

# MULTISTATICKÉ RADAROVÉ SYSTÉMY

prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc., prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.  
Univerzita Pardubice

pavel.bezousek@upce.cz, vladimir.schejbal@upce.cz

**Resumé.** Radarové systémy, založené na konceptu bistatických radarů přitahují v poslední době značnou pozornost. Pasivní koherentní systémy (Passive Coherent Location PCL), které používají nekooperující vysílače ("transmitters of opportunity" jako jsou rozhlasové nebo TV vysílače či základové stanice GSM) ukázaly, že mají potenciál pro detekci a sledování pohybující se cílů ve značné oblasti. Je popsán multistatický lokační systém s nekooperujícími vysílači a diskutovány určité aspekty cílů a parametry signálů.

## 1. Úvod

Radar určuje vzdálenost od cíle z doby šíření vlny od vysílače k přijímači. Pokud je vysílač umístěn přímo na sledovaném objektu, hovoříme o pasivním radarovém systému (pasivní radar), pokud je vysílač součástí systému, hovoříme o aktivním radarovém systému (aktivním radaru). Na rozhraní těchto dvou kategorií jsou systémy, kdy se využívá signálu, vysílaného nějakým nezávislým vysílačem (např. rozhlasovým nebo TV vysílačem, vysílačem GSM, GPS apod.) a vlastní radar pouze analyzuje signály, rozptýlené objekty, nacházejícími se v prostoru. Přitom není zapotřebí žádná koordinace systému s vysílačem (tzv. nespoupracující vysílače, příležitostně ad hoc. apod. – non cooperating, transmitters of opportunity, ad hoc.). Tyto systémy se někdy řadí do kategorie pasivních (PCL – Passive Coherent Location), někdy (zejména s ohledem na to, že nekooperující vysílače mohou být v těchto systémech doplněny vlastními vysílači) do kategorie aktivních systémů. Proto také není v nadpisu použito běžně používané označení PCL.

V České republice mají aktivní i pasivní radarové systémy užívané pro detekci, zjišťování polohy a sledování letadel a dalších prostředků

v pásmech 0,8 až 18 GHz dlouhou tradici [1] - [3], [19], [20].

U aktivního radaru jsou přijímač i vysílač obvykle na stejném místě (monostatický radar) ale mohou být také prostorově odděleny (přitom jejich vzdálenost je srovnatelná se vzdálenostmi vysílač – cíl a cíl - přijímač). Takový systém se nazývá bistatický radar – viz obr. 1. Úhlová poloha cíle se obvykle určí pomocí směrové antény. Pokud se cíl pohybuje, může dále radar z Dopplerova posuvu kmitočtu určit i radiální složku jeho rychlosti (např. [4]). Radar také může cíl sledovat v čase a odvodit tak jeho trajektorii („stopu“) případně předpovídat jeho budoucí polohu. I když radary nacházejí největší použití v dopravě, velký rozvoj této technologie všude ve světě je ve velké míře umožněn díky požadavkům armády [1] - [4].

Radary často přijímají signály, odražené (rozptýlené) od sledovaných objektů. U monostatického radaru se pak uplatňuje zpětný odraz signálu (backscatter, monostatický rozptyl) u bistatického radaru bistatický rozptyl ([5] - [11]). Bistatický rozptyl významně závisí na úhlu mezi dopadajícím a odraženým paprskem.

Ve vojenských aplikacích je často důležité, aby se cíl mohl „nepozorovaně“ přiblížit, na menší vzdálenost, než bude zpozorován.

Pravděpodobnost detekce objektu (např. letadla či lodi) radarem lze významně snížit například tím, že podstatně zmenšíme jeho efektivní odraznou plochu (Radar Cross Section - RCS). RCS hraje klíčovou roli ve známé radarové rovnici [3], [4], která určuje výkon  $P_R$  přijatý v přijímači. RCS závisí na frekvenci, rozměru a tvaru cíle, směru ozáření a rozptylu a dopadající a přijímané polarizaci. Velikost přijatého signálu  $P_R$  závisí u primárního monostatického radaru na poměru  $P_R \sim \sigma_{ef}/R^4$ , kde

$\sigma_{\text{ef}}$  je efektivní odrazná plocha (RCS) a  $R$  je vzdálenost. Proto bude dosah úměrný čtvrté odmocnině RCS. Chceme-li snížit dosah desetkrát, musíme  $\sigma_{\text{ef}}$  snížit desetitisíc krát. Existují dvě nejvýznamnější metody snižování RCS [12] - [18]. Je to jednak použití absorbérů, s jejichž pomocí zatlumíme dopadající a odraženou vlnu, jednak změnou tvarů cíle, které nasměrují odraženou vlnu do nezajímavých směrů. Absorpční materiály, které mění vyzařovanou energii na teplo, sníží odraženou energii řádově desetkrát až stokrát. Vzhledem k uvedeným potřebám musí tedy konstruktéři pro účel snížení RCS využít hlavně správné tvarování objektu.

Jinou cestou konstrukce „neviditelných“ cílů je minimalizovat kontrast cíle na daném pozadí, podobně jako to dělá např. chameleon. Tato metoda se aplikuje už léta v oblasti vizuální kamufláže (maskování) volbou takového zabarvení (nebo vzoru), aby cíl opticky splynul s pozadím. Pro radary je pozadím volný prostor s hmyzem a ptáky, s deštěm, mraky a prachem ve vzduchu, ale i s odrazy od terénních předmětů (pozemní clutter), jejichž odrazy nebyly dostatečně potlačeny. Tato metoda patří u radarů do problematiky aktivního a pasivního rušení a v tomto příspěvku se jí zabývat nebudeme.

