



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 Muhanad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Studentka:	Rafah Muhanad
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.

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 pomůcku pro přípravu profesionálních pilotů a bakalářů leteckého provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

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 a military aeronautic 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.

KEYWORDS

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

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v leteckých civilních a vojenských radarech (studijní pomůcka) jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 13.08.2021

.....

Rafah Muhanad

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. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům, kteří mě podporovali v průběhu celého studia.

V Brně dne: 13.08.2021

.....

Rafah Muhanad

OBSAH

ÚVOD	7
1 ÚVOD DO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	8
1.1 Způsoby šíření vln	9
1.2 Pásmo velmi krátkých vln	10
1.3 Pásmo ultra krátkých vln	10
1.4 Pásmo super krátkých vln	10
1.5 Pásmo extrémně krátkých vln	11
2 VLIV ZEMSKÉ ATMOSFÉRY NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAG. VLNY	12
2.1 Troposféra	12
2.2 Ionosféra	12
2.2.1 Jednotlivé vrstvy ionosféry	13
2.3 Jevy v atmosféře	13
3 KMITOČTOVÁ PÁSMA VYUŽÍVANÁ RADIOLOKÁTORY	15
3.1 Klasifikace pásem od VKV po EKV	15
3.2 VKV	15
3.3 UKV	15
3.4 L pásmo	16
3.5 S pásmo	16
3.6 C pásmo	16
3.7 X pásmo	17
3.8 Ku pásmo	17
3.9 K pásmo	17
3.10 Ka pásmo	17
3.11 V pásmo	17
3.12 W pásmo	18
3.13 Mm pásmo	18
4 RADIOLOKAČNÍ TECHNIKA	19
4.1 Funkce základních komponentů radaru	19
4.2 Základní druhy antén	19
4.3 Směrový vyzařovací diagram antény radaru	20
4.4 Dopplerův jev	20
4.5 Metoda snímání prostoru	20
4.6 Vzdálenost cíle	21
4.7 Délka jednoho pulzu	21
4.8 Minimální dosah	21
4.9 Frekvence opakování impulzů	22
5 AKTIVNÍ RADIOLOKÁTORY	23
5.1 Primární radary v letectví	23
5.1.1 Základy impulsní radiolokace	24
5.1.2 Dopplerovské zpracování v primárních radarech	25
5.1.3 Druhy primárních radarů	25

5.1.4	Přesný přibližovací radar	27
5.1.5	Meteorologický radar	28
5.1.6	Palubní meteorologický radar	29
5.1.7	Radiovýškoměr.....	31
5.2	Sekundární radary	31
5.2.1	Sekundární radary mód A, mód C	32
5.2.2	Mód S	34
5.2.3	Zvláštní kódy SSR.....	35
5.2.4	Překrývání odpovědí SSR	35
5.2.5	CRC (Cyclic redundancy check).....	36
5.2.6	1090ES (Extended squitter).....	36
6	PASIVNÍ RADIOLOKÁTORY	37
6.1	Multilaterační systém	37
6.2	PSS Věra	39
7	VOJENSKÉ RADARY.....	40
7.1	Využití podle kmitočtových pásem.....	40
8	KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE	42
8.1	Frekvenční spektra využívaná pro komunikaci.....	42
8.2	Satelitní telefonie.....	42
8.3	Metody určování polohy pomocí komunikačních signálů	42
8.4	VCS GAREX	43
8.5	Climax	43
8.6	VDF.....	43
	ZÁVĚR.....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	55
	SEZNAM TABULEK	56

ÚVOD

Téma bakalářské práce jsem volila tak, aby bylo spojeno s předmětem Radionavigace, který mě během mého bakalářského studia velmi zaujal a chtěla jsem tak ještě výrazně rozšířit mé 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 modernímu a komplexnímu 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, tak tato práce může mít i reálné využití, jelikož v této práci bude taktéž popsán právě i praktický význam a 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 v této práci bude taktéž většina systémů ohodnocena pomocí dalších parametrů, jako například šířka využívaného pásu, dosahu systému apod. Dalším z cílů je dále popis komunikačních technologií a frekvencí využívaných v letectví. U všech přehledových systémů taktéž lze nalézt poměrně podrobný rozsah praktického využití. Pro tyto účely byly 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 s 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].

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. VKV a EKV se obvykle nevyužívají v civilním letectví. Účel aplikace vln o jiné délky záleží na druhu komunikace. Rozdělení těchto vln je v tabulce 2 [1].

Tabulka 1: Rozdělení rádiových vln podle ITU [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 3. Mezi nejrozšířenější z nich lze vymežit:

- 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 prostředků 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. [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)	Podobně jako DV
KV (3–30 MHz)	Hlavně prostorová odražená (vlna ve dne i v noci)
VKV, UKV, SKV (30 –30 000 MHz)	Přímá vlna (šíření podle rádiové dohlednosti), někdy vlnovodným kanálem nebo rozptylem v troposféře

1.2 Pásmo velmi krátkých vln

Pásmo VKV, anglicky Very High Frequency wave (VHF). S kmitočtem frekvencí 30 do 300 MHz a délkou vlny od 1 do 10 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 1 m. 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].

Na dolním konci tohoto pásma jsou zpravidla vyžadovány větší antény než na horním konci. Ve srovnání s výše uvedeným pásmem je získání větší šířky pásma méně náročné, zatímco vnější přirozené zvuky a efekty počasí představují mnohem menší problém. Na dolní úrovni 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 horní úroveň UHF je pak vhodná pro radary sledující objekty na blízké a střední vzdálenosti [28].

1.4 Pásmo super krátkých vln

Pásmo SKV, anglicky Super High Frequency wave (SHF). Do tohoto spektra spadá frekvence v rozsahu od 3 do 30 GHz a vlnová délka 1 až 10 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 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 dolní pásmo SKV vhodnější pro pozorování 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 radary srážek [28].

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 300GHz. Vlnová délka spadající do tohoto frekvenčního spektra se pohybuje od 1 do 10 mm [4].

V tomto pásmu je těžké generovat vysoký výkon. Rušení kvůli hydrometeorům jsou hlavními faktory, které brání použití tohoto frekvenčního pásma. 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 [28].

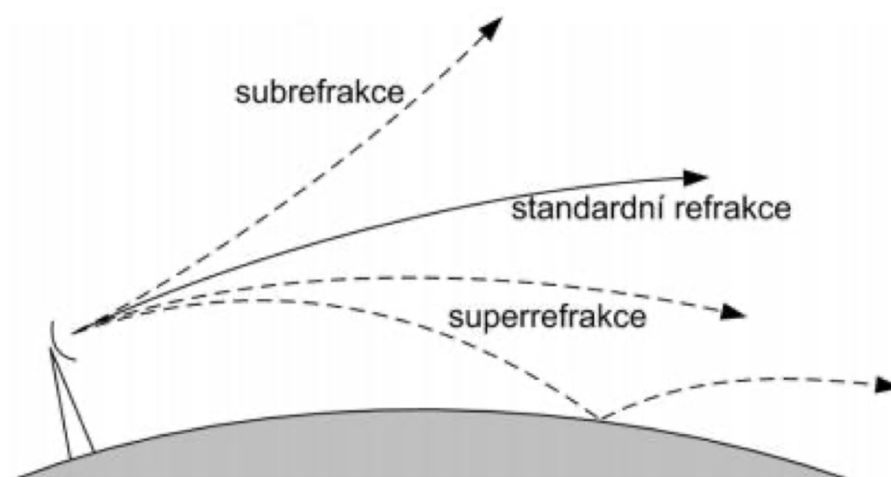
2 VLIV ZEMSKÉ ATMOSFÉRY NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAG. VLNY

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 to nejnižší vrstvou atmosféry, sahá do výšky zhruba 10 km. Její složení je většinou homogenní, protože je promíchávána větrem, který ale také 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 je naopak velké zakřivení vlny [4].



