

Zestaw programów do badań psychoakustycznych

A set of programs for psychoacoustic experiments

Aleksander P. Sęk¹, Brian C. J. Moore²

¹) Katedra Akustyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

²) Department of Experimental Psychology, University of Cambridge
England Downing Street, Cambridge CB2 3EB, England

STRESZCZENIE

Bieżące prace eksperymentalne w zakresie psychoakustyki prowadzone są głównie za pomocą komputera służącego zarówno do generowania i prezentacji bodźców jak również do gromadzenia odpowiedzi słuchaczy w oparciu o specjalistyczny program. Stworzenie takiego oprogramowania jest czasochłonne i wymaga wiedzy technicznej, co w przypadku początkujących badaczy może być sporym wyzwaniem. Dlatego też celem niniejszej pracy było opracowanie pakietu aplikacji, który umożliwia konfigurację i prowadzenie szerokiej gamy eksperymentów w dziedzinie psychoakustyki bez potrzeby każdorazowego przygotowywania oprogramowania. Jedyne wymagania tego zestawu programów to komputer osobisty (PC) z dobrej jakości kartą dźwiękową i zestawem słuchawek. W prezentowanym zestawie programów parametry definiujące niezbędne bodźce oraz procedurę eksperymentalną wprowadza się za pomocą odpowiednich pól na ekranie i rozwijanych menu. Eksperymenty które można prowadzić za pomocą tego zestawu obejmują pomiar progu słyszalności, maskowanie wsteczne, jednoczesne i resztkowe; komodulacyjne odmaskowanie (CMR); dyskryminację natężenia i częstotliwości, detekcję i dyskryminację modulacji amplitudowej, częstotliwościowej i mieszanej, zaburzenie detekcji/dyskryminacji modulacji (MDI); wyznaczanie zaledwie spostrzeganej międzyusznnej różnicy czasu i natężenia, detekcję przerw czasowych w sygnale, pomiar wrażliwości na czasową strukturę subtelną sygnału, wyznaczenie binauralnej różnicy poziomów maskowania czy też w końcu wyznaczenie psychofizycznych krzywych strojenia w oparciu o metodę szumu przestrajanego (Fast PTC). Prezentowane oprogramowanie może być przydatne zarówno w prowadzeniu bieżących badań w zakresie percepcji słuchowej jak i dla studentów akustyki i dziedzin pokrewnych dając im możliwość przeprowadzenia samodzielnych eksperymentów psychofizycznych, co z pewnością wzbogaci ich wiedzę w zakresie percepcji słuchowej.

Słowa kluczowe: diagnozowanie słuchu, psychoakustyka

ABSTRACT

Ongoing experimental work in the field of psychoacoustics is mainly carried out using a computer that is used both to generate and present stimuli and to collect listeners' responses. Preparation of such specialized software is time consuming and requires technical knowledge, which in the case of beginner researchers can be a challenge. Therefore, the purpose of this work was to develop a software package that allows the user to configure and conduct a wide range of experiments in the field of psychoacoustics without the need for time-consuming software preparation. In the presented set of programs, the parameters defining the stimuli and the experimental procedure are entered using appropriate fields on the screen and drop-down menus. Experiments that can be carried out include measurement of absolute threshold, backward, simultaneous and forward masking; comodulation masking release (CMR); intensity and frequency discrimination; detection and discrimination of amplitude and frequency modulation; modulation detection/discrimination interference (MDI); thresholds for detecting interaural time and intensity differences, detection of temporal gaps in a signal, measurement of sensitivity to the temporal fine structure of a signal (TFS), determination of the binaural masking level difference (BMLD), and the determination of psychophysical tuning curves using the fast method (Fast PTC). The software can be useful both for ongoing research in the field of auditory perception and for students of acoustics (or related fields) by giving them the opportunity to conduct independent psychophysical experiments, which will certainly enrich their knowledge in the field of auditory perception.

Key words: hearing diagnosis, psychoacoustics

1. Wprowadzenie

Badania w zakresie psychofizyki słuchu polegają w głównej mierze na prezentowaniu słuchaczom odpowiednich bodźców akustycznych i rejestrowaniu ich odpowiedzi na ściśle sprecyzowane i jednoznacznie brzmiące pytanie. Parametry fizyczne kolejno prezentowanych bodźców dobierane są w szczególności tak, by dążyć do wyznaczenia progów spostrzegania pewnej cechy sygnałów lub też zaledwie spostrzeganych

różnic pomiędzy prezentowanymi bodźcami. Powszechność dostępu do komputerów wyposażonych w karty dźwiękowe umożliwia zastosowanie ich do badań tego typu, choć przygotowanie specjalistycznego programu generującego odpowiednie bodźce i rejestrującego odpowiedzi słuchaczy stanowi niejednokrotnie poważną przeszkodę. Ponadto, badania psychofizyczne związane z percepcją bodźców słuchowych wymagają zastosowania odpowiednich metod psychologii eksperymentalnej, co również stanowi przeszkodę na drodze do samodzielnego przygotowania odpowiednich testów.

¹e-mail: olekseka@amu.edu.pl

²e-mail: bcjm@cam.ac.uk

Dlatego też zasadniczym celem niniejszej pracy było stworzenie możliwie jak najszerszego zestawu programów komputerowych pozwalających na prowadzenie zarówno podstawowych jak i zaawansowanych badań w dziedzinie akustyki psychofizjologicznej bez konieczności każdorazowego przygotowania złożonego zestawu eksperymentalnego. Stanowią go programy do wyznaczenia progu słyszalności, analizy wielu aspektów jednoczesnego i niejednoczesnego maskowania czy też wyznaczenia kształtu (charakterystyki) filtrów słuchowych. Obejmują one również możliwość analizy dyskryminacji natężenia i częstotliwości dla różnego typu sygnałów. Jego zastosowanie umożliwia analizę zaledwie spostrzegalnych międzysłuchowych różnic pomiędzy sygnałami (ITD & IID), a także binauralnej różnicy poziomów maskowania (BMLD). Oprócz wymienionych powyżej podstawowych eksperymentów z zakresu psychofizyki słuchu zestaw ten umożliwia prowadzenie bardziej zaawansowanych badań. W tym też celu zaimplementowano w nim kilka procedur bazujących na szybkiej metodzie wyznaczania psychofizycznych krzywych strojenia (Fast PTC) oraz grupę programów służących do analizy przetwarzania informacji zawartych w subtelnej strukturze czasowej sygnałów (TFS) zarówno w ujęciu monauralnym jak i binauralnym.

Omawiany tu zestaw programów może być z powodzeniem wykorzystany do głębszej i bardziej drobiazgowej analizy właściwości słuchu w gabinetach zarówno lekarskich jak i w punktach dopasowania aparatów słuchowych. To właśnie tam osoby z niedosłuchem szukają w pierwszej kolejności pomocy by poprawić sobie komfort życia poprzez poprawę komunikacji z innymi osobami i środowiskiem. Analiza słuchu, lub szerzej układu słuchowego, nie sprowadza się z pewnością wyłącznie do audiogramu, i przeprowadzenie dodatkowych, specjalistycznych badań jest niezbędne. Wydaje się, że zbiór prezentowanych tu testów może stanowić cenne uzupełnienie badań słuchu zmierzających do zastosowania i doboru optymalnych parametrów pracy aparatu słuchowego. Umożliwi to z pewnością poprawę komfortu życia osób z niedosłuchem.

W prezentowanym zestawie programów znajduje się cała gama testów umożliwiających przeanalizowanie funkcjonowania układu słuchowego pod różnym kątem, tzn. zarówno pod względem czułości słuchu na pojawienie się pewnej cechy dźwięku (progi) jak również czułości słuchu na zmianę wybranego parametru dźwięku (progi różnicowe). Znakomita większość prezentowanych testów to testy monauralne. Jednak równie ważnymi testami w tym zestawie są te, które umożliwiają analizę słuchowych zjawisk binauralnych. Jeden z testów, umożliwia analizę wrażliwości na międzysłuchową różnicę natężeń czy też fazy sygnału w obu uszach. Wrażliwość ta pozwala na lokalizację źródła dźwięku w przestrzeni i dzięki temu odgrywa jedną z najważniejszych funkcji całego układu słuchowego. Zwracając głowę w kierunku naszych rozmówców, mimowolnie niejako, minimalizujemy międzyuszną różnicę poziomu natężenia i fazy sygnału w obu uszach, co prowadzi bezpośrednio do poprawy stosunku sygnału do szumu, a dalej do wzrostu zrozumiałości mowy i komfortu życia. Analiza wrażliwości na międzysłuchową różnicę natężenia i fazy, której dokonać można również w ramach wyznaczania tzw. binauralnej różnicy poziomów maskowania (BMLD),

nawet w najprostszej jego wersji (sygnał S_0 i S_{π}), może wydanie pomóc w pełnej diagnozie układu słuchowego. Wydaje się że PSYCHOACOUSTICS, jako zbiór testów słuchowych, może być cenną pomocą w jak najdokładniejszej diagnozie słuchu.

