

Aleksander P. Sęk

Instytut Akustyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza
Poznań

Czy wstęgi krytyczne poprawnie opisują filtrowanie zachodzące w peryferyjnym układzie słuchowym

Does Critical Bandwidth Describe Adequately the Filtration which Occurs in the Peripheral Auditory System

Słowa kluczowe: wstęgi krytyczne, filtrowanie dźwięków, peryferyjny układ słuchowy.
Key words: critical bandwidth, sound filtration, peripheral auditory system.

Streszczenie

W pracy niniejszej wykazano, że krytyczna częstotliwość modulacji nie jest poprawnym estymatorem szerokości filtru słuchowego (wstęgi krytycznej) dla częstotliwości mniejszych od ok. 250 Hz. Analizując detekcję modulacji mieszanej dla częstotliwości 50 i 1000 Hz oraz dla częstotliwości modulacji bliskiej krytycznej częstotliwości modulacji, stwierdzono, że detekcja modulacji zachodzi wyłącznie w oparciu o dolną składową widma. Dla małych częstotliwości nośnych, 125 Hz, stwierdzono natomiast, że detekcja modulacji zachodzi w oparciu o górną składową widma. Jednakże górne składowe widm sygnałów zmodulowanych amplitudowo (AM) i częstotliwościowo (FM) nie różnią się fazami początkowymi, co ma miejsce w przypadku dolnych składowych. Krytyczna częstotliwość modulacji, wyrażająca tę wartość częstotliwości modulacji, od której progi AM i FM zaczynają przyjmować jednakowe wartości (dla najmniejszych częstotliwości nośnych), nie odzwierciedla wrażliwości układu słuchowego na strukturę fazową sygnału. Częstotliwość ta, zgodnie z sugestią Zwickera [1952], stanowi granicę tej wrażliwości w dziedzinie częstotliwości modulacji i określa połowę szerokości wstęgi krytycznej. Dlatego też w przypadku najmniejszych nośnych częstotliwości krytyczna częstotliwość modulacji nie zawiera żadnych informacji o szerokości filtru słuchowego.

Zmiana składowej, która ma decydujące znaczenie dla detekcji modulacji, wraz ze zmniejszaniem częstotliwości, jest przyczyną stałej wartości szerokości wstęg krytycznych w zakresie najmniejszych częstotliwości. Gdyby detekcja modulacji zachodziła zawsze w oparciu o filtr słuchowy, którego częstotliwość środkowa byłaby w stałej relacji z częstotliwością nośną sygnału, szerokość wstęg krytycznych malałaby systematycznie nawet dla najmniejszych częstotliwości nośnych, tak jak ma to miejsce w przypadku filtrów słuchowych wyznaczonych na podstawie metody szumu pasmowozaporowego.

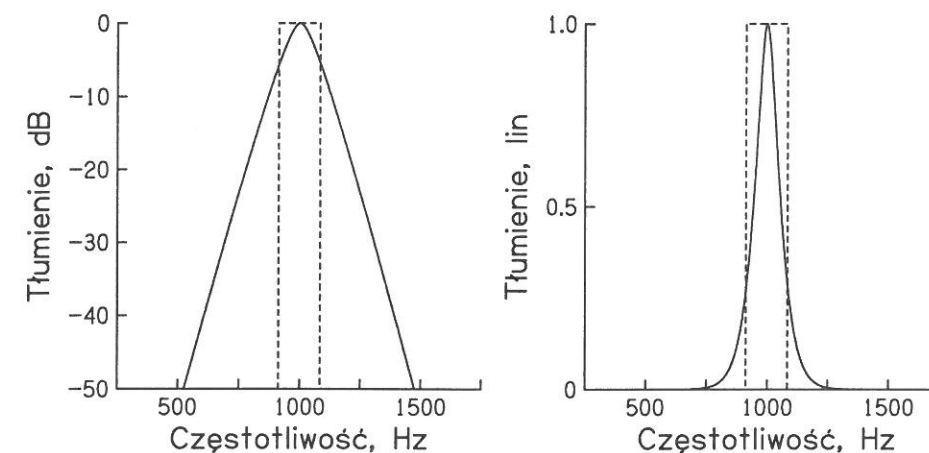
Summary

This paper is concerned with the comparison of the critical bandwidth (CB) and the equivalent rectangular bandwidth (ERB) of the auditory filters at low frequencies. The method of critical bandwidth determination based on the critical modulation frequency (CMF) has been questioned, particularly for frequencies less than 500 Hz. The CMF, which is the modulation frequency at which amplitude modulation (AM) and frequency modulation (FM) detection thresholds become identical, is confounded as a proper measure of the auditory filter's width. It refers to the modulation rate for which one of the sidebands is most detectable. For low carrier frequencies the higher sideband is most detectable whereas for higher carrier frequencies the lower sideband becomes most detectable. Thus, at least for low carrier frequencies (i.e. less than 200 Hz), the CMF does not reflect the auditory system's sensitivity for detecting the phase differences of the spectral components of the signal. These findings can account for the fact that the critical bandwidth flattens off at low carrier frequencies, whereas the equivalent rectangular bandwidth of the auditory filters continues to decrease down to very low centre frequencies. It was also shown that, at least for very low frequencies, critical bands do not reflect directly the auditory filtering that takes place in the peripheral auditory system.

Peryferyjny układ słuchowy człowieka jest najczęściej opisywany za pomocą układu liniowych, pasmowoprzepustowych, nakładających się na siebie filtrów. Prace nad fizjologią układu słuchowego sugerują, że podstawą procesu filtrowania jest bez wątpienia błona podstawna ślimaka ucha wewnętrznego. Sygnał sinusoidalny wywołuje wychylenie błony podstawnej z położenia równowagi, która drga z częstotliwością fali wymuszającej, a położenie maksimum obwiedni tych drgań (względem okienka owalnego, które stanowi niejako początek ślimaka) zależy od częstotliwości. Dźwięki o dużej częstotliwości wytwarzają maksimum pobudzenia blisko okienka owalnego, podczas gdy dźwięki o małej częstotliwości – bliżej helikotremy. (Każdemu punktowi błony podstawnej przypisuje się wielkość nazywaną „częstotliwością charakterystyczną”, która wyraża częstotliwość tonu wytwarzającego maksymalne wychylenie w tym właśnie punkcie błony podstawnej [Pickles 1988; Moore 1997]). Dzięki tej funkcji ślimak zachowuje się jak analizator fourierowski (o nie najlepszej rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości), rozkładający złożone bodźce akustyczne na poszczególne składowe sinusoidalne. Mówi się też dość często, że błona podstawna dokonuje konwersji częstotliwość – miejsce, każdemu bowiem jej punktowi odpowiada ściśle określona częstotliwość, co stanowi kwintesencję tzw. teorii miejsca.

Z fizycznego punktu widzenia tę podstawową funkcję ślimaka można opisać za pomocą procesu filtrowania, tj. przepuszczania bodźca akustycznego przez układ filtrów. Jeśli każdy punkt błony podstawnej zachowuje się z przybliżeniem jak pasmowoprzepustowy filtr o określonej częstotliwości środkowej, szerokości pasma przepustowego i nachyleniu zboczy, to zbiór takich filtrów (tzw. filtrów słuchowych), po jednym filtrze dla każdego punktu błony podstawnej (lub dla bardzo krótkich odcinków tej błony), może stanowić model

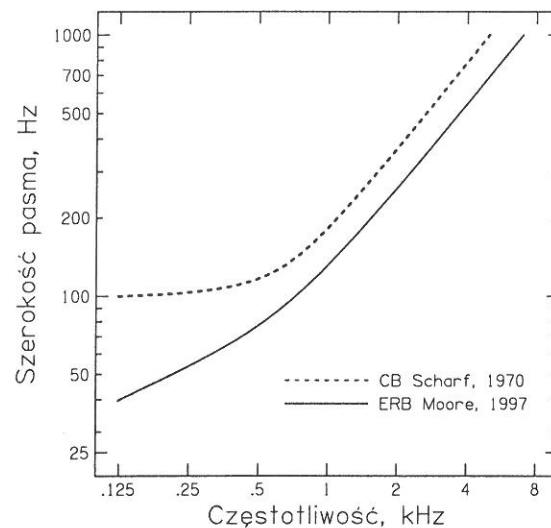
funkcjonowania tej części układu słuchowego. Sygnały wyjściowe z tych filtrów, jako funkcja ich częstotliwości środkowej, stanowią odwzorowanie aktywności układu słuchowego, którą można mierzyć w pomiarach psychofizycznych. Poprzez aktywność układu słuchowego rozumieć należy, bądź obwiednię wychylenia błony podstawnej jako funkcję odległości od okienka owalnego, bądź też aktywność neuronów (liczbę impulsów czynnościowych w jednostce czasu) jako funkcję ich częstotliwości charakterystycznej. Tę aktywność wyrażoną jako funkcję częstotliwości nazywa się „pobudzeniem”.



