

Małgorzata I. MICHALCZYK

INSTYTUT AUTOMATYKI, POLITECHNIKA ŚLĄSKA,
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Adaptacyjne układy sterowania tworzące strefy ciszy wokół poruszającego się mikrofonu

Dr inż. Małgorzata I. MICHALCZYK

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Prowadząc badania nad tworzeniem lokalnych przestrzennych stref ciszy zajmuje się cyfrowym przetwarzaniem sygnałów, sterowaniem adaptacyjnym, identyfikacją systemów, wielowymiarowymi oraz rozproszonymi układami sterowania.



e-mail: malgorzata.michalczyk@polsl.pl

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań nad adaptacyjnymi układami aktywnej redukcji hałasu wykorzystywanymi do tworzenia stref ciszy wokół poruszającego się w pomieszczeniu mikrofonu. Pokazano, że w części przypadków zastosowanie adaptacyjnego algorytmu FX-LMS zapewnia poprawne działanie układu, czyli śledzenie przez wytworzoną strefę ciszy zmian położenia mikrofonu. W przypadku złożonych zakłóceń lub szerszego zakresu ruchu mikrofonu, koniecznym jest zastosowanie dodatkowych algorytmów bieżącej estymacji modelu obiektu sterowania.

Słowa kluczowe: aktywna redukcja hałasu, adaptacyjne układy sterowania, algorytm LMS.

Adaptive control systems creating zones of quiet around moving error microphone

Abstract

The paper summarizes the novel research on a special class of digital sound processing systems with time varying sound sensor position, conducted in the Institute of Automatic Control, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland. These are adaptive active noise control (ANC) systems creating zones of quiet around a microphone, position of which is being changed in enclosure. They use the LMS-based adaptive control algorithm which is parameterized with a model of the so called secondary path. The problem arises when the microphone position is changed during the ANC system operation, because the secondary path modelling errors occur. They, in some cases, can be coped by the adaptive control algorithm itself, however, in other cases an additional, on-line identification routine has to be used to update the secondary path model. These two situations are the subject of the presented research. The results of real world experiments showed that the zone of quiet can adaptively track the movement of the microphone if the LMS-based adaptive control algorithm is applied. However, if the noise is random and the spatial range of the microphone movement is wider, then the more complex algorithms have to be used, which is shown on the basis of simulation experiments, verified in the ANC laboratory.

Keywords: active noise control, adaptive algorithms, LMS algorithm, parameterization.

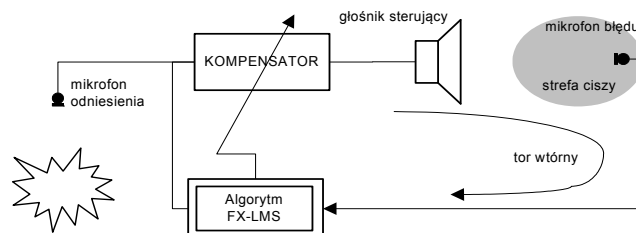
1. Wstęp

Artykuł prezentuje wyniki badań nad układami aktywnej redukcji hałasu (ARH) prowadzonych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Są to adaptacyjne układy sterowania, stosowane dla tworzenia lokalnych przestrzennych stref ciszy wokół poruszającego się w pomieszczeniu mikrofonu, tzw. mikrofonu błędu.

Lokalna przestrzenna strefa ciszy to podprzestrzeń przestrzeni akustycznej, w której zachodzi zmniejszenie poziomu hałasu (wyłumienie zakłócenia). Jest ono osiągane przez minimalizację wartości średniokwadratowej zmian ciśnienia akustycznego. W tym celu wykorzystuje się ideę ARH. Ideą ARH jest redukcja

hałasu (zakłócenia) za pomocą fal akustycznych dodatkowo wygenerowanych przez głośniki sterujące, wykorzystując zjawisko destruktywnej interferencji. W wielu praktycznych realizacjach wykazano już efektywność układów ARH (aktywne ochronniki słuchu, falowody akustyczne, układy dla ARH w środkach lokomocji i pomieszczeniach) [1, 2]. Pomimo długiej historii ARH, wciąż istnieją nierozwiązane problemy tworzenia lokalnych przestrzennych stref ciszy w pomieszczeniach.

