

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 852 793 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
28.11.2001 Bulletin 2001/48

(21) Numéro de dépôt: **96932664.4**

(22) Date de dépôt: **27.09.1996**

(51) Int Cl.7: **G10K 11/178**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR96/01512

(87) Numéro de publication internationale:
WO 97/12359 (03.04.1997 Gazette 1997/15)

(54) **PROCEDE ET DISPOSITIF D'ATTENUATION ACTIVE HYBRIDE DE VIBRATIONS, NOTAMMENT DE VIBRATIONS MECANQUES, SONORES OU ANALOGUES**

VERFAHREN UND VORRICHTUNG FÜR AKTIVE HYBRIDE SCHWINGUNGSDÄMPFUNG,
INSBESONDERE VON MECHANISCHEN, SCHALL- UND DERGLEICHEN SCHWINGUNGEN

HYBRID ACTIVE VIBRATION CONTROL METHOD AND DEVICE, PARTICULARLY FOR
MECHANICAL AND ACOUSTIC VIBRATION AND THE LIKE

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC
NL PT SE**

(30) Priorité: **27.09.1995 FR 9511327**

(43) Date de publication de la demande:
15.07.1998 Bulletin 1998/29

(73) Titulaire: **TECHNOFIRST
13670 Aubagne (FR)**

(72) Inventeurs:
• **CARME, Christian
F-13008 Marseille (FR)**
• **PREUMONT, André
B-1450 Chastre (BE)**

(74) Mandataire: **Bratel, Gérard et al
Cabinet GERMAIN & MAUREAU,
12, rue Boileau,
BP 6153
69466 Lyon Cedex 06 (FR)**

(56) Documents cités:
**EP-A- 0 385 713 EP-A- 0 612 058
EP-A- 0 622 779 WO-A-87/05430
WO-A-94/17512 WO-A-95/20841**

- **JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA**, vol. 94, no. 4, 1 Octobre 1993, pages 2181-2193, XP000412914 SNYDER S D ET AL: "ON FEEDFORWARD ACTIVE CONTROL OF SOUND AND VIBRATION USING VIBRATION ERROR SIGNALS"
- **ACUSTICA**, vol. 66, no. 5, Octobre 1988, STUTTGART, pages 233-246, XP000574129 CHR. CARME: "Absorption acoustique active dans les cavités auditives"
- **ICASSP 90**, vol. 3, 3 - 6 Avril 1990, ALBUQUERQUE, NEW MEXICO, USA, pages 1788-1790, XP000461056 WEEKS ET AL.: "A real-time, multichannel system with parallel digital signal processors"

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen, toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 0 852 793 B1

Description

[0001] La présente invention concerne l'atténuation active de vibrations, c'est-à-dire l'opération qui consiste à atténuer certaines vibrations, en superposant d'autres vibrations créées en opposition de phase avec les vibrations à atténuer.

[0002] Elle s'applique à l'atténuation active de toutes vibrations et plus particulièrement aux vibrations sonores, mécaniques ou analogues.

[0003] On connaît déjà la technique d'atténuation active par rétroaction, appelée encore "FEED BACK", et qui est fondée sur une boucle de contre-réaction agencée pour engendrer une atténuation active sur une ossature sujette aux vibrations (FR 86 03394).

[0004] La boucle de contre-réaction comprend une entrée reliée à des moyens capteurs de vibrations dits "proches", disposés sur l'ossature, et une sortie reliée à des moyens actionneurs de vibrations disposés sur l'ossature, à proximité des moyens capteurs proches. Le signal mesuré par les moyens capteurs proches est directement injecté aux moyens actionneurs à travers des moyens de filtrage qui corrigent ledit signal pour tenter d'annuler son énergie.

[0005] Cette technique rétroactive permet d'obtenir une atténuation vibratoire avec un certain gain, sans engendrer d'instabilité dans une bande de fréquences de traitement. Le plus souvent, cette bande de traitement correspond à des basses fréquences, par exemple en vibrations sonores à la bande de fréquences allant de 0 à 600 Hz.

[0006] Toutefois, cette technique rétroactive engendre des instabilités en hautes fréquences. Elle n'est donc pas totalement satisfaisante pour obtenir une atténuation vibratoire dans une large bande de fréquences.

[0007] On connaît aussi la technique d'atténuation active par anticipation, appelée encore "FEED FORWARD", dans laquelle des vibrations de référence, en amont de la propagation des vibrations, et destinées à se propager dans le milieu à traiter sont détectées par des moyens capteurs dits "distants", puis traitées par des moyens de filtrage afin de déterminer la commande à appliquer aux moyens actionneurs.

[0008] La technique par anticipation est articulée autour de moyens de filtrage de type adaptatif dont les coefficients sont adaptés en temps réel selon un algorithme choisi de façon à minimiser l'énergie des vibrations captées par les moyens capteurs proches en fonction de l'énergie des vibrations de référence captées par les moyens capteurs distants.

[0009] Une telle technique par anticipation est satisfaisante généralement pour traiter des vibrations dans une bande de fréquences étroite. Par contre, lorsqu'il s'agit d'atténuer des vibrations dans une large bande de fréquences, elle nécessite généralement un filtrage adaptatif long et coûteux.

[0010] Une solution pour écourter le temps de con-

vergence de l'algorithme de filtrage par anticipation est décrite dans le document MIYASAKI et al, 1994, "Consideration about Feed back, Feed forward, Hybrid Control for Active Control of Micro-Vibration", Second International Conference on Motion on Vibration Control, Yokohama, Aug.30-sept. 3, 1994. Elle consiste à juxtaposer un amortissement actif de type rétroactif et le filtrage par anticipation. L'amortissement actif par rétroaction effectue d'abord un amortissement des vibrations à une fréquence donnée, généralement la fréquence fondamentale de vibration de l'ossature. Ensuite, le filtrage par anticipation effectue son atténuation sur des vibrations ainsi pré-amorties, ce qui permet de comprimer la réponse impulsionnelle des chemins secondaires moyens actionneurs/moyens capteurs proches et écourte ainsi le traitement du filtrage par anticipation.

[0011] Cependant, l'amortissement actif par rétroaction est ici effectué sur une seule fréquence, ce qui rend cette solution inappropriée et inefficace pour un traitement actif sur une large bande de fréquences. Cet amortissement actif est en fait équivalent à un amortissement passif puisqu'il ne traite que la fréquence fondamentale de l'ossature, ce qui est totalement différent d'un contrôle actif large bande par filtrage rétroactif. De plus, il s'agit ici d'une simple juxtaposition du filtrage par anticipation et d'un amortissement actif dans laquelle aucune synergie des techniques est mise en place.

[0012] On connaît aussi des structures d'atténuation active du bruit (WO95/20841) dans lesquelles les moyens de filtrage par anticipation et les moyens de filtrage par rétroaction sont simplement juxtaposés en série pour atténuer le bruit. De plus, les moyens de filtrage par anticipation et les moyens de filtrage par rétroaction sont tous les deux de type adaptatif, ce qui empêche une réelle synergie entre lesdits moyens de filtrage par anticipation et par rétroaction.

[0013] La présente invention apporte une solution à ces problèmes.

[0014] Elle vise tout d'abord à fournir une atténuation active des vibrations dans une large bande de fréquences.

[0015] Un autre but de l'invention est de fournir une atténuation active de type "hybride" dans laquelle le filtrage par anticipation est greffé sur le filtrage par rétroaction ou réciproquement, afin d'améliorer le comportement respectif desdits filtres par anticipation et par rétroaction avec une atténuation résultante supérieure à la somme algébrique des atténuations desdits filtres prises séparément.

[0016] La présente invention porte sur un dispositif d'atténuation active de vibrations, du type comprenant:

- une ossature susceptible d'être sujette à des vibrations à atténuer;
- des premiers moyens capteurs de vibrations, disposés sur l'ossature selon une première relation géométrique prédéterminée par rapport à ladite os-

sature;

- des moyens actionneurs de vibrations, disposés sur l'ossature à proximité des premiers moyens capteurs; et
- des moyens de filtrage comprenant au moins une entrée reliée aux premiers moyens capteurs et une sortie reliée aux moyens actionneurs, les moyens de filtrage étant agencés pour engendrer une atténuation active des vibrations sur l'ossature,
- des seconds moyens capteurs de vibrations, disposés sur l'ossature selon une seconde relation géométrique prédéterminée par rapport à ladite ossature;
- des moyens sommateurs possédant une première entrée, une seconde entrée, et une sortie reliée aux moyens actionneurs.

[0017] Selon une définition générale de l'invention, les moyens de filtrage comprennent:

- des moyens de filtrage par rétroaction de type non adaptatif possédant une entrée reliée aux premiers moyens capteurs et une sortie reliée à la première entrée des moyens sommateurs, et propres à engendrer une atténuation active non adaptative des vibrations sur l'ossature, sans engendrer d'instabilité dans une première bande de fréquences;
- des moyens de mesure propres à mesurer, au préalable, en présence des moyens de filtrage par rétroaction, la fonction de transfert entre les moyens actionneurs et les premiers moyens capteurs;
- des moyens de filtrage par anticipation de type adaptatif comprenant une première entrée reliée aux seconds moyens capteurs, une seconde entrée reliée aux premiers moyens capteurs, et une sortie reliée à la seconde entrée des moyens sommateurs;

les coefficients de filtrage des moyens de filtrage par anticipation étant adaptés en temps réel selon un algorithme choisi pour minimiser l'énergie des vibrations captées par les premiers moyens capteurs en fonction de l'énergie des vibrations captées par les seconds moyens capteurs, et de la fonction de transfert préalablement mesurée;

ce qui permet de linéariser l'atténuation rétroactive dans toute une seconde bande de fréquences plus large que la première bande de fréquences, d'accélérer la convergence de l'algorithme de minimisation, et d'améliorer la robustesse des moyens de filtrage par anticipation.

[0018] Selon un premier mode de réalisation de l'invention, l'ossature comprend au moins une cavité déli-

mitée par une oreille et des moyens d'atténuation passifs, les premiers moyens capteurs et les moyens actionneurs étant logés dans ladite cavité tandis que les seconds moyens capteurs étant disposés hors de la cavité.

[0019] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, l'ossature comprend une poutre de type métallique, une plaque, un treillis, un siège, une gaine de ventilation ou analogue.

[0020] En pratique, les premiers et seconds moyens capteurs comprennent chacun au moins: un élément capteur de sons de type microphone, un élément capteur d'accélération de type accéléromètre, un élément capteur de déplacement, un élément capteur de vitesse, un élément capteur de contrainte, un élément capteur de force ou analogue.

[0021] Dans une variante, les premiers moyens capteurs comprennent deux éléments capteurs, l'un étant associé aux moyens de filtrage par anticipation, l'autre étant associé aux moyens de filtrage par rétroaction.

[0022] De préférence, les moyens actionneurs comprennent une source de sons de type haut-parleur, un corps d'épreuve, un pot vibrant ou analogue.

[0023] Avantagusement, les moyens de filtrage par rétroaction comprennent une pluralité de filtres analogiques et/ou numériques actifs d'ordre supérieur ou égal à 1, agencés pour engendrer une fonction de transfert permettant d'éviter des instabilités dans la première bande de fréquences au sens de Nyquist, et la fonction de transfert des moyens de filtrage par rétroaction est déterminée de telle sorte que la phase de ladite fonction de transfert ne passe pas par la valeur 0 dans la première bande de fréquences.

[0024] En pratique, les moyens de filtrage par rétroaction sont de type à réponse impulsionnelle infinie.

[0025] Par exemple, les moyens de filtrage par anticipation sont à réponse impulsionnelle finie, et l'algorithme de minimisation est du type des moindres carrés moyens.

[0026] Selon un autre aspect de l'invention, le dispositif comprend une pluralité de premiers moyens capteurs, et de moyens actionneurs et le dispositif est articulé autour d'une structure à multiprocesseurs maître/esclaves, chaque processeur esclave étant chargé de piloter un seul moyen actionneur.

[0027] La présente invention a également pour objet un procédé d'atténuation active hybride des vibrations, notamment des vibrations mécaniques, sonores ou analogues, mis en oeuvre par le dispositif décrit ci-avant.

[0028] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lumière de la description détaillée ci-après et des dessins annexés dans lesquels:

- la figure 1 est une représentation schématique du dispositif d'atténuation acoustique active selon l'invention;

- la figure 2 représente schématiquement les moyens essentiels et constitutifs du dispositif de la figure 1 selon l'invention;
- la figure 3 sont des courbes illustrant l'atténuation des vibrations sonores en présence/absence de moyens de filtrage par rétroaction, dans une bande de fréquences allant de 0 à 2500 Hz;
- les figures 4 et 5 sont des courbes illustrant l'atténuation des vibrations sonores en présence/absence de moyens de filtrage hybride selon l'invention, dans une bande de fréquences allant de 0 à 2500 Hz;
- les figures 6 et 7 sont des courbes illustrant l'atténuation des vibrations sonores en présence/absence de moyens de filtrage hybride selon l'invention, dans une bande de fréquences allant de 500 Hz à 1500 Hz;
- la figure 8 est une courbe illustrant l'atténuation des vibrations sonores en présence/absence des moyens de filtrage hybride selon l'invention, dans une bande de fréquences allant de 0 à 500 Hz;
- les figures 9, 10A et 10B sont des courbes illustrant l'atténuation des vibrations sonores en présence/absence des filtrage par anticipation;
- la figure 11 représente schématiquement la structure du dispositif d'atténuation multi-voies selon l'invention, dans lequel les filtrages par anticipation et par rétroaction sont numériques;
- la figure 12 représente schématiquement les éléments constitutifs du processeur esclave du dispositif de la figure 11;
- la figure 13 représente schématiquement la structure du dispositif d'atténuation multi-voies selon l'invention, dans lequel le filtrage par rétroaction est analogique; et
- la figure 14 représente schématiquement l'assemblage du filtrage par rétroaction analogique dans le dispositif de la figure 13.

