Arrival), kdy se měří rozdíl časů příchodu signálů na konkrétní pozemní stanice. Tato metoda bude podrobněji popsána v následujících odstavcích. Obecně se v případě tohoto systému můžeme setkat se dvěma konfiguracemi. Tou první je pasivní konfigurace, ve druhém případě pak verze aktivní, která je doplněna o aktivní dotazovač, jenž umožní přesnější měření zejména v hornatém terénu a taktéž získá od letadla tzv. BDS registry, které obsahují údaje například o rychlosti.

Problém nalezení průsečíků hyperboloidů je tak matematicky popsán následovně:

$$c \cdot (T_1 - T_2) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}$$

$$c \cdot (T_1 - T_3) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}$$

$$c \cdot (T_1 - T_4) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2}$$

Kde x, y, z jsou souřadnice cíle, $x_1, y_1, z_1, \dots, x_4, y_4, z_4$ souřadnice přijímacích stanic, $T_1 \dots T_4$ časy příchodu na jednotlivé stanice.

Po přijetí signálů pozemními přijímači putuje signál do centrální procesorové jednotky, se kterou jsou všechny pozemní přijímače datově propojeny. Velmi důležitá je pro správnou činnost celého systému správná vzájemná konfigurace přijímacích stanic a jejich umístění. Z tohoto důvodu se u systémů WAM, které vykrývají relativně velké prostory, lze setkat s umístěním stanic v horách. Jako příklad lze uvést přijímač na Jedlové hoře u Chomutova viz obrázek 9. Dalším velmi důležitým aspektem je správná časová synchronizace přijímacích stanic, která zároveň patří mezi největší chybu systému (pokud není časová synchronizace dodržena) [53].



Obrázek 9: Příjemcí anténa systému P3D–WS na Jedlové hoře u Chomutova [42]

6.2 PSS VĚRA

Pasivní sledovací systém Věra je systém sloužící jako nezávislý zdroj informací o vzdušné situaci a plnicí funkce kontrolního a záložního systému pro radarové systémy ŘLP. PSS Věra je čtvrtou generací českých ESM–TDOA systémů patřící do kategorie tří pozičních časově hyperbolických systémů, které jsou vyvinuty s cílem určovat polohu zdroje elektromagnetických signálů, tedy odpovědí palubních odpovídačů SSR vysílaných ve formě impulzních kódů. Systém určuje polohu letounů prostřednictvím vyhodnocení rozdílu času příchodu signálů na tři přijímací stanice, které jsou mezi sebou vzdáleny o délce několik desítek kilometrů [9].

PSS Věra byl vyvíjen pardubickou akciovou společností ERA v průběhu roku 1995 a to podle požadavku velení letectva, protivzdušné obrany AČR a mezirezortní komise pro řízení letového provozu Ministerstva obrany ČR. Poprvé se funkční vzor systému nainstaloval na stanovištích s nadmořskou výškou cca 1000 m a byl testován skupinou odborníků. Jedna stanice váží cca 25 kg, její příkon je cca 30 W.

V současné době PSS Věra je představen v několika modifikacích, konkrétně pak:

- Věra–P3D;
- Věra ASCS;
- Věra–AP;
- Věra–ADSB;
- Věra–HME;
- Věra–E.

První tři z těchto modifikací se prosadily v českém civilním letectví při řízení letového provozu na konci 90. let. Později v roce 2004 se do české armády dostal komplet Věra–S/M, jako speciální mobilní modifikace. Jiný systém Věra–E se nabízel především k vývozu. Již tehdy byl tento systém schopen sledovat frekvenční pásmo od 300 MHz do 18 GHz, zjistit polohu vysílače ve vzdálenosti až 450 km a určit polohu letounu s přesností 10 m [37].

Dosah PSS Věra tvoří 400 až 500 km v úhlovém sektoru, který je větší než 120°. To znamená, že systém je schopen pokrýt území České republiky, a dokonce i část vzdušného prostoru sousedních států, a to s přesností řádově desítek metrů. Kromě toho současné programové vybavení PSS Věra může sledovat zároveň 300 letounů [9].

PSS Věra byl pojmenován po slavné české dispečerce Věře Perlingerové, která usilovala o bezpečnost ve vzdušném prostoru v polovině 50. let minulého století. Nyní je tento pasivní radar vysoce oceněn mnoha mezinárodními přímiemi a slouží nejen pro armády zemí NATO, ale i pro civilní letectví. Například se používá na německých letištích v Braunschweigu, ve španělské Palmě de Mallorca a dánské Kodani [9].

7 VOJENSKÉ RADARY

Vojenské přehledové radary na našem území využívá Armáda České republiky (AČR). Tyto radary se užívají hlavně v těchto oblastech:

- sledování a vyhledávání nepřátelských objektů (letadla, lodě, pozemní cíle);
- rychlé varování před nebezpečím vzdušného napadení;
- detekci a určení polohy letadel a lodí pro řízení jejich provozu;
- mapování a měření vzdáleností na zemském povrchu;
- navádění raketových řízených střel;
- dělostřelectvo a zbraňové systémy;
- meteorologická měření, předpověď počasí a další.

Radary pracující v kmitočtovém pásmu C, X, Ku, K a Ka, se velmi často využívají pro navádění raket a z důvodu většího dosahu, v pásmech KV po pásmo S se využívají sledovací radary. Vojenské trackové radary využívají pásma C, X a Ku.



Obrázek 10: Radarová stanice na Kwajaleinu [32]

Na obrázku 10 je zobrazena radarová stanice systému protiraketové obrany, ležící v Kwajaleinu na Marshallových ostrovech v Tichém oceánu [33]. Jedná se o duálně polarizovaný dopplerovský systém používaný k detekci, analýze a záznamu systémů srážkového počasí pracující v kmitočtovém pásmu S. Měří výšku, vzdálenost a intenzitu návratů odrazů a dokáže sledovat a odvodit jejich pohyb. Dopplerovská schopnost poskytuje získávání informací o větru z těchto povětrnostních cílů, což umožňuje identifikaci potenciálních hrozeb silného větru, když jsou stále nad oceánem mimo povrchové systémy měření větru. V tabulce 10 jsou dále uváděny základní parametry tohoto radaru.

