

VLIV VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA FUNKCI RADARŮ

WINDMILL POWER TURBINE EFFECTS ON RADAR FUNCTIONS

Vladimír Schejbal^{1*}, Pavel Bezoušek², Dušan Čermák¹

Abstrakt Článek analyzuje vliv umístění větrných elektráren na funkci pozemních radarů používaných pro řízení letového provozu. Uvažují se zejména primární radary přehledové, přibližovací a sledovací v kmitočtových pásmech 1 GHz až 10 GHz. Přitom se článek věnuje řešení odhadu efektivní odrazné plochy (RCS) elektrárny s ohledem na typické tvary a rozměry větrných elektráren a odhadu zastínění sledovaného prostoru vlivem jednotlivých větrných elektráren a skupiny elektráren pro primární i sekundární radary. Protože uvedené problémy jsou obvykle velice komplikované a numerická simulace bývá extrémně náročná jak z hlediska doby výpočtů, tak z hlediska rozsahu paměti, jsou zde uvedeny zjednodušené vztahy, umožňující základní výpočty pro předběžnou analýzu.

Klíčová slova větrná elektrárna, radary pro řízení letového provozu, efektivní odrazná plocha

Summary The paper analyses windmill power turbines (WT) effects on ground-based radar functions, used for air traffic control. The primary radars, especially surveillance, landing and tracking systems for frequency ranges 1 GHz up to 10 GHz, are considered. The paper is dealing with the estimations of radar cross sections (RCS) considering typical shapes and dimensions of windmill turbines and with shadowing due to an individual WT and groups of power stations for primary and secondary radars. As the given problems are usually very complicated, and numerical simulations are extremely demanding from viewpoint of time and memories, the simplified equations are given allowing the basic preliminary analyses.

Keywords windmill power turbine, air traffic control radars, radar cross section

1 ÚVOD

Cílem článku je analýza vlivu umístění větrných elektráren na funkci pozemních radarů používaných pro řízení letového provozu, zejména primární radary přehledové, přibližovací a sledovací v kmitočtových pásmech 1 GHz až 10 GHz (Bezoušek a Schejbal, 2004), (Bezoušek a Schejbal, 2011), (Skolnik, 1990) a (Zavodny et al., 2019). Přitom je nutné se věnovat řešení následujících problémů:

- Odhad efektivní odrazné plochy (RCS) elektrárny s ohledem na typické tvary a rozměry větrných elektráren

¹ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika

² Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, náměstí Čs. legií 565, 532 10 Pardubice, Česká republika

* korespondenční autor, tel.: +420 466 036 293, e-mail: vladimir.schejbal@upce.cz

- Odhad zastínění sledovaného prostoru vlivem jednotlivých větrných elektráren a skupiny elektráren pro primární i sekundární radary

Moderní teoretický výzkum RCS závisí především na dosažitelném výkonu počítačů. Je nutné uvažovat roli vývoje paměti a rychlosti počítačů na schopnost řešit problémy rozptylu elektromagnetických vln. I když výkonnost počítačů roste zhruba exponenciální řadou, je velmi obtížné řešit rozptyl od velkých těles (o rozměrech značně větších než vlnová délka). Ovšem inovace numerických metod rychlého řešení rozsáhlých matic a paralelních výpočtů může pomoci v této situaci. Měření RCS není méně důležité než teoretické modelování. Moderní měřicí zařízení řízené počítačem vždy poskytuje hlubší pohled do mechanismů rozptylu, které se vyskytují jak u jednoduchých, tak i u složitých cílů.

Protože uvedené problémy jsou obvykle velice komplikované a numerická simulace bývá extrémně náročná (Bhattacharyya a Sengupta, 1991) a (Greving et al., 2008) jak z hlediska doby výpočtů (typický týden, neuvažujeme-li podstatně delší čas nutný pro přípravu dat), tak z hlediska rozsahu paměti. Jsou zde uvedeny zjednodušené vztahy, umožňující základní výpočty pro předběžnou analýzu, neboť je zpravidla nutné analyzovat řadu variant.

Základní metodou je fyzikální optika (PO), popř. její zpřesnění, tzn. fyzikální teorie difrakce (PTD), (Ufimtsev, 1996). Je to metoda pro přibližné vyjádření rozptylu těles (zejména velice komplikovaných těles) pro dostatečně vysoké frekvence. Tato metoda se ukázala jako velice plodná idea. Např. v Lockheed a Northrop nazývali PTD „průmyslově silnou“ difrakční teorií na rozdíl od preferovaného přístupu amerických univerzit, tzn. geometrické optiky (GO) a geometrické teorie difrakce (GTD), který nebyl dostatečně vyvinutý pro řešení problémů návrhu „neviditelných“ (stealth) letadel (Ufimtsev, 2007).

Jako řada dobrých teorií je PTD mnohem snadněji aplikovatelná, než vysvětlitelná. PTD je založená na dvou důležitých principech – fyzikálním a geometrickém. Fyzikální princip ukazuje, jak lze vypočítat pole mimo těleso jako integrál vhodně zvolených hodnot na povrchu tělesa. Geometrický princip říká, že pro dostatečně vysokou frekvenci, kdy je vlnová délka dostatečně malá ve srovnání s kritickými rozměry tělesa, lze plošné integrály vyjádřit asymptoticky a tím dostat popis celkového pole mimo těleso pomocí geometrických paprsků včetně difrakčních paprsků. Změnu amplitudy pole podél paprsků lze počítat geometricky vyšetřováním divergence a konvergence svazků paprsků s výjimkou oblastí obklopujících a) geometrické oblasti stínu, kde sledování paprsku by předvíдалo nespojitosti na rozhraní a b) kaustiku, tzn. místo, kde se sousední geometrické paprsky stýkají nebo kříží (jako v ohnisku) kde sledování paprsků by předvíдалo nekonečně velké pole. Správnou hodnotu pro tyto oblasti, které se zmenšují pro zvyšující frekvenci, lze nalézt pomocí uniformních asymptotických technik pro vyjádření plošných integrálů. Jedna z důležitých vlastností PTD je schopnost počítat přesně pole na hranicích stínu a oblastech kaustik, kde často GTD a její modifikace selhávaly. To je zvláště důležité pro konstrukci cílů s malou RCS, neboť nás často zajímá rozptyl rovinné vlny ve vzdálených oblastech od těles s příkými, nebo mírně zaoblenými hranami, což jsou konfigurace, pro které části vzdálených oblastí leží v oblasti kaustik.