[0029] Sur la figure 1, on a représenté une application particulièrement avantageuse, non limitative, de l'invention, à savoir l'atténuation des vibrations sonores. Dans cette application, l'ossature susceptible d'être sujette à des vibrations à atténuer comprend une cavité 2 délimitée par une oreille 4 et des moyens d'atténuation 6 de type casque 6.

[0030] Par exemple, le casque à filtre rétroactif est celui vendu par la société TECHNOFIRST.

[0031] De façon connue, ce casque est équipé d'un

dispositif d'atténuation acoustique active par rétroaction.

[0032] En pratique, ce dispositif d'atténuation par rétroaction comprend pour chaque oreille:

- un microphone 8 disposé dans la cavité 2;
- un haut-parleur 10 disposé dans la cavité 2 à proximité du microphone 8;
- des moyens de pré-amplification 9 comprenant une entrée 7 reliée au microphone 8 et une sortie 11,
- des moyens de filtrage par rétroaction 12 comprenant une entrée 14 reliée à la sortie 11, et une sortie 16; et
- des moyens d'amplification 18 comprenant une entrée 20 reliée à la sortie 16, et une sortie 22 reliée à l'entrée du haut-parleur 10.

[0033] Les moyens de pré-amplification 9, les moyens de filtrage par rétroaction 12 et les moyens d'amplification 18 constituent ici une boucle de contre-réaction 30 agencée de façon connue pour engendrer une atténuation acoustique active sans engendrer d'instabilité dans une bande de fréquences choisies.

[0034] Sur la figure 1, on a représenté à proximité du casque, une source de bruit 40 susceptible d'engendrer des vibrations sonores à des fins expérimentales et de test.

[0035] Par exemple, la bande de fréquences dans laquelle les moyens de filtrage par rétroaction sont efficaces sans engendrer d'instabilité au sens de Nyquist, est de l'ordre de 0 à 600 Hz pour des vibrations sonores (figure 3).

[0036] En pratique, les moyens de filtrage par rétroaction 12 comprennent une pluralité de filtres analogiques actifs d'ordre supérieur ou égal à 1, agencés pour engendrer une fonction de transfert permettant d'éviter des instabilités dans la bande de fréquence 0-600 Hz au sens de Nyquist, et la fonction de transfert des moyens de filtrage 12 est déterminée de telle sorte que la phase de ladite fonction de transfert ne passe pas par la valeur 0 dans la bande 0-600 Hz.

[0037] Un tel filtrage par rétroaction est par exemple décrit dans le Brevet français 86 03394.

[0038] En référence à la figure 3, le casque permet un traitement large bande jusqu'à 600 Hz et des atténuations de bruit de l'ordre de 20 dB. Cependant, un effet de pompage apparaît à partir de 650 Hz qui se traduit par une augmentation du niveau de bruit par rapport à l'action des moyens d'atténuation passive seule. Ce phénomène est tout à fait connu de l'homme du métier, et constitue une non-linéarité (dégradations des performances) par rapport aux résultats attendus de l'observation du système en boucle ouverte.

[0039] Le Demandeur s'est posé le problème de re-

médier aux inconvénients liés au filtrage par rétroaction.

[0040] La solution selon l'invention consiste tout d'abord, à utiliser un microphone supplémentaire 100 disposé à une certaine distance du microphone 8. Par exemple, le microphone supplémentaire 100 est disposé sur la partie supérieure des moyens qui permettent de rattacher les deux coquilles du casque. Dans ces conditions, le microphone supplémentaire 100 est proche de la source de bruit 40 et permet ainsi de récupérer une information utile à traiter. Bien évidemment, ce microphone distant peut être disposé différemment.

[0041] Ensuite, selon l'invention, des moyens sommateurs 110 sont prévus au niveau de la boucle de contre-réaction 30. Ces moyens sommateurs 110 possèdent une première entrée 112 reliée à la sortie 16 des moyens de filtrage 12, une seconde entrée 114 et une sortie 116 reliée à l'entrée 20 des moyens amplificateurs 18.

[0042] Enfin, selon l'invention, des moyens de filtrage de type par anticipation sont greffés à la boucle de contre-réaction 30 afin d'améliorer le filtrage par rétroaction et, plus exactement, afin de linéariser l'atténuation active dans la totalité d'une bande de fréquences plus large que la bande 0-600 Hz et d'améliorer ainsi le gain d'atténuation active dans la bande élargie qui peut aller jusqu'à 3000 Hz (figure 4), par suppression totale de l'effet de pompage mentionné ci-avant.

[0043] En pratique, les moyens de filtrage par anticipation 130 comprennent une première entrée 132 reliée au microphone supplémentaire 100, une seconde entrée 134 reliée au microphone 8 et une sortie 136 reliée à la seconde entrée 114 des moyens sommateurs 110.

[0044] Comme on le verra plus en détail ci-après, les coefficients de filtrage des moyens de filtrage par anticipation 130 sont adaptés en temps réel selon un algorithme choisi pour minimiser l'énergie des vibrations captées par le microphone 8, en fonction de l'énergie des vibrations captées par le microphone 100, afin de linéariser l'atténuation rétroactive dans toute une bande de fréquences plus large que la bande de fréquences traitée directement par rétroaction, d'accélérer la convergence de l'algorithme de minimisation, et d'améliorer la robustesse des moyens de filtrage par anticipation.

[0045] En pratique, les moyens de filtrage par anticipation comprennent des filtres à réponse impulsionnelle finie de type adaptatif 140. Les coefficients des filtres 140 sont réactualisés en temps réel par un algorithme de minimisation 150. Par exemple, l'algorithme de minimisation est du type des moindres carrés moyens, appelés encore LMS pour "LEAST MEAN SQUARES".

[0046] Cette linéarisation est observable au moins en deux points, notamment au niveau de la bande 0-600 Hz dans laquelle le gain d'atténuation dans la bande est amélioré; ainsi qu'au niveau de la bande 600-1100 Hz dans laquelle la réapparition des vibrations liées au pompage du filtrage rétroactif est supprimée et dans laquelle une atténuation apparaît alors que celle-ci n'existe pas en présence d'un filtrage par rétroaction seul (fi-

gures 3 à 8).

[0047] Cette accélération de la convergence de l'algorithme de minimisation ainsi que l'amélioration de la robustesse des moyens de filtrage par anticipation est observable en comparant les courbes d'atténuation obtenues par les moyens de filtrage par anticipation seuls (figures 9, 10A et 10B) par rapport aux courbes d'atténuation obtenues par les moyens de filtrage hybride selon l'invention (figures 4 à 8).

[0048] Il est à remarquer que l'atténuation active de type "hybride" obtenue selon l'invention résulte d'une combinaison des moyens de filtrage par anticipation et par rétroaction dans laquelle le filtrage par anticipation est greffé sur le filtrage par rétroaction ou réciproquement.

[0049] Cette combinaison des filtrages par anticipation et par rétroaction selon l'invention permet d'améliorer le comportement respectif desdits filtres, avec une atténuation active résultante supérieure à la somme algébrique des atténuations individuelles desdits filtres prises séparément.

[0050] Sur la figure 2, on a représenté en détail les éléments constitutifs des moyens de filtrage par rétroaction ainsi que les éléments constitutifs des moyens de filtrage par anticipation, ces derniers étant combinés avec les moyens de filtrage par rétroaction selon l'invention.

[0051] Les moyens de filtrage par anticipation 130 comprennent un premier module d'acquisition A8 associé aux moyens capteurs proches 8 et un second module d'acquisition A100 associé aux moyens capteurs distants 100.

[0052] Les modules d'acquisition A8 et A100 sont généralement semblables. Toutefois, dans certaines configurations, les modules d'acquisitions peuvent être différents. Leurs éléments constitutifs sont individualisés par le suffixe 8 lorsqu'ils sont associés aux moyens capteurs 8 et 100 lorsqu'ils sont associés aux moyens de capture distants 100.

[0053] Chaque module d'acquisition comprend:

- un élément pré-amplificateur d'entrée PE possédant une entrée reliée aux moyens capteurs 8 ou 100 associés et une sortie;
- un filtre de conditionnement FAT spécifique à l'application choisie, de préférence de type anti-recouvrement possédant une entrée reliée à la sortie du pré-amplificateur d'entrée et une sortie; et
- un convertisseur analogique/numérique CAN possédant une entrée reliée à la sortie du filtre de conditionnement et une sortie.

[0054] Chaque module d'acquisition est relié à des moyens de traitement DSP qui vont assurer notamment l'algorithme de minimisation décrite ci-avant.

[0055] En pratique, les moyens de traitement numé-

rique sont de type processeur à signal numérique PSN.

[0056] Le processeur DSP comprend une entrée E8 recevant les signaux sortant du module d'acquisition A8 et une entrée E100 recevant les signaux sortant du module d'acquisition A100.

[0057] Le processeur DSP comprend une sortie délivrant un signal numérique destiné à un module de restitution R.

[0058] Ce module de restitution R comprend un convertisseur numérique/analogique CNAR et un filtre de lissage FLR, par exemple de type passe-bas, dont l'entrée reçoit le signal sortant du convertisseur numérique/analogique CNAR et dont la sortie est reliée à la seconde entrée 114 des moyens sommateurs 110.

[0059] Par exemple, le processeur DSP est celui vendu par la société TEXAS INSTRUMENT sous la référence TMS 320C25.

[0060] Le fonctionnement du dispositif selon l'invention est le suivant.

[0061] Dans une première étape d'initialisation, les moyens de filtrage par rétroaction 12 sont mis en fonctionnement, ainsi que la source de bruit 40, tandis que les moyens de filtrage par anticipation sont mis en position pause.

[0062] On règle sur les moyens de filtrage par anticipation les préamplificateurs d'entrée PE8 et PE100, pour être en pleine échelle des convertisseurs analogiques/numériques CAN8 et CAN100.

[0063] Ensuite, on arrête la source de bruit 40. On mesure alors la fonction de transfert du chemin dit secondaire entre le haut-parleur 10 et le microphone dit de contrôle 8 par une méthode d'initialisation, par exemple en excitant les moyens actionneurs par des signaux de type Diracs, bruit blanc, de référence filtrée ou analogue.

[0064] Enfin, la fonction de transfert est échantillonnée et sauvegardée dans la mémoire du processeur DSP. Par exemple, la fonction de transfert est échantillonnée à la fréquence de 3000 Hz sur un nombre de 80 points. Avantageusement, on règle le gain de l'amplificateur 18 afin que l'excitation du haut-parleur 10 produise à la sortie du pré-amplificateur PE8, un niveau de signal proche de celui réglé lors de l'étape précédente relative au réglage dynamique des convertisseurs.

[0065] Cette fonction de transfert ainsi préalablement mesurée va servir ensuite dans la phase de calibration pour l'adaptation des éléments de filtrage par anticipation.

[0066] En condition de fonctionnement, c'est-à-dire pendant la phase de minimisation du dispositif de contrôle hybride (c'est-à-dire combinaison feedforward avec feedback ou réciproquement), les moyens de traitement numérique acquièrent périodiquement, et en temps réel, le bruit distant capté par les moyens capteurs distants 100. Ils calculent également l'énergie du signal, représentative de la somme des énergies des signaux délivrés par les moyens capteurs proches 8. Ensuite, les moyens de filtrage par anticipation 150 sont

placés en recherche des paramètres optimaux pour la meilleure atténuation active. La connaissance des réponses impulsionnelles préalablement mesurées, des signaux issus des moyens capteurs proches et distants en temps réel, permet à un algorithme de minimisation choisi de déterminer, en temps réel, les valeurs du signal de commande d'atténuation acoustique active.

[0067] Le but de la convergence est ici de minimiser l'énergie des signaux délivrés par le microphone 8 disposé dans la cavité à débruiter du casque.

[0068] Par exemple, l'algorithme de minimisation utilise la technique des moindres carrés moyens qui est le plus répandu dans le domaine des applications en temps réel.

[0069] En variante, l'algorithme de minimisation peut être un algorithme fréquentiel travaillant sur les transformés de Fourier des signaux considérés.

[0070] Il est à remarquer que la réponse impulsionnelle ou la fonction de transfert des chemins haut-parleur/microphone de contrôle 8 tient compte ici du filtrage par rétroaction.

[0071] Ainsi, les informations d'instabilité liées au filtrage par rétroaction sont introduites dans la réponse impulsionnelle du filtre par anticipation. De même, les informations d'atténuation active large bande liées au filtrage par rétroaction apparaissent dans les éléments échantillonnés de la réponse impulsionnelle.

[0072] Grâce à la participation de ces informations liées donc à l'instabilité du filtrage par rétroaction ainsi que les informations liées à l'atténuation active large bande de ce filtrage, le filtrage par anticipation va apporter plusieurs types d'améliorations en référence aux figures 3 à 10B :

- annulation des amplifications de signaux en haute fréquences liées aux instabilités par rétroaction;
- atténuation du bruit en dehors de la bande de traitement du filtrage par rétroaction (gain jusqu'à 10 dB par rapport au traitement passif des coquilles dans le cas du casque);
- amélioration du traitement dans la totalité de la bande de traitement de filtrage par rétroaction (gain jusqu'à 15 dB par rapport au filtrage par rétroaction seul), ce qui permet de le rendre encore plus linéaire;
- amélioration de la robustesse du système, par exemple aux effets Larsen;
- amélioration des performances par rapport à des filtrages par rétroaction et des filtrages par anticipation utilisés séparément.
- accélération de la convergence de l'algorithme de minimisation,

- amélioration de la robustesse des moyens de filtrage par anticipation (observable en comparant les courbes d'atténuation obtenues par les moyens de filtrage par anticipation seuls (figures 9, 10A et 10B) par rapport aux courbes d'atténuation obtenues par les moyens de filtrage hybride selon l'invention (figures 4 à 8).