W ARH najczęściej wykorzystuje się układ automatycznej kompensacji przedstawiony na rys. 1. Wartości sygnału odniesienia $x(i)$ pozyskiwane są za pomocą mikrofonu odniesienia. Sygnał odniesienia niosący informację o zakłóceniu jest przetwarzany przez kompensator. Uzyskany w ten sposób sygnał sterowania $u(i)$ jest doprowadzony do głośnika sterującego, który generuje falę akustyczną (hałas wtórny) interferującą z hałasem pierwotnym i wokół mikrofonu błędu powstaje lokalna przestrzenna strefa ciszy. Ponieważ nieznanym jest analityczny model kompensatora, w celu jego wyznaczenia wykorzystuje się algorytm adaptacji minimalizujący wariancję sygnału błędu $e(i)$. Algorytm adaptacji FX-LMS wykorzystywany w badaniach jest modyfikacją algorytmu LMS (*least mean squares*) z filtracją sygnału odniesienia (FX – *filtered X*) [1].



Rys. 1. Idea ARH dla tworzenia lokalnych stref ciszy
Fig. 1. Idea of ANC for local zones of quiet

Cechą charakterystyczną układów ARH jest obiekt sterowania, którym jest tor wtórny będący obiektem elektroakustycznym. Obejmuje on tor elektryczny, głośnik sterujący, mikrofon błędu oraz przestrzeń akustyczną pomieszczenia. Jego dynamika w przypadku układów tworzenia przestrzennych stref ciszy jest bardzo złożona, musi być jednak modelowana na potrzeby algorytmu FX-LMS. Zastosowanie adaptacyjnego algorytmu sterowania sprawia, że układ ARH może dostosowywać się do zmian zachodzących w pomieszczeniu, takich jak poruszanie się w nim osób, przestawienie mebli. Jednakże w wyniku użycia modelu toru wtórnego, zidentyfikowanego przed rozpoczęciem pracy układu, algorytm adaptacji staje się wrażliwy na ruch mikrofonu błędu, który wprowadza silne zmiany dynamiki toru wtórnego. Aby zapewnić zbieżność algorytmu FX-LMS, błędy fazowe modelu toru wtórnego nie powinny przekraczać wartości $\pm\pi/2$ rad [1].

Celem nowatorskich badań nad adaptacyjnymi własnościami tworzonych stref ciszy jest ocena, jakie adaptacyjne algorytmy sterowania należy zastosować i w jaki sposób je sparаметryzować, aby tworzona strefa ciszy podążała za ruchem mikrofonu błędu.

2. Własności adaptacyjne układów ARH

W układach ARH adaptacja stosowana jest w dwóch celach: w fazie wstępnej, dla wyliczenia współczynników kompensatora, a następnie, w celu dostosowania się do zmiennych w czasie warunków zewnętrznych poprzez bieżącą korekcję tych współczynników. W większości układów rozważanych w literaturze [1, 2] powolna adaptacja jest wystarczająca do obliczenia współ-

czynników kompensatora i osiągnięcia zadowalających wyników w przypadku słabych zmian toru wtórnego, takich jak ruch osoby w pomieszczeniu, otwarcie drzwi czy okna. Jednak w niektórych przypadkach zmiany toru wtórnego mogą być znacznie silniejsze, jak np. w przypadku układu, który tworzyłby strefę ciszy wokół osoby poruszającej się z mikrofonem błędu. Powstaje wtedy szereg problemów – adaptacja powinna być szybka, żeby śledzić zmiany położenia mikrofonu błędu, jednak zmiany toru wtórnego, wprowadzając błędy modelowania, utrudniałyby parametryzację układu.

