ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2008
Seria: AUTOMATYKA z. 150 Nr kol. 1796

Wojciech BOŻEJKO
Politechnika Wrocławska
Wyższa Szkoła Zarządzania „Edukacja" we Wrocławiu

Maciej WALCZYŃSKI
Uniwersytet Wrocławski

Mieczysław WODECKI
Uniwersytet Wrocławski
Wyższa Szkoła Zarządzania „Edukacja" we Wrocławiu

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU POSZUKIWANIA SNOPOWEGO OPARTEGO NA SZYBKIEJ TRANSFORMACIE FOURIERA DO CYFROWEJ ANALIZY SYGNAŁÓW

Streszczenie. W pracy proponujemy algorytm poszukiwania snopowego analizowania sygnałów akustycznych oparty na kodowaniu sygnału za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Wykonano obliczenia na reprezentatywnej grupie przykładów, a uzyskane wyniki wskazują na dużą aplikacyjność proponowanej metody w zastosowaniu do zagadnień praktyki przemysłowej.

APPLICATION OF BEAM SEARCH ALGORITHM BASED ON FAST FOURIER TRANSFORMATION TO DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Summary. In this paper we propose a beam search algorithm to analyze an acoustic signals, which is based on FFT coding. Calculations executed on representative group of benchmark instances show that the method has a big chance for application in the factory practice problems.

1. Wprowadzenie

W pracy zaproponowano zastosowanie algorytmu poszukiwania snopowego (inaczej poszukiwania strumieniowego, *beam search*) do wykrywania uszkodzeń systemów przemysłowych, których z różnych względów nie można zdemontować i poddać bezpośrednim badaniom, np. wału napędowego statku, bardzo dużego silnika spalinowego lub elektrycznego, wirujących elementów samolotów lub helikopterów, itp. W literaturze problematyka ta pojawia się dość często, jednak jak do tej pory do rozwiązywania pojawiających się problemów nie używano algorytmów metaheurystycznych. Kim i in. [2], YanPing i in. [5] oraz Gao i in. [1] analizowali metody wykrywania uszkodzeń w systemach wirujących. Ngan i in. [3] zastosowali teorię falek do wykrywania defektów w produkcji masowej. We wszystkich tych podejściach nie zastosowano metaheurystyk, mimo że przeglądana przestrzeń spektrogramów jest bardzo duża i można ją analizować albo za pomocą niedokładnych

metod opartych na dużych okienkach i rzadkim podziale, albo za pomocą metod o bardzo długim czasie działania opartych na idei przeglądu zupełnego. Zaimplementowanie badanej metody w systemach czasu rzeczywistego jest możliwe przy użyciu podejścia heurystycznego, proponowanego w niniejszej pracy.

2. Cyfrowa analiza sygnału akustycznego

W rozważanym zagadnieniu bada się dwie próbki dźwiękowe poddane konwersji analogowo-cyfrowej. Pierwszy dźwięk, nazywany dalej wzorcem, jest akustycznym odwzorowaniem prawidłowej pracy maszyny. Czas trwania wzorca jest mały w porównaniu z czasem trwania drugiej próbki dźwiękowej, która jest zapisem akustycznych atrybutów pracy diagnozowanej pod kątem awarii maszyny. Oba dźwięki w zapisie cyfrowym reprezentowane są pierwotnie przez wektory zależności ciśnienia akustycznego od czasu. Ponieważ porównanie obu sygnałów w takiej reprezentacji nie daje dobrych rezultatów, dlatego transformuje się oba dźwięki do reprezentacji w przestrzeni amplituda-częstość. Przekształcenia dokonuje się za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT), będącej modyfikacją dyskretnej transformaty Fouriera (DFT):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-i2\pi}{N}nk} \qquad k = 0,\ldots,N-1,$$

gdzie: X_k – jest reprezentacją sygnału w dziedzinie częstości, x_n – reprezentacją sygnału w dziedzinie czasu.