Obrázek 1: Různé typy troposférických refrakcí [5]

2.2 Ionosféra

Je ionizovaná část atmosféry, sahající od 60 km do 600 až 800 km na úrovni střední hladině moře. Nachází v oblastech mezosféry a termosféry. V ionosféře je většina částic ionizovaná, která může být způsobena různými faktory, hlavně působením UV zářením [4].

2.2.1 Jednotlivé vrstvy ionosféry

Vrstva D

Je to nejnižší 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 vysílacím výkonu.

Vrstva E

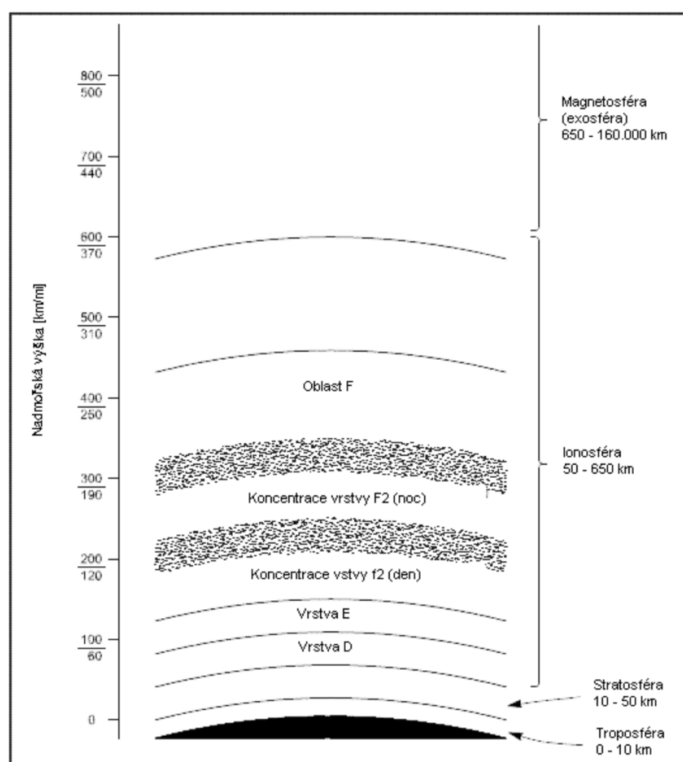
Nachází se ve výšce 90 až 130 km. Odráží zejména střední vlny. Její účinek se v noci sníží. Tato vrstva často odráží rádiové vlny do 10 MHz.

Vrstva Es

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 [4].



Obrázek 2: Jednotlivé vrstvy ionosféry [6]

2.3 Jevy v atmosféře

Lom a odraz na frontálním rozhraní

Při ideální orientaci fronty a vysílače dochází k nasměrování elektromagnetického vlnění mohou být elektromagnetické vlny nasměrovány za horizontem na relativně velké vzdálenosti. Tento jev se nejčastěji vyskytuje v pásmu velmi krátkých vln a ultra krátkých vln [7].

Lom na ostré překážce

V situacích, kdy dochází ke špatné viditelnosti a vysílač přímo objekt nevidí, je možné použít lom vln. Jedná se o to, že elektromagnetické vlny dopadají na ostrou překážku šikmo, tudíž lomí se a mění směr svého záření. Příkladem aplikace podobné metody je příjem německých vysílačů VKV v Praze. Zde se vlny lomí na vhodně orientovaném pohoří, což jsou hřebeny Krušných hor [7].

Odraz od meteorických stop, drah blesků, polární záře

Mimořádné přírodní jevy v atmosféře, jako jsou blesk či polární záře, také se využívají při vysílání. Je to možné díky tomu, že vytvářejí krátkodobé a zároveň nestabilní ionizované oblasti ve vysokých nadmořských výškách. Jejich prostřednictvím lze odrazit vysílané signály do místa příjmu [7].

Odraz od ionosféry

Odrážení od ionosféry je vhodné při vysílání signálu v dolních pásmech krátkých vln. Vysokofrekvenční signály se však odrážejí jen za mimořádných podmínek, přičemž pokud dochází k jejich několikanásobnému odrážení, pak je tím možné překonat větší vzdálenosti [7].

Vlnový kanál

Mezi povrchem Země a nejnižší vrstvou ionosféry proléhá vlnový kanál. Když je vlnová délka srovnatelná s velikostí vlnového kanálu, pak sleduje jeho tvar a může se šířit na velké vzdálenosti, a to i okolo celé Země. K tomu dochází při šíření VDV, DV a SV [7].

3 KMITOČTOVÁ PÁSMA VYUŽÍVANÁ RADIOLOKÁTORY

V této kapitole se budu zaměřovat na kmitočtová pásma VKV, UKV, SKV a EKV, vzhledem k zadání práce, kde jsou vypracovány podle jednotlivých kmitočtových pásem a jejich využití radiolokátory.

3.1 Klasifikace pásem od VKV po EKV

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 nesnesitelně 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 [29].

3.2 VKV

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 není pásmo příliš využívané radary. Radary s velkým dosahem pro detekci letadel nebo družic však mohou být v VKV pásmu konstruovány úsporněji než při vyšších frekvencích. Práce radarů na těchto frekvencích není ovlivněna rušením deště, ale polární záře a meteory vytvářejí 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.

3.3 UKV

Kmitočet	Využití
328,6-335,4 MHz	ILS GP

406–406,1 MHz	SAR
420–450 MHz	Sledovací vojenské radary
960–1 215 MHz	DME, GNSS, SSR

Na dolním konci UKVV pásma jsou zpravidla vyžadovány větší antény než na horním konci. Ve srovnání s výše uvedeným pásmem je získání větší šířky pásma méně náročné, zatímco vnější vlivy hydrometeorů představují mnohem menší problém. Na dolní úrovni 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 horní úroveň UHF je pak vhodná pro radary sledující objekty na blízké a střední vzdálenosti.

3.4 L pásmo

Kmitočet	Využití
1 030 a 1 090 MHz	SSR, MLAT, ACAS, 1090ES
1 215–1 400 MHz	GNSS, PSR
1 525–1 559 MHz	Satelitní komunikace
1 610–1 626,5 MHz	Satelitní komunikace
1 626,5–1 660,5 MHz	Satelitní komunikace
1 559–1 626,5 MHz	GNSS

Radary s pásmem L pracují na vlnové délce 15-30 cm a frekvenci 1-2 GHz. Radary s tímto pásmem se většinou používají pro zkoumání turbulencí.

3.5 S pásmo

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. 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. Národní meteorologická služba (NWS) používá radary s tímto pásmem na vlnové délce o něco více než 10 cm. Nevýhodou tohoto radarového pásma je však to, že k jeho napájení je potřeba velká satelitní parabola a velký motor. Pro radary s takovým pásmem je běžné překročit 25 metrů ve velikosti.

3.6 C pásmo

Kmitočet	Využití
4 200–4 400 MHz	Radiovýškoměr
5 000–5 250 MHz	MLS
5 350–5 470 MHz	AWR

Radary v pásmu C pracují na vlnové délce 3,8-7,5 cm a frekvenci 4-8 GHz. Vzhledem k vlnové délce a frekvenci nemusí být satelitní parabola příliš velká, což dělá radary s tímto pásmem 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 s pásmem C vytvořit menší šířku paprsku pomocí menší satelitní paraboly.

3.7 X pásmo

Kmitočet	Využití
8 750–8 850 MHz	Dopplerův radar
9 345–9375 MHz	AWR
9 000–9 500 MHz	PAR, ASDE

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

Většina velkých letadel je vybavena radary s pásmem X, který zachycuje turbulenci a další jevy počasí. Toto pásmo se také využívá některými policejními radary rychlosti a některými kosmickými radary.

