

(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2012-141532

(P2012-141532A)

(43) 公開日 平成24年7月26日(2012.7.26)

(51) Int.Cl.
G10K 11/178 (2006.01)

F I
G10K 11/16

テーマコード(参考)
5D061

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2011-1001(P2011-1001)
(22) 出願日 平成23年1月6日(2011.1.6)

(71) 出願人 000005821
パナソニック株式会社
大阪府門真市大字門真1006番地
(74) 代理人 100109667
弁理士 内藤 浩樹
(74) 代理人 100109151
弁理士 永野 大介
(74) 代理人 100120156
弁理士 藤井 兼太郎
(72) 発明者 大西 将秀
大阪府門真市大字門真1006番地 パナ
ソニックエレクトロニクス株式会社
社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 能動騒音低減装置

(57) 【要約】

【課題】音響伝達特性が変動する場合に、適応フィルタが発散するまでの利得余裕と位相余裕をともに把握することが困難であり、そのためLMSアルゴリズムで用いるステップサイズパラメータの値は余裕を持たせて充分小さい値に実験的または経験的に決定されていた。

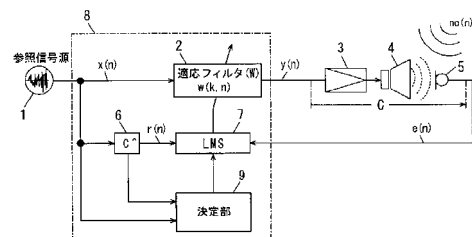
【解決手段】適応フィルタのサンプリング周波数とフィルタ係数の個数によって決定される離散周波数毎に下式を満たすステップサイズパラメータ μ を求め、そのうちの最小値を決定する決定部を有する構成とした。

【数 1】

$$0 < \mu < \frac{2 \cdot \cos(\theta c' - \theta c^{\wedge})}{|X|_{ave}^2 \cdot R c^{\wedge} \cdot R c^{\prime}}$$

(但し、 X : 参照信号をフーリエ変換した値、 $|X|_{ave}^2$: X の実部の 2 乗と虚部の 2 乗の和の時間平均値、 $R c^{\wedge}$ 、 c^{\wedge} : 模擬音響伝達特性の利得と位相、 $R c^{\prime}$ 、 c^{\prime} : 初期状態から変動した音響伝達特性の利得と位相)

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

課題となる騒音と相関のある信号を出力する参照信号源と、この参照信号源からの出力信号である参照信号が入力され前記課題となる騒音を打ち消すための 2 次騒音信号を出力する適応フィルタと、前記 2 次騒音信号を 2 次騒音として発生させる 2 次騒音発生手段と、前記 2 次騒音と前記課題となる騒音との干渉による残留音を検出するマイクロフォンと、前記参照信号を前記 2 次騒音発生手段から前記マイクロフォンまでの間の音響伝達特性の初期状態を模擬した模擬音響伝達特性で補正した濾波参照信号と前記残留音と係数であるステップサイズパラメータを用いてフィルタード X - LMS アルゴリズムに基づいて前記適応フィルタのフィルタ係数を更新する LMS アルゴリズム演算部を有する能動騒音低減装置において、

前記適応フィルタのサンプリング周波数と前記適応フィルタのフィルタ係数の個数によって決定される離散周波数毎に、前記模擬音響伝達特性の利得値及び位相値と、前記音響伝達特性の初期状態から所定値変動した音響伝達特性の利得値及び位相値と、前記参照信号をフーリエ変換して得られた値の実部の 2 乗と虚部の 2 乗の和の時間平均値を用いて下式を満たす前記ステップサイズパラメータを求め、そのうちの最小値を決定する決定部を有し、前記 LMS アルゴリズム演算部は前記決定部が決定した前記ステップサイズパラメータを用いることを特徴とする能動騒音低減装置。

【数 1】

$$0 < \mu < \frac{2 \cdot \cos(\theta c' - \theta c^{\wedge})}{|X|_{ave}^2 R c' R c^{\wedge}}$$

(但し、 μ : ステップサイズパラメータ、 X : 参照信号をフーリエ変換した値、 $|X|^2$: X の実部の 2 乗と虚部の 2 乗の和、 $|X|_{ave}^2$: $|X|^2$ の時間平均値、 $R c^{\wedge}$: 模擬音響伝達特性の利得値、 c^{\wedge} : 模擬音響伝達特性の位相値、 $R c'$: 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の利得値、 c' : 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の位相値)

【請求項 2】

決定部は、2 次騒音発生手段からマイクロフォンまでの音響伝達特性の初期状態を模擬するための同定動作を実行直後にステップサイズパラメータを決定することを特徴とする請求項 1 に記載の能動騒音低減装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、不快な騒音に対し、逆位相且つ等振幅の信号を干渉させることでこの騒音を低減する能動騒音低減装置に関するもので、特に使用される場所の環境変化が比較的大きく、それに伴い音場特性が変化する自動車室内などの騒音を制御対象とする場合に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来、能動騒音低減装置は、適応フィルタの係数更新アルゴリズムとしてフィルタード X - LMS アルゴリズムを用いるものが最も一般的である(例えば、非特許文献 1 または非特許文献 2 参照)。図 13 は、一般的なフィルタード X - LMS アルゴリズムを用いた能動騒音低減装置の構成を示すものである。図中、 n は離散時間処理で動作し、騒音低減のための信号(2 次騒音信号 y) を発生するデジタル信号処理装置である DSP (Digital Signal Processor) のサンプリング周期 T_s (sec) 毎のサンプリングナンバーを表している。フィルタード X - LMS アルゴリズムにより T_s (sec) 毎に値が更新される N 個のフィルタ係数 $w(k)$ 、($k = 1, 2, 3, \dots$