Ryc. 1. Porównanie wstęgi krytycznej (linie przerywane) i filtru słuchowego (linie ciągłe i równanie 1) wykreślonych w skali logarytmicznej i liniowej

Niemal wszystkie modele funkcjonowania peryferyjnego układu słuchowego oparte są w mniejszym lub większym stopniu na teorii miejsca. Najważniejsze znaczenie zyskały sobie, jak dotychczas model Zwickera [Maiwald 1967 a; 1967 b; Zwicker, Feldtkeller 1967] oraz model Pattersona i Moore'a [1974; 1976]. Model Zwickera, zapoczątkowany pracami Fletchera [1940], zakłada, że filtr słuchowy ma prostokątną obwiednię widmową (przepuszcza wszystkie składowe przypadające na pasmo przepuszczania z jednakową wartością funkcji ważącej) i jego szerokość jest równa szerokości jednej wstęgi krytycznej (zob. linia przerywana na ryc. 1). Układ takich prostokątnych filtrów, nakładających się na siebie, a nie sąsiadujących z sobą, stanowi zasadnicze założenie tego modelu. Szerokości wstęg krytycznych (pasm krytycznych) wyznaczono, jak dotychczas, w wielu różnych eksperymentach dotyczących maskowania, próbując określić pewien punkt charakterystyczny w danych empirycznych wiążących spostrzeganie bodźca z szerokością pasma sygnału maskowanego lub maskującego. Jak bowiem orzeka definicja zaproponowana przez Scharfa [1970], „wstęga kryty-

czna jest ta szerokością pasma, dla której subiektywna odpowiedź zmienia się gwałtownie”. Liczne badania poświęcone temu problemowi zostały podsumowane przez Scharfa [1970], który przedstawił zależność szerokości wstęg krytycznych od częstotliwości środkowej. Zależność tę, która stała się światowym, do dziś szeroko stosowanym standardem, przedstawiono na ryc. 2 za pomocą linii przerywanej.



Ryc. 2. Porównanie „tradycyjnych” wstęg krytycznych przedstawionych przez Scharfa [1970] oraz ekwiwalentnych szerokości prostokątnych filtru słuchowego przedstawionych przez Moore’a [1997]

Stopień udokumentowania tej zależności dla częstotliwości większych od 1 kHz nie budzi zastrzeżeń. Prezentowane w literaturze dane uzyskane na podstawie różnych metod pomiarowych są zgodne i pokazują jednakowy wzrost szerokości pasma krytycznego wraz ze wzrostem częstotliwości. Szereg wątpliwości budzi jednak przyjmowany przebieg tej zależności dla częstotliwości mniejszych od 500 Hz, gdyż jest on wynikiem aproksymacji. Dokonano jej na podstawie niewielkiej ilości danych eksperymentalnych, pochodzących głównie z pomiaru ilorazu krytycznego [Fletcher 1940] oraz progów maskowania [Zwicker 1961].

Przyjęcie założenia stałości wstęg krytycznych dla częstotliwości do 500 Hz, a więc w tym zakresie częstotliwości, którym posługujemy się na co dzień, jest dość dyskusyjne. Jest niewiele faktów obserwowanych eksperymentalnie, które sugerować mogą, że filtry słuchowe reprezentowane w modelu Zwickera przez wstęgi krytyczne są stałe w tym zakresie częstotliwości. Wiele natomiast wyników badań psychofizycznych i neurofizjologicznych sugeruje, że szerokość

filtru słuchowego zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem częstotliwości nawet dla najmniejszych jej wartości [Pickles 1988; Zwicker, Fastl 1990; Moore 1997]. Najważniejsza wydaje się selektywność częstotliwościowa, czyli fundamentalna własność układu słuchowego, pod którą kryje się zdolność słyszenia jako oddzielnych dwóch sygnałów tonalnych występujących jednocześnie. Zdolność ta, mierzona poprzez najmniejszą różnicę częstotliwości sygnałów ocenianych jako dwa różne współistniejące tony, maleje systematycznie wraz ze zmniejszaniem częstotliwości sygnałów nawet do najniższych wartości, co nie może być zinterpretowane na podstawie założeń stałej szerokości filtru. Zatem przyjęcie stałej wartości szerokości wstęg krytycznych dla małych częstotliwości jest bez wątpienia zbyt daleko idącym uproszczeniem i eksperymentalne wyznaczenie szerokości wstęg krytycznych dla najmniejszych wartości częstotliwości mogłoby lepiej udokumentować dotychczas przyjmowany ich przebieg i w konsekwencji zweryfikować model Zwickera w tym zakresie częstotliwości.

Alternatywnym podejściem do modelowania filtrów słuchowych jest model zaproponowany przez Pattersona i Moore’a [Patterson 1974; Patterson 1976; Patterson, Moore 1986]. Założyli oni, że aktywność układu słuchowego wywołaną sygnałem akustycznym można traktować jako wynik przejścia sygnału przez układ pasmowo przepustowych filtrów słuchowych opisanych za pomocą funkcji eksponencjalnych typu $roex(f)$. Założyli też, że aktywność tę można mierzyć w pomiarach psychofizycznych.

W najprostszym ujęciu modelu Pattersona-Moore’a [1986] zbocza filtru słuchowego można opisać za pomocą zależności:

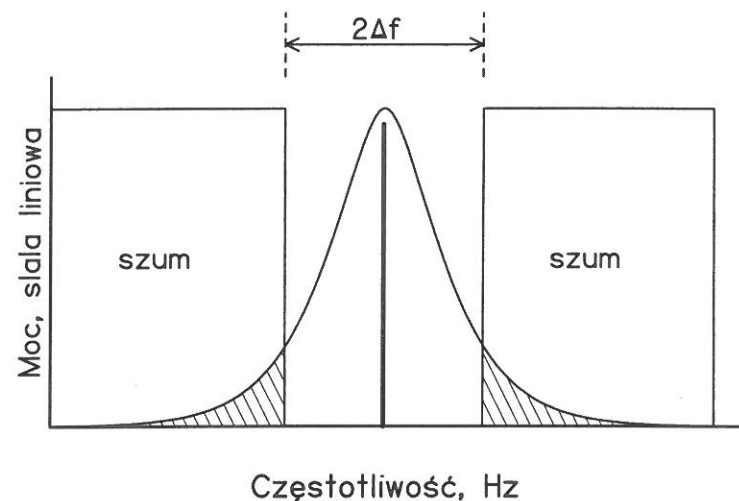
$$W(g) = (1 + pg)e^{-pg}, \quad (1)$$

gdzie $W(g)$ jest funkcją ważącą, g względną dewiacją częstotliwości: $g = |f - f_0|/f_0$, a p określa nachylenie zboczy filtru oddzielnie od strony dużych i małych częstotliwości względem częstotliwości środkowej. Przyjęcie założenia, że filtry słuchowe mają określony kształt, umożliwia wyznaczenie ich głównych parametrów na podstawie badań psychofizycznych. Jedną z metod określania kształtu filtru słuchowego oparta jest na wyznaczaniu tzw. psychofizycznych krzywych strojenia [Vogten 1974], choć z uwagi na zjawisko słyszenia za pomocą filtru o częstotliwości innej niż częstotliwość sygnału (ang. *off-frequency listening*) polegające na tym, że układ słuchowy nie zawsze korzysta z filtru „nastrojonego” na częstotliwość sygnału, a często z filtru dającego największy stosunek sygnału do szumu [Patterson, Nimmo-Smith 1980; O’Loughlin, Moore 1981], metoda ta nie przynosi najlepszych rezultatów i nie jest szeroko stosowana. Patterson [1976] zaproponował metodę określania parametrów filtru słuchowego opartą na zastosowaniu szumu pasmowozaporowego. W metodzie tej wyznacza się progi

maskowania tonu o częstotliwości równej częstotliwości środkowej pasma zaporowego szumu w zależności od szerokości pasma zaporowego (zob. ryc. 3). Poszerzanie odstepu częstotliwości $2\Delta f$ pomiędzy pasmami szumu maskującego powoduje, że coraz mniej energii zawartej w szumie maskującym przechodzi przez filtr słuchowy związany z sygnałem (zaciemnione obszary na ryc. 3). Moc sygnału P_s na progu jego detekcji wyrażona jest za pomocą równania:

$$P_s = \int_0^\infty W(f)N(f)df, \quad (2)$$

gdzie $W(f)$ jest kształtem filtru (por. równanie 1), $N(f)$ mocą szumu maskującego, a K stałą korespondującą z ilorazem mocy sygnału i mocy szumu na wyjściu filtru słuchowego. Wyznaczenie mocy sygnału P_s , a progu detekcji w zależności odstepu częstotliwości Δf pomiędzy pasmami szumu pozwala na określenie parametrów filtru słuchowego, którego przykład przedstawiono na ryc. 1.



Ryc. 3. Schematyczne przedstawienie metody Pattersona [1976] wyznaczania kształtu obwiedni filtru słuchowego

Miarą szerokości filtru słuchowego jest tzw. ekwiwalentna szerokość prostokątna (ERB). Jest ona liczbowo równa szerokości idealnego prostokątnego filtru o wartości transmitancji równej maksymalnej transmitancji filtru słuchowego, przy czym moc szumu przechodzącego przez ten filtr jest równa mocy szumu przechodzącego przez filtr słuchowy.

Przebieg zależności ekwiwalentnej szerokości filtrów słuchowych od częstotliwości jest opisany za pomocą następującej zależności, [Glasberg, Moore 1990]:

$$ERB = 24.7(4.37F + 1), \quad (3)$$

gdzie F jest częstotliwością środkową filtru wyrażoną w kHz. Przebieg tej zależności jest w pełni udokumentowany w przedziale częstotliwości 80-12000 Hz, [Moore, Glasberg 1983; Dubno, Dirks 1989 a; 1989 b; Glasberg, Moore 1990; Moore (i in.) 1990; Shailer (i in.) 1990; Rosen (i in.) 1992; Rosen, Stock 1992; Moore 1995; Zhou 1995]. Zależność tę ilustruje linia ciągła na ryc. 2.

