騒音環境下での音源選択法

—補聴器の改良—

鈴木 一元

How to Detect the Sound under Noisy Circumstances

—The Improvement of Hearing Aids—

Kazumoto Suzuki

(Iwata Municipal Hospital)

A new algorithm for signal processing to improve the hearing ability of hearing aid users under noisy circumstances is proposed.

In the auditory system, the sound directions are detected precisely by analyzing two kinds of information ; 1) the interaural time difference and 2) the interaural sound pressure difference. Using a personal computer, acoustic signals were analyzed according to an algorithm similar to that of the auditory system. The sound coming from the optional direction could be readily detected. If this algorithm is applied to the electric circuits of hearing aids, the user's hearing ability under noisy circumstances could be improved greatly.

Key words: hearing aid, algorithm, sound directions

はじめに

補聴器は、音を増幅する機能に関しては様々な工夫がなされ、性能は着実に向上してきた¹⁾。しかし、雑音環境下で音源を任意に選択して聴く音源選択の機能については、現在のところ技術革新は十分ではなく、補聴器の機能の一つとして実用化されるまでには至っていない²⁾。

補聴器に音源選択能がないために「補聴器を装着すると、近くの音源からの音ばかりが大きく聴こえて、遠くの音源からの音はよく聴こえない」とか、「補聴器は、聴きたい音は聴こえないで雑音ばかり大きく聴こえる」という補聴器使用者共通の苦情が発生することになる。音響エネルギーの小さい遠くの音源の音を聞き取

ろうと増幅率を上げると、音響エネルギーの大きい近くの雑音音源の音まで増幅してしまい、それが耳障りな雑音として聴こえる。また、補聴器は多くは片方の耳だけで使用するが、雑音が多い環境でこの片耳の「モノラル再生」の音の中から聴きたい音のみを選択して聴くことは容易ではない。そのため、「聴きたい音」が「聴かなくてもよい音＝雑音」に邪魔されて「よく聴こえない」と感じられることになる。

このような音源選択機能のない補聴器は、難聴者のための聴覚の補助具としては甚だ不十分なものである。この補聴器の問題点は、人工内耳、人工中耳の場合でも変わらない。音源の位置を認識したり、ある音源の音のみを選択して

聴取できる機能は、生体にとって単に音を聴くという機能に勝るとも劣らない重要な機能である。この機能を、補聴器がある程度代行できるようにすることが、大きな意義をもつことは論を俟たない。本論では、このような観点から補聴器の音源選択機能を実現する方法を提案する。

音源選択の方法

聴覚は、基本的には、両耳間に入力する信号音の音圧差および位相差を手がかりとして音源選択を行っている。1つの音源から出た音を異なる2点で観測し、2点間の信号の情報差（音圧差および時間差）によって音源の位置を検出し、音源を選択していると考えられる。この方法を補聴器の音源選択機能として応用することが、問題点を解決する最も自然な方法と考えられる。

聴覚が実際にどのような神経回路でインパルスを演算して音源選択を行っているかは不明であるが、聴覚が最も合理的な方法を行っているとの前提に立てば、聴覚の演算方式をある程度推定することができる。

このような観点で、任意の方向にある音源を選択するための波形の演算法について検討した。波形演算は、A/D変換器で波形をコンピュータ(PC-9801, NEC製)に取り込み、波形演算ソフト(Sound Master, Canopus製)を用いて行った。アナログ演算回路を用いれば波形演算はリアルタイムで行うことができる。

今回開発した波形演算法を以下に述べる。

方法 1

まず、一定の間隔を置いて設置した2つのマイクロフォンにより取り込んだ2チャンネルの信号波形を帯域フィルターで複数の周波数帯域に分割する。そして、各帯域において、帯域フィルターの出力を微分した波形がゼロ交差する点を波形演算により検出し、これをパルス状の波形（以後これをパルスと表記する）で表す。

すなわち、マイナス側からプラス側へゼロ交差する点が上向き（プラス側）のパルスで表され、プラス側からマイナス側へゼロ交差する場

合が下向き（マイナス側）のパルスで表された波形を作る（図1）。このときのパルスの振幅（高さ）および持続時間（幅）は一定とする。

これら2チャンネルの波形を比較して、両者で位相が一致しないパルスを除去する。この波形処理は複数の方式が考えられるが、ここでは、チャンネル間で乗算を行う場合について説明する。