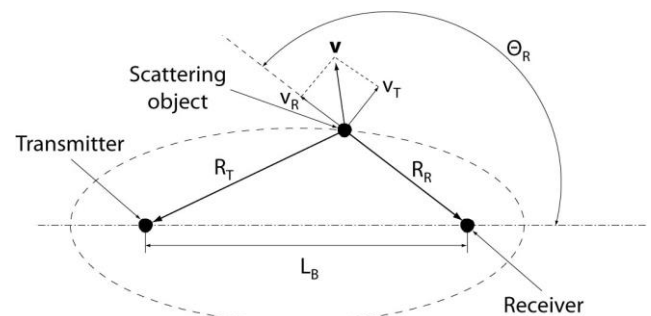
Naopak, tvarování objektů k potlačení nežádoucích odrazů je široce využíváno. Při konstrukci „neviditelných“ letadel se vycházelo z předpokladu, že protivník používá monostatické radary, takže bylo nutno pouze odklonit odrazy od zpětného směru. To ovšem umožnilo využít bistatických (a multistatických) radarů k účinné detekci („vidění“) těchto letadel.

V tomto příspěvku bude popsán princip funkce bistatických a multistatických koherentních systémů, založených na využití nekooperujících vysílačů. Srovnáním přímých a odražených signálů je možné najít polohy a rychlosti těchto odrážejících objektů (cílů). Pro implementaci je zapotřebí pouze přijímač a velice sofistikované digitální zpracování signálů.

## 2. Princip koherentního multistatického systému

Systém obecně sestává z několika vysílačů a

několika přijímačů, které jsou oddělené větší vzdáleností. O vysílačích se předpokládá, že pokrývají svými signály celou monitorovanou oblast. Nevyžaduje se žádná synchronizace ani mezi jednotlivými vysílači nebo vysílači a přijímači, ale je nutná znalost přesné polohy jak vysílačů, tak i přijímačů. Každý přijímač přijímá signál přímo od vysílače a signál odražený statickými pozemními objekty (clutter) a pohyblivými objekty, jako jsou letadla, či vozidla (užitečné signály). Každá dvojice vysílač a přijímač se chová jako bistatický radar na obr. 1, který v této konfiguraci vyjádří bistatickou vzdálenost  $R_B = R_T + R_R$  pomocí rozdílu času příchodu (TDOA) mezi odraženou a přímou dráhou. Všechny možné polohy cíle se stejnou bistatickou vzdáleností  $R_B$  leží na povrchu rotačního elipsoidu (v rovině na elipse) s ohnisky v místě vysílače a přijímače.



Obr. 1. Geometrie bistatického radaru

Pokud navíc předpokládáme koherentní funkci radaru, můžeme detekovat i Dopplerův posun frekvence  $f_D$ . Pro bistatický radar odpovídá Dopplerův posun aritmetickému součtu složek rychlostí  $v_T$  (podél dráhy  $R_T$ ) a bistatické rychlosti  $v_R$  (podél dráhy  $R_R$ ). Zatímco rozlišení vzdálenosti  $\Delta R$  závisí zejména na efektivním pásmu signálu  $B$ , rozlišení Dopplerovy frekvence  $\Delta f$  je zhruba nepřímo úměrné času integrace  $T_i$ :

$$\Delta R = c/(2B), \Delta f = 1/T_i. \quad (1)$$

Pokud se bistatická vzdálenost a Dopplerův posun frekvence určí pomocí zpracování signálu pro jednu dvojici vysílač-přijímač, minimálně jsou zapotřebí dva vysílače nebo dva přijímače pro nalezení horizontální polohy cíle v průsečíku dvou elips. Ale obvykle, když je přítomno mnoho cílů, to vede k vážným problémům s vyloučením falešných cílů. Každý cíl vytváří jednu elipsu pro jednu dvojici vysílač-přijímač (T/R). Existuje-li

$N$  dvojic (T/R) a  $M$  cílů, vznikne  $N \cdot (N-1) M^2$  průsečíků, ale pouze  $M$  z nich odpovídá polohám reálných cílů. Například pro  $N = 3$ ,  $M = 5$  se získá 150 možných poloh cílů, ale pouze 5 z nich odpovídá reálným cílům. Je zřejmé, že je rozumné získat maximum informací od jediné dvojice (T/R) a určit vždy přímo polohu cíle pro jednu T/R dvojici tak, aby se snížilo složitě zpracování signálů. K tomu je nezbytné, aby bylo měření rozdílů časů příchodu signálů doplněno měřením úhlu příchodu signálu. K tomu slouží například vícekanálové přijímače se sektorovými (směrovými) anténami. U těchto systémů je ovšem nutno jako jeden z prvních kroků vytvoření hluboké nuly ve směru k vysílači, aby se potlačil přímý signál pomocí anténní řady.

Je poměrně snadné odvodit bistatickou radarovou rovnici [4], [5], ale její použití je mnohem komplikovanější. Řada signálů jako je přímý signál, korelované odrazy od terénních objektů (clutter), nekorelované signály, vysílané jinými zdroji (elektromagnetický šum) se stejnou frekvencí a tepelný šum snižují maximální dosah a komplikují zpracování signálů. Uvažujme následující příklad:  $ERP = 10 \text{ kW}$ ,  $G_R = 3 \text{ dB}$ ,  $R_R = 50 \text{ km}$ ,  $R_T = 80 \text{ km}$ ,  $T_S = 600 \text{ K}$  (efektivní šumová teplota),  $B = 100 \text{ kHz}$  (frekvenční pásmo signálů),  $L_B = 100 \text{ km}$ ,  $\sigma_B = 10 \text{ m}^2$ ,  $\sigma_C = 10\,000 \text{ m}^2 - 100\,000 \text{ m}^2$  (clutter),  $\lambda = 3 \text{ m}$ ,  $f_R = 1$ ,  $L_{TR} = 1$ . Výsledky dává tab. 1.