Porównanie szerokości wstęg krytycznych i ekwiwalentnych szerokości filtrów słuchowych pozwala stwierdzić, że przyjmowane w literaturze szerokości wstęg krytycznych (CB) są generalnie większe niż ekwiwalentna szerokość filtrów słuchowych (ERB), jakkolwiek w przedziale częstotliwości 500-5000 Hz iloraz CB/ERB jest w przybliżeniu stały i osiąga wartość ok. 1.22-1.5. Ten liniowy, w przybliżeniu, związek pozwala stwierdzić, że w tym przedziale częstotliwości oba modele, tj. Zwickera i Pattersona-Moore'a, są zgodne. Jednakże dla częstotliwości mniejszych od 500 Hz iloraz szerokości CB/ERB wzrasta w miarę zmniejszania częstotliwości. Wstęgi krytyczne są prawie trzykrotnie szersze niż ekwiwalentna szerokość filtrów słuchowych dla częstotliwości 100-120 Hz. Różne przebiegi szerokości wstęg krytycznych i ekwiwalentnych szerokości prostokątnych w zależności od częstotliwości sugerują, że w tym zakresie częstotliwości modele te nie są zgodne. Sytuację dodatkowo komplikuje fakt, że wstęgi krytyczne dla tego zakresu częstotliwości wyznaczone zostały na podstawie aproksymacji niewielkiej ilości danych eksperymentalnych. Brak danych eksperymentalnych nie może być oczywiście argumentem na rzecz odrzucenia jednej koncepcji na korzyść drugiej. Należy raczej podważyć zasadność koncepcji wstęg krytycznych lub wykazać, że metody ich wyznaczania są obarczone błędami, by zaakceptować alternatywny model.

I. KRYTYCZNA CZĘSTOTLIWOŚCI MODULACJI JAKO MIARA SZEROKOŚCI FILTRU SŁUCHOWEGO

Jedną z metod określania szerokości wstęgi krytycznej jest oparta na pomiarze progów detekcji modulacji amplitudowej (AM) i częstotliwościowej (FM). Dla małych częstotliwości modulacji, f_{mod} , progi te są znacząco różne, ale w miarę wzrostu jej wartości różnica ta staje się coraz mniejsza. Od pewnej częstotliwości modulacji, nazywanej „krytyczną częstotliwością modulacji”

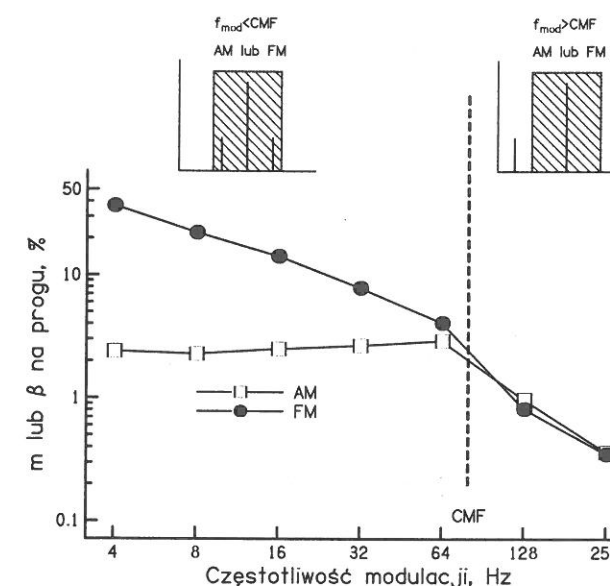
(CMF), której wartość zależy dodatkowo od częstotliwości nośnej, f_c , progi te są w przybliżeniu jednakowe.

Dla małych wartości wskaźników modulacji (m i β), takich jak wartości progowe, widma sygnałów zmodulowanych amplitudowo i częstotliwościowo są do siebie bardzo zbliżone i zawierają po trzy składowe spektralne o częstotliwościach $f_c - f_{mod}$, f_c , $f_c + f_{mod}$. Jedyną różnicą pomiędzy tymi sygnałami jest faza „dolnej” składowej o częstotliwości $f_c - f_{mod}$, która dla tych dwóch sygnałów (AM i FM) przyjmuje przeciwne wartości, co schematycznie (w postaci prążków skierowanych „do góry” i „ku dołowi”) przedstawiono na ryc. 4. Różnica faz tych składowych powoduje, że przebiegi czasowe sygnałów AM i FM różnią się. Jeśli zatem w pewnym zakresie częstotliwości modulacji te dwa rodzaje sygnałów (AM i FM) są percypowane w inny sposób (progi detekcji AM i FM są różne), to różnica ta musi wynikać z różnicy faz tych składowych. Można więc zatem powiedzieć, że układ słuchowy jest wrażliwy na strukturę fazową sygnału, co w odniesieniu do prezentowanych zagadnień nazywane jest „jednousznym efektem fazy” [Mathes, Miller 1947]. Warto jednak podkreślić, iż wrażliwość ta nie występuje w odniesieniu do całego zakresu częstotliwości modulacji, jako że w sytuacji, gdy częstotliwość modulacji przekroczy swoją krytyczną wartość (CMF), progi AM i FM przyjmują jednakowe w przybliżeniu wartości. A zatem różnica fazy tych składowych nie odgrywa wówczas większej roli. Krytyczna częstotliwość modulacji jest więc pewnym punktem granicznym dzielącym dziedzinę częstotliwości modulacji na dwa obszary: jeśli $f_{mod} < CMF$, to struktura fazowa sygnału ma zasadnicze znaczenie dla detekcji modulacji, w przeciwnym przypadku, tj. gdy $f_{mod} > CMF$, relacje fazowe poszczególnych składowych dźwięku nie są istotne.



Ryc. 4. Schematyczne przedstawienie widm sygnałów zmodulowanych amplitudowo (AM) i częstotliwościowo (FM). W przypadku małych wartości wskaźników modulacji, m i β , widma te różnią się fazą dolnej składowej, co w postaci prążka skierowanego ku dołowi wykreślono dla sygnału FM

Zwicker [1952] założył, że wartość krytycznej częstotliwości modulacji odpowiada połowie szerokości wstęgi krytycznej. Zasugerował też, że jeśli widmo sygnału zmodulowanego zawarte jest w całości w jednej wstędze krytycznej, to struktura fazowa sygnału jest istotna dla jego percepcji, a w przypadku detekcji modulacji AM i FM przyczynia się do znacznych różnic wartości progowych (por. lewą stronę ryc. 5). Z chwilą jednak, gdy częstotliwość modulacji przekroczy swą krytyczną wartość, boczne składowe sygnału zmodulowanego nie mieszczą się we wstędze krytycznej, której częstotliwość środkowa odpowiada częstotliwości nośnej, i wówczas faza dolnej składowej widm sygnałów AM i FM nie wpływa w zasadniczy sposób na detekcję modulacji (por. prawą stronę ryc. 5). Ten punkt widzenia jest dodatkowo poparty przez fakt, że z chwilą, gdy częstotliwość modulacji przekroczy CMF, następuje zdecydowany spadek wartości zarówno progów AM, jak i szybszy spadek progów FM, co – w myśl definicji Scharfa [1970] – oznacza właśnie moment przekroczenia zakresu jednej wstęgi krytycznej. Wyznaczenia wartości krytycznej częstotliwości modulacji dokonuje się zazwyczaj na podstawie analizy regresji zależności $\log_{10}(\beta_{th}/m_{th})$, która jest w przybliżeniu liniowa i osiąga wartość zerową dla $f_{mod} = CMF$ [Sęk 1994 a; 1994 b).

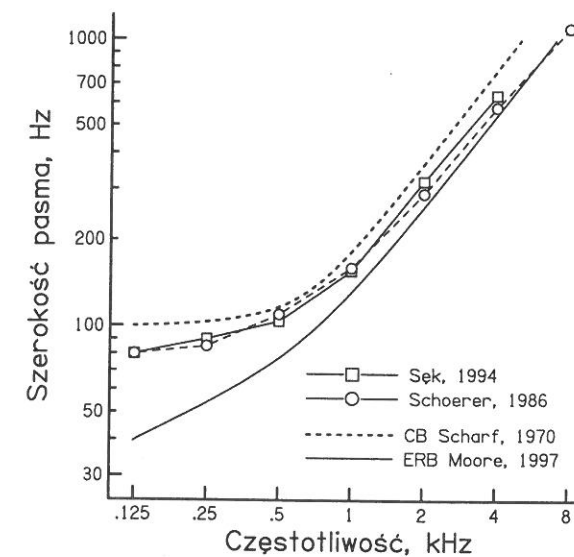


Ryc. 5. Krytyczna częstotliwość modulacji to ta wartość częstotliwości modulacji, dla której progi AM (nie wypełnione symbole) i FM (wypełnione symbole) osiągają jednakowe wartości. Jest ona pewnym punktem podziału (linia przerywana) częstotliwości modulacji na dwa obszary, w których struktura fazowa sygnału odgrywa zupełnie inną rolę. Jest to jednocześnie ta wartość odstepu częstotliwości pomiędzy składowymi widma sygnału zmodulowanego, przy którym wszystkie składowe sygnału zmodulowanego przestają mieścić się w jednej wstędze krytycznej związanej z sygnałem nośnym, co schematycznie ilustrują dwa diagramy w górnej części rysunku