2. Instalacja pakietu

Instalacja programu jest typowym procesem instalacji nowego programu, która po uruchomieniu pliku PSYCHO_Install.msi sugeruje zainstalowanie go w katalogu C:\users\public\PSYCHOACOUSTICS, by wszyscy użytkownicy mieli do niego dostęp. Procedura ta tworzy odpowiednie katalogi i instaluje ikonę na pulpicie służącą do uruchamiania programu. Niezbędnymi urządzeniami do pełnego wykorzystania tego zestawu programów, oprócz komputera PC z systemem operacyjnym od Windows XP do Windows 10, jest karta dźwiękowa oraz słuchawki. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie 24 bitowej zewnętrznej karty dźwiękowej w metalowej lub metalizowanej obudowie celem ograniczenia wpływu zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych oraz słuchawek stereofonicznych o podwyższonej jakości, np. Sennheiser 580 do 630.

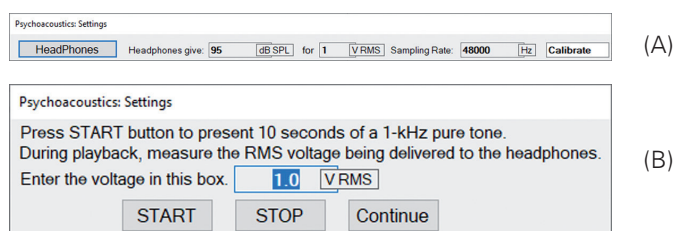
Pierwsze uruchomienie programu kończy się komunikatem o konieczności wyłączenia sygnałów kontrolnych systemu Windows. By zapobiec ich generowaniu w czasie prowadzenia badań, celowo zrezygnowano z automatycznej kontroli ich poziomu czy też wprost z wyłączenia tych dźwięków za pomocą funkcji systemu. Informacja ukazująca się na ekranie umożliwia dotarcie do sekcji Windows odpowiedzialnej za dźwięki systemu i wybranie opcji No Sound. Jej wybór kończy działanie programu, który po ponownym uruchomieniu wymaga przeprowadzenia kalibracji (Settings) całego systemu. Jest to krok niezbędny, bowiem brak kalibracji uniemożliwia korzystanie z tego zestawu programów.

3. Kalibracja

Kalibracja systemu (komputer, karta dźwiękowa i słuchawki) jest niezbędna i należy ją wykonać, bowiem bezpośrednio po zainstalowaniu żaden z programów zestawu nie jest dostępny. Naciśnięcie przycisku Settings powoduje wyświetlenie okna kalibracji, w którym należy zaktualizować wszystkie dane (Rys. 1A). Każda para słuchawek charakteryzuje się inną skutecznością, tzn. poziomem natężenia dźwięku o częstotliwości 1 kHz, gdy dostarczany do nich sygnał o napięciu 1 V RMS. Informacje te dostępne są zazwyczaj w technicznej specyfikacji parametrów słuchawek. Aby poprawnie przeprowadzić kalibrację należy dołączyć słuchawki do karty dźwiękowej tak, by mieć możliwość pomiaru napięcia sygnału zasilającego słuchawki, by wprowadzić te dane w odpowiednie pola procedury kalibrującej.

Program umożliwia zastosowanie wielu rodzajów słuchawek, których charakterystyki częstotliwościowe zapisywane są w podkatalogu Headphones i są typowymi plikami tekstowymi. Niezależnie od tego, że kilka przykładowych charakterystyk typowych słuchawek jest zawartych w ww. podkatalogu, to program pozwala na dodawanie kolejnych słuchawek jako odrębnych urządzeń możliwych do wykorzystania w badaniach

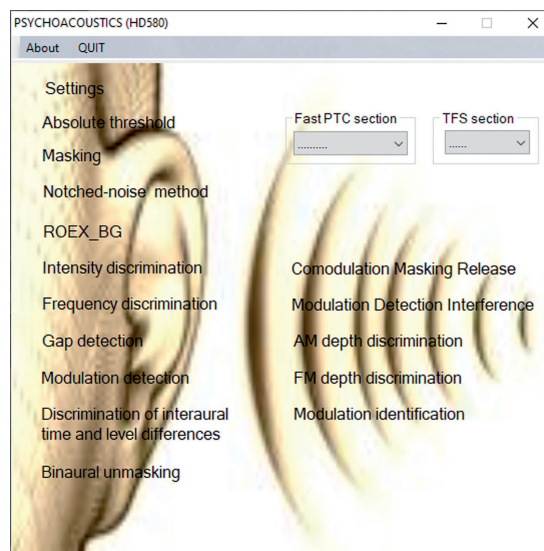
eksperymentalnych. Charakterystyki słuchawek podaje się zwykle w kilku wariantach, tzn. bądź jako poziom dźwięku w funkcji częstotliwości na wejściu do kanału słuchowego zewnętrznego, bądź jako poziom sygnału przy błonie bębenkowej, w funkcji częstotliwości. Wybór słuchawek pozwala na obliczenie charakterystyki wzmocnienia całego zestawu w całym paśmie częstotliwości (20 Hz do 20 kHz). Charakterystykę słuchawek podaje się zwykle w przedziale od 125 Hz do 8 lub 10 kHz. Ponieważ system pozwala na generację sygnałów od 20 Hz do 20 kHz, to dla częstotliwości nie objętych danymi fabrycznymi, charakterystyka jest liniową aproksymacją dokonaną na podstawie poziomów dla dwóch najniższych i dwóch najwyższych częstotliwości. Kolejnym krokiem kalibracji jest podanie skuteczności słuchawek, tj. liczbę decybeli na ich wyjściu (Headphones give) przy zasilaniu sygnałem 1 V RMS. Naciśnięcie przycisku Calibrate powoduje generację 10 sekundowego odcinka tonu o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie 1 (plik .wav) przy szybkości próbkowania 48 kHz (Rys. 1B). W czasie generowania tonu należy ustawić wzmocnienie w oknie Sound mikser systemu Windows na pozycję około 90-95% wartości maksymalnej oraz zmierzyć napięcie jakim zasilane są wówczas słuchawki. Wartość tego napięcia należy wpisać w pojawiające się pole (Rys. 1B) i zaakceptować wybór (generowanie tonu kalibracyjnego można powtarzać wielokrotnie). Zakończenie kalibracji (przycisk Continue) powoduje wyświetlenie informacji o dostępnym zakresie poziomów natężeń tonów i pasm szumu oraz odblokowuje dostęp do pozostałych składników programu. Zaakceptowanie wprowadzonego napięcia powoduje również zapamiętanie go, jak i pozycji wszystkich suwaków Sound mixer. Rozpoczęcie jakiegokolwiek eksperymentu dostępnego w zestawie przywołuje zapamiętane ustawienia tak, że kalibracja wykonana jeden raz wystarczy do prowadzenia badań w dowolnym czasie. Jednak zmiana karty dźwiękowej lub/i słuchawek wiąże się z koniecznością ponownej kalibracji. Warto dodać, że szybkość próbkowania sygnałów w całym zestawie programów została ustalona na 48 kHz, a pole Sampling rate jest typu Read only.



Rys. 1. (A) Okno kalibracji programu umożliwiające wprowadzenie podstawowych danych dotyczących słuchawek. (B) okno generacji sygnału testowego i miejsce wprowadzenia zmierzonego napięcia po uprzednim ustawieniu wzmocnienia karty dźwiękowej w Sound mikser systemu Windows na pozycję około 90-95%

Pomyślne zakończenie kalibracji powoduje wyświetlenie głównego okna programu Psychoacoustics przedstawionego na Rys. 2, które umożliwia wybór odpowiedniej aplikacji. Dokonanie wyboru prowadzi do wyświetlenia głównego okna każdego z dostępnych eksperymentów i daje możliwość uzupełnienia danych dotyczących parametrów sygnałów,

możliwość wyboru metody badawczej oraz rozpoczęcie badań. Lista dostępnych aplikacji jest dość długa a opis jej poszczególnych elementów zamieszczono poniżej.



Rys. 2. Główne okno Psychoacoustics umożliwiające wybór odpowiedniego programu do badań

4. Metody badawcze

Niezależnie od wyboru typu eksperymentu, w każdym przypadku niezbędne jest wprowadzenie nazwy słuchacza (Subject name) oraz dokonanie wyboru ucha (Test ear) do którego dostarczane będą bodźce, co przedstawiono na Rys. 3 ilustrującego główne okno przykładowej aplikacji umożliwiającej pomiar progu detekcji modulacji. Nazwa słuchacza bądź jego inicjały, a także wszystkie poprawnie wprowadzone parametry wybranego eksperymentu, stanowią podstawę do utworzenia unikalnego pliku wejściowego i automatycznego zapisania go w odrębnym (dla eksperymentu i słuchacza) katalogu i pliku tekstowym z rozszerzeniem *.in. Podstawowymi składnikami nazwy pliku wejściowego są nazwa słuchacza, bieżąca data oraz numer kolejnego pomiaru danego dnia.

