

## PRZEGLĄD METOD PRZETWARZANIA DŹWIĘKU WYKORZYSTYWANYCH W APARATACH SŁUCHOWYCH

Krzysztof KĄKOL<sup>1</sup>, Bożena KOSTEK<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, tel.: (58)3472717, e-mail: info@creasoft.pl,
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Laboratorium Akustyki Fonicznej, tel.: (58)3472717, e-mail: bokostek@audioacoustics.org

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł odnosi się do aktualnego stanu technologii wykorzystywanych w cyfrowych aparatach słuchowych, ze szczególnym uwzględnieniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów dźwiękowych. W artykule przedstawiono czynniki mające wpływ na efektywność aparatów słuchowych, a także zaprezentowano przykłady nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Przedstawiono również przykłady ograniczeń współczesnych aparatów słuchowych oraz kierunki ich rozwoju. Przywołano również pojęcie analizy sceny dźwiękowej (CASA - *Computational Auditory Scene Analysis*) jako potencjalnej metody do polepszenia jakości odbioru mowy i muzyki w aparatach słuchowych.

**Słowa kluczowe:** cyfrowe aparaty słuchowe; przetwarzanie sygnałów; przetwarzanie wielokanałowe; redukcja szumu i zakłóceń; kompensacja sprzężenia zwrotnego.

### 1. WPROWADZENIE

Cyfrowe aparaty słuchowe stały się obecnie powszechnym rozwiązaniem dla osób niedosłyszących. Jest jednak wiele decyzji, których taka osoba musi dokonać, np. wybór typu aparatu, użyte algorytmy przetwarzania dźwięku (DSP), automatyka ustawień, możliwość podłączenia zewnętrznych urządzeń takich, jak telefon czy odbiornik telewizyjny. Każdy z wymienionych elementów ma wpływ na funkcjonalność konkretnego rozwiązania (jak również wpływ na cenę). Dodatkowo im bardziej wyrafinowane rozwiązania zostaną użyte w aparacie, tym ma on większe zapotrzebowanie w energię. Dlatego projektanci aparatów słuchowych koncentrują się nie tylko na użytych algorytmach DSP, lecz także na optymalnym zużyciu mocy, co często skutkuje niezbędnymi kompromisami [1].

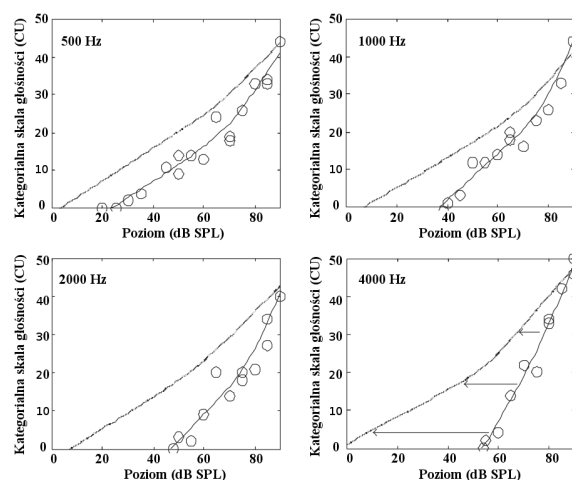
Współczesna technologia umożliwia wytwarzanie aparatów słuchowych, które w sposób istotny poprawiają zrozumiałość mowy, zwłaszcza w obecności szumu tła. W badaniach Littmana i in. [9] wykazano jednak, że często pomijanym aspektem jest wysiłek, który musi podejmować osoba niedosłysząca w trakcie codziennego użytkowania aparatu. Ten problem coraz częściej pojawia się w kontekście opracowywania obiektywnych metod oszacowywania "wysiłku słuchowego" (ang. *listening effort*) [10].

W niniejszej pracy przedstawiono przegląd współczesnych cyfrowych technologii przetwarzania sygnału i strategii przetwarzania wykorzystywanych w aparatach słuchowych. Zaprezentowano także obecne ograniczenia aparatów słuchowych oraz kierunki ich rozwoju.

### 2. PRZETWARZANIE WIELOKANAŁOWE

Stopień utraty słuchu jest zazwyczaj różny dla różnych pasm częstotliwości. W niektórych przypadkach dźwięk musi być wzmocniony, w innych stłumiony. Ten drugi przypadek dotyczy przede wszystkim hałasu (jak np. wiatr, szum wentylatora, hałas z ulicy), występującego głównie w niskich częstotliwościach, poniżej częstotliwości sygnału mowy. To pozwala projektować strategie filtracji, które mają za zadanie tłumienie lub usuwanie hałasu czy szumu.

Dźwięk musi być także przetwarzany wielokanałowo ze względu na różne charakterystyki słyszenia pacjentów. W niektórych pasmach dynamika dźwięku musi być zwiększona (przy użyciu ekspandera), w innych zmniejszona (przy użyciu kompresora), aby była dopasowana do stopnia ubytku słuchu. Ubytek słuchu może być mierzony przy użyciu kategoryjnej skali głośności. Na rysunku 1 pokazano, że przy wzroście częstotliwości różnica w poziomie głośności pomiędzy człowiekiem zdrowym a pacjentem z ubytkiem słuchu, rośnie. Widoczny jest także efekt, tzw. wyrównania głośności (ang. *loudness recruitment*).