10

20

30

40

50

、 N)からなるFIR(Finite Impulse Response)型の適応フィルタ2に入力される信号 x は参照信号と呼ばれ、その出力源である参照信号源1は、例えば本能騒音低減装置を自動車の車室内騒音の低減に適用する場合、車両のシャーシに設置された加速度ピックアップ等である。なお、この参照信号 x は、制御対象となる騒音 n_o と相関が高い必要があり、相関が低い帯域の騒音は騒音低減効果が期待できない。適応フィルタ2でフィルタリング演算(畳み込み演算)された参照信号 x は、2次騒音信号 y として2次騒音発生手段としての電力増幅器3とスピーカ4に送られ、騒音 n_o を低減させる2次騒音として空間中に放射される。空間中で2次騒音と騒音 n_o とが干渉した結果は、マイクロフォン5で残留音 e として検出され、適応フィルタ2のフィルタ係数 $w(k)$ を更新するLMSアルゴリズム演算部7に入力される。ここで、電力増幅器3の入力からマイクロフォン5の出力までの間の周波数領域での音響伝達特性を C とする。模擬音響伝達特性6は、音響伝達特性 C を模擬した周波数領域での特性 C^{\wedge} を有している。この模擬音響伝達特性6は、一般的に適応フィルタ2と同様に N_c 個のフィルタ係数 $c^{\wedge}(m)$ 、($m=1, 2, \dots, N_c$)からなるFIR型のフィルタで構成される。LMSアルゴリズム演算部7には、前記の残留音 e に加え、さらに参照信号 x を模擬音響伝達特性6でフィルタリング演算した信号 r が入力される。この信号 r は濾波参照信号と呼ばれ、フィルタード X の名称はこのことに由来する。さて、今、時刻 nT_s (sec)における各信号を考えることにする。適応フィルタ2の N 個のフィルタ係数 $w(k)$ をベクトルで表現すると、

10

【0003】
【数1】

20

$$\mathbf{w}(n) = [w(1,n), w(2,n), \dots, w(N,n)]^T \dots (1)$$

【0004】

となる。ここで、 T は転置を意味する。同じく、周波数領域での音響伝達特性 C を模擬した特性 C^{\wedge} を有する模擬音響伝達特性6の N_c 個のフィルタ係数 $c^{\wedge}(m)$ と、現時刻から $(N_c - 1)$ サンプル過去までの N_c 個の参照信号 x をベクトルで表現すると、

【0005】
【数2】

30

$$\mathbf{c}^{\wedge} = [c^{\wedge}(1), c^{\wedge}(2), \dots, c^{\wedge}(N_c)]^T \dots (2)$$

【0006】
【数3】

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_c+1)]^T \dots (3)$$

【0007】

となる。模擬音響伝達特性6のフィルタ係数 $c^{\wedge}(m)$ は固定値であり、時不変である。このとき、現時刻での濾波参照信号 r は、

40

【0008】
【数4】

$$r(n) = \sum_{k=0}^{N_c-1} c^{\wedge}(k+1)x(n-k) = \mathbf{c}^{\wedge T} \mathbf{x}(n) \dots (4)$$

【0009】

のように、式(2)で表現されたフィルタ係数 $c^{\wedge}(m)$ のベクトルと式(3)で表現された参照信号 x のベクトルの行列演算で求めることができる。式(4)で求めた現時刻で

50

の濾波参照信号 r と同様に、現時刻から $(N - 1)$ サンプル過去までの N 個の濾波参照信号をベクトルで表現すると、

【 0 0 1 0 】

【 数 5 】

$$\mathbf{r}(n) = [r(n), r(n-1), \dots, r(n-N+1)]^T \quad \dots (5)$$

【 0 0 1 1 】

となる。この濾波参照信号 r のベクトルと現時刻の残留音 e を用いて、次式のフィルタード $X - LMS$ アルゴリズム

【 0 0 1 2 】

【 数 6 】

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu e(n) \mathbf{r}(n) \quad \dots (6)$$

【 0 0 1 3 】

に基づき適応フィルタ 2 のフィルタ係数 $w(k)$ を更新していく。ここで、 μ はステップサイズパラメータと呼ばれる係数である。このステップサイズパラメータ μ は適応フィルタの 1 回あたりの更新量（つまり、収束速度）を調整するパラメータであるとともに、適応動作の安定性を決定付ける重要なパラメータである。能動騒音低減装置は、式 (6) に基づいて T_s (sec) 毎に再帰的に適応フィルタ 2 のフィルタ係数 $w(k)$ を更新することで、マイクロフォン 5 の位置で騒音 n_o と逆位相且つ等振幅となる最適な 2 次騒音を求めることができ、騒音を低減することが可能となる。

【 0 0 1 4 】

ここで、フィルタード $X - LMS$ アルゴリズムを用いた一般的な能動騒音装置の動作安定性について述べる。この能動騒音低減装置の適応フィルタ 2 のフィルタ係数 $w(k)$ が収束し、安定的な騒音低減動作を継続するためには 2 つの重要な条件が必要となる。1 つは模擬音響伝達特性 \hat{C} が実際の音響伝達特性 C を十分に模擬しており誤差が少ないことである。もう 1 つは適応フィルタのフィルタ係数 $w(k)$ を更新する際のステップサイズパラメータ μ の値が大き過ぎず、適度な大きさを探ることである。具体的には、前者の条件に対して、前記非特許文献 2 では、適応フィルタ 2 のフィルタ係数 $w(k)$ が収束する必要条件として、実際の音響伝達特性 C とそれを模擬した模擬音響伝達特性 \hat{C} との間の位相誤差が ± 90 (deg) 以内という条件があることが述べられている。これは能動騒音低減装置を設計する際の一般的な条件として周知である。特に、参照信号がサインソイダル（周期正弦波）信号の場合について、下記非特許文献 3 でこの条件が導き出されている。また、後者の条件に対しては、ステップサイズパラメータ μ の値は、 $0 < \mu < 2 / \max$ （但し、 \max は濾波参照信号 r の自己相関行列の最大固有値）の範囲で設定される必要があることが下記非特許文献 4 で述べられている。これも上記同様、能動騒音低減装置を設計する際の一般的な条件としては周知である。しかしながら、このような指標はあるものの、ステップサイズパラメータ μ の値は一般的には $2 / \max$ よりも充分小さい値を探ることが多い。これは、騒音が想定される以上に大きくなり、これに伴って参照信号が大きくなった場合でも余裕を持って安定的な適応動作を継続するためである。さらには、音響伝達特性 C の利得が経年変化などで初期状態から上昇変動してしまった場合でも、余裕を持って安定的に適応動作を行わせるためである。音響伝達特性 C の利得が初期状態から上昇した場合、模擬音響伝達特性 \hat{C} との間に利得誤差が発生することになるが、これは結局ステップサイズパラメータ μ がこの利得誤差分だけ上昇したと等価になるためである。そのため、音響伝達特性 C の利得の経年変化も考慮して、余裕を持ってステップサイズパラメータ μ を充分小さく設定しておく必要がある。以上に述べた 2 つの条件のうち 1 つでも満たさない場合、適応フィルタ 2 のフィルタ係数 $w(k)$ は収束することなく発散してしまい、能動騒音低減装置から大音量且つ異常な音が発生することとな