Radar obvykle pracuje v režimu „objemového skenování“ vzorkováním trojrozměrné domény do 150 km od Kwajaleinu, přičemž spouští jednostupňové přehledové skenování k pozorování polohy srážek do 300 kilometrů. Trojrozměrná data získaná z objemových skenů jsou analyzována v reálném čase, aby se vytvořily produkty zorného pole z libovolného místa v datové doméně [58].

Tabulka 10: Základní parametry [58]

| | |
|---|-----------------|
| Frekvence | 2700–2900 MHz |
| Dosah vlnové délky | 10,34–11,11 cm |
| Frekvence opakujícího pulzu | 396 Hz / 960 Hz |
| Dosah | 450 km |
| Výkon | Až 500 kW |
| Šířka paprsku (horizontálně i vertikálně) | 1,1° |

7.1 VYUŽITÍ PODLE KMITOČTOVÝCH PÁSEM

Níže v tabulce 11 je ve stručnosti popsáno využití vojenských radarů podle jednotlivých kmitočtových pásem [34].

Tabulka 11: Využití vojenských radarů [34]

| Název | Kmitočet | |
|------------|--------------|---------------------------|
| KV | 3–30 MHz | Sledovací radary |
| VKV | 30–300 MHz | |
| UKV | 300–3000 MHz | |
| L | 1–2 GHz | Trackové sledovací radary |
| S | 2–4 GHz | |
| C | 4–8 GHz | Trackové radary |
| X | 8–12 GHz | |
| Ku | 12–18 GHz | C-RAM |
| K | 18–27 GHz | |
| Ka | 27–40 GHz | |
| W | 40–100+ GHz | |

Radiolokátory přístrojového dosahu

7.2 PŘEHLEDOVÉ RADARY

Jedná se o radary, které jsou navrženy tak, aby lokalizovaly lodě a letadla, která jsou rozmístěna na velké vzdálenosti, které by mohly být těžkopádné při manévrování. Obvykle mají velmi dobrou přesnost rangerů, která armádě pomůže určit přesnou polohu a dosah daného objektu. Kromě lokalizace letadel a lodí se tyto radary používají také k lokalizaci osob, které mohou být v nouzi a potřebují okamžitou pomoc. Mnoho vojenských pátracích a záchranných misí se provádí pomocí radarové technologie, která dokáže detekovat různé obrazy pomocí pokročilejší technologie tepelného zobrazování [59].

7.3 TRACKOVÉ RADARY

Tyto typy radarů nepřetržitě sledují jediný cíl v úhlu (azimutu a elevaci) a dosahu, aby určil jeho dráhu nebo trajektorii a předpověděl jeho budoucí polohu. Radar pro sledování jediného cíle zaručuje polohu cíle téměř nepřetržitě. Typický sledovací radar může měřit polohu cíle rychlostí 10krát za sekundu. Radary pro měření vzdálenosti jsou typické sledovací radary. Vojenské sledovací radary využívají sofistikované zpracování signálu k odhadu

velikosti cíle nebo identifikaci specifických charakteristik před aktivací zbraňového systému. Tyto radary jsou někdy označovány jako radary pro řízení palby [59].



Obrázek 11: AN/FPS-16 [64]

Příkladem trackového radaru zde patří AN/FPS-16 (viz obrázek 11), který je navržen speciálně pro účely měření vzdálenosti a je prohlašován za první, který byl takto navržen. Tento monopulzní radar je vysoce přesný a pracuje v kmitočtovém pásmu C speciálně navržený pro instalaci v testovacích střediscích řízených střel pro sledování letových drah střel během testů. Využívá monopulzní technologii čtyřnásobného děleného klaksonu a monopulzní duplexer [63]. Základní parametry jsou dále uváděny v tabulce 12.

Tabulka 12: Základní parametry [63]

| | |
|------------------------|---------------|
| Frekvence | 5400–5900 MHz |
| Maximální výkon | 1,3 MW |
| Velikost antény | 3,9 m |
| Zisk antény | 47 dB |
| Šumivé číslo přijímače | 6,5 dB |
| Přesnost úhlu | 0,15 |
| Přesnost dosahu | 4,5 m |

7.3.1 PAR-E

PAR-E je přesný přibližovací radar (obrázek 12), který poskytuje zásadní a nepostradatelnou podporu pro řízení přiblížení a přistání širokého spektra letadel, včetně nouzových přistání v důsledku avioniky nebo technických poruch letadla. Radar využívá aktivní elektronické skenovací antény (AESA) v sektorech azimutu i nadmořské výšky, což umožňuje technologii fungovat bez mechanického pohybu antén. Tento radar odpovídá příslušným standardům ICAO a vyhovuje dokumentu NATO Vision, podle kterého bude technologie PAR používána alespoň do roku 2040. Radar je zvláště důležitý v situacích, kdy je dohled pilota omezen kvůli mlze, dešti a dalším povětrnostním situacím, včetně nouzového přistání. Kvůli avionice nebo letecké technologii. V tomto případě musí radar poskytovat řídicímu přiblížení radarovou informaci nejvyšší kvality, doplněné počítačovým

hodnocením rychlosti, odchylky od dráhy, kurzu, vzdálenosti od přibližujícímu letadlu atd. [62].



