XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom III

KKA 2005

Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk

XV Krajowa Konferencja Automatyki
Tom III

Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR
Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
WSPÓŁORGANIZATORZY
Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFCZYK
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowi	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-02-2

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

SZTUCZNA INTELIGENCJA

ESTYMACJA ZMIENNEGO OPÓŹNIENIEA W UKŁADACH DYNAMICZNYCH ZA POMOCĄ ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH

Janusz PAPLIŃSKI

Politechnika Szczecińska, Instytut Automatyki Przemysłowej,
71-126 Szczecin, ul. 26 Kwietnia 10, e-mail: janusz.paplinski@ps.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono algorytmy ewolucyjne zastosowane do estymacji liniowych układów dynamicznych z opóźnieniem transportowym. Szczególną uwagę zwrócono na problemy związane z identyfikacją na bieżąco, sposobem implementacji algorytmu oraz modelowania zmiennego w czasie opóźnienia. Przedstawione rozwiązania oparte są o badania symulacyjne.

Słowa kluczowe: Algorytmy ewolucyjne, opóźnienie transportowe, estymacja parametrów.

1. WSTĘP

W otaczającym nas świecie istnieje bardzo wiele układów, w których występuje opóźnienie transportowe. Pojawia się ono miedzy innymi w przetwarzaniu sygnałów [18], pomiarach [12, 27], chemii [15], medycynie, biologii [1, 19, 23], astronomii [4] elektrotechnice i wielu innych dziedzinach. Okazuje się przy tym, że sterowanie takimi obiektami należy do zagadnień trudnych, a występujące opóźnienie powoduje pogorszenie jakości układu sterowania, oscylacje i niestabilność [2, 3, 17]. Z tego względu niezwykle ważna jest estymacja wartości opóźnienia występującego w układzie. Zagadnienie to należy do problemów trudnych i wciąż znajduje się w obszarze zainteresowań współczesnej nauki [14, 25, 30, 31]. Trudność ta polega na tym, że jeśli potraktować zadanie estymacji opóźnienia jako optymalizację, to okazuje się, że mamy do czynienia z funkcją wielomodalną, o wielu lokalnych ekstremach [6, 10]. Z tego względu podejmowane są próby zastosowania do rozwiązania tego zagadnienia metod optymalizacji globalnej [7] oraz sztucznej inteligencji, takich jak: sieci neuronowe [24], logika rozmyta [22], czy różnego rodzaju algorytmy genetyczne [9, 26, 29]. Spośród ogólnego zagadnienia estymacji opóźnienia w układach dynamicznych, na szczególną uwagę zasługuje identyfikacja w trybie nadążnym za zmieniającym się opóźnieniem. Niestacjonarność obiektu, a w szczególności opóźnienia, może w znacznym stopniu pogorszyć jakość regulacji, a nawet zdestabilizować układ regulacji. Z tego względu zagadnieniem estymacji ciągłej zajmuje się wielu autorów wykorzystując zarówno metody tradycyjne [5, 16, 28], jak i sztuczną inteligencję [22, 13].

W pracy zastosowano algorytmy ewolucyjne do dynamiki identyfikacji niestacjonarnego obiektu liniowego z opóźnieniem transportowym. Szczególną uwagę zwrócono przy tym na identyfikację zmiennego opóźnienia. Praca zawiera metodologię przeprowadzonych badań symulacyjnych i analizę uzyskanych wyników.

2. OPERACJE STOSOWANE W ALGORYTMACH EWOLUCYJNYCH

Każdy osobnik w populacji zawiera pełen opis modelu. Składa się on z 11 parametrów, zakodowanych w sposób zmiennoprzecinkowy. Odpowiada to opisowi obiektu w postaci równania różniczkowego z opóźnionym sygnałem wejściowym:

$$\begin{aligned} &c_1 y^{(4)}(t-c_{11}) + c_2 y^{(3)}(t-c_{11}) + c_3 y^{(2)}(t-c_{11}) + \\ &+ c_4 y^{(1)}(t-c_{11}) + c_5 y(t-c_{11}) = c_6 x^{(4)}(t) + \\ &+ c_7 x^{(3)}(t) + c_8 x^{(2)}(t) + c_9 x^{(1)}(t) + c_{10} x(t) \end{aligned} \tag{1}$$