10

20

30

40

50

る。このように、フィルタードX-LMSアルゴリズムを用いた能動騒音低減装置を設計する場合、十分に動作安定性を考慮する必要がある。経年変化により音響伝達特性Cの利得のみならず、当然位相も変動することを考慮し、音場が変動しても安定的に動作するように余裕を持った設計が必要となる。特にステップサイズパラメータ μ の値は、動作安定性を決定付けるため重要である。その値の決定には、細心の注意を払わなければならない。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0015】

【非特許文献1】Barnard Widrow & Samuel D. Stearns 著, “ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING”, Prentice Hall, 1985年 (P. 288) 10

【非特許文献2】P. A. Nelson & S. J. Elliott 著, “Active Control of Sound”, Academic Press, 1992年 (P. 196)

【非特許文献3】C. C. Baucher, S. J. Elliott & P. A. Nelson 著, “Effect of errors in the plant model on the performance of algorithms for adaptive feedforward control”, IEEE, PROCEEDINGS-F, vol.138, No.4, AUGUST, 1991年

【非特許文献4】Scott D. Snyder & Colin H. Hansen 著, “The Effect of Transfer Function Estimation Errors on the Filtered-X LMS Algorithm”, IEEE, TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, vol.42, No.4, APRIL, 1994年

【発明の概要】 20

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

しかしながら、前記従来一般的なフィルタードX-LMSアルゴリズムを用いた能動騒音低減装置では、安定的に騒音低減動作を継続するための2つの条件は周知であるものの、それぞれが独立した形で存在しており、これら両者の相互関係については明確にされていなかった。従って、音響伝達特性の利得と位相がともに変動する場合に、適応フィルタのフィルタ係数が発散状態に至るまでの利得余裕と位相余裕をともに把握することは困難であった。そのため、動作安定性を決定付けるステップサイズパラメータ μ の値は余裕を持たせて充分小さい値に設定され、しかもその値は実験的または経験的に決定されていた。 30

【0017】

本発明は、前記従来課題を解決するもので、環境の変化に伴って音響伝達特性が変動することを考慮し、適応フィルタのフィルタ係数が発散状態に至るまでの利得余裕と位相余裕をともに把握して数式に基づいて論理的にステップサイズパラメータの値を決定することで、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合でも安定した動作を保証することができる能動騒音低減装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0018】

本発明の能動騒音低減装置は、前記適応フィルタのサンプリング周波数と前記適応フィルタのフィルタ係数の個数によって決定される離散周波数毎に、前記模擬音響伝達特性の利得値及び位相値と、前記音響伝達特性の初期状態から所定値変動した音響伝達特性の利得値及び位相値と、前記参照信号をフーリエ変換して得られた値の実部の2乗と虚部の2乗の和の時間平均値を用いて下式を満たす前記ステップサイズパラメータを求め、そのうちの最小値を決定する決定部を有し、前記LMSアルゴリズム演算部は前記決定部が決定した前記ステップサイズパラメータを用いる。 40

【0019】

【数 7】

$$0 < \mu < \frac{2 \cdot \cos(\theta c' - \theta c^{\wedge})}{|X|_{ave}^2 R c' R c^{\wedge}}$$

【0020】

(但し、 μ : ステップサイズパラメータ、 X : 参照信号をフーリエ変換した値、 $|X|^2$: X の実部の 2 乗と虚部の 2 乗の和、 $|X|_{ave}^2$: $|X|^2$ の時間平均値、 $R c^{\wedge}$: 模擬音響伝達特性の利得値、 c^{\wedge} : 模擬音響伝達特性の位相値、 $R c'$: 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の利得値、 c' : 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の位相値)

本構成によって、音響伝達特性が初期状態から所定値変動したときでも安定に動作できるステップサイズパラメータの値を論理的に決定することができる。

【発明の効果】

【0021】

本発明の能動騒音低減装置によれば、環境の変化に伴って音響伝達特性が変動することを考慮し、適応フィルタのフィルタ係数が発散状態に至るまでの利得余裕と位相余裕をともに把握して数式に基づいて論理的にステップサイズパラメータの値を決定することで、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合でも安定した動作を保証することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図 1】実施の形態 1 に係る能動騒音低減装置の構成を示すブロック図

