



(11) **EP 2 597 889 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
04.06.2014 Bulletin 2014/23

(51) Int Cl.:
H04R 1/10 (2006.01) **H04R 5/033** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **12193852.6**

(22) Date de dépôt: **22.11.2012**

(54) **CASQUE AUDIO A CONTROLE ACTIF DE BRUIT DE TYPE NON-ADAPTATIF**
KOPFHÖRER MIT NICHT-ADAPTIVES AKTIVEN GERÄUSCHKONTROLLE
HEADPHONES WITH NON-ADAPTIVE ACTIVE NOISE CONTROL

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **22.11.2011 FR 1160642**

(43) Date de publication de la demande:
29.05.2013 Bulletin 2013/22

(73) Titulaire: **Parrot**
75010 Paris (FR)

(72) Inventeur: **Hua, Phong**
75011 Paris (FR)

(74) Mandataire: **Dupuis-Latour, Dominique**
Bardehle Pagenberg
10, boulevard Haussmann
75009 Paris (FR)

(56) Documents cités:
US-A1- 2010 272 276 US-B1- 6 449 369

EP 2 597 889 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] L'invention concerne un casque audio comprenant un système de "contrôle actif de bruit".

[0002] Un tel casque peut être utilisé pour l'écoute d'une source audio (musique par exemple) provenant d'un appareil tel qu'un lecteur MP3, radio, *smart-phone*, etc. auquel il est relié par une liaison filaire ou bien par une liaison sans fil, notamment une liaison de type *Bluetooth* (marque déposée du Bluetooth SIG).

[0003] S'il est pourvu d'un ensemble microphonique apte à capter la voix du porteur du casque, il est également possible d'utiliser ce casque pour des fonctions de communication telles que des fonctions de téléphonie "mains-libres", en complément de l'écoute de la source audio. Le transducteur du casque reproduit alors la voix du locuteur distant avec lequel le porteur du casque est en conversation.

[0004] Le casque comprend deux écouteurs réunis par un arceau. Chaque écouteur comprend une coque fermée logeant un transducteur de reproduction sonore (ci-après simplement désigné "transducteur") et destinée à être appliquée autour de l'oreille de l'utilisateur avec interposition d'un coussinet circumaural isolant l'oreille de l'environnement sonore extérieur.

[0005] Lorsque le casque est utilisé dans un environnement bruyant (métro, rue passante, train, avion, etc.) le porteur est partiellement protégé du bruit par les écouteurs du casque, qui l'isolent grâce à la coque fermée et au coussinet circumaural.

[0006] Toutefois, cette protection purement passive n'est que partielle, une partie des sons, notamment dans la partie basse du spectre de fréquences, pouvant être transmis jusqu'à l'oreille au travers de la coque des écouteurs, ou encore via la boîte crânienne du porteur.

[0007] C'est pour cette raison qu'ont été développés des techniques dites de "contrôle actif de bruit" ou ANC (*Active Noise Control*), dont le principe consiste à capter la composante de bruit incidente au moyens d'un microphone placé sur la coque des écouteurs du casque et à superposer, temporellement et spatialement, à cette composante de bruit une onde acoustique qui est idéalement la copie inversée de l'onde de pression de la composante de bruit. Il s'agit de créer de cette manière une interférence destructive avec la composante de bruit et réduire, idéalement neutraliser, les variations de pression de l'onde acoustique parasite.

[0008] La mise en oeuvre de ce principe implique de résoudre un nombre important de difficultés, ce qui a conduit à des propositions de nature très variée, que l'on peut regrouper en deux catégories.

[0009] Une *première catégorie* est celle des procédés ANC utilisant des filtres adaptatifs, c'est-à-dire des filtres dont la fonction de transfert est modifiée dynamiquement, en continu, par un algorithme d'analyse en temps réel du signal. Ces traitements ont pu être mis en oeuvre notamment grâce au développement des techniques de numérisation et de traitement du signal par des proces-

seurs spécialisés, programmés pour mettre en oeuvre des algorithmes temps réel.

[0010] Le DE 37 33 132 A1 est un exemple typique d'un traitement ANC mettant en oeuvre de tels filtres adaptatifs. D'autres exemples de procédés ANC impliquant des filtres adaptatifs sont décrits notamment dans les US 6 041 126 A, US 2003/0228019 A1 et WO 2005/112849 A2.

[0011] Ces techniques peuvent être efficaces sur le plan de la réduction du bruit, mais elles présentent l'inconvénient d'être nécessairement numériques et d'exiger une puissance de calcul relativement importante, avec pour conséquence une conception relativement complexe et un coût de réalisation assez élevé.

[0012] De plus, le traitement numérique introduit des retards non négligeables dans le signal de compensation, et le caractère adaptatif implique un temps de convergence minimal des algorithmes. Tout ceci nuit à la réactivité du système, notamment à l'égard des bruits irréguliers. De ce fait, le débruitage est surtout efficace à l'encontre des bruits essentiellement périodiques, dans des bandes étroites.

[0013] La *seconde catégorie* de procédés ANC - à laquelle appartient la technique de l'invention - est celle des systèmes à filtrage fixe, non adaptatifs, c'est-à-dire où les paramètres des divers filtres utilisés sont prédéterminés.

[0014] Ces systèmes ANC combinent des filtrages fixes de type *feedback*, en boucle fermée, et *feedforward*, en boucle ouverte. La voie de filtrage *feedback* se base sur un signal recueilli par un microphone disposé à l'intérieur de la cavité acoustique (ci-après "cavité avant") délimitée par la coque de l'écouteur, le coussinet circumaural et le transducteur. En d'autres termes, ce microphone est disposé à proximité de l'oreille de l'utilisateur, et reçoit principalement le signal produit par le transducteur et le signal de bruit résiduel, non neutralisé, encore perceptible dans la cavité avant. Le signal de ce microphone, duquel est soustrait le signal audio de la source musicale à reproduire par le transducteur, constitue un signal d'erreur pour la boucle de rétroaction du système ANC. La voie de filtrage *feedforward*, quant à elle, utilise le signal capté par le microphone externe recueillant le bruit parasite régnant dans l'environnement immédiat du porteur du casque.

[0015] Un tel système est notamment décrit par le US 2010/0272276 A1 qui, outre les voies de filtrage *feedback* et *feedforward*, prévoit une troisième voie de filtrage, qui traite le signal audio issu de la source musicale à reproduire. Les signaux de sortie des trois voies de filtrage sont combinés et appliqués au transducteur pour reproduire le signal de la source musicale associé à un signal de suppression du bruit environnant.

[0016] Les paramètres des divers filtres étant fixes, les techniques à filtrage fixe peuvent être implémentées aussi bien en technologie analogique que numérique, de façon moins exigeante en termes de ressources que pour les techniques à filtres adaptatifs.

[0017] Les procédés à filtrage fixe présentent toutefois des limitations et des inconvénients.

[0018] Un premier inconvénient est la sensibilité relativement importante aux variations des chemins électroacoustiques entre le transducteur et le microphone d'erreur, c'est-à-dire le microphone interne placé dans la cavité avant. La réponse électro-acoustique entre ces deux éléments peut en effet être modifiée en raison des variations de volume de la cavité avant et de son étanchéité par rapport à l'extérieur. Les principaux facteurs susceptibles de faire varier cette réponse électro-acoustique sont le positionnement du casque sur la tête, la forme de l'oreille de l'utilisateur, les serrages différents du casque sur la tête, et la présence de cheveux à l'endroit où les coussinets circumauraux viennent en appui. D'autres variations peuvent être dues aux composants électroniques utilisés (résistances, condensateurs, transducteur et microphone), dont les caractéristiques électriques sont susceptibles de fluctuer au cours du temps.

[0019] Ces variations de réponse acoustique sont susceptibles de produire un effet indésirable appelé *waterbed effect* : au-delà de la bande de fréquences principale de suppression des bruits, le bruit va se trouver amplifié dans une bande de fréquences relativement étroite, en général autour de 1 kHz, de façon parfaitement perceptible et bien entendu nuisible. S'il est trop important ce phénomène peut même engendrer un effet Larsen, phénomène que l'on peut constater pour de nombreux casques lorsque le coussinet est accidentellement enlevé.

[0020] Un autre facteur à prendre en compte est le volume de la cavité avant, dans la mesure où un volume avant réduit augmente la variabilité de la réponse électroacoustique entre le transducteur et le microphone d'erreur, car dans ce cas la variation relative du volume entre la position normale d'écoute et la position de transition où l'utilisateur approche le casque sur sa tête sera plus importante.

[0021] Un faible volume de cavité avant est donc un facteur supplémentaire de perte de stabilité de la boucle de rétroaction, avec les mêmes conséquences que celles exposées plus haut. Or, en pratique il est souhaitable de réaliser des écouteurs de volume relativement réduit, tant pour des raisons de confort que de poids, ce qui va donc à l'encontre de l'exigence de stabilité du système ANC.

[0022] Concrètement, les réglages des diverses voies de filtrage sont ajustées de manière à produire des performances correspondant à une réponse électroacoustique donnée, pour des marges de gain et de phase permettant de garantir une stabilité suffisante et des performances maximales. On estime à cet égard qu'un système à boucle fermée doit en général présenter une marge de phase supérieure à 45° et une marge de gain d'au moins 10 dB. Mais ces marges théoriques s'avèrent souvent insuffisantes, du fait de la grande variabilité des réponses électroacoustiques rencontrées en pratique dans le domaine des casques à contrôle actif de bruit.

[0023] Le problème de l'invention est, dans un tel système ANC non adaptatif, de lutter contre les risques d'instabilité, avec des marges de gain et de phase accrues permettant, malgré un faible volume de cavité avant, d'éviter toute apparition d'effet *waterbed* ou Larsen en dépit des variations de mise en place du casque sur la tête, de serrage des écouteurs, d'étanchéité plus ou moins bonne au niveau des coussinets circumauraux.

