

Prof. dr hab. inż. Janusz Kacprzyk, członek rzecz. PAN

Warszawa, 21 grudnia 2020

Fellow of IEEE, IET, EurAI, IFIP, IFSA, SMIA

Instytut Badań Systemowych

Polskiej Akademii Nauk

Ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

Email: kacprzyk@ibspan.waw.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Hawro pt.
„Adaptacyjne algorytmy estymacji sygnałów w systemie monitorowania
obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi
zwyczajnymi”**

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na prośbę p. prof. Marka Kisiel-Dorohinińskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, wyrażoną w piśmie RD.ITIT.WEAIiTB.510-8/19/514/2020 z dn. 19 października 2020 r.

Recenzowana rozprawa doktorska jest poświęcona ogólnie bardzo ważnemu zagadnieniu projektowaniu i implementacji algorytmów estymacji sygnałów otrzymywanych z pomiarów na bieżąco (online) z obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi, przy czym zakłada się, że są to algorytmy adaptacyjne. Nietrudno zauważyć, że tego typu zadania występują bardzo często w różnych problemach, np. w systemach nadzoru, diagnostyki, sterowania itp. w najróżnorodniejszych obszarach zastosowań, jak np. w ochronie środowiska czy inżynierii produkcji.

W pracy rozpatruje się dokładniej tego zadania w kontekście modelowania zanieczyszczeń wody w rzece oraz procesów występujących w reaktorze chemicznym z ciągłym mieszaniem. Dokładniej rozpatruje się problemy związane z zanieczyszczeniem rzek, w perspektywie

Sekretariat Rady Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

04-01-2021

data wpływu

budowy systemu monitorowania online, zwłaszcza przy założeniu, że możliwości pomiaru sygnałów online są ograniczone. W pracy zastosowano do tego celu system adaptacyjny.

Ponadto, w pracy rozpatruje się także zastosowanie zaproponowanego podejścia do monitorowania i kontroli procesów chemicznych. Te dwa obszary zastosowań są bez wątpienia ważne, charakteryzują się pewnymi specyficznymi właściwościami, m.in. występujących w nich sygnałów, i dobrze ilustrują istotę i zalety zaproponowanej metody. Problem z zakresu ochrony środowiska jest, moim zdaniem, jednak ciekawszy i ważniejszy, a więc być może wystarczyłaby jego dokładniejsza analiza w pracy.

W rozpatrywanej klasie zagadnień istotnym problemem jest estymacja, czyli odtworzenie użytecznego sygnału z jakichś innych sygnałów, np. zaszumionych. Stosuje się do tego celu m.in. różne filtry, np. tzw. filtr Kalmana (lub Kalmana-Bucy'ego), który jest rekurencyjnym algorytmem wyznaczania minimalno-wariancyjnej estymaty wektora stanu modelu liniowego dyskretnego układu dynamicznego na podstawie pomiarów jego wejść i wyjść. Zakłada się znajomość charakterystyk probabilistycznych błędów pomiarowych, a także liniowość układu dynamicznego. Są to istotne ograniczenia w praktyce, a także z punktu widzenia zadań rozpatrywanych w pracy. Autor proponuje więc nowe podejście oparte na układzie adaptacyjnym, nie wymagającym znajomości charakterystyk zakłóceń i liniowości. Podejście to ma oczywiście sens.

Omówię teraz poszczególne rozdziały, co pozwoli dobrze uzasadnić moją zdecydowanie pozytywną ocenę rozprawy.

