

***Oponentský posudek disertační práce
„Odhad vlastností šumů v dynamických modelech“
Autor: Ing. Oliver Kost***

O tento posudek mne požádal Děkan FAV ZČU doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D. dopisem ze dne 26.11.2021.

Práce se zabývá problematikou odhadu vlastností šumů ve stavových modelech, a to především tzv. korelačními metodami. Klíčovým je v práci využití odhadu necentrálních a centrálních momentů šumu, namísto přímého odhadu parametrů jeho předpokládaného pravděpodobnostního rozdělení. Na základě analýzy předností a nedostatků stávajících korelačních metod je v práci navržena nová původní korelační metoda, založená na tzv. diferenci měření, která poskytuje konzistentní a nestranné odhady zmíněných momentů, a to jak pro časově nezávislé, tak i časově závislé šумы. Tato metoda je pečlivě analyzována a jsou zdůrazněny i její přednosti ve srovnání s již existujícími metodami. Metoda, mimo jiné, umožňuje ověřovat předpoklad gaussovosti analyzovaného šumu, či následný odhad jeho parametrů. Význam výsledků je pak zdůrazněn jejich využitím v modelech globální satelitní navigace, a to jak simulačně, tak i na reálných praktických datech. Toto je umožněno i tím, že je splněn jeden z cílů disertace, kterým je i odhad momentů časově závislých šumů, neboť i takové šумы se mohou vyskytovat při měření pseudovzdáleností v satelitním navigačním systému.

Z tohoto popisu pak vyplývá i vyjádření oponenta k bodům, navržených v pokynech pro vypracování posudku. Zejména:

- a) Práce představuje nesporně přínos k oboru Kybernetika, ve kterém je předložena. Odhad vlastností šumů zůstává otevřeným problémem, a závisí na něm kvalita dalšího řízení systémů, či jiného využití dostatečné znalosti jeho stavů. Předkládá další původní výsledky v této oblasti, a dokládá zajímavé možnosti jejich využití. Podrobněji, předkládá nové výsledky v oblasti odhadu necentrálních i centrálních momentů šumů a využívá je k návrhu originální korelační metody, která vylepšuje vlastnosti jiných dosavadní korelačních metod. Zabývá se i praktickým využitím těchto nově vyvinutých metod.
- b) Postup řešení je systematický a plánovitý a dokládá schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce předkladatele. Zmíněné originální výsledky jsou odvozeny na základě důkladného studia a zhodnocení předností a nedostatků dříve známých postupů publikovaných v odborné literatuře. Použité metody jsou zcela odpovídající cílům práce. Tyto cíle jsou jasně formulovány na základě přehledného popisu stavu užšího zaměření práce, jejich splnění je pak doloženo a zhodnoceno.
- c) Výsledky disertační práce jsou původní a přínos předkladatele k těmto výsledkům zcela jistě nezanedbatelný, i když mají většinou více autorů, je třeba respektovat specifiku zkoumané oblasti, ve které je týmová spolupráce nezbytná.
- d) Jak již bylo naznačeno výše, práce je prezentována systematicky a celkem přehledně, formální úprava je výborná a jazyková úroveň přijatelná, s výhradami níže.

Na základě zevrubného popisu existujících přístupů jsou vytyčeny cíle práce tak, aby byly pro zkoumanou oblast přínosné a odstranily nedostatky existujících přístupů. Hlavní část práce pak vytyčené cíle podrobně plní, na konci práce jsou výsledky přehledně shrnuty a splnění jednotlivých cílů stručně doloženo odkazem na příslušnou podrobnou pasáž práce.

- e) Původnost výsledků dokládá, mimo jiné, to, že byly publikovány v kvalitních recenzovaných časopisech, včetně impaktovaných, a ve sbornících významných mezinárodních konferencí. Publikační činnost předkladatele lze tedy považovat za dostatečnou.
- f) Práci lze proto doporučit k obhajobě, během které mohou být zodpovězeny i hlavní výhrady a otázky z těch, které jsou dale podrobně popsány.