Zastosowanie adaptacyjnych algorytmów ARH do śledzenia szybkich zmian położenia mikrofonu błędu analizowano do tej pory w kilku tylko pracach. Wyniki eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzonych w specjalnie skonstruowanym układzie tworzącym lokalne strefy ciszy w pomieszczeniu w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej były prezentowane m.in. w [3-5]. Pokazano, że stworzone strefy ciszy mogą poruszać się, śledząc zmiany położenia mikrofonu błędu, gdy algorytmem sterowania jest klasyczny w ARH algorytm FX-LMS, lub jego modyfikacje o przyspieszonej zbieżności. Wyniki doświadczeń w falowodzie akustycznym przeprowadzonych na University of Adelaide z zastosowaniem techniki mikrofonu wirtualnego przedstawiane były przez Petersena [6] i in. [7].

W obu przypadkach zakres zmian położenia mikrofonu błędu był niewielki: ruch kołowy po okręgu o średnicy 90 cm w pomieszczeniu [3-5] oraz liniowy po odcinku 10 cm w falowodzie [6, 7]. W badaniach Petersena [6, 7] niezbędne modele obiektu sterowania zidentyfikowano w fazie inicjalizacji algorytmu sterowania z rozdzielczością liniową 1 cm, a następnie przełączano je w trakcie ruchu mikrofonu.

W badaniach prowadzonych w Instytucie Automatyki [3-5] modele były również identyfikowane w fazie wstępnej działania układu, jednakże tylko w jednej, losowo wybranej pozycji. W takim przypadku skuteczność układu ARH jest ograniczona ze względu na błędy modelowania toru wtórnego, które wynikają z ruchu mikrofonu błędu. Wiadomo jednak, że algorytm FX-LMS jest do pewnego stopnia odporny na błędy modelowania toru wtórnego [2, 3]. Natomiast stosując procedurę bieżącej estymacji modelu toru wtórnego należy wymusić szybszą zbieżność procedury estymacji niż adaptacji, co mogłoby być trudnym zadaniem w badaniach [3-5], gdy mikrofon błędu poruszał się nawet z prędkością 3,7 m/s. Taka prędkość pozwala wykorzystać maksymalnie własności adaptacyjne układu, należy jednak pamiętać, że istnieje wtedy możliwość nieliniowego, chaotycznego zachowania algorytmu sterowania [3].

W przypadku, gdy ruch mikrofonu błędu wprowadza błędy fazowe większe niż $\pm\pi/2$ rad, koniecznym jest zastosowanie dodatkowej procedury bieżącej estymacji modelu toru wtórnego. W przeprowadzonych badaniach zastosowano algorytm FX-LMS rozszerzony o dodatkowe dwa algorytmy LMS i generator sygnału pobudzenia dla identyfikacji modelu toru wtórnego, zaproponowany w [8] z dodatkową modyfikacją [9].

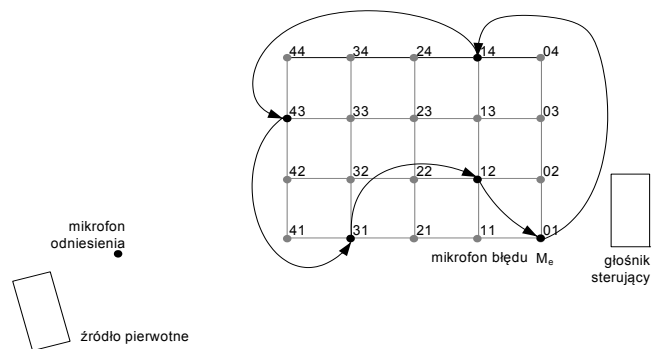
3. Układy ARH

Układy przedstawione w artykule przeznaczone były do redukcji hałasu niskoczęstotliwościowego (30 - 150 Hz) w pomieszczeniach [3] o objętości ok. 70 m³ i ok. 180 m³ [9-11]. Częstotliwość próbkowania wynosiła 500 Hz. Jednym z trudniejszych zadań była realizacja ruchu mikrofonu błędu, a dokładniej jego powtarzalności i możliwości synchronizacji ruchu i mierzonych sygnałów.