Rozdział 1 „Wstęp” zawiera ogólną analizę zagadnienia estymacji, czyli odtwarzania użytecznych sygnałów z innych sygnałów z zakłóceniami, zwłaszcza z punktu widzenia różnych założeń głównie o charakterystykach probabilistycznych zakłóceń oraz liniowości albo nieliniowości układów dynamicznych, których sygnały wejściowe i wyjściowe są do tego celu używane. Autor przy tym wyraźnie wskazuje, że Jego obszarem zainteresowania są raczej algorytmy, a nie analizy teoretyczne, co jest dobrym rozwiązaniem z kilku powodów. Po pierwsze, pozwala Mu to opracować algorytmiczne podejście adaptacyjne, w którym nie jest konieczna znajomość charakterystyk probabilistycznych błędów, a także liniowość układów dynamicznych. Ponadto, to podejście algorytmiczne jest bardzo uzasadnione w aspekcie dużej roli, jaką dla pracy ma analiza rzeczywistych problemów związanych

z zanieczyszczeniami rzek oraz procesami chemicznymi. W końcu, można tę orientację algorytmiczną uważać za przejaw ogólnie rozumianego tzw. podejścia „data driven”, czyli jakby oparcia wszelkich analiz, procedur, metod itp. po prostu na danych, których zwykle duże (wielkie?) zbiory są coraz bardziej dostępne. To podejście w ostatnich latach święci triumfy.

Autor przedstawia w tym rozdziale dobrą analizę podstawowego podejścia, jakie jest powszechnie stosowane od wielu dziesięcioleci, tzw. filtra Kalmana, zwłaszcza w sensie wskazania na jego ograniczenia i przegląd jego różnych modyfikacji. Jest to dobrze zrobione, a uwagi na temat możliwości zastosowania tego podstawowego podejścia, np. do systemów monitorowania dla rozpatrywanych procesów, pozwalają na przekonywujące przedstawienie istoty proponowanego nowego podejścia. Cenny jest też fragment dotyczący zmiennych jakościowych, głównie rozpatrywanych w zagadnieniach chemicznych. Ponadto, uwagi o nakładach obliczeniowych zaproponowanych rozwiązań są też bardzo istotne. Doprowadziło to do zaproponowania zastosowania algorytmu adaptacyjnego, który nie wykazuje ograniczeń podejść tradycyjnych i to się Autorowi udało.

Jako cel pracy podano „Celem pracy jest zaprojektowanie, implementacji i przeprowadzenie badań dla algorytmów adaptacyjnych estymujących sygnały w systemie czasu rzeczywistego monitorującym obiekty opisane nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi” i to dobrze odpowiada temu, co Autor w pracy wykonał. A teza pracy, czyli „Można zastosować zaproponowane algorytmy adaptacyjne o złożoności mniejszej niż $O(n^3)$ i wyższej dokładności niż klasyczne podejścia, np. filtr Kalmana do monitorowania w trybie online obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi”, została potwierdzona.

W dalszej części tego rozdziału Autor opisał w skrócie poszczególne wyniki cząstkowe, które się składają na realizację powyższego celu i jest to dobrze zrobione, ułatwiając czytelnikowi potem zrozumienie i śledzenie dalszych analiz i propozycji pokazanych w pracy.

Moja ocena Rozdziału 1 jest więc pozytywna, zarówno w sensie dobrego przedstawienia problemu i wyzwań oraz podejść znanych z literatury, a w końcu przekonującego przedstawienia zaproponowanych podejść.

Rozdział 2 „Modele matematyczne obiektów badań” jest poświęcony przedstawieniu modeli matematycznych typu nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych dla rozpatrywanych w pracy dwu problemów. Pierwszy z nich to model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wody w rzece, a drugi to model matematyczny reaktora chemicznego z systemem ciągłego mieszania. Na początku Autor krótko omawia ogólne zagadnienia związane z modelowaniem matematycznym procesów i systemów i robi to dobrze. Potem przechodzi do opisu pierwszego z rozpatrywanych w pracy zagadnień, tzn. modelowania przemieszczania się zanieczyszczeń w wodzie w rzece. Jest to zrobione dobrze w tym sensie, że – mimo ograniczonego zakresu opisu – przedstawiono w sposób pogładowy, a jednocześnie dostatecznie ścisły, model matematyczny. Dla potrzeb symulacji przyjęto uproszczenie, że jakość wody w rzece wyrażona jest przez bilans stężenia tlenu opisywany przez tzw. biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT) i rozpuszczony tlen (RT). W modelu bierze się pod uwagę adwekcję (transport), dyfuzję (zmniejszania) i reakcję chemiczną (dynamikę), w perspektywie czasowej i przestrzennej. Jest to opis oczywiście uproszczony, ale wydaje się, że jest on uzasadniony celem badań i może służyć do znaczących analiz. Opis drugiego z rozpatrywanych modeli, czyli reaktora z ciągłym mieszaniem jest przedstawiony w sposób bardziej skrócony. Jako trudności wspomina się m.in. interakcje, nieliniowość i niestabilną dynamikę.

