

NEVIDITELNÁ LETADLA

prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.
Univerzita Pardubice

vladimir.schejbal@upce.cz

ÚVOD

TVAROVÁNÍ CÍLE

RADAROVÉ ABSORBÉRY

BISTATICKÉ AND MULTISTATICKÉ RADARY

PASIVNÍ RADARY

ZÁVĚR

ÚVOD

Každý člověk má své silné a slabé stránky. Proto i když se říká, že to co slyšíme, zapomeneme, to co čteme, si zapamatujeme, a to co děláme, pochopíme, budeme každý k novým poznatkům přistupovat rozdílně. Nejde říkat, že fyziku pochopíme jen tak, že se naučíme matematiku. Faraday, který formálně neměl ani základní školu, objevil experimentálně a pochopil řadu poznatků, které kromě chemie, umožnily matematicky popsat téměř veškeré děje v elektrotechnice. Byl jeden z nejlepších experimentátorů všech dob a své posluchače okouzloval schopností vyložit i ten nejsložitější problém dokonale názorným způsobem. To platilo i o elektřině a magnetizmu. Byl zvolen členem britské (a dlouhé řady zahraničních) akademií věd a jmenován ředitelem jejich laboratoří a profesorem.

Bohužel téměř nikdo není tak geniální jako Faraday a tak ve větší či menší míře používáme matematiku (což jsou pro někoho berličky a pro druhého litinový záchranný kruh).

Spektrum radiových vln má velmi rozsáhlé aplikace v mnoha různých prostředích. Frekvenční pásma překrývají frekvenčně mnoho řádů (od stovek Hz do stovek GHz). Radiové systémy vyžadují vysílací systémy a přijímače, aby mohly poskytovat komunikační spoje. Pochopení radiových kanálů mezi přijímači a vysílači je kritické při návrhu libovolného radiového systému.

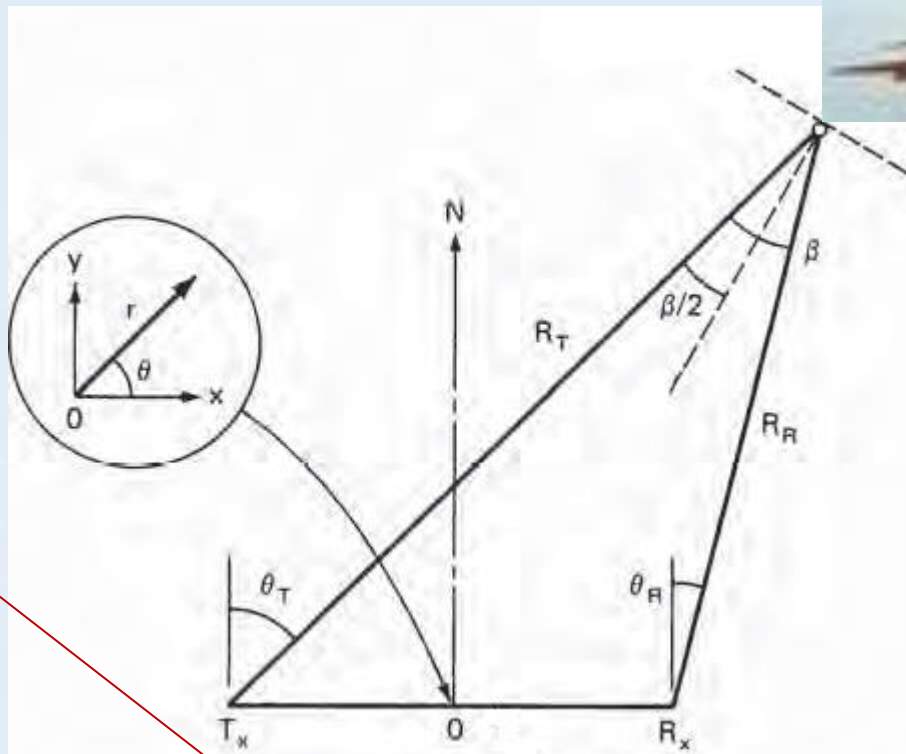
RADARY

Zjišťují předměty pomocí vln a měří jejich vzdálenosti, případně polohu..

První uplatnění našly radary v armádě při ostraze vzdušného prostoru proti nepřátelským letadlům. Dnes zastávají vojenské radary řadu funkcí v letectví, v raketové technice, v lodní navigaci, ochraně vzdušného prostoru atd.



V civilní oblasti se používají radary v navigaci (zejména letecké), při přistávacím manévru (přibližovací radary), nebo jsou součástí kontroly a sledování provozu na povrchu letiště. Lodní a automobilové radary výrazně zvyšují bezpečnost provozu (např. **v roce 2014 se vyrobilo 210 miliónů automobilových radarů**). Rozšířilo se uplatnění radarů pro mapování a sledování povrchu Země i atmosféry ze satelitů. Moderními metodami zpracování signálu se dosáhlo vysoké rozlišovací schopnosti a stálosti zobrazení z velké vzdálenosti (např. pohyb terénních útvarů dokonce v rozmezí několika cm za rok)



Radarová rovnice

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \frac{\sigma}{4\pi R_R^2} \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} F_T^2 F_R^2$$

Bistatický radar

Monostatický radar
OPRL - 4



P_R - Přijatý výkon na vstupu antény, P_T - vyslaný výkon na výstupu, G_T - zisk vysílací antény, G_R - zisk přijímací antény, σ - efektivní odrazná plocha cíle (RCS), λ - vlnová délka, F_T - činitel šíření pro vysílací anténu - cíl, F_R - činitel šíření pro cíl - přijímací anténa, R_T - vzdálenost vysílací anténa - cíl, R_R - vzdálenost přijímací anténa - cíl.

Základní koncepce radarů je poměrně jednoduchá, ale praktické provedení může být velice složité. Radar vyzařuje elektromagnetickou energii (vlny) a detekuje odrazy, které se vrací po odrazu od objektu (cíle). Vlastnosti odraženého signálu dávají informace o cíli.

Vzdálenost od cíle se určí z doby, během které se šíří vyzařovaná energie k cíli a nazpět (obvykle se používá stejná anténa pro příjem i vysílání – monostatický radar).

Úhlová poloha cíle se určí pomocí směrové antény, která má úzký svazek (malou šířku svazku), aby mohla určit úhel odkud přichází signál. Pokud se cíl pohybuje, radar může odvodit jeho „stopu“ nebo trajektorii a předpovídat příští polohu.

Klíčovou roli v radarové rovnici, která dává výkon P_R přijatý v přijímači, hraje RCS. Snížení RCS z vojenského hlediska přináší výhodu, že se cíl může „nepozorovaně“ přiblížit, takže bude zpozorován mnohem později.

Zpravodajské služby pomohou při volbě specifických konstrukčních parametrů, jako jsou frekvenční rozsahy, úrovně RCS (jak mohou být veliké odrazy, které umožní ještě přežití) a úhly, ze kterých bude letadlo pozorováno. To umožní začít s návrhem konstrukce. Cíl je jasný – nedovolit, aby se energie odrážela zpět do ohrožených sektorů, kde mohou být umístěny radary.

Hlavní snahou při konstrukci „neviditelných“ („stealth“) cílů je, abychom je skryli na pozadí, tzn. minimalizovat kontrast cíle s uvážením pozadí, podobně jako u chameleona. To se aplikuje pro jakékoliv pozorování: vizuální, akustické, infrazářením a radar. Vizuální kamufláž používá takové zbarvení, aby se cíl „smísil“ s pozadím. Pro radary lze značně snížit pravděpodobnost detekce cíle (např. letadel či lodí) tím, že podstatně zmenšíme efektivní odraznou plochu (radar cross section - RCS).

Změna maximálního dosahu R_m při snížení maximální hodnoty RCS

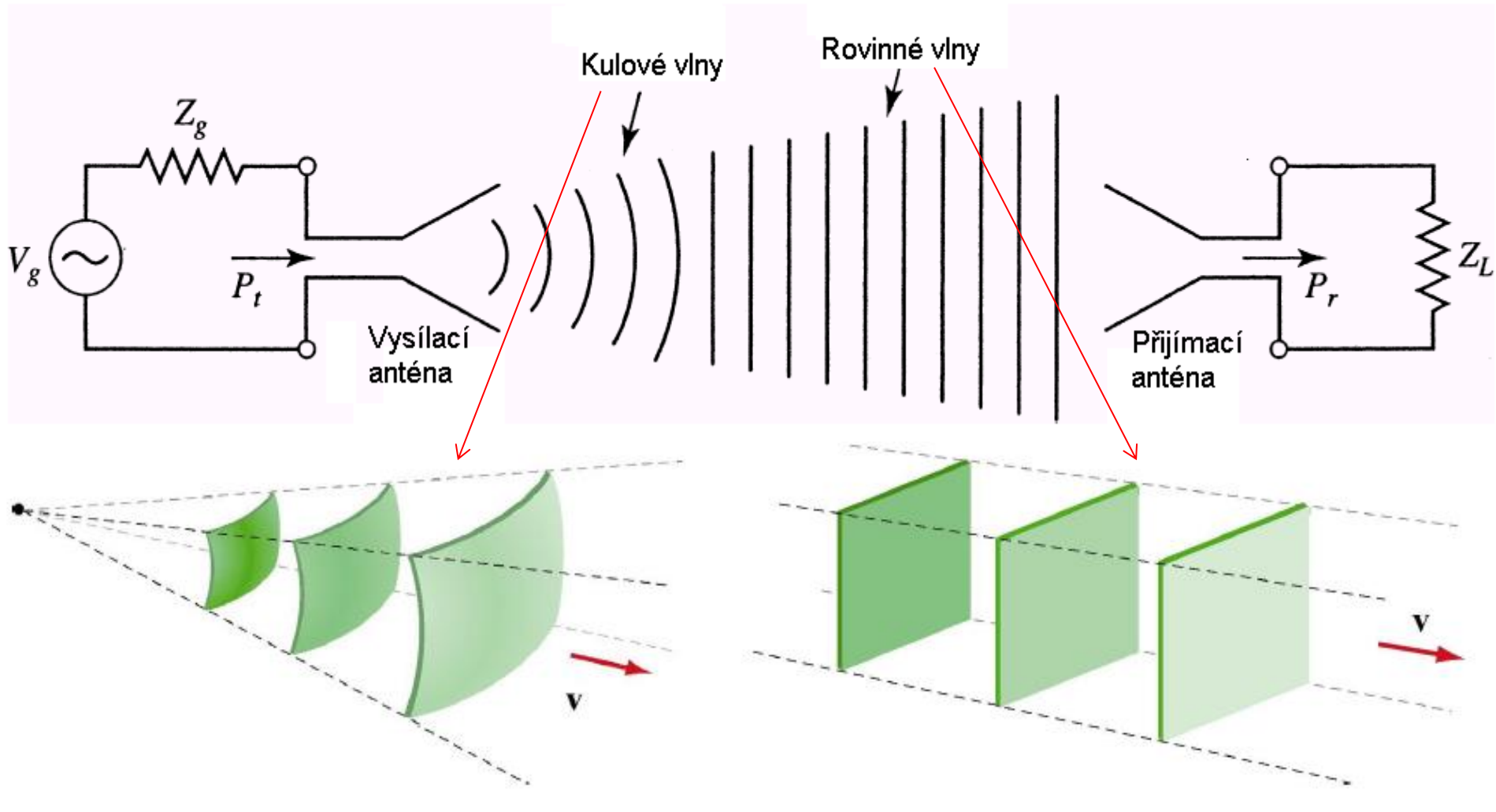
Změna RCS	Změna RCS (dB)	Změna R_m
$1 \sigma_m$	0 dB	$1R_m$
$0,5 \sigma_m$	-3 dB	$0,84R_m$
$0,1 \sigma_m$	-10 dB	$0,56R_m$
$0,05 \sigma_m$	-13 dB	$0,47R_m$
$0,01 \sigma_m$	-20 dB	$0,32R_m$
$0,005 \sigma_m$	-23 dB	$0,27R_m$
$0,001 \sigma_m$	-30 dB	$0,18R_m$
$0,0005 \sigma_m$	-33 dB	$0,15R_m$
$0,0001 \sigma_m$	-40 dB	$0,1R_m$