【図 2】音響伝達特性の計測結果の図

【図 3】音響伝達特性に逆フーリエ変換を施して求めた模擬音響特性のフィルタ係数 (インパルス応答) の図

【図 4】参照信号源の時間波形の図

【図 5】参照信号源の $|X|_{ave}^2$ の図【図 6】 $\mu = 0.00048$ のときの、音響伝達特性の初期状態からの利得変動に対する、発散状態に至るまでに許容される音響伝達特性の初期状態からの位相変動のグラフ【図 7】 $\mu = 0.00048$ のときの、能動騒音低減装置の騒音低減効果のグラフ【図 8】 $\mu = 0.00055$ のときの、音響伝達特性の初期状態からの利得変動に対する、発散状態に至るまでに許容される音響伝達特性の初期状態からの位相変動のグラフ【図 9】 $\mu = 0.00055$ のときの、能動騒音低減装置の騒音低減効果のグラフ【図 10】 $\mu = 0.001$ のときの、音響伝達特性の初期状態からの利得変動に対する、発散状態に至るまでに許容される音響伝達特性の初期状態からの位相変動のグラフ【図 11】 $\mu = 0.001$ のときの、能動騒音低減装置の騒音低減効果のグラフ

【図 12】実施の形態 2 に係る適応フィルタを用いたシステム同定の構成を示すブロック図

【図 13】従来一般的な能動騒音低減装置の構成を示すブロック図

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下本発明を実施するための最良の形態について、図面を参照しながら説明する。

【0024】

(実施の形態 1)

図 1 は、本発明実施の形態 1 における能動騒音低減装置の図である。なお、図 1 において、背景技術において示した従来一般的な能動騒音低減装置 (図 13) と同一の構成要素には同一の符号を付して、説明の省略を行う。図 1 において、図 13 との相違点である DSP 8 内部の決定部 9 は、LMS アルゴリズム演算部 7 が用いるステップサイズパラメータ μ を

10

20

30

40

50

決定する。このステップサイズパラメータ μ は、能動騒音低減装置が安定に動作するために、重要なパラメータである。ステップサイズパラメータ μ が大きいと、式(6)からわかるように適応フィルタのフィルタ係数の更新速度が速くなり、騒音が時々刻々と変化する場合の追従性が向上するため、結果として騒音低減効果も向上する。しかし、あまり大きすぎると動作安定性が悪くなってしまい、最悪の場合適応フィルタのフィルタ係数が発散してしまう。逆にステップサイズパラメータ μ が小さいと、動作は安定するものの騒音を低減するまでに時間を要し、騒音の変化に対する追従性も悪いため、騒音低減効果は劣化する。このようにフィルタドX-LMSアルゴリズムを用いた能動騒音低減装置の動作安定性と騒音低減効果はトレードオフにあるため、その値の決定は困難を伴う。一般的には、安定性がより重要視されるため、発散までの余裕を持たせて充分小さい値(例えば、0.0001など)に設定される。また、この値は実験的または経験的に決定される。このように決められたステップサイズパラメータ μ では、能動騒音低減装置がどれほどの安定余裕度を持って動作しているのかが不明である。特に、先に述べたフィルタドX-LMSアルゴリズムを用いた能動騒音低減装置が安定に動作するための2つの重要な条件が作用するところの音響伝達特性 C と模擬音響伝達特性 C^{\wedge} との間の利得誤差と位相誤差に関しては、その余裕度は全くわからなかった。本発明の決定部9は、従来のこのようなステップサイズパラメータ μ の決定過程では考慮されていなかった実際の音響伝達特性の変動を考慮した、次式

10

【0025】
【数8】

20

$$0 < \mu < \frac{2 \cdot \cos(\theta c' - \theta c^{\wedge})}{|X|_{ave}^2 R c' R c^{\wedge}} \dots (7)$$

【0026】

(但し、 μ : ステップサイズパラメータ、 X : 参照信号をフーリエ変換した値、 $|X|^2$: X の実部の2乗と虚部の2乗の和、 $|X|_{ave}^2$: $|X|^2$ の時間平均値、 $R c^{\wedge}$: 模擬音響伝達特性の利得値、 c^{\wedge} : 模擬音響伝達特性の位相値、 $R c'$: 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の利得値、 c' : 初期状態の音響伝達特性から所定値変動した音響伝達特性の位相値)

30

に基づいてステップサイズパラメータ μ を決定する。

【0027】

では、具体的に決定部9が式(7)に基づいてステップサイズパラメータ μ を決定する過程を説明していく。図1に示した能動騒音低減装置を動作させるためには、模擬音響伝達特性6のフィルタ係数 c^{\wedge} を決定する必要がある。そのために、能動騒音低減装置とは別に用意した周波数応答解析器などの計測器(図示せず)を用いて、能動騒音低減装置が設置されている環境における現在の音響伝達特性 C を計測する必要がある。計測した結果、ここでは、図2に示すような周波数領域での特性(利得特性と位相特性)が得られたとする。能動騒音低減装置は、周波数領域の情報ではなく、時間領域の情報としてフィルタ係数 c^{\wedge} を保持する必要があるため、周波数応答解析器の計測結果を逆フーリエ変換して時間領域の情報に変換したもの(インパルス応答)を模擬音響伝達特性6のフィルタ係数 c^{\wedge} とする。図2の周波数特性を用い、インパルス応答の長さを256として求めた模擬音響伝達特性6のフィルタ係数 c^{\wedge} を図3に示す。この模擬音響伝達特性6のフィルタ係数 c^{\wedge} は、決定部9にも入力され、後述する式(7)に基づいてステップサイズパラメータ μ を決定する過程で使用される。一方、決定部9には、参照信号源1の信号も入力される。ここでは、決定部9に、図4に示すような時間領域での信号が入力されたとする。決定部9は、例えば、DSP8の内部に有しているメモリ(図示せず)に参照信号源1の信号を一定時間(例えば、10(sec))記録する。これも同じく、後述する式(7)に基づいてステップサイズパラメータ μ を決定する過程で使用される。