Jednymi z ostatnich prac dotyczących wyznaczenia krytycznej częstotliwości modulacji, a na jej podstawie szerokości wstęg krytycznych, są prace Sęka [1994 a; 1994 b] i Schorera [1986]. Zasugerowali oni, że ta metoda wyznaczania parametrów filtru słuchowego jest jedną z najlepszych metod, zwłaszcza w odniesieniu do najmniejszych częstotliwości, a więc tego zakresu, dla którego ilość danych eksperymentalnych jest niewielka. Sęk i Schorer przedstawili następujące argumenty na korzyść tej metody:

- Najmniejsza z możliwych szerokość spektralna sygnału, który lokalizowany jest tylko w wąskim obszarze częstotliwości, związanym w zasadzie z jedną wstęgą krytyczną,
- Ponieważ szerokość spektralna sygnału jest mała, zmienność progu absolutnego dla bardzo małych częstotliwości wpływa w najmniejszym stopniu na efektywność tego sygnału.
- Detekcja modulacji ma miejsce na progu, co pozwala sądzić, że zjawisko słyszenia za pomocą filtru o częstotliwości innej niż częstotliwość sygnału (tzw. *off-frequency listening*) [Patterson, Nimmo-Smith 1980; O'Loughlin, Moore 1981], nawet jeśli występuje w tym przypadku, to ma bardzo niewielkie znaczenie.
- Stosowanie sygnałów AM i FM nie powoduje powstania tonów kombinacyjnych, a więc pewnej formy zniekształceń nieliniowych wytwarzanych w ślimaku i mających zasadnicze znaczenie w przypadku eksperymentów związanych z maskowaniem [Moore 1997]. Metoda ta może być stosowana również dla dużych poziomów ciśnienia akustycznego.

Podsumowanie wyników Schorera i Sęka oraz porównanie ich z szerokościami wstęg krytycznych zaproponowanymi przez Scharfa [1970] i ekwiwalentnymi szerokościami prostokątnymi filtrów słuchowych przedstawiono na ryc. 6. Generalnie szerokości wstęg krytycznych wyznaczonych na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji mają wartości mniejsze niż „klasyczne” wstęgi krytyczne i większe niż ekwiwalentne szerokości prostokątne. Dla dużych częstotliwości nośnych, tj. większych od 500 Hz, wszystkie krzywe przedstawione na ryc. 6 są w przybliżeniu równoległe, co sugeruje, że w tym zakresie częstotliwości przebiegi te są jakościowo zgodne, choć wartości liczbowe są różne. Nieco inną sytuację obserwuje się dla częstotliwości mniejszych od 500 Hz. Wstęgi krytyczne wyznaczone na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji nie przyjmują stałych wartości, tak jak „klasyczne” wstęgi krytyczne, lecz maleją wraz ze zmniejszaniem częstotliwości nośnej, osiągając wartość ok. 70 Hz dla częstotliwości 125 Hz, co jest rezultatem jakościowo różnym i istotnym statystycznie, gdy analizuje się różnicę tych danych [Sęk 1994 a; 1994 b]. Rezultat ten świadczy o tym, że szerokość filtru słuchowego (wyrażona za pomocą prostokątnego przybliżenia jego obwiedni) nie jest wartością stałą w tym przedziale częstotliwości.



Ryc. 6. Porównanie szerokości wstęg krytycznych wyznaczonych na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji [Schorer 1986; Sęk 1994 b] oraz wstęg krytycznych przedstawionych przez Scharfa [1970] i ekwiwalentnych szerokości prostokątnych filtru słuchowego przedstawionych przez Moore'a [1997]

Wartości uzyskane przez Schorera i Sęka są jednak zdecydowanie większe od ekwiwalentnych szerokości prostokątnych. I choć podważają one dość istotnie zasadność założenia stałości szerokości filtru słuchowego dla małych częstotliwości, to nie przynoszą rozstrzygnięcia kwestii: który z modeli – Zwickera czy Pattersona i Moore'a – lepiej opisuje proces filtrowania w peryferyjnym układzie słuchowym. Należy jednak zwrócić uwagę na jeden istotny szczegół: metoda określania szerokości wstęgi krytycznej na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji jest zasadna tylko wówczas, gdy występuje jednuszny efekt fazy, a więc wtedy, gdy dolna składowa widma sygnału zmodulowanego decyduje o detekcji modulacji. Jeśli jednak detekcja modulacji zachodziłaby w oparciu o górną składową widma (o częstotliwości $f_c + f_{mod}$), to z uwagi na brak różnicy fazy tych składowych dla sygnału AM i FM nie można byłoby mówić o wystąpieniu jednuszego efektu fazy i o wrażliwości układu słuchowego na strukturę fazową sygnału. Podstawowe założenie tej metody nie byłoby w takiej sytuacji spełnione i jeśli nawet można byłoby wyznaczyć wówczas krytyczną częstotliwość modulacji, to wielkość ta nie byłaby poprawnym estymatorem szerokości filtru słuchowego. Czy jednak możliwe jest, by w warunkach modulacji dolna składowa nie była czynnikiem decydującym o detekcji modulacji?

III. DETEKCJA MODULACJI MIESZANEJ

W warunkach modulacji mieszanej, tj. jednocześnie występującej modulacji amplitudowej i częstotliwościowej tego samego sygnału nośnego, amplituda i częstotliwość zmieniają się zgodnie z przebiegami zastosowanych modulatorów. Jeśli zastosuje się sygnał modulujący o częstotliwości f_{mod} w odniesieniu do zmian amplitudy i częstotliwości, wówczas przebieg czasowy sygnału zmodulowanego można zapisać następująco:

$$A_{MM}(t) = A_0 (1 + m \cos(2\pi f_{mod} t + \Phi)) \times \cos(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_{mod} t + \Theta)), \quad (4)$$

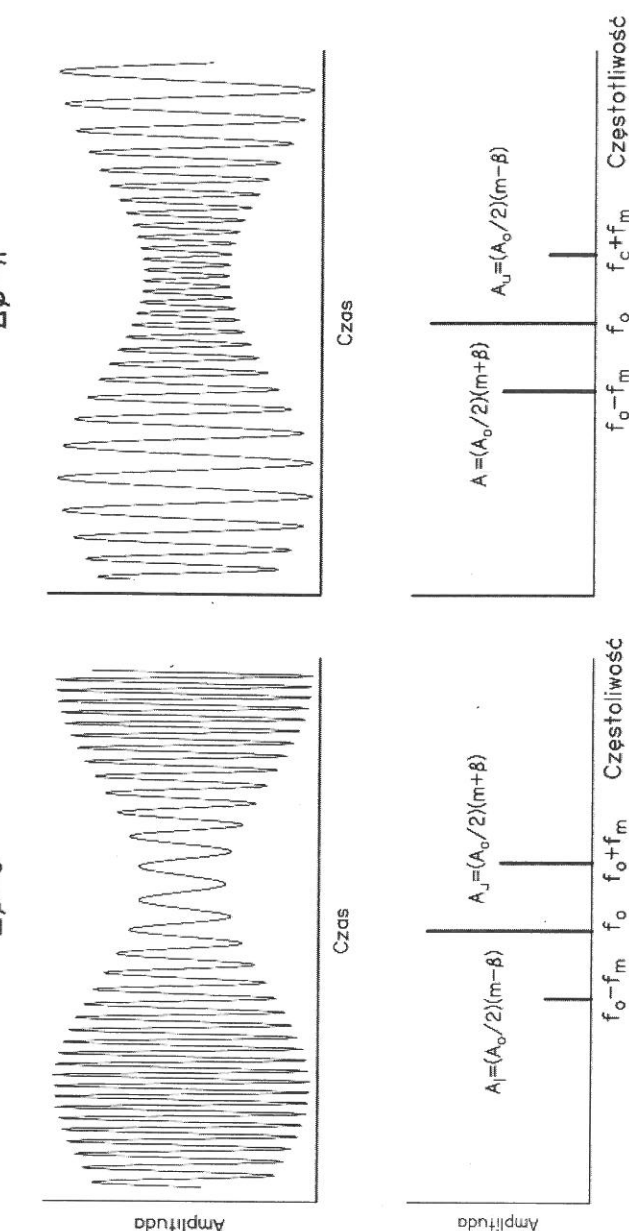
gdzie m i β są wskaźnikami modulacji amplitudowej i częstotliwościowej, f_c i f_{mod} częstotliwością nośną i modulacji, a Φ i Θ oznaczają fazy początkowe modulatorów. W najprostszym przypadku, gdy $\Delta\varphi = \Phi - \Theta = 0$, maksymalna wartość amplitudy sygnału zmodulowanego występuje w tym samym momencie czasu, co jego maksymalna częstotliwość. Natomiast w przypadku gdy $\Delta\varphi = \Phi - \Theta = \pi$ maksimum amplitudy przypada na minimum częstotliwości i vice versa. Jeśli założyć, że m i β przyjmują małe wartości, co jest słuszne, jeśli bierze się ich wartości okołoprołowe oraz pominie wyrażenia proporcjonalne do $m^*\beta$, to widmo sygnału MM można przedstawić za pomocą trzech składowych o częstotliwościach $f_c - f_{mod}$, f_c , $f_c + f_{mod}$ i amplitudach zależnych od różnicy faz $\Delta\varphi$. Przykładowe widma sygnałów MM dla $\Delta\varphi = 0$ i π oraz odpowiadające im przebiegi czasowe przedstawiono na ryc. 7. Wartości wskaźników modulacji dobrane zostały arbitralnie tak, by w możliwie najlepszy sposób zilustrować zmiany amplitudy i częstotliwości.