RCS závisí na frekvenci, rozměru a tvaru cíle, směru ozáření a rozptylu a dopadající a přijímané polarizaci. Pro monostatický příjem uvažujeme, že odražená energie má opačný směr šíření než dopadající energie. Naproti tomu pro bistatický radar je směr šíření odražené energie určen polohou přijímací antény a obecně se velikost odražené energie může řádově měnit v závislosti na poloze přijímací antény. Protože je obvyklé uvádět změny RCS pomocí decibelů, je tam jak změna v poměrné velikosti, tak i v decibelech. Je zřejmé, že 10 000 násobné zmenšení RCS sníží maximální dosah pouze 10 násobně. To může být významné z vojenského hlediska, ale při měření rychlosti stabilním policejním radarem to příliš nepomůže.

Pro konstrukci „neviditelných“ letadel se vycházelo z předpokladu, že nepřítel používá monostatické radary s obvyklými frekvencemi. To ovšem vytváří principiální nevýhody, které lze využít pro metody detekce („vidění“) těchto letadel.

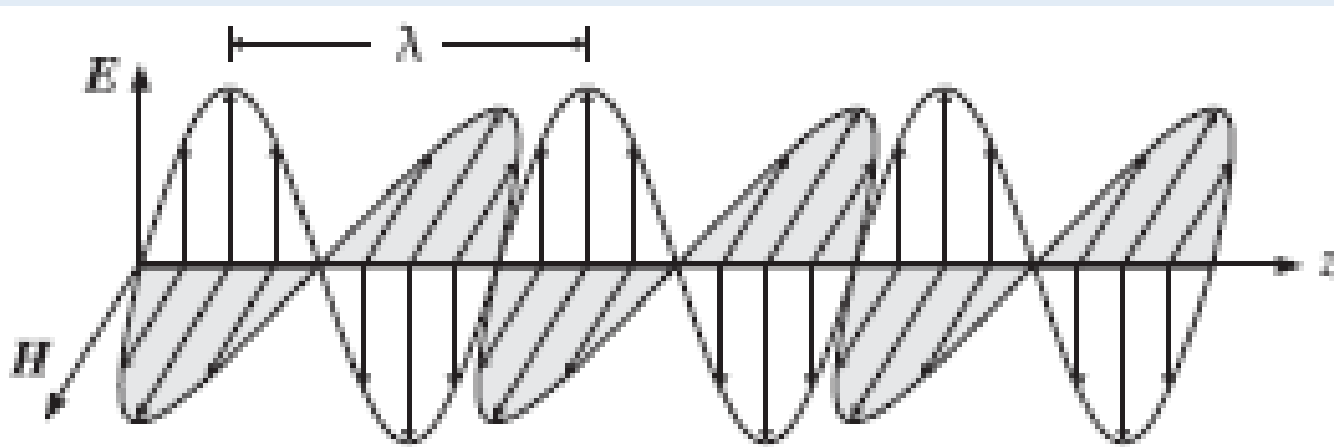
Existují dvě nejvýznamnější metody snižování RCS. Je to jednak použití absorbérů a také změnou tvarů cíle. Nedůležitější je tvarování, které způsobí odraz do jiných směrů. Absorpční materiály, které mění vyzařovanou energii na teplo, sníží odraženou energii řádově deset až stokrát. Protože potřebujeme snížit odraženou energii alespoň tisíc až 10 000 krát je tvarování základní metoda.

PŘENOS DAT MEZI DVĚMA ANTĚNAMI

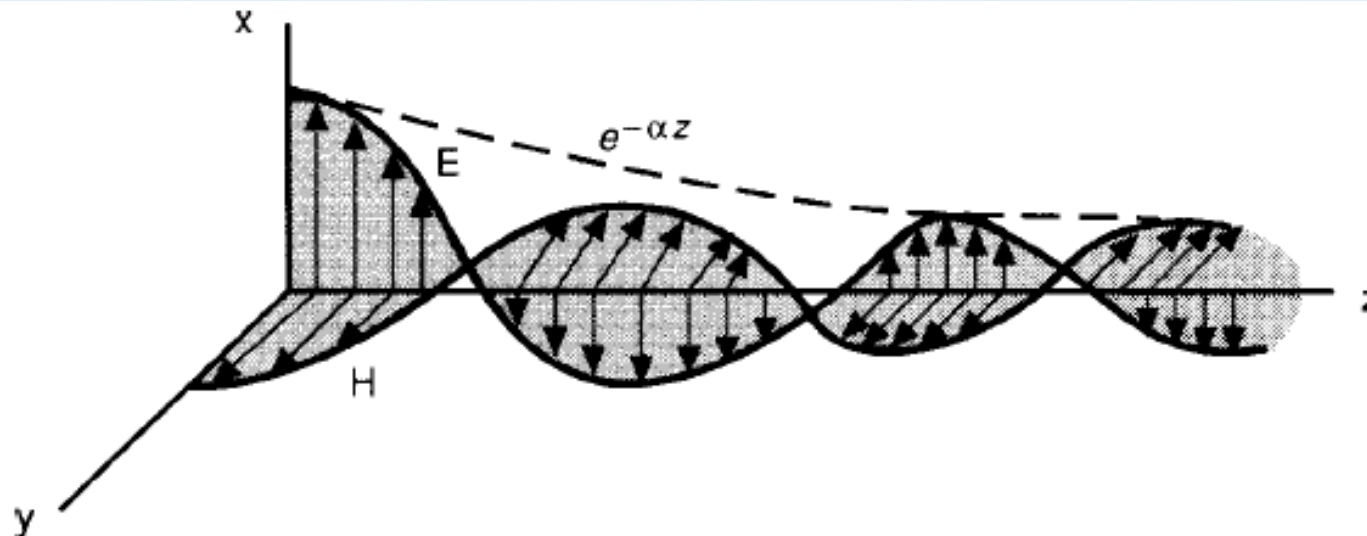


Rovinné vlny představují ve velké vzdálenosti vhodnou aproximaci pro kulové vlny vyzařované vysílací anténou

Šíření rovinné elektromagnetické vlny ve volném prostoru



Šíření ve vzduchu (dielektriku s malými ztrátami)



Šíření rovinné elektromagnetické vlny se sinusovým průběhem (vlnovou délkou λ) rychlostí v .

Pokud se mění sinusový průběh s frekvencí $f = 1/T$, kde T je perioda, bude zřejmě platit

$$v = \lambda f$$

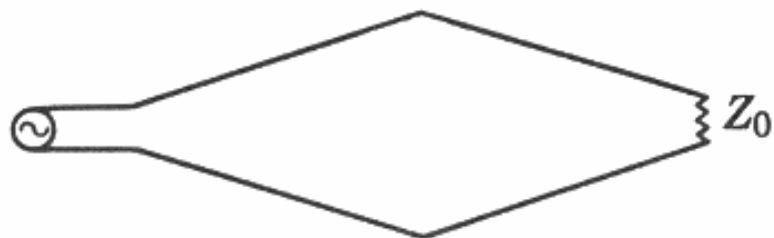
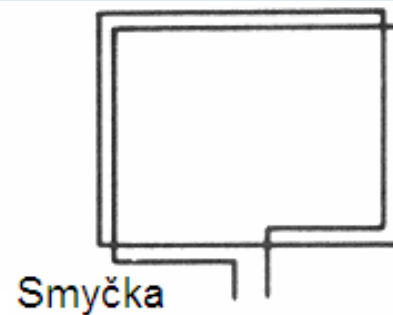
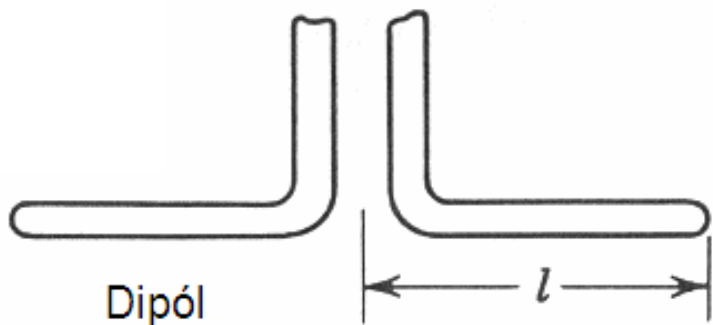
(za 1 s urazí vlna dráhu v což bude f vlnových délek λ)

Volba typu antén

Mnoho elektronických zařízení volí pro návrh spíše estetická hlediska, než dobré elektrické vlastnosti, i když požadavek vysoké účinnosti pro daný typ antény je velmi důležitý. Pro elektricky malé antény (menší než vlnová délka) se budou jejich vlastnosti zhoršovat přítomností okolních předmětů (např. při použití mobilního telefonu v blízkosti hlavy může účinnost klesnout na 10% a proto je vhodné používat reproduktor nebo hands-free). Proto bylo vyvinuto velké množství typů antén, kde se požadují miniaturní rozměry (přitom jejich návrh může být velmi komplikovaný). Jedná se o vyžívání principů použitelných pro zmenšení antén (např. použití krytu jako vyzařujícího elementu, použití dielektrik, kombinace elektrických a magnetických antén).