Przyjęte w pracy ograniczenie do modeli rzędu czwartego wynika z kompromisu między dokładnością uzyskanych modeli, a ich złożonością. Wartości poszczególnych genów zawierają się w przedziale zamkniętym, przy czym granice tego przedziału określane są a priori, na podstawie wstępnych informacji o obiekcie. Wynoszą one dla opóźnienia transportowego $c_{11} \in [0\ 5]$, a dla pozostałych parametrów $c_i \in [0\ 1]$ dla i=1, 2, ..., 10

Dla każdego osobnika wyznaczana jest wartość kryterium jakości - funkcja celu. Pozwala ona ustalić dokładność modelu utworzonego na jego podstawie, a co za tym idzie pozycję osobnika w populacji. Ma ona postać:

$$J = \frac{1}{\sum_{i=1}^{200} \left(\alpha(i)\left(y_o(t_i) - y_m(t_i)\right)\right)^2} \tag{2}$$

gdzie: $y_0(t_i)$ - odpowiedź obiektu;
$y_m(t_i)$ - odpowiedź modelu;
$\alpha(i)$ - współczynnik wagi.

Wartości kryterium jakości w kolejnych pokoleniach wyznacza się na podstawie bieżących odpowiedzi obiektu i jego 200 poprzednich próbek. Jest to przesuwające się okno czasowe w ramach którego porównuje się zgodność odpowiedzi obiektu i modelu. Współczynnik wagi α we wzorze (2) ma za zadanie zminimalizować wpływ różnicy odpowiedzi swobodnych wynikający z różnych warunków początkowych, z jakimi staruje obiekt i model na początku każdego okna [20].

Do podstawowych operacji stosowanych w AE zaliczyć można selekcję, krzyżowanie i mutację. Przy wyborze osobników do nowej populacji stosowano metodę znormalizowanej geometrycznej selekcji [11]:

$$p_r = \frac{q(1-q)^{r-1}}{1-(1-q)^n} \tag{3}$$

gdzie q - prawdopodobieństwo wyboru najlepszego osobnika;
r - pozycja osobnika w populacji
n - rozmiar populacji.

Jako operację krzyżowania zastosowano krzyżowanie arytmetyczne z losowym kierunkiem zmian, określone zależnością:

$$\begin{aligned} \overline{X'} &= a\overline{Y} + (1-a)\overline{X} \\ \overline{Y'} &= a\overline{X} + (1-a)\overline{Y} \end{aligned} \tag{4}$$

dla $a \in [-1 \quad 1]$

Dla obiektu ze zmiennym opóźnieniem transportowym identyfikacja zmieniającego się opóźnienia jest najważniejszym i najtrudniejszym zadaniem. Z tego powodu, obok ogólnej funkcji celu J zastosowano globalne kryterium jakości J_g pozwalające określić skuteczność identyfikacji tego parametru [21]:

$$J_g = \sum_{i=1}^{stop} W(i)\left|t_{op}(i) - t_{ident}(i)\right| \tag{5}$$

gdzie: $t_{op}(i)$ - wartość opóźnienia transportowego obiektu dla i-tej chwili czasu;
$t_{ident}(i)$ - wartość opóźnienia transportowego najlepszego modelu z i-tej populacji;
$W(i)$ - współczynnik wagi;
$stop$ - warunek stopu algorytmu ewolucyjnego.

Kryterium jakości J_g służy do porównania ze sobą różnych wariantów AE i ma zastosowanie w badaniach eksperymentalnych - prowadzonych w sposób symulacyjny. Do jego wyznaczenia niezbędna jest znajomość rzeczywistej wartości opóźnienia obiektu.

