

## Analiza i detekcja słuchowych potencjałów stanu ustalonego z zastosowaniem metod czasowo-częstotliwościowych

### Analysis and detection of auditory steady state responses by means of time-frequency methods

Wiktor W. Jędrzejczak, Krzysztof Kochanek, Lech Śliwa, Adam Piłka, Henryk Skarżyński

Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

#### Streszczenie

Słuchowe potencjały wywołane (Auditory steady state responses – ASSRs) są obecnie efektywnie wykrywane i analizowane w dziedzinie częstotliwości za pomocą analizy Fourierskiej. Jednakże odpowiedzi te są ukryte w sygnale elektroencefalicznym – EEG, a ich amplituda podlega fluktuacjom pomiędzy kolejnymi przebiegami pomiaru. Dlatego też wydaje się interesujące zbadanie czy można wydobyć czasowe właściwości tych odpowiedzi z EEG. W niniejszej pracy ewolucja odpowiedzi ASSR w czasie została zbadana za pomocą metod czasowo-częstotliwościowych. Do tego celu wykorzystano metodę aproksymacji adaptacyjnych. Najpierw analizowano sygnały symulowane i wpływ różnego poziomu szumu na detekcję odpowiedzi. Następnie dokonano analizy rzeczywistych sygnałów, a także podjęto próbę wykorzystania metod czasowo-częstotliwościowych do detekcji odpowiedzi.

**Słowa kluczowe:** elektrofizjologia, słuchowe potencjały wywołane, metody czasowo-częstotliwościowe.

#### Summary

Auditory steady state responses (ASSRs) are effectively detected and analyzed in frequency domain by Fourier analysis. However, the responses are hidden in EEG activity and there are fluctuations of their amplitude between trials. Therefore it seems interesting whether time properties of those responses can be extracted from EEG. In the present study time evolution of ASSRs was investigated by means of time-frequency methods. For this purpose high resolution algorithm of adaptive approximations was chosen. As a first step simulated signals were analyzed. The influence of noise and number of sinusoidal components was studied. Finally time-frequency properties of real recorded signals were investigated.

**Key words:** electrophysiology, auditory evoked potentials, time-frequency methods.

#### Wprowadzenie

Potencjały słuchowe stanu ustalonego (*auditory steady state responses* – ASSRs) zostały po raz pierwszy opisane przez Galambosa i innych w 1981 roku [Galambos (i in.) 1981]. Jednakże do końca ubiegłego wieku były stosowane tylko w celach badawczych. Gdy w ostatnich latach opracowano pierwsze, łatwe w obsłudze, urządzenia komercyjne [John, Picton 2000], metoda ta przeżyła gwałtowny rozkwit. ASSR są wywoływane poprzez szybką stymulację układu słuchowego, co prowadzi do nakładania się kolejnych odpowiedzi na siebie. W mózgu tworzony jest w ten sposób rodzaj stanu ustalonego odpowiedzi i można zmierzyć składowe potencjałów o częstotliwości odpowiadającej częstotliwości powtarzania bodźca akustycznego. Obecnie prowadzone są intensywne prace nad rozwojem tej metody, przede wszystkim nad opracowaniem nowych metod analizy sygnału odpowiedzi, które uczyniłyby tą metodę bardziej wiarygodną i użyteczną klinicznie. Pojawiają się nowe dziedziny zastosowań, w których technika odpowiedzi stanu ustalonego przynosi niespodziewanie dobre efekty (np. w badaniach

presiewowych słuchu, dopasowaniu aparatów słuchowych, itp.).

W niniejszej pracy do analizy sygnałów ASSR zastosowano metody czasowo-częstotliwościowe. Takie podejście uzasadnione było faktem że potencjały stanu ustalonego razem z aktywnością EEG – wbrew temu co sugeruje ich nazwa – są już sygnałem niestacjonarnym. Jest to widoczne już w trakcie pomiarów wykonywanych za pomocą komercyjnych systemów takich jak chociażby Master czy Audera. Śledząc kolejne stadia pomiaru można zauważyć nierównomierny przyrost mocy odpowiedzi w częstotliwościach stymulacji (Master) czy też duży rozrzut faz odpowiedzi (Audera). Interesujące zatem wydaje się być zbadanie jak często odpowiedzi pojawiają się w czasie.