Transformacja sygnału diagnostycznego jako całości dałaby jedynie informację o uśrednionym po całym czasie trwania widmie sygnału. Porównywanie uśrednionych widm obu dźwięków nie miałoby większego sensu, dlatego wprowadza się funkcję okienkującą, która dzieli sygnał na mniejsze fragmenty, na których dopiero działa FFT. Funkcja okienkująca ma w ogólności następującą postać:

$$w_n = \begin{cases} f(n), & n \in \langle 0, N), \\ 0, & n \notin \langle 0, N), \end{cases}$$

gdzie: n – numer próbki, N – prawy skraj okienka. W naszych badaniach zastosowaliśmy funkcję okienkującą Hamminga:

$$f(n) = x_n \cdot \left[0{,}54 - 0{,}46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right], n \in [0, N).$$

Opis zagadnień okienkowania znaleźć można w pracy Trethewey [4].

3. Algorytm poszukiwania snopowego

Poszukiwanie snopowe, zwane także poszukiwaniem strumieniowym (*beam search*, BS) polega na "oświetlaniu" snopem światła przestrzeni rozwiązań. Każdy "oświetlony" punkt przestrzeni rozwiązań staje się źródłem ukierunkowanej, ograniczonej wiązki świetlnej, zawierającej pewną liczbę rozwiązań potomnych, najbardziej obiecujących z punktu widzenia procesu poszukiwań. Rozwinięciu podlegają węzły najbardziej obiecujące, np. w sensie wartości dolnego ograniczenia lub wartości pewnej heurystycznej funkcji oceny. Wybór węzłów dostarcza pewnej

liczby kolejnych węzłów podlegającej dalszej analizie. Pełniejszy opis metody można znaleźć w pracy [6].

Proponowany algorytm używa heurystycznej funkcji h do oszacowania kosztu węzłów w rozwijanym wierzchołku. Zbiór B używany jest do pamiętania węzłów, które mają być rozwinięte w następnej iteracji algorytmu. Tablica haszująca TH służy do pamiętania wierzchołków już odwiedzonych (podobnie jak listy *open* i *closed* w algorytmach typu *best-first search*, np. algorytmie A^*). Zbiór S używany jest do zapisywania następników bieżącego węzła.

Algorytm 1. Poszukiwanie snopowe (*beam search*)

```
g = 0; TH = { start }; B = { start };
while (B ≠ ∅)
    begin
    S = ∅;
    for (każdego elementu B) begin
        for (każdego następnika elementu) begin
            if (następnik = cel) return g + 1;
            S = S ∪ { następnik };
        end;
    end;
    B = ∅; g = g + 1;
    while ((S ≠ ∅) AND (B > |B|)) begin
        element = następnik w S z największą wartością h; S = S \ {element };
        if (element ∉ TH) begin
            if (TH jest pełna) return ∞;
            TH = TH ∪ { element };
            B = B ∪ { element };
        end;
    end;
end;
return ∞.
```

Procedura jest kontynuowana tak długo, aż znaleziony zostanie cel (tj. widmo FFT analizowanego okienka będzie się znacząco różniło od wzorca – znalezione zostanie uszkodzenie), bądź do momentu zapełnienia pamięci (pełna tablica TH). Wartości heurystyki h proponujemy wyznaczać w oparciu o wartość bezwzględną różnic pomiędzy spektrogramami:

$$h = \sum_{k=0}^{N-1} |X_k - W_k|,$$

gdzie: $X = (X_0, X_1, \ldots, X_{N-1})$ jest spektrum badanego dźwięku, a $W = (W_0, W_1, \ldots, W_{N-1})$ – spektrum wzorca prawidłowej pracy silnika uzyskane za pomocą FFT z sygnału wzorcowej pracy silnika.

