

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 661

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Michal Fuchs

**Měření trajektorie
malých cílů
pomocí sítě CW radarů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

Ing. Michal Fuchs

**MĚŘENÍ TRAJEKTORIE MALÝCH CÍLŮ POMOCÍ
SÍTĚ CW RADARŮ**

TRAJECTORY RECONSTRUCTION WITH
DOPPLER CW RADAR ARRAY

ZKRÁCENÁ VERZE DISERTAČNÍ PRÁCE

OBOR	Elektronika a sdělovací technika
VEDOUCÍ PRÁCE	doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.
OPONENTI	prof. Ing. Dušan Kocur, CSc. doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.
DATUM OBHAJOBY	15. KVĚTEN 2012

Klíčová slova

Dopplerův radar, rekonstrukce trajektorií, optimalizace trasovacích metod, multi-trajektoriální identifikace

Keywords

Doppler radar, trajectory reconstruction, tracking method optimizing, multi-trajectory identification

Disertační práce je uložena na adrese

Ústav radioelektroniky
Purkyňova 118
612 00 Brno

© Michal Fuchs, 2012

ISBN 978-80-214-4526-0

ISSN 1213-418X

Obsah

ÚVOD	4
1. POUŽÍVANÉ METODY – SOUČASNÝ STAV	5
REKONSTRUKCE TRAJEKTORIE V 3D PROSTORU	5
METODY MULTI-TRAJEKTORIÁLNÍ A MULTI-SENZOROVÉ IDENTIFIKACE	7
2. CÍLE DISERTACE	7
3. OPTIMALIZAČNÍ SYSTÉM	8
TRAJEKTORIÁLNÍ MATEMATICKÝ MODEL	8
VÝSTUPNÍ SIGNÁL RADAROVÉ HLAVICE	9
SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA	10
VÁHOVÁNÍ SPEKTRA	10
GAUSSOVSKÉ PŘEDZPRACOVÁNÍ VÁHOVANÉHO SPEKTRA	10
VYJÁDŘENÍ CHYBOVOSTI A ÚČINNOSTI DETEKCE	11
4. MULTI-TRAJEKTORIÁLNÍ IDENTIFIKACE CÍLŮ	11
MAPOVÁNÍ POLÍ RADIÁLNÍCH RYCHLOSTÍ	11
<i>Metoda s fixním gradientním limitem</i>	12
<i>Metoda s plovoucím gradientním limitem</i>	15
VYHLEDÁNÍ KALIBRAČNÍCH BODŮ T_{PCA}	16
PÁROVÁNÍ TRAS JEDNOTLIVÝCH SENZORŮ	18
REKONSTRUKCE POLOHY	18
<i>Ověření algoritmu na skákajícím míčku</i>	19
5. SROVNÁNÍ ÚČINNOSTI MAPOVACÍCH METOD	20
<i>Výpočet spektra a volba parametrů systému</i>	20
<i>Vytvoření mapy bodů a aplikace trasovacího algoritmu</i>	20
<i>Určení chyby a srovnání gradientních metod</i>	21
6. SIMULACE TRASOVACÍ METODY	22
VYHLEDÁNÍ KALIBRAČNÍCH BODŮ T_{PCA}	22
7. SYSTÉM PRO REKONSTRUKCI TRAJEKTORIE STŘEL	22
AKVIZIČNÍ JEDNOTKA	23
8. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	23
ZÁVĚR	24
LITERATURA	26
VLASTNÍ PUBLIKACE	26
OSTATNÍ LITERATURA	27

Úvod

V posledních letech radary nacházejí stále nové a nové oblasti uplatnění. Například použití UWB radaru k odhalování osob za překážkami pro bezpečnostní složky [37], FMCW radary pro zkoumání vrstev sněhu [38], anti-kolizní [39] a parkovací radary v automobilovém průmyslu a další.

Převážně se ke sledování objektů používají radary pracující s velice úzkým vyzařovacím svazkem definovaným v azimutu a elevaci. Šířka tohoto svazku udává vertikální i horizontální rozlišitelnost. Budicí signál apertury bývá pulzně nebo jinak speciálně modulovaný a vzdálenost se určuje podle doby šíření signálu od radaru k cíli a zpět (TOA). Tento klasický přístup přináší výhody v okamžitém určení polohy cíle, ale vyžaduje mechanické natáčení antén, případně pole fázovaných antén. Náročnější je také zpracování signálů na vysokých kmitočtech a fázování jednotlivých TX/RX modulů. To spolu s mechanickou náročností přináší vyšší náklady na celý systém.

Pro sledování pohyblivých objektů lze s výhodou využít Dopplerova jevu a systém měření z něj vycházející. Systém zpracovávající dopplerovsky posunutý signál sice nemá přímou informaci o vzdálenosti a směru, ale rovněž nemá takové nároky na anténní systém. Antény nemusí být úzce směrové, mohou mít široký vyzařovací svazek a mohou být stacionární. Zároveň vyhodnocení signálu je zde naopak prováděno v základním pásmu - na kmitočtech odpovídajících Dopplerovu posuvu. Vyhodnocování trajektorie touto cestou je řešeno dvěma přístupy, pasivním a aktivním. Pasivní metody, využívající vyzařování cíle, jsou popisovány v [12][23][24][25]. Pokud je vyzařování pulzního nebo modulovaného charakteru lze metodami [15][23] s využitím TDOA a více senzory určit i azimut cíle. Nevýhodou těchto metod je právě nutnost radiové aktivity cíle pulzního charakteru. V případě nemodulovaného vyzařování (CW) cílem jsou použitelné metody Weinsteinovy [12][15] a Weinstein-Levanonovy [12]. Jejich algoritmus vyžaduje čtyři a více senzorů pro určení pozice a rychlosti cíle.

Na rozdíl od pasivních metod, které jsou použitelné i v sonarové technice na velké vzdálenosti [24], jsou aktivní metody používány pro měření na krátké vzdálenosti. Důvodem je nízký zisk antén s velkým Θ_{-3dB} , který snižuje jejich dosah. Zpracováním fáze a kmitočtu záznamového signálu v základním pásmu z několika senzorů lze rekonstruovat 3D trajektorii objektu [10].

Aplikačně se CW radary založené na měření Dopplerova posuvu z jejich principu používají pouze pro sledování pohyblivých cílů a především pro měření jejich rychlosti. Statické objekty nevytváří žádný Dopplerův posuv frekvence a po filtraci případné stejnosměrné složky, je tak jejich vliv přirozeně zcela potlačen. Nevýhodou je, že tyto radary nedovedou přímo měřit vzdálenost k cíli. Využití potom nachází například jako náhrada PIR čidel s možností detekce osob přes zdi, pro měření rychlosti vozidel, jako dopravní radary a v armádním sektoru se používají pro semi-aktivní radarové navádění střel vzduch-vzduch.

Tato práce se z aplikačního pohledu zabývá nasazením v balistických měřeních, v balistickém tunelu v případech penetrace projektilu do měkké překážky a obecně případů, kdy nelze použít klasických optických metod jakou je například rychlo-kamera. Z důvodů uvedených v kapitole 2 je dále pozornost upřena k trasování více projektilů, případně střepin.

1. Používané metody – současný stav

Znamé metody pro rekonstrukci trajektorií lze rozdělit do několika kategorií podle [1]. Na metody zaměřené na měření rychlosti a jejich speciální případy například eliminující vliv úhlu θ mezi osou radaru a cíle [11]. Metody identifikující polohu například vycházející z výpočtů TDOA. Komplexní metody založené na Dopplerově posuvu frekvence [12][13][14]. Metody vycházející z fázových změn dopplerovského signálu [10]. Dále metody pro speciální případy trajektorií. K identifikaci vzdálenosti, rychlosti a úhlu θ s jedním senzorem při přímočarém pohybu objektu [22] a metody uvažující konstantní zrychlení [10]. Samostatnou skupinou jsou metody frekvenční analýzy, které jsou používány ve zmíněných komplexních metodách [16][22][27][28]

Rekonstrukce trajektorie v 3D prostoru

Přímá identifikace trajektorie s konstantním zrychlením vyžaduje devíti-rozměrnou nelineární optimalizaci. Využitím symetrie měřicí soustavy a předpokladu, že cíl se bude pohybovat pouze v jednom kvadrantu, lze redukovat nelineární systém na jeden v třídímním prostoru s přidáním lineárních parametry [10]. Cíl je identifikován pozicí, rychlostí a zrychlením. Vektor těchto hodnot je definován rovnicí (1.1) pro každou dimenzi.

$$\Phi = \begin{bmatrix} X_0 \\ \dot{X}_0 \\ \ddot{X}_0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Časový průběh signálu za směšovačem senzoru dán vztahem:

$$z_i(t) = A_i \cos\left(2\pi \frac{2r_i(t)}{\lambda} + \phi_0\right), \quad (1.2)$$

kde A_i reprezentuje zisk předzesilovače a zároveň útlum filtru, $r_i(t)$ je vzdálenost mezi i -tým senzorem a cílem násobená dvakrát (cesta signálu sensor-cíl a zpět), λ je vlnová délka vysílače a ϕ_0 je počáteční fáze. Je-li N senzorů sledujících cíl, pak každý bude mít odpovídající radiální vzdálenost od cíle $R_i(t)$ a směrový úhel $\phi_i(t)$. Protože dopplerovský sensor není schopen identifikovat, zda se cíl vzdaluje nebo přibližuje¹ a proces trasování je sféricky symetrický, nelze pomocí jednoho senzoru určit trajektorii cíle. Zapotřebí jsou minimálně tři senzory neležící na stejné přímce ke stanovení trajektorie. Zavedme pojem bodu nejbližšího přiblížení cíle a senzoru a definujme t_{pca}^i a R_{pca}^i jako čas a vzdálenost sensor-cíl k tomuto bodu. V tomto význačném bodu se mění fáze podle středu. Vzdálenost příslušného senzoru k tomuto bodu potom bude:

$$\Delta R_i(t) = R_i(t) - R_{pca}^i = \frac{\lambda}{4\pi} \left(ph \left(z_i(t_{pca}^i) \right) + 2\pi N_{cycles}^i(t) \right), \quad (1.3)$$

¹ Pokud je efektivní odrazná plocha cíle konstantní ve všech směrech a anténa dostatečně směrová lze identifikovat vzdalování a přibližování podle amplitudy záznějového signálu, nebo lépe použít hlavice s dvojím směšováním.

kde $ph(z_i(t))$ je okamžitá fáze signálu $z_i(t)$ v radiánech a N_{cycles}^i značí počet obrátů fázi o 2π od času t_{pca} po čas t . $\Delta R_i(t)$ při detekci akumulace fáze a podle vztahu (1.3), vztaženo k aktuální vzdálenosti od senzoru vztahem:

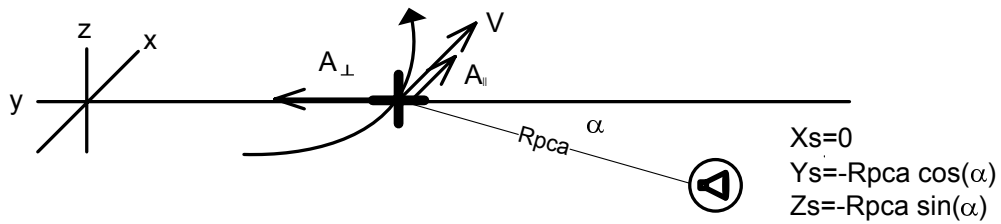
$$R_i(t) = \Delta R_i(t) + \frac{\lambda}{2} \left(n_i + \frac{ph(z_i(t_{pca}^i)) + \theta_i}{2\pi} \right), \quad (1.4)$$

kde n_i odpovídá neznámému počtu násobků 2π definující vzdálenost od bodu t_{pca} . A θ_i respektuje fázové zpoždění celého systému.

