

Oponentský posudek na doktorskou disertační práci Ing. Jana Pidaniče, studenta doktorského studijního programu Technika technologie v dopravě a spojích ve studijním oboru Dopravní prostředky a infrastruktura na téma: **Metody pro výpočet vzájemné funkce neurčitosti.**

Předložená doktorská disertační práce se věnuje, v současnosti velice aktuální, problematice pasivní koherentní radiolokace (PCL), která je založena na multi-statickém principu s využitím tzv. nespolečnicujících vysílačů. Metoda PCL je v principu schopna detekovat, klasifikovat, lokalizovat a sledovat cíle, které aktivně negenerují žádné elektromagnetické signály (tzv. tiché cíle) a cíle, které jsou vybaveny technologiemi pro potlačení přímé odrazivosti ve vybraných frekvenčních pásmech (tzv. technologie Stealth). Metoda PCL typicky pracuje v pásmu VHF-UHF, kde jsou stávající technologie Stealth neúčinné. Z tohoto hlediska je PCL takřka ideálním doplňkem stávajících PSS založených na TDOA multilateraci, protože poskytuje zcela unikátní možnosti a dosud nedostupné provozní radiolokační režimy a provozní scénáře. Potenciální význam a uplatnění technologie PCL je velice široké a pokrývá aplikace od čistě vojenských, přes bezpečnostní až po čistě civilní. Z technického hlediska metoda PCL představuje vysoce náročnou technologii slučující do jednoho celku oblasti anténní techniky (kruhové fázované anténní řady), digitálního příjmu (SW rádio na IF úrovni), pokročilých metod digitálního zpracování signálů (eliminace pozemního clutteru, výpočet CAF, detekce cíle), lokalizace cíle (převod z prostoru doppler-range do prostoru XYZ), klasifikace cíle (korelace 3-D charakteristiky měřeného RCS s databází cílů) a vedení detekovaných cílů (Kalmanova filtrace, odhad přesnosti, atd.) včetně integrace s dalšími spolupracujícími a nadřazenými systémy. Ve všech těchto oblastech je nutno řešit problémy, které jsou často na hranici současných technických možností. Řešená problematika proto představuje jednoznačně řadu technických výzev vyžadujících moderní metody, postupy a technologie. Je proto ideálním tématem pro novou nastupující generaci odborníků v oblasti radiolokace.

Autor předložené práce se soustředil na jednu specifickou oblast technologie PCL: výpočtu tzv. vzájemné funkce nejednoznačnosti (CAF), které kvantifikuje korelační míru souhlasu pro nalezení bistatického zpoždění a dopplerova posunu sledovaného cíle na základě znalosti přímého a odraženého (od sledovaného cíle) signálu vybraného nespolečnicujícího vysílače. Znalost CAF je klíčová pro spolehlivou detekci cíle a veškeré další následné kroky dalšího zpracování a vyhodnocení. V případě spolupracujícího zdroje, lze v principu detekci přímého signálu zcela eliminovat a systém tím výrazně zjednodušit, v tomto případě je ale nutno řešit problém koncepce, konstrukce a provozu vlastních vysílačů. Výpočet CAF je v principu relativně jednoduchá matematická operace, v praxi je ale nutno ji provádět opakovaně (cca 1-10x /sec) a na relativně dosti velkém objemu dat (10^5 - 10^6 komplexních vzorků). Díky tomuto faktu, se jedná o numericky dosti náročnou proceduru, která vyžaduje použití moderních metod DSP a paralelního programování, protože veškeré zpracování se v cílovém systému provádí v reálném čase.

Předložená práce detailně sumarizuje více méně všechny známé metody pro výpočet CAF (v práci je předložen, podle mého názoru, dosud nejuplněnější přehled všech použitelných metod!!!). Analyzuje jejich numerické vlastnosti a popisuje jejich algoritmicovou i programovou implementaci (MATLAB) jak pro sériové, tak pro paralelní zpracování. Následně je provedena podrobná simulační studie, která analyzuje výpočetní efektivitu jednotlivých metod pro tři typické konfigurace výpočetních systémů (multi-core SMP systémy, výpočetní clustery a GPU akcelerátory).

Hlavním a nejvýznamnějším praktickým výsledkem předložené práce je solidně (numerické experimenty) doložené zjištění, že v současnosti je pro realizaci robustního (spolehlivého) a efektivního (rychlého) výpočtu CAF jako nejperspektivnější platforma GPU-akceleratorů doplněných o multi-jádrový výpočetní systém se sdílenou pamětí a současné nalezení optimální metody pro výpočet CAF na této HW platformě, kterou je algoritmus FMGFD.

