



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Jakub Ptáček

**PRINCIPY A POUŽITÍ PALUBNÍCH
METEOROLOGICKÝCH RADARŮ**

Bakalářská práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Jakub Ptáček

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Principy a použití palubních meteorologických radarů**

Název tématu (anglicky): Principles and Operation of Airborne Weather Radar

Zásady pro vypracování

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

- Princip palubního radaru
- Vývoj palubního radaru
- Použití palubního radaru
- Události související s funkcí a použitím palubních radarů



- Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Navigation 2: Radio Navigation; Oxford Aviation Academy
Radar Handbook; Merrill I. Skolnik
Airborne Weather Radar Interpretation; Ian Gilbert

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viktor Valenta**
Mgr. Iveta Kameníková

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajících ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **27. srpna 2018**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jakub Ptáček
jméno a podpis studenta

V Praze dne 20. října 2017

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady a rady pro vypracování této práce. Zejména panu Ing. Michalovi Šťastnému, Ing. Janu Klazarovi a dalším členům týmu DSA a.s., za umožnění a pomoc během praktického měření. Dále bych chtěl poděkovat vedoucím, Ing. Viktoru Valentovi a Mgr. Ivetě Kameníkové, za odborné vedení.

V neposlední řadě děkuji své rodině za značnou podporu a pochopení během celého studia.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vykonal samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona š. 121/2000 Sb. O právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. srpna 2018



Podpis

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Principy a použití palubních meteorologických radarů

Bakalářská práce

Jakub Ptáček

2018

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce, „Principy a použití palubních meteorologických radarů“, je vytvořit podklady pro studium začínajících pilotů a seznámit je se základními principy meteorologického radaru a jeho funkcemi. Názorně je vysvětleno mapování terénu pomocí AWR, které proběhlo ze stojánky na letišti v Hradci Králové. Byl proveden také zkušební let, během něhož byla sledována konvektivní oblačnost. Práce popisuje s pomocí fotografií manipulaci se ziskem a sklonem antény a interpretaci některých funkcí systému Garmin GWX68. Snímky byly pořízeny z letounu Cessna Caravan právě pro účely této práce. Obsah této práce by měl sloužit jako praktický průvodce ATPL učebnice a pomoci svým názornějším pojetím k pochopení této problematiky.

Abstract

The aim of this bachelor thesis, „Principles and operation of airborne weather radar“, is to provide student pilots with a training guide and to familiarize them with basic principles of meteorological radar and its functions. This thesis demonstrates terrain mapping using AWR, which was carried out from the apron of Hradec Králové. A test-flight was done in purpose of scanning convective weather. This thesis describes adjustments of gain and antenna tilt and interpretation of selected functions of Garmin GWX68. The description is accompanied by photographs. The images were taken from Cessna Caravan exclusively for use in this thesis. The content of this thesis is meant to be a supplement to ATPL textbooks. Its straightforward approach can provide better explanation of this matter.

Klíčová slova

Palubní meteorologický radar, princip radaru, vývoj meteorologického radaru, implementace palubního meteorologického radaru, Garmin GWX68, letecké incidenty, letecké nehody

Key words

Airborne weather radar, principles of radar, evolution of weather radar, implementation of airborne weather radar, Garmin GWX68, aviation incidents, aviation accidents

Obsah

Seznam použitých zkratk a termínů	5
1 Úvod	7
2 Úvod do radionavigačních a radarových zařízení	8
2.1 Rádiová vlna	8
2.2. Šíření rádiových vln	11
2.3. Antény	11
2.4. Dopplerův jev	12
3 Meteorologický radar	13
3.1. Zavádění meteorologického radaru	13
3.2. Palubní meteorologický radar	14
3.2.1 Konstrukce AWR	15
3.2.2 Ovládací prvky AWR	17
3.2.3 Chyby v zobrazení AWR způsobené vnějšími faktory	19
3.2.4 Vliv nesprávné manipulace s AWR, či jeho chybné indikace na letecké nehody ..	20
4 Praktická část	23
4.1. Vybavení	23
4.1.1. Parametry a funkce radaru	24
4.1.2. Ovládání radaru GWX 68	26
4.2. Praktická úloha č.1 – identifikace terénních překážek pomocí AWR	27
4.3. Praktická úloha č.2 – snímání srážek s různým nastavením AWR a vertikální řezy srážkami	40
5 Závěr	47
Použitá literatura	48
Seznam obrázků	49

Seznam použitých zkratk a termínů

AWR – Airborne Weather Radar – Palubní Meteorologický Radar

BEARING – Směrník

BRG – Bearing – směrník

CAT – Clear Air Turbulence – Turbulence v ovzduší bez oblačnosti (jinak také tzv. "turbulence v čistém")

FD – Flight Director – indikace promítaná na hlavní letový displej, říkající pilotovi, jak má naklonit letoun, aby letěl podle kýžené trajektorie

FDR – Flight Data Recorder – zařízení sbírající letové údaje pro případ potřeby pozdějšího vyhodnocování

FL – Flight Level – letová hladina, označení výšky při letu nad převodní výškou/převodní hladinou

FMS – Flight Management System – kritická součást avioniky moderních letounů, která snižuje zátěž posádky tím, že automatizuje několik činností, které dříve zastávali lidé

ft – feet – stopa (0,3048 m)

GAIN – Zisk antény

GND – Ground – země/terén, použito ve spojení GND MAP – mapování terénu

GPS – Global Positioning System – globální polohový systém je polohový systém americké armády založený na družicích

MAP – viz. GND

MFD – Multi-Function Display – multifunkční displej na palubní desce letadel sloužící například k zobrazení navigačních informací nebo výnosu z radaru

ND – Navigation Display – navigační displej letounu zobrazující informace o trati

NM – Nautical Mile – námořní míle (1,852 km)

PFD – Primary Flight Display – hlavní letový displej letadla zobrazující např. informace o rychlosti, výšce a náklonu

POH – Pilot Operating Handbook – letová příručka

QTE – Q-kód určený pro označení pravého zeměpisného směrníku od zařízení/místa

SIDESTICK – Ovládací prvek letadel Airbus

TILT – Sklon antény radaru

TURB – Zkratka pro režim radaru schopný zachytit turbulenci

VOR – Very High Frequency Omnidirectional Radio Range – všesměrový radiomaják používaný pro radionavigaci

1 Úvod

S vývojem letectví se lidé vydávali na delší trasy a piloti se odvážili startovat i do horších povětrnostních podmínek. V mnohých z těchto letů se potkali s meteorologickými vlivy, které do té doby nikdo v letadle nezažil a nevěděl, jak jim čelit ani jaké mohou mít setkání s nimi následky. Tyto okolnosti si žádaly vývoj systému, který by pomohl leteckému personálu s detekcí nepříznivých meteorologických jevů, jejich analýzou a se zavedením účinných protiopatření. Jedním ze systémů, které umožňují získání těchto dat, je radar.

Dnes se s radarem lze setkat nejen na zemi, ale také na palubě letounů. To, co bylo dříve umožněno jen velkým dopravním strojům, je dnes dostupné i pro letouny všeobecného letectví. Nejen rozměry, ale také rozlišovací schopnosti a jejich následné zobrazení na obrazovce radaru prošly od dob druhé světové války převratným vývojem. Je-li posádka řádně seznámena s obsluhou těchto systémů, tak může účinně předvídat a plánovat trasu svého letu vzhledem k počasí v reálném čase. Tato možnost výrazně přispívá ke zvýšení bezpečnosti letu, optimalizace trati a tím pádem i k zefektivnění letecké dopravy. Podmínkou však je, že potenciálně nebezpečné počasí musí obsahovat určitou vlhkost, přesněji kapky vody. Díky této podmínce nedokáže palubní meteorologický radar zachytit například CAT.

V této práci bych se rád zaměřil mimo jiné také na jeho zavedení v letounech všeobecného letectví a na způsob obsluhy palubního radaru v těchto strojích. Za tímto účelem jsou v první části práce popsány obecné principy fungování AWR a radaru obecně. Druhá část práce se pomocí dvou měření věnuje praktickému použití AWR. První měření bylo provedeno na zemi za účelem snímání terénu pomocí meteorologického radaru. Druhé měření bylo provedeno již za letu s úmyslem popsat a názorně předvést snímání konvektivní oblačnosti a některé funkce, které nabízí systém Garmin GWX68. Výsledkem práce by mělo být přehledné pojednání o fungování a využití palubního meteorologického radaru doplněné o poznatky z praxe. Věřím, že svým názornějším přístupem k této problematice bude možné práci využít jako doplňující studijní materiál k ATPL učebnicím.

2 Úvod do radionavigačních a radarových zařízení

2.1 Rádiová vlna

Rádiová vlna je jedním ze základních pilířů moderního letectví. S narůstající složitostí letadel bylo potřeba vyvinout navigační systémy, které by umožňovaly let bez vizuální reference. První systémy tohoto druhu byly podle dnešního měřítka velice primitivní. Poskytovaly sice celkem obstojnou přesnost pro vedení na traťovém letu nad pevninou, ale pouze velmi omezené informace pro let nad oceány. V těchto oblastech se ještě v 60. letech pro zjištění polohy užívalo základní navigace pomocí Slunce, Měsíce a hvězd. Dnešní systém GPS je také založen na zaměřování vesmírných objektů, tentokrát se ale jedná o umělé družice, satelity. (Oxford 2008, s. 3)

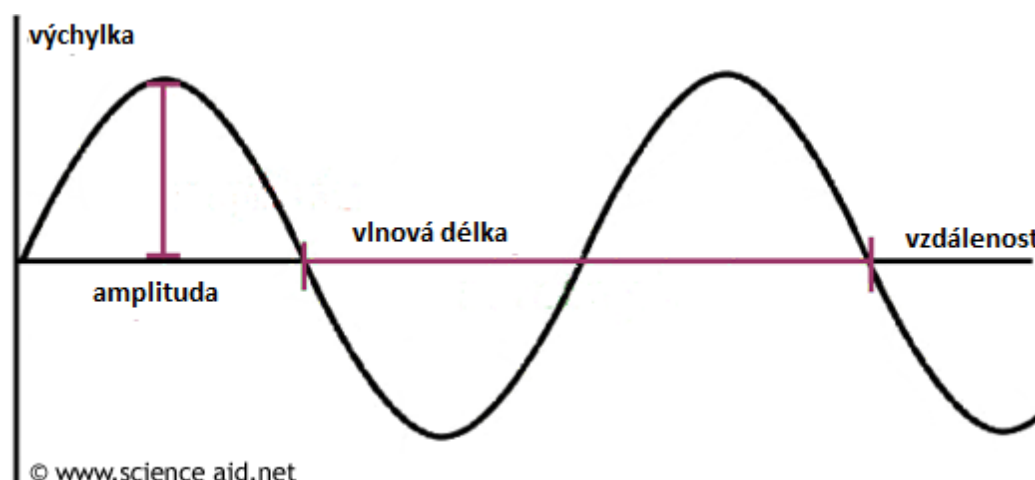
Rádiová vlna se šíří rychlostí světla $c = 300\,000\text{ m/s}$ ($162\,000\text{ NM/s}$). Určuje se u ní několik parametrů: perioda, frekvence, vlnová délka, modulace a polarizace. Perioda rádiové vlny udává dobu, za kterou proběhne jeden cyklus vlny. Nejčastěji se značí řeckým písmenem tau (τ) a měří se v mikrosekundách (μs). Z periody pramení i další parametr rádiové vlny a tím je frekvence (f). Vztah pro výpočet frekvence rádiové vlny je

$$f = \frac{1}{\tau}.$$

Frekvence se udává v hertzech (Hz), kdy 1 Hz odpovídá 1 cyklu za sekundu. U radarů se frekvence nejčastěji pohybuje kolem řádu 10^6 (MHz) a 10^9 (GHz). Dalším z parametrů je vlnová délka (λ). Vzorec pro výpočet vlnové délky zní

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

(Oxford 2008, s. 5-7)



Obrázek 1 Grafické znázornění vlnové délky a periody (<https://scienceaid.net/images/c/c8/wave.png>)

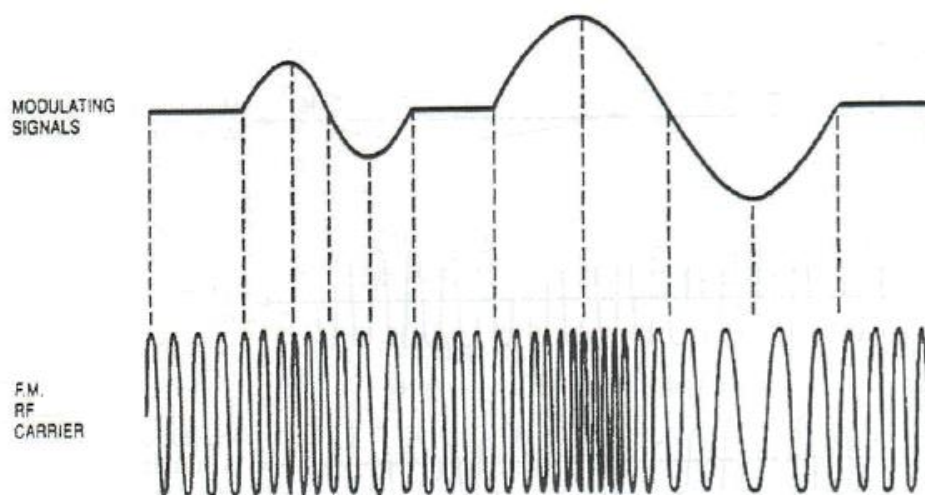
Tabulka 1 Přehled frekvencí používaných v civilním letectví (Oxford 2008, s. 8)

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

Modulací se nazývá proces vkládání informací do radiových vln. Ovlivňuje se tvar nosné vlny. Modulace vlny může být analogová, nebo digitální. Mezi analogové patří amplitudové, frekvenční a fázové. Digitální modulace jsou ASK – „amplitude-shift keying“, což odpovídá AM, FSK – „frequency-shift keying“, odpovídající FM a PSK – „phase-shift keying“, což je modulace fázová.

U amplitudové modulace (AM) dochází ke změně amplitudy signálu. Frekvence a fáze nosné vlny zůstává bez změny. U této modulace vznikají dvě postranní pásma, z nichž obě nesou stejnou informaci. Značí se „upper side band“ (USB) a „lower side band“ (LSB). USB se označuje také jako součtové postranní pásmo ($f_c + f_s$), kde f_c je označení nosné vlny a f_s je modulovaný signál. LSB je naopak pásmo rozdílové ($f_c - f_s$). Rozteč postranních frekvencí nazýváme šířkou pásma. Vzhledem k tomu, že obě postranní pásma nesou stejnou informaci, můžeme jedno z nich potlačit. To přináší dvě hlavní výhody. První výhodou je potřeba menší energie na vysílání a druhou je efektivnější využití frekvenčního pásma, protože signál bude zabírat menší část frekvenčního spektra. S potlačením jednoho postranního pásma se lze setkat u HF komunikace (komunikace na dlouhých vlnách). (Jeppesen 2004, s. 1/19)

Frekvenční modulace má za následek změnu frekvence signálu. Princip je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 2 Znárodnění průběhu frekvenční modulace (Jeppesen, 2004 str. 1/20)

V horní části obrázku lze vidět průběh modulačního signálu. Změna signálu v kladném smyslu (nahoru) má za následek zhuštění frekvence výsledné vlny, jak je znázorněno ve spodní části obrázku. Vychýlení modulačního signálu v opačném směru má za následek snížení frekvence. Vysílání s frekvenční modulací je sice čisté a bez šumu, ale zabírá mnohem větší část frekvenčního pásma než vysílání s modulací amplitudovou. Tato podstatná nevýhoda má za následek pouze omezené využití v letectví. Používá se například v radiových výškoměrech, Dopplerově radaru ve VOR majácích. (Jeppesen 2004, s. 1/20)

Fázová modulace, jak název napovídá mění fázi nosné vlny. Existují dva případy fázové modulace. První případ je, když modulační signál je analogový a fáze nosné vlny je ovlivněna amplitudou signálu. Druhý případ nastává, když je signál modulující nosnou vlnu digitální. V tomto případě používáme označení PSK – „phase shift keying“. Změna fáze u PSK reflektuje přijetí 0, nebo 1. Jako jednoduchý příklad si můžeme uvést, že 0 odpovídá 0° a 1 by znamenala změnu fáze o 180° . Binární PSK užívá například systém GPS. (Oxford 2008, s. 43)