[0024] Cette amélioration de la stabilité devra bien entendu être obtenue sans dégradation des performances antibruit du système ANC, c'est-à-dire que celui-ci devra conserver toute son efficacité de neutralisation des composantes de bruit parasite, quel que soit leur caractère plus ou moins périodique et leur spectre fréquentiel.

[0025] Bien entendu, le signal audio issu de la source musicale (ou la voix du locuteur distant, dans une application de téléphonie) ne devra pas être distordu et son spectre ne devra pas être amputé par le traitement ANC, bien que le signal de neutralisation de bruit et le signal audio à reproduire soient amplifiés par le même canal et reproduits par le même transducteur.

[0026] L'idée de base de l'invention consiste à réduire la bande passante du filtre *feedback* dans le haut du spectre, c'est-à-dire dans la zone fréquentielle instable, de manière à réduire, voire supprimer, les risques d'effet *water-bed* ou Larsen. Cette limitation de la bande passante pourra procurer, comme on le verra, une augmentation de la marge de gain d'au moins 15 dB, de préférence au moins 17 dB, et de la marge de phase d'au moins 45°, de préférence au moins 60°.

[0027] Parallèlement, le filtre *feedforward* compensera la perte en performances dans les fréquences supérieures du spectre de bruit à éliminer (c'est-à-dire autour de 1 kHz).

[0028] Enfin, un filtre stabilisateur est disposé en parallèle du filtre *feedback*. Ce filtre stabilisateur permet d'augmenter la marge de phase du filtre *feedback* grâce à l'augmentation de la phase dans la zone critique de l'effet *waterbed* : pour compenser la diminution de phase due à l'acoustique, en particulier du fait du chemin de propagation du son du transducteur jusqu'au microphone d'erreur, une résonance limitée est créée par le filtre stabilisateur afin de remonter la phase et augmenter ainsi la marge de phase.

[0029] Ces trois voies (*feedback*, *feedforward* et stabilisateur) sont agencées en parallèle, et les signaux délivrés en sortie des filtres sont combinés entre eux et avec le signal audio à reproduire au moyen d'un combineur délivrant une combinaison linéaire de ces différents signaux, pour amplification et reproduction par le transducteur.

[0030] Plus précisément, l'invention concerne un casque comportant un système de contrôle actif de bruit comportant, de manière en elle-même connue d'après le US 2010/0272276 A1 précité, deux écouteurs réunis par un arceau de maintien et comportant chacun un transducteur de reproduction sonore d'un signal audio à reproduire, transducteur logé dans une cavité acoustique

délimitée par une coque pourvue d'un coussinet circumaural. Ce casque comporte un système de contrôle actif de bruit avec :

- une première branche *feedforward* en boucle ouverte, avec un premier filtre passe-bande recevant en entrée un signal délivré par un microphone externe apte à capter un bruit acoustique régnant dans l'environnement du casque ;
- une deuxième branche *feedback* en boucle fermée, avec un deuxième filtre passe-bande recevant en entrée un signal d'erreur délivré par un microphone interne à la cavité ;
- une troisième branche avec un troisième filtre ; et
- un circuit de mixage, recevant en entrée les signaux délivrés par les premier, deuxième et troisième filtres ainsi que le signal audio à reproduire, et délivrant en sortie un signal apte, après amplification, à piloter le transducteur.

[0031] De façon caractéristique de l'invention :

- le contrôle actif de bruit est un contrôle non adaptatif, les paramètres des premier, deuxième et troisième filtres étant des paramètres prédéterminés ;
- le troisième filtre est un filtre passe-bande stabilisateur agencé en parallèle de la deuxième branche *feedback*, recevant en entrée le signal délivré par le microphone interne, et délivrant en sortie un signal appliqué en entrée du circuit combineur, ce troisième filtre étant apte à augmenter localement la phase de la fonction de transfert du deuxième filtre dans une zone d'instabilité prédéterminée ;
- les première, deuxième et troisième branches sont agencées en parallèle, et le circuit de mixage est un circuit sommateur délivrant en sortie une combinaison linéaire des signaux délivrés par les premier, deuxième et troisième filtres ainsi que d'au moins une fraction du signal audio à reproduire, avec pondération des gains respectifs appliqués à ces signaux.

[0032] La zone d'instabilité prédéterminée en question est notamment une zone d'effet *waterbed* autour d'une fréquence de 1 kHz.

[0033] La fréquence de coupure supérieure du deuxième filtre est de préférence inférieure à 150 Hz, de préférence inférieure à 120 Hz, et sa largeur de bande inférieure à 65 Hz, de préférence inférieure à 55 Hz.

[0034] La marge de gain de la branche *feedback* du contrôle actif de bruit est avantageusement d'au moins 15 dB, de préférence au moins 17 dB, et la marge de phase d'au moins 45°, de préférence au moins 60°.

[0035] Le signal audio à reproduire est de préférence appliqué en entrée à la fois du deuxième filtre et du circuit sommateur, le deuxième filtre recevant en entrée un signal obtenu par combinaison dudit signal d'erreur délivré par le microphone interne avec au moins une fraction du

signal audio à reproduire, et il n'est pas appliqué au troisième filtre.

[0036] On va maintenant décrire un exemple de mise en oeuvre du dispositif de l'invention, en référence aux dessins annexés où les mêmes références numériques désignent d'une figure à l'autre des éléments identiques ou fonctionnellement semblables.

La Figure 1 illustre de façon générale un casque audio reposant sur la tête d'un utilisateur.

La Figure 2 est une représentation schématique montrant les différents signaux acoustiques et électriques ainsi que les divers blocs fonctionnels impliqués dans le fonctionnement d'un casque audio à contrôle actif de bruit.

La Figure 3 est une coupe en élévation de l'un des écouteurs du casque selon l'invention, montrant la configuration des divers éléments mécaniques et organes électromécaniques de celui-ci.

La Figure 4 est une vue de face de l'écouteur de la Figure 3.

La Figure 5 est une vue de dos de l'écouteur des Figures 3 et 4.

La Figure 6 est une vue de dessous de l'écouteur des Figures 3 à 5.

La Figure 7 est une vue générale, sous forme de diagramme fonctionnel, des divers éléments du système de contrôle actif de bruit du casque de l'invention.

La Figure 8 illustre un exemple de réalisation, sous forme analogique, du filtre *feedforward* de la Figure 7.

La Figure 9 illustre un exemple de réalisation, sous forme analogique, du filtre *feedback* de la Figure 7.

La Figure 10 illustre un exemple de réalisation, sous forme analogique, du filtre stabilisateur de la Figure 7.

La Figure 11 est une caractéristique illustrant l'atténuation introduite par la coque de l'écouteur, rapportée à l'atténuation interne de la cavité avant de l'écouteur.

La Figure 12 représente, en amplitude et en phase, le diagramme de Bode de la fonction de transfert du filtre *feedforward* du circuit de la Figure 7.

La Figure 13 représente le lieu de Black du système de contrôle actif de bruit selon l'invention, avec et sans action du filtre stabilisateur.

La Figure 14 représente le module de la fonction de transfert du filtre *feedback* du circuit de la Figure 7 pour différentes configurations (avec bande passante complète, avec bande passante réduite, avec et sans filtre stabilisateur).

La Figure 15 représente la phase de la fonction de transfert du filtre *feed-back* du circuit de la Figure 7, également pour différentes configurations.

La Figure 16 est le tracé de Nyquist du circuit de la Figure 7, également pour différentes configurations. La Figure 17 représente la caractéristique d'atténua-

tion, en boucle fermée, du circuit de la Figure 7, également pour différentes configurations.

[0037] Sur la Figure 1, on a représenté un casque audio posé sur la tête de son utilisateur. Ce casque comporte, de manière en elle-même classique, deux écouteurs 10, 10' réunis par un arceau de maintien 12. Chacun des écouteurs 10 comprend une coque extérieure 14 venant s'appliquer sur le contour de l'oreille de l'utilisateur, avec interposition entre la coque 14 et la périphérie de l'oreille d'un coussinet souple circumaural 16 destiné à assurer une étanchéité satisfaisante, du point de vue acoustique, entre la région de l'oreille et l'environnement sonore extérieur.

[0038] La Figure 2 est une représentation schématique montrant les différents signaux acoustiques et électriques ainsi que les divers blocs fonctionnels impliqués dans le fonctionnement d'un casque audio à contrôle actif de bruit.

[0039] L'écouteur 10 enferme un transducteur de reproduction sonore 18, ci-après dénommé simplement "transducteur", porté par une cloison 20 définissant deux cavités, à savoir une cavité avant 22 du côté de l'oreille et une cavité arrière 24 du côté opposé.

[0040] La cavité avant 22 est définie par la cloison intérieure 18, la paroi 14 de l'écouteur, le coussinet 16 et la face externe de la tête de l'utilisateur dans la région de l'oreille. Cette cavité est une cavité fermée, à l'exception des inévitables fuites acoustiques dans la région de contact du coussinet 16.

[0041] La cavité arrière 24 est une cavité fermée, à l'exception d'un événement acoustique 26 permettant d'obtenir un renforcement des fréquences basses dans la cavité avant 22 de l'écouteur. Un tel renforcement acoustique est plus avantageux qu'une amplification électrique, car il permet une amélioration de l'effet de suppression du bruit ambiant par le système de contrôle actif, sans saturation et avec un bruit électrique moindre.

[0042] Pour le contrôle actif du bruit, l'écouteur 10 porte un microphone externe 28 destiné à capter le bruit environnant à l'extérieur de l'écouteur, schématisé par l'onde 30. Le signal recueilli par ce microphone externe 28 est appliqué à un étage de filtrage *feedforward* 32 du système de contrôle actif de bruit.