Konkrétní výhrady, otázky, drobné nedostatky a připomínky tedy jsou:

- obecně, v práci je až příliš chyb v textu, příklady níže zdaleka nejsou vyčerpávající. Je zřejmé, že byly použity automatické opravy, které ale nejsou všelékem, pokud překlep vede na existující gramaticky správný výraz.
- Na str. 8, vzhledem k celkové podrobnosti práce mi chybí formální definice pojmu "odhad".
- K vytvoření vektoru složeného z jednočlenů je využit formalismus Kroneckerových součinů což vede k duplicitě některých prvků a zavedení vektoru unikátních prvků, který duplicitu eliminuje, ale jeho výběr je nejednoznačný. Matematicky, všechny výběry představují třídu ekvivalence. Bylo by na str 6 dobré zmínit, zda existuje nějaký typický "kanonický" reprezentant třídy ekvivalence. Pokud ano, nabízí se otázka, zda neexistuje přímočařejší cesta k onomu reprezentativnímu unikátnímu vektoru, bez formalismu Kroneckerových součinů, prostě jen jednoduchým uspořádáním všech jednočlenů, jejichž střední hodnota definuje příslušný necentrální moment. Např. reprezentativním unikátním vektorem může být ten, jehož indexy komponent vektoru šumu budou vždy v každém jednočlenu zleva doprava rostoucí.
- V 3.2, první věta, "kapitola" má asi být "podkapitola", pokud je to překlep, je nešťastně matoucí.
- Druhá věta 3tího odstavce 3.2 je téměř nesrozumitelná, zřejmě jde jen o překlep, či gramatickou chybu, ale těžko říci přesně jakou. Věcně, co znamená " hustota pravděpodobnosti parametrů šumu"? Doposud se práci o parametrech zmiňuje jen jako o neznámých číslech, nikoliv jako o další náhodné veličině.
- Věta před (4.2) je matoucí, neboť nazývá celou rovnost (4.2) funkcí. Co je tedy přesně ona korelační funkce?
- Na třetím řádku podkapitoly 5.2 "kovariancím" má být "kovariancí"
- Druhý odstavec 9.6, první věta, "definován" má být "definovány"
- Druhý odstavec 9.6, 3tí řádek od konce, "Protože budou" má být "Protože bude" a "dostupné" má být "dostupný".
- Konec 9.6: v předposlední řádce "budou" má být "budou se" anebo "porovnávat" zaměněno "porovnávány".
- Vztah (9.10) je ze začátku matoucí, 4tá a 5tá komponenta nemají vůbec vliv na Kartézské souřadnice objektu, k čemu tedy je? Až po dalším výkladu na další straně je vidět, že se poslední dvě rovnice (9.10) jen přímo zapojí do měřeného výstupu a na dynamiku nemají vliv. Uvítal bych strohý, matematický způsob výkladu, jasný popis všech rovnic v jednom místě a pak kompaktní přehled proměnných, teprve pak další slovní výklad, co bývá a nebývá s těmito proměnnými. Zejména pak s ohledem na vícero příkladů výše, které zdaleka nejsou vyčerpávající, o tom, že literární styl

- autora je poněkud komplikovaně čitelný, a ne zcela kultivovaný, s řadou chyb a nepřesností.
- Poslední dvě rovnice (9.10) a x_5 , w_4 , a reset u_4 (ten ale probíhá jen někdy, jak jsem pochopil, není součástí odhadování), vlastně generují jinou náhodnou veličinu x_4 , pomocí lineárních operací a jednotkového zpoždění, tedy se zdá, že x_4 nebude mít zásadně bohatší statistické vlastnosti než w_4 . Nebylo by jednodušší přímo odhadovat x_4 jako součást šumu na pravé straně (9.12)?
 - Funkce h v (9.11) není ve skutečnosti nikde definována. Jen si lze domyslet z (9.12) čemu se rovná. Ale nač pak vztah (9.11) a označení "h" v práci vůbec jsou?
 - Mění se během jednoho experimentu, tj. v rámci datové sady sestava viditelných satelitů? Pokud ano, je zajímavé, jak je to formálně a algoritmicky ošetřeno během výpočtů. Pokud ne, je trochu zbytečné tím komplikovat výklad o výstupní funkci h .
 - Obecně metodologický dotaz. Kromě konzistence a nestrannosti bývá ve statistice studována i tzv. "efficiency". Můžete to komentovat?

