

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-318598

(P2005-318598A)

(43) 公開日 平成17年11月10日(2005. 11. 10)

(51) Int.Cl.⁷

H04S 5/02

H04R 3/04

H04S 1/00

F I

H04S 5/02

H04R 3/04

H04S 1/00

K

E

テーマコード (参考)

5D020

5D062

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L 外国語出願 (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2005-128302 (P2005-128302)

(22) 出願日 平成17年4月26日 (2005. 4. 26)

(31) 優先権主張番号 532572

(32) 優先日 平成16年4月26日 (2004. 4. 26)

(33) 優先権主張国 ニュージーランド (NZ)

(71) 出願人 505155997

フィテック システムズ リミテッド

PHITEK SYSTEMS LIM

TED

ニュージーランド国、1003 オークラ

ンド、グラフトン、パークフィールド テ

ラス 20

20 Parkfield Terrac

e, Grafton, Aucklan

d 1003, NEW ZEALAND

(74) 代理人 100091502

弁理士 井出 正威

(74) 代理人 100125933

弁理士 野上 晃

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 信号処理におけるまたはそれに関する改善

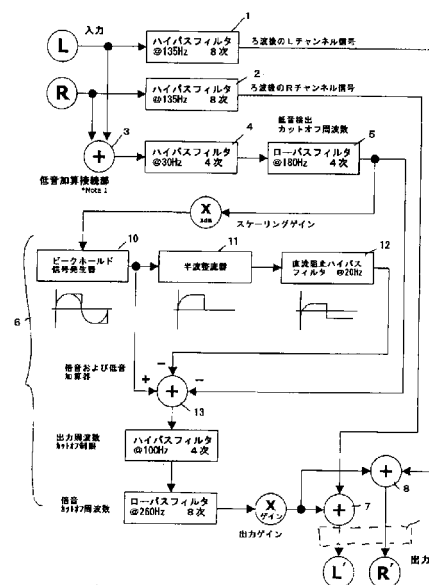
(57) 【要約】 (修正有)

【課題】低周波オーディオ信号を音響心理的に聴取者に知覚させるのに適したオーディオ信号を生成する信号処理装置である。

【解決手段】低周波信号の波形を時間および/またはレベルについて整形した。

【効果】低周波信号の倍音を生成する。これは、ピークホールド信号発生器および整流器を用いて、またはピークホールド減衰信号発生器を用いて実現することができる。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

低周波オーディオ信号を音響心理的に聴取者に知覚させるのに適したオーディオ信号を生成する信号処理装置であって、前記低周波信号の波形を時間について整形することにより前記低周波信号の倍音を生成するピークホールド信号発生手段を含む信号処理装置。

【請求項 2】

前記ピークホールド信号発生器は、前記低周波信号の波形をレベルについて整形する信号減衰手段を含む請求項 1 に記載の信号処理装置。

【請求項 3】

前記倍音生成手段が、奇数および偶数倍音を生成する請求項 2 に記載の信号処理装置。 10

【請求項 4】

偶数倍音を生成する整流器をさらに含む請求項 1 に記載の信号処理装置。

【請求項 5】

前記ピークホールド信号発生器が、ピークホールド減衰信号発生器を備える請求項 2 に記載の信号処理装置。

【請求項 6】

前記低周波信号の波形が、時間およびレベルに関して非対称に整形される請求項 2 に記載の信号処理装置。

【請求項 7】

低周波オーディオ信号を音響心理学的に聴取者に知覚させるのに適したオーディオ出力信号を生成するために低周波オーディオ信号を処理する方法であって、実質的にピークマグニチュードまで前記低周波信号に追従し、零交叉に達した後は再び逆の極性において前記信号に追従することによって、前記低周波信号の波形を時間について整形するステップを含む方法。 20

【請求項 8】

実質的にピークマグニチュードまで前記低周波信号に追従し、その後前記ピークマグニチュードを所定のレートで減衰させることによって、前記低周波信号の波形を時間およびレベルについて整形するステップを含む請求項 9 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】**【0001】**

本発明は、オーディオ信号処理の方法および装置に関し、特に低域周波数の音響心理学的な知覚を介してより明瞭な低音を伝えるのに適用される。

【背景技術】**【0002】**

スピーカなどの音響変換器では、一般的に低音（すなわち、低域周波数）周波数帯域を再生するのが困難である。

【0003】

明瞭な低音周波数帯域を発生させるために、倍音を利用することが知られている。このことは、基本音が存在しない場合であっても、低周波音の倍音があると聴取者には低い基本周波数が「聴こえる」という音響心理学的な現象からもたらされる。 40

【0004】

公知の装置または方法では、コンプレッサやリミッタなどの装置を用いてダイナミックレンジ（すなわち、音量または信号レベル）全域にわたって信号を変化させる。

【発明の開示】**【発明が解決しようとする課題】****【0005】**

本発明の目的は、少なくとも既存の方法および装置にとって代わる有用な方法および装置となりうる改良されたオーディオ信号処理方法またはオーディオ信号処理装置を提供す 50

ることにある。

【0006】

本発明のさらなる目的は、以下の説明から明らかになり得る。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明は、一局面によれば、低周波オーディオ信号を音響心理学的に聴取者に知覚させるのに適したオーディオ信号を生成する信号処理装置に関するものであり、この装置は、低周波信号の波形を時間について整形することにより低周波信号の倍音を生成するピークホールド信号発生手段を含む。

【0008】

好ましくは、上記ピークホールド信号発生器は、低周波信号の波形をレベルについて整形する信号減衰手段を含む。

【0009】

好ましくは、上記倍音生成手段は、奇数および偶数倍音を生成する。

【0010】

好ましくは、上記装置は、偶数倍音を生成する整流器を含む。

【0011】

好ましくは、上記ピークホールド信号発生器は、ピークホールド減衰信号発生器を備える。

【0012】

好ましくは、上記低周波信号の波形は、時間およびレベルについて非対称に整形される。

【0013】

別の局面では、本発明は、低周波オーディオ信号を音響心理学的に聴取者に知覚させるのに適したオーディオ出力信号を生成するために低周波オーディオ信号を処理する方法に関するものであり、この方法は、実質的にピークマグニチュードまで低周波信号に追従し、零交叉に達した後は再び逆の極性において前記信号に追従することによって、低周波信号の波形を時間について整形するステップを含む。

【0014】

好ましくは、上記方法は、実質的にピークマグニチュードまで前記低周波信号に追従し、その後前記ピークマグニチュードを所定のレートで減衰させることによって、前記低周波信号の波形を時間およびレベルについて整形するステップを含む。

【0015】

本発明はまた、広義には、本明細書で開示する新規な任意の特徴部分からなるか、または複数の特徴部分を組合せたものと言うことができる。

【0016】

本発明のさらなる新規な態様は、以下の説明から明らかとされる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

以下に、添付図面を参照して本発明の実施形態を例を挙げて説明する。

図1は、本発明の信号処理回路の第1の実施形態の概略ブロック図である。

図2は、本発明の信号処理回路の第2の実施形態の概略ブロック図である。

図3は、本発明の信号処理回路の第3の実施形態の概略ブロック図である。

図4は、本発明の信号処理回路の第4の実施形態の概略ブロック図である。

図5は、図4の実施形態において使用されるピークホールド減衰生成器によって生成された倍音波形の例を示すグラフである。測定音の44.1 kHzのサンプリング・レートで示される時間を横軸に、信号レベルを縦軸に示す。

図6は、倍音成分の第1の例の周波数(Hz) - 信号強度(dB)のグラフである。

図7は、倍音成分の第2の例の周波数(Hz) - 信号強度(dB)のグラフである。

図8は、倍音成分の第3の例の周波数(Hz) - 信号強度(dB)のグラフである。

【 0 0 1 8 】

図 1 に、信号処理システムの第 1 の実施形態のブロック図を示す。

【 0 0 1 9 】

図 1 に示す回路は、ソフトウェアにて実施してもよく、物理的ハードウェアを用いて実施してもよい。さらに、この回路は、デジタル形式またはアナログ形式で構成することもできる。どちらの形式でも、所望の結果が得られる多数の理論および技術がある。