Ze względu na niestacjonarność obiektu, bardzo ważnym zagadnieniem jest zachowanie w kolejnych populacjach AE dużej różnorodności osobników. W tym celu zastosowano metodę ścisku [9]. Dla każdego nowo utworzonego osobnika wybiera się w sposób losowy, z populacji do której ma on zostać włączony, pewną pod-populację o wielkości równej współczynnikowi ścisku. Następnie porównuje się go ze wszystkimi osobnikami tej pod-populacji według zależności:

$$J_s = \sum_{i=1}^{11}\left(c_{ic} - c_{is}\right)^2 \tag{6}$$

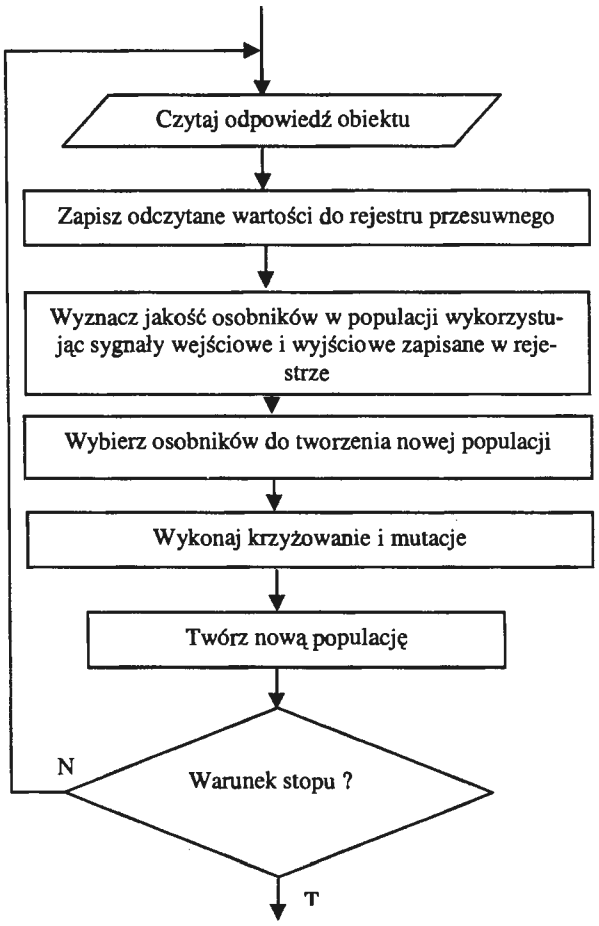
gdzie: c_{ic} - i-ty gen osobnika nowo utworzonego
c_{is} - i-ty gen osobnika z pod-populacji.

Nowo utworzony osobnik zastąpi w populacji tego osobnika z pod-populacji, który jest do niego najbardziej podobny, czyli dla którego J_s jest minimalne. W trakcie przeprowadzonych badań przyjęto współczynnik ścisku równy 2.

3. ESTYMACJA OPÓŹNIENIA W TRYBIE NADĄŻNYM

AE ze względu na iteracyjny charakter funkcjonowania nadają się szczególnie do zagadnień śledzenia niestacjonarnego obiektu. Algorytm taki musi być jednak odpowiednio przystosowany. Na rys.1 przedstawiono uproszczony diagram blokowy takiego algorytmu. Przystosowanie do pracy w niestacjonarnym środowisku będzie polegało przede wszystkim na tym, że na początku każdej iteracji odczytywane są bieżące wartości sygnału wejściowego i odpowiedzi obiektu, które następnie zapisywane są do rejestru przesuwnego. Rejestr ten ma długość wynikającą z okna czasowego, zastosowanego w kryterium jakości J (2), równą 200 próbek. Funkcjonuje on według zasady FIFO (first input first output)), czyli najstarsze wartości są gubione w momencie zapisywania nowych. W następnym kroku algorytm wyznacza wartość kryterium jakości wszystkich osobników w populacji korzystając z wartości zapisanych w rejestrze. Dalsze działanie algorytmu nie odbiega już od typowej implementacji AE.

Przeprowadzono badania symulacyjne wykorzystując metodę pozwalającą na budowę prostego modelu opóźnionego obiektu. Algorytm został zaimplementowany z zastosowaniem środowiska matematycznego MATLAB.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego pracującego w środowisku niestacjonarnym.