Význam tohoto výsledku jde asi nejlépe demonstrovat odkazem na intenzivní výzkumné a vývojové aktivity, které probíhaly v letech 2004-2006 ve firmě ERA, a.s. ve spolupráci s ÚTIA AV ČR (svého času dosti vysoce hodnocené; celkový počet citací všech souvisejících publikací dosáhl hodnoty 89). V té době byla (po rozsáhlých analýzách) jako „ideální“ platforma pro výpočet CAF v reálném čase zvolena platforma FPGA (Xilinx). Kvůli extrémní náročnosti na vývoj a následnou optimalizaci VHDL kódu pro FPGA procesor musela být od začátku zvolena jediná metoda (FFT). Samotný vývoj kódu a jeho implementace a optimalizace v FPGA zabral více jak 2 člověko-roky a náklady na nutné SW a HW vybavení přesáhly cca 10000 USD. Výsledkem tohoto projektu byla signálová PCIe FPGA deska, která dokázala realizovat kompletní výpočet CAF za 1.99sec (viz. příloha tohoto posudku). Autor předložené práce je prokazatelně schopen v roce 2012 realizovat stejnou úlohu za cca 0.05sec (tj. cca 40x rychleji) při nákladech nepřesahujících cca 1000USD a době nutné pro implementaci kolem 1 měsíce (!!!). Srovnání předložené práce a článkem z roku 2006 (viz. příloha) je velice poučné, protože jasně ukazuje rychlost vývoje v oblasti moderních DSP metod a také rychlý proces zastarávání výsledků. Z dnešního pohledu je tzv. „vysoce optimalizovaná“ implementace CAF algoritmu na tehdy špičkovém FPGA procesoru Xilinx-Virtex IV již zcela nevyhovující a obecná použitelnost provedených analýz je minimální.

Z výše uvedeného plyne několik závěrečných konstatování:

1. Předložená práce prezentuje výsledky, které snesou srovnání v mezinárodním měřítku. Doporučuji autorovi získané výsledky prezentovat na vhodné konferenci a následně publikovat v nějakém renomovaném mezinárodním odborném časopise.
2. Budoucnost moderních DSP metod a tedy i PCL systémů je s velkou pravděpodobností v důsledné aplikaci masivně paralelních algoritmů na hybridních multi-jádrových výpočetních systémech (CPU+GPU) se sdílenou pamětí (tj. v přeprogramování – paralelizaci stávajících sériových algoritmů), z důvodů blížícího se dosažení fyzikálních limitů konstrukce jednotlivých jader procesorů. Nelze totiž už očekávat nějaké zásadní zrychlení procesorů na sériové úrovni.
3. Překvapivým zjištěním je také skutečnost, že výpočetní prostředí MATLAB (považované dosud spíše za nástroj pro výuku a vývoj algoritmu, resp. analýzu dat) dnes poskytuje tak vysokou numerickou efektivitu, která nebyla před cca 6 lety dosažitelná ani pomocí vysoce optimalizovaných FPGA řešení.
4. Výsledky předložené práce dobře korespondují i se stavem řešení projektu PCL ve firmě ERA a.s., která patří stále k předním pracovištím v této oblasti ve světě. I zde totiž používají GPU akcelerátory pro výpočet CAF a dalších numericky náročných částí signálového zpracování.

Předložená práce splnila všechny stanovené cíle. Prezentované výsledky a zevrubný přehled metod DSP užívaných v PCL systémech pro výpočet CAF jsou na takové úrovni, že předložená práce splňuje podmínky kladené na tvůrčí a původní vědeckou práci. Práce přináší, resp. analyzuje, nové možnosti číslicového zpracování signálů dané současnými a budoucími možnostmi masivně paralelního přístupu a má nepopíratelný význam pro budoucí vývoj a výrobu komerčních pasivních sledovacích systémů v rámci spolupráce s komerčním sektorem.

Na základě výše uvedených hodnocení **DOPORUČUJI** předloženou disertační práci k obhajobě a následně i udělení titulu PhD.

Otázky na autora předložené práce:

1. Co je tedy v současnosti „nejvyšším hrdlem“ z hlediska možností dalšího zvyšování výpočetního výkonu na všech třech testovaných HW platformách?
2. Jaké jsou možnosti přenosu vyvinutých kódů v systému MATLAB do nějakého low-level jazyka (C/C++, ...). Přinesla by tento převod nějaké výhody? Jak by byl náročný?

.....
Michal Kvasnička
Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.

V Praze dne: 16.4. 2012

Příloha: Hermanek, Kunes and Kvasnicka: Computation of Long Time Cross Ambiguity function using reconfigurable HW, 2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, Vancouver, Canada.