Nicméně, uvedené konkrétní nedostatky, i když ty odstranitelné pečlivějším redigováním práce mne poněkud mrzí, nic nemění na celkovém pozitivním vyznění práce. Závěrem proto rád konstatuji, že disertační práce předložená Ing. Oliverem Kostem přesvědčivě splňuje požadavky kladené na disertační práci příslušnými předpisy a obecnými zvyklostmi vědecké komunity. Proto rád prohlašuji, že práci Ing. Olivera Kosta **doporučuji k obhajobě**.

V Praze, 25.1.2022



prof. RNDr. Sergej Čelikovský, CSc.

ÚTIA AV ČR, v.v.i.
Pod vodárenskou věží 4
182 08 Praha 8
celikovs@utia.cas.cz
<https://www.utia.cas.cz/cs/people/celikovsky>



Odhad vlastností šumu v dynamických modelech

Ing. Oliver Kost

Posudek disertační práce

Disertační práce Ing. Olivera Kosta se zabývá vlastnostmi šumu ve stavových modelech dynamických systémů. Pokrývá korelační metody pro odhad kovariančních matic šumu procesu (stavu) a šumu měření a několik dalších úzce souvisejících témat, např. odhad středních hodnot šumů, odhad vyšších momentů šumů nebo ověření normality rozdělení šumů.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Zvolené téma práce je vysoce aktuální, a to jak z hlediska rozvoje teoretického aparátu, tak z hlediska aplikací. Většina metod pokročilého řízení nebo moderní metody navigace s využitím satelitních systémů využívají odhadu stavu pomocí Kalmanových filtrů. Jejich správná funkce vyžaduje dostatečně přesný stavový model. Zatímco identifikace deterministické části stavových modelů byla velmi podrobně studována, odhad vlastností stochastické části stavových modelů je stále v řadě aspektů otevřenou záležitostí. Aktuálnost tématu a intenzita výzkumu v této oblasti je také dobře dokumentovaná seznamem referencí, obsahujícím více než 100 položek.

Postup řešení problému, použité metody a splnění určeného cíle

Současně používané metody pro odhad vlastností šumů jsou popsány v kapitole 3. Doktorand se soustředil na korelační metody. Jejich vlastnosti jsou analyzovány v kapitole 4. Na základě nedostatků stávajících korelačních metod jsou poté v kapitole 5 definované cíle disertační práce.

Ke splnění těchto cílů doktorand využívá metodu difference měření (MDM), která umožňuje najít na základě chyby predikce měření explicitní vztah mezi pozorovanou sekvencí měření a řízení (6.10) a nepozorovatelnou sekvencí šumu procesu a šumu měření (6.5), přičemž tento vztah je plně definován známými maticemi systému a není závislý na odhadu počátečního stavu systému. Na základě toho pak odvozuje vztahy mezi momenty měřitelných a neměřitelných veličin a další výsledky.

Postup řešení problému, použitý doktorandem, je logický a dobře strukturovaný. Základní metoda MDM uvedená v kapitole 6 je poté v kapitole 7 a 8 postupně využívána ke splnění dalších cílů práce. Dosažené výsledky jsou ilustrovány několika numerickými příklady v kapitole 9, splnění všech konkrétních cílů práce je pak jmenovitě popsáno v závěru práce v kapitole 10. Všechny stanovené cíle byly splněny.

Výsledky disertační práce a přínos předkladatele práce

Původní výsledky autora jsou shrnuty v kapitolách 6 – 8. Metoda MDM uvedená v kapitole 6 je klíčovým originálním výsledkem autora, neboť odstraňuje nedostatky ostatních známých korelačních metod. Zároveň tento přístup umožňuje rigorózně dokázat řadu významných statistických vlastností (nestrannost, konzistence) dále odvozených odhadů a algoritmů.