[0073] Il est à remarquer que l'action du filtrage par anticipation ne perturbe pas celle du filtrage par rétroaction dans le sens où l'on peut arrêter la minimisation en cours du filtrage par anticipation sans altérer les performances du filtrage par rétroaction.

[0074] Sur les figures 3 à 10B, on a représenté les densités spectrales de puissance mesurées à l'aide d'un microphone fixé dans l'oreille de l'expérimentateur dans différentes configurations. Les effets indésirables dus à l'instabilité du filtrage par rétroaction (réjection jusqu'à 8 dB) sont éliminés par l'action du dispositif de filtrage par anticipation (voir figures 3, 4 et 5).

[0075] Mieux encore, le dispositif par anticipation permet d'obtenir, en dehors de la bande de traitement du feed back (0-600 Hz), un gain en atténuation de 2 à 10 dB par rapport à un casque passif (figure 6).

[0076] De même, on a mesuré des meilleurs résultats d'anti-bruits en basse fréquences jusqu'à +15 dB.

[0077] Le dispositif décrit en référence aux figures 1 et 2, utilise un traitement de type mono-voie, articulé autour du processeur TMS 320C25 de chez TEXAS INSTRUMENT qui peut exécuter 10 millions d'instructions par seconde.

[0078] Toutefois, il peut être trop lent lorsqu'il doit piloter un dispositif multivoies comprenant une pluralité de capteurs 8, de capteurs distants 100 et d'actionneurs 10.

[0079] Par exemple, pour un fonctionnement du dispositif avec cinq microphones 8, cinq hauts-parleurs 10, 60 points pour les réponses impulsionnelles et 15 coefficients de filtrage par anticipation, le processeur ne peut travailler qu'à des fréquences d'échantillonnage inférieures ou égales à 1000 Hz.

[0080] Or, certaines expérimentations nécessitent un traitement rapide, pour un nombre de microphones 8 dits d'erreurs et de sources de contre-bruits 10 supérieur à cinq.

[0081] De plus, pour garder la pleine efficacité de l'algorithme de minimisation, il peut être nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la réponse impulsionnelle des trajets secondaires. Il faut donc enregistrer en mémoire cette réponse avec un grand nombre de points. Ce nombre de points détermine aussi le nombre d'échantillons du signal de référence issu du capteur distant 100 qu'il faut conserver également en mémoire interne, d'où le problème de la capacité mémoire.

[0082] La présente invention apporte également une solution à ces problèmes.

[0083] Selon l'invention, le dispositif d'atténuation est capable de gérer une pluralité de voies, par exemple

vingt voies d'entrée analogiques susceptibles de recevoir les signaux émanant de 19 capteurs proches individualisés en 8-1 à 8-19 et d'un capteur distant 100. Le dispositif selon l'invention comprend également au moins seize voies de sorties capables de véhiculer des signaux vers seize actionneurs individualisés en 10-1 à 10-16.

[0084] Une telle structure implique le traitement de I (nombre entier de capteur d'erreur 8) fois J (nombre entier d'actionneurs) réponses impulsionnelles, une réponse RIJ pour chaque combinaison d'actionneurs J et de capteurs d'erreurs I.

[0085] Très avantageusement, le dispositif est articulé autour d'une structure à multiprocesseurs maître/esclaves, chaque processeur esclave étant chargé de piloter un seul moyen actionneur.

[0086] En référence à la figure 11, le processeur maître DSPM fait l'acquisition de tous les signaux émanant des capteurs 8 et 100, notamment les signaux de référence dits distants ainsi que les signaux de contrôle dits d'erreur. Il les distribue ensuite à tous les processeurs esclaves DSPE, individualisés ici en DSPE-1 à DSPE-16.

[0087] Chaque processeur esclave DSPE calcule le signal de sortie d'un seul actionneur 10.

[0088] En pratique, les capteurs 8 et le capteur distant 100 sont reliés aux entrées d'un bloc d'acquisition BA dont la sortie est reliée au processeur maître DSPM.

[0089] Ce bloc d'acquisition BA comprend, comme les modules d'acquisition A décrits en référence à la figure 2, un élément pré-amplificateur PE, un filtre de conditionnement de préférence spécifique à l'application choisie FAT et un convertisseur analogique/numérique CAN.

[0090] Le filtre de conditionnement peut être numérique (anti-recouvrement) ou bien analogique (spécifique).

[0091] Un micro-ordinateur de type PC portable peut être prévu. Il est dans ce cas relié au processeur maître et est muni de tous les logiciels de pilotage de l'ensemble de l'installation.

[0092] L'ensemble numérique est articulé autour d'un élément processeur de signal numérique PSN, par exemple celui vendu par la société TEXAS INSTRUMENT sous la référence TMS 320C50.

[0093] En référence à la figure 12, Chaque processeur esclave est dédié à la commande d'un seul actionneur. Par exemple, il s'agit du processeur associé à l'actionneur 10-1 et qui est en relation avec tous les microphones 8 ainsi qu'avec le microphone distant 100.

[0094] Tous les signaux des capteurs 8 et 100 sont acheminés via le bloc d'acquisition BA et le processeur maître DSPM vers le processeur esclave DSPE-1.

[0095] Le processeur esclave DSPE comprend généralement les mêmes éléments que ceux du dispositif monovoie décrit en référence à la figure 2. Ainsi, on retrouve les moyens de restitution R, les moyens de filtrage par rétroaction 12 ainsi que le filtrage par anticipation

130. Un élément sommateur 110 reçoit sur ses deux entrées les signaux émanant des deux filtrages pour délivrer sur sa sortie le signal d'atténuation vers l'actionneur 10-1.

[0096] Le processeur esclave comprend une communication avec le processeur maître DSPM. 5

[0097] Dans le cas d'un filtrage par rétroaction de type analogique (figure 14), des modifications sont apportées au niveau du bloc de restitution. Un sommateur individuel 100-1, c'est-à-dire associé au processeur esclave DSPE-1, permet d'ajouter le signal analogique issu du filtrage par rétroaction 12-1 au signal analogique issu du filtrage spécifique FLR-1. 10

[0098] Il est à remarquer que le filtrage par rétroaction n'a de sens que pour un couple de transducteurs comprenant un actionneur et un capteur de sons. Dans ces conditions, le nombre de filtrages par rétroaction numériques ou analogiques est égal à: 15

- soit au nombre de capteurs 8, lorsque ce nombre est égal au nombre d'actionneurs 10, 20
- soit au nombre d'actionneurs 10, si ce nombre est inférieur au nombre de capteurs 8, 25
- soit au nombre de capteurs 8, si celui-ci est inférieur au nombre d'actionneurs 10. 30

[0099] On définit ainsi le nombre maximal de filtrages par rétroaction. 30

[0100] On définit aussi la notion de couples de transducteurs 8 et 10, c'est-à-dire les voies de traitement sur lesquelles sont appliquées les moyens de filtrage par rétroaction respectifs. 35

[0101] Ensuite, chaque processeur esclave DSPE calcule, en parallèle du filtrage par anticipation, le filtrage par rétroaction qui lui est associé, dans le cas d'un filtrage par rétroaction de type numérique. 40

[0102] Dans le cas d'un filtrage par rétroaction de type analogique (figure 12), il est prévu un réseau de connexions dans lequel s'enfichent des modules de filtrage par rétroaction entre les couples de transducteurs 8, 10 choisis. 45

[0103] Dans la description ci-avant, nous avons décrit une application liée aux vibrations sonores. Toutefois, l'invention s'applique à l'atténuation active de toute vibration. 50

[0104] Ainsi, l'ossature sujette à des vibrations peut être aussi une poutre de type métallique, une plaque, un treillis, un siège, une gaine de ventilation ou analogue. Dans ces conditions, les moyens capteurs peuvent être des moyens capteurs de sons, mais aussi d'accélération, de contrainte, de force, de déplacement, de vitesse ou analogue. De même, les moyens actionneurs peuvent être non seulement un actionneur de sons tel qu'un haut-parleur, mais aussi un corps d'épreuve, un élément piézo-électrique, ou analogue. Par ailleurs, les moyens capteurs proches peuvent comprendre deux 55

éléments capteurs, l'un étant associé aux moyens de filtrage par anticipation, l'autre étant associé aux moyens de filtrage par rétroaction.

Revendications

1. Dispositif d'atténuation active de vibrations, du type comprenant:

- une ossature susceptible d'être sujette à des vibrations à atténuer;
- des premiers moyens capteurs de vibrations (8), disposés sur l'ossature selon une première relation géométrique prédéterminée par rapport à ladite ossature;
- des moyens actionneurs de vibrations (10), disposés sur l'ossature à proximité des premiers moyens capteurs (8); et
- des moyens de filtrage comprenant au moins une entrée reliée aux premiers moyens capteurs et une sortie reliée aux moyens actionneurs, les moyens de filtrage étant agencés pour engendrer une atténuation active des vibrations sur l'ossature;
- des seconds moyens capteurs de vibrations (100), distants, disposés sur l'ossature selon une seconde relation géométrique prédéterminée par rapport à ladite ossature;
- des moyens sommateurs (110) possédant une première entrée (112), une seconde entrée (114), et une sortie reliée aux moyens actionneurs (10);

caractérisé en ce que les moyens de filtrage comprennent:

- des moyens de filtrage par rétroaction (12) de type non adaptatif possédant une entrée reliée aux premiers moyens capteurs (8) et une sortie (16) reliée à la première entrée (112) des moyens sommateurs, et propres à engendrer une atténuation active de type non adaptatif des vibrations sur l'ossature, sans engendrer d'instabilité dans une première bande de fréquences;
- des moyens propres à mesurer au préalable, et en présence des moyens de filtrage par rétroaction, la fonction de transfert entre les moyens actionneurs (10) et les premiers moyens capteurs (8);

- des moyens de filtrage par anticipation (130) de type adaptatif comprenant une première entrée (132) reliée aux seconds moyens capteurs (100), une seconde entrée (134) reliée aux premiers moyens capteurs (8), et une sortie reliée à la seconde entrée (114) des moyens sommateurs (110);

les coefficients de filtrage (140) des moyens de filtrage par anticipation (130) étant adaptés en temps réel selon un algorithme choisi pour minimiser l'énergie des vibrations captées par les premiers moyens capteurs (8) en fonction de l'énergie des vibrations captées par les seconds moyens capteurs (100) et de la fonction de transfert ainsi préalablement mesurée, ce qui permet de linéariser l'atténuation rétroactive dans toute une seconde bande de fréquences plus large que la première bande de fréquences, d'accélérer la convergence de l'algorithme de minimisation, et d'améliorer la robustesse des moyens de filtrage par anticipation.

2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'ossature comprend au moins une cavité (2) délimitée par une oreille (4) et des moyens d'atténuation passif (6), les premiers moyens capteurs (8) et les moyens actionneurs (10) étant logés dans ladite cavité (2) tandis que les seconds moyens capteurs (100) étant disposés hors de la cavité.

3. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'ossature comprend une poutre de type métallique, ou une plaque, ou un treillis, ou un siège, ou une gaine de ventilation ou analogue.

4. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les premiers moyens capteurs (8) comprennent au moins: un élément capteur de sons de type microphone, un élément capteur d'accélération de type accéléromètre, un élément capteur de déplacement, un élément capteur de vitesse, un élément capteur de contrainte, un élément capteur de force, ou analogue.

5. Dispositif selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** les premiers moyens capteurs (8) comprennent deux éléments capteurs, l'un étant associé aux moyens de filtrage par anticipation, l'autre étant associé aux moyens de filtrage par rétroaction.

6. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les seconds moyens capteurs (100) comprennent au moins: un élément capteur de sons de type microphone, un élément capteur d'accélération de type accéléromètre, un élément capteur de déplacement, un élément capteur de vitesse, un élément capteur de contrainte, un élément capteur de force, ou analogue.

7. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les moyens actionneurs (10) comprennent une source de sons de type haut-parleur, un corps d'épreuve, un pot vibrant, ou analogue.

8. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les moyens de filtrage par rétroaction (12) comprennent une pluralité de filtres analogiques et/ou numériques actifs d'ordre supérieur ou égal à 1, agencés pour engendrer une fonction de transfert permettant d'éviter des instabilités dans la première bande de fréquences au sens de Nyquist et **en ce que** la fonction de transfert des moyens de filtrage par rétroaction est déterminée de telle sorte que la phase de ladite fonction de transfert ne passe pas par la valeur zéro dans la première bande.

9. Dispositif selon l'une quelconque des précédentes revendications, **caractérisé en ce que** les moyens de filtrage par rétroaction (12) sont à réponse impulsionnelle infinie.

10. Dispositif selon l'une quelconque des précédentes revendications, **caractérisé en ce que** les moyens de filtrage par anticipation (130) comprennent:

- un premier module d'acquisition (A8) possédant une entrée reliée à la sortie des premiers moyens capteurs (8), et une sortie;
- un second module d'acquisition (A100) possédant une entrée reliée à la sortie des seconds moyens capteurs (100), et une sortie;
- des moyens de traitement numérique possédant une première entrée reliée à la sortie du premier module d'acquisition (A8), une seconde entrée reliée à la sortie du second module d'acquisition (A100), et une sortie, lesdits moyens de traitement numérique étant propres à commander l'algorithme - de minimisation de l'énergie des vibrations captées par les premiers moyens capteurs (8) en fonction de l'énergie des vibrations captées par les seconds moyens capteurs (100); et
- un module de restitution (R) possédant une entrée reliée à la sortie des moyens de traitement numérique et une sortie reliée à la seconde entrée (114) des moyens sommateurs.

11. Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** les premier et second modules d'acquisition (A8 et A100) comprennent:

- un élément pré-amplificateur d'entrée (PE)

- possédant une entrée recevant les signaux issus des premiers moyens capteurs (8) ou des seconds moyens capteurs (100), et une sortie;
- un filtre de conditionnement (FAT) adapté à l'application choisie et possédant une entrée reliée à la sortie de l'élément pré-amplificateur d'entrée, et une sortie; et
 - un convertisseur analogique/numérique (CAN) possédant une entrée reliée à la sortie du filtre de conditionnement et une sortie reliée à une entrée des moyens de traitement numérique.
- 12.** Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** le module de restitution (R) comprend:
- un convertisseur numérique/analogique (CNA) possédant une entrée reliée à la sortie des moyens de traitement numérique et une sortie; et
 - un filtre de lissage (FLR) possédant une entrée reliée à la sortie du convertisseur numérique/analogique et une sortie reliée à la seconde entrée (114) des moyens sommateurs (110).
- 13.** Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** les moyens de filtrage par anticipation (130) sont à réponse impulsionnelle finie et **en ce que** l'algorithme de minimisation est du type des moindres carrés moyens.
- 14.** Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** les moyens de traitement numérique sont du type processeur de signal numérique.
- 15.** Dispositif selon l'une quelconque des précédentes revendications, **caractérisé en ce qu'il** comprend une pluralité de premiers moyens capteurs (8-1,8-2,8-3,...), et de moyens actionneurs (10-1,10-2,...) et **en ce que** le dispositif est articulé autour d'une structure à multiprocesseurs maître/esclaves, chaque processeur esclave (DSPE-1) étant chargé de piloter un seul moyen actionneur (10-1).
- 16.** Procédé d'atténuation vibratoire active, notamment acoustique, du type comprenant les étapes suivantes:
- a) prévoir une ossature susceptible d'être soumise à des vibrations à atténuer,
 - b) prévoir des premiers moyens capteurs de vibrations (8), disposés sur l'ossature selon une première relation géométrique prédéterminée par rapport à ladite ossature,
 - c) prévoir des moyens actionneurs de vibrations (10), disposés sur l'ossature à proximité des premiers moyens capteurs,
 - d) prévoir des moyens de filtrage comprenant au moins une entrée reliée aux premiers moyens capteurs (8) et une sortie (16),
 - e) agencer les moyens de filtrage pour engendrer une atténuation active des vibrations sur l'ossature,
 - f) prévoir des seconds moyens capteurs de vibrations (100), distants, disposés sur l'ossature selon une seconde relation géométrique prédéterminée,
 - g) prévoir des moyens sommateurs (110) possédant une première entrée (112), une seconde entrée (114), et une sortie reliée aux moyens d'actionneurs (10),
- caractérisé en ce qu'il** comprend en outre les étapes suivantes:
- h) prévoir des moyens de filtrage par rétroaction (12) de type non adaptatif, possédant une entrée reliée aux premiers moyens capteurs (8) et une sortie (16) reliée à la première entrée (112) des moyens sommateurs, et agencer lesdits moyens de filtrage par rétroaction pour engendrer une atténuation active de type non adaptatif des vibrations sur l'ossature, sans engendrer d'instabilité dans une première bande de fréquences;
 - i) mesurer au préalable, et en présence des moyens de filtrage par rétroaction, la fonction de transfert entre les moyens actionneurs (10) et les premiers moyens capteurs (8);
 - j) prévoir des moyens de filtrage par anticipation (130) de type non adaptatif comprenant une première entrée (132) reliée aux seconds moyens capteurs (100), une seconde entrée (134) reliée aux premiers moyens capteurs (8), et une sortie reliée à la seconde entrée (114) des moyens sommateurs (110);
 - k) adapter les coefficients de filtrage (140) des moyens de filtrage par anticipation (130) en temps réel selon un algorithme choisi pour minimiser l'énergie des vibrations captées par les premiers moyens capteurs (8) en fonction de l'énergie des vibrations captées par les seconds moyens capteurs (100), et la fonction de transfert préalablement mesurée;
- ce qui permet de linéariser l'atténuation rétroactive dans toute une seconde bande de fréquences plus large que la première bande de fréquence, d'accélérer la convergence de l'algorithme de minimisation, et d'améliorer la robustesse des moyens de filtrage par anticipation.
- 17.** Procédé selon la revendication 16, **caractérisé en ce qu'il** est mis en oeuvre par un dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 15.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur aktiven Schwingungsdämpfung des Typs, der folgendes umfasst:

- eine Tragkonstruktion, die geeignet ist, den zu dämpfenden Schwingungen ausgesetzt zu sein; 5
- erste Aufnehmermittel (8) für Schwingungen, die auf der Tragkonstruktion nach einer ersten geometrischen Relation angeordnet sind, die bezogen auf diese Tragkonstruktion vorherbestimmt wurde; 10
- Mittel (10) zur Erzeugung von Schwingungen, die auf der Tragkonstruktion nahe bei den ersten Aufnehmermitteln (8) angeordnet sind; und 15
- Filtermittel, die mindestens einen mit den ersten Aufnehmermitteln verbundenen Eingang und einen mit den Erzeugungsmitteln verbundenen Ausgang umfassen, wobei die Filtermittel so eingerichtet sind, dass sie eine aktive Dämpfung der auf die Tragkonstruktion einwirkenden Schwingungen bewirken; 20
- zweite, entfernte, Aufnehmermittel (100) für Schwingungen, die auf der Tragkonstruktion nach einer zweiten geometrischen Relation angeordnet sind, die bezogen auf diese Tragkonstruktion vorherbestimmt wurde; 25
- Summiermittel (110), die einen ersten Eingang (112), einen zweiten Eingang (114) und einen mit den Erzeugungsmitteln (10) verbundenen Ausgang besitzen; 30

dadurch gekennzeichnet, dass die Filtermittel umfassen: 35

- Rückkopplungsfilter (12) vom nicht-adaptiven Typ, die einen mit den ersten Aufnehmermitteln (8) verbundenen Eingang und einen mit dem ersten Eingang (112) der Summiermittel verbundenen Ausgang (16) besitzen und geeignet sind, eine aktive Dämpfung vom nicht-adaptiven Typ der auf die Tragkonstruktion wirkenden Schwingungen zu erzeugen, ohne dass sie Instabilität in einem ersten Frequenzbereich erzeugen; 40
- Mittel, die geeignet sind, im voraus und in Gegenwart von Rückkopplungsfiltern die Übertragungsfunktion zwischen den Erzeugungsmitteln (10) und den ersten Aufnehmermitteln (8) zu messen; 45

- Vorlauffilter (130) vom adaptiven Typ, die einen ersten, mit den zweiten Schwingungsaufnehmern (100) verbundenen Eingang (132), einen zweiten, mit den ersten Schwingungsaufnehmern (8) verbundenen Eingang (134) und einen mit dem zweiten Eingang (114) der Summiermittel (110) verbundenen Ausgang umfassen; 50

wobei die Filterkoeffizienten (140) der Vorlauffilter (130) nach einem ausgewählten Algorithmus in Echtzeit eingestellt sind, um die Energie der von den ersten Aufnehmermitteln (8) aufgenommenen Schwingungen in Abhängigkeit von der Energie der von den zweiten Aufnehmermitteln (100) aufgenommenen Energie und der auf diese Weise zuvor gemessenen Übertragungsfunktion zu minimalisieren; damit ist es möglich, die rückgekoppelte Dämpfung in einem gesamten zweiten Frequenzbereich, der breiter ist als der erste Frequenzbereich, zu linearisieren, die Konvergenz des Minimalisierungs-Algorithmus zu beschleunigen und die Stabilität der Vorlauffilter zu verbessern.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Tragkonstruktion mindestens einen Hohlraum (2) umfasst, der von einem Ohr (4) und passiven Dämpfungsmitteln (6) begrenzt ist, wobei die ersten Aufnehmermittel (8) und die Erzeugungsmittel (10) in diesem Hohlraum untergebracht sind, während die zweiten Aufnehmermittel (100) ausserhalb des Hohlraums angeordnet sind.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Tragkonstruktion einen Träger metallischen Typs, oder eine Platte, oder ein Geflecht, oder einen Sitz, oder eine Ventilationsumhüllung oder dergleichen umfasst.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ersten Aufnehmermittel (8) mindestens umfassen: ein Tonaufnehmerelement des Mikrophontyps, ein Aufnehmerelement für Beschleunigung des Typs Beschleunigungsmesser, ein Aufnehmerelement für Verschiebung, ein Aufnehmerelement für Geschwindigkeit, ein Aufnehmerelement für mechanische Spannungen, ein Aufnehmerelement für Kraft, oder dergleichen.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ersten Aufnehmermittel (8) zwei Aufnehmerelemente umfassen, wobei das eine mit den Vorlauffiltern und das andere mit den Rückkopplungsfiltern verbunden ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweiten Aufnehmermittel (100) mindestens umfassen: ein Tonaufnehmerelement

des Mikrophontyps, ein Aufnehmerelement für Beschleunigung des Typs Beschleunigungsmesser, ein Aufnehmerelement für Verschiebung, ein Aufnehmerelement für Geschwindigkeit, eine Aufnehmerelement für mechanische Spannungen, ein Aufnehmerelement für Kraft oder dergleichen.

7. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Erzeugungsmittel (10) eine Schallquelle des Typs Lautsprecher, einen Prüfkörper und einen Schwingtopf oder dergleichen umfassen. 10
8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rückkopplungsfilter (12) eine Vielzahl von aktiven Analog- und/oder Digitalfiltern der Ordnung 1 oder höher umfassen, die so angeordnet sind, dass sie eine Übertragungsfunktion erzeugen, die die Vermeidung von Instabilitäten im ersten Frequenzbereich im Nyquist-Sinn erlaubt, und dadurch, dass die Übertragungsfunktion der Rückkopplungsfilter in der Weise bestimmt ist, dass die Phase dieser Übertragungsfunktion im ersten Bereich nicht durch Null läuft. 20 25
9. Vorrichtung nach einem beliebigen der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rückkopplungsfilter (12) unbegrenzte Impulsantwort besitzen. 30
10. Vorrichtung nach einem beliebigen der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorlauffilter (130) umfassen: 35
 - ein erstes Erfassungsmodul (A8), das einen mit dem Ausgang der ersten Aufnehmermittel (8) verbundenen Eingang und einen Ausgang besitzt; 40
 - ein zweites Erfassungsmodul (A100), das einen mit dem Ausgang der zweiten Aufnehmermittel (100) verbundenen Eingang und einen Ausgang besitzt; 45
 - digitale Verarbeitungsmittel, die einen ersten, mit dem Ausgang des ersten Erfassungsmoduls (A8) verbundenen Eingang, einen zweiten, mit dem Ausgang des zweiten Erfassungsmoduls (A100) verbundenen Eingang, und einen Ausgang besitzen, wobei diese digitalen Verarbeitungsmittel dazu geeignet sind, den Algorithmus zur Minimalisierung der Energie der Schwingungen, die von den ersten Aufnehmermitteln (8) aufgenommen werden, in Abhängigkeit von der Energie der Schwingungen, die von den zweiten Aufnehmermitteln (100) aufgenommen werden, zu steuern; und 50 55

- ein Rekonstruktionsmodul (R), das einen mit dem Ausgang der digitalen Verarbeitungsmittel verbundenen Eingang und einen mit dem zweiten Eingang (114) der Summiermittel verbundenen Ausgang besitzt.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ersten und die zweiten Erfassungsmodule (A8 und A100) umfassen:
 - ein Eingangs-Vorverstärkerelement (PE), das einen Eingang hat, der die von den ersten Aufnehmermitteln (8) oder den zweiten Aufnehmermitteln (100) ausgesandten Signale empfängt, und einen Ausgang besitzt;
 - ein Konditionierungsfilter (FAT), das an die gewählte Anwendung angepasst ist, und einen mit dem Ausgang des Eingangs-Vorverstärkerelements verbundenen Eingang und einen Ausgang besitzt; und
 - einen Analog/Digital-Wandler (CAN), der einen mit dem Ausgang des Konditionierungsfilters verbundenen Eingang und einen mit einem Eingang der digitalen Verarbeitungsmittel verbundenen Ausgang besitzt.
12. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rekonstruktionsmodul (R) umfasst:
 - einen Digital/Analog-Wandler (CNA), der einen mit dem Ausgang der digitalen Verarbeitungsmittel verbundenen Eingang und einen Ausgang besitzt; und
 - ein Glättungsfilter (FLR), das einen mit dem Ausgang des Digital/Analog-Wandlers verbundenen Eingang und einen mit dem zweiten Eingang (114) der Summiermittel (110) verbundenen Ausgang besitzt.
13. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorlauffilter (130) begrenzte Impulsantwort besitzen, und dadurch, dass der Minimalisierungs-Algorithmus dem Typ kleinster mittlerer Fehlerquadrate entspricht.
14. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die digitalen Verarbeitungsmittel dem Typ digitaler Signalprozessor entsprechen.
15. Vorrichtung nach einem beliebigen der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie eine Vielzahl von ersten Aufnehmermitteln (8-1, 8-2, 8-3...) und von Erzeugungsmitteln (10-1, 10-2,...) umfasst, und dadurch, dass die Vorrichtung um eine Master/Slave-Struktur von Multiprozessoren herum angeordnet ist, wobei jeder Slave-

Prozessor (DSPE-1) die Aufgabe hat, ein einziges Erzeugungsmittel (10-1) zu steuern.