Na druhé straně existuje řada systémů, kde na rozdíl od spotřební elektroniky budou specifikace uvedené v popisu snadněji kontrolovatelné zákazníkem (např. antény pro radary či s vysokou směrovostí). Proto degradace systému vlivem antén nebudou akceptovatelné a protože prostorově malé antény mají obvykle podstatně horší vlastnosti, budou vyžadovat i větší rozměry (elektricky velké antény).

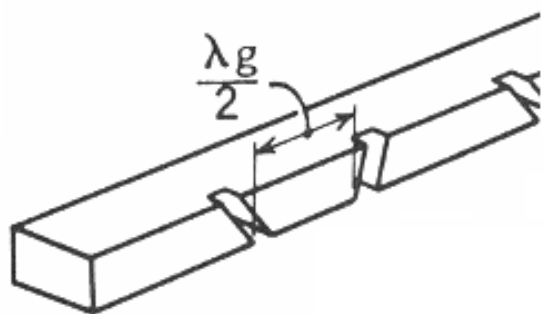
TYPICKÉ ANTÉNY



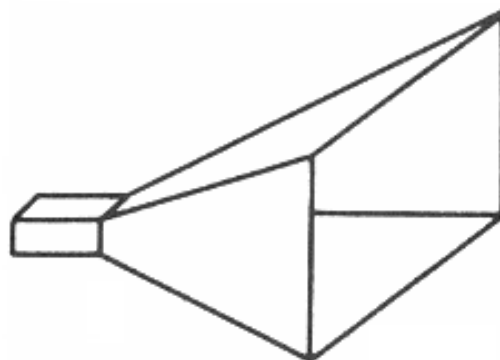
Rombická anténa



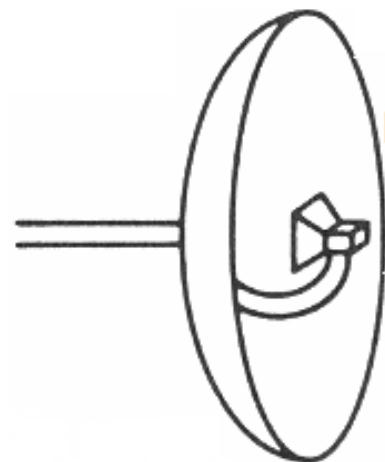
Mikrovlnná „patch“ anténa
Zemnicí deska



Vlnodová štěrbinová anténa
(řada)



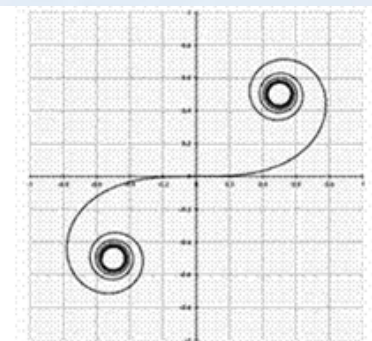
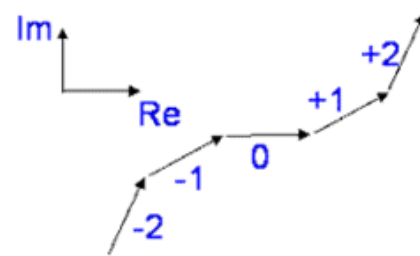
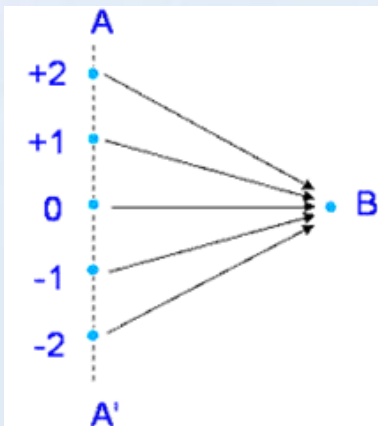
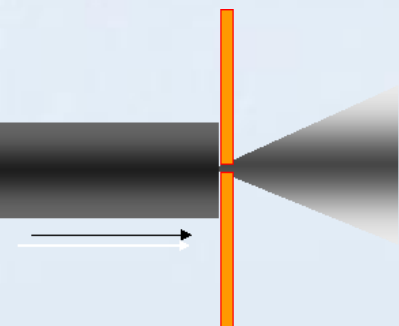
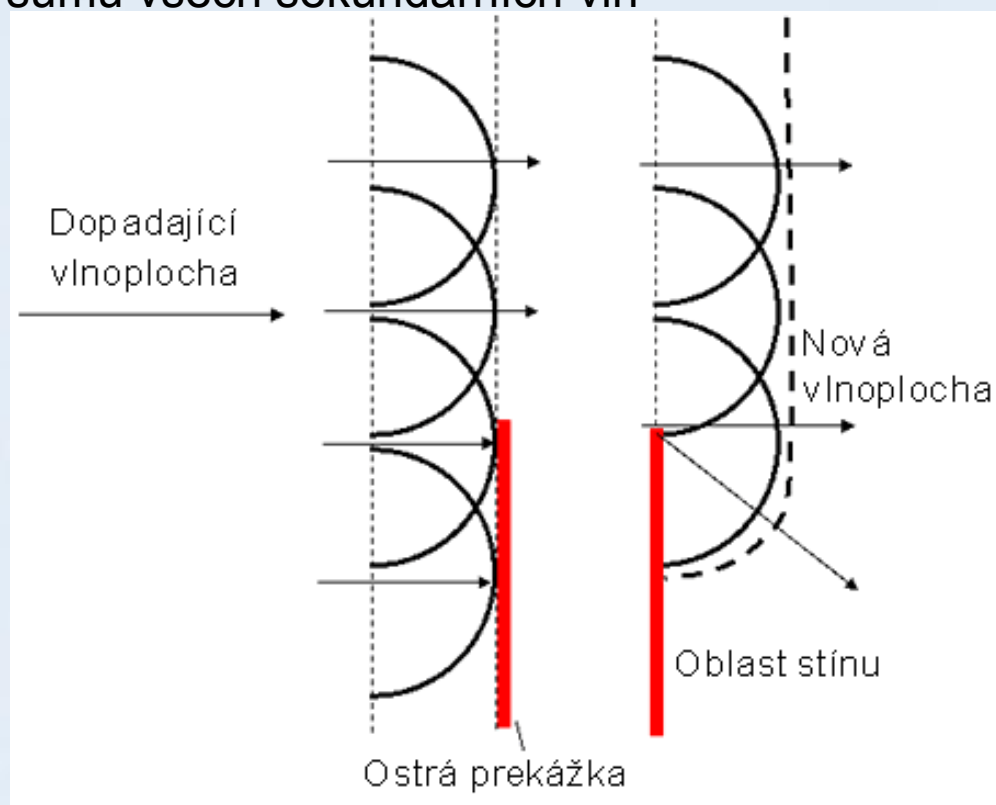
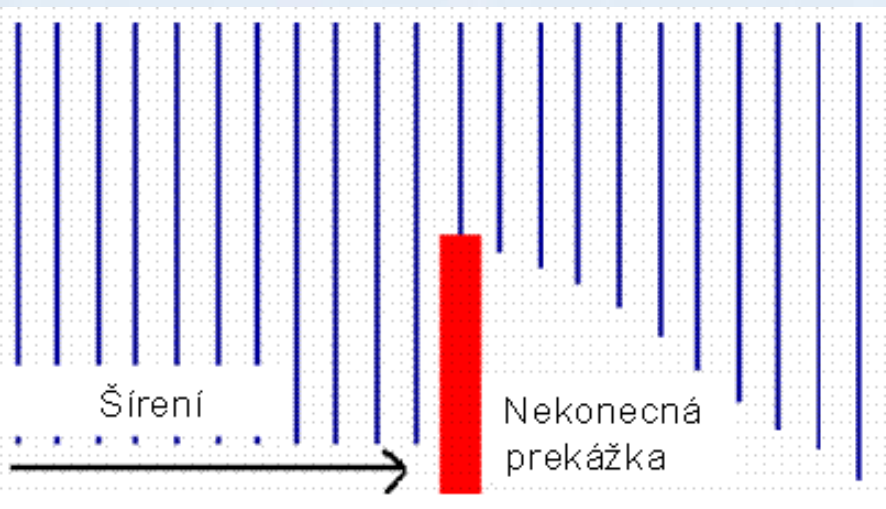
Trychtýřová anténa



Parabolický reflektor
s napáječem
v ohnisku

DIFRAKCE VLN

Huygensův princip. Každý bod vlnoplochy můžeme uvažovat jako zdroj nové vlnoplochy, kterou budeme uvažovat jako sumu všech sekundárních vln