Tab. 1. Relativní úrovně

7Signál	Výkon v přijímači	Relativní úroveň
Tepelný šum	-121,0 dBm	+8,8 dB
Přímý signál	-37,7 dBm	+92,1 dB
Elmag. šum	-90,0 dBm (see [11])	+39,8 dB
Clutter	- 99,8 dBm	+30 – 40 dB
<b>Přijatý signál</b>	<b>-129,8 dBm</b>	<b>0,0 dB</b>

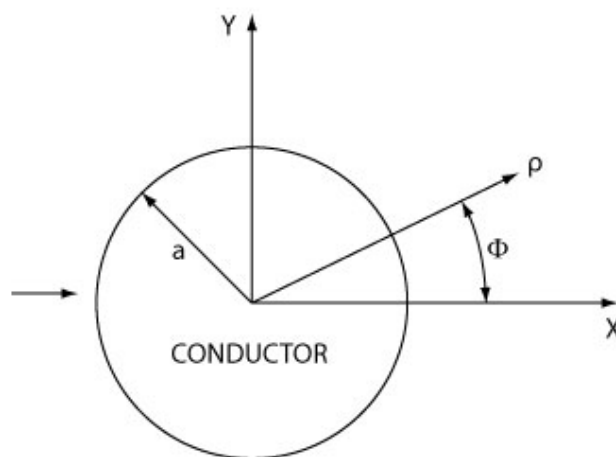
Lze vidět, že úroveň přijatého přímého signálu je zhruba o 90 dB vyšší než používaný přijatý signál odražený pohybujícím se cílem. Rozumná úroveň pro detekci pohybujícího cíle vyžaduje, aby nežádoucí cíle byly alespoň o 15 dB nižší než požadovaná úroveň signálu. Dopplerovské zpracování signálů sice potlačí signály s nulovým Dopplerovským posunem včetně přímého

signálu, ale velikost tohoto potlačení je omezená konečnou úrovní frekvenčních postranních laloků. Takže vzniká naléhavý požadavek na co největší potlačení přímého signálu již v anténě a účinného potlačení clutteru adaptivní filtrací přijatých signálů.

### 3. Efektivní odrazná plocha (RCS) cíle

Tvarováním objektu, tzn. úmyslným výběrem povrchových ploch a jejich vlastností, lze měnit množství energie odražené zpět od cíle k radaru. Přesný výpočet odražené (rozptýlené) energie je možný pouze pro několik nejjednodušších případů.

Jako jeden z nejjednodušších případů lze uvést zdroj vyzařující v přítomnosti vodivého nekonečně dlouhého válce [12] - [14]. Uvažujeme-li dopadající rovinnou vlnu na obr. 2 s ozářenou levou polovinou válce a zastíněnou pravou polovinou válce, pak můžeme určit jak rozptýlené, tak i celkové pole (součet dopadajícího a rozptýleného pole) v okolí válce.

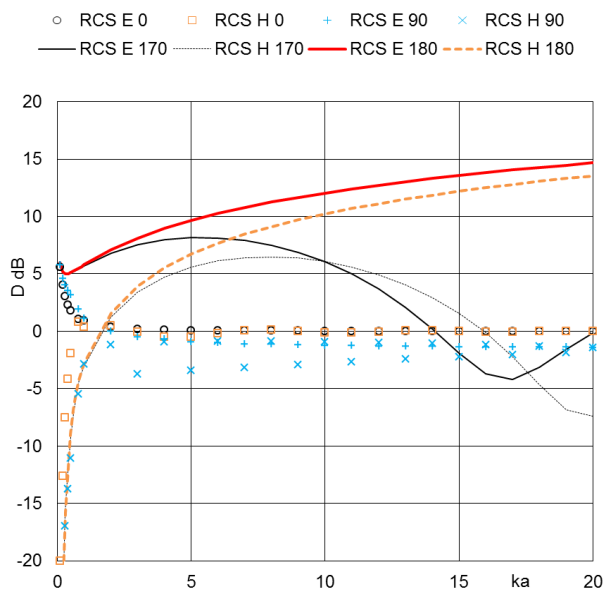


Obr. 2. Rovinná vlna dopadající ve směru  $x$

Obr. 3 ukazuje změny rozptýleného pole  $D=10 \log [\sigma/(2\pi a^2/\lambda)]$  pro dokonalý vodivý válec o délce  $l$  s poloměrem  $a$  pomocí přesného řešení pro nekonečný válec [18]. E indikuje, že dopadající pole je polarizováno rovnoběžně s osou válce (osou  $z$ ) a H indikuje, že dopadající pole je polarizováno kolmo na osu válce. E180 indikuje úhel  $\Phi = 180^\circ$ , tzn. monostatický rozptyl a H180 úhel  $\Phi = 180^\circ$ . Podobně E0 a H0 zobrazuje dopředný rozptyl ( $\Phi = 0^\circ$ ), atd. Uvedené průběhy jasně demonstrují vliv vlnové délky (frekvence), polarizace vlny a zpětného

(monostatického) a bistatického (pro  $\Phi = 0^\circ$  dopředného) rozptylu.