Obrázek 12: Přesný přibližovací radar PAR-E [61]

Konfigurace

- Radar funguje jako zcela nezávislá jednotka. Konstrukce radaru je modulární a využívá plně redundantní radarové řešení včetně systému komunikace se vzdáleným pracovištěm. Azimutová i výšková anténa obsahuje 128 T/R modulů. Spolehlivost systému a provozní parametry jsou zaručeny i v případě poruchy tří modulů. Systém PAR-E zahrnuje interní diagnostiku BITE pro rychlou a přesnou identifikaci vadných bloků radarového systému.

Hlavní součásti

- Anténní systém (AESA);
- Kabina radarového vybavení;
- Napájecí jednotka – diesel generátor, UPS jednotka;
- Protipožární systém;
- Bezpečnostní elektronický systém.

Základní parametry:

- Pracuje v pásmu X;
- Dosah až 40 km;
- Nízké nároky na údržbu;
- Využívá principu elektronického skenování AESA;
- Možnost přepravy standardními nákladními vozidly pro trajektové kontejnery normy ISO [62].

7.4 DĚLOSTŘELECKÉ RADARY

Tyto radary také zahrnují radarové systémy pro sledování bojiště, sledování, řízení palby a lokalizaci zbraní, ať už pevné, mobilní, přenosné nebo přenosné [59].

Příkladem zde uvedu dělostřelecký radiolokátor ARTHUR (obrázek 13), což je moderní dopplerovský radar, pracující na 24 frekvencích v rozsahu 5,4 – 5,9 GHz s pulzním vysílacím výkonem až 25 kW. Radar detekuje vystřelený dělostřelecký granát, zpracuje získaná data a určí místo dopadu granátu a přesnou polohu odpáleného dělostřelectva. Má nakloněnou obdélníkovou anténu o rozměru 2,1 x 1,2 metru fungující jako vysílač a přijímač. Nachází se na točně a umožňuje mechanickou střelbu v azimutu, elevaci a automaticky vyrovnává sklony terénu v rozmezí ± 7 stupňů. Výšeč je rozdělena do 16 sektorů, z nichž některé může systém ignorovat, což šetří výkon a snižuje možnost samokontroly.



Obrázek 13: Dělostřelecký radiolokátor ARTHUR [65]

ARTHUR automaticky detekuje, sleduje a určuje typ létajícího projektilu, a to i při elektronickém boji nebo rozsáhlých požárech. Radar má operační dosah 2,7 – 40 km, s režimy až 20, 30 a 40 km. Vzdálenost, na kterou je projektil, mina nebo střela detekována, závisí na úhlu pohledu, radiální rychlosti a odrazném povrchu. Při testech ve Spojených arabských emirátech detekoval ARTHUR raketu na vzdálenost 42,6 kilometru [60].

8 KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE

Vzhledem k tomu, že cílem této práce je taktéž analyzovat frekvence a systémy používané pro komunikaci v letectví, bude v této kapitole jejich popis. Dojde k popisu využití frekvencí pro komunikaci, satelitní telefonii, metod určování polohy pomocí komunikačního rádiového signálu a dále taktéž krátce systému VCS Garex.

8.1 FREKVENČNÍ SPEKTRA VYUŽÍVANÁ PRO KOMUNIKACI

V dnešní době se v letecké komunikaci využívají nejvíce amplitudové modulace velmi krátkých vln v rozsahu 118–136,975 MHz. Dosah je však pouze v rámci optické viditelnosti (tzn. „kam anténa vidí“). Využívá se přenosu horní i dolní části spektra, takového to uspořádání se nazývá „double side band“.

Krátké vlny se využívají pro přenos na větší vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že se přenáší pouze jedno pásmo, jsou náchylnější na rušení. Přenáší se tak pouze horní spektrum (USB – upper sideband).

Kromě VKV a KV vln se pro komunikaci v letectví, zejména tom vojenském, využívají UKV vlny [35].

8.2 SATELITNÍ TELEFONIE

Obecně význam satelitní telefonie v dnešní době upadá. Důvodem je, že po rozšíření GSM (Globální systém pro mobilní komunikace) sítí je již velmi značné pokrytí Země, a tak již není důvod používat z povrchu satelitní telefony. V minulosti se satelitní telefonii věnovaly velmi značně společnosti Iridium anebo Orbcomm. Právě po původním rozšíření GSM sítí se však obě tyto společnosti potýkaly s existenčními problémy. Společnost Iridium se rozhodla změnit svůj obchodní model a soustředí se již na přenos dat, v dnešní době se jedná o jednoho z největších zákazníků společnosti SpaceX.

V letecké dopravě se pro účely satelitní telefonie stále využívají satelity společností Globalstar a Inmarsat. Satelity společnosti Globalstar, kterých je celkem 40, však mají inklinaci 52°, což neumožňuje pokrytí v polárních oblastech. Kromě toho jsou její služby poměrně drahé. Příznivější ceny nabízí společnost Inmarsat pro svůj BGAN (Broadband Global Area Network), využívá geostacionární satelity, které sice taktéž nemají celosvětové pokrytí, ale společnost nabízí příznivější ceny. Díky tomu se tak kromě letecké dopravy využívá například i v námořní přepravě [52].

8.3 METODY URČOVÁNÍ POLOHY POMOCÍ KOMUNIKAČNÍCH SIGNÁLŮ

První metodou, která je v této práci popsána, je získání polohy pomocí VDF směrového zaměřovače, kdy letadlo po zaklíčování vyše signál o jedné frekvenci, ze kterého můžeme z pozemní antény určit výsledné zaměření letadla. VDF je podrobněji popsáno v jiné kapitole této práce.