【 0 0 2 0 】

このシステムの目的は、任意のオーディオ出力機構によって任意のオーディオソースから聴取者により明瞭な低音を伝えることにある。

【 0 0 2 1 】

チャンネルごとに (L、R など。本発明は単一チャンネルまたは複数チャンネルのオーディオ・システムに適用可能である。) オーディオソース入力信号をハイパスフィルタ (1、2) にかけて低音成分を除去し、後に使用するため、チャンネルごとにろ波された入力信号を生成することが望ましい (ろ波後の入力信号)。次に、これらのチャンネルのオーディオソース入力信号を加算して (3)、原音中に低音周波数成分の全量を含んだ単一ソース信号を生成することが好ましい。その後、得られた信号をハイパスフィルタ (4) およびローパスフィルタ (5) にかけて、極超低音周波数帯域および非低音周波数帯域を除去し、低音ソース信号を生成する。

【 0 0 2 2 】

通常 (6) で示される倍音生成部を用いて、倍音を上記の低音ソース信号に付加する。このプロセスによって、低音出力信号が生成され、次いでこの信号がろ波後の入力信号と合成される。このプロセスの詳細については後述する。

【 0 0 2 3 】

最終的に出力される音響は、ろ波後の入力信号 (7、8) の各々に低音出力信号を加算し、その結果をオーディオ出力信号 (スピーカ、ヘッドフォン等) に与えることで生成される。ピーキング・イコライザ (一般にステレオ・システムに搭載されている標準的な「低音ブースト」に類似のもの) (9) を適宜付加するかまたはその後に別途設け、さらにオーディオ出力信号に低音出力レベル調整を行い、それによってすでに付加された倍音成分を全量含んだ状態であってもさらに低周波数応答を向上させることができる。

【 0 0 2 4 】

倍音生成部 (6) は、次のように機能させることが好ましい。低音ソース信号をピークホールド信号発生器 (10) に与える。ピークホールド信号発生器は、入力信号に追従して、その増加 (または減少) に伴い、連続的に増加 (または減少) し、入力信号が正負いずれの範囲でもその最大の値に保持される出力信号を生成する。入力信号が正から負または負から正の信号レベルに遷移するとき、ピークホールド信号発生器の出力は 0 (ゼロ) に設定される。この発生器は、オーディオ信号を時間について対称的に整形することにより、基本周波数の奇数倍音を生成する。人間の耳が「位相音痴 (phase deaf)」である、すなわちオーディオ信号の位相が聴取者には判別できないので、このプロセスは容易に機能しうる。このようにオーディオ信号を整形することにより、倍音生成器は、特定の一連の倍音を付加することで、倍音出力の位相に関係なく、所望の音響心理学的な低周波数応答が得られる。

【 0 0 2 5 】

上記低音入力には、ヒステリシス関数を適用することが好ましく、これにより、入力信号レベルが所定のスレシールド値より低い場合、ピークホールド信号発生器から出力させないようにする。これは、信号遷移範囲を 0 (ゼロ) のみから ± 信号の範囲に拡張することによって実現される。

【 0 0 2 6 】

その後、ピークホールド信号発生器出力 (ピークホールド出力信号) を半波整流し (11) (これにより、原信号の正部分のみが保持される。)、偶数倍音を生成することが好ましい。それに続いて、直流阻止フィルタ (12) を通過させ、上記出力信号の直流バイ

10

20

30

40

50

アスを除去する。これが整流器出力信号である。

【 0 0 2 7 】

次いで、算術加算器 1 3 において（加算および／または減算を適宜組合せることによって）、ピークホールド出力信号、低音ソース信号、および整流器出力信号を最終出力レベルゲインと加算して、倍音成分を多く含む低音信号を生成する。次いで、この倍音を含む低音信号をハイパスおよびローパスフィルタにかけて、望ましくないか、またはオーディオ出力手法によって再生できない倍音成分を除去し、低減する。

【 0 0 2 8 】

このアルゴリズムは、デジタル形式でもアナログ形式でも容易に実現することができる。デジタル形式では、アルゴリズムは、所定のフィルタとして例えばオーディオ双 2 次フィルタを用い、および倍音生成器のピークホールド信号および整流信号を生成させる基本的な数学的関数を利用することによって実現できる。 10

【 0 0 2 9 】

アナログ形式では、ピークホールド信号発生器は、調整可能なピーク検出回路もしくはコンデンサ充電回路により、または出力信号を発生させるその他の手段により実現され、零交叉（信号遷移によりスレショルド値に達する）まで上記ソース入力低音信号のピーク値に保持できる。半波整流および直流阻止フィルタは、単純な整流ダイオードからオペアンプまでの様々な方法で実現することができる。

【 0 0 3 0 】

ピークホールド信号発生器によって行われる波形整形は、次のように記述することができる。 20

- a) 入力の増減中は入力信号に追随する。
- b) + v e 値および - v e 値では、そのレベルで信号を保持する。
- c) 零交叉時に保持された値をゼロにリセットする。

【 0 0 3 1 】

ヒステリシス関数を入力レベルに適用して、入力信号が特定の信号レベル（ - 3 0 d B と規定）を超えたときのみ、出力を制限することが好ましい。このことは、「ゼロにリセットする」入力の範囲をゼロ入力に対して $\pm 3 0$ d B レベルの範囲に拡張することによって実現できる。これによって、過渡的な交差をなくするとともに、さらにより高い周波数の低音成分を不必要に生成することなく、存在する最も低い低音周波数を確実に検出しかつ 30

【 0 0 3 2 】

ヒステリシスを備えたピークホールドプロセスは、以下のように簡潔に記述することができる。

S (t) - 時間 (t) でのソース信号

O (t) - 時間 (t) での出力信号

レベル - ヒステリシス・レベル (\pm 最小レベル / 必要な音量)

とすると、

(S (t) - レベル) かつ (S (t) + レベル) の場合、

$$O (t) = 0 . 0$$

上記条件を満たさず、(S (t) > O (t - 1)) かつ (S (t) > 0 . 0) の場合、

$$O (t) = S (t)$$

上記 2 つの条件を満たさず、(S (t) < O (t - 1)) かつ (S (t) < 0 . 0) の場合、

$$O (t) = S (t)$$

上記いずれの条件をも満たさない場合、

$$O (t) = O (t - 1)$$

終わり

【 0 0 3 3 】

処理経路において、 + 3 d B のスケーリングゲインを加えて、種々の倍音と合成された 50

信号レベルとのバランスを適切にとった。最終出力ゲインを補償するために相応して大きくすることで、初期ソース信号の3 dB低下を同様に使用できた。このゲイン調整は、開発中に各信号のゲインが個別に調整可能となったソフトウェア・インターフェースによるものである。このゲインを加えた結果、倍音および低音の加算部への各入力について、ゲインファクタを公称、「0 dB」とすることができた。

【0034】

図1に掲げた周波数カットオフ値は、100 Hz対応のスピーカ用にソフトウェアを実行させる際に、（入力に対して）0 dBの総合ゲインが得られるように特に選択されたものである。ソフトウェアによる好ましい実施態様では、適切にカスケード接続されたデジタルオーディオ双2次フィルタ（2次）を用いて、所望のフィルタ次数を生成する。より低周波数帯域を扱うヘッドフォンまたはスピーカでは、異なるフィルタ・カットオフ設定値を用いる必要がありうる。簡単な1回の調整で出力周波数のカットオフ限界を変えることによって基本周波数をより多く出力に付加することができ、その結果、さらに豊かな低音が得られる。ただし、これにより、出力信号にそれに応じた電力が付加されることになる。