Rys. 1. Głośność jako funkcja poziomu dźwięku u osób niedosłyszących (kółka) oraz u osób bez wady słuchu (linia kropkowana) [2]

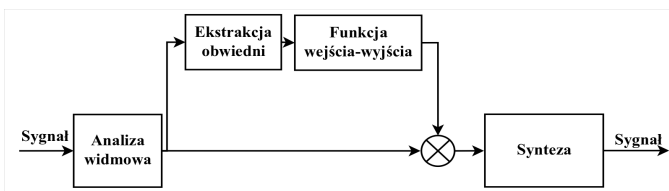
Wyrównanie głośności jest zjawiskiem często występującym u osób niedosłyszących z odbiorczym

ubytkiem słuchu. Polega ono na tym, że osoba niedosłysząca słabo lub w ogóle nie słyszy dźwięków cichych i o normalnej głośności, dźwięki głośne natomiast słyszy dobrze lub odbiera je zbyt intensywnie. Może to powodować brak komfortu w niektórych sytuacjach – np. przy stosunkowo gwałtownej zmianie otoczenia z cichego pokoju na np. hałaśliwą ulicę. Ucho, które próbuje dostosować się do zmienionego poziomu głośności, odbiera głośne dźwięki jako niekomfortowe czy nawet za głośne.

Ten problem skutkuje potrzebą użycia automatycznej kontroli wzmacnienia (AGC - *Automatic Gain Control*) w aparatach słuchowych, ponieważ poziom wzmacnienia musi być różny w różnych pasmach częstotliwości i powinien zależeć od poziomu sygnału wejściowego.

Obecnie systemy AGC zwykle wykorzystują analizę widmową z podziałem sygnału wejściowego na osobne pasma (jak pokazano na rysunku 2). Najczęściej wykorzystuje się podział na pasmo od 100 do 500 Hz, a powyżej 500 Hz używane są 1/3 oktawowo filtry pasmowe [2].

Systemy AGC mogą pracować w zróżnicowany sposób



Rys. 2. Droga sygnału dla wielopasmowego przetwarzania AGC

w zależności od konfiguracji czasów ataku i zwolnienia. Algorytmy z długimi czasami (rzędu kilku sekund) znane są jako automatyczna kontrola głośności (AVC - *Automatic Volume Control*), a te, których czasy zwolnienia i ataku są określane w milisekundach, nazywa się kompresją sylabyczną, ponieważ mogą one adaptować się w czasie trwania pojedynczej sylaby. Wykorzystuje się również systemy, które używają obu typów AGC (podwójna kompresja) [2].

### 3. ADAPTACJA DO WARUNKÓW AKUSTYCZNYCH

#### 3.1. Redukcja szumu i zakłóceń

Można wyróżnić kilka wskaźników, które wpływają na ocenę efektywności aparatu słuchowego przez jego użytkownika:

- jednym z największych problemów dla osób niedosłyszących jest utrata rozdzielczości, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości; skutkuje to zmniejszonym stosunkiem sygnału do szumu (SNR), głównie w hałaśliwym otoczeniu SNR jest dużo niższy niż u osób dobrze słyszących (o ok. 4-10 dB [2]); uniemożliwia to stosowanie strategii prostego zwiększania poziomu dźwięku, gdyż prowadziłoby to do dyskomfortu w przypadku użytkownika urządzenia w hałasie;

- szумы tła muszą być wytłumione w aparacie słuchowym; wzmacnienie sygnału w całym zakresie widma prowadziłyby do podniesienia także poziomu szumu;

- w sytuacjach, w których występuje hałas zwykle korzystniejsze jest wzmacnienie wyłącznie dźwięku dochodzącego do słuchacza z zerowego kąta przy jednoczesnym wytłumieniu pozostałych dźwięków, co oznacza, że użytkownik aparatu powinien patrzeć na osobę, z którą rozmawia; jednak istnieje wiele sytuacji, w których ta strategia nie będzie odpowiednia – np. podczas prowadzenia samochodu – dźwięki dochodzące z lewej/prawej strony nie powinny być wytłumione;

- aparat słuchowy jest zminiaturyzowanym urządzeniem, w którym mikrofon jest położony bardzo blisko głośnika – to oznacza, że jednym z podstawowych

problemów w aparatach słuchowych jest likwidacja przesłuchów i sprzężenia zwrotnego;

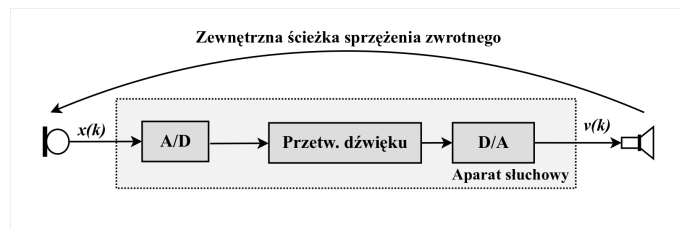
- aparat słuchowy powinien efektywnie tłumić nagłe, silne dźwięki, tak aby urządzenie ich nie wzmacniało;
- osoby niedosłyszące często dotknięte są zniszczeniem zewnętrznych komórek rzęskowych, co skutkuje zmniejszeniem rozdzielczości częstotliwościowej; oznacza to, że efekt maskowania sygnału w dziedzinie częstotliwości jest znacznie silniejszy (np. dźwięki o częstotliwości 500 Hz mogą maskować te o częstotliwości 1 kHz), co może znacząco obniżyć zrozumiałość mowy.

Powyższe stwierdzenia prowadzą do kilku strategii, które wykorzystywane są w nowoczesnych aparatach słuchowych.