Polohu letadla lze taktéž určit pomocí nouzových frekvencí 121,5MHz, 243MHz a zařízení ELT (Emergency Locator Transmitter). V případě, že letadlo havaruje anebo se do ELT dostane voda, ELT začne na již zmíněných frekvencích vysílat své číslo. Kromě toho lze právě pro určení polohy využít satelity na nízkých orbitách (typicky polárních), středních orbitách (Galileo) anebo geostacionárních orbitách pomocí Dopplerova efektu. Díky tomu, že jsou satelity v pohybu (letadlo je již stacionární), utváří se Dopplerův efekt. Satelit naměřená data o frekvenčních posunech zašle na zem, kde se následně určí poloha s přesností zhruba 20 km. Tyto signály nejlépe zachytí obecně signály na nízkých orbitách. Poloha se určí ve vyhodnocovací středisku zhruba do 45 minut. Česká republika spadá do vyhodnocovacího střediska Moskva. V případě letu MH370 byla síla signálu velmi malá, jelikož se letadlo okamžitě ponořilo. I přesto, že je ELT vodotěsné a ponořené stále vysílá, ale signál je tak slabý, že ho již nelze zachytit. Tento systém se nazývá COSPAS–SARSAT.

Díky tomu se tak v obchodní civilní dopravě urychlil přechod na 406 MHz, ve kterém se vysílá číslo ELT, družice naměří data pro určení polohy, taktéž se zašle poslední známá GPS (Global Positioning System) poloha z palubního počítače. Díky tomu je poloha letadla známa do 5 minut [46][49].

8.4 VCS GAREX

Systém VCS Garex (Voice Communication System) je komunikační systém, který využívá jako primární systém službu řízení letového provozu České republiky. Díky tomuto systému, který je dostupný na všech pracovištích, například na stanovišti approach, lze vysílat na frekvencích, kaplovat určité frekvence, pořizovat nahrávky, volat na sousední stanoviště (i do zahraničí) anebo na libovolné telefonní číslo. Tento systém se ovládá pomocí dotykové obrazovky [48].

8.5 CLIMAX

Jedná se o systém, který se využívá pro rozsáhlé sektory s problematickým hornatým terénem, kde nelze využít pro pokrytí celého sektoru jeden vysílač. Využíváme tak systém s posunutou nosnou vlnou – potřeba pro využití více vysílačů pro jednu frekvenci. Následně tak pracují všechny stanice současně, ale každá s jinak posunutou nosnou vlnou. Díky tzv. „capture effect“ se zajistí, že v demodulátoru se potlačí slabší signály. Systém VCS Garex vybere v rámci své funkce BSS (Best Signal Selection) nejsilnější signál, jenž se je následně prezentován řídícímu [47].

8.6 VDF

Dalším způsobem, pomocí kterého lze určit polohu letadla, je tzv. VDF pracující v pásmu 118–137 MHz. Tato zkratka znamená „Very High Frequency Direction Finder“. Jedná se o směrový zaměřovač, který využívá pro svoji činnost velmi krátké vlny. Princip činnosti tohoto zařízení je takový, že pokud pilot vysílá na frekvenci anebo trvale zakličuje, pomocí příchozího signálu lze určit směr, ze kterého signál přišel. Vzhledem k tomu, že jsou v letecké komunikaci právě nejrozšířenější velmi krátké vlny, tak byl pro činnost tohoto systému zvolen právě tento frekvenční rozsah. Nevýhodou užití velmi krátkých vln je to,

že celý systém má dosah pouze optické viditelnosti. Využití tohoto systému spočívalo v minulosti zejména v nouzových situacích. Ve vojenství se tato služba taktéž využívá, nazývá se však UDF vzhledem k odlišnému využití frekvencí – „Ultra High Frequency Direction Finding“.

Celý systém se skládá ze dvou hlavních částí, přijímací část je na zemi a vysílačem je rádiová stanice letadla. Tou první je pozemní „rotující“ anténa, která však mechanicky nerotuje. Mechanická rotace antény je zajištěna postupným přepínání dipólů (případně monopólů) v anténě po kružnici. Poté, co pilot vyšle na frekvenci určitý signál, tak ho zachytí právě tato uměle rotující anténa. Díky tomu, že se dipóly postupně přepínají, tak se uměle vytváří Dopplerův jev, jelikož se částečně mění velikost předchozí frekvence. Letadlo tak po zaklíčování vyšle signál o jedné frekvenci, následný pohyb antény způsobí, že přijímaný signál bude mít různou frekvenci (pokud se objekt anebo anténa vzdaluje, bude frekvence nižší). Pokud máme pouze jednu anténu, jsme schopni zjistit pouze zaměření letadla. Pro určení polohy je třeba mít alespoň dvě antény na různých místech, následně je pak v místě, kde se výsledná zaměření letadla protnou, poloha letadla. Obecně tak lze tvrdit, že VDF pracuje na obráceném principu nesměrového majáku NDB (Non-Directional Beacon). De facto se tak simulujícím otáčením antény natáčí srdcovka a my hledáme minimum přijímaného signálu. Reference zaměření letadla může být poskytnuta jak vůči zeměpisnému, tak vůči magnetickému severu. Řídící letového provozu může taktéž pilotovi poskytnout odhad přesnosti zaměření jeho polohy – pro tyto účely se využívá několik tříd, které jsou klasifikovány následovně: třída A má přesnost $\pm 2^\circ$, třída B $\pm 5^\circ$, třída C $\pm 10^\circ$ a třída D má horší přesnost než třída C. Obecně lze tuto službu používat na tzv. „guardu“ čili na nouzové frekvenci 121,5MHz [46].

ZÁVĚR

V této práci byly popsány vybrané přehledové systémy, které využívají spektrum frekvencí specifikované v cílech práce. Díky tomu se tak lze setkat v této práci s relativně podrobným a zároveň poměrně srozumitelným vysvětlením principů činnosti systémů jako multilaterační systém, palubní meteorologický radar apod. Jelikož si tato práce vymezovala jako cíl popsat taktéž frekvence využívané v letectví, tak jedna z kapitol je taktéž věnována této problematice.