Polarizace vln může být horizontální, vertikální a kruhová. Polarizace vlny závisí na druhu antény, kterou signál vysíláme. Pro zajištění nejkvalitnějšího příjmu je nutné, aby anténa přijímače byla ve stejné rovině, jako je polarizace vlny. Vertikální polarizaci zajistí anténa vertikální a horizontální anténa horizontální. Kruhové polarizace můžeme dosáhnout například použitím šroubovicové antény. Při kruhové polarizaci elektrické, a tudíž i magnetické pole, rotuje frekvencí rádiové vlny. Rotace může být levotočivá i pravotočivá, což závisí na orientaci pole antény. Aby došlo k zachycení kruhově polarizované vlny je zapotřebí antény se stejnou orientací pole, nebo dipólové antény. Anténami se budou zabývat další kapitoly. Vlny s kruhovou polarizací přináší z pohledu radarů (ne však meteorologických radarů) velkou výhodu. Ta spočívá v tom, že při odrazu takto polarizované vlny od vodních kapek dojde ke

změně rotace vlny, díky čemuž se odraz od srážek na obrazovce radaru neobjeví. Odstranění těchto odrazů výrazně přispívá k efektivnější práci operátora radaru. (Oxford 2008, s. 4)

2.2. Šíření rádiových vln

Rádiové vlny se mohou šířit vlnou přímou, přízemní a odraženou. Vzhledem k zaměření práce bude popsáno pouze šíření vlnou přímou. Pro šíření přímou vlnou je potřeba, aby byla zachována záměrná mezi vysílací stanicí a přijímačem. Pokud se vysílač a přijímač ocitnou mimo záměrnou, tak může mít vysílač jakýkoliv výkon, ale přijímač nezachytí nic. Je to dáno tím, že při vysokých frekvencích mají rádiové vlny povahu podobnou viditelného světla. Díky atmosférickému lomu se rádiové vlny o vysoké frekvenci dokáží šířit za horizont. Vzhledem k tomu, že známe průměr zeměkoule a atmosférický lom dovedeme spočítat, můžeme zjistit dosah vlny. Velikost lomu se snižuje se zvyšující se frekvencí. Pro zjištění maximálního dosahu radaru použijeme tzv. Radiolokační rovnici, která zní:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_v * G^2 * \lambda^2 * \sigma_c}{(4\pi)^3 * P_{Pmin}}}$$

Maximální dosah radaru R_{max} vyjde v metrech (m), P_v je výkon vysílače ve wattech (W), P_{Pmin} značí minimální zjištělný výkon odraženého signálu ve wattech (W), G je zisk antény, λ je vlnová délka v metrech (m) a σ značí plochu cíle v metrech čtverečních (m²). (Oxford 2008, s. 22-23)

2.3. Antény

Vzhledem k tématu této práce zde bude rozebrána dipólová anténa, z důvodu jejího uvedení v předchozí kapitole a dále poté antény využívané u radarů.

Půlvlnný dipól patří mezi základní antény používané pro komunikaci. Dipólová anténa je anténou všesměrovou. Aby anténa pracovala co nejefektivněji, je potřeba, aby měla správnou délku vzhledem k frekvenci, pro kterou má být použita. Optimální je, aby anténa měla délku rovnu polovině, nebo čtvrtině vlnové délky (Marconiho anténa). Byť je rychlost šíření elektromagnetické energie považována za konstantní, jsou materiály/prostředí, u kterých toto neplatí. Při přechodu z jednoho prostředí do druhého dochází k malé změně v rychlosti. Platí to samé, co v optice, čím je prostředí hustší, tím je rychlost šíření vlny nižší. Rychlost šíření elektromagnetické vlny v kovu je zhruba 95% rychlosti šíření ve volném prostoru. Při zohlednění tohoto faktu dospějeme k závěru, že anténa musí mít 95% délky poloviny (nebo čtvrtiny) vlnové délky. (Oxford 2008, s. 53)

Antény používané u radarů mají, na rozdíl od dipólů, velkou směrovost. Dosažení směrovosti antény je závislé na frekvenci, pro kterou anténu využíváme a na účelu antény. Nejjednodušší

způsob, jak směrovosti u antény dosáhnout, je přidání kovového prutu, který je o 5% delší, než je samotná anténa do vzdálenosti rovné čtvrtině vlnové délky. Aby prut fungoval jako odrazná plocha, tak musí mít stejnou orientaci, jako anténa. Po odražení dojde ke změně fáze o 180°, kdy žádný signál neprojde za odrazný prvek, naopak dojde k jeho zesílení ve směru vysílání antény. Můžeme před anténu přidávat další prvky, tzv. usměrňovače, které dále mění tvar výsledné vyzařovací charakteristiky antény. Usměrnění vysílání antény má však svá úskalí. Vzniklo nám tím mnoho postranních laloků, které vysílají, případně přijímají nechtěné signály. Toto je závažný problém u systému ILS, i pro radary. (Oxford 2008, s. 56)

2.4. Dopplerův jev

Dopplerův jev je dalším ze základních jevů, se kterými je třeba počítat a na kterých fungují mnohé přístroje využívající rádiové vlny. Dopplerův jev porovnává rozdíl mezi vysílanou frekvencí a frekvencí přijatou. Tomuto rozdílu se říká Dopplerův posuv. Vzorec pro výpočet Dopplerova posuvu zní

$$f_d = \frac{V * f}{c} = \frac{V}{\lambda}$$

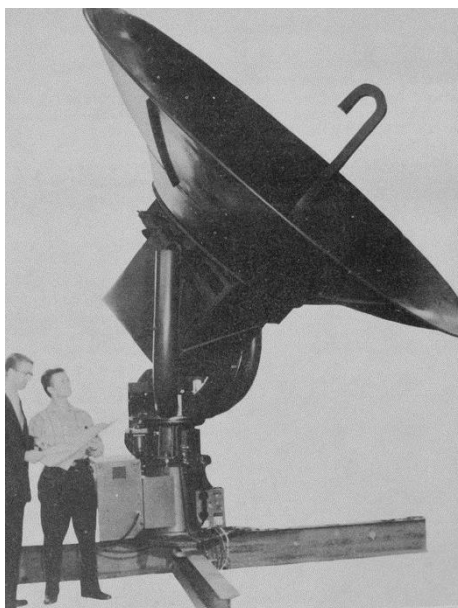
kde V je rychlost, s jakou se přijímač přibližuje, f je frekvence vysílané vlny, c je rychlost šíření vlny a λ je vlnová délka vlny. Pokud se přijímač a zdroj přibližují, tak frekvence roste a naopak. Důvod růstu frekvence je ten, že je rychlost c konstantní, a tudíž se musí měnit frekvence f a vlnová délka λ . Když se zdroj pohybuje k přijímači, dojde k „nahuštění“ vln, frekvence se zvýší a aby byla zachována platnost vzorce, musí dojít ke zmenšení vlnové délky. Meteorologické radary využívající Dopplerova jevu jsou například radary z americké sítě NEXRAD. Tyto radary zaznamenávají změnu fáze vyslané a přijaté vlny. Vlny po odrazu od překážky, například od vodních kapek, mění fázi. Počítače následně fázový posuv vyhodnotí a získá z něj rychlost pohybu od, nebo k radaru. Tyto informace mohou posloužit i k zobrazení směru a síly větru. Na základě směru pohybu se následně přiřadí radarovým odrazům barva. Červená při pohybu od radaru a zelená, pokud se srážky k radaru přibližují.

(Using and Understanding Doppler Radar n. d.)

3 Meteorologický radar

3.1. Zavádění meteorologického radaru

S rozmachem letectví bylo potřeba nových technologií pro zvýšení bezpečnosti letu. Stroje létaly s větším množstvím pasažérů, na větší vzdálenosti a za horších letových podmínek. Jedním z revolučních systémů byl meteorologický radar. Již během druhé světové války si operátoři radarů všimli na svých radarech odrazů způsobených právě srážkami. V té době to ale byly spíše nechtěné jevy, protože primární cíl radarů té doby byl zachycovat letouny, nikoliv mapovat výskyt srážek. Prvním radarem vyvinutým za účelem meteorologických pozorování byl AN/CPS-9. Existence tohoto radaru byla zveřejněna až v roce 1954, byť byl vyráběn již kolem roku 1949. V letech 1954 a 1955 zasáhlo několik hurikánů americké pobřeží, aniž by byly zachyceny radarem. Na základě toho pořídil v roce 1956 meteorologický úřad 31 nových radarů později nesoucích označení WSR-57. Tyto radary, vyrobené společností Raytheon, měly tzv. radome, což byla novinka u meteorologických radarů. Radome je ochranný kryt radaru vyrobený z materiálů, které minimálně ovlivňují elektromagnetické vlny a tím i funkci radaru. Radomy pozemních radarů mají většinou tvar kupole, zatímco radome AWR je navržen s ohledem na aerodynamické vlastnosti stroje.



Obrázek 3 Radar WSR-57 (https://en.wikipedia.org/wiki/WSR-57#/media/File:WSR-57_antenna.jpg)

Důležitý poznatek o tvorbě nebezpečných meteorologických jevů, v tomto případě krup, byl zjištěn v podstatě náhodou. V padesátých letech chtěla vláda USA minimalizovat škody způsobené spádem krup na pole místních farmářů. Chtěli toho docílit namířením radaru Decca Typ-41 do oblačnosti, což mělo kroupy rozpustit, nebo alespoň zmenšit. Tento účel byl splněn jen minimálně, ale podařilo se získat zásadní informace o vztahu mezi pravděpodobností

výskytu krup a vrcholky oblačnosti. Pokud výška oblačnosti přesáhla tropopauzu, tudíž 9 až 17 km, bylo vysoce pravděpodobné, že se začnou tvořit velké kroupy.



Obrázek 4 DECCA radar Typ-41 (<http://woottonbridgeiow.org.uk/decca-legacy/images/p92.jpg>)

V šedesátých letech se více zkoumaly i odrazy v bezoblačné atmosféře. Tyto odrazy mohou být způsobeny dvěma způsoby. Jeden způsob jsou odrazy od „pevných cílů“, například od hmyzu, nebo od ptactva. Druhá možnost je odraz vyvolaný pohybem vzduchu – turbulence. Odraz způsobený turbulencí se vyskytuje u radarů, které pracují s vlnovou délkou větší než 10 cm. Pokud je vlnová délka menší, tak turbulence nemusí být dostatečně silná pro způsobení odrazu.

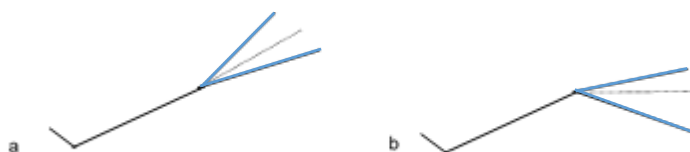
V následujících letech docházelo k rozšíření dopplerovských radarů, a to až do podoby současných radarů systému NEXRAD. Tyto radary jsou schopny ještě přesnějšího zachycení odrazů v bezoblačné atmosféře a poskytují i informace o dopplerovských rychlostech, díky kterým získáme informace o směru a rychlosti větru. (Duda n. d.)

3.2. Palubní meteorologický radar

Palubní meteorologický radar vznikl pro zkvalitnění a rozšíření dat o počasí, které posádka potřebuje pro zajištění bezproblémového průletu potenciálně nebezpečným počasím. Navzdory tomu, že informace o počasí mohou být pilotům poskytnuty ze země řídicími letového provozu, zobrazení počasí v reálném čase přímo na palubě je mnohem lepší zdroj informací. AWR se postupně implementoval do všech kategorií letadel. Lze jej najít i na moderních turbovrtulových strojích všeobecného letectví, kde má velké opodstatnění, neboť tyto letouny mnohdy nejsou schopny bouře nadlétnout a jsou nuceny mezi jejich jádry manévrovat. V následujících kapitolách bude rozebrána konstrukce AWR, jeho jednotlivé funkce a nastavení a také další možnosti, které tato technologie nabízí v jiných oblastech, než je meteorologie.

3.2.1 Konstrukce AWR

AWR se skládá ze čtyř hlavních komponent. Vysílače/přijímače, antény, zobrazovacího zařízení a řídicí jednotky. Stejně jako ostatní meteorologické radary je i AWR radar primární. Pomocí radarových odrazů určí vzdálenost cíle (srážek, či terénu) a zároveň vytvoří i směrník od letadla k nim. Vzdálenost i směrník lze odčíst z obrazovky radaru díky zobrazeným čarám představujících vzdálenost v námořních mílích, respektive odchylku vůči směru letu ve stupních. Je třeba pamatovat, že vzdálenost terénu zobrazena radarem je šikmá vzdálenost. Pro výpočet vzdálenosti použijeme Pythagorovu větu. Anténa AWR může být parabolická i plochá a je stabilizovaná. Stabilizace antény je velmi důležitá pro přesné zobrazení meteorologické situace zejména při stoupání. Schéma, znázorňující tuto situaci, popisuje obrázek 5. Na tomto obrázku je v případě „a“ stabilizace antény ve stoupání vypnuta a paprsek radaru míří ve směru osy letounu. V případě „b“ je stabilizace již zapnuta a paprsek radaru míří před letoun. Sklon antény je v obou případech nastaven na 0°. Pokud by anténa stabilizovaná nebyla, tak by paprsek radaru při stoupání mohl vyzařovat nad srážky a ty by tak nebyly zobrazeny.



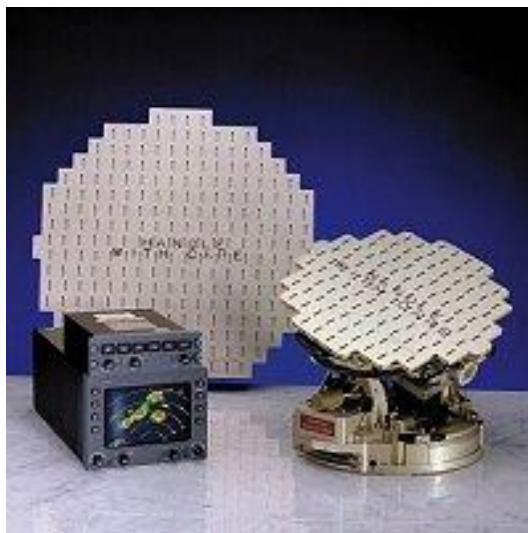
Obrázek 5 Schéma funkce stabilizace antény AWR, sklon antény je nastaven na 0°

Tvar paprsku záleží na zvoleném módu radaru. Může být kuželovitý, ale i tvaru kosekantu. Jestli mají zobrazované informace mít co největší rozlišení, je nutné, aby byla šířka vyzařovaného paprsku co nejmenší. Pro výpočet šíře paprsku ve stupních lze použít jednoduchý vzorec, do něhož je zapotřebí dosadit vlnovou délku a průměr antény. Vzorec zní:

$$\theta = 70 * \frac{\lambda}{d}$$

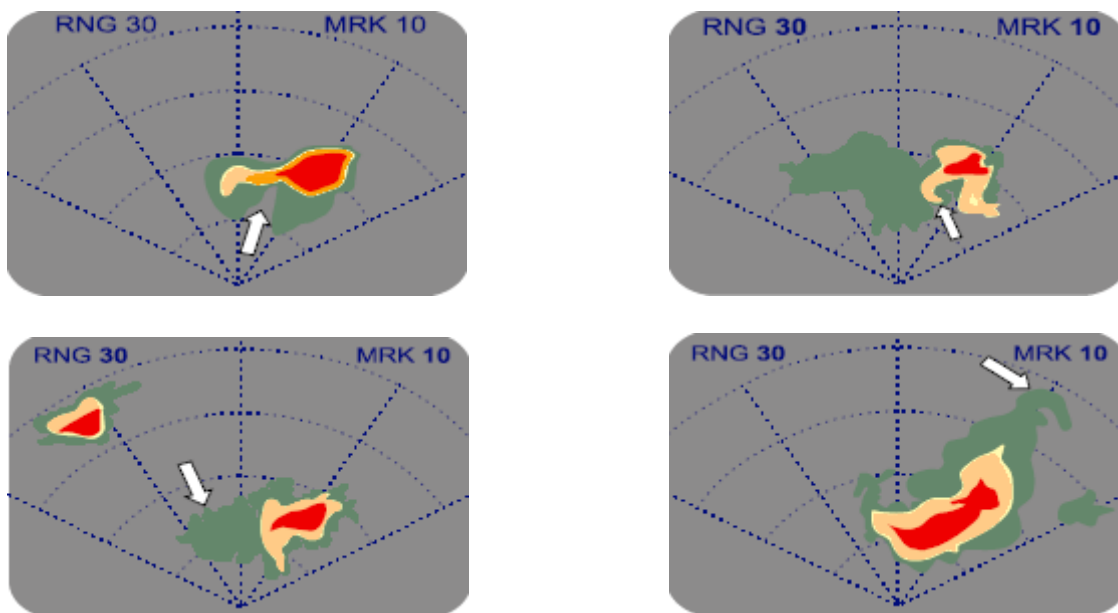
Běžně se u AWR používají paprsky o šířce 3° až 5°. Pokud by byla šířka paprsku větší, bylo by možné, že se dva radarové cíle spojí v jeden a až když se letadlo přiblíží blíže, tak dojde k jejich jednoznačnému oddělení. Jak plyne ze vzorce, nejužšího paprsku se docílí dvěma způsoby. Může být použita anténa o velkém průměru, což je ale při zástavbě do konstrukce letadla velmi problematické, nebo se může použít kratších vlnových délek. Hodnota vlnové délky je velmi důležitá, neboť ovlivňuje, jak velké cíle radar zachytí. AWR by měl bezpečně zachytit velké vodní kapky a kroupy, protože se jedná o jevy, které většinou doprovází silná turbulence. Tyto vodní kapky a kroupy mají většinou rozměr kolem 3 cm, proto se i vlnová délka pohybuje kolem této hodnoty. Nejčastěji používaná frekvence 9375MHz ± 30MHz zajistí

optimální odrazy od výše zmíněných jevů v konvektivní oblačnosti. Dále také umožňuje vyzařování úzkého paprsku. Vlnovou délku použitou u radaru můžeme spočítat stejným vzorcem, jako v kapitole 2.1., kdy za f dosadíme frekvenci radaru. Pokud by byla frekvence vyšší, než 9375 MHz, docházelo by k nežádoucím odrazům i od menších kapek. Naopak frekvence nižší než 9375 MHz by měla za následek nedostatečné odrazy pro znázornění oblasti turbulencí. (Oxford 2008, s. 213-218)