4. Eksperymenty obliczeniowe

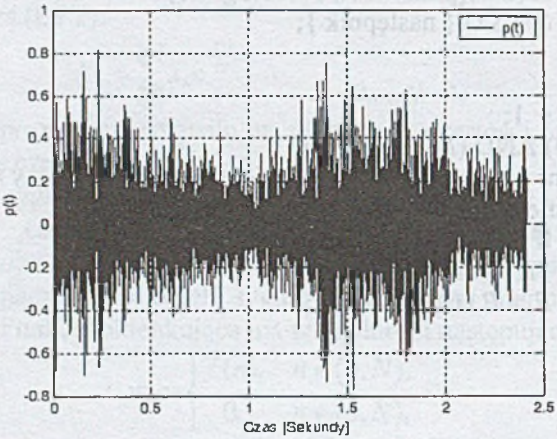
Metodę testowano na 20 przykładach wziętych z praktyki przemysłowej (analiza pracy silnika spalinowego). Czas trwania badanych sygnałów akustycznych mieścił się

w przedziale od 352 sekund do 37 minut 43 sekund. Częstość próbkowania wynosiła 44,1 kHz. Na rysunkach 1 i 2 zaprezentowano nagranie dźwięku prawidłowego (rys. 1) oraz uszkodzonego (rys. 2) silnika. Rysunki 3 i 4 prezentują spektrum FFT częstotliwości silników.

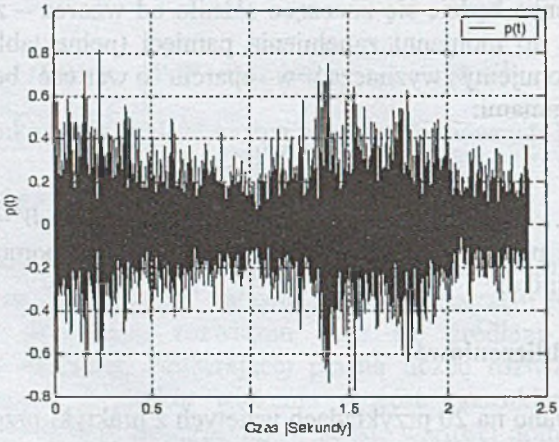
Idea działania algorytmu poszukiwania snopowego przy poszukiwaniu odgłosu uszkodzenia opiera się następującym postępowaniu:

- podziale badanej fali na mniejsze okna,
- przeprowadzeniu szybkiej transformaty Fouriera i odjęciu od spektrogramu wzorca (ilustrującego odgłos prawidłowej pracy silnika),
- normalizacji spektrogramów (przypisaniu częstotliwości o najwyższej amplitudzie wartości 0),
- wyznaczeniu wartości heurystyki h – miernika różnic spektrogramów.

Algorytm w następnych krokach dzielił na mniejsze te okna, dla których wartość heurystyki h przekraczała próg 0.3 (wyznaczony eksperymentalnie na wstępnym etapie badań), przy czym zastosowano podział okna na 10 równej wielkości mniejszych okien.