Na začátku práce byly nejprve definovány rádiové vlny obecně a dále byly rozvedeny a popsány různé jevy, které ovlivňují šíření rádiových vln v atmosféře. Kromě toho byl taktéž ve zkratce popsán Dopplerův jev, jehož principu se využívá v mnoha moderních přehledových systémech. Jelikož primárním cílem této práce byl popis frekvencí u jednotlivých radarů, tak u všech přehledových systémů bylo uvedeno, z jakého důvodu využívá právě daný systém určité frekvenční spektrum, jaké to sebou přináší výhody a nevýhody. Vzhledem k tomu, aby byly vybrané systémy v této práci popsány srozumitelně, bylo třeba mírně překročit rozsah této práce, která se tak ve výsledku věnuje i v poměrně velké míře praktickému využití vybraných radarů.

Jak můžeme již v dnešní době vidět, tak některé frekvence jsou již značně „přehlcené“ a proto některé systémy procházejí modifikacemi a zlepšeními, které vedou k tomu, že systém danou frekvenci tolik nevyužívá. Jako typický příklad takového systému můžeme uvést palubní protisrážkový systém TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System), jenž od své původní podoby přechází do tzv. hybridního TCAS, který již tolik nezatěžuje velmi vytíženou frekvenci 1030/1090MHz. Bude tak jistě zajímavé do budoucna sledovat, jak se bude v případě dalších přehledových systémů a radarů přistupovat k výběru a zatížení jednotlivých frekvencí.

Tato práce si tedy kladla za cíl zejména popsat využití definovaných kmitočtových pásem v letectví a jejich názornou praktickou ukázkou na přehledových systémech a radarech. Z tohoto pohledu byla pro účely této práce využita pomoc jak z řad odborníků na přehledové systémy, tak z řad komerčních pilotů. Krátce byly popsány taktéž systémy, které se využívají ve vojenství. Hlubšímu rozsahu popsání takových systémů bohužel brání limitovaný počet zdrojů. Další cílem, který si vymezila tato práce bylo popsání komunikačních technologií, které byly názorně popsány na příkladu Řízení letového provozu České republiky. Díky tomu tak byl v této práci zpracován přehled radarových systémů, jejich praktické využití a výhody. U každého systému bylo taktéž naznačeno, proč využívá daný systém příslušnou frekvenci a jaké to sebou nese výhody, případně nevýhody.

Věřím, že tato práce tak v budoucnu poslouží jak studentům VUT, tak taktéž studentům připravujícím se na teoretické zkoušky dopravního pilota na Úřadu civilního letectví. Dále věřím, že veškeré poznatky, které jsem získala během této práce využiji v budoucnu, jak při své diplomové práci a následném studiu, tak i případně v zaměstnání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOSECKÝ, Slavomír. Radionavigace (062 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4448-6.
- [2] Radiokomunikace: Rozdělení kmitočtového spektra [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <http://www.lss.fd.cvut.cz/vyuka/tkms/soubor2>
- [3] VOSECKÝ, Slavomír; JURÁNEK Josef. Základy leteckých navigačních zařízení I. Brno: VAAZ, 1988.
- [4] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. Rozdělení kmitočtového spektra [online]. Praha [cit. 10.11.2012]. Dostupné z: <http://www.lss.fd.cvut.cz/vyuka/tkms/soubor2>
- [5] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [6] Jednotlivé vrstvy ionosféry [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.crk.cz/PICTURES/GIF/7_5.GIF
- [7] Šíření elektromagnetického záření [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: http://oklike.c-a-v.com/soubory/ant_3.htm
- [8] United States frequency allocations: The radio spectrum [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/january_2016_spectrum_wall_chart.pdf
- [9] Pasivní sledovací systém Věra [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.acr.army.cz/technika-a-vyzbroj/protivzdujna-obrana/pasivni-sledovaci-system-vera-3504/>
- [10] Radar Principle [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html>
- [11] Radar navigation and maneuvering board manual: Seventh Edition 2001 00. Annapolis: Lighthouse Press, 2001. ISBN 978-1-57785-248-3
- [12] ANTÉNY: Skripta RCD Radiokomunikace spol. s r. o. [online]. [cit. 2021-8-9]. Dostupné z: https://www.rcd.cz/user-files/tinymce/files/5_anteny.pdf
- [13] Range or distance measurement [online]. [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: https://www.flightsafety.com/elearning/fs_el_assets/courses/weatherradar/img2.jpg

- [14] Radio Navigation[online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné
z: <http://anyflip.com/mrcd/sioy/basic>
- [15] PRI [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné
z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Pulse%20Repetition%20Frequency%20%28PRF%29.en.html>
- [16] Historie ŘLP v USA – Ing. Jiří Šála
- [17] Palubní přístroje II – Štěpán Matouš
- [18] Přednáška PSR – Stanislav Pleninger, FD ČVUT
- [19] Meteorologické radiolokátory [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_radar/index.html
- [20] Radar – radarové snímky: Radar a měření srážek [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <https://www.meteocentrum.cz/radar>
- [21] Strip 2016 – Podnikový speciál Řízení letového provozu České republiky s.p., dostupné
z: http://www.rlp.cz/KnihovnaMaterialu/STRIP/Zpravodaj%20Strip_kv%C4%9Bten%202016.pdf
- [22] Co je to meteoradar [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <https://www.meteoradar.cz/o-radaru.php>
- [23] Precision approach radars [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <http://www.spsnavalforces.com/story/?id=236>
- [24] Precision Approach Radar [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp30.en.html>
- [25] Flight Operations Support and Services [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <https://www.cockpitseeker.com/wp-content/uploads/goodies/ac/a320/pdf/data/gettingToGripsSurveillanceIssue1.pdf>
- [26] Airbus Flight Operations [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné
z: <https://abrapac2015.files.wordpress.com/2019/09/getting-to-gripps-with-surveillance.pdf>
- [27] Altimetres [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné
z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Altimeter.en.html>
- [28] Bezoušek P, Šedivý P, České vysoké učení technické v Praze, and Elektrotechnická fakulta 2004 Radarová technika (Praha: Vydavatelství ČVUT)