Obrázek 6 Komponenty AWR typu Honeywell Primus 660
(<http://www.radartutorial.eu/19.kartei/08.airborne/karte005.en.html>)

Zobrazovací zařízení může mít mnoho podob. Od jednoduchých černo – bílých obrazovek (mohly mít i jinou kombinaci, například černo – zelenou) až po moderní obrazovky, kde se nám vykreslí několik barev s ohledem na intenzitu srážek. Intenzitu můžeme změřit díky odrazivosti. Čím je odrazivost vyšší, tím intenzivnější srážky se v dané oblasti nachází. Nejmenší odrazivost má přemrzlý, suchý sníh. Naopak nejvyšší odrazivost mají mokré kroupy. Pokud systém disponuje barevnou obrazovkou, tak bude počasí vykresleno následovně. Minimální srážky budou mít barvu černou, lehké srážky 0,7 až 4 mm/hod budou mít barvu zelenou, žluté budou srážky o intenzitě 4 až 12 mm/hod a červené budou srážky nejsilnější, 12 mm/hod a více. Purpurově se zobrazí oblast s turbulencí a v případě, že systém neumí purpurovou zobrazit, může tato oblast blikat červeně. Barevné zobrazení turbulencí se může lišit systémem od systému. Nejsilnější turbulence se většinou vyskytuje v místech, kde dochází k rychlému střídání barev, což indikuje největší gradient srážek. K odhalení přítomnosti turbulencí může dopomoci i tvar vykreslených srážek, viz. obr. 7. Výnos z radaru může být veden na samostatnou obrazovku, nebo jej lze promítnout přímo na navigační displej letadla. Oba způsoby mají své výhody i nevýhody. Výhodou samostatné obrazovky je dostupnost informací o počasí i po selhání obrazovky ND, ale již na ní většinou nejde promítnout trať letu, což ztěžuje rozhodování o obletových trasách. (Oxford 2008, s. 219-220)



Obrázek 7 U zobrazených případů lze předpokládat výskyt krup, a tak i turbulence. (Oxford 2008, s. 221)

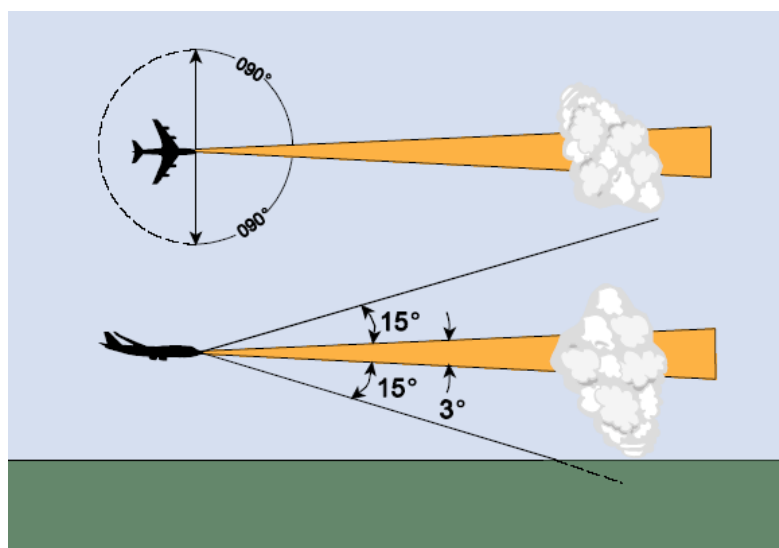
3.2.2 Ovládací prvky AWR

AWR má několik ovládacích prvků. Kromě samotného tlačítka napájení se na něm většinou nachází volič dosahu radaru, ovladač náklonu antény, ovladač manuálního nastavení zisku antény a volič režimů AWR. Tyto přepínače, potažmo voliče, mohou mít různou podobu, která se liší podle typu instalace. Různé zástavby AWR jsou k vidění v příloze.

Při zapnutí AWR se současně u většiny typů AWR aktivuje stabilizace antény. Tuto funkci však lze u některých zástaveb AWR ovládat zvlášť. Nezbytnost stabilizace antény AWR byla popsána v předchozí kapitole. V případě, že by se stabilizace manuálně vypnula, tak by se anténa uzamkla v souladu s příčnou a podélnou osou letadla. Funkce voliče dosahu radaru nepotřebuje širší popis. V některých případech může u této funkce být ještě možnost nastavení radaru do pohotovostního režimu, tzv. „STAND – BY“, ve kterém radar nevyzařuje žádné paprsky. Tato funkce musí být aktivní, pokud se v okolí radaru vyskytuje například pozemní personál. Záření radaru může mít neblahý vliv na lidský organismus. Přepnutím voliče na nějaký dosah radaru dojde k aktivaci antény a radar začne ozařovat okolí. Aktivace radaru na zemi není zakázána, naopak se při provozu ve špatném počasí se zapnutí AWR na menší dosah používá ke zjištění povahy počasí ve směru vzletu. Musí však být dodržena podmínka zajištění sterility prostředí v okolí radaru. Na radaru lze nastavit dosah i přes 300 NM. Taková vzdálenost je však již nepraktická, protože paprsek radaru v takové vzdálenosti má šíři několika kilometrů, a tak je jeho rozlišovací schopnost značně omezena. Další důvod, proč by se výnosy AWR z takové vzdálenosti měli používat hlavně pro hrubou představu toho, co nás čeká po trati je fakt, že stroj se do oblasti zobrazeného počasí dostane až za několik desítek

minut, během kterých se povaha počasí může dramaticky změnit. Běžně se používají rozsahy do 150 NM před letadlem. V do této vzdálenosti má paprsek radaru dostatečnou rozlišovací schopnost a doba letu do zobrazené oblasti není příliš dlouhá.

Funkce nastavení sklonu antény, tzv. „TILT“ ovlivňuje náklon antény podél její příčné osy a tím směřuje paprsek radaru nahoru, nebo dolů. Běžný pracovní rozsah antény radaru je 15° nahoru a 15° dolů. Tyto parametry se ale samozřejmě mohou u různých AWR lišit. Na nastavení správného sklonu antény by se kvůli zakřivení Země mělo pamatovat i při nastavování dosahu radaru. Pokud nastavíme dosah radaru na velkou vzdálenost, je zapotřebí anténu nasměřovat více nahoru a naopak. Nižší sklon antény by měl být nastaven i při stoupání do větší výšky. (Oxford 2008, s. 222)

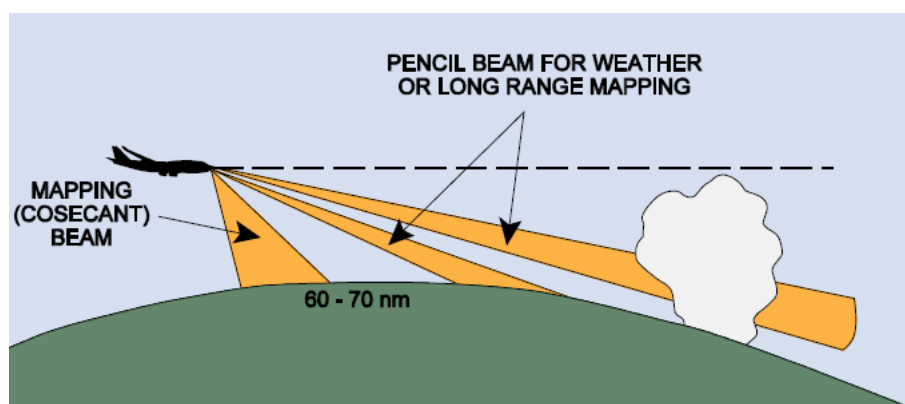


Obrázek 8 Rozsah nastavení sklonu antény (Oxford 2008, s.223)

Režimy AWR mohou být například MAP, GND, TURB, WEA apod. Dostupné režimy se liší podle pokročilosti systému. Režim MAP se používá pro zobrazení terénu. V tomto módu má radar různé vyzařovací charakteristiky. Paprsek může být tvaru kosekantu, případně klasický kuželovitý. Kosekantní paprsek bude použit při nastavení menšího rozsahu (± 70 NM), kuželovitý na vzdálenosti větší.

Při zobrazování terénu je třeba brát v potaz rozdílnou odrazivost různých povrchů. Vodní plochy, jemný písek a plochý terén bude mít odrazivost menší než výškové budovy, linie pobřeží nebo elektrárny. Další úskalí tvoří radarový stín od kopců. Díky tomuto jevu se hornatá oblast v zákrytu horského masivu může jevit jako vodní plocha. Tento režim AWR je možné využít i v navigaci. Pokud letoun letí například nad oceánem a posádka ví, že se v oblasti nachází pouze jeden ostrov je možné tento ostrov radarem zobrazit a následně zjistit zaměření „QTE“. I zde platí pravidla z obecné navigace. Je tak třeba znát deklinaci v prostoru, kde se letadlo nachází a zároveň posádka nesmí zapomenout přepočítat šikmou vzdálenost

odečtenou na obrazovce radaru na vzdálenost skutečnou. Deklinace se započítává pouze v případě, že výnos z radaru je zobrazen na své vlastní obrazovce. Pokud je výnos promítnut do ND, je deklinace již započítána.



Obrázek 9 Vyzařovací charakteristika radaru při mapování terénu (kosekantní) a pro mapování počasí (kuželová) (Oxford 2008, s. 223)

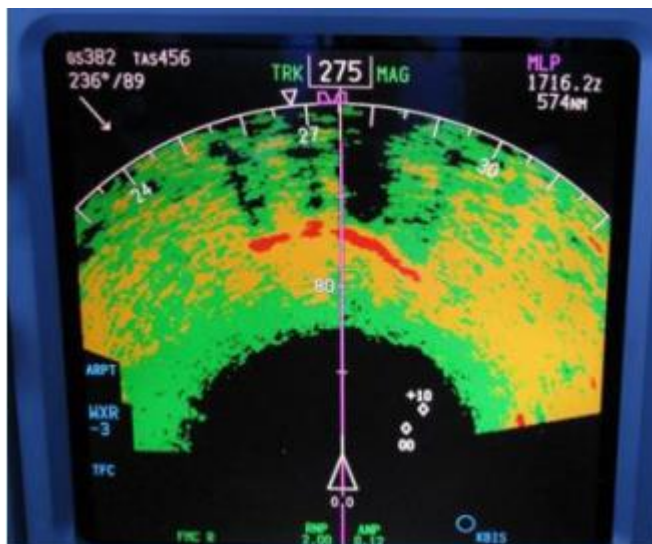
V režimu WEA se generuje kuželovitý paprsek a slouží k mapování srážek. U pokročilejších radarů se v tomto režimu lze setkat s funkcí automatického nastavení zisku antény. Tato funkce má za následek redukování zisku antény v závislosti na vzdálenosti detekovaných oblaků. Díky tomu neškodná oblačnost s minimem srážek nebude mít na radaru silnější odraz než vzdálenější bouře. TURB je jednou z novějších funkcí AWR. Slouží k detekci turbulence. Funguje pouze při nastavení menšího dosahu radaru, například u systému Honeywell Primus 880 je to do 50 NM. Zobrazení turbulence může mít několik podob. U systému Primus 800 je barva oblastí turbulence bílá, u moderních systémů je obvykle purpurová. (Oxford 2008, s. 224-226)

3.2.3 Chyby v zobrazení AWR způsobené vnějšími faktory

Výnosy z AWR jsou jako u každého primárního radaru ovlivněny mnoha nepříznivými faktory. Jedním z nepříjemných jevů je zachycení odrazů od terénu. Tyto odrazy se od meteorologických útvarů složitě rozlišují. Řešení tohoto problému přinesl MTI, Moving Target Identification, který k odstranění odrazů od země využívá Dopplerova fázového posunu. Je však nezbytné, aby se meteorologické útvary pohybovaly dostatečnou radiální rychlostí, při které je ještě fázový posun dostatečný k jejich separaci od terénu.

Velký vliv na zobrazení má i intenzita a druh srážek. Pokud jsou srážky velmi intenzivní, AWR nedokáže prosvítit skrze bouři, a tak se za takto intenzivními srážkami objevují místa, která se jeví jako bez srážek. Zobrazené srážky však mohou být jen okraj bouře, jejíž jádro již nebylo radarem zobrazeno. Takové informace mohou značně zkreslit pilotovu představu o povaze počasí před letadlem. Útlum radaru může nastat i při namrznutí radomu letadla, nebo při jeho poškození, například kroupami. Mohou nastat i případy, kdy AWR není schopen správně

identifikovat výšku mraků. Je to způsobeno nízkou odrazivostí zmrzlých srážek, které se v této výšce nachází. (Werth 2014, s. 1-2)



Obrázek 10 Výnos z AWR ukazující útlum radaru způsobený silnými srážkami (Werth 2014, s.2)

3.2.4 Vliv nesprávné manipulace s AWR, či jeho chybné indikace na letecké nehody

Southern Airways DC-9; Muscle Shoals – Atlanta

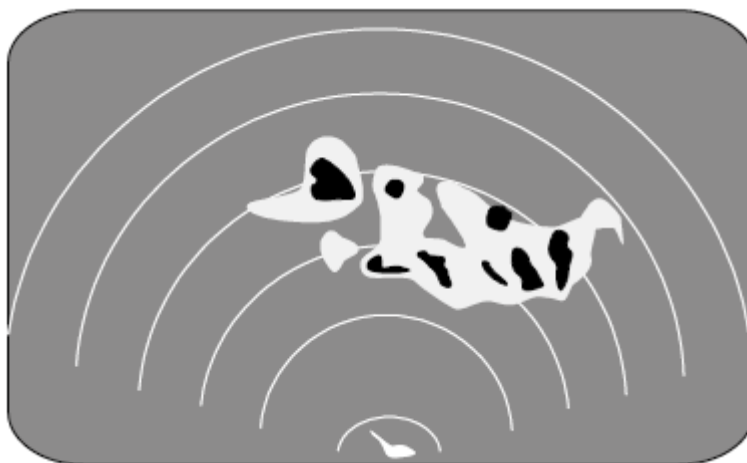
Jednou z nehod, kde chybný výnos z palubního meteorologického radaru přímo ovlivnil rozhodnutí posádky byla nehoda letu Southern Airways číslo 242 z Muscle Shoals do Atlanty s mezipřistáním v Huntsville. Šlo o letoun McDonnell Douglas DC-9, reg. N1335U. Jednalo se o klasický případ zvolení nesprávné trasy letu na základě zobrazení AWR, které bylo klamavé díky útlumu radaru, způsobenému intenzivními srážkami. V iluzi lepšího počasí posádka zvolila kurz, který je však přivedl do mnohem horšího počasí s výskytem intenzivního deště a krup. Došlo k rozbití čelního skla a následně i k selhání obou motorů. Stroj nouzově přistál na dálnici. Z 85 lidí na palubě jich 62 zahynulo.