Další velké výhody PTD jsou ve způsobu určování hodnot pole. Vedle uniformní části, která je definovaná všude na povrchu, existuje neuniformní část, která se používá jako korekční člen. Pro elektromagnetické vlny je obvykle uniformní část daná PO, i když ne vždycky. To znamená, že plošné hodnoty pole se počítají stejně, jako kdyby tento bod byl na nekonečné rovinné tečné ploše se stejnými okrajovými podmínkami. Neuniformní pole pro nepenetrující těleso (např. dokonalý vodič) mají tendenci být nejsilnější blízko difrakčních částí (např. hran), kde se stýkají dvě plochy a tato rychle mizí při vzdalování od těchto částí. Toto žádoucí chování je ovšem následkem vhodné volby uniformní části. Neuniformní pole se určí pomocí známých jednodušších problémů rozptylu zvaných kanonické problémy, např. rozptyl na klínu. Neuniformní část se pak najde odečtením pole fyzikální optiky od známého celkového řešení kanonického problému.

2 ODHAD EFEKTIVNÍ ODRAZNÉ PLOCHY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Efektivní odrazná plocha (RCS) objektu, který je ozařován radarem je fiktivní plocha, která popisuje intenzitu vlny, která se odráží zpět k radaru. Tuto plochu můžeme definovat ve velmi jednoduchých výrazech: je to průmět elektricky velké, dokonale vodivé koule, jejíž intenzita odrazu by odpovídala cíli, kdybychom zaměnili cíl touto koulí. Pod pojmem *elektricky velká* uvažujeme kouli (v obecném případě libovolné těleso), která má průměr alespoň několik vlnových délek a pak průmět je πa^2 , kde a je poloměr koule. Kovová koule je úplně fiktivní, ale přesto dává většině lidí rozumnou představu ekvivalentního fyzikálního rozměru pro radarový cíl. Odrazy od většiny cílů se podstatně mění se změnou dopadajícího úhlu a frekvencí radaru, zatímco odraz od velké koule se téměř nemění. Abychom mohli dodat skutečné změny do intenzity odrazů od předmětů ve svazku radaru, mohli bychom si představit, že se může naše ekvivalentní kovová koule roztahovat a smršťovat, jak se mění úhel dopadu a frekvence. To znamená, že i když je naše představa ekvivalentní koule užitečná, má svoje omezení. Takže je asi nejlepší si představit, že efektivní odrazná plocha objektu je měřítko intenzity radarových odrazů, vyjádřených v plošných jednotkách.

Efektivní odrazná plocha σ se obvykle definuje následujícím vztahem

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{\mathbf{E}^s}{\mathbf{E}^i} \right|^2, \quad (1)$$

kde r je vzdálenost mezi cílem a přijímací anténou, \mathbf{E}^i je elektrické pole (rovinná vlna) dopadající na cíl a \mathbf{E}^s je rozptylové elektrické pole v místě přijímače. Z definice nevyplývá, že RCS závisí na frekvenci, rozměru a tvaru cíle, směru ozáření a rozptylu a dopadající a přijímané polarizaci. Monostatický rozptyl vzniká, když vysílač a přijímač jsou vedle sebe (kdy se obvykle používá společná anténa pro vysílání i příjem). Bistatický rozptyl uvažujeme, když jsou obě antény prostorově (z hlediska cíle úhlově) odděleny. RCS hraje klíčovou roli ve známé radarové rovnici, která vyjadřuje výkon P_R přijatý v přijímači

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \frac{1}{L} \quad (2)$$

kde P_T je přijatý výkon, G_T je zisk vysílací antény, G_R je zisk přijímací antény, R je vzdálenost mezi cílem a přijímací anténou, R_T je vzdálenost mezi cílem a přijímací anténou, λ je vlnová délka a L jsou ztráty dané útlumem v přijímacím a vysílacím kanálu, útlumem rozptylem mezi cílem a přijímací a vysílací anténou a nepřizpůsobením přijímané a vysílané polarizace vlivem nepřizpůsobených antén (pro bistatický radar), depolarizace cílem a případně Faradayovou rotací. Metody určení RCS jsou podrobně studovány v řadě prací (Knott et al., 1993), (Kupčák, 1986) a (Schejbal et al., 2011) a nelze v žádném případě podat vyčerpávající přehled různých metod. To samozřejmě není ani účelem tohoto článku. Kromě „přesných metod“ se používá řada přibližných metod. Přitom často mezi „přesným“ a přibližným řešením není významný rozdíl. Teoretické určení efektivní odrazné plochy cíle je obtížná úloha jak pro monostatický radar, tak pro bistatický radar, kdy je tato úloha obvykle mnohem složitější. Proto se obvykle uvažují 3 různé případy: Cíle tvořené jednoduchými tělesy, cíle tvořené složenými tělesy a cíle, kde dochází k vzájemným odrazům mezi jednotlivými částmi.

Dokonce i nejjednodušší cíle mají více než jeden zdánlivý střed rozptylu a příspěvky od všech středů rozptylu tvoří výsledný odraz. Příspěvky velmi závisí na fázi, která se mění jak se vzdáleností od radaru (vzdáleností vysílač – cíl a cíl – přijímač), tak relativních vzdálenostech jednotlivých středů, frekvencí vysílané vlny a úhlu dopadu. To je způsobeno tím, že otáčení cíle způsobí posun jednotlivých středů rozptylu směrem k radaru, nebo od něj. Relativní změny v poloze způsobí velké fluktuace amplitudy odrazů, neboť se koherentně kombinují desítky a často i stovky odrazů od jednotlivých středů rozptylu. Skutečné fyzikální rozměry mají pouze málo společné s RCS, jak je uvedeno v tab. 1, kde jsou uvedené základní vztahy pro určení RCS pomocí PO. Např. pro $f=10$ GHz (tzn. $\lambda = 0,03$ m) má rovinná deska s $S = 1$

m^2 hodnotu $\sigma = 4\pi A^2/\lambda^2 = 13\,963\,m^2$, válec o délce $l=1\,m$ a poloměru $a=1\,m$ má $\sigma = ka l^2 = 209\,m^2$ a koule o poloměru $a = 1\,m$ má $\sigma = \pi a^2 = 3,1\,m^2$.

Významné budou různé kouty, kdy kout se dvěma stěnami s rozměry a, b má dvakrát větší RCS než obdélníková deska s rozměry a, b v tab. 1, kout se třemi stěnami (čtverci o stranách b) má třikrát větší RCS než čtvercová deska o straně b a kout se třemi stěnami (trojúhelníky se stejnými odvěsnami b) má třikrát menší RCS než čtvercová deska o straně b . Je zřejmé, že pro kouty platí z hlediska velikosti odrazů podobné závěry jako pro obdélník nebo čtverec. Ovšem jsou zde dva významné rozdíly. Naštěstí pokud jednotlivé stěny netvoří pravé úhly, popř. stěny budou zakřivené, budou odrazy řádově menší. Bohužel na druhé straně je velice nepříjemné, že na rozdíl od rovinných desek, které mají odraz ve velmi úzkém úhlovém intervalu, má kout odrazy ve velice širokém úhlovém intervalu. Je velice nepříjemné, že i „miniaturní“ kouty vytváří odrazy o významné hodnotě RCS v širokém úhlovém rozsahu.