Rozpatrzmy dwa główne przypadki przedstawione na ryc. 7. Jeśli różnica faz modulatorów $\Delta\varphi = 0$, to amplitudę dolnej, A_L , i górnej, A_U , składowej można zapisać następująco:

$$A_L = \frac{A_0}{2} |m - \beta| \quad \text{i} \quad A_U = \frac{A_0}{2} |m + \beta| \quad (5)$$

w przypadku zaś $\Delta\varphi = \pi$:

$$A_L = \frac{A_0}{2} |m + \beta| \quad \text{i} \quad A_U = \frac{A_0}{2} |m - \beta| \quad (6)$$



Ryc. 7. Schematyczne przedstawienie przebiegów czasowych i widm sygnałów modulacji mieszanej dla dwóch wartości przesunięcia fazowego sygnału modulującego amplitudę i częstotliwość. Wartości wskaźników modulacji amplitudowej i częstotliwościowej zostały dobrane arbitralnie po to, by jak najlepiej zilustrować jednocześnie występujące zmiany amplitudy i częstotliwości

Jeśli zatem przyjąć podprogową wartość jednego ze wskaźników modulacji (np. $m < m_{th}$) i przy określonej wartości $\Delta\phi$ zmieniać drugi wskaźnik (czyli β), to można zmieniać poziom składowych tak, że jedna z nich osiągnie wartość wystarczającą dla detekcji modulacji. Ponieważ wzrost wskaźnika modulacji częstotliwościowej β przy ustalonym podprogowym wskaźniku modulacji amplitudowej wywołuje przeciwne zmiany amplitud bocznych składowych, to można się spodziewać, że to tylko jedna ze składowych osiągnie w danych warunkach wystarczającą wartość, by zadecydować o detekcji modulacji. Można się zatem pokusić o następujące przewidywania: Jeśli d o l n a składowa jest odpowiedzialna za detekcję modulacji, to podprogowe indeksy modulacji, na progu detekcji modulacji, powinny spełniać następujące równania:

$$\text{dla } \Delta\phi = 0 \quad \frac{\beta}{\beta_{th}} = 1 + \frac{m}{m_{th}}, \quad (7)$$

$$\text{dla } \Delta\phi = \pi \quad \frac{\beta}{\beta_{th}} = 1 - \frac{m}{m_{th}}, \quad (8)$$

co schematycznie przedstawiono również w prawej części ryc. 8.

Założmy teraz, że to jednak g ó r n a składowa widma sygnału zmodulowanego jest odpowiedzialna za detekcję modulacji. Wówczas na progu detekcji modulacji mieszanej powinny być spełnione następujące zależności

$$\text{dla } \Delta\phi = 0 \quad \frac{\beta}{\beta_{th}} = 1 - \frac{m}{m_{th}}, \quad (9)$$

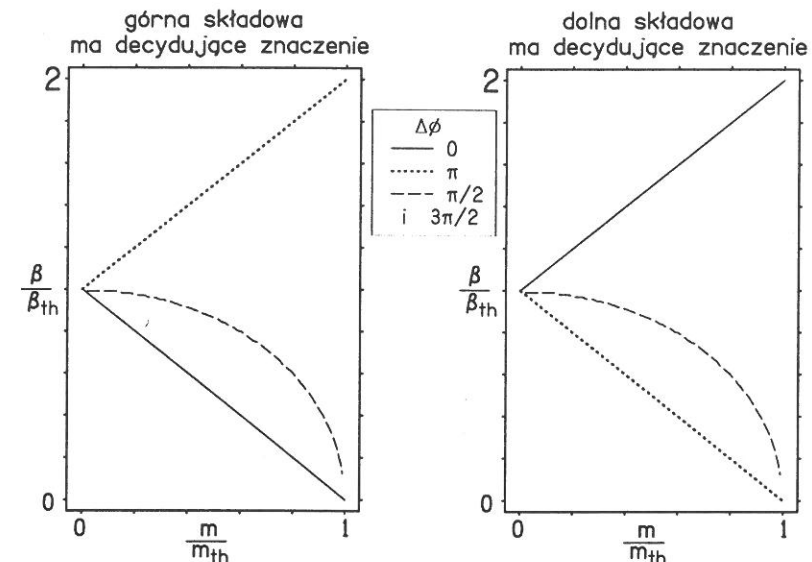
$$\text{dla } \Delta\phi = \pi \quad \frac{\beta}{\beta_{th}} = 1 + \frac{m}{m_{th}}, \quad (10)$$

które zilustrowano również w lewej części ryc. 8.

1. Zakres dużych częstotliwości

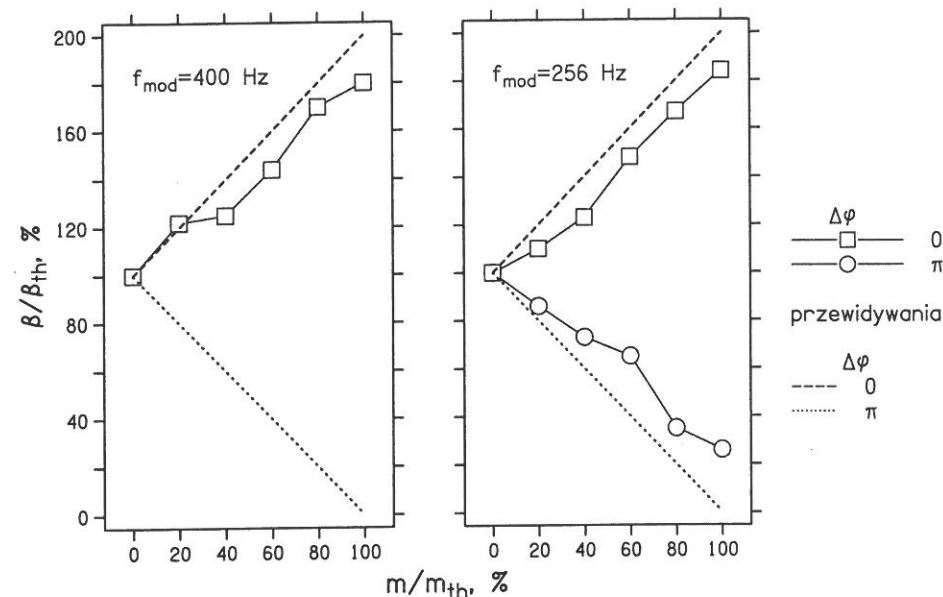
Hartmann i Hnath [1982], Ozimek i Sęk [1987] oraz Moore i Sęk [1992] analizowali detekcję modulacji mieszanej pod kątem mechanizmów odpowiedzialnych za spostrzeganie jednocześnie występujących zmian amplitudy i częstotliwości. Zaprezentowali jednak również szereg danych, które pozwoliły ocenić znaczenie struktury widmowej sygnału zmodulowanego dla detekcji modulacji. Innymi słowy, ich dane pozwalają wskazać, która ze składowych sygnału zmodulowanego jest odpowiedzialna za detekcję modulacji. Ozimek i Sęk [1987] oraz Moore i Sęk [1992] wyznaczali w pierwszej kolejności progi detekcji

Przewidywany przebieg rezultatów gdy:



Ryc. 8. Przewidywane przebiegi zależności względnego wskaźnika modulacji częstotliwościowej od względnej głębokości modulacji amplitudowej w sytuacji, gdy wyłącznie górna składowa (lewa część) lub dolna składowa (prawa część) decyduje o detekcji modulacji dla różnych wartości różnicy faz pomiędzy sygnałami modulującymi amplitudę i częstotliwość

modulacji amplitudowej i częstotliwościowej w oddzielnych eksperymentach. W następnym kroku dla podprogowych wartości wskaźnika modulacji amplitudowej m ($m = 0 \cdot m_{th}, 0.2 \cdot m_{th}, 0.4 \cdot m_{th}, 0.6 \cdot m_{th}, 0.8 \cdot m_{th}$ i m_{th}) w ramach procedury adaptacyjnej w połączeniu z metodą 2AFC wyznaczali progi spostrzegania modulacji częstotliwościowej dokonywanej modulatorem o tej samej częstotliwości f_{mod} i przesuniętym w fazie względem modulatora amplitudy o $0, \pi/2, \pi$ lub $3\pi/2$. Zastosowali oni ton nośny o częstotliwości 1 kHz oraz sygnały modulujące z szerokiego zakresu częstotliwości, uwzględniając też wartości większe od krytycznej częstotliwości modulacji ($f_{mod} = 256$ Hz [Moore, Sęk 1992] oraz $f_{mod} = 400$ Hz [Ozimek, Sęk 1987]). Uzyskane w ten sposób rezultaty, uśrednione względem słuchaczy, przedstawiono na ryc. 9.