Letoun byl vybaven palubním meteorologickým radarem typu RDR-1E, vyrobeným firmou Bendix. Radar pracoval ve frekvenčním pásmu X (8 až 12 GHz) a vlnovou délkou 3,2 cm. Na tomto systému bylo možno nastavit tři rozsahy, konkrétně 30, 80 a 180 mil. Zobrazení radaru bylo možno přepínat mezi režimy „normal“ a „contour“. V normálním režimu byly srážky zobrazeny jako světlé oblasti na tmavém pozadí. V režimu „contour“ jsou nejsilnější srážky elektronicky potlačeny a jsou zobrazovány formou tmavých děr, ohraničených srážkami nižší intenzity. Dle údajů výrobce se tyto tmavé oblasti generovaly při úhrnu srážek mezi 12,7 mm/hod a 25,4 mm/hod a měly být obléhány minimálně ve vzdálenosti 10 mil. Zároveň

veškeré srážky, které jsou zobrazeny v rozsahu větším, než 75 mil jsou považovány za silné a měly by být obletěny, bez ohledu na přítomnost tmavých oblastí. Příručka od výrobce zmiňuje také snížení výkonu radaru díky útlumu. Dle příručky silné srážky ve vzdálenosti 100 ft od antény mohou mít za následek rozptýlení paprsku a následnou degradaci výkonu radaru. Podobný účinek má i namrznutí radomu stroje. V nejhorším případě dojde ke zmizení všech zobrazovaných srážek a místo nich se na obrazovce radaru zobrazí neurčitý opar. Žádné další informace o útlumu radaru způsobeném deštěm, nebo jinými srážkami výrobce nezmiňuje. Výpočty však nasvědčují tomu, že proti radarům, které pracují s nižší frekvencí a delší vlnovou délkou, jsou radary pracující ve frekvenčním pásmu X poměrně hodně citlivé na útlum vlivem srážek.

O možném útlumu radaru a tím způsobené falešné indikaci lepšího počasí nasvědčuje i konverzace v kokpitu, kdy kapitán řekl prvnímu důstojníkovi: „*Na levé straně to vypadá dobře.*“ a následně se kurz letounu odchýlil doleva vstříc nejsilnějším srážkám. Dle výpovědi prvního důstojníka, který letěl s posádkou dříve toho dne, pracoval radar na N1335U správně. Klesání do Hunstville bylo provedeno v IMC a v jeho průběhu, i při přiblížení na letiště, byl letoun vystaven krupobití a střednímu, až silnému dešti. Na obrazovce radaru však toto počasí nevytvořilo žádné tmavé oblasti. Proč tomu tak bylo však nedokázal první důstojník vysvětlit.

(Raymond G. Belanger 1978)



Obrázek 11 Příklad zobrazení v režimu "contour" (Oxford,2008 s. 242)

Air France A330-200; Madagaskar – Paříž

V tomto případě se nejedná o nehodu, ale o vážný incident, při kterém se lehce zranil jeden člen posádky a jeden pasažér. K incidentu letounu Airbus A330-200, registrační značky F-GZCG, došlo 27. února 2012 v 00:48 UTC během cestovního letu ve FL360 nad územím Tanzánie. Během letu obdržela posádka přes systém ACARS satelitní snímky počasí, které mohou během letu očekávat. Ze zprávy bylo patrné, že musí počítat se zónami s vysokou

konvekcí až po 12°30' j.š.. Zóny měly být do přeletu VOR Dar-Es-Salaam spíše izolovány a po tomto bodě měl let být bez turbulencí až do 2°30' j.š.. Během průletu vysoce konvektivními zónami posádka vykonala několik úhybných manévrů. Deset minut po minutí 12°30' j.š. změnil pilot letící rozsah svého navigačního displeje ze 40 NM na 160 NM. Následně byly takto nastaveny oba ND. Posádka poté vypověděla, že obloha byla jasná a byly vidět hvězdy. Zmínili také, že nastavili sklon radaru na -1,5° a pravidelně toto nastavení měnili, stejně tak prý měnili i zisk antény. Tyto údaje však není možné ověřit, protože nejsou zaznamenány v FDR. Během letu v hladině byla posádka dvakrát požádána řídícím, aby stoupali do FL380. Posádka tuto žádost zamítla a odůvodnila potřebou udržení výškové rezervy od maximální doporučené letové hladiny. Zhruba 6 minut po minutí Dar-Es-Salaam VOR, byla rychlost 0,81 Mach a začala narůstat. Pilot letící změnil rozsah ND ze 160 na 80 NM a nastavil sklon antény radaru -1,5°. Na radaru nezaznamenal žádné odrazy, ale všiml si záblesku v mraku napravo od letadla. Následně došlo k dalším změnám v rychlosti, které si vyžadovali i vysunutí aerodynamických brzd, zvětšení úhlu náběhu, automatickému odpojení autopilota i automatu tahu a nekontrolovatelnému stoupání letounu až do FL380. Ve FL380 posádka stroj stabilizovala a začala klesat, aktivovala autopilota i automat tahu a zbytek letu proběhl zcela normálně.

Po dobu turbulence, která trvala 40 sekund, byly na FDR zaznamenány následující údaje. Klopení letounu se pohybovalo v rozmezí -6 a +11°, Machovo číslo se měnilo od 0,77 do 0,83, úhel náběhu byl -0,7° až +10,2°, klonění stroje bylo v rozmezí od -16° do +31°, vertikální rychlost dosáhla hodnoty +8500 ft/min, vertikální násobek zatížení byl +0,02 až +2,28g a horizontální násobek -0,16 až +0,17g, břevna FD několikrát zmizela a pilot po odpojení autopilota vychýlil sidestick s úmyslem sklonit před letounu dolů. Dle výrobce letoun zůstal ve své letové obálce.

Stroj byl vybaven meteorologickým radarem od firmy Rockwell Collins se společným nastavením pro oba ND. Při používání radaru je zapotřebí dbát na správné nastavení sklonu antény radaru v závislosti na zobrazovaném rozsahu. Během cestovního letu musí být sklon takový, aby se odrazy ze země objevily na obrazovce radaru až v největší možné vzdálenosti. Dle pokynů provozovatele by mělo být užito rozsahu 80 NM za účelem vyhýbání se rizikovým oblastem a 160 NM v pohotovostním režimu. V těchto rozsazích byl doporučen sklon antény -1,5° pro 160 NM a -3,5° pro 80 NM. Provozovatel však zmiňuje, že doporučené nastavení pro 80 NM lze použít pouze při letu nad vodní plochou, protože při letu nad pevninou se mohou objevovat četné nežádoucí odrazy od země. Toto tvrzení se shoduje s výpovědí posádky, která byla nucena zvolit sklon -1,5°, protože odrazy od země dostávala již při nastavení -2°. Vzhledem ke společnému nastavení sklonu antény pro oba ND mělo pouze jedno zobrazení odpovídající nastavení. Výchozí rozsah v cestovní hladině je běžně

160 NM, a tak posádka musí pravidelně nastavovat správný sklon pro zobrazení s rozsahem 80 NM. Vzhledem k poloze jádra bouře lze odhadnout, že zhruba 15 minut před turbulencí byl stroj ve vzdálenosti 120 NM a bouře, která se teprve tvořila nemusela být zachycena radarem. Přibližně 10 minut před turbulencí byl stroj 80 NM od jádra bouře a při správně nastaveném sklonu antény mohla být bouře zobrazena na obrazovce radaru. Ve vzdálenosti 40NM a 5 minut před začátkem turbulence by bouře při rozsahu nastaveném na 80 NM a s odpovídajícím nastavením sklonu pravděpodobně na radaru zobrazena nebyla. Rozsah by musel být přepnut na 40 NM a opět by se tomu muselo přizpůsobit nastavení sklonu antény.

Závěr vyšetřovací komise zní, že incident vznikl vlivem nedetekování konvektivní zóny během velmi rychlého vývoje cumulonimbu, jejíž detekce byla ztížena právě rychlostí vývoje. Fakt, že posádka nemá na palubě nástroje dostupné operačnímu středisku na zemi, které by zvýšily efektivitu zachycení nebezpečných meteorologických fenoménů, také výrazně přispěl ke vzniku této situace. Díky nevhodnému nastavení rozsahu na ND neměla posádka optimální podmínky k rozpoznání vyvíjející bouřkové oblačnosti. Při rychlosti, s jakou se oblačnost vyvíjela není jisté, zda by se podařilo bouři zachytit, aniž by posádka aktivně monitorovala radar a kontrolovala správná nastavení systému.

(BEA 2014)

Většině incidentů by mohlo být zabráněno, pokud by posádka využila všech možností radaru a aplikovala správně kombinace rozsahu a sklonu radaru. Ve zprávách z těchto incidentů se lze dočíst, že vyšetřovatelé doporučují intenzivnější školení posádek pro práci s AWR. Tato školení se často k posádkám dostávají formou materiálů pro samostudium, případně prezentací přímo od výrobce. Bohužel zatím neexistuje způsob zobrazení reálné struktury počasí v simulátorech, které se používají při typovém výcviku, či při periodickém přezkoušení. Dnes dostupné simulace meteorologických jevů nejsou tak komplexní, aby se na nich vyzkoušela kompletní práce s AWR a se všemi jeho režimy, natož pak k odhalení jeho limitů. V letectví se technologie vyvíjejí velmi rychle a AWR není výjimkou. Proto se i piloti s náletem několika tisíc hodin mohou dostat do potíží při nedostatečném proškolení při přechodu na nový typ radaru.

4 Praktická část

4.1. Vybavení

Experimentální část práce byla provedena na letounu Cessna Grand Caravan EX vybaveným avionikou Garmin G1000 s volitelným radarem od společnosti Garmin, GWX 68. Tento radar se zobrazuje na MFD, který je umístěn uprostřed přístrojové desky. Výnos z něj je barevný a

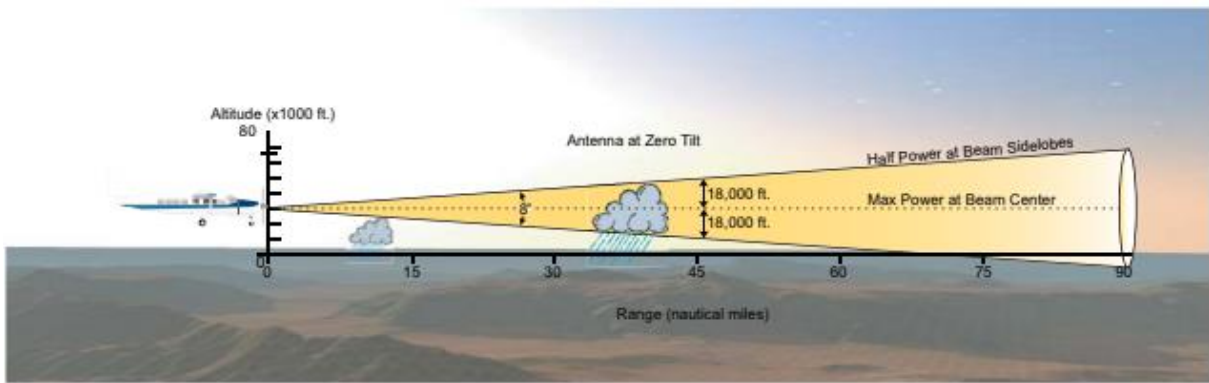
system zahrnuje i funkce jako STC, WATCH® a Weather Alert. Všechny tyto funkce budou podrobněji popsány, včetně fotodokumentace, v následujících kapitolách. Fotografie použité v této práci byly pořízeny mobilním telefonem a digitální zrcadlovkou. Ke grafickým úpravám byl použit program GIMP verze 2.10.4.



Obrázek 12 Radar systému GWX 68 na pravém křídle C208

4.1.1. Parametry a funkce radaru

Radar Garmin GWX 68 patří do kategorie pokročilejších systémů. Vyzářovaný výkon je 6,5 kW a délka pulzu je 4 μ s ve všech rozsazích, kromě rozsahu 2,5 NM. V tomto rozsahu je délka pulzu jen 1 μ s. Kratší délka byla zvolena pro zredukování rozmazání a vzájemného prolínání jednotlivých odrazů, čímž bylo udrženo dobré rozlišení tohoto radaru i na takto krátkém rozsahu. Celý proces detekce cíle trvá 12,36 μ s na každou míli vzdálenosti od cíle. Anténa použitá v letounu Cessna Caravan má 12" (zhruba 30,48 cm) a je plně stabilizovaná v rozsazích 30° pro klonění i klopení. Systém GWX 68 umožňuje pilotovi zaměřit se na konkrétní sektory před letounem. Má možnost nastavit sektory o rozměru 20°, 40°, 60° a 90°. Kromě skenů horizontálních umožňuje radar i vertikální skeny oblačností. Tato možnost najde své uplatnění, pokud je zapotřebí zjistit vrcholky bouře, gradient a tvorbu jader bouří v různých výškách. Je zapotřebí mít na paměti, že systém GWX 68 je pulzní typ radaru, nikoliv Dopplerovský radar. Nelze tak na něm zachytit turbulenci. V předchozích kapitolách byl rozebrán vztah úhlu sklonu antény a nastaveném rozsahu. Na následujícím obrázku je zobrazen případ pro 12" anténu.



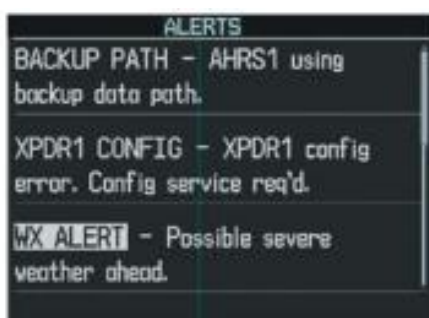
Obrázek 13 Zobrazení šířky paprsku 12" antény na C208 (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 316)

Na vertikální ose je vynesena výška letu v krocích po 1000 stopách. Na vodorovné ose je vynesena vzdálenost v námořních mílích. Velmi dobře je zde znázorněna důležitost nastavení sklonu antény vzhledem k rozsahu. Při nastavení 0°, které je v ilustraci použito, se na obrazovce radaru vůbec nezobrazí srážky zhruba 15 NM od letounu. Toto opomenutí může být velmi nebezpečné zejména při velké rychlosti růstu bouře, jak se lze dočíst v jednom z incidentů, rozebraných v této práci. Postupy správného nastavení sklonu antény jsou rozebrány v jedné z praktických úloh této práce. Útlum radaru způsobený vzdáleností umí GWX 68 poměrně dobře odstranit. Stará se o to algoritmus STC (Extended Sensitivity Time Constant), který automaticky koreluje vzdálenost odrazu s intenzitou. Téměř tak eliminuje jiné zobrazení stejně velké bouře v různých vzdálenostech. Míra útlumu s rostoucí vzdáleností cíle od letounu roste kvadraticky. Mnohem výraznější a méně předvídatelný projev má však útlum způsobený srážkami. V předchozí kapitole bylo vysvětleno, že při zachycení velmi silných srážek může dojít k úplnému utlumení radarového pulzu, a tak ke zobrazení černé oblasti na obrazovce radaru. Byť má černá barva na radaru indikovat oblast bez význačného počasí, nemusí tomu tak být. GWX 68 se snaží ulehčit posádce práci tím, že označí oblasti, ve kterých předpokládá, že došlo k nějakému útlumu. Tato funkce se nazývá WATCH®. Na fotografii níže jsou oblasti, identifikované funkcí WATCH® jako nevěrohodně vykreslené, zvýrazněny bílými elipsami.



Obrázek 14 Výnos AWR na MFD s aktivní funkcí WATCH® a Weather Alert

Na obrázku 14 je žlutou elipsou zvýrazněna funkce Weather Alert. Tato funkce hlásí výskyt význačných srážek mezi rozsahy 80 a 320 NM bez ohledu na námi zvolený rozsah (v době pořízení fotografie byl nastaven rozsah radaru 60 NM). Varování má formu červených pásek, které se objevují za vnějším prstencem rozsahu v přibližném azimutu výskytu srážek. Pokud je varování před srážkami v rozmezí $\pm 10^\circ$ od kurzu letounu, zobrazí se varování i na PFD, což lze vidět na obrázku 15. Pokud je však sklon antény nastaven na příliš nízkou hodnotu, může být varování falešné. Pravděpodobně se jedná o odrazy od terénu.