Podstawową metodą czasowo-częstotliwościową jest okienkowa transformata Fouriera. Niestety nie jest ona w stanie zapewnić wystarczającej rozdzielczości w analizie ASSR. Nawet przy zastosowaniu klasycznej transformaty Fouriera, która umożliwia uzyskanie odpowiedniej rozdzielczości stosuje się kilkusekundowe okna analizy. Z tego

powodu praktycznie nie jest możliwe zmniejszenie wartości czasu analizy i jednocześnie wydobycie informacji o odpowiedziach.

W związku z powyższym do analizy czasowo-częstotliwościowej wykorzystano metodę aproksymacji adaptacyjnych – Dopasowanie Kroczące (*Matching Pursuit* – MP). Jest to iteracyjna, nieliniowa procedura rozkładająca sygnał na liniową sumę znanych funkcji wybranych z bardzo dużego zbioru funkcji. W tym przypadku zbiór ten został utworzony z sinusoid o obwiedni Gaussowskiej. Metoda MP rozkłada sygnał na komponenty o określonej częstotliwości, latencji, czasie trwania i amplitudzie.

## Material

Material badań stanowiły sygnały słuchowych potencjałów wywołanych stanu ustalonego zmierzone przez systemu MASTER (firmy Biologic). Stosowano stymulację obuuszną tonami o częstotliwościach 0,5, 1, 2, 4 kHz modulowanych częstotliwościami około 82, 84, 87, 89, 91, 94, 96, 99 Hz.

## Metoda

Algorytm Dopasowania Kroczącego został zaproponowany przez Mallata i Zhanga w 1993 roku [Mallat, Zhang 1993]. Metoda ta opiera się na adaptywnej dekompozycji sygnału na funkcje (zwane również atomami) z dużego i redundantnego zbioru funkcji (zwanego słownikiem). Słownik podstawowych funkcji można stworzyć na przykład poprzez skalowanie, przesuwanie i modulowanie funkcji okna. W rezultacie dostajemy rozkład złożonego sygnału na składowe o konkretnych częstotliwościach, dodatkowo opisane rów-

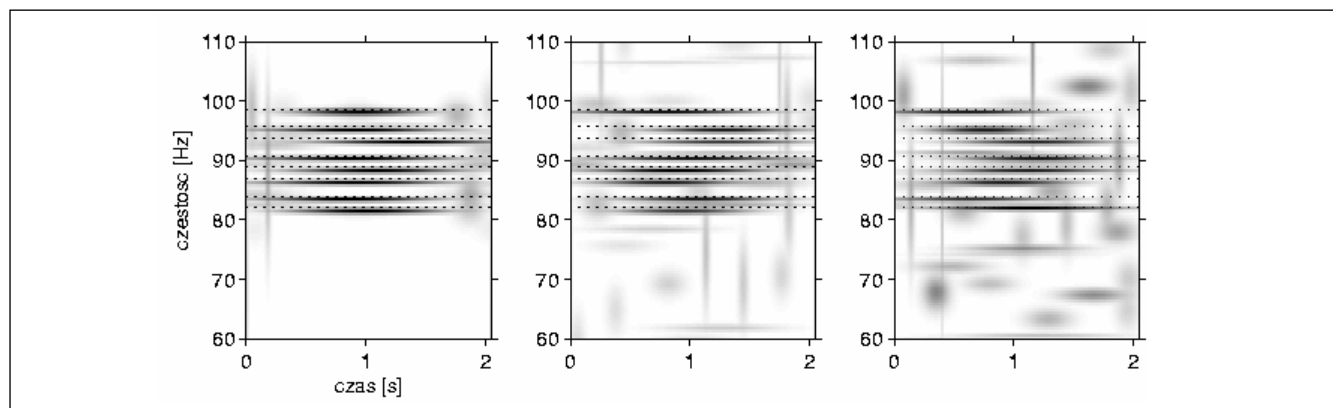
nież przez takie parametry jak amplituda, latencja, czas trwania i faza. Wyniki MP można zobrazować w przestrzeni czas-częstotliwość poprzez zastosowanie transformaty Wignera do każdej z wybranych funkcji. Dokładny opis procedury można znaleźć np. w [Jędrzejczak (i in.) 2004].