Mimo dobrego przedstawienia tych obu problemów nasuwać się może kilka pytań. Po pierwsze, skoro problem zanieczyszczeń wody w rzece jest dokładniej badany i z jego analizy dobrze widać zarówno problemy, jak też zalety zaproponowanego podejścia, to czy uzasadnione jest rozpatrywanie dodatkowo problemu reaktora chemicznego. Odpowiedź jest pozytywna, ale może dobrze byłoby napisać *explicite*, że te problemy mają swoją specyfikę i dlatego rozpatruje się je oba dla kompletności przedstawienia zaproponowanego podejścia, które może być stosowane do różnych zadań.

W paragrafie u dołu strony 33 jest uwaga o algorytmach adaptacyjnych, ich bezinwazyjności, dobrej efektywności numerycznej, implementacji w postaci systemu monitorującego itp. Nie bardzo wiadomo, dlaczego te uwagi tu się pojawiają, bo przecież w Rozdziale 2 omawia się na razie tylko modele dwu rozpatrywanych problemów, a te uwagi dotyczą dalszych rozdziałów pracy, gdzie się już omawia estymację i wtedy uwaga o podejściu adaptacyjnym miałaby większy sens.

Rozdział 3 „Estymacja filtrem Kalmana i ocena jakości sygnałów” jest poświęcony przedstawieniu znanego od lat tzw. filtra Kalmana służącego do estymacji wartości zmiennych stanu na podstawie wartości sygnałów wejścia i wyjścia. Jest to zrobione dobrze i Autor na pewno wykazał się tu znajomością tematyki i erudycją, podając także na przykład także nowe propozycje, jakie pojawiły się w literaturze. Mam tu jednak pewne uwagi. Otóż, Autor przechodzi szybko do algorytmu tego bazowego filtra Kalmana (Rys. 2.1), co jest uzasadnione w kontekście pracy, bo – jak już wspominałem – Autor reprezentuje to podejście algorytmiczne, zgodne z duchem tzw. „data driven”.

Ale, żeby łatwiejsze było śledzenie dalszych rozważań, można byłoby przytoczyć choćby krótkie przedstawienie filtra Kalmana jako problemu optymalizacyjnego, bo takim on jest, na przykład podając to, co się dla zadań optymalizacyjnych podaje. Po pierwsze, czego się poszukuje, czyli rekursywnego estymatora stanu, który jest liniowy w odniesieniu do pomiarów i nieobciążony, a do tego optymalny w sensie minimalnej kowariancji błędu odpowiednio określonego, jak to się zwykle podaje przy omawianiu filtra Kalmana. W zasadzie, Autor to pisze, ale nie w sposób jawny, choć pisze o wskaźnikach jakości estymowanych sygnałów (RMSE – root mean square error i MAPE – mean absolute percentage error), czyli służących w końcu do oceny rozwiązań, a więc do optymalizacji. Jest to istotne, ponieważ Autor w pkt. 3.1 przedstawia algorytm filtra Kalmana, ale jeśli nie ma sformułowanego zadania (tu optymalizacyjnego), to trudno się zorientować, czy jakiś algorytm zaproponowany przez Autora właśnie je rozwiązuje, czy rozwiązuje coś innego. Być może, Autor założył zbyt optymistycznie, że filtr Kalmana jest ogólnie znany i nie trzeba przedstawiać zadania, jakie się tam rozwiązuje, Dla kompletności wywodu nie pomijałbym jednak tego. Poza tym, z postaci zadania można łatwiej zrozumieć cel oryginalnych modyfikacji zaproponowanych przez Autora. Ale, ogólnie, ten rozdział oceniam pozytywnie.