Ryc. 9. Progi spostrzegania modulacji częstotliwościowej jako funkcja podprogowych zmian amplitudy dokonywanych z tą samą częstotliwością, co zmiany częstotliwości dla różnych wartości przesunięcia fazowego pomiędzy zmianami amplitudy i częstotliwości. Linie proste przedstawiają przewidywania teoretyczne zakładające decydujące znaczenie dolnej składowej. Dane te uzyskano dla częstotliwości nośnej 1 kHz oraz dla częstotliwości modulacji $f_{mod} = 400$ i 256 Hz [Ozimek, Sęk 1987; Moore, Sęk 1992]

W przypadku przesunięcia fazowego $\Delta\phi = 0$ (prostokąty) wzrost względnego wskaźnika modulacji amplitudowej, począwszy od 0 do wartości progowej, powoduje liniowy w przybliżeniu wzrost względnego wskaźnika modulacji częstotliwościowej, niezbędnego, by osiągnąć próg detekcji modulacji, przy czym współczynnik kierunkowy tej zależności jest dodatni, bliski 1. W przypadku jednak, gdy przesunięcie fazowe $\Delta\phi = \pi$, zależność ta przebiega również w sposób w przybliżeniu liniowy, ale współczynnik kierunkowy jest ujemny, bliski -1. Przebieg tych zależności może być opisany za pomocą zależności (7) i (8) (które w postaci linii przerywanych zawarto również na ryc. 9) opisujących sytuację, w której dolna składowa jest decydująca dla detekcji modulacji.

Wydaje się więc, że w przypadku dużych częstotliwości modulacji, większych od krytycznej częstotliwości modulacji, oraz dla częstotliwości nośnych 1 kHz i większych detekcja modulacji zachodzi w oparciu o detekcję dolnej składowej widma. W momencie, gdy wartość poziomu tej składowej przekroczy spostrzeganą w danych warunkach wartość, modulacja będzie dostrzeżona, a wrażenie, jakie wywoła dźwięk zmodulowany, podobne będzie do wrażenia

wywołanego wielotonem. Dzieje się tak dlatego, że odstęp częstotliwości pomiędzy tą składową a sygnałem nośnym jest na tyle duży (większy od krytycznej częstotliwości modulacji), że składowe te mogą być rozłożone w układzie słuchowym na dwa odrębne percepcyjnie dźwięki. Warto też podkreślić, że górna składowa widma sygnału zmodulowanego, mająca w niektórych przypadkach wyższy poziom niż dolna składowa, nie wpłynęła na detekcję modulacji w żadnym stopniu. Ponadto odstęp częstotliwości pomiędzy tą składową a sygnałem nośnym był wystarczająco duży, by układ słuchowy mógł je rozseparować percepcyjnie na dwa sygnały. Jeśli jednak nawet rozseparowanie takie mogło nastąpić, to jego wpływ na detekcję modulacji jest niezauważalny. Gdyby to górna składowa zadecydowała o detekcji modulacji i mogła być usłyszana jako odrębny dźwięk, to obserwowalibyśmy zależności opisane równaniami (9) i (10) lub takie, których nie można by przybliżyć za pomocą przedstawionych powyżej przewidywań. Zgodnie z koncepcją Hartmanna i Hnatha [1982] można zatem przyjąć, że górna składowa sygnału zmodulowanego podlega w tych warunkach całkowitemu maskowaniu z uwagi na fakt, że maskowanie wytwarzane przez sygnał nośny nie jest symetryczne w dziedzinie częstotliwości i znacznie bardziej efektywne po stronie dużych częstotliwości.

Jeśli więc dla tych częstotliwości nośnych dolna składowa decyduje o detekcji modulacji, to krytyczna częstotliwość modulacji poprawnie opisuje zakres występowania wrażliwości układu słuchowego na fazę. Wyznaczone tą drogą wstęgi krytyczne poprawnie opisują proces filtrowania w peryferyjnym układzie słuchowym.

2. Zakres małych częstotliwości

Znaczenie dolnej składowej widmowej sygnału zmodulowanego nie musi być jednak decydujące w całym zakresie częstotliwości. Wydaje się, że obszarem częstotliwości, gdzie można oczekiwać innego przebiegu tego typu zależności, a więc nieco większego znaczenia górnej składowej, jest zakres bardzo małych częstotliwości, w którym obserwuje się znaczny wzrost wartości progów absolutnych. Ten wzrost progów może być spowodowany z jednej strony charakterystyką ucha zewnętrznego i środkowego [Rosowski 1991], a z drugiej – szumem o niskich częstotliwościach, którego istnienie charakteryzuje ślimak [Nedzeltnitsky 1980].

Zmierzając do ustalenia, która z bocznych składowych widma sygnału zmodulowanego jest odpowiedzialna za detekcję modulacji dla małych częstotliwości nośnych i dla częstotliwości modulacji większych niż krytyczna częstotliwość modulacji, Sęk i Moore [1994] wyznaczyli progi detekcji modulacji

częstotliwościowej sygnału tonalnego zmodulowanego amplitudowo modulatorem o takiej samej częstotliwości w zależności od wartości współczynnika głębokości modulacji amplitudowej (o wartościach nie większych niż próg). W pierwszej kolejności, dla danej częstotliwości nośnej i modulacji, wyznaczono progi detekcji AM. Następnie dla sygnału zmodulowanego amplitudowo z podprogową wartością współczynnika głębokości modulacji amplitudowej wyznaczano progi detekcji FM.

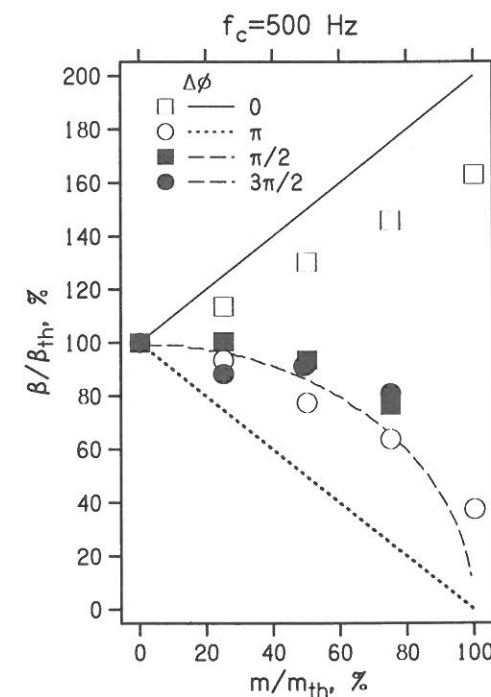
Sygnałem nośnym był w tych badaniach ton o częstotliwościach: 125, 250 i 500 Hz i poziomie ciśnienia akustycznego 70 dB SPL. Częstotliwość modulacji była równa $1.5 \cdot \text{CMF}$ [Sęk 1994 a], tj. 60, 70 i 80 Hz odpowiednio dla częstotliwości nośnych: 125, 250 i 500 Hz. Podprogowe wartości współczynnika głębokości modulacji amplitudowej były równe 25%, 50% i 75% wartości progowej i wyznaczono je indywidualnie dla każdego słuchacza w pomiarach wstępnych. Zastosowano cztery wartości przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami modulującymi amplitudę i częstotliwość: $\Delta\phi = 0, \pi/2, \pi$ i $3\pi/2$.

Uśrednione dla trzech słuchaczy dane zilustrowano na ryc. 10 i 11. Przedstawiają one zależności względnego wskaźnika modulacji częstotliwościowej od względnego współczynnika modulacji amplitudowej na progu detekcji modulacji odpowiednio dla 500 i 125 Hz. Rysunki te prezentują również m.in. przewidywania teoretyczne zgodnie z równaniami (7-10).

Dla częstotliwości nośnej równej 500 Hz (ryc. 10) charakter uzyskanych zależności jest podobny do wcześniej przedstawionych, analogicznych zależności dla 1 kHz. Dla przesunięcia fazowego $\Delta\phi = 0$ wzrost głębokości modulacji amplitudowej powoduje wzrost wskaźnika modulacji częstotliwościowej. Jednakże w przypadku $\Delta\phi = \pi$ obserwuje się spadek wskaźnika modulacji częstotliwościowej na progu detekcji modulacji wraz ze wzrostem głębokości modulacji amplitudowej. Oznacza to, że rezultaty uzyskane dla częstotliwości 500 Hz są całkowicie zgodne z przewidywaniami opartymi na założeniu, iż detekcja modulacji oparta jest na dolnej składowej widma sygnału zmodulowanego. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że wartości bezwzględne współczynników kierunkowych prostych, które mogłyby przybliżać dane eksperymentalne w najlepszym stopniu, są dla tej częstotliwości nośnej mniejsze niż te uzyskane dla częstotliwości nośnej równej 1 kHz. I choć z ryc. 10 jasno wynika, że wzrost lub spadek obserwowanych progów jest zgodny z koncepcją decydującego znaczenia dolnej składowej widma sygnału zmodulowanego, to jednak wartości uzyskanych progów są nieco mniejsze niż przewidywane. Może to sugerować, że dla tej częstotliwości nośnej dolna składowa nie jest jedynym czynnikiem odpowiedzialnym za detekcję modulacji.