10

【0035】

ソフトウェアを実行することで-15 dB、20 Hzから1 kHzの間で正弦波スイープ試験を行い、適切に付加された倍音を有する比較的平坦な-15 dBの出力信号を生成するようにフィルタ・カットオフを調整することで、0 dBゲイン経路であることが検証された。出力は、70 Hz～100 Hzの周波数帯域に対して1.5 dBの適度なゲインを有し、また180 Hzの入力フィルタ・カットオフ周波数付近で1.5 dB低下することが分かった。

20

【0036】

生成信号のスペクトル成分では、（130 Hz未満の）低周波数帯域で倍音が著しく増加し、その結果、冒頭述べた基本波が無い場合の原理により、30 Hz程度の低域周波数帯域が、100 Hzの公称周波数レスポンスをもつスピーカで「聞くことが可能」となる。入力周波数が高くなると、最終の倍音カットオフ・フィルタがこれらのより高次の倍音を非常に大きく減衰させるので、1つまたは2つの倍音のみが付加されることになる。

【0037】

上記の生成された倍音は、滑らかに減衰するスペクトル中に基音ならびにすべての奇数倍音および偶数倍音を含んでいる。楽音とはならない5次以上の奇数倍音も生成されるが、カットオフ周波数を選択することによって、ほとんどの入力信号にこのような高次の奇数倍音を含めるのを厳しく規制する。50 Hz未満の信号には、これらの倍音が含まれるが、このような倍音は、この超低周波数帯域の音が知覚されるのに大いに役立つと考えられ、場合によっては最初に存在した周波数よりも知覚可能なより低域周波数を生成することがある。

30

【0038】

最初の低音入力加算器については、次の2つの異なる方法で調べた。

a) 図示した直接加算（Lチャンネル信号+Rチャンネル信号）

b) る波後に加算（Lチャンネル信号-る波後のRチャンネル信号）+（Rチャンネル信号-る波後のLチャンネル信号）

40

【0039】

2番目の方法は、ほとんどの入力媒体に、著しく大きなオーディオ遮断能力を与えることが分かった。それによって、非常に低い周波数の男性の声に付加される倍音効果が低減した。しかし、このことは、非常に高次のフィルタをフィルタ間の重なり部分に利用しない限り、カットオフ時に特定周波数帯域に鋭いノッチを生じるという副作用をもたらした。

【0040】

図2に本発明の第2の実施形態を示す。図2、3および4に示す各部分が、図1のそれと同一または類似の場合、同じ参照番号を付している。図2から明らかなように、本実施形

50

態におけるフィルタは、図 1 のいくつかのフィルタと比べわずかに異なるカットオフ周波数を有しており、生成される倍音は、加算接続部 13 で基音から減算される。また、加算接続部 13 で加算 / 減算される各成分のゲインを調整することができる。

【0041】

図 3 の実施形態では、基音を加算または減算せずに、奇数倍音成分および偶数倍音成分を加算することによって、図 1 および図 2 に示す実施態様を簡略化している。

【0042】

図 4 の実施形態では、ピークホールド信号発生器の保持時間を変更し、所望の倍音をさらに付加しかつ生成するようにしている。そのため、個別に設けられたピークホールド信号発生器、整流器、および直流阻止フィルタの代わりに、ピークホールド減衰信号発生器 20 を使用している。本実施形態ではさらに、人間の耳が「位相音痴」であるという特性を利用し、1つのプロセスで奇数倍音および偶数倍音を生成するようにピークホールド信号発生器を変更可能としている。好ましい実施形態では、この信号発生器の変更は、保持された信号の減衰を調整することによって行われる。また、保持された信号をリセットするために異なる遷移点を用いることが好ましい。

【0043】

このプロセスは、以下のように簡潔に記述することができる。

$S(t)$ - 時間 (t) でのソース信号

$O(t)$ - 時間 (t) での出力信号

減衰 - 特定の信号減衰係数

$abs()$ - 信号の絶対レベル / 音量

とすると、

$(abs(S(t)) > O(t-1))$ の場合

$O(t) = S(t)$

上記条件を満たさない場合、

$O(t) = \text{減衰} * O(t-1)$

終わり

【0044】

これにより、時間についてだけでなくレベルについても、非対称形の波形が生成される。その結果、偶数倍音および奇数倍音の双方が生成される。倍音生成の程度は、減衰率または減衰特性を調整することによって、容易に調整できる。好ましい実施形態では、この調整は、本実施例においてコンデンサの放電曲線と同様の挙動を示す減衰係数を調整することによって行われる。出力信号を適切に減衰させるために、実際の減衰係数は、1.0 より小さく（すなわち、ユニティー・ゲイン以下に）しなければならない。

【0045】

上記の減衰係数は、次に例示する式によって計算することができる。

減衰係数 = $2.0 - e^{x_p (\text{設定値} / \text{サンプリング・レート})}$

【0046】

ここで、「設定値」は、ユーザが任意に設定可能な減衰定数であり、付加される倍音量を調整するために用いられる。本実施例では、サンプリング・レートを 44.1 kHz に仮定した場合、上記設定値は 100 ~ 1000 の範囲で任意に設定される。これらの定数を用いることにより得られるオーディオ信号およびそれらのスペクトルを図 5 ~ 8 に示す。設定値は、図 6 では 200、図 7 では 500、図 8 では 1000 である。

【0047】

先に概説した様々なプロセスにより入力としてチャープ (Chirp) 正弦波スイープ信号を利用することによって、倍音のスペクトル成分を確認してきた。所望の倍音量を適切なレベルで加えながらも、それぞれの場合のゲインおよびフィルタ設定を適切に調整することで、全スイーププロセスに安定した出力レベルをもたらすようにした。

【0048】

本明細書に記載したように、本発明の範囲内で本発明の多くの様々な実施形態を採りう

10

20

30

40

50

る。例えば、信号の低音成分抽出や再結合の多くの異なる理論および技術（マルチバンド・フィルタリング、入力差分加算、マルチチャンネルオーディオソース専用のLFEチャンネルの使用など）があり、それらのいずれも本発明に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0049】

【図1】本発明の信号処理回路の第1の実施形態の概略ブロック図である。

【図2】本発明の信号処理回路の第2の実施形態の概略ブロック図である。

【図3】本発明の信号処理回路の第3の実施形態の概略ブロック図である。

【図4】本発明の信号処理回路の第4の実施形態の概略ブロック図である。

【図5】図4の実施形態において使用されるピークホールド減衰生成器によって生成された倍音波形の例を示すグラフである。測定音の44.1kHzのサンプリング・レートで示される時間を横軸に、信号レベルを縦軸に示す。 10

