



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VYUŽÍVÁNÍ KMITOČTOVÝCH PÁSEM VKV, UKV, SKV A EKV V RADARECH CIVILNÍHO I VOJENSKÉHO VYUŽITÍ

UTILIZATION OF THE VHF, UHF, SHF, AND EHF FREQUENCY BANDS BY RADARS OF
CIVILIAN & MILITARY AERONAUTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR HELIA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. SLAVOMÍR VOSECKÝ, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Helia

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

obor: **Profesionální pilot (3708R030)**

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:

Využívání kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v radarech civilního i vojenského využití

v anglickém jazyce:

Utilization of the VHF, UHF, SHF, and EHF frequency bands by radars of civilian & military aeronautics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Druhy leteckých radarů.

Kmitočtová pásma, využívaná různými druhy leteckých radarů.

Šíření vln zmíněných kmitočtových pásem.

Cíle bakalářské práce:

Studijní příručka pro BS - profesionální pilot (ATPL).

Seznam odborné literatury:

L 10/I

VOSECKÝ, S.: Radionavigace, skripta, ISBN 978-80-7204-764-2, CERM, Brno 2011

Obecná literatura / letecké radary

Internet ... letecké civilní/vojenské radary

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24. 11. 2014

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá radarovou technikou, kterou se autor pokusil přehledně seřadit pro studijní potřeby následujících ročníků studentů bakalářského studia oboru profesionální pilot. Soustřeďuje se zejména na význam kmitočtových pásem u jednotlivých radarů a jejich dopad na vlastnosti radaru.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with radar technology. Author tried clearly sort this thesis as study source for following students of the field professional pilot. It is focused on importance of frequency bands of selected radars and their impact on radar properties.

KLÍČOVÁ SLOVA

radar, letecká doprava, kmitočtová pásma, primární přehledový radar, PSR, sekundární přehledový radar, SSR,

KEYWORDS

radar, air traffic, frequency bands, primary surveillance radar, PSR, secondary surveillance radar, SSR

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím literatury a internetových zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, 28. 5. 2015

.....
Petr Helia

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HELIA, P. *Využívání kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v radarech civilního i vojenského využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce by nemohla vzniknout bez lidí v mém okolí, kteří mě nejen po dobu tvorby velmi podporovali. Tímto bych rád poděkoval zejména:

- panu doc. ing. Slavomíru Voseckému CSc. za jeho vedení a cenné rady
- panu ing. Petru Fišerovi ze společnosti Ramet a. s. za velmi užitečné studijní materiály
- panu Jakobovi Herzanovi za poskytnutí informací o radaru v Brně-Tuřany

Na závěr bych chtěl poděkovat také své rodině za podporu, kterou mi poskytují po celou dobu mého studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Vlastnosti radarové techniky	12
2.1	Směrový vyzařovací diagram	12
2.2	Vzdálenost cíle	12
2.3	Opakovací frekvence radaru.....	12
2.4	Minimální dosah radaru.....	13
2.5	Maximální dosah radaru	13
2.6	Refrakce.....	14
2.7	Rozlišovací schopnost a přesnost radarového zaměření	15
3	Rozdělení kmitočtových pásem	16
4	Primární radary	18
4.1	Primární přehledový radar	18
4.2	Meteorologický radar	19
4.2.1	Požadavky	20
4.3	Palubní meteorologický radar.....	21
4.4	Přesný přibližovací radar	22
4.5	Primární pojezdový radar	23
5	Sekundární radary	24
5.1	Sekundární přehledové radary	24
5.1.1	Odpovídač SSR	24
5.1.2	Módy odpovídačů SSR	26
5.2	Poruchy sekundárních radarů	26
5.2.1	Nesynchronní rušení.....	26
5.2.2	Synchronní rušení.....	27
5.2.3	Nadbytečné odpovědi.....	27
5.3	Odpovídač módu S	27

5.4	Palubní dálkoměrné zařízení.....	28
5.4.1	Rozlišení vlastních a cizích odpovědí	28
6	Závěr	29
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	31
	Seznam použitých zdrojů	32
	Seznam použité literatury	32
	Seznam internetových zdrojů	32
	Jiné zdroje.....	33
	Seznam použitých obrázků.....	34
	PŘÍLOHY	35
	Příloha 1	35
	Příloha 2	35

1 Úvod

Slovo radar vzniklo jako zkratka z „**R**adio **D**irection **A**nd **R**ange“ a jak již samotný název napovídá, jedná se o prostředek k měření vzdálenosti a směru objektů vůči měřicímu zařízení za pomoci rádiových vln. Vynález radaru je jeden z nejdůležitějších technických počínů 20. století a jeho význam dosáhl takové úrovně, že by se bez něj dnešní letecký průmysl neobešel.

První radary pracovaly na principu vyzařování elektromagnetických impulsů přesně určeným směrem a následným přijímáním slabých „odrazů“. Na základě časové prodlevy mezi vyslaným a přijatým impulsem se pak dá zjistit vzdálenost takto ozářeného cíle. Na stejném základu funguje část radarů, nazývajících se „primární přehledové radary“ dodnes. Dnešní radary však umožňují mnohem přesnější zaměření.

Během postupného vývoje se vytvořily 3 základní konstrukce radaru, lišící se zejména ochotou sledovaného objektu (v našem případě letadla) spolupracovat s radarovým zařízením. Tyto tři směry nazýváme primární, sekundární a pasivní.

Princip primárního radaru (PR), byl naznačen výše. Energie, vyslaná radarem, vytváří ve vodivých částech cíle tzv. Foucaultovo proudění. Vodivé mohou být plechové části letadla, voda v mokré dřevěné konstrukci, a dokonce i dešťové kapky nebo mokré kroupy. Zde pak toto proudění vyzařuje energii všemi směry, a tak se malá část odrazí zpět k radarovému zařízení, kde ji velmi přesný přijímač dokáže zachytit. Vzhledem k tomu, že je potřeba vyzářit dostatek energie na to, aby uletěla vzdálenost od radaru k zaměřenému cíli a zpět, je PR charakteristický velkým potřebným výkonem. PR jsou konstruovány v široké škále kmitočtových pásem – od nejstarších radarů z dob druhé světové války, které operovaly ve VKV, přes primární přehledové radary (**P**rimary **S**urveillance **R**adar – PSR) s velkým dosahem využívající UKV, až po palubní meteorologické radary s SKV kmitočtovým pásmem. [6]

Sekundární radar (SR) se oproti PR vyznačuje vysokou mírou spolupráce mezi elektronickými prostředky na zemi a na palubě a také nižším potřebným výkonem. Zásadní jsou zde signály dotazů a odpovědí, které mají různé kmitočty. Vyslaný signál „dotaz“ je v zaměřeném objektu přijat, zpracován a po pevně stanovené prodlevě je vyslán zpět na jiném kmitočtu signál „odpověď“. Tato výměna informací probíhá oběma směry, tedy nejen země - letadlo, ale i letadlo – země. Díky spolupráci mezi zemí a letadlem pak SR může přinášet kromě informací o pozici letadla také další doplňující informace, jako například výšku a rychlost letadla. V praxi pak řízení letového provozu (ŘLP) používá kombinaci PSR, který

přesněji určí polohu letadla a sekundárního přehledového radaru (**S**ecundary **S**urveillanc**e** **R**adar – **SSR**), který podává dodatečné informace. SSR na rozdíl od PSR pro stejný dosah nepotřebuje tak vysoký výkon, protože signál musí urazit pouze vzdálenost SSR – letadlo. Dráhu letadlo – SSR pak již vyšle letadlový odpovídač, čímž se snižuje potřeba velikosti vyslané energie. Co se kmitočtového pásma týče, pracují SR v UKV na pevně stanovených kmitočtech. [8]