Rozdział 4 „Algorytmy adaptacyjne dla systemów monitorowania online” to jedna z podstawowych oryginalnych części pracy. Na początku, przedstawia się ogólne zagadnienia związane z algorytmami adaptacyjnymi, czyli zmieniającymi swoje zachowanie w zależności od informacji uzyskiwanych na bieżąco. Ciekawsze są uwagi dotyczące filtrów adaptacyjnych, głównie opartych na LMS (least mean squares), a zwłaszcza uwagi o filtrze Kalmana w aspekcie optymalizacji. Uwaga autora, że filtr Kalmana nigdy nie jest stosowany jako filtr adaptacyjny ze względu na jego złożoność i dużą liczbę nieznanych parametrów

w modelu przestrzeni stanów jest słuszna, ale byłaby bardziej oczywista, gdyby Autor poprzednio i teraz pokazał zadanie optymalizacyjne rozwiązywane w tym przypadku.

W pkt. 4.1 pokazuje się ideę stosowanych algorytmów adaptacyjnych. Jest to dobrze zrobione, choć może uzasadnione byłoby pokazanie explicite, jak działa to rozwiązanie oparte na użyciu „błędu łatwo mierzalnego” i stosownej zmiany parametrów w równaniu filtracji, co to znaczy „rezygnując z optymalnego doboru tego parametru” (czyli jak?) itp.

Idea zastosowana w pracy, czyli obliczanie w algorytmach wartości współczynnika wzmocnienia w równaniu filtracji po każdym pomiarze na podstawie wyznaczonego na bieżąco błędu adaptacji jest dobrym i konstruktywnym rozwiązaniem.

W pkt. 4.2 i pkt. 4.3 są przedstawione dwa algorytmy adaptacyjne. Pierwszy z nich, tzw. algorytm strefowy, jest oparty na algorytmie filtra Kalmana ze współczynnikiem wzmocnienia w równaniu filtracji wyznaczanym w każdym kroku pomiarowym zgodnie ze wzorem (4.3) Drugi z nich, tzw. algorytm proporcjonalny, polega na wyznaczaniu korekty współczynników wzmocnień proporcjonalnie do wartości błędu adaptacji. Są to dość proste i oczywiste algorytmy adaptacyjne, ale działające efektywnie.

W pkt. 4.4 jest przedstawiony proporcjonalno-różniczkowy algorytm wyznaczania korekty wzmocnienia, który – jak Autor pisze już w sposób jawny – jest Jego oryginalnym dorobkiem badawczym i algorytmicznym. Na marginesie, nie jest jasne z opisu, czy te dwa prostsze algorytmy pokazane w pkt. 4.2 i 4.3 są też oryginalnym dorobkiem. Moim zdaniem tak, choć jest w nich zastosowana dość prosta idea. Autor powinien to wyraźnie napisać. Ogólnie, algorytm Autora z pkt. 4.4 jest ciekawy i zaimplementowano go w odpowiedni sposób.

W pkt. 4.5 pokazano tzw. algorytm z mechanizmem zatraskowym o zadanych własnościach dynamicznych – proporcjonalny i proporcjonalno-różniczkowy. Jest on oparty na idei algorytmów o zadanych własnościach dynamicznych, w których wykorzystuje się lokalizację wartości własnych systemu monitorującego, wyliczanych w trakcie działania, w wybranym obszarze stabilności. Ogólnie, zmiany współrzędnych stanu obiektu są w tym algorytmie znacznie wolniejsze niż dla systemu monitorującego, co jest właśnie istotne. Ten algorytm adaptacyjny o zadanych własnościach dynamicznych jest oczywiście rozszerzeniem algorytmu proporcjonalnego i proporcjonalno-różniczkowego.