Aplikacje dostępne w ramach zestawu wykorzystują metodę dwu- lub trój-alternatywnego wymuszonego wyboru (Method 2AFC lub 3AFC, [1]) bądź też bazują na wyznaczaniu funkcji psychometrycznych. W znakomitej większości dostępnych eksperymentów wyboru metody, reguły decyzyjnej oraz liczby punktów zwrotnych dokonuje się w polu Method/Procedure, co na przykładzie programu umożliwiającego pomiar progów detekcji modulacji (AM lub FM) przestawiono na Rys. 3.

W przypadku metod wymuszonego wyboru słuchaczom prezentowane są dwa (2AFC) lub trzy (3AFC) interwały obserwacyjne, z których tylko jeden zawiera sygnał (lub sygnał o zmieniających się parametrach). Zadaniem słuchacza jest wskazanie tego właśnie interwału. W czasie trwania eksperymentu wartość sygnału (lub jego wybranego, analizowanego parametru, np. głębokości modulacji czy też dewiacji częstotliwości) ulega zwiększeniu po każdej niepoprawnej odpowiedzi

(1u). Jednak zmniejszenie sygnału następuje po dwóch (2d) lub trzech (3u) występujących kolejno po sobie odpowiedziach poprawnych, [2]. Liczbę poprawnych odpowiedzi prowadzących do zmniejszenia (parametru) bodźca można wybrać w polu Decision rule (2d1u lub 3d1u). Prowadzenie eksperymentu w oparciu o te metody zmierza do wyznaczenia punktów zwrotnych, tj. tych wartości analizowanego parametru bodźca, dla których następuje odwrócenie kierunku zmian (parametru) bodźca, ze zmniejszania na zwiększanie lub odwrotnie.

Rys. 3. Strona główna jednej z aplikacji zestawu (pomiar progów detekcji modulacji). Lewy górny panel umożliwia wprowadzenie danych słuchacza zaś prawy dolny wybór metody badawczej, procedury adaptacyjnej oraz liczby punktów zwrotnych

Punkty te są niejako pośrednim rezultatem eksperymentu i na ich podstawie obliczany jest ostateczny wynik pojedynczego pomiaru. Liczba punktów zwrotnych (No. of turnpoints) jest wyborem arbitralnym i może być równa $N=8$, 10 lub 12. Ostateczna wartość progu jest obliczana jako średnia z ostatnich punktów zwrotnych z pominięciem pierwszych dwóch (dla $N=8$) lub pierwszych czterech (dla $N=10$ i 12) z nich.

Istotnym elementem procedur adaptacyjnych jest tzw. krok zmian analizowanego parametru sygnału (np. dewiacji częstotliwości, Δf , w przypadku detekcji modulacji częstotliwościowej). W obrębie pierwszych dwóch punktów zwrotnych wartość tego parametru dla interwału z sygnałem mnożona lub dzielona jest przez 1.25^3 , a dla trzeciego i czwartego punktu zwrotnego przez 1.25^2 . Dla pozostałych punktów zwrotnych wartość ta mnożona/dzielona jest przez 1.25. W przypadku gdy adaptacyjnie zmienianą wielkością jest poziom dźwięku (lub inna wielkość w skali logarytmicznej), to krok zmian jest równy 4 dB dla pierwszych dwóch punktów zwrotnych, 2 dB dla dwóch kolejnych i 1 dB dla pozostałych punktów zwrotnych.

Zmierzając do wyznaczenia funkcji psychometrycznej należy określić pięć wartości wybranego parametru sygnału. Sygnały z tymi wartościami wybranego parametru prezentowane są w seriach po 30 (pięć razy każda wartość) bądź po 55 (10 razy każda wartość) par w dowolnym (losowym zazwyczaj) porządku. Rezultatem tych pomiarów jest liczba poprawnych odpowiedzi uzyskanych dla każdej z wybranych wartości analizowanego parametru, co stanowi kolejne wartości funkcji psychometrycznej. Ta procedura eksperymentalna zastosowana

została w odniesieniu do pomiaru progów dyskryminacji modulacji (AM i FM) oraz do identyfikacji rodzaju modulacji.

W obrębie każdego z eksperymentów możliwe jest zapisanie (Save) bądź przywrócenie (Load) plików wejściowych, co znacząco ułatwia obsługę wszystkich programów. Okno Pocket help sugeruje dozwolone wartości poszczególnych parametrów sygnału lecz tylko w chwili, gdy wskaźnik myszy znajduje się w polu odpowiedniego parametru.

Rys. 4. Przykładowe okno umożliwiające udzielanie odpowiedzi przez słuchacza

Odtwarzanie sygnału w każdym interwale obserwacyjnym sygnalizowane jest we wszystkich aplikacjach zestawu poprzez chwilową zmianę kolorów pól ('1', '2' i '3') na zielony a informacja o poprawności odpowiedzi jest dostępna dla słuchacza. Przykładowe okno umożliwiające udzielanie odpowiedzi przez słuchacza (Response box) dla metody 3AFC przedstawiono na Rys. 4. Możliwość wyłączenia informacji zwrotnej dla słuchacza istnieje tylko w przypadku pomiaru progu słyszalności. Przycisk Start obecny w każdej aplikacji, nie tylko uruchamia ją lecz także zapisuje dane wejściowe w odrębnym pliku tekstowym (*.in) w tworzonym automatycznie katalogu dla danego eksperymentu i słuchacza.

Pojedynczy pomiar kończy się w momencie uzyskania zadeklarowanej liczby punktów zwrotnych. Rezultaty każdego pojedynczego pomiaru zapisywane są w odrębnym pliku tekstowym (*.out), a informacja o lokalizacji tego pliku dostępna jest na ekranie. Nazwy tych plików oraz katalogi do których są zapisywane tworzone są automatycznie i uwzględniają nazwę zarówno eksperymentu (katalog), słuchacza, bieżącą datę i numer pomiaru danego dnia. Dla każdej z aplikacji załączono przykładowy plik wejściowy (Read only), by ułatwić korzystanie ze wszystkich z nich.

Ważnym elementem eksperymentu słuchowego przy wykorzystaniu jednej z metod wymuszonego wyboru jest wartość różnicy analizowanego parametru bodźca (np. głębokości modulacji amplitudowej) na początku każdego pomiaru. Tę początkową wartość należy dobrać tak, by w obrębie pierwszych kilku prezentacji par (trypletów) sygnałów słuchacz udzielał wyłącznie poprawnych odpowiedzi. Innymi słowy: należy zaprezentować słuchaczowi sygnały zdecydowanie różniące się, by umożliwiło to udzielenie poprawnej odpowiedzi.

5. Omówienie kolejnych aplikacji

Niezależnie od wyboru rodzaju eksperymentu, tylko poprawne

wypełnienie wszystkich wymaganych pól pozwala na rozpoczęcie eksperymentu (przycisk Start). Jednak każda z załączonych procedur eksperymentalnych wyposażona jest w moduł sprawdzający poprawność wartości wszystkich parametrów. Do każdej z procedur dołączonych jest kilka przykładowych plików wejściowych (Read only), które można odczytać za pomocą klawisza Load. Mogą one służyć do stworzenia własnych zestawów tych plików poprzez zmianę ich nazwy (nazwy słuchacza). Każdorazowe naciśnięcie przycisku Start uruchamia wybrany eksperyment i wyświetlenie okna odpowiedzi słuchacza. Eksperyment można zatrzymać w dowolnej chwili. Jednak zatrzymanie takie, przed uzyskaniem założonej liczby punktów zwrotnych, nie prowadzi do zapisu żadnych danych wyjściowych. Zapis danych uzyskanych w ramach pojedynczego pomiaru następuje automatycznie, lecz wyłącznie po uzyskaniu ostatniego z zaplanowanych punktów zwrotnych.

W prawym górnym rogu każdej z aplikacji wyświetlane jest okno Pocket help. Przedstawiane w nim informacje związane są z każdym niemal polem wyboru każdej aplikacji sugerując zakresy dozwolonych parametrów w polach, które aktualnie podlegają edycji.

5.1. Róg słyszalności (Absolute threshold)

Wybranie tej opcji pozwala na wyznaczenie progu słyszalności za pomocą metody 2 lub 3AFC. Niezbędne jest tu podanie nazwy słuchacza (inicjały, imię) symbol testowanego ucha (L lub P), początkowego poziomu sygnału oraz jego częstotliwości. Należy także zdecydować o czasie trwania interwałów obserwacyjnych i interwałe pomiędzy nimi. Dodatkowo należy zdecydować o wyborze metody oraz o sprzężeniu zwrotnym (tj. informowaniu słuchacza o wartości logicznej jego odpowiedzi). Pomiar progu słyszalności związany jest z prezentowaniem interwałów obserwacyjnych które nie zawierają sygnału dźwiękowego, a są jedynie sygnalizowane poprzez zmianę koloru poszczególnych pól w Response box, co może stanowić pewne utrudnienie dla słuchaczy.