Pasivní sledovací systém (**P**assive **S**urveillanc**e** **S**ystem – **PSS**) pracuje s předpokladem, že letadlo nejenže nevysílá odpovědi na dotazy jako je tomu u SSR, ale může být také vybaven stealth technologií, která způsobuje velmi slabé nebo dokonce vůbec žádné odrazy na primárním radaru. PSS proto nemá vysílač, ale pouze systém vzájemně propojených velmi citlivých přijímačů, které dokážou zachytit signály, vysílané samotnými letadly. Na základě znalosti vzájemné polohy přijímačů pak dokážeme vypočítat polohu daného letadla. Dnešní letadla se neobejdou bez elektrotechnických technologií, a tak je prakticky nemožné, aby nevysílaly do svého okolí elektromagnetickou energii. Navíc mohou být letadla ozářena také vysílači PSS a dokonce i civilními radiovými vysílači. Výhoda PSS spočívá zejména v absenci vysílače, neboť potřebuje minimum energie, a ze strategického hlediska je jistě výhodou, že je velmi obtížné jej lokalizovat. [8]

Ať pracujete s jakýmkoliv radarem, dominantní vliv na jeho funkci a provozní vlastnosti radarů má zejména kmitočtové pásmo, ve kterém daný radar pracuje. Některé radary umožňují jejich kmitočet v jistých mezích měnit, zatímco jiné mají kmitočet pevně daný. Všechny radary však pracují ve VKV a vyšších kmitočtových pásmech. Tato pásma mají pro radary velmi důležité vlastnosti – malý ionosférický rozptyl, úzké směrové vyzařovací diagramy nebo úzké vysílací impulsy. Výhody, nevýhody a další důležité vlastnosti těchto kmitočtových pásem budou podrobněji rozebrány v této práci.

2 Vlastnosti radarové techniky

2.1 Směrový vyzařovací diagram

Směrový vyzařovací diagram (SVD) vyznačuje směr, kterým je vyzařována energie radaru. SVD má jeden hlavní lalok, kudy proudí většina energie vyslané v daném impulsu a několik postranních, s výrazně menší energií. Postranní svazky se konstruktéři radarů snaží co nejvíce omezovat, protože způsobují nadbytečné odpovědi, které jsou blíže rozvedené v kapitole 6.3. [2]

Pro co největší přesnost radaru se snažíme o co nejužší SVD společně s co nejkratšími impulsy. [8]

2.2 Vzdálenost cíle

Elektromagnetické pulsy se šíří rychlostí blízké rychlosti světla. Pro praktické použití nám stačí pracovat se zaokrouhleným číslem $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [8]

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

Díky znalosti rychlosti šíření a časového zpoždění mezi vysláním pulsu a přijetím odrazu můžeme jednoduchým výpočtem určit vzdálenost mezi radarem a zaměřeným cílem, kde r je vzdálenost od cíle, c je rychlost světla a Δt je časová prodleva mezi vysláním signálu a příjmem odrazu. [6, 11]

$$2r = c \cdot \Delta t \quad (2)$$

V Δt může být obsaženo také umělé zpoždění signálu na odpovídači, typické zejména pro SR. Při výpočtu vzdálenosti musíme vzít v úvahu trasu tam i zpět. Proto je i ve vzorci (2) vzdálenost dvakrát.

2.3 Opakovací frekvence radaru

Během doby, kdy radar vysílá svůj silný elektromagnetický impuls, musí být jeho citlivé přijímací obvody blokovány, aby nedošlo k jejich poškození. Jsou totiž konstruovány na příjem radarových odrazů, které jsou řádově $10^{12} \times$ slabší. Tyto impulsy jsou vysílány s přesně danými rozestupy, které se nazývají opakovací perioda impulsů (**P**ulse **R**epetition **I**nterval – PRI) a prodleva mezi nimi je využita pro příjem radarových odrazů. Reciprokou hodnotou opakovací periody je pak opakovací frekvence radaru

(**P**ulse **R**epetition **F**requency – PRF), která určuje, kolik period radar vyše za jednu sekundu. [8]

$$PRF = \frac{1}{PRI} \quad (3)$$

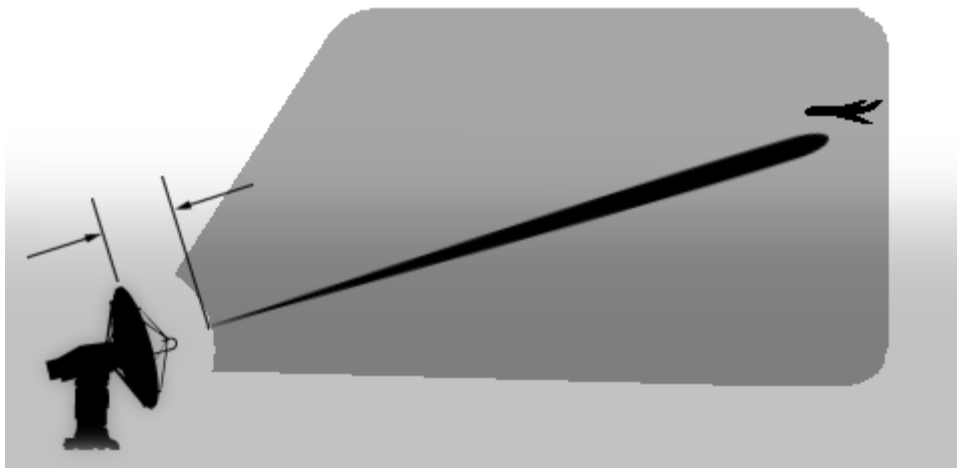
Radary s vysokým PRF dokážou vytvořit úzký SVD. Zároveň však existuje jen velmi krátká doba na vyslání impulsu, během které je možné vyslat pouze omezené kvantum energie. Menší množství vyslané energie pak ve výsledku omezí maximální dosah radaru. [1, 8]

2.4 Minimální dosah radaru

PRF respektive PRI určuje krom maximálního také minimální dosah radaru. Kvůli blokování přijímačů během vysílání není možné přijímat odrazy z nejbližšího okolí. Tato vzdálenost se nazývá slepé pásmo. Vzhledem k rychlosti šíření elektromagnetických pulsů popsaných výše, je možné určit vzorec pro slepé pásmo radaru.

$$r_{min} = \frac{1}{2}c (PRI + t_{tech}) \quad (4)$$

V praxi musíme k PRI ještě přičíst určitý čas t_{tech} , který potřebují obvody radaru k restartování před dalším měřením. [1, 15]



Obr. 1 Slepé pásmo radaru [20]

2.5 Maximální dosah radaru

Maximálním dosahem radaru rozumíme největší možnou vzdálenost, ze které je radar schopen jednoznačně určit cíl. U PR závisí zejména na množství energie, které dokáže anténa radaru vyslat a následně i zachytit v odrazu. To je ovlivněno hned několika parametry radaru, s jejichž znalostí se dá teoretický dosah vypočítat pomocí radiolokační rovnice (5), ve které je

P_V výkon vysílače [W], G je zisk antény [dB], λ je vlnová délka [m], σ je efektivní odrazná plocha cíle [m²] a S_P je citlivost přijímače radaru [W]. [8]

$$r_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_v \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{64 \cdot \pi^3 \cdot S_p}} \quad (5)$$

Ze vzorce je možné vyčíst, že kvůli čtvrté odmocnině je pro dvojnásobné zvýšení dosahu potřeba zvýšit výkon šestnáctkrát. Oproti tomu zisk antény nebo vlnovou délku stačí zvýšit pouze čtyřikrát.

Maximální dosah SR vychází z radiokomunikační rovnice, kde figurují obdobné jednotky jako ve vzorci 5. Veličiny jsou pro dotazovač s indexem d . Odpovídač má pak index o .

$$r_{max} = \sqrt{\frac{P_d \cdot G_d \cdot G_o \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot S_o}} \quad (6a)$$

$$r_{max} = \sqrt{\frac{P_o \cdot G_o \cdot G_d \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot S_d}} \quad (6b)$$

Nejvýraznější rozdíl oproti radiolokační rovnici je v řádu odmocniny a v absenci σ . Jak bylo již zmíněno výše, SR potřebuje vyslat signál, který urazí pouze vzdálenost dotazovač – odpovídač. Maximální dosah dotazovače tedy určuje vzorec 6a. Pro odpovídač platí vzorec 6b.