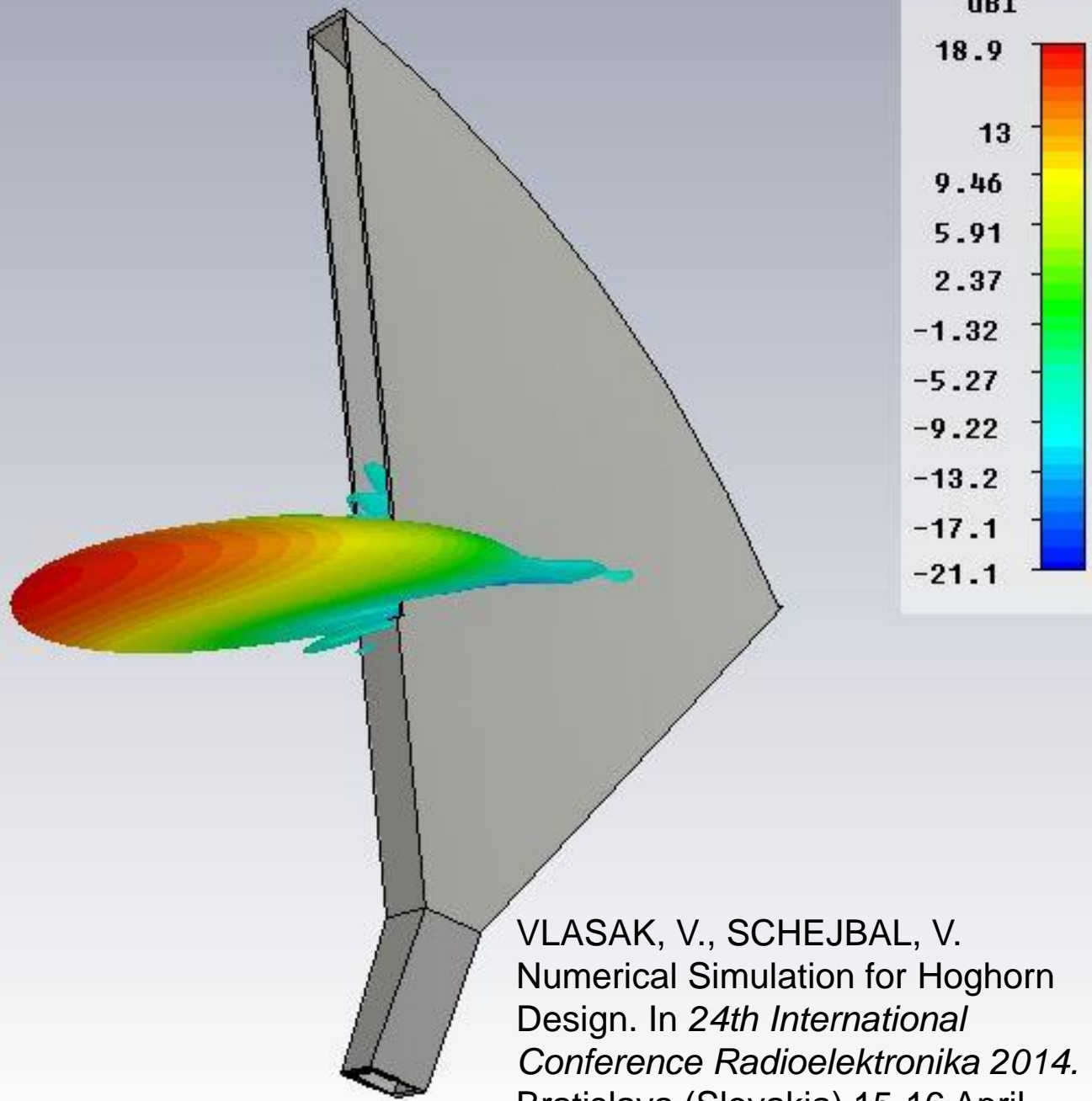


Suma fázorů

Cornu spirála
Nekonečná suma

NUMERICKÉ SIMULACE

Analýza antény pomocí numerické simulace (výsledek z projektu studenta doktorského studia), kdy pomocí vhodného software je možné nejen provádět výpočty elektrického pole, ale i dalších veličin (v tomto případě směrovosti antény) včetně znázornění geometrie studovaného objektu.



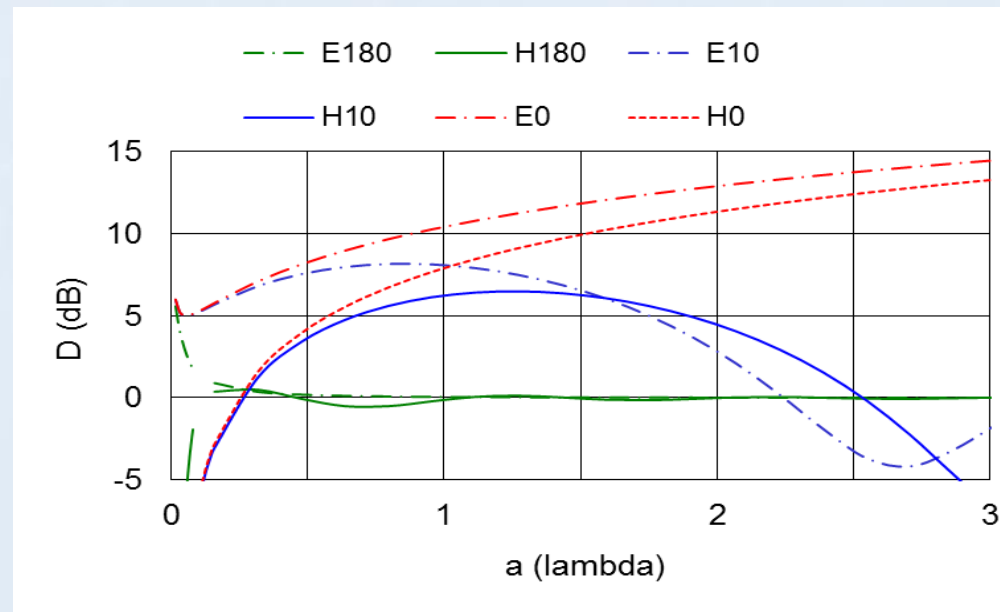
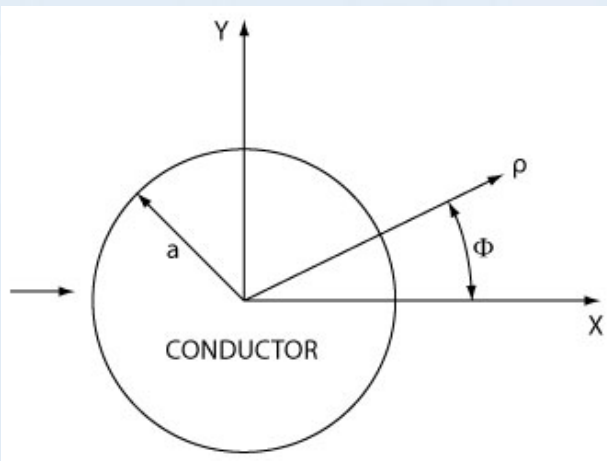
VLASAK, V., SCHEJBAL, V.
Numerical Simulation for Hoghorn
Design. In *24th International
Conference Radioelektronika 2014*.
Bratislava (Slovakia) 15-16 April
2014, p. 1 - 4.

TVAROVÁNÍ CÍLE

Tvarováním cíle, tzn. úmyslným výběrem 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.

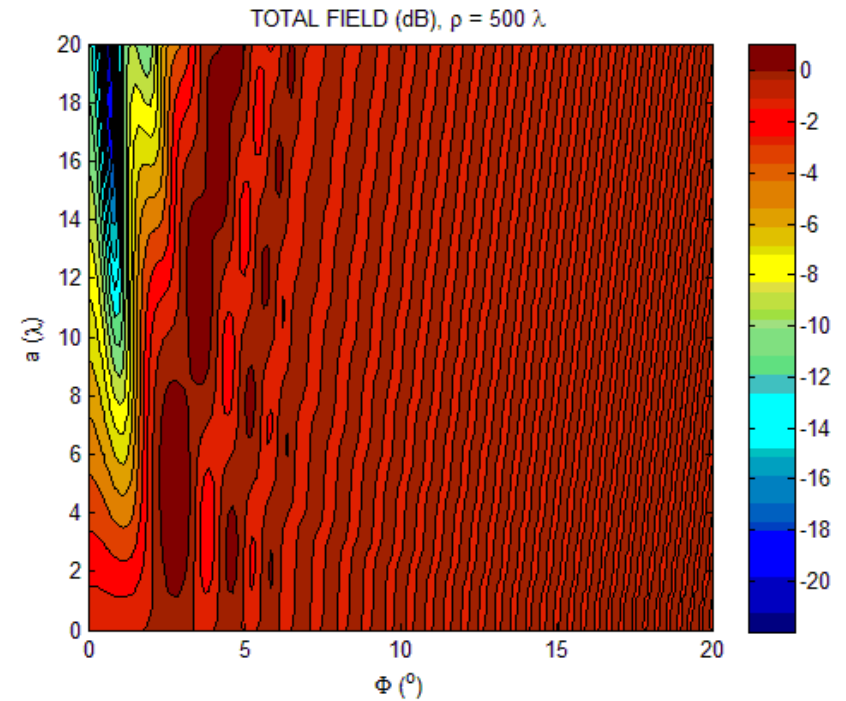
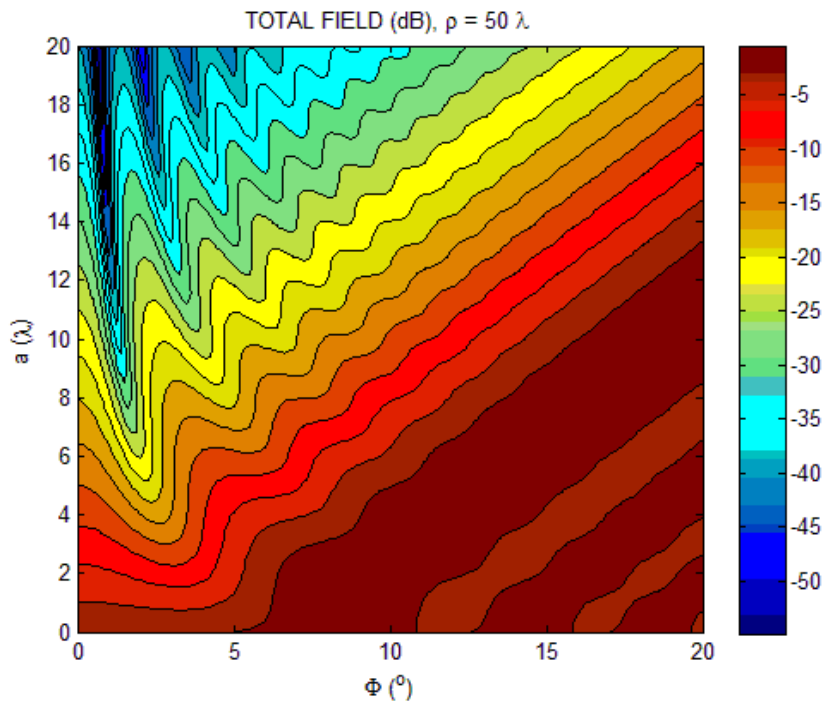
Jako jeden z nejjednodušších případů lze uvést zdroj vyzařující v přítomnosti vodivého nekonečně dlouhého válce. Uvažujeme-li dopadající rovinnou vlnu s ozářenou levou polovinou válce a zastíněnou pravou polovinou válce, pak můžeme určit jak rozptýlené, tak i celkové pole (součet dopadajícího a rozptýleného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

Rozptýlené pole $D=10 \log [\sigma/(2\pi a^2/\lambda)]$ -
vodivý válec o délce l s poloměrem a



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.

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.



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, aut atd.).