Obrázek 15 Zobrazení varování Weather Alert na PFD (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 334)

4.1.2. Ovládání radaru GWX 68

Jak již bylo napsáno v předešlých kapitolách, výnos z AWR je zobrazen na MFD Garminu G1000. Ovládání radaru je velmi intuitivní. K volbě režimů a nastavení slouží, jak tlačítka umístěna na spodní straně obrazovky, tak otočné voliče. Na obrázku 16 jsou oranžovou elipsou vyznačena tlačítka sloužící k volbě režimů radaru a k aktivaci funkcí. Bílou elipsou je

vyznačen otočný volič k nastavení rozsahu a modrou je vyznačen tzv. „FMS knob“. FMS knob se skládá z velkého a malého voliče. Při stisknutí malého voliče dojde k zobrazení kurzoru, který se projeví modrým obdélníkem u dané veličiny. Na obrázku 16 je kurzor aktivní u položky „TILT“, neboli sklon antény. Velkým voličem poté posouváme kurzorem v menu a malým voličem měníme hodnoty. Při dalším stisknutí malého voliče kurzor zmizí.



Obrázek 16 Ovládací prvky na MFD

Tabulka 2 Barevná stupnice v režimu „WEATHER“ (Garmin G1000 Pilot’s guide for Cessna Caravan s. 332)

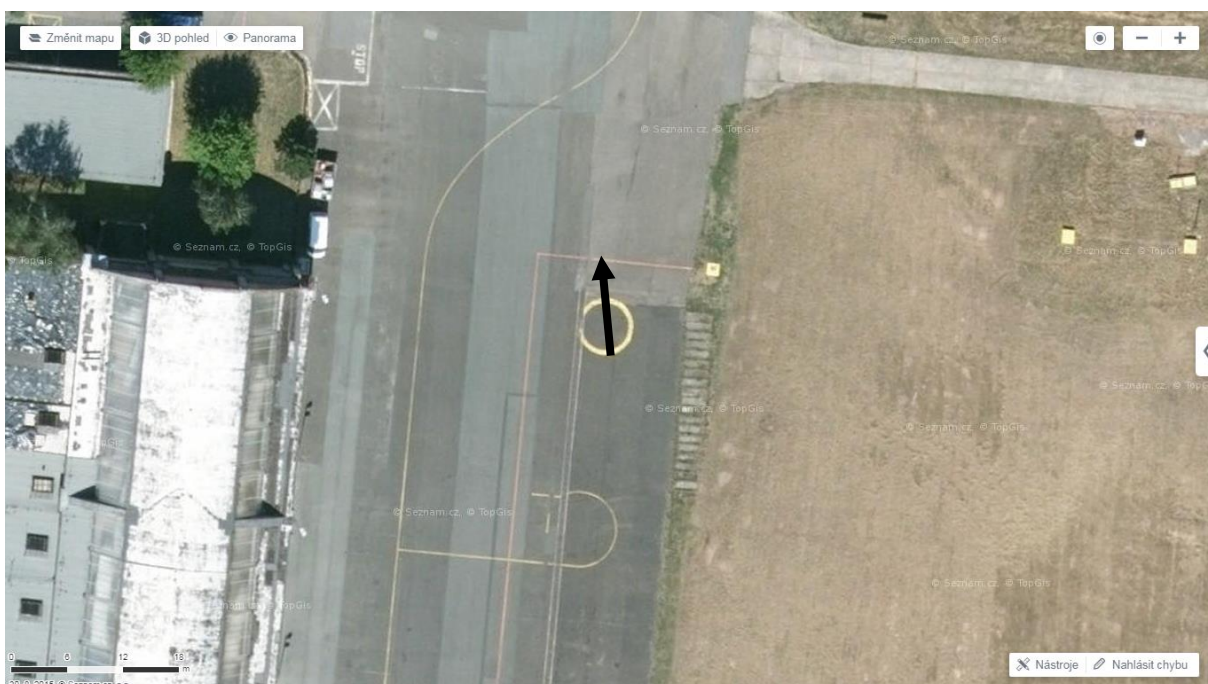
Weather Mode Color	Intensity	Approximate Precipitation Rate (in/hr.)
Black	< 23 dBZ	< .01.
Green	23 dBZ to < 32 dBZ	.01 - 0.1.
Yellow	32 dBZ to < 41 dBZ	0.1 - 0.5
Red	41 dBZ to < 50 dBZ	0.5 - 2
Magenta	50 dBZ and greater	> 2

Tabulka 3 Barevná stupnice v režimu „GND MAP“ (Garmin G1000 Pilot’s guide for Cessna Caravan s. 335)

Ground Map Mode Color	Intensity
Black	0 dB
Light blue	> 0 dB to < 9 dB
Yellow	9 dB to < 18 dB
Magenta	18 dB to < 27 dB
Blue	27 dB and greater

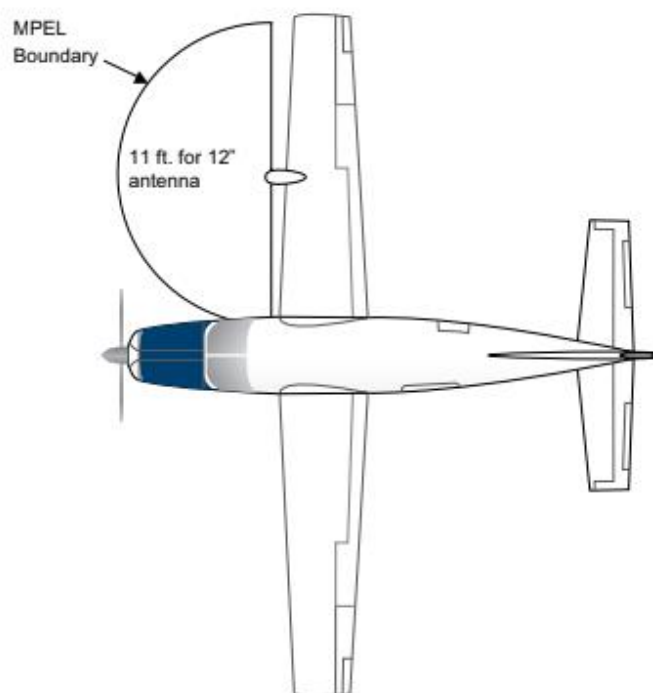
4.2. Praktická úloha č.1 – identifikace terénních překážek pomocí AWR

Cílem této úlohy je zjistit výšku překážky na základě znalosti šíře paprsku AWR, výšky překážky a její vzdálenosti od letounu. Měření bylo uskutečněno ze země, aby vzdálenost od cíle zůstala neměnná. Stroj byl přetažen na stojánku všeobecného letectví na letišti v Hradci Králové tak, aby před směřovala na sever (pozice letounu je vyznačena na obrázku 16 šipkou). Z dané pozice se jako nejlepší cíl jeví pohoří Krkonoše.



Obrázek 17 Umístění letounu na stojánce LKHK (www.mapy.cz)

Vzhledem k provozu AWR na zemi bylo potřeba zajistit, aby se v okolí letounu nevyskytovali lidé, ani předměty náchylné na radiaci. Výrobce jako bezpečnou vzdálenost pro 12" anténu označuje 11 ft a více od radaru (viz obrázek 18). Uvnitř vzniklé polokružnice je radiace vyšší, než připouští standard americké vlády, jehož maximální tolerovaná hodnota je 1 mW/cm^2 . V příručce je vzdálenost označena jako „MPEL boundary“, neboli hranice maximální přípustné míry ozáření.



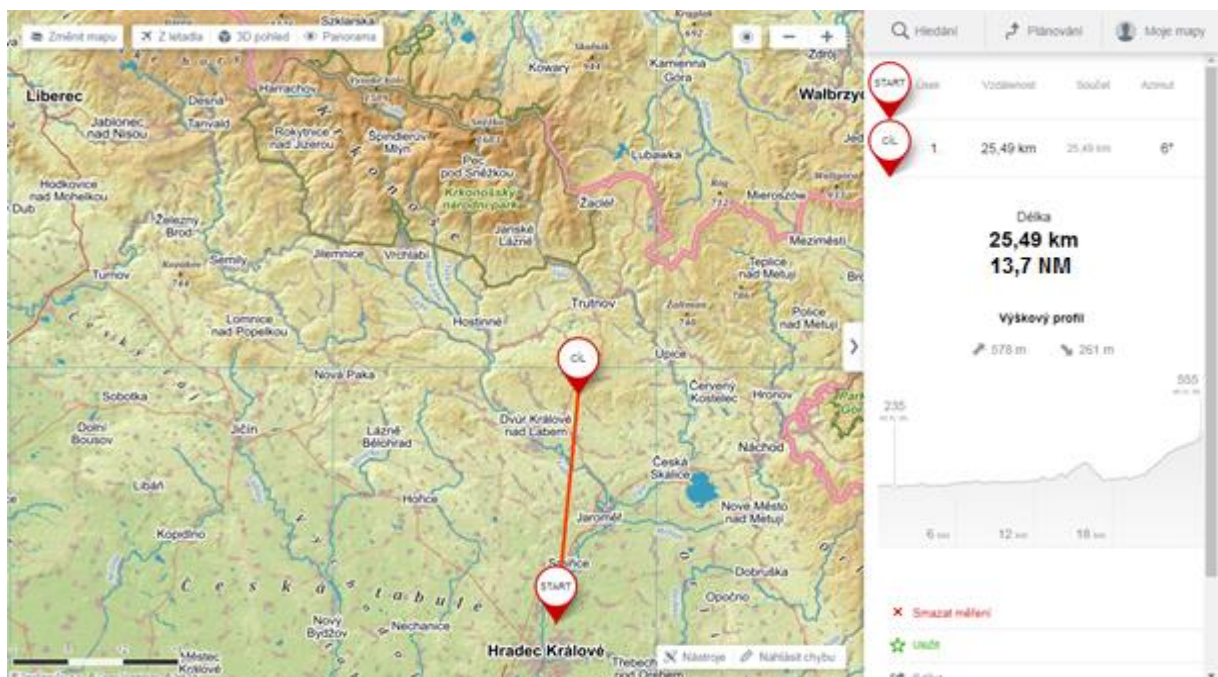
Obrázek 18 Vyznačení nebezpečné oblasti kolem radaru (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 320)

Na začátku měření byla anténa radaru nastavena na hodnotu mínus 5°. Při tomto nastavení již jsou patrné dvě výraznější oblasti ve vzdálenosti zhruba 15 NM a 25 NM (viz. obrázek 19). Oblast ve vzdálenosti 15 NM (27,8 km) byla identifikována jako Krkonošské podhůří a oblast vzdálená 25 NM (46,3 km) jako Černá hora. Pro měření výšky cíle byla vybrána Černá hora. K rozpoznání cílů byly použity mapy ze serveru www.mapy.cz a jako podklad map bylo zvoleno zeměpisné zobrazení (obrázky 20 a 21). Ze stejného zdroje byla převzata i výška Černé hory, 1299 m. Příď letounu byla namířena na 346°, odrazy od Krkonošského podhůří a Černé hory jsou od osy radaru odchýleny o zhruba 5°. Na obrázku 18 je zobrazené i nastavení radaru. Žlutý obdélník říká, jaký režim AWR je zvolen. V uvedeném případě je radar v režimu „WEATHER“, což je režim pro snímání počasí a paprsek radaru je kuželový. Radar nebyl nastaven pro snímání terénu záměrně, protože se v tomto režimu využívá méně často. Pokud by byl nastaven do režimu snímání terénu došlo by ke změně barevné škály, jak je možné vidět v tabulkách 2 a 3. Tyto dvě tabulky jsou převzaté přímo z POH letounu. V prvním sloupci je, v obou tabulkách, barevná stupnice. Druhý sloupec znázorňuje, pro jakou odrazivost se zobrazí určitá barva. V tabulce 2 je navíc třetí sloupec, informující o úhrnu srážek v palcích za hodinu. O změně kuželové charakteristiky paprsku na charakteristiku kosekantní se příručka nezmiňuje. Fialový obdélník informuje o tom, že je aktivní stabilizace antény. V bílém obdélníku lze odečíst informace o sklonu antény ve stupních („TILT“), „BEARING“ by informoval o zvolení určitého směrníku pro vertikální řez srážkami nalevo, případně napravo od stroje. Zobrazení by mělo následující podobu „X°L/R“. Při měření první úlohy nebyla tato

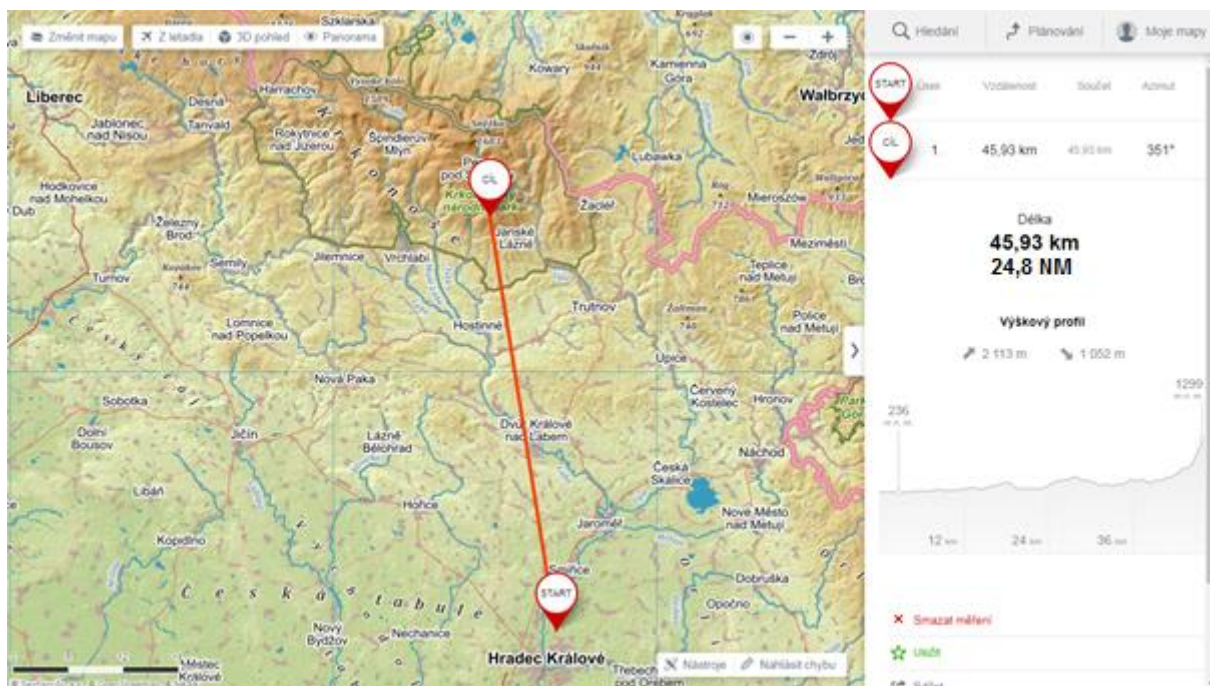
funkce využita. „SECTOR SCAN“ je nastaven na plné zobrazení („FULL“). Zisk antény („GAIN“) je nastaven do kalibrovaného režimu, ve kterém zobrazené barvy odpovídají intenzitě srážek. Červenou šipkou je označena čára označující momentální směr skenu scan line).



Obrázek 19 Popis údajů AWR na MFD



Obrázek 20 Směrník a vzdálenost od Krkonošského podhůří (Start-LKHK; Cíl-Krkonošské podhůří; www.mapy.cz)



Obrázek 21 Směrnik a vzdálenost k Černé hoře (Start-LKHK; Cíl-Černá hora; www.mapy.cz)

Při měření byl postupně zvyšován úhel antény radaru z výchozí hodnoty -5° až na hodnotu $+5,75^\circ$, kdy se Černá hora naposledy objevila na obrazovce radaru. Při zvyšování úhlu na vyšší hodnoty se v oblasti stále vyskytovaly odrazy, nebylo však možné s jistotou prohlásit, že se stále jedná o odraz zkoumaného cíle. Proto nejsou snímky od snímku nastavení sklonu na $+5,75^\circ$ v práci zahrnuty a není s nimi počítáno. Jak se zvyšování úhlu antény projevilo na zobrazení lze vidět na následujících obrázcích. Černá hora je na všech snímcích (obrázky 22 až 33) vyznačena modrým obdélníkem.