すなわち、2チャンネルの波形を乗算すると、チャンネル間で位相差がゼロのときは同一波形の二乗算をすることになり、全波整流した形の上向きのパルスが生じる（図2A）。位相差が $2n\pi$ (n =整数、以後同じ)のときは、位相差ゼロの場合とほぼ同様の波形が生じる（図2A）。位相差が $(2n-1)\pi$ のときは、下向きのパルスのみが生じる（図2C）。それ以外の位相差の時は、乗算した結果はゼロとなる（図2B）。位相差が $(2n-1)\pi$ のときの下向きのパルスは半波整流して取り除く。パルスの幅（持続時間）を小さく設定すれば、例えば $20\mu\text{sec}$ の時間差があるだけで波形は完全に除かれる。

図1 波形処理の第一段階

- A：原波形（帯域フィルターで分割した信号波形）。
- B：Aの波形の微分波形。
- C：微分波形のゼロクロス点をパルス状波形で表したもの。原波形の極点とパルス状波形の位置とは一致する。

パルスの幅（持続時間）をどのくらいに設定するかでこの装置の指向性を調節することもできる。図3は、パルスの幅を $104 \mu\text{sec}$ とした場合の両耳間時間差と最終出力波形の振幅との

図2 位相の一致しない波形の除去

- A : 位相差が 0 または $2n\pi$ のとき ($R \times L$ の波形は, R^2 または L^2 に一致する).
 B : 位相差が $(n-1)\pi$ 以外のとき ($R \times L$ の波形にはパルスが現れない).
 C : 位相差が $(2n-1)\pi$ のとき ($R \times L$ の波形は, $-R^2$ または $-L^2$ に一致する).

図3 パルスの幅による指向性の調節

- A : Rチャンネルのパルス状波形.
 B : Lチャンネルのパルス状波形.
 C : $R \times L$ の演算後の波形.
 D : 最終出力波形 (図4のDに相当).
 パルスの幅は, $104 \mu\text{sec}$. 左右の時間差は (1) $0 \mu\text{sec}$, (2) $31 \mu\text{sec}$, (3) $62 \mu\text{sec}$, (4) $93 \mu\text{sec}$, (5) $124 \mu\text{sec}$, である. 左右の時間差が大きくなるにつれ出力波形の振幅は小さくなる.

相対的關係を示している. 両耳間時間差が大きくなるにつれ演算後の波形の振幅は小さくなり, $104 \mu\text{sec}$ を越えると波形は完全に除かれている.

ここまでの段階で, $2n\pi$ 以外の位相差の波形に由来するパルスを除去できたことになるが, さきに信号波形を振幅, 持続時間が一定のパルスに変形したことで, 信号波形の振幅に関する情報が失われている. そこで, この情報を回復するために, この波形と右または左チャンネルの帯域信号波形とを乗算する. この結果, 振幅が信号波形の振幅にほぼ比例しているパルスからなる波形が得られる (図4C).

これを再び同じ特性の帯域フィルターで処理すると, パルスに含まれていた高調波成分などが除かれ, チャンネル間で位相が一致しない波形を取除いた信号波形が得られる (図4D).

最後に各帯域の処理後の波形を加算して一つ

図4 パルスから元の波形を復元する過程

- A : 原波形 (帯域フィルター群で分割後の波形の一つ).
 B : 左右のパルスの積 (図2の $R \times L$ の波形に相当).
 C : Aの波形とBの波形の積.
 D : Cの波形をAの波形と同じ中心周波数の帯域フィルターで処理した波形.
 位相差 = 0 の場合, AとDは極めて良く似た波形となる.

にまとめると、2チャンネルの信号波形のうち、各周波数成分で両者の位相が一致したものからなる複合波形、すなわち、2つのマイクロフォンから等距離にある音源の信号波形が選択されて抽出される。信号音を分割する帯域フィルター数は、多い方が出力波形と原波形との差(歪)は少なくなるが、回路は複雑になる。

2つのマイクロフォンからの距離の差がある値 d ($L \geq d \geq 0$; L は2つのマイクロフォン間の距離)である点 P の軌跡上にある音源からの音を選択的に抽出しようとする場合は、あらかじめ、いずれか一方の波形を遅延回路によって一定時間($=t$)遅延させる。すると、音源から同時に出了音が2つのマイクロフォンに到達する時間の差が t であるような音源の場合、2チャンネルの波形間の位相差がゼロになる(このとき、 $d=v \times t$; v =音速、が成り立つ)。したがって、この音源の音を、上記の方法で選択的に抽出することが可能となる。遅延時間 t を変えることで、任意の方向の音源を選択することができる。