Pokud je to možné, inženýři se spoléhají na výpočetní metody, které se postupně vytvořily a které se stávají stále spolehlivějšími pro návrh nových a zlepšení existujících výrobků. Protože všechny výpočetní metody jsou omezené, musí inženýři vždy provádět měření, aby překonali problémy s výpočetními metodami. Proto není měření RCS méně důležité než teoretické modelování. Moderní měřicí zařízení řízené počítačem vždy poskytuje hlubší pohled do mechanismů rozptylu, které se vyskytují jak u jednoduchých, tak i u složitých cílů. Pokroky v technologii a měřicích metodách, např. měření v blízké zóně (Falconer, 1988), (Parini et al., 2015), (Schejbal et al., 2008) a (Smith et al., 2014), mohou ve značné míře vhodně doplňovat teoretické výzkumy. V některých moderních měřicích systémech bylo integrováno experimentální zařízení pro časovou oblast (širokopásmové měření) s použitím vhodných oken, aby se odfiltrovaly nežádoucí odrazy od okolních předmětů, zemského povrchu, vliv refrakce (Schejbal, 2019) a jiných zdrojů šumu a přesné vzorkování v blízké zóně a tedy i přesné určení pole ve vzdálené zóně. Tyto možnosti mohou značně zvýšit porozumění mechanismu odrazů od cílů a ovládání velikosti RCS.

Tab. 1. Základní vztahy pro určení RCS

Zrcadlový odraz	RCS
Tělesa s efektivní plochou A_e	$\sigma = 4\pi \frac{A_e^2}{\lambda^2}$
Rovinná deska a plochou S	$\sigma = 4\pi \frac{S^2}{\lambda^2}$
Plocha s jednou křivostí (válec o délce l a poloměru a)	$\sigma = 2\pi a \frac{l^2}{\lambda}$
Plocha se dvěma poloměry křivosti a_1, a_2	$\sigma = \pi a_1 a_2$

Pro menší úhly mezi dopadajícím a odraženým paprskem lze použít teorém o ekvivalenci monostatického a bistatického odrazu - pro dostatečně hladká dokonale vodivá tělesa je pro nekonečně malou vlnovou délku bistatický odraz roven monostatickému odrazu ve středu úhlu mezi dopadajícím a odraženým paprskem. Pro velké úhly se podstatně uplatní odrazy od hran spojení podstavy a pláště válce apod.

Analytické vyjádření RCS libovolného tvarovaného konečného tělesa je obtížná úloha. Velmi slibně se jeví hybridní techniky. Často lze získat pouze průměrné hodnoty nebo maximální meze. Pro složitý cíl, jako je letadlo, je pro některé úhly dopadu velké množství široce oddělených zdrojů odrazů. Výsledkem je, že vysokofrekvenční RCS se mění velice rychle při změně úhlu dopadu.

Pro každé těleso, ať je relativně jednoduché, nebo složité, se musí provést řada kroků pro analytické vyjádření RCS. Pokud uvažujeme složitější cíl, nejprve se rozloží těleso na řadu jednoduchých geometrických segmentů nebo dílů. Odražené pole od každého tohoto geometrického dílu pak přispívá ke kombinaci odrazů od různých dílů. V této etapě se musí rozhodnout o relativních velikostech příspěvků z různých dílů a segmentů a uvažovat pouze hlavní příspěvky. Tento model se obecně bude lišit pro různé úhly dopadu a frekvence.

Pokud je těleso relativně jednoduché, budou se odrazy od jednotlivých dílů kombinovat s uvažováním relativní fáze mezi jednotlivými díly. Pro složitá tělesa, kde může být velké množství relativně stejných odrazů, mohou malé chyby při odhadu relativní fáze způsobovat velké chyby při odhadu RCS (zejména pro vyšší frekvence). Jestliže se jedná o tento případ, lze získat průměrnou hodnotu odrazů tím, že se předpokládá, že relativní fáze mezi příspěvky jsou náhodně rozdělené a jednotlivé RCS se mohou přímo sečíst. To znamená

$$\langle \sigma \rangle \approx \sum_{n=1}^N \sigma_n \quad (3)$$

Odhad odchylny od průměrné hodnoty je dán vztahem

$$S^2 = \left[\sum_{n=1}^N \sigma_n \right]^2 - \sum_{n=1}^N \sigma_n^2 \quad (4)$$

Pravděpodobná hodnota RCS leží uvnitř mezí

$$\langle \sigma \rangle \pm S \quad (5)$$

Maximální možná hodnota je dána

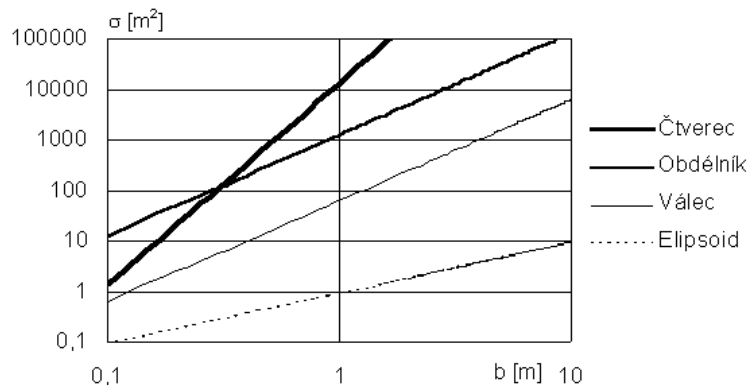
$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} \right|^2 \quad (6)$$

Jestliže relativní fáze jsou náhodné s rovnoměrným rozložením hustoty, odražené pole by mělo asymptoticky Rayleighovo rozložení a směrodatná odchylna S by se rovnala $\langle \sigma \rangle$. Proto RCS by byla uvnitř rozsahu $0 \leq \sigma \leq \langle \sigma \rangle$ jako limitní hodnota velkého N .

Problematika fluktuací odrazů od cílů je značně složitá. I když je možné získat některé závěry ze vztahů (3) až (6), uvažují se obvykle 4 případy podle Swerlinga (Skolnik, 1990), kde jsou grafy pro srovnání pravděpodobností detekce, požadovaný poměr signál/šum a vliv integrace a jsou studovány další typy fluktuací.