40

【0028】

50

ここで、能動騒音低減装置のサンプリング周波数 f_s は 3000 (Hz)、適応フィルタ 2 のフィルタ係数 w の個数 (インパルス応答の長さ) は、模擬音響伝達特性 6 のフィルタ係数 c^{\wedge} と同じく 256 個とする。このとき、適応フィルタ 2 の周波数分解能は、 $3000 / 256 = 11.7188$ (Hz) であるため、離散周波数は、DC (0 Hz) からナイキスト周波数である 1500 (Hz) までを 11.7188 (Hz) 間隔で区切った値となる。以下では、その中の 1 つである、 199.22 (Hz) の場合を代表的に説明するが、他の離散周波数でも全く同様である。

【0029】

さて、決定部 9 は、上述した 2 つの入力を用い、式 (7) に基づいてステップサイズパラメータ μ を決定する。ここでは、音響伝達特性の利得が現在の初期状態 C から +6 (dB) 上昇変動したときに、発散状態に至るまでに少なくとも +45 (deg) の位相余裕があるように、つまり、変動後の音響伝達特性 C' が現在の初期状態 $C (= C^{\wedge})$ から利得が +6 (dB) 且つ位相が +45 (deg) 変動しても能動騒音低減装置が安定に動作することを保証するステップサイズパラメータ μ を決定していくことにする。まず、式 (7) において、 Rc^{\wedge} と c^{\wedge} は模擬音響伝達特性 6 の利得特性と位相特性を表している。従って、 199.22 (Hz) における模擬音響伝達特性 6 の利得値と位相値を求め、その値を単に代入すればよい。しかし、決定部 9 に入力されている模擬音響伝達特性 6 のフィルタ係数 c^{\wedge} は時間領域の情報であるため、決定部 9 はこれをフーリエ変換して周波数領域の情報に変換する必要がある。その結果は、図 2 に示した周波数領域での特性と一致する。図 2 より、 199.22 (Hz) における利得値は 7.14 (dB)、位相値は -48.33 (deg) である。そこで、決定部 9 は、 $Rc^{\wedge} = 10^{(7.14/20)} = 2.28$ 、 $c^{\wedge} = -48.33$ を式 (7) に代入する。次に、式 (7) において、 Rc' と c' は、初期状態の音響伝達特性 C から所定値変動した音響伝達特性 C' の利得特性と位相特性を表している。ここでは、変動後の音響伝達特性 C' が初期状態 $C (= C^{\wedge})$ から利得が +6 (dB) 且つ位相が +45 (deg) 変動した特性であるため、 $Rc' = 10^{((7.14+6.00)/20)} = 4.54$ 、 $c' = -48.33 + 45.00 = -3.33$ である。そこで、決定部 9 は、これらを式 (7) に代入する。さらに、式 (7) において、 $|X|_{ave}^2$ は参照信号をフーリエ変換した値の実部の 2 乗と虚部の 2 乗の和の時間平均値を表している。これを求めるために、まず、決定部 9 は、DSP 8 の内部のメモリに一定時間記録された参照信号を適応フィルタ 2 のフィルタ係数 w の個数 (ここでは、256) 毎に区切って、それぞれにフーリエ変換を行い、各区間で離散周波数毎の $|X|^2$ を得る。そして、決定部 9 は、得られた $|X|^2$ を全区間に渡って平均化処理することで離散周波数毎の $|X|_{ave}^2$ を得る。決定部 9 が算出した $|X|_{ave}^2$ を図 5 に示す。 199.22 (Hz) において、 $|X|_{ave}^2 = 274.4$ である。そこで、決定部 9 は、これを式 (7) に代入する。以上より、 199.22 (Hz) において、音響伝達特性 C' が初期状態 C から利得が +6 (dB) 且つ位相が +45 (deg) 変動しても能動騒音低減装置が安定に動作することを保証するステップサイズパラメータ μ の値は、 0.00049 より小さな値であると求まる。そこで、決定部 9 は、 199.22 (Hz) におけるステップサイズパラメータ μ として、例えば、 0.00048 を決定する。

【0030】

さて、今度は視点を変えて、現在設定しているステップサイズパラメータ μ を用いて能動騒音低減装置を動作させた場合、それが安定に動作するために許容される音響伝達特性 C の利得変動と位相変動を考えてみる。式 (7) を変形すると、

【0031】

【数 9】

$$-\cos^{-1}\left(\frac{\mu|X|_{ave}^2 Rc' Rc^{\wedge}}{2}\right) < \theta c' - \theta c^{\wedge} < \cos^{-1}\left(\frac{\mu|X|_{ave}^2 Rc' Rc^{\wedge}}{2}\right) \dots (8)$$

【0032】

が得られる。式(8)は、上記で決定されたステップサイズパラメータ μ によって制約される能動騒音低減装置の動作安定性の限界値に関して、視覚的に理解を手助けしてくれる。式(8)の μ 、 R_c 、 $|X|_{ave}^2$ に上記の各値を代入し、横軸を音響伝達特性の初期状態からの利得変動値、つまり C' と C^{\wedge} の利得差として表した場合のグラフを図6に示す。図6において、縦軸は式(8)から求められた、各利得変動のときに許容される音響伝達特性の初期状態からの位相変動を表している。即ち、このグラフは、現在決定されているステップサイズパラメータを使用して能動騒音低減装置を動作させた場合に、一つの離散周波数(この場合、199.22(Hz))において、能動騒音低減装置が安定に動作することができる音響伝達特性の利得変動と位相変動の許容範囲(安定領域)を表している。このグラフの原点(音響伝達特性の利得変動が0(dB)、位相変動が0(deg))は、音響伝達特性が初期状態から変動していない場合($C' = C^{\wedge}$ 、つまり、音響伝達特性 C を計測した直後に模擬音響伝達特性 C^{\wedge} を求めた状態)を表している。グラフより、現在決定されているステップサイズパラメータ μ の値では、この状況においても、既に位相余裕は ± 90 (deg)もなく、 ± 69.3 (deg)しかないことが読み取れる。さらに、同じく、現在決定されているステップサイズパラメータ μ の値では、音響伝達特性の位相特性が一切変化しなくとも、利得特性だけが+9.1(dB)以上変動するとき、即ちステップサイズパラメータ μ が現在値の0.00048より2.85(倍)大きくなると、安定領域を外れ、不安定になる(最悪の場合、発散状態に至る)ことも読み取れる。また、ここで決定したステップサイズパラメータ μ の値では、音響伝達特性の利得変動が+6(dB)の場合に許容される位相変動は、所望どおり ± 45 (deg)となっていることも視覚的に容易に理解できる。