Další parametr ovlivňující dosah primárního i sekundárního radaru je podmínka přímé viditelnosti. Radar využívá kmitočtová pásma, jejichž vlny se šíří převážně přímočaře. Z důvodu zakřivení země je tedy i radar s dostatečným výkonem limitován obzorem. Problém též představují letadla letící velmi nízko nad terénem. Pro maximální dosah se proto radary dalekého dosahu umisťují na kopce, či jinak vyvýšené místa.

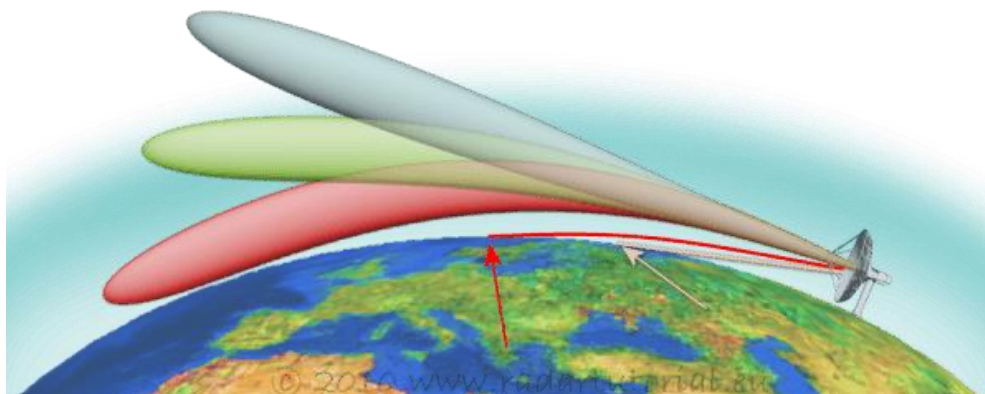
$$r_{max} = 1,25 \cdot \sqrt{h_1 + h_2} \quad (7)$$

Ve vzorci (7) je použito $r_{(max)}$ pro maximální dosah radaru [NM]. Dále pak h_1 a h_2 , což jsou výšky letadla a radaru [ft]. [6, 8]

2.6 Refrakce

V kontrastu s tvrzením v předchozím odstavci, že se radarové vlny šíří zejména přímočaře, mohou nastat meteorologické podmínky, které způsobí ohyb radarové vlny. Tento jev se nazývá refrakce a může se vyskytnout například při inverzi. Značný ohyb vln se pak nazývá superrefrakce a může způsobit výrazné zvýšení dosahu radaru. „Na obrazovce radaru se při

superrefrakci mohou objevit falešné cíle (odrazy od terénu či předmětů, existujících za hranicí očekávaného dosahu), přicházející na vstup přijímače v následující periodě vysílání.“ [8] Na níže uvedeném obrázku je přímá vlna znázorněna modře, refrakce zeleně a superrefrakce červeně. Bílá šipka pak ukazuje podmínku přímé viditelnosti, zatímco červená šipka dosah radaru při superrefrakci. [17]



Obr. 2.5. Dopad refrakce na dosah radaru [21]

Na ochranu před superrefrakcí jsou radary vybaveny softwarem „Pulse to Pulse Stagger“, filtrující všechny cíle, které jsou dál, než přístrojový dosah radaru. [19]

2.7 Rozlišovací schopnost a přesnost radarového zaměření

Rozlišovací schopnost radaru určuje minimální vzdálenost mezi dvěma letadly, která ještě radar dokáže označit za dva rozdílné cíle. V azimutu je dána jako šířka SVD a závisí tak na frekvenci a velikosti antény. V dálce je pak rozlišovací schopnost závislá na PRF, neboť čím kratší impulsy jsou vysílány, tím přesněji se určí vzdálenost cíle.

Přesností radaru se pak rozumí schopnost přesně identifikovat polohu letadla. Je založena na 95% pravděpodobnosti určení cíle, což znamená, že v 95 % měření nebude poloha letadla mimo zvolenou odchylku. [8]

3 Rozdělení kmitočtových pásem

Vzhledem k rozsahu tohoto tématu, je následující odstavec zaměřen pouze na frekvenční pásma od 30 MHz do 300 GHz odpovídající pásmům VKV až EKV.

Existuje několik druhů značení kmitočtových pásem. Dělení na VKV, UKV, SKV a EKV, definované Mezinárodní telekomunikační unií (ITU), je běžně používáno v radiotechnice. Tabulka jejich rozdělení je připojena v příloze. U radarů se však používá poněkud pozměněného značení.

V radarové technice se nejčastěji používá značení, které je uvedeno v tabulce 3.1, kde oproti rozdělení ITU je UKV zkráceno na polovinu. Místo části UKV bylo vydáno značení L, S, C, X, K, V, W, které nahrazuje také SKV a EKV pásmo. Díky tomuto rozčlenění na menší úseky je možné snadněji popsat vlnové vlastnosti každého z nich. [7,18]

Tab. 3.1. Rozdělení radarových kmitočtů [4]

Název	Kmitočet	λ	Využití
VKV	30 ÷ 300 MHz	10 ÷ 1 m	Přehledové radary velmi dlouhého dosahu
UKV	0,3 ÷ 1 GHz	1 ÷ 0,3 m	Palubní přehledové radary
L	1 ÷ 2 GHz	30 ÷ 15 cm	Zbraňové radary, radary ŘLP, přehledové radary dlouhého dosahu
S	2 ÷ 4 GHz	15 ÷ 7,5 cm	Zbraňové radary, meteorologické radary
C	4 ÷ 8 GHz	7,5 ÷ 3,75 cm	Meteorologické radary
X	8 ÷ 12 GHz	3,75 ÷ 2,5 cm	Palební radary, mapovací radary, raketové radary
Ku	12 ÷ 18 GHz	2,5 ÷ 1,6 cm	Radary se syntetickou aperturou
K	18 ÷ 27 GHz	1,6 ÷ 1,1 cm	Využití kmitočtu limitováno kvůli absorpci
Ka	27 ÷ 40 GHz	11 ÷ 7,5 mm	Palební radar na krátké vzdálenosti
Mm	40 ÷ 300 GHz	7,5 ÷ 1 mm	Palební radary, letištní skenery

Využití daných kmitočtů závisí na vlastnostech jejich vln. Vlnová délka radaru je určena jeho kmitočtem, přičemž platí následující vztah, kde f je frekvence [Hz], c je rychlost světla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a λ vlnová délka [m]. [8]

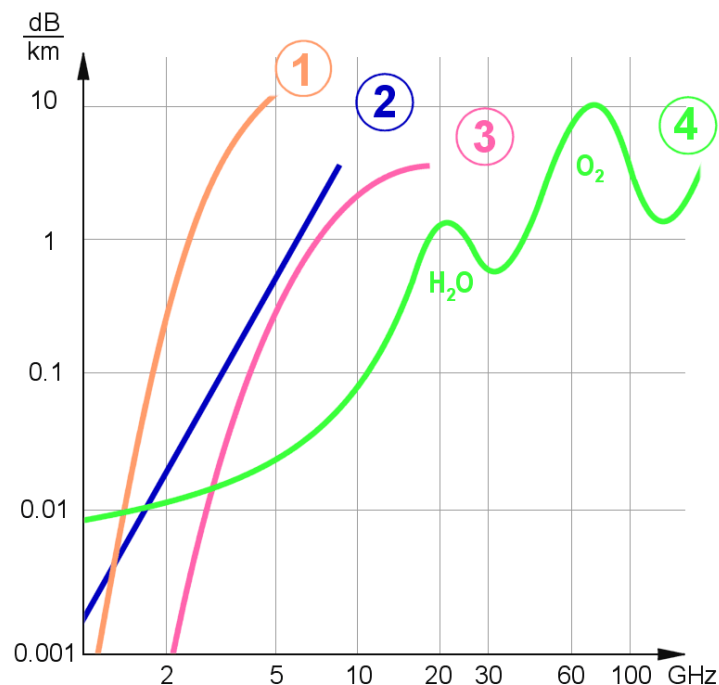
$$\lambda = c \cdot f \quad (8)$$

Vlnění se odráží od překážky větších rozměrů, než je jeho vlnová délka. Když však narazí na překážku menších rozměrů, nastává ohyb vlny. Tento ohyb je pak úměrný poměru λ – překážka.

