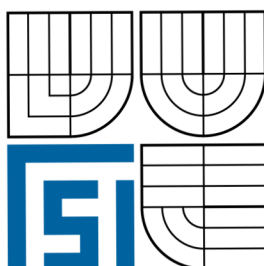


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

PŘEHLEDOVÉ RADARY V ČR CZECH SURVEILLANCE RADARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB KOHUTEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. SLAVOMÍR VOSECKÝ, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Kohutek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Přehledové radary v ČR

v anglickém jazyce:

Czech Surveillance Radars

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Struktura sítě přehledových radarů v ČR, příčiny jejího budování, její současné a budoucí využití.

Cíle bakalářské práce:

Přehled existujících radarů pro řízení letového provozu v ČR

Cíle budování a provozní požadavky na radary ŘLP v ČR

Charakteristiky použitých radarových systémů

Využití těchto radarových systémů v ČR a v Evropě

Seznam odborné literatury:

- [1] PŘIBYL, Karel; KEVICKÝ, Dušan: Letecká navigace, Praha, Nakladatelství dopravy a spojů, 1980, 412s.
- [2] VOSECKÝ, Slavomír a kol.: Základy leteckých navigačních zařízení, Brno, Vojenská akademie, 1988, 750s.
- [3] KULČÁK, Ludvík a kol.: Air Traffic Management, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 314s. ISBN 80-7204-229-7.
- [4] KAYTON, Myron; FRIED, Walter: Avionics Navigation Systems, John Wiley & Sons, Inc, London, 1997, 773s. ISBN 0-471-54795-6.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce vytváří obecný soubor informací souvisejících s přehledovými radary. Jsou zde zmíněny hlavní části radaru obecně, vysvětleny důležité pojmy týkající se konstrukce radaru a uvedeno dělení radarů podle způsobu využívání elektromagnetického záření. Část textu se zabývá teorií týkající se přehledových radarů. Je vysvětlen princip funkce primárních a sekundárních přehledových radarů, některé problémy primární i sekundární radiolokace, jejich řešení a porovnání schopností primárního a sekundárního radaru. Dále jsou uvedeny požadavky na radary a radarové informace a vysvětlena jejich důležitost a nenahraditelnost v současném systému řízení letového provozu. Následuje seznam přehledových radarů v České republice a přehled dostupných charakteristik. Je uvedena přehledová infrastruktura a možnosti zpracování, resp. distribuce radarových informací systémy ARTAS a EUROCAT 2000, resp. stanicemi RMCDE a přenosovou sítí RADNET. Konec práce je zaměřen na současný stav a budoucí vývoj přehledové infrastruktury, implementaci vzdušného prostoru módu S s uvedením požadavků Elementary Surveillance (ELS) a Enhanced Surveillance (EHS).

Klíčová slova

radar, přehledový radar, primární radiolokace, sekundární radiolokace, řízení letového provozu, přehledová infrastruktura, distribuce radarových dat, mód S

Abstract

The bachelor's thesis covers a general set of information related to surveillance radars. The main parts of radar are mentioned and important terms related to radar construction explained. Also a classification of radars on the basis of use of electromagnetic radiation is presented. A part of the text is devoted to the theory of surveillance radars. The principles of primary and secondary radars, some of the problems of primary and secondary radiolocation with their solutions are explained, and comparison of primary and secondary radar's abilities is presented. Also the demands for a radar and radar-provided information are introduced, and radar's importance and irreplaceableness in today's air traffic control systems is shown. A list of Czech surveillance radars including available characteristics follows. The surveillance infrastructure and capabilities of processing or distribution of radar information by ARTAS and EUROCAT 2000 or RMCDE units and distribution network RADNET is included. The end of this text is focused on present situation and future development of surveillance infrastructure and implementation of mode S Elementary Surveillance (ELS) and Enhanced Surveillance (EHS) requirements.

Keywords

radar, surveillance radar, primary radiolocation, secondary radiolocation, air traffic control, surveillance infrastructure, radar data distribution, mode S

Bibliografická citace mé práce

KOHUTEK, J. *Přehledové radary v ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Přehledové radary v ČR vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

8. května 2009

.....

Jakub Kohutek

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu bakalářské doc. Ing. Slavomíru Voseckému, CSc. za jeho iniciativu a potřebný „nátlak“ v počátcích tvorby mé bakalářské práce a následné nasměrování správnou cestou. Děkuji za věcné připomínky a cenné rady člověku, který ke mně mluvil stručně, přesto řekl mnoho.

Velký dík za podporu, trpělivost a porozumění patří Anně Korvasové, která má upřímnou radost z mých úspěchů. To je nesmírně motivující.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Předmluva..... | 11 |
| Úvod..... | 13 |
| 1 Radary..... | 15 |
| 1.1 Základní části radaru | 15 |
| 1.2 Rozdělení radarů podle formy vyzařované energie..... | 17 |
| 2 Přehledové radary..... | 19 |
| 2.1 Primární přehledové radary..... | 19 |
| 2.1.1 Radiolokační rovnice..... | 19 |
| 2.1.2 Forma vyslané energie..... | 20 |
| 2.1.3 Určení polohy..... | 21 |
| 2.1.4 Některé problémy primárního radaru | 22 |
| 2.2 Sekundární přehledové radary..... | 23 |
| 2.2.1 Forma vyslané energie..... | 24 |
| 2.2.2 Určení polohy..... | 25 |
| 2.2.3 Některé problémy sekundárního radaru | 26 |
| 2.3 Pasivní radary..... | 28 |
| 2.4 Rozdělení přehledových radarů podle účelu | 29 |
| 3 Požadavky na přehledové radary..... | 31 |
| 3.1 Radarové vs. neradarové rozstupy..... | 31 |
| 3.2 Požadavky na radarové informace..... | 31 |
| 3.3 Požadavky na přehledové radary..... | 33 |
| 4 České přehledové radary..... | 34 |
| 4.1 Některé parametry českých přehledových radarů..... | 35 |
| 4.2 RADNET a RMCDE..... | 38 |
| 4.3 Vojenské radary..... | 39 |
| 5 Využití přehledových radarů a jejich budoucnost..... | 43 |
| 5.1 Rozdělení vzdušného prostoru a stanovišť řízení letového provozu..... | 43 |
| 5.2 Současnost a budoucnost přehledových radarů..... | 45 |
| 6 Závěr..... | 49 |
| Použité zdroje..... | 50 |
| Seznam použitých zkratek..... | 53 |
| Seznam příloh..... | 55 |

Předmluva

Při výběru tématu své bakalářské práce bylo mou jedinou podmínkou to, aby bylo téma vypsáno Leteckým ústavem, nejlépe odborem Letecký provoz. Na studijní program Provoz letadel se těším již od podání přihlášky na vysokou školu. Ačkoliv jsem neměl s letectvím žádné zkušenosti a ani ve volném čase jsem se mu nijak intenzivně nevěnoval, vždy mě pohled na jakýkoliv letící stroj fascinoval, snad asi jako každého chlapce. Mé rozhodnutí jít studovat Letecký provoz jen podpořil široký záběr studovaných předmětů, od čehož je možné očekávat také široké uplatnění. Preferuji získání co nejvíce obecných informací před úzkým profilováním již v počátcích studia. Volba tohoto tématu nebyla ovlivněna žádnými předchozími zkušenostmi, a nemohu tedy přesně říct, proč jsem si vybral právě toto téma. Hlavním důvodem byl tedy nejspíše pouze první dojem z vedoucího práce.

Na doporučení docenta Voseckého jsem začal studovat problematiku přehledových radarů, nejprve teorii z publikace *Introduction to radar systems* od Merrilla I. Skolnika, která poskytuje mnohem více než nutné teoretické základy a nutno říct, že mnohé popisné rovnice a schémata zůstaly nepovšimnuty. Ovšem mojí snahou bylo nejprve nastudovat a následně uvést pouze ty informace, které by potenciálního čtenáře neznalého tématu neodradily při prvním nahlédnutí, ale naopak by ho mohly zaujmout. Vlastností elektromagnetických vln, které zaujaly mne, je věnována celá jedna příloha.

Stěžejní literaturou pro studium principu funkce přehledových radarů byla publikace *Klasické prostriedky zabezpečovacej leteckej techniky*. Publikace *Základy leteckých navigačních zařízení* mi ukázala, že se dá psát stručně, a přesto výstižně, tak, aby tematiku pochopil i neznalý čtenář. Svou práci bych se rád tomuto stylu přiblížil, alespoň co do výkladu.

Výčet radarů na serveru Řízení letového provozu s.p. (www.rlp.cz) nebyl dlouho aktualizován (odkazuje na systémy, které již byly nahrazeny novými radary), ovšem v tiskových zprávách a tzv. Stripech (aktuality uvedené na serveru) bylo možné tento výčet poopravit. S uvedením aktualizovaného seznamu též pomohlo pročtení různých internetových fór a diskuzí nadšenců pro radarovou techniku.

Technické specifikace používaných radarů byly těžko dohledatelné, přesto za podpory vyhledávacího serveru scholar.google.cz (jenž se specializuje na vyhledávání dokumentů ve formátech pdf, ppt apod. a k tomuto účelu jej mohu čtenáři doporučit) se podařilo najít odborné články a reklamní materiály výrobce, jež poskytují různé charakteristiky. Opět fóra a diskuze poskytly některé informace, ač jejich zdroje často nebyly uvedeny. Z tohoto důvodu bude speciálně u každého radaru uvedeno, z jakých zdrojů informace pocházejí. Kvalitním zdrojem technických parametrů starších radarů by mohl být SCHEJBAL V., *Czechoslovakia cumulative index on radar systems 1960–1990*, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-27, 1991, 4 (Jul 1991), 747, jenž se mi ovšem nepodařilo získat a o jehož existenci vím pouze z referencí jiných článků.

Co se týká současného a budoucího využití přehledových radarů, byly mi zdrojem letecké předpisy – především L 10 svazek IV, webové stránky www.rlp.cz a www.eurocontrol.int. Obzvláště server organizace EUROCONTROL je zajímavým, užitečným a dle mého názoru i přehledně organizovaným a lehce čitelným zdrojem informací.

Tvorba bakalářské práce mi poskytla mnoho nových informací a pohledů, které jistě budou v dalším studiu výhodou. Následující stránky jsou jinde nezískatelným, lze snad říct i exkluzivním uceleným „přehledem“ o přehledových radarech, zvláště těch českých.

Jakub Kohutek

Úvod

Radiolokátor (z lat. radius – paprsek, locator – zaměření), zkráceně radar (RADio Detection And Ranging) je přístroj, který byl v minulosti používán k rádiovému zjišťování – tedy zda vůbec v jeho okolí „něco“ je – a zaměřování – jak je to „něco“ daleko a kterým směrem se nachází.

Prvním zařízením, které splnilo tuto funkci, byl tzv. telemobiloskop vynálezce Christiana Hülsmeyera. Hülsmeyer v roce 1904 jako první změřil čas, za který urazilo elektromagnetické záření vzdálenost ke kovové lodi a zpět, a z tohoto času spočetl vzdálenost, ve které se loď nacházela. V literatuře je uvedeno⁷, že telemobiloskop dokonce zazvonil, když přijímač zachytil odraženou vlnu.

V současné době lze radar definovat jako zařízení sloužící k získávání **informací** o **cíli** využívající vlastností elektromagnetických vln.

Nejdůležitějšími **informacemi**, které radar dává a pro jejichž zjišťování byl a stále je využíván, jsou údaje o poloze cíle. Ty mají charakter polárních souřadnic u 2D polohy, tedy délku spojnice radar–cíl (v letectví šikmá dálka, *angl. slant range*) a úhel v rovině vodorovné (v letectví azimut, *bearing*). U 3D polohy má informace o poloze charakter sférických souřadnic, kdy ke dvěma výše uvedeným přibude ještě výškový úhel (*elevation*), tedy úhel mezi rovinou horizontální a spojnici radar–cíl měřený ve vertikální rovině.

V současné době umějí některé radary kromě polohy také určit rychlost cíle, popřípadě přenést data v binárním kódu, která cíl záměrně vysílá.

Cílem je myšleno vše, od čeho se elektromagnetické vlny odrazí zpět směrem k radaru. Mohou to být lesy, vodní plochy, budovy a další tzv. pevné cíle. Lodě, letadla a další dopravní prostředky, ptáci, hmyz nebo dokonce déšť a oblačnost (pokud fouká vítr) se řadí k cílům pohyblivým.

Mezi cíle se ale také počítají objekty, které radarem vyzářené elektromagnetické vlny nemusejí nutně odrážet zpět směrem k radaru (jako například letadla s technologií stealth, které vlny mohou pohlcovat, nebo alespoň odrážet jiným směrem), ale v případě tzv. pasivních radarů stačí, když cíl elektromagnetické záření vysílá.

Protože radar je souhrnné označení pro určitý typ zařízení a škála informací a cílů je široká, různé typy radarů (zpracovávající různé informace od různorodých cílů) se od sebe liší principem funkce, velikostí, konstrukcí, nebo alespoň nastavením.

Schopnost zjišťovat polohu objektů je vyžadována v mnohých aplikacích. Radary mohou být nepohyblivé, nebo pohyblivé (umístěné na palubách letadel a lodí, případně upevněné k pozemnímu vozidlu). Radary se využívají například ke sledování letadel a lodí civilních i vojenských. Policejní radary měří rychlost vozidel, meteorologické radary dávají přehled o oblačnosti. Existují také mapovací radary, které svým pohybem kolem sledovaného statického objektu získávají informaci o jeho tvaru.

V civilním i vojenském letectví je používáno několik různých typů radarů:

- přehledové radary** – vytvářejí obraz situace ve vzdušném prostoru, tento obraz je nezbytný pro řízení letového provozu. Kromě informace o poloze mohou některé přehledové radary získávat o letadlech dodatečné informace.
- přesné přiblížovací radary** – umožňují správné přiblížení letadla k přistávací dráze a následné přistání.
- meteorologické radary** – jejich účelem je sledování oblačnosti a srážek. Díky těmto radarům může meteorologická služba mimo jiné vydávat varování pro letadla při zhoršených meteorologických podmínkách.
- palubní radary** – radary poskytující pilotovi informace o počasí (velikost kapek deště, výška mraků), povrchu země (možnost vyhnutí vysokým překážkám). Na základě mapování terénu je umožněna i navigace.

Předmětem této práce jsou právě radary přehledové. V teoretické části bude uvedeno rozdělení radarů a popsány principy funkce impulzních radarů. V této části budou také vysvětleny důležité pojmy týkající se tématu. Dále budou uvedeny dostupné informace o přehledových radarech umístěných v České republice a bude nastíněno, jak se s radarovými informacemi nakládá. Podíváme se na přehledovou infrastrukturu využívanou při řízení letového provozu a její vývoj v budoucích několika letech.

1 Radary^{12,23,26}

1.1 Stavba radaru

Základní princip radaru je relativně jednoduchý. Radar vyšle energii ve formě elektromagnetické vlny, následně přijme vlny odražené od objektů, vyhodnotí tvar takovéto vlny a již vyhodnocenou informaci (jejíž nositelkou je elektromagnetická vlna) zobrazí ve srozumitelné podobě. Hlavními částmi radaru jsou: vysílač, modulátor, anténní přepínač, anténa, přijímač a indikátor. Všechny tyto části přímo vykonávají výše uvedené.

Vysílač

K vyslání elektromagnetické vlny je zapotřebí v první řadě generátoru vlny, modulátoru, který na nosnou vlnu namoduluje přenášenou informaci, a antény. Dále je zapotřebí nějakého spouštěcího mechanismu.

Generátor vlny produkuje vysokofrekvenční nosnou vlnu, modulátor zajistí, aby měla požadovaný tvar, a generátor spouštěcích impulsů určuje, ve kterých okamžicích bude vlna vyzářena anténou do prostoru. Pro měření vzdálenosti je třeba, aby vysílač dal vědět přijímači, ve kterém okamžiku vlnu vyslal. Přijímač poté z časového rozdílu vyslání a příjmu vlny určí vzdálenost.

Přijímač

Tato část radaru má za úkol přijímat elektromagnetické vlny z prostoru a tento signál posléze zpracovat (detekovat). Samotné zpracování signálu je to nejnáročnější. Do antény kromě odrazu požadovaného cíle přichází odražené vlnění také ze všech ostatních objektů, které byly ozářeny – nežádoucí ozvy. Do antény přichází i záření, jehož zdrojem jsou okolní tělesa. Podle zákonů termodynamiky každé těleso s teplotou vyšší než 0 K je zdrojem elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření dopadá na anténu i z vesmíru. Taková záření se označují jako šum. Dokonce i vodiče a obvody uvnitř radaru jsou zdrojem šumu. Při velkých vzdálenostech sledovaného cíle od radaru má požadovaný signál velmi nízkou intenzitu a může se stát, že v okolním šumu zůstane nepovšimnut. Důležitým pojmem je poměr signálu k šumu (*signal-to-noise ratio*). Po složitém zpracování signálu z antény přijímač posílá sledované informace na indikátor.

Indikátor

Indikátorů je několik druhů, dělí se podle druhu výstupní informace na analogové a digitální. V současné době je požadován digitální výstup kvůli přehlednému zobrazení na počítačovém monitoru, možnostem dalšího zpracování radarové informace či archivaci.

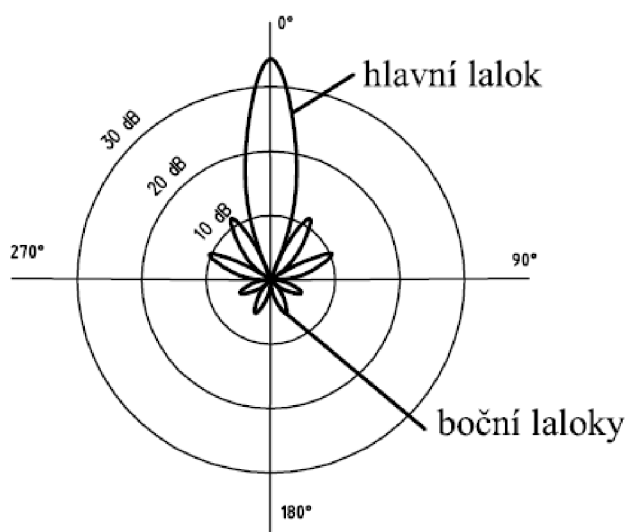
Anténa

Podstatnou roli ve výkonu radaru hraje právě anténa. Používá se jak pro vysílání, tak pro příjem, proto je ve většině případů tato anténa použita k oběma činnostem. Anténní přepínač zajistí, aby byla anténa bezprostředně po vyslání informace schopna znovu přijímat, a nedošlo tak ke ztrátě signálu od cílů v blízkosti radaru. Pokud chceme určit i výšku cíle, je třeba, aby anténní svazek kromě 360° rotace v horizontální rovině prováděl současně také kývavý pohyb nahoru a dolů (tzv. 3D radar). Tímto způsobem je možné určit výškový úhel. Tyto dva současné pohyby, pokud jsou vykonávány mechanicky, kladou vysoké nároky na konstrukci antény. V současné době se lze setkat s pojmem fázovaná anténa (*phased array antenna*), která se skládá z mnoha modulů. Elektronickým rozkmitem svazku realizuje pohyb ve vertikální rovině, a tím snižuje mechanické namáhání, navíc umožňuje sledovat více cílů naráz.