Většina analyzovaných objektů je dostatečně velkých z hlediska použité vlnové délky, takže jejich RCS jsou často charakterizovány 20 až 40 dB fluktuacemi mezi maximy a minimy, které se rychle střídají. Proto se často používají „vyhlazená“ data, kdy se rychlé fluktuace filtrovaly pomocí statistického zpracování, což je ovšem ovlivněné účelem, pro který se výpočet provádí. Průměrnou hodnotu odrazů lze získat tím, že se předpokládá, že relativní fáze mezi příspěvky jsou náhodně rozdělené a jednotlivé RCS se pak mohou přímo sečíst. Je zřejmé, že vztahy v tab. 1, popř. další zjednodušené odhady, lze snadno naprogramovat a používat pro odhady RCS. Ovšem takový program nelze používat mechanicky, ale je nutné uvažovat pro různé cíle základní tělesa. Nelze dost přesně odhadnout vliv jednotlivých těles. Navíc se tento vliv může podstatně měnit se změnou uvažovaného úhlu, použité frekvence a řadě dalších parametrů – např. použití absorpčních materiálů či změna tvarů. Často řada významných zdrojů není na první pohled patrná (různé „skryté“ kouty), či naopak zdánlivě významné zdroje mají podstatně nižší RCS (kouty, které nesvírají pravé úhly). Je zřejmé, že zjednodušený rozbor tvarů a rozměrů jednotlivých částí větrné elektrárny může složit pouze pro velmi hrubé výpočty, neboť jednotlivé detaily nejsou zcela zřejmé a detailní proměření není reálné. Z tab. 1 plyne, že RCS tělesa se dvěma poloměry křivosti (elipsoid) nezávisí na vlnové délce a proto tyto odhady budou relativně přesné, zatímco plochy s jedním poloměrem křivosti (např. válce) a zejména rovinné plochy budou silně závislé na vlnové délce (poměru l^2/λ , popř. S^2/λ^2). Je zřejmé, že změnil-li poloměr křivosti o 1%, změní se RCS také o 1%. Ovšem změnil-li se jeden „lineární“ rozměr o 1%, změní se RCS o 2%. To dobře dokumentuje obr. 1 pro elipsoid, válec, obdélník, nebo čtverec. Je zřejmé, že zatímco změny RCS v dB jsou „relativně přijatelné“, jsou změny v m^2 pro válec a obdélník nepřijatelně veliké. Naštěstí se na větrné elektrárně tak velké obdélníkové plochy nevyskytují, takže chyby odhadů nebudou nikdy 4 000 m^2 .

Odhady RCS jsou velice užitečné, neboť potvrzují, že experimentální měření nebo výsledky analytické počítačové simulace jsou v rozumných mezích, vytváří porozumění pro hlavní mechanismy rozptylu a poskytují odhady i pro případy kdy nejsou žádná jiná data. Odhady se používají pro zrcadlový rozptyl, kde existují jednoduché vztahy, dané v tab. 1. Odhady se tedy používají nejlépe pro „zrcadlové“ typy cílů. Odhady jsou obtížné pro cíle, kde neexistují žádné zrcadlové odrazy, neboť zbytkový rozptyl je vlivem druhotných mechanismů, které nevedou na jednoduché předvídatelné vztahy. Cílem odhadů je získat jakési „průměrné“ nebo nekoherentní RCS jako funkce úhlu. Obvykle nezkoušíme odhadnout nuly a maxima (tzn. koherentní RCS), pokud není v určité oblasti jen jeden dominantní odraz. Odhady pracují dobře, neboť zpravidla požadujeme hodnoty v logaritmickém měřítku (dB), které nejsou citlivé na chyby. Pro složitější cíle nás obvykle uspokojuje chyba v rozmezí 3 dB, což v lineárním měřítku znamená dvakrát



větší nebo menší hodnotu. Pro jednoduché cíle mohou být odhady pravděpodobně lepší. Nemusíme být příliš kritičtí k odhadům a je často výhodnější zvolit relativně jednoduchá tělesa, i když na první pohled přesně nevyhovují.

Obr. 1. Efektivní odrazná plocha σ těles pro čtverec se stranou b , obdélník se stranami a , b , válec s poloměrem a a délkou b a elipsoid s poloměry křivosti a , b pro $\lambda = 0,03$ m a $a = 0,3$ m

Věž větrné elektrárny se obvykle skládá z několika modulů, které lze v prvním přiblížení nahradit válcem. Pro odraz od dlouhého válce

$$\sigma = ka^2 \left| \sin \theta \frac{\sin(kl \cos \theta)}{kl \cos \theta} \right|^2, \quad (7)$$

kde $k = 2\pi/\lambda$, l je délka válce, a je poloměr válce a úhel θ se měří od osy válce. Vztah (7) platí pro dostatečně dlouhý válec (mnohem větší než délka vlny), který má dostatečně velký poloměr (větší než délka vlny). Podle tab. 1 bychom získali maximální hodnoty (řádově 10^5 m²). Tuto hodnotu bychom ovšem získali pouze v rovině kolmé na osu válce. Pro úhly zhruba $\pi/2$ (90°) dostaneme ($\alpha = \pi/2 - \theta$)

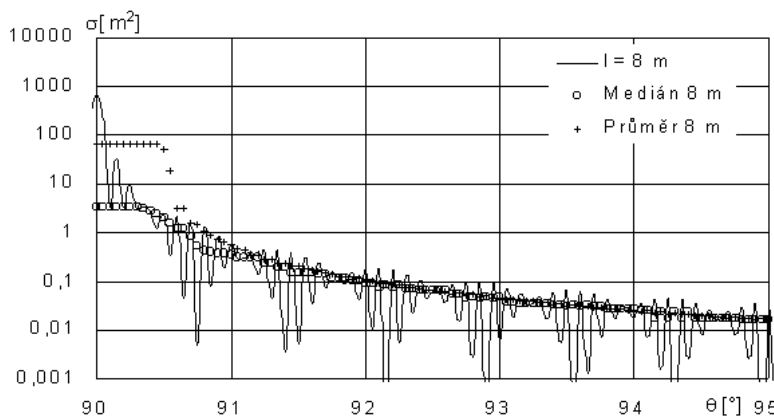
$$\sigma \approx ka^2 \left| \frac{\sin(kl\alpha)}{kl\alpha} \right|^2, \quad (7a)$$

takže bychom dostali pro první nulovou hodnotu $kl\alpha = \pi$ a tedy $\alpha = \lambda/(2l)$, což platí pro vzdálenou zónu a pro menší vzdálenost by se sice zaplnila minima, ale podstatně by klesala i RCS.