この方法の特徴および問題点は以下の如くである。

1) 2チャンネルの波形の位相差(時間差)を検出するため、きわめて正確な音源選択が可能である。

2) しかし、位相差を手がかりにするため、位相差が 2π の場合と位相差がゼロの場合とを区別することができない。

聴覚においても、2)と同様の現象が起こっている。すなわち、定常な純音を聴いているとき、その両耳間位相差を0から次第に大きくして行くと音像は左右に揺れ動いて感じるが、その音像の移動の周期は 2π である。このような現象は、聴覚が位相差 α と位相差 $\alpha+2\pi$ を弁別することができないために起こると考えられる³⁾。

2)の様な現象は2つのマイクロフォンの間隔より音源の波長が短くなると起こり始める(例えば、マイクロフォンの間隔が30cmの場

合、約1100Hz以上で起こり始める)。したがって、音源の周波数がある程度高くなると、方法1では正確な音源選択が困難になる。このような問題を解決するためには、以下に述べる如く「方法2」を併用する必要がある。

方法2

方法2では、まず、一定の間隔を置いて設置した2つのマイクロフォンにより取り込んだ2つのチャンネルの信号波形を、それぞれ帯域フィルターで複数の周波数帯域に分割する。次に、各周波数帯域で、信号波形の振幅を表す包絡波形を波形演算により作製する。

次に、2つの包絡波形の振幅の比が1つのときに振幅が最大値をとり、1より大きくなるにつれ、また、1より小さくなるにつれゼロに近づいて行くような波形を波形演算により作製する。

例えば、2つのチャンネルの信号波形の包絡波形を $R(t)$ および $L(t)$ とすると、

$R(t) \leq L(t)$ のとき、 $\{R(t)/L(t)\}^a$

$R(t) \geq L(t)$ のとき、 $\{L(t)/R(t)\}^a$ (ただし、 $a \geq 1$)
なる演算を行う。

演算後の波形は、音源が2つのマイクロフォンから等距離の位置にあるとき($R(t)=L(t)$ のとき)に振幅が最大値をとり、 $R(t) > L(t)$ 、 $R(t) < L(t)$ となるにつれて急激に振幅は減衰する。減衰率は a の値によって調節する。この波形を信号波形と乗算すると、2つのマイクロフォンから等距離にある音源の信号波形を選択的に増幅することができる。

各周波数帯域で、以上のように処理された信号波形を加算して一つにまとめ最終出力とする。

2つのマイクロフォンから等距離ではない点にある音源の信号を抽出する場合は、各チャンネルの信号波形(または包絡波形)の増幅率を帯域毎に調整して2チャンネルの波形の振幅を等しくして両耳間音圧差をゼロとし、音源が見かけ上2つのマイクロフォンから等距離にあるようにしてから波形処理を行う。

方法2の特徴と問題点は以下の如くである。

1) 方法2は、方法1のように正確ではないが、 $2n\pi$ の位相差で音源の方向を誤ることはない。

2) 方法2は、低い周波数領域の音の音源選択が不得手である。

音波の性質上、低い周波数の音になるほど2つのマイクロフォン間に生じる音圧差は小さくなる。したがって、この方法のみで、実環境において低域の周波数範囲まで正確な音源選択を実現することはかなり難しい。一方、方法1は、既述したように、原理上、高音域の音源選択が正確に行えない。そのため、広い周波数帯域で正確な音源選択を可能にするためには、方法1および方法2を併用して両者の欠点を相い補うようにすることが必要である。

方法1, 2の併用

すなわち、一定の間隔を置いて設置した2つのマイクロフォンで取り込んだ2チャンネルの信号波形をそれぞれ帯域フィルターで複数の周波数帯域に分割した後、方法1および方法2の波形処理を平行して行う。そして、方法1の出力波形と、方法2で左右の包絡波形を演算処理したものを乗算し、最後に各帯域のこれら乗算後の波形を加算して一つにまとめ最終出力とする。このようにして、広い帯域にわたって、正確な音源の選択が可能となる。

考 察

方法1, 2を併用することでかなり正確な音源選択が可能となるが、これによっても解決できないもう一つの問題点が、本稿で述べた方法には存在している。すなわち、2チャンネルの音波の情報差を比較演算して音源を選択する方法では、2チャンネルの音波の情報差がどのような原因で生じたかを弁別することができない。そのため、抽出すべき音源と類似した周波数スペクトラムの雑音音源が異なる方向に同時に存在すると、雑音のために両耳間の情報差に狂いが生じ、演算結果に影響がでる。また、音源が2つのマイクロフォンの正中面上にある場合、音源が前方にあるか後方にあるかでマイクロフ