Dlouhé vlny jsou tedy méně zatížené atmosférickým rozptylem a mohou tak pracovat na velmi dlouhé vzdálenosti. Radarová technika je však závislá na přesném určení směru vyslaného a následně přijatého impulsu. Případný ohyb vlny je tedy nežádoucí jev. Proto se zpravidla nepoužívají delší, než VKV kmitočty.

Oproti tomu kmitočty vyšší než 3 GHz jsou velmi zatížené atmosférickým rozptylem, viz graf 3.1. Vodní pára běžně obsažená v atmosféře (v grafu pod číslem 4) způsobí při kmitočtu 2 GHz úbytek energie vyslaného pulsu 0,01 dB na každý kilometr. Procentuálně je to cca 0,23% ztráta na kilometr. To se může zdát málo, avšak po 45 km je impuls slabší o 10 %. Ztrátovost je v grafu uvedena v dB/km a procentuálně stoupá s růstem kmitočtu logaritmickou řadou, jejíž tabulka je v přílohách. [5, 10]

Útlum radarové vlny mohou způsobit také meteorologické jevy, např. déšť nebo mlha. V grafu je znázorněn útlum v případě silného deště (1), mlhy (2), slabého deště (3) a vodní páry obsažené v atmosféře (4).



Graf 3.1 Atmosférický útlum radarové vlny [22]

4 Primární radary

4.1 Primární přehledový radar

Řízení letového provozu (ŘLP) má na starosti velké prostory o rozlohách stovek kilometrů čtverečních. Na udržení bezpečnosti leteckého provozu proto potřebuje univerzální radar, který dokáže zachytit vše, od malých letadel letících pár kilometrů v hodině, přes velké dopravní kolosy, až po moderní stíhací letouny operující v rychlostech několikanásobně převyšujících rychlost zvuku. To samozřejmě v co největší přesnosti a v reálném čase. Na přelomu tisíciletí se uvažovalo o možném ústupu primárních přehledových radarů a jejich nahrazení sekundárními, avšak po útocích z 11. září 2001 se opět ukázala důležitost primárních radarů pro ŘLP.

PSR nejčastěji pracuje v kmitočtovém pásmu S (2700 Mhz – 2900 Mhz) a vlnovou délkou cca 10 cm. Dalším parametrem je SVD. Pro co největší rozlišovací schopnost je snaha mít SVD co nejužší. Abychom mohli pracovat s těmito parametry radaru, je potřeba mít adekvátně velikou anténu. Z následujícího vzorce lze vyčíst, že šířka SVD je přímo úměrná délce vlny λ a nepřímo úměrná velikosti antény d . [8]

$$SVD = (56 \div 70)\lambda \cdot d^{-1} \quad (9)$$

Jedná se zde však spíše o teoretický vzorec, protože teoretické určení vlastností zrcadla antény se od praxe může značně lišit. Například RL-2000, primární radar používaný v Tuřanech, pracující na 4 různých kmitočtech, má při SVD 2,8° anténu širokou 5m [19]. To je prakticky dvojnásobek oproti teoretickému rozměru antény, který je uveden v tabulce 4.1. Stejně tak lze vypočítat, že teoreticky by při reálných rozměrech antény mohl být SVD cca dvakrát užší.

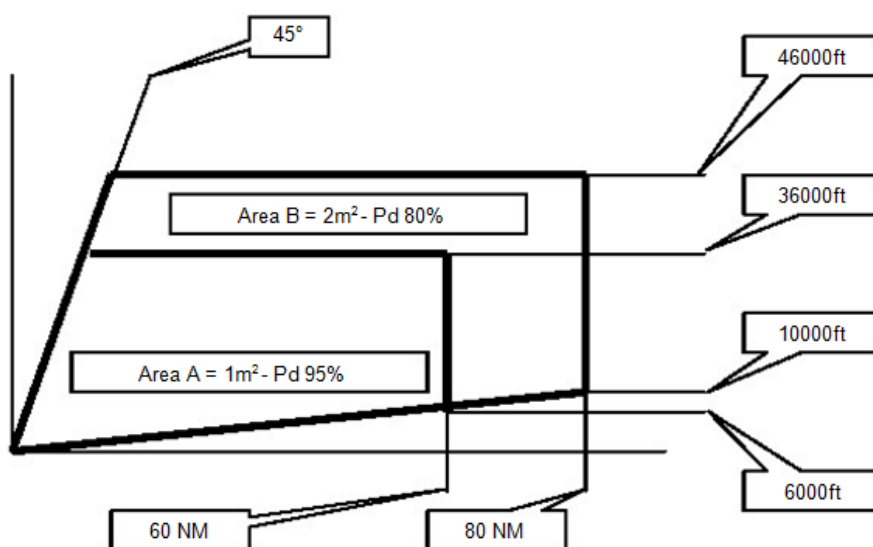
Tab. 4.1. Kmitočty radaru RL-2000 a přepočtem určené hodnoty λ , SVD a D

Kmitočet	Vlnová délka	Teoretický SVD při šířce antény 5m	Teoretický rozměr D antény při SVD 2,8°
2820,33 MHz	10,57 cm	1,18° ÷ 1,4°	2,11 m ÷ 2,64 m
2798,99 MHz	10,65 cm	1,19° ÷ 1,49°	2,13 m ÷ 2,66 m
2777,66 MHz	10,72 cm	1,20° ÷ 1,50°	2,14 m ÷ 2,68 m
2742,98 MHz	10,86 cm	1,21° ÷ 1,52°	2,17 m ÷ 2,71 m

Pro dosažení kýženého úzkého SVD, je potřeba mít kombinaci vysokého kmitočtu, velkých rozměrů antény a správném tvaru zrcadla antény.

Tuřanský PSR využívá hned 4 kmitočtová pásma, ve kterých vysílá své impulsy. Kvůli meteorologickým podmínkám se může stát, že konkrétní kmitočtové pásmo bude zatíženo poruchami. Při využití různých frekvencí se však pravděpodobnost rušení značně zmenšuje. [19]

Úzký SVD potřebují zejména pro přesné zaměření cílů v azimutu, v daném prostoru. Pro přesnost v dálce je pak nutné mít vysoké PRF.



Obr. 3.1. Požadavky na přesnost zaměření cílů pro PSR Brno a Ostrava [23]