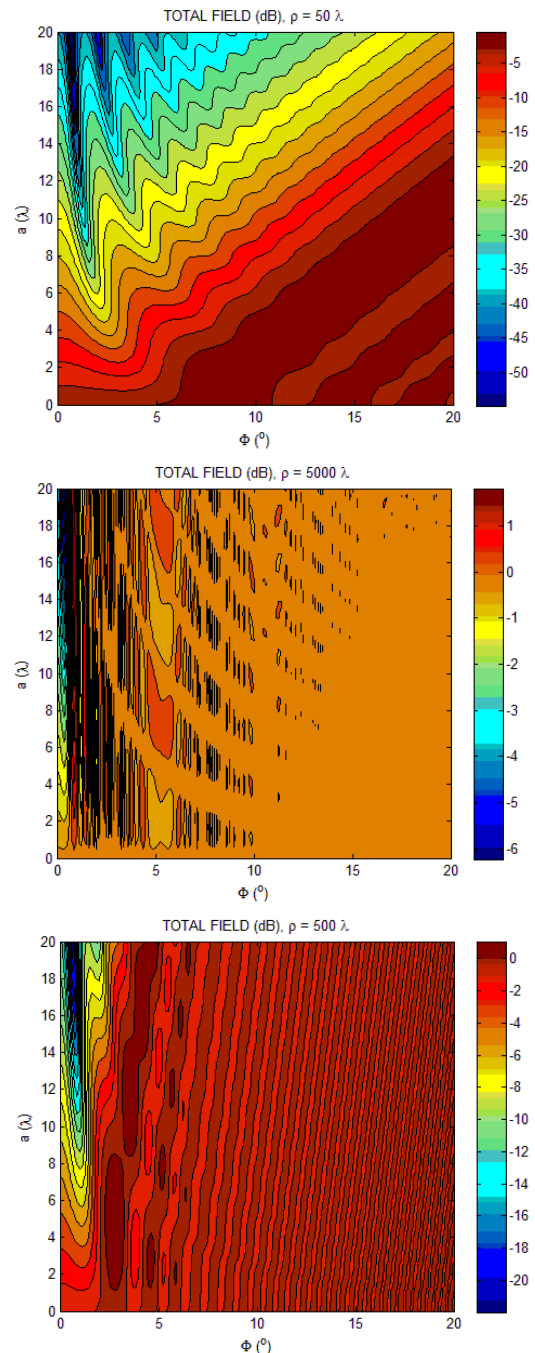
Celkové pole válce je na obr. 4, který ukazuje zřetelně, že celkové pole v oblasti stínu, vytvořené dopadající vlnou a dopředným rozptylem je nulové pro velmi malé vzdálenosti. Může být mírně větší než dopadající pole pro větší vzdálenosti. Celkové pole v oblasti stínu pro oblasti blízké dopřednému rozptylu může být mírně větší (obvykle řádově 1 dB) vlivem difrakce.



Obr. 3. Změny rozptýleného pole  $D = 10 \log [\sigma / (2\pi a^2 / \lambda)]$  pro dokonalý vodivý válec o délce  $l$  s poloměrem  $a$ .

Pro vývoj „neviditelných“ (stealth) letadel měly obrovský význam různé (dostatečně přesné) přibližné metody [22]. Moderní teoretický výzkum RCS závisí především na dosažitelném výkonu počítačů a je tedy na místě, abychom připomněli 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. Velmi významnou součástí výzkumu RCS je ovládání velikosti odrazů člověkem vyrobených radarových cílů (letadel, lodí, automobilů atd.).



Obr. 4. Celkové pole pro vzdálenosti 50, 500 a 5000  $\lambda$

Hlavním problémem při studiu tohoto tématu v publikované literatuře je, že většina příslušných prací čeká dosud na publikování (je dobře známo, že některé práce vykonané v době druhé světové

války byly publikovány až o dvacet i více let později).

Pro představu lze uvést RCS pro mikrovlnné frekvence. Pro ptáka zepředu je to zhruba  $0,01 \text{ m}^2$ , pro dospělého muže asi  $1 \text{ m}^2$  a pro automobil okolo  $100 \text{ m}^2$ . Protože lineární rozměry typických radarových cílů (letadly, lodě apod.) jsou mnohem větší než vlnová délka radarů, má odražené pole kvazi-optický charakter a silně závisí na tvaru objektu.

Fyzikální teorie difrakce, kterou původně vyvinul prof. Ufimtsev v padesátých letech v bývalém SSSR [15] - [17], je metoda pro přibližné vyjádření rozptylu od těles (zejména velice komplikovaných těles) pro dostatečně vysoké frekvence. Tato metoda se ukázala jako velice plodná idea. V SSSR se také studovaly vhodné úpravy letadel pro snížení RCS, ale tyto práce se zastavily, protože letečtí konstruktéři „neměli rádi myšlenky radarových inženýrů“. Takže se ironicky nejimpozantnější aplikace sovětské PTD použila pro návrh „neviditelných“ letadel v zemi protivníka - USA.

První tvar PTD, vektorový tvar použitelný pro elektromagnetický rozptyl od třírozměrných těles, hrál hlavní roli při vývoji moderních zbrojních systémů s nízkým RCS, jako byly přepadový stealth bombardér F-117 a strategický víceúčelový stealth bombardér B-2 a to jak pro teoretické základy, tak i návrh. Američané pracující na těchto projektech nazývaly PTD „rosettskou deskou pro stealth technologii“, nebo „průmyslově silnou“ difrakční teorií, aby ji odlišili od přístupů k difrakci, které byly podporované na amerických univerzitách, ale nebyly dostatečně vyvinuté pro řešení problémů stealth konstrukcí. Není bez zajímavosti, že řada článků publikovaných v amerických časopisech tehdy uváděla, že PTD je teoretická metoda, která není prakticky použitelná (tvrzení o nepoužitelnosti výsledků sovětských vědců bylo patrně ve většině případů pravdivé, ale často to platilo i obráceně).