#### 3.1.1. Redukcja sprzężenia zwrotnego

Aparaty słuchowe są skonstruowane w sposób, który wymusza umiejscowienie mikrofonu (lub mikrofonów) w pobliżu głośnika. Jak wspomniano wcześniej, zwiększa to możliwość wystąpienia sprzężenia zwrotnego (sygnał z głośnika powraca do mikrofonu). Obecnie wykorzystuje się zaawansowane filtry adaptacyjne, które usuwają ten efekt. Jednak najbardziej efektywną metodą redukcji sprzężenia zwrotnego jest używanie dobrze dopasowanego głośnika umiejscowionego w kanale słuchowym. To redukuje możliwość przenikania dźwięku z głośnika do mikrofonu.

Przenikanie dźwięku odbywa się przez dodatkowy kanał wentylacyjny - przestrzeń pomiędzy uchem i aparatem słuchowym. Niestety urządzenia (zwłaszcza te najmniejsze – umieszczane w kanale słuchowym) nie mogą być ściśle dopasowane do kanału słuchowego. To spowodowałoby efekt okluzji, który jest odpowiedzialny za zniekształcenia własnego głosu. Jednak kanał wentylacyjny zwiększa możliwość przenikania dźwięku i niepożądanego sprzężenia zwrotnego. Ścieżka sprzężenia zwrotnego przedstawiona jest na rysunku 3.



Rys. 3. Ścieżka sprzężenia zwrotnego

Sprzężenie zwrotne, występujące w aparatach słuchowych, zależy od następujących czynników [2]:

- rozmiaru dodatkowego kanału wentylacyjnego,
- typu aparatu słuchowego (ITE (*in-the-ear*), BTE (*behind-the-ear*), itd.),
- przeszkody w pobliżu aparatu słuchowego (np. nakrycie głowy, dłonie, itd.),
- fizycznego dopasowania aparatu w kanale słuchowym wynikającego z czynników zewnętrznych, np. ruchów szczęki.

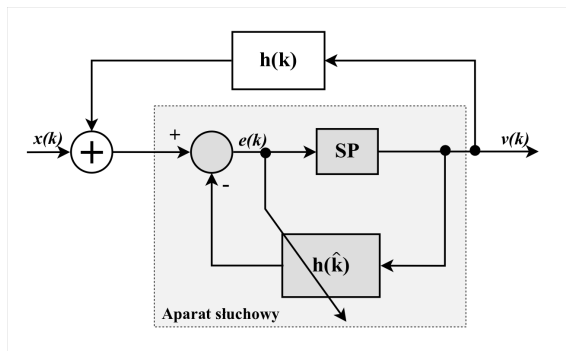
Pierwsze dwa czynniki są statyczne i dlatego mogą być modelowane. Dwa ostatnie muszą być przetwarzane adaptacyjnie. Ponieważ ścieżka sprzężenia zwrotnego może być zamodelowana jako filtr z odpowiednią odpowiedzią częstotliwościową. Każdy z powyższych czynników wpływa na tę odpowiedź.

Dla czynników statycznych zwyczajową metodą jest pomiar ścieżki sprzężenia zwrotnego dla dopasowanego aparatu słuchowego i ograniczenie wzmacnienia, tak aby wzmacnienie zamkniętej pętli było mniejsze niż 1 dla wszystkich składników częstotliwościowych. Ale nawet, jeśli powyższy algorytm zostanie zaimplementowany, zwykle nie

można uniknąć sprzężenia zwrotnego, ponieważ może ono być wywołane przez przeszkody w pobliżu aparatu. Dlatego należy wykorzystywać adaptacyjne, dynamiczne mechanizmy, aby zminimalizować ryzyko sprzężenia.

Do najczęściej wykorzystywanych należą dwie metody [2]:

- selektywne tłumienie komponentów częstotliwościowych, dla których występuje sprzężenie zwrotne,

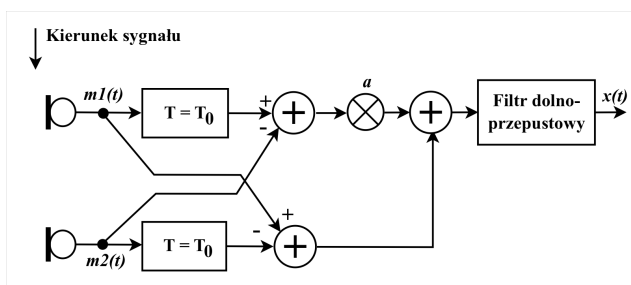


Rys. 5. Kompensacja sprzężenia zwrotnego;  $h(k)$  reprezentuje odpowiedź impulsową zewnętrznej ścieżki sprzężenia zwrotnego.  $h(k)$  reprezentuje filtr adaptacyjny

- kompensacja sprzężenia zwrotnego – wymaga to modelowania ścieżki sprzężenia zwrotnego jako filtra i odjęcia rezultatu tego filtrowania od sygnału oryginalnego; tego typu kompensacja realizowana jest przy użyciu filtra adaptacyjnego, jak na rysunku 4.

### 3.1.2. Mikrofony kierunkowe

Mikrofony kierunkowe (uwarunkowane fizyczną budową przetwornika) nie są dobrym rozwiązaniem, ponieważ nie mogą adaptować swojej charakterystyki do danej sytuacji dźwiękowej. Jak już wcześniej wspomniano, są pewne okoliczności, w których aparat słuchowy powinien być kierunkowy i inne, w których lepszym rozwiązaniem jest charakterystyka wszechkierunkowa. W tym drugim przypadku można bowiem wykorzystywać algorytm kształtowania wiązki (ang. *beamforming*). Schemat takiego rozwiązania zaprezentowano na rysunku 5.