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

$$\sigma = \pi a_1 a_2$$

Kout se dvěma stěnami (obdélníky se stranami a, b)

$$\sigma = 8\pi \frac{(ab)^2}{\lambda^2}$$

Kout se třemi stěnami (trojúhelníky se stejnými odvěsnami b)

$$\sigma = 4\pi \frac{b^4}{3\lambda^2}$$

Neabsorbující dutina s otvorem S , náhodné odrazy

$$\sigma \approx 2S$$

Pro vývoj „neviditelných“ letadel měly obrovský význam různé (dostatečně přesné) přibližné metody. Fyzikální teorie difrakce, kterou původně vyvinul prof. Ufimtsev v padesátých letech v bývalém SSSR, 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 technologií“, 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 vhodně zvolených hodnot na povrchu tělesa.

Geometrický princip říká, že pro dostatečně vysokou frekvenci, kdy je vlnová délka dostatečně malá ve srovnání s 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 zvláště důležité pro konstrukci, 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) a tedy 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. Určí se 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..

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.

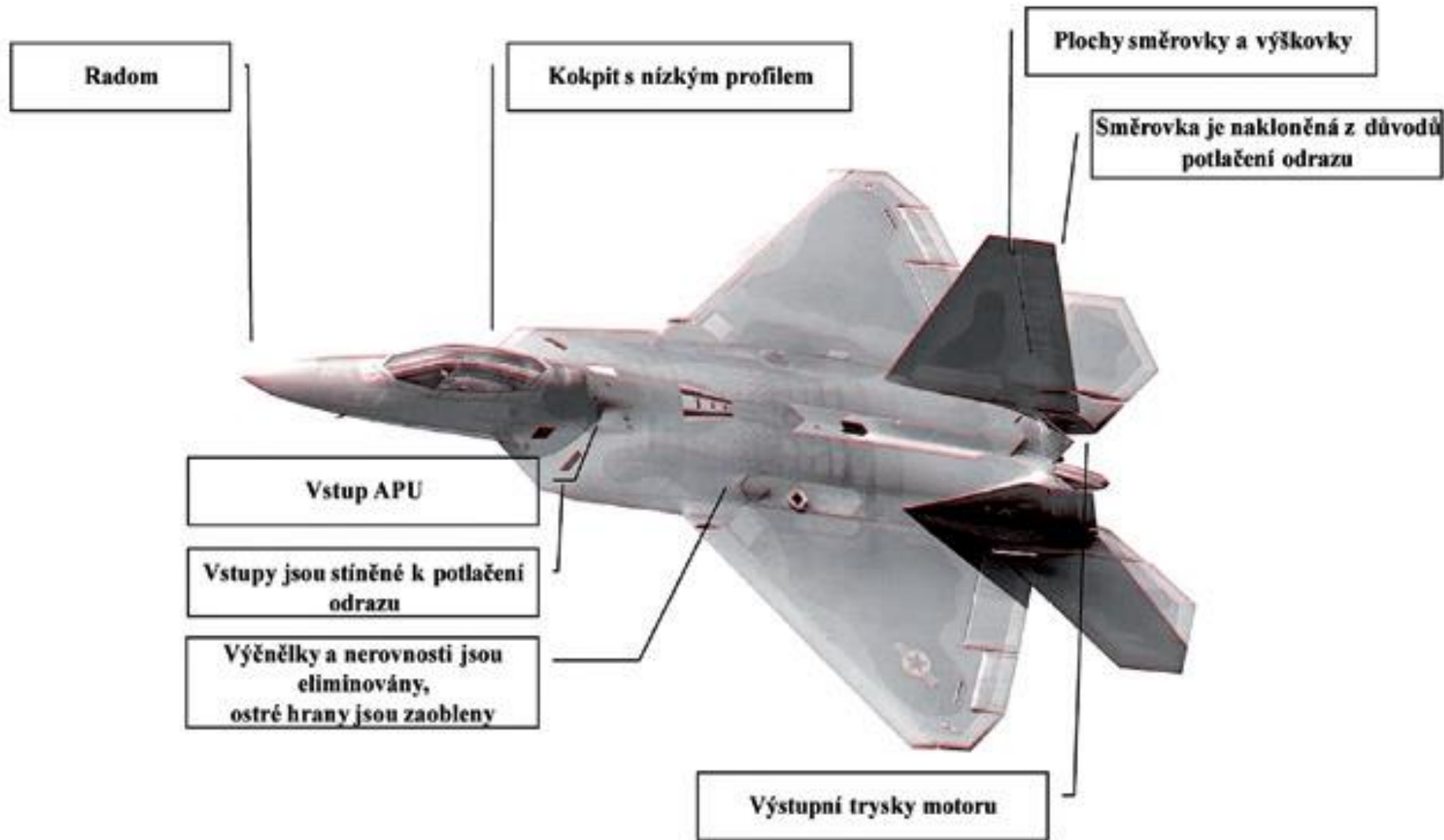
PTD tedy může najít přesně odrazy a difrakce od tělesa s komplikovaným tvarem bez toho, že přizpůsobuje celé těleso kanonickým problémům, minimalizuje obtíže sladění geometrie tělesa a kanonického problému a dává difrakční paprsky ve všech směrech od každého prvku lineární difrakční části, nejen pouze 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.

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 –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 odrážejí paprsky do několika diskretních směrů, ale zakřivené plošky je rozptylují v širokém sektoru.

Nejprve se vychýlí všechny odražené paprsky ve směru k radaru - 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 odrážejí paprsky do několika diskretních směrů, ale zakřivené plošky je rozptylují v širokém sektoru (ovšem pro vysoké rychlosti jsou často nezbytné).



Pro snížení monostatické RCS lze doporučit odstranění koutů s úhly 90° , 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 budou 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 odraženy 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. Nejvzdálenější 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.

RADAROVÉ ABSORBÉRY

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. Snížení 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 zvlňením. 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 vyzařování“ (shadow radiation). 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 vyzařování“ 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.

Metamateriály mohou realizovat řadu praktických aplikací pomocí fraktálových antén. To by v budoucnu mohlo vyvolat úvahy o jejich použití pro pokrytí „neviditelných“ letadel.

Pro izotropní a lineární prostředí platí

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E}.$$

Podle charakteru parametrů ε , μ a σ dělíme prostředí podle různých hledisek. Pro **lineární prostředí** nezávisí parametry ε , μ a σ na intenzitách pole. Pro **nelineární prostředí** jsou parametry ε , μ a σ (buď všechny nebo některý) funkcemi intenzit pole – např. feromagnetika mají závislost $\mu = \mu(\mathbf{H})$, feroelektrika $\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{E})$ a u většiny polovodičů $\sigma = \sigma(\mathbf{E})$.

Homogenní prostředí - ε , μ a σ jsou konstantní ve všech bodech daného prostředí, u **nehomogenních** se mění ε , μ a σ buď plynule nebo skokem. Jsou-li vlastnosti materiálů nezávislé na směru vektorů intenzit pole, je **prostředí izotropní**. V **anizotropním prostředí** závisí na směru vektorů, takže vektory (buď všechny nebo některé) \mathbf{D} a \mathbf{E} , \mathbf{B} a \mathbf{H} a \mathbf{J} a \mathbf{E} nejsou navzájem rovnoběžné a parametry ε , μ a σ mají **tenzorový** charakter.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \mathbf{E} = \underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \mathbf{H} = \underline{\underline{\mu}} \cdot \mathbf{H} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \mathbf{E} = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \mathbf{E}$$

Např. krystaly jsou obecně popsány symetrickými tenzory permitivity a vždy existuje transformace souřadnic, která transformuje symetrickou matici do diagonální matice.

Na rozdíl od anizotropních (popř. izotropních) prostředí existuje v **bianizotropním prostředí** vzájemná vazba mezi elektrickými a magnetickými poli

$$\mathbf{D} = \overline{\overline{\varepsilon}} \cdot \mathbf{E} + \overline{\overline{\xi}} \cdot \mathbf{H} \quad \mathbf{B} = \overline{\overline{\zeta}} \cdot \mathbf{E} + \overline{\overline{\mu}} \cdot \mathbf{H}$$

kde $\overline{\overline{\varepsilon}}, \overline{\overline{\xi}}, \overline{\overline{\zeta}}$ a $\overline{\overline{\mu}}$ jsou tenzory a pro biizotropní (chirální) prostředí to budou skaláry.

Tato prostředí často nabízí nové principy, které lze využít nejen pro teoretické analýzy, ale i pro návrh zařízení, která nelze realizovat pomocí anizotropních materiálů.

Na rozdíl od obvyklých materiálů, kde ε i μ jsou kladné, mohou mít **metamateriály** oba parametry záporné (double negative DNG materiály), což může vést na zcela nová řešení. Vzhledem k překotnému vývoji není terminologie ve světové literatuře ani zdaleka ustálená.

I když byly metamateriály teoreticky analyzovány již od poloviny dvacátého století, možnost realizace takových materiálů byla popsána až v roce 1999 a v současnosti jsou popisovány jak nové možnosti jejich realizace, tak i zcela nové aplikace (např. integrované antény mobilní telefony, které jsou určeny pro náhradu několika klasických antén).

Šíření rovinné vlny v metamateriálech. Pro nevodivé prostředí bez zdrojů platí $\rho_f = \sigma = \mathbf{J}_f = 0$ a Maxwellovy rovnice se změňjí na tvar

$$-j \mathbf{k} \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H}, \quad -j \mathbf{k} \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon \mathbf{E}$$

V obvyklých materiálech to znamená, že $(\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k})$ tvoří pravotočivý systém, zatímco pro $\varepsilon < 0, \mu < 0$ to znamená, že tvoří levotočivý systém. Ovšem Poyntingův vektor je stále $\text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]/2$ a tedy tvoří pravotočivý systém.