Není cílem tohoto textu podrobně popsat, jak která část vypadá nebo pracuje. Bude však třeba vysvětlit pojmy, které se vztahují buď k radaru jako celku, nebo k některým jeho částem.

šumové číslo – vyjadřuje úroveň šumu vznikajícího v přijímači, ukazuje, kolikrát větší šum přijímač vyrábí, než by podle teoretických předpokladů měl. Čím je šumové číslo menší, tím je přichozí signál méně zkreslen. Udává se v dB.

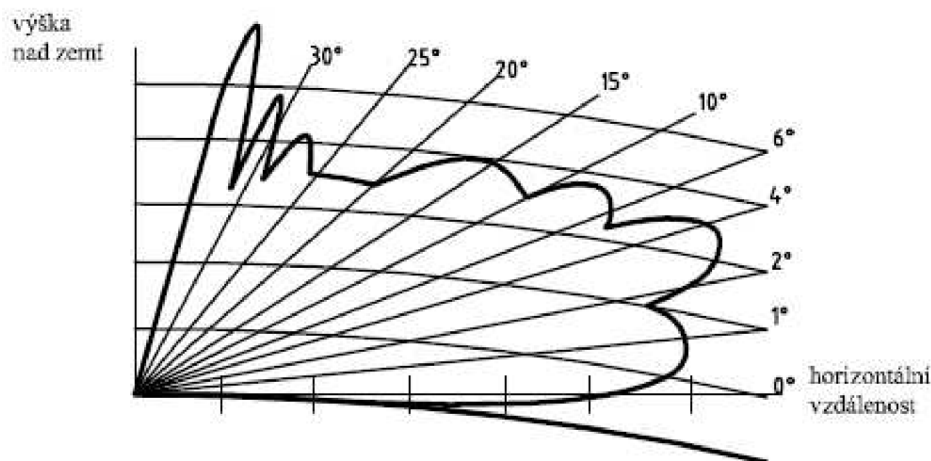
zisk antény – toto číslo (v dB) udává, kolikrát je výkon vyzářený v určitém směru vyšší, než kdyby byl vyzářen všesměrově. Poměr těchto dvou výkonů v závislosti na úhlu od osy antény vyjadřuje tzv. *vyzařovací diagram*.



Obr. 1.1 Typický horizontální vyzařovací diagram směrové antény primárního radaru [12]

U přehledových radarů požadujeme, aby byl zisk antény největší v její ose a aby při odchylce od osy větší než 1–2° prudce klesal. Oblasti vysokého zisku v ose antény říkáme *hlavní lalok* nebo *hlavní svazek* antény. Hlavní svazek musí být charakterizován šířkou svazku a maximálním ziskem. Menší šířka svazku má za následek větší přesnost v azimutu, ovšem není vždy výhodou, aby byl svazek příliš úzký, jak bude ukázáno v kapitole 3.

Směrový vyzařovací diagram radaru ve vertikální rovině – SVD – je částečně experimentálním a částečně teoretickým zobrazením závislosti dosahu radaru na výškovém úhlu. Závisí nejen na charakteristikách radarového zařízení, ale také na jeho umístění v terénu, velikosti sledovaného cíle, počasí... Na konečnou podobu SVD má jistě vliv mnoho dalších aspektů, které dosud nebyly prozkoumány.



Obr. 1.2 Typický SVD směrové antény primárního radaru[12]

Měřítka výškového úhlu v SVD zpravidla není konstantní a je jemnější pro menší výškové úhly, kde se více projevuje odraz vln od země.

Efektivní plocha antény – charakteristika antény; převede hustotu výkonu na anténě na přijímaný výkon.

Ekvivalentní odrazná plocha – není charakteristikou radaru, ale sledovaného cíle. Znamená plochu příčného průřezu, jaký by cíl měl mít, aby zachytil a následně vyzářil stejný výkon jako cíl skutečný.

1.2 Rozdělení radarů podle formy vyzařované energie

Radary se stálou vlnou

Tyto radary vysílají elektromagnetickou vlnu o určité frekvenci nepřetržitě, resp. vysílají spojitou vlnu, pokud jsou v činnosti. Hlavní jejich využití spočívá v měření rychlosti na základě Dopplerova efektu, tedy změny frekvence vlny odražené od pohybujícího se předmětu. (Pro vysvětlení Dopplerova efektu předpokládejme, že nezáleží na tom, jestli je dopadající vlna od cíle odrazena, nebo je cíl zdrojem vlny stejné charakteristiky, jako by měla vlna dopadající. Analogií budiž všem známá projíždějící sanitka, případně troubící automobil.)

Pokud jsou vysílač a přijímač na jednom místě, je problémem rozeznat slabší odraženou vlnu od té, co je produkována vysílačem. I ty nejlepší izolace nedokáží zabránit průchodu

vlny z vysílače přímo do přijímače. Radary s vysílačem a přijímačem na různých místech se nazývají bistatické. Pro měření vzdálenosti je nutná frekvenční modulace stálé vlny k určení časového rozdílu vyslání a příjmu signálu.

Impulzní radary

Tento druh radaru vysílá vlny v krátkých impulzech o vysoké energii a poté čeká na odrazy, které budou dále vyhodnoceny. U těchto radarů slouží anténa k vysílání i příjmu, nutný je však přepínač, který dokáže rychle měnit požadovanou funkci.

Pasivní radary

Pasivní radary nemají vysílač, který by ozařoval sledovaný prostor, nýbrž zařízení je složeno z většího počtu přijímačů. Porovnáním signálu z jednotlivých přijímačů lze přesně určit polohu cíle. Tento druh radaru má využití ve vojenských aplikacích, v civilním letectví není zatím jeho potenciál plně využit.

Pouze impulzní a pasivní radary se používají pro řízení letového provozu, zbytek textu se tedy bude zabývat právě jimi.

2 Přehledové radary

V civilním letectví se používají převážně radary impulzní, ve vojenském letectví jsou ve větší míře zastoupeny i radary pasivní. Právě impulzním radarům bude věnována převážná část kapitoly.

Rozdělení impulzních radarů:

- primární přehledové radary (PSR, *Primary Surveillance Radar*)
- sekundární radary (SSR, *Secondary Surveillance Radar*)

2.1 Primární přehledové radary

Základním principem primárního radaru je vyslání krátkého impulzu o vysoké energii, vyčkávání na echo (odraženou vlnu) a jeho následné vyhodnocení.

2.1.1 Radiolokační rovnice^{12,23}

P_v vyzářený výkon

r vzdálenost

G zisk antény

σ ekvivalentní odrazná plocha cíle

S_p efektivní plocha antény

P_p přijímaný výkon

Kdyby byla energie vyzařována rovnoměrně ve všech směrech, ve vzdálenosti r od radaru definujeme hustotu vyzářeného výkonu.

$$\frac{P_v}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

K usměrnění energie do požadovaného směru se používá anténa s výkonovým ziskem G , potom hustota vyzářeného výkonu ve vzdálenosti r je

$$\frac{P_v \cdot G}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

Na cíl o ekvivalentní odrazné ploše σ tedy dopadá výkon

$$\frac{P_v \cdot G \cdot \sigma}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

Předpokládejme, že cíl vyzáří dopadený výkon všesměrově. V místě radaru je hustota vyzářeného výkonu

$$\frac{P_v \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi r^2)^2} \quad (2.4)$$

Výkon přijímaný anténou je tedy

$$P_p := \frac{P_v \cdot G \cdot \sigma \cdot S_p}{16\pi^2 \cdot r^4} \quad (2.5)$$

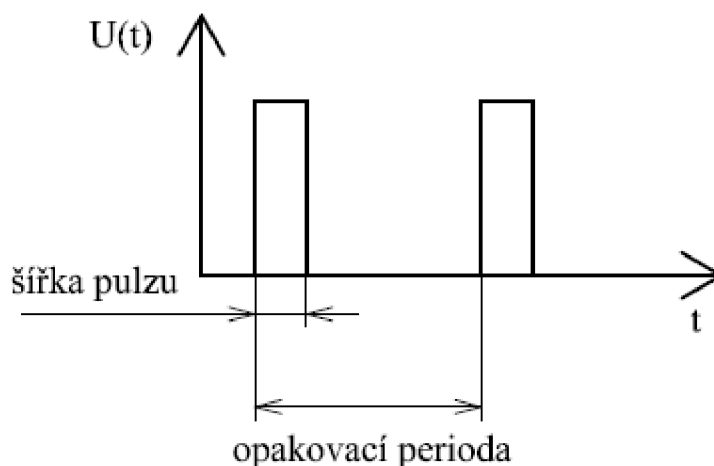
Po úpravě zjistíme, že dosah r je funkcí čtvrté odmocniny vyzářeného výkonu (ostatní parametry se při stejném typu radaru a stejném cíli považují za konstantní). Abychom dosah radaru zvýšili dvakrát, musel by být vyzářený výkon vyšší 16x. Je tedy vhodné dosáhnout zvýšení dosahu spíše než zvýšením výkonu změnou parametrů antény se zřetelem na vztah mezi efektivní plochou antény S_p a ziskem G .

$$S_p := \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \quad (2.6)$$

Tento vztah pro dosah radaru je pouze ilustrativní a platí pro velmi zjednodušené podmínky a v žádném případě nemůžeme považovat takto spočtený dosah za dosah skutečného radaru ve skutečném prostředí. Dosah je snížen např. útlumem vln v atmosféře, vysokou hladinou okolního šumu. Různým formám radiolokační rovnice je věnována celá jedna kapitola v Introduction to radar system. Důležitým závěrem této formy je vztah mezi vyzářeným výkonem a vzdáleností.

2.1.2 Forma vyslané energie^{12,26}

Primární radar nejdříve vyšle krátký pulz, pak se na určitou dobu přepne na příjem a čeká na odražené vlny (echa), pak se opět přepne na vysílání, vyšle pulz a cyklus se opakuje.



Obr. 2.1 Obálky vysokofrekvenčních impulzů vysílače primárního radaru [12]

Energie vyslaná za dobu šířky pulzu se nazývá špičkový výkon, tento se používá v radiolokační rovnici. Energie vyslaná za dobu jedné periody se nazývá střední výkon, který je dobré znát pro určení vhodného zdroje nebo způsobu chlazení.

Jestli je opakovací perioda pulzu – *pulze repetition time (PRT)* – T, pak opakovací frekvence pulzu – *pulze repetition frequency (PRF)* – je $f = 1/T$.

$$PRF := \frac{1}{PRT} \quad (2.7)$$

2.1.3 Určení polohy^{12,26}

Dálka

je určena změřením času uplynulého mezi vysláním impulzu a příjmu echa. Pro vzdálenost r platí:

$$r := \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.8)$$

Kde 2r je vzdálenost, kterou musí urazit impulz k letadlu a zpět, t je změřený čas a c je rychlost šíření elektromagnetické vlny v prostředí (pro praktické využití je $c = 300\,000\,000$ m/s). Každá mikrosekunda od vyslání po příjem echa znamená 150 m vzdálenosti cíle od radaru. Z těchto rovnic vyplývají omezení pro dosah radaru:

Minimální dosah – je dán šířkou impulzu a dobou potřebnou k přepnutí na příjem. V době vyslání a přepínání není radar schopen přijímat a žádný z ozvů v tomto časovém úseku nebude vyhodnocen.

Maximální dosah – je dán opakovací periodou pulzu. Pokud je doba potřebná k překonání vzdálenosti radar–cíl a zpět větší než opakovací perioda pulzu, hovoříme o odrazu v druhé časové periodě, jehož akceptování by vedlo k složitějšímu, tzv. nejednoznačnému měření dálky. Odrazy v druhé (a teoreticky i každé další) časové periodě by při standardním zpracovávání přijatých signálů mohly zkreslovat informaci o vzdálenosti. Jejich odstranění lze dosáhnout při proměnlivé délce opakovací periody. Odrazy v základní opakovací periodě se zobrazují pokaždé ve stejné vzdálenosti, odrazy v druhé časové základně (opakovací periodě) se pokaždé zobrazují ve vzdálenosti jiné, a lze je tak rozlišit a statisticky eliminovat.

Rozlišovací schopnosti v dálce, tedy nejmenší vzdálenost mezi dvěma cíli, kdy jsou ještě pro radar rozeznatelné, je 150 m za každou mikrosekundu šířky vysílacího pulzu.

Azimut

Je určen přímo natočením antény. Přijímač měří, v jaké pozici je signál cíle nejsilnější. Anténa se otáčí konstantní rychlostí v horizontální rovině, počet otáček za minutu se nazývá *rychlost snímání*.

Rozlišovací schopnost v azimutu je schopnost radaru rozeznat dvě letadla ve stejné vzdálenosti, ale v jiném úhlu. Rozlišovací schopnost není stejná jako šířka anténního svazku, nicméně určitá korelace existuje.

Rozlišovací schopnost v dálce i v azimutu může být snížena v případě použití nevhodného indikátoru, kdy radar od sebe dva cíle rozezná, ovšem dva blízké cíle na indikátoru mohou být pro lidské oko nerozlišitelné.

2.1.4 Některé problémy primárního radaru¹²

Šum

$P_{p \text{ (min)}}$ je nejnižší výkon, který může být po průchodu přijímačem rozeznán jako signál. Zjištění slabého signálu může být znemožněno šumem. U nízkých frekvencí pochází určitá část šumu z vnějších zdrojů, u frekvencí používaných pro řízení letového provozu je rozhodující jen vnitřní šum přijímače, který je vyjádřen šumovým číslem.

Přijímaný signál musí mít výkon alespoň $P_{p \text{ (min)}}$, ale nesmí být větší, než je úroveň zahlcení přijímače. Může se stát, že signály od cílů v malé vzdálenosti od radarů jsou tak silné, že způsobí zahlcení přijímače, a signály od vzdálenějších cílů zase budou slabší než $P_{p \text{ (min)}}$ a taktéž nedojde k jejich vyhodnocení. Existuje možnost řízení zisku přijímače, což znamená, že v době mezi dvěma impulzy jsou přichozí signály různě zesíleny. Volba vhodného průběhu zisku v čase je však náročná. Další možností je tzv. komprese pulzu²⁶. V blízké zóně je okolí ozařováno klasickým úzkým pulzem, zatímco vzdálená zóna je ozařována dlouhým pulzem. Během vysílání dlouhého pulzu dochází ke změně vysílaného kmítočtu. Při příjmu potom přijatý dlouhý pulz projde frekvenčně závislým zpoždovacím členem, kde je časově komprimován, a na výstupu pro další zpracování je k dispozici opět krátký pulz (energie vyslaná na cíl během dlouhého pulzu se přepočte na výkon s použitím délky krátkého pulzu, čímž se vyslaný výkon výrazně zvýší).

Nežádoucí ozvy

Energie vyslaná z radaru se neodrazí jen od sledovaného cíle, ale i od ostatních „odrážejících“ objektů, které byly ozařeny. Kopce, budovy, sloupy, srážky, hejna ptáků nebo hmyzu a další vytváří nežádoucí ozvy. Zobrazení nežádoucích ozvů na indikátoru spolu s informacemi o poloze letadla může operátora mást.

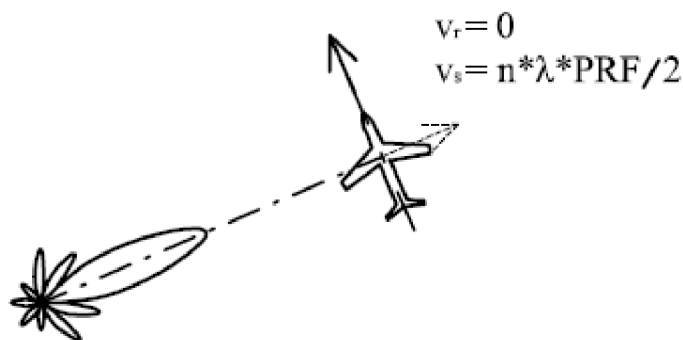
K odstranění nežádoucích cílů se používá systém IPC – indikace pohyblivých cílů (*MTI – Moving Target Indication*). MTI využívá Dopplerova jevu, tedy změny frekvence vlny při odrazu od pohyblivého cíle. Systém MTI odfiltruje signál o stejné frekvenci, jako měl vyslaný impuls, a zobrazí jen ty cíle, které mají nenulovou radiální rychlost vůči radaru.

Nevýhodou je, že může dojít ke ztrátě signálu od letadla letícího po tangentě vzhledem k radaru (má nulovou radiální rychlost v_r) a při tzv. slepých rychlostech (v_s).

Slepé rychlosti jsou takové rychlosti letadla, kdy radiální složka v intervalu mezi impulzy je násobek poloviny vlnové délky.

Systém MTI zobrazí cíle v širokém rozsahu radiálních rychlostí včetně cílů nežádoucích.

Složitějším zařízením je SPC – selekce pohyblivých cílů (*MTD – Moving Target Detection*) který vytváří osm nebo deset Dopplerových frekvencí, což umožňuje rozdělit cíle podle velikosti radiální rychlosti a následně filtrovat pomalu se pohybující cíle od rychlých letadel. Zároveň dojde k eliminaci slepých rychlostí.