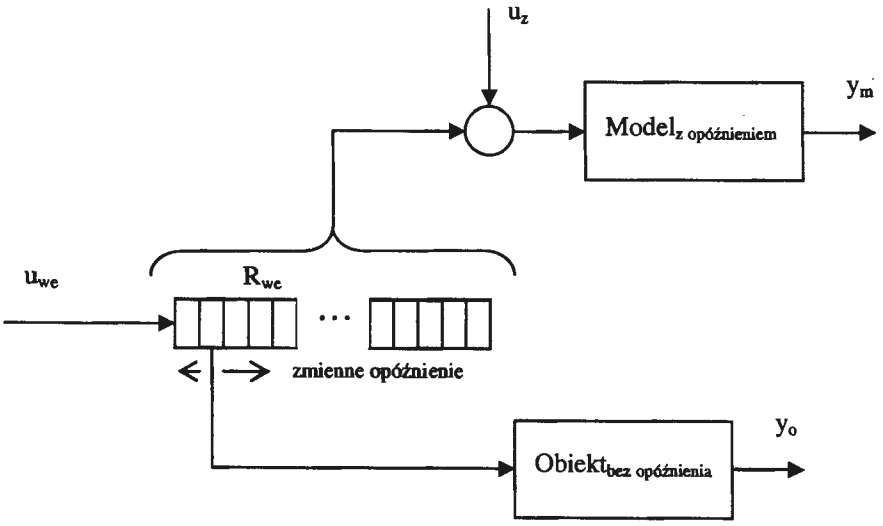
Badany obiekt został opisany w postaci zmiennych stanu bez opóźnienia. Opóźnienie obiektu uzyskano przez opóźnienie sygnału wejściowego. Realizację zmienności opóźnienia uzyskano przez zastosowanie ruchomego znacznika na rejestrze sygnału wejściowego. Miejsce położenia znacznika uzależnione jest od bieżącej wartości opóźnienia. Schematycznie procedura powyższa przedstawiona została na rys.2. W kolejnej iteracji AE generuje się pojedynczy krok odpowiedzi obiektu, przy czym wartość sygnału wejściowego odczytywana jest z komórki rejestru wskazanej przez znacznik. Warunki początkowe w obiekcie są określone przez wartości zmiennych stanu z poprzedniej iteracji. Wyznaczona wartość odpowiedzi obiektu zapisywana jest do rejestru, a uzyskane nowe wartości zmiennych stanu zapamiętywane są jako warunki początkowe dla następnej iteracji. Przy wyznaczaniu kryterium jakości dla poszczególnych osobników z populacji generowane są odpowiedzi modeli, utworzonych na ich podstawie, przy czym na wejście każdego z nich podawany jest nie opóźniony sygnał wejściowy, czyli cała zawartość rejestru wejściowego R_{we}. Dzięki takiemu podejściu ominięte zostały problemy związane z interpretacją fizyczną zmiany wartości opóźnienia. Założono przy tym, że opóźnienie nie może się zwiększać w sposób skokowy.

4. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA AE DO ESTYMACJI ZMIENNEGO OPÓŹNIENIA

Powyżej przedstawiony algorytm zastosowano do identyfikacji dynamiki liniowego obiektu z niestacjonarnym opóźnieniem w postaci:

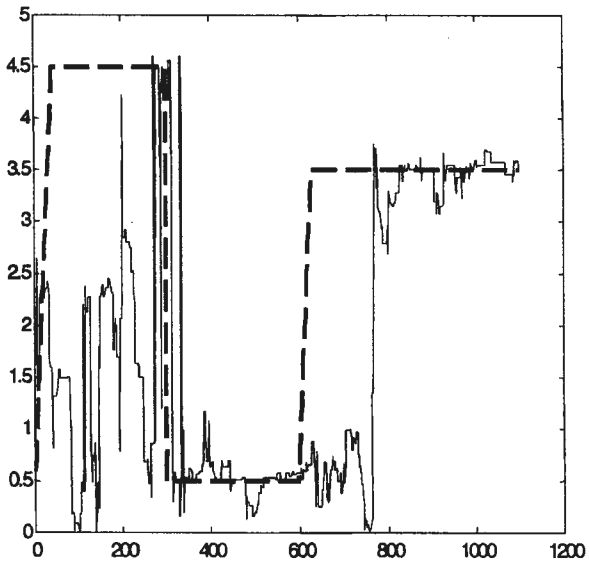
$$\begin{aligned} x_1'(t) &= -0{,}5x_1(t) - 0{,}75x_2(t) + u(t-\tau(t)) \\ x_2'(t) &= x_1(t) \\ y(t) &= 0{,}75x_1(t) + 0{,}625x_2(t) \end{aligned} \tag{7}$$