ォン間に本質的な情報差が生じないので、音源の前後方向を弁別できない。これらは、このような方法に必然的に伴う避けられない弱点である。

このような現象は、実際の聴覚でも生じている。聴取者の右と左に置いたスピーカーから同じ音を出すと、音はスピーカーからではなく2つのスピーカーの中央から聴こえてくるように聴取者には感じられる。左右のスピーカーに注意を向けても、そこからは音は全く聴こえてこない。これは、聴覚が左右の耳で捉えた音を神経回路で演算して、聴空間の正中に計算の結果である理論上の音像を形成するためと考えられる。ステレオ再生では、このことを利用して左右2つのスピーカーからでる音の音圧や時間差を調節して、両耳に入力する情報をいろいろに調節し、聴取者の聴空間のさまざまな位置に実際には存在しない音源の音像を形成している。

本方法を、実際に補聴器に応用したとき、本方法の上述の性質(弱点)が、実用上どの程度問題となるかは、今後、検討して行く必要がある。ただし、聴覚を代行するための装置が聴覚と同じ性質を持つことは必ずしも欠点とは言えないし、また、補聴器の音源選択の機能が聴覚の持つ能力をはるかに越える必要もない。したがって、上述の性質(弱点)は、この方法の利用価値を少しも減じるものではないと思われる。

さて、この音源選択法を補聴器に応用すると、任意の方向の目標音源をかなり厳密に選択することができるため、増幅率を上げても周囲の雑音と一緒に増幅されることがない。雑音は効率よく排除されて雑音環境下での補聴器の聴きやすさは大きく改善されると期待される。また、波形演算により音源選択を行うため、特性を自由に変更することが可能であり、諸特性を使用者の状況に即してきめ細かく設定して使用することが可能である。複数の設定値を状況に応じて調節するのはやや煩雑であるが、その代わり、雑音環境下での特定音源の聞き取り能力は、従来の補聴装置に比べて飛躍的に向上すると考え

られる。

補聴器の将来像としては、聴覚の代行をさらに進めて自動的に音源選択、音源追尾、雑音の排除などができることが期待される。しかし、装置使用者の意志によって、選択すべき音源と排除すべき雑音とは容易に入れ替わる。どの音源が使用者の聴きたい音で、どれが雑音なのかを装置は自分自身で推定することはできない。そのため、こうした自動化の実現はそれほど簡単ではない。今後、本稿の方法による補聴装置に、使用者の意志を高速かつ的確に伝達する方法が開発されれば、理想的な補聴装置が完成するものと考えられる。

まとめ

本稿で述べた方法についてまとめると以下のようである。

1) 方法1の波形処理法により、比較的低い周波数領域において、2つのマイクロフォン間で生じる信号音の位相差を手がかりに任意の方向の音源を極めて鋭い指向性で選択的に抽出することが可能である。指向特性は任意に設定可能である。

2) 方法2の波形処理法により、比較的高い周波数領域では、2つのマイクロフォン間で生じる信号音の音圧差を手がかりに、任意の方向の音源を選択的に抽出することが可能である。指向特性は任意に設定可能である。

3) 方法1および方法2の波形処理法を併用すると、広い周波数範囲で任意の方向の音源選

択が可能である。

補聴器を聴覚の代行装置であるとするならば、音を増幅するだけでは十分とは言えない。聴覚の重要な機能である音源の選択機能も備えられているべきである。本稿では、音源選択のための波形演算法について考察し、具体的な方法を提案した。この方法が聴覚の音源選択の方法とどの程度一致するかは不明であるが、基本原理は共通しているのではないかと筆者は考えている。本稿で述べた方法によって波形演算を行うと、極めて選択的に特定の音源からの音を抽出することができる。この様な波形演算を補聴器の電子回路で行うことにより、音源選択式の補聴器が実現するものと期待される。それによって、雑音環境下でも補聴器使用者が聞きたい音を選択して増幅することができ、雑音に弱いという現在の補聴器の重大な欠点が解消されることが考えられる。

文 献

- 1) 尾野湊夫：デジタル補聴器の現状と将来。音響学会誌 47：778～784, 1991.
- 2) Levitt H：信号処理型補聴器の将来。音響学会誌 47：785～790, 1991.
- 3) 鈴木一元：聴覚が計測可能な両耳間時間差の最大値について。音講集：163～164, 1981.

(別刷請求先：鈴木一元
〒438 静岡県磐田市国府台57-1
磐田市立総合病院耳鼻咽喉科)