Při měření a zpracování výsledků měření nás často zajímají pouze jakési „průměrné“ hodnoty. Je nemožné zvolit „nejvýhodnější“ způsob zpracování. Pro zpracování se používají jak lineární měřítka, tak logaritmická. Obecně dávají průměrné hodnoty více vyhlazené průběhy než mediány, které se ovšem počítají mnohem snadněji. Vyhlazené hodnoty závisí na velikosti okna (window), které udává jak velký rozsah úhlů uvažujeme při výpočtu a posunu (slide), který udává s jakou rychlostí (velikostí kroku) posunujeme okno v oblasti úhlů. Obecně se zdá, že postačí okno větší než jedna až dvě lokální periody a proto okno 1° postačuje. Je obtížné rozhodnout, kterou statistiku a jaké měřítko použít, neboť samotné zpracování signálu v radaru může využívat nejrůznější principy a proto nedává obecně rozumné návody

pro vyhodnocování měření. Při výpočtu mediánů dostaneme stejné hodnoty (pro stejný posun a okno) jak při výpočtu pomocí lineární, tak i logaritmické stupnice. Ovšem při výpočtu průměrných hodnot dostaneme zcela odlišné hodnoty při použití logaritmické nebo lineární stupnice, protože v lineární stupnici jsou změny mnohem větší než při použití logaritmické stupnice (tzn. vyjádření v „jednotkách“ dBm^2). Příklad takových změn udává obr. 2 pro válec o délce 8 m a poloměru 0,1 m.

RCS jednoho listu určíme podle tab. 1 $\sigma \approx \pi a_1 a_2$. Zajímavá je otázka určení přesnosti poloměrů křivosti a_1 a a_2 . Je zřejmé, že nelze tyto poloměry určit přesně, neboť se budou měnit pro různé body povrchu. Na rozdíl od předchozího případu by se hodnota RCS měnila podstatně méně. Odhady průměrných hodnot nebudou mít přesnost lepší než zhruba 5 dB. To vypadá na první pohled jako těžko použitelné. To ovšem není správný závěr. Již jsme uvedli, že RCS je tvořená odrazy od mnoha samostatných „zdrojů“, takže RCS je velice proměnlivá a je nutné uvažovat statistické charakteristiky cíle. Je samozřejmé, že je např. možné použít pro zpracování měření nejružnější okna a statistiky a to nutně vede k podstatně rozdílným výsledkům (viz např. průměrné hodnoty a mediány na obr. 2) a pochopitelně i použití průměrné hodnoty je vždy poněkud diskutabilní. Vzhledem ke statistickému charakteru jednotlivých parametrů v radarové rovnici, je nutné uvážit účel použití odhadů a obvykle tyto chyby jsou zcela akceptovatelné.



Obr. 2. RCS, mediány a průměrné hodnoty pro válec o délce 8 m a poloměru 0,1 m pro úhly 90° až 95° od osy válce v lineárním měřítku. Okno 1° a posun $0,05^\circ$ pro statistické zpracování

Naměřené (a samozřejmě i podstatně přesněji odhadnuté) hodnoty se mohou podstatně lišit od průměrných hodnot z několika důvodů. Odrazy od rovinných nebo lineárních objektů mají velmi proměnlivé hodnoty RCS, jak dokumentuje obr. 2.

3 ANALÝZA ZASTÍNĚNÍ VLIVEM VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Pozorování odrážejícího předmětu ozářenému světlem nám může dát dobrou vizuální představu o rozptylu radarových vln. Jasně zářící body (centra rozptylu), které můžeme vidět na předmětu, jsou přesně ty, které budou odrazeny k přijímacímu radaru, jestliže nahradíme světelný zdroj vysílajícím radarem. Polohy těchto bodů nezávisí na frekvenci dopadajících vln a jsou určeny úplně polohou zdroje světla (radaru), pozorovatelem a předmětem. Vlny odražené od jednotlivých zářících bodů hladkých částí tělesa představují odražené paprsky získané obvyklou geometrickou optikou. Vlny odražené od jednotlivých zářících bodů umístěných na hranách, vrcholcích a koutech jsou difrakční paprsky. Nejbližší zářící body na hladkém tělese, tzn. body na hranici mezi viditelným (ozářeným) a neviditelným (zastíněným) povrchem, vytváří plošné difrakční paprsky. Při změně orientace tělesa se mění poloha zářících bodů podél tělesa. Některé se mohou spojit s jinými a vytvořit bod, který září více. V tomto případě je naše oko (radar) na kaustice, která tvoří obálku spojujících se paprsků.

Větrné elektrárny samozřejmě netvoří pouze radarové cíle, ale velmi důležité jsou i problémy, které vznikají vlivem jejich stínícího účinku. Budeme-li uvažovat jejich výšku (150 m) a vodorovný rozměr (90 m), pak jejich úhlový rozměr bude daný obr. 3.

Zřejmě nelze dát obecně doporučení pro maximální přípustný úhlový rozměr. Z literatury (Skolnik, 1990) a (Bezoušek a Šedivý, 2004) lze sice získat některá data, týkající se parametrů radarů, ale obecně nelze odvodit závěry od všech zařízení. Jako rozumný kompromis se jeví požadavek, aby rozměry překážky ve vertikální rovině nepřesahovaly zhruba 2° a v horizontální rovině 1° .

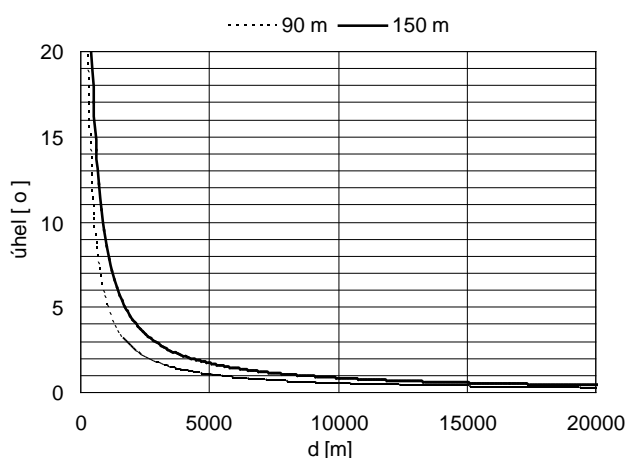
Uvažujeme poloměr R_1 prvního Fresnelova elipsoidu (první zóny) pro anténu radaru A a cíl T (např. letadlo) ve vzdálenosti d_1 . Vzájemná vzdálenost antény radaru a cíle je $d_1 + d_2$, anténa A je ve výšce h_1 a cíl T je ve výšce h_2 nad ideální kulovou zemí, jak je ukázáno na obr. 4. Pak (Kupčák, 1986) platí