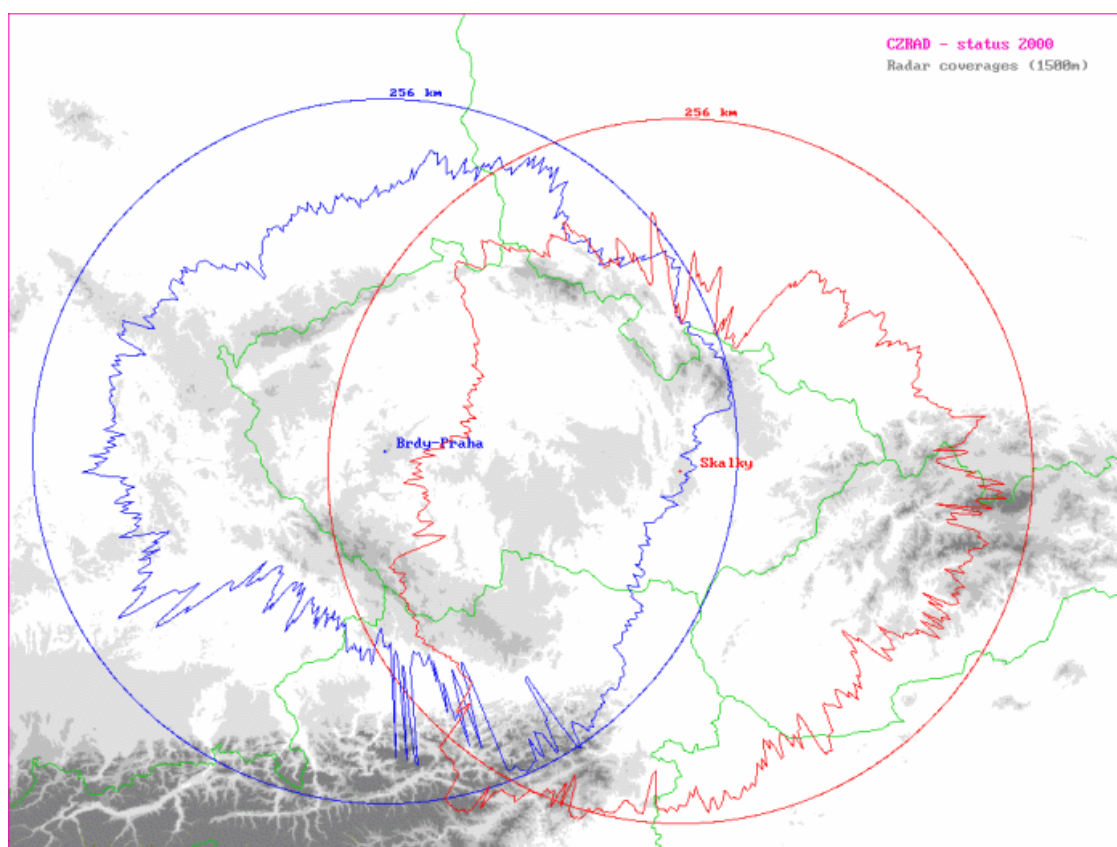
Na obrázku 3.1 lze najít požadavky na přesnost zaměření cílů pomocí PSR. Na obrázku je radar uvažován v levém spodním kraji. Silně značené čáry označují plochy A a B. V rámci plochy A je požadováno, aby v 95 % měření nepřekročila chyba v zaměření letadla o odrazné ploše 1 m² odchylku o 500 m při letu po trati, nebo 300 m při letu v koncové řízené oblasti. Plocha A je ohraničena výškou 36 000 stop, vzdáleností 60 NM a úhlovými výsečemi 2,8° a 45°. Plocha B je pak prodloužena oproti ploše A až do vzdálenosti 80 NM a výšky 46000 ft a chyba měření polohy letadla o odrazné ploše 2 m² v ní nesmí přesáhnout výše zmíněné limity přesnosti v 80 % měření.

4.2 Meteorologický radar

Se snímky z meteorologických radarů je možné se setkat prakticky každý den při televizní předpovědi počasí. Samotné sledování povětrnostní situace pomocí radaru sahá až k samotným počátkům radarové techniky. Zprvu byly odrazy radarových vln od bouřkové

oblačnosti vnímány jako nežádoucí jev, který je nutné eliminovat. Již v roce 1943 však byly některé přehledové radary, instalované v okolí Panamského kanálu, používány mimo jiné i k detekci meteorologické situace. Po druhé světové válce pak začaly vznikat první čistě meteorologické radary. [7]

V České republice momentálně fungují dva pozemní meteorologické radary - Brdy a Skalky. Pracují s kmitočty 5645 MHz a 5635 MHz, spadající do frekvenčního pásma C. To představuje kompromis mezi dostatečně malou vlnovou délkou pro zachycení dešťových kapek a mokrých krup a zároveň relativně velkým dosahem 250 km. [8, 9]



Obr. 4.2 Pokrytí území ČR meteorologickými radary [24]

Meteorologická měření se skládají z cca 10÷20 otáček antény v azimutu s proměnným výškovým úhlem (elevací). Tato objemová měření jsou opakována každých 5÷15 minut. [9]

4.2.1 Požadavky

Požadavky na pozemní meteorologický radar vychází z cílů, které mají sledovat. Bouřkové mraky se skládají z kapek vody, případně mokrých krup, a proto je nutné použít s nimi srovnatelnou vlnovou délku. Tou je v případě radarů používaných v ČR 5,3 cm. Díky umístění na zemi, které výrazněji nelimituje velikost zrcadla antény, se snadno dosáhne

úzkých svazků SVD. Kvůli vysokému kmitočtu je však pro dostatečný dosah radaru nutno použít velký impulsní výkon společně s vysokým ziskem antény.

4.3 Palubní meteorologický radar

Palubní meteorologický radar (**A**irborne **W**eather **R**adar - AWR) je využíván k celé řadě úkonů – od přehledu meteorologické situace v okolí letadla, přes mapování povrchu terénu, až po měření traťové rychlosti a úhlu snosu.

Z důvodu omezených možností velikosti antény na palubě radaru bylo nutné zvolit vyšší kmitočet, oproti pozemním meteorologickým radarům. AWR operuje s kmitočtem 9345 MHz ÷ 9405 MHz a řadí se tak do pásma X. Jeho vlnová délka $\pm 3,2$ cm odpovídá průměrné velikosti letící dešťové kapky. Primárním účelem je tedy detekovat velikost vodních kapek a mokrých krup, které jsou v oblačnosti průvodním jevem turbulence. Nedokáže však identifikovat turbulenci v bezoblačném prostředí a jen slabé odrazy získává u suchého sněhu.

Nutností AWR je možnost přenastavení šířky SVD, neboť musí plnit velmi různorodé úkony. Ten se dá měnit od tužkového tvaru s šířkou několika stupňů a velkým dosahem pro měření výšky mraků, až po kosekant SVD s šířkou desítek stupňů určený k detekci terénu.

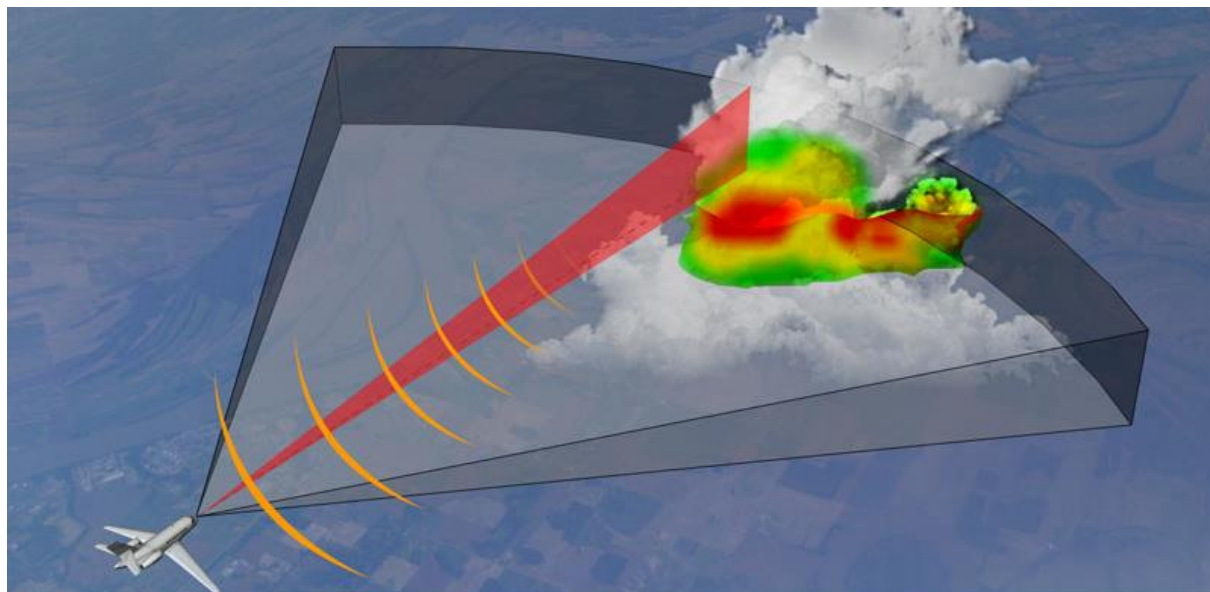
V tužkovém SVD je veškerá energie vyzářena ve svazku širokém $3^\circ - 5^\circ$. Šířka závisí na rozměrech antény, respektive letadla. Slouží pro detekci výšky oblačnosti. Ta se získá vertikálním vychylováním SVD. Měří se úhel vychýlení svazku od podélné osy letadla. Jakmile přestane radar dostávat odrazy od mraku, znamená to, že je nastaven přesně o polovinu SVD nad horní hranicí nebo naopak spodní základnou mraku.