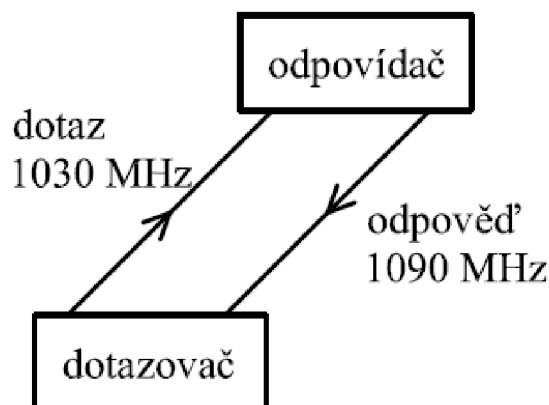
Obr. 2.2 Ztráta signálu při letu po tangente a při slepých rychlostech [12]

I déšť vyvolává nežádoucí ozvy, jejichž odstranění lze dosáhnout kruhovou polarizací. Kulový tvar kapek má za následek odraz vlny s polarizací opět kruhovou, ale na přijímači se odražená vlna projeví v opačném smyslu a bude potlačena. Naproti tomu od letadel se kruhově polarizovaná vlna odrazí s polarizací eliptickou a signál na anténě nebude úplně potlačen, ale jen zeslaben. Při dobrém počasí je ale zeslabení signálu od letadla nežádoucí, proto většina radarů umožňuje přepnutí mezi lineární a kruhovou polarizací.

2.2 Sekundární přehledové radary^{12,17}

Principem činnosti sekundárního radaru je vyslání dotazu radarem a vyhodnocení odpovědi vyslané tzv. odpovídačem letadla. Pro funkci radaru je proto nutné, aby sledované letadlo bylo vybaveno odpovídačem, tzv. transpondérem (zkratka pro anglický název *transmitter – responder, transponder*)

Vysílač radaru – dotazovač (*interrogator*) – vyšle dotaz na frekvenci 1030 MHz. Na stejnou frekvenci je naladěný přijímač transpondéru. Po zpracování dotazu letadlo vyšle odpověď na 1090 MHz. Pozemní přijímač pak tuto informaci na 1090 MHz zpracuje.



Obr. 2.3 Dotaz–odpověď [12]

Přítomnost vlastního vysílače na palubě letadla znamená, že sekundární radar nespolehá na odraz vln a maximální dosah radaru je dán pouze druhou odmocninou vyzářeného výkonu (a ne čtvrtou odmocninou jako u primárního radaru). Dosah je určen menším z dosahů dotazovače a odpovídače. Dosah sekundárního radaru není závislý na ekvivalentní odrazné ploše letadla. Pro představu lze použít k výpočtu dosahu vztahu 2.3, kde ekvivalentní odraznou plochu σ nahradíme efektivní plochou antény S_p . Rozdílná frekvence dotazu a odpovědi odstraňuje jeden z problémů primárního radaru – nežádoucí ozvy.

Sekundární radiolokace kromě zjištění okamžité polohy cíle umožňuje komunikaci mezi radarem a cílem.

2.2.1 Forma vyslané energie

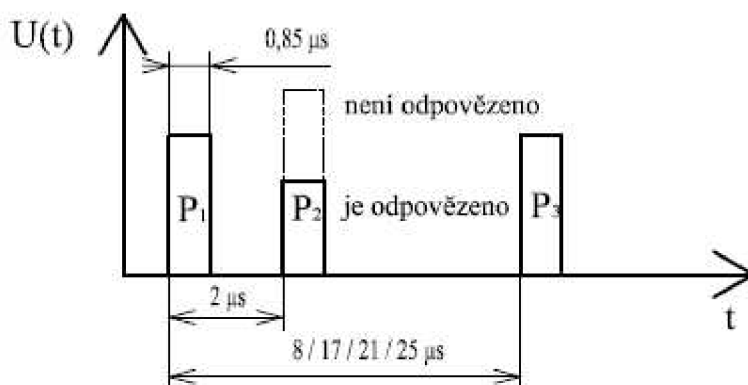
Dotaz

Dotaz je vyslán z radaru a přijímán letadlem. Je tvořen dvěma impulzy označenými P_1 a P_3 . V závislosti na vzdálenosti těchto dvou pulzů rozlišujeme dotaz módu A, B, C, D.

Mód dotazu je určen vzdáleností P_1 a P_3 :

| | | |
|------------|------------|--|
| Mód A..... | 8 μ s | určen pro identifikaci a sledování |
| Mód B..... | 17 μ s | určen pro budoucí využití |
| Mód C..... | 21 μ s | určen pro automatické vyslání tlakové výšky podle standardní atmosféry |
| Mód D..... | 25 μ s | určen pro budoucí využití |

Mezi P_1 a P_3 je vyslán ještě kontrolní impulz P_2 , který slouží k potlačení odpovědi vyvolaných postranními laloky vyzářovacího diagramu. Vzdálenost kontrolního pulzu P_2 je 2 μ s za P_1 . Pokud je amplituda pulzu P_2 větší nebo rovna P_1 , byl dotaz přijatý transpondérem vyvolán postranním lalokem a nebude na něj odpovězeno. Šířka všech dotazovacích impulzů je 0,85 μ s.



Obr. 2.4 Dotaz SSR [12]

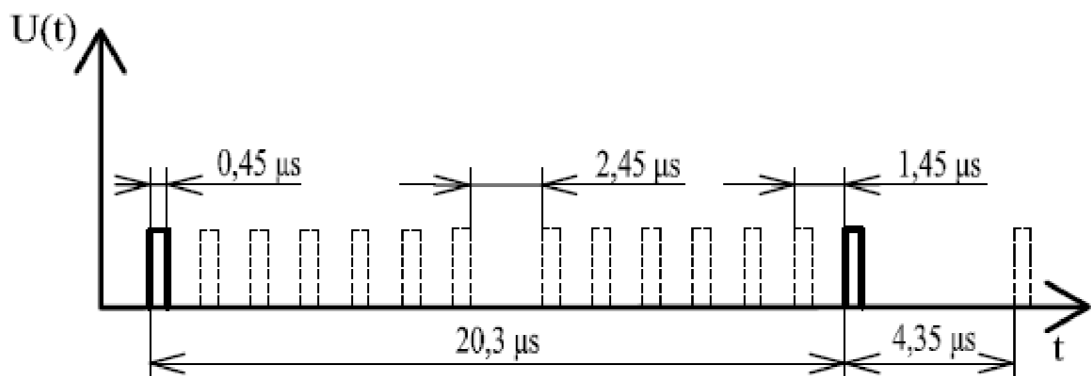
Dotazovač standardního sekundárního přehledového radaru střídá dotazy ACACAC...

Odpověď

Odpověď je vyslána letadlem a přijímána radarem. Pokud transpondér přijme dotaz, ve kterém je amplituda pulzu P_2 menší než P_1 , vyšle všesměrově odpověď ve tvaru:

- 2 bránové impulzy ve vzdálenosti $20,3 \mu\text{s}$
- 12 informačních impulzů vložených mezi bránové impulzy, každý může být vyslán nebo nemusí (0 nebo 1), je tedy 12 bitů, až $2^{12} = 4096$ různých kódů
- identifikační impulz vzdálený $4,35 \mu\text{s}$ za druhým bránovým impulzem. Na žádost služeb řízení letového provozu pilot na ovládacím panelu odpovídače stiskne tlačítko a identifikační impulz se zařadí do odpovědi transpondéru po dobu 20 sekund. Tím je potvrzeno, se kterými letadly je navázáno rádiové spojení.

Každý impulz má délku $0,45 \mu\text{s}$.



Obr 2.5 Odpověď SSR [12]

Odpověď v módu A obsahuje identifikaci letadla (4 skupiny po třech bitech = 4 číslice 0–7), případně některé speciální kódy:

- 7500 – letadlo je předmětem nezákonného vměšování, např. únosu
- 7600 – letadlo s poruchou telekomunikačních prostředků (spojení)
- 7700 – letadlo v tísni

Radar musí být vybaven zařízením pro automatické rozpoznávání zvláštních kódů. Letadlo je na indikátoru zvýrazněno a mohou mu být poskytnuty služby přednostně.

2.2.2 Určení polohy

Dálka

Určení vzdálenosti je obdobné jako u primárního radaru, ovšem od času mezi vysláním a přijmutím signálu je třeba odečíst dobu potřebnou k vyslání odpovědi. Odpověď je vyslána $3 \mu\text{s}$ po obdržení impulzu P_3 ¹².

Azimut

Azimut je určen stejně jako v případě primárního radaru sledováním úhlu natočení antény.

Výška

Radar získá informaci o výšce z odpovědi na dotaz módu C. Tlaková výška je rozdělena normou ICAO v intervalech po 100 stopách v rozsahu –1000 až 126 750 stop, každému intervalu přísluší jiná kombinace 12 bitů odpovědi. Odeslaná tlaková výška je získána barometrickým výškoměrem, který je součástí odpovídače.

Rozlišení v dálce je dáno délkou odpovědi. Ta je v případě vyslání identifikačního impulzu $(20,3 + 4,35 + 0,45) \mu\text{s} = 25,1 \mu\text{s}$. Za tuto dobu signál urazí $(300 \cdot 25,1) \text{ m}$, což je asi 7,5 km.

Délky a rozestupy mezi impulzy navíc nejsou přesné a musí se vejít do tolerance dané ICAO. V důsledku této možné tolerance se celá odpověď může ještě mírně prodloužit.

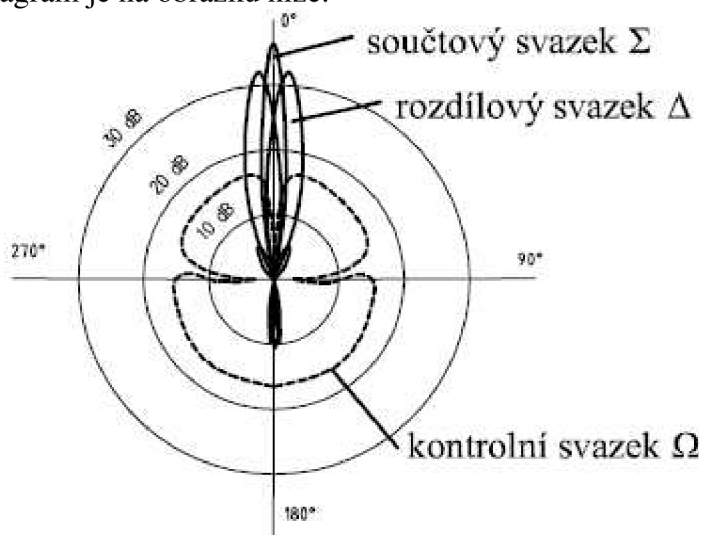
Rozlišení v azimutu je u standardního SSR dáno šířkou anténního diagramu, jež je 4° u krátké antény (6 m) a $2,5^\circ$ u dlouhé antény (9 m).

Přesnost radarem získané informace je dána šířkou intervalu v normě ICAO, tedy 100 stop.

2.2.3 Některé problémy sekundárního radaru

Velká šířka anténního svazku

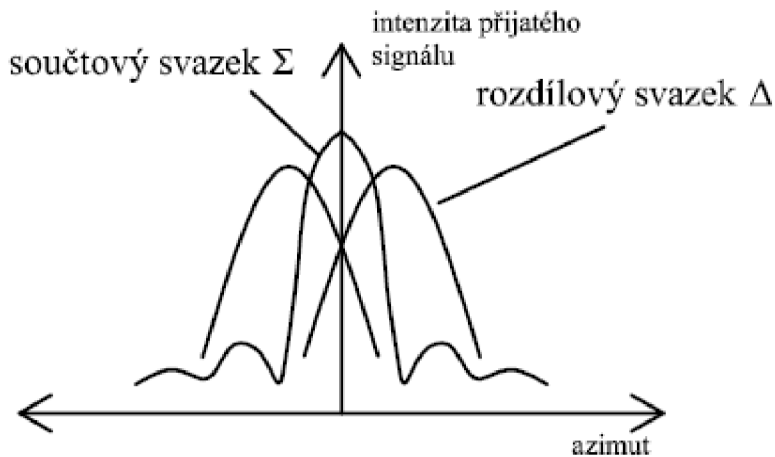
Jak bylo uvedeno výše, sekundární přehledový radar má nedostatky v určení azimutu vlivem širokého anténního svazku. Řešením je monoimpulzní sekundární radar (MSSR), jehož vyzařovací diagram je na obrázku níže.



Obr. 2.6 Vyzařovací diagram MSSR [12]

Svazek je tvořen ze třech laloků ve směru osy antény. Součtový dotazovací svazek je symetrický kolem osy a další dva tzv. rozdílové svazky mají největší zisk v malých úhlech

od osy a s přibližujícím se úhlem zisk klesá. Průběh intenzity přijatého signálu v závislosti na úhlu od osy antény je na obr 2.7.



Obr. 2.7 Intenzita přijímaného signálu MSSR [12]

Čím větší je rozdíl intenzity přijatého signálu rozdílového a součtového svazku, tím přesněji anténa míří právě na letadlo.

Kromě hlavního a součtového laloku vysílá anténa MSSR také kontrolní svazek, jenž vysílá kontrolní impuls P_2 k potlačení odpovědi vyvolaných postranními laloky.

Odpovědi vyvolané jiným dotazovačem

Letadlo vysílá odpovědi všesměrově. Může nastat situace, kdy odpověď letadla vyvolaná jedním radarem bude zaregistrována radarem jiným. Není přitom nutné, aby oba dva radary mířily právě na letadlo.

Odpověď na dotaz vyvolaná bočním lalokem je zablokována, ovšem příjem jiných odpovědí bočními laloky radaru znemožněn není. Takovýmto odpovědím se říká False Response Un-correlated In Time (FRUIT). Při digitálním zpracování radarových dat je možné tyto odpovědi potlačit nebo úplně odstranit.

Překrytí odpovědí

Dlouhá doba trvání odpovědi může způsobit překrytí odpovědí ze dvou letadel v různých výškách, ale se stejnou šikmou dálkou. Překryté odpovědi nemohou být vyhodnoceny a často dojde ke ztrátě signálu z obou letadel. Jako opatření byl vyvinut sekundární radar s adresným dotazováním – mód S.

Sekundární radar v módu S používá dva základní typy dotazů:

– všeobecný dotaz

– všeobecný dotaz A/C. Skládá se z impulsů P_1 , P_3 , kontrolního impulsu P_2 a krátkého impulsu P_4 . Na tento dotaz odpoví všechny odpovídače módu A/C, odpovídače módu S neodpoví.

– všeobecný dotaz A/C/S. Skládá se z impulzů P_1 , P_3 , kontrolního impulzu P_2 a dlouhého impulzu P_4 . Na tento dotaz odpoví všechny odpovídače módu A/C, odpovídače módu S odpoví svojí 24bitovou adresou.

– dotaz módu S, je tvořen impulzy P_1 , P_2 a P_6 (kontrolní P_5).

Různé typy dotazů a odpovědí jsou podrobně definovány a zobrazeny v předpisu L 10 svazek IV, hlava 4 a zde nebudou zobrazeny.

Existují tři režimy použití dotazu módu S:

- všeobecný mód S, odpoví na něj všechny odpovídače módu S
- rozhlasový mód, vysílá informace všem odpovídačům módu S, odpověď na ně se neočekává
- adresný mód (selektivní), odpovídá na něj jen tázané letadlo

Používá se 25 různých formátů dotazu S, radar tedy může kromě polohy zjistit 25 různých informací o letadle.

Přenos dat se skládá z 24bitové adresy letadla a dalších 56, 112, nebo až 1 280 bitů.

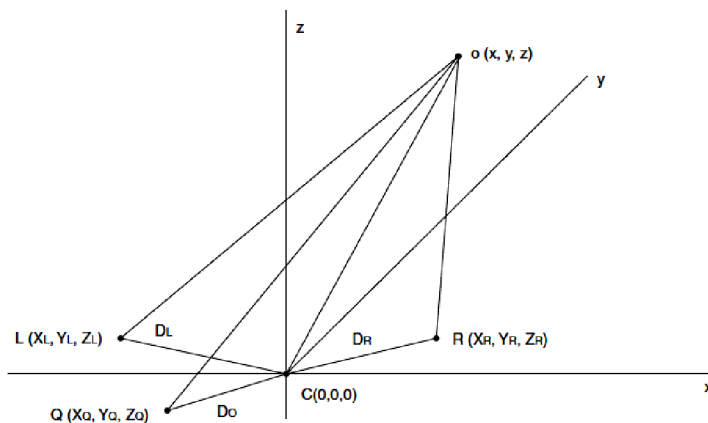
Mód S tedy umožňuje komunikaci – výměnu informací mezi letadlem a radarem. Je umožněno předání informací o poloze (zjištěné palubními přístroji mnohem přesněji, než i ty nejlepší radary dokážou), rychlosti, množství paliva apod.

2.3 Pasivní radary

Pasivní radary jsou radary, které nevysílají žádnou formu elektromagnetické energie, ale pouze „poslouchají“. Pasivní radar sestává z několika antén na různých místech a vyhodnocuje přijaté signály. Teoreticky je možné sledovat jakýkoliv zdroj elektromagnetického záření, v letectví se využívá odpovědi vyvolaných dotazovačem některého sekundárního radaru, případně pasivní sledovací systém má dotazovač vlastní. (Pak neplatí tvrzení o tom, že nevysílá. Pak ztrácí na významu ve vojenských aplikacích, kdy je pro nepřítele obtížné nevysílající radar lokalizovat a uvést mimo provoz.)

Metoda TDOA²²

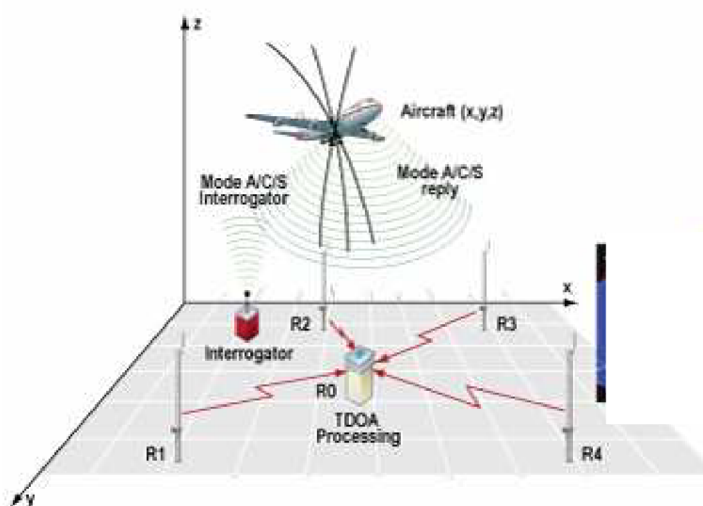
Vícepoziční Time Difference Of Arrival (TDOA) je proces určení polohy zdroje signálu ve dvou (popř. třech) rozměrech řešením matematických průsečíků více hyperbol (nebo hyperboloidů), založený na časovém rozdílu příchodu signálů mezi více senzory. Hyperboloid je definován jako plocha, která má konstantní rozdíl vzdáleností ze dvou bodů (v tomto případě přijímačů). Použitím dvou hyperbol (tří přijímačů) můžeme získat 2D polohu cíle, zatímco použitím alespoň tří hyperboloidů (čtyř přijímačů) lze získat úplnou 3D polohu.