$$R_1 = \sqrt{\lambda d_1 d_2 / (d_1 + d_2)} \leq \sqrt{\lambda d_1} \tag{8}$$

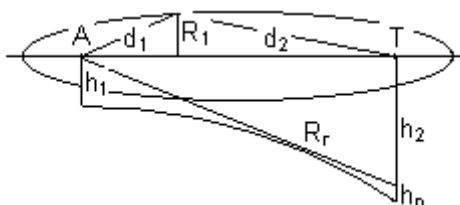
Maximální poloměr

$$R_m = (\lambda d_1)^{1/2} \tag{9}$$

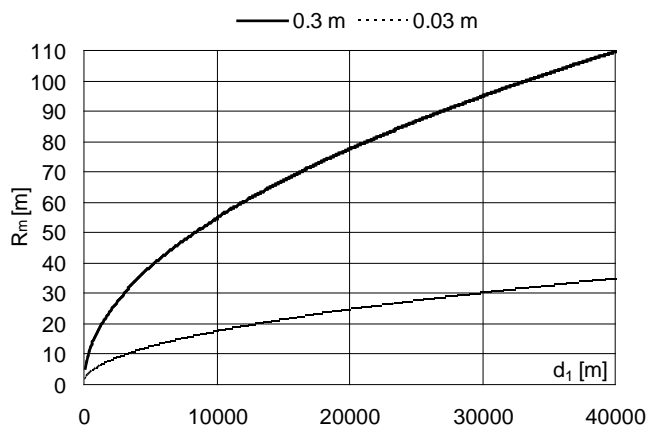
první Fresnelovy zóny pro vlnovou délku $\lambda = 0,3$ m a $\lambda = 0,03$ m je zobrazen na obr. 5.



Obr. 3. Úhlový rozměr větrné elektrárny v horizontálním (90 m) a vertikálním směru



Obr. 4. První Fresnelova zóna pro anténu radaru A a cíl T nad ideální kulovou zemí



Obr. 5. Maximální poloměr první Fresnelovy zóny pro vlnovou délku 0,3 m a 0,03 m

Pro nejnižší letovou hladinu nad elektrárnu 300 m je zřejmě maximální poloměr R_m menší než 110 m pro vzdálenost d_1 menší než 40 km a $\lambda = 0,3$ m. To znamená, že větrná elektrárna nezasahuje do první Fresnelovy zóny a tedy lze její vliv zanedbat. Ovšem pro větší vzdálenosti bude větrná elektrárna částečně, nebo zcela za radiovým horizontem, neboť přímá viditelnost R_r pro dva body ve výškách h_1 a h_n nad ideální zemí se standardní atmosférou podle obr. 4 je (Kupčák, 1986)

$$R_r = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_n}) \quad [\text{km}; \text{m}, \text{m}] \quad (10)$$

Je zřejmé, že pro $h_1 = 2$ m a $h_n = 70$ m je vzdálenost $R_r = 40,3$ km. To znamená, že pro anténu radaru ve výšce 2 m by již značná část (70 m) ve vzdálenosti 40,3 km nebyla viditelná a proto by zvětšování poloměru první Fresnelovy zóny R_1 bylo zčásti eliminováno tímto efektem.

4 VLIV ODRAZŮ NA FUNKCI RADARŮ

4.1 Předpokládané vlastnosti radarů

Počítáme s pozemními přehledovými, přibližovacími a sledovacími radary v kmitočtových pásmech 1 GHz až 10 GHz, vybavenými dopplerovskou filtrací. Přenos dopplerovského filtru s dvojnásobným zpožděním (zpracovávající tři impulzy) má v okolí nulového dopplerovského kmitočtu ω_d průběh (Bezoušek a Šedivý, 2004)

$$|H(\omega_d)|^2 = \sin^4\left(\frac{\omega_d T_{op}}{2}\right) \quad \text{pro} \quad \omega_d \ll \frac{4\pi}{T_{op}} \quad (11)$$

kde T_{op} je střední opakovací perioda radaru.

Dále předpokládáme, že tyto filtry musí propustit signály odražené od objektů, pohybující se rychlostmi nad 50 km/h = 13,9 m/s.

Charakteristické parametry:

$f_0 = 1$ GHz, rozlišovací schopnost v dálce: 200 m, $f_{op} = 400$ Hz, šířka svazku azimut: 2,5°, elevace 20°, rychlost otáčení antény 6 – 10 ot/min, doba ozáření bodového cíle 33,3 ms až 55,5 ms, minimální propouštěný dopplerovský kmitočet: $f_{dopmin} = 92,6$ Hz.

$f_0 = 10$ GHz, $f_{op} = 2\,000$ Hz až 10 kHz, rozlišovací schopnost v dálce: 50 m, šířka svazku azimut: 1° až 2°, elevace 1° až 20°, rychlost snímání antény až 30/min, doba ozáření bodového cíle 5 ms až 15 ms, minimální propouštěný dopplerovský kmitočet: $f_{dopmin} = 926$ Hz.

4.2 Signály, odražené od jedné větrné elektrárny – vliv na primární radary

Vycházíme z předpokladu, že celkový odražený signál od jedné větrné elektrárny je součtem odrazu od věže, od jednotlivých listů rotoru a od hlavy rotoru. Přitom provedeme rozbor pro tři úhly pohledu (směr natočení roviny rotoru vůči radaru):

a) Pohled ze strany rotoru:

Jeden list rotoru může částečně zastínit věž, přitom vzhledem k rozměrům listu a věže může dojít maximálně k poklesu odrazné plochy věže o 30% s periodou $f_1 = 3 \cdot (\text{otáčky rotoru}) / 60 = 0,43$ až 0,92 Hz. Efektivní odrazná plocha věže tedy může kolísat s touto periodou. Po dobu ozáření (nejdéle 55 ms) se rotor otočí maximálně (při 18,4 ot/min.) o 6°. Odtud lze odvodit, že *odraz od věže bude po dobu jednoho ozáření stacionární*. Dopplerovský kmitočet do 1 Hz je zanedbatelný, vůči opakovacím kmitočtům f_{op} všech uvažovaných typů radarů. Odraz od věže bude tedy filtrem indikace pohyblivých cílů (IPC) účinně potlačen ($I \geq 30$ dB). Odraz od hlavy rotoru by z tohoto pohledu měl odpovídat odrazné ploše asi 12 m², což je nevýznamné vůči odrazu od věže elektrárny.

Z předpokladu lineární polarizace radarového signálu bude i odraz od rotoru kolísat podle natočení jednotlivých listů vůči směru polarizace. Vzhledem k rozložení listů rotoru po 120° se bude odrazná plocha periodicky měnit po otočení o každých 60° tj. s opakovacím kmitočtem $6.18,4/60 = 1,8$ Hz. Proto lze tedy i odraz od rotoru považovat za stacionární s nízkým dopplerovským kmitočtem, který bude filtrem IPC potlačen.

b) Pohled z opačné strany:

Věž může částečně zastínit 1 list rotoru. Všechny úvahy provedené pro předcházející orientaci zůstávají v platnosti a odrazy od větrné elektrárny budou zřejmě opět potlačeny filtrem IPC.

c) Boční pohled:

Listy ani věž se nemohou zastínit. Věž i hlava rotoru představují nepohyblivé cíle a jejich odrazy budou filtrem IPC dostatečně potlačeny. Odraz od listů rotoru v případě pohybu rotoru však představuje velmi složitý signál se širokým spektrem od nejnižších dopplerovských kmitočtů až po kmitočty (Bezoušek a Šedivý, 2004):

$$f_{d\max} = 2f_0 \frac{v_{\max}}{c} = 2f_0 \frac{2\pi R_r f_{ot\max}}{c}, \quad (12)$$

kde f_0 je kmitočet radaru, $v_{\max} = 84,8$ m/s je typická maximální rychlost pohybu konce rotoru, $R_r = 45$ m je typický poloměr rotoru, $f_{ot\max} = 0,3$ Hz jsou typické maximální otáčky rotoru a $c = 3 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla.