16. Verfahren zur aktiven Dämpfung von Schwingungen, insbesondere akustischen, vom Typ, der die folgenden Stufen umfasst:
- a) eine Tragkonstruktion vorzusehen, die zu dämpfenden Schwingungen ausgesetzt werden kann, 10
 - b) erste Aufnehmermittel (8) für Schwingungen vorzusehen, die auf der Tragkonstruktion nach einer ersten geometrischen Relation angeordnet sind, die bezogen auf diese Tragkonstruktion vorherbestimmt ist, 15
 - c) Erzeugungsmittel (10) für Schwingungen vorzusehen, die auf der Tragkonstruktion nahe bei den ersten Aufnehmermitteln angeordnet sind, 20
 - d) Filtermittel vorzusehen, die mindestens einen mit den ersten Aufnehmermitteln (8) verbundenen Eingang und einen Ausgang (16) besitzen, 25
 - e) die Filtermittel so einzurichten, dass sie eine aktive Dämpfung der Schwingungen auf die Tragkonstruktion erzeugen, 30
 - f) zweite, entfernte Aufnehmermittel (100) für Schwingungen vorzusehen, die auf der Tragkonstruktion nach einer zweiten vorherbestimmten geometrischen Relation angeordnet sind, 35
 - g) Summiermittel (110) vorzusehen, die einen ersten Eingang (112), einen zweiten Eingang (114) und einen mit den Erzeugungsmitteln (10) verbundenen Ausgang besitzen, 40

dadurch gekennzeichnet, dass es ausserdem die folgenden Stufen umfasst:

- h) Rückkopplungsfilter (12) vom nicht-adaptiven Typ vorzusehen, die einen mit den ersten Aufnehmermitteln (8) verbundenen Eingang und einen mit dem ersten Eingang (112) der Summiermittel verbundenen Ausgang (16) besitzen, und diese Rückkopplungsfilter so einzurichten, dass sie eine aktive Dämpfung vom nicht-adaptiven Typ der Schwingungen auf die Tragkonstruktion bewirken, ohne Instabilität in einem ersten Frequenzbereich zu erzeugen; 45
- i) zuvor und in Gegenwart der Rückkopplungsfilter die Übertragungsfunktion zwischen den 50

Erzeugungsmitteln (10) und den ersten Aufnehmermitteln (8) zu messen;

- j) Vorlauffilter (130) vom nicht-adaptiven Typ vorzusehen, die einen ersten, mit den zweiten Aufnehmermitteln (100) verbundenen Eingang (132), einen zweiten, mit den ersten Aufnehmermitteln (8) verbundenen Eingang (134) und einen mit dem zweiten Eingang (114) der Summiermittel (110) verbundenen Ausgang besitzen;
- k) die Filterkoeffizienten (140) der Vorlauffilter (130) in Echtzeit einzustellen nach einem Algorithmus, der so gewählt ist, dass die Energie der von den ersten Aufnehmermitteln (8) aufgenommenen Schwingungen in Abhängigkeit von der Energie der von den zweiten Aufnehmermitteln (100) aufgenommenen Schwingungen und der zuvor gemessenen Übertragungsfunktion minimiert wird;

was es ermöglicht, die Rückkopplungsdämpfung in einem gesamten zweiten Frequenzbereich zu linearisieren, der breiter ist als der erste Frequenzbereich, die Konvergenz des Minimalisierungs-Algorithmus zu beschleunigen und die Stabilität der Vorlauffilter zu verbessern.

17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** es durch eine Vorrichtung nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 15 in Gang gesetzt wird.

Claims

1. Active vibration attenuation device of the type comprising:
- a framework likely to be subject to vibration to be attenuated;
 - first vibration sensor means (8), arranged on the framework in a first predetermined geometric relationship with respect to said framework;
 - vibration actuator means (10), arranged on the framework in proximity to the first sensor means (8); and
 - filtering means comprising at least one input linked to the first sensor means and an output linked to the actuator means, the filtering means being configured to generate active attenuation of the vibration on the framework;
 - second vibration sensor means (100), remote, arranged on the framework in a second predetermined geometric relationship with respect to said framework;
 - summation means (110) possessing a first in-

put (112), a second input (114), and an output linked to the actuator means (10);

characterized in that the filtering means comprise:

- nonadaptive-type feedback filtering means (12) possessing an input linked to the first sensor means (8) and an output (16) linked to the first input (112) of the summation means, and suitable for generating nonadaptive active attenuation of the vibration on the framework, without generating instability in a first frequency band;
- means suitable for measuring, in advance, and in the presence of the feedback filtering means, the transfer function between the actuator means (10) and the first sensor means (8);
- adaptive-type feedforward filtering means (130) comprising a first input (132) linked to the second sensor means (100), a second input (134) linked to the first sensor means (8), and an output linked to the second input (114) of the summation means (110);

the filtering coefficients (140) of the feedforward filtering means (130) being adapted in real time according to an algorithm chosen to minimize the energy of the vibration which is picked up by the first sensor means (8) as a function of the energy of the vibration which is picked up by the second sensor means (100), and of the thus previously measured transfer function, which makes it possible to linearize the feedback attenuation throughout a second frequency band which is wider than the first frequency band, to accelerate the convergence of the minimization algorithm, and to enhance the robustness of the feedforward filtering means.

2. Device according to claim 1, **characterized in that** the framework comprises at least one cavity (2) bounded by an ear (4) and passive attenuation means (6), the first sensor means (8) and the actuator means (10) being lodged in said cavity (2), while the second sensor means (100) being arranged outside the cavity.
3. Device according to claim 1, **characterized in that** the framework comprises a metal-type beam, or a plate, or a trellis, or a seat, or a ventilation duct or the like.
4. Device according to claim 1, **characterized in that** the first sensor means (8) comprise at least: a sound sensor element of microphone type, an acceleration sensor element of accelerometer type, a movement sensor element, a speed sensor element, a stress sensor element, a force sensor element or the like.

5. Device according to claim 4, **characterized in that** the first sensor means (8) comprise two sensor elements, one being associated with the feedforward filtering means, the other being associated with the feedback filtering means.

6. Device according to claim 1, **characterized in that** the second sensor means (100) comprise at least: a sound sensor element of microphone type, an acceleration sensor element of accelerometer type, a movement sensor element, a speed sensor element, a stress sensor element, a force sensor element or the like.

7. Device according to claim 1, **characterized in that** the actuator means (10) comprise a sound source of loudspeaker type, a test unit, a vibrating platform or the like.

8. Device according to one of the preceding claims, **characterized in that** the feedback filtering means (12) comprise a plurality of active digital and/or analog filters of order greater than or equal to 1, configured to generate a transfer function making it possible to avoid instability in the first frequency band in the Nyquist sense, and **in that** the transfer function of the feedback filtering means is determined in such a way that the phase of said transfer function does not pass through the value zero in the first band.

9. Device according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the feedback filtering means (12) are of the infinite impulse-response type.

10. Device according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the feedforward filtering means (130) comprise:

- a first acquisition module (A8) possessing an input linked to the output of the first sensor means (8), and an output;
- a second acquisition module (A100) possessing an input linked to the output of the second sensor means (100), and an output;
- digital processing means possessing a first input linked to the output of the first acquisition module (A8), a second input linked to the output of the second acquisition module (A100), and an output, said digital processing means being suitable for controlling the algorithm for minimizing the energy of the vibration which is picked up by the first sensor means (8) as a function of the energy of the vibration which is picked up by the second sensor means (100); and
- a reproduction module (R) possessing an input

linked to the output of the digital processing means and an output linked to the second input (114) of the summation means.

11. Device according to claim 10, **characterized in that** the first and second acquisition modules (A8 and A100) comprise:

- an input preamplifier element (PE) possessing an input receiving the signals output by the first sensor means (8) or by the second sensor means (100), and an output; 10
- a conditioning filter (FAT) adapted to the chosen application and possessing an input linked to the output of the input preamplifier element, and an output; and 15
- an analog/digital converter (CAN) possessing an input linked to the output of the conditioning filter and an output linked to an input of the digital processing means. 20

12. Device according to claim 10, **characterized in that** the reproduction module (R) comprises:

- a digital/analog converter (CNA) possessing an input linked to the output of the digital processing means, and an output; and 25
- a smoothing filter (FLR) possessing an input linked to the output of the digital/analog converter and an output linked to the second input (114) of the summation means (110). 30

13. Device according to claim 10, **characterized in that** the feedforward filtering means (130) are finite impulse-response filters and **in that** the minimization algorithm is of the least mean squares type. 35

14. Device according to claim 10, **characterized in that** the digital processing means are of the digital signal processor type. 40

15. Device according to any one of the preceding claims, **characterized in that** it comprises a plurality of first sensor means (8-1, 8-2, 8-3, etc.), and of actuator means (10-1, 10-2, etc.) and **in that** the device is centered around a structure with master/slave multiprocessors, each slave processor (DSPE-1) being tasked with driving a single actuator means (10-1). 45

16. Method of active vibration attenuation, particularly of acoustic vibration, of the type comprising the following stages: 50

- a) providing a framework likely to be subject to vibration to be attenuated; 55
- b) providing first vibration sensor means (8), arranged on the framework in a first predeter-

mined geometric relationship with respect to said framework;

- c) providing vibration actuator means (10), arranged on the framework in proximity to the first sensor means ;
- d) providing filtering means comprising at least one input linked to the first sensor means (8) and an output (16);
- e) configuring the filtering means so as to generate active attenuation of the vibration on the framework;
- f) providing second vibration sensor means (100), remote, arranged on the framework in a second predetermined geometric relationship;
- g) providing summation means (110) possessing a first input (112), a second input (114), and an output linked to the actuator means (10);

characterized in that it further comprises the following stages:

- h) providing nonadaptive-type feedback filtering means (12) possessing an input linked to the first sensor means (8) and an output (16) linked to the first input (112) of the summation means, and configuring the said feedback filtering means so as to generate nonadaptive-type active attenuation of the vibration on the framework, without generating instability in a first frequency band;
- i) measuring, in advance, and in the presence of the feedback filtering means, the transfer function between the actuator means (10) and the first sensor means (8) ;
- j) providing nonadaptive-type feedforward filtering means (130) comprising a first input (132) linked to the second sensor means (100), a second input (134) linked to the first sensor means (8), and an output linked to the second input (114) of the summation means (110) ;
- k) adapting the filtering coefficients (140) of the feedforward filtering means (130) in real time according to an algorithm chosen to minimize the energy of the vibration which is picked up by the first sensor means (8) as a function of the energy of the vibration which is picked up by the second sensor means (100), and the previously measured transfer function; which makes it possible to linearize the feedback attenuation throughout a second frequency band which is wider than the first frequency band, to accelerate the convergence of the minimization algorithm, and to enhance the robustness of the feedforward filtering means.

17. Method according to claim 16, **characterized in that** it is implemented by a device according to any one of claims 1 to 15.