- [29] WOLF, Christian. Radar Basics: Garbling/Degarbling [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr15.en.html>
- [30] WOLF, Christian. Radar Basics: Fruit[online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr14.en.html>
- [31] FEDERAL RADAR SPECTRUM REQUIREMENTS [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/ntia00-40.pdf>
- [32] Radarová stanice [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/obr/kw4.jpg
- [33] Armádní radary [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k35.htm
- [34] Radar system engineering: Lecture 1 Introduction [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/VIBINHLE/radar-2009-a-1-introduction-62261283>
- [35] ESA – Electromagnetic spectrum [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-3/-/asset_publisher/mQ9R7ZVkJKg5P/content/radar-course-3-electromagnetic-spectrum
- [36] Meteorologická situace [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupná z: <http://files.meteohydro.webnode.cz/200000271-d95cdda573/Srážky%209.6.2011%2010.JPG>
- [37] PSS [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <http://pamatky2.kehilaprag.cz/pasvisingr.pdf>
- [38] PAR [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <http://atccommunication.com/wp-content/uploads/2011/09/parRadar.jpg>
- [39] Weather radar [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/OUPRIME1.png>
- [40] MLAT [online]. [cit. 2021-8-17]. Dostupné z <http://www.airnav.eu/ostrava3.jpg>
- [41] SVD AWR [online]. [cit. 2021-8-18]. Dostupné z: https://www.flightsafety.com/elearning/fs_el_assets/courses/weatherradar/img2.jpg
- [42] P3D-WS [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.aeroweb.cz/Obrazky/Image/4_multilaterace.jpg
- [43] Radio/Microwave Spectrum [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: https://radiojove.gsfc.nasa.gov/education/educationalcd/_Info/info.012.pdf

- [44] Aeronautical Radionavigation [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://www.ntia.doc.gov/legacy/osmhome/reports/ntia00-40/chapt1.htm>
- [45] NEPOVÍM, Miroslav. Generátor signálů odpovídače sekundárního radaru pro přístroje R&S[online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68060/NepovimM_GeneratorSignalu_JP_2017.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [46] VHF Direction Finding [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: https://www.nordian.net/REPOSITORY/121_jaa_radio_navigation_demo.pdf
- [47] GAREX 220 VCCS SYSTEM DESCRIPTION COMPACT AND MIDI System Description [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: https://www.academia.edu/8379550/GAREX_220_VCCS_SYSTEM_DESCRIPTION_COMPACT_AND_MIDI_System_Description
- [48] VCS – GAREX 220 [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/kariera/sts/Stranky/vcs.aspx>
- [49] Emergency locator transmitters [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://silo.tips/download/emergency-locator-transmitters>
- [50] [online]. [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tkbgar/BP-MartinKorbel.pdf>
- [51] UNDERSTANDING THE CYCLIC REDUNDANCY CHECK [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://www.cardinalpeak.com/blog/understanding-the-cyclic-redundancy-check>
- [52] Mapy pokrytí satelitních sítí [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://www.navisat.cz/mapy-pokryti-satelitnich-siti.html>
- [53] Surveillance [online]. 2017 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <http://www.multilateration.com/surveillance/multilateration.html>
- [54] ŠEDIVÝ, P. Sekundární přehledový radar SSR. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2001.
- [55] ZÁLABSKÝ, Ing. Tomáš. Řídké antény pro příjem signálů odpovídačů sekundárních radiolokátorů[online]. Pardubice, 2018 [cit. 2021-8-20]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/72056>
- [56] Aviation Usages of Frequency Spectrum [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/d7e421981aa64169af1a8d6b37438d4d/aviation20usages20of20frequency20spectrum20-2020170726.pdf>

- [57] VHF/UHF radar Part 2: Operational aspects and applications [online]. [cit. 2021-8-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/3364675_VHFUHF_radar_Part_2_Operational_aspects_and_applications
- [58] Kwajalein Polarimetric S-band Weather Radar (KPOL) [online]. [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: <https://rts-wx.com/about-kpol-weather-radar>
- [59] 10 Military radar applications [online]. [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: <https://lidarradar.com/apps/10-military-radar-applications>
- [60] RADAR a jeho využití [online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k35.htm
- [61] PAR-E [online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: https://www.eldis.cz/imagecache/81/960x0_0_1506a6d5-960x0-0-a9fd8a2e-par.jpeg
- [62] PAR-E [online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: <https://www.eldis.cz/par-e-mobilni>
- [63] AN/FPS-16 [online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RCA_AN/FPS-16_Instrumentation_Radar
- [64] PAR-E[online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/01.oth/pic/img01-008-01s.jpg>
- [65] ARTHUR [online], [cit. 2022-1-20]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/ARTHUR_%28radar%29.jpg