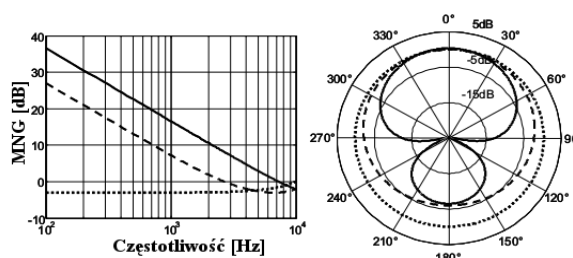
Rys. 4. Mikrofon różnicowy pierwszego rzędu

Zwykle do tego celu wykorzystuje się dwa mikrofony. Sygnał zbierany przez jeden z mikrofonów jest opóźniony o czas  $T_0$ . Charakterystyka kierunkowa jest modyfikowana przy użyciu parametru  $a$ . Przykłady takiej charakterystyki pokazano na rysunku 6.

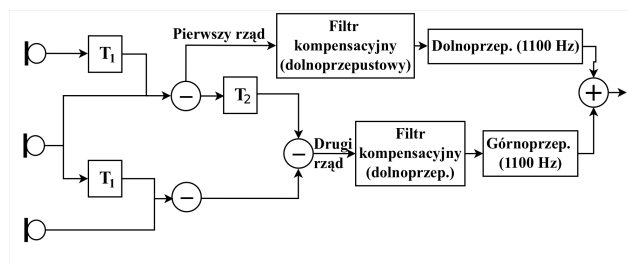
Dwa mikrofony tworzą mikrofon różnicowy pierwszego rzędu. Są jednak rozwiązania, w których wykorzystuje się mikrofony drugiego rzędu. Schemat takiego podejścia zaprezentowany jest na rysunku 7.

Mikrofon drugiego rzędu może być wykorzystany dla częstotliwości powyżej 1 kHz (z powodu wysokiej czułości takiego mikrofonu), gdyż te częstotliwości są bardzo istotne dla zrozumiałości mowy. Indeks kierunkowości może być

wyższy o 2 dB w porównaniu z typowym mikrofonem pierwszego rzędu. Powoduje to znaczące różnice w kontekście zrozumiałości mowy.



Rys. 6. Różne wartości mikrofonowego wzmocnienia szumu (MNG) oraz charakterystyki kierunkowe dla różnych ustawień parametru:  $a = 0.5$  (linia ciągła),  $a = -0.5$  (kreskowana) i  $a = -1$



Rys. 7. Mikrofon różnicowy drugiego rzędu

### 3.1.3. Redukcja szumu

Podstawową metodą redukcji szumu jest długookresowa redukcja oparta o modulację częstotliwości. Koncepcja ta wykorzystuje tłumienie komponentów częstotliwościowych z bardzo niskim stosunkiem sygnału do szumu (SNR). Trudność polega na wykryciu podpas, które zawierają sygnał z niską wartością SNR.

Można tego dokonać przy użyciu analizy modulacji częstotliwości. Sygnały mowy i muzyki wykazują częstotliwość modulacji powyżej 4 Hz w porównaniu z bardziej lub mniej stacjonarnym szumem. Tę cechę sygnału można wykorzystać do wykrycia podpas z niskim SNR i do wytłumienia sygnału w tych pasmach. Metoda ta sprawdza się w przypadku, gdy szum i sygnał użyteczny są zlokalizowane w innych pasmach częstotliwości. W innym przypadku, metoda ta nie daje właściwych wyników redukcji szumu.

Bardziej wyrafinowana metoda wykorzystuje filtrację Wienera. Metoda ta opiera się na założeniu, że można obliczyć współczynniki filtra, gdy dysponuje się wiedzą na temat widmowej gęstości mocy zaszumionego sygnału mowy oraz samego szumu. Jednak w aparatach słuchowych sygnał szumu nie może być w prosty sposób odseparowany. Dlatego wykorzystuje się inne metody, które to umożliwiają. Dla przykładu - aparat słuchowy może estymować szum przez obliczanie jego gęstości widmowej mocy w przerwach sygnału użytecznego (do tego celu niezbędny jest mechanizm detekcji pauz), albo może estymować tę wielkość, wykorzystując metody statystyczne.

Obie metody skutkują obliczeniem jedynie długookresowej, wygładzonej estymaty widmowej gęstości mocy szumu. Jeśli zastosuje się krótkookresową estymatę, to wynik działania algorytmu skutkuje zniekształceniami (występuje wtedy tzw. muzyczny szum). Muzyczny szum jest zjawiskiem, które się pojawia, gdy wyizolowane wartości szczytowe występują w widmie po przetworzeniu go algorytmem odejmowania widmowego. Można tego uniknąć przy użyciu różnych metod – takich, jak np. „przeestymowanie” widmowej gęstości mocy szumu lub ograniczenie wartości filtracji Wienera do minimum, tj. do poziomu tzw. szumów własnych [2].

Pierwsza z wymienionych metod („przeestymowanie” estymat widmowej gęstości mocy szumu) powoduje, że krótkookresowe fluktuacje szumu nie wywołują zmiany współczynników filtra Wienera (przyczyna muzycznego szumu), jednak może prowadzić do redukcji ogólnej jakości dźwięku – komponenty o niskiej mocy mogą być silnie stłumione.