[0043] Chaque écouteur 10, 10' est muni de son propre système de contrôle actif de bruit, les microphones externes respectifs 28, 28' (Figure 1) étant indépendants l'un de l'autre.

[0044] Le casque peut éventuellement porter, comme illustré Figure 1, un autre microphone externe 34 destiné à des fonctions de communication, par exemple si le casque est pourvu de fonctions de téléphonie "mains-libres". Ce microphone externe additionnel 34 est destiné à capter la voix du porteur du casque, il n'intervient pas dans le contrôle actif du bruit et dans la suite on ne considérera comme microphone externe que le(s) microphone(s) 28 dédié(s) au contrôle actif du bruit.

[0045] Le casque est également pourvu d'un micro-

phone interne 36 disposé au plus près du conduit auditif de l'oreille, pour capter le bruit résiduel présent dans la cavité interne 22, bruit qui sera perçu par l'utilisateur.

[0046] En faisant abstraction du signal audio de la source musicale reproduite par le transducteur (ou de la voix du locuteur distant, dans une application de téléphonie), le signal acoustique capté par ce microphone interne 36 est une combinaison :

- du bruit résiduel 30 provenant de la transmission du bruit externe environnant 30 au travers de la coque 14 de l'écouteur, et
- d'une onde sonore 40 générée par le transducteur 18, qui est, idéalement, la copie inversée du bruit 38, c'est-à-dire du bruit à supprimer au point d'écoute, selon le principe des interférences destructives.

[0047] La neutralisation du bruit par l'onde sonore 40 n'étant jamais parfaite, le microphone interne 36 recueille un signal résiduel qui est utilisé comme signal d'erreur *e* appliqué à une branche de filtrage *feedback* 42 en boucle fermée et à une branche stabilisatrice 44 (spécifique à l'invention) dont les signaux sont combinés en 46 avec le signal de la branche *feedforward* en boucle ouverte 32 pour piloter le transducteur 18.

[0048] En outre, le transducteur 18 reçoit un signal audio à reproduire issu d'une source musicale (baladeur, radio, etc.), ou bien la voix du locuteur distant, dans une application de téléphonie. Comme ce signal subit les effets de la boucle fermée qui le distord, il sera prétraité en amont par une égalisation dans un processeur numérique de signal, de manière à présenter la fonction de transfert désirée, déterminée par le gain de la boucle ouverte et la réponse cible sans contrôle actif.

[0049] Les Figures 3 à 6 illustrent, selon plusieurs angles de vue, un exemple de réalisation des différents éléments mécaniques et électroacoustiques représentés schématiquement sur la Figure 2, pour l'un des écouteurs 10 (l'autre écouteur 10' étant réalisé identiquement).

[0050] On y retrouve la cloison 20 divisant l'intérieur de la coque 14 en une cavité avant 22 et une cavité arrière 24 avec, montés sur cette cloison, le transducteur 18 et le microphone interne 36 porté par une grille 48 maintenant celui-ci à proximité du conduit auditif de l'utilisateur. Sur les Figures 5 et 6, on a également représenté le microphone externe 28 dédié au contrôle actif de bruit et le microphone additionnel 34 pour les fonctions de communication "mains-libres", ainsi que l'événement 26, constitué par exemple d'une série de petits trous recouverts d'une grille en matière plastique acoustiquement résistive.

[0051] La Figure 7 illustre sous forme de schéma par blocs le circuit de contrôle actif de bruit selon l'invention, avec les fonctions de transfert électriques et acoustiques impliquées dans le fonctionnement de ce circuit.

[0052] Le circuit comporte essentiellement trois branches agencées en parallèle, avec un filtre *feedforward*

32, un filtre *feedback* 42 et un filtre stabilisateur 44.

[0053] Le signal recueilli par le microphone externe 28 est préamplifié par un gain G1 (par exemple G1 = +8 dB), puis est appliqué au filtre *feedforward* 32.

[0054] Le signal recueilli par le microphone interne 36 est appliqué concurremment au filtre stabilisateur 44 et au filtre *feedback* 42, avec application de gains respectifs G2 (par exemple G2 = 0 dB), et G3 (par exemple G3 = +9 dB).

[0055] Les signaux issus en parallèle des filtres 32, 44 et 42 sont combinés entre eux par un sommateur 46 avec application de gains respectifs G5, G6 et G7 (par exemple G5 = -6 dB pour le signal issu du filtre *feedforward* 32, G6 = +6 dB pour le signal issu du filtre stabilisateur 44 et G7 = 0 dB pour le signal issu du filtre *feedback* 42).

[0056] Le signal audio S (signal *line-in*) issu de la source musicale (baladeur MP3, radio, etc.) ou des circuits de téléphonie fait l'objet d'un traitement numérique (décodage, égalisation, effets audio tels que spatialisation, etc.) par un processeur numérique de signal ou DSP 50. Par ailleurs, comme ce signal subit les effets de la boucle fermée qui le distord, il est prétraité en amont dans le DSP 50 par une égalisation appropriée, de manière à présenter la fonction de transfert désirée, déterminée par le gain de la boucle ouverte et la réponse cible sans contrôle actif.

[0057] Le signal audio en sortie du DSP 50 est appliqué au circuit de contrôle actif en deux endroits, respectivement :

- avec application d'un gain G4 (par exemple G4 = -14 dB), au filtre *feed-back* 42, et
- avec application d'un gain G8 (par exemple G4 = -6 dB), à un sommateur 52 qui combinera ce signal à celui capté par le microphone interne 36 après que ce dernier ait été préamplifié du gain G3, pour l'appliquer en entrée du filtre *feedback* 42.

[0058] L'injection du signal audio à reproduire S en deux endroits différents du circuit permet d'obtenir une égalisation équilibrée entre les fréquences graves et les fréquences aiguës. En effet, la partie du signal injectée en entrée du sommateur général 46 subira l'atténuation du contrôle actif, ce qui donnera des composantes fréquentielles aiguës ; à l'opposé, la partie du signal injectée sur le sommateur 52 en entrée du filtre *feedback* 42 subira le filtrage passe-bas du circuit, donnant des composantes fréquentielles graves. Les gains respectifs G8 et G4 appliqués à ces deux parties de signal permettent d'équilibrer les graves et les aigus du spectre du signal à reproduire.

[0059] On notera que le signal audio à reproduire est injecté uniquement en entrée du filtre *feedback* 42 (via le sommateur 52), mais ne l'est pas dans la branche du filtre stabilisateur 44, ce qui permet d'ajuster ce filtrage stabilisateur sans perturber l'égalisation de la musique à reproduire : en effet, le filtre stabilisateur 44 ne reçoit que le son capté par le microphone interne 36, à l'exclu-

sion du signal audio à reproduire, qui n'interfère donc pas sur la fonction de stabilisation.

[0060] Enfin, le signal de sortie du sommateur général 46, qui est une combinaison linéaire des signaux issus des trois voies de filtrage *feedforward*, *feedback* et de stabilisation ainsi que du signal audio à reproduire, est appliqué au transducteur 18 après amplification par un étage de puissance 54.

[0061] Les Figures 8, 9 et 10 illustrent des exemples de réalisation, en technologie analogique, respectivement des filtres *feedforward* 32, *feedback* 42 et stabilisateur 44. Sur ces figures, V_i et V_o indiquent aux tensions respectivement d'entrée et de sortie des filtres, et V_{mid} indique la tension milieu entre les bornes positives et négatives de l'alimentation de l'amplificateur opérationnel utilisé par le filtre. On décrira plus en détail, en référence aux Figures 12 à 17, les fonctions de transfert respectives de ces différents filtres et la manière dont notamment le filtre stabilisateur 44 permet de modifier la réponse du filtre *feedback* 42 de manière à augmenter les performances globales du système de contrôle actif de bruit.

[0062] Comme on peut le constater, ces trois filtres peuvent être réalisés avec un minimum de composants, donc avec un coût matériel très faible.

[0063] Par ailleurs, dans les exemples illustrés, les filtres *feedforward* 32 et *feed-back* 42 sont réalisés sous forme de filtres passe-bas d'ordre 1, mais il est possible sans difficulté de réaliser des filtres passe-bande d'ordre 2 par modification des éléments résistifs et capacitifs.

[0064] On va maintenant décrire le fonctionnement général du système de contrôle actif de bruit selon l'invention, dont on vient de présenter l'architecture générale.

[0065] On utilisera les notations suivantes :

- H_c : fonction de transfert entre le signal reçu par le microphone externe 28 et le signal reçu par le microphone interne 36, représentative de la fraction du bruit extérieur qui a traversé la coque de l'écouteur du casque ;
- H_o : fonction de transfert entre le signal reproduit par le transducteur 18 et le signal reçu par le microphone externe 28, représentative de la fraction de signal acoustique qui a été transmise par la coque de l'écouteur jusqu'au microphone externe ;
- H_a : fonction de transfert entre le signal produit par le transducteur 18 et le signal reçu par le microphone interne 36 ;
- d : signal de bruit environnant (signal de bruit à atténuer, idéalement à neutraliser par le contrôle actif) ;
- e : signal d'erreur délivré par le microphone interne 36 (signal que l'on souhaite minimiser),
- H_{FF} : fonction de transfert du filtre *feedforward* 32 (qui est une fonction fixe, non adaptative),
- H_{FB} : fonction de transfert du filtre *feedback* 42 (qui est également une fonction fixe), le cas échéant modifiée par la mise en oeuvre du filtre stabilisateur 44.