【0033】

ここでは離散周波数の1つである199.22(Hz)について述べたが、他の離散周波数でもステップサイズパラメータ μ の決定方法は同じである。その結果、離散周波数毎にステップサイズパラメータ μ が求まることになるが、決定部9はその中の最小値を選択する。そうすることで、全ての離散周波数の中で最も動作安定性に対してクリティカルな周波数帯域においても所望の音響伝達特性の変動余裕を有する能動騒音低減装置を実現することができる、システム全体としての動作安定性を保証することができる。

【0034】

では、シミュレーションを用いることで、式(7)、(8)の妥当性を検証する。なお、以下に説明するシミュレーションにおいては、決定部9が式(7)に基づいて求めた結果から、全ての離散周波数の中で最も動作安定性に対してクリティカルな周波数帯域は199.22(Hz)であることがわかっている。従って、特にこの周波数での動作安定性に注目して説明を行う。まず、図6に示したように、ステップサイズパラメータ μ を0.00048に設定したとき、音響伝達特性の利得変動が+6(dB)、位相変動が ± 45 (deg)ある場合、能動騒音低減装置は安定に動作することができる。しかしながら、このときの動作点は安定領域と不安定領域の境界にあるので不安定になることはないとは言え、より確実な安定性が保証されているとき(より小さなステップサイズパラメータ μ が設定され、安定領域のより内部に動作点が存在するとき)と比較すると、騒音低減効果は幾らか劣ることが予想される。このときのシミュレーション結果(騒音のパワースペクトル密度)を図7に示す。能動騒音低減装置は、制御帯域である50(Hz)から500(Hz)で安定的に騒音を低減していることがわかる。199.22(Hz)においても10(dB)以上の騒音低減効果が得られている。しかし、その近傍の周波数と比較すると少し効果が劣化していることがわかる。これは、図6から想定されるとおりの結果である。次に、ステップサイズパラメータ μ を0.00055に設定した場合の安定領域のグラフを図8に示す。この場合、音響伝達特性の利得変動が+6(dB)、位相変動が ± 45 (deg)あると(図中、 \square で動作点を示す)、動作点は安定領域を外れ、不安定領域に入ってしまう。このとき、能動騒音低減装置は、199.22(Hz)の騒音を低減できず、むしろ増音してしまうことが予想される。しかしながら、大きく安定領域を外れているわけではないので、発散に至ることはないとも予想される。このときのシミュレーシ

ョン結果を図9に示す。能動騒音低減装置は、予想どおり、199.22(Hz)の騒音を低減できず、4(dB)程度増音していることがわかる。また、不安定ではあるものの、少しの増音だけで収まっており、システムとしては発散に至っていないこともわかる。さらに、ステップサイズパラメータ μ を0.001に設定した場合の安定領域のグラフを図10に示す。この場合、音響伝達特性の利得変動が+6(dB)、位相変動が ± 45 (deg)あると、能動騒音低減装置の動作点は安定領域を大きく外れ、完全に不安定領域に入ってしまう。このとき、能動騒音低減装置は、199.22(Hz)から発散が始まり、それが引き金になり、システム全体で大きく増音してしまうことが予想される。このときのシミュレーション結果を図11に示す。能動騒音低減装置は、予想どおり、199.22(Hz)を中心に発散し、システム全体で大きく増音していることがわかる。

10

【0035】

以上のように、本実施の形態1に示す能動騒音低減装置は、適応フィルタのフィルタ係数が発散状態に至るまでの利得余裕と位相余裕をとともに把握して、式(7)を用いて論理的に求められた離散周波数毎の最適なステップサイズパラメータ μ の中から最小値を選択することで、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合でも安定した動作を保証することができるという効果を奏する。

【0036】

(実施の形態2)

以下、実施の形態2を用いて、本発明の請求項2に記載の発明について説明する。本実施の形態は図1に示した上記実施の形態1と同じ構成からなり、決定部9がステップサイズパラメータ μ を決定するタイミングに関するものである。上記の実施の形態1で述べたように、模擬音響伝達特性6の特性 C^{\wedge} は、音響伝達特性の初期状態(C)を十分に模擬している必要がある。その上で式(7)を計算しないと、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合に安定した動作を保証するステップサイズパラメータ μ の値を正確に決定できなくなる。従って、模擬音響伝達特性6の特性を決定直後にステップサイズパラメータ μ の値を決定するものとする。

20

【0037】

では、模擬音響伝達特性6の特性を決定する方法について、図12を用いて具体的に説明する。図12において、基本的な構成は図1に示したものと同様であり、同一の符号を付して説明を省略する。DSP8内の構成をプログラムで図12のように変更することにより、音響伝達特性Cを求める。この方法は、一般的には適応フィルタを用いたシステム同定と言われており、未知の系を適応処理で求めるために広く知られた手法である。能動騒音低減装置は、もともと適応フィルタ2を内蔵しているため、少しのプログラム変更でこの同定動作を行うことができる。過程としては、まず、白色ノイズ信号源10から一般的なスペクトルを有する白色ノイズ信号 w_x を発生させ、電力増幅器3を通じてスピーカ4から放射する。適応フィルタ2には同じく白色ノイズ信号 w_x が入力される。適応フィルタ2でフィルタリング演算した出力 w_y とマイクロフォン5からの出力信号である w_d が等しくなるように、即ち誤差 $w_e = w_d - w_y$ が最小になるようにLMSアルゴリズム演算部7が適応フィルタ2のフィルタ係数 $w(k)$ を更新する。その更新式は、式(6)と同様に、