Proto \mathbf{k} je ve směru fázové rychlosti, fázová rychlost a tok energie mají opačný směr. Je-li

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) < 0 &\Rightarrow \varepsilon(\omega) = |\varepsilon(\omega)| \exp(j\pi) \\ \mu(\omega) < 0 &\Rightarrow \mu(\omega) = |\mu(\omega)| \exp(j\pi) \\ n = (|\varepsilon(\omega)| |\mu(\omega)|)^{1/2} \exp(j\pi) &= - (|\varepsilon(\omega)| |\mu(\omega)|)^{1/2} \end{aligned}$$

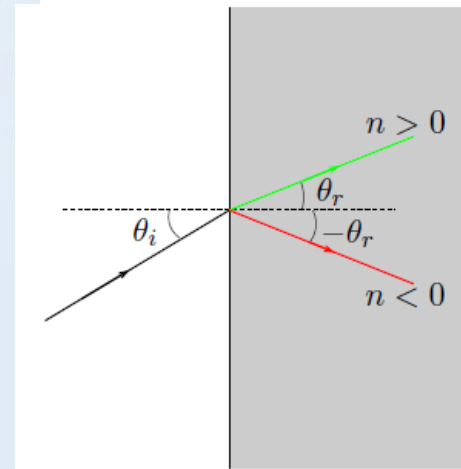
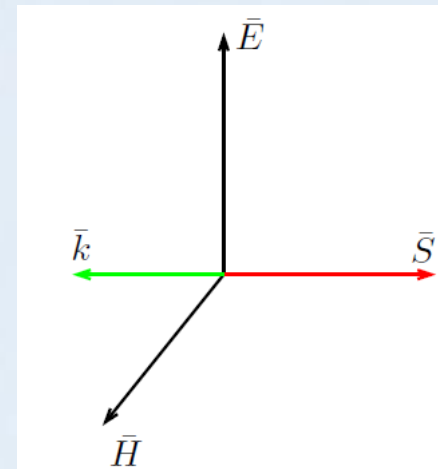
Tzn. dostaneme záporný index lomu a tedy i opačný Snellův zákon.

Poyntingův teorém dává

$$-\text{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_f$$

Není možné, aby celková energie byla záporná. Metamateriály tedy mohou mít $\varepsilon(\omega) < 0$ a $\mu(\omega) < 0$ pouze pro úzké frekvenční pásmo (jsou silně disperzivní) a dostaneme (a tedy příslušné derivace musí být kladné)

$$\iiint_V \left(\frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} H_m^2 + \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} E_m^2 \right) dV > 0$$

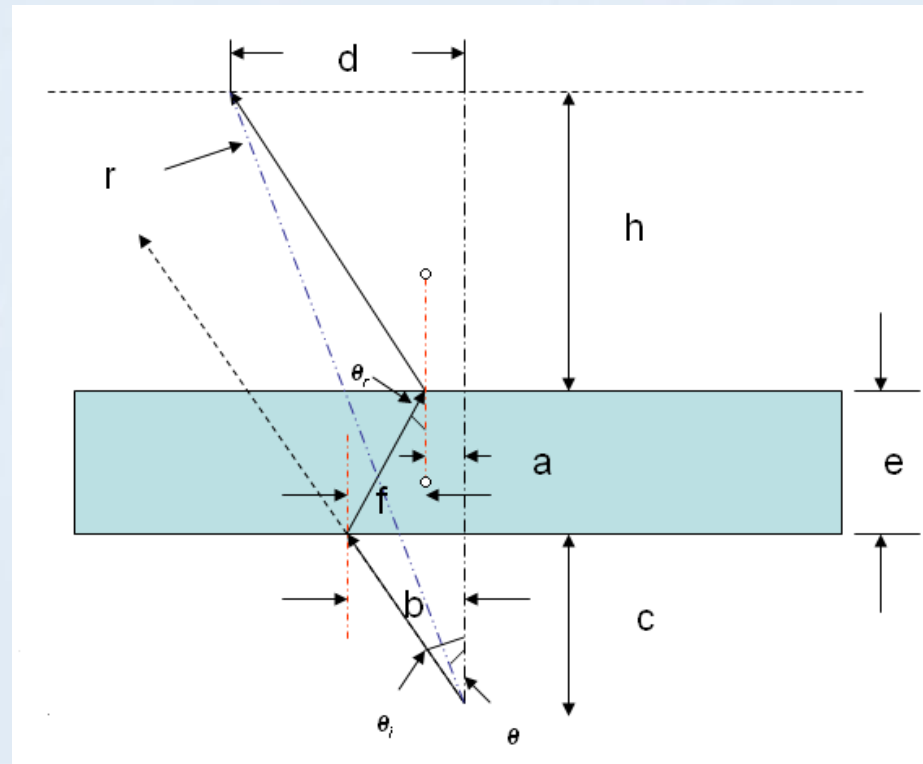
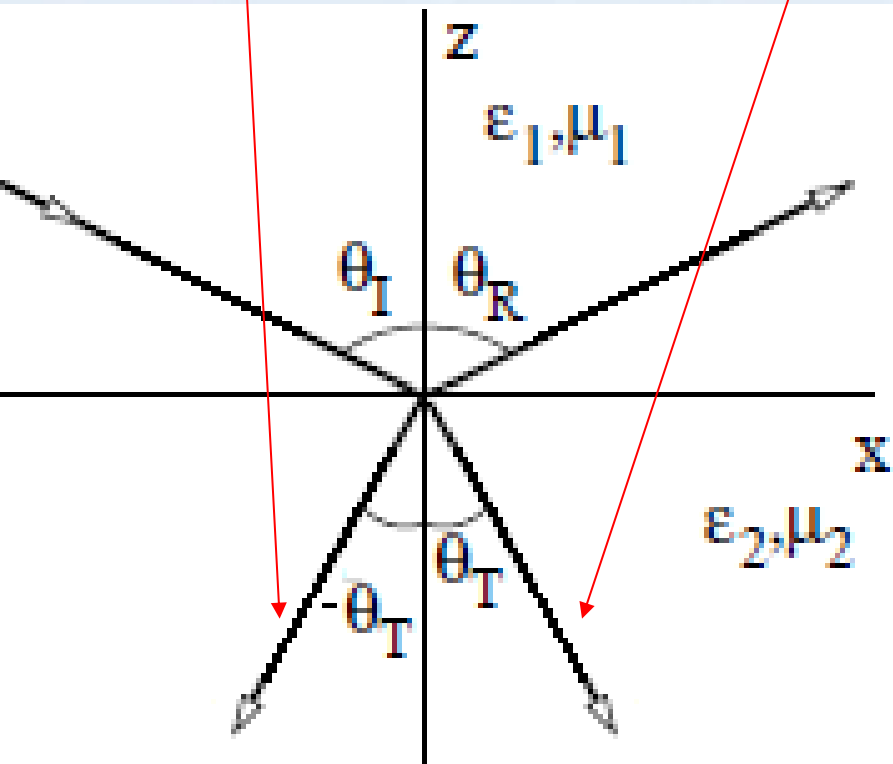


Tok energie určuje Poyntingův vektor $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$, který je vždy dán pravidlem pravé ruky. Pro obvyklé materiály mají $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ a vektor \mathbf{k} stejný směr, ale pro metamateriály mají opačný směr (\mathbf{k} je záporné). Odražený paprsek svírá stejný úhel s normálou ($\theta_I = \theta_R$) a procházející paprsek se láme podle Snellova zákona

$$k_1 \sin \theta_I = k_2 \sin \theta_T, \quad \text{popř. } n_1 \sin \theta_I = n_2 \sin \theta_T,$$

kde index lomu $n = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$. Pro **obvyklé materiály** svírá paprsek s normálou úhel θ_T , ale **pro metamateriály** je to záporný úhel $-\theta_T$.

Pro desku z metamateriálu dochází ke dvěma lomům na rovnoběžných rozhraních. Pokud by se index lomu neměnil (což obecně nebude platit) budou vlivem dvou negativních lomů dopadající a vystupující rovnoběžné (s úhlem θ_i). Při změně indexu lomu v desce bude mít vystupující paprsek jiný směr.



Příklad: Metamateriálová buňka, která umožňuje měnit efektivní parametry ($\epsilon_{r,ef}$ a $\mu_{r,ef}$) v určitém frekvenčním rozpětí. Magnetický rezonátor je tvořen dvěma symetrickými kovovými kroužky tištěnými na stejné straně substrátu s diskontinuitou uprostřed. Na spodní straně je kovový proužek tvořící elektrický rezonátor.

Příklad: V dnešních komunikacích je velmi složité prostředí – např. na lodích nebo letadlech v důsledku dopředného rozptylu vzniká **hluboký stín (blokování)**. V těchto případech by bylo možné **pokrýt (nehomogením a anizotropním metamateriálem s vhodným $\epsilon_{r,ef}$ a $\mu_{r,ef}$)** stínící předměty, které se stanou průhledné pro pracovní frekvence. Anténa pak vysílá i přijímá jako v případě volného prostoru (jak z hlediska vyzařovacích diagramů, tak i impedancí). To bylo potvrzeno numerickými simulacemi i experimentálně (mikrovlny, viditelné světlo).

JAK DETEKOVAT NEVIDITELNÁ LETADLA

„Drobná vada“ - rychlost letadel je vyšší než rychlost zvuku



BISTATICKÉ AND MULTISTATICKÉ RADARY

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.

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. Otázka je jak vyřešit zpracování signálů. Je tedy nepravděpodobné, že by se mohl vyvinout praktický aktivní radar, který by odhaloval stealth letouny.