Obr. 2.8 Schéma vícepoziční TDOA [22]

Jinou metodou je určení Angle of Arrival (AOA), tedy určení úhlu, ze kterého přišel signál. Pokud alespoň dva přijímače určí úhel příchodu, cíl se nachází v průsečíku dvou polopřímek.

Pasivní radary pro civilní letectví vyrábí česká firma ERA, která ve svém pasivním sledovacím systému využívá dotazovače módu A/C/S, 4 přijímače a zpracovávající jednotku.



Obr. 2.9 Pasivní sledovací systém firmy ERA (www.sra.com/era/)

2.4 Rozdělení přehledových radarů podle účelu

Traťové radary / En-route surveillance radars (RSR)

Jsou to radary s dlouhým dosahem (200–300 nm), poskytující informace o letadlech na letových tratích. Pracují na vlnových délkách 10–50 cm s pulzy o šířce 2–4 μs .

Opakovací frekvence pulzu se pohybuje v rozmezí 300–400 s^{-1} , rychlost snímání je 5–6 otáček za minutu.

Okrskové radary / Terminal surveillance area radars (TAR)

Jsou to radary se středním dosahem (až 75 nm), které se využívají k řízení provozu v koncové oblasti. Pracují na vlnových délkách 10–50 cm s pulzy o šířce 1–3 μ s.

Přistávací radary

- přehledový radar s vysokým rozlišením / high resolution surveillance radar je využíván k řízení přiblížení na civilních letištích
- přesný přiblížovací radar / precision approach radar (PAR) je využíván převážně na vojenských letištích

Podávají řídicímu přesnou informaci o azimutu a výškovém úhlu, požaduje se u nich pokrytí nižších výškových úhlů.

Pojezdové radary / Surface movement radars (SMR)

Tyto radary informují o pohybu letadel a vozidel na letištní ploše. Pracují na vlnových délkách 3–10 cm s pulzy o šířce 0,5–1 μ s.

3 Požadavky na přehledové radary

Letecká doprava je nejrychleji se rozvíjejícím druhem dopravy. Provozuje se prostředky nejdražšími a nejrychlejšími ve srovnání s jinými druhy dopravy, proto jsou požadavky na ni vysoké.

V počátcích letecké dopravy bylo řízení letového provozu prováděno na základě zpráv posádek letadel. V důsledku zvýšení hustoty letového provozu bylo třeba přesnějšího a spolehlivějšího systému zjišťování polohy. Nejprve se ke zjišťování polohy začaly používat radary s analogovým výstupem. Z těchto informací byl sestaven proužek (strip) s aktuálními informacemi o letadlu. Řídící letového provozu dostával stripy postupně, řadil je za sebe a na základě těchto informací prováděl tzv. procedurální řízení.

S rozvojem počítačové techniky bylo možno zrychlit předání informace řídicímu a rovněž její zobrazení se stalo přehlednějším a názornějším. Digitalizace radarové informace přináší možnost radarového řízení leteckého provozu.

3.1 Radarové vs. neradarové rozstupy

Z mnohých požadavků na leteckou dopravu vyzdvihneme bezpečnost a ekonomičnost. Jediným způsobem řídicího letového provozu, jak zajistit bezpečnost letadel ve vzduchu, je dodržet optimální rozstupy mezi letadly. To znamená, že po celou dobu letu musí být zajištěno, aby předepsaný ochranný prostor kolem letadla nebyl narušen letadlem jiným.

Rozstupy jsou dány předpisy a dělí se na radarové a neradarové. Pro různé situace (jedno letadlo stoupá, druhé letí přímo, dvě letadla po křížících se trajektoriích, dvě letadla za sebou...) mají rozstupy v rámci své skupiny (radarové/neradarové) různé hodnoty. Jednotlivé případy, kdy jaký rozstup musí být dodržen, zde nebudou rozebrány. Nicméně pro představu uvedeme, že neradarový horizontální rozstup mezi letadly ve stejné cestovní hladině musí být 15 minut (10 minut, pokud navigační prostředky umožňují časté měření polohy a rychlosti).

Minimum radarového rozstupu pro tu samou situaci je stanoveno na 5 NM (9,3 km)¹¹.

Nejpomalejší Boeing z modelů 7x7 je 737-100¹⁸. Jeho cestovní rychlost je 856 km/h, což odpovídá uražené vzdálenosti asi 142 km během 10 minut letu cestovní rychlostí. Radarový rozstup versus neradarový rozstup je 142,66 km versus 9,3 km. U letounů pro regionální dopravu je cestovní rychlost asi poloviční, i tak je rozdíl v radarovém a neradarovém rozstupu významný.

Právě snižování rozstupu při udržení stejné úrovně bezpečnosti bylo a zatím i je jedinou možností, jak při stále se zvyšující hustotě leteckého provozu vyhovět všem jeho uživatelům. Zvýšení propustnosti vzdušného prostoru zkrátí čekací doby, ušetří peníze za palivo, a zároveň tak šetří životní prostředí.

3.2 Požadavky na radarové informace

Velikost rozstupů přímo závisí na kvalitě radarové informace. Z tohoto důvodu jsou radary důležitou částí systému řízení letového provozu. Charakteristiky přehledových radarů

přímo ovlivňují kvalitu poskytovaných služeb řízení letového provozu (tedy udržet letadlo na předem naplánované trase) a nepřímo napomáhají zvýšení propustnosti vzdušného prostoru (v daném časovém úseku je možno povolit více letů na jedné trati). Je třeba, aby byly radarové informace přesné, aktuální a spolehlivé. Význam přesnosti, aktuálnosti a spolehlivosti se zvyšuje s hustotou provozu. V okolí letišť se předpokládá větší pohyb letadel než na tratích, přičemž hustota provozu se obecně neustále zvyšuje¹¹.

Přesnost

Přesnost radarové informace je závislá na charakteristikách použitého radaru. Je žádoucí používat v koncových oblastech radary se stále vyšší přesností v azimutu, přesností v dálce a rozlišovací schopností v azimutu a v dálce. Instalování nového systému s lepšími parametry přímo ovlivní přesnost informace.

Aktuálnost

Aktuálnost radarové informace v první řadě závisí na rychlosti otáčení antény neboli rychlosti snímání. Kolikrát za minutu se otočí anténa o celých 360°, tolikrát za minutu získáme aktualizovanou informaci. Vyšší rychlost otáčení antény nám tedy dává aktuálnější informace o poloze letadla. Ovšem velká rychlost otáčení antény není vždy výhodou.

Spolehlivost

Spolehlivost je určena jednak jako schopnost radarového zařízení jako takového fungovat bez poruchy, dále však lze spolehlivost definovat jako pravděpodobnost, že bude cíl rozpoznán. Tato pravděpodobnost roste s tzv. hits per scan, tedy počtem impulzů, jež radar na cíl vyšle během jednoho přechodu anténního svazku přes cíl. Ze závislosti hodnoty odrazné plochy na natočení letadla lze soudit, že při malém počtu vyslaných impulzů je možné, že nedojde k detekci cíle.

Problém je v tom, že požadavky jdou často proti sobě. Pokud zvýšíme rychlost snímání, získáme aktuálnější radarové informace, ovšem při stejné opakovací frekvenci impulzu to znamená snížení hits per scan. Pokud zvýšíme opakovací frekvenci pulzu, získáme větší počet impulzů za jeden scan, ale zkrátíme tak maximální dosah radaru. Zvýšení počtu impulzů na jeden scan můžeme dosáhnout širším anténním svazkem, nicméně tímto zásahem snížíme rozlišovací schopnost v azimutu.

Je třeba uvážlivě volit parametry radaru v závislosti na tom, co od něj očekáváme.

Zlepšení všech tří parametrů lze dosáhnout v řadě druhé kombinací dat ze dvou a více radarů.

Zařízení, které toto umožňuje, se nazývá **multiradarová stanice**. Je to počítač, který z informací z několika různých radarů vyloučí údaje s největší chybou a pak na základě systému vah (v závislosti na očekávané přesnosti informace z určitého radaru) vypočte teoretickou polohu cíle.

Digitální výstup radaru by neměl být pouhý požadavek, ale v dnešní době už spíše samozřejmost. Existuje několik formátů výstupu neboli protokolů. V multiradarové stanici dojde ke konverzi různých formátů z různých radarů.

Proč se u radarů pro řízení letového provozu používají vysoké frekvence:

- a) na těchto frekvencích je zanedbatelný okolní šum a tyto frekvence se neodrážejí od ionosféry
- b) kratší vlnové délky vytvářejí užší svazek s vyšším ziskem pro lepší přesnost a rozlišovací schopnost v azimutu
- c) kratší vlnové délky umožní kratší pulzy
- d) odraz vlny závisí na velikosti objektu a na poměru velikosti a vlnové délky – kratší vlnové délky se odrážejí efektivněji

3.3 Požadavky na radary

Exaktní technické parametry sekundárních přehledových radarů, resp. parametry zvláště dotazovačů a odpovídačů jsou k nalezení v českém překladu přílohy k Úmluvě o mezinárodním civilním letectví L10 svazek IV. Normované požadavky na technické parametry primárních radarů nejsou k nalezení. Zde bude pro představu uvedeno jen několik požadovaných parametrů systému sekundárního radaru módu A/C uvedených ve výše zmíněném předpisu.

Odpovídač módu A/C

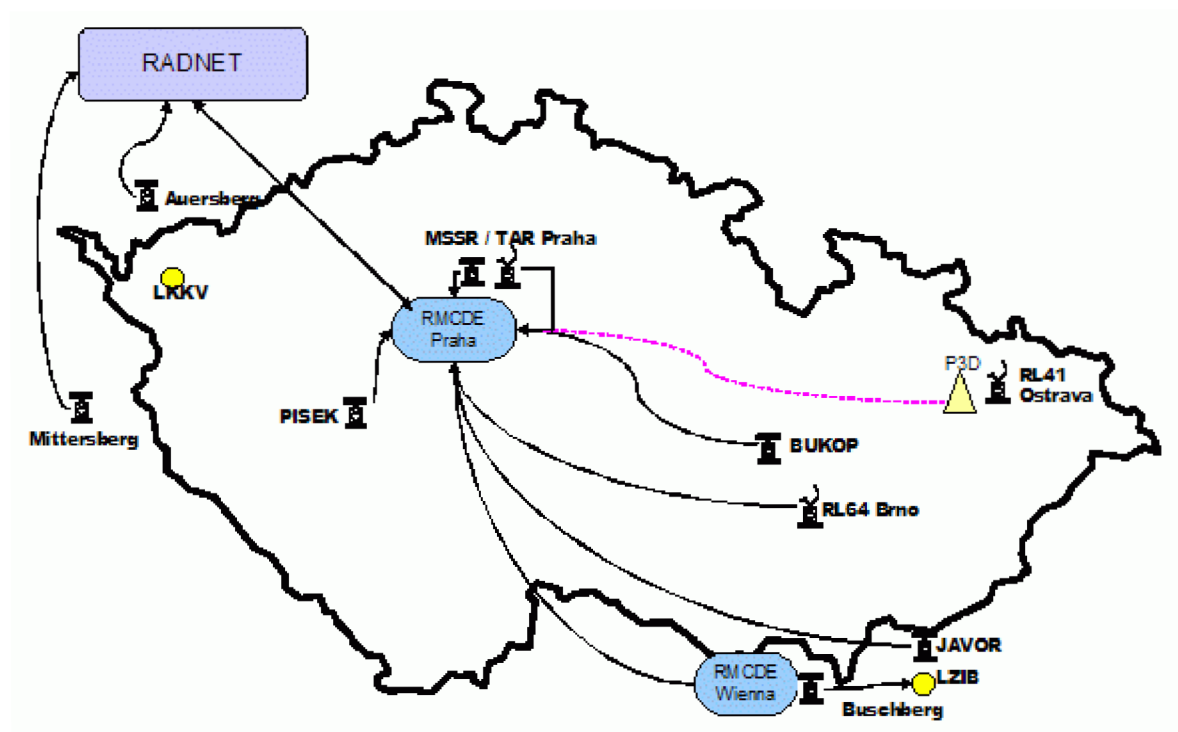
Musí být schopen odpovědět na dotaz, který byl vyvolán hlavním lalokem vyzářovacího diagramu dotazovače s nejméně 90% správností. Po přijmutí dotazu ve správném tvaru musí dojít k zablokování odpovídače – nesmí odpovídat na žádné další dotazy nejméně po dobu vyslání odpovědi a nejdéle 125 μ s po vyslání posledního impulsu odpovědi. Odpovídač musí být schopen vyslat minimálně 1200 odpovědí o 15 impulsích za jednu sekundu. Špičkový výkon by měl být v rozmezí 21–27 dB vztaženo k 1 W, což odpovídá špičkovému výkonu 125–500 W. U odpovídačů používaných pod 4 500 m stačí 18,5–27 dB, potažmo 70–500 W. Od anténního systému se vyžaduje v horizontální rovině všesměrový vyzářovací diagram.

Dotazovač A/C

má mít maximální opakovací kmitočet 450 dotazů za sekundu. Co se týká vyzářovacího diagramu, je doporučeno, aby postranní a zadní laloky byly nejméně 24 dB pod maximem hlavního vyzářovacího laloku.

4 České přehledové radary

V České republice jsou přehledové radary spravovány státním podnikem Řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP má za úkol sledovat vzdušný prostor, kontrolovat, jestli se letadla drží letového plánu, a v případě odklonění letadla z plánované trasy ho navést na původní trasu nebo, pokud to podmínky neumožňují, na trasu náhradní. Řídicí dále řeší vzniklé mimořádné situace. ŘLP je za síť přehledových radarů zodpovědné a musí zajistit její funkčnost a věnovat se modernizaci.



Obr. 4.1. Rozmístění radarů využívaných ŘLP (www.rlp.cz)

| | PSR/SSR/PSS | Poloha | Dosah dle ŘLP | Typ radaru |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------------|------------------------------------|
| Praha | PSR/SSR | 50°05'11.87" N 14°16'13.55" E | -/170 NM | Thales STAR 2000/ Thales RSM970 |
| Brno | PSR | 49°09'08.41" N 16°41'39.00" E | 65 NM | Tesla RL64 |
| Ostrava | PSR/PSS | | 110 km/40–150 NM | Tesla RL41 / Tesla Věra P3D |
| RLB PISEK | SSR | 49°47'05.56" N 14°02'04.32" E | 200 NM | Thales RSM 970 |
| RLB BUKOP | SSR | 49°39'34.79" N 16°08'00.14" E | 200 NM | Thales RSM 970 |
| Auersberg | SSR | 50°27'20.20" N 12°38'54.37" E | 150 NM | Thales RSM 970 |
| Mittersberg | SSR | 49°21'36.37" N 11°33'46.26" E | 200 NM | Thales RSM 970 |
| Buschberg | SSR | 48°34'37.32" N 16°23'45.11" E | 160 NM | Thales RSM 970 |
| RLB JAVOR | SSR | | 200 NM | Thales RSM 970 |

4.1 Některé parametry českých přehledových radarů

Praha

Na letišti Praha-Ruzyně byl v prosinci 2007 primární radar TA 10MTD firmy Thales se středním výkonem 500 kW nahrazen primárním přehledovým radarem STAR 2000 o středním výkonu pouze 32 kW spolu se sekundárním radarem RSM 970 od téže firmy.

Thales STAR 2000^{8,20,25}

Rozsah frekvencí: 2 750 MHz a 2 850 MHz (Pásmo S)

Dosah radaru: maximální 80 nmi
(cíl s odraznou plochou 2 m²)

Vertikální pokrytí: minimální 0,25 nmi
do 30 000 stop

Anténa:

Zisk: 33,5 dB pro Low cover;
32,5 dB pro High cover

Diagram vertikálního krytí: dle obr.

Horizontální šířka svazku: 1,3°

Rychlost otáčení: 15 min⁻¹

Polarizace: kruhová nebo vertikální

Vysílač:

Střední výkon: 23–24 kW

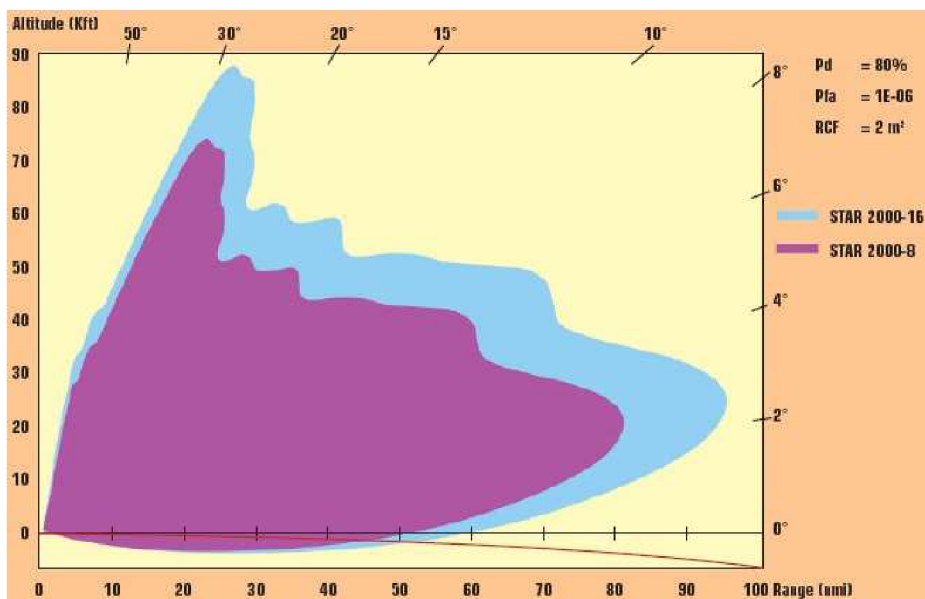
Přijímač:

Rozlišovací schopnost v azimutu: 2,3°

Přesnost v azimutu: 0,12°

Šířka pulzu: 1 μs / 98 μs

s využitím komprese pulzu



6.3. Diagram vertikálního krytí STAR 2000 (www.thalesatm.com)

Thales RSM 970S ^{8, 24}

Rozsah frekvencí: 1 030 MHz a 1 090 MHz
 Dosah radaru: maximální až 256 nmi
 minimální 1,5 km

Anténa:

Zisk: 27 dB
 Horizontální šířka svazku: 2,4°
 Rychlost otáčení: až 15 min⁻¹
 Polarizace: vertikální

Přijímač:

Rozlišovací schopnost podle oblastí Eurocontrol:

| | | |
|-----------|---------------------|----------------------|
| oblast 1: | 0,6 < azimut < 4,8° | dálka < 2 nmi |
| oblast 2: | azimut – 0,6° | 0,05 < dálka < 2 nmi |
| oblast 3: | azimut < 0,6° | dálka < 0,05 nmi |

Přesnost v azimutu: 0,07°
 Přesnost v dálce: <30 m – SSR
 <15 m – mód S

Maximální počet zpracovávaných cílů:

| | |
|-------------------|-----|
| – v sektoru 3,5°: | 40 |
| – v sektoru 45°: | 200 |
| – na jeden scan: | 800 |

Brno

Na letišti Brno-Tuřany se nachází primární radar bývalé firmy Tesla RL-64.