30

40

【0038】

【数10】

$$w(n+1) = w(n) + \mu w_e(n) w_x(n) \quad \dots (9)$$

【0039】

である。ただし、符号が異なることに注意が必要である。ここで、 μ はステップサイズパラメータであり、同定の際の値としては非常に小さな値(例えば、0.0001など)が採られる。これは、時間を要しても正確に同定を行わせるためである。また、式(6)では濾波参照信号のベクトルであった箇所が、白色ノイズ信号のベクトルになっていること

50

は容易に理解される。このようにして模擬音響伝達特性 6 の特性を求めた直後に、決定部 9 が前記実施の形態 1 の手順に従って、ステップサイズパラメータ μ を決定することで、より実際の状況に即した正確な設計を行うことができる。

【 0 0 4 0 】

以上のように、本実施の形態 2 に示す能動騒音低減装置は、模擬音響伝達特性 6 の特性を決定直後にステップサイズパラメータ μ の値を決定することで、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合に安定した動作を保證するステップサイズパラメータ μ の値をより正確に求めることができるという効果を奏する。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 4 1 】

本発明にかかる能動騒音低減装置は、適応フィルタのフィルタ係数が発散状態に至るまでの利得余裕と位相余裕をともし把握して数式に基づいて論理的にステップサイズパラメータの値を決定することで、音響伝達特性が初期状態から所定値変動した場合でも安定した動作を保證することが可能になるので、使用される場所の環境変化が比較的大きく、それに伴い音場特性が変化する自動車室内などの騒音を制御対象とする場合に有用である。

【 符号の説明 】

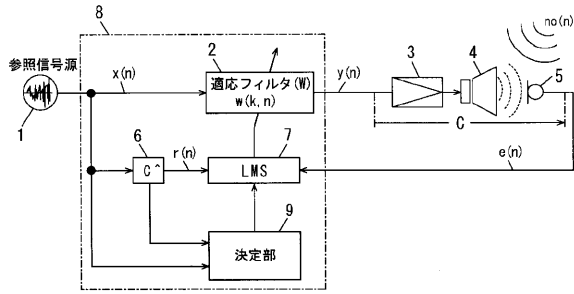
【 0 0 4 2 】

- 1 参照信号源
- 2 適応フィルタ
- 3 電力増幅器 (2 次騒音発生手段)
- 4 スピーカ (2 次騒音発生手段)
- 5 マイクロフォン
- 6 模擬音響伝達特性
- 7 L M S アルゴリズム演算部
- 8 D S P
- 9 決定部
- 1 0 白色ノイズ信号源