[0066] Si l'on cherche à représenter le signal d'erreur e en fonction du signal de bruit d , on obtient la fonction de transfert suivante du microphone externe 28 vers le microphone interne 38 (ce microphone, situé au plus près du conduit auditif de l'utilisateur, représentant le signal perçu au point d'écoute) :

$$\frac{e}{d} = \frac{H_c + H_{FF}(H_a + H_o) + \varepsilon}{1 - H_{FB}(H_a + H_o)}$$

[0067] Le terme ε représente tous les rebouclages d'ordres supérieurs ou égaux à 2 ; concrètement, ce terme est négligeable devant les autres termes du numérateur et on en fera abstraction. Par ailleurs $|H_o| \ll |H_a|$, car H_o contient l'atténuation supplémentaire due à la coque de l'écouteur.

[0068] La Figure 8 illustre un exemple de relevé en fonction de la fréquence du module de H_o/H_a , qui représente donc l'atténuation de la coque de l'écouteur par rapport à l'atténuation interne de la cavité.

[0069] Si l'on fait l'approximation $|H_o| \ll |H_a|$, la fonction de transfert du bruit peut donc se simplifier pour donner :

$$\frac{e}{d} = \frac{H_c + H_{FF}H_a}{1 - H_{FB}H_a}$$

[0070] Pour que le bruit recueilli par le microphone interne soit faible, c'est-à-dire pour minimiser le signal d'erreur, il faut que :

$$\frac{e}{H_c d} = \frac{1 + \frac{H_a H_{FF}}{H_c}}{1 - H_a H_{FB}}$$

[0071] Du point de vue de la stabilité, la stabilité du *feedforward* H_{FF} est supérieure à celle du *feedback* H_{FB} du fait de l'absence de boucle de rétroaction (le *feedforward* opère en boucle ouverte).

[0072] En revanche, comme on l'a expliqué en introduction, le *feedforward* et le *feedback* ont tendance à produire un effet indésirable d'amplification du bruit dans une petite bande de fréquences au-delà de la bande de suppression du bruit, en général autour de 1 kHz ("waterbed effect"). De plus, avec la rétroaction du filtre *feedback*, cet effet peut rapidement s'emballer et se transformer en effet Larsen.

[0073] Or, bien que le *feedforward* soit plus stable, il ne peut pas être utilisé sans *feedback*, car la suppression

de bruit qu'il procure seul est moins efficace. En effet, pour avoir une suppression parfaite, il faudrait que $H_{FF} = H_o/H_a$, ce qui est difficile à atteindre car H_o et H_a sont très variables pour les raisons citées plus haut : volume avant variable et réduit, position et serrage du casque, etc. En pratique, la suppression de bruit par un filtre *feedforward* seul est typiquement proche de 10 dB, alors qu'avec un *feedback* il est possible d'atteindre 20 dB.

[0074] L'invention permet précisément de pallier les inconvénients que l'on vient d'exposer. Essentiellement, l'invention propose :

1°) de réduire la bande de fréquences du filtre *feedback*, de manière à augmenter les marges de gain et de phase (typiquement à au moins 15 dB et 60°), notamment dans la zone fréquentielle où se situent les risques d'instabilité incontrôlée ;

2°) de compenser par le filtre *feedforward* la baisse corrélative de performances dans les plus hautes fréquences (jusqu'à 1 kHz) ; et

3°) de réduire l'effet *waterbed* par un filtre stabilisateur associé au filtre *feedback*, ce qui permet de diminuer, voire de supprimer, les risques d'effet Larsen.

[0075] On notera que l'augmentation des marges de gain et de phase par une réduction de la bande passante a été choisie de préférence à une réduction du gain en boucle ouverte (qui aurait également permis d'augmenter ces marges) : une réduction du gain en boucle ouverte présente en effet l'inconvénient de réduire les performances maximales du contrôle actif de bruit, à l'opposé d'une réduction de la bande passante, qui ne réduit que la bande de fréquences d'atténuation du circuit de contrôle du bruit. C'est donc pour ne pas réduire l'atténuation maximale du bruit que la réduction de la bande passante a été choisie de préférence à une réduction du gain en boucle ouverte du filtre *feedback*.

[0076] En ce qui concerne le filtre *feedforward*, celui-ci est plus stable car il opère en boucle ouverte. Il peut donc être utilisé dans les fréquences les plus hautes (jusqu'à 1 kHz) pour compenser la perte de bande passante du filtre *feedback*. Ce filtre *feedforward* présente un gain faible et un facteur de qualité faible par rapport à celui du filtre *feedback*, et ses performances sont ajustées pour couvrir une large bande de fréquences.

[0077] La Figure 12 illustre le diagramme de Bode (amplitude et phase en fonction de la fréquence) de ce filtre *feedforward* 32.

[0078] En ce qui concerne le filtre stabilisateur 44, sa mise en parallèle avec le filtre *feedback* 42 permet d'augmenter la marge de phase de ce dernier notamment dans la zone critique de l'effet *waterbed*. Et pour compenser la diminution de phase due à l'acoustique, en particulier du fait du chemin acoustique de propagation du son du transducteur vers le microphone d'erreur (fonction de transfert H_a) le filtre stabilisateur crée une résonance locale dans cette zone permettant d'accroître la phase

et augmenter ainsi la marge de phase.

[0079] Ces différents aspects sont visibles en particulier sur les exemples de diagrammes des Figures 13 à 17.

[0080] La Figure 13 illustre le lieu de Black du système, c'est-à-dire la représentation cartésienne du module de la boucle ouverte ($H_a H_{FB}$) en fonction de sa phase, en faisant varier la fréquence de 0 Hz à l'infini. En traçant ce lieu de Black, on peut facilement lire les marges de gain et de phase, qui sont données par l'intersection du lieu avec les deux axes passant par le point d'instabilité O, situé à 0 dB et 0°.

[0081] Sur la Figure 13, on a tracé en trait interrompu le lieu de Black avec le filtre *feedback* seul avant réduction de la bande passante, et en trait continu ce même filtre mais avec la bande passante réduite (mais sans le stabilisateur). Initialement, les marges de gain et de phase ΔM et $\Delta \phi$ sont respectivement de -12 dB et 25°, et l'on voit que la réduction de la bande passante permet d'acquiescer ces valeurs à respectivement +18 dB et plus de 60°.

[0082] Les Figures 14 à 17 représentent, pur le circuit de la figure 7 :

- Figure 14 : le module de la fonction de transfert du filtre *feedback* ;
- Figure 15 : la phase de la fonction de transfert du filtre *feedback* ;
- Figure 16 : le tracé de Nyquist ;
- Figure 17 : la caractéristique d'atténuation, en boucle fermée.

[0083] On a représenté sur ces figures :

- en A la caractéristique correspondant au filtre *feedback* originel avec sa préamplification G3, avant réduction de la bande passante ;
- en B cette même caractéristique A, mais après réduction de la bande passante ; et
- en C la caractéristique finale, c'est-à-dire la caractéristique B après adjonction du filtre stabilisateur 44 avec sa préamplification G2.

[0084] Comme on peut le voir en comparant sur la Figure 14 les caractéristiques A et B (ou C), la bande passante originelle du filtre qui était de 80-160 Hz, soit une largeur de 80 Hz (caractéristique A) a été réduite à 65-115 Hz, soit une largeur de 50 Hz, réduite (caractéristique B ou C).

[0085] Cette réduction de bande passante permet, comme on l'avait vu à l'examen de la Figure 13, d'augmenter sensiblement les marges de gain et de phase et de contribuer ainsi à une stabilité accrue du système.

[0086] L'examen de la Figure 15 montre que l'utilisation du filtre stabilisateur 44 augmente sensiblement, d'environ 30 à 35°, la phase dans la zone instable de l'effet *waterbed*, autour de 1 kHz.

[0087] On constate sur la Figure 16 que cette augmentation de phase éloigne notablement la boucle ouverte

de la zone d'instabilité. Cette figure est un tracé de Nyquist sur lequel on a indiqué en trait interrompu la zone N d'amplification du bruit. Comme on peut le constater, dans aucune des trois configurations A, B ou C le système n'entoure le point d'instabilité O : ces systèmes sont donc théoriquement tous stables. Toutefois, la réduction de la bande passante du filtre *feedback* (passage de A à B) et son association avec un filtre stabilisateur (passage de B à C) éloigne à chaque fois le tracé du point d'instabilité, contribuant ainsi à une meilleure stabilité globale du système.

[0088] La courbe d'atténuation théorique de la Figure 17 montre que la zone de l'effet *waterbed* à 1 kHz est diminuée. On peut noter que la zone d'effet *waterbed* à 6 kHz est dégradée mais ne dépasse pas 4 dB, comme celle à 1 kHz. Cette figure illustre l'atténuation simulée de la boucle fermée, où l'on peut constater une réduction de la profondeur de l'effet *waterbed* dans la zone des 1 kHz du système A vers le système B (amélioration de 4 dB) et du système B vers le système C (amélioration de +3 dB). La perte d'atténuation, d'environ -5 dB, constatée dans la zone 100-800 Hz entre le système A et le système B ou C sera compensée par le contrôle actif procuré par le filtre *feedforward* fixe 32.