Dále se tužkového svazku využívá pro zjišťování intenzity srážek uvnitř mraku. Jak je uvedeno v tabulce 4.3, intenzita srážek se na černé obrazovce radaru zobrazuje od zelené přes žlutou až po červenou. [7, 8]

Tab. 4.3 barevné označení intenzity srážek AWR [7]

Barva	Odrazy	Srážky
Černá	Velmi slabé nebo žádné	Méně než 0,7 mm/hod
Zelená	Slabé	(0,7 ÷ 4) mm/hod
Žlutá	Středně silné	(4 ÷ 12) mm/hod
Červená	Silné	Více než 12 mm/hod

Oblasti předpokládaných silných turbulencí jsou označovány barvou magenta. Největší turbulence se vyskytují v oblastech největšího gradientu intenzity srážek. V praxi se tedy piloti snaží vyhýbat místům, kde zelená velmi rychle přechází až k červené.



Obr. 4.2 Detekce vodních kapek [25]

Pro mapování terénu se využívá SVD ve tvaru kosekant. Kosekanta je reciproká hodnota sinusu daného úhlu, kterým je v našem případě úhel sklonu směru vyzařování od podélné osy letadla. Jelikož je energie radaru rozptýlená do značně širokého svazku, výrazně se sníží dosah radaru oproti použití tužkového SVD. Pro mapování povrchu ve vzdálenostech větších než 70 NM je tedy nutno použít tužkového svazku. Poté lze radar používat až do vzdálenosti 150 NM. [8]

4.4 Přesný přibližovací radar

Přesné přibližovací radary (**P**recision **A**pproach **R**adar - PAR) se využívají pro radarové navedení letadla až nad práh dráhy. Vzhledem k jejich vymezenému účelu mají specifické požadavky na konstrukci a vlastnosti. Jeho oblast působnosti je pouze v ose dráhy. V horizontální rovině je široká 20° a ve vertikální rovině 7° . PAR má požadovaný dosah alespoň 9 NM. Důležitá je zde šířka SVD – a se požaduje co možná nejmenší – pro maximální přesnost radaru.

PAR používají kmitočty $(9,3\div 10)$ GHz, které se nachází v kmitočtovém pásmu X. Jejich SVD jsou namířené v ose dráhy. Operátor PAR sleduje letadlo na obrazovce radaru a při vychýlení letadla ze sestupové osy dává pilotovi povely k návratu na osu. [4]

V civilním letectví se dnes místo PAR využívají zejména automatické systémy pro přesné přiblížení ILS a MLS. Přiblížení pomocí PAR se pak provádí pouze na vyžádání od velitele letadla.

4.5 Primární pojezdový radar

Letištní pojezdový radar (**S**urface **M**ovement **R**adar – SMR), využívá ŘLP pro přehled o pozemní situaci na letišti. Jeho hlavním úkolem je detekce pojíždějících letadel a vozidel.

Zejména za špatných meteorologických podmínek bylo ŘLP limitováno vizuálním dohledností, což byl u velkých letišť závažný problém. Díky SMR se však může řídící na obrazovce radaru ujistit, že pilot správně plní jeho pokyny a nehrozí tak kolizní situace.

Pro co možná nejmenší omezení zástavbou bývá SMR zpravidla umístován na střechu řídicí věže. Umístění ale často komplikuje samotná váha radaru, případně požadavky na údržbu.

Pro maximální přesnost se využívá velmi úzkého SVD, které je široké cca $0,25^\circ$. K dosažení těchto parametrů se volí kmitočet (15 ÷ 17) GHz a velmi krátké PRI. Tento kmitočet, spadající do pásma Ku, je pro velmi krátkou vlnovou délku výrazně ovlivňován meteorologickými podmínkami. Dosah SMR se tak při silném dešti markantně snižuje. [3]

5 Sekundární radary

Radar vznikl jako výsledek válečného úsilí lokalizovat nepřítele ještě dříve, než vůbec přiletí. K tomuto účelu – detekovat nespolupracující cíle – vznikla původní radarová technologie, dnes nazývaná primární radary. Stejně jako bylo potřeba znát polohu nepřítele, začalo být časem důležité znát polohu vlastních letounů. Když se „přátelský“ letoun vybaví odpovídačem, může pak místo slabého echa vysílat vlastní silný signál. V tomto signálu pak mohou být obsaženy důležité informace o stavu a záměrech letadla.

Základem činnosti SR je tedy spolupráce dotazovač - odpovídač. Signály SR jsou pouze jednosměrné. To znamená, že dotazovač vyšle na určitém kmitočtu signál dotazu, odpovídač signál přijme a s přesně určeným zpožděním vyšle odpověď na jiném kmitočtu. Kmitočty sekundárního radaru jsou však konstantní. Výhodou různých kmitočtů dotazovače a odpovídače je absence falešných cílů způsobených odrazy od různých vodivých překážek, které se mohou vyskytnout v jeho SVD. Přijímač dotazovače není uzpůsoben k přijímání signálu „dotaz“, nýbrž k přijímání signálu „odpověď“. Obráceně to samozřejmě platí i pro odpovídač.

Do civilního letectví se pak přenesly 2 základní formy SR. Sekundární přehledový radar (Secondary Surveillance Radar - SSR) využívá ŘLP pro přehled o situaci v jejich vzdušném prostoru. Palubní dálkoměrné zařízení (Distance Measuring Equipment – DME) pak měří šikmou vzdálenost mezi letadlem a odpovídačem na zemi. [8]

5.1 Sekundární přehledové radary

Jsou důležitým nástrojem pro ŘLP, protože na rozdíl od PSR přináší kromě informace o poloze také další důležité informace jako je volací znak, letová hladina, plánovaný cíl letadla nebo jeho traťovou rychlost. Oproti PSR je však jeho zaměření polohy méně přesné, a tak se v praxi využívá kombinace PSR a SSR, kdy jsou na obrazovce radarového řídicího informace z obou těchto zařízení.

5.1.1 Odpovídač SSR

Aby se informace o letadle objevila na obrazovce sekundárního radaru na stanovišti řízení letového provozu, musí být letadlo vybaveno odpovídačem. Na obrázku 6.1 je příklad panelu odpovídače módů A/C.



Obr. 6.1. Civilní odpovídač SSR [26]

- OFF, odpovídač je vypnut
- SBY (Stand BY), obvody odpovídače jsou zahřáté, ale odpovídač nevysílá
- ON, odpovídač vysílá v módu A
- ALT (ALternate), odpovídač vysílá střídavě v módech A a C
- TST, slouží ke kontrole správné funkce odpovídače

Dále se zde nachází tlačítko IDENT. Jeho použití si může vyžádat ŘLP a po jehož zmáčknutí se na několik sekund zvýrazní dané letadlo na radarové obrazovce.

Vpravo se nachází čtyřmístný identifikační kód (SQUAWK), na kterém lze v každém okně nastavit číslice 0 až 7. Dohromady lze tedy nastavit 4 096 kombinací. Identifikační kód dostane letadlo přidělen od ŘLP, přičemž každá letová informační oblast má omezený počet určených kódů, které může přidělovat. Pilot může změnit kód odpovídače pouze na pokyn ŘLP. Jediná možnost samostatného přepnutí je při použití jednoho ze speciálních kódů:

- 2000, VFR řízený let (pro ČR)
- 7000, VFR neřízený let (pro ČR)
- 7500, protiprávní čin na palubě (např. únos)
- 7600, ztráta rádiového spojení
- 7700, stav tísně

Je přitom nepřípustné, aby ve stejném čase měla dvě letadla stejný kód, kromě speciálních kódů, které může mít nastaveno více letadel najednou. [8]

Aby omylem nedošlo k nastavení speciálního kódu, případně dvou letadel se stejným kódem, je nutné dodržet správný postup změny kódu. První se přepne funkce odpovídače na SBY, poté se změní kód a až po změně kódu se opět nastaví ALT.