【図6】倍音成分の第1の例の周波数（Hz）-信号強度（dB）のグラフである。

【図7】倍音成分の第2の例の周波数（Hz）-信号強度（dB）のグラフである。

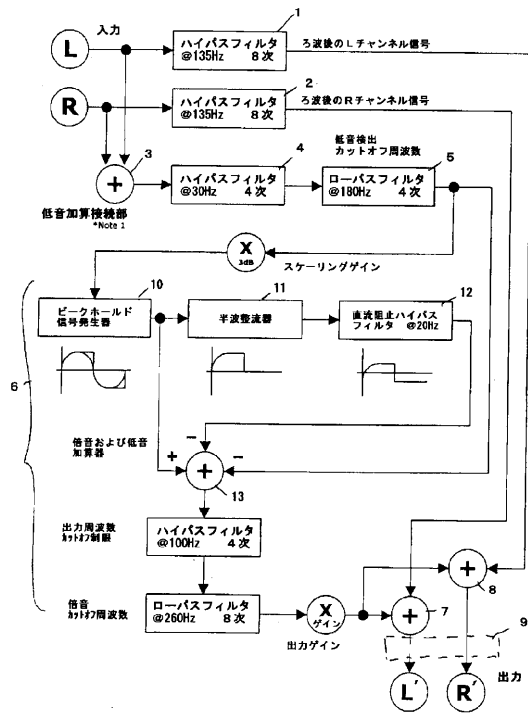
【図8】倍音成分の第3の例の周波数（Hz）-信号強度（dB）のグラフである。

【符号の説明】

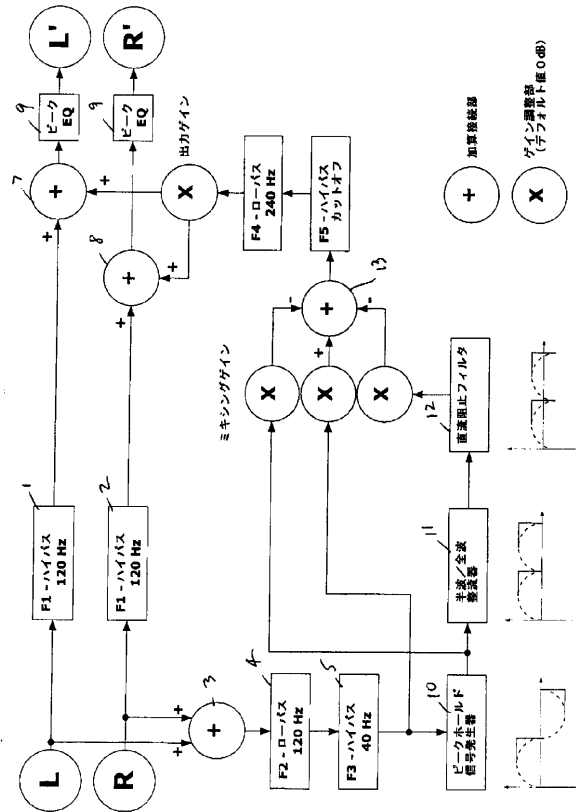
【0050】

- 1、2、4 ハイパスフィルタ
- 3 加算器
- 5 ローパスフィルタ
- 6 倍音生成部、倍音生成器セクション
- 7、8 加算器
- 9 ピーキング・イコライザ
- 10 ピークホールド信号発生器
- 11 半波(全波)整流器
- 12 直流阻止フィルタ
- 13 加算器
- 20 ピークホールド減衰信号発生器