Użycie drugiej metody (ograniczanie redukcji szumu do poziomu szumów własnych), generalnie usuwa ten problem, ale redukuje przy tym efektywność redukcji szumu.

Istnieje również kilka innych metod, np. krótkookresowa wygładzona redukcja szumu, wykorzystująca algorytm Ephraima-Malaha. W zastosowaniach komercyjnych wymagają one jednak wydajnej implementacji.

### 3.2. Rozpoznawanie środowiska dźwiękowego

Podczas adaptacji aparatu słuchowego do zmiennego środowiska pracy, w których ma działać, w nowoczesnych urządzeniach można wykorzystać zapamiętane ustawienia, które dla danych warunków są typowe. Dlatego aparaty słuchowe najwyższej klasy używają systemów inteligentnej klasyfikacji oraz algorytmów uczących się, aby wspomagać urządzenie w adaptacji do różnych charakterystyk pomieszczenia lub przestrzeni, w której działa.

Jedną z najważniejszych cech nowoczesnych aparatów słuchowych jest możliwość automatycznej adaptacji do różnych warunków akustycznych. W ogólności, algorytm adaptacji musi być brać pod uwagę:

- kierunkowość mikrofonu,
- użyte algorytmy redukcji szumu,
- współczynniki kompresji w danych pasmach częstotliwości.

Problem zwykle występuje wtedy, gdy użytkownik aparatu słuchowego zmienia środowisko, w którym przebywa, np. zmieni ciche pomieszczenie na hałaśliwą ulicę lub wyjdzie ze stosunkowo cichego samochodu do klubu muzycznego. Niektóre prekonfigurowane ustawienia mogą działać dobrze w pewnych okolicznościach, ale w innych mogą mieć negatywny wpływ na wynik przetwarzania. Dlatego tak ważna jest potrzeba dokonywania automatycznej adaptacji

pasemowy w zakresie 1 do 4 Hz. Sygnał mowy bez obecności szumu wykazuje oscylacje obwiedni w tym zakresie (1-4 Hz). Jeśli do sygnału dodany jest szum lub przetwarzanym sygnałem jest muzyka, oscylacje te nie występują. Może to być więc cecha, na podstawie której algorytm podejmie decyzję, że w danym momencie przetwarzanym sygnałem wejściowym jest niezaszumiona mowa. Aby dokonać dalszej selekcji sygnału (mowa w szumie czy muzyka), system decyzyjny powinien bazować na dodatkowym zestawie cech, tworzących wektor cech (ang. *feature vector*). W celu wyselekcjonowania cech sygnału można posłużyć się parametrami wykorzystywanymi w rozpoznawaniu sygnału mowy lub sygnałów środowiskowych.

Wyodrębnione w ten sposób cechy sygnału mogą być wykorzystane w klasyfikacji warunków przy pomocy np. standardowego klasyfikatora Bayesa lub sieci neuronowych. Algorytmy te muszą zostać uprzednio wytrenowane (w odpowiednich procedurach treningowych), wykorzystując zależność pomiędzy wektorami cech a wyjściową klasyfikacją sygnału. Do treningu algorytmów powinno się wykorzystywać duże i reprezentatywne bazy sygnałów fonicznych pochodzących z codziennego życia [2].

Wybór danego zestawu algorytmów jest zwykle dokonywany przy użyciu typowej logiki on/off. Jednak mechanizm decyzyjny nie może być zbyt czuły, ponieważ prowadziłoby to do dyskomfortu użytkownika, ze względu na zbyt szybkie przełączanie. Dlatego wykorzystywane są mechanizmy przenikania, które realizują płynne przejście pomiędzy różnymi ustawieniami.

Jest oczywiste, że algorytmy inteligentnej adaptacji nie są doskonałe i podejmowane przez algorytm decyzje nie są zawsze odpowiednie, dlatego alternatywą jest zostawienie użytkownikowi decyzji dotyczącej ustawień algorytmów w zależności od warunków, w których przebywa. W wielu jednak przypadkach (np. starsze osoby lub dzieci), nie jest to możliwe.

## 4. DODATKOWE CECHY APARATÓW SŁUCHOWYCH

### 4.1. Programowalność

Nowoczesne aparaty słuchowe dysponują zwykle możliwością programowania czy to z poziomu specjalizowanych urządzeń, pilotów zdalnego sterowania, czy nawet z aplikacji mobilnych.

### 4.2. Zoom

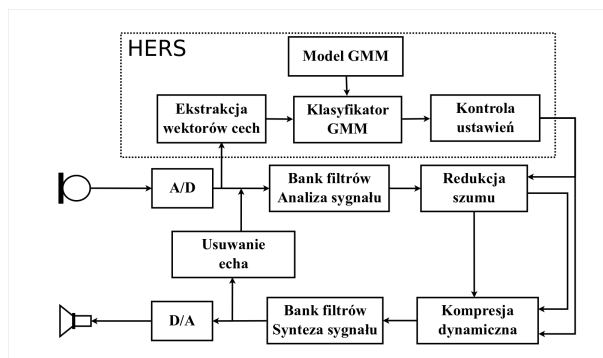
Zoom polega na efektywnym zbieraniu sygnału dźwiękowego z przodu użytkownika aparatu. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu mikrofony kierunkowe. „Zoom” odnosi się najczęściej do mikrofonów kierunkowych pierwszego rzędu.