Revendications

1. Un casque audio, comprenant deux écouteurs (10) réunis par un arceau de maintien (12) et comportant chacun un transducteur (18) de reproduction sonore d'un signal audio à reproduire, ce transducteur étant logé dans une cavité acoustique délimitée par une coque (14) pourvue d'un coussinet circumaural (16), ce casque comportant un système de contrôle actif de bruit comprenant :

- une première branche *feedforward* en boucle ouverte, avec un premier filtre passe-bande (32) recevant en entrée un signal délivré par un microphone externe (28) apte à capter un bruit acoustique (30) régnant dans l'environnement du casque ;
- une deuxième branche *feedback* en boucle fermée, avec un deuxième filtre passe-bande (42) recevant en entrée un signal d'erreur (e) délivré par un microphone (36) interne à la cavité ;
- une troisième branche avec un troisième filtre (44) ; et
- un circuit de mixage (46), recevant en entrée les signaux délivrés par les premier, deuxième et troisième filtres ainsi que le signal audio à reproduire (S), et délivrant en sortie un signal apte, après amplification (54), à piloter le transducteur (18),

caractérisé en ce que :

- le contrôle actif de bruit est un contrôle non adaptatif, les paramètres des premier, deuxième et troisième filtres (32, 42, 44) étant des paramètres prédéterminés ;
 - le troisième filtre (44) est un filtre passe-bande stabilisateur agencé en parallèle de la deuxième branche *feedback*, recevant en entrée le signal délivré par le microphone interne, et délivrant en sortie un signal appliqué en entrée du circuit combineur, ce troisième filtre étant apte à augmenter localement la phase de la fonction de transfert du deuxième filtre dans une zone d'instabilité prédéterminée ;
 - les première, deuxième et troisième branches sont agencées en parallèle, et le circuit de mixage est un circuit sommateur (46) délivrant en sortie une combinaison linéaire des signaux délivrés par les premier, deuxième et troisième filtres (32, 42, 44) ainsi que d'au moins une fraction du signal audio à reproduire (S), avec pondération des gains respectifs (G5-G8) appliqués à ces signaux.
2. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel ladite zone d'instabilité prédéterminée est une zone d'effet *waterbed* autour d'une fréquence de 1 kHz. 25
 3. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel la fréquence de coupure supérieure du deuxième filtre est inférieure à 150 Hz, de préférence inférieure à 120 Hz. 30
 4. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel la largeur de bande du deuxième filtre est inférieure à 65 Hz, de préférence inférieure à 55 Hz. 35
 5. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel la marge de gain de la branche *feedback* du contrôle actif de bruit est d'au moins 15 dB, de préférence au moins 17 dB. 40
 6. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel la marge de phase de la branche *feedback* du contrôle actif de bruit est d'au moins 45°, de préférence au moins 60°. 45
 7. Le casque audio de la revendication 1, dans lequel le signal audio à reproduire (S) est appliqué en entrée à la fois du deuxième filtre (42) et du circuit sommateur (46), le deuxième filtre recevant en entrée un signal obtenu par combinaison (52) dudit signal d'erreur (e) délivré par le microphone interne (36) avec au moins une fraction du signal audio à reproduire. 50
 8. Le casque audio de la revendication 7, dans lequel le signal audio à reproduire (S) n'est pas appliqué 55

au troisième filtre (44).

Patentansprüche

1. Kopfhörer, der zwei Hörer (10) umfasst, die durch einen Haltebügel (12) miteinander verbunden sind und jeweils einen Wandler (18) zur Schallwiedergabe eines wiederzugebenden Audiosignals enthalten, wobei sich dieser Wandler in einem Schallhohlraum befindet, der durch eine Schale (14) begrenzt ist, der mit einem das Ohr umgebenden Kissen (16) versehen ist, wobei dieser Kopfhörer ein aktives Rauschsteuersystem umfasst, das seinerseits umfasst:

- einen ersten Vorwärtskopplungsweig mit offener Schleife, der ein erstes Bandpassfilter (32) enthält, das an seinem Eingang ein Signal empfängt, das von einem externen Mikrofon (28) geliefert wird, das akustisches Rauschen (30) aufnehmen kann, das in der Umgebung des Kopfhörers herrscht;
- einen zweiten Rückkopplungsweig mit geschlossener Schleife, der ein zweites Bandpassfilter (42) enthält, das am Eingang ein Fehlersignal (e) empfängt, das von einem Mikrofon (36) innerhalb des Hohlraums geliefert wird;
- einen dritten Zweig mit einem dritten Filter (44) ; und
- eine Mischungsschaltung (46), die am Eingang die von dem ersten, dem zweiten und dem dritten Filter gelieferten Signale sowie das wiederzugebende Audiosignal (S) empfängt und am Ausgang ein Signal liefert, das nach Verstärkung (54) den Wandler (18) steuern kann,

dadurch gekennzeichnet, dass:

- die aktive Rauschsteuerung eine nicht adaptive Steuerung ist, wobei die Parameter des ersten, des zweiten und des dritten Filters (32, 42, 44) vorgegebene Parameter sind;
- das dritte Filter (44) ein Stabilisator-Bandpassfilter ist, das parallel zu dem zweiten Rückkopplungsweig angeordnet ist und am Eingang das von dem internen Mikrofon gelieferte Signal empfängt und am Ausgang ein Signal liefert, das in den Eingang der Kombinierschaltung eingegeben wird, wobei dieses dritte Filter dafür ausgelegt ist, die Phase der Übertragungsfunktion des zweiten Filters in einer vorgegebenen Instabilitätszone lokal zu erhöhen;
- wobei der erste, der zweite und der dritte Zweig parallel geschaltet sind und die Mischungsschaltung eine Summationsschaltung (46) ist,

die am Ausgang eine Linearkombination der von dem ersten, dem zweiten und dem dritten Filter (32, 42, 44) gelieferten Signale sowie wenigstens einen Bruchteil des wiederzugebenden Audiosignals (S) mit Gewichtung der jeweiligen Verstärkungen (G5-G8), die auf diese Signale angewendet werden, liefert.

2. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei die vorgegebene Instabilitätszone eine Zone mit Wasserbettwirkung um eine Frequenz von 1 kHz ist.
3. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei die obere Kapungsfrequenz des zweiten Filters niedriger als 150 Hz, vorzugsweise niedriger als 120 Hz, ist.
4. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei die Bandbreite des zweiten Filters kleiner als 65 Hz, vorzugsweise kleiner als 55 Hz, ist.
5. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei der Verstärkungsbereich des Rückkopplungszeigs der aktiven Rauschsteuerung wenigstens 15 dB, vorzugsweise wenigstens 17 dB, ist.
6. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei der Phasenbereich des Rückkopplungszeigs der aktiven Rauschsteuerung wenigstens 45°, vorzugsweise wenigstens 60°, ist.
7. Kopfhörer nach Anspruch 1, wobei das wiederzugebende Audiosignal (S) in den Eingang sowohl des zweiten Filters (42) als auch der Summationsschaltung (46) eingegeben wird, wobei das zweite Filter am Eingang ein Signal empfängt, das durch Kombination (52) des von dem internen Mikrophon (36) gelieferten Fehlersignals (e) mit wenigstens einem Bruchteil des wiederzugebenden Audiosignals erhalten wird.
8. Kopfhörer nach Anspruch 7, wobei das wiederzugebende Audiosignal (S) in das dritte Filter (44) nicht eingegeben wird.

Claims

1. An audio headset, comprising two earphones (10) connected to each other by a holding bow (12) and each including a transducer (18) for sound reproduction of an audio signal to be reproduced, said transducer being accommodated in an acoustic cavity delimited by a shell (14) provided with a circumaural pad (16), said headset including a active noise control system comprising:

- a first, open-loop, feedforward branch, with a

first pass-band filter (32) receiving as an input a signal delivered by an external microphone (28) adapted to pick-up an acoustic noise (30) present in the environment of the headset;
 - a second, closed-loop, feedback branch, with a second pass-band filter (42) receiving as an input an error signal (e) delivered by a microphone (36) internal to the cavity;
 - a third branch with a third filter (44); and
 - a mixing circuit (46), receiving as an input the signals delivered by the first, second and third filters as well as the audio signal to be reproduced (S), and delivering as an output a signal adapted, after amplification (54), to pilot the transducer (18),

characterized in that:

- the active noise control is a non-adaptive control, the parameters of the first, second and third filters (32, 42, 44) being predetermined parameters;
 - the third filter (44) is a stabilizing band-pass filter arranged parallel to the second feedback branch, receiving as an input the signal delivered by the internal microphone, and delivering as an input a signal applied at the input of the combiner circuit, said third filter being adapted to locally increase the phase of the transfer function of the second filter in a predetermined area of instability;
 - the first, second and third branches are arranged parallel to each other, and the mixing circuit is a summing circuit (46) delivering as an output a linear combination of signals delivered by the first, second and third filters (43, 42, 44) as well as at least one fraction of the audio signal to be reproduced (S), with a weighting of the respective gains (G5-G8) applied to these signals.

2. The audio headset of claim 1, wherein said predetermined area of instability is an area of waterbed effect around a frequency of 1 kHz.
3. The audio headset of claim 1, wherein the upper cut frequency of the second filter is lower than 150 Hz, preferably lower than 120 Hz.
4. The audio headset of claim 1, wherein the bandwidth of the second filter is lower than 65 Hz, preferably lower than 55 Hz.
5. The audio headset of claim 1, wherein the gain margin of the feedback branch of the active noise control is at least 15 dB, preferably at least 17 dB.
6. The audio headset of claim 1, wherein the phase

margin of the feedback branch of the active noise control is at least 45° , preferably at least 60° .

7. The audio headset of claim 1, wherein the audio signal to be reproduced (S) is applied at the input of both the second filter (42) and the summing circuit (46), the second filter receiving as an input a signal obtained by combination (52) of said error signal (e) delivered by the internal microphone (36) with at least one fraction of the audio signal to be reproduced.
8. The audio headset of claim 7, wherein the audio signal to be reproduced (S) is not applied to the third filter (44).