3.8 Ku pásmo

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

Radary s pásmem Ku pracuje na vlnové délce 1,7-2,5 cm a odpovídající frekvenci 12-18 GHz. Toto pásmo je rozděleno uprostřed kvůli silné absorpční lince vodní páry. Toto pásmo je podobné pásmu X, ale je ještě citlivější. Kromě toho se také používá policejními radary.

3.9 K pásmo

Kmitočet	Využití
24,25–24,65 GHz	Satelitní komunikace, RSMS, vojenské radary

3.10 Ka pásmo

Kmitočet	Využití
31,8–33,4 GHz	Satelitní komunikace, ASDE

3.11 V pásmo

Kmitočet	Využití
59–64 GHz	ASDE

3.12 W pásmo

Kmitočet	Využití
76–81GHz	ASDE
92–100 GHz	Vojenské radary

3.13 Mm pásmo

Kmitočet	Využití
136–148,5 GHz	Radioastronomická oblast
151,5–155,5 GHz	Radioastronomická oblast
231,5–235 GHz	Družicová a radiolokační oblast
238–248 GHz	Družicová a radiolokační oblast

[8], [28], [29], [30], [31]

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 [11].

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 jednou 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 ozvěny a přenáší tyto ozvěny do přijímače.

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

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. Dále rozdělujeme podle:

- Směrnosti – **všesměrová, směrová, vícesměrová**
- Konstrukce – **parabolická, dipólová, tyčová, fázová**

- Šířky frekvenčního pásma – **úzkopásmové antény, širokopásmové** [12].

4.3 Směrový vyzařovací diagram antény radaru

Směrový vyzařovací diagram vyjadřuje směrovost vlastností antény a ozařuje ten prostor, ve kterém se očekávaně 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 včetně toho 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 (ve vertikálním řezu), k nimž patří maximální předpokládaná výška letu cílů, maximální dosah radaru, nejmenší velikost polohového úhlu daná pozemními překážkami a největší velikost polohového úhlu [13].

4.4 Dopplerův jev

Pod pojmem Dopplerův jev se zpravidla rozumí změna frekvence a vlnové délky v porovnání s vyslaným vlněním. Příčina této změny spočívá v nenulové rychlosti mezi vysílačem a přijímačem, přičemž v letecké oblasti se Dopplerův jev vyskytuje u primárních radarových systémů, stejně jako u radionavigačních zařízení typu VOR (VHF Omnidirectional Range) a ve službě pátrání a záchran. Prostřednictvím tohoto jevu je možné dosáhnout vyšší přesnosti při některých měřeních či určit přibližnou polohu zříčeného letadla, z něhož se vysílá signál zařízení ELT (tzv. Emergency Locator Transmitter).

Příkladem působení Dopplerova jevu může sloužit jedoucí sanitka. Když se přibližuje k stojícímu pozorovateli, zdá se, že její přijímaný tón je vyšší, než tomu doopravdy je. Kdyby se sanitka nepohybovala, průběh by byl stejný [13].

4.5 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 středové osy letadla či lodi, 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 ale 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 ozvěny 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 [14].

4.6 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 [3].

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 světa 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 světa, zatímco Δt je časovou prodlevou mezi vysláním signálu a příjmem odrazu [15]

4.7 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 mikrosekunda bude mít minimální dosah 164 yardů, 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 mikrosekundy [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].

4.8 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 měřicí vzdáleností od antény, kterou musí mít cíl, aby byl detekován. Tento dosah určuje rozměry takzvané slepé neboli mrtvé zóny [16].

4.9 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 $PRT = 1/PRP$ [17].

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

Mezi nejstarší přehledové systémy se v letecké oblasti se považují primární radary využívané i do dnešní doby. Tato kapitola práce shrnuje poznatky týkající se primárních pozemních přehledových radarů. Následně jsou taktéž uvedeny informace o palubním meteorologickém radaru a radiovýškoměru. Pozornost se taktéž věnuje pozemnímu meteorologickému radaru a přesnému přibližovacímu radaru. Nedílnou součástí práce je historický vývoj radarových systémů a popis těch primárních radarů, které se využívají i v dnešní době. Na konci je v kapitole popsán možný způsob zpracování dat z radarových čísel, stejně jako jejich zobrazení na příkladu stanovišť služeb Řízení letového provozu České republiky.

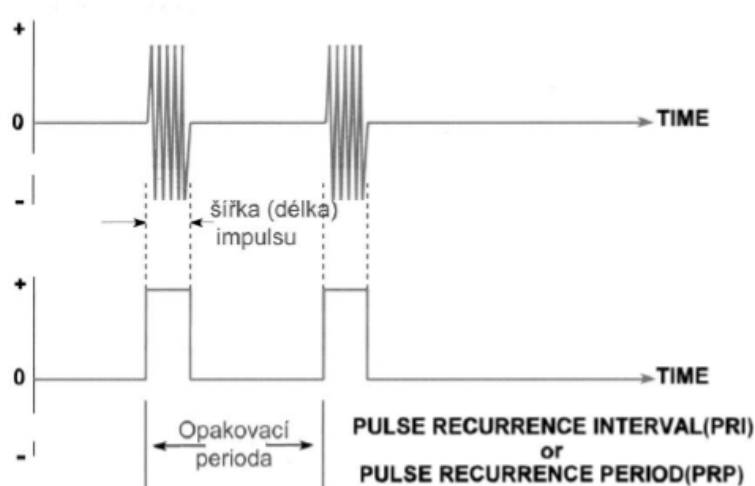
Dnes všude rozšířené slovo RADAR vzniklo na konci 30. let minulého století jako zkratka z anglického výrazu Radio Detection And Ranging. Radary se původně využívaly pro potřeby včasného varování přes nepřátelskými letadly v okolí. Zpravidla letecké radary fungují v pásmech UKV či SKV a jejich podstatou je překonávání dvojitě vzdálenosti mezi cílem a zdrojem vysokofrekvenční energie. Funguje to tak, že se silný vysokofrekvenční signál odesílá do prostoru a následně se v něm setkává s letadlem. Kvůli tomu se malá část signálu odráží 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. K jeho popisu dojde v následujících kapitolách práce. 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 světla. Radiolokátory druhého typu využívají vysílaný signál, který periodicky mění kmitočet. 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 [18].

5.1.1 Základy impulsní radiolokace

V oblasti impulsní radiolokace jsou stanoveny některé základní aspekty, ukazatele a parametry. Jedním z takových parametrů je šířka impulsu, která představuje čas trvání vysokofrekvenčního impulsu udávaného v mikrosekundách. Pokud je impuls krátký, znamená to, že má lepší rozlišovací schopnosti ve vzdálenosti. Jinak řečeno, takový impuls 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 vysíláním dvou po sobě následujících impulsů. Obráceným ukazatelem tohoto intervalu je PRF (z angličtiny Pulse Repetition Frequency), který znamená frekvenci impulsů radaru čili počet impulsů, 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 [18].



Obrázek 3: Znázornění PRI

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 [18].

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 impulsu více cyklů, která zvětší energii impulsu, 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 [18].

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 jako 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 [27].

5.1.3 Druhy primárních radarů

V této podkapitole budou popsány druhy primárních pozemních radarů, jenž 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 popsáný multilaterační systém anebo Advanced-Surface Movement Guidance and Control System [18].

Radary, pracující na dlouhé vzdálenosti jsou tzv. oblastní anebo traťové radary. Tyto radary monitorují letouny při cestách a umožní tak složkám řízení letového provozu (ŘLP) zajišťovat potřebné navigační informace, například rozestupy mezi letouny. Antény těchto radarů se obvykle umísťuje 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, tak byla v minulosti hojně užívána frekvence 600 MHz (vlnová délka 50 cm) [18].