5.1.2 Módy odpovídačů SSR

Vlastní kapitolou jsou pak módy odpovídačů. Liší se zejména velikostí PRF a určují, které informace budou přeneseny v signálu odpovědi. V civilním letectví se používá módů A a C, přičemž mód A je sdílený také s armádou. Ta jej vede pod označením 3. [8, 16]

Tab. 6.2. Módy odpovídačů SSR

Mód		PRI	Přenesené informace
Vojenský	Civilní		
1		3+0,2 μ s	Výběr z 32 kódů pro indikaci role, mise nebo typu letadla
2		5+0,2 μ s	Přenáší identifikační kód letadla, běžně nastavován jako číslo draku letadla
3	A	8+0,2 μ s	Přenáší identifikační kód civilních i vojenských letadel
	B	17+0,2 μ s	Nepoužívá se
	C	21+0,2 μ s	Indikace tlakové výšky letadla
	D	25+0,2 μ s	Vyčleněno pro další vývoj SSR

5.2 Poruchy sekundárních radarů

5.2.1 Nesynchronní rušení

Všechny SSR po celém světě operují pouze na kmitočtech 1030 MHz a 1090 MHz. To způsobuje řadu problémů a poruch. Jednou z nich je tzv. nesynchronní porucha (**F**alse **R**eplies **U**n-synchronised **I**n **T**ime – FRUIT), kdy odpovídač reaguje na dotazy více SSR. Tento problém nastává zejména v lokalitách s velkou koncentrací letišť vybavených SSR. Přijímání odpovědí určených pro jiný SSR může na obrazovce radaru vytvořit obraz letadla, které vůbec neexistuje nebo dokonce zahltit radar řadou takových odrazů.

FRUIT se odstraňuje zvláštními detekčními obvody, které využívají různých rytmů jednotlivých SSR. Anténa radaru se otáčí relativně pomalu, a tak odpovídač během jednoho cyklu stihne vyslat 10 ÷ 30 odpovědí. Detekční obvody pak určí, které odpovědi jsou v rytmu jeho dotazů. [8, 12]

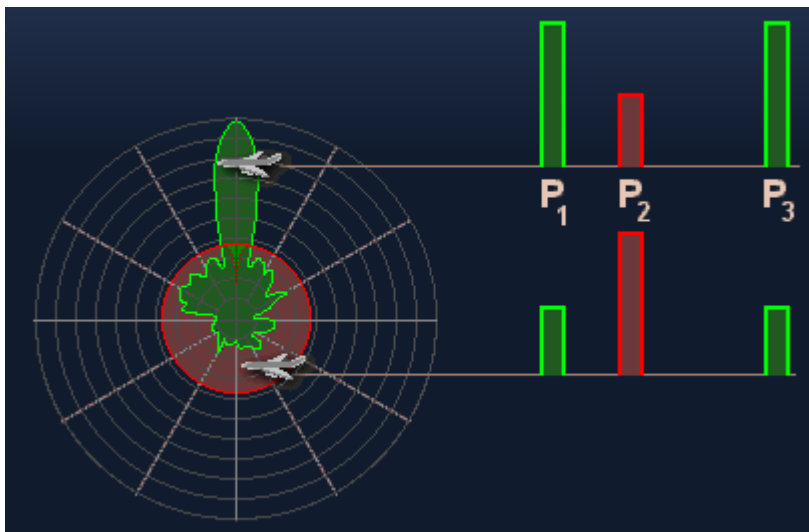
5.2.2 Synchronní rušení

Synchronní rušení (angl. Garbling) je další z poruch SSR. I tady hraje významnou roli velká koncentrace letecké dopravy. Konkrétně synchronní rušení vzniká u letadel vzdálených 1,7 NM a méně, což je v koncových řízených oblastech (TMA) naprosto běžné. Odpovědi se pak navzájem překrývají. To, co by se u PSR dalo označit jako nepříjemnost, neboť se dvě letadla zobrazí jako jeden cíl, je u SSR velký problém. Překrytím dvou odpovědí dojde k jejich zkomolení dohromady, kdy jsou pak obě zprávy nečitelné.[13]

5.2.3 Nadbytečné odpovědi

U nadbytečných odpovědí (angl. Ghosting) je problém ve vyzařování tzv. postranních svazků, směřujících mimo hlavní SVD. Tyto svazky nemají velký dosah, avšak při průletu letadla některým z nich se na radaru vytvoří falešný obraz letadla, který má sice správnou vzdálenost od radaru, avšak ve směru hlavního svazku.

Aby se zabránilo nadbytečným odpovědím, vysílá se kromě směrových signálů P_1 a P_3 také všesměrový signál P_2 . Pokud signály P_1 a P_3 nejsou alespoň o 9 dB silnější než P_2 , radar je ignoruje.[14]



Obr. 6.3 Eliminace postranních svazků [27]

5.3 Odpovědač módu S

Jak je již zmíněno výše, SSR má řadu problémů a poruch. Většina z nich pramení z toho, že byly sekundární radary vyvinuty v době relativně malé hustoty letecké dopravy. Od té doby se však civilní letectví velmi rozvinulo a původní koncept sekundárního radaru s módy A a C již nestačí. Největším problémem je pouhých 4 096 kombinací nastavitelných kódů, které se, až

na výše uvedené výjimky, nesmí přidělit více letadlům současně. Obzvláště na vytížených letištích se tento nedostatečný počet kódů začal projevovat.

Z těchto důvodů se začalo pracovat na novém konceptu SSR, a tak vznikl mód S (Selective). Počet impulsů byl oproti A/C zvýšen z 12 na 24, takže se počet kombinací zvýšil ze 4 096 na cca 16 milionů. To umožňuje zvolit určitý kód při instalaci odpovídače do letadla a pilot již nic nastavovat nemusí. S větším množstvím přenesených informací je také možné uvádět atmosférickou výšku letadla s odchylkou ± 25 ft místo ± 100 ft. [8]

5.4 Palubní dálkoměrné zařízení

Palubní dálkoměrné zařízení (Distance measure equipment – DME) je druh Sekundárního radaru měřící šikmou vzdálenost mezi letadlem a zařízením na zemi. Oproti SSR se v DME dotazovač nachází v letadle, odkud vysílá signály „dotazu“ a odpovídač na zemi, kde po umělém zdržení 50 μ s vyšle signál „odpovědi“.

Jelikož je DME druh sekundárního radaru, má také rozdílný kmitočet dotazu a odpovědi. Rozdíl činí ± 63 MHz. DME pracuje v kmitočtech (960-1215) MHz. Toto kmitočtové pásmo je rozděleno na 256 kanálů.

Princip měření vzdálenosti je již popsán v kapitole 2. DME měří tzv. šikmou vzdálenost pozemního odpovídače od letadla. Tím se rozumí nejkratší vzdálenost mezi letadlem a pozemním zařízením. Jeho hodnotu lze vyjádřit Pythagorovou větou, kdy šikmá vzdálenost je přepona a pozemní vzdálenost a výška letou jsou odvěsny. Rozdíl šikmé a pozemní vzdálenosti se stává s rostoucí vzdáleností zanedbatelný, avšak při letu v hladině relativně blízko pozemního zařízení DME je nutné provést přepočty. [8]

5.4.1 Rozlišení vlastních a cizích odpovědí

Zatímco pilot dokáže rozlišit jednotlivá pozemní zařízení pomocí kmitočtu, který si naladí, a identifikačních kódů které slyší ve sluchátkách, pozemní zařízení signály dotazů nijak nerozlišuje a vysílá „odpovědi“ všesměrově. To může na letadlovém přijímači odpovědi způsobit Fruiting, popsáný v kapitole 5.2.1.

Aby letadlo dokázalo rozpoznat „odpověď“ určenou pro něj od těch ostatních, vysílá každé letadlo své „dotazy“ v různém rytmu. Přijaté odpovědi pak statisticky vyhodnotí a odpovědi neodpovídající danému rytmu vyřadí. Pro statistické určení vlastních odpovědí je potřeba přijmout alespoň 50 % odpovědí pozemního zařízení DME. [8]

6 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření studijní příručky pro další ročníky studentů v oboru profesionální pilot. Snažil jsem se proto koncipovat tuto práci co možná nejpřehledněji. Pro úplné shrnutí ještě v závěru uvádím tabulku 6. Obsahuje stručný přehled kmitočtů radarových zařízení popsaných v této práci.