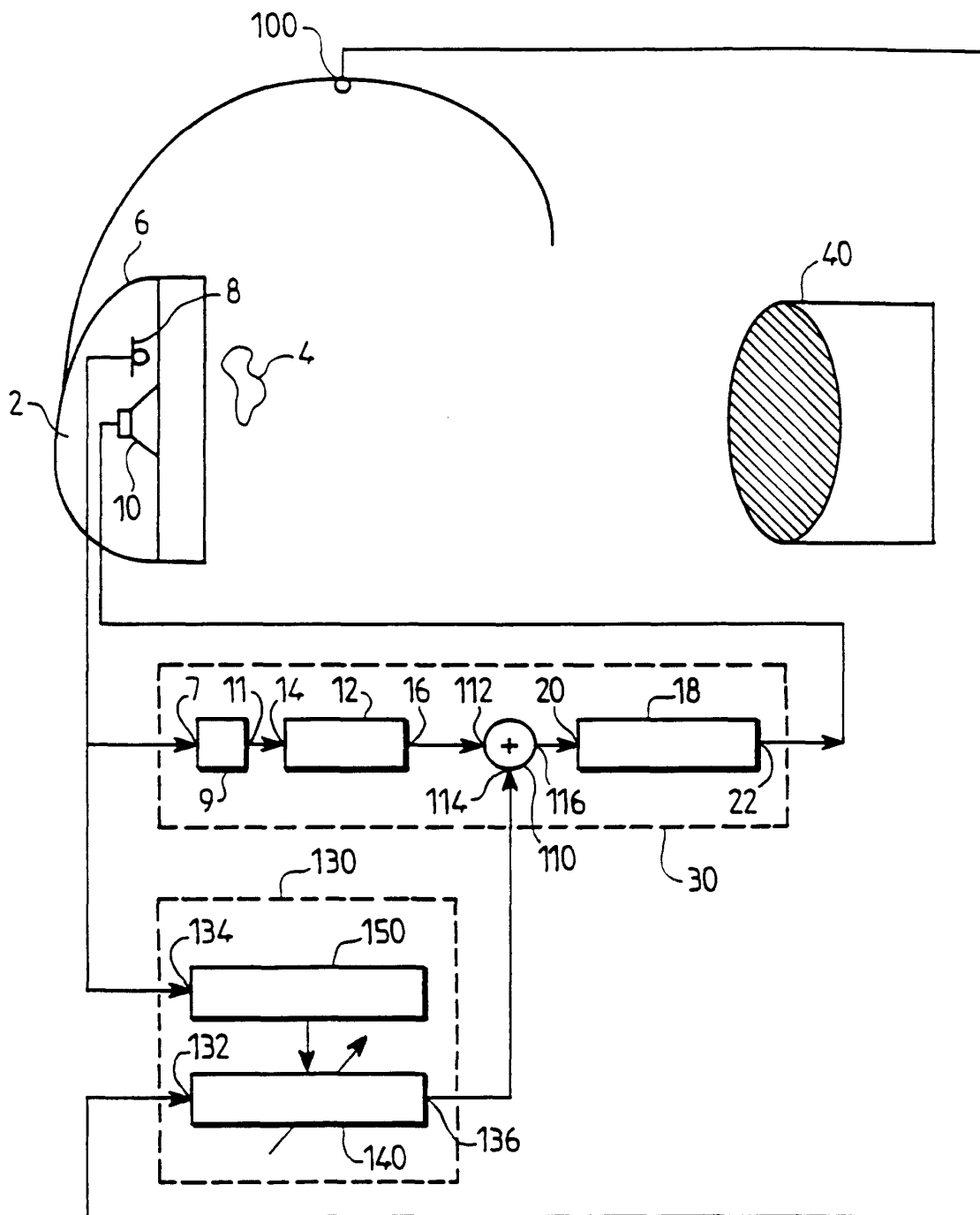
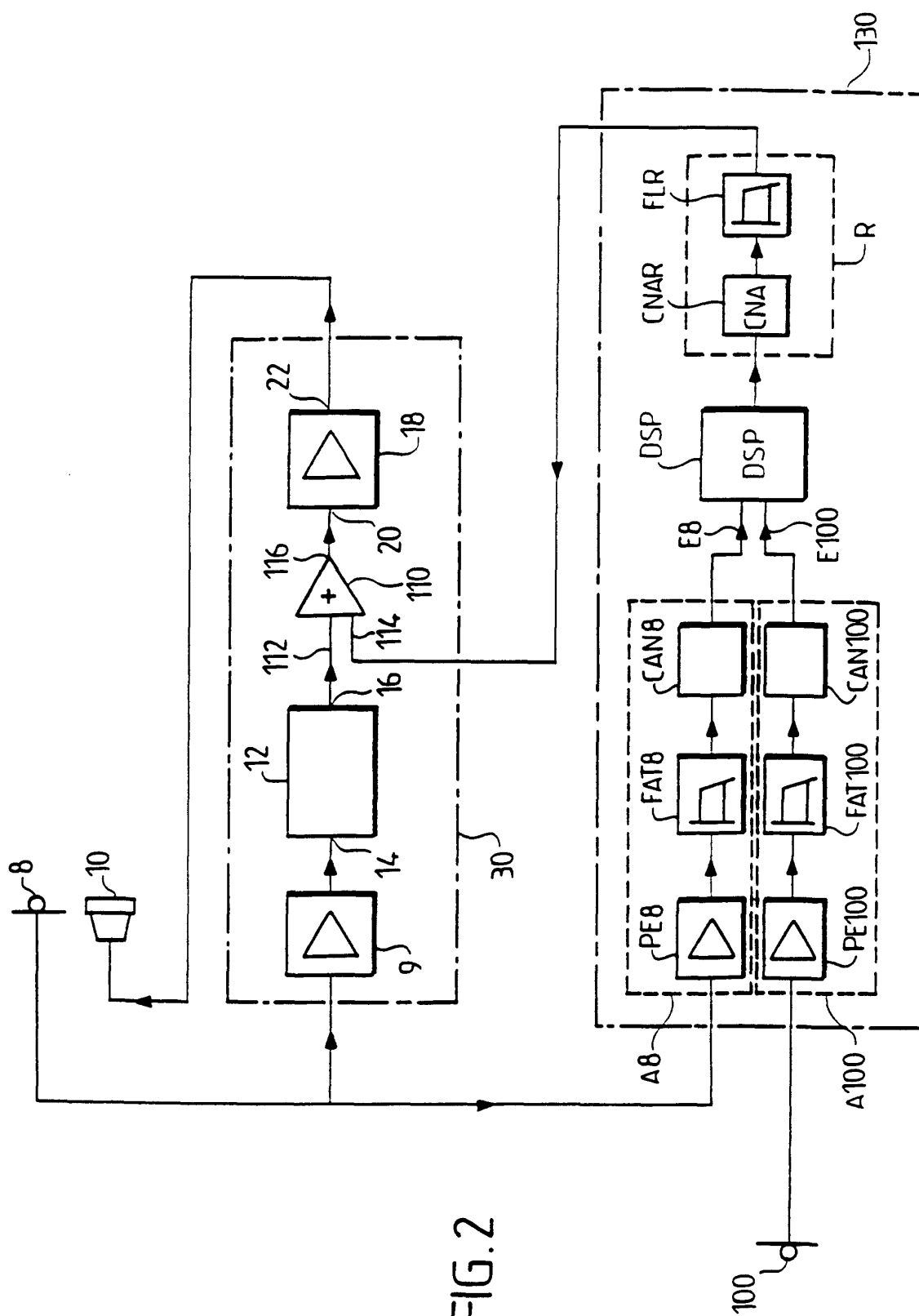