Z uwagi na ograniczoną dynamikę kart dźwiękowych pomiaru progu absolutnego warto dokonywać przy zastosowaniu dodatkowego pasywnego tłumika (np. 40 dB) włączonego na wyjściu karty dźwiękowej. Jednak wymaga to dodatkowej kalibracji całego systemu. Uzyskanie założonej liczby punktów zwrotnych kończy automatycznie pomiar generując plik wyjściowy zawierający wszystkie dane wejściowe, punkty zwrotne, wartość średnią progu oraz jego odchylenie standardowe. Plik ten zapisany w głównym katalogu Psychoacoustics w automatycznie zakładanym podkatalogu ...\\AbsTh\\OUT_data\\słuchacz\\. Aplikacja ta nie daje możliwości sterowania czasem narastania i zaniku sygnału, które to zostały ustalone na 20 ms każdy.

5.2. Maskowania (Masking)

Aplikacja ta umożliwia wyznaczenie progu detekcji sygnału w warunkach maskowania jednoczesnego (SIM), wstecznego (BACK) oraz resztkowego (FOR). Niezależnie deklarowane czasy trwania sygnału maskowanego (Signal duration)

i maskera (Masker duration) oraz momenty ich rozpoczęcia (Asynchrony) pozwalają na dowolne usytuowanie sygnału w obrębie maskera (Asynchrony >= 0), przed maskerem (Asynchrony < 0) lub za maskerem. Również czasy narastania/wybrzmiewania tych sygnałów są od siebie niezależne. Sygnałem maskującym jest dowolne pasmo szumu, którego poziom można określić poprzez poziom całkowity (dB) bądź poprzez widmową gęstość mocy (dB/Hz). Adaptacyjnym zmianom w ramach wybranej metody może podlegać bądź sygnał, przy ustalonym poziomie maskera, bądź masker przy ustalonym poziomie sygnału. Pierwszy ze sposobów prowadzi do wyznaczenia tzw. krzywych maskowania, czyli zależności poziomu sygnału na progu słyszalności od jego częstotliwości. Drugi sposób prowadzi do wyznaczenia poziomu sygnału maskującego w funkcji jego częstotliwości środkowej, który maskuje stały w czasie ton. Krzywa określona w ten sposób nazywana jest psychofizyczną krzywą strojenia (Psychophysical Tuning Curve, PTC). Warto dodać, że aplikacja ta umożliwia powtórzenie wielu klasycznych eksperymentów Fletchera [3] i Zwickera [4], których rezultaty legły u podstaw modelu funkcjonowania słuchu jak również zaprojektowanie nowego oryginalnego eksperymentu.

5.3. Metoda szumu pasmowo-zaporowego (Notched-noise method)

Jest to implementacja metody szumu pasmowo-zaporowego służąca do wyznaczania charakterystyki filtra słuchowego [5, 6]. Jest to eksperyment maskowania tonu za pomocą dwóch pasm szumu usytuowanych (najczęściej) symetrycznie względem tonu. Odległość dolnego pasma szumu maskującego od tonu w dziedzinie częstotliwości określa parametr g_l zdefiniowany następująco:

$$g_l = \frac{f_0 - f_u}{f_0} \quad (1)$$

gdzie f_0 oznacza częstotliwość tonu a f_u górną częstotliwość odcięcia dolnego pasma szumu. Analogiczny parametr górnego pasma, g_u , oznacza różnicę dolnej częstotliwości odcięcia górnego pasma f_d szumu i częstotliwości tonu odniesionej do częstotliwości tonu:

$$g_u = \frac{f_d - f_0}{f_0} \quad (2)$$

Najważniejsze parametry opisujące oba pasma szumu są niezależne. Jednak czas trwania pasm, czasy ich narastania oraz sposób określania ich poziomu (dB vs dB/Hz) jest dla obu pasm jednakowy. Czas trwania sygnału oraz moment jego załączenia (Asynchrony) muszą być dobrane tak, by sygnał rozpoczął się nie wcześniej niż masker a zakończył się nie później niż sygnał maskujący. Umożliwia to usytuowanie sygnału wyłącznie podczas trwania maskera, ale nie poza nim (maskowanie jednoczesne). Wybór metody pomiarowej, liczby punktów zwrotnych oraz procedury adaptacyjnej jest analogiczny jak we wszystkich innych aplikacjach tego zestawu. Na Rys. 5 zilustrowano główne okno tej części pakietu.

Warto dodać, że wyznaczenie charakterystyki filtra słuchowego dla danej częstotliwości wymaga pomiaru progów masko-

wania dla co najmniej trzech różnych wartości parametrów g_l i g_u (które są sobie najczęściej równe), a wyznaczenie charakterystyki filtra słuchowego na podstawie tak uzyskanych danych dokonuje się za pomocą programu ROEX_BG (patrz poniżej).

Rys. 5. Główne okno programu Notched-noise method służącego do wyznaczenia progów maskowania tonu za pomocą dwóch pasm szumu. Wyznaczone w ten sposób dane umożliwiają określenie podstawowych parametrów filtra słuchowego o zadanej częstotliwości środkowej

5.4. ROEX_BG

Jest to aplikacja umożliwiająca wyznaczenie charakterystyki filtra słuchowego na podstawie danych uzyskanych w eksperymencie Nothed-noise method [6]. Informacje pojawiające się w Pocket help jednoznacznie opisują znaczenie wartości parametrów, które należy wprowadzić w odpowiednie pola aplikacji. Charakterystyka filtra słuchowego $H(f)$ opisywana jest najczęściej za pomocą funkcji roex(pg) o następującej postaci:

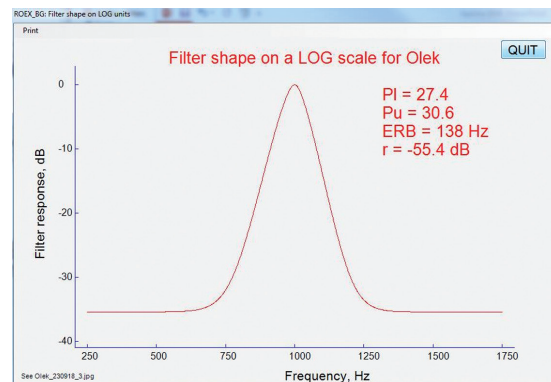
$$|H(f)|^2 = (1 + pg)e^{-pg}, \quad (3)$$

gdzie parametr p określa nachylenie tej funkcji a g jest jej argumentem wyrażającym względną częstotliwość (por. r. (1) i (2)). Zastosowanie tej postaci funkcji roex prowadzi do określenia filtra słuchowego o nieskończonej dynamice oraz o pełnej symetrii w dziedzinie częstotliwości (symetrycznych zboczach), co nie jest w pełni zgodne z naturą tych filtrów. Dlatego też funkcję tę zapisuje się zwykle oddzielnie dla lewego (strona niskich częstotliwości) oraz dla prawego zbocza (wysokie częstotliwości) stosując różne wartości nachyleń p_l i p_u . Ponadto dążąc do właściwego określenia dynamiki filtra słuchowego, która w rzeczywistości nie jest nieskończenie wielka, dodaje się parametr r ograniczający tę dynamikę. Dlatego też równania opisujące odpowiednio dolne ($W(-g)$) i górne ($W(+g)$) zbocze filtra słuchowego mają postać:

$$W(-g) = (1 - r)(1 + p_l g)e^{-p_l g} + r, \quad (4)$$

$$W(+g) = (1 - r)(1 + p_u g)e^{-p_u g} + r. \quad (5)$$

Wprowadzanie danych wejściowych (Enter data) dokonywane jest w nowym oknie, lecz po uprzednim wprowadzeniu liczby danych eksperymentalnych. Dla poszczególnych względnych odległości tonu od dolnej częstotliwości górnego pasma szumu (g_u) oraz od górnej częstotliwości dolnego pasma szumu (g_l), należy wprowadzać uzyskane uśrednione uprzednio wartości progowe. Sugerowana początkowa wartość nachyleń zboczy filtra (p_l i p_u) jest równa 50 i dopasowywana jest w sposób iteracyjny w obrębie procedury ROEX_BG. Początkową wartość zakresu dynamiki filtra słuchowego (r) przyjmuje się zwykle jako -40 dB, (wartość ujemna!). Aplikacja ta po wprowadzeniu danych umożliwia wykreślenie rezultatów eksperymentalnych oraz charakterystyki filtra słuchowego zarówno w skali liniowej jak i logarytmicznej podając jednocześnie końcowe wartości parametrów p_l , p_u i r oraz ekwiwalentną szerokość prostokątną filtra słuchowego (Equivalent Rectangular Bandwidth, ERB). Przykładowe dane uzyskane w oparciu o przedstawioną tu procedurę ilustruje Rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyka przykładowego filtra słuchowego uzyskanego w oparciu o aplikację ROEX_PR