Aby byl vysílací paprsek dostatečně úzký, musí mít radar při takto malé frekvenci však poměrně velkou vysílací anténu. Rychlost rotace antény i tedy obnovení radarového obrazu je tedy 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 otáček za minutu. Parametr PRF se pohybuje od 270 až do 400 pps [18].

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 zde již nižší než na tratích, tak je třeba zvýšit obnovení radarové informace a vylepšit rozlišovací schopnosti radaru. Běžné radary TAR (Terminal Area Surveillance Radar) tak využívají nosné frekvence od 1,2 do 3GHz s vlnovou délkou mezi 10 až 25 cm s dosahem do 80 NM. Šířka pulsu je 2° a rychlost rotace antény 8 otáček za minutu. Hodnota PRF je pak 360 pps. Služba řízení letového provozu v Praze používá pro tyto účely přehledové radary s frekvencí okolo 2,8 GHz.

Okrskový radar slouží primárně k poskytování rozestupů letounů na přiletu anebo odletu. Je zde tak 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 stupně a rychlost rotace antény okolo 15 otáček za minutu, parametr PRF je 700 pps.

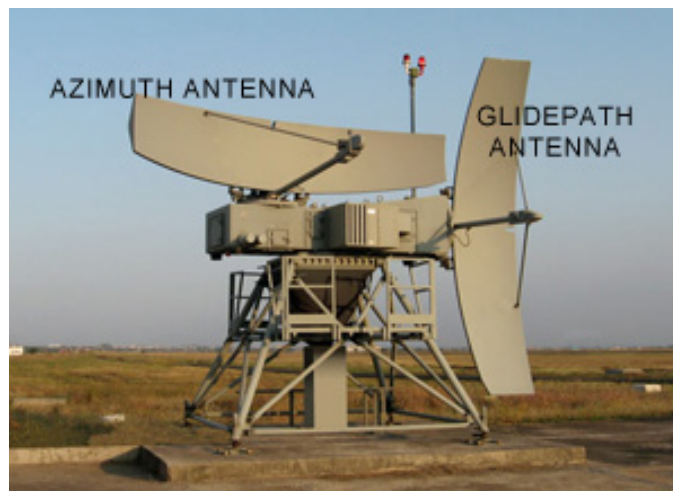
Pojezdový radar, jenž se v anglické literatuře typicky nazývá SMR (Surface Movement Radar) anebo ASDE (Airport Surveillance Detection Equipment). Tento radar pracuje na nejvyšších frekvencích, jaké jsou používány v technice civilního letectví. Požadavek na tento typ radaru je takový, že musí pokrývat 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. Výsledná zobrazená informace je však integrována z několika čidel, jak bude dále popsáno. 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 umožnili i detekci velmi malých kovových součástí na vzletové dráze [26].

Jak můžeme odečíst na příkladech konkrétních primárních radarů, tak vybrané frekvence se právě liší v závislosti na tom, jaký vzdušný prostor chceme sledovat.

Zatímco v prostoru na tratích, kde nejsou nároky na přesnost takové, se používá obecně nižších nosných frekvencí. Nižší frekvence není tak náchylná na ovlivnění počasí, ale nemožní zachytit malé cíle, která však 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 úplnému přerušování provozu, toto kompenzuje systém A-SMGIS, jenž bude popsán následně [18].

5.1.4 Přesný přiblížovací radar

Využití tohoto radaru, který je také známý jako PAR (Precision Approach Radar) je dnes téměř výhradně jen na vojenských letištích. Vzhledem k tomu, že v případě tohoto systému existuje elektronická skluzová rovina, tak 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. Řídící má výstup na obrazovkách umístěných nad sebou. Horní zobrazení umožňuje kontrolovat sestupovou rovinu a vzdálenost, dolní osu dráhy a také vzdálenost. Řídící 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 [20].



Obrázek 4: Azimutální a vertikální anténa systému PAR

Základním pokrytím tohoto systému od úvratě azimutální antény je ± 10 stupňů od osy dráhy do vzdálenosti 17 kilometrů. Pokrytí sestupové antény je pak od 1 do 6 stupňů 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 % skuteční 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 je frekvence 10 GHz optimální [20].

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 lodě, 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) [20].

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 [19].



Obrázek 5: Meteorologický radar v Oklahomě

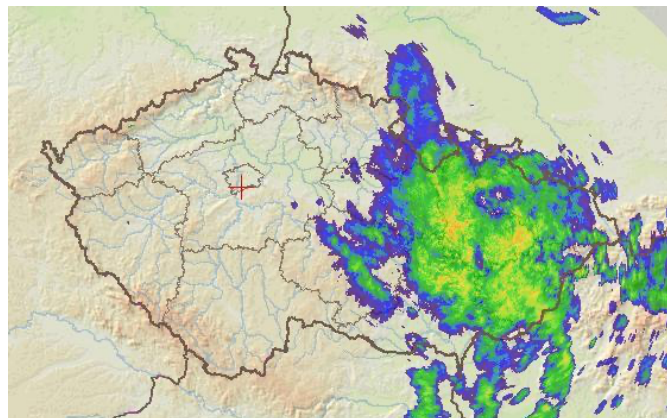
Vzhledem k tomu, aby vlnová délka pulsu nebyla přibližně dlouhá jako délka vodní kapénky, tak se volí obvykle vlnová délka okolo 1-10 cm. To odpovídá přibližně desetinásobku průměru vodní kapénky. Kratší vlnové délky jsou vhodnější pro menší kapénky, ale signál je taktéž výrazně utlumen vlivem počasím. Díky tomu tak jsou obvykle použity radary využívající vlnovou délku 10 cm (pásmo S), který je však dražší

než radar 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 dosah bývá maximálně pár stovek 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 pulsů vyslanému [19].

Přijatý signál je taktéž dále analyzován pro posouzení odrazivosti signálu – tedy pro určení intenzity srážek. Vzhledem k odlišné dielektrické konstantě cíle se vyjadřuje odrazivost v dBZ. Pokud je přijatý signál větší jak 65 dBZ, tak se jedná o extrémně silné srážky a výsledné zobrazení je v purpurové (magenta) barvě. Silné srážky jsou klasifikovány jako silnější než 50 dBZ a 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, tak že je nutné brát informaci například o velmi silných srážkách vážně. Důvod proto je ten, že pozemní meteorologický radar pracující na vyšší frekvenci je více vystaven útlumu počasí, to tak může být horší, než jej dispečer vidí [19].

Aktuální srážky a bouřky se tak u nás měří pomocí dvou meteorologických radarů. Jeden je umístěn v Brdech na vrcholu Praha (860 m n.m.), druhý radar je na hoře Skalky (730 m n.m.) u Protivanova [19].

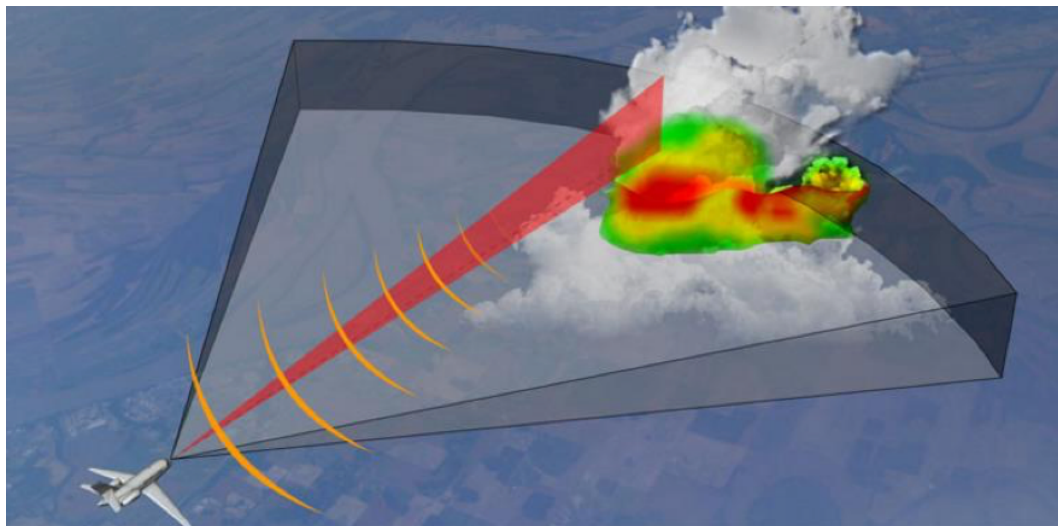


Obrázek 6: Zobrazení meteo. situace pocházející z meteorologického radaru

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, nicméně již hůře bude detekovat suchý sníh anebo suché kroupy [21].