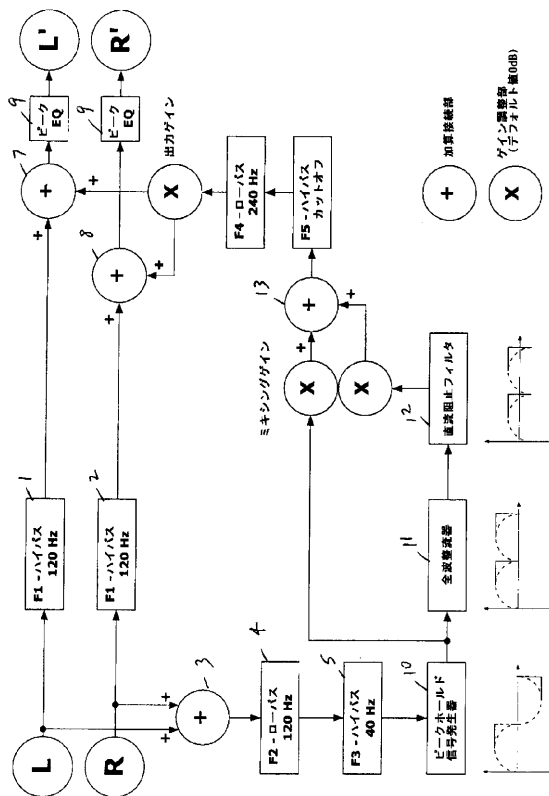
【 図 1 】



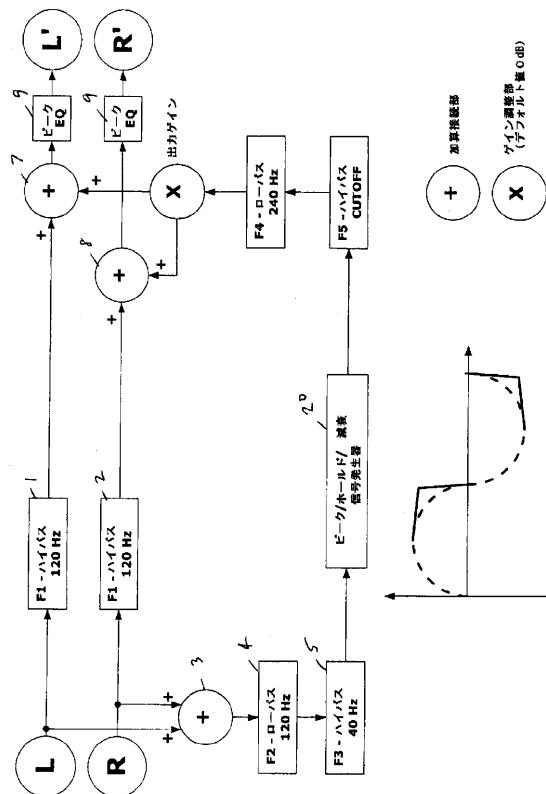
【 図 2 】



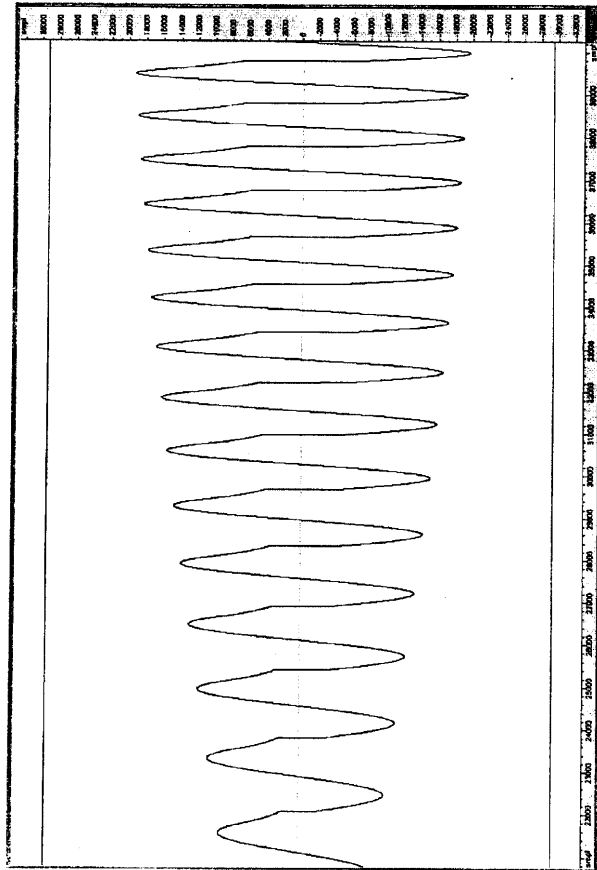
【 圖 3 】



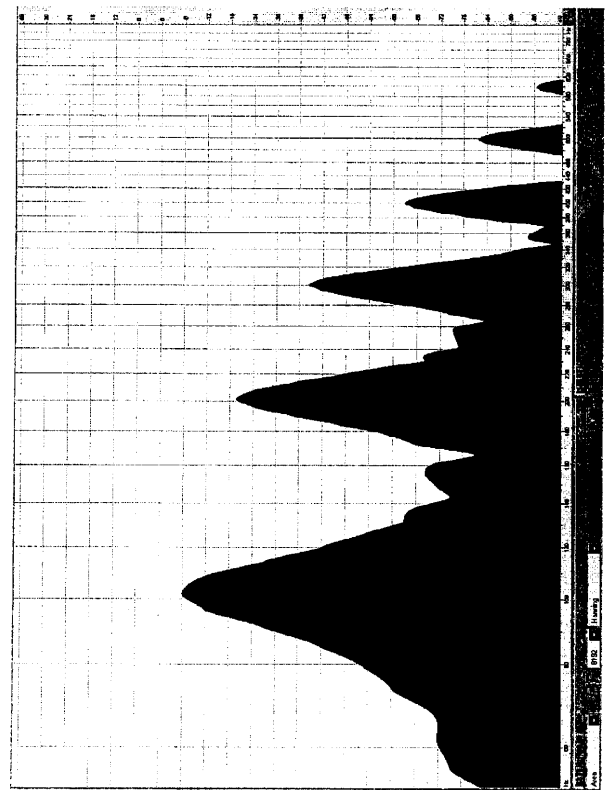
【 図 4 】



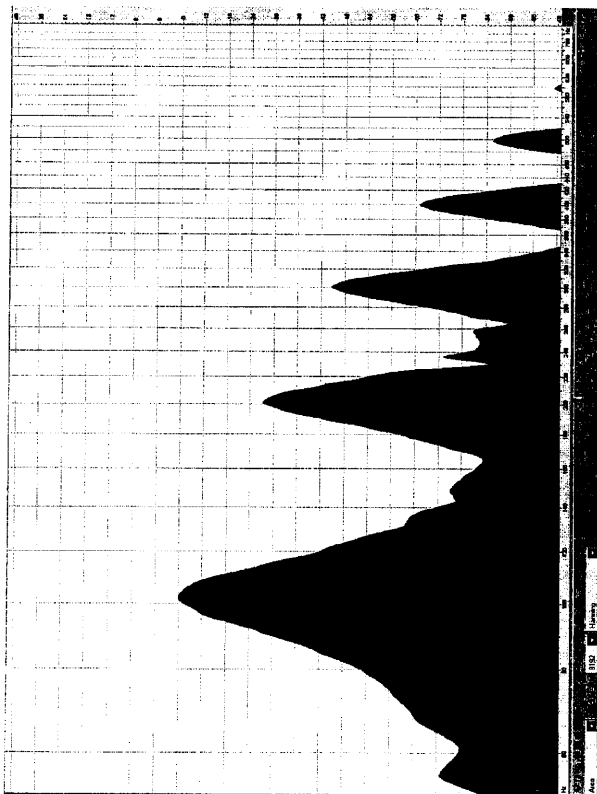
【図 5】



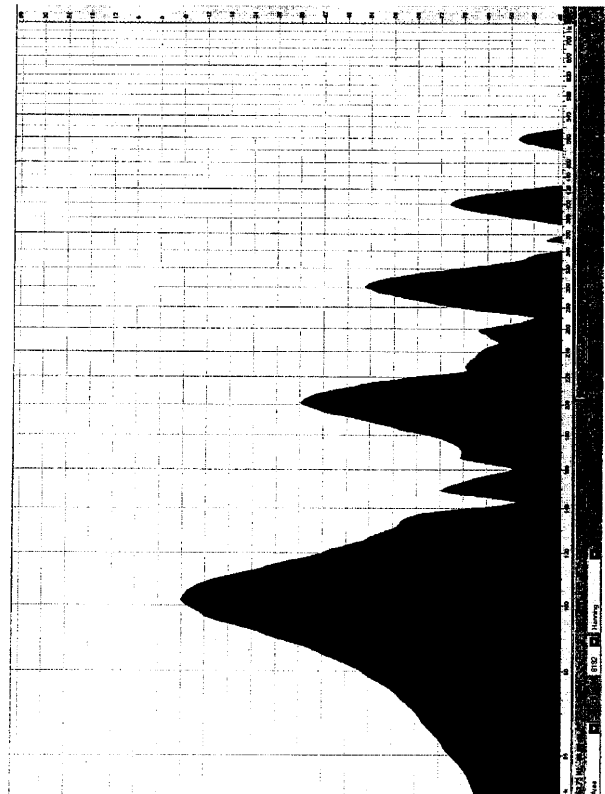
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

(72)発明者 ロバート パトリック ベイヤー

ニュージーランド国、オークランド、ワンフンガ、アテンズ ロード 2 5 B

F ターム(参考) 5D020 CE03

5D062 BB02

【 外国語明細書 】

Title of invention**IMPROVEMENTS IN OR RELATING TO SIGNAL PROCESSING****Technical Field**

5 This invention relates to audio signal processing methods and apparatus, and has particular application to delivering more apparent bass through the psychoacoustic perception of bass frequencies.

Background Art

10 Audio transducers such as loudspeakers frequently have difficulty reproducing bass (i.e. low audio frequency) audio frequencies.

It is known to utilise harmonics to generate apparent bass audio frequencies. This results from a psychoacoustic phenomenon where harmonics of low frequency sounds lead the
15 listener to "hear" the fundamental low frequency even though the fundamental is not present.

Known apparatus and methods vary signals over their dynamic range (i.e. volume or signal level) using apparatus such as compressors or limiters.

20

Disclosure of Invention**Problems to be solved by the invention**

It is an object of the invention to provide an improved audio signal processing method, or an improved audio signal processing device which will at least provide a useful alternative to
25 existing methods and apparatus.

Further objects of the invention may become apparent from the following description.

Means for solving problems

30 In one aspect the invention consists in signal processing apparatus for producing an audio signal suitable for conveying a psychoacoustic perception of a low frequency audio signal to a listener, the apparatus including a peak-hold generator means to generate harmonics of the low frequency signal by shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time.

35

Preferably the peak-hold generator includes a signal decay means to shape the waveform

of the low frequency signal with respect to level.

Preferably the harmonic generation means generate odd and even harmonics.

5 Preferably the apparatus includes a rectifier to generate even harmonics.

Preferably the peak-hold generator comprises a peak-hold-decay generator.

10 Preferably the low frequency waveform is shaped asymmetrically with respect to time and with respect to level.

In a further aspect the invention consists in a method of processing a low frequency audio signal to produce an output audio signal suitable for conveying a psychoacoustic perception of a low frequency audio signal to a listener, the method including shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time by tracking the low frequency signal to a substantially peak magnitude until a zero crossing then tracking the signal again in the opposite polarity.

20 Preferably the method includes the step of shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time and with respect to level by tracking the low frequency signal to a substantially peak magnitude then allowing the peak to decay at a predetermined rate.

The invention may also broadly be said to consist in any new feature or combination of features disclosed herein.

25 Further novel aspects of the invention will become apparent from the following description.

Embodiments for carrying out the invention

30 Embodiments of possible implementations of the invention will be described below by way of example with reference to the accompanying figures in which:

Figure 1 is a schematic block diagram of a first embodiment of a signal processing circuit;

35 Figure 2 is a schematic block diagram of a second embodiment of a signal processing circuit;

Figure 3 is a schematic block diagram of a third embodiment of a signal processing circuit;

Figure 4 is a schematic block diagram of a fourth embodiment of a signal processing circuit;

5

Figure 5 is a graph showing an example of a harmonics waveform generated by a peak hold decay generator used in the embodiment of figure 4, with time on the horizontal axis indicated by sample at a 44.1kHz sampling rate and signal level on the vertical axis;

10

Figure 6 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a first example of harmonics content;

Figure 7 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a second example of harmonics content;

15

Figure 8 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a third example of harmonics content;

20

Referring to figure 1, a block diagram of a first embodiment of a possible implementation of a signal processing system is shown.

25

The circuit shown in figure 1 may be implemented in software, or may be implemented using physical hardware. Furthermore, it may be implemented digitally or in analog form. There are a multiple methodologies and techniques which can be used to achieve the desired results in either form.

The purpose of the system is to deliver more apparent bass to a listener from any audio source material by means of any audio delivery mechanism.