5.5. Progi różnicowe (poziomu) natężenia (Intensity discrimination)

Aplikacja ta służy do wyznaczania progów różnicowych natężenia (zaledwie spostrzeganych różnic natężenia/poziomu) dla sygnałów sinusoidalnych (SS) bądź dla dowolnych pasm szumu (NB). Zarówno w tej jak i w szeregu innych aplikacji zestawu zastosowano tzw. Frequency roving bądź Level roving, co oznacza losowy wybór częstotliwości (częstotliwości środkowej) oraz poziomów sygnału w wąskim, zadeklarowanym wcześniej, zakresie. Jest to często stosowana praktyka w badaniach eksperymentalnych pozwalająca na uniknięcie błędów przyzwyczajenia i antycypacji. Możliwość wyboru czasu narastania/zaniku sygnału umożliwia pomiar zaledwie spostrzeganych różnic natężenia również dla bardzo krótkich sygnałów w oparciu o jedną z dostępnych metod i procedur adaptacyjnych. Warto również zwrócić uwagę na początkową wartość różnicy poziomów sygnałów w prezentowanych interwałach (Initial level difference). Zadaniem słuchacza jest wskazanie tego interwału, w którym sygnał był w jego odczuciu głośniejszy. Dlatego też początkowa wartość tej różnicy w trzech pierwszych parach prezentowanych bodźców powinna być na tyle duża, by słuchacz udzielał odpowiedzi poprawnych.

5.6. Progi różnicowe częstotliwości (Frequency discrimination)

Ta aplikacja jest bardzo podobna do wyżej przedstawionej, choć dotyczy nie dyskryminacji poziomu sygnału lecz dyskryminacji jego częstotliwości. Służy ona do wyznaczania tzw. progów różnicowych częstotliwości, tj. zaledwie spostrzeganych różnic częstotliwości sygnału. Sygnałami w tej aplikacji (Signal type) mogą być sygnały sinusoidalne (SS) lub pasma szumu o jednakowej szerokości (NB). Parametry czasowe sygnałów są tu analogiczne do opisanych powyżej. Zastosowano tu także parametry Frequency roving i Level roving przedstawione w sekcji 4.5, oraz analogiczny wybór metody badawczej, procedury adaptacyjnej i liczby punktów zwrotnych. Początkowa wartość różnicy częstotliwości w trzech pierwszych parach prezentowanych bodźców (Initial frequency difference) powinna być na tyle duża, by słuchacz udzielał odpowiedzi poprawnych.

5.7. Spostrzeganie interwałów ciszy (Gap detection)

Spostrzeganie niewielkich przerw czasowych (kilka milisekund) w sygnałach będącymi pasmami szumu jak i w tonach jest przedmiotem badań psychofizyki słuchu i dostarcza ważnych informacji dotyczących funkcjonowania słuchu [7, 8]. Dlatego też zagadnienie to znalazło się wśród problemów, które można analizować eksperymentalnie za pomocą proponowanego zestawu aplikacji. Gap detection umożliwia wyznaczenie najkrótszej spostrzeganej przerwy czasowej zlokalizowanej w połowie czasu trwania sygnału, którym może być zarówno ton jak i dowolne pasmo szumu. Jednak nagłe wyłączenie sygnałów wąskopasmowych powoduje znaczące poszerzenie ich widm. W związku z tym czynnikiem ułatwiającym detekcję przerwy czasowej jest nie tylko sama przerwa (jej czas trwania), lecz także poszerzone widmo sygnału będące skutkiem nagłego wyłączenia/włączenia. Dlatego też zastosowano tu możliwość prezentowania dodatkowego, niezależnego szumu (prawa kolumna głównego okna, Rys. 7), którego zadaniem jest maskowanie tych zniekształceń widmowych. Szum ten stanowi tło akustyczne dla obu interwałów obserwacyjnych i przerwy pomiędzy nimi. Warto podkreślić, że zarówno pasmo szumu, w którym generowana jest przerwa czasowa, jak i ten dodatkowy szum, są w pełni niezależnymi sygnałami. Jedynym wspólnym ich parametrem jest czas narastania/wybrzmiewania (Rise/Decay time).

Poziomy obu szumów można deklarować bądź jako poziom całkowity bądź jako widmową gęstość mocy. Ważnym parametrem przerwy czasowej w sygnale, wpływającym również na spodziewane poszerzenie widma sygnału, jest sposób wyłączenia przed przerwą i ponownego włączenia sygnału po przerwie, a właściwie czas w ciągu, którego poziom sygnału maleje od swej nominalnej wartości (Noise level) do zera a następnie narasta od zera do wartości nominalnej. Zagadnienie to sprowadza się do odpowiedniego kształtowania obwiedni amplitudowej w obrębie przerwy czasowej. Kształtowanie tej obwiedni w obrębie przerwy dokonywane jest za pomocą funkcji (okna) Hanninga o czasie narastania/wybrzmiewania nie większym niż 5 ms (Decay/Rise time of GAP,

por. Rys. 7). Wybrzmiewanie i narastanie sygnału w obrębie przerwy czasowej jest niezależnym parametrem od narastania i wybrzmiewania sygnałów w obrębie interwałów obserwacyjnych.

Rys. 7. Główne okno aplikacji Gap detection

5.8. Progi spostrzegania modulacji (Modulation detection)

Aplikacja ta umożliwia wyznaczanie progów spostrzegania modulacji amplitudowej (AM) oraz częstotliwościowej (FM) dla tonów w szerokim zakresie tak częstotliwości nośnych jak i częstotliwości modulacji. Umożliwia też wyznaczenie progów detekcji modulacji amplitudowej dla dowolnych pasm szumu (np. wyznaczenie tzw. funkcji przeniesienia modulacji (Temporal Modulation Transfer Function, TMTF [9, 10]. Określenie częstotliwości nośnej (częstotliwości środkowej i szerokości pasma szumu), poziomu sygnału, częstotliwości modulacji, początkowej wartości współczynnika głębokości modulacji amplitudowej (AM) bądź dewiacji częstotliwości (FM) oraz parametrów czasowych sygnału, pozwala na rozpoczęcie eksperymentu. Wybór metody badawczej, procedury adaptacyjnej oraz liczby punktów zwrotnych do uzyskania w pojedynczym pomiarze jest analogiczny jak we wszystkich innych aplikacjach zestawu. Ważnym czynnikiem jest również początkowa wartość głębokości modulacji amplitudowej (Starting AM depth).

5.9. Spostrzeganie międzysusznych różnic czasu i natężenia (Discrimination of interaural time and level differences).

Międzysuszne różnice czasu i natężenia dźwięku są głównymi czynnikami umożliwiającymi określanie kierunku dochodzenia dźwięku [11, 12]. Lokalizując źródło dźwięku ustawiamy zazwyczaj głowę tak, by różnice tak natężenia jak i czasu (fazy) dotarcia dźwięku do obu uszu były jak najmniejsze. Dzięki temu lokalizacja źródeł znajdujących się 'z przodu' jest obciążona najmniejszym błędem. Aplikacja ta jest jedną z nielicznych przedstawianych tu aplikacji bazujących na binauralnej prezentacji bodźców. Umożliwia ona pomiar zaledwie spostrzeganych różnic międzysusznych dla sygnałów tonalnych, dowolnych pasm szumu oraz szumu szerokopasmowego. Program

pozwala na zadeklarowanie częstotliwości (lub częstotliwości środkowej), poziomów sygnałów w lewym i prawym uchu niezależnie, czasów trwania interwałów obserwacyjnych, przerwy między nimi oraz początkowej wartości różnicy poziomów (ILD) lub też czasu (ITD).

5.10. Binauralna różnica poziomów maskowania (Binaural unmasking)

Ta część zestawu aplikacji dotyczy zjawiska binauralnej różnicy poziomów maskowania (Binaural Masking Level Difference, BMLD). Zjawisko to pokazuje przede wszystkim, że odwrócenie fazy sygnału sinusoidalnego prezentowanego na tle identycznego w obu uszach szumu, znacząco poprawia detekcję tego sygnału w porównaniu z sytuacją, gdy faza sygnału sinusoidalnego docierającego do obu uszu jest jednakowa. Różnica progów dla jednakowej i odwróconej fazy tonu dochodzi do 15 dB [13]. Jednak zjawisko to można również zaobserwować w kilku innych przypadkach, bowiem odwracanie biegunowości szumu, wyłączanie szumu w jednym z uszu, czy też stosowanie szumów nieskorelowanych, to kolejne przykłady znaczącego obniżenia progu, będące kolejnymi przejawami zjawiska BMLD. Główne okno programu umożliwiającego podjęcie badań w tym zakresie przedstawiono na Rys. 8. Aplikacja umożliwia wyznaczenie wartości różnicy poziomów maskowania w kilku różnych przypadkach, które określają wzajemną relację sygnałów i maskerów w obu uszach. W każdym z nich należy jednak wykonać dwa pomiary (Measured threshold), których różnica jest miarą efektu BMLD.