Práce proto reprezentuje významný přínos autora jak v teoretické, tak aplikační oblasti.

Přehlednost, formální úprava a jazyková úroveň práce

Uspořádání práce je systematické a logické, rozsah jednotlivých kapitol přiměřený. Práce je napsána pečlivě, má dobrou jazykovou i grafickou úroveň, ale přesto je její čtení náročné vzhledem ke komplikované matematické symbolice.

Výklad je většinou srozumitelný, na některých místech je pro čtenáře obtížné detailně sledovat formální matematické úpravy - kromě úplného odvození základních vztahů metody MDM v Příloze A se v práci vyskytují zkratky typu „z rovnice (x.x) lze jednoduše ukázat ...“, ale odvození nebo alespoň ilustrační příklad chybí.

Publikace studenta

Originální výsledky doktoranda potvrzuje řada jeho publikací v časopisech a na kvalitních mezinárodních konferencích. Počet publikací (15) lze považovat za nadstandardní. Seznam publikací dokládá, že se autor problematikou své disertační práce zabývá dlouhodobě a systematicky navazuje na předchozí výsledky týmu ZČU v této oblasti.

Náměty pro odbornou diskusi při obhajobě

1. Pro systémy s vícerozměrným výstupem nemusí být matice pozorovatelnosti (2.3) řádu $n_z \cdot n_x$, její plná hodnota souvisí s vektorovým indexem pozorovatelnosti. Dala by se jeho znalost využít také pro volbu minimální hodnoty parametru L v (6.5)? Jsou matice A_k pro větší hodnoty parametru L totožné?
2. V případě normálního rozdělení šumů jsou momenty vyšších řádů funkcemi momentů 1. a 2. řádu. Rovněž věrohodnostní funkce (a tedy i případné bayesovské odhady) jsou plně reprezentovány postačující statistikou, která obsahuje momenty maximálně druhého řádu. Vede použití momentů vyšších řádů v tomto případě ke zpřesnění odhadu vlastností šumů – bylo by možné to ilustrovat konkrétním příkladem?
3. Termín „časově závislé šумы“ používaný v práci je podle mého názoru zavádějící. Místo stacionárního / nestacionárního šumu se tím míní šумы nekorelované (bílé) vs. šумы korelované (barevné), generované např. MA procesem – ale i ty mohou být stacionární, tj. s časově nezávislými vlastnostmi.
4. Model 5 na str. 61 má pól 1.1, který je považován za stabilní?

5. Stochastický model s jedním výstupem je parametrizován maticí Q dimenze $n_x \cdot n_x$, případně maticí S dimenze $n_x \cdot 1$ a rozptylem R dimenze 1. V inovačním tvaru pak je parametrizován vektorem Kalmanova zesílení K dimenze n_x a rozptylem inovací, tj. podstatně menším počtem unikátních parametrů. Dalo by se závěry diskuse o počtu odhadnutelných prvků v kapitole 7.14 interpretovat tak, že inovační reprezentace je ve smyslu počtu unikátních parametrů minimální a tento počet parametrů ($n_x + 1$) je vždy odhadnutelný?
6. S rostoucím řádem odhadovaných momentů radikálně narůstá výpočetní a paměťová náročnost prezentovaných algoritmů. Jaké jsou „praktické limity“ využitelnosti těchto algoritmů ve smyslu délky časových řad vstupů a výstupů a řádu systému vs. doba výpočtu a potřebná paměť? Bylo by možné paměťové a výpočetní nároky zásadně omezit rekurzivní implementací?

Závěrečné vyjádření oponenta

Celkově konstatuji, že práce Ing. Olivera Kosta je kvalitní, obsahuje originální výsledky autora, které jsou přínosem pro vědeckou komunitu v oboru, a splňuje nároky na udělení akademického titulu „doktor“ v oboru *Kybernetika*.

Doporučuji disertační práci Ing. Olivera Kosta k obhajobě.

V Praze 12. 1. 2022

prof. Ing. Vladimír Havlena, CSc.

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 27.01.2022

ZCU 002163/2022

listy: 6
druh:

přílohy:



zcupes14fbeef