Pro kmitočty radarů dostáváme pro maximální dopplerovský kmitočet $f_{d\max}$ hodnoty:

$$f_0 = 1 \text{ GHz: } f_{d\max} = 565,3 \text{ Hz} \gg 92,6 \text{ Hz} = f_{dop\min}$$

$$f_0 = 10 \text{ GHz: } f_{d\max} = 5\,653 \text{ Hz} \gg 926 \text{ Hz} = f_{dop\min}$$

Spektra jsou velmi široká a zasahují daleko do propustného pásma používaných dopplerovských filtrů. Proto pravděpodobně nebude možno signály, odražené od pohybujících se listů rotoru v této pozici dostatečně potlačit. Odrazná plocha listů bude však z bočního pohledu nižší, než z čelního pohledu, podle údajů o maximálním natočení listů lze odhadovat pokles asi na 10% hodnoty z čelního pohledu. Celková efektivní odrazná plocha cíle po průchodu dopplerovským filtrem bude kolísat s opakovacím kmitočtem kolem 0,9 Hz a v maximu se bude pohybovat asi na úrovni 30 m². Při jiné orientaci rotoru elektrárny vůči radaru budou odrazy nižší s menším rozptylem dopplerovských kmitočtů.

4.3 Odrazy od skupiny elektráren

Pro radary s azimutální šířkou svazku 2° bude možno elektrárny rozlišit v průměru asi do 12 km, se šířkou 1° do vzdálenosti asi 25 km. Pro větší vzdálenosti od radaru skupina splyne v jeden cíl.

Vzhledem k tomu, že vzdálenost mezi jednotlivými elektrárnami je mnohonásobně větší než vlnová délka na všech uvažovaných kmitočtech radarů, bude se průměrná hodnota efektivní odrazné plochy celé skupiny přibližně rovnat součtu odrazných ploch jednotlivých elektráren se střední kvadratickou odchylkou na úrovni 6 dB. Můžeme tedy odhadnout, že skupina 10 elektráren bude představovat cíl o odrazné ploše pohyblivé části maximálně kolem 1 200 m².

Běžné vzdušné cíle o efektivní odrazné ploše 0,1 až 100 m² nebudou v prostoru nad touto skupinou pozorovatelné. I v případě, že radar jednotlivé stanice rozliší v azimutu nebo v dálce, bude pozorování cílů, letících nad touto skupinou velmi obtížné. V této oblasti bude při otáčení a při vhodném natočení rotorů vůči radaru velmi obtížné odhalit vzdušné cíle. Jde však o izolovaný prostor s trvalou polohou. Letadlo se k němu musí nějak dostat a opět z něj vylétnout. Ztráta informace po dobu několika sekund nemůže být pro přehledové radary významná.

4.4 Vznik falešných cílů

Posoudíme možnost vznik důsledku vícecestného šíření signálu odrazem od skupiny větrných elektráren. Situace, přicházející do úvahy jsou zobrazeny na obr. 6. V prvním případě na obr. 6a) jde o odraz od skutečného cíle, který se šíří k radaru (či od radaru) prostřednictvím odrazu od skupiny elektráren. Přitom postačí odraz od pevných částí stanic (věž, hlava rotoru). To způsobí, že se objeví falešný cíl ve směru elektráren a ve vzdálenosti větší, než vzdálenost skutečného vzdušného cíle R_1 . Výkon přijatého signálu P_{p1} , který se šíří oběma cestami přímo mezi radarem a skutečným cílem je roven (Bezoušek a Šedivý, 2004):

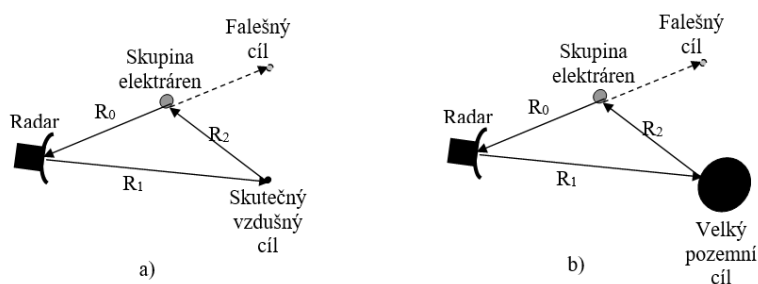
$$P_{p1} = P_v G^2 \frac{\lambda^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R_1^4}, \quad (13)$$

kde P_v je vysílaný výkon, G je zisk antény radaru (vysílací a přijímací antény mají stejný zisk), λ je vlnová délka vysílaného signálu, σ_c je efektivní odrazná plocha skutečného cíle, σ_E je efektivní odrazná plocha skupiny elektráren, R_1 je vzdálenost cíle podle obr. 6.

Výkon přijatého signálu P_{p2} , odraženého od skupiny elektráren je pak roven (Bezoušek a Šedivý, 2004):

$$P_{p2} = P_v G^2 \frac{\lambda^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} \frac{\sigma_E}{4\pi R_0^2} \quad (14)$$

kde R_0 , R_2 jsou vzdálenosti podle obr. 6.



Obr. 6. Vznik falešného cíle vícecestným šířením

Pro poměr obou výkonů pak dostaneme

$$\frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \frac{\sigma_E}{4\pi R_0^2} \quad (15)$$

V typickém případě při vzdáleném skutečném cíli dostáváme a při vzdálenosti skupiny elektráren od radaru R_0 asi 10 km dostáváme

$$R_1 \approx R_2 \quad \sigma_E \cong 4N \cdot 300 \quad \frac{P_{p2}}{P_{p1}} \approx N \frac{300}{\pi 10^8} = N \cdot \frac{3}{\pi} \cdot 10^{-6} \quad [m^2] \quad (16)$$

kde N je počet elektráren ve skupině.

Pro $N = 3$ až 10 dostáváme pro poměr odražených výkonů obou signálů rozmezí asi $3 \cdot 10^{-6}$ až 10^{-5} . Odtud lze usoudit, že v takových případech lze falešný cíl ignorovat.