Przy czym do celów identyfikacji założono brak w algorytmie jakiejkolwiek informacji o obiekcie. W trakcie przeprowadzanego eksperymentu szczególną uwagę zwrócono na jakość identyfikacji opóźnienia. Pozostałe parametry obiektu, jakkolwiek identyfikowane, pełniły tylko rolę pomocniczą – niejako wewnętrzną w algorytmie, a jakość ich estymacji nie była bezpośrednio sprawdzana. Należy przy tym pamiętać, iż o kierunku w jakim podążał AE decydowało kryterium jakości J (2), bazujące na porównaniu odpowiedzi obiektu i modelu, a więc określające całościową jakość identyfikacji. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe krzywe zbieżności estymowanego opóźnienia do rzeczywistego opóźnienia

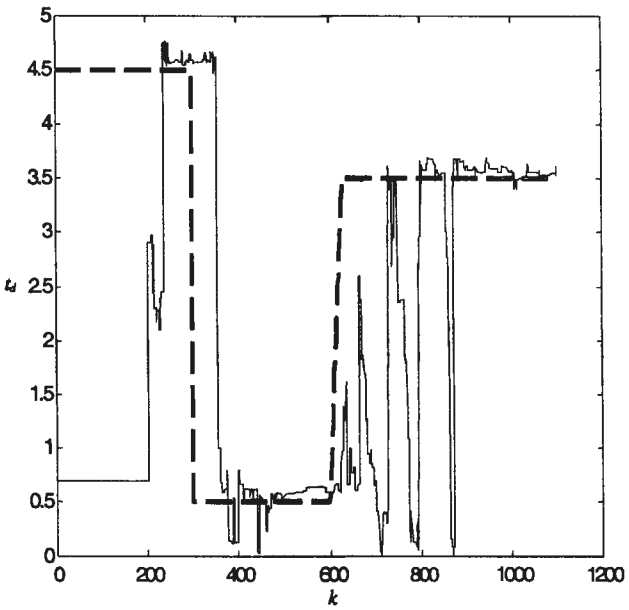


Rys.2 Metoda uzyskania zmiennego opóźnienia.

występującego w obiekcie, dla najgorszej estymacji uzyskanej w 20 uruchomieniach, przy założeniu braku zakłóceń. Na rys.4 przedstawiono analogiczne krzywe zbieżności, ale dla estymacji w obecności 50% zakłóceń.



Rys. 3. Krzywe zbieżności estymowanego opóźnienia w obecności zakłóceń - przypadek najgorszy z uzyskanych, przy braku zakłóceń



Rys. 4. Krzywe zbieżności estymowanego opóźnienia w obecności zakłóceń - przypadek najgorszy z uzyskanych, przy wystepowaniu 50% zakłóceń

Niezależnie od występowania zakłóceń, czy też ich braku widać wyraźnie złą jakość estymacji na początku działania algorytmu. Wynika ona z nieznajomości obiektu i konieczności identyfikacji wszystkich jego parametrów. Po tym okresie wstępnym algorytm radzi sobie już zdecydowanie lepiej, co wynika z tego, że niestacjonarność dotyczy tylko wartości opóźnienia obiektu. W trakcie trwania procesu estymacji algorytm niejako „gubi" najlepsze dotychczas znalezione rozwiązania. Zjawisko to występuje pomimo zastosowanego elitaryzmu, który do kolejnego pokolenia algorytmu ewolucyjnego kopiuje najlepszego osobnika z poprzedniej iteracji. Chwilowe pogarszanie się uzyskanych rozwiązań wynika z zastosowania w eksperymencie losowego sygnału wymuszającego oraz niedużego skończonego okna czasowego zastosowanego w kryterium jakości (2), równego 200 próbek. Dodatkowo na jakość bieżącej identyfikacji znacząco wpływają występujące zakłócenia, które zwiększają chwilowe odchylenia wartości zidentyfikowanej.