30

It is desirable to High Pass filter (1,2) the source input audio signal per channel (L, R,etc., although the invention is applicable to single channel or multiple channel audio systems) to remove the bass components, generating a filtered input signal per channel for use later (Filtered Input). The source input audio signal channels are preferably then summed (3) to generate a mono source signal which contains the sum total of the bass information in the original audio. This resultant signal is then High Pass (4) and Low Pass (5) filtered to

35

remove the ultra-low infrasound frequencies, and the non-bass frequencies, generating the bass source signal.

5 Harmonics Generation, generally referenced (6), is used to introduce harmonics into the resultant audio. The results of this process generate the bass output signal, which is then merged with the filtered input signals. The details of this process are described below.

10 The resulting output audio is generated by summing the bass output signal into each of the filtered input signals (7,8), and presenting the result to the audio output (speakers, headphones, etc.). Optionally a Peaking Equalizer (9) (akin to the standard "Bass Boost" commonly found on stereo systems) may be added or utilised afterwards to further provide output bass level adjustment to the audio output, thus further increasing the bass response, but also including all the harmonic content already introduced.

15 It is preferable to implement the Harmonics Generator section (6) as follows: The bass source signal is presented to a Peak-Hold Generator (10). The Peak-Hold Generator generates an output signal which tracks the input signal, continuously increasing (decreasing) as the input signal rises (or falls), but holds the signal at the maximum value on both the positive and negative extents of the input signal. When the input signal transitions
20 from positive to negative, or negative to positive signal level, the output of the Peak Hold Generator is set to 0 (Zero). This generates odd harmonics of the fundamental frequency by symmetrically shaping the audio signal over time. This process can be readily performed since the human ear is "phase deaf", i.e. the phase of the audio signal cannot be determined by a listener. By shaping an audio signal in this manner, the harmonics
25 generator can introduce a specific series of harmonics to produce the psychoacoustic bass response desired without concern for the phase of the output harmonics.

It is preferable to have a hysteresis function applied to the bass input, which eliminates any output from the Peak-Hold Generator if the input signal level is below a certain threshold.
30 This is achieved by expanding the signal transition range from exclusively being 0 (Zero), to a +/- signal bounds.

The Peak-Hold Generator output (peak-hold output signal) is then preferably Half-Wave Rectified (11) (only positive portions of the original signal retained), which generates even
35 harmonics. This is followed by a DC Blocking Filter (12), which removes the DC Bias on the resultant signal. This is the resultant rectified output signal.

The peak-hold output signal, bass source signal, and rectified output signal are then combined (by any desired combination of addition and/or subtraction) at algebraic adding stage 13, with a final output level gain, to generate a resultant bass signal with a strong harmonic content. This harmonic bass signal is then High Pass and Low Pass filtered to remove and reduce the harmonic content which is undesired, or can not be reproduced by the audio output methodology to be used.

The algorithm may readily be realized in both Digital and Analogue forms. In Digital form, the algorithm may be realized through the utilisation of Audio BiQuad filters for example to provide the required filters, and elementary mathematical functions to implement the Peak-Hold and Rectified signal generation of the Harmonics Generator.

In Analogue form, the Peak Hold generator may be realised by a controllable Peak Detection circuit, or by a capacitor charging circuit, or by any other means to generate an output signal, held at the peak of the source input bass signal, until a zero crossing (signal transition with threshold) is reached. The Half-Wave rectification and DC blocking can be realised in a variety of methods from a simple rectifier diode, to an operational amplifier.

The Wave-Shaping performed by the Peak Hold Generator may be described as follows:

- a). Track the input signal on the rising or falling input.
- b). For +ve and -ve values, hold the signal at that level.
- c). At the zero crossing, reset the held value back to Zero.

The hysteresis function is preferably applied to the input level, limiting the output to occur only when the input signal is above the specified signal level (specified as -30 dB). This may be implemented by extending the 'reset to zero' range of the input to a +/- 30 dB level around the Zero input. This eliminates transient crossings, and additionally properly detects and generates the lowest bass frequency present without generating any higher frequency bass components unnecessarily.

The peak-hold process with hysteresis may be described succinctly through the following:

- S(t) – Source signal at time (t)
- O(t) – Output signal at time (t)
- Level – Hysteresis level (minimum +/- level/volume required)


```

if (S(t) >= -Level) AND (S(t) <= +Level)
    O(t) = 0.0
else if (S(t) > O(t-1)) AND (S(t) > 0.0)
    O(t) = S(t)
5   else if (S(t) < O(t-1)) AND (S(t) < 0.0)
    O(t) = S(t)
    else
        O(t) = O(t-1)
    end if

```

10

The +3 dB scaling gain in the processing path was added to properly balance the various harmonics and levels of the signals being merged. A 3 dB drop in the initial source signal could similarly be used, with the final output gain being correspondingly raised to compensate. The gain was implemented in this way by reason of the software interface, which during development permitted the gains of each signal to be individually controlled. Adding in this gain resulted in a nominal '0 dB' gain factor being applied to each input for the harmonics and bass summation operation.

15

The frequency cut-off values listed in figure 1 were specifically chosen to generate a 0dB overall gain (with respect to the input) in the software implementation for 100 Hz capable speakers. The preferred software implementation utilises Digital Audio BiQuad Filters (2nd order) appropriately cascaded to generate the desired filter order. Headphones or speakers which can handle lower frequencies may require different filter cut-off settings to be used. A simple single adjustment can be done by changing the output frequency cut-off limit, to add more of the fundamental frequency back into the output, thus resulting in an even richer bass, however this will correspondingly add power to the output signal.

20

25

The 0dB gain path was verified by running a -15dB, 20Hz to 1 KHz sinusoidal sweep through the software implementation and adjusting the filter cut-offs to produce a relatively flat -15 dB output signal with the harmonics added appropriately. We have found that the output does have a modest 1.5 dB gain for frequencies between 70 to 100Hz, and also has a 1.5 dB drop around the 180Hz input filter cut-off frequency.

30

The spectral content of the generation adds harmonics heavily at low frequencies (below 130 Hz), resulting in frequencies as low as 30 Hz becoming 'audible' on speakers with a nominal response of 100 Hz, through the principle of the missing fundamental. Higher input

35

frequencies result in only one or two harmonics being added as the final Harmonics cut-off filter attenuates these higher order harmonics very strongly.

5 The generated harmonics include the fundamental and all odd and even harmonics in a smoothly decaying spectrum. While the fifth and higher odd harmonics are also generated, resulting in non-musical tones, the choice of cut-off frequencies severely limits these being utilised for most input signals. Signals below 50Hz will have these harmonics added; however these harmonics appear to greatly aid in these infrasound frequencies being successfully perceived, and in some cases even generate a lower perceived frequency than
10 was originally present.

For the initial bass input adder, two different methods were explored:

- a). Direct Summation ($L + R$) as shown on the diagram.
- b). Filtered Summation ($L - \text{Filtered } R$) + ($R - \text{Filtered } L$).

15

The second method proved to provide a much greater vocals rejection capability on most input media, which reduced the effect of harmonics being introduced on very low frequency male voices. This however did introduce a side-effect of a sharp frequency notch at the cut-off, unless a very high order filter was utilised with some overlap within the filters.

20

In figure 2 a second embodiment of the invention is shown. Features of figures 2, 3 and 4 which are the same as, or similar to, that of figure 1 have the same reference numerals. As can be seen, the filters in the embodiment of figure 2 have slightly different cut-off frequencies than some of the filters of figure 1, and the generated harmonics are subtracted
25 from the fundamental at the adding stage 13. Also, and the gain of the each of the components to be added/subtracted at adding stage 13 may be controlled.

In the embodiment of figure 3, the embodiments of the preceding figures have been simplified by adding the odd and even harmonic components together without adding or
30 subtracting the fundamental.