Obrázek 7: SVD palubního meteorologického radaru [1].

Tento systém se skládá z antény, která je společně s přijímači localizeru a glideslope umístěná v tzv. radome, tedy v přídi letadla. Tato anténa je na moderních letadlech zejména plochá („flat antenna“) tak, 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. Dnes ji můžeme spatřit například na letounech A300, A310 anebo 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 stop nad zemí zobrazili dvě „oči“ v úhlu zhruba 45 stupňů 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, tak je anténa automaticky nastavena a držena v rovině s křídly letadla. Díky tomu tak může dojít při náklonu k zobrazení pozemních odrazů na místo počasí [21].

Systém využívá obecně na detekci hydrometeorů, které se nachází dále jak 80NM od letadla širší pulzy než pro počasí na kratší vzdálenosti. Důvod pro tento fakt je ten, že na větší vzdálenosti již dochází k útlumu pulzu. Na druhou stranu platí, že čím užší je pulz, tím lepší je rozlišení a určení počasí v určité vzdálenosti i směru. S rostoucí vzdáleností ztrácí pulz energii vlivem absorpce a refrakce. Díky tomu tak může dojít

mimo jiné k tomu, že pulz již není schopen prostoupit počasím a může se vytvořit tzv. radarový stín [21].

5.1.7 Radiovýškoměr

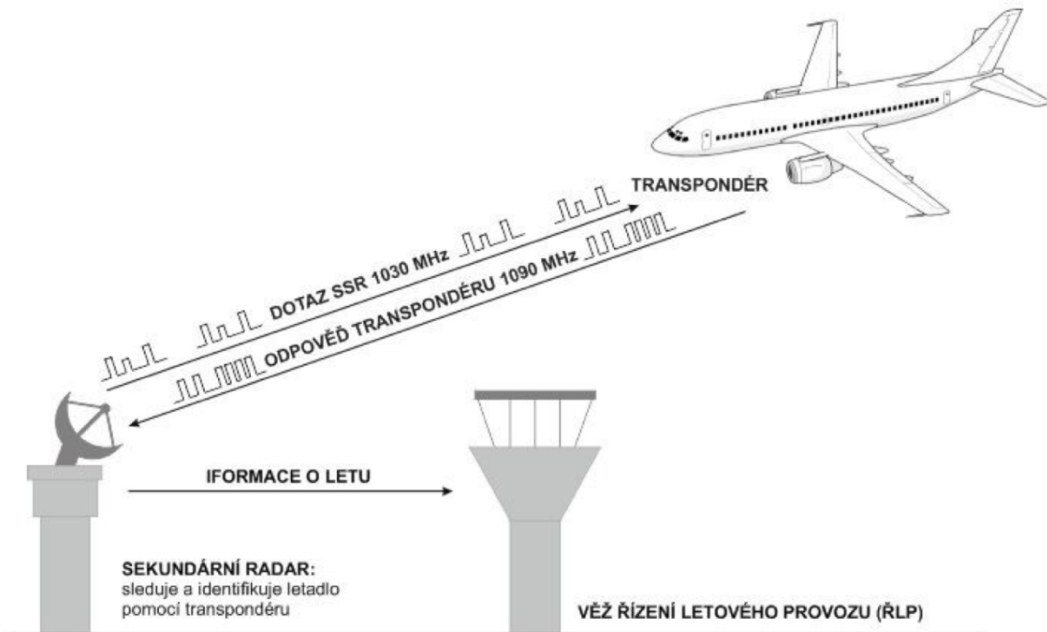
Tento systém je spolu s palubním meteorologickým radarem (AWR) dalším systémem na palubě letadla, který využívá principu primárního radaru. Na rozdíl však právě od AWR tento systém nevyužívá klasickou techniku vyslaného pulzu, který se odrazí od oblačnosti a my jej opět přijmeme. Princip činnosti v případě tohoto systému je takový, že vysílací anténa radiovýškoměru vyše spojitou vlnu, která periodicky mění svoji frekvenci. Tato vlna se po odrazu od země vrací zpět směrem k letadlu, jenž vlnu přijme a vyhodnotí rozdíl frekvencí mezi přijímaným a současně vysílaným signálem. Díky této změně frekvence může dojít k velmi přesnému vyjádření výšky letadlu na zemi, čehož se využívá například při automatickém přistání [22].

Radiovýškoměr pak pro svoji činnost využívá frekvence 4 200 až 4 400 MHz. Moderní systémy jsou schopny měřit výšku typicky do úrovně 2 500 stop na povrchem Země. Nejčastější provedení je pak takové, že na letadlu jsou dva radiovýškoměry, přičemž jeden radiovýškoměr se skládá z vysílací antény a současně přijímací antény. Taková zástavba je typická například pro letoun Airbus A320. Určitou výjimku pak představuje Airbus 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 letadlu A380 instalovány tři radiovýškoměry – v takovém případě při ztrátě jednoho radiovýškoměru nedochází k žádné 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 [22].

5.2 Sekundární radary

Sekundární radary pracují ve dvou kmitočtech 1030 a 1090 MHz. Sekundární radar obecně odstraňuje, případně redukuje chyby, které ovlivňují primární radar.

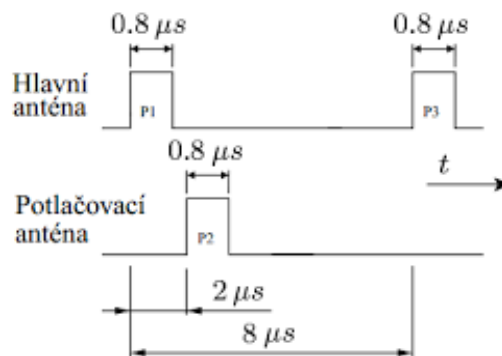


Obrázek 8: Komunikace radaru s letadlem [23]

5.2.1 Sekundární radary mód A, mód C

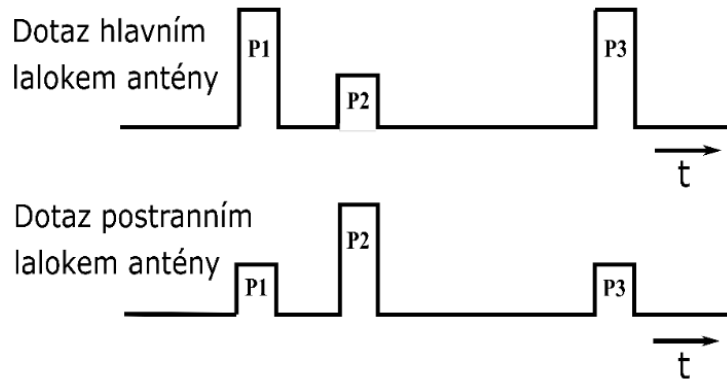
Mód A

Mód A se používá jen k vyhledání čísla letu, tzv. SQUAK. Číslo letu se skládá ze čtyř čísel, která mohou nabývat hodnot mezi 0-7, takže existuje 4096 kombinací a standard ICAO definuje pro tento účel několik kódů, které jsou určeny pro speciální účel. Dotaz zahrnuje celkem tři pulsy, P1, P2 a P3, délka pulzu je $0,8 \mu\text{s}$. Impulzy P1 a P3 jsou vysílány hlavním svazkem antény a puls P2 je vysílán potlačovacím svazkem antény.