### 4.3. Blokowanie echa

Funkcja blokowania echa umożliwia redukcję pogłosu w przestrzennych pomieszczeniach, jak wielkie hale czy kościoły. Znakomicie poprawia komfort odsłuchu w takich miejscach. Ten typ przetwarzania wykrywa tzw. wybrzmiewanie pogłosu w sygnale wejściowym. Nie wpływa to na zrozumiałość mowy w pomieszczeniach bez pogłosu czy w sygnałach, gdzie mowa jest najistotniejszym składnikiem, ale może zdecydowanie wspomóc rozumienie w pomieszczeniach o dużym pogłosie.

### 4.4. Tłumienie hałasów impulsowych

Algorytm tłumienia hałasów impulsowych wycisza nagle impulsy dźwiękowe i wycisza je. Jest to szczególnie ważne w tych zakresach częstotliwości, w których aparat słuchowy wzmacnia dźwięk. Nie powinno to wpływać na czystość i zrozumiałość mowy.



Rys. 8. Etapy przetwarzania w cyfrowych aparatach słuchowych ze specjalizowanym systemem rozpoznawania warunków odsłuchowych (*hearing environment recognition system* - HERS)

aparatu do warunków akustycznych.

Najczęściej adaptacja ta jest dokonywana według ogólnego schematu (rys. 8).

Zwykle system rozpoznawania warunków zewnętrznych ekstrahuje wybrane cechy wejściowego sygnału i dopasowuje je do mieszanego modelu gaussowskiego (GMM), aby ustawić dostępne parametry innych algorytmów (np. progi czy czasy kompresji).

Różne cechy mogą być wykorzystane do poprawnego rozpoznania warunków akustycznych. Dla przykładu, oblicza się obwiednię sygnału, a następnie wykorzystuje filtr



#### 4.5. Funkcja redukcji szumu wiatru

Komfort słuchania może być łatwo zakłócony przez wiatr, który wprowadza zmienny szum. Funkcja redukcji szumu wiatru może usuwać takie dźwięki. Dźwięki te powstają poprzez ruch powietrza lub wibracje na membranie mikrofonu. Są rejestrowane i przetwarzane w aparacie – mimo, że nie są “typowymi” dźwiękami.

Istnieje kilka strategii eliminacji redukcji szumu wiatru:

- podejście dwumikrofonowe – szum wiatru rejestrowany przez dwa mikrofony jest zwykle nieskorelowany i zlokalizowany w niskich częstotliwościach; gdy więc aparat wykryje nieskorelowany, niskoczęstotliwościowy szum, jest on usuwany. Może to być realizowane np. poprzez zmianę charakterystyki częstotliwościowej lub/i kierunkowej mikrofonów, np. wytłumienie niektórych pasm częstotliwości;

- wykorzystanie dwuosznego systemu transferu sygnału pomiędzy dwoma aparatami słuchowymi; ponieważ szum wiatru pochodzi zwykle z jednego kierunku, jeden z aparatów jest zwykle bardziej na niego narażony; system może więc przekazywać dźwięki o niskich częstotliwościach z aparatu, który rejestruje szum wiatru w mniejszym stopniu w stosunku do aparatu, który rejestruje go w większym stopniu – dzięki czemu szum wiatru zostaje “zastąpiony” przez właściwy sygnał.

#### 4.6. Eliminacja szumów usznych

Funkcja eliminacji szumów usznych (*tinnitus*) umożliwia generowanie łagodnego szumu, który pozwala zredukować irytujące dźwięki uszne. Eliminacja dźwięków usznych jest częścią szerszej terapii dźwiękowej, dostępnej dla użytkowników aparatów słuchowych. Terapia ta obejmuje wzmacnianie dźwięków tła (przez co szumy uszne stają się mniej słyszalne), poprawę komunikacji z otoczeniem (obniża się w ten sposób poziom stresu) i właściwą kompensację utraty słuchu [17] [18].

#### 4.7. Blokowanie szumu

Funkcja blokowania szumu usuwa całkowicie szum tła, jak np. hałas pochodzący od silników samochodowych, wentylatorów, itd. Jest to realizowane przez opisane wcześniej mechanizmy redukcji szumu.

### 5. KONKLUZJE I PRZYSZŁE KIERUNKI ROZWOJU

#### 5.1. Mikrofony kierunkowe

Wykorzystanie dwóch mikrofonów w pojedynczym aparacie słuchowym nie jest rozwiązaniem idealnym – mikrofony są blisko siebie (z powodu ogólnych rozmiarów pojedynczego aparatu). Lepszą opcją byłoby rozwiązanie dwuoszne – tak, aby dwa aparaty mogły komunikować się ze sobą. Każde urządzenie mogłoby posiadać jeden mikrofon i kierunkowość sygnału byłaby zapewniana przy użyciu tych dwóch mikrofonów. To rozwiązanie wpływa jednak negatywnie na pobór mocy, ponieważ urządzenia muszą komunikować się bezprzewodowo. Stanowi to problem ze względu na rozmiar aparatu oraz przeciętną pojemność baterii. Jednak ostatnie badania wykazały [11] [12], że bezprzewodowa transmisja danych fonicznych pomiędzy aparatami skutkowałą bardziej efektywną kierunkowością urządzeń, szczególnie, gdy testy przeprowadzane były w typowych warunkach, np. tzw. “cocktail-party”. To także pozwoliło wykorzystywać algorytmy *beamformingu* dla aparatów ITC (*in-the-canal*).