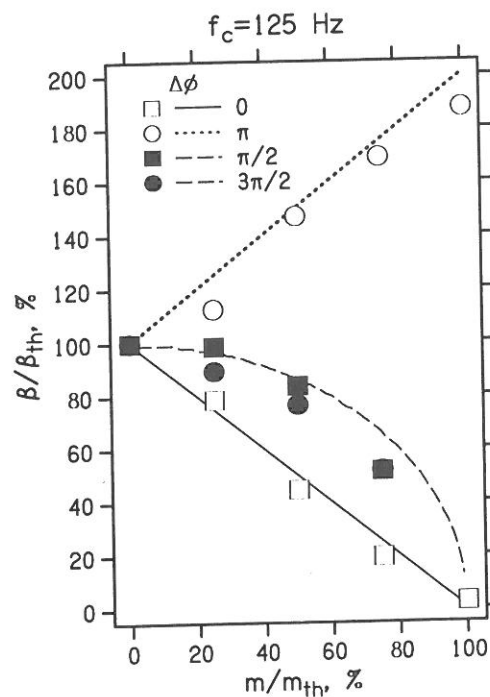
Rezultaty uzyskane dla poszczególnych słuchaczy dla częstotliwości 250 Hz były jakościowo różne. Wskazywały one na to, że dla niektórych słuchaczy może być dla detekcji modulacji decydująca górna składowa widma, dla innych zaś dolna składowa. Wydaje się więc, że częstotliwość 250 Hz leży w pewnym

obszarze, w którym żadna ze składowych nie odgrywa dominującej roli, i detekcja modulacji zachodzi w oparciu o obie składowe w przybliżeniu w równym stopniu.



Ryc. 10. Podobnie jak ryc. 10, z tym że częstotliwość nośna była równa 0.5 kHz, a częstotliwość modulacji 80 Hz [Sęk, Moore 1994]

Na ryc. 11 przedstawiono dane uzyskane dla częstotliwości nośnej 125 Hz. W przypadku, gdy przesunięcie fazowe pomiędzy modulatorami było równe $\Delta\phi = 0$, a więc w sytuacji, gdy maksima amplitudy występowały w tym samym momencie co maksima częstotliwości, wzrost głębokości modulacji amplitudowej powoduje spadek progowego wskaźnika modulacji częstotliwościowej. Jest to zależność przeciwna do przedstawionej dla częstotliwości 0.5 i 1 kHz, w przypadku których obserwowano wzrost wskaźnika modulacji częstotliwościowej. Ponadto otrzymana zależność jest zgodna z przewidywaniami zakładającymi, że to górna składowa jest odpowiedzialna za detekcję modulacji, które przedstawiono za pomocą linii ciągłej na tym rysunku.



Ryc. 11. Progi spostrzegania modulacji częstotliwościowej jako funkcja podprogowych zmian amplitudy dokonywanych z tą samą częstotliwością, co zmiany częstotliwości dla różnych wartości przesunięcia fazowego pomiędzy zmianami amplitudy i częstotliwości. Dane te uzyskano dla częstotliwości nośnej $f_c = 125$ Hz i częstotliwości modulacji $f_{mod} = 60$ Hz. Linie proste przedstawiają przewidywania teoretyczne zakładające decydujące znaczenie górnej składowej [Sęk, Moore 1994]

Inną sytuację obserwuje się dla $\Delta\phi = \pi$, wzrost bowiem współczynnika głębokości modulacji amplitudowej powoduje znaczny wzrost progowego wskaźnika modulacji częstotliwościowej. Jednakże i w tym przypadku przebieg otrzymanej zależności jest zgodny z założeniem, że dla tej częstotliwości nośnej górna składowa jest odpowiedzialna za detekcję modulacji (por. linię przerywaną na ryc. 11). Zależność ta jest ponadto przeciwna analogicznym zależnościom uzyskanym dla częstotliwości 0.5 i 1 kHz.

Charakter zależności otrzymanych dla tej częstotliwości nośnej jest dokładnie taki, jaki można otrzymać na mocy założenia, że górna składowa sygnału zmodulowanego jest odpowiedzialna za detekcję modulacji. Wydaje się więc, że w tym przypadku to górna, a nie dolna składowa sygnału zmodulowanego zadecydowała o detekcji modulacji. Dolna składowa, pomimo że w pewnych

w warunkach jej poziom jest wyższy (niż górnej składowej), nie odegrała większej roli. Jest to jeden z najważniejszych rezultatów, który podważa zasadność stosowania krytycznej częstotliwości modulacji jako estymatora szerokości pasma filtru słuchowego. Detekcja modulacji nie zachodzi bowiem zawsze w oparciu o dolną składową i w związku z tym jednoustny efekt fazy, taki, jak obserwowany w warunkach detekcji modulacji, nie występuje w całym zakresie częstotliwości nośnych. Gdy częstotliwość nośna sygnału jest mała, to górna składowa sygnału zmodulowanego decyduje o detekcji modulacji. Składowa ta ma jednak jednakową fazę dla sygnałów zmodulowanych amplitudowo lub częstotliwościowo i określenie wartości krytycznej częstotliwości modulacji na podstawie detekcji modulacji nie przynosi wówczas żadnych informacji o wrażliwości układu słuchowego na fazę. Wstęgi krytyczne oparte na pomiarze krytycznej częstotliwości modulacji w tym zakresie częstotliwości nie są poprawnym estymatorem pasma przepustowego filtru słuchowego.

III. PODSUMOWANIE

Najważniejsze wnioski wynikające z przedstawionych powyżej eksperymentów można ująć następująco:

- Dla częstotliwości nośnych mniejszych niż 200 Hz decydujące znaczenie dla detekcji modulacji ma górna składowa widma sygnału zmodulowanego (AM lub FM).
- Dla częstotliwości nośnych większych niż 250 Hz dolna składowa widma sygnału zmodulowanego decyduje o detekcji modulacji (AM lub FM).
- W obszarze przejściowym, tj. dla częstotliwości z przedziału 200-250 Hz, obie składowe widma sygnału zmodulowanego mają w przybliżeniu jednakowe znaczenie dla detekcji modulacji.

Przedstawione powyżej wnioski pozwalają stwierdzić, że jakkolwiek krytyczna częstotliwość modulacji jest tą wartością częstotliwości modulacji, dla której progi detekcji modulacji amplitudowej i częstotliwościowej osiągają jednakowe wartości, to dla częstotliwości nośnych mniejszych niż 250 Hz, nie została ona wyznaczona na podstawie detekcji dolnych składowych widm sygnałów zmodulowanych (AM i FM), które jako jedyne składowe tych widm mają właśnie różną fazę. A zatem, ponieważ dolna składowa nie przyczynia się do detekcji modulacji, to główny postulat Zwickera o zmianie znaczenia struktury fazowej sygnału, gdy szerokość jego widma przekracza zakres jednej wstęgi krytycznej, nie znajduje tu zastosowania. Oznacza to, że dla częstotliwości mniejszych od 250 Hz krytyczna częstotliwość modulacji nie odzwierciedla wrażliwości układu słuchowego na fazę składowych spektralnych. Ponadto wyznaczone na jej pod-

stawie szerokości wstęg krytycznych nie mogą być uznane za właściwy estymator szerokości pasma przepustowego filtru słuchowego.

Jest szereg przyczyn, które mogą powodować znaczące tłumienie dolnej składowej widma sygnału zmodulowanego dla bardzo małych częstotliwości nośnych. Jedną z nich jest charakterystyka przeniesienia ucha środkowego [Zwislocki 1975; Rosowski 1991]. Dźwięki o małych częstotliwościach mogą być tłumione, podczas gdy dźwięki o średnich i dużych częstotliwościach mogą ulegać wzmocnieniu. W warunkach maskowania, zwłaszcza gdy masker ma częstotliwość większą niż sygnał, może to doprowadzić do dodatkowego zróżnicowania tych sygnałów względem siebie na niekorzyść sygnału podlegającego detekcji. Inną przyczyną może być wewnętrzny szum o małych częstotliwościach, który charakteryzuje ślimaka [Nedzelitsky 1980]. Często się sugeruje, że szum ten jest właśnie odpowiedzialny za znaczące podwyższenie progów absolutnych dla małych częstotliwości [Glasberg, Moore 1990; Zwicker, Fastl 1990].

Rezultaty przedstawionych badań przynoszą również szereg sugestii tłumaczących przyczyny znacznych różnic pomiędzy szerokościami wstęg krytycznych wyznaczonymi na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji a ekwiwalentnymi szerokościami filtrów słuchowych wyznaczonymi za pomocą metody szumu pasmowozaporowego.

Dla częstotliwości mniejszych niż 200 Hz detekcja modulacji zachodziła wyłącznie w oparciu o poziom składowej spektralnej o większej niż nośna częstotliwości. Oznacza to, że poziom pobudzenia wywołanego składową o częstotliwości $f_c + f_m$ jest wyższy niż poziom pobudzenia wywołanego składową częstotliwości $f_c - f_m$. Pobudzenie to odzwierciedla aktywność filtru o środkowej częstotliwości bliskiej tej składowej, a więc filtru o częstotliwości środkowej większej niż częstotliwość nośna. Innymi słowy, jeśli częstotliwość nośna sygnału zmodulowanego (AM lub FM) nie przekracza 200 Hz, detekcja modulacji zachodzi w oparciu o filtr słuchowy o częstotliwości środkowej w i ę k s z e j niż częstotliwość nośna.

Dla częstotliwości z przedziału 200-250 Hz obie składowe spektralne sygnału zmodulowanego w jednakowym, w przybliżeniu, stopniu decydują o detekcji modulacji. Trudno jest w związku z tym stwierdzić, który z filtrów słuchowych (tj. filtr o częstotliwości środkowej mniejszej czy większej od częstotliwości nośnej) jest odpowiedzialny za detekcję modulacji. Wydaje się, że filtry o częstotliwościach środkowych bliskich tym składowym wykazują jednakową w przybliżeniu aktywność.