Tesla RL-64²¹

Rozsah frekvencí: 2 700–2 900 MHz
Dosah radaru: maximální přes 100 km
(cíl s odraznou plochou 2 m²)
minimální 1,5 km

Anténa:

Zisk: 33,5 dB hlavní svazek
32,5 dB pomocný svazek

SVD ve vertikální rovině: modifikovaný kosekant
Horizontální šířka svazku: 1,4°
Rychlost otáčení: 15 min⁻¹
Polarizace:
– hlavní svazek kruhová nebo vertikální
– pomocný svazek kruhová

Vysílač:

Špičkový výkon: 800 kW
Střední výkon: 1 000 W
Šířka pulzu: 1,1 μs
Opakovací frekvence pulzu (střední): 1 000 s⁻¹

Přijímač:

Šumové číslo 2,1 dB
Maximální počet zpracovávaných
cílů v šířce svazku: 64

Ostrava

Tesla RL-41 – nenalezeno

Věra P3D²⁷

Zpracovávané signály: SSR odpovědi módu 3/A, C, S
Dosah: min 250 km
Sledovaný sektor: 360°
Počet sledovaných cílů: až 200 najednou
Přesnost: 10–100 m
Provozní podmínky: –40° až –60° C

Pasivní radary

V přehledové infrastruktuře používá ŘLP systémy P3D od firmy Era z Pardubic (Era je následník Tesly v oblasti pasivních radarových systémů, v podstatě jediný světový výrobce pasivních radarů pro civilní využití). Kategorie WS s dosahem 80 NM je již řadu let v provozu v Ostravě, kategorie AS je jako součást systému letištního přehledového radaru A-SMGCS (Advanced-Surface Movement Guidance and Control Systems) používán na TWR Praha pro řízení provozu na letišti.

Dále podle informací serveru www.rlp.cz bude v krátké době dokončena certifikace systému P3D-WS Praha s dosahem 120NM, který bude využíván jak pražskými stanovišti, tak i v radarovém zobrazení v Karlových Varech. Od počátku března 2008 probíhají přípravy instalace třetího traťového systému s centrem v Brně s plánovaným zahájením provozu v polovině roku 2009. Proběhla jednání s polským podnikem řízení letového provozu o případném rozšíření ostravského krytí přes Krakov a Katovice a budoucí brněnský systém bude připravený k možnému rozšíření i pro TMA Vídeň.

4.2 RADNET a RMCDE ^{4,14,15,16}

RADNET – Radar Data NETwork – je název pro evropskou síť propojující jednotlivé uzly, tedy počítačové stanice RMCDE – Radar Message Conversion and Distribution Equipment.

RMCDE v první řadě umožňují konverzi různých datových protokolů z připojených radarů na EUROCONTROLEM standardizovaný protokol ASTERIX – All-purpose STructured Eurocontrol Radar EXchange. Konverze radarových dat probíhá na národní úrovni, pro jeden stát, resp. jednu službu řízení letového provozu zpravidla postačuje jedna stanice RMCDE.

Druhou výhodou je možnost získání radarové informace i z jiných radarů, než které služba řízení letového provozu spravuje. Jednotlivé RMCDE jsou navzájem propojeny, a tak česká ŘLP může využívat informace i ze zahraničních radarů, které z části pokrývají český vzdušný prostor. Distribuce radarových dat probíhá na mezinárodní úrovni. Bez RADNETu by bylo jedinou možností jak získat radarové informace pouze komplikované přímé spojení s požadovaným radarem.

RMCDE (stanice nebo uzel) potažmo RADNET (síť propojující jednotlivé stanice) byly vytvořeny německou společností Comsoft v rámci 4-States Integration Project v osmdesátých letech, kdy byly propojeny Německo, Belgie, Nizozemí a Lucembursko. Toto se osvědčilo a Comsoft získal od EUROCONTROLU kontrakt na vytvoření RADNETU v Evropě. V současné době je na světě instalováno kolem 50 stanic RMCDE ve 30 centrech ATC, většina z nich je připojena k RADNETu. Prakticky je možné pro každého uživatele získat informace z kteréhokoliv připojeného radaru. Takovýto systém výrazně zlepšuje pokrytí vzdušného prostoru, resp. využití informací jednou službou z prostoru již pokrytého službou jinou.

Dalším produktem firmy Comsoft je ARTAS – ATM Surveillance Tracker and Server, jež Řízení letového provozu ČR používá od roku 2005 jako zdroj kvalitní multiradarové informace.

ARTAS je neustále ve vývoji a má za úkol využít všech informací získaných PSR, SSR, módu S a ADS-B v protokolu ASTERIX. Cílem je využít všech informací dostupných z kokpitu letadla a zobrazit je řídicímu, což by mělo smazat rozdíl mezi konvenčním sledováním a informacemi na palubě letadla. Přesné informace nejen o poloze jsou získávány na základě módu S a ADS-B. ARTASem zpracované informace jsou na základě infrastruktury RADNETu přístupné všem zúčastněným službám, čímž je dosaženo efektivního využití všech připojených radarových čidel v Evropě.

ARTAS však není jediným systémem pro zpracování radarových dat, který ŘLP využívá. Již od roku 2001 – tedy 4 roky před ARTASem – je k získávání multiradarové informace využíván systém EUROCAT 2000, jehož výrobcem je opět firma Thales.

EUROCAT 2000

Tento systém nejen zpracovává radarová data, ale také letové plány a letové údaje. Dle serveru www.rlp.cz poskytuje následující funkce:

- pořizuje a zpracovává primární, sekundární a kombinované tracky a ploty, které jsou získávány z několika radarových vstupů
- zpracovává a před-zpracovává data letových plánů
- automaticky přiděluje SSR kódy s výjimkou odletů z vybraných letišť FIRu Praha
- umožňuje práci s elektronickými stripy s omezeným využitím jejich dat, detekuje krátkodobé konflikty, nebezpečí sblížení s terénem a varuje před sblížením s nebezpečným prostorem
- zaznamenává údaje o práci systému a obsluh a umožňuje jejich přehrávku
- umožňuje filtraci systémových tracků a jejich distribuci externím uživatelům
- monitoruje a řídí systém

Maximální velikost multiradarového zpracování je 512 NM x 512 NM, což s přehledem pokrývá celou naši republiku. K tomuto systému je možno připojit až 8 radarových čidel. Je současně schopen generovat maximálně 250 systémových tracků s periodou 6 vteřin.

4.3 Vojenské radary^{6,9,10,13}

Kromě civilních přehledových radarů, které využívá ŘLP, existují na našem území i vojenské přehledové radary, které využívá Armáda České republiky (AČR). AČR disponuje nejen radary přehledovými, ale také radary zastávající i jiné úlohy. Jsou to radary využívané k těmto účelům:

- vyhledávání nepřátelských letadel, lodí i pozemních cílů
- včasná výstraha před nebezpečím vzdušného napadení
- detekce a určování polohy letadel a lodí pro řízení jejich provozu
- přehledové a přibližovací radary pro navigaci letadel, lodí a pozemních vozidel
- měření letové výšky nad terénem (radarový výškoměr)
- řízení palby – dělostřelectvo, zbraňové systémy
- navádění raketových řízených střel
- mapování a měření vzdáleností na zemském povrchu
- zabezpečení lodní a letecké dopravy palubními radiolokátory
- meteorologická měření, předpověď počasí
- radarové stanice systémů obrany před balistickými řízenými střelami

I z tohoto neúplného přehledu je vidět, že armádní radiolokátory hrají opravdu důležitou roli. Jako konkrétní ukázky radiolokátorů, sloužících AČR, server Ministerstva obrany www.army.cz uvádí:

Mobilní radiolokátor jednotek pozemní protivzdušné obrany P-19

Přehledové radiolokátory RL-4 a RL-5

Mobilní dělostřelecký radar ARTHUR

Páteří radar NATO

Radiolokátor EBR (European Based Radar) systému protiraketové obrany, o jehož umístění se jedná

Radiolokátor P-19

Tento přehledový radar je určen k radiolokačnímu průzkumu vzdušného prostoru republiky. Zjišťuje polohu a vzdálenost vzdušných cílů a pomocí dotazovače je schopen rozpoznat také jejich příslušnost. Radiolokátor prošel důkladnou modernizací, při které bylo původní analogové zpracování signálů převedeno na zpracování digitální. Po této modernizaci splňuje radar současné požadavky na identifikaci vzdušných cílů.

Přehledové radiolokátory RL-4 a RL-5

Tyto radiolokátory jsou určeny k zabezpečení letového provozu na letištích, k průzkumu vzdušných cílů a k zabezpečení aktivních prostředků protivzdušné obrany. Zachycují vzdušné cíle a identifikují jejich souřadnice (azimut a šikmou dálku). Slouží ke sledování cílů nad terénem (se silnými odrazy od pozemních předmětů), za nepříznivých povětrnostních podmínek (mraky, sněžení, déšť) i při úmyslném rušení. Jejich původní analogový výstup byl taktéž digitalizován.

RL-4 i RL-5 jsou výrobky bývalé firmy Tesla. V současné době se věnuje jejich modernizaci firma Eldis, která v letech 1994–1998 provedla jejich modernizace na RL-4AS a RL-5M.

RL-4AS⁹

Maximální dosah: 200 km
Impulzní výkon: 2 x 850 kW
Rychlost snímání: 6 / 12 min⁻¹
Polarizátor na potlačení odrazů od oblačnosti
Režim potlačení nepohyblivých předmětů – IPC
Potlačení odrazů od pozemních předmětů
Možný náklon antény od -2° do +2°

RL-5M^{6,10}

Parametry primárního radaru:
Rozsah frekvencí: 2 700–2 900 MHz
Dosah radaru: 120 km (cíl s odraznou plochou 1 m²)
Krytí:

do výšky: 12 000 m
v elevaci: 0,5° až 45°

Výkon vysílače: 2 x 800 kW
Šířka impulzu: 2 μ s

Parametry sekundárního radaru:
Režim činnosti: 1,2,3 / A,C,4,(5)
Dosah: 200 km
Krytí ve výšce: 30 km
Přesnost:
v dálce: 120 m
v azimutu: 0,7°

O umístění těchto radarů se server www.army.cz nezmiňuje, lze však předpokládat, že se budou nalézat na vojenských letištích v Čáslavi, Pardubicích a Náměšti nad Oslavou, příp. Praha-Kbely.

Radiolokační výškoměr PRV-17

Zjišťuje výšku letu cílů (ve spolupráci s přehledovým radiolokátorem). Slouží k radiolokačnímu průzkumu nízkoletících cílů v režimu dálkoměr, k určení azimutu a polohového úhlu aktivního rušiče, ke zjišťování jaderných výbuchů a udávání souřadnic cílů pro aktivní prostředky (stíhacího letectva a protiletadlového raketového vojska).

Radiolokátor 1L22-1/IFF

Je určen k průzkumu vzdušných cílů a k zabezpečení aktivních prostředků. Zjištěné informace je schopen samostatně předávat zájemcům o další využití (aktivní prostředky, centrální velení).

Třídídimenzionální radiolokátor ST-68U CZ

Jde o mobilní radiolokační prostředek určený k radiolokačnímu průzkumu a zjišťování především nízkoletících cílů. Radiolokátor zabezpečuje měření ve třech souřadnicích (azimut, šikmá dálka a polohový úhel) a umožňuje určit polohu zdroje aktivního rušení. Zařízení je po modernizaci schopno plně automatizovaně zabezpečit výstup kvalitních radiolokačních dat.

Radiolokátor P-37

Slouží k radiolokačnímu průzkumu a k navádění stíhacího letectva na vzdušné cíle. Radiolokátor zabezpečuje vyhledávání vzdušných cílů v rozmezí dosahu a měření souřadnic (azimut, šikmá dálka), měření azimutu zdroje aktivního rušení a měření souřadnic (včetně charakteristik) jaderného výbuchu. Je uzpůsoben ke spolupráci s výškoměrem.

Dělostřelecký radiolokátor ARTHUR

Jde o moderní dopplerovský radar, určený k vyhledávání palebných stanovišť protivníka a řízení palby vlastního dělostřelectva. Pracuje na 24 frekvencích v rozsahu 5,4–5,9 GHz s pulzním vysílacím výkonem až 25 kW. Radar zachytí vystřelený dělostřelecký granát, zpracuje získané údaje a z nich určí bod dopadu granátu i přesnou polohu střílejícího děla. Radar je schopen současně sledovat pohyb až osmi vystřelených granátů. Díky rychlému zpracování údajů může takto vyhodnotit až 100 cílů za minutu.

Páteřní radar NATO

Jedním z úkolů ozbrojených sil zemí NATO je ochrana společného vzdušného prostoru, která se neobejde bez kvalitní sítě radiolokátorů. V naší republice byly nedávno vybudovány dva tzv. páteřní radary, začleněné do Integrovaného systému protivzdušné ochrany NATO. Jeden stojí u obce Nopolisy nedaleko Chlumce nad Cidlinou, druhý poblíž jihomoravské obce Sokolnice. Tyto radary mají střední vyzářený výkon 2,5 kW, dosah až 500 km a slouží k nepřetržitému radiolokačnímu průzkumu a navádění bojových letounů. Mohou být využity i pro potřeby civilního letectví.

Radarová stanice EBR

V rámci systému protiraketové obrany má radarová stanice EBR za úkol sledovat dráhu letící balistické střely a dráhy z ní již oddělených částí. To znamená odlišit bojovou hlavici střely od klamných cílů a velmi přesně určovat souřadnice tohoto cíle.

Na základě informací z radarové stanice EBR dochází v rámci systému protiraketové obrany k nasměrování letu protiraketové řízené střely – tzv. interceptoru (hovorově „antirakety“) – do prostoru předpokládaného zničení balistické střely nebo její bojové hlavice. Tím ale činnost radarové stanice EBR nekončí. Radar má také sledovat a následně vyhodnocovat, zda protiraketová řízená střela svým nevýbušným zásahovým prostředkem bojovou hlavici svým nárazem – kinetickou energií – také zničila.

Vzhledem ke škále zmíněných úkolů musí mít radarová stanice EBR dostatečný dosah (okolo 2 000 km). Od předchozích radarů se odlišuje i tím, že se neotáčí, ale pracuje jen ve vymezeném sektoru. V tomto sektoru se radar soustřeďuje navíc pouze na směr předpokládaného prostoru zjištění balistické řízené střely. Na tento směr se zaměří a začne jej prohledávat extrémně úzkým paprskem ($0,18^\circ$) až na základě informací z družic a jiných radiolokátorů, např. předsunutých radiolokátorů nebo radiolokátorů včasné výstrahy.

S ohledem na své specifické poslání rovněž není potřeba, aby radar pracoval nepřetržitě. Je zapnut, neboli aktivován, pouze v případě skutečného odpálení balistické řízené střely. Hlavní každodenní činností radaru stanice EBR je jeho pravidelná údržba a kontrola, které se říká kalibrace.

Dle referencí firmy Eldis bylo roku 1994 o na vojenských letištích ČR postupně nainstalováno šest systémů Radarcentrum RC 930, obsahujících pracoviště radarového řídicího přehledu, radarového řídicího přistání a pracoviště technika. Tyto systémy jsou připojeny k soupravám letištních radarů RPL-5 (obsahující primární RL-5, sekundární radar a přesný přibližovací radar RP-5 a řídicí pracoviště).

5. Využití přehledových radarů a jejich budoucnost

5.1 Rozdělení vzdušného prostoru a stanovišť řízení letového provozu v ČR^{11,19}

Jak bylo řečeno, v letecké dopravě je hlavním kritériem bezpečnost. Je tedy nutné zabránit srážkám mezi dopravními prostředky a udržet přitom plynulý a uspořádaný letový tok. V současné době existují dva přístupy, jak srážkám zabránit:

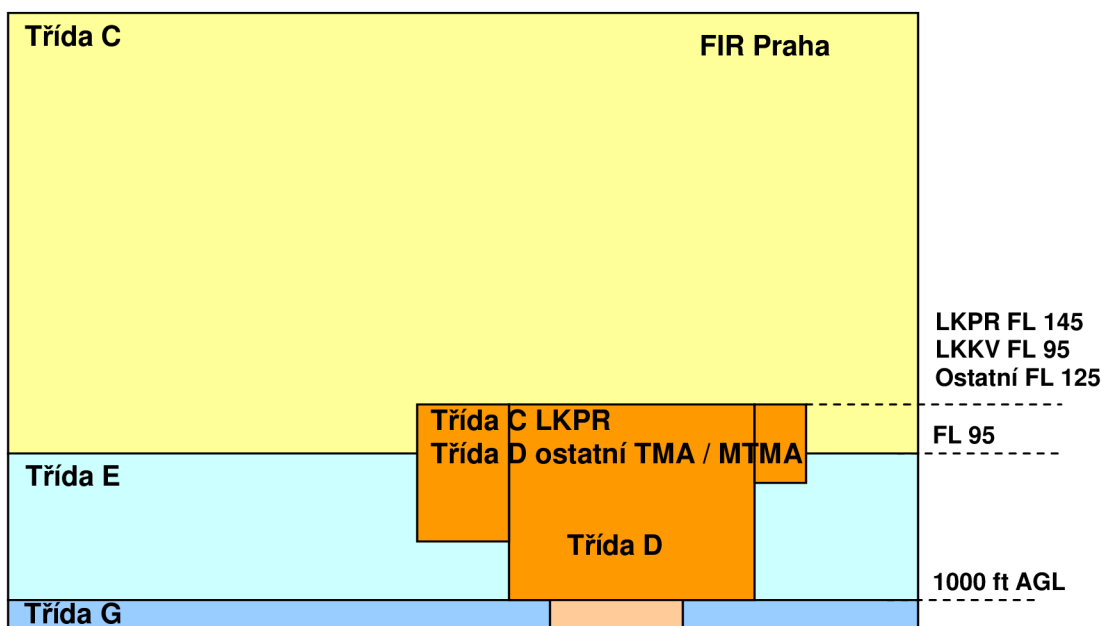
Pravidla pro let za viditelnosti VFR

Předpokládají se dobré meteorologické podmínky a nižší hustota provozu. U těchto letů odpovídají za udržení rozstupů velitelé letadel. Při letu v oblastech s vyšší hustotou provozu případně ve vyšších letových hladinách však stoupají požadavky na vybavení (vybavení odpovídačem SSR, rádiové spojení se stanovištěm řízení letového provozu, schválený letový plán FPL).