Tab. 6 Přehled kmitočtových pásem radarové techniky

Radar	Kmitočet	Kmitočtové pásmo
DME	960 ÷ 1215 MHz	UKV-L
SSR	1030 ÷ 1090 MHz	L
PSR	2700 ÷ 2900 MHz	S
Meteorologický radar	5645 MHz	C
AWR	9345 MHz	X
PAR	9300 ÷ 10000 MHz	X

Není bez zajímavosti, že sekundární radary pracují na spodním okraji kmitočtových pásem vhodných pro radarovou techniku. Je to dáno zejména důrazem na množství přenesených údajů na úkor přesnosti zaměření.

Na opačné straně pak stojí AWR a PAR, které využívají super krátké vlny, které sice limitují jejich dosah, avšak zajišťují mimořádně přesné zaměření. Využití vyšších kmitočtů je pak již pro letectví limitované absorpcí takto krátkých vln v atmosféře. Nicméně pro neletecké druhy radarů mohou mít extrémně krátké vlny své využití.

Pro letecký provoz jsou momentálně prioritní přehledové radary. Kombinace primárního a sekundárního přehledového radaru je v současné době stavebním kamenem celé obchodní dopravy. I zde však, dle mého názoru, budou postupně nastávat změny. Díky rozšíření přenosu přes data-link bude většina informací probíhat právě touto cestou. Piloti pak budou dostávat pouze souhrny, aby nedošlo k jejich zahlcení informacemi.

Mód S v SSR bude postupně zaveden na všechny řízené letiště. Je však otázkou, zda bude v neustále rostoucím počtu letadel stačit „pouhých“ 16 milionů kódů. Myslím si, že jeho nástupce vznikne do konce příští dekády.

Radarová technika má nyní sice dominantní roli, avšak je jen otázkou času, kdy ICAO schválí globální družicový polohový systém jako primární navigační prostředek. PSR pak

budou již jen záložním systémem, stejně jako byl PAR nahrazen systémy ILS a MLS. SSR pak bude nahrazen data-linkem, neboť družicový systém určování polohy je již v současnosti mnohem přesnější, než přehledové radary.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AWR	Airborne weather radar	Palubní meteorologický radar
c	Speed of light	Rychlost světla
dB	decibel	decibel
DME	Distance measure equipment	Palubní dálkoměrné zařízení
EKV/EHF	Extremely high frequency	Extremně krátké vlny
ft	Feet	Stopy
Hz	hertz	hertz
ICAO	International civil aviation organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ILS	Instrument landing system	Systém řízení přesného přiblížení na přistání
ITU	International telecommunication union	Mezinárodní komunikační unie
m	meter	metr
MLS	Microwave landing systém	Mikrovlnný systém řízení přesného přiblížení na přistání
NM	Nautical miles	Námořní míle
PAR	Precision approach radar	Přesný přibližovací radar
PR	Primary radar	Primární radar
PRF	Pulse repetition frequency	Opakovací kmitočet pulsů
PRI	Pulse repetition interval	Opakovací perioda pulsů
PSR	Primary surveillance radar	Primární přehledový radar
PSS	Passive surveillance systém	Pasivní sledovací systém
ŘLP	Air traffic control	Řízení letového provozu
SMR	Surface movement radar	Pojezdový radar
SKV/SHF	Super high frequency	Super krátké vlny
SR	Secondary radar	Sekundární radar
SSR	Secondary surveillance radar	Sekundární přehledový radar
SVD		Směrový vyzařovací diagram
TMA	Terminal maneuvering area	Koncová řízená oblast
UKV/UHF	Ultra high frequency	Ultra krátké vlny
VKV/VHF	Very high frequency	Velmi krátké vlny
W	watt	watt

Seznam použitých zdrojů

Seznam použité literatury

- [1] BRINGI, V. N. a V. CHANDRASEKAR Doppler radar signal theory and spectral estimation. *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, s. 211-293. ISBN 9780511541094.
- [2] DANIELS, David J. Applications and Technology. *EM Detection of Concealed Targets*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2009, 288 s. ISBN 9780470121696.
- [3] MIČKAL, O. *Optimalizace prostředků ZLT na letišti Ostrava (náhrada pojezdového radaru)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 67s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc..
- [4] MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *L10/I: RADIONAVIGAČNÍ PROSTŘEDKY*. 2015.
- [5] KOLAWOLE, Michael O. *Radar systems, peak detection and tracking*. Boston: Newnes, 2002, xxv, 363 s. ISBN 0750657731.
- [6] JENROSE, Harold Ernest a Reginald Sidney Henry BOULDING. *Principles and practice of radar*. D. Van Nostrand, 1950.
- [7] SCHEER, William L. Melvin & James A. *Principles of Modern Radar Volume 3: Radar Applications*. Edison, NJ: SciTech Publishing Inc, 2013. ISBN 9781613530320.
- [8] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00 00 00): učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 244 s. ISBN 978-80-7204-764-2.

Seznam internetových zdrojů

- [9] Český hydrometeorologický ústav. *Radarová síť CZRAD: Pokrytí území ČR radary ČHMÚ* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/
- [10] WOLF, Christian. *Radar Basics: Absorption* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa13.en.html>
- [11] WOLF, Christian. *Radar Basics: Distance-determination* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Distance-determination.en.html>
- [12] WOLF, Christian. *Radar Basics: Fruit* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr14.en.html>
- [13] WOLF, Christian. *Radar Basics: Garbling/Degarbling* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr15.en.html>

[14] WOLF, Christian. *Radar Basics: Interrogation Path Side Lobe Suppression (ISLS)*[online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr10.en.html>

[15] WOLF, Christian. *Radar Basics: Minimal Measuring Range* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Minimal%20Measuring%20Range.en.html>

[16] WOLF, Christian. *Radar Basics: Uplink – Formats* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr06.en.html>

[17] WOLF, Christian. *Radar Basics: Propagation of Electromagnetic Waves* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa17.en.html>

[18] WOLF, Christian. *Radar Basics: Waves and Frequency Ranges* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html>

Jiné zdroje

[19] HERZAN, Jakub. *Info o radaru* [online]. 17. dubna 2015 23:10; [cit. 2015-5-21].
Osobní komunikace.

Seznam použitých obrázků

- [20] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Minimal Measuring Range* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Minimal%20Measuring%20Range.en.html>
- [21] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Propagation of Electromagnetic Waves* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa17.en.html>
- [22] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Absorption* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa13.en.html>
- [23] BRÁT, Martin. *Protivzdušná obrana v podmínkách single european sky (SAS): Implementace Single European Sky* [Prezentace]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://katalog.unob.cz/konferencepvo/data/uploads/2013/prezentace/13Brat.pdf>
- [24] Český hydrometeorologický ústav. *Radarová síť CZRAD: Pokrytí území ČR radary ČHMÚ* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/
- [25] FlightSafety International. [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.flightsafety.com/elearning/fs_el_assets/courses/weatherradar/img2.jpg
- [26] BendixKing. [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.bendixking.com/HWL/media/2013/ProductImages/p-KT76A-detail-470x290.png>
- [27] WOLF, Christian. *Radar Basics: Interrogation Path Side Lobe Suppression (ISLS)*

PŘÍLOHY

Příloha 1

Tabulka rozdělení kmitočtů podle ITU se zvýrazněním blíže rozvedených kmitočtových pásem

Symbol	Kmitočet	Vlnová délka
UDV	300-3000 Hz	1000-100 km
VDV	3-30 kHz	100-10 km
DV	30-300 kHz	10-1 km
SV	300-3000 kHz	1000-100 m
KV	3-30 MHz	100-10 m
VKV	30-300 MHz	10-1 m
UKV	300-3000 MHz	100-10 cm
SKV	3-30 GHz	10-1 cm
EKV	30-300 GHz	10-1 mm

Příloha 2

Tabulka závislosti útlumu v decibelech a v procentech

dB/km	%/km
0,001	0,02
0,01	0,23
0,1	2,2
0,2	5
0,4	9
0,8	17
1,0	20
1,6	31
3,2	52
6,4	77
10,0	90