20

25

30

35

40

45

50

55

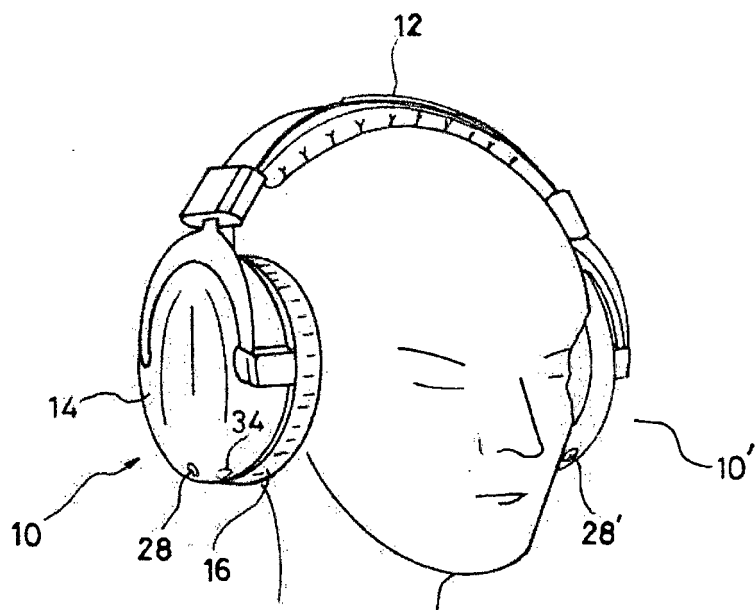


FIG. 1

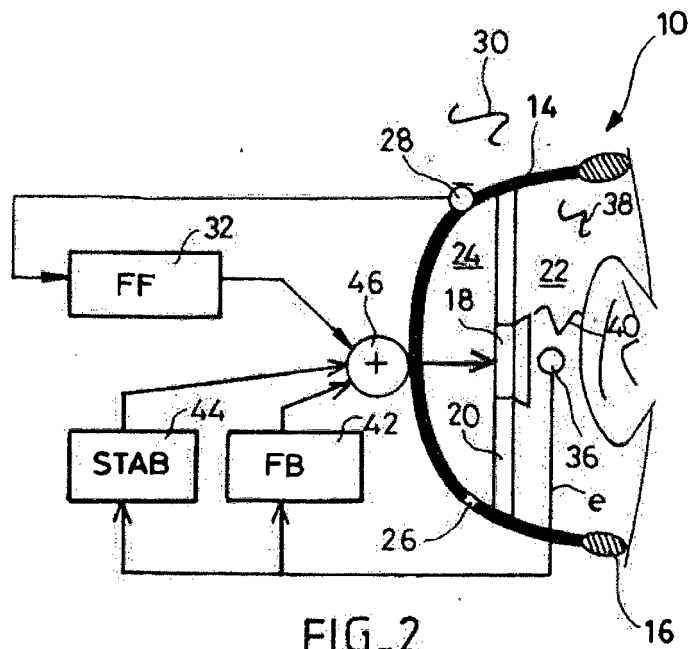


FIG. 2

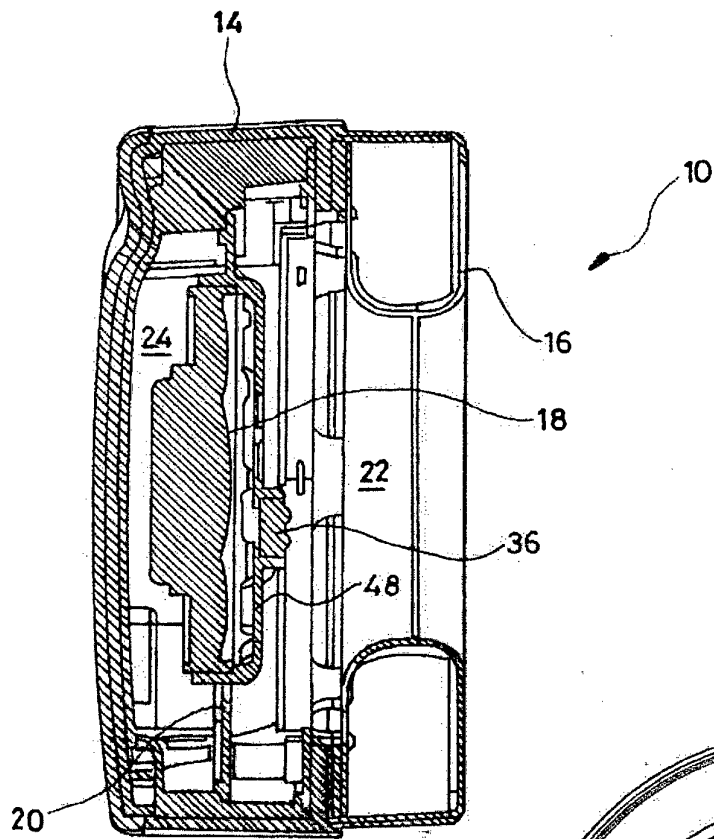


FIG-3

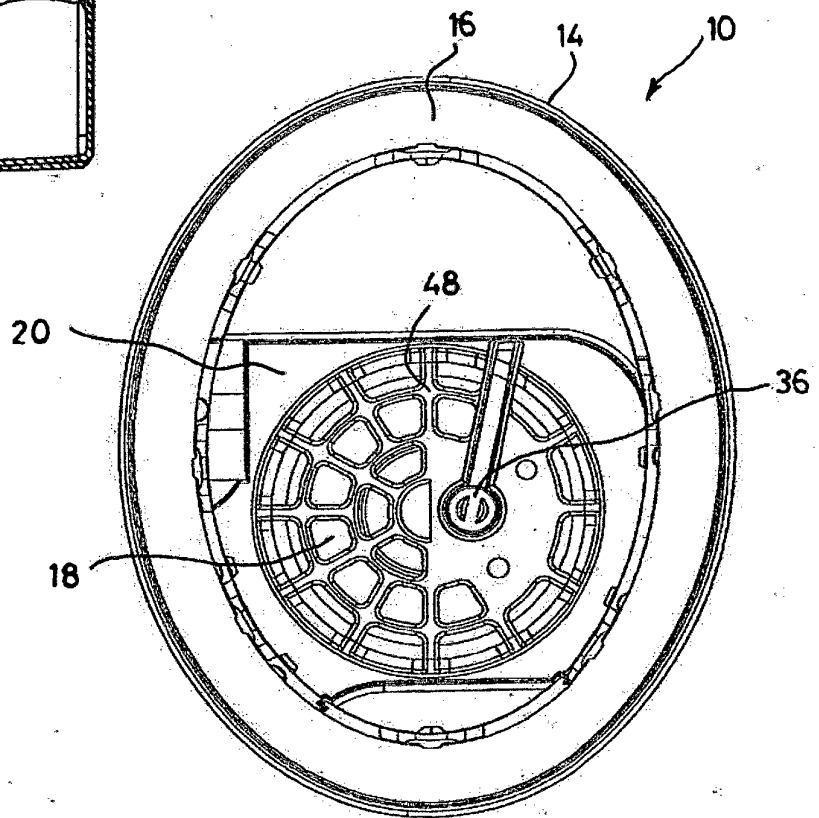
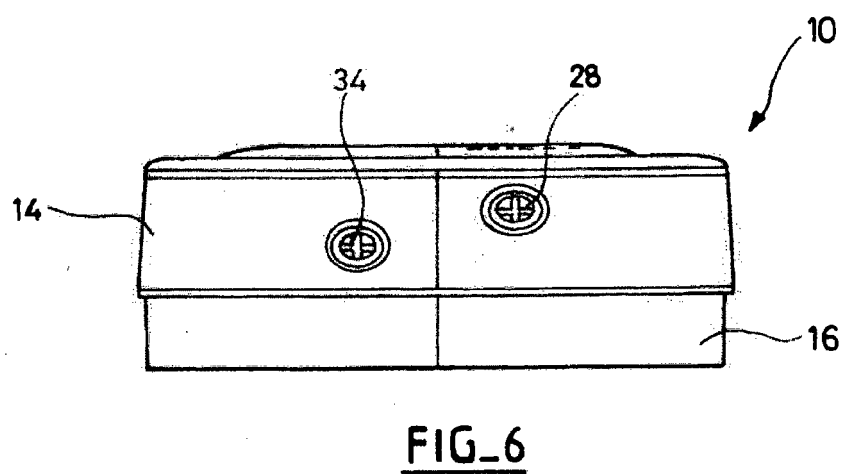
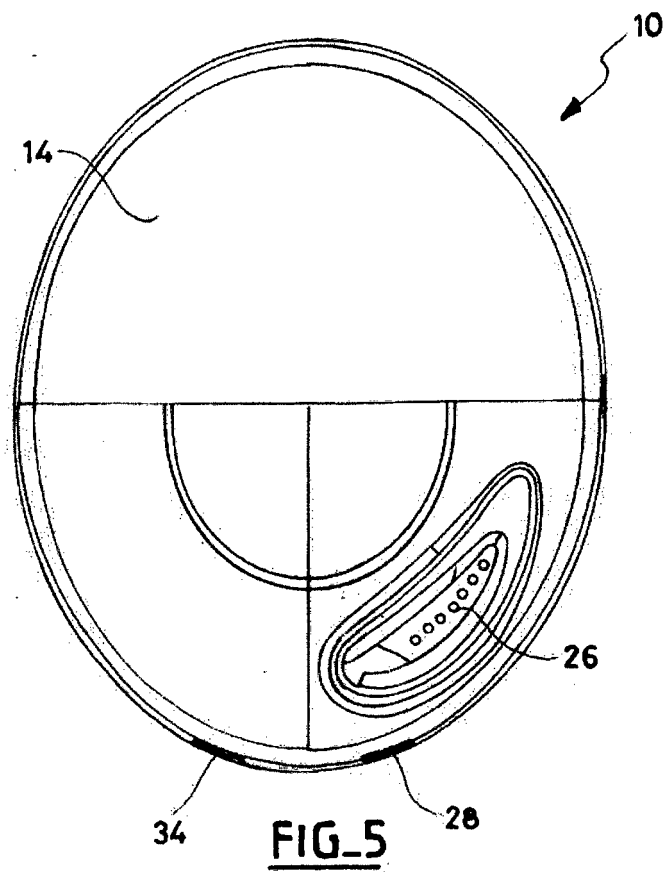


