

Piotr Kruczek

Abstract for thesis

“Cyclostationary random sequences with stable noise and their applications”

This thesis is mainly devoted to three scientific fields: cyclostationary random sequences, stable distribution, and condition monitoring. We are joining all of these topics together to propose a new theory and methodology and fill the gap between them. It was observed that cyclostationary random sequences have found applications in many different fields. In particular, they are effectively applied in condition monitoring, especially for local damage detection in rotating elements such as gears and bearings. However, their definition assumes a finite variance of the analyzed data. This assumption can be too strict for many real data and there is a lack of appropriate methods for stable cyclostationary random sequences. For instance, machines operating under harsh conditions with many sources of contamination. Our motivation is to propose a robust methodology for local damage detection using the theory of stable cyclostationary random sequences. The idea came from the condition monitoring of the machines operating in the harsh mining environment. Vibration signals acquired on such machines are often highly impulsive and contaminated. Typically, methods based on finite variance distribution fail. Therefore, we propose novel methods that are appropriate for impulsive signals. Moreover, we introduce new definitions and theory for stable cyclostationary random sequences. The results obtained in this thesis were published in 9 articles.

In Chapter 2 a brief overview of cyclostationary random sequences, stable distribution, and condition monitoring is presented. We also highlighted the main articles where the intersection of these topics is presented. In addition, the last section is devoted to our contribution to the field.

Chapter 3 gathers crucial information related to periodically correlated random sequences. In the beginning, their definitions and main properties are presented. Then we briefly recall the unitary operators and their relation to the periodically correlated time series definition. The Wold decomposition for periodically correlated random sequences is also recalled. The important part of this chapter is devoted to cyclic spectral analysis. Finally, examples of second-order cyclostationary random sequences are presented.

Chapter 4 is devoted to stable distribution and time series. Firstly, the equivalent definitions, different parameterizations, and properties are presented. We also recall the definition of a stable random sequence. Then the alternative dependency measures for stable random variables and time series are recalled. Finally, the algorithms for simulation of stable random variables and estimators of stable distribution's parameters are presented.

Chapter 5 is one of the main part of the thesis. We introduce there the stable cyclostationary time series, namely, novel definitions based on alternative dependency measures. Moreover, we propose the generalized cyclic spectral analysis, which is appropriate for stable cyclostationary random sequences. Then examples of such a process are presented. For the simulated signals, we compare the classical approach (based on autocovariance function) with the novel one.

In Chapter 6 novel methods for stable cyclostationary random sequences in the time domain are proposed. In particular, estimators of the parameters of the periodic autoregressive model are described. Firstly, the classical Yule-Walker method is recalled. Then, two novel generalized Yule-Walker methods are proposed. The performance of the proposed estimators is tested on simulated and real data.

In Chapter 7 novel methods for stable cyclostationary random sequences in the frequency domain are proposed. These methods are applied for local damage detection in rotating machinery. First, the problem of local damage detection is briefly introduced. Then several new diagnostic methods are described in detail.

Chapter 8 is devoted to the application of the methods proposed in Chapters 5 and 7. We analyze the simulated and real vibration data. We consider signals acquired from two types of mining machinery (belt conveyor and crusher) and wind turbines. We verify that the proposed methods are powerful tools for local damage detection.

Piotr Kruczek

Streszczenie rozprawy doktorskiej

„Modelowanie cyklostacjonarnych szeregów czasowych z szumem stabilnym i ich zastosowanie”