Rys. 8. Główne okno aplikacji umożliwiającej wyznaczenie progów detekcji sygnałów w ramach analizy efektu binauralnej różnicy poziomów maskowania (BMLD)

W ramach prezentowanej aplikacji sygnałem podlegającym detekcji może być zarówno ton jak i pasmo szumu. Wzajemna relacja pomiędzy sygnałami tonalnymi dostarczonymi do obu uszu określa parametr Signal type, zaś relację pomiędzy

pasмами szumu dostarczonymi do obu uszu określa parametr Masker type. Szczegółowy opis każdego z typów sygnału i maskera możliwych do zastosowania w tej aplikacji jest automatycznie sugerowany w oknie Pocket help z chwilą, gdy kursor wyboru znajduje się w polu Signal type bądź Masker type. Program umożliwia analizę efektu BMLD zarówno w odniesieniu do maskowania jednoczesnego jak i resztkowego oraz wstecznego (Masking type).

Specyfikacja parametrów sygnałów i maskerów prezentowanych do lewego i prawego ucha jest tylko z pozoru złożona, bowiem wiele z nich należy podać tylko w odniesieniu do lewego uchu, a ich wartości dla sygnału w prawym uchu są wyznaczane automatycznie, zależnie od wybranego typu sygnału i typu maskera. Okno Timing umożliwia określenie struktury czasowej interwałów obserwacyjnych a Method/Procedure wybór metody badawczej, procedury adaptacyjnej i liczby punktów zwrotnych.

5.11. Komodulacyjne odmaskowanie (Comodulation Masking Release, CMR)

W klasycznym eksperymencie Fletchera [3], początkowe poszerzanie pasma szumu o stałej widmowej gęstości mocy prowadzi do znaczącego wzrostu progu maskowania tonu o częstotliwości równej częstotliwości środkowej szumu. Jednak od pewnej szerokości pasma szumu, nazwanej później pasmem krytycznym (wstęgą krytyczną, Critical Band, CB), dalsze poszerzanie pasma, i związany z tym wzrost całkowitego poziomu szumu, nie wpływa na wartość progu. Hall i Grose. [14] pokazali jednak, że dla szumu maskującego, zmodulowanego amplitudowo wąskim szumem dolnoprzepustowym, próg detekcji tonu nie był stały po przekroczeniu pasma krytycznego, a zmniejszał się jego wartość. Ponadto Schooneveldt i Moore [15] pokazali, że próg detekcji tonu maleje wraz z poszerzeniem pasma maskera nim pasmo to osiągnie szerokość krytyczną. Zjawisko to, nazwane komodulacyjnym odmaskowaniem, stanowi przedmiot analizy kolejnej aplikacji prezentowanego zestawu. Sygnałem podlegającym detekcji jest ton (Signal), a sygnałem maskującym pasmo szumu (Band of Noise). Parametry tych sygnałów (częstotliwości, poziomy, szerokość pasma, czas trwania, interwał, etc.) należy wyszczególnić w lewej kolumnie okna. Prawa strona (Amplitude modulation), oprócz danych związanych z metodą pomiaru, umożliwia wprowadzenie typu oraz szczegółowych parametrów sygnału modulującego masker. Sygnałem modulującym może być ton, szum dolnoprzepustowy lub pasmo szumu. Dodatkową opcją jest możliwość przekonwertowania pasma szumu modulującego na tzw. low-noise noise (LNN). Pasma szumu wygenerowane za pomocą odwrotnej transformaty Fouriera charakteryzuje się dużym współczynnikiem szczytu (~3.5), co uniemożliwia zastosowanie większych współczynników głębokości modulacji, z uwagi na ryzyko przemodulowania. Procedura iteracyjna dzielenia szumu „przez siebie” z jednoczesnym ograniczeniem pasma [16, 17] prowadzi do ograniczenia tego współczynnika do ok 1.7 nie zmieniając jego widma. Umożliwia to zastosowanie większych wartości głębokości modulacji maskera i analizę zjawiska CMR w szerszym zakresie dynamiki sygnału.

5.12. Zburzenie detekcji (dyskryminacji) modulacji (Modulation Detection / Discrimination Interference, MDI)

Detekcję modulacji amplitudowej (AM) lub częstotliwościowej (FM) można znacząco utrudnić, jeśli oprócz sygnału, w którym dokonuje się detekcji modulacji, zaprezentuje się słuchaczowi dodatkowy sygnał (lub sygnały, tzw. flankers) zmodulowany (AM lub FM) o znacząco różnej częstotliwości nośnej tak, by pobudzenia błony podstawnej wywołane tymi sygnałami nie nachodziły na siebie. Podwyższenie progów detekcji modulacji osiąga maksimum, gdy częstotliwości modulacji zastosowane w odniesieniu do wszystkich sygnałów są bliskie sobie [18, 19]. Aplikacja ta umożliwia wyznaczenie progów detekcji modulacji (AM lub FM) przy braku lub przy obecności do czterech dodatkowych sygnałów (Number of flankers). Sygnałem, którego śledzenie jest głównym zadaniem słuchacza, jest zazwyczaj ton, który podlega modulacji bądź amplitudowej bądź częstotliwościowej. Sygnałami dodatkowymi mogą być zmodulowane tony jak i pasma szumu, choć modulacja częstotliwościowa może być zastosowana tylko w odniesieniu do tonów. Aplikacja ta wymaga wyboru typu stosowanych sygnałów (tony, T, lub pasma szumu, N), oraz ich szczegółowych parametrów (częstotliwość, częstotliwość modulacji, głębokość modulacji itp.). W odniesieniu do wszystkich flankerów (FLANKERS), w odrębnie wyświetlanego okna należy szczegółowo podać ich parametry, których wartości zapisywane są w odrębnym pliku tekstowym (*.fla). Warto podkreślić, że w przypadku braku dodatkowych sygnałów aplikacja ta umożliwia pomiar progu detekcji modulacji amplitudowej prezentowanej na tle modulacji częstotliwościowej i vice versa, czyli modulacji mieszanej (Mixed modulation, MM). Podobnie jak we wszystkich aplikacjach tego zestawu, opis każdego z parametrów sygnału i maskera oraz flankerów jest dostępny w pomocy podręcznej (Pocket help) z chwilą, gdy kursor wyboru znajduje się w polu odpowiednim polu.

5.13. Dyskryminacja głębokości modulacji amplitudowej (AM depth discrimination)

W ramach tej aplikacji możliwe jest wyznaczenie progów dyskryminacji głębokości modulacji, czyli miary zdolności słuchacza do słuchowego rozróżnienia głębokości modulacji kolejno prezentowanych bodźców i wskazania sygnału charakteryzującego się większą głębokością AM. Wielkością, która opisuje zdolność tego typu, może być tzw. funkcja psychometryczna, wyrażająca prawdopodobieństwo poprawnej identyfikacji sygnału o większej modulacji amplitudowej w funkcji współczynnika głębokości tej modulacji.

W eksperymencie tym zastosowano metodę 2AFC bez procedury adaptacyjnej. W ramach pojedynczej prezentacji słuchaczom prezentowana jest para bodźców z których jeden, wybrany losowo, charakteryzuje się głębokością modulacji określoną w polu Baseline AM depth, a głębokość modulacji w drugim interwale jest jedną z pięciu wartości wyszczególnionych w polu Remining AM depths. Pięć prezentowanych w tym polu głębokości modulacji obliczanych jest automatycznie na podstawie Baseline AM depth oraz Maksimum AM depth of target. Obliczone głębokości modulacji mogą być równomiernie rozłożone (Spacing) w skali liniowej (LIN) bądź też

równomiernie względem kwadratu współczynnika głębokości modulacji (SQR). Zadaniem słuchaczy w ramach metody 2AFC jest wskazanie interwału zawierającego sygnał charakteryzujący się większą głębokością modulacji. Zatem w przypadku gdy Baseline AM depth jest równa zero, to eksperyment prowadzi do wyznaczenia funkcji psychometrycznej związanej z detekcją modulacji. Warto podkreślić, że aplikacja ta umożliwia zastosowanie quasi-trapezoidalnej funkcji modulującej, dla której można określić czas trwania jej maksymalnej wartości (Steady state duration). Jest to zmodyfikowana funkcja sinus, w której czas trwania wartości szczytowych (+1 i -1) wydłużono do wartości określonej w Steady state duration, a czas przejścia pomiędzy wartościami szczytowymi definiuje Transition „ramp” duration. W odróżnieniu od procedur adaptacyjnych, głębokości modulacji prezentowanych bodźców są tu predefiniowane, a nie dobierane adaptacyjnie.