FIG-4



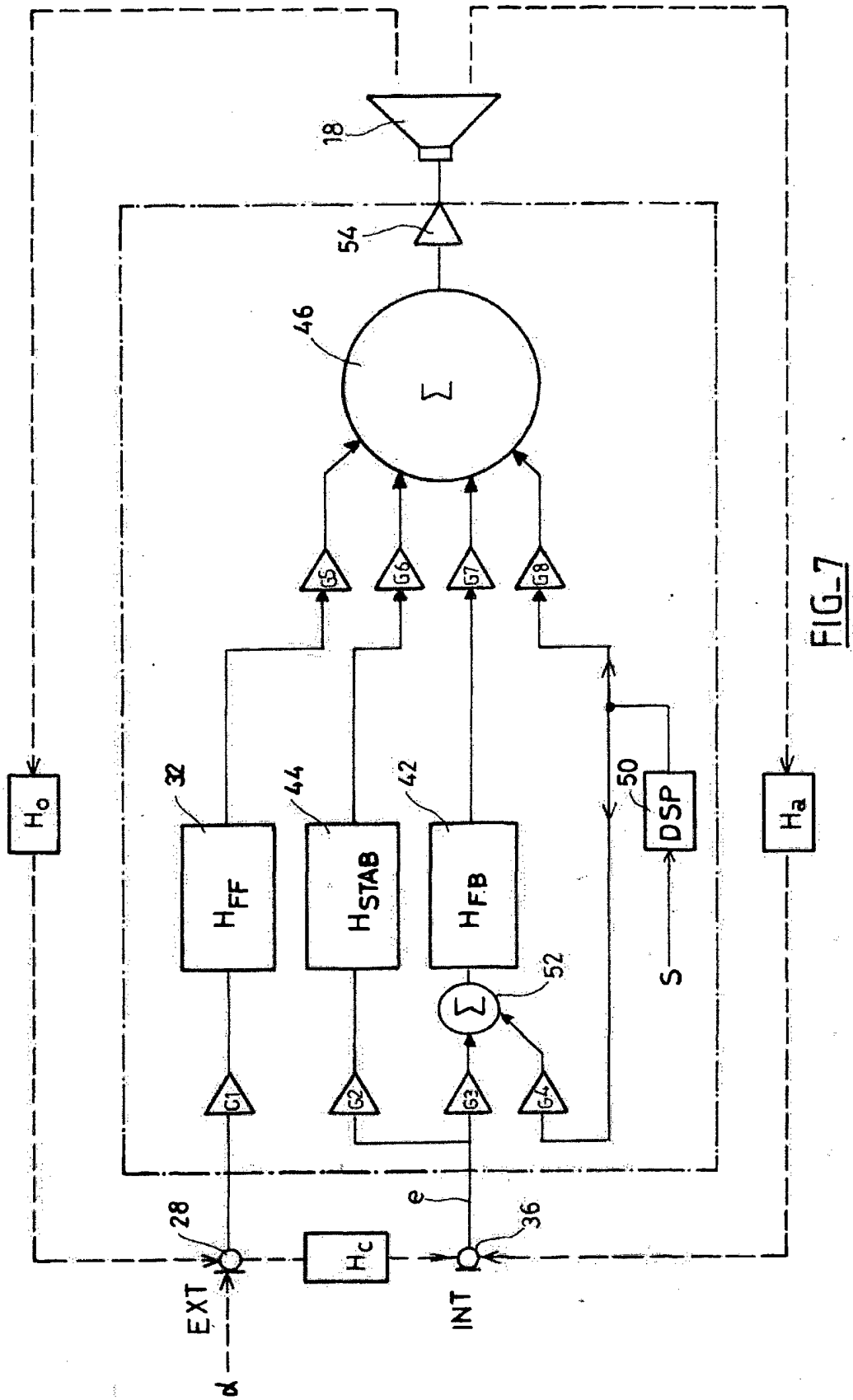
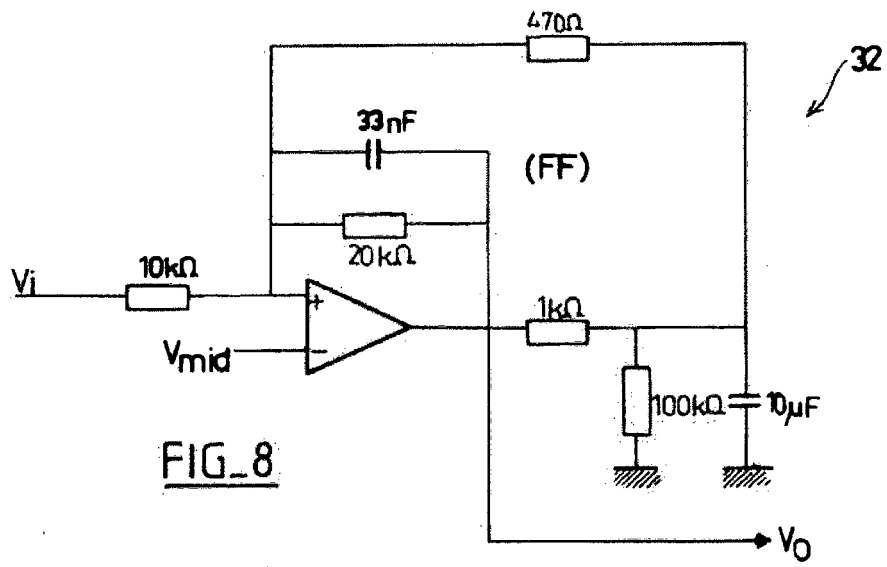
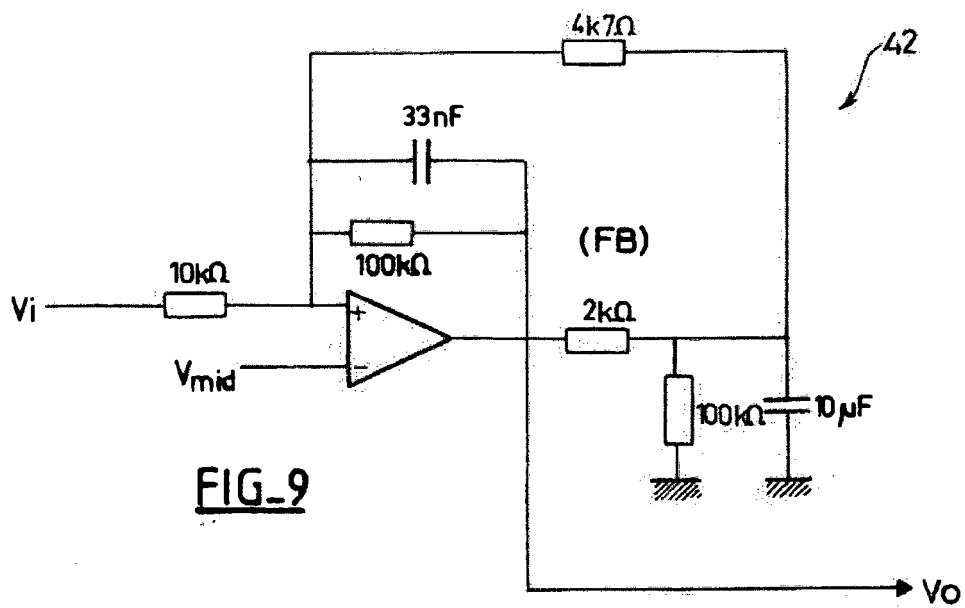