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 vhodné 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. To je zvláště důležité pro konstrukci cílů s malou RCS, neboť nás často zajímá rozptyl rovinné vlny ve vzdálených oblastech od těles s přímými, 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 fyzikální optikou (PO - i když ne vždy), 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 žádané 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.

PTD tedy může najít přesně odrazy a difrakce od tělesa s komplikovaným tvarem bez toho, že přizpůsobuje celé těleso kanonickým problémům, minimalizuje obtíže sladění geometrie tělesa a kanonického problému a dává difrakční paprsky ve všech směrech od každého prvku lineární difrakční části, nejen pouze ve směrech známého difrakčního kužele, což je velice důležité při práci s velmi nízkými hodnotami RCS, kde paprsky mimo difrakční kužel mohou občas dávat nejsilnější pole v dané oblasti.

Největší příspěvky jsou odražené paprsky od rovinných plošek na tělese. Zářící plošky jsou vždy kolmé na směr monostatického radaru. Také kouty ze dvou kolmých desek, reflektorové antény a velké přímé dutiny se zářivým rovným dnem dávají podobné příspěvky. Zářivé úsečky na hladké válcové nebo kuželové části tělesa také vytváří odražený paprsek. Odrazy od plochy se dvěma poloměry křivosti vytváří odražené paprsky podle geometrické optiky (frekvenčně nezávislé). Zářivá přímá hrana klínu vytváří difrakční paprsek, který je frekvenčně nezávislý. Odražené paprsky podle geometrické optiky a difrakční paprsky na hraně způsobí středně silnou úroveň rozptýlené energie. Nejnižší úroveň způsobují sférické vlny od jednotlivých zářivých bodů na hranách, koutech a koncích tyčí (drátů). Pochopitelně tyto mechanismy nemohou objasnit všechny různé díly, které se zúčastňují vytváření rozptylového pole, např. rezonanční rozptyl – poznamenejme, že půlvlnné dipóly se stále používají, aby maskovaly cíle.

Pro snížení hodnoty RCS je nutné nejprve vychýlit všechny odražené paprsky ve směru k radaru. To znamená, že všechny desky, rovné hrany, pravoúhlé kouty a hladké díly na odrážejícím tělese kolmé na směr k radaru se musí odstranit nebo odklonit. Aby se odstranily silné odrazy od dutin, je praktické je umístit, aby nebyly viditelné z radaru. Je zřejmé, že malé plošky jsou výhodnější než křivé, neboť plošky odráží paprsky do několika diskrétních směrů, ale zakřivené plošky je rozptylují v širokém sektoru (ovšem pro vysoké rychlosti jsou často nezbytné).

Ovšem tvarování není tak efektivní v případě bistatických radarů a existuje řada omezení pro snížení rozptylového pole. Jedno omezení plyne

z asymptotického zákona zachování energie. Pro velká vodivá tělesa je celkový odražený výkon asymptoticky roven dopadajícímu radarovému svazku přijatému předmětem, tzn. celkový odražený výkon nezávisí na tvaru objektu a je zcela určen jeho příčným průřezem. Změna tvaru tělesa pouze změní rozdělení odraženého výkonu v okolním prostoru. Nemůžeme změnit celkovou hodnotu, pokud celkový geometrický průřez zůstane stejný.

Pro snížení monostatické RCS lze doporučit odstranění koutů s úhly  $90^\circ$ , které vytváří silné zpětné odražené signály, který ukazují zdroje silných odrazů a možnosti odstranění. Pokud se musí zachovat kouty, musí se zvětšit úhly. Pak se vychýlí silné odrazy od směru k radaru. Ostré vrcholy raket a letadel vytváří menší RCS. Pro menší úhly vrcholů budou menší difrakční paprsky, z tohoto důvodu jsou lepší konkávní vrcholy než konvexní. Je nutné odstranit všechny rovné hrany, kolmé na radarový paprsek, jinak budu všechny vlny odražené od hran ekvifázové a vytvářet silné odrazy. Pokud to není možné, je nutné vytvořit zahnuté hrany, které budou vytvářet vlny v oblasti stínu. Pokud však bude poloměr křivosti dostatečně velký, budou tyto vlny slabé. Z důvodu potlačení odrazů je směrovka nakloněná, či vstupy jsou stíněné, náběžné hrany jsou zvlněné, překryt kabiny je realizován s nízkým profilem, zlomy a rohy musí být minimální, aby se zabezpečil malý odraz, na trupu nejsou ostré hrany a jsou zaoblené konce křídel. Používá se výzbroj, která je uvnitř letadla. Bohužel vše vede ke kompromisu mezi účinnou odraznou plochou a aerodynamickými vlastnostmi letadla.

Pozorování odrážejícího předmětu ozářenému světlem nám může dát dobrou vizuální představu o bistatickém rozptylu radarových vln. Jasně zářící body (centra rozptylu), které můžeme vidět na předmětu, jsou přesně ty, které budou odráženy 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. Nejuvdálenější 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 spojovat s jinými a vytvořit bod, který září více. V tomto případě je naše oko (radar) na kaustice, která tvoří obálku spojujících se paprsků.

Předpokládejme, že vhodné tvarování velkého objektu umožní, že objekt není viditelný v některých směrech k monostatickému radaru, pak nejsilnější odražený svazek bude v nějakých jiných směrech. Proto přijímací radar umístěný v některém z těchto směrů může snadno detekovat tento objekt. Navíc, díky reciprocitě, se mohou role obou radarů vyměnit. Takže stealth objekt vzhledem k monostatickému radaru lze snadno detekovat bistatickým radarem.