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|---------------|--|--|
| A-SMGCS | Advanced Surface Movement and Guidance Control System | Pokročilý systém pro navádění a řízení pozemních pohybů |
| ACAS | Airborne Collision Avoidance System | Palubní antikolizní systém |
| AČR | Army of Czech Republic | Armáda České republiky |
| ADF | Automatic Direction Finder | Automatický směrový zaměřovač |
| ADS | Automatic Dependent Surveillance | Automatický závislý přehled |
| ADS-B | Automatic Dependent Surveillance – Broadcast | Automatický závislý přehled – vysílání |
| AESA | Active Electronically Scanned Array | Aktivní elektronické skenovací antény |
| AM | Amplitude Modulation | Amplitudová modulace |
| ARC | Area chart | Oblastní mapa |
| ASDE | Airport Surface Detection Equipment | Letištní zařízení pro detekci kolizí |
| ASR | Airport Surveillance Radar | Letištní přehledový radar |
| ASTERIX | All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange | Standard pro výměnu informací o letových provozních službách |
| ATC | Air Traffic Control | Řízení letového provozu |
| ATIS | Automatic Terminal Information Service | Automatická informační služba TMA |
| AWR | Airborne Weather Radar | Palubní meteorologický radar |
| BDS | BeiDou Satellite | BeiDou satelit |
| BeiDou-3 | BeiDou Navigation Satellite System | Navigační satelitní systém BeiDou |
| BGAN | Broadband Global Area Network | Širokopásmová globální síť |
| BITE | Built-In Test Equipment | Věstavené zkušební zařízení |
| BSS | Best Signal Selection | Výběr nejvhodnějšího (použitého) signálu |
| c | Speed of light | Rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) |
| CAT | Category | Kategorie |
| CCA | Corrected meteorological message | Opravená meteorologická zpráva |
| CIWS | Close-In Weapon System | Zbraňový systém blízké obrany |
| cm | centimeter | centimetr |
| COSPAS-SARSAT | Search And Rescue Satellite-Aided Tracking | Satelitní sledování pro pátrání a záchranu |
| CRC | Cyclic redundancy check | Cyklický redundantní součet |
| CZRAD | CZEch RADAR network | Národní meteorologická radiolokační síť |
| ČHMÚ | Czech Hydrometeorological Institute | Český hydrometeorologický ústav |
| dbi | decibel isotropic | Decibel izotropní |
| dB | decibel | Decibel (jednotka hlasitosti) |

| | | |
|-------|---|--|
| DC-10 | McDonell Douglas | McDonell Douglas |
| DF | Direction Finder | Zaměřovač |
| DME | Distance Measuring Equipement | Zařízení pro měření vzdálenosti |
| DV | | Dlouhé vlny |
| DVB-T | Digital Video Broadcasting – Terrestrial | Pozemní digitální vysílání televizního signálu |
| E | Electric Field Intensity | Intenzita elektrického pole (Vm^{-1}) |
| EASA | European Union Aviation Safety Agency | Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví |
| EHF | Extremely High Frequency | Extrémně vysoká frekvence |
| EKV | | Extrémně krátká vlna |
| ELINT | ELectronic INTelligence | Elektronické zpravodajství |
| ELT | Emergency Locator Transmitter | Polohový maják nehody |
| ERA | European Research Area | Evropský výzkumný prostor |
| ESM | Electronic Support Measures | Elektronická podpurná opatření |
| FIR | Flight Information Region | Letová informační oblast |
| FL | Flight Level | Letová hladina |
| FMGC | Flight Management and Guidance Computer | Počítač pro řízení a navádění letu |
| ft | foot | Stopa (0,3048 m) |
| G | antenna Gain | Výkonový zisk antény |
| GBAS | Ground Based Augmentation System | Rozšiřovací systém umístěný na zemi |
| GCA | Ground-Controlled Approach | Pozemně řízené přiblížení |
| GHz | Giga Hertz | Gigahertz (10^9 Hz) |
| GLS | GBAS Landing System | GBAS přistávací systém |
| GNSS | Global Navigation Satellite System | Globální navigační satelitní systém |
| GPS | Global Positioning System | Globální navigační systém |
| GSM | Global System for Mobile communication | Globální systém pro mobilní komunikace |
| H | Magnetic field strength | Intenzita magnetického pole (Am^{-1}) |
| hPa | hectoPascal | Hektopascal |
| Hz | Hertz | Hertz |
| GP | Glide Path | Sestupový maják |
| ICAO | Internacional Civil Aviation Organization | Mezinárodní organizace pro civilní letectví |
| IDENT | IDENTification | Identifikace |
| IEC | Information Executive Controller | Řídící přenosu informací |
| IFR | Instrument Flying Rules | Pravidla letu podle přístrojů ILS |
| ILS | Instrumental Landing System | Systém pro přesné přístrojové přiblížení |
| ITU | International Telecommunication Union | Mezinárodní telekomunikační unie |
| K | K-band | Kmitočtové pásmo K |
| Ka | Ka-band | Kmitočtové pásmo Ka |
| kg | kilogram | kilogram |

| | | | |
|--------|---|-----------|--|
| kHz | kiloHertz | | Kilohertz (10 ³ Hz) |
| km | kilometer | | Kilometr (10 ³ m) |
| Ku | Ku-band | | Kmitočtové pásmo Ku |
| KV | | | Krátké vlny |
| L | L-band | | Kmitočtové pásmo L |
| LAM | Local Area Multilateration | | Multilaterační systém pro lokální oblast |
| LLZ | Localizer | | Kurzový maják |
| LORAN | Longe Range Air Navigation | | Navigace na velké vzdálenosti |
| LPV | Low Visibility Procedures | | Navedení za snížené viditelnosti |
| LSB | LaSt Bite | | Poslední bit |
| LVNL | Luchtverkeersleiding Nederland | | Řízení leteckého provozu Nizozemsko |
| m | meter | | Metr (rozměrová jednotka) |
| m/s | meter per second | | Metr za sekundu |
| METRAD | | | Českého hydrometeorologického ústavu |
| MHz | MegaHertz | | Megahertz (10 ⁶ Hz) |
| MLAT | MultiLATeration | | Multilaterace |
| MLS | Microwave Landing System | | Mikrovlnný přistávací systém |
| Mm | Mm-band | | Kmitočtové pásmo Mm |
| mm | milimeter | | Milimetr (10 ⁻³ m) |
| MSPSR | Multi-Statics | Primary | Multistatický primární přehledový radar |
| | Surveillance Radar | | |
| MSSR | Monopulse | Secondary | Monopulzní sekundární přehledový radar |
| | Surveillance Radar | | |
| MTI | Moving Target Indication | | Indikace pohybujícího se cíle |
| NATO | The North Atlantic Treaty Organization | | Organizace Severoatlantické smlouvy |
| NDB | Non-Directional Beacon | | Nesměrový radiomaják |
| NM | Nautical mile | | Námořní míle (1 852 m) |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration | | Národní úřad pro oceán a atmosféru |
| OM | Outer Marker | | Vnější návěstidlo |
| P | Power | | Výkon |
| PALS | Precision Approach Landing System | | Přistávací systém pro přesné přiblížení |
| PAR | Precision Approach Radar | | Radar pro přesná přiblížení |
| PC | Planning Controller | | Plánovač |
| PCL | Passive Coherent Location | | Pasivní koherentní lokace |
| PET | Passive ESM Tracker | | Pasivní ESM |
| PRF | Pulse repetition frequency | | Frekvence opakování vysílání pulzu |
| PRI | Pulse Repetition Interval | | Interval opakujícího pulzu |
| PRT | Pulse Repetition Time | | Doba opakování pulzu |
| PSR | Primary Surveillance Radar | | Primární přehledový radar |
| r | range | | Dosah (m) |
| RADAR | Radio Detection and Ranging | | Rádiové rozpoznávání |