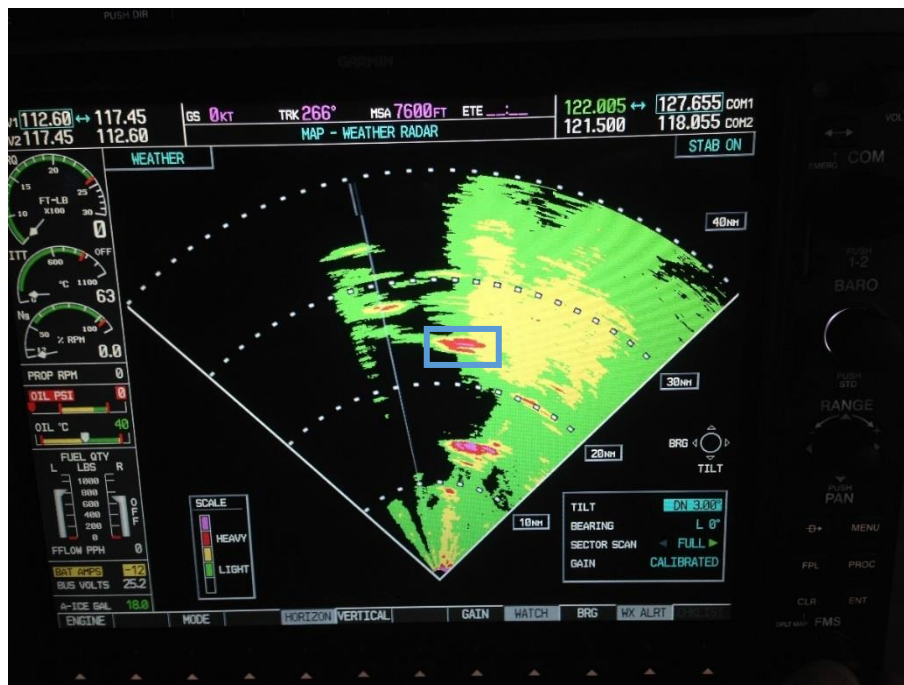
Obrázek 22 Sklon antény -5°

Na prvním snímku měření (obrázek 22) je možné zřetelně vidět odraz od Černé hory zbarvený barevnou škálou od zelené přes žlutou až do červené. Ve spodní části radaru je možné vidět i odrazy fialové, způsobené s největší pravděpodobností letištními budovami. Použité nastavení je sklon antény na -5° , zisk byl ponechán v kalibrovaném režimu. S funkcemi „BEARING“ ani „SECTOR SCAN“ nebylo manipulováno a jsou tak ve výchozím nastavení. Nastavení těchto dvou funkcí zůstalo neměnné po celou dobu měření úlohy.



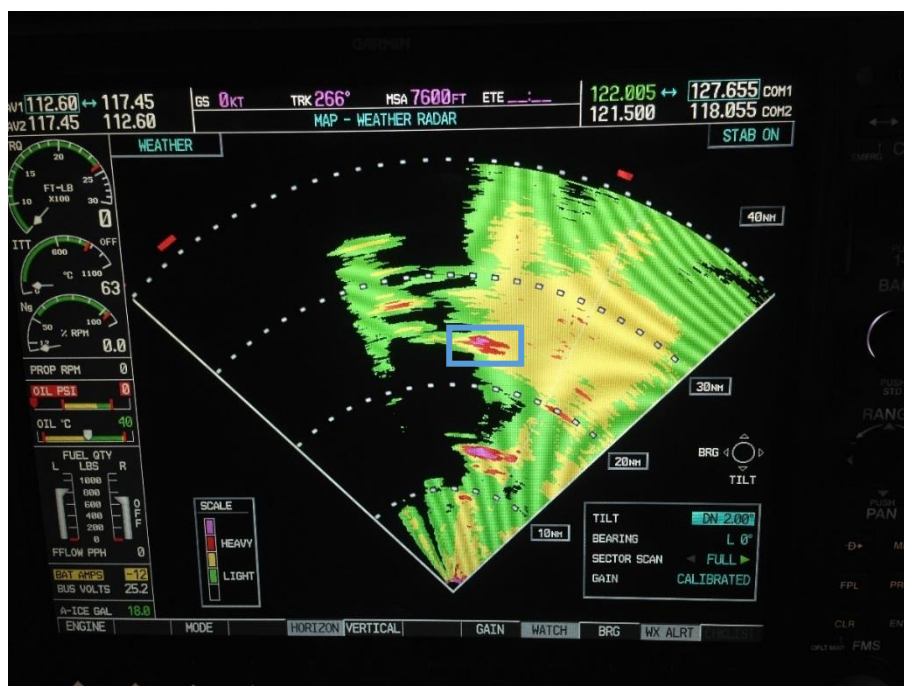
Obrázek 23 Sklon antény -4°

Na obrázku 23 byl sklon antény nastaven na hodnotu -4° . Dochází ke změně barevné škály cíle i okolí.

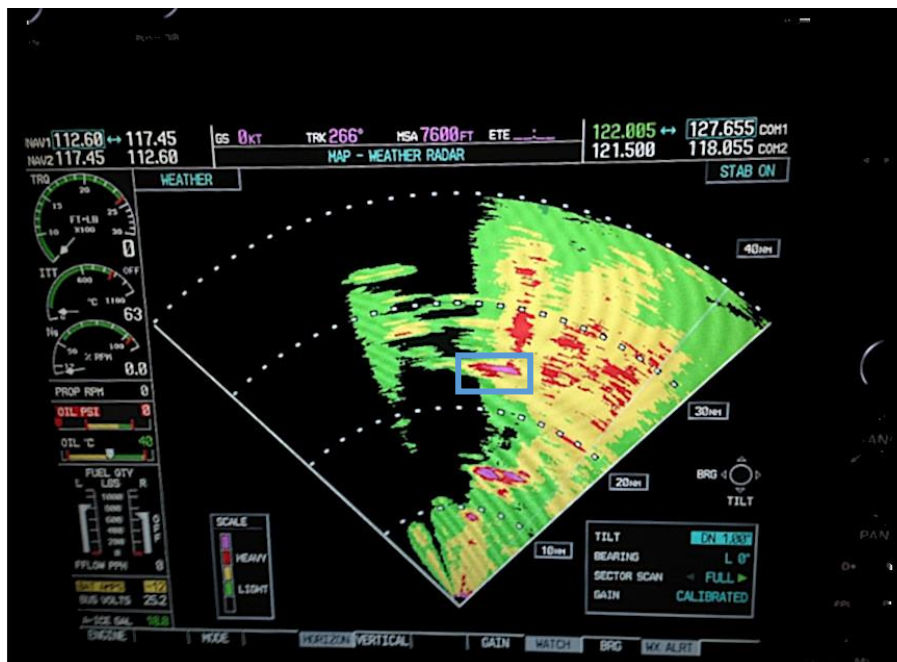


Obrázek 24 Sklon antény -3°

Obrázek 24 ukazuje zvýšení sklonu antény o 1 stupeň nahoru na hodnotu -3° . Dochází opět ke zvýšení odrazivosti cíle i okolního terénu.

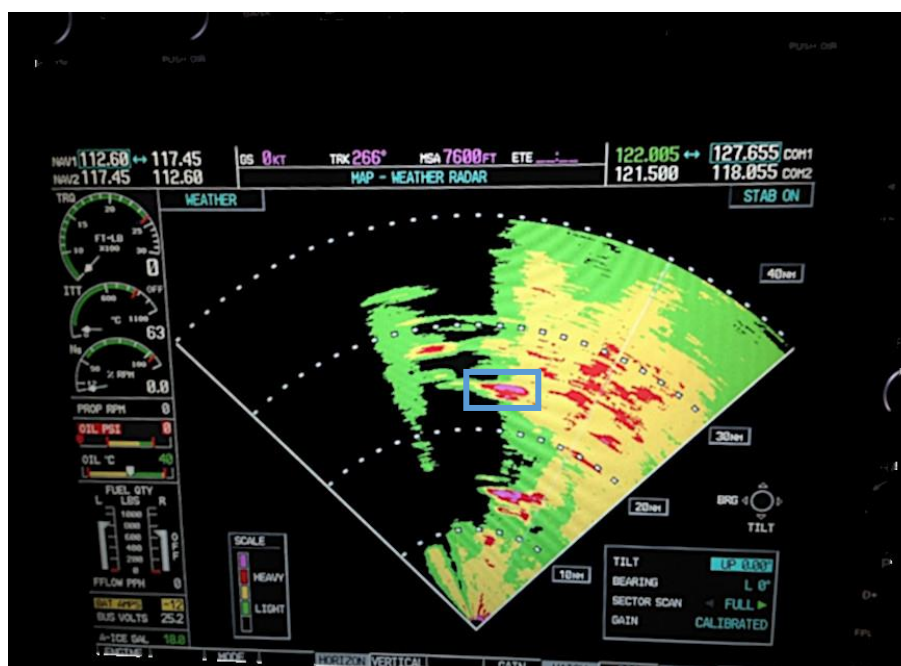


Obrázek 25 Sklon antény -2°



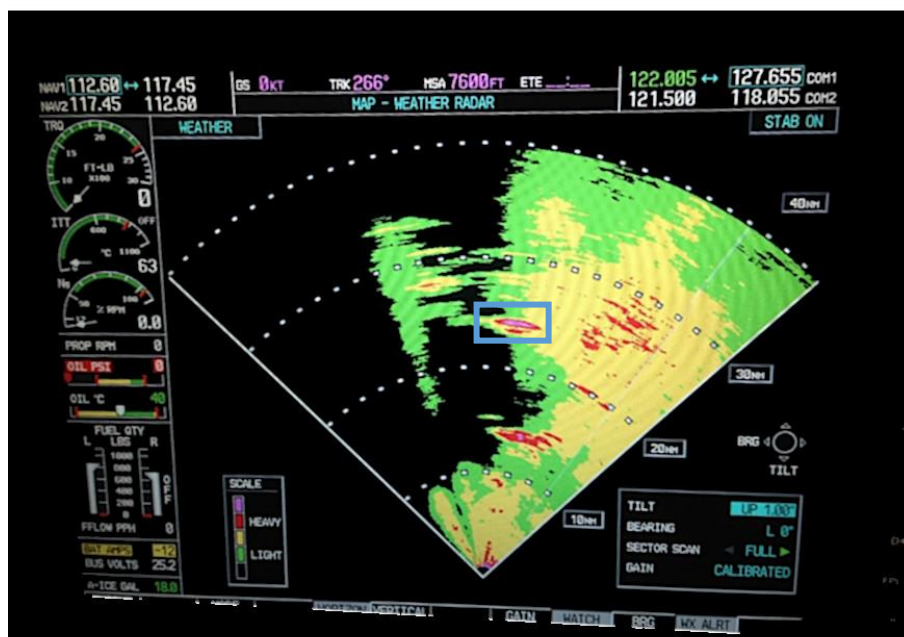
Obrázek 26 Sklon antény -1°

Na obrázcích 25 až 26 byl sklon nastaven na -2°, respektive -1°. Je stále vidět trend přibývání odrazivosti okolního terénu.



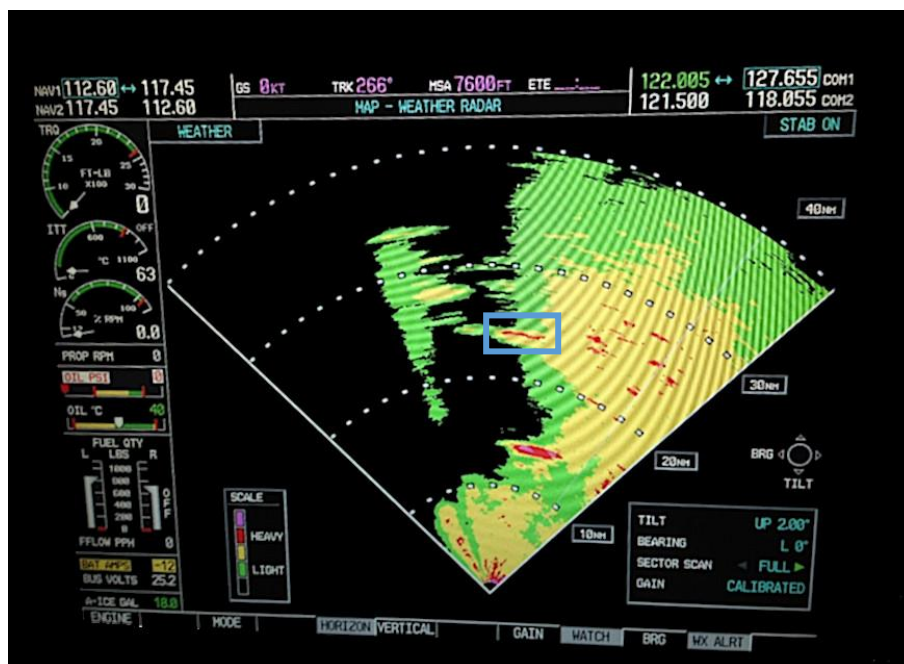
Obrázek 27 Sklon antény 0°

Na obrázku 27 byl sklon nastaven na 0° a lze pozorovat pozvolné ubývání odrazů od okolního terénu.



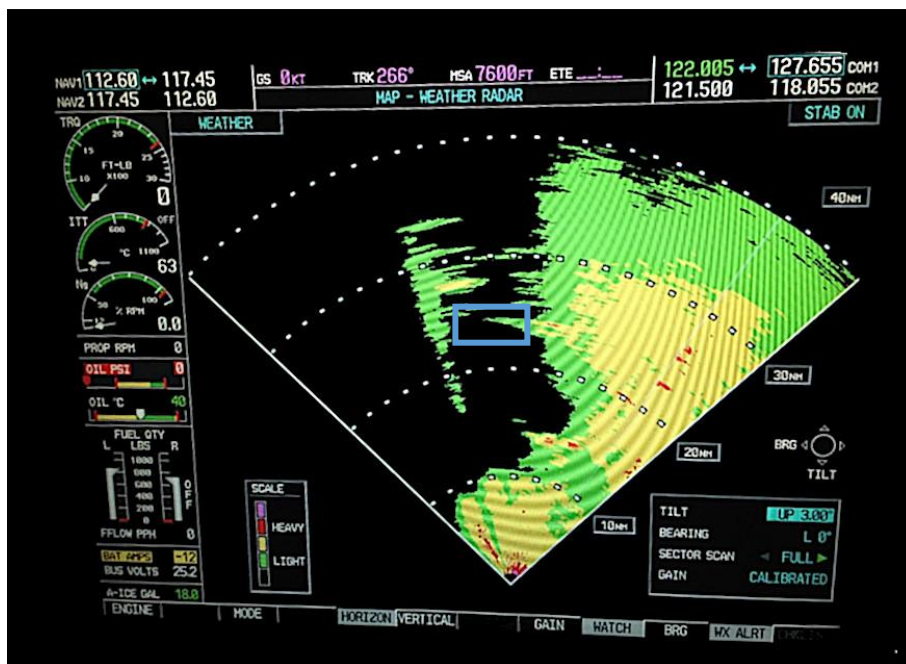
Obrázek 28 Sklon antény +1°

Na obrázku 28 je již ubývání odrazů od terénu ztelnější. Černá hora je však stále jasně identifikovatelná. Sklon antény byl +1°.



Obrázek 29 Sklon antény +2°

Při sklonu antény +2°, jak je vidět na obrázku 29 dochází i k mizení odrazů cíle.

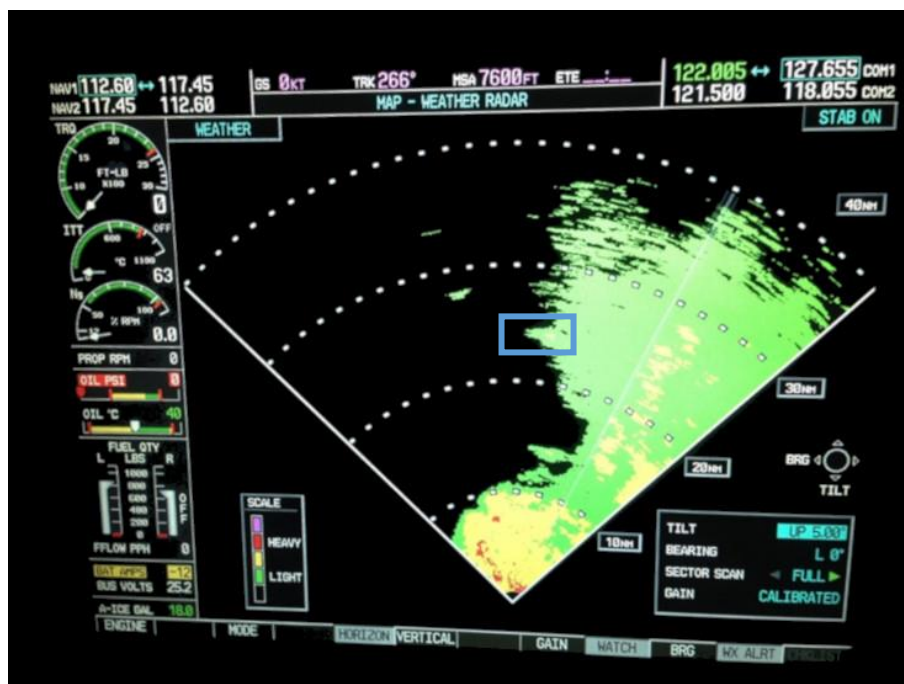


Obrázek 30 Sklon antény +3°



Obrázek 31 Sklon antény +4°

Při sklonu antény +3° na obrázku 30, nebo +4° na obrázku 31 se již z odrazů cíle vytratila červená barva. Odrazy od okolního terénu taktéž mizí a stejně tak i rušení od letištních budov.