Ogólnie, moja ocena Rozdziału 4 jest bardzo pozytywna. Autor zaproponował oryginalne algorytmy i dokładnie przedstawił ich implementacje, w sensie schematów blokowych ich części, zwłaszcza dla bardziej złożonych algorytmów przedstawionych w pkt. 4.4 i 4.5.

Rozdział 5 „Złożoność obliczeniowa algorytmów” jest poświęcony złożoności obliczeniowej zaproponowanych algorytmów. Jest on krótki, ale ważny. Najpierw podaje się ogólne informacje o złożoności obliczeniowej, od stałej przez logarytmiczną, liniową, kwadratową, sześcienną, wielomianową, wykładniczą aż do typu silni. Potem pokazano złożoność obliczeniową dwu podstawowych algorytmów stosowanych jako punkty odniesienia w pracy: filtra Kalmana, co jest oczywiste, oraz metody Runge’go-Kutty, jako że konieczne jest rozwiązywanie równań różniczkowych zwyczajnych. Potem Autor krótko przedstawia złożoność obliczeniową swoich algorytmów adaptacyjnych, stosując dogodne podejście pokazane na rys. 5.2., a potem podając te oszacowania złożoności obliczeniowej dla poszczególnych algorytmów.

Moja ocena jest tu pozytywna, ponieważ jest to ważny rozdział, a dodatkowo widać, że algorytmy: strefowy, proporcjonalny i proporcjonalno- różniczkowy, które są niewątpliwym osiągnięciem Autora, mają złożoność obliczeniową o rząd wielkości mniejszą od podejść opartych na filtrze Kalmana. To dobry wynik.

Rozdział 6 „Badania symulacyjne systemu monitorującego” ma dwa zadania. Po pierwsze, proponuje się koncepcję i implementację systemu monitorującego opartego na zaproponowanych algorytmach adaptacyjnych, a potem ich zastosowanie do badań symulacyjnych dla dwu zadań rozpatrywanych w pracy, tzn. modelowaniu przemieszczania się zanieczyszczeń wody w rzece i reaktora chemicznego z ciągłym mieszaniem.

W pkt. 6.1 przedstawia się koncepcję systemu monitorującego, zarówno w wersji online jak offline. Architektury odpowiednich systemów oraz ich algorytmika są przedstawione poglądowo i konstruktywnie na rys. 6.1 i rys. 6.2.

W pkt. 6.2 krótko omówiono, jak przeprowadzać się będzie badania numeryczne, m.in. stosując MATLAB, równania różniczkowe czwartego rzędu itp. Jest tu pewna drobna rzecz, która – moim zdaniem – powinna być wyjaśniona wcześniej, jak zresztą już wspominałem.

Otóż, w pierwszym paragrafie po tytule pkt. 6.2, Autor pisze, że „... podobny typ równań różniczkowych zastosowano w przypadku modelu reaktora, jednak wykazują one wyraźną nieliniowość...” Czyli, czy to znaczy, że równania różniczkowe opisujące zanieczyszczenia wody w rzece nie wykazują (wyraźnej?) nieliniowości, wykazują niezbyt dużą nieliniowość czy...? Ta wspomniana różnica może być powodem rozpatrywania dwu problemów, bo wtedy są one różne, a tak – z opisu w pierwszych rozdziałach – nie wiadomo tego, czyli nie wiadomo, dlaczego rozpatruje się dwa zadania o jakichś nieliniowościach, tylko z innych dziedzin, ale to (czyli dziedzina) dla modelowania matematycznego nie jest istotne. Takie uwagi o różnicach między dwoma rozpatrywanymi zadaniami w sensie różnic w modelach byłoby chyba uzasadnione i ułatwiłoby śledzenie analiz.