Jeden z producentów aparatów słuchowych rozwinął nieco inne podejście (zwane “StereoZoom”): oba urządzenia posiadają dwa mikrofony i wobec tego te dwa aparaty tworzą razem mikrofon kierunkowy trzeciego rzędu. Używany on jest w specyficznych sytuacjach, kiedy wymagana jest bardzo silna kierunkowość [16].

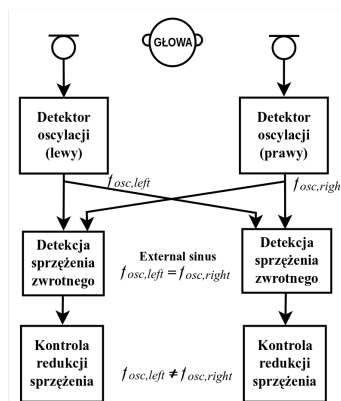
#### 5.2. Przetwarzanie wielokanałowe

Można również wykorzystywać bardziej wyrafinowane algorytmy AGC (*Automatic Gain Control* – automatyczna kontrola wzmocnienia). Da przykładu kontrola parametrów AGC (czas ataku/zwolnienia lub funkcja wejścia/wyjścia) może być wykonywana przez inteligentne klasyfikatory. Wartościowym elementem takiej strategii przetwarzania są dane przesyłane pomiędzy dwoma urządzeniami – pozwoliłoby to uniknąć problemów z lokalizacją źródła sygnału przez umożliwienie synchronizacji mierzonych parametrów [19].

#### 5.3. Redukcja sprzężenia zwrotnego

Również w przypadku redukcji sprzężenia zwrotnego można brać pod uwagę wykorzystanie przez osobę niedosłyszącą dwóch aparatów. Jeśli pomiędzy tymi urządzeniami istnieje połączenie, wtedy aparat słuchowy jest stanie wykrywać sprzężenie zwrotne w sposób bardziej precyzyjny. W tego typu koncepcji przyjmuje się, że oscylacje wykrywane przez jeden z aparatów mogą być wywołane przez sprzężenie zwrotne tylko wtedy, jeśli aparat na drugim uchu nie wykrył oscylacji o dokładnie tej samej częstotliwości [2]. Mechanizm ten został przedstawiony na rysunku 9.

#### 5.4. Inteligentne dopasowanie



Rys. 9. Redukcja sprzężenia zwrotnego przy użyciu łącza danych pomiędzy dwoma aparatami słuchowymi

Przyszłość inteligentnej adaptacji zapewne sprowadzać się będzie do wykorzystania sygnałów pochodzących z wielu mikrofonów, z możliwością wykorzystania przetwarzania dwuosznego (przy zapewnieniu łącza danych pomiędzy oboma aparatami). Wynika to z faktu, że przetwarzanie bazujące na pojedynczym sygnale może nie być efektywne w wielu typowych sytuacjach, np. podczas rozmowy w restauracji z muzyką w tle. Algorytmy powinny wykorzystywać informację o specyficznej detekcji liczbie, typie i kierunku źródeł dźwięku. Algorytmy te znane są pod wspólną nazwą analizy sceny dźwiękowej z wykorzystaniem algorytmów obliczeniowych (CASA – *Computational Auditory Scene Analysis*) [2].

Celem algorytmów CASA jest wytworzenie odseparowanych strumieni dźwiękowych z mieszaniny dźwięków, która odbierana jest przez użytkownika aparatu słuchowego. Liczba strumieni musi być ograniczona (maksymalnie cztery strumienie w danym momencie [14]). Podczas separacji strumieni należy wziąć pod uwagę kilka innych elementów: maskowanie dźwięków w tym samym pasmie częstotliwości, trudność w odseparowaniu dźwięków, takich jak różowy i biały szum oraz poziom słyszalności danego strumienia – co oznacza, że musi on przekraczać pewien poziom dźwięku, aby mógł być uważany za oddzielny strumień.

Istnieje wiele podejść do CASA, jednym z nich jest założenie o idealnej masce binarnej [14]. Koncepcja ta

zakłada zachowanie fragmentów sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości, które są silniejsze niż interferencja, a usunięcie tych, które są od niej słabsze.

### 5.5. Przetwarzanie muzyki

Jednym z najtrudniejszych obszarów dla audiologów i producentów aparatów słuchowych jest przetwarzanie muzyki. Dla muzyków cyfrowe aparaty słuchowe są zwykle mniej akceptowalne niż analogowe [13]. Ma to związek z faktem, że konwertery analogowo-cyfrowe zwykle nie mogą osiągnąć teoretycznej granicy 96-decybelowego zakresu dynamiki (ograniczenie to wynika z wykorzystywanej obecnie w aparatach 16-bitowej architektury przetworników). Oznacza to w praktyce, że jeśli sygnał przekracza poziom 105 dB (SPL), aparat słuchowy może wywoływać zniekształcenia.

Jedną z głównych różnic pomiędzy sygnałem mowy i muzyki jest poziom intensywności dźwięku. Typowa rozmowa ma poziom ok. 65-70 dB SPL [15]. Jednak poziom muzyki może łatwo przekraczać poziom 90 dB SPL i dochodzić do wartości 110 dB SPL.