Obrázek 32 Sklon antény +5°



Obrázek 33 Sklon antény +5,75°

Obrázek 33 byl poslední ze série vyhodnocovaných snímků. Černá hora je již vidět naprosto minimálně. Pokud je známa hodnota nastavení sklonu antény, vzdálenost zaměřovaného cíle a nadmořská výška, ve které se letoun nachází, je možné spočítat nadmořskou výšku cíle. Nadmořská výška letiště v Hradci Králové je dle oficiálních map 791 ft, což odpovídá 241 m. Vzdálenost od Černé hory je zhruba 25 NM, neboli 46,3 km. Šířka paprsku 12" antény je 7,8° (Trammell n. d.).

Pokud by nebyla šířka radarového paprsku známa ze specifikací radaru, lze jí získat pomocí rovnice:

$$BW = 70 * \left(\frac{\lambda}{D}\right) = 70 * \left(\frac{c}{fD}\right) = 70 * \left(\frac{3 * 10^8}{8833 * 10^6 * 0,3048}\right) = 7,8^\circ$$

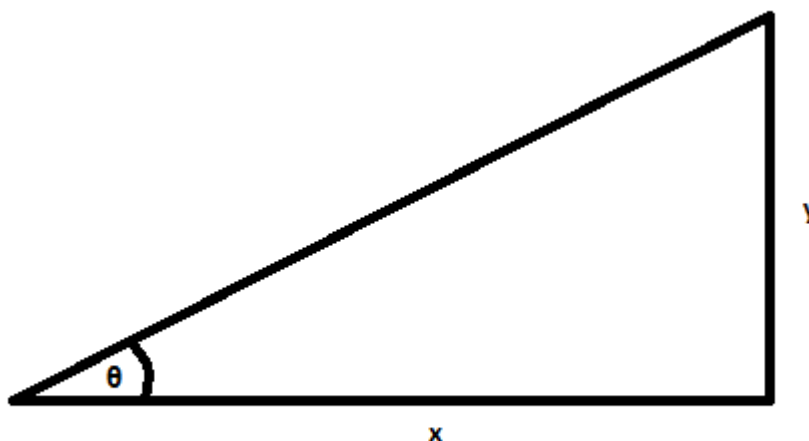
BW... šířka radarového paprsku [°]

λ ... vlnová délka [m]

D... průměr antény [m]

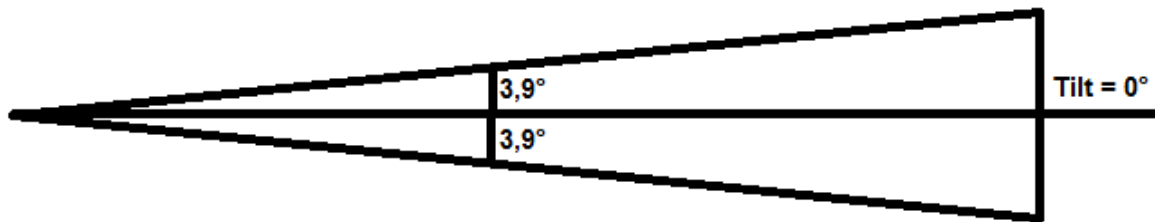
f... frekvence radaru [Hz] (Trammell n. d.)

Když jsou známy veškeré parametry, lze výsledek získat pomocí trigonometrie.



Obrázek 34 Grafické znázornění postupu výpočtu

Na ose x je znázorněna vzdálenost letounu od cíle, 46 300 m, zatímco na ose y je výška cíle. Úhel θ značí úhlovou hodnotu spodní části kužele radarového paprsku. Úvahou je, že pokud je sklon antény nastaven na 0° , kužel paprsku bude osově souměrný, tedy zasahuje $3,9^\circ$ pod rovinu 0° a $3,9^\circ$ nad rovinu.



Obrázek 35 Nákres radarového paprsku o šířce 7,8°

Pokud se zvedne úhel nastavení antény na +5°, bude spodní část kužele paprsku 1,1° nad rovinou 0°. Tato hodnota se poté aplikuje v rovnici:

$$y = \tan(\theta) * x = \tan(1,1) * 46\,300 = 889 \text{ m}$$

Výsledkem této rovnice je výška cíle vztažena k letounu. Pro nadmořskou výšku je potřeba přičíst nadmořskou výšku letiště, kde se stroj nachází.

$$y_{\text{nadmořská}} = 889 + 241 = 1130 \text{ m}$$

Výsledkem tedy je, že nadmořská výška Černé hory je více než 1130 m a méně než 1736 m (tato hodnota je získána při sklonu antény +5,75°, obrázek 33, na kterém již nešlo jasně identifikovat Černou horu). Odchylku vypočtené hodnoty od hodnoty získané z map lze přisoudit ne zcela přesnému zobrazení vzdálenosti z MFD, a velikosti kroku nastavení sklonu antény AWR. Při úvaze nastavení sklonu antény 0,125° (polovina kroku nastavení), by na vzdálenost 46 300 m vznikla nepřesnost ±101 m. Vzhledem k použitému rozsahu jsou na MFD jednoznačné 10 NM kroky vzdálenosti. Polovina je 5 NM, což odpovídá 9260 m. V extrémním případě při započítání obou nepřesností, by vznikla následující situace:

$$y = \tan(1,225) * 55560 = 1188 \text{ m}$$

Po přičtení nadmořské výšky stojánky, odkud bylo měření provedeno, bude výsledná výška:

$$y_{\text{nadmořská}} = 1188 + 241 = 1429 \text{ m}$$

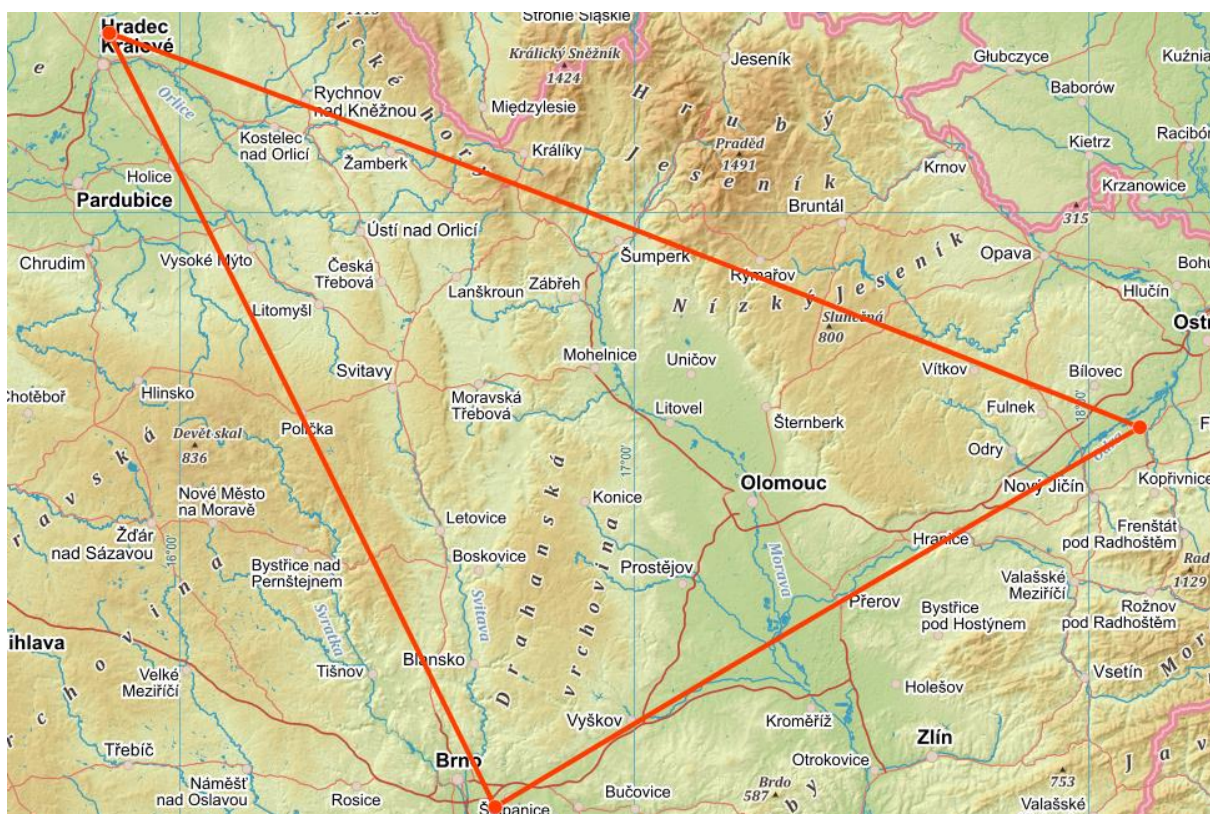
Při uvažování s opačnými extrémy a za použití stejného vzorce, byla by výsledná hodnota:

$$y_{\text{nadmořská}} = 630 + 241 = 871 \text{ m}$$

Po započítání obou možných nepřesností vyšla výška 1429 m, respektive 871 m, namísto správných 1299 m. Vzniklo tak rozmezí 558 m. Naměřený výsledek 1130 m se od správné hodnoty 1299 m v této odchylce pohybuje.

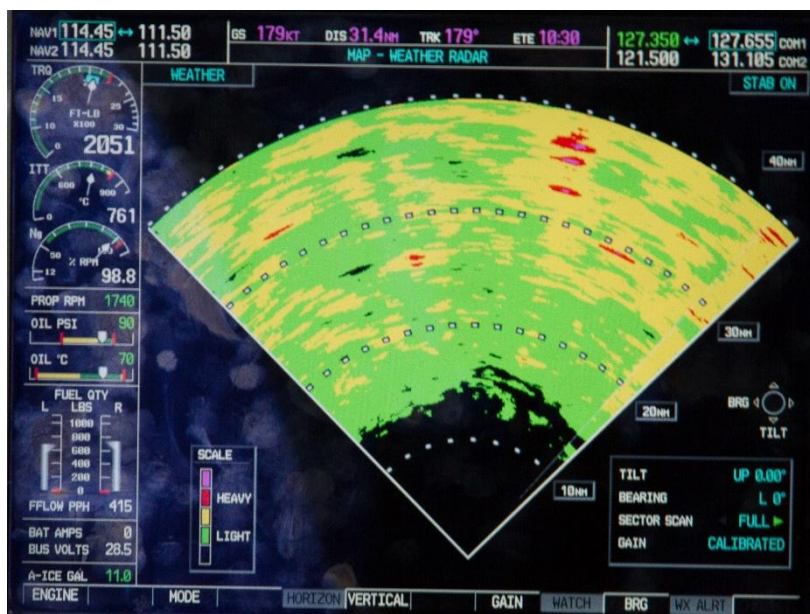
4.3. Praktická úloha č.2 – snímání srážek s různým nastavením AWR a vertikální řezy srážkami

Měření této úlohy se odehrálo za letu během dne s vysokou konvektivní aktivitou. Snímky byly pořízeny ze sedadla pasažéra pomocí digitální zrcadlovky. Cílem bylo zachytit pomocí AWR meteorologické jevy při různých hodnotách nastavení sklonu antény i zisku a měnit nastavení radaru tak, aby se projevila většina jeho funkcí. Z důvodu měření za letu nebylo možné kvalitně stabilizovat a umístit fotoaparát. První série fotografií znázorňuje skeny radaru při nastavení sklonu antény na 0° , $-0,5^\circ$ a $+0,25^\circ$ (obrázky 37 až 39).

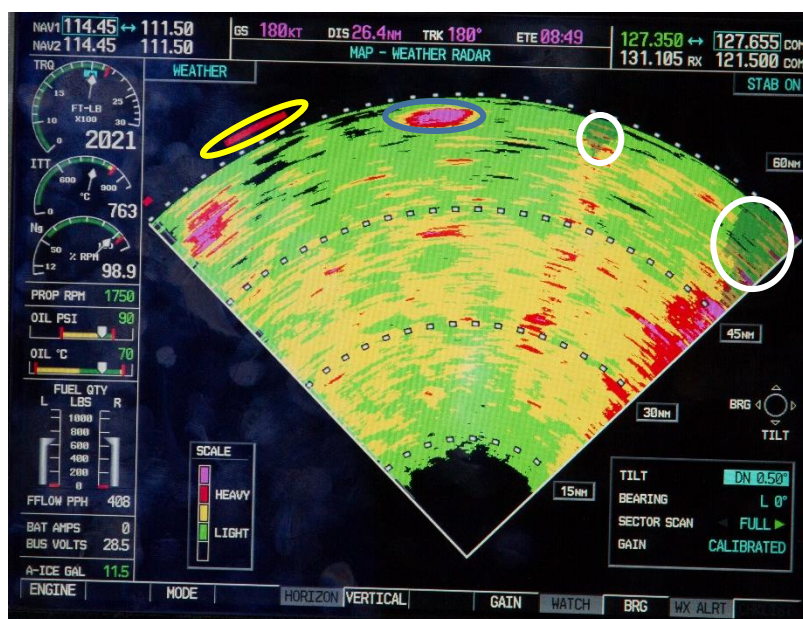


Obrázek 36 Mapa s trasou letu (www.mapy.cz)

Na obrázku 36 je znázorněna trasa letu. Měření probíhalo především na úseku z Hradce Králové do Brna. Výška letu se pohybovala v rozmezí FL090 a FL080. Na obrázku 37 jsou na 15 NM patrné odrazy od země, tzv. „ground clutter“.

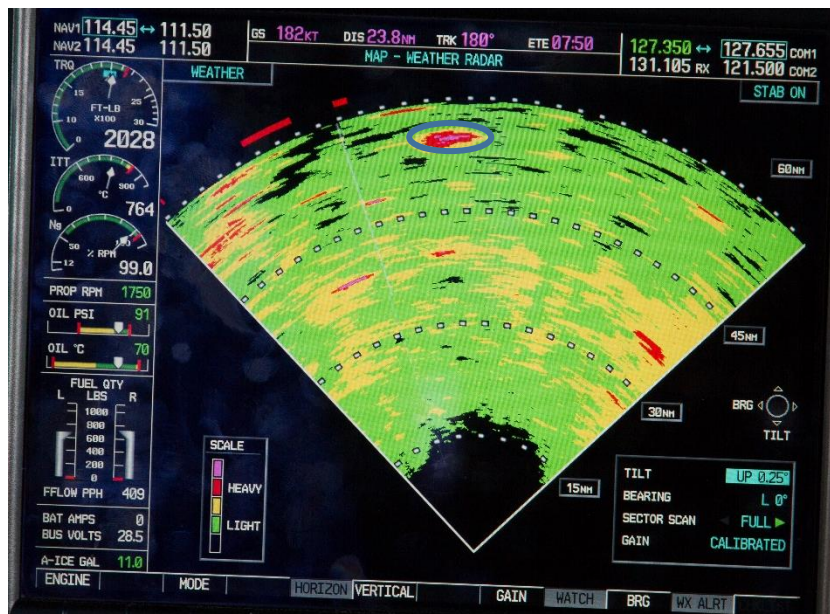


Obrázek 37 Sken s nastavením sklonu na 0°



Obrázek 38 Sken s nastavením sklonu na -0,5°

Jak je vidět na obrázku 37, hodnota 0° byla výchozí hodnotou. Při snížení sklonu antény na -0,5° (obrázek 38) se na trase letu objevil odraz upozorňující na silné srážky (označen modrou elipsou), nebylo však v danou chvíli zřejmé, zda se jedná o odraz od srážek, nebo od terénu. Lze si také všimnout indikace funkce WATCH® o potenciálně nevěrohodném zobrazení (bílé elipsy) a indikace funkce Weather Alert o nebezpečném počasí za zobrazeným rozsahem radaru (žlutá elipsa).