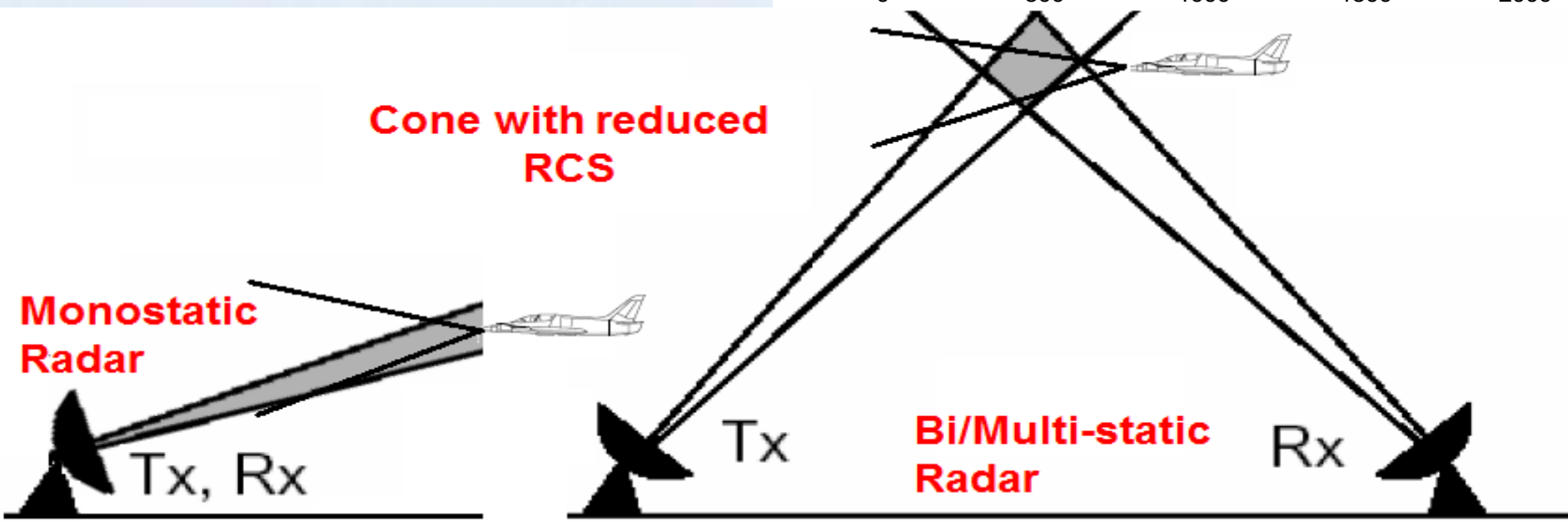
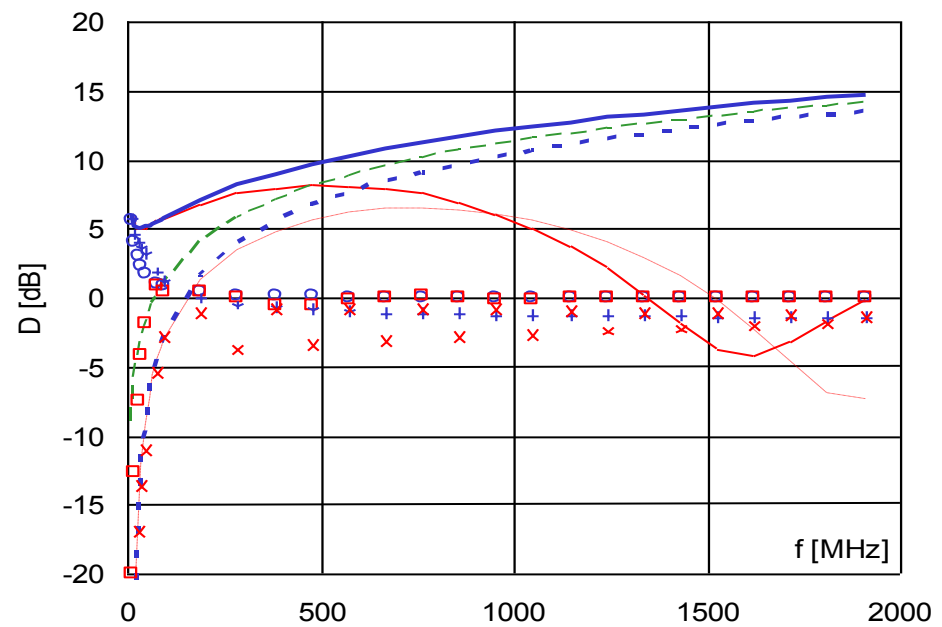
Pasivní radary žádný signál nevysílají a přijímají buď signál vysílaný cílem, nebo signál vyslaný z jiných zdrojů (např. TV vysílačů) a cílem odražený. Rozsáhlejší nasazení nastalo až v sedmdesátých a civilní verze vznikají dokonce až v devadesátých letech minulého století.

Bistatická RCS je mírně menší než monostatická RCS (RCS E 0 a RCS H 0). Dopředný rozptyl (RCS E 180 a RCS H 180) je mnohem větší než monostatická RCS. Pro nižší frekvence bistatická RCS pro úhly blízko 180° (např. RCS E 170 a RCS H 170) je větší. To je díky tomu, že šířka svazku mezi nulami je

$$\theta_0 \approx 57\lambda / d \quad [^\circ]$$

kde d je lineární rozměr cíle. To znamená, že dopředný rozptyl je větší pro vyšší frekvence.

- RCS E 0 □ RCS H 0 + RCS E 90
- × RCS H 90 — RCS E 170 — RCS H 170
- RCS E 180 - - - RCS H 180 - - - Eq. (1)

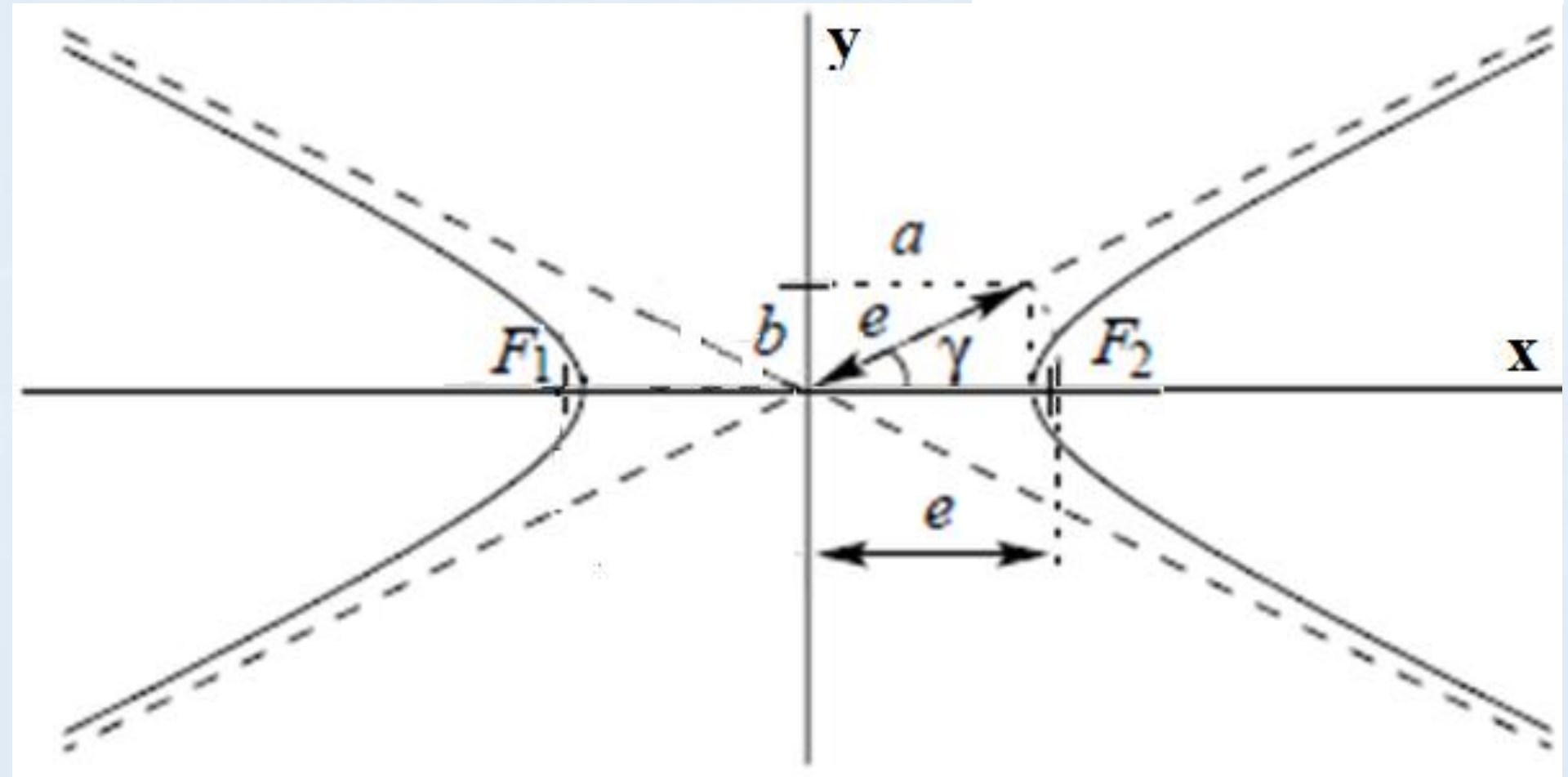
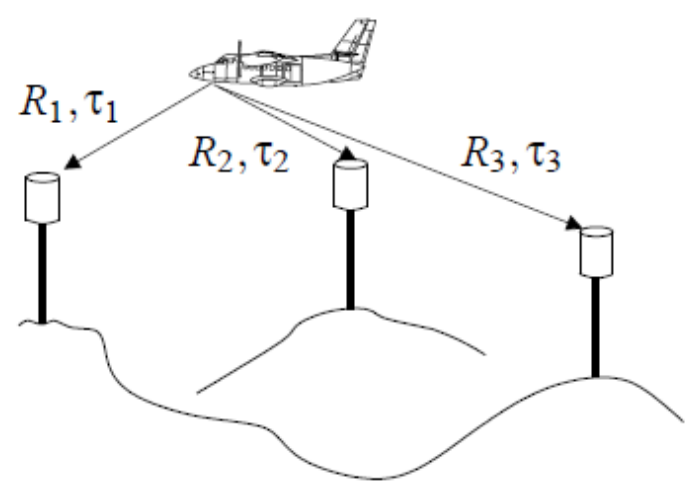
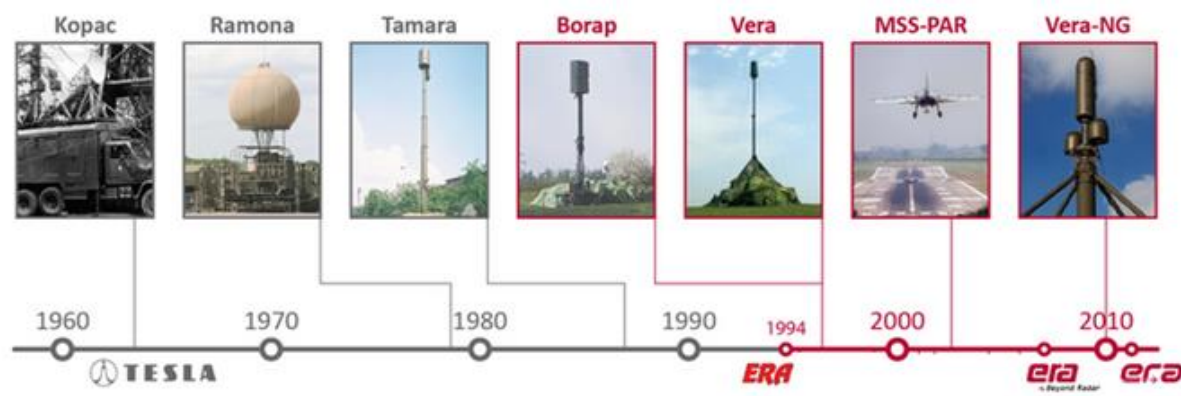


PASIVNÍ RADARY

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 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.