W ramach eksperymentu prowadzonego za pomocą tej aplikacji wartości głębokości modulacji stosowane do interwału testowego mogą być prezentowane w sposób losowy, bądź też uporządkowany względem głębokości modulacji wyznaczonych na podstawie parametrów Baseline AM depth i Remining AM depths, a więc od największej do najmniejszej głębokości modulacji lub vice versa. W ramach pojedynczej serii pomiarowej można zaprezentować słuchaczowi 30 lub 55 par bodźców do oceny. Niezależnie od liczności serii, pierwszych pięć prezentacji stanowią tzw. prezentacje próbne, których nie bierze się pod uwagę w rezultacie końcowym. Wśród parametrów opisujących sygnały zmodulowane, oprócz wyboru częstotliwości, poziomu sygnału, częstotliwości modulacji czy czasów trwania interwałów, jest również możliwość wyboru fazy początkowej sygnału modulującego (Modulator starting phase, ZERO, SAME, RANDOM) w odniesieniu do każdego z interwałów obserwacyjnych. Ponadto poziom prezentowanych bodźców może być dobrany w sposób losowy, ale w zakresie (± 5 dB) względem poziomu nominalnego (Nominal signal level).

Rezultaty tego eksperymentu, to zależność liczby poprawnych identyfikacji interwału zawierającego sygnał o większej głębokości modulacji od tegoż współczynnika. Zależność ta opisana jest pięcioma punktami i stanowi tzw. funkcję psychometryczną. Z uwagi na fakt stosowania metody 2AFC próg dyskryminacji modulacji przypada dla wartości współczynnika głębokości modulacji amplitudowej odpowiadającego prawdopodobieństwu 70.9% [2]. Jednak do wyznaczenia tych funkcji niezbędny jest wielokrotny odsłuch tego testu by liczba zaprezentowanych sygnałów w odniesieniu do każdej z pięciu głębokości modulacji była równa co najmniej 50. Ostatnie linie tekstowego pliku wyjściowego (*.out) zawierają tabelę, w której wyszczególnione są głębokości modulacji z pola Remining AM depths oraz liczba poprawnych odpowiedzi dla każdej z nich.

5.14. Dyskryminacja dewiacji modulacji częstotliwościowej (FM depth discrimination)

Program ten jest w swej naturze i zasadach działania niemalże identyczny z wyżej przedstawioną aplikacją AM depth discrimination. Jediną różnicą jest zastosowanie nie modulacji amplitudowej a modulacji częstotliwościowej (FM), której

podstawowym parametrem jest dewiacja częstotliwości zdefiniowana jako maksymalne odchylenie częstotliwości sygnału od jego częstotliwości nośnej. Pozostałe parametry sygnału, sposób doboru wielkości dewiacji częstotliwości w kolejno prezentowanych parach bodźców, metoda pomiarowa, sposób obliczania i przedstawiania rezultatów końcowych jest analogiczny do przedstawionego wyżej.

5.15. Identyfikacja rodzaju modulacji (Modulation identification)

Zastosowanie tej aplikacji wymaga uprzedniego wykonania pomiarów zarówno dyskryminacji głębokości modulacji amplitudowej (5.13) jak i dewiacji modulacji częstotliwościowej (5.14). Wyniki tych pomiarów stanowią bowiem argumenty wejściowe do omawianej tu aplikacji, która zgodnie z nazwą prowadzi do określenia funkcji psychometrycznej opisującej możliwość rozróżnienia tych dwóch rodzajów modulacji. Dobór parametrów zarówno modulacji amplitudowej i częstotliwościowej dla poszczególnych par bodźców ma dla tej aplikacji zasadnicze znaczenie. Jak wspomniano wyżej, wyniki dwóch wcześniej opisanych aplikacji prowadzą bowiem do określenia funkcji psychometrycznych dla odpowiedniego rodzaju modulacji, które wyrażają prawdopodobieństwo poprawnej odpowiedzi w funkcji odpowiedniego współczynnika głębokości modulacji. Zasadniczą ideą tej aplikacji jest przedstawienie obserwatorowi dwóch interwałów obserwacyjnych w losowym porządku. Jeden z nich zawiera sygnał zmodulowany amplitudowo a drugi sygnał zmodulowany częstotliwościowo, zaś zadaniem słuchacza jest wskazanie tego interwału, w którym dostrzega on zmiany wysokości sygnału (pitch wobbling), czyli modulację częstotliwościową. Jednak w obrębie tych dwóch interwałów głębokość modulacji i dewiacja częstotliwości dobrane są tak, by odpowiadały jednakowemu prawdopodobieństwu detekcji tych modulacji gdy prezentowane były one w odrębnych eksperymentach. Wartości tych głębokości modulacji dobierane są w oparciu o tzw. wrażliwość, d' [20, 1], która jednoznacznie łączy się z prawdopodobieństwem detekcji.

Modulation type discrimination: Psychometric function determination

Initial data

Subject name:

Test ear:

Signal

Carrier frequency: [Hz]

Nominal carrier level: [dB SPL]

Modulation rate: [Hz]

Steady state duration: [ms]

Transition ("ramp") duration: [ms]

Carrier duration: [ms]

Interval between carrier bursts: [ms]

Signal level roving: [dB]

Modulator Starting Phases:

Order of presentation:

d'	20log(m)	delta f [Hz]
1.0	-30	2
1.5	-25	4
2.0	-15	6
2.5	-10	8
3.0	-5	10

Psychometric Function

Number of trials:

Control buttons

Rys. 9. Główne okno aplikacji umożliwiającej wyznaczenie funkcji psychometrycznych dla identyfikacji rodzaju modulacji

Na Rys. 9 przedstawiono główne okno aplikacji pozwalającej na przeprowadzenie eksperymentu identyfikacji rodzaju modulacji. Wartości odpowiednich współczynników głębokości modulacji AM ($20\log(m)$ [dB]) i dewiacji FM (Δf [Hz]) należy wprowadzić w tabeli w prawej części okna. Podobnie jak w poprzednio prezentowanych częściach PSYCHOACOUSTICS program ten wymaga wprowadzenia danych dotyczących słuchacza, podstawowych parametrów sygnału (częstotliwość, poziom natężenia, czas trwania interwałów i przerwy pomiędzy nimi). Oprócz sinusoidalnego sygnału modulującego można tu zastosować sygnał quasi-trapezoidalny dla którego określa się czas trwania stałej wartości (Steady state duration) oraz czas przejścia pomiędzy wartościami szczytowymi (Transition „ramp” duration).

Aplikacja ta umożliwia wybór fazy początkowej sygnału modulującego (Modulator starting phase) w odniesieniu do każdego z interwałów obserwacyjnych (ZERO, SAME, RANDOM). Poziom bodźców może być dobrany w sposób losowy ale w zakresie ± 5 dB względem poziomu nominalnego (Nominal signal level).

Rezultatem tego eksperymentu jest funkcja psychometryczna której argumentami są zarówno głębokość modulacji amplitudowej jak i dewiacji częstotliwości. Próg identyfikacji rodzaju modulacji przypada dla głębokości modulacji (dewiacji) odpowiadających prawdopodobieństwu 70.9% [2].

5.16. Szybki pomiar psychofizycznych krzywych strojenia (SWPTC) Fast measurement of the psychophysical tuning curves (SWPTC)

Psychofizyczna krzywa strojenia (PTC) przedstawia poziom pasma szumu, w funkcji jego częstotliwości środkowej, który zaledwie maskuje ton o stałej częstotliwości i niewielkim poziomie (np. 10 dB SL). Szybką metodę wyznaczania PTC, wykorzystującą pasmo szumu o przestrajanej w sposób ciągły częstotliwości środkowej, zaproponowali Sęk i in. [21], co znacząco przyspiesza proces wyznaczania PTC. Implementacja tej metody jest zawarta w Fast PTC section. Podstawowa wersja tej aplikacji (SWPTC) wymaga podania parametrów cyklicznie prezentowanego sygnału (częstotliwość, poziom, czas trwania sygnału i przerw) oraz parametry szumu (najniższa i najwyższa częstotliwość środkowa, szerokość pasma, kierunek i szybkość przestrajania oraz początkowy poziom szumu). W przypadku opcji SWPTC_ERB szerokość pasma maskera jest równa ekwiwalentnej szerokości filtra słuchowego dla aktualnej częstotliwości środkowej pasma. SWPTC_LPN jest natomiast opcją w ramach której, oprócz tonu i szumu przestrajanego, prezentowany jest szum dolnoprzepustowy o zadawanej częstotliwości odcięcia i poziomie. Szum ten ma na celu maskowanie tonów kombinacyjnych, które są wynikiem nieliniowych właściwości błony podstawnej obserwowanych zwłaszcza w przypadku prezentowania dwóch lub większej liczby sygnałów o nieznacznie różnych częstotliwościach. Podobną funkcję spełnia szum typu TEN (Threshold Equalizing Noise) [22] w opcji SWPTC_TEN. Wszystkie wymienione opcje umożliwiają zastosowanie stymulacji kontrlateralnej za pomocą całej gamy sygnałów (tony, szumy, sygnały zmodulowane), która ma wpływ na kształt i dobroć krzywych strojenia.