Obrázek 39 Sken s nastavením sklonu na +0,25°

Proto byl sklon změněn na +0,25° (obrázek 39). Ani na obrázku 39 není zcela jednoznačné, zda se jedná o bouři, nebo o odraz města. Vysoké pevné překážky a bouře mají za sebou, na rozdíl od měst, radarový stín. Odraz na obrázku 38 a 39 může mít za sebou náznak tohoto stínu. Ten však nemusí být dostatečně hluboký, aby se na zobrazení projevil. Pokud by se chtěl pilot přesvědčit, že se opravdu jedná o izolovanou bouři, musel by vyjmout zisk antény z kalibrovaného režimu a zisk antény snížit. Tímto by došlo ke snížení saturace zobrazení a možný stín by se na radaru objevil. Jak by vypadala obrazovka radaru po použití tohoto postupu je vidět na obrázku 40. Manuální zisk antény lze nastavit označením pole „GAIN“, jak je znázorněno na obrázku 40. Zobrazí se posuvník, jímž se nastavuje hodnota zisku vzhledem k hodnotě kalibrované, vyznačené bílým ukazatelem. Na obrázku 40 je tento ukazatel zvýrazněn červenou elipsou. Tato hodnota je klíčová pro správné zobrazení intenzity srážek. Někdy může být výhodné i zvýšení zisku antény. Tento postup by se mohl hodit například v situaci na obrázku 10. Na radaru lze vidět odraz s velkým radarovým stínem. Mohlo by se zdát, že za odrazem není žádné nebezpečné počasí. Aby se pilot přesvědčil, zda tomu tak opravdu je, může manuálně zvýšit zisk antény a „prosvítit“ tak tmavou oblast. Je třeba mít na paměti, že během tohoto procesu dojde ke značnému zkrácení zobrazení srážek, kvůli kterým radarový stín vznikl (budou se jevit jako ještě intenzivnější). Proto je zapotřebí po provedení tohoto úkonu vrátit zisk do kalibrovaného nastavení, aby radar srážky zobrazoval věrohodně.



Obrázek 40 Zobrazení se sníženou hodnotou zisku antény

Zkoumaný odraz (na obrázku 40 označen žlutou elipsou) se při snížené hodnotě zisku antény jeví jako mnohem slabší. S největší pravděpodobností se jednalo o oblačnost vyfocenou na obrázku 41, definitivně to ale říci nelze, protože trať nevedla do dostatečné blízkosti k oblačnosti. Na radaru jsou ještě stále vidět dva fialové odrazy. V tomto případě se jedná s největší pravděpodobností o města. Lze si všimnout absence jakéhokoliv radarového stínu. Změna zisku antény má na terén mnohem menší vliv než na srážky. Pro přehlednost jsou tyto dva cíle znázorněny modrou elipsou.



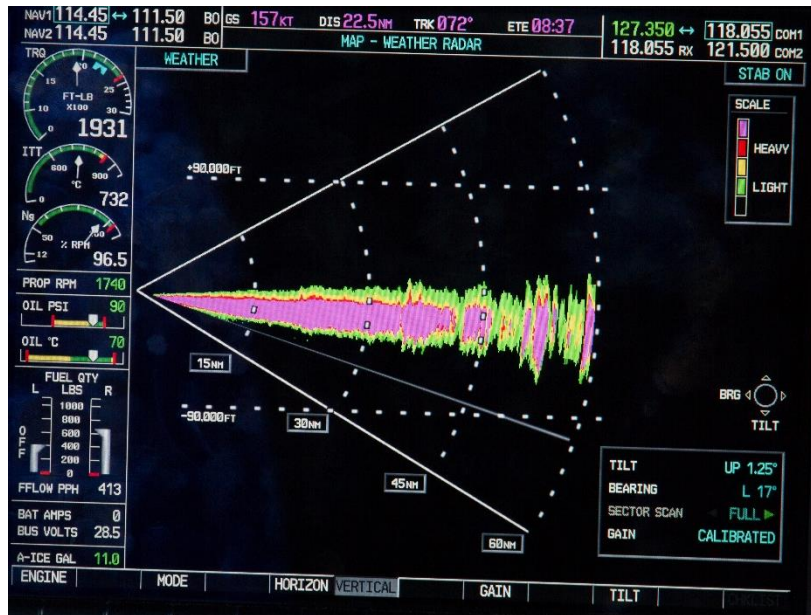
Obrázek 41 Pravděpodobně zachycená oblačnost při pohledu z letounu

Na obrázcích 42 až 45 je znázorněno, jak se projeví změna zisku antény a zároveň ukázka vertikálního řezu srážkami.



Obrázek 42 Sken radaru s aktivovaným režimem BRG

Na obrázku 42 lze spatřit modrou čáru, indikující námi zvolený směr. Tímto směrem se vykreslí vertikální řez srážkami. Hodnota byla nastavena na 17° doleva od směru letu.

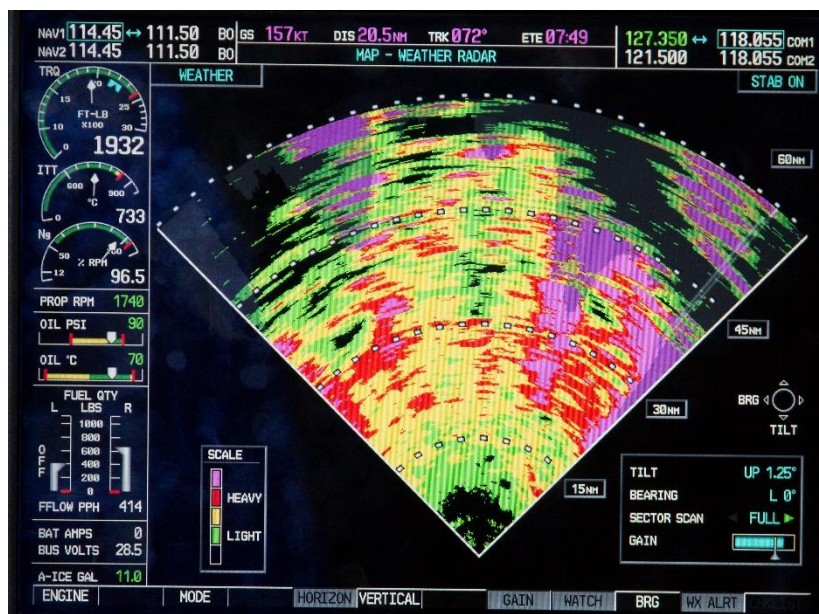


Obrázek 43 Sken radaru v režimu vertikálního řezu srážek

Obrázek 43 je již zmíněný vertikální řez srážkami. Z tohoto zobrazení tak pilot dokáže získat rámcovou představu o tom, jaký je vertikální vývoj oblačnosti se srážkami vzhledem k výšce jeho letu. Odečtení vzdálenosti je však velmi hrubé, jelikož horizontální linie při tomto nastavení rozsahu symbolizuje výšku $\pm 90\,000$ ft.



Obrázek 44 Sken radaru s manuální volbou zisku antény



Obrázek 45 Sken radaru s hodnotou zisku antény nastavenou na vysokou hodnotu

Při prohlednutí obrázku 42, 44 a 45 je jasně vidět změna zobrazení v závislosti na nastavení zisku antény. Na obrázku 42 byl zisk v kalibrovaném režimu, manuálně snížený je na obrázku 44 a manuálně zvýšený od kalibrované hodnoty je na obrázku 45. Obrázek 45 je na první pohled značně přesaturovaný a lze si povšimnout i šedivě zbarvených oblastí funkce WATCH®, varující pilota před nevěrohodností zobrazení.

5 Závěr

Navzdory neustálému vývoji a zdokonalování palubních meteorologických radarů dochází k řadě incidentů a nehod způsobených neznalostí principu jeho fungování, či nesprávnou obsluhou tohoto systému. Věnuje se mu jen malá část výcviku pilotů, což může mít za následek ne zcela efektivní využití všech možností, které systém poskytuje, nebo v horším případě naprosto chybnou interpretaci zobrazovaných informací. AWR již není výsadou velkých dopravních letadel, ale dostává se i do letadel všeobecného letectví, čímž se značně zvyšuje počet letců, kteří s ním mohou přijít do styku a kteří budou využívat jeho výstupy k vyhýbání se nebezpečným meteorologickým jevům a k učinění kritických rozhodnutí.

Při měřeních provedených v této práci byla předvedena práce AWR při snímání terénu i konvektivní oblačnosti. Vcelku netradiční měření snímání terénu ze stojánky letiště úspěšně popsalo práci se sklonem antény a vysvětlilo prvky zobrazení na MFD. Měření uskutečněné za letu bylo zaměřeno nejen na nastavení sklonu antény, ale také na sledování změn ve zobrazení při manipulaci se ziskem antény a na interpretaci varovných funkcí systému Garmin GWX68. Pro zajímavost bylo provedeno i vertikální snímání pomocí AWR.

Tato práce může sloužit jako podklady pro studium začínajících pilotů, které by měly pomoci k prvotnímu seznámení se s AWR, některými jeho funkcemi a vztahy mezi nimi. Zejména provedená měření provedena ze země i za letu, která popisují práci s meteorologickým radarem a rozebírají jeho výstupy mohou urychlit pochopení vztahů mezi jednotlivými nastaveními. POH letounu poskytuje informace o zabudovaném AWR, je však zaměřena spíše na ovládání konkrétního systému, než na obecné principy a na základy, které jeho provoz může skýtat. Jsou to však většinou právě chybějící znalosti o jevech doprovázejících provoz AWR, které dostanou let do nebezpečné situace.

Věřím, že obsah této práce bude využit k základnímu seznámení se s fungováním palubního meteorologického radaru a s jeho možnostmi i omezeními. Je třeba mít na paměti, že během tvorby této bakalářské práce byl pro měření a bližší zkoumání dostupný pouze AWR Garmin GWX68. Nebylo možné rovnocenné srovnání se systémy používané v dopravních letadlech. Vzhledem k intenzivnímu zlepšování v oblasti avioniky, a tudíž i implementací nových technologií do AWR je jisté, že nové typy meteorologických radarů budou ještě lepší než použitý systém. Obecné principy práce s AWR však zůstanou nezměněny.

Použitá literatura

AUSTRALIAN GOVERNMENT BUREAU OF METEOROLOGY. n. d. *How Radar Works* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/what_is_radar.shtml#re

BEA. 2014. *Report - serious incident* [online]. [cit. 2018].

DUDA, Jeff. n. d. A History of Radar Meteorology: People, Technology and Theory. In: *Iowa State University* [online]. Dostupné z: <http://www.meteor.iastate.edu/~jdduda/portfolio/HistoryPPT.pdf>

GILBERT, Ian. n. d. www.airpilots.org. In: *Weather Radar* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.airpilots.org/ruth-documents/study-papers/Weather%20Radar.pdf>

HASKEL, Eddie. n. d. *Gulfstream G450 Systems* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: http://code7700.com/g450_avionics.htm#radar

JANOUSHKOVÁ, Šárka. 2005. *Radionavigace druhá část (multimediální prezentace)*. Praha: Fakulta dopravní ČVUT v Praze.

JEPPESSEN. 2004. *Radio Navigation*. Neu-Isenburg: Jeppesen. 0884873536.

LESKINEN, Matti. 1998. *Echoes in clear weather* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <http://www.helsinki.fi/~mleskine/engl/kike.html>

National Weather Service [online]. n. d. [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/mkx/using-radar>

OXFORD. 2008. *Navigation 2*. 4th ed. Oxford: Oxford Aviation Academy. 9781906202606.

ŘÁDA, Ivan. 2001. *Anglicko-český letecký slovník*. Voznice: LEDA, spol. s.r.o.

RAYMOND G. BELANGER. 1978. *Aircraft Accident Report-Southern Airways Inc., DC-9-31, N1335U, New Hope, Georgia, April 4, 1977* [online]. National Transportation Safety Board [cit. 2018]. Dostupné z: <http://libraryonline.erau.edu/online-full-text/ntsb/aircraft-accident-reports/AAR78-03.pdf>

SKOLNIK, Merrill. 2008. *Radar handbook*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. 978-0-07-148547-0.

TRAMMELL, Archie. n. d. *Garmin's New GWX 68 Radar* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/en-US/blog/wp-content/uploads/2006/08/flyingMag.pdf>

WERTH, John. 2014. Airborne Weather Radar Limitations. In: www.weather.gov [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/media/publications/front/14dec-front.pdf>

WOLFF, Christian. n. d. *Radar basics - angular resolution* [online]. [cit. 2018]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Angular%20Resolution.en.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Grafické znázornění vlnové délky a periody (https://scienceaid.net/images/c/c8/wave.png)	8
Obrázek 2 Znázornění průběhu frekvenční modulace (Jeppesen, 2004 str. 1/20).....	10
Obrázek 3 Radar WSR-57 (https://en.wikipedia.org/wiki/WSR-57#/media/File:WSR-57_antenna.jpg).....	13
Obrázek 4 DECCA radar Typ-41(http://woottonbridgeiow.org.uk/decca-legacy/images/p92.jpg)	14
Obrázek 5 Schéma funkce stabilizace antény AWR, sklon antény je nastaven na 0°	15
Obrázek 6 Komponenty AWR typu Honeywell Primus 660 (http://www.radartutorial.eu/19.kartei/08.airborne/karte005.en.html)	16
Obrázek 7 U zobrazených případů lze předpokládat výskyt krup, a tak i turbulence. (Oxford 2008, s. 221).....	17
Obrázek 8 Rozsah nastavení sklonu antény (Oxford 2008, s.223).....	18
Obrázek 9 Vyzařovací charakteristika radaru při mapování terénu (kosekantní) a pro mapování počasí (kuželová) (Oxford 2008, s. 223).....	19
Obrázek 10 Výnos z AWR ukazující útlum radaru způsobený silnými srážkami (Werth 2014, s.2)	20
Obrázek 11 Příklad zobrazení v režimu "contour" (Oxford,2008 s. 242).....	21
Obrázek 12 Radar systému GWX 68 na pravém křídle C208	24
Obrázek 13 Zobrazení šířky paprsku 12" antény na C208 (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 316)	25
Obrázek 14 Výnos AWR na MFD s aktivní funkcí WATCH® a Weather Alert	26
Obrázek 15 Zobrazení varování Weather Alert na PFD (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 334)	26
Obrázek 16 Ovládací prvky na MFD	27
Obrázek 17 Umístění letounu na stojánce LKHK (www.mapy.cz)	28
Obrázek 18 Vyznačení nebezpečné oblasti kolem radaru (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 320)	29
Obrázek 19 Popis údajů AWR na MFD	30
Obrázek 20 Směrník a vzdálenost od Krkonošského podhůří (Start-LKHK; Cíl-Krkonošské podhůří; www.mapy.cz)	30
Obrázek 21 Směrník a vzdálenost k Černé hoře (Start-LKHK; Cíl-Černá hora; www.mapy.cz)	31
Obrázek 22 Sklon antény -5°	32
Obrázek 23 Sklon antény -4°	32

Obrázek 24 Sklon antény -3°	33
Obrázek 25 Sklon antény -2°	33
Obrázek 26 Sklon antény -1°	34
Obrázek 27 Sklon antény 0°	34
Obrázek 28 Sklon antény +1°	35
Obrázek 29 Sklon antény +2°	35
Obrázek 30 Sklon antény +3°	36
Obrázek 31 Sklon antény +4°	36
Obrázek 32 Sklon antény +5°	37
Obrázek 33 Sklon antény +5,75°	37
Obrázek 34 Grafické znázornění postupu výpočtu	38
Obrázek 35 Nákres radarového paprsku o šířce 7,8°	39
Obrázek 36 Mapa s trasou letu (www.mapy.cz)	40
Obrázek 37 Sken s nastavením sklonu na 0°	41
Obrázek 38 Sken s nastavením sklonu na -0,5°	41
Obrázek 39 Sken s nastavením sklonu na +0,25°	42
Obrázek 40 Zobrazení se sníženou hodnotou zisku antény	43
Obrázek 41 Pravděpodobně zachycená oblačnost při pohledu z letounu	44
Obrázek 42 Sken radaru s aktivovaným režimem BRG	44
Obrázek 43 Sken radaru v režimu vertikálního řezu srážek	45
Obrázek 44 Sken radaru s manuální volbou zisku antény	45
Obrázek 45 Sken radaru s hodnotou zisku antény nastavenou na vysokou hodnotu	46
Tabulka 1 Přehled frekvencí používaných v civilním letectví (Oxford 2008, s. 8)	9
Tabulka 2 Barevná stupnice v režimu „WEATHER“ (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 332)	27
Tabulka 3 Barevná stupnice v režimu „GND MAP“ (Garmin G1000 Pilot's guide for Cessna Caravan s. 335)	27