Rozprawa doktorska skupia się na trzech zagadnieniach naukowych: cyklostacjonarnych szeregach czasowych, rozkładzie stabilnym oraz diagnostyce maszyn. Istotnym elementem rozprawy jest zaproponowanie nowej teorii łączącej te trzy tematyki. Cyklostacjonarne szeregi czasowe znajdują zastosowanie w wielu różnych obszarach. W szczególności, są bardzo skutecznym narzędziem do diagnostyki elementów maszyn pracujących w trybie obrotowym (np. łożyska lub przekładnie zębate). Klasyczna definicja cyklostacjonarnych szeregów czasowych zakłada, że analizowany szereg ma skończony drugi moment. W przypadku danych rzeczywistych to założenie często okazuje się nie być spełnione. Przykładowo sygnały rejestrowane na maszynach operujących w ciężkich warunkach i w obecności wielu źródeł szumu mają zazwyczaj charakter impulsowy i nie pochodzą z rozkładu o skończonej wariancji. W takich przypadkach klasyczne metody cyklostacjonarne okazują się być zawodne. Dlatego niezbędne jest zaproponowanie nowych metod, odpowiednich dla sygnałów pochodzących z rozkładów o nieskończonej wariancji. Głównym celem rozprawy było stworzenie nowej metodologii do analizy sygnałów cyklostacjonarnych z szumem stabilnym. Wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane w dziewięciu artykułach naukowych.

W rozdziale 2 przedstawiony jest przegląd literatury z obszarów cyklostacjonarnych szeregów czasowych, rozkładu stabilnego oraz diagnostyki maszyn. Wspomniane zostały również kluczowe prace, które łączą ze sobą wskazane obszary. Dodatkowo ostatnia część rozdziału pokazuje, jaki wkład w dotychczasowe badania wniosły wyniki uzyskane w ramach doktoratu.

Rozdział 3 jest poświęcony cyklostacjonarnym szeregom czasowym. Na wstępie przedstawiona jest ich definicja oraz najważniejsze własności. Następnie opisane są operatory unitarne oraz ich związek z szeregami cyklostacjonarnymi. Przedstawiona została również dekompozycja Wolda dla opisywanych szeregów. Dodatkowo opisana została analiza szeregów cyklostacjonarnych w dziedzinie częstotliwości. W rozdziale przedstawione są również przykłady szeregów czasowych wraz z symulacjami.

Rozdział 4 jest poświęcony rozkładowi stabilnemu. Przypomniana została definicja rozkładu wraz z różnymi parametryzacjami oraz własnościami. Dodatkowo przedstawiona jest definicja stabilnych szeregów czasowych. Następnie zaprezentowane zostały alternatywne miary zależności, odpowiednie dla stabilnym szeregów czasowych.

Rozdział 5 stanowi jedną z głównych części rozprawy. Wprowadzone zostały w nim definicje stabilnych cyklostacjonarnych szeregów czasowych bazujące na różnych miarach zależności. Ponadto wprowadzona została uogólniona koherencja spektralna. Ostatnia część rozdziału zawiera analizy danych symulacyjnych w celu porównania klasycznych metod z zaproponowanymi w ramach doktoratu.

W rozdziale 6 wprowadzone zostały metody do analizy stabilnych szeregów cyklostacjonarnych w dziedzinie czasu. W szczególności przedstawione zostały nowe estymatory parametrów dla stabilnych szeregów okresowych autoregresyjnych (PAR). W pierwszej kolejności przypomniana została klasyczna metoda Yule-Walkera. Następnie wprowadzono uogólnione metody Yule-Walkera wykorzystujące różne miary zależności. Estymatory zostały sprawdzone z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo.

Rozdział 7 poświęcony został nowym metodom do analizy stabilnych cyklostacjonarnych szeregów czasowych w dziedzinie częstotliwości. Na początku opisany został problem detekcji uszkodzeń lokalnych. Następnie zaproponowano nowe algorytmy do diagnostyki maszyn.

W rozdziale 8 przedstawione zostały zastosowania nowych metod (wprowadzonych w rozdziałach 5 i 7). Analizie poddane zostały sygnały symulowane oraz rzeczywiste rejestrowane za pomocą akcelerometrów. Badania przeprowadzone były na dwóch typach maszyn górniczych (przenośnikach taśmowych i kruszarce) oraz turbinach wiatrowych. Wykazano, że zaproponowane metody są efektywne w problemie wykrywania uszkodzeń lokalnych i dają lepsze wyniki niż klasyczne techniki.