Pravidla pro let podle přístrojů IFR

Tyto lety jsou plně závislé na službě řízení letového provozu. Ta má přehled o aktuální situaci ve vzdušném prostoru a má za úkol pomocí rádiového spojení s letadly udržet předepsané rozstupy při zachování plynulosti dopravy. Lety IFR jsou řízeny ve všech fázích letu, a tedy i ve všech oblastech a výškách.

Vzdušný prostor České republiky je vertikálně rozdělen do tříd C, D, E a G. Do tohoto dělení zasahují oblasti v okolí letišť – širší prostor kolem letiště vymezuje koncová řízená oblast, Terminal Control Area (TMA), ve které se řídí letadla přibližující se k letišti; a oblast bezprostředně kolem letiště, řízený okrsek Control Zone (CTR), ve kterém se uskutečňuje samotné přistání.



Obr. 5.1 Rozdělení vzdušného prostoru v ČR [19]

Takovému rozdělení vzdušného prostoru odpovídá rozmístění stanovišť řízení letového provozu.

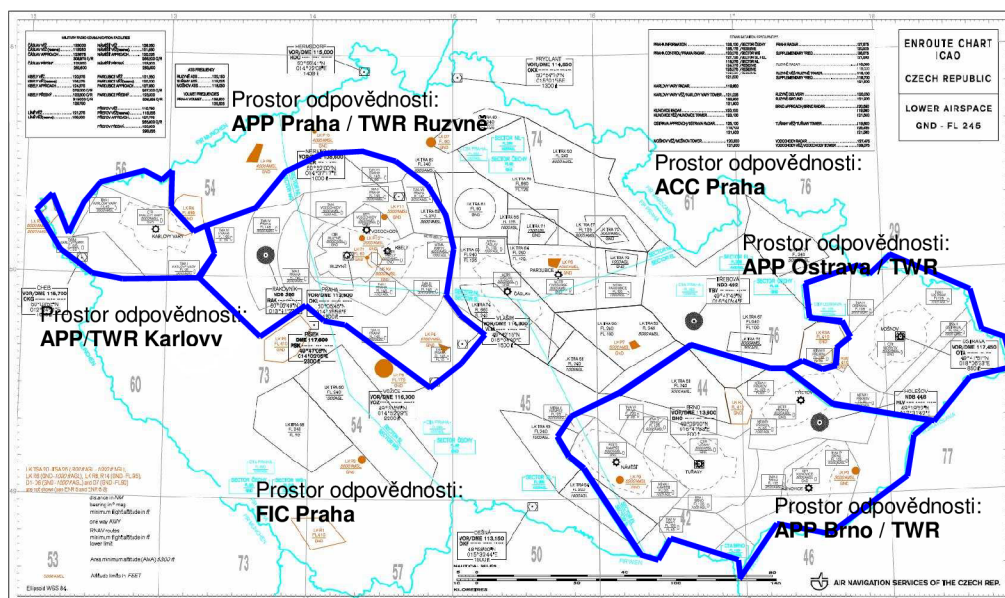
Ve třídě G, která tvoří 300metrovou vysokou vrstvu kopírující povrch, je provoz neřízen, je zde možnost provozovat lety podle pravidel pro let za viditelnosti.

V třídách C, D, E je provoz řízen oblastním střediskem řízení – Area Control Centre (ACC).

V koncové řízené oblasti TMA za let odpovídá přibližovací stanoviště řízení – Approach Control Service (APP); přistání, vzlety a pohyb na letištní ploše jsou řízeny z letištní řídicí věže – Tower Control Centre (TWR).

Ne všechny pracoviště TWR pracují v režimu 24/7, mimo jejich provozní dobu jsou lety řízeny nadřazeným stanovištěm (např. v době mimo provozní dobu APP/TWR Karlovy Vary je provoz v této oblasti řízen stanovištěm ACC Praha).

Umístění stanovišť služeb řízení letového provozu je zobrazeno na obrázku níže:



Obr. 5.2 Stanoviště ŘLP a jejich prostor odpovědnosti [19]

Souvislost uvedeného rozdělení s přehledovými radary je taková, že podle AIP GEN 1.5.1 musí být odpovídačem SSR schopným odpovídat v 4 096 kódech na dotazy A a C vybaveny ve vzdušném prostoru České republiky:²

- všechna letadla provádějící let IFR (ve všech třídách vzdušného prostoru, krom třídy G, kde se lety IFR nesmějí objevit)
- všechna motorová letadla a všechny balony provádějící VFR let ve FL 60 (třída E) až FL 200 (třída C, horní hranice, kde je možno provozovat lety VFR)
- všechna letadla provádějící lety VFR v CTR Ruzyně a v TMA Praha

5.2 Současnost a budoucnost přehledových radarů

Existuje výbor FANS (Future Air Navigation Systems) v pověření mezinárodní organizace ICAO. Tímto výborem byla v roce 1988 vypracována koncepce moderních systémů CNS/ATM (Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management). V této koncepci se v oblasti sledování (*surveillance*) – jež je dnes zastáváno primárním a sekundárním radarem – uvažuje o využití sekundárního radaru v módu S a A/C a automatického závislého sledování ADS-B, a to s postupným stahováním dosluhující techniky (tedy primárních radarů). A by bylo možno přestat využívat primárních radarů (přesněji přestat je využívat ke sledování pro potřeby řízení letového provozu, což ovšem neznamená, že by primární radary úplně vymizely; od oblačnosti SSR odpověď v módu A/C/S nedostaneme při sebevětším snažení), je zapotřebí technicky vybavit všechny vzdušné dopravní prostředky odpovídačem, nejlépe odpovídačem módu S.

V příloze k Úmluvě o civilním letectví ICAO, předpisu L10 svazek IV část I. odstavec 2.1.5.,

jsou odpovídače módu S rozděleny do pěti úrovní podle schopností:²

Odpovídače úrovně 1 musí mít tyto schopnosti:

- předávání identifikace módu A a tlakové výšky módu C
- předávání odpovědí společných módů a všeobecného dotazu módu S
- předávání adresného sledování výšky a identifikace
- protokoly blokování
- protokoly základních dat s výjimkou zpráv o možnostech datového spoje
- předávání služby letadlo–letadlo

Úroveň 1 umožňuje sledování na základě tlakové výšky a identifikačních kódů módu A. Použitím módu S se díky selektivnímu dotazování zlepšují technické vlastnosti oproti módu A/C.

Odpovídače úrovně 2 musí mít tyto schopnosti:

- všechny schopnosti úrovně 1
- předávání zpráv standardní délky Comm A (v dotazu vyhrazeno 56 bitů pro zprávu kanálem země–letadlo) a Comm B (v odpovědi vyhrazeno 56 bitů pro zprávu kanálem letadlo–země)
- předávání zpráv o možnostech datového spoje
- předávání údajů o identifikaci letadla

Odpovídače úrovně 3 musí mít tyto schopnosti:

- všechny schopnosti úrovně 2
- předávání zpráv prodloužené délky Comm C kanálem země–letadlo

V dotazu Comm C je vyhrazeno 80 bitů pro zprávu letadlu. Dotazovač je schopen vyslat letadlu zprávu až v 16 segmentech (16 dotazů) a až poté vyžádat odpověď. Toto zaručuje $16 \times 80 = 1\,280$ bitů pro zprávu, jak bylo uvedeno již v kap. 4.2.3.

Odpovídače úrovně 4 musí mít tyto schopnosti:

- všechny schopnosti úrovně 3
 - předávání zpráv prodloužené délky Comm D kanálem letadlo–země
- Comm D je totéž co Comm C, jen v opačném směru.

Úroveň 4 umožňuje předávání dat prodloužené délky v obou směrech, na zem (letovým provozním službám) se dostávají data přístupná na palubě letadla.

Odpovídače úrovně 5 musí mít tyto schopnosti:

- všechny schopnosti úrovně 4
- zdokonalený přenos Comm B a zpráv prodloužené délky

Úroveň 5 umožňuje předávání dat v podmínkách práce skupiny dotazovačů bez nutnosti rezervování při práci skupiny stanic. Toto zajišťuje vyšší minimální propustnost kanálu přenosu dat ve srovnání s jinými úrovněmi odpovídačů.

Právě možnost datového přenosu v rámci módu S vede k zavádění jak pozemních stanic módu S, tak odpovídačů módu S postupně v celé Evropě.

Informační schopnost módu S je rozdělena do dvou kategorií, které se postupně implementují.

Mód S Elementary Surveillance (ELS)¹

K dosažení požadavků ELS musí být palubní odpovídač minimálně úrovně 2 a musí být schopen vysílat následující:

- ICAO 24bitová adresa. Toto je jeden z hlavních důvodů zavádění módu S. 4 096 možných kódů v odpovědi A přestávalo být dostačující. 24bitová adresa umožňuje $2^{24} = 16\,777\,216$ různých kombinací, což se prozatím ukazuje jako dostačující. Aircraft Identification je shodná s označením vyplněným v letovém plánu. Tato informace je porovnána se systémem zpracovávajícím letové plány, a tím je jeho identifikace jednoznačná.
- odpověď módu A, což zajišťuje odpovědi na dotazy vyvolané standardními SSR
- hlášení výšky v intervalech po 25 stopách (25 ft) Oproti standardnímu SSR, kde je výška obsažená v odpovědi C v intervalu 100 ft, umožňuje přesnější určení výšky (25 ft = 7,62 m). Tato informace však nemusí být dostupná v případě, že palubní technika neumožňuje dostatečně přesné určení výšky.
- status letu (na zemi, ve vzduchu)
- hlášení o schopnostech datové linky
- ACAS aktivní doporučení k vyřešení konfliktu
- hlášení o schopnosti využívat GICB

Mód S Enhanced Surveillance (EHS)¹

Odpovídač splňující požadavky EHS musí být schopen ELS, dále musí vysílat tyto údaje:

- nastavená výška

- úhel příčného náklonu
- rychlost změny traťového úhlu
- zeměpisný traťový úhel
- traťová rychlost
- magnetický kurz
- indikovaná vzdušná rychlost / Machovo číslo – pokud jsou dostupné oba údaje, musí je letadlo vyslat
- rychlost stoupání/klesání

Soubor těchto informací se nazývá DAPs – Downlink Aircraft Parameters. Podle toho, které jsou zobrazeny řídicímu a které jsou dostupné zpracovávajícímu systému, se lze setkat se zkratkami CAPs (Controller Access Parameters) a SAPs (System Access Parameters).

Dle EUROCONTROLu (www.eurocontrol.int) dosáhl systém SSR hranice své operační kapacity, počítá se s módem S jako hlavním způsobem sledování v první čtvrtině 21. století. Zavádění infrastruktury módu S začalo v oblasti EUROCONTROLem nazvané jako Core Area of Europe (neboli „jádro Evropy“), do které se počítá Belgie, Lucembursko, Francie, Německo, Nizozemí, Švýcarsko a Velká Británie jakožto oblasti s nejvyšší hustotou provozu. Požadavek na ELS byl zaveden nejprve v této oblasti, ve Velké Británii, Německu, Francii a ve vzdušném prostoru nad FL 245 všech tří států Beneluxu. O vzdušném prostoru, kde jsou zavedeny požadavky ELS a EHS, se mluví jako o prostoru módu S.

Aktuálně se ve vzdušném prostoru České republiky uplatňuje požadavek na odpovídač módu A/C podle AIP GEN 1.5.1, jak bylo uvedeno výše, nicméně v budoucnu dojde ke zpřísnění požadavků technického vybavení letadel a vytvoření vzdušného prostoru módu S i u nás. Zavádění módu S je prozatím naplánováno ve dvou krocích:

1) od 4. června 2009 budou mít všechny lety VFR a IFR povinnost být vybaveny odpovídači módu S s funkcí Elementary Surveillance (ELS) v prostoru:

- CTA Praha, sektory W, N, S nad FL 95
- TMA Praha, CTR Ruzyně

Požadavek na odpovídač A/C v prostoru mimo prostor módu S se stále řídí AIP GEN 1.5.1.

2) od 31. května 2012 budou mít všechny lety VFR a IFR povinnost být vybaveny odpovídači módu S s funkcí Elementary Surveillance (ELS) v prostoru:

- IFR lety ve FIR Praha
- VFR lety ve FIR Praha nad FL95
- VFR lety v TMA Praha a CTR Ruzyně

Opět se požadavek na odpovídač A/C v prostoru mimo prostor módu S řídí AIP GEN 1.5.1.

Výhody módu S

Krom výhod uvedených v teoretické části, sekundární přehledový radar módu S ve spojení se systémem zpracování radarových dat, který navíc spolupracuje se systémem pro zpracování letových plánů – ať už je to EUROCAT 2000 nebo EUROCONTROLEM stále vylepšovaný ARTAS, poskytuje nesporné výhody oproti standardním SSR, nemluvě o primární radiolokaci. Zpracování informací získaných v odpovědích módu S a jejich konfrontace s letovým plánem podstatně zjednodušuje práci řídicího. Pokud situace odpovídá schváleným letovým plánům, měla by být bezpečnost všech letadel zajištěna (schválený letový plán vylučuje možnost nebezpečného přiblížení v prostorech s povinným podáním letového plánu).

Pokud do prostoru pokrytého sekundárním radarem vstoupí letadlo s transpondérem módu S a odpoví jednou na všeobecný dotaz A/C/S, je „uloženo do paměti“ radaru a od této chvíle je s ním komunikováno pouze selektivně. To zamezí ztrátám signálu při překrytí odpovědí na všeobecný dotaz.

Jako ochrana před kolizemi se používá palubního protisrážkového systému ACAS (Airborne Collision Avoidance System). Tento systém využívá toho, že odpovídač vysílá všesměrově. ACAS vysílá dotazy odpovídačům SSR jiných letadel a zpracovává jejich odpovědi. Měří vzdálenost a relativní úhel odpovídajícího letadla a s využitím informací obsažených v odpovědi vyhodnocuje relativní polohy okolních letadel.

ACAS je rozdělen do třech tříd. ACAS I je založen pouze na odpovědích A/C a není schopen koordinace s ACAS jiných letadel. ACAS II a III zpracovávají odpověď módu S. V případě blízkosti jiného letadla může předat pilotovi dva typy zpráv. Traffic Advisory (TA) jsou informace o letovém provozu, jsou to upozornění o přítomnosti jiných letadel, která představují potenciální hrozbu. Resolution Advisory (RA) dává pilotovi doporučení k manévru pro udržení bezpečného rozstupu. ACAS II a III mezi sebou komunikují a vydávají koordinované RA. Jsou-li tedy například dvě letadla v nebezpečné blízkosti, prvnímu ACAS doporučí stoupaní a druhému klesání. Navíc, pokud dojde k nežádoucímu přiblížení, ACAS dá o takové situaci vědět pozemní stanici řízení letového provozu – prostřednictvím sekundárního radaru. ACAS v podstatě poskytuje druhý pohled na situaci ve vzduchu, nezávislý na informacích zjištěných přehledovými radary.

6 Závěr

Získávání informací pro řídicího prošlo od svých počátků pozoruhodným vývojem. Od třicátých let dvacátého století, kdy se začalo v podstatě experimentálně používat radiolokačních prostředků, urazily radiotechnické prostředky velký kus cesty a nikdo nemůže spolehlivě předpovědět, jakých systémů se bude využívat za dalších padesát let. Jako téměř všechen technický pokrok byl i rozvoj radarů podporován hlavně vojenskými potřebami, a to nejen v průběhu světové války. Dříve nepředstavitelné možnosti nabídl intenzivní rozvoj digitální techniky v posledních dvaceti letech. Mnoho technických vymožeností původně určených pro vojenské užití s určitým zpožděním našlo uplatnění i v civilním sektoru a přehledové radary nejsou výjimkou. Přehledová infrastruktura musí být zdokonalována zároveň se vzrůstajícím leteckým provozem. Její vývoj je dán požadavky na leteckou dopravu, resp. na její bezpečnost. Přehledové radiolokátory jsou zásadní částí systému řízení letového provozu, protože jejich schopnosti jsou v současné době nenahraditelné. Bez znalosti pozice letadel by při současné hustotě provozu nebylo vůbec možné dodržet bezpečné vzdálenosti mezi dopravními prostředky ve vzduchu. Každá další informace, která přísluší k bodu na monitoru, dává řídicímu možnost „vidět dál“, předpovídat chování letadla v několika dalších okamžicích. Spektrum informací získávané současnými technikami rovněž umožňuje vyšší stupeň automatizace, což opět ulehčí práci řídicího.