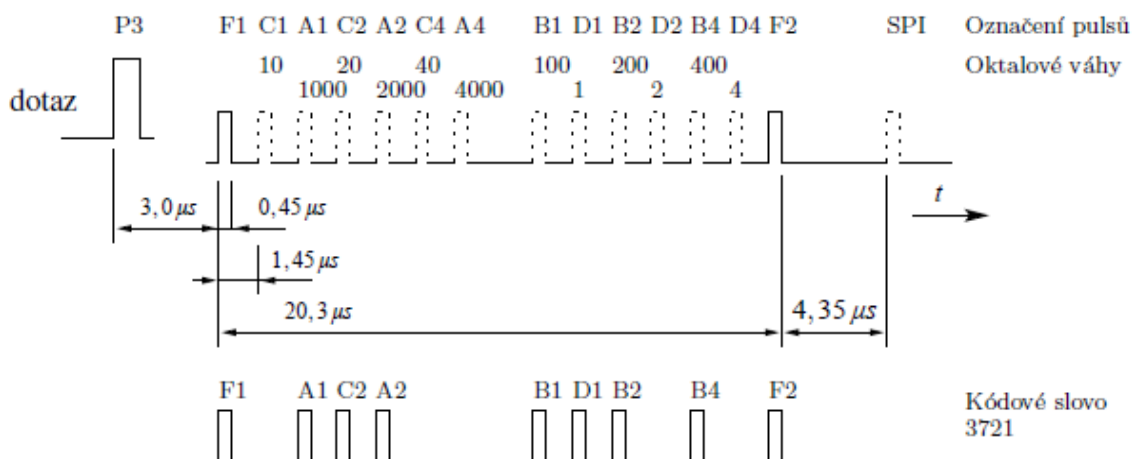
Obrázek 8: Průběh pulzů dotazu v módu A [21]

Přenos dotazu rozdělen na část vysílanou hlavním svazkem a část vysílanou potlačovacím svazkem. Odpovědač tedy vyhodnotí, zda je dotaz odeslán hlavním svazkem dotazovací antény nebo postranním svazkem. Pokud jsou přijaté amplitudy pulzu P1 a P3 alespoň o 9 dB větší než amplituda přijatého impulzu P2, jedná se o dotaz odeslaný hlavním lalokem a odpovídáč odpoví, jinak jde o dotaz postranní lalok a reakce je následně potlačena [21].



Obrázek 9: Porovnání dotazů v módu A vyslaných hlavním a postranním lalokem antény dotazovače [32]

Odpověď v módu A zahrnuje dva impulzy označené jako F1 a F2. Mezi těmito dvěma impulzy je 12 bitů označených jako A₁-D₄. Jeden impulz je amplitudově modulovaný – logické 1 odpovídá přítomnosti nosného pulzu a logika 0 odpovídá absenci pulzu. Formát odpovědi módu A zachycuje obr. 10.



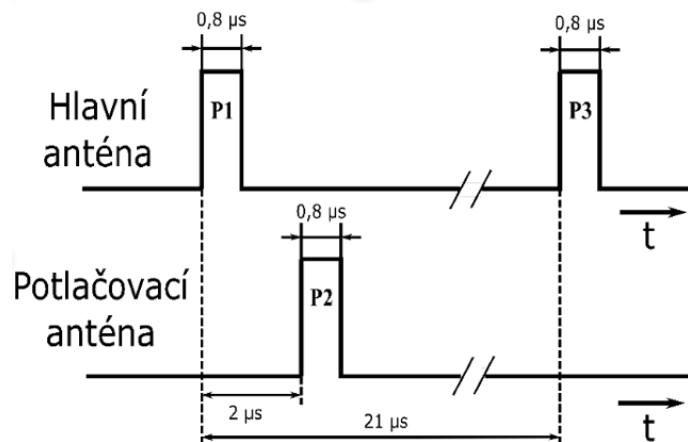
Obrázek 10: Formát odpovědi v módu A [21]

Kromě informačního pulzu může vyslat také speciální identifikační impuls polohy SPI (Special Pilot Identification), který lze odeslat na základě zásahu pilota podle požadavku dispečera. Poté je tento puls odeslán 15 až 30 sekund po každé odpovědi a slouží k potvrzení, s jakým letadlem dispečer aktuálně komunikuje. Obecný postup je takový, že by se tento speciální pulz „IDENTu“ neměl používat jindy, než právě na výzvu dispečera [21].

Mód C

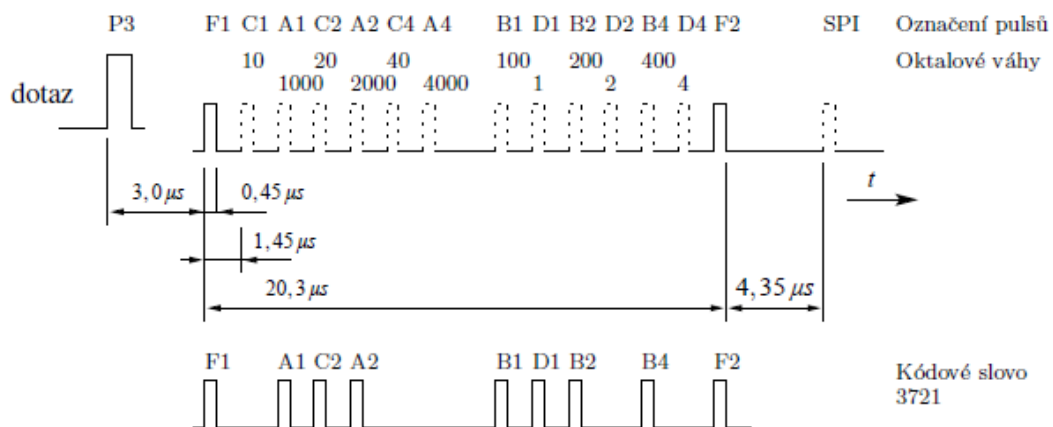
Mód C se používá k přenosu informací o výšce letadel podle údajů z palubního barometrického výškoměru. Je nutné zmínit, že tato výška je vždy vztažena k základnímu tlaku 1013 hPa. Všechny údaje o výšce letu jsou zaokrouhleny na stovky

stop, aby se vytvořily údaje o výšce letu. Tvary dotazů jsou velmi podobné tvary dotazů módu A, pouze vzdálenost mezi náběžnou hranou pulzu P1 a pulzu P3 je odlišná, v tomto případě $21 \pm 0,2 \mu\text{s}$. Interval mezi náběžnými hranami pulzů P1 a P2 $2 \pm 0,15 \mu\text{s}$ je zachován – obr. 11.



Obrázek 11: Průběh pulzů dotazu v módu C [21]

Odpovědi jsou velmi podobné odpovědím v režimu A. Opět se používají dva impulsy F1 a F2 s intervalem $20,3 \pm 0,1 \mu\text{s}$. Avšak pouze 11 bitů se používá k přenosu informací o výšce letadla. Bit D1 je trvale nastaven na úroveň 0, viz obr.12. Všechny délky impulsů, vzdálenosti pulzů, délky náběžné a sestupné hrany, včetně tolerancí, jsou přesně stejné jako odpovědi v režimu [21].



Obrázek 12: Formát odpovědi v módu C [21]

5.2.2 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

fáze se pravidelně střídají. První fáze se nazývá „All-call“ a druhá fáze se nazývá „Roll-call“.

Problém v režimu S se zakládá na 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.