Na ryc. 1 pokazano zastosowanie metody MP do analizy sygnału symulującego zapis EEG z odpowiedziami ASSR. Utworzono sygnał złożony z 8 sinusoid i dodawano biały szum o amplitudzie 1 i 2 razy większej. Można zauważyć że nawet gdy amplituda szumu jest dwa razy większa metoda MP jest w stanie odnaleźć składowe oscylujące.

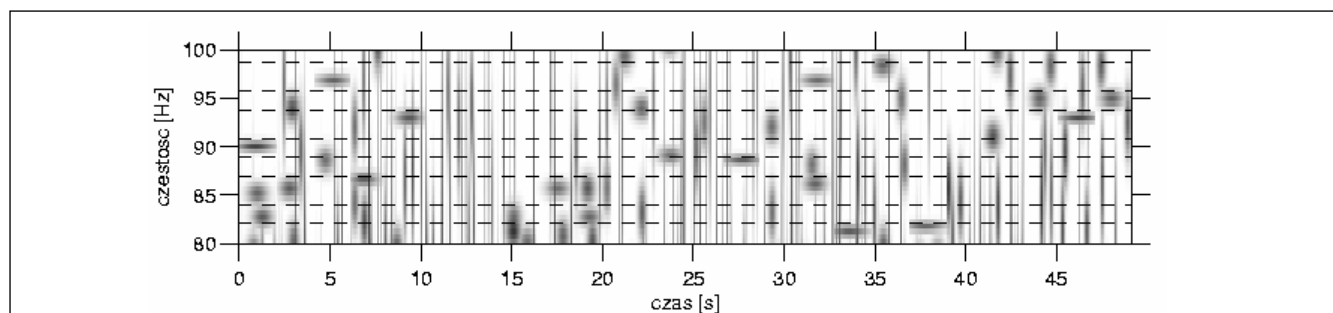
## Wyniki

### Ewolucja odpowiedzi ASSR w czasie

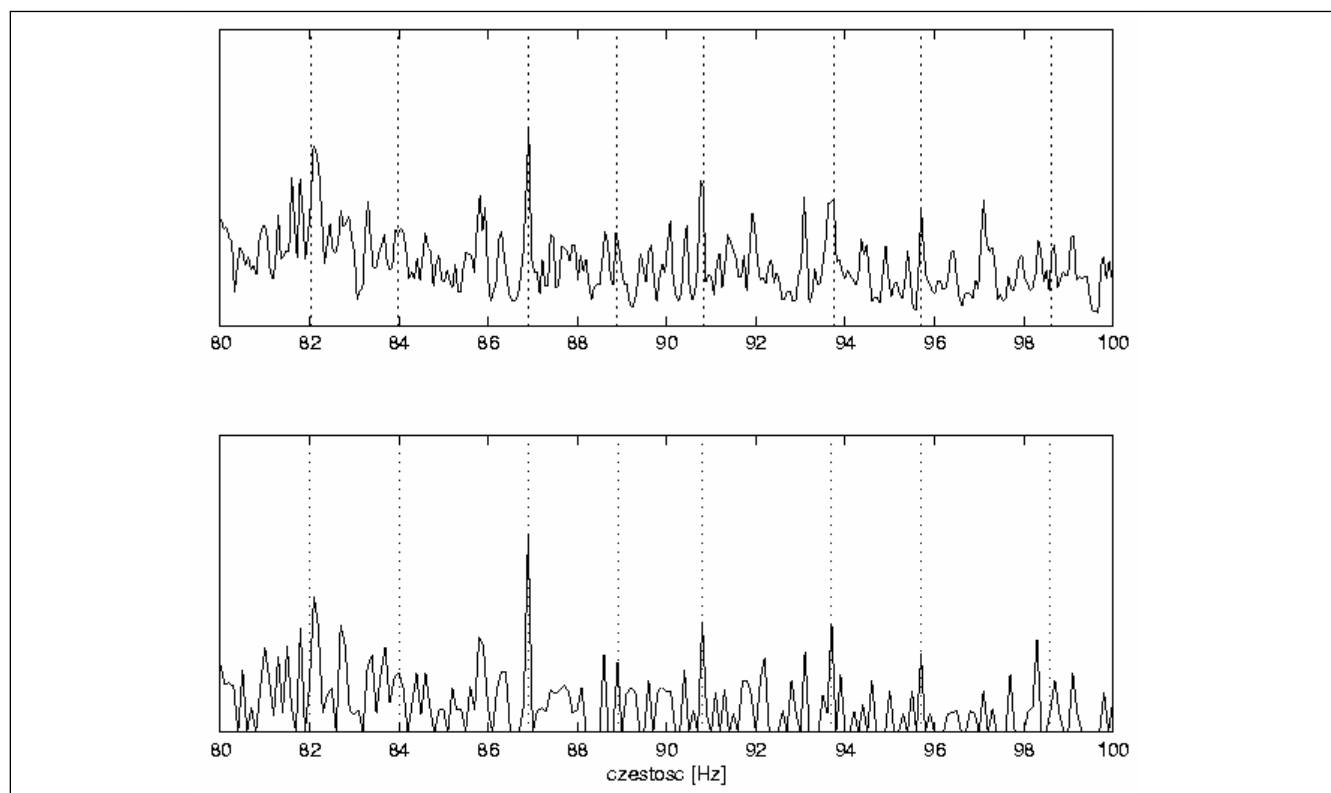
Dla zobrazowania przebiegu czasowego sygnału EEG, w którym spodziewamy się wykryć słuchowe potencjały stanu ustalonego można zastosować okienkową transformatę Fouriera. Jednakże wydobycie informacji o składowych ASSR z map uzyskanych z okienkowej transformaty Fouriera nie różniłoby się tak naprawdę od stosowanej zwykle metody opartej o klasyczną transformatę Fouriera. Dlatego do ekstrakcji poszukiwanych składowych znacznie lepiej nadaje się metoda Matching Pursuit. Wynikiem jej zastosowania nie jest sam rozkład gęstości energii w przestrzeni czas-częstotliwość lecz opisane parametrycznie poszczególne składowe sygnału. Można je przedstawić w postaci map czas-częstotliwość (ryc. 2) stosując transformatę Wignera.



Ryc. 1. Mapy gęstości energii w przestrzeni czas-częstotliwość uzyskane za pomocą algorytmu MP dla sygnału złożonego z 8 sinusoid, kolejno bez szumu i z białym szumem o amplitudzie 1 i 2 razy większej od amplitudy sinusoid. Liniami przerywanymi zaznaczono dodatkowo częstotliwości sinusoid