Sekundární radiolokace a obzvláště využití selektivního dotazování přináší do střediska řízení letového provozu nesmírně cenné informace. Letadla vybavená transpondérem odpovídajícímu požadavkům EHS a ACASem II neznamení pro řídicího významnou zátěž, pokud dodržují letový plán. Mód S v současné době představuje asi nejlepší způsob sledování, o čemž svědčí snahy mezinárodních organizací, které spějí k zavedení vzdušného prostoru módu S jako evropského standardu. Obrovskou výhodou selektivního dotazování je omezení počtu odpovědí. I Česká republika nezůstává pozadu a postupně zavádí povinnost vybavení odpovídači v oblastech s hustým provozem. Jsou dvě možnosti, jak se provozovatelé takto ovlivněných letů k vzniklé situaci postaví. Hlavně u letů VFR se odpovídač módu S se schopností ELS, případně EHS, jež jsou provozovány menšími firmami, může stát finanční zátěží (např. v e-shopu aviatik.cz se ceny odpovídače pohybují okolo 50 000 Kč). Je tedy možné, že své lety budou provozovat pod FL 95, a pokud dříve byla jejich cílovým letištěm Ruzyně, lze uvažovat o přistání na jiném letišti, kde prozatím není třeba odpovídače. Pokud se však implementace prostoru módu S dovede do konce a bude pokryt všechen vzdušný prostor, snad kromě třídy G, nebude již pro provozovatele jiného zbylí a transpondér módu S bude třeba instalovat.

Ve fázi, kdy bude převážná většina letů vybavena odpovídačem, je možné spekulovat o širším využití multilaterálních sledovacích systémů sestávajících z dotazovače A/C/S a několika přijímačů. Systém zpracování informace je složitější než u sekundárních radarů, odpadá však nutnost mechanického pohybu potřebného k rotaci antény, a je tedy možné, že pořizovací i provozní náklady budou oproti sekundárním radarům nižší. I jejich přesnost závisí pouze na přesnosti měření času a měření vzdálenosti mezi jednotlivými přijímači, není nutné důsledně promýšlet vyzařovací diagram, a tedy složitě navrhovat konstrukci antény.

Použité zdroje:

- [1] AIC Czech republic A 6/07: GEN 1.5-1 [online dokument formátu PDF], 2007-05-24, [cit. 2009-03-08], <http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aic.htm>
- [2] AIP Czech republic: GEN 1.5-1 [online dokument formátu PDF], 2008-06-05, [cit. 2009-03-08], <http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm>
- [3] BEZOUSEK, Pavel, SCHEJBAL, Vladimír: *Radar Technology in the Czech Republic* [online dokument formátu PDF], IEEE AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS MAGAZINE, August 2004 [cit. 2009-02-06], <http://genesis.upce.cz/priloha/keez_clanek02>
- [4] COMSOFT: *Making the link* [online dokument formátu PDF], Air Traffic Management, March/April 1996, [cit. 2009-03-20], <www.comsoft.de/download/atc/background/archive/rmcde_atm96.pdf>
- [5] DOHNAL, Jiří: *26. brigáda velení řízení průzkumu Stará Boleslav* [online], c2007-03-13, [cit. 2009-04-10], <<http://www.bvrpz.army.cz/>>
- [6] ELDIS: *Radar RL-5M* [online dokument formátu PDF], firemní katalog fy Eldis, [cit. 2009-02-06], <www.eldis.cz/files/katalog_list/radar-RL-4AS-cz.pdf>
- [7] ENDER, Joachym: The inventor Christian Hülsmeier [online dokument formátu PDF], H Hülsmeier memorial sérech in the townhall of Cologne, 2002-06-4, [cit. 2009-01-22], <http://www.design-technology.info/resourcedocuments/Huelsmeier_EUSAR2002_english.pdf >
- [8] HATZIPANAGOS, Georgie: *Kamara and Merenda Hill Terminal Area Radar* [online], c1997-2005, [cit. 2009-02-06], <http://www.hcaa-eleng.gr/en/systems/star2000_en.html>
- [9] HAVELKA, Radek: *CZK - RL-4AS* [online], c1997-2008, [cit. 2009-03-20] <<http://forum.valka.cz/viewtopic.php/title/CZK-RL-4AS/t/15784>>
- [10] HAVELKA, Radek: *CZK - RPL-5 (mobilní letištní radiolokační systém)* [online], c1997-2008, [cit. 2009-03-20], <<http://forum.valka.cz/viewtopic.php/title/CZK-RPL-5-mobilni-letistni-radiolokacni-system/t/63887>>
- [11] KULČÁK, Ludvík a kol.: *Air Traffic Management*, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 314s. ISBN 80-7204-229-7
- [12] KULČÁK, Ludvík: *Klasické prostriedky zabezpečovacej leteckej techniky*, Žilina, EDIS – vydavateľství ŽU, 1998, 358s. ISBN 80-7100-477-4
- [13] KUSALA, Jaroslav: *RADAR a jeho využití* [online], c2008, [cit. 2009-04-10], <http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k35.htm>
- [14] MAYER, Erwin: *Next generation Artas* [online dokument formátu PDF], reprinted from Air Traffic International 2004 for COMSOFT, Germany, 2004, [cit. 2009-03-20], <www.comsoft.de/download/atc/background/artas_atti04.pdf>

- [15] MAYER, Erwin: *Radnet – A Network for Air Traffic Control* [online dokument formátu PDF], presented at GI/ITG Conference for Communication in Distributed Systems, Chemnitz, Germany, January 1994, [cit. 2009-03-20], <http://comsoft.de/download/atc/background/archive/radnet_94.pdf>
- [16] MAYER, Erwin: *Radnet: Yesterday, Today and Tomorrow* [online dokument formátu PDF], Skyway, Volume 2, Number 5, Spring 1997, [cit. 2009-03-20], <http://comsoft.de/download/atc/background/archive/rmcde_skyway97.pdf>
- [17] Předpis L 10/IV: *Předpis o letecké telekomunikační službě: Přehledový radar a protisrážkový systém* [online dokument formátu PDF], <<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10/L-10iv/index.htm>>
- [18] RENDALL, David: *Jane's Letadla: Příručka pro rozpoznávání letadel*, přeložil Tomáš Moravec, české první vydání, Praha, Jan Vašut, 1999, 512 s. ISBN 80-7236-078-7
- [19] ŘLP: *Společný seminář ŘLP ČR, s.p. a Aeroklubu ČR* [online dokument formátu PPS], prezentace ŘLP ČR v IAATC Jeneč, 2008-12-06 [cit. 2009-03-21], <www.aecr.cz/download.php?file=upload/www.aecr.cz/nehody-uvod/_dir/setkani-se-zastupci-gaaprosinec2008-verze3.pps>
- [20] *SBS-1 a Air Nav Box online sledování leteckého provozu :: Zobrazit téma – Nový primární / sek. radar na Ruzyni a NATO v Sokolnici* [online], c2001,2005, [cit. 2009-02-06], <<http://www.cts-kenwood.cz/forum/viewtopic.php?t=164>>
- [21] SCHEJBAL, Vladimír: *Czech Rradar Technology* [online dokument formátu PDF], IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, VOL. 30, No. 1, January 1994, [cit. 2009-02-06], <http://genesis.upce.cz/priloha/keez_clanek03>
- [22] SCHEJBAL, Vladimír: *Pasivní radary Tamara a Věra* [online dokument formátu PDF], Sdělovací technika č.: 10/2004, [cit. 2009-02-06], <http://genesis.upce.cz/priloha/keez_clanek01>
- [23] SKOLNIK, Merrill Ivan: *Introduction to radar systems*, Singapore, McGraw-Hill Books Co., 1981, 581s. ISBN 0-07-066572-9
- [24] THALES: *RSM 970 S: Monopulze Secondary Surveillance Radar/Mode S* [online dokument formátu PDF], firemní katalog fy Thales, [cit. 2009-02-06], <www.thalesgroup.com/extra/events/atc2009/docs/Thales_rsm970s.pdf>
- [25] THALES: *STAR 2000* [online dokument formátu PDF], firemní katalog fy Thales, [cit. 2009-02-06], <http://www.thalesgroup.com/extra/events/atc2009/docs/Thales_star2000.pdf>
- [26] VOSECKÝ, Slavomír a kol.: *Základy leteckých navigačních zařízení*, Brno, Vojenská akademie, 1988, 750 s.
- [27] OMNIPOL: *VERA –AP, P3D and ASCS* [online dokument formátu PDF], firemní katalog fy OMNIPOL, [cit. 2009-02-06], <<http://www.omnipol.cz/OMNI2224/VERA-AP.pdf>>

Další internetové zdroje:

www.rlp.cz

www.army.cz

lis.rlp.cz

<http://www.eurocontrol.int>

<http://www.radartutorial.eu/>

<http://www.sra.com/era/>

www.eldis.cz

www.aviatik.cz

Seznam použitých zkratek

| | | |
|---------|---|---|
| 2D | Two Dimensional | Dvourozměrný |
| 3D | Three Dimensional | Třírozměrný |
| ACAS | Airborne Collision Avoidance System | Palubní protisrážkový systém |
| ACC | Area Control Centre | Oblastní středisko řízení |
| AČR | | Armáda České republiky |
| ADS-B | Auomatic Dependent Systém – Broadcasting | Automatické závislé sledování – rozhlasové |
| APP | Approach Control Service | Přibližovací služba řízení |
| A-SMGCS | Advanced-Surface Movement Guidance and Control Systems | Viz SMR |
| ATC | Air Traffic Control | Služba řízení letového provozu |
| ATM | Air Traffic Management | Organizace letového provozu |
| CAP | Controller Acces Parameter | Parametry dostupné řídicímu |
| CNS | Communication Navigation Surveillance | Komunikace, navigace, sledování |
| CTA | Control Area | Řízená oblast |
| CTR | Control Zone | Řízený okresek |
| ČR | | Česká republika |
| DAP | Downlink Aircraft Parameter | |
| EHS | Enhanced Surveillance | |
| ELS | Elementary Surveillance | |
| FANS | Future Air Navigation Systems | Budoucí letecké systémy |
| FIR | Flight Information Region | Letová informační oblast |
| FPL | Filed Flight Plan | Zpráva podaného letového plánu |
| FLxx | Flight Level xx | Letova hladina xx, xx00 ft |
| FRUIT | False Response Un-correlated In Time | Odpovědi přijaté bočními laloky přehledového radaru |
| GICB | Ground Initiated Comm-B | Ze země vyvolaná zpráva Comm B |
| ICAO | International Civil Aviation Organization | Mezinárodní organizace pro civilní letectví |
| IEEE | The Institute of Electrical and Electronics Engineers | Institut elektrických a elektronických inženýrů |
| IFR | Instrument Flight Rules | Pravidla letu podle přístrojů |
| IPC | | Viz MTI |
| MSSR | Monopulse Secondary Surveillance Radar | Monoimpulzní sekundární přehledový radar |
| MTD | Moving Target Detection | Selekce pohyblivých cílů |
| MTI | Moving Target Indication | Indikace pohyblivých cílů |
| NATO | North Atlantic Treaty Organization | Severoatlantická aliance |
| NM | Nautical Mile | Námoňní míle, 1 852 m |
| PRF | Pulze Repetition Frequency | Opakovací frekvence pulzu |
| PRT | Pulze Repetition Time | Opakovací perioda pulzu |
| PSR | Primary Surveillance Radar | Primární přehledový radar |
| PSS | Passive Surveillance Systém | Pasivní sledovací systém |
| RA | Resolution Advisory | Návrh řešení konfliktu |
| RADNET | Radar Data NETWORK | |
| RMCD | Radar Message Conversion and Distribution Equipment | |
| RSR | en-Route Surveillance Radar | Traťový radar |
| ŘLP | | Řízení letového provozu |
| SAP | Systém Acces Parameters | Parametry dostupné systému |
| SMR | Surface Movement radar | Pojezdový radar |
| SPC | | Viz MTD |
| SSR | Secondary Surveillance Radar | Sekundární přehledový radar |
| SVD | | Směrový vyzářovací diagram |
| TA | Traffic Advisory | Informace o provozu |

| | | |
|------|----------------------------------|------------------------------------|
| TAR | Terminar Area Surveillance Radar | Okrskový radar |
| TDOA | Time Difference Of Arrival | Časový rozdíl příchodu, metoda PSS |
| TMA | Terminal Control Area | Koncová řízená oblast |
| TWR | Tower Control Service | Letecká řídicí věž |
| VFR | Visual Flight Rules | Pravidla letu za viditelnosti |

Seznam příloh

Příloha A – Elektromagnetické vlny a jejich vlastnosti

Příloha A

Elektromagnetické vlny a jejich vlastnosti^{12,23}

Složky elektromagnetické vlny

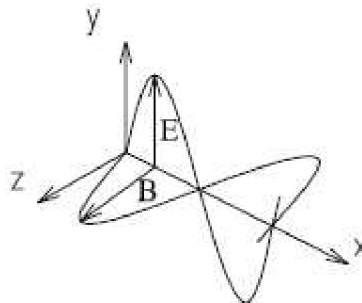
Elektromagnetické vlnění je jednou z forem přenosu energie, lze se také setkat s ekvivalentním pojmem elektromagnetické záření. V dostatečné vzdálenosti od zdroje lze vlny považovat za rovinné. Elektromagnetická vlna má dvě složky, vektor elektrické intenzity \mathbf{E} a vektor magnetické indukce \mathbf{B} (v některých literaturách \mathbf{H}). Směr šíření je dán vektorovým součinem $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} jsou tedy kolmé na směr šíření, navíc jsou kolmé k sobě navzájem. Vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} jsou spolu ve fázi a jejich amplitudy jsou vždy ve stejném poměru:

$$\frac{E}{B} := \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi$$

Elmag. vlna je tedy rovinná, příčná a postupná. Lze ji zcela popsat amplitudou, frekvencí (též kmitočtem) a fází. Ve volném prostoru se šíří konstantní rychlostí, která je rovna rychlosti šíření světla $c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$, přičemž $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ je postačující aproximací pro většinu aplikací. Rychlost šíření v jiném prostředí než ve vzduchoprázdnu je

$$v := \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

kde ϵ_r je relativní permitivita prostředí. Pro vzduch se $\epsilon_r = 1$. Vezmeme-li rychlost šíření v atmosféře $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, pak dostatečně přesné změření času stačí k určení uražené dráhy.

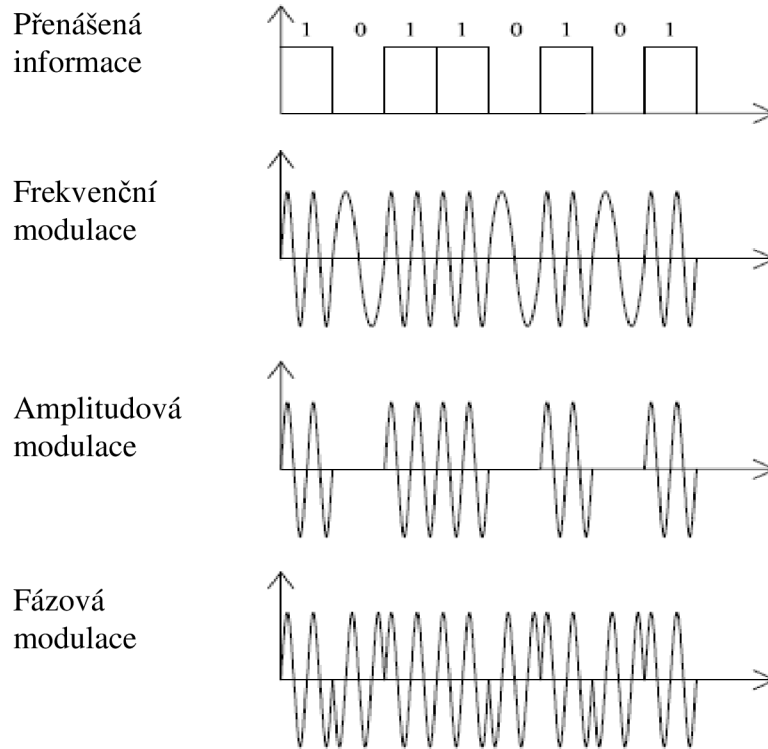


Obr. A-1 Elektromagnetická vlna

Modulace

Pokud chceme pomocí elektromagnetické vlny přenést nějakou informaci, musíme ji namodulovat na nosnou vlnu. Rozlišujeme modulaci frekvenční, amplitudovou a fázovou.

Pro nosnou vlnu, modulovaný signál a vlnu výslednou existují popisné rovnice. Tyto rovnice jsou rozebrány například v [12], zde vystihneme jejich podstatu pouze obr. A-2.



Obr. A-2 Modulace

Polarizace

Pokud vektory **E** a **B** kmitají v obecném směru, jedná se o nepolarizované záření. Ovlivnění směru kmitání nebo velikosti amplitudy se nazývá polarizace. Existuje polarizace lineární (horizontální nebo vertikální), kruhová a eliptická. U lineární polarizace má výsledný vektor konstantní orientaci a periodicky se mění jeho velikost. U kruhové polarizace má vektor konstantní velikost a periodicky se mění jeho fáze. U eliptické polarizace se mění i velikost i fáze, obě se stejnou periodou.

Spektrum elektromagnetických vln

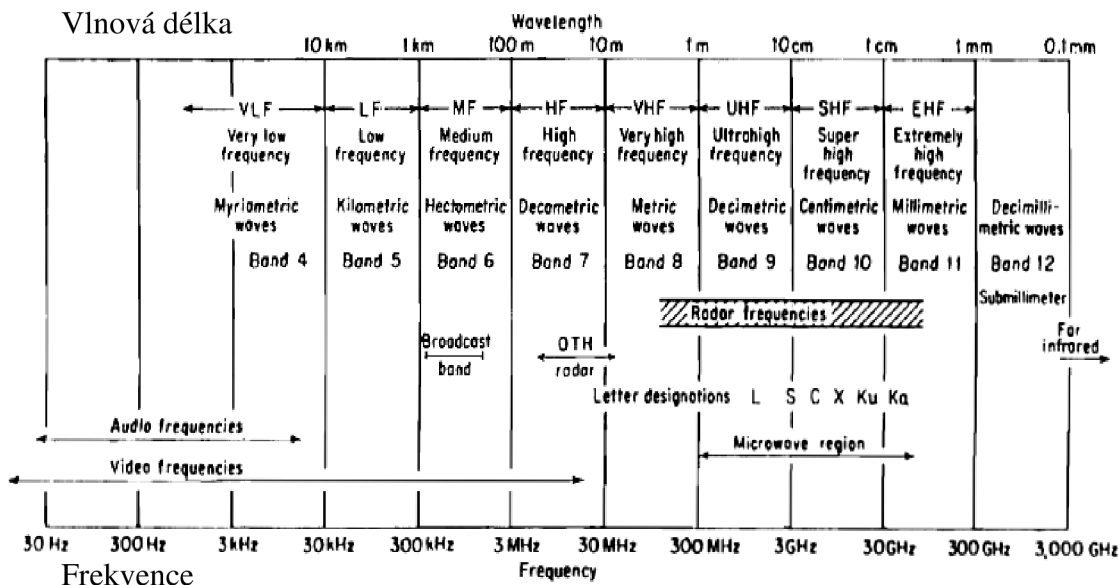
Kromě charakterizování vlny frekvencí f (v hertzech) se často používá pojmu vlnová délka λ (v metrech). Je to dráha, jakou vlna urazí za dobu jedné periody kmitu elektrické intenzity (a také magnetické indukce – jsou ve fázi, jak již bylo uvedeno). Dráha je rychlost vynásobená časem. Rychlost známe, periodu spočítáme ze vztahu $T = 1 / f$

$$\lambda = v \cdot T := \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Pro šíření v atmosféře lze psát

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Při přechodu vlny do prostředí, kde se šíří rychlostí nižší než c , se mění vlnová délka, frekvence zůstává nezměněna.