In the embodiment of figure 4 the duration of the hold period for the peak-hold generator is modified to further introduce and generate the desired harmonics. Therefore, a peak – hold – decay generator 20 replaces the separate peak – hold generator, rectifier and DC
35 blocking filter. This further exploits the property of the human ear being “phase deaf”, and allows the peak – hold generator to be modified to generate the odd and even harmonics in

one process. In a preferred embodiment this is achieved through controlled decay of the held signal. It is also preferred that a different transition point is used for resetting the held signal.

5 The process may be described succinctly in as follows:

S(t) – Source signal at time (t)

O(t) – Output signal at time (t)

Decay – A specified signal decay factor

abs() – Absolute level/volume of the signal

10

if (abs(S(t))>O(t-1))

O(t) = S(t)

else

O(t) = Decay * O(t-1)

15

end if

This generates a waveform which is shaped asymmetrically not only with respect to time but also with respect to level, thus generating both even and odd harmonics as a result. The degree of harmonic generation may be easily controlled through controlling the rate or properties of the decay. In a preferred embodiment this is done by controlling a Decay factor, which in this example implementation operates similarly to a capacitor discharge curve. The Actual Decay factor must be below 1.0 (i.e. less than unity gain) in order to appropriately decay the output signal.

25

The decay factor may be calculated through the following example formulae:

$$\text{Decay} = 2.0 - \exp(\text{Setting} / \text{SampleRate})$$

30

Where "Setting" is an arbitrary user configurable decay constant used to control the degree of harmonics introduced. For an example implementation, assuming a SampleRate of 44.1 kHz audio, the Setting range is arbitrarily set to 100 to 1000. Utilising these constants, the resultant audio signals and their spectrums are as shown in figures 5 to 8. In figure 6 the Setting is 200, in figure 7 it is 500, and in figure 8 it is 1000.

35

The harmonic spectral content has been validated by utilising a Chirp sinusoidal sweep signal as input through the various processes outlined above. The gain and filter settings in

each case were appropriately adjusted to provide a consistent output level for the entire sweep process, while still introducing the appropriate level of harmonic content desired.

Those skilled in the art will realise that many different implementations of the invention are possible within the scope of the invention as described in this document. For example, there are many different realisations and techniques of signal bass extraction and recombination (multi-band filtering, input difference summation, use of LFE channel only from multi-channel audio sources, etc.) any of which may be applied to the present invention.

Brief description of Drawings

Figure 1 is a schematic block diagram of a first embodiment of a signal processing circuit;

Figure 2 is a schematic block diagram of a second embodiment of a signal processing circuit;

Figure 3 is a schematic block diagram of a third embodiment of a signal processing circuit;

Figure 4 is a schematic block diagram of a fourth embodiment of a signal processing circuit;

Figure 5 is a graph showing an example of a harmonics waveform generated by a peak hold decay generator used in the embodiment of figure 4, with time on the horizontal axis indicated by sample at a 44.1kHz sampling rate and signal level on the vertical axis;

Figure 6 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a first example of harmonics content;

Figure 7 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a second example of harmonics content;

Figure 8 is a graph of frequency (Hz) against signal strength (dB) of a third example of harmonics content;

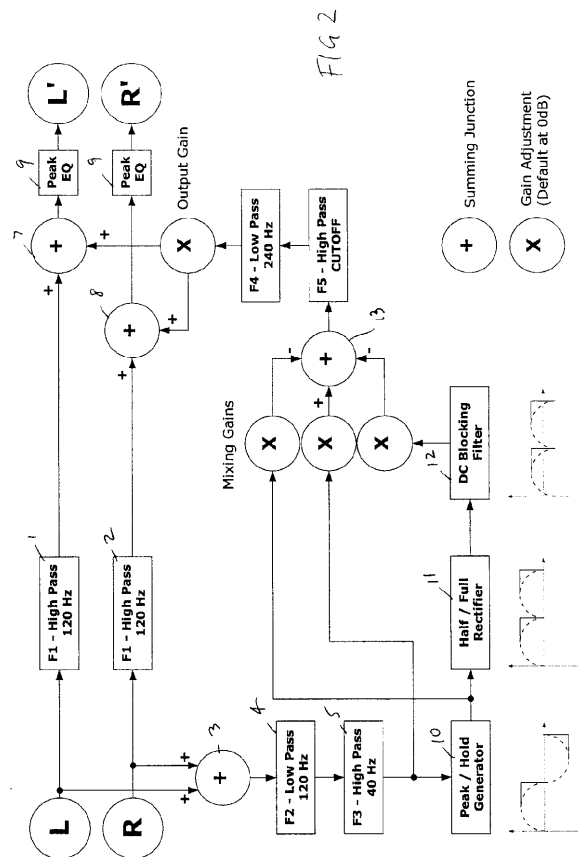
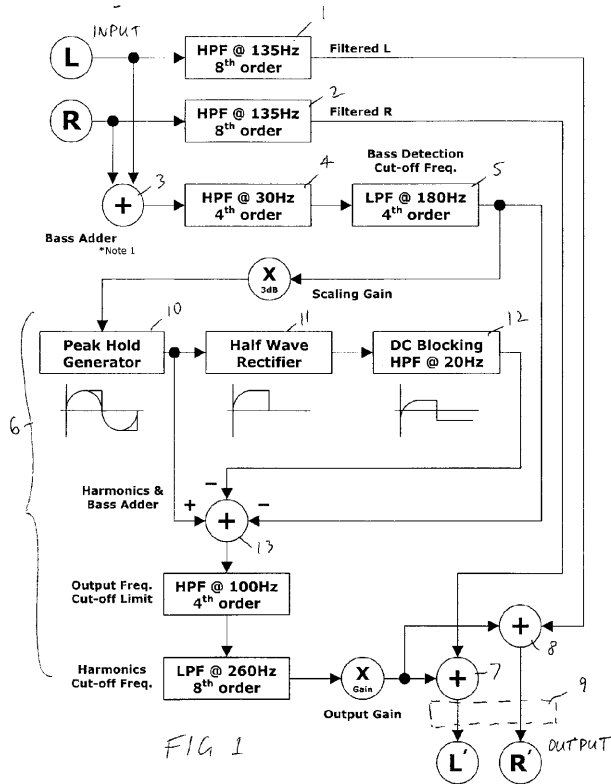
Claims

1. Signal processing apparatus for producing an audio signal suitable for conveying a psychoacoustic perception of a low frequency audio signal to a listener, the apparatus including a peak-hold generator means to generate harmonics of the low frequency signal by shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time.
5
2. Signal processing apparatus as claimed in claim 1 wherein the peak-hold generator includes a signal decay means to shape the waveform of the low frequency signal with respect to level.
10
3. Signal processing apparatus as claimed in claim 2 wherein the harmonic generation means generate odd and even harmonics.
- 15 4. Signal processing apparatus as claimed in claim 1 further including a rectifier to generate even harmonics.
5. Signal processing apparatus as claimed in claim 2 wherein the peak-hold generator comprises a peak-hold-decay generator.
20
6. Signal processing apparatus as claimed in claim 2 wherein the low frequency waveform is shaped asymmetrically with respect to time and with respect to level.
- 25 7. A method of processing a low frequency audio signal to produce an output audio signal suitable for conveying a psychoacoustic perception of a low frequency audio signal to a listener, the method including shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time by tracking the low frequency signal to a substantially peak magnitude until a zero crossing then tracking the signal again in the opposite polarity.
30
8. A method as claimed in claim 9 including the step of shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time and with respect to level by tracking the low frequency signal to a substantially peak magnitude then allowing the peak to decay at a predetermined rate.
35

1 Abstract

Signal processing apparatus produces an audio signal suitable for conveying a psychoacoustic perception of a low frequency audio signal to a listener, the apparatus generates harmonics of the low frequency signal by shaping the waveform of the low frequency signal with respect to time and/or level. This may be achieved using a peak-hold generator and a rectifier, or using a peak-hold-decay generator.