Použití *VAA* (*Velocity-Acceleration-Acceleration*) [10] modelu vede k redukci nelineárních parametrů. Každý senzor je sféricky symetrický a má tři nezávislé osy odpovídající azimutu, elevaci a úhlu rotace kolem úhlu pohledu. Vhodným zvolením počátku souřadnic pak lze redukovat devíti-rozměrný vektor Φ (1.1) na šesti-rozměrný (1.5), ve kterém jsou místo pozice, rychlosti a zrychlení hodnoty rychlosti V , paralelního zrychlení A_{\parallel} a kolmého zrychlení A_{\perp} .

$$\Phi_{|\Phi \in \mathbb{R}^6} = \begin{bmatrix} V \\ A_{\parallel} \\ A_{\perp} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

VAA model, ukazující obrázek 1, splňuje následující zákonitosti. Vektor rychlosti pro každý senzor je shodně orientován s osou x . Sledovaný cíl a senzor leží na stejné rovině ($X_s = X_t = 0$). A jako výchozí čas se uvažuje čas v bodu nejbližšího přiblížení $t = t_{pca}$ [10].



Obrázek 1 – Popis soustavy podle VAA modelu

Výsledná trajektorie s použitím VAA modelu je potom dána vztahem:

$$\mathbf{x}_{VAA}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (t - t_{pca}) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{\parallel} \\ A_{\perp} \\ 0 \end{bmatrix} (t - t_{pca})^2 \quad (1.6)$$

a vzdálenost:

$$\begin{aligned} R_i^2(t) &= (R_{pca}^i)^2 + 2R_{pca}^i \Delta R_i(t) + \Delta R_i^2(t) = \\ \dots &= (R_{pca}^i)^2 + (V_i^2 + A_{i\perp} R_{pca}^i \cos(\alpha_i) \tau_i^2 + V_i A_{i\parallel} \tau_i^3 + \frac{A_{i\parallel}^2 + A_{i\perp}^2}{4} \tau_i^4, \quad (1.7) \end{aligned}$$

Metody multi-trajektoriální a multi-senzorové identifikace

Jedná se metody, které obecně ze sady signálů vyhodnocují požadované parametry. Zdrojem těchto signálů mohou být anténní nebo senzorová pole, a primárním parametrem s vysokým rozlišením pak například DOA u radarových, sonarových, seizmických nebo přehledových systémů, případně přesné stanovení kmitočtu v jiných aplikacích. Před zpracováním je již uvažováno váhování, beamforming a časová korekce zpoždění signálu.

Výchozími metodami, které byly a jsou úspěšně používány jsou Caponova metoda maximální věrohodnosti (1969) [19] a Burgova metoda maximální entropie (1967) [29]. Obě metody z dnešního pohledu nelze považovat za vhodné ve všech případech, dosahují určitých omezení u citlivosti zkoumaných parametrů, protože používají nepřesný AR model (auto-regresivní modelování signálu) místo vhodnějšího ARMA modelu. Pisarenkova metoda (1973) [41] jako první využívá výhod datové struktury modelu, řeší souvislosti mezi odhadovanými parametry cisoidu [40], šumem a kovariance signálů. Teprve Schmidt (1977) [28] a nezávisle na něm Bienvenu (1979) prezentovali model senzorového pole, ve kterém není nutné mít přesnou znalost o poloze a směrových charakteristikách senzorů. Schmidt nejprve vyřešil problém s použitím geometrické abstrakce, bez uvažování šumu a posléze tento model rozšířil aproximací postihující šumové prostředí. Výsledný algoritmus byl označen jako MUSIC (Multiple Signal Classification) a byl dále studován a upravován pro specifické aplikace [28].

2. Cíle disertace

Výchozím cílem disertace, při volbě tématu v r. 2008, byl vývoj systému pro sledování a rekonstrukci trajektorie střely před nárazem, při průchodu a případně i po průletu překážkou. K vyhodnocení měla být použita modifikovaná Armstrong-Holemanova metoda [10] s autokalibrací radarových hlavic.

Systém radarových hlavic s akvizičními jednotkami a systémovým kontrolérem a použitelné metody byly v r. 2009 postupně prezentovány v [3][1][2]. Byl vyvíjen prototyp akviziční jednotky balistického měřicího systému pro sledování a rekonstrukci trajektorie projektilů střel ručních palných zbraní s maximální rychlostí střely do 1500 m/s prezentovaný v [4].

Po publikování článku [34] od autorů Pinezich, Heller, Lu v druhé polovině roku 2010, který obsahoval nejen popis systému s obdobnou koncepcí akvizičních jednotek a systémového kontroléru, včetně vyhodnocení skutečných měření přesností pro různé zbraně různých kalibrů, nemělo smysl dále v původním cíli pokračovat a jako stěžejní byla zvolena identifikace více pohyblivých cílů pomocí pole dopplerovských radarů. Tento přístup by umožnil lokalizaci a sledování i roztříštěných projektilů a střepin.

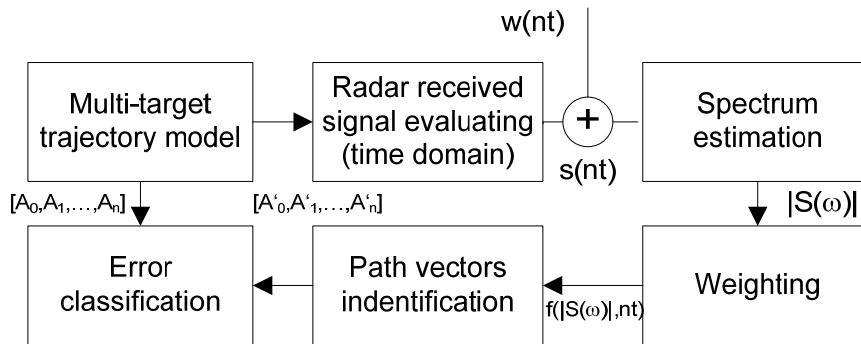
Pro ověřování metod k rekonstrukci trajektorií byl vyvinut matematický model systému [5]. Ten umožňuje získat výstupy signálů jednotlivých radarových hlavic rozmístěných v kartézském souřadnicovém systému. Původně model produkoval data pro jednu trajektorii a jeden cíl. Dále byl rozšířen a pro ověřování a implementaci metod sledování více cílů současně rozšířením o skládání výsledných dat pro různé trajektorie dohromady. Vybrané metody byly nastudovány a představeny v [1].

Vytvoření algoritmu vychází z předpokladu specifické dráhy projektilu. Při přesné znalosti pozice počátečního bodu lze při „zapasování“ dráhy do prostoru využít nejen bodů v čase t_{pca} , ale i bodu t_0 ke zvýšení přesnosti. Dále poté, co projektil opustí hlaveň, můžeme po krátkou dobu s drobným zanedbáním považovat pohyb za přímočarý a využít tohoto poznatku ke kalibraci hlavic.

Jednou z výzev je i vyřešení problému nejednoznačnosti cest cílů například predikcí pohybu, vyjádřenou pravděpodobnostní funkcí pro případ, kdy se cíle v osách jednotlivých radarů křížují.

3. Optimalizační systém

K optimalizaci a hodnocení trasovacích metod a dále ke konfiguraci radarového systému [3] byl sestaven optimalizační systém ukazující obrázek 2.



Obrázek 2 - Blokové schéma systému pro optimalizaci trasovacích metod

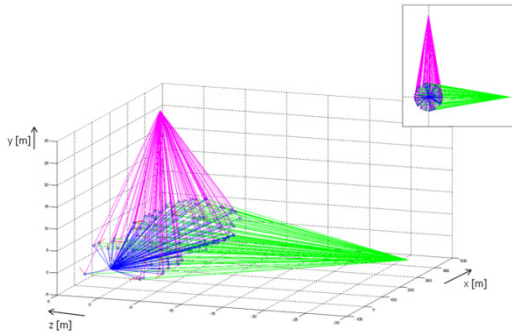
Dle definovaných parametrů a trajektorií cílů matematický model [4] vytvoří časové průběhy signálů přijaté za vyváženým směšovačem CW radarů. Použití modelu poskytne přesnou znalost trajektorií před zpracováním, využité jako reference při stanovování chyby zkoumané metody. Pro potřeby simulace lze přidat rušení nebo šum a následně je výsledný signál podroben spektrální analýze. Po zpracování spektra s určením PSD a váhování následuje mapování a ověření přesnosti.

Při předem známé trajektorii cíle lze optimalizační systém použít i při nastavování parametrů radarového systému. Mimo optimalizace trasovacích algoritmů lze tedy systém využít k optimalizaci bloků zpracování signálů pro specifické případy drah objektů.

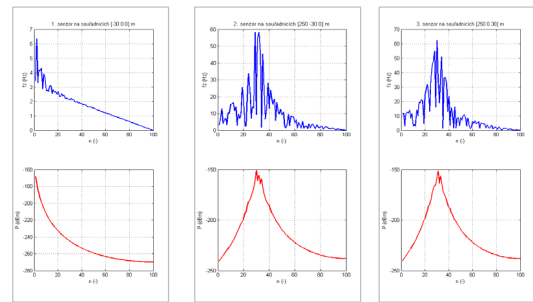
Trajektoriální matematický model

Matematický model slouží k testování metod pro rekonstrukci trajektorií. Pro první ověření byl zkoušen na dvou trajektoriích. Pohyb přímočarý rovnoměrně zrychlený (konstantní zrychlení) po přímce. Model zohledňuje směrovou charakteristiku antén i efektivní odraznou plochu cíle. Obě tyto směrově závislé veličiny musí být do modelu externě vloženy.

Druhou trajektorií je pohyb po spirále, matematicky pohyb po kružnici s nenulovou složkou v třetím rozměru². Jednotlivé body měření s vyznačenými vektory pohybu viz obrázek 3. Orientace všech senzorů je vždy do středu výsledné trajektorie objektu. Záznejový kmitočet a míru přijímaného signálu pro každý bod měření ukazuje obrázek 4. Zarážející mohou být v grafu výkonové úrovně přijímaného signálu. Jsou co do velikosti tak malé, že by nešly detekovat. Je to tím, že model uvažuje základní konfiguraci senzoru bez směrovější antény a výkonového koncového stupně. Tyto údaje budou známy až po realizaci zmíněných částí a model bude upraven.



Obrázek 3 – Uspořádání senzorů v prostoru



Obrázek 4 – Záznejové kmitočty a výkonové úrovně příslušných senzorů

Multi-trajektoriální model vychází z matematického modelu pro pole dopplerovských radarů [5]. Ten je upraven tak, aby poskytoval výstup pouze z jedné radarové hlavice. Takto upravený model je spouštěn opakovaně pro různé trajektorie a výsledný signál je poskládán podle rovnic v [5]. Dále model pracuje podle vztahů uvedených v [1][3].