Szereg doświadczeń przeprowadzono w układzie pokazanym na rys. 2. Mikrofon błędu poruszał się po okręgu o średnicy 90 cm z zadaną prędkością liniową od 0,5 do 3,7 m/s (odpowiednio 0,2 do 1,3 obrotu na sekundę). Ok. 3 cm nad okręgiem umieszczono cztery mikrofony: M₁, M₂, M₃ i M₄ w celu obserwacji działania układu. Ponieważ zakres zmian położenia mikrofonu nie wprowadzał błędów modelowania naruszających warunek zbieżności algorytmu FX-LMS, w układzie nie zastosowano dodatkowej estymacji modelu toru wtórnego.



Rys. 2. Układ ARH z mikrofonem błędu M_e poruszającym się po okręgu
Fig. 2. ANC system with an error microphone M_e moving around the circle



Rys. 3. Układ ARH z mikrofonem błędu przełączanym mikrofonem błędu M_e
Fig. 3. ANC system with the error microphone M_e position change simulated by switching over the microphone array

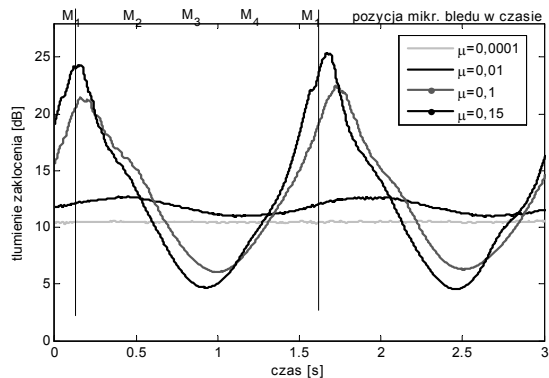
Ponieważ badania w opisanym układzie są czasochłonne oraz trudną jest symulacja tego typu ruchu, zbudowano stanowisko laboratoryjne składające się ze standardowych urządzeń pomiarowo-wykonawczych oraz macierzy mikrofonów (rys. 3). Umożliwia ono symulację ruchu mikrofonu błędu poprzez przełączanie mikrofonów w macierzy, mikrofon błędu może więc znajdować się w węzłach siatki o wymiarach 120 cm x 90 cm o rozstawie 30 cm. Modele torów elektroakustycznych zostały zidentyfikowane i stworzono środowisko symulacyjne umożliwiające badania porównawcze adaptacyjnych algorytmów sterowania [10]. Mikrofon przełączany był w losowy sposób, wzdłuż drogi zaznaczonej strzałkami (rys. 3): z pozycji 01, przez pozycje 14, 43, 31, i 12, z powrotem do pozycji 01. W badaniach rozważano zarówno algorytm FX-LMS [10], jak i algorytm FX-LMS wraz z bieżącą estymacją modelu toru wtórnego [11].

W dalszych badaniach planuje się wprowadzanie ruchu mikrofonu błędu w bardziej naturalny sposób. Przykładowo, w badaniach [9] zastosowano mały robot mobilny z zamocowanym mikrofonem bezprzewodowym, co umożliwiło realizację zadanych i powtarzalnych trajektorii mikrofonu błędu.