Algorytmy ewolucyjne korzystają z procedur losowych. Uzyskane w drodze eksperymentów rezultaty są więc tylko pewną losowa próbą z potencjalnie nieskończonej ilości możliwych prób. Można określić przedział ufności, w jakim zawiera się rzeczywista wartość średnia. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, iż wartość średnia kryterium jakości (3) dla założonego 95% przedziału ufności zawiera się w granicach:

- dla przypadku braku zakłóceń $J=0,79 \pm 0,07$
- dla 50% poziomu zakłóceń $J=1,35 \pm 0,11$.

Korzystając z odchylenia standardowego, które wynosi:

- dla przypadku braku zakłóceń $\sigma=0,23$
- dla 50% poziomu zakłóceń $\sigma=0,24$,

można dodatkowo określić przedział $J \pm \sigma$ w jakim zawarte będzie 80% przeprowadzanych rezultatów. Powyższa analiza stochastyczna pokazuje zasadniczą wadę algorytmów ewolucyjnych. W pojedynczym eksperymencie nigdy nie ma pewności, czy osiągnie się zamierzoną dokładność. Mogą zdarzać się również przypadki, gdzie algorytmy będą działały zdecydowanie źle.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono metodę zastosowania AE do estymacji zmiennego opóźnienia.

Szczególną uwagę zwrócono na sposób modelowania obiektu z niestacjonarnym opóźnieniem wykorzystanym w trakcie badań symulacyjnych.

Przedstawione w pracy wyniki symulacji potwierdzają możliwość stosowania algorytmów ewolucyjnych do estymacji zmiennego opóźnienia również w obecności 50% zakłóceń.

Przeprowadzona analiza stochastyczna wskazuje wadę algorytmów ewolucyjnych wynikającą z wykorzystania losowych procedur. Algorytmy te, jakkolwiek z reguły działają efektywnie, to jednak nie gwarantują w każdym pojedynczym przypadku uzyskanie w określonym czasie zadanej dokładności estymacji.

THE ESTIMATION OF VARIABLE TIME DELAY FOR DYNAMIC SYSTEMS BY USING OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Abstract: The identification of time delay of the linear plant often appears as very important tasks. It is especially hard problem if the plant is non-stationary. The new possibility in this field is opened by application of an evolutionary algorithm. The on-line estimation by means of evolutionary algorithm based on the control random signal, is proposed in the paper.

Literatura

[1] Barrero M.O., De Moor B.L.R. (2004) Nonparametric regularized time delay estimation *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 2

[2] Bjorklund S., Ljung L. (2003) A Review of Time-Delay Estimation Techniques *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 3 pp. 2502-2507

[3] Boukas E. K. (2003) Stochastic output feedback of uncertain time-delay system with saturing actuators. *Journal of optimization theory and applications*, 118, No. 2, 255-273

[4] Bozza V., Mancini L. (2004) Time delay in black hole gravitational lensing as a distance estimator. *General Relativity and Gravitation*, 36 (2), pp. 435-450

[5] Chan Y.T., Riley J.M.F., Plant J.B. (1981) Modeling of time delay and its application of nonstationary delays. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ASSP-29 (3 pt 2), pp. 577-581.

[6] Chen B.-S., Hung J.-C. (2001) A global estimation for multichannel time-delay and signal parameters via genetic algorithm. *Signal Processing*, 81 (5), pp. 1061-1067.