5.2.3 Zvláštní kódy SSR

- **7700** – indikace nebezpečné situace. Kód se nastaví nejdříve po vzniku nebezpečí. Má význam signálu vyšší důležitosti. 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 [21].

Odpovídač na palubě letadla

Posádka letadla může odečíst aktuální nastavený SQUAWK, který může pomocí tlačítek změnit. Při změně kódu se nevyužívá funkce „Standby“. Kromě toho zde taktéž může pilot aktivovat funkci IDENT, díky které bude následně několik sekund „blikat“ na obrazovce dispečera. Panel SSR na velkých dopravních letadlech bývá sdružený s ovládáním systému TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System). Pilot taktéž může odečíst vysílanou tlakovou výšku, jenž je vztažena k tlaku 1013 hPa.

5.2.4 Překrývání odpovědí SSR

Garbling jsou 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 pak 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 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.

Fruiting je častější typ. Odpovědi na přijaté dotazy budou zaslány do cíle ve všech směrech. Jedním ze způsobů, jak eliminovat asynchronní rušení, je použití 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 [24][25].

5.2.5 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 jí 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.

5.2.6 1090ES (Extended squitter)

Určitou nadstavbou, která bude v této práci taktéž zmíněná, je tzv. 1090ES. Jedná se o zprávu, která sice spadá pod ADS-B, ale využívá stejných frekvencí, formátu zpráv a taktéž antén jako klasická SSR odpověď. Squitter obecně je nevyžádaná odpověď kdy se v zásadě odpovídá na něco, na co se nás nikdo netázal – v tomto případě samozřejmě záměrně. Je to odpověď, jenž je „našroubována“ na odpověď SSR v módu S – jedná se o určitý softwarový upgrade, jenž umožňuje přenos většího počtu dat a taktéž šetří zatížení frekvencí 1030 MHz a 1090 MHz tím, že mění periodu a obsah zasílaných dat v závislosti na fázi letu. Například, když je letadlo ve vzduchu, tak zasílá tuto odpověď 2x za sekundu, když je stacionární na zemi tak jednou za 5 sekund.

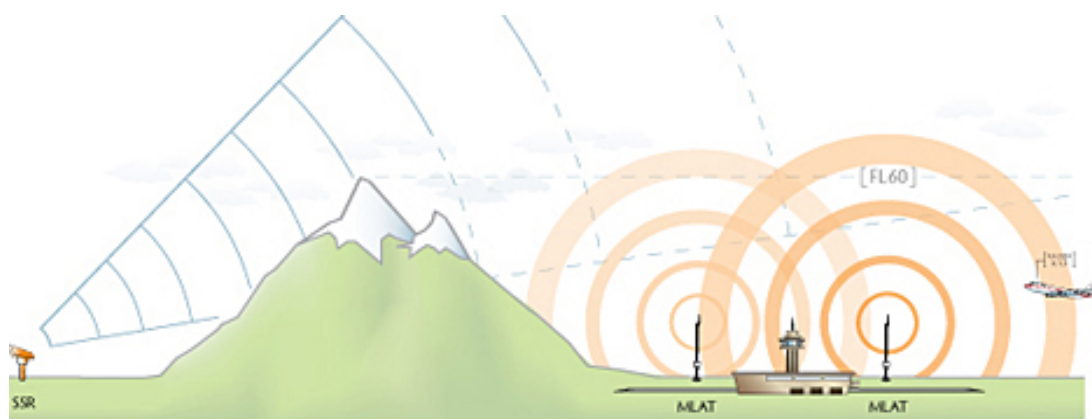
6 PASIVNÍ RADIOLOKÁTORY

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 správné činnosti 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 Multilaterační systém

Princip činnosti multilateračního systému spočívá v tom, že letadlo vysílá na frekvenci 1090 MHz odpovědi SSR anebo zprávy ADS-B. 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 neznámějšího pasivního systému Věra mezi rozšířené pasivní sledovací komplexy vyrobené v Československu patří KOPÁČ, Ramona a Tamara [25].



Obrázek 13: Srovnání SSR a MLAT v hornaté oblasti

Pro systém MLAT se lze setkat s několika názvy. Mezi ty nejrozšířenější patří zejména 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 pak slouží příkladně 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 s dvěma konfiguracemi, první je pasivní konfigurace a 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 důležité pro správnou činnost celého systému je 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. Dalším velmi důležitým aspektem je správná časová synchronizace přijímacích stanic, která zároveň patří mezi největší chybu systému (pokud není časová synchronizace dodržena) [25].



Obrázek 14: Přijímací anténa systému P3D-WS na Jedlové hoře u Chomutova

6.2 PSS Věra

Pasivní sledovací systém Věra je systém sloužící jako nezávislý zdroj informací o vzdušné situaci a plnící 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 [25].

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 [9].

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 přemiemi 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 radary se užívají hlavně v těchto oblastech:

- sledování a vyhledávání nepřátelských objektů,
- rychlé varování před nebezpečím vzdušného napadení,
- detekci a určení polohy,
- mapování,
- dělostřelectvo,
- meteo.měření 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.

Na obrázku níže je radarová stanice systému protiraketové obrany, ležící v Kwajaleinu na Marshallových ostrovech v Tichém oceánu a která by měla být v budoucnu umístěna v České republice ve vojenském újezdu v Brdech [35].



Obrázek 15: Radarová stanice na Kwajaleinu [34]

7.1 Využití podle kmitočtových pásem

Zde je ve stručnosti popsáno využití vojenských radarů podle jednotlivých kmitočtových pásem.

Tabulka 3: Využití vojenských radarů [36]

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

Sledovací radary

Trackové + sledovací radary

Trackové radary

C-RAM

Nástrojové dosahovací radary

8 KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE

Vzhledem k tomu, že cílem této práce je taktéž analyzovat frekvence a systémy používané pro komunikaci v letectví, tak v této kapitole dojde k jejich popsání. Dojde tak zde 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, tak 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.

8.2 Satelitní telefonie

Obecně význam satelitní telefonie již v dnešní době upadá. Důvodem pro to je ten, že po rozšíření GSM sítí je již velmi značné pokrytí Země, a tak již není důvod používat z povrchu satelitní telefony. V minulosti se satelitní telefonii věnovali velmi značně společnosti Iridium anebo Orbcomm. Právě po původním rozšíření GSM sítí se však obě tyto společnosti potýkaly s existenčními problémy. Společnost Iridium se tak 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 stupňů, což neumožňuje pokrytí v polárních oblastech. Kromě toho jsou její služby taktéž poměrně drahé. Příznivější ceny nabízí společnost Inmarsat pro svůj BGAN (Broadband Global Area Network), která využívá geostacionární satelity, které sice taktéž nemají celosvětové pokrytí, ale společnost nabízí příznivější ceny. Díky tomu tak se tak kromě letecké dopravy využívá například i v námořní dopravě.

8.3 Metody určování polohy pomocí komunikačních signálů

První metodou, která je v této práci taktéž popsána, je získání polohy pomocí VDF směrového zaměřovače, kdy letadlo po zaklíčování vyšle 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 nebo se do ELT dostane voda, tak 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, jelikož havaroval) tak se utváří Dopplerův efekt. Satelit naměřená data o frekvenčních posunech zašle na zem, kde se následně určí poloha s přesností zhruba 20 kilometrů. Tyto signály nejlépe zachytí obecně signály na nízkých orbitách. Poloha se určí ve vyhodnocovacím 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 ponořil. I přesto, že ELT je vodotěsné a ponořené stále vysílá, tak signál je tak slabý, že již jej nelze zachytit. Tento systém se nazývá COSPAS-SARSAT.

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

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, která 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.

8.5 Climax

Jedná se o systém, který se využívá pro rozsáhlé sektory s problematickým hornatým terénem, kde nelze využít pro vykrytí 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.