Výstupní signál radarové hlavice

Energetická bilance je v matematickém modelu zohledněna podle vzorce:

$$P_r = \frac{S_e(P_1 G(\theta)_1 G(\theta)_2)}{4\pi^2 r^4} \cdot A, \quad (3.1)$$

kde P_1 je vysílací výkon hlavice, $G_{1,2}$ představují zisky přijímací a vysílací antény v daném směru podle směrové charakteristiky antény. S_e je efektivní odrazná plocha cíle a r je vzdálenost mezi radarovou hlavicí a cílem.

Výstupní signál radarové hlavice $s(nt)$, při sledování skupiny pohyblivých objektů, dílí signály $s_k(nt)$, je dán rovnicí (1.2). Pro sledování odolnosti vyhodnocovacích metod v závislosti na šumových podmínkách se v tomto místě přidává ještě bílý šum $w(nt)$.

$$s(nt) = \sum_k s_k(nt) P_k(nt) + w(nt) \quad (3.2)$$

² Počáteční rychlost $v_0 = 300$ m/s, zrychlení $a = -3$ m/s².

Spektrální analýza

Získaný průběh výstupního signálu se převádí do frekvenční oblasti diskrétní Fourierovou transformací (DTFT) s překryvem $\frac{1}{2}$ délky časového okna. Překrývání časových oken při spektrální analýze poskytuje jemnější detaily na nižších frekvencích. Délka a tvar použitých oken při transformaci jsou dalšími parametry, které lze pomocí tohoto systému optimalizovat. Samozřejmě pro konkrétní limitní případy.

Váhování spektra

Proces váhování slouží k vytvoření množiny významných spektrálních bodů, v nichž jsou následně trasovacím algoritmem hledány možné trajektorie objektů. Váhování je založeno na určení výkonového spektra $S_{ffw}(\omega)$ podle rovnice (3.3) a stanovení spektrální hustoty energie pro každé časové okno.

$$S_{ffw}(\omega) = E \left\{ \frac{1}{N} F_w(\omega) F_w^*(\omega) \right\} = E \left\{ \frac{1}{N} |F_w(\omega)|^2 \right\} \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{N} |F_{w_i}(\omega)|^2 \quad (3.3)$$

Z této výkonnostní funkce se stanoví průměrná energie signálu a její hodnota se využije k výpočtu rozhodovacího prahu W_w podle vzorce (3.4).

$$W_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{ffw}(\omega_i) \cdot k \quad (3.4)$$

Parametr k je volitelná konstanta, která ovlivňuje výběr bodů. Nízké hodnoty k zvýší počet chybně detekovaných cílů, naopak vysoké hodnoty potlačí detekci slabých detekovatelných signálů. K optimalizaci k parametru pro daný případ lze využít bloku vyjadřujícího účinnost rekonstrukční metody. A tuto účinnost použít jako kritériální funkci při optimalizaci.

Gaussovské předzpracování váhovaného spektra

Při váhování silných signálů vznikají v mapě bodů překračující práh W_w energetické shluky, které, pokud jsou dostatečně dlouhé, způsobují vznik nových falešných cest. Předpokládáme-li, že maximum energie tohoto shluku je ve středu zmíněného shluku, potom může být celý shuk nahrazen v daném čase okna gaussovským průběhem. Výsledkem je potlačení počtu především krátkých falešných cest, jak potvrzují simulace.

Matematický popis pro gaussovské předzpracování spektra pro časový úsek $\langle i \times t - t/2; i \times t + t/2 \rangle$ je podle vzorce (3.5) následující.

$$g_i(k) = \begin{cases} 0, & |k - b_m| > \sigma \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & |k - b_m| \leq \sigma \end{cases} \quad (3.5)$$

Střední hodnota μ odpovídá pozici středu shluku a rozptyl σ šířce shluku. Vypočtené sady funkcí $g_i(k)$ jsou spojeny a posunuty na odpovídají frekvence podle (3.6). Nové nejpravděpodobnější cesty jsou hledány podle funkce $\max(p(k, nt))$.

$$G(f, t) = \frac{1}{N} \sum_i^N g_i(f) \quad (3.6)$$

V konečném výběru pro určování trasy se pravděpodobností funkce skládá ze dvou vrstev. První vrstvou je vrstva gaussovská, vypočtená podle (3.6), a druhou vrstvou, překryvnou, je vrstva *gradientní* nebo v jednodušším modelu pravděpodobnostní vrstva představující vliv časově sousedících bodů. Obě vrstvy se spojí do jedné s koeficienty jejich vlivu a , b podle vzorce (3.7).

$$p(f, t) = a \cdot G(f, t) + b \cdot p_c(f, t) \quad (3.7)$$

Vyjádření chybovosti a účinnosti detekce

Blok vyhodnocující chybovost srovnává nepřímo rekonstruované trajektorie (mapy radiálních rychlostí cílů) s výchozími trajektoriemi vstupujícími do simulace. Výstupem jsou absolutní chyby trajektorií v m resp. m/s , statistické hodnoty jako je chybová střední hodnota pro kompenzaci systémové chyby měření a chybový rozptyl. Současně vyhodnocuje "trasovací účinnost" η definovanou jako poměr počtu správně vyhodnocených trasovacích bodů (bodů mapování) ve zvoleném limitu P_b ku počtu všech časových oken P_{all} dle (3.8), který odpovídá délce měření.

$$\eta = \frac{P_t}{P_{all}} \quad (3.8)$$

Výstup tohoto bloku se používá jako kritériální funkce při optimalizaci parametrů trasovacího systému na specifické případy trajektorií.

4. Multi-trajetoriální identifikace cílů

Kapitola je zaměřena na multi-trajetoriální identifikace cílů pomocí pole dopplerovských radarů. Prezentovaný algoritmus je zamýšlen k měření v balistickém tunelu, čemuž odpovídá i konstelace senzorů a metoda párování tras. Postup rekonstrukce trajektorie cílů z časových signálů radarových hlavic nebo signálů z matematického modelu (rovnice 3.2) je složen z následujících bodů:

- spektrální analýza
- mapování polí radiálních rychlostí
- vyhledání kalibračních bodů t_{pca}
- párování tras z jednotlivých senzorů
- rekonstrukce polohy podle zmapovaných fragmentů radiálních rychlostí

Postup zpracování signálu, spektrální analýza a váhování je totožné s postupem u optimalizačního systému, především rovnice (3.3)(3.4).

Mapování polí radiálních rychlostí

Mapovací algoritmus hledá nepřímo mezi body získanými z procesu váhování možné cesty³ objektů podle definovaných kritérií. Jedná se o mapu možných cest, která je

³ cestou či trasou se v této kapitole rozumí průběh radiální rychlosti vybraného senzoru, nikoliv trajektorie cíle, spojováním bodů vznikají pouze myšlené spojnice označované jako cesty, pokud je jedná o trajektorii cíle, je to výslovně uvedeno

mapovacím algoritmem zpracována do sady vektorů odpovídající jednotlivým cestám. Požadavky na mapovací algoritmus jsou následující:

- dosáhnout nízký počet chybně detekovaných cílů a osamocených tras
- umožnit adaptivní trasování existujících tras (fyzikální model)
- zajistit správné rozhodování při křížení trajektorií (gradientní predikce)
- zpětné adaptivní trasování (potlačení necitlivosti vzniku nových cest)

Vypočtený váhovaný spektrogram lze vyjádřit jako síť bodů matice \mathbf{M} ,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,1} & \cdots & a_{i,j} \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

kde sloupce odpovídají diskrétnímu času s krokem dt daném vzorkovací frekvencí a délkou FFT okna. Pokud řádky reprezentují diskrétní frekvenci df , index j značí konečný čas měření t_m a i je maximální frekvence $\omega/2$. Potom rozestup mezi spojnicemi sítě je dán následovně:

$$a_{i,j} - a_{i,j-1} = \frac{t_m}{j} = dt; a_{i,j} - a_{i-1,j} = \frac{f_s}{2\omega} = df, \quad (4.2)$$

Matice \mathbf{M} je obecně řídká matice s elementy a nabývajících hodnot nula nebo jedna, za předpokladu, že nebylo použito gaussovské předzpracování. Následující algoritmy zajistí spojení významných bodů sítě do vektorů radiálních rychlostí cíle vůči senzoru.

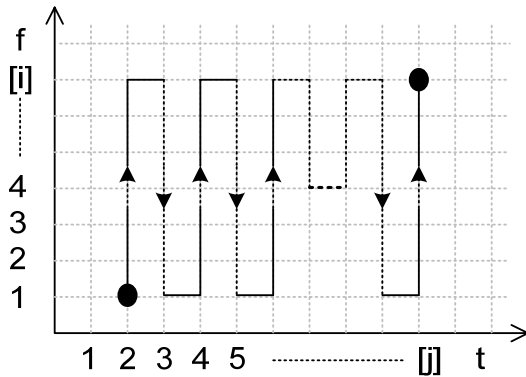
Jsou zde prezentovány dvě gradientní metody. Gradientní metoda s fixním a plovoucím gradientním limitem. U těchto metod je riziko vzniku falešných cest sníženo náročnějšími podmínkami při počátečním sestavení cesty. Tyto ztížené podmínky způsobují necitlivost i na reálné cíle. U reálných cílů však dojde k vytvoření zárodku trasy s časovým posuvem a počáteční necitlivost se eliminuje zpětným adaptivním trasováním. Zpětným adaptivním trasováním se rozumí aplikace metody na sérii bodů s existujícími trasami a převrácenou časovou osou. Zpětné adaptivní trasování se zde používá pouze u gradientní metody s proměnnou mezí. U obou metod rozhoduje při křížení cest gradient. V případě fixní gradientní metody byla do procesu rozhodování zahrnuta i výkonová bilance tras.

Metoda s fixním gradientním limitem

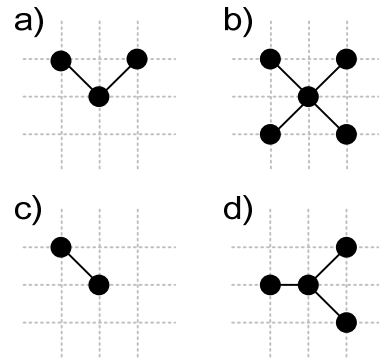
Metoda vychází z fyzikálních předpokladů chování cíle. Pokud se cíl pohybuje určitým směrem, uvažuje se, že nejpravděpodobnější je servání v tomto pohybu. Míru možné deviace stanovuje gradientní limit g_m . Podle názvu je jasné, že maximální změna kmitočtu resp. radiální rychlosti v čase dt , je zde pevně limitována volbou g_m . Vyhodnocování probíhá pomocí submatice \mathbf{M}_{SX} uvnitř matice \mathbf{M} definované jako:

$$\mathbf{M}_{SX} = \begin{pmatrix} a_{c-g_m,j-1} & a_{c-g_m,j} & a_{c-g_m,j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{c,j-1} & a_{c,j} & a_{c,j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{c+g_m,j-1} & a_{c+g_m,j} & a_{c+g_m,j+1} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

Vertikálně je submatice omezena volbou gradientního limitu g_m a horizontálně pevně šířkou okna délky $3dt$. Výsledná cesta je poté složena z řady krátkých úseků právě délky $3dt$. Algoritmus naplní matici \mathbf{M}_{sx} z matice \mathbf{M} od prvního nemulového bodu v \mathbf{M} od prvku $a_{1,2}$, kde tento nenulový prvek bude odpovídat středovému prvku $a_{c,j}$ matice \mathbf{M}_{sx} . Následně postupuje po nenulových elementech matice \mathbf{M} k f_{max} opakovaně s horizontálním krokem okna $2dt$, jak ukazuje obrázek 6.