| | | |
|--------|---|---|
| | Radiolocator | a zaměřování |
| RDPS | Radar Data Processing System | Systém pro zpracovávání radarových dat |
| RMCDDE | Radar Message Conversion and Distribution Equipment | Systém konverze a distribuce radarových dat |
| ŘLP | | Řízení Letového Provozu |
| S | S–band | Kmitočtové pásmo S |
| SAM | Slot Allocation Message | Zpráva o přidělení slotu |
| SBAS | Satellite Based Augmentation System | Rozšiřovací systém umístěný na družici |
| SDPS | Surveillance Data Processing System | Systém pro zpracovávání přehledových dat |
| SHF | Super High Frequency | Super vysoká frekvence |
| SKV | | Super krátké vlny |
| SMR | Surface Movement Radar | Letištní přehledový radar |
| SPI | Special Pilot Identification | Speciální polohový identifikační impuls |
| SQB | SQuitter Beacon | Vysílač módu S |
| SSR | Secondary Surveillance Radar | Sekundární přehledový radar |
| SV | | Střední vlny |
| SVD | | Směrový vyzářovací diagram |
| t | time | Čas (s) |
| TAR | True Airspeed | Skutečná vzdušná rychlost |
| TCAS | Traffic Alert and Collision Avoidance System | Palubní proti–srážkový systém |
| TDOA | Time Difference of Arrival | Časový rozdíl příchodu signálu |
| TMA | Terminal Area | Koncová řízená oblast |
| TWR | Tower | Řídicí věž |
| UAS | Unmanned Aircraft System | Bezpilotní palubní systém |
| UDF | Ultra High Frequency Direction Finding | Ultra vysokofrekvenční rádiový zaměřovač |
| UDV | | Ultra dlouhé vlny |
| UHF | Ultra High Frequency | Ultra vysoká frekvence |
| UKV | | Ultra krátké vlny |
| USA | United States of America | Spojené státy americké |
| USB | Upper SideBand | Horní postranní pásmo |
| VCS | Voice Communication System | Systém hlasové komunikace |
| VDF | Very High Frequency Direction Finder | VKV vyhledávač směru |
| VDV | | Velmi dlouhé vlny |
| VKV | | Velmi krátké vlny |
| VHF | Very High Frequency | Velmi vysoké frekvence |
| VOR | VHF Omni–directional Radion Range | VKV všesměrový radiomaják |
| WAM | Wide Area Multilateration | Multilaterační systém pro rozsáhlé oblasti |
| WSR | Weather Surveillance Radar | Meteorologický radar |

| | | |
|---------------|----------------------------|--|
| X | X-band | Kmitočtové pásmo X |
| 3 D | Three – dimensional | Trojdimenzionální |
| λ | wavelength | Vlnová délka (m) |
| μs | microseconds | Mikrosekunda (10^{-6} s) |
| σ | Target radar cross section | Efektivní odrazná plocha cíle (m^2) |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Základní typy troposférických refrakcí [5] | 17 |
| Obrázek 2: Jednotlivé vrstvy ionosféry [6] | 18 |
| Obrázek 3: Přesný přibližovací radar PAR..... | 33 |
| Obrázek 4: Meteorologický radar v Oklahomě [39] | 34 |
| Obrázek 5: Zobrazení meteorologické situace [36]..... | 35 |
| Obrázek 6: SVD palubního meteorologického radaru [41]..... | 36 |
| Obrázek 7: Komunikace radaru s letadlem [45]..... | 38 |
| Obrázek 8: Srovnání SSR a MLAT v hornaté oblasti [40]..... | 41 |
| Obrázek 9: Příjímací anténa systému P3D–WS na Jedlové hoře u Chomutova [42]..... | 43 |
| Obrázek 10: Radarová stanice na Kwajaleinu [32] | 45 |
| Obrázek 11: AN/FPS–16 [64] | 47 |
| Obrázek 12: Přesný přibližovací radar PAR–E [61] | 48 |
| Obrázek 13: Dělostřelecký radiolokátor ARTHUR [65]..... | 49 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Základní rozdělení rádiových vln [2] | 14 |
| Tabulka 2: Způsob šíření vln podle kmitočtových pásem [2] | 15 |
| Tabulka 3: Způsob využití pásma VKV podle kmitočtu [8] | 19 |
| Tabulka 4: Způsob využití pásma UKV [8] | 20 |
| Tabulka 5: Způsob využití pásma L [8] | 20 |
| Tabulka 6: Způsob využití pásma S [8] | 21 |
| Tabulka 7: Způsob využití pásma C [8] | 21 |
| Tabulka 8: Způsob využití pásma X [8] | 22 |
| Tabulka 9: Způsob využití pásma Ku [8] | 22 |
| Tabulka 10: Základní parametry [58] | 46 |
| Tabulka 11: Využití vojenských radarů [34] | 46 |
| Tabulka 12: Základní parametry [63] | 47 |