4. Wyniki badań

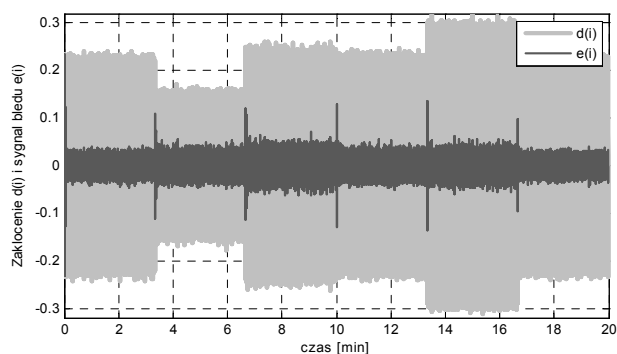
W [3, 5] pokazano, że stworzona strefa ciszy może śledzić zmiany położenia mikrofonu błędu, nawet, gdy stosuje się tylko klasyczny algorytm FX-LMS. Na rys. 4 [5] przedstawiono wykres tłumienia zakłócenia w mikrofonie obserwacyjnym M₁ (rys. 2) w funkcji czasu, dla prędkości mikrofonu błędu 3,7 m/s, przy redukcji hałasu tonowego. Cztery wykresy tłumienia odpowiadają kolejnym wartościom kroku adaptacji algorytmu FX-LMS: $\mu = 0,0001$, 0,01, 0,1 oraz 0,15. Można zauważyć, że o ile dla mniejszych wartości μ (powolna adaptacja) tłumienie jest stałe lub lekko oscyluje, to dla większych wartości μ (szybka adaptacja) układ śledzi ruch mikrofonu błędu. Dla $\mu = 0,1$ tłumienie zmienia się w zakresie 6-22 dB, osiągając maksymalną wartość ok. 100 ms po tym, gdy mikrofon błędu przejeżdża przez pozycję M₁, czyli

strefa ciszy podąża za mikrofonem błędu ze 100 ms opóźnieniem. Dla najwyższej wartości kroku adaptacji $\mu = 0.15$ opóźnienie to wynosi już tylko 50 ms, a tłumienie w centrum strefy ciszy 25 dB.



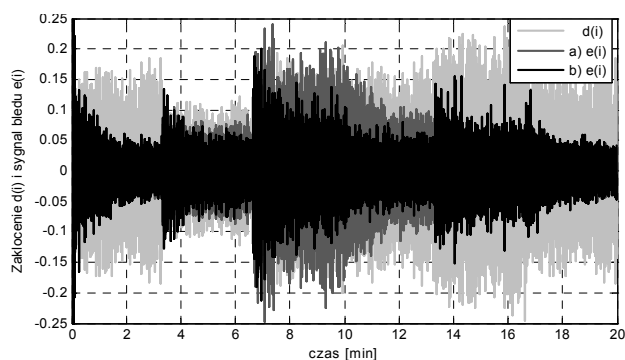
Rys. 4. Tłumienie zakłócenia tonalnego w mikrofonie M_1 dla różnych wartości μ , prędkość mikrofonu 3,7m/s

Fig. 4. Attenuation in observation microphone M_1 for different values of μ



Rys. 5. Zakłócenie tonowe $d(i)$ i sygnał błędu $e(i)$ w układzie z przełączanym mikrofonem błędu, algorytm FX-LMS

Fig. 5. Tonal disturbance $d(i)$ and error signal $e(i)$ picked in the ANC system with the error microphone switched over the microphone array, FX-LMS alg



Rys. 6. Zakłócenie losowe $d(i)$ i sygnał błędu $e(i)$ w układzie z przełączanym mikrofonem błędu, algorytm FX-LMS bez (a) i z (b) bieżącą estymacją modelu toru wtórnego.

Fig. 6. Random disturbance $d(i)$ and error signal $e(i)$ picked in the ANC system with the error microphone switched over the microphone array, FX-LMS algorithm without (a) and with (b) online secondary path model estimation

Środowisko symulacyjne dla układu z macierzą mikrofonów umożliwiło szeroko zakrojone badania. Powtórzono badania dla zakłócenia tonalnego przełączając mikrofon w kolejne pozycje co 200 s [10]. Dla filtru FIR kompensatora o 100 współczynnikach i klasycznego algorytmu FX-LMS otrzymano bardzo dobre wyniki (tłumienie rzędu 18-24 dB). Przełączanie mikrofonu błędu objawia się jednak chwilowym zwiększeniem mocy sygnału błędu (rys. 5). W przypadku wąskopasmowego zakłócenia losowego