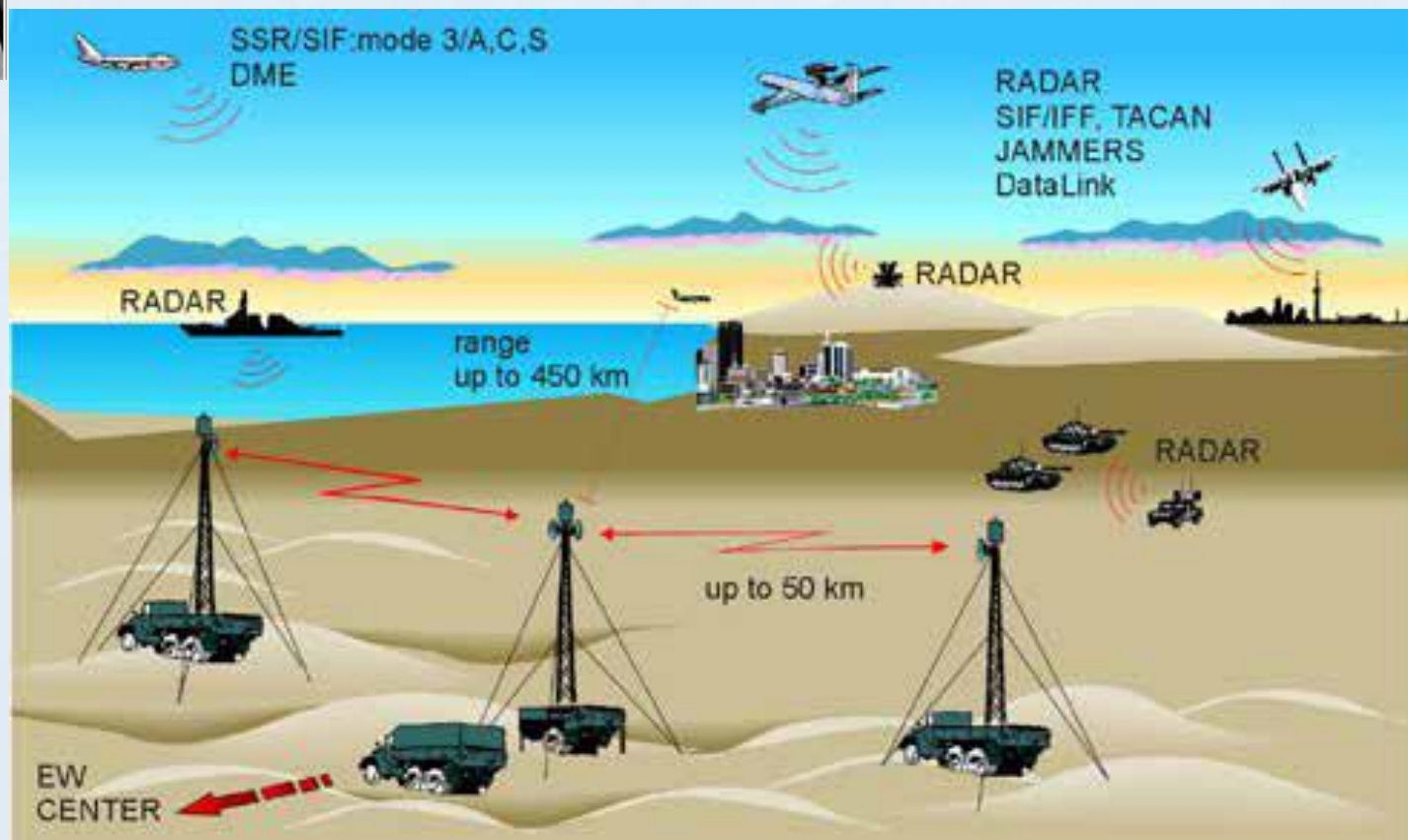


Pasivní radary (multilaterační systémy).

Vlevo zařízení Tamara a dole nástupce (vojenské i civilní verze) zařízení Vera, která se používá pro moderní přehled a sledování letů pro vojenské a bezpečnostní operace, řízení letového provozu a provoz letiště.

Pochopitelně námitka, že stealth zařízení nebude během operace vysílat žádné signály je značně diskutabilní.

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

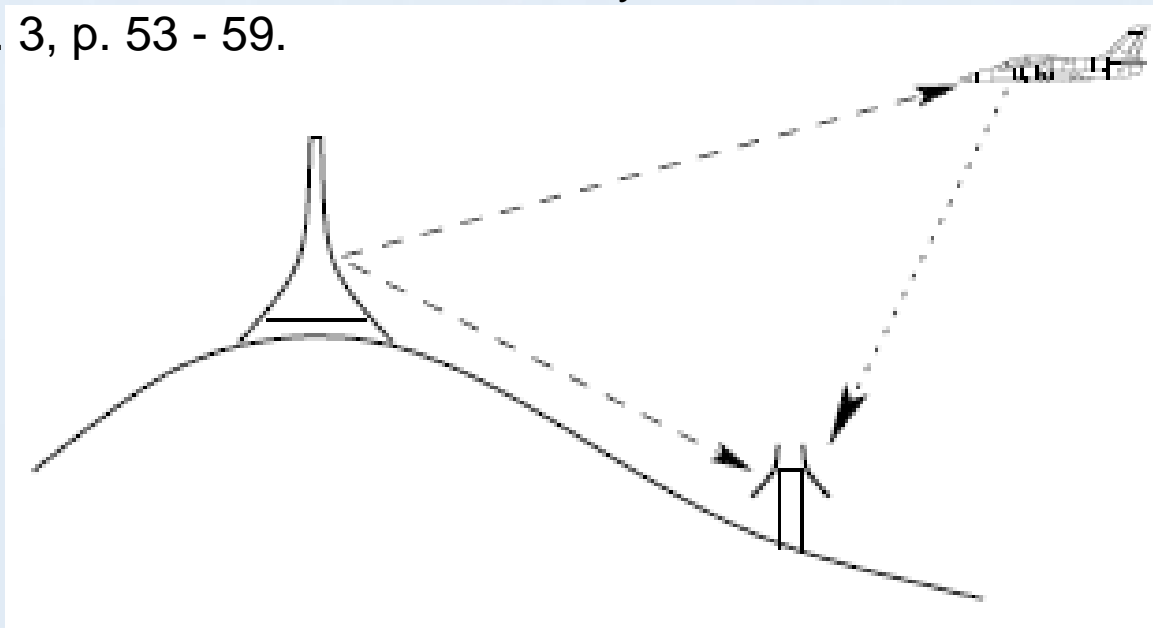


U pasivní koherentní lokace (passive coherent location PCL) jsou systémy založené na využití nejrůznějších „příležitostných“ systémů jako jsou FM rádiové vysílače, analogové nebo digitální televizní vysílače, GSM základové stanice atd. Vysílače pokrývají signály monitorovanou oblast a PCL systémy přijímají přímé signály a signály odražené od okolních předmětů. Ze srovnání přímých a odražených signálů je možné najít polohy a rychlosti těchto odražejících předmětů. Pro implementaci takového radaru je potřebný pouze „jednoduchý“ přijímač a veškerá zodpovědnost je přenesená na velice pokročilé digitální zpracování signálů.

PCL přináší další přínos, zejména pro vojenské uživatele – detekci „neviditelných“ cílů (což může být užitečné i pro civilní použití). Tyto cíle (např. „neviditelná“ letadla) jsou navrženy tak, aby byl minimální odražený signál ve směru dopadajícího paprsku. Pokud je vysílač prostorově oddělený od přijímače, je odražený signál mnohem větší a detekce je snadnější.

BEZOUSEK, P., SCHEJBAL, V. Bistatic and Multistatic Radar Systems.

Radioengineering, 2008, vol. 17, no. 3, p. 53 - 59.



ZÁVĚR

Dnes zastávají vojenské radary řadu funkcí v letectví, v raketové technice, v lodní navigaci, ochraně vzdušného prostoru atd. Jejich rozvoj ve světě a ČR (díky nejrůznějším grantovým projektům) často přispívá k celkovému rozvoji radarů a vývoji nových technologií. Radary se nepoužívají pouze pro vojenské, ale v současné době velice intenzívně i pro civilní použití, zejména dopravu. Ve skutečnosti je civilní využití nesrovnatelně častější než ve vojenské oblasti.

Byly popsány základní principy použité pro konstrukci „neviditelných“ cílů („stealth technology“). Pro monostatické radary lze značně snížit pravděpodobnost detekce cíle (např. letadel či lodí) nepřátelskými radary tím, že podstatně zmenšíme efektivní odraznou plochu (radar cross section - RCS). To z vojenského hlediska přináší výhodu, že se cíl se může „nepozorovaně“ přiblížit, tzn. bude zpozorován mnohem později.

Byly analyzovány hlavní možnosti jak tvarování cíle, tak i použití absorbérů radarem vyslané energie.

Byly uvedeny základní možnosti, jak detekovat stealth letadla a přínos československého (popř. českého) výzkumu, vývoje a produkce těchto zařízení.

SEMINÁŘ O ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN V BIOLOGICKÝCH TKÁNÍCH

Pořádá: Univerzita Pardubice (UPce), Dopravní fakulta Jana Pernera (DFJP), KEEZ
IEEE Czechoslovakia Section, Chapter MTT/AP/ED/EMC

Termín: 11. května 2017 (čtvrtek)

Místo: Univerzita Pardubice, Zasedací místnost děkanátu DFJP

- 9:00 – 10:00 Registrace
- 10:00 – 10:05 Zahájení semináře
- 10:05 – 10:35 Fyzikální základy šíření EM vln v biologických tkáních
- 10:35 – 11:00 Měření komplexní permitivity biologických tkání
- 11:00 – 11:30 Numerické simulace šíření EM vln v lidském těle
- 11:30 – 12:00 Aplikátory a expoziční komory pro biomedicínské aplikace EM polí
- 12:00 – 13:00 Přestávka na oběd
- 13:00 – 13:30 Klinické aplikace EM pole
- 13:30 – 14:00 Principy neinvazivního měření změny teploty na bázi UWB radaru
- 14:00 – 14:30 Principy lékařské diagnostiky na bázi mikrovlnné diferenční tomografie
- 14:30 – 15:00 Diskuse

Účastníci Univerzity 3. věku vstup volný

DĚKUJI ZA POZORNOST