8.6 VDF

Dalším způsobem, pomocí kterého lze určit polohu letadlo je tzv. VDF, pracující v pásmu 118-137 MHz. Tato zkratka znamená „Very High Frequency Direction Finder“. Jedná se tak o směrový zaměřovač, který využívá pro svoji činnost velmi krátké vlny. Princip činnosti tohoto je zařízení je takový, že pokud pilot vysílá na frekvenci anebo trvale zakličuje, tak pomocí příchozího signálu lze určit směr, ze kterého signál přišel. Vzhledem k tomu, že v letecké komunikaci jsou právě nejrozšířenější velmi krátké vlny, tak byl pro činnost tohoto systému zvolen právě tento frekvenční rozsah. Nevýhoda užití velmi krátkých vln však přináší 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 tak 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 jej 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, tak bude frekvence nižší). Pokud máme pouze jednu anténu, tak jsme schopni zjistit pouze zaměření letadla. Pro určení polohy je třeba mít alespoň dvě antény na různých místech, následně pak v místě, kde se výsledná zaměření letadla protnou je 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 ± 2 stupně, třída B ± 5 stupňů, třída C ± 10 stupňů a třída D má horší přesnost, než třída C. Obecně lze tuto službu používat na tzv. „guardu“ – čili na nouzové frekvenci 121,5MHz [26].

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 komunikační technologie a frekvence využívané v letectví, tak jedna ze závěrečných kapitol je taktéž věnována této problematice.

Na začátku práce byly nejprve definovány rádiové vlny obecně a dále byly rozvedeny a popsány různé disturbační 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 frekvenčních 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] *Weather radar* [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://abrapac2015.files.wordpress.com/2019/09/getting-to-gripps-with-surveillance.pdf>
- [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] Basic radar principles [online]. <http://anyflip.com/mrcd/sioy/basic> [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <http://anyflip.com/mrcd/sioy/basic>
- [12] LUKEŠ, Z. Antény a šíření elektromagnetických vln, Přednáškový text. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007
- [13] Historie ŘLP v USA – Ing. Jiří Šála
- [14] 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
- [15] [3] Range or distance measurement [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <http://anyflip.com/mrcd/sioy/basic>
- [16] *Radio navigation* [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <http://anyflip.com/mrcd/sioy/basic>

- [17] PRI [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Pulse%20Repetition%20Frequency%20%28PRF%29.en.html>
- [18] Přednáška PSR – Stanislav Pleninger, FD ČVUT
- [19] Přednáška Letové provozní služby na stanovišti APP Praha – Marek Štumper
- [20] Radar - radarové snímky: Radar a měření srážek [online]. [cit. 2021-8-9]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/radar#:~:text=Aktu%C3%A1ln%C3%AD%20sr%C3%A1%C5%BEky%20a%20bou%C5%99ky%20se, kter%C3%A9%20se%20odr%C3%A1%C5%BEj%C3%AD%20od%20sr%C3%A1%C5%BEk>
- [21] Bezoušek P, Šedivý P, České vysoké učení technické v Praze, and Elektrotechnická fakulta 2004 Radarová technika (Praha: Vydavatelství ČVUT)
- [22] Altimetres [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Altimeter.en.html>
- [23] Česká republika. Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka). In: 038. 2010, č. 105, Částka 38. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf
- [24] Novák A and Kandra B 2010 Moderní sledovací systémy v letecké dopravě: [vědecká monografie (Brno: Akademické nakladatelství CERM)
- [25] PSS [online]. [cit. 2021-8-12]. Dostupné z: <http://pamatky2.kehilaprag.cz/pasvisingr.pdf>
- [26] 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/mQ9R7ZVkJg5P/content/radar-course-3-electromagnetic-spectrum
- [27] Aviation Usages of Frequency Spectrum [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/d7e421981aa64169af1a8d6b37438d4d/aviation20usages20of20frequency20spectrum20-2020170726.pdf>
- [28] LONG, Teng, Zhennan LIANG a Quanhua LIU. Advanced technology of high-resolution radar: target detection, tracking, imaging, and recognition. Science China Information Sciences [online]. 2019, 62(4) [cit. 2021-8-13]. ISSN 1674-733X. Dostupné z: doi:10.1007/s11432-018-9811-0
- [29] XU, Dan, Bowen BIE, Guang-Cai SUN, Mengdao XING a Vito PASCAZIO. ISAR Image Matching and Three-Dimensional Scattering Imaging Based on Extracted Dominant Scatterers: target detection, tracking, imaging, and recognition. Remote Sensing [online]. 2020, 12(17) [cit. 2021-8-13]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12172699

- [30] FEDERAL RADAR SPECTRUM REQUIREMENTS [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/ntia00-40.pdf>
- [31] LONG, Teng, Zhennan LIANG a Quanhua LIU. Advanced technology of high-resolution radar: target detection, tracking, imaging, and recognition. Science China Information Sciences [online]. 2019, 62(4) [cit. 2021-8-13]. ISSN 1674-733X. Dostupné z: doi:10.1007/s11432-018-9811-0
- [32] Anténa [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: http://lh3.googleusercontent.com/b5B3bF7iiH_QTn07dc9DNzfQvuoC6E8Lln3ksJ3rFAi0YfZ-Y4tgPBKQhAI8phi3XdXhTQ=s166
- [33] [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: file:///var/folders/z5/_fc_byk174s3ybm_5n3cfd040000gn/T/com.apple.Safari/WebKitDropDestination-3msHGJ3M/Sn%C3%ADmek%20obrazovky%202021-08-13%20v%C2%A016.11.13.png
- [34] Radarová stanice [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/obr/kw4.jpg
- [35] Armádní radary [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k35.htm
- [36] Radar system engineering: Lecture 1 Introduction [online]. [cit. 2021-8-13]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/VIBINHLE/radar-2009-a-1-introduction-62261283>

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
ARTAS	ATM suRveillance Tracker and Server	ATM
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	McDonnell Douglas	McDonnell Douglas
DF	Direction Finder	Zaměřovač
DME	Distance Measuring Equipment	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
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	Globální systém pro mobilní

	communication	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	Instrumental Landing System	ILS 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 Surveillance Radar	Multistatický primární přehledový radar
MSSR	Monopulse Secondary Surveillance Radar	Monoimpulzní sekundární přehledový 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 Radiolocator	Rádiové rozpoznávání 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)
μ s	microseconds	Mikrosekunda (10^{-6} s)
σ	Target radar cross section	Efektivní odrazná plocha cíle (m^2)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Refrakce	13
Obrázek 2: Znázornění PRI	14
Obrázek 3: Azimutální a vertikální anténa systému PAR	25
Obrázek 4: Meteorologický radar v Oklahomě	28
Obrázek 5: Zobrazení meteo. situace pocházející z meteorologického radaru	29
Obrázek 6: SVD palubního meteorologického radaru [15].....	30
Obrázek 7: Komunikace radaru s letadlem [14].....	32
Obrázek 8: Průběh pulzů dotazu v módu A	33
Obrázek 9: Porovnání dotazů v módu A vyslaných hlavním a postranním lalokem antény dotazovače.....	33
Obrázek 10: Formát odpovědi v módu A	34
Obrázek 11: Průběh pulzů dotazu v módu C.....	34
Obrázek 12: Formát odpovědi v módu C	35
Obrázek 13: Srovnání SSR a MLAT v hornaté oblasti	35
Obrázek 14: Příjímací anténa systému P3D-WS na Jedlové hoře u Chomutova.....	40
Obrázek 15: Radarová stanice na Kwajaleinu	38

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Rozdělení rádiových vln podle ITU [2] ... Chyba! Záložka není definována.	
Tabulka 2: Způsob šíření vln podle kmitočtových pásem [3]	9
Tabulka 3: Využití vojenských radarů	10