(rys. 6, linia szara) układ jest znacznie wolniejszy, a w pozycji 43 mikrofonu tłumienie zakłócenia jest niezadowalające. Gdy czas między przełączeniami był dłuższy, błędy modelowania toru wtórnego w pozycji 43 powodowały rozbieżność algorytmu adaptacji. W pozostałych pozycjach osiągnięto jednak dość wysokie tłumienie, do 12 dB. Natomiast zastosowanie algorytmu z bieżącą estymacją modelu toru wtórnego znacznie poprawiło osiągnięte wyniki (rys. 6, linia czarna), a algorytm sterowania był zbliżony w każdej pozycji [11]. Działanie układu z bieżącą estymacją toru wtórnego zostało również zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych [10].

Trzeba jednak zauważyć, że o ile do parametryzacji klasycznego algorytmu FX-LMS należy dobrać krok adaptacji, rząd filtru kompensatora oraz model toru wtórnego, to dla algorytmu z bieżącą estymacją trzeba dobrać 3 parametry μ oraz wariancję sygnału pobudzającego dla estymacji, dodawanego do sygnału sterowania, co może być trudnym zadaniem [1].

5. Podsumowanie

Badania nad układami tworzenia przestrzennych stref ciszy wokół poruszającego się mikrofonu błędu wydają się mieć wciąż przyszłość. Z jednej strony, systemy te są trudnym benchmarkiem dla adaptacyjnych algorytmów sterowania, nawet, gdy są wspomagane procedurami bieżącej estymacji modeli. Parametryzacja adaptacyjnych układów ARH jest wciąż problemem otwartym. Z drugiej strony, układy ARH znajdują coraz szersze zastosowanie w systemach ochrony dla pracowników przebywających w zanieczyszczonych akustycznie środowiskach, zwłaszcza teraz, gdy procesory sygnałowe i dedykowane układy charakteryzują się coraz to większą mocą obliczeniową, a mniejszym rozmiarem i energochłonnością.

Badania współfinansowano ze środków budżetowych na badania na rok 2010 w ramach grantu N N514 232037.

6. Literatura

- [1] Kuo S.M. and Morgan D.R.: Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations. J. Wiley & Sons, N. York, 1996.
- [2] Hansen C.H., Snyder S.D.: Active Control of Noise and Vibration, Cambridge University Press, 1997.
- [3] Michalczyk M.I.: Adaptive control algorithms for three-dimensional zones of quiet. Skalmierski Comp. Studio, Gliwice, 2004.
- [4] Czyż K.: Adaptive control for nonstationary electro-acoustic plant, Proc. 13th IEEE Int. Conference MMAR, Szczecin, Poland, 2007.
- [5] Michalczyk M.I.: Active Noise Control with Moving Error Microphone. Mechanics, 27(3), p. 113-119, 2008.
- [6] Petersen C.D.: Virtual sensing for active noise control at a moving location. Ph.D. Thesis, The University of Adelaide, Australia, 2007.
- [7] Hansen C.H., Qiu X., Petersen C., Howard C., Singh S.: Active Noise and Vibration Control System Design Considerations, Mechanics, 26(2), pp. 37-46, 2007.
- [8] Cornelissen D., Sommen P.C.W.: New online secondary path estimation in a multipoint filtered-X algorithm for acoustic noise canceling. Proc. ProRISC/IEEE Workshop o Semiconductors, Circuits, Sys. and Sig. Processing, Mierlo, pp. 97-10, ISBN 90-73461-18-9, 1999.
- [9] Filec M.: System tworzenia przestrzennych stref ciszy wokół poruszającego się mikrofonu bezprzewodowego. Praca magisterska. Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice, 2010.
- [10] Michalczyk M.I.: Comparison of feedforward and IMC controllers for active noise control system with moving error microphone: simulation results. Mat. 9th Conf. on Active Noise and Vibration Control Methods, Zakopane, 2009.
- [11] Michalczyk M.I., Filec M.: Application of online secondary path estimation for ANC system with moving error microphone: simulation results, Mat. 57. OSA, PTA, Gliwice, 2010.