Komercyjni producenci aparatów słuchowych zademonstrowali nowe podejście do przetworników A/D (technologia TrueInput). Rozszerza ona zakres przetwarzania A/D do 113 dB SPL przy zachowaniu niskiego poziomu szumu. Dzięki temu można wykorzystywać cały zakres mikrofonów do nowoczesnych aparatów słuchowych (do 115 dB SPL bez zniekształceń). Wyniki badań pokazały, że ta technologia może być użyteczna w przypadku osób, które chciałyby korzystać z aparatów słuchowych również w kontekście słuchania muzyki [13].

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Puder H., Hearing Aids: An Overview of the State-of-the-Art, Challenges, and Future. Trends of an Interesting Audio Signal Processing Application, In Proceedings of the 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2009.
2. Hamacher V., Chalupper J., Eggers J., Fischer E., Kornagel U., Puder H., and Rass U., Signal Processing in High-End Hearing Aids: State of the Art, Challenges, and Future Trends, EURASIP Journal on Applied Signal Processing 2005:18, pp. 2915–2929.
3. Kochkin S., The Binaural Advantage, <http://www.betterhearing.org/hearingpedia/hearing-aids/binaural-advantage>
4. Phonak's feature matrix [http://www.phonak.com/com/b2c/en/products/hearing\\_instruments/features/performance-table.html](http://www.phonak.com/com/b2c/en/products/hearing_instruments/features/performance-table.html)
5. Zheng W., Liu M., Hearing Environment Recognition in Hearing Aids, In 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), pp. 1556-1560, 2015.
6. DiCristina J., Introduction to Hearing Aids and Important Design Considerations, <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/4691>.
7. Selecting and purchasing a hearing aid. <http://www.bcaslpa.ca/public/audiology/faq-selecting-and-purchasing-a-hearing-aid/>
8. BTE vs RIC Hearing Aids. <http://www.ziphearing.com/blog/bte-vs-ric-hearing-aids/>
9. Littmann V., Beilin J., Froehlich M., Branda E., Schäfer P.J., Clinical Studies Show Advanced Hearing Aid Technology Reduces Listening Effort, The Hearing Review, April 2016 (<http://www.hearingreview.com/2016/03/clinical-studies-show-advanced-hearing-aid-technology-reduces-listening-effort/>, link z czerwca 2016).
10. Schafer P.J., Serman M., Arnold M., Corona-Strauss F.I., Strauss D.J., Seidler-Fallbohmer B., Seidler H., Evaluation of an objective listening effort measure in a selective, multi-speaker listening task using different hearing aid settings, Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2015, pp. 4647-50, August 2015.
11. Herbig R., Froehlich M., Binaural Beamforming: The Natural Evolution, Hearing Review, May 2015 (<http://www.hearingreview.com/2015/04/binaural-beamforming-natural-evolution/>, link z czerwca 2016).
12. Powers T. A., Froehlich M., Clinical Results with a New Wireless Binaural Directional Hearing System, Hearing Review, October 2014 (<http://www.hearingreview.com/2014/10/clinical-results-new-wireless-binaural-directional-hearing-system/>, link z czerwca 2016)
13. Chasin M., A Hearing Aid Solution for Music, Hearing Review, January 2014 (<http://www.hearingreview.com/2014/01/a-hearing-aid-solution-for-music/>, link z czerwca 2016)
14. DeLiang Wang, On Ideal Binary Mask As the Computational Goal of Auditory Scene Analysis, In P. Divenyi (Ed.), Speech Separation by Humans and Machines, Chapter 12, pp. 181-197, Kluwer Academic, Norwell MA, 2005.
15. Chasin M., Hockley N., Schmidt M., Musicians and Hearing Aid Design—Is Your Hearing Instrument Being Overworked? (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040858/>, link z czerwca 2016).
16. StereoZoom and autoStereoZoom [https://www.phonakpro.com/content/dam/phonak/gc\\_hq/b2b/en/evidence/compendium/Compendium\\_No2\\_auto\\_StereoZoom.pdf](https://www.phonakpro.com/content/dam/phonak/gc_hq/b2b/en/evidence/compendium/Compendium_No2_auto_StereoZoom.pdf) (link z czerwca 2016).
17. Can hearing aids help people with tinnitus? <http://www.tinnitus.org.uk/can-hearing-aids-help-people-with-tinnitus> (link z czerwca 2016).
18. Kostek B., Poremski T., A new method for measuring the psychoacoustical properties of tinnitus, Diagn Pathol. 2013; 8: 209, doi: 10.1186/1746-1596-8-209.
19. Speech in wind [https://www.phonakpro.com/content/dam/phonak/gc\\_hq/b2b/en/elearning/publications/insight/2012/Insight\\_Speech\\_in\\_Wind\\_028-0771.pdf](https://www.phonakpro.com/content/dam/phonak/gc_hq/b2b/en/elearning/publications/insight/2012/Insight_Speech_in_Wind_028-0771.pdf) (link z czerwca 2016).

## A STUDY ON SIGNAL PROCESSING METHODS APPLIED TO HEARING AIDS

This paper presents a short survey on current technology available in hearing aids with a focus on digital signal processing techniques used. First, factors influencing the hearing aid effectiveness are introduced. Then, examples of the current DSP methods and strategies are shown. Also, a description of existing limitations of hearing aids and future trends of development are provided. Finally, the notion of computational auditory scene analysis is presented as a possible solution for improving quality of speech and music perception while using a hearing prosthesis.

**Keywords:** digital hearing aids; signal processing; multichannel processing; noise and distortion reduction, feedback compensation.