2 Representative Drawing Figure 1



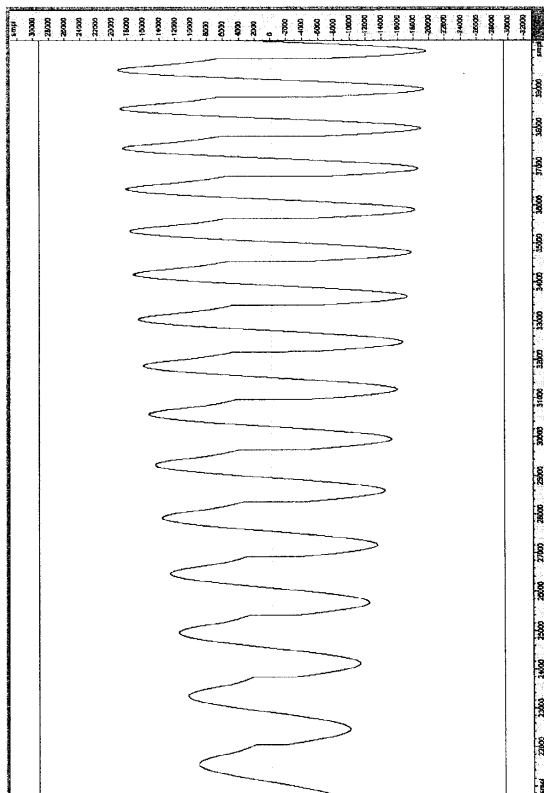


FIG 5

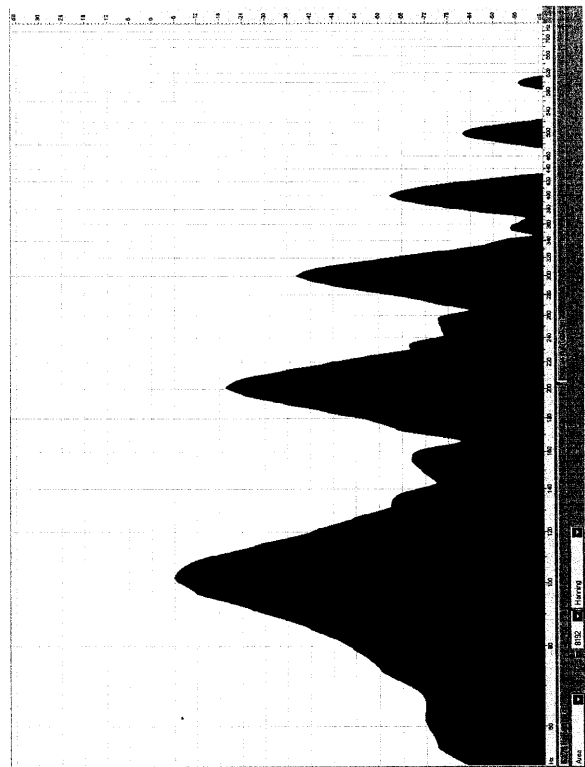
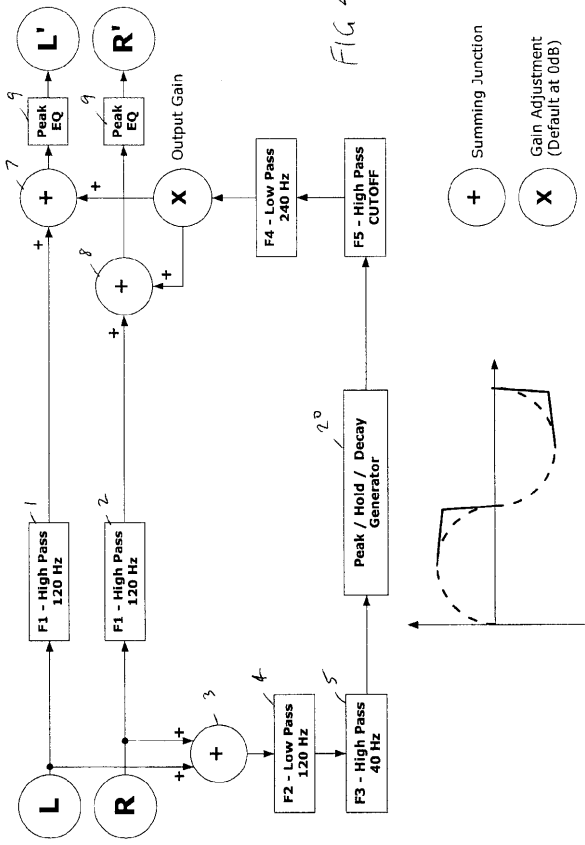
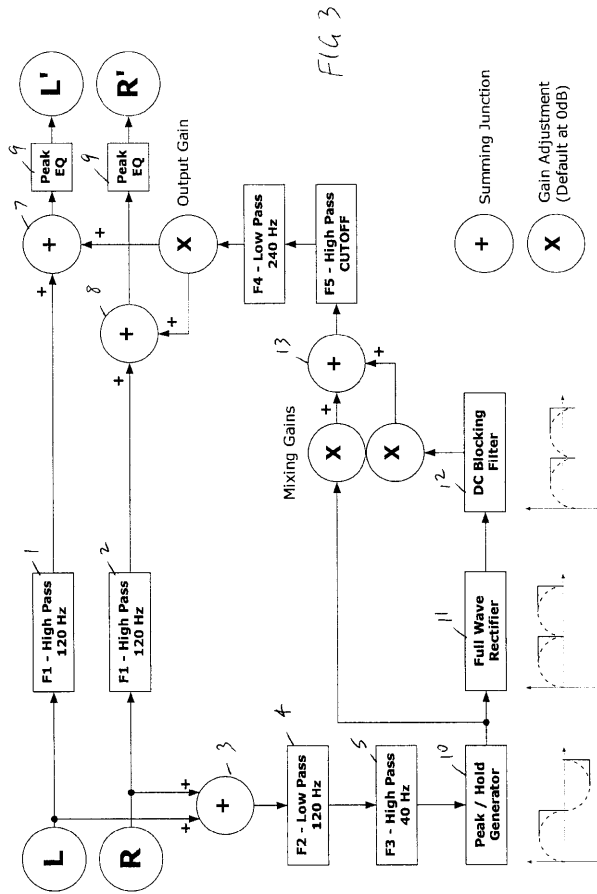


FIG 6

Fig 7

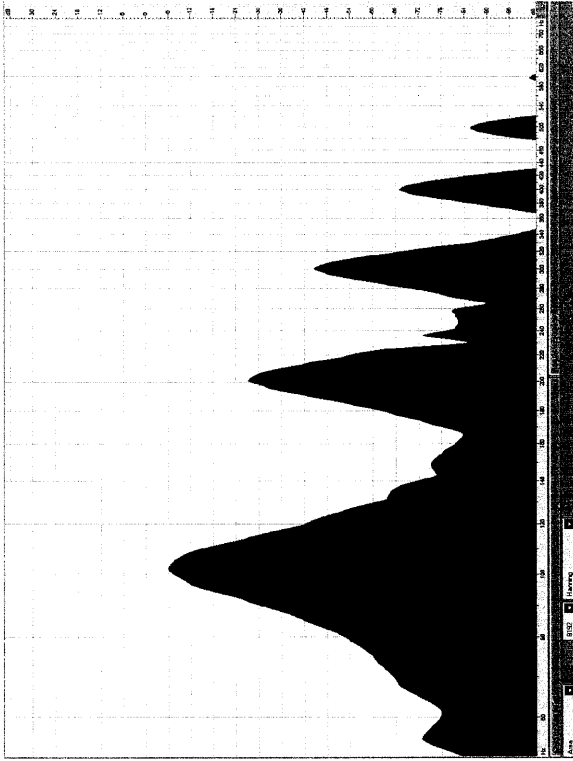


Fig 8