W pkt. 6.2 pokazano bardzo wyczerpująco wyniki poważnych badań symulacyjnych dla pierwszego problemu, czyli modelowania zanieczyszczeń wody w rzece. Najpierw podano wartości początkowe różnych parametrów, co jest bardzo cenne, choć może brakuje więcej szczegółów np. skąd uzyskano dane dotyczące rozpatrywanej rzeki oraz parametry, czyli np. czy są to wartości ogólniej używane czy też specyficzne dla danego zadania. Ale, w obu przypadkach, warto byłoby podać źródła tych danych. Przeprowadzono symulacje dla najróżniejszych sytuacji, różnych zakłóceń, parametrów itp. Wyniki numeryczne wskazują ogólnie, że uzyskane wyniki są porównywalne z uzyskanymi z użyciem standardowego filtra Kalmana, ale ich efektywność numeryczna jest lepsza, a do tego wartości jakości estymacji: RMSE – root mean square error i MAPE – mean absolute percentage error są ok. dwukrotnie mniejsze. To dobrze świadczy o zaproponowanej metodzie.

Pkt. 6.4 jest poświęcony prezentacji wyników numerycznych dla problemu reaktora chemicznego. Tu też wyniki są dobre, choć nie jest do końca jasne, dlaczego w przypadku tego problemu przeprowadzono już mniej (w porównaniu z problemem zanieczyszczeń wody w rzece - pkt. 6.3) eksperymentów symulacyjnych. Czy to znaczy np., że wyniki byłyby takie same? Jeśli tak, to warto byłoby to napisać.

Ogólnie, moja ocena Rozdziału 6 jest zdecydowanie pozytywna. Przedstawia on wyniki zakrojonego na szeroką skalę eksperymentu obliczeniowego dotyczącego zaproponowanych przez Autora nowych algorytmów adaptacyjnych estymacji. Przebadano praktycznie wszystkie możliwe kombinacje wartości parametrów, rodzaju zakłóceń itp. Uzyskano bardzo obiecujące wyniki. Ten rozdział można tu uważać także za przykład nowoczesnego podejścia

do analizy i projektowania złożonych systemów np. monitorujących, w których podstawowym narzędziem są zaawansowane metody symulacyjne. Jest to chyba najbardziej obiecujące podejście do analizy bardzo złożonych problemów i systemów. Można to też uważać za przykład ogólnie rozumianego podejścia „data driven”, które szturmem opanowuje nowoczesną informatykę i automatykę, ale także wiele innych dziedzin.

Rozdział 7 „Wnioski końcowe i podsumowanie” to już krótkie omówienie zawartości poszczególnych rozdziałów i wniosków z uzyskanych wyników, które zostały już omówione przy omawianiu poszczególnych rozdziałów. Ważną częścią jest wykaz tego, co uznać można za oryginalny wkład Autora, czyli przede wszystkim opracowanie i implementacja algorytmów adaptacyjnych, które można stosować do obiektów nieliniowych, które mają lepszą złożoność obliczeniową niż filtr Kalmana, nie wymagają znajomości charakterystyk probabilistycznych zakłóceń, korygują wzmocnienie w równaniu filtra implementacyjnie itp. Ponadto, na podkreślenie zasługują autorskie rozwiązania dotyczące architektur systemów monitorujących oraz przeprowadzenie na dużą skalę eksperymentów numerycznych dostarczających użytkownikowi całego szeregu bardzo użytecznych informacji, które mogą być użyte w fazie projektowania i implementacji takich algorytmów dla potrzeb innych użytkowników dla złożonych zadań.

Podsumowując moją opinię na temat przedmiotowej rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że – moim zdaniem – spełnia ona wszelkie wymagania ustawowe i zwyczajowo przyjęte w polskim środowisku naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