Dla częstotliwości większych od 250 Hz detekcja modulacji zachodzi w oparciu o poziom dolnej składowej widmowej o częstotliwości $f_c - f_m$. Poziom pobudzenia wywołanego tą składową jest wyższy niż poziom pobudzenia wywołanego składową o częstotliwości $f_c + f_m$ i związany jest z aktywnością filtru o częstotliwości środkowej bliskiej tej składowej, a więc filtru o częstotliwości

środkowej m n i e j s z e j niż częstotliwość nośna. Jeśli więc częstotliwość nośna sygnału zmodulowanego jest większa niż 250 Hz, to detekcja modulacji zachodzi w oparciu o filtr słuchowy o częstotliwości środkowej m n i e j s z e j niż częstotliwość nośna.

A zatem zmniejszanie częstotliwości od 500 do 125 Hz powoduje, że w którymś momencie następuje zmiana filtru odpowiedzialnego za detekcję modulacji: z filtru o częstotliwości środkowej mniejszej niż częstotliwość nośna na filtr o częstotliwości środkowej większej niż częstotliwość nośna. Gdyby detekcja modulacji zachodziła zawsze w oparciu o filtr słuchowy, którego częstotliwość środkowa byłaby w stałej relacji z częstotliwością nośną sygnału (np. byłaby zawsze mniejsza), to szerokość wyznaczonych wstęg krytycznych malałaby systematycznie, nawet dla najmniejszych częstotliwości nośnych, tak jak ma to miejsce w przypadku filtrów słuchowych wyznaczonych w oparciu o metodę szumu pasmowozaporowego. Jednakże dla częstotliwości z przedziału 200-250 Hz następuje zamiana filtru (tj. z filtru o częstotliwości środkowej mniejszej niż częstotliwość nośna, $f_c > 250$ Hz, na filtr o częstotliwości środkowej większej niż nośna, $f_c < 200$ Hz), w oparciu o który następuje detekcja modulacji. Filtr związany z częstotliwością większą niż częstotliwość nośna ma szerokość większą niż filtr związany z mniejszą częstotliwością, w związku z czym systematyczny spadek szerokości wstęg krytycznych zostaje zahamowany i od pewnej częstotliwości przyjmują one stałe wartości, podczas gdy szerokości ekwiwalentne filtrów słuchowych maleją wraz z ich częstotliwością środkową.

Wstęgi krytyczne wyznaczone dla małej częstotliwości na podstawie krytycznej częstotliwości modulacji nie zawierają w sobie jednoznacznej informacji dotyczącej szerokości filtru słuchowego ani też nie odzwierciedlają selektywności częstotliwościowej układu słuchowego. Dlatego też posługiwanie się ich aproksymowanym przebiegiem [Scharf 1970] w celu analizy zjawisk zachodzących w układzie słuchowym, zwłaszcza dla małych częstotliwości, jest zbyt dużym uproszczeniem i prowadzić może do błędnych wniosków. Wydaje się, że model filtrów słuchowych, który wielokrotnie został potwierdzony eksperymentalnie w całym zakresie częstotliwości słyszalnych, zawiera w sobie pełniejszy i bardziej precyzyjny opis funkcjonowania układu słuchowego, a przede wszystkim jest wolny od daleko idących uproszczeń i aproksymacji.

Odpowiadając na pytanie zawarte w tytule pracy, można więc powiedzieć, że wstęgi krytyczne opisują poprawnie funkcjonowanie układu słuchowego, ale tylko w obszarze częstotliwości powyżej 500 Hz.

Bibliografia

- Dubno J. R., Dirks D. D. (1989 a): Auditory filter characteristics and consonant recognition for hearing-impaired listeners. „J. Acoust. Soc. Am.” 85, 1666-1675.
- Dubno J. R., Dirks D. D. (1989 b): Filter characteristics and consonant recognition for hearing-impaired listeners. „J. Acoust. Soc. Am.” 85, 1666-1675.
- Fletcher H. (1940): Auditory patterns „Rev. Mod. Phys.” 12, 47-65.
- Glasberg B. R., Moore B. C. J. (1990): Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. „Hear. Res.” 47, 103-138.
- Hartmann W. M., Hnath G. M. (1982): Detection of mixed modulation. „Acustica” 50, 297-312.
- Maiwald D. (1967 a): Die Berechnung von Modulationsschwellen mit Hilfe eines Funktionsschemas (calculation of differential thresholds by means of a functional model): „Acustica” 18, 193-207.
- Maiwald D. (1967 b): Ein Funktionsschema des Gehörs zur Beschreibung der Erkennbarkeit kleiner Frequenz- und Amplitudenänderungen. „Acustica” 18, 81-92.
- Mathes R. C. i Miller R. L. (1947): Phase effects in monaural perception. „J. Acoust. Soc. Am.” 19, 780-797.
- Moore B. C. J. (1995): Frequency analysis and masking. W: B. C. J. Moore (ed.). Hearing. Orlando: Academic Press.
- Moore B. C. J. (1997): An Introduction to the Psychology of Hearing. 4th Ed. London: Academic Press.
- Moore B. C. J., Glasberg B. R. (1983): Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidth and excitation patterns. „J. Acoust. Soc. Am.” 74, 750-753.
- Moore B. C. J., Peters R. W., Glasberg B. R. (1990): Auditory filter shapes at low center frequencies. „J. Acoust. Soc. Am.” 88, 132-140.
- Moore B. C. J., Sęk A. (1992): Detection of combined frequency and amplitude modulation. „J. Acoust. Soc. Am.” 92, 3119-3131.
- Nedzelitsky V. (1980): Sound pressures in the basal turn of the cat cochlea. „J. Acoust. Soc. Am.” 68, 1676-1689.
- O'Loughlin B. J., Moore B. C. J. (1981): Off-frequency listening: effects on psychoacoustical tuning curves obtained in simultaneous and forward masking. „J. Acoust. Soc. Am.” 69, 1119-1125.
- Ozimek E., Sęk A. (1987): Perception of amplitude and frequency modulated signals (mixed modulation): „J. Acoust. Soc. Am.” 82, 1598-1603.
- Patterson R. D. (1974): Auditory filter shape. „J. Acoust. Soc. Am.” 55, 802-809.
- Patterson R. D. (1976): Auditory filter shapes derived with noise stimuli. „J. Acoust. Soc. Am.” 59, 640-654.
- Patterson R. D., Moore B. C. J. (1986): Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency resolution. W: B. C. J. Moore (ed.). Frequency Selectivity in Hearing. London: Academic Press.
- Patterson R. D., Nimmo-Smith I. (1980): Off-frequency listening and auditory filter asymmetry. „J. Acoust. Soc. Am.” 67, 229-245.
- Pickles J. O. (1988): An Introduction to the Physiology of Hearing. 2nd Ed. London: Academic Press.
- Rosen S., Baker R. J., Kramer S. (1992): Characterizing changes in auditory filter bandwidth as a function of level. W: Y. Cazals, K. Horner, L. Demany (ed.). Auditory Physiology and Perception. Oxford: Pergamon Press.
- Rosen S., Stock, D. (1992): Auditory filter bandwidths as a function of level at low frequencies (125 Hz-1 kHz). „J. Acoust. Soc. Am.” 92, 773-781.

- Rosowski J. J. (1991): The effects of external- and middle-ear filtering on auditory threshold and noise-induced hearing loss. „J. Acoust. Soc. Am.” 90, 124-135.
- Scharf B. (1970): Critical bands W: J. V. Tobias (ed.). Foundations of Modern Auditory Theory. New York: Academic Press.
- Schorer E. (1986): Critical modulation frequency based on detection of AM versus FM tones „J. Acoust. Soc. Am.” 79, 1054-1057.
- Sęk A. (1994 a): Critical modulation frequency and critical band based on random amplitude and frequency changes „Archives of Acoustics” 19, 59-74.
- Sęk A. (1994 b): Modulation thresholds and critical modulation frequency based on random amplitude and frequency changes. „J. Acoust. Soc. Jn. (E)” 15, 67-75.
- Sęk A., Moore B. C. J. (1994): The critical modulation frequency and its relationship to auditory filtering at low frequencies. „J. Acoust. Soc. Am.” 95, 2606-2615.
- Shailer M. J., Moore B. C. J., Glasberg B. R., Watson N., Harris S. (1990): Auditory filter shapes at 8 and 10 kHz. „J. Acoust. Soc. Am.” 88, 141-148.
- Vogten L. L. M. (1974): Pure-tone masking: A new result from a new method. W: E. Zwicker, E. Terhardt (ed.). Facts and Models in Hearing. Berlin: Springer-Verlag.
- Zhou B. (1995): Auditory filter shapes at high frequencies. „J. Acoust. Soc. Am.” 98, 1935-1942.
- Zwicker E. (1952): Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones. „Acustica” 2, 125-133.
- Zwicker E. (1961): Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). „J. Acoust. Soc. Am.” 33, 248.
- Zwicker E., Fastl H. (1990): Psychoacoustics – Facts and Models Berlin: Springer-Verlag.
- Zwicker E., Feldtkeller R. (1967): Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Stuttgart: Hirzel-Verlag.
- Zwislocki J. J. (1975): The Role of the External and Middle Ear in Sound Transmission. W: D. B. Tower, E. L. Eagles (ed.). The nervous system. Vol. 3: Human communication and its disorders. New York: Raven Press.