Podczas eksperymentu, słuchaczowi prezentuje się odcinki czasowe sygnału na tle przestrajanego szumu, a jego zadaniem (poprzez naciskanie i zwalnianie przycisku space) jest kontrolowanie kierunku zmian poziomu szumu w taki sposób, by ton był zaledwie słyszalny. Jak pokazały dotychczasowe badania [21] zastosowanie tej metody przynosi bardzo zbliżone rezultaty do metody klasycznej. Jednak znaczące zredukowanie czasu trwania pomiaru przemawia na jej zdecydowaną korzyść.

5.17. Analiza subtelnej struktury czasowej (Temporal Fine Structure, TFS)

Ostatnia z przedstawianych tu aplikacji (TFS section) jest grupą programów umożliwiających analizę wykorzystania subtelnej struktury czasowej sygnału w układzie słuchowym [23]. Analizy tej dokonuje się w ramach aplikacji TFS1 poprzez wyznaczenie progu dyskryminacji wielotonu harmonicznego (H) i anharmonicznego (A), przy czym wieloton anharmoniczny utworzony jest poprzez powiększenie częstotliwości każdej składowej wielotonu harmonicznego o tę samą wartość Δf . Oba wielotony są poddawane identycznemu filtrowaniu pasmowoprzepustowemu (20 dB/oct). Dolną częstotliwość odcięcia tego filtra dobiera się tak, by w filtrze słuchowym, na który przypadnie maksimum widmowej gęstości mocy sygnału, znajdowały się co najmniej dwie składowe wielotonu. Jest to zwykle częstotliwość równa dziewiętej lub wyższej składowej dźwięku harmonicznego. Szerokość pasma przepustowego tego filtra jest obliczana automatycznie na podstawie deklarowanej liczby składowych harmonicznym przypadających na to pasmo, o czym decyduje użytkownik. Tak dobrane parametry sygnału pozwalają stwierdzić, że możliwość rozróżnienia wielotonu harmonicznego (H) i anharmonicznego (A) możliwa jest dzięki wykorzystaniu informacji zawartej w przebiegach czasowych tych sygnałów (ich strukturze subtelnej, TFS) a nie w oparciu o różnicę obwiedni poburzeń błony podstawnej wywołanych tymi bodźcami. Widma tych sygnałów są bowiem niemalże identyczne a dodatkowo wielotony te prezentowane są zwykle na tle szumu którego sugerowany poziom (mierzony w filtrze słuchowym o częstotliwości środkowej 1 kHz) jest o 15 dB niższy niż poziom wielotonów. Prowadzenie tych badań wymaga podania częstotliwości podstawowej wielotonu, najniższej składowej i liczby składowych w obrębie filtra pasmowoprzepustowego, całkowitego poziomu wielotonów, czasu trwania bodźców i przerwy pomiędzy nimi oraz początkowej wartości różnicy częstotliwości, Δf , która musi być mniejsza od połowy częstotliwości podstawowej wielotonu H. Interwały obserwacyjne prezentowane słuchaczom zawierają po cztery odcinki czasowe dźwięków. W jednym z interwałów prezentowane są wyłącznie dźwięki harmoniczne a w drugim na przemian dźwięki harmoniczne i anharmoniczne.

Dwuuszną wrażliwość na strukturę subtelnej dźwięku może być analizowana za pomocą opcji TFS_LF, w której wykorzystano procedurę 2AFC. Parametrem podlegającym adaptacji jest różnica faz sygnałów sinusoidalnych prezentowanych do lewego i prawego ucha, co prowadzi do wyznaczenia zaledwie spostrzeganej różnicy faz sygnałów w obu uszach (podobnie jak w przypadku pomiaru IPD). Struktura czasowa interwałów obserwacyjnych w przypadku tej aplikacji jest analogiczna jak w przypadku procedury TFS1.

Nieco inne podejście zawiera opcja TFS_AF, gdzie adaptacyjnym zmianom w procedurze 2AFC poddana jest częstotliwość tonu dzięki czemu wyznacza się maksymalną jego częstotliwość, dla której rozróżnienie sygnałów prezentowanych do obu uszu, o tych samych bądź przeciwnych fazach, jest jeszcze możliwe.

6. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej zbiór aplikacji służących do prowadzenia nie tylko podstawowych badań w zakresie akustyki psychofizjologicznej może być z powodzeniem wykorzystywany w wielu laboratoriach. Nie jest to jednak zbiór zamknięty bowiem w dalszym ciągu trwają prace nad jego uzupełnianiem o dalsze, bardziej zaawansowane aplikacje. Poszczególne składniki sytemu, jako odrębne programy, były już wykorzystywane w wielu eksperymentach a rezultaty niektórych z nich zostały opublikowane [23, 21]. Wydaje się jednak, że opracowanie większego systemu aplikacji, które obejmowałyby większość podstawowych zagadnień z psychoakustyki jest celowe i dlatego też prace nad tym systemem są w dalszym ciągu kontynuowane.

Warto dodać, że zestaw prezentowanych tu procedur jest w chwili obecnej na etapie finalnego sprawdzania i uzupełniania. W obecnej, w pełni funkcjonującej wersji jest nieodpłatnie dostępny na stronie internetowej Katedry Akustyki (<http://www.ia.amu.edu.pl>). Autorzy byłiby wdzięczni za komentarze i uwagi które nasuną się użytkownikom tego programu podczas jego stosowania.

Bibliografia

1. Coombs, C.H., Davies, R. M. and Tversky, A.' Wprowadzenie do psychologii matematycznej 1977, Waeszawa: PWN.
2. Levitt, H., Transformed up-down methods in psychoacoustics. J. Acoust. Soc. Am., 1971. 49: p. 467-477.
3. Fletcher, H., Auditory patterns. Reviews of Modern Physics, 1940. 12: p. 47-65.
4. Zwicker, E. and Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger 1967, Stuttgart: Hirzel-Verlag.
5. Patterson, R.D., Auditory filter shapes derived with noise stimuli. Journal of the Acoustical Society of America, 1976. 59: p. 640-654.
6. Glasberg, B.R. and Moore, B.C.J., Auditory filter shapes in forward masking as a function of level. J. Acoust. Soc. Am., 1982. 71: p. 946-949.
7. Penner, M.J., Detection of temporal gaps in noise as a measure of the decay of auditory sensation. Journal of the Acoustical Society of America, 1977. 61: p. 552-557.
8. Buunen, T.J.F. and D.A. van Valkenburg, Auditory detection of a single gap in noise. Journal of the Acoustical Society of America, 1979. 65: p. 534-537(L).

9. Viemeister, N.F., Temporal modulation transfer functions based on modulation thresholds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1979. 66: p. 1364-1380.
10. Sek, A. and B.C.J. Moore, B.C.J., Detection of mixed modulation using correlated and uncorrelated noise modulators. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994. 95: p. 3511-3518.
11. Blauert, J., *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization* 1996, Cambridge, Mass: MIT Press.
12. Moore, B.C.J., *An Introduction to the Psychology of Hearing*, 4th Ed. 1997, London: Academic Press.
13. Moore, B.C.J., *An Introduction to the Psychology of Hearing*, 5th Ed. 2003, London: Academic Press.
14. Hall, J.W. and J.H. Grose, J.H., Comodulation masking release: Evidence for multiple cues. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988. 84: p. 1669-1675.
15. Schooneveldt, G.P. and Moore, B.C.J., Comodulation masking release (CMR) as a function of masker bandwidth, modulator bandwidth and signal duration. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989. 85: p. 273-281.
16. Kohlrausch, A., et al., Detection of tones in low-noise noise: Further evidence for the role of envelope fluctuations. *Acustica United with Acta Acustica*, 1997. 83: p. 659-669.
17. Hopkins, K., Moore, B.C.J. and Stone, M.A., The effects of the addition of low-level, low-noise noise on the intelligibility of sentences processed to remove temporal envelope information. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010. 128(4): p. 2150-2161.
18. Hall, J.W. and Grose, J.H., Some effects of auditory grouping factors on modulation detection interference (MDI). *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991. 90(6): p. 3028-3035.
19. Mendoza, L., Hall, J.W., and Grose, J.H., Modulation detection interference (MDI) for randomly fluctuating envelopes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993. 94: p. 1777.
20. Green, D.M. and Swets, J.A., *Signal Detection Theory and Psychophysics* 1974, New York: Krieger.
21. Sęk, A., Sweeping noise method for psychophysical tuning curves determination (SWPTC). *Journal of Hearing Science*, 2011. 1(1): p. 7.
22. Huss, M., Moore, B.C.J. and Glasberg, B.R., Development and evaluation of a noise producing equal masked thresholds at all frequencies as a tool for identification of 'dead regions'. *British Journal of Audiology*, 2000. 34: p. 106-107.
23. Sęk, A. and Moore, B.C.J., Implementation of two tests for measuring sensitivity to temporal fine structure. *International Journal of Audiology*, 2012. 53: p. 58-63.