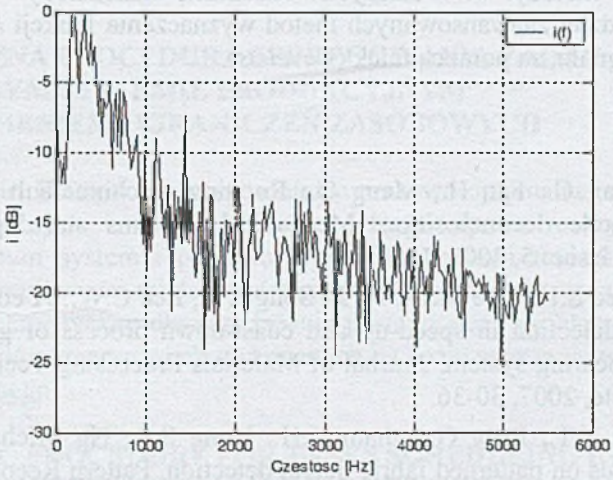


Rys 1. Amplituda prawidłowego dźwięku pracy silnika

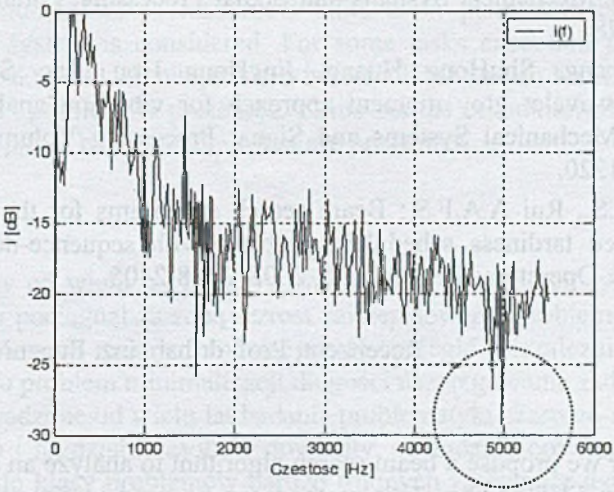


Rys 2. Amplituda odgłosu uszkodzonego silnika

Algorytm zaimplementowano w programie MATLAB wersji R2007b uruchomionej na komputerze Silicon Graphics Altix 3700 Bx2 we Wrocławskim Centrum Sieciowo-Superkomputerowym. Zastosowanie algorytmu poszukiwania snopowego pozwoliło w krótkim czasie odnaleźć miejsca (momenty czasowe) pojawienia się odgłosu uszkodzenia. Średni procentowy poziom wykrywania uszkodzeń w badanych próbkach wyniósł 92,1%. Maksymalny poziom wykrywania usterek wyniósł 96,1% , minimalny 83,2% .



Rys.3. Spektrogram ilustrujący pracę silnika nieuszkodzonego



Rys.4. Spektrogram ilustrujący pracę uszkodzonego silnika. Zaznaczono pojawienie się dodatkowej częstotliwości składowej

5. Podsumowanie

W pracy zaproponowano zastosowanie algorytmu poszukiwania snopowego (*beam search*) do wykrywania uszkodzeń systemów przemysłowych, których z różnych względów nie można zdemontować i poddać bezpośrednim badaniom, np. wału napędowego statku lub innych dużych maszyn, w których zbadać można widmo akustyczne. Otrzymane wyniki wskazują na bardzo dużą skuteczność zaproponowanej metody. W dalszych badaniach należałoby się skupić na zastosowaniu bardziej zaawansowanych metod wyznaczania funkcji *h*, np. opartej na dekompozycji sygnału, za pomocą falek (*wavelets*).

BIBLIOGRAFIA

1. Gao Q., Duan C., Fan H., Meng Q.: Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition. Mechanical Systems and Signal Processing Volume: 22, Issue: 5, 2008, 1072-1081.
2. Kim B.S., Lee S.H., Lee M.G., Ni J., Song J.Y., Lee C.W.: A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. Journal of Materials Processing Tech. Volume: 187-188, Complete, 2007, 30-36.
3. Ngan Henry Y.T., Pang Grantham K.H., Yung S.P., Ng Michael K.: Wavelet based methods on patterned fabric defect detection. Pattern Recognition Volume: 38, Issue: 4, 2005, 559-576.
4. Trethewey M.W.: Windown and overlap processing effects on power estimates from spectra. Mechanical Systems and Signal Processing Volume: 14, Issue: 2, 2000, 267-278.
5. YanPing Zhang, ShuHong Huang, JingHong Hou, Tao Shen, Wei Liu: Continuous wavelet grey moment approach for vibration analysis of rotating machinery. Mechanical Systems and Signal Processing Volume: 20, Issue: 5, 2006, 1202-1220.
6. Valente J.M.S., Rui A.A.F.S.: Beam search algorithms for the single machine total weighted tardiness scheduling problem with sequence-dependent setup., Computers & Operations Research 35, 2008, 2388-2405.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Toczyłowski

Abstract

In this paper we propose a beam search algorithm to analyze an aocustic signals, which is based on FFT coding. This method can be used in situations when direct research is impossible or very difficult (i.e. big engines, elements of ships or aircrafts rotation elements). Calculations executed on representative group of benchmark instances show that the method has a big chance for application in the factory practice problems.