FIG.1



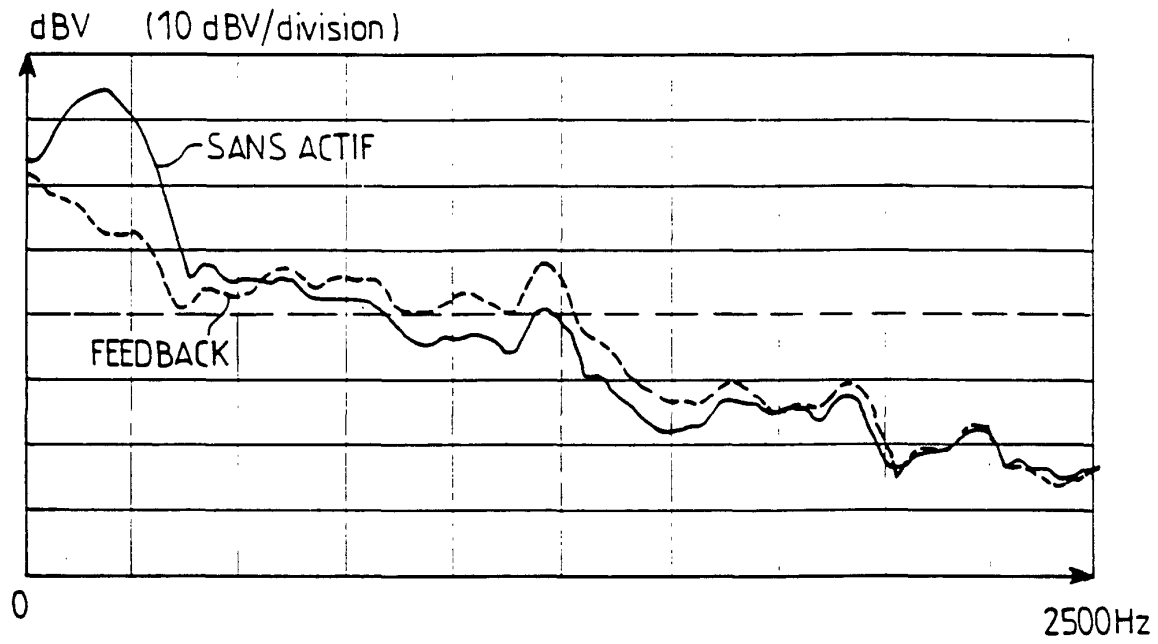


FIG.3

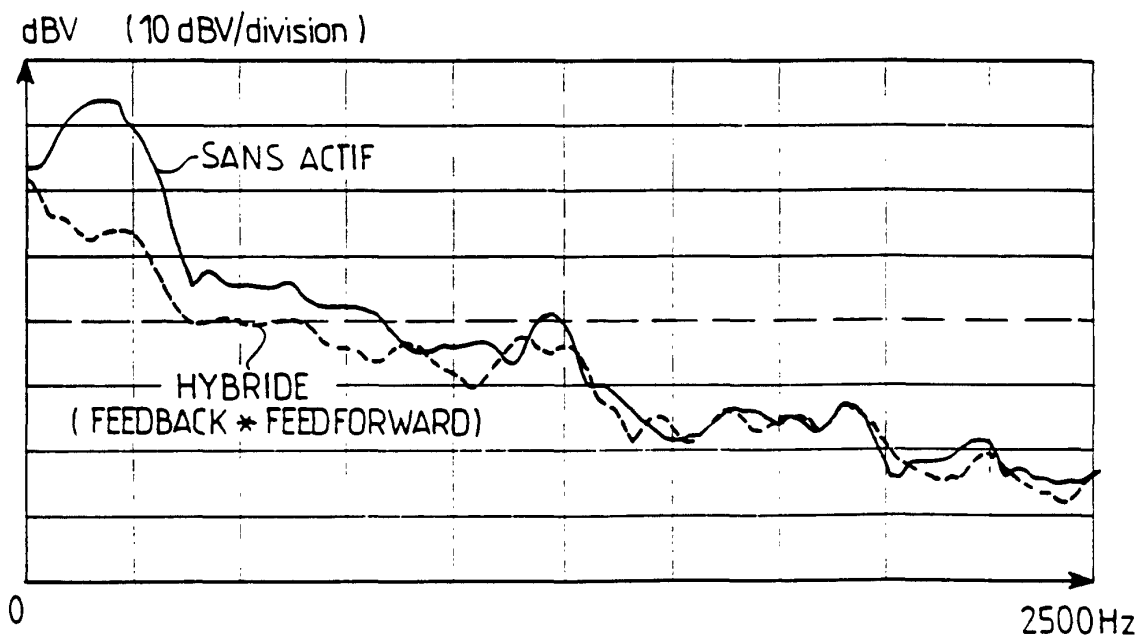


FIG.4

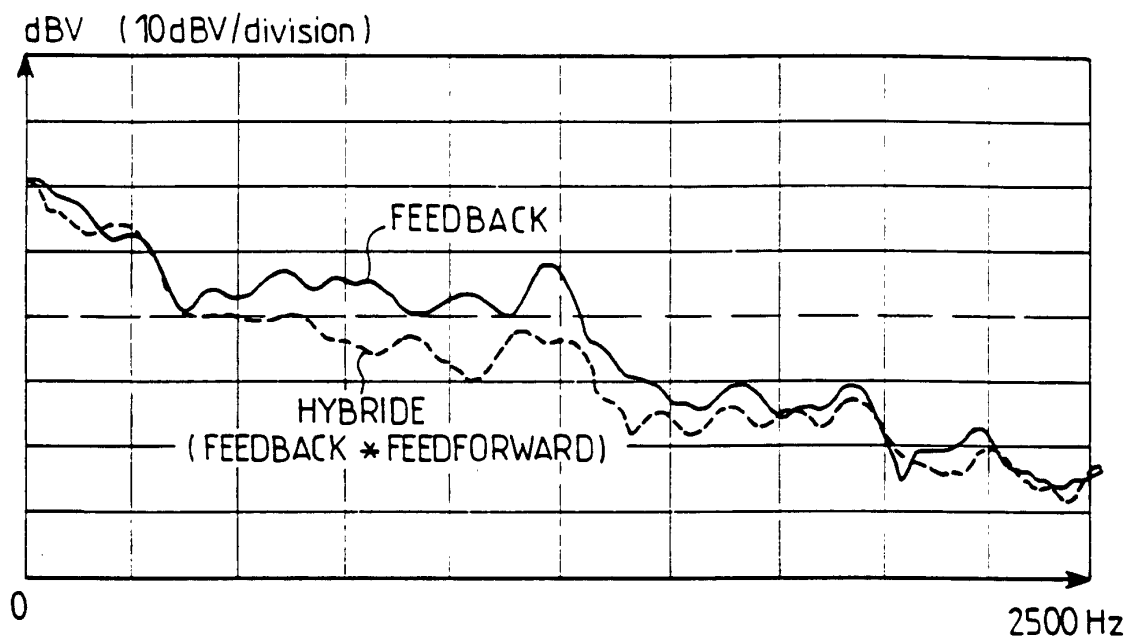


FIG. 5

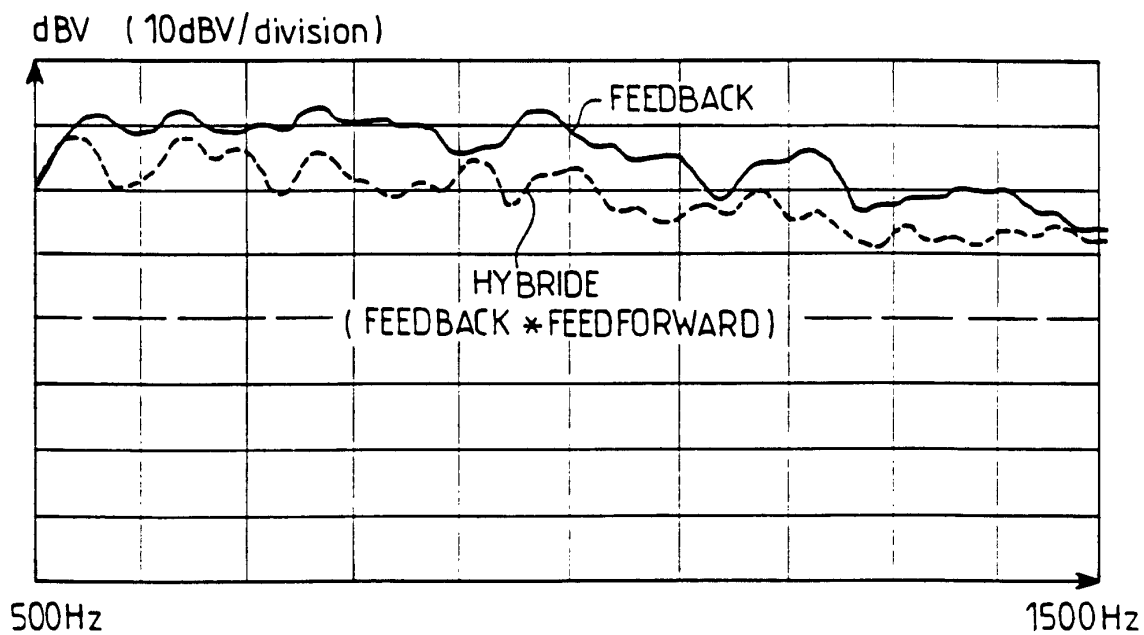


FIG. 6

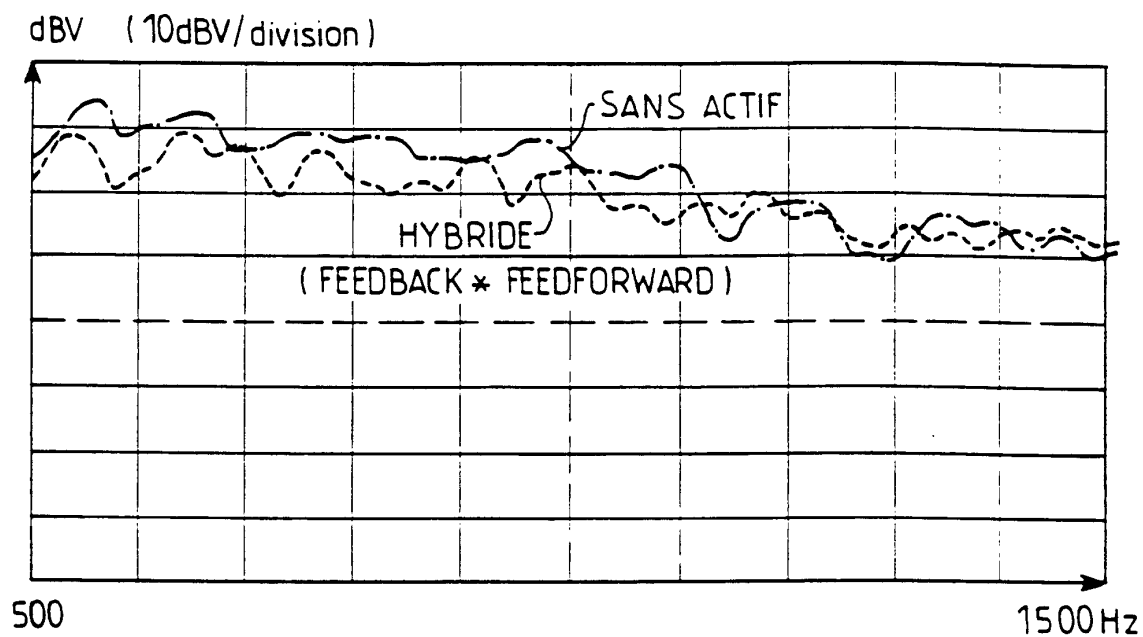


FIG.7

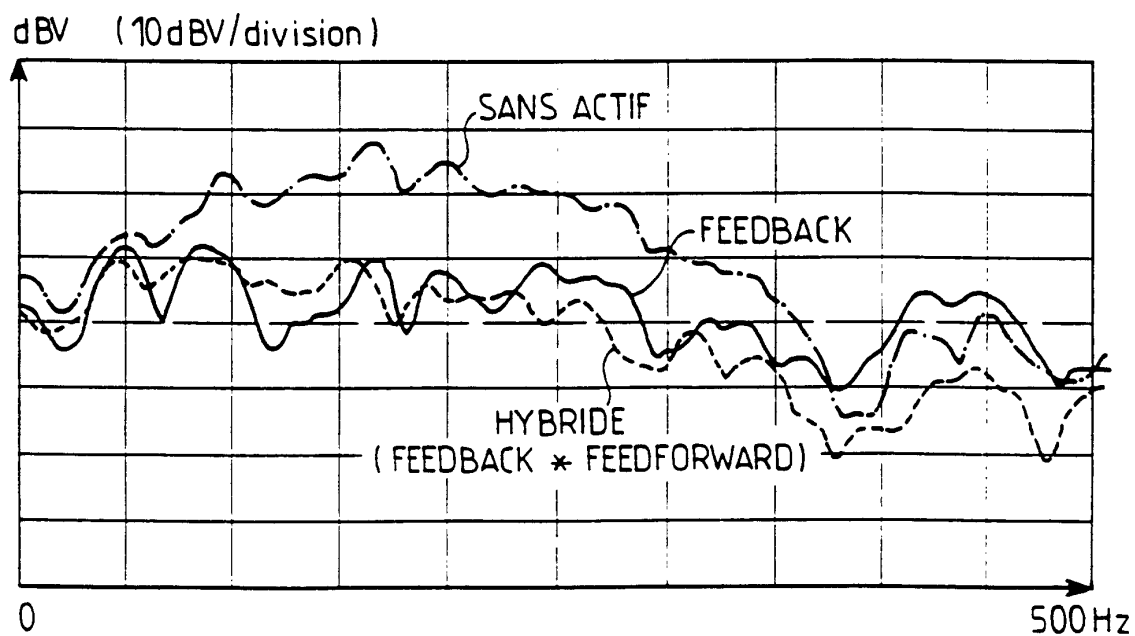


FIG.8

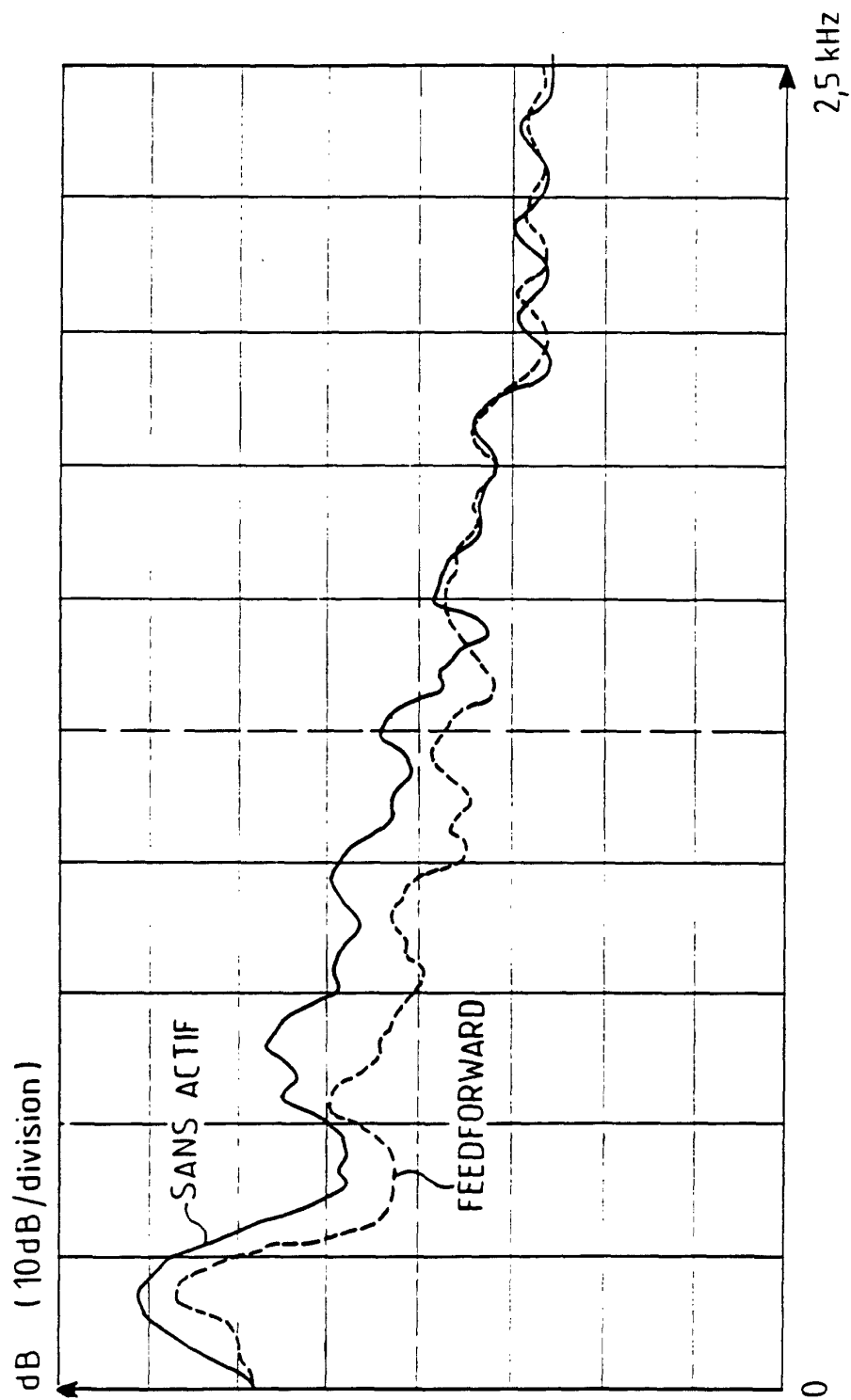