Absorpční materiály částečně mění dopadající energii na teplo a snižují úroveň rozptylového pole v některých směrech. Hybridní materiály obsahují materiály s elektrickými a magnetickými ztrátami. Snižování odrazů pomocí diod může být přibližně 45 dB. Uplatnění nalézají i frekvenčně citlivé plochy se vzory ve tvaru štěrbin, otvorů atd.

Obecně se musí provést několik kroků, aby se zmenšila efektivní odrazná plocha letadel: a) křídla se vyrábějí kombinací konstrukce a vhodného absorpčního materiálu, b) vlny dopadající na zepředu na náběžné hrany a zezadu na zadní hrany se absorbují optimalizovaným použitím struktur tvořených laminátovými vrstvami skleněných vláken a uhlíkem pokrytých plastů, které absorbují radarové odrazy, c) používají se plástvové útlumy, které mají maximální dovolenou délku, aby byly účinné na nízkých frekvencích, d) používají se odporové desky, které minimalizují difrakci od okrajů a e) pokud je to praktické z aerodynamického hlediska, kovové části se vymění za odporové a kompozitní struktury.

RCS lze snížit diskretním zatížením, které poruší indukované proudy a to vede ke snížení rozptylového pole ve specifikovaném rozsahu

úhlů. I když se této metodě věnovalo velké úsilí v 60 letech, nyní se již nepovažuje za perspektivní.

Další metoda je modifikace povrchu. Plochu lze měnit mnoha způsoby. Je možné vyrábět kovové desky s periodicky rozmístěnými aperturami (otvory) nebo se zvlněním. I když se věnovalo mnoho úsilí pronikání vln perforovanými kovovými deskami, věnovalo se z počátku mnohem méně výzkumu RCS těchto desek. Výsledky těchto výzkumů ukazují, že je možné snížení asi 10 dB v úhlovém rozsahu  $\pm 30^\circ$  od kolmého směru.

Zvlnění povrchu se používá pro snížení odrazů alespoň pro určitý rozsah úhlů, frekvencí a polarizací. Tato technika se může použít pro střechy velkých odrazných struktur v blízkosti radaru. Radary, které pracují v přeplněných letištích, se často potýkají s odrazy od budov letištních terminálů a velkých hangárů letadel. Odrazy od těchto struktur lze zmírnit vhodným zvlněním povrchu. Ukazuje se, že pro některé (poměrně malé) rozsahy úhlů, frekvencí a polarizací lze docílit potlačení větší než 30 dB. Aby se obdržel větší rozsah parametrů, je možné modulovat hloubku drážek a vzdálenost mezi žebry. Výzkum byl prováděn pro nejrůznější tvary drážek (např. trojúhelníkové drážky) a různé proužky.

Libovolný materiál homogenní ve směru rovnoběžném k povrchu není účinný v tomto směru. To je základní nedostatek. Další důležitý jev je „stínové vyzářování“ (shadow radiation) [15] - [17]. Tento jev má dvě základní vlastnosti – pole rozptýlené černým tělesem nezávisí na tvaru tělesa, ale je jednoznačně určené geometrií a velikostí obvodu zastínění a celkový výkon tohoto pole se rovná přesně výkonu dopadajícího radarového paprsku. To ovšem znamená, že dokonce i pro ideální absorpční materiál není možné úplně maskovat rozptylující objekt žádným pokrytím radarovým absorpčním materiálem. V praxi může být extrémně obtížné toto „stínové vyzářování“ potlačit. Jak aktivní, tak i pasivní potlačení by muselo být schopné se měnit jak se změnou orientace tělesa, tak i frekvence radaru. Ovšem aktivní potlačení, které nepracuje správně, se stane dobře viditelným.

Detekce současných stealth letadel vyžaduje oddělení radarového vysílače a přijímače, kdy dopadající energie se odráží k přijímači. Ovšem u aktivního radaru vzniká řada problémů. Ve válečném konfliktu asi není možné vhodně umístit oba radary, které by vzájemně spolupracovaly. Je tedy nepravděpodobné, že by se mohl vyvinout praktický aktivní radar, který by odhaloval stealth letouny.

Pasivní radary [5] - [7], [11], [18] - [21] žádný signál nevysílají a přijímají buď signál vysílaný cílem (PET), nebo signál vyslaný z jiných zdrojů a cílem odražený (PCL). Rozsáhlejší nasazení PET nastalo až v sedmdesátých a civilní verze vznikají dokonce až v devadesátých letech minulého století. Přijímací stanice multilateračních systémů přijímají signály vysílané cíli a posílají je do centrální stanice na zpracování. Zde se měří rozdíly času (Time Differences of Arrival TDOA) z jednotlivých stanic. Navíc se v centrální stanici tyto signály analyzují a vydávají se hlášení. Typicky jsou potřebné tři stanice pro určení 2D polohy letadla a čtyři stanice jsou potřebné pro 3D polohu. Systém dosahuje velmi vysokou přesnost polohy, nezávislé měření výšky (s vysokou přesností) a je cenově výhodnější než sekundární radary.

Československo bylo od šedesátých do devadesátých let jediným výrobcem na světě. Dnes je ERA Pardubice [20] světový lídr ve vývoji a výrobě těchto systémů. Vyrábí jak civilní, tak i verze pro vojenské a bezpečnostní použití. Většina systémů se používá pro kontrolu civilního provozu letadel (ERA má zhruba 150 zákazníků v 50 zemích světa) a provozu nejrůznějších vozidel na letišti. Systém MSS je založený na TDOA multilateračním principu a proto poskytuje přesné a spolehlivé určení polohy a identifikaci všech letadel, vozidel a dalších objektů vybavených transpondéry s módem A/C/S, které se pohybují na letištích. Pochopitelně vzhledem ke komplikovaným podmínkám šíření se na velkých letištích používá mnohem více než minimum přijímačů.