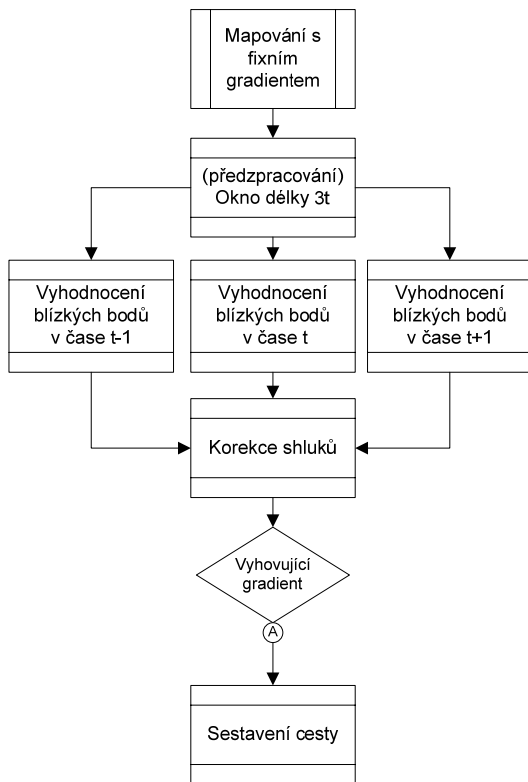


Obrázek 6 - Způsob mapování v maticové síti

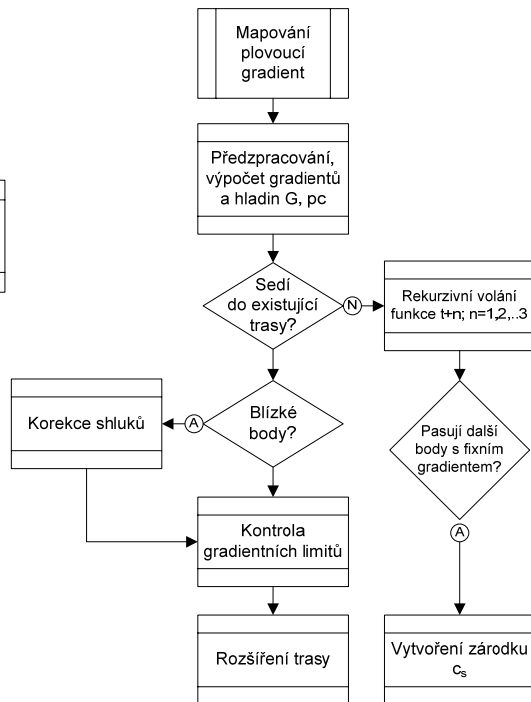


Obrázek 5 - Speciální případy
a) odraz nebo průchod bodem t_{pca}
b) křížení c) zánik d) rozdělení

Každá submatice \mathbf{M}_{sx} s definovaným středovým bodem $a_{c,j}$ je zpracována algoritmem podle následujícího vývojového diagramu ukazujícího obrázek 8.



Obrázek 7 - Vývojový diagram metody s plovoucím gradientním limitem



Obrázek 8 - Vývojový diagram metody s fixním gradientním limitem

Jeden běh algoritmu z matice \mathbf{M}_{sx} vytvoří vektor $\mathbf{c} = ([f_1, t_1]; [f_2, t_2]; [f_3, t_3])$ nebo $\mathbf{c} = \emptyset$, pokud nebyly splněny podmínky pro sestavení nové trasy. Výstupy \mathbf{c} se kumulují ve vektoru krátkých tras \mathbf{TR} :

$$\mathbf{TR} = (\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n)^T \quad (4.4)$$

Poslední blok rozhodující o sestavení cesty musí brát v úvahu i speciální případy, které mohou při mapování nastat. Jedná se především o odraz předmětu/cíle od pevné překážky, průchod bodem t_{pca} , křížení, zánik a rozdělení jak ukazuje obrázek 5. Z principu metody je zde zpětné adaptivní trasování neúčinné a neprovádí se.

Pokud je aplikováno gaussovské předzpracování signálu (3.5), provádí se ještě před zpracováním zmíněným algoritmem a projeví se jako váhovaná funkce pravděpodobnosti $p(f, t)$ (rovnice (3.7) bez gradientní vrstvy).

Metoda s plovoucím gradientním limitem

Metoda s plovoucím gradientním limitem přepočítává gradientní limit pro každý zárodek fragmentu cesty a na jeho základě se rozhoduje o přidání nového bodu k vytvořenému zárodku. Gradientní limit se počítá z rozdílu rychlostí dvou posledních bodů existujícího zárodku cesty. Falešné krátké cesty často vznikající u metody s fixním gradientním limitem, jsou zde potlačeny obtížnějšími kritérii pro vznik zárodku nové cesty. Způsobuje to však necitlivost na vznik zárodku. Algoritmus se zachytí cesty později při dostatečném poměru SNR. Tuto nepříjemnost lze u této metody eliminovat zpětným adaptivním trasováním. Zpětné adaptivní trasování pracuje tak, že po dokončení mapování dojde k převrácení časové osy včetně prvků vektoru \mathbf{c} a celý proces se zopakuje. Body, které byly přeskočeny, nyní leží ve směru existujícího zárodku cesty a současně nyní s vyšší hodnotou pravděpodobnosti (3.7) se k zárodku přidávají. Po dokončení dojde opět k převrácení časové osy s vektorem \mathbf{c} . Pomocí plovoucího gradientního limitu zároveň metoda sama řeší případy křížení cest.

Algoritmus prochází matici \mathbf{M} cik-cak podobně jak ukazuje obrázek 5 s tím rozdílem, že výchozím prvkem je prvek $a_{1,1}$ s horizontálním krokem $1dt$. Shluky bodů ve frekvenční oblasti jsou nahrazeny jedním bodem na centrální pozici. Tam se očekává nejpravděpodobnější výskyt cíle, nebo při gaussovském předzpracování jsou transformovány do nové pravděpodobnosti vrstvy. Každý bod sítě je podroben zpracování podle následujícího postupu, jak ukazuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Vznikají zárodky nových cest, ke kterým se přidávají body ležící v předpokládaném pohybu cíle. Nejprve se bod testuje, zda může patřit k existujícímu zárodku, pokud ne je proveden test na vytvoření nového zárodku. Algoritmus se provádí opakovaně v rekurzi pro body $a_{i,j+1}$ do hloubky 2 nebo 3 dt . Při vytváření zárodku se dočasně používá konstantní gradientní limit g_m . Při splnění podmínek dojde k vytvoření nového zárodku:

$$\mathbf{c}_s = ([f_i, t_i]) \quad (4.5)$$

Plovoucí gradient g_f reprezentuje fyzikální chování ještě lépe než předchozí metoda. Počítá se pro každou cestu uvnitř \mathbf{TR} (4.4), s výchozími prvky \mathbf{c}_s (4.5) podle vzorce:

$$g_f = \frac{f_{t_n} - f_{t_{n-1}}}{t_n - t_{n-1}} \quad (4.6)$$

a pomocí lineární interpolace lze určit následující předkládanou pozici pro čas t_{n+1} podle vzorce:

$$\{f_{t_{n+1}}, t_{n+1}\} = \{f_{t_n} + g_f, t_n + dt\}, \quad (4.7)$$

který představuje druhou váhovanou pravděpodobností vrstvu $b\text{-}p_c(f,t)$ v rovnici (3.7).

Cesty jsou formovány v rostoucím vektoru \mathbf{c} (4.8), který se rozrůstá ze zárodků \mathbf{c}_s , dokud není běh algoritmu dokončen.

$$\mathbf{c} = ([f_1, t_1], [f_2, t_2], \dots, [f_n, t_n]) \quad (4.8)$$

Vektor rozpoznaných cest \mathbf{TR} má stejný tvar jako v předchozím případě (4.4) s tím, že n odpovídá počtu rozpoznaných tras a délky vektorů \mathbf{c}_i jsou různé.

Vyhledání kalibračních bodů t_{pca}

Po dokončení mapování je k dispozici sada cest, případně pouze fragmenty těchto cest od všech měřících senzorů. Dalším krokem je spárování odpovídajících si fragmentů od různých senzorů k sobě. K tomu lze využít bodů nejbližšího přiblížení t_{pca} a vhodného uspořádání sensorové sítě. Při trasování jednoho cíle při znalosti výchozí polohy není třeba tento krok provádět, dvojitou integrací se z jednotlivých senzorů dopočítávají následné pozice. Body t_{pca} pak mohou sloužit jako zpřesňující body pro kalibraci, nebo s dostatečným počtem vhodně umístěných senzorů ke stanovení výchozí pozice. U multi-trajektoriální identifikace cílů je ale tento krok nezbytný a není předem zaručeno, že spárování všech fragmentů bude úspěšné, je jisté, že ve všech případech úspěšné nebude.

Body nejbližšího přiblížení t_{pca} , jsou charakteristické tím, že signál po výkonové stránce dosahuje maximální hodnoty (obrázek 15), v časovém průběhu dochází ke změně fáze a ve frekvenční oblasti čára periodogramu klesá k nulové frekvenci a opět stoupá (obrázek 9). Všechny tyto charakteristické vlastnosti lze využít k jejich lokalizaci. Méně spolehlivou metodou je stanovení na základě úrovně signálu (rovnice 3.1), protože velmi záleží i na parametrech cíle, především její efektivní odrazné ploše $S_e(\square, \theta)$. Další možností je filtrace dolní propustí na nízkých kmitočtech s odstraněním stejnosměrné složky. Tento způsob selhává při sledování pomalých objektů a v horších šumových podmínkách je třeba vhodně nastavit vyhodnocovací práh. Přesto je kombinace "balistického filtru" a maximální amplitudy auto-konvoluce⁴ signálu použita v [34]. Další možností je zpracování časového průběhu a hledání změny fáze, použití fázového závěsu.

Zde prezentovaný inovační přístup používá k vyhledávání bodů t_{pca} kombinace optimalizační metody a první řádek mapovací matice \mathbf{M} s prvky $a_{1,n}$. První řádek mapovací matice odpovídá sice váhovanému PSD a je tedy principiálně podobný filtru, avšak body $a_{1,n}$ jsou zde použity pouze jako báze pro optimalizaci a o výskytu bodu t_{pca} rozhodne až samotný výsledek optimalizace. Určení množiny bází jako potencionálních bodů t_{pca}' je vyjádřeno vztahem:

$$t'_{pca} = \{a_{1,n}, a_{1,n+1}, \dots, a_{1,j} | n > 0; n \leq j; a_{1,n} \geq k\} \quad (4.9)$$

kde k určuje práh detekce. Bez gaussovského předzpracování je použit koeficient $k=1$, protože prvky $a_{1,n}$ obsahují pouze prvky s hodnotami nula nebo jedna. Při gaussovském předzpracování je vhodné volit k v okolí hodnoty 0,8.