V případě podle obr. 6b) se může velký pozemní cíl o odrazné ploše σ_{c2} (například terénní útvar – hora nebo velká ocelová konstrukce (most, věž apod.)) transformovat odrazem od pohyblivých částí elektrárny na falešný pohybující se cíl. V rovnici (14) nyní nahradíme odraznou plochu letadla σ_c plochou velkého cíle σ_{c2} a plochu pevných částí elektráren σ_E plochou jejich pohyblivých částí při bočním odrazu σ_{E2}

$$\sigma_{E2} = 4N \cdot 30 \quad [m^2] \quad (4.8)$$

Při odhadu $\sigma_{C2} \sim 10^4 \text{ m}^2$, $\sigma_{C2} \sim 1 \text{ m}^2$ a jinak stejných geometrických poměrech dostáváme

$$\frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{R_1^2 \sigma_{C2} \sigma_{E2}}{R_2^2 \sigma_C 4\pi R_0^2} \approx N \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ až } 10^{-2} \quad (4.9)$$

Neboli efektivní odrazná plocha falešného cíle se jeví v rozmezí $3 \cdot 10^{-3}$ až 10^{-2} m^2 . To už sice není tak malá hodnota jako v případě a) ale v praxi ji také nemusíme uvažovat.

5 ZÁVĚR

V této studii byly analyzovány vlivy větrných elektráren, umístěných samostatně i ve skupinách s počtem $N = 3$ až 10 na činnost primárních a sekundárních radarů v pásmu 1 GHz až 10 GHz . Přitom byly vzaty v úvahu následující mechanismy ovlivnění radarů s tímto výsledkem

1) Vliv odrazů od větrných elektráren na primární radary:

Odrazy od pevných částí elektráren budou dostatečně potlačeny standardními filtry IPC.

Odrazy od pohyblivých částí nebude v nepříznivých případech (orientace „bokem k radaru“) možno zcela potlačit. Odrazná plocha skupiny N elektráren v takových případech může dosahovat maximálně hodnoty $120 \cdot N \text{ [m}^2\text{]}$. Tento odraz ovšem bude trvale lokalizován na stálém místě v prostoru několika km^2 . Detekce letadel nad tímto prostorem bude sice značně ztížena, ale to znamená, že pouze při přeletu tohoto prostoru hrozí předem očekávaný krátký výpadek detekce.

2) Možnost zastínění sledovaného prostoru za oblastí rozmístění elektráren pro primární i sekundární radary:

Provedená analýza zastínění zcela vyvrátila tuto možnost, pokud bude skupina elektráren umístěna ve vzdálenosti minimálně 5 km od radaru.

3) Vznik falešných cílů v důsledku vícecestného šíření odrazem od skupiny elektráren:

Odraz od skutečného pohyblivého cíle – úroveň falešného cíle je hluboko pod hranicí detekovatelnosti (platí pro primární i sekundární radary).

Odraz od rozsáhlého pevného cíle, modulovaný pohybem rotorů elektráren (má význam pouze pro primární radary) – úroveň falešného cíle je v reálných případech pod hranicí detekovatelnosti. Navíc takový cíl by byl snadno rozpoznatelný, protože by byl stále na stejném místě.

V závěru lze říci, že při vzdálenosti elektráren od radaru více než 5 km zůstává jediný významný nežádoucí vliv a to omezení schopnosti přehledových a přibližovacích primárních radarů detekovat vzdušné cíle nad skupinou větrných elektráren. Tento nedostatek je u přibližovacích radarů nutno eliminovat přemístěním elektráren mimo směry přistávání letadel.

Přehledové radary se umísťují na stanovištích, kde je dobrý přehled po okolí (dobrá radarová viditelnost). Omezení detekovatelnosti vzdušných cílů v omezeném prostoru na předem známém místě pak podstatně neovlivní celkovou funkci tohoto radaru.

U sledovacích radarů tento negativní jev prakticky odpadá vzhledem k vysoké rozlišovací schopnosti jeho antény v elevaci.

U sekundárních radarů žádné významné vlivy, ohrožující jejich funkci nebyly shledány.

Poděkování

Výzkum je podpořen projektem MPO ČR č. FV20701V.

Literatura

- Bezoušek, P. a Schejbal, V. **2004**. Radar technology in the Czech Republic. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 19 (8), s. 27 - 34.
- Bezoušek, P. a Schejbal, V. **2011**. Monopulse Secondary Surveillance Radar Antenna for Air Traffic Control. *Perner's Contacts*, 5 (5), s. 21-28.
- Bezoušek, P. a Šedivý, P. **2004**. *Radarová technika*. Praha: ČVUT.
- Bhattacharyya, A. K. a Sengupta, D. L. **1991**. *Radar Cross Section Analysis and Control*. Boston: Artech House.
- Falconer, D. G. Extrapolation of near-field RCS measurements to the far zone. *IEEE Trans. Antennas Prop.* **1988**, 36 (6), s. 740 -745.
- Greving, G., Biermann, W. D. a Mundt, R. **2008**, Status of Advanced Scattering Distortion System Analysis for Nav aids and Radar - Examples of A380 and Wind Turbines. *MRRS-2008 Symposium Proceedings*. Kiev, Ukraine, Sep 22-24, s. 1 – 6.
- Knott, E. F., Shaeffer, J. F. a Tuley, M. T. **1993**. *Radar Cross Section*. Dedham: Artech House.
- Kupčák, D. **1986**. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu*. Díl III. Praha: MNO.
- Parini, C., Gregson, S., McCormick, J., van Rensburg, D. J. **2015**. *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Schejbal, V., Fiser, O. a Ondracek, O. **2011**. Comments on "On the Power Absorbed and Scattered by an Antenna". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 53 (2), s. 172 – 174.
- Schejbal, V., Fiser, O. a Zavodny, V. **2019**. Study of Refraction Effects for Propagation over Terrain, DOI: 10.5772/intechopen.88543.
- Schejbal, V., Kovarik, V. a Cermak, D. **2008**. Synthesized-Reference-Wave Holography for Determining Antenna Radiation Characteristics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50 (5), s. 71 – 83.
- Skolnik, M. I. **1990**. *Radar Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Smith, D., Yurduseven, O., Livingstone, B. a Schejbal, V. **2014**. Microwave Imaging using Indirect Holographic Techniques. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56 (1), s. 104 – 117.
- Ufimtsev, P. Y. **1996**. Comments on diffraction principles and limitations of RCS Reduction Techniques. *Proc. of IEEE*, 84 (12), s. 1830 -1851.
- Ufimtsev, P. Y. **2007**. *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*. New York: Wiley.
- Zavodny, V., Dvorsky, M. a Schejbal, V. **2019**. ICAO Antenna for sidelobe suppression. *Conference on Microwave Techniques, COMITE 2019 - Microwave and Radio Electronics Week, MAREW*.