V poslední době je zaznamenán zvýšený nárůst aktivit v oblasti radarových systémů, založených na bistatických radarech, kde na rozdíl od obvyklých monostatických radarů jsou vysílač a přijímač odděleny vzdáleností, srovnatelnou se

vzdáleností přijímač a vysílač. Bistatické radary mají dlouhou tradici. Značné oživení byla myšlenka, kterou vyvolala snadno dosažitelná digitální technika a husté pokrytí země širokým spektrem zdrojů elektromagnetického záření.

Bistatický teorém ekvivalence [6] udává, že bistatická RCS dostatečně hladkého, dokonale vodivého cíle se rovná monostatické RCS pro osu bistatického úhlu. Dostatečně hladké cíle jsou typicky koule, eliptické válce, jehly apod. To demonstruje i obr. 3 dávající představu o změnách  $D=10 \log [\sigma/(2\pi a^2/\lambda)]$  pro dokonale vodivý nekonečně dlouhý válec. Lze jasně vidět, že bistatická RCS pro bistatický úhel  $90^\circ$  (tj. RCS E 90 a RCS H 90) je poněkud menší než monostatická RCS (tj. RCS E 0 a RCS H 0). Dopředný rozptyl (tj. RCS E 180 a RCS H 180) je mnohem větší než monostatická RCS.

Je ovšem možné očekávat rozdíly a tedy výsledky se musí používat opatrně. To je dáno řadou jevů, jako jsou změny relativních fází mezi diskretními centry rozptylů a změnou center – nová centra se objevují, nebo stará zanikají. Obvykle je bistatická RCS nižší než monostatická RCS pro složité cíle. Ovšem pro některé úhlové polohy mohou cíle vytvářet nízkou monostatickou RCS a velké bistatické zrcadlové odrazy pro specifické bistatické úhly (zejména pro cíle navržené pro nízké monostatické odrazy v určitém rozsahu úhlů) a stínění, které se občas vyskytuje pro monostatickou geometrii, nevzniká pro bistatickou geometrii.

Mezní případ bistatické geometrie se vytvoří, je-li cíl na spojnici vysílač-přijímač. To může vytvořit podstatné zesílení odrazů, dokonce i pro cíle stealth, vlivem dopředného rozptylu, tzn. díky „stínovému vyzařování“ (Babinetovu principu). V tomto případě dokonale absorbující cíl vytváří stejné dopředné pole jako otvor stejného tvaru v dokonale vodivém stínítku. Dopředný odraz  $\sigma_f$  je zhruba

$$\sigma_f = 4\pi A^2 / \lambda \quad (2)$$

kde  $A$  je promítnutá plocha a  $\lambda$  je vlnová délka.

Pro nižší frekvence je bistatická RCS větší pro bistatické úhly blízko  $180^\circ$  (např. RCS E 170 a



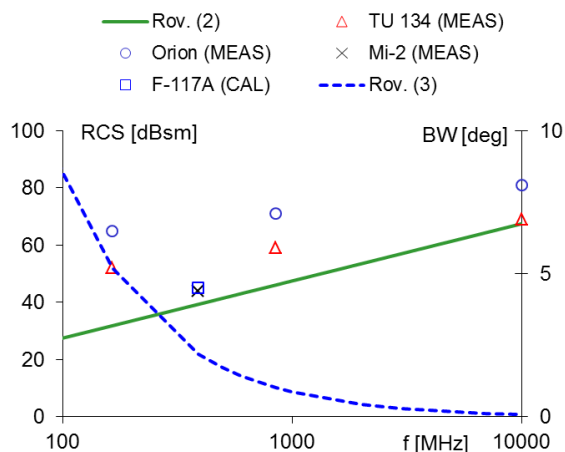
RCS H 170 na obr. 3). To je vlivem toho, že šířka svazku mezi nulami pro rozptyl je zhruba

$$\theta_0 \approx 57\lambda/d \text{ [deg]} \quad (3)$$

kde  $d$  je lineární rozměr cíle. To znamená, že dopředný rozptyl je větší pro vyšší frekvence podle (2), ale šířka svazku mezi nulami je velmi úzká. Navíc, je-li radarová vlnová délka zhruba dvojnásobek rozměru cíle, bude vznikat významný odraz vlivem půlvlnného rezonančního jevu. Obecně, radarové absorpční materiály, které používají grafito-feritové mikroskopické kuličky, mohou být méně účinné pro nižší frekvence.

Články [8] a [10] poskytují výsledky měření a výpočtů bistatické RCS pro několik reálných cílů jako letadla pro frekvenční pásma 160, 390, 850 a 3 000 MHz. Experimentální data ukazují, že RCS pro dopředný rozptyl je větší než monostatický případ o 30-40 dB v závislosti na frekvenčním pásmu.

Obr. 5 ukazuje dopředný rozptyl  $\sigma_F$  podle (2) a  $\theta_0$  podle (3) pro  $A = 20 \text{ m}^2$  a  $d = 20 \text{ m}$ . Tyto hodnoty lze považovat jako typické pro letadla. Výpočty dopředné RCS (F-117A [10]) a měření (Mi-2 helikoptéry [10], TU 134 a Orion [8]) jsou ukázané pro srovnání. Lze shrnout, že frekvence užívané pro velmi krátké vlny, jsou optimální pro dopředný rozptyl [5].



Obr. 5. Dopředný rozptyl  $\sigma_F$  podle (2) a  $\theta_0$  podle (3) pro  $A = 20 \text{ m}^2$  a  $d = 20 \text{ m}$ . Výpočty dopředné RCS (F-117A [10]) a měření (Mi-2 helikoptéry [10], TU 134 a Orion [8]).