Množina t'_{pca} se prochází bod po bodu a pro každý z nich se spouští optimalizační úloha hledající ve spektrogramu charakteristický tvar V, typický pro skutečné body t_{pca} . K hledání je použito parametrizovaného modelu funkce s průběhem připomínající V podle vzorce:

$$f_V(x) = h \log_e(w \cdot x^2) | x < -1 \cup x \geq 1; x \in R, \quad (4.10)$$

⁴ Autokonvoluce zde využívá symetrie přichozího a odchozího dopplerovského signálu [29].

Funkce f_v se používá k vytvoření modelu použitého k výpočtu kriteriální optimalizační funkce f_c , kde parametr w definuje šířku modelu a h jeho výšku. K výpočtu lze potom použít metodu jader s váhou danou křivkou s normálním rozložením pravděpodobnosti od středu boxu, nebo pouze boxu, pokud jsou šířky spektrálních čar cílů přibližně stejné šířky. Parametry h , w , případně velikost vyhodnocovacího boxu jsou optimalizovanými proměnnými. Kriteriální funkcí je pak vyjádření umocněného rozdílu mezi výkonovými hodnotami modelu a spektrogramu podle vzorce:

$$f_c = \sum_i \sum_j (m(i, j) - o(i, j))^2, \quad (4.11)$$

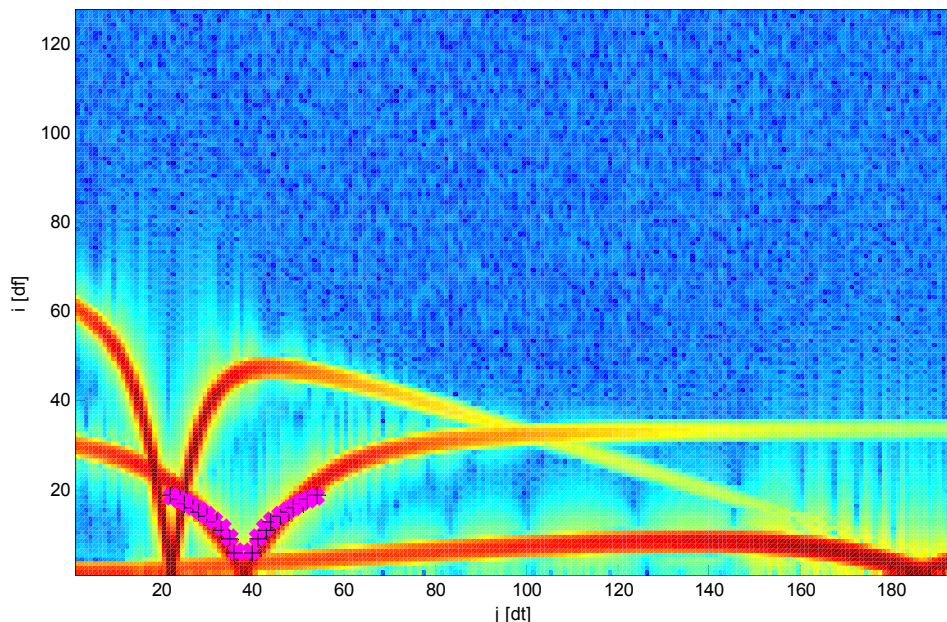
Podle průběhu kriteriální funkce f_c lze zvolit vhodnou optimalizační metodu. K samotné optimalizaci byla použita Nelder-Meadova simplexová metoda [3]. Obrázek 9 ukazuje dokončený proces optimalizace simplexovou metodou pro data senzoru S3, kde vrchol funkce V , označen jako báze, leží na vodorovné ose v hodnotě 38. K ukončení došlo po 22. iteraci z výchozích parametrů $w_d = 2$, $h_d = 2$ na parametrech $w_{opt} = 1.58$, $h_{opt} = 3.28$. Zde byla použita konstantní délka vyhodnocovacího okna.

Množina detekovaných t_{pca} bodů je potom dána vztahem:

$$t_{pca} = \left\{ a_{1,n}, a_{1,n+1}, \dots, a_{1,j} \mid n > 0; n \leq j; \min(f_c(a_{1,n})) \leq k_c \right\}, \quad (4.12)$$

kde k_c stanovuje rozhodovací mez.

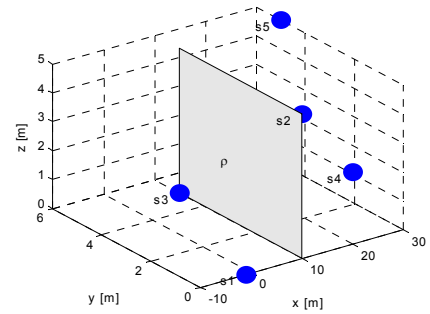
Nutno podotknout, že optimalizační zpracování je zde v současné době možné pouze díky tomu, že zpracování dat z balistického tunelu neprobíhá v reálném čase, ale vždy se předpokládá práce s daty, které byly dříve naměřeny a uloženy akviziční jednotkou.



Obrázek 9 - Dokončená optimalizace hledání t_{pca} (senzor s3, báze=38, boxsize=3)

Párování tras jednotlivých senzorů

Po dokončeném mapování a identifikaci t_{pca} bodů jsou k dispozici vektory $t_{pca,N}$ a fragmenty radiálních rychlostí v \mathbf{TR}_N od všech senzorů ze sensorového pole. Nyní při znalosti pozic všech senzorů, výchozí pozice cíle nebo dostatečného počtu t_{pca} , lze provést rekonstrukci trajektorie cíle. Avšak pouze za předpokladu, že je zde jen jeden pohybující se objekt. V případě, že je po čas měření v pohybu více objektů, jedná se o tzv. multi-trajektoriální identifikaci a je nutné před samotnou rekonstrukcí provést spárování odpovídajících si fragmentů od jednotlivých senzorů dohromady. K párování se využívá znalosti t_{pca} bodů a speciálního rozmístění senzorů.



Obrázek 10 - Pokusné uspořádání sensorové sítě s dvěma vázanými senzory

Předpokládejme, že se objekt v sensorovém poli (obrázek 10) pohybuje z počátku souřadnic ve směru osy x . Zvolíme-li dva vztažné senzory S_2, S_3 v rovině kolmé k vektoru pohybu cíle a bude-li zaručena podmínka, že v čase měření objekt tuto rovinu protne, potom průběhy signálů obou senzorů budou korelované a body nejbližšího přiblížení cíle nastanou u obou senzorů ve stejný okamžik.

Na základě předchozího poznatku dokážeme spárovat trajektorie vázaných senzorů S_2, S_3 . Podmínkou nutnou je, že objekt musí proletět rovinou ρ (obrázek 10). Podmínka kolmého průletu k rovině ρ , je v balistickém tunelu, kde je jeho délka několikanásobně vyšší než šířka, prakticky splněna a vychýlení průletového úhlu způsobí pouze malý rozdíl mezi časy t_{pca} . Párování s nevázanými senzory rozšiřuje předchozí hypotézu. Po průletu rovinou ρ a identifikaci bodu t_{pca,S_2-S_3} , bude nejbližší vzniklý bod t_{pca,S_4} od t_{pca,S_2-S_3} patřit stejnému objektu. Podle tohoto pravidla se identifikují a spárují všechny fragmenty cest.

Rekonstrukce polohy

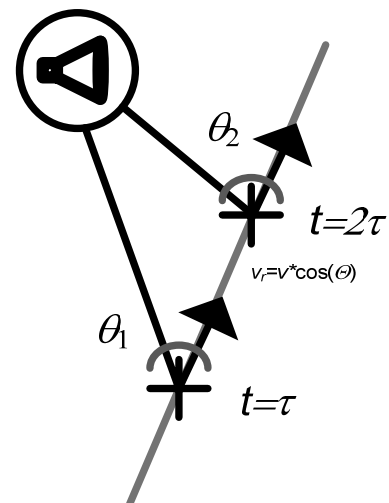
Postup rekonstrukce polohy z vektorů radiálních rychlostí byl dříve popsán v [6].

U pole dopplerovských radarů je zřejmé, že řešíme úlohu rekonstrukce trajektorie pohybu objektu pouze ze znalosti okamžitých radiálních rychlostí cíle vůči jednotlivým hlavicím bez známého směru.

Vztah mezi radiální rychlostí a skutečnou okamžitou rychlostí cíle je následující:

$$v_r = v \cos(\theta), \quad (4.13)$$

kde θ je úhel mezi spojnici radaru a cíle s vektorem pohybu cíle podle obrázku vpravo. Vyjdeme-li z fyzikálních znalostí, je rychlost dána velikostí změny dráhy v čase ($v = ds/dt$). Změnu



Obrázek 11 - Intervalové měření radiální rychlosti

dráhy mezi časovými vzorky dostaneme integrací rovnice:

$$ds = v dt, \quad (4.14)$$

$$\int ds = \int v dt \quad (4.15)$$

Pokud je měřicí krok dostatečně malý, lze rychlost považovat za konstantní a rovnice přejde do tvaru:

$$\int ds = v \int dt, \quad (4.16)$$

po úpravě je potom výsledkem:

$$s = v t + C, \quad (4.17)$$

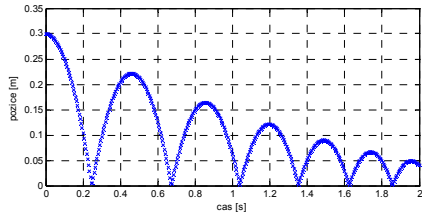
Integrační konstanta C zahrnuje počáteční bod (dále referenční bod), od kterého započalo měření. Pokud je známa pozice referenčního bodu a všech senzorů, lze ze znalostí jednotlivých radiálních rychlostí pozici dopočítávat. S touto myšlenkou je spojeno několik obtíží. Zaprvé, postupným dopočítáváním se kumuluje chyba výpočtu. Zadruhé, pokud ztratíme „stopu“ je zbytek trajektorie neobnovitelný. Zatřetí, stále není znám směr pohybu.

První dva problémy lze řešit kalibrací trajektorie pomocí bodů t_{pca} , kdy je úhel $\theta = 90^\circ$ a radiální rychlost $v_r = 0$ m/s. Třetí problém, směr pohybu, lze vyhodnocovat ze znaménka fázového zpoždění u vícekanálových hlavice. Při použití jednonálové hlavice HB410 [33] toto rozlišení provést nelze. Možností by bylo přídavné vyhodnocování amplitudy, pro určení zda se cíl přibližuje nebo vzdaluje, ale stejně jako u vyhodnocování pozice t_{pca} bodů je to i zde nevhodná metoda díky vlivu dalších parametrů rovnice (3.1). U balistického tunelu předpokládáme, že všechny objekty přicházejí z jednoho směru a můžeme předem nastavit znaménka směrových koeficientů na hodnoty $k_{ax}=1$, $k_{ay}=1$, $k_{az}=-1$ výpočtového modelu.