Ryc. 2. Mapa gęstości energii w przestrzeni czas-częstotliwość tego sygnału ASSR wywołanego bodźcami podawanymi do obydwu uszu wykonana za pomocą metody Matching Pursuit. Mapa przedstawia 48 sekund pomiaru



Ryc. 3. Widmo mocy dla sygnału ASSR. Góra: wykonane poprzez uśrednianie widm uzyskanych za pomocą FFT. Dół: wykonane poprzez uśrednianie widm uzyskanych za pomocą MP. Przerywane linie oznaczają częstotliwości stymulacji

### Detekcja odpowiedzi ASSR w oparciu o metodę MP

Jedną z najpopularniejszych metod detekcji odpowiedzi ASSR jest obliczanie widma sygnału i porównywanie energii w częstotliwościach stymulacji z energią sygnału w pozostałych częstotliwościach. Proces ten jest realizowany poprzez uśrednianie widm kolejnych odpowiedzi, a do samej detekcji używa się testu statystycznego. Jednym z najbardziej popularnych jest test F. Standardowo widma obliczane są za pomocą transformaty Fouriera. W niniejszych badaniach podjęto próbę zastosowania metody Matching Pursuit zamiast transformaty Fouriera. Na ryc. 3 przedstawiono porównanie tych dwóch podejść. Tym razem jednak zaprezentowano średnie z 9 widm liczonych na 16 sekundowych fragmentach sygnału. Na wykresach można zaobserwować, że widmo uzyskane za pomocą metody MP cechuje się niższym szumem i większym stosunkiem sygnału do szumu. Zaowocowało to zarówno przyspieszeniem detekcji o jeden krok jak i wykryciem większej liczby odpowiedzi.

