

Oponentní posudek disertační práce:

„Zpracování radarového signálu s využitím μ – Dopplerova efektu“

autora Ing. Josefa Jordána

z Univerzity Pardubice, Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Předložená disertační práce je obecně zaměřena do oblasti zpracování radiolokačního signálu s cílem separace μ – Dopplerova spektra pro účely následné klasifikace zájmových objektů. Hlavním cílem předložené disertační práce je vytvoření modelů odražených signálů od zájmových objektů, jejich porovnání s experimentálně naměřenými daty a následným navržením postupů klasifikace, které umožní rozpoznávání těchto zájmových objektů. Ke splnění tohoto hlavního cíle práce byly autorem stanoveny tři dílčí cíle, kterými jsou:

- analýza metod odhadu μ – Dopplerova spektra a následný výběr optimální metody odhadu tohoto spektra,
- vytvoření zjednodušených modelů vyslaného i přijatého signálu, včetně jejich experimentálního ověření,
- vytvoření klasifikátoru na bázi neuronové sítě.

Stanovené dílčí cíle jsou podle mého názoru stanoveny v souladu s vytyčeným hlavním cílem disertační práce a jsou vhodně logicky uspořádány. Vlastní práce má celkový rozsah 107 stran a je členěna do 9 částí, a to včetně úvodu a závěru.

Ve smyslu doporučených pokynů hodnotím práci následovně:

- Z pohledu současné poptávky na hledání nových způsobů detekce malorozměrných, vysoce manévrujících objektů s využitím aktivních radiolokačních systémů, resp. hledání metod jejich klasifikace či následné identifikace s využitím parametrů extrahovaných z přijatého radiolokačního signálu se problematika separace μ – Dopplerova spektra a měření jeho parametrů ukazuje jako jeden z velmi perspektivních přístupů. Jsem přesvědčen, že význam tohoto přístupu bude nadále vzrůstat, a to jak v civilních, tak i vojenských aplikacích. Z tohoto pohledu tedy mohu konstatovat, že zvolené téma práce je vysoce aktuální.
- Jak již bylo uvedeno výše, autor si vytyčil mimo hlavní cíl disertační práce i tři cíle dílčí. Při plnění jednotlivých dílčích cílů předložené disertační práce bylo postupováno následujícím způsobem. V části práce věnované současnému stavu poznání v oblasti řešené problematiky autor zevrubně popsal možné technologické přístupy k detekci malých cílů, typicky UAV systémů. Dále autor provedl výčet radarových systémů, které jsou schopny detekovat deklarované cíle, a to včetně uvedení jejich základních parametrů a stanovil základní požadavky na takovéto radarové systémy. V následující části předložené práce (ve čtvrté kapitole) byly uvedeny a analyzovány základní metody zpracování radarového signálu s důrazem položeným do oblasti jeho

dopplerovského zpracování. V této souvislosti bylo také představeno porovnání těchto metod z hlediska jak schopnosti extrakce μ – Dopplerovského spektra přijatého signálu, tak i jejich výpočetní náročnosti a současně byla vybrána konkrétní metoda pro vyjádření tohoto spektra. Tímto byl splněn první dílčí cíl práce. V této části práce byla také představena modifikovaná verze radarového signálu s kmitočtovou modulací, tzv. FLAMENCO signál, který lze považovat za jeden z teoretických přínosů práce.

V další části práce se autor zabýval návrhem modelu signálů, včetně jejich šíření, pro vybrané zástupce možných objektů zájmu s cílem vytvoření jejich předpokládaných μ – Dopplerových spekter. Dále je zde popsán měřicí řetězec pro realizaci praktických měření s vybranými cíli. Následuje, z mého pohledu podstatná, část práce, kde jsou porovnána naměřená data μ – Dopplerových spekter s daty simulovanými, a to včetně podrobného rozboru dosažených výsledků. Touto částí práce je podle mého názoru dostatečně splněn druhý dílčí cíl předložené práce.

V závěrečné kapitole práce se autor zabývá problematikou klasifikace objektů na základě signifikantních rysů μ – Dopplerova spektra. Jedná se o naplnění třetího dílčího cíle práce. Autor se apriori rozhodl pro řešení tohoto úkolu využít metod založených na aplikaci neuronových sítí pro rozpoznávání obrazů. Z mého pohledu by bylo vhodnější nejdříve stručně uvést, zda použitý přístup je vhodný pro klasifikaci těchto objektů, resp. uvést, proč vyloučil použití jiných způsobů klasifikace. Nicméně tento přístup autora respektuji. Konkrétně autor pro klasifikaci využil vícevrstvou konvoluční neuronovou síť, kde vstupními daty jsou hodnoty matice popisující spektrogram o rozměru 128 x 2048 hodnot, což je dle názoru autora dostatečné pro zachycení rozdílů ve spektrogramu jednotlivých objektů. Toto tvrzení je podloženo i dosaženými výsledky, kdy pravděpodobnost úspěšné klasifikace byla více než 90 %. Lze tedy konstatovat, že i poslední dílčí cíl práce byl splněn.

- Vzhledem k výše uvedenému mohu konstatovat, že autor práce se zabýval všemi otázkami souvisejícími se splněním deklarovaných cílů disertační práce, a jsem přesvědčen, že všechny byly řádně splněny.
- Na základě podrobného prostudování předložené disertační práce mohu konstatovat, že autorovým teoretickým přínosem k rozvoji poznání v dané oblasti je definice signálu s novou nelineární vnitroimpulsní modulací. Za praktický přínos lze považovat vytvoření klasifikátoru objektů na základě odhadu μ – Dopplerova spektra.
- Z hlediska formální úpravy předložené práce mohu konstatovat, že se v práci nevyskytují zásadní faktické nedostatky ani chyby.

S dovolením mám k práci, jako i k samotné řešené problematice, následující otázky:

1. Veškeré simulace i související experimenty byly provedeny pro stacionární, tj. nepohyblivé cíle, kdy dominantní Dopplerův kmitočet objektu jako takového je nulový a ve spektru je reprezentován jako relativně úzká a ostře ohraničená „špička“. V případě

pohybujícího cíle, lze předpokládat, že pásmo vymežující konkrétní Dopplerův kmitočet může být širší (např. vlivem náhodných změn v pohybu cíle, v jeho poloze, v natočení, apod.). Nedojde z tohoto důvodu pak tedy ke snížení „kvality“ extrakce zájmového μ – Dopplerova spektra?

2. Jako vstupní data pro klasifikátor byla použita data reprezentující vlastní spektrogram. Byla tato vstupní data nějakým způsobem předzpracována? Například normalizací, filtrací („rozmazání“), apod.

Závěrem mohu uvést, že předložená disertační práce pana Ing. Josefa Jordána na mě působí konzistentním dojmem, tj. jednotlivé části práce jsou seřazeny v logicky správném pořadí a vedou ke splnění hlavního cíle práce. Jsem také přesvědčen, že byly splněny všechny definované cíle práce a dosažené výsledky vedou k rozšíření poznání v dané oblasti.

Na základě výše uvedeného **doporučuji předložit práci k obhajobě.**

V Brně dne 27. 10. 2025

doc. Ing. Petr Hubáček, Ph.D.

Katedra komunikačních technologií,
elektronického boje a radiolokace, Fakulta
vojenských technologií, Univerzita obrany
Brno