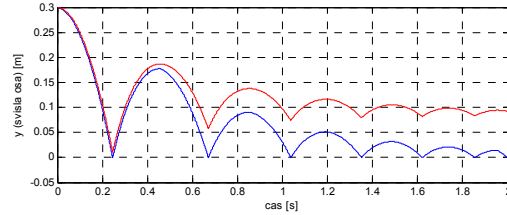
Ověření algoritmu na skákajícím míčku

Sledovaný objekt, míček, je vpuštěn do plastového boxu v přesně známém bodě, otvor pro vhoz, a poté bude padat, přitahován zemskou gravitační silou směrem dolů, dokud nenarazí na podložku. Tím jsou známy počáteční podmínky koeficientů $k_{ax}=1$, $k_{ay}=-1$, $k_{az}=1$. Při dopadu a odrazu se náhle mění rychlost a zároveň i znaménko u koeficientu k_{ay} . Nové vyhodnocení směrových koeficientů se provádí při každém výpočtu nového bodu. Stále však může dojít k odrazu ve vodorovných osách od libovolné stěny. Tady lze počítat s tím, že k odrazu došlo uvnitř zkoumaného prostoru. Potom při zpracování lze vybrat pravděpodobnější desku odrazu a zpětně určit směrový koeficient k . Další možností je kontrola amplitudy signálu. Pokud se objekt odráží od stěny bližší k radaru, bude i amplituda signálu vyšší.

Pro ověření bude rekonstruována trajektorie z 2D matematického modelu, kde pohyb objektu bude pouze ve svislé ose. Objekt bude míček vypuštěný z referenčního bodu $[0 \ 0.3 \ 0]$ s počáteční rychlostí $v_0 = 0$ m/s. Je předpokládána dokonalá pružnost a nulový odpor vzduchu. Pozice míčku s ekvidistantním časovým krokem v závislosti na čase ukazuje obrázek 13.



Obrázek 13 - Referenční pozice míčku (matematický model)



Obrázek 12 - Vliv kumulativní chyby na přesnost měření

Způsob použití rekonstrukčních tříd je dostatečně popsán v [6].

5. Srovnání účinnosti mapovacích metod

Pro ověření byly provedeny simulace mapovacích gradientních algoritmů (viz [9]). V případové studii byly současně vyhodnocovány tři cíle s následně zadanými trajektoriemi. Všechny objekty se pohybují po přímce s konstantním zrychlením a v této konfiguraci vzniknou dva t_{pca} body a šest křížení tras do rozhodného konečného času $t_{end} = 0,5$ s. Některé body šíření jsou ukryty v šumu, jak lze vyvodit z porovnání viz obrázek 14 a obrázek 15. Parametr pozice cíle na ose x , je dán rovnicí (5.1).

$$x(t) = s_0 + \frac{1}{2}v_0t + at^2 \quad (5.1)$$

Výpočet spektra a volba parametrů systému

Podle kap. 3 je pro výpočet spektra použita metoda DTFT. Parametry, které ovlivňují rozlišení a vlastnosti spektra jsou v tomto případě dva. Tvar okna a šířka okna. Pro simulaci bylo zvoleno pravoúhlé okno s překrytím $\frac{1}{2}$ následujícího intervalu. Obrázek 15 zobrazuje spektrogram, reálnou část spektra v čase, s třemi objekty a přidaným AWGN šumem, kde je patrné křížení objektů. Přijatý signál je nejsilnější v blízkosti bodů t_{pca} a střední hodnota signálu je velice malá. Je to z důvodu nastavení parametrů matematického modelu podle reálné radarové hlavičky HB410 [33], která není určena pro měření na takové vzdálenosti. $\Theta_{v,h-3dB} = 60^\circ$ a $P_{Iout} = 13$ dBm.

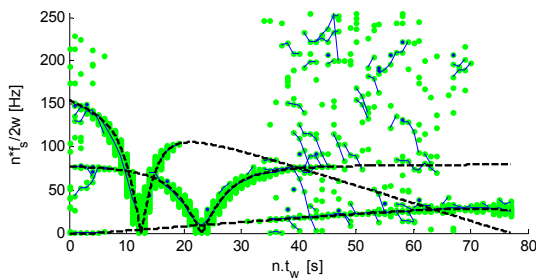
Vytvoření mapy bodů a aplikace trasovacího algoritmu

Váhování je provedeno podle vztahů (3.6)(3.3) a (3.4). Průměrování PSD zvyšuje dynamiku systému, přesto při konstantním parametru k , dojde k potlačení slabých signálů, které se nacházejí v blízkosti energeticky silných. Východiskem je proces váhování provádět opakovaně s různými hodnotami parametru k . V procesu vyhodnocování se výsledné mapy zahrnou jako další pravděpodobnostní vrstvy do vztahu (3.7). Opakovaný proces váhování není v simulaci prováděn.

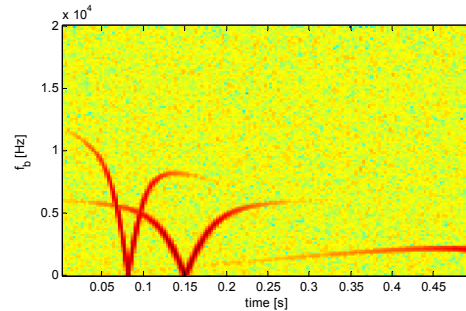
Obrázek 14 ukazuje mapu bodů získanou váhováním zašuměného spektra (obrázek 15). Z něho je patrný vznik shluku bodů v blízkosti bodů t_{pca} , což je způsobeno tím, že v těchto bodech je největší koncentrace energie, radiální rychlost cíle nejvyšší a nejčastěji to jsou body odpovídající nejmenší vzdálenosti od radaru z celé trasy.

Identifikace cest cílů – trasování je prováděno podle algoritmů, které popisuje kapitola 4. Kritická je volba okna, nastavení gradientního limitu a parametru

zahrnujících oddělení jednotlivých cest při vytváření nových zárodků. Obrázek 14 zároveň ukazuje aplikaci gradientního algoritmu s proměnným limitem.



Obrázek 14 – Aplikace gradientního algoritmu s proměnným limitem

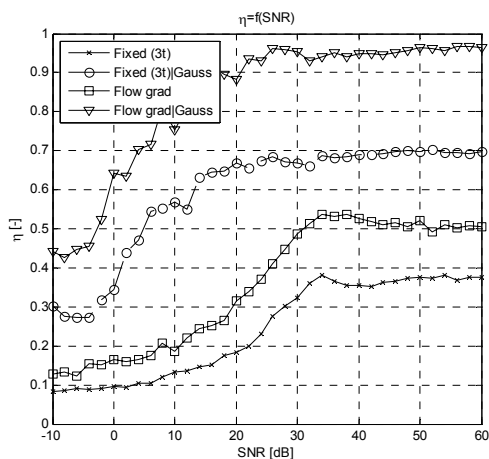


Obrázek 15 - Spektrogram radarové hlavičky do času $t = 0,5$ s

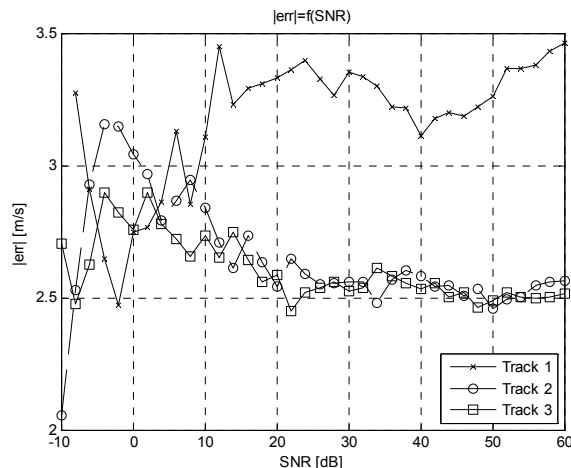
Nalezené trasy jsou vyznačeny modrou linkou, zeleně jsou váhované body určené ze zašuměného spektra a čárkovaně je vyznačena skutečná trasa cíle. Metoda s proměnným limitem považuje skutečnou pozici cíle ve středu shluku bodů, což není nejvhodnější strategie v případě, když je spektrum rozmazáno a cíle jsou blízko sebe. Shluky se spojí, sníží se rozlišovací schopnost a blízké cíle splynou. Řešením je v tomto případě nastavení silnějšího parametru k .

Určení chyby a srovnání gradientních metod

Pro srovnávání byl použit optimalizační systém s pevnými parametry, kde byly měněny pouze použité rekonstrukční algoritmy s nebo bez gaussovského předzpracování. Vyhodnocovací funkce absolutní chyby pracuje tak že, oddělené trasy spojí, přerušené místa přeskočí a vzdálené zárodky cílů ignoruje. Absolutní chyba je zde vyjádřena jako hodnota rozdílu nejbližší sestavené cesty od referenční trajektorie.



Obrázek 16 – Srovnání účinnosti gradientních metod s a bez gaussovského předzpracování



Obrázek 17 – Přesnost trasování gradientní metody s proměnným limitem a gaussovským předzpracováním.

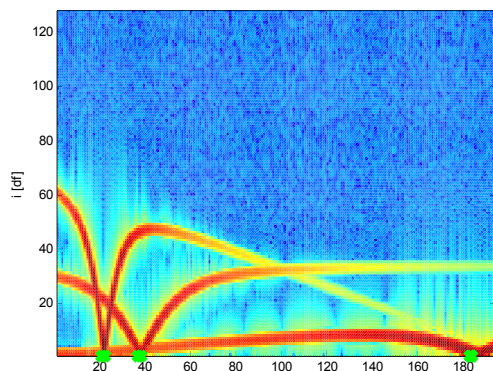
Souhrnné srovnání efektivity zkoumaných rekonstrukčních metod s gaussovským předzpracováním a bez něj v závislosti na poměru signál-šum ukazuje obrázek 16.

Ze simulací plyne, že Gradientní metoda s proměnným limitem a gaussovským předzpracováním dosahuje největší účinnosti a přesnosti. Současně gaussovské předzpracování snižuje počet nevýznamných bodů mapování, což snižuje i výpočetní čas. Přesnost této metody při vyhodnocování jednotlivých tras ukazuje obrázek 17.

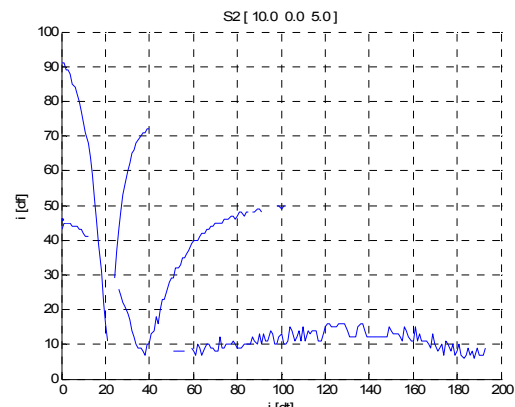
6. Simulace trasovací metody

Vyhledání kalibračních bodů t_{pca}

Aplikace metody z kap. 4. Výsledné pozice jsou označeny zelenými křížky, jak ukazuje obrázek 19.