#### 4. Bistatický clutter

Bistatický clutter může být mnohem proměnlivější než monostatický clutter, neboť je s geometrií spojeno mnohem více proměnných. Pro clutter bude RCS dáno jako součin bistatického koeficientu  $\sigma_c$  a plochy rozlišovací buňky pro clutter  $A_c$ . Oba parametry závisí na geometrii (s maximální hodnotou pro úhly zrcadlového odrazu). Experimentální data a modely pro bistatický clutter jsou omezené [4], [5], [9], [23]. Hodnoty pro horizontální a vertikální polarizaci nevykazují žádné významné rozdíly. Většinou jak monostatická, tak i bistatická data vykazují téměř log-normálové amplitudové rozložení.

#### 5. Závěr

Článek popisuje systémy založené na myšlence bistatických radarů a použití nekooperujících vysílačů. Tyto systémy potřebují pouze jednoduchý vysokofrekvenční HW, ale mají velké nároky na zpracování signálů. Samozřejmě spolehlivost této metody lze zvýšit přidáním vlastních vysílačů (v případě výpadků „příležitostných“ vysílačů). Mnoho autorů ukázalo velice kreativní řešení částečných problémů, ale existuje stále mnoho otázek pro vyřešení celého systému pro praktické použití včetně otázek spolupráce PET a PCL systémů.

#### Poděkování

Tento výzkum byl podpořen projektem TA ČR č. TA04030375.

#### Literatura

- [1] SCHEJBAL, V. et al. Czech radar technology. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronics Systems*, 1994, vol. 30, no. 1, p. 2 – 17.
- [2] BEZOUSEK, P., SCHEJBAL, V. Radar Technology in the Czech Republic, 2004, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 19, no. 8, p. 27-34.

- [3] BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P. *Radarová technika*, 2004, Praha: ČVUT.
- [4] SKOLNIK, M. I. *Radar handbook*, 2nd ed., 1990, Boston, Mass: McGraw-Hill.
- [5] GRIFFITHS, H.D. Bistatic and Multistatic Radar [online].  
<[www2.theiet.org/oncomms/pn/radar/Griffiths%20Shrivenham.pdf](http://www2.theiet.org/oncomms/pn/radar/Griffiths%20Shrivenham.pdf)>
- [6] BEZOUSEK, P., SCHEJBAL, V. Bistatic and multistatic radar systems. *Radioengineering*, 2008, vol. 17, no. 3, p. 53 - 59.
- [7] PLSEK, R., STEJSKAL, V., PELANT, M., VOJACEK, M. Passive Coherent Location and Passive ESM tracker systems synergy. In *14th International Radar Symposium (IRS)*, 2013, p. 149 – 154.
- [8] CHESNOKOV, Y. S., KRUTIKOV, M. V. Bistatic RCS of aircrafts at the forward scattering, In 1996, *CIE International Conference of Radar Proc*, p. 156 – 159.
- [9] GIERULL, C. H. Bistatic Synthetic Aperture Radar, [Online]. Available: <<http://pubs.drdc.gc.ca/PDFS/unc34/p523308.pdf>>
- [10] BLYAKHMAN, B., RUNOVA, I. A. Forward Scattering Radiolocation Bistatic RCS and Target Detection, 1999, *IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, p. 203 – 208.
- [11] GRIFFITHS, H. D., BAKER, C.J. Passive coherent location radar systems. Part I: Performance prediction, 2005, *IEE Proc. Radar, Sonar Navigation*, vol. 152, no. 3, p. 153 – 159.
- [12] SCHEJBAL, V. Efektivní odrazné plochy cílů. *Sdělovací technika*. 2000, no. 9, p. 10 - 12.
- [13] RUCK, G. T. a kol. Radar cross section handbook. New York, Plenum Press. Díl 1 a 2, 1970.
- [14] KNOTT, E. F., SHAEFFER, J. F., TULEY, M. T. Radar cross section. Dedham, Artech House 1985.
- [15] UFIMTSEV P. Y. Comments on diffraction principles and limitations of RCS Reduction Techniques. *Proc. of IEEE*. Vol.84, no. 12, pp. 1830 -1851, 1996.
- [16] UFIMTSEV P. Y. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction. New York: Wiley, 2007.
- [17] UFIMTSEV P. Y. The 50-Year Anniversary of the PTD: Comments on the PTD's Origin and Development. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 55, no. 3, pp. 18 – 28, 2013.
- [18] SCHEJBAL, V., SVOBODA, P., PIDANIC, J., FISER, O. Two-Dimensional Forward Scattering – Comparisons of Approximate and Exact Solutions. *Radioengineering*, 2012, vol. 21, no. 1, p. 471- 477.
- [19] SVOBODA, P. Padesát let oboru pasivních sledovacích systémů v České republice. *Sdělovací technika*. 2009, no. 10, p. 8 – 10.
- [20] <http://www.era.cz/>
- [21] STEJSKAL, V., PLSEK, R., PELANT, M., VOJACEK, M. FM based passive coherent location system – tracking capabilities evaluation. In *ICMT 2013*, 22 – 23 May 2013, Brno, pp. 1027 -1034.
- [22] SCHEJBAL, V., LEUCHTER, J. Neviditelná letadla a jak je lze vidět. *Sdělovací technika*, 2015, no. 4, p. 5 – 9.
- [23] MALANOWSKI, M., HAUGEN, R., GRECO, M. S., O'HAGAN, DANIEL W., PLŠEK, R., BERNARD, A. Land and sea clutter from FM-based passive bistatic radars, 2014, *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 8, no. 2, p. 160 – 166.