FIG. 9

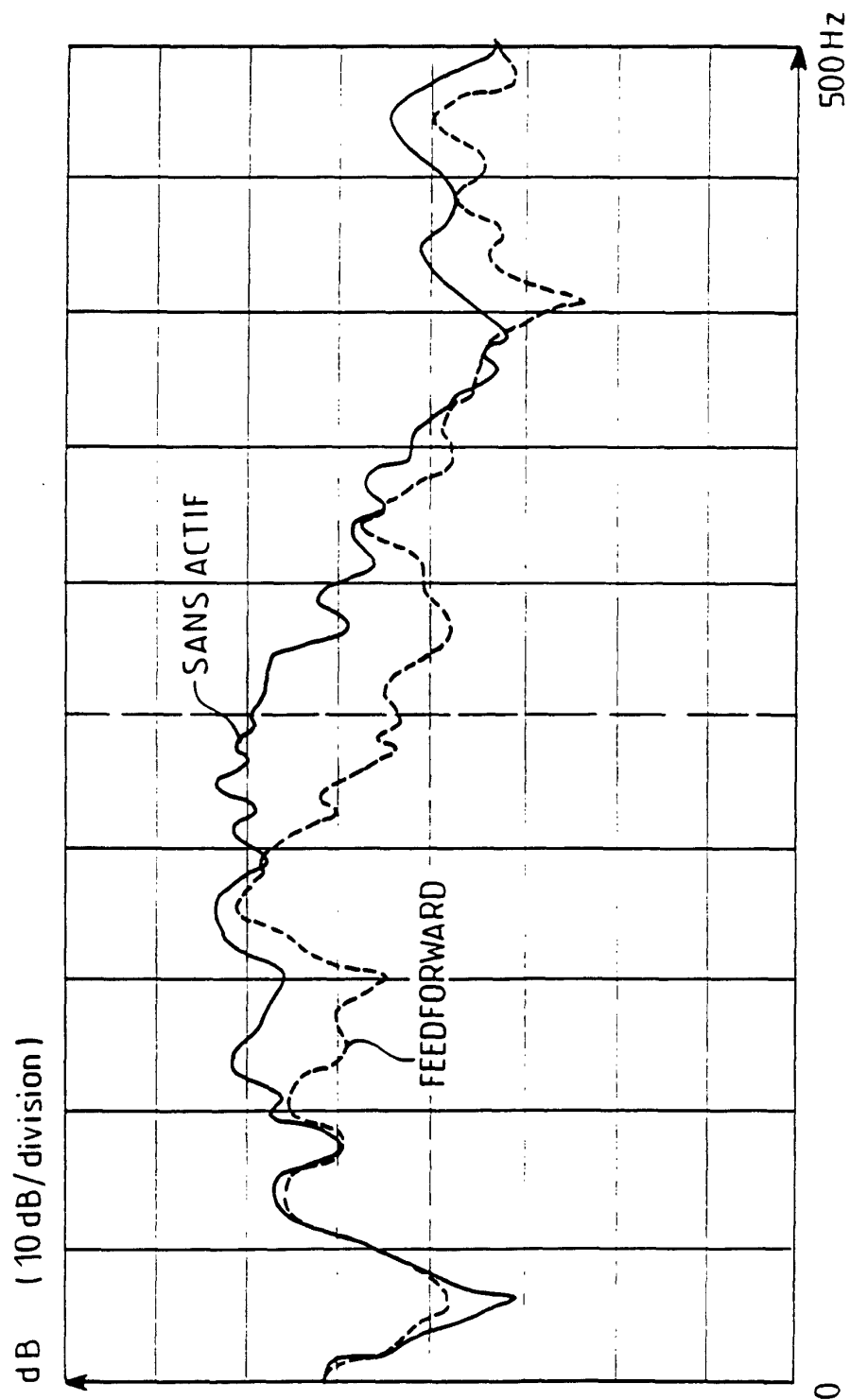


FIG.10A

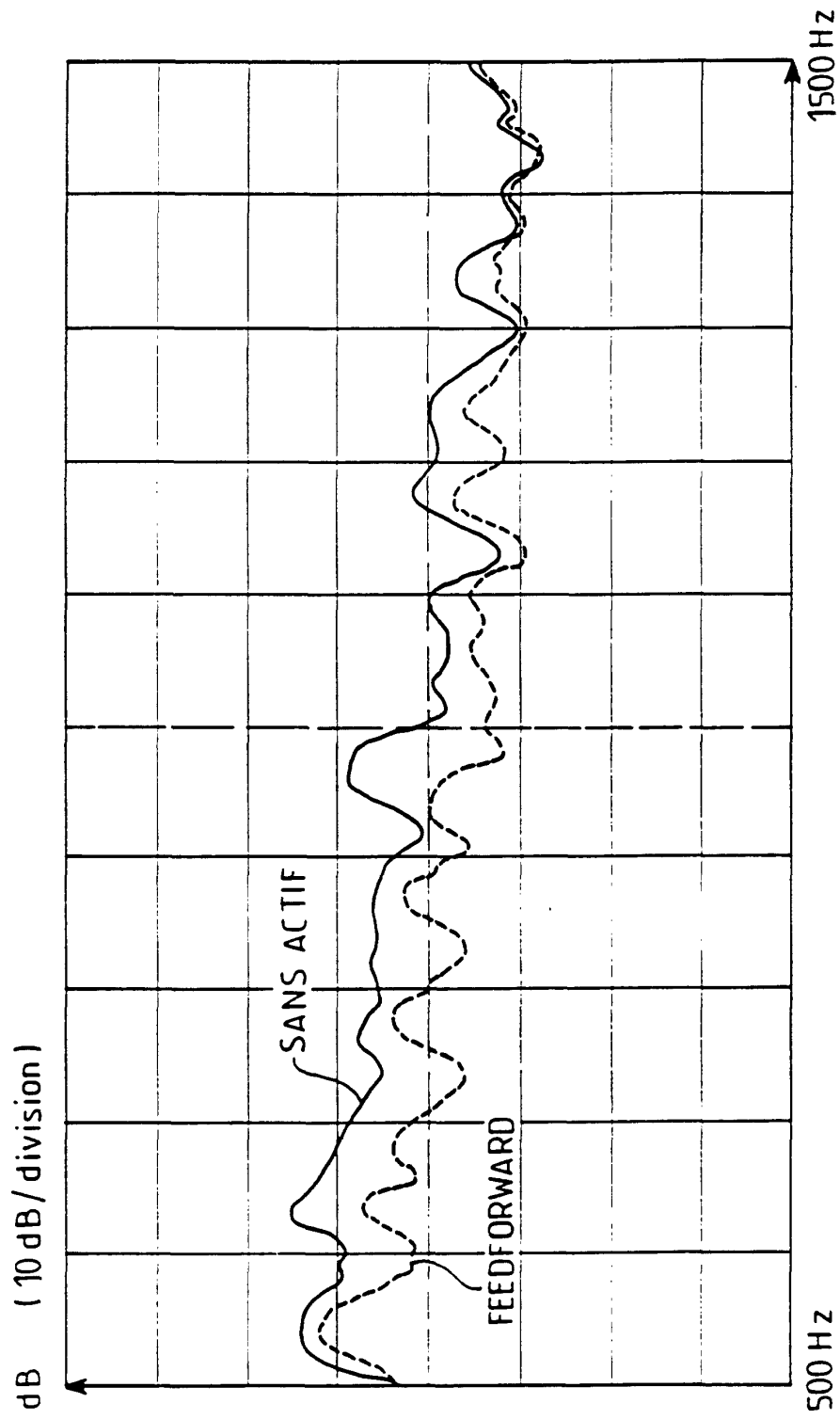


FIG.10B

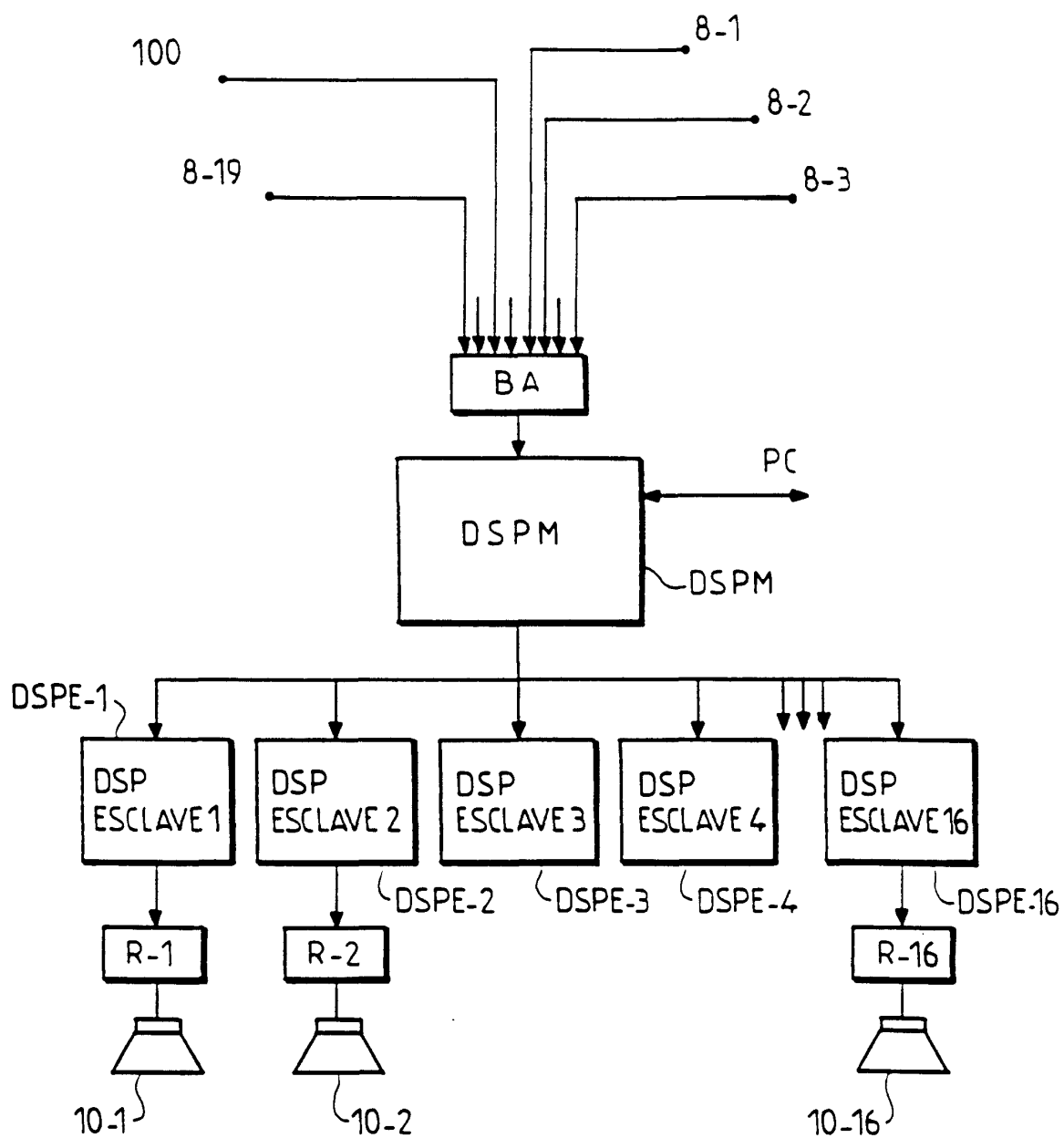


FIG. 11

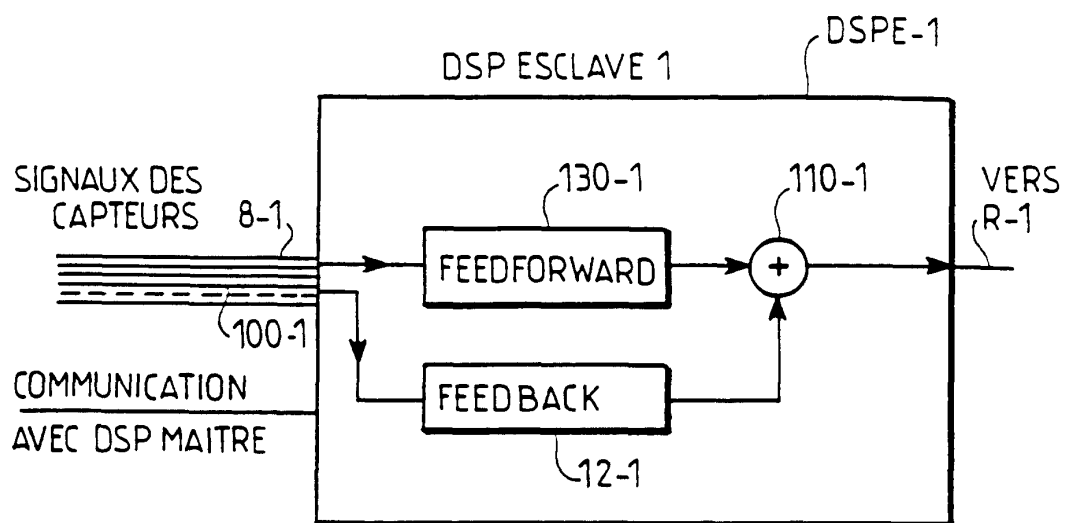


FIG.12

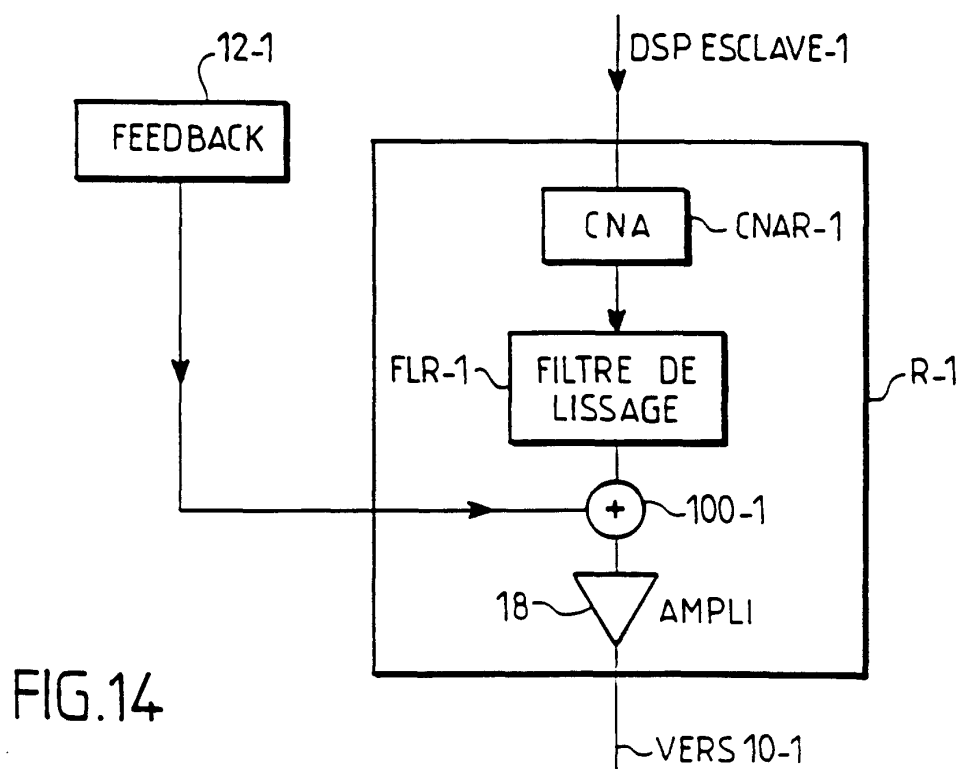


FIG.14

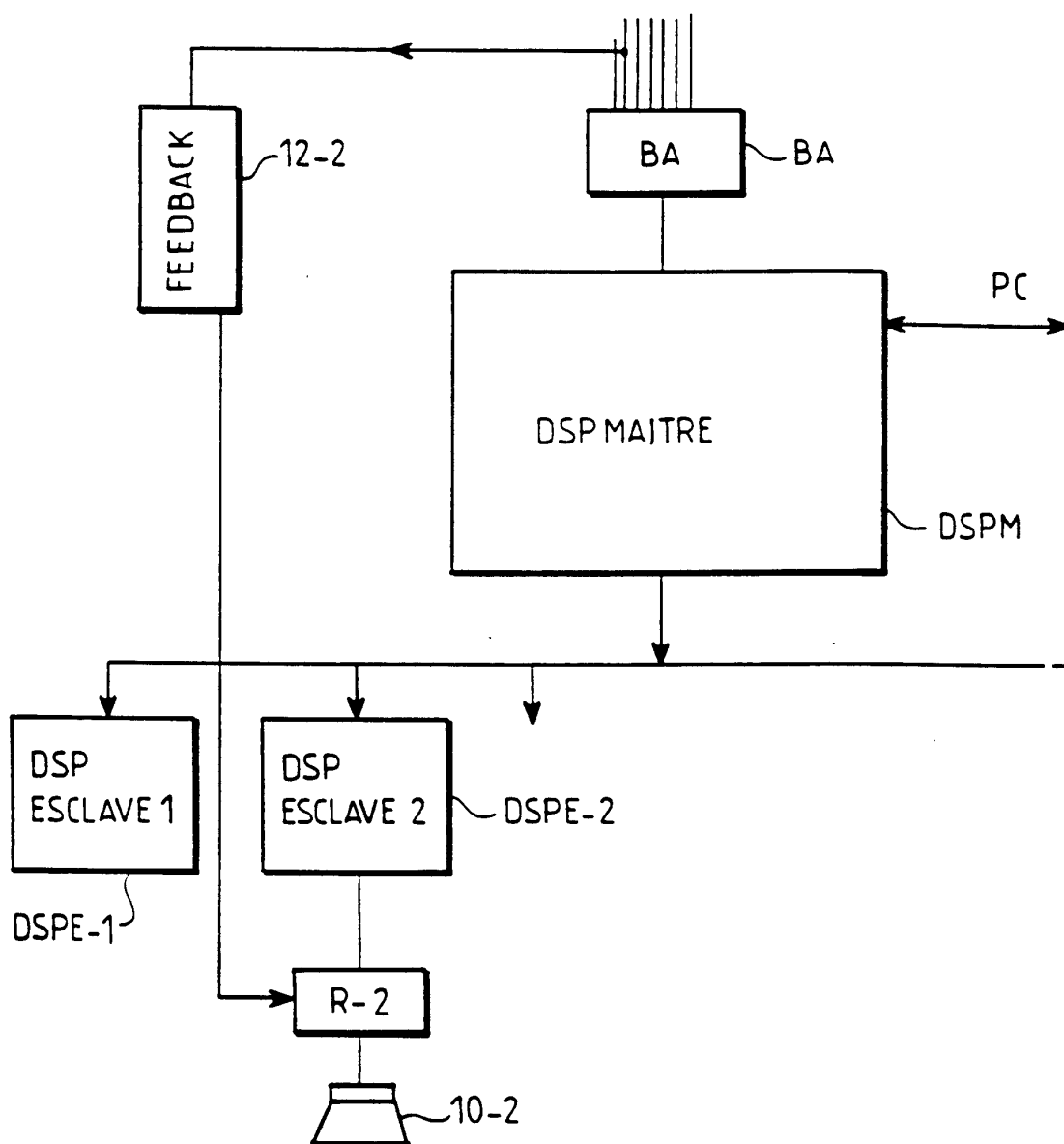


FIG. 13