Obrázek 19 – Výsledky vyhledávání bodů t_{pca} bodů, sensor S2



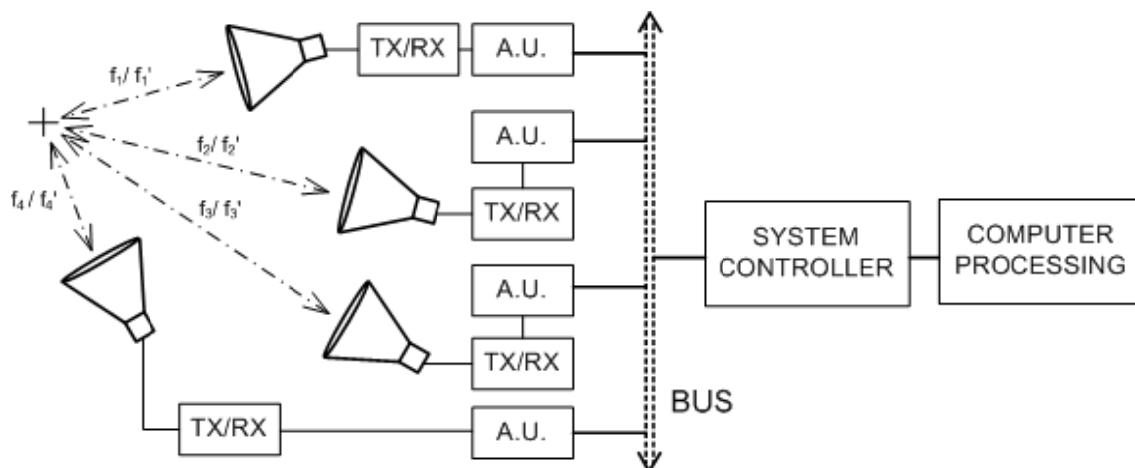
Obrázek 18 – Výsledky mapování cest radiálních rychlostí, sensor S2

Kriteriální meze byly zvoleny $k_{c,S2} = 100$, $k_{c,S3} = 150$, $k_{c,S4} = 650$, $k_{c,S5} = 150$. Jak dokládá obrázek 19, všechny existující t_{pca} body S2 byly nalezeny správně. Nalezené body v po sobě jdoucích intervalech dt je vhodné sloučit. Podle průběhů lze pozorovat neidentifikovatelné časové úseky.

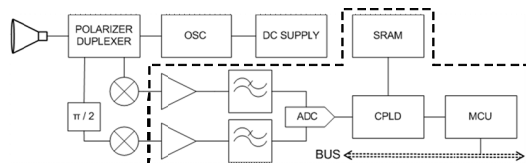
7. Systém pro rekonstrukci trajektorie střel

Radarový systém je určen ke sledování malých rychlých objektů, nejčastěji střel z ručních palných zbraní, pomocí sítě CW dopplerovských radarů. Předpokládají se rychlá krátkodobá měření. Akviziční jednotky uloží naměřená data do paměti SRAM a po dokončení měření se na vyžádání odesílají po komunikační sběrnici do počítače k dalšímu zpracování. Zpracováním se rozumí převod signálu do frekvenční oblasti, podrobení frekvenční analýze, váhování a aplikací algoritmu na rekonstrukci trajektorií.

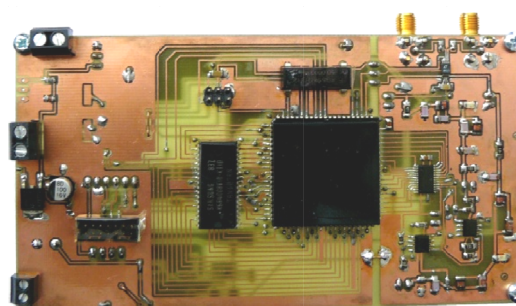
Součástí práce je návrh tohoto systému. Systém se skládá z párů dopplerovských hlavic a akvizičních jednotek. Hlavice i akviziční jednotky jsou spolu rozmístěny ve sledovaném prostoru a propojeny komunikační sběrnici. Proces akvizice je inicializován z počítače a spuštěn systémovým kontrolérem. Po dokončení akvizice (zaplnění paměti SRAM v akvizičních jednotkách), systémový kontrolér postupně vyčítá naměřené hodnoty a předává je do počítače pro následné zpracování [2].



Obrázek 20 – Blokové schéma systému pro rekonstrukci trajektorie střel



Obrázek 21 – Blokové schéma akviziční jednotky



Obrázek 22 – Prototyp akviziční jednotky

Akviziční jednotka

Obrázek 21 v přerušované části prezentuje blokové schéma akviziční jednotky. Akviziční jednotka slouží ke zpracování a dočasnému uložení naměřených dat z radarové hlavičky. Systém je dostatečně popsán v [3][4][8].

8. Experimentální měření

Pro srovnání s matematickým modelem a pro získání představy o šumových podmínkách bylo provedeno experimentální měření s dvojicí mikrovlnných senzorů.

Mikrovlnné senzory vyzařují malé množství energie, která se odráží od okolních objektů, ta je opět senzorem přijímána. Pokud se ozařované objekty pohybují ve směru radiálním ke směru ozařování, dochází v místě příjmu k dopplerovskému posuvu frekvence. Přijímaný signál se směšuje se signálem z lokálního oscilátoru ve vyváženém směšovači do základního pásma. Vzniká záznějový signál, který se dále zpracovává. Základem každého dopplerovského senzoru je tedy oscilátor s dielektrickým rezonátorem nebo s Gunnovou diodou, vysílací a přijímací anténa a vyvážený směšovač. Záznějový signál je mimo radiální rychlosti závislý na vř. kmitočtu nosné. Pracoviště a výsledky jsou uvedeny v úplné verzi práce.

Závěr

Práce je orientována na problematiku měření trajektorií malých objektů pomocí pole dopplerovských radarů. K tomuto účelu byly nastudovány a zpracovány použitelné metody měření prezentované v [1]. Blíže se práce měla zaměřit na systém měření střel v balistickém tunelu. Koncepce takového systému byla představena v [3] a detailněji poté zpracování signálů ve [2]. Byl navržen systém složený z radarových hlavic, akvizičních jednotek a systémového kontroléru a vyvinut prototyp akviziční jednotky publikovaný v [4] a její zpracování dat poté v [8]. Pro práci na rekonstrukčních metodách byl naprogramován matematický model radarové hlavičky prezentovaný v [5]. Tento model původně určený pro jeden cíl, jeden senzor byl postupně modifikován jak pro pole senzorů, tak i pro postihnutí multi-trajektoriální identifikace v radarovém poli. Pozornost byla směřována k rekonstrukční metodě založené na frekvenčních analýzách dopplerovských signálů a bodech nejbližšího přiblížení. Protože bylo nutné různé přístupy identifikace porovnat a najít optimální nastavení parametrů systému, byl vytvořen obecný systém pro optimalizaci a vyhodnocování rekonstrukčních algoritmů, který byl prezentován v [7]. Tento systém je použitelný i pro algoritmy multi-trajektoriální identifikace. Byly vyvinuty dvě metody označené jako metoda s fixním gradientem a metoda s plovoucím gradientem pro mapování cest radiálních rychlostí jednotlivých hlavic k následné rekonstrukci trajektorie prezentované v (článek v recenzním řízení, srpen 2011)[9]. Obě metody byly testovány a laděny optimalizačním systémem a později rozšířeny o vyhodnocování podle pravděpodobnostních hladin s gaussovským předzpracováním. Protože zpracování dat neprobíhá v reálném čase, mohla být k hledání bodů nejbližšího přiblížení použita inovativní metoda založená na modelové funkci V , hledající body ve spektrogramu optimalizační Nelder-Meadovou simplexovou metodou.

Pro získání reálných dat měřením a pro praktické odzkoušení metod mimo simulací, byl jako učební pomůcka realizován projekt "3D rekonstrukce trajektorie objektů pomocí dopplerovských hlavic" [6]. Jedná se o sestavu radarového pole sledující prostor v uzavřeném plexisklovém boxu. Bohužel data získaná měřením nejsou pro rekonstrukci použitelná. Na vině je vysoká míra šumu, nízká frekvenční dynamika způsobená relativně nízkým nosným kmitočtem hlavičky a nízkými rychlostmi cíle.

Po zveřejnění článku [34] byla pozornost nasměřována k možnosti multi-trajektoriální identifikace pomocí dopplerovských radarů a tomu odpovídá i charakter textové části disertační práce. Současný stav zachycuje metody sledování a identifikace jednoho cíle a obecně metody používané pro zpracování signálů ze sensorových polí. Dále jsou představeny cíle disertace a je popisován optimalizační systém použitelný i pro metody sledující více než jeden cíl. Stěžejní částí je kapitola Multi-trajektoriální identifikace cílů. Jedná se o speciální případ použitelný pro balistický tunel při sledování velmi rychlých objektů. Je zde představen postup, jak lze sledování více cílů současně realizovat a představeny dva algoritmy, jejichž srovnání je provedeno v kapitole následující. Bylo zjištěno, že nejlepšími výsledky co do přesnosti, účinnosti i výpočetního času dosahuje metoda s plovoucím gradientním limitem s gaussovským předzpracováním. V další kapitole následuje představení hardwarové části systému rekonstrukce trajektorie střel a experimentální měření z [6].

Při srovnávání mapovacích metod se u uváděného případu přes hodnotu trasovací účinnosti $\eta = 70\%$ dostaly pouze metody s aplikovaným gaussovským předzpracováním. Je to dáno především potlačením falešných cest, kde špičky vzniklé

působením šumu mají po zpracování pouze nízké hodnoty v pravděpodobnostní vrstvě. Dobře použitelné jsou obě metody od hodnoty $\text{SNR} = 22 \text{ dB}$, kde účinnost gradientní metody s plovoucím oknem a gaussovským předzpracováním dosahuje účinnosti $\eta = 95 \%$. I přes tyto dobré hodnoty účinností rozhoduje o možnosti rekonstrukce i přerušení cesty, které se nevyhodnocuje. Je tím citlivější, čím blíže je k referenčnímu bodu.

Slabinami tohoto systému jsou tedy přerušení za referenčními body, které neumožní pokračování v rekonstrukci trajektorie cíle⁵. Dále cíle s relativně nízkou rychlostí vůči vzorkovacímu kmitočtu a kmitočtu nosné radarové hlavice a řada případů nejednoznačného křížení cest. Dále je zde nutná znalost informace o počátečním směru pohybu každého cíle u měření s hlavicemi s jedním směšováním při menším počtu senzorů.

V budoucí práci by bylo vhodné při párování tras a rozhodování při křížení vyjadřovat i faktor neurčitosti rozhodování a definovat jak je výsledná rekonstrukce důvěryhodná. Protože u tohoto způsobu, především v případě, že jsou použity hlavice s jedním směšováním, mohou snadno vznikat omyly rozhodování, je zde nezbytné zvažovat validitu měření. Při reálném nasazení je nutné použít kvalitní radarové hlavice. Předpokládá se, že při vysokých rychlostech cílů s hlavicemi s nosným kmitočtem $35,5 \text{ GHz}$ se zvýší frekvenční dynamika a prezentované metody budou v praxi použitelné.