Obr. A-3 Spektrum rádiových vln, radarové frekvence [23]

| Anglická zkratka | Anglický název | Česká zkratka | Český název |
|------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------|
| VLF | Very low frequency | VDV | Velmi dlouhé vlny |
| LF | Low frequency | DV | Dlouhé vlny |
| MF | Medium frequency | SV | Střední vlny |
| HF | High frequency | KV | Krátké vlny |
| VHF | Very high frequency | VKV | Velmi krátké vlny |
| UHF | Ultra high frequency | UKV | Ultra krátké vlny |
| SHF | Super high frequency | české ekvivalenty se nepoužívají | |
| EHF | Extremely high frequency | | |

Tab. A-1 České názvy vlnových pásem

| Pásmo | Rozsah frekvencí | Rozsah vlnových délek |
|-------|------------------|-----------------------|
| L | 1 - 2 GHz | 15 - 30 cm |
| S | 2 - 4 GHz | 7,5 - 15 cm |
| C | 4 - 8 GHz | 37,5 - 75 mm |
| X | 8 - 12 GHz | 25 - 37,5 mm |

Tab. A-2 Pásmo používaná radary řízení letového provozu

Šíření elektromagnetických vln

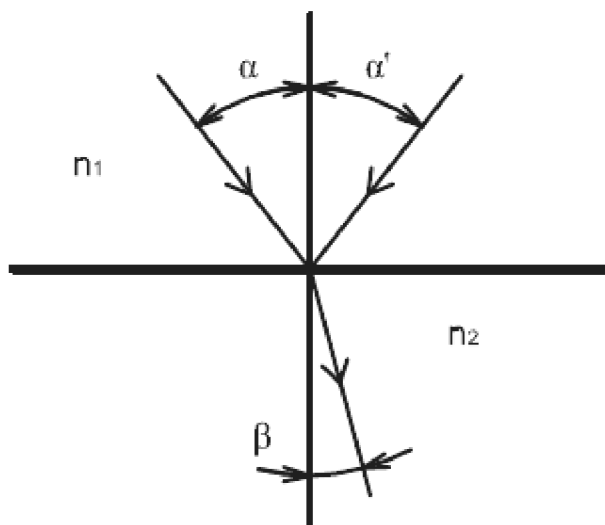
Viditelné světlo je velmi úzká část spektra elektromagnetických vln. Připomeneme tedy základní jevy středoškolské optiky a rozšíříme je na rádiové vlny. Z optiky známe odraz a

lom na rozhraní dvou prostředí, v nichž se vlny šíří rozdílnou rychlostí. Definujme tedy index lomu:

$$n = \frac{v}{c}$$

kde v je rychlost, jakou se záření šíří daným prostředím.

V případě, že na rozhraní dojde k odrazu, platí, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. Pokud dojde k průchodu vlny přes rozhraní do druhého prostředí, mohou nastat tři situace. Pokud mají obě prostředí stejný index lomu, paprsek prochází dál beze změny směru. Pokud vlna vstoupí do opticky hustšího prostředí (prostředí s vyšším indexem lomu), dojde k přiklonění směru blíže k normále (kolmici k) rozhraní. Z pravidla o nezávislosti chodu paprsku (nezáleží na tom, jestli se paprsek pohybuje tam nebo zpátky, vždy se pohybuje po stejné trajektorii) nutně vyplývá, že při přechodu do opticky řidšího prostředí se odklání směrem od normály rozhraní. Ve většině případů dojde na rozhraní jak k lomu, tak odrazu. Zmíňme ještě úplný odraz, kdy paprsek v opticky hustším prostředí dopadá na rozhraní s řidším prostředím pod větším než mezním úhlem (měřeno od kolmice). V takovémto případě se veškerá energie odrazí zpět od rozhraní. Tohoto jevu se hojně využívá v optických kabelech.



Obr. A-4 Odraz a lom světla

Otázkou je, jaká část záření bude odražena a jaká projde, navíc prostředí může energii také absorbovat. Mluvíme-li o elektromagnetických vlnách v souvislosti s radary a zjišťováním polohy objektů, ideální situací je, když v prostředí mezi radarem a sledovaným objektem nedochází ani k absorpci ani lomu, tedy zakřivení trajektorie paprsku na cestě radar–objekt (trajektorie se předpokládá přímá), a naopak že od sledovaného objektu se odrazí co nejvíce energie zpět k radaru.

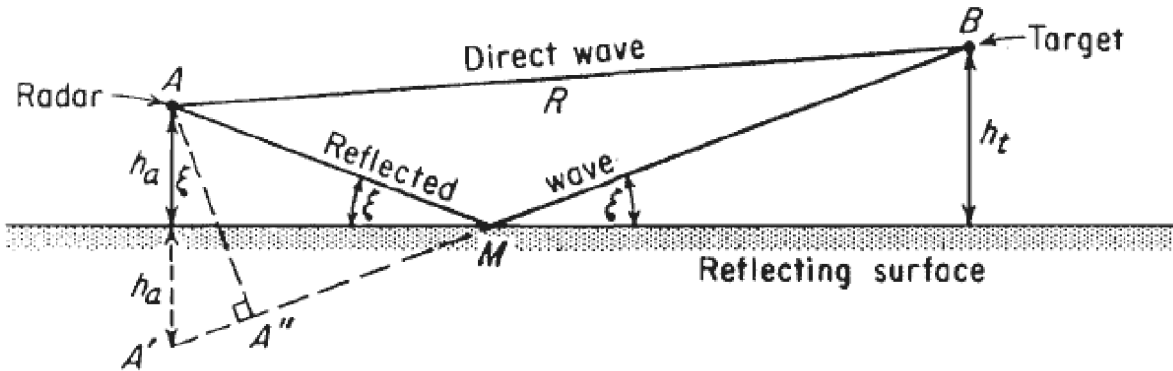
Dalším jevem v optice je difrakce, ohyb světla do oblastí geometrického stínu na překážkách v rozměrech srovnatelných s vlnovou délkou záření.

Odraz i úplný odraz, lom a ohyb se vyskytují nejen v oblasti viditelného záření, ale setkáváme se s nimi i u rádiových vln.

Jevy způsobené zemským povrchem:

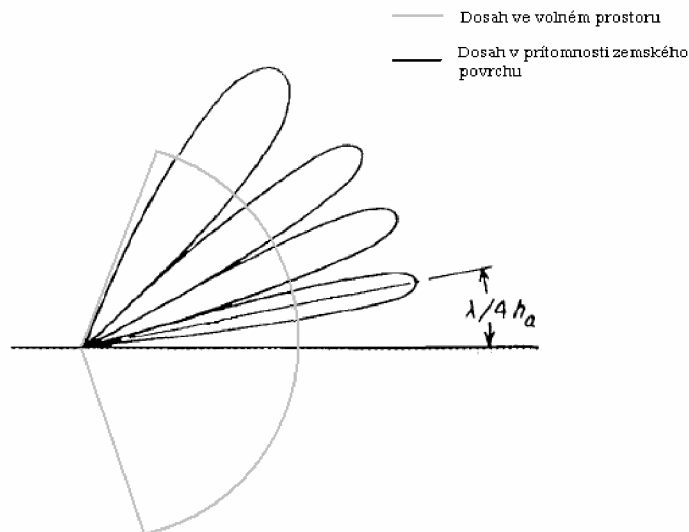
a) odraz rádiových vln od země

Předpokládejme, že radar s anténou ve výšce h_a má ve volném prostoru ve všech výškových úhlech, ve kterých je schopen vysílat vlny, stejný dosah. Nyní si představme situaci na obr. A-5, v níž je přítomen povrch země, pro zjednodušení rovný, hladký, a všechno záření se od něj úplně odrazí.



Obr. A-5 Odraz od rovného povrchu [23]

Fázový rozdíl přímé vlny a odražené vlny v místě B je způsoben za prvé rozdílem délky trajektorie a za druhé změnou fáze odražené vlny při odrazu v bodě M. V místě B nutně dojde k interferenci obou vln. V konstantních výškových úhlech bodu B jsou obě vlny ve fázi. Na cíl tak dopadá největší energie a dosah radaru je maximální (v teoretickém případě, kdy dojde k ideálnímu odrazu beze ztráty energie, je dosah radaru dvakrát větší než ve volném prostoru). V jiných výškových úhlech mají obě vlny fázi opačnou, jejich součet je tedy nulový a dosah radaru je minimální (v tomto teoretickém případě nulový). Závislost dosahu radaru na výškovém úhlu lze popsat rovnicemi, pro tento text vystačíme s obr. A-6.



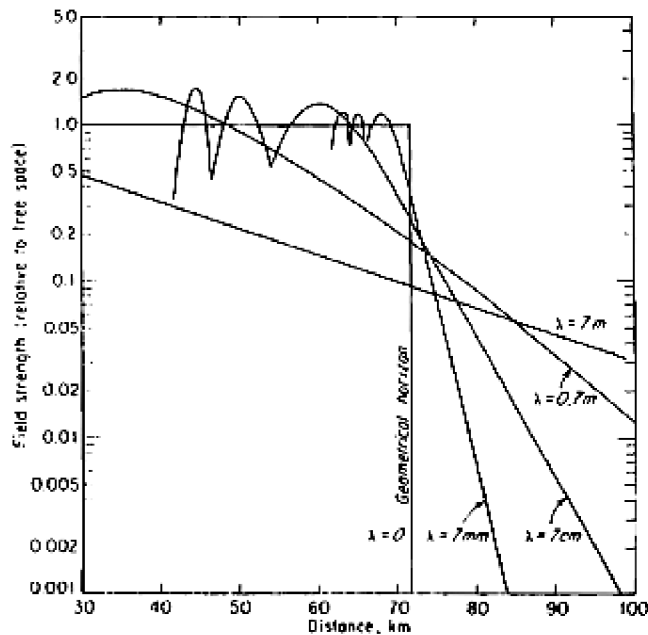
Obr. A-6 Směrový vyzařovací diagram radaru ve vertikální rovině [23]

Takovou závislost vyjadřuje diagram vyzařování ve vertikální rovině – SVD. Vidíme, že rovnoměrné ozařování v horizontální rovině ve volném prostoru přechází v přítomnosti povrchu v laločkovitou strukturu. Diagram na obr. A-6. odpovídá velmi zjednodušeným podmínkám a ve druhé kapitole je SVD rozebrán podrobněji.

Důležitým poznatkem je, že úhel prvního maxima je funkcí vlnové délky a výšky antény nad povrchem. Pokud potřebujeme dosáhnout dostatečného ozáření malých výškových úhlů, je třeba vhodně volit právě tyto parametry.

b) ohyb rádiových vln v důsledku zakřivení zemského povrchu

Toto je jeden z mechanismů, jak dosáhnout zvýšení dosahu radaru až za geometrický horizont. Viditelné světlo se dokáže ohnout za překážku, pokud má tato překážka podobný rozměr, jako je vlnová délka světla. U VDV se vlivem zakřivení Země, opakovaného odrazu od ionosféry a od Země dá dosáhnout až obejití celé zeměkoule kolem dokola. U rádiových vln vyšších frekvencí není ohyb tak výrazný, nicméně radarový horizont se nachází o něco dál než geometrický i u kratších vlnových délek. Na obr. A-7 je zobrazena teoretická velikost elektrického pole v závislosti na vzdálenosti od zdroje záření. Graf byl vytvořen pro výšky $h_a = h_t = 100$ m (z obr. A-5: h_a – výška antény, h_t – výška cíle) a pro určité hodnoty dalších parametrů, které pro tento text nejsou zásadní. Berme jej tedy pouze ilustrativně.



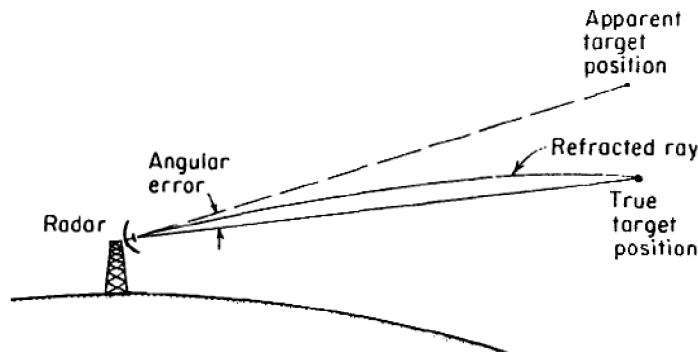
Obr. A-7 Radarový horizont [23]

Jevy způsobené atmosférou

a) ohyb vlivem atmosféry

Protože index lomu v atmosféře není konstantní, elektromagnetická vlna se v ní tedy nemůže šířit přímočaře. Index lomu atmosféry je funkcí barometrického tlaku, absolutní teploty a parciálního tlaku vodních par ve vzduchu. Ve standardní atmosféře klesá index lomu o $4 \cdot 10^{-6}$ s každým metrem výšky.² Vlna směřující nahoru tedy postupně prochází

prostředím se stále nižším indexem lomu. To má za následek ohyb vlny a chybu v měření výškového úhlu (*angular error*), jak je patrné z obr. A-8.



Obr. A-8 Ohyb v atmosféře [23]

b) vlnovodné kanály

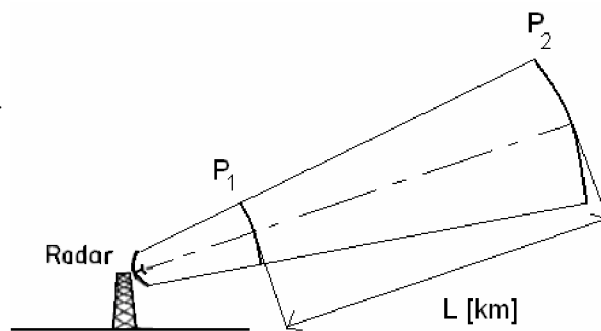
Jak bylo řečeno, index lomu atmosféry je funkcí teploty a tlaku vzduchu a parciálního tlaku par. Nad zemským povrchem se mohou vyskytnout několik desítek metrů vysoké vrstvy atmosféry s vyšším množstvím par a nižší teplotou oproti okolnímu vzduchu. Tyto vrstvy mají vyšší index lomu a na rozhraní těchto vrstev dochází k úplnému odrazu, jako např. u optických kabelů. Pokud do této vrstvy vnikne elektromagnetická vlna v malém úhlu, může se tímto tzv. vlnovodným kanálem šířit na větší vzdálenost téměř beze ztrát. Tímto způsobem jsou ovlivněny převážně vlny s vyššími frekvencemi, jaké se využívají právě u radarů.

Nevýhodou je, že vlny, které by normálně rozhraním prošly a nezůstaly uvězněny ve vlnovodném kanálu, musí někde chybět. Prodloužení dosahu ve směru vlnovodného kanálu má za následek ztrátu intenzity záření v jiných výškových úhlech.

c) útlum elektromagnetických vln

Elektromagnetická vlna šířící se od radaru k cíli atmosférou je nositelem energie. Bohužel, atmosféra samotná, resp. molekuly kyslíku a vodních par absorbují část energie ve formě tepla. To má za následek ztrátu přeneseného výkonu. Tato ztráta se uvádí v jednotce dB/km, která vystihuje poměr výkonů na začátku a konci úseku dlouhého jeden kilometr.

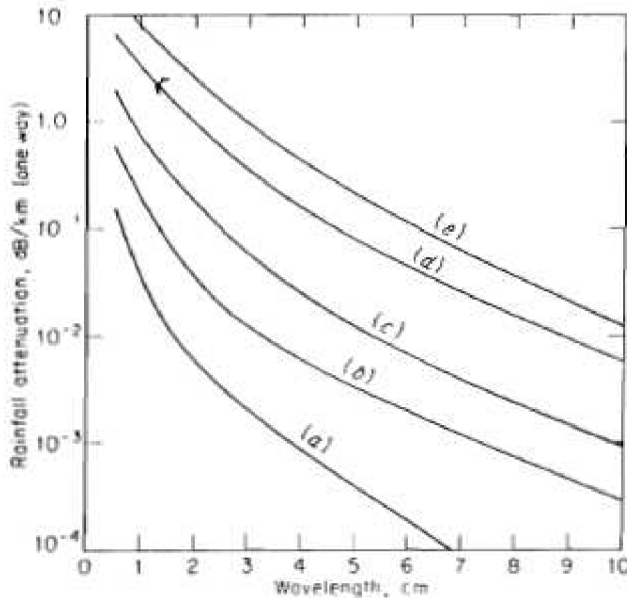
$$1 \frac{\text{dB}}{\text{km}} = \frac{10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}{L}$$



Obr. A-9 Útlum rádiových vln

Útlum vlivem molekul v atmosféře nemá pro rozsah frekvencí přehledových radarů velký význam, projevuje se už u vln s frekvencemi v desítkách GHz a výše.

Mnohem horší situace nastává, pokud se v atmosféře nacházejí srážky. Kapky deště stojící (padající) v cestě elektromagnetickým vlnám o frekvencích používaných přehledovými radary energii přenášenou vlnami ani ne tak absorbují, jako spíše odrazejí. Podle zákona zachování energie pokud je cestou část energie odražena, k cíli nemůže dorazit všechna, ale jen ta část, která nebyla odražena. Krom útlumu, vlny odražené zpět radaru jsou ve většině případů nežádoucí a znesnadňují rozeznání signálu odraženého od letadla.



Jednosměrný útlum (dB/km) v dešti při teplotě 18 °C při srážkách:

- (a) 0,25 mm/h
- (b) 1 mm/h
- (c) 4 mm/h
- (d) 16 mm/h
- (e) 40 mm/h

Obr. A-10 Útlum rádiových vln v dešti [23]