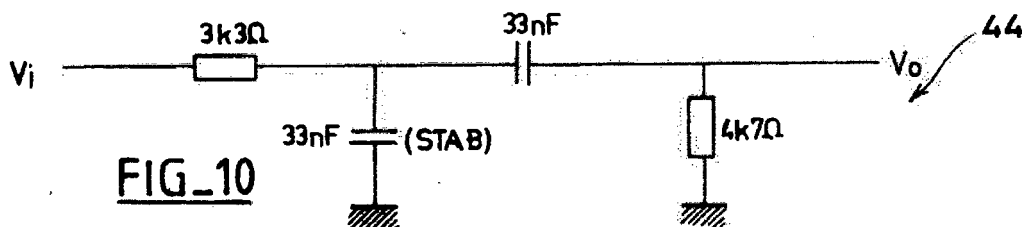
FIG-7



FIG_8



FIG_9



FIG_10

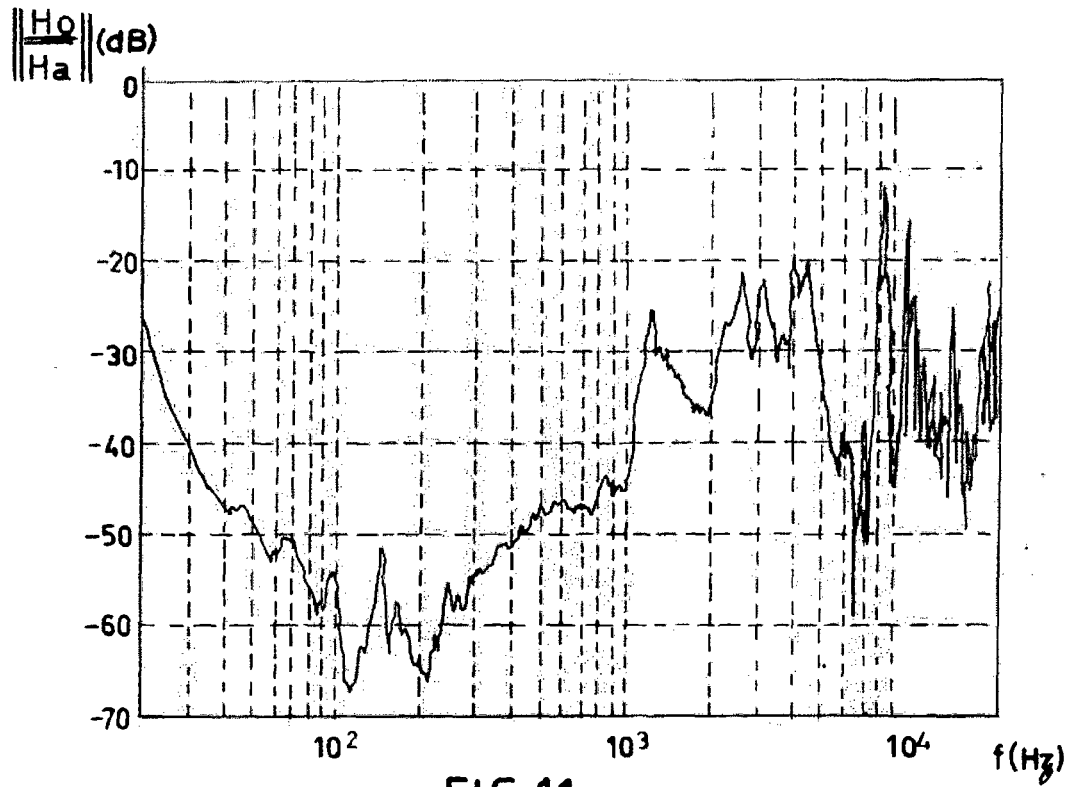


FIG-11

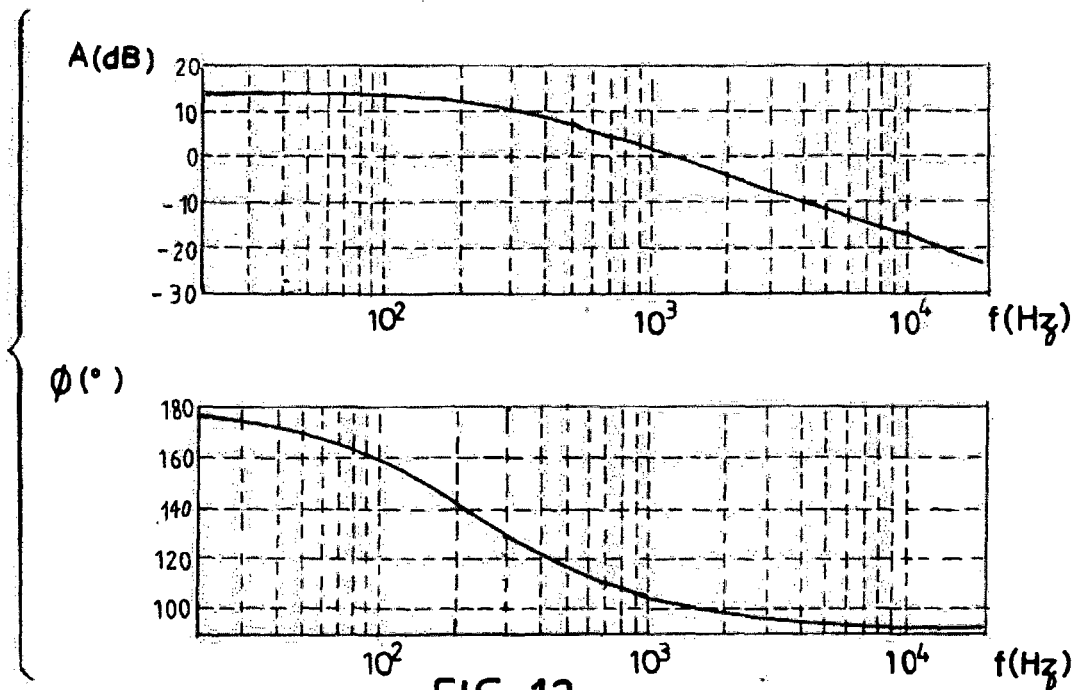
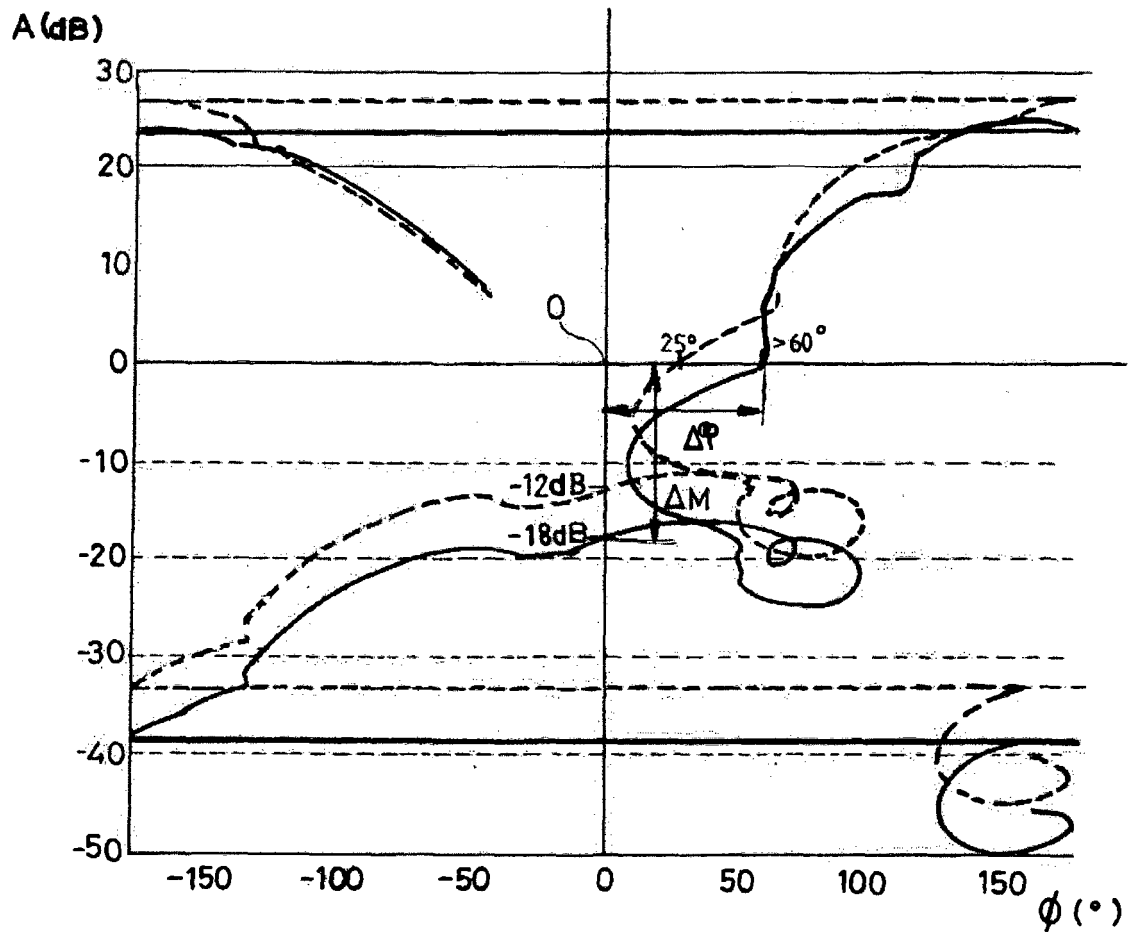


FIG-12



FIG_13

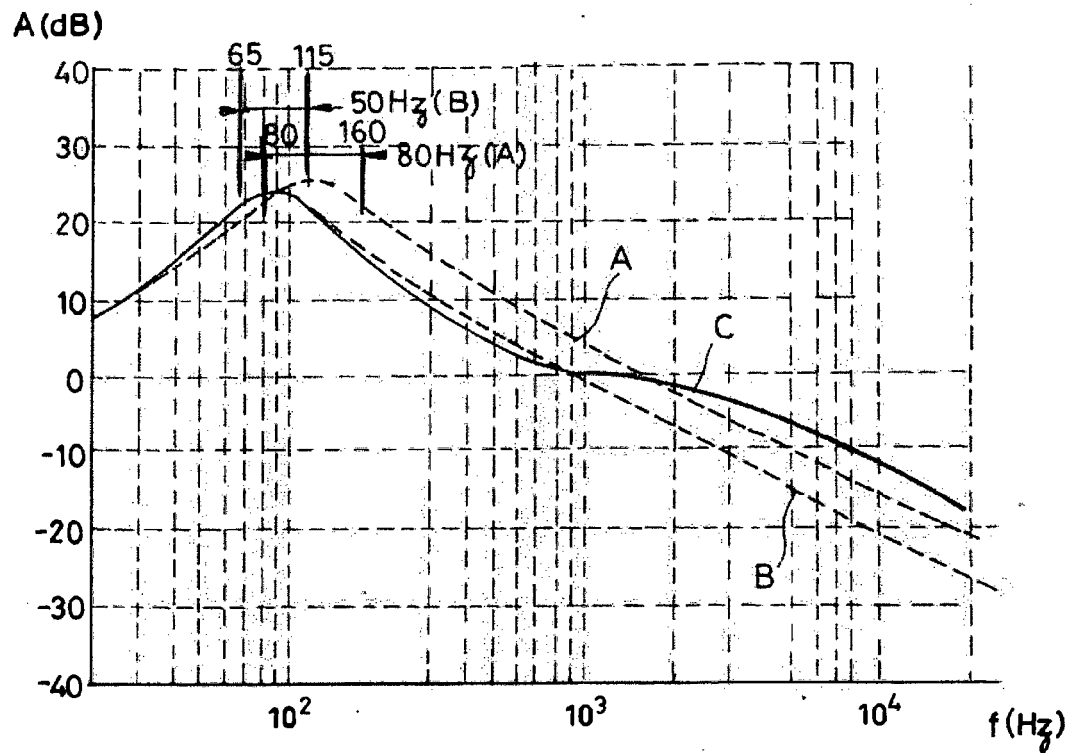


FIG-14