⁵ Mimo zde neuvažovaného zpětného dopočítání reference z t_{cpa} bodů

Literatura

Vlastní publikace

- [1] Fuchs, M. Methods for reconstruction of the trajectory using Doppler radar. In Summer School Proceedings. Rome, Italy: 2009. s. 504-509.
- [2] Fuchs, M. Řetězec pro zpracování dat z radarové hlavičky. In Pokročilé metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace 2009. 2009. s. 11-14. ISBN: 978-80-214-4017- 3.
- [3] Fuchs, M. Systémový rozbor zařízení pro rekonstrukci trajektorie střel. In Sborník konference KONDOR 2009. Trenčín, Slovensko: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíně, 2009. s. 51-54. ISBN: 978-80-8075-395- 5.
- [4] Fuchs, M. Circuit Design of an Acquisition Unit Part of the Doppler Radar Acquisition System. In Proceedings of the 4th workshop of the COST IC0803. 2010. s. 1-4.
- [5] Fuchs, M.; Šebesta, J. Mathematical model of Doppler radars array. In Proceedings of the 2nd workshop of the COST IC0803. 2009. s. 1-9.
- [6] Fuchs, M. 3D rekonstrukce trajektorie objektů pomocí dopplerovských hlavic. Brno: 2010. s. 1-25. Závěrečná zpráva k projektu G1/2656 v roce 2010.
- [7] Fuchs, M.; Šebesta, J. System for Optimizing Multiple-Target Identification Methods. In ICECom 2010, Conference Proceedings (CD-ROM). Dubrovnik, Croatia: KoREMA, 2010. s. 1-4. ISBN: 978-953-6037-58- 2.
- [8] Fuchs, M.; Šebesta, J. Signal and Data Processing for Radar Sensor Head Network. In Proceedings of the 20th International Conference RADIOELEKTRONIKA 2010. Brno: 2010. s. 159-162. ISBN: 978-1-4244-6319- 0.
- [9] Fuchs, M.; Šebesta, J. Flow and Fixed Gradient Methods for Multiple-Target Tracking with Unknown Number of Moving Objects. Radioengineering . 2011. 7 s. [článek v recenzním řízení].

Ostatní literatura

- [10] Armstrong, B.; Holeman, B.S., "Target tracking with a network of Doppler radars," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on , vol.34, no.1, pp.33-48, Jan 1998
- [11] Levanon, N., Weinstein, E., „Angle-Independent Doppler Velocity Measurement“, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, vol.AES-19, no.3
- [12] Weinstein, E.; Levanon, N., "Passive Array Tracking of a Continuous Wave Transmitting Projectile," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on , vol.AES-16, no.5, pp.721-726, Sept. 1980
- [13] Statman, J.I.; Rodemich, E.R., "Parameter Estimation Based on Doppler Frequency Shifts," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on , vol.AES-23, no.1, pp.31-39, Jan. 1987
- [14] Chan, Y.-T.; Jardine, F.L., "Target localization and tracking from Doppler-shift measurements ," *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of , vol.15, no.3, pp.251-257, Jul 1990
- [15] Arnold, J, Bar-Shalom Y., „Target parameter estimation using measurements acquired with a small number of sensors“, IEEE Journal of oceanic engineers, vol.OE-8, no.3, 3. July 1983
- [16] Ziegenbein, J.; , "Spectral analysis using the Karhunen-Loeve transform," *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE International Conference on ICASSP '79. , vol.4, no., pp. 182- 185, Apr 1979
- [17] Reddi, S.S.; , "Multiple Source Location-A Digital Approach," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on , vol.AES-15, no.1, pp.95-105, Jan. 1979 doi: 10.1109/TAES.1979.308800
- [18] El-Behery, I.; MacPhie, R.; , "Maximum likelihood estimation of the number, directions and strengths of point radio sources from variable baseline interferometer data," *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on , vol.26, no.2, pp. 294- 301, Mar. 1978
- [19] Capon, J.; , "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *Proceedings of the IEEE* , vol.57, no.8, pp. 1408- 1418, Aug. 1969
- [20] Duckworth, G.L., "Adaptive array processing for high-resolution acoustic paging," S. M. thesis, M.I.T., Cambridge, MA, Sept. 1979
- [21] Webster, R.J.; , "An Exact Trajectory Solution from Doppler Shift Measurements," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on , vol.AES-18, no.2, pp.249-252, March 1982
- [22] Jakobsson, S.; Ekman, T.; Stoica, P.; , "Computationally efficient 2-D spectral estimation," *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2000. ICASSP '00.

Proceedings. 2000 IEEE International Conference on , vol.6, no., pp.2151-2154
vol.4, 2000

- [23] Weinstein, E.; , "Optimal source localization and tracking from passive array measurements," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.30, no.1, pp. 69- 76, Feb 1982
- [24] Carter, G.; , "Time delay estimation for passive sonar signal processing," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.29, no.3, pp. 463- 470, Jun 1981
- [25] Weinstein, E.; , "Measurement of the differential Doppler shift," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.30, no.1, pp. 112-117, Feb 1982
- [26] McClellan, J.H.; , "Multidimensional spectral estimation," Proceedings of the IEEE , vol.70, no.9, pp. 1029- 1039, Sept. 1982
- [27] Jan, J. Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. Brno: FEKT VUT v Brně, 1997, 2002. 427 stran. ISBN 80-214-2911-9
- [28] Schmidt, R.; , "Multiple emitter location and signal parameter estimation," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.34, no.3, pp. 276- 280, Mar 1986
- [29] Burg, J.P.; , "Maximum entropy spectral analysis," presented at the 37th Int. Meet., Soc. Explor. Geophys., Oklahoma City, OK, Oct. 1968
- [30] Newman, W.; , "Extension to the maximum entropy method II," Information Theory, IEEE Transactions on , vol.25, no.6, pp. 705- 708, Nov 1979
- [31] Lang, S.; McClellan, J.; , "The extension of Pisarenko's method to multiple dimensions," Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '82. , vol.7, no., pp. 125- 128, May 1982
- [32] Lang, S.; McClellan, J.; , "Spectral estimation for sensor arrays," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.31, no.2, pp. 349-358, Apr 1983
- [33] AgilSense, „HB410 Microwave sensor module“ [cit. duben 2010].
Dostupné na URL:
<http://www.agilsense.com/pdf/x-band%20sensor/DS_HB410_v102%20.pdf>
- [34] Pinezich, J. D.; Heller, Jason; Lu, Ting; , "Ballistic Projectile Tracking Using CW Doppler Radar," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on , vol.46, no.3, pp.1302-1311, July 2010
- [35] Nelder, John A.; R. Mead; , "A simplex method for function minimization". Computer Journal 7., pp. 308–313, 1965
- [36] Bartsch, H.J., "Matematické vzorce," třetí revidované vydání, Praha : Mladá fronta, 2002. 832 s.

- [37] Zetik, R.; Hirsch, O.; Thoma, R.; , "Kalman filter based tracking of moving persons using UWB sensors," *Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, 2009. IMWS 2009. IEEE MTT-S International Microwave Workshop on* , vol., no., pp.1-4, 24-25 Sept. 2009
- [38] Galin, N.; Worby, A.; Massom, R.; Brooker, G.; Leuschen, C.; Gogineni, S.P.; Jansen, P.; , "2 – 8 GHz FMCW radar for estimating snow depth on antarctic sea ice," *Radar, 2008 International Conference on* , vol., no., pp.276-281, 2-5 Sept. 2008
- [39] Sakkila, L.; Tatkeu, C.; Boukour, F.; El Hillali, Y.; Rivenq, A.; Rouvean, J.-M.; , "UWB Radar system for road anti-collision application," *Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008. ICTTA 2008. 3rd International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 7-11 April 2008
- [40] Yates, R. C. "Cisoid." *A Handbook on Curves and Their Properties*. Ann Arbor, MI: J. W. Edwards, pp. 26-30, 1952.
- [41] Pisarenko V. F., "The Retrieval of Harmonics from a Covariance Function," *Geophysical J. Roy. Astro. Soc.*, 1973

Curriculum Vitae

Name:	Michal Fuchs
Born:	April 17 th 1984 in Šumperk
Contact:	fuchs.michal@post.cz
Education	
2008 – 11	Technical University of Brno / Department of Radio Electronics Ph.D. study of Electronics Dissertation: "Trajectory Reconstruction with CW Doppler Radar Array"
2006 - 08	Technical University of Brno / Department of Radio Electronics Higher Education, Master Study Programme Thesis title: "Control of ZigBee Wireless Network"
2003 - 06	Technical University of Brno / Department of Radio Electronics Higher Education, Bacheor Study Programme Bacheor thesis title: "Hospital Parking and Revenue Control System"
1999 - 03	The Secondary School of Electrical Engineering, VOŠ a SPŠ Šumperk Leaving examination, Low-power Electronics Final project: "Universal computer display unit"
Internships	
10/10 - 12/10	International Research Fellowships at University of Cantabria, Spain Department of Communication Engineering, Advisors: A. P. Tazón, T. Fernandez
Courses	
	International Summer School on Radar / SAR July 8 th - 15 2011, Bonn, Germany
	The 19th International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves 2009 (ITSS 2009) July 4 th - 10 th 2009, Rome, Italy
Experience	
2005 - 08	SQUARE Design External PHP programmer Stand-alone projects programming

9/06 - 12/06	CTMOS Brno External PHP programmer Stand-alone projects programming
7/05 - 7/05	DESIGN CIS PHP programmer Universal Embedded Modules programming
7/03 – 7/03	GUBI Computer Systems Assistant, programmer Translate utilities modification
Languages	Czech - Native speaker English - Independent German - Basic
Skills	MCU Programming (AVR, PIC), PCB Layout Design, Digital Circuits Design, ZigBee Networks, Computer Networking, Radio Modulations.
IT Skills	Linux Server Supervising, ASM for MCUs, ANSI C for MCUs, C, .NET C#, MatLab, PHP, SQL, VB, HTML, JS

Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou měření trajektorie cílů pomocí pole dopplerovských radarů. Pozornost je věnována měření trajektorií střel v balistickém tunelu a možnosti využití radarových senzorů s jedním směšováním v případě, kdy je striktně dán směr přiblížení cíle. Část disertační práce se věnuje rozboru a vývoji měřicího systému s akviziční jednotkou a systémovým kontrolérem. V teoretické části je prezentován vytvořený matematický model radarového sensorového pole a optimalizační systém určený pro ladění a hledání optimálních parametrů mapovacího systému. Práce se zabývá i možnostmi rekonstrukce trajektorií více objektů současně. Originální je použití gradientních metod s gaussovským předzpracováním k mapování a dále hledání kalibračních bodů nejbližšího přiblížení senzoru pomocí optimalizace "V" modelu.

Abstract

This dissertation is focused on target trajectory identification using CW radar sensor network measuring. An omni-directional radar based on single mixing is considered for measurement in ballistic tunnel, where information about direction of target approaching is a priory known. Applied experimental radar network setup with system controller and acquisition units is demonstrated. Mathematical models and optimized structures have been developed for fitting of system parameters and presented in the theoretical part. The second part is aimed to the multi-trajectory identification. New methodical techniques of this work consist in identification of the points of the closest approach with "V" model function and utilizing gradient methods for path identification.