[7] Chen X., Wang M. (2004) Global optimization methods for time delay estimation. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 1 pp. 212-215

[8] Goldberg D. (1995) Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. *WNT* Warszawa

[9] Hachino Tomohiro, Yang Zi-Jiang, Tsuji Teruo (1996) On-line identification of continuous time-delay systems using the genetic algorithm *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 116 (6), pp. 115-126

[10] Harada K., Kobayashi Y., Okita T. (2003) Identification of Linear Systems With Time Delay and Unknown Order Electrical. *Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 145 (3), pp. 61-68

[11] Houck, C. R., J. A. Joines, and M. G. Kay. (1995) A genetic algorithm for function optimisation: A Matlab implementation. *North Carolina State University NCSU-IE Technical Report* 95-09

[12] Igarashi R., Fukushima S., Yamada Y., Uemara T., Saitoh A., Narita Y. (1994) Evaluation of fluctuating dead times by time interval distribution measurement. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 43, 164-169

[13] Ke J., Qiao Y., Qian J. (2004) Identification of time-varying delay systems using particle swarm optimization. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 1 pp. 330-334.

[14] Kleiman E.G. (1999) Identification of time-varying systems *Automation and Remote Control*, 60 (10 PART 1), pp. 1371-1402.

[15] Latour P.R., Koppel L. B., Coughanowr D.R. (1967) Time-optimum control of chemical processes for set-point changes. *Industrial and Engineering Chemistry Process design and Development*, , 6, 452-

[16] Lo W.L., Rad A.B., Li C.K. (2003) Self-tuning control of systems with unknown time delay via extended polynomial identification *ISA Transactions*, 42 (2), pp. 259-272

[17] Li Z.-S., Wan Y.-C. (2002) Suboptimal control for plants with pure time delay based on state feedback. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 36 (SUPPL.), pp. 138-140.

[18] Maskell D.L., Woods G.S., Kerans A. (2004) A hardware efficient implementation of an adaptive subsample delay estimator *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 3

[19] Muller T., Lauk M., Reinhard M., Hetzel A., Lucking C.H., Timmer . (2003) Estimation of delay times in biological systems. *Annals of biomedical engineering*, 31 (11), pp. 1423-1439

[20] Papliński J.P. (2004) An evolutionary algorithm for identification of non-stationary linear plants with time delay. *Proceedings of the First International Conference of Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 1 pp. 64-69.

[21] Papliński J.P. (2004) An identification of disturbed non-stationary linear plants with time delay by using evolutionary algorithm. *Proceedings of the International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. (MMAR)*, 1 pp. 1405-1408.

[22] Phat V.N., Savkin A.V. (2002) Robust state estimation for a class of uncertain time-delay systems. *Systems and Control Letters*, 47 (3), pp. 237-245

[23] Rihan F.A. (2003) Sensitivity analysis for dynmics systems with time-lags *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 151 (2), pp. 445-462

[24] Shaltaf S. (2004) Neural-Network-Based Time-Delay Estimation *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2004 (3), pp. 378-385

[25] So H.C. (2002) Noisy input-output system identification approach for time delay estimation. *Signal Processing*, 82 (10), pp. 1489-1493.

[26] Tang K.S., Man K.F., Kwong S., He Q. (1996) Genetic algorithms and their *applications* IEEE Signal Processing Magazine, 13 (6), pp. 22-37.

[27] Vasudevan L., Ortega A., Mitra U. (2004) Jointly optimized quantization and time delay estimation for sensor networks. *International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, ISCCSP*, pp. 203-208.

[28] Viola F., Walker W.F. (2003) A new algorithm for continuous time delay estimation using sampled data. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2 pp. 1834-1838.

[29] Yang Z.-J., Hachino T., Tsuji T. (1996) Model reduction with time delay combining the least-squares method with the genetic algorithm. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 143 (3), pp. 247-254.

[30] Yi M., Wei P., Xiao X.-C. (2004) New algorithm for multipath time delay estimation of unknown signal. *Dianzi Yu Xinxi Xuebao/Journal of Electronics and Information Technology*, 26 (8), pp. 1224-1231

[31] Zhu Z., Huang X. (2003) Performance Analysis of Discrete-time Quadrature Subsample Method for Time Delay Estimation. *Proceedings of the IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications*, 3 pp. 57-62.

Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-00-6