### Dyskusja

Słuchowe potencjały stanu ustalonego cały czas budzą duże kontrowersje ze względu na nie do końca poznany mechanizm ich generacji i dosyć niski poziom tych odpowiedzi w porównaniu z szumem. Pomocą w ich zrozumieniu mogą służyć metody czasowo-częstotliwościowe, które coraz częściej pojawiają się w publikacjach dotyczących ABR np. [Bradley, Wilson 2004; Zhang (i in.) 2006]. Jednakże do tej pory nie stosowano ich do detekcji sygnałów ASSR.

Jednym z bardzo interesujących zagadnień jest detekcja odpowiedzi w szumie. Do tej pory stosowano do tego celu uśrednianie lub najbardziej podstawowe metody statystycz-

ne np. [Stapells (i in.) 1987; Sturzebecher (i in.) 2005]. Z uwagi na coraz doskonalszą konstrukcję aparatury i nowe metody analizy możliwe jest nowe podejście do tej problematyki. Metoda aproksymacji adaptacyjnych bardzo dobrze radzi sobie ze złożonymi sygnałami i potrafi wyłowić składowe oscylacyjne z szumu o dużo większej amplitudzie np. [Jędrzejczak (i in.) 2006].

Analiza czasowo-częstotliwościowa wykazała, że odpowiedzi ASSR nie pojawiają się w postaci długich fal sinusoidalnych, a raczej pojedynczych „paczek” odpowiedzi (ryc. 1), które wybijają się z szumu. Może to być wyjaśnieniem dla problemów związanych z tym pomiarem. Ze względu na dość rzadkie pojawianie się odpowiedzi potrzebny jest duży czas pomiaru. Często też się zdarza że wynik nie jest wiarygodny i powtarzalny.

Podobne wnioski można wysnuć porównując mapy sygnałów symulujących ASSR zawierających sinusoidy z szumem dodanym do map oryginalnych sygnałów. Występowanie pomiędzy nimi dużych różnic może wskazywać na fakt braku długich fal w odpowiedziach a występowanie raczej krótkich fal odpowiedzi, podobnie jak w sygnale słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu – ABR. Z drugiej strony długotrwała aktywność może być do tego stopnia zakryta szumem że nie można jej wykryć nie stosując uśredniania.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie procedury Matching Pursuit może pomóc w detekcji odpowiedzi. Bardzo duża rozdzielczość tej metody pozwala wykryć odpowiedzi w tych przypadkach, w których inne metody zawodzą.





## Bibliografia

- Bradley A. P., Wilson W. J. [2004]. On wavelet analysis of auditory evoked potentials. „Clinical Neurophysiology” 115, 1114-1128.
- Jędrzejczak W. W., Blinowska K. J., Konopka W., Grzanka A., Durka P. J. [2004]. Identification of otoacoustic emissions components by means of adaptive approximations. „Journal of the Acoustical Society of America” 115, 2148-2158.
- Jędrzejczak W. W., Blinowska K. J., Konopka W. [2006]. Resonant modes in transiently evoked otoacoustic emissions and asymmetries between left and right ear. „Journal of the Acoustical Society of America” 119, 2226-2231.
- Mallat S. G., Zhang Z. [1993]. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. „IEEE Transactions on Signal Processing” 41, 3397-3415.
- Stapells D. R., Makeig S., Galambos R. [1987]. Auditory steady-state responses: threshold prediction using phase coherence. „Electroencephalography and Clinical Neurophysiology” 67, 260-270.
- Sturzebecher E., Cebulla M., Elberling C. [2005]. Automated auditory response detection: statistical problems with repeated testing. „International Journal of Audiology” 44, 110-117.
- Zhang R., McAllister G., Scotney B., McClean S., Houston G. [2006]. Combining wavelet analysis and Bayesian networks for the classification of auditory brainstem response. „IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine” 10, 458-467.