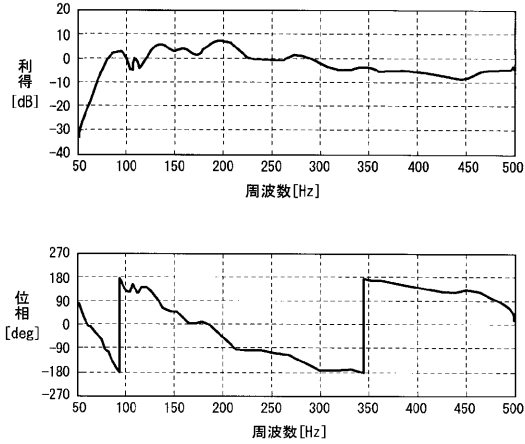
10

20

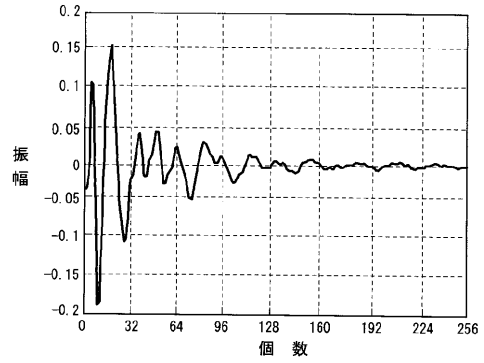
【図1】



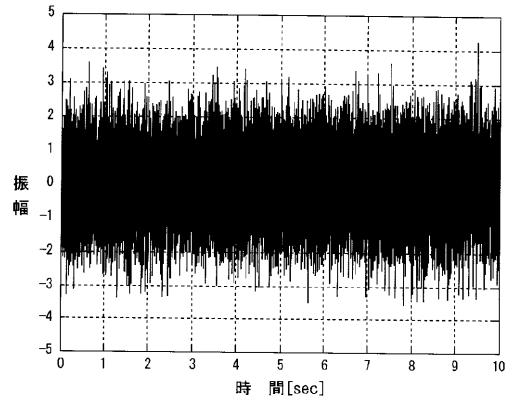
【図2】



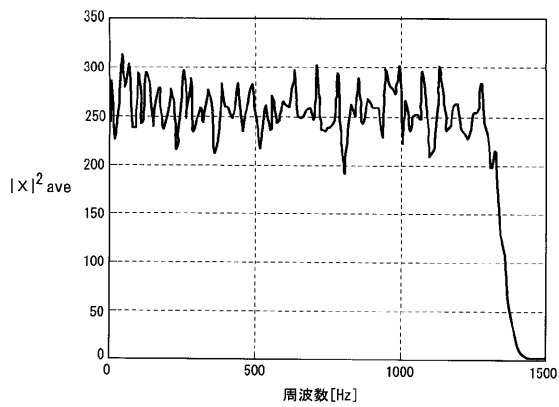
【図3】



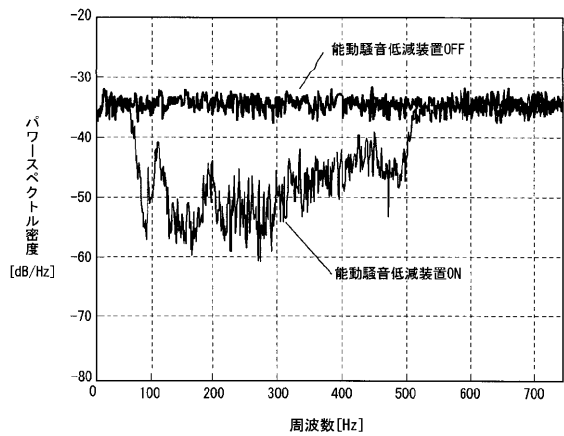
【図4】



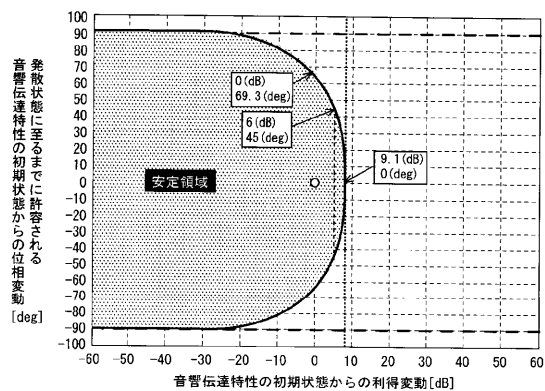
【図5】



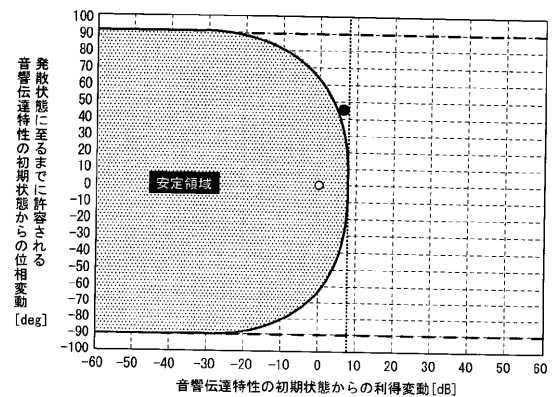
【図7】



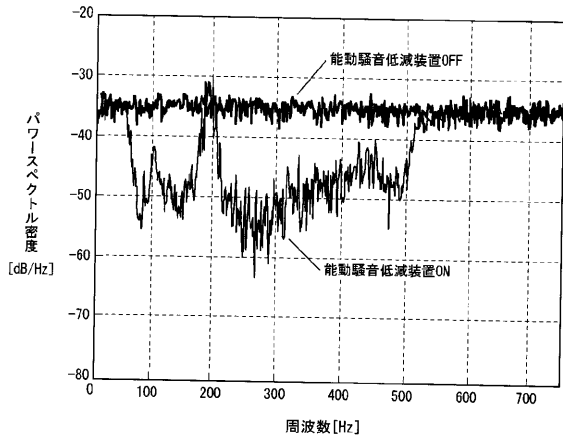
【図6】



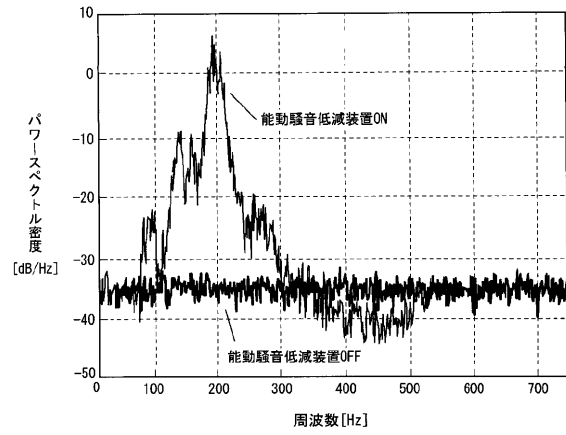
【図8】



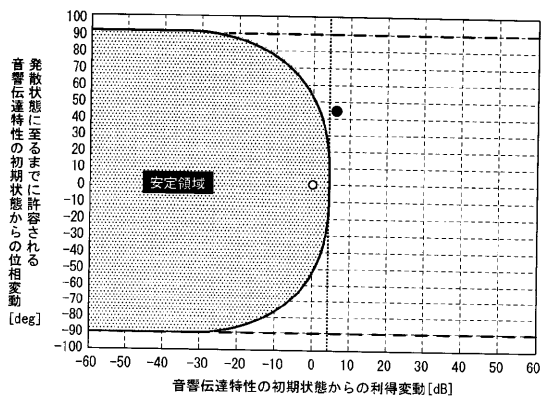
【 図 9 】



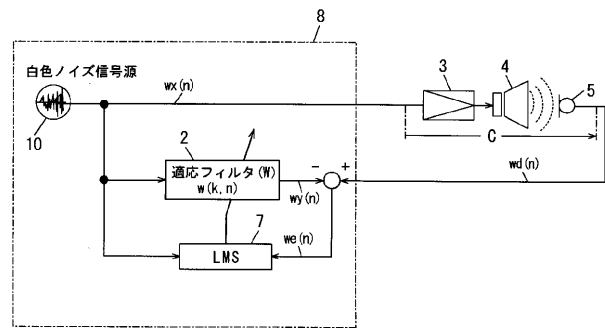
【 図 1 1 】



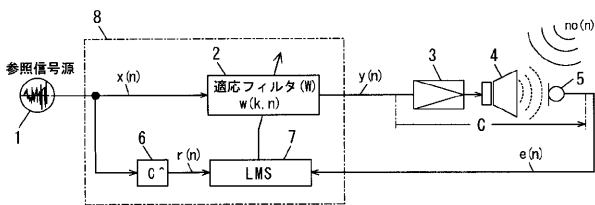
【 図 1 0 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



フロントページの続き

- (72)発明者 小手川 和久
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 パナソニックエレクトロニックデバイス株式会社内
- (72)発明者 今野 文靖
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 パナソニックエレクトロニックデバイス株式会社内
- (72)発明者 平賀 悠介
大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 パナソニックエレクトロニックデバイス株式会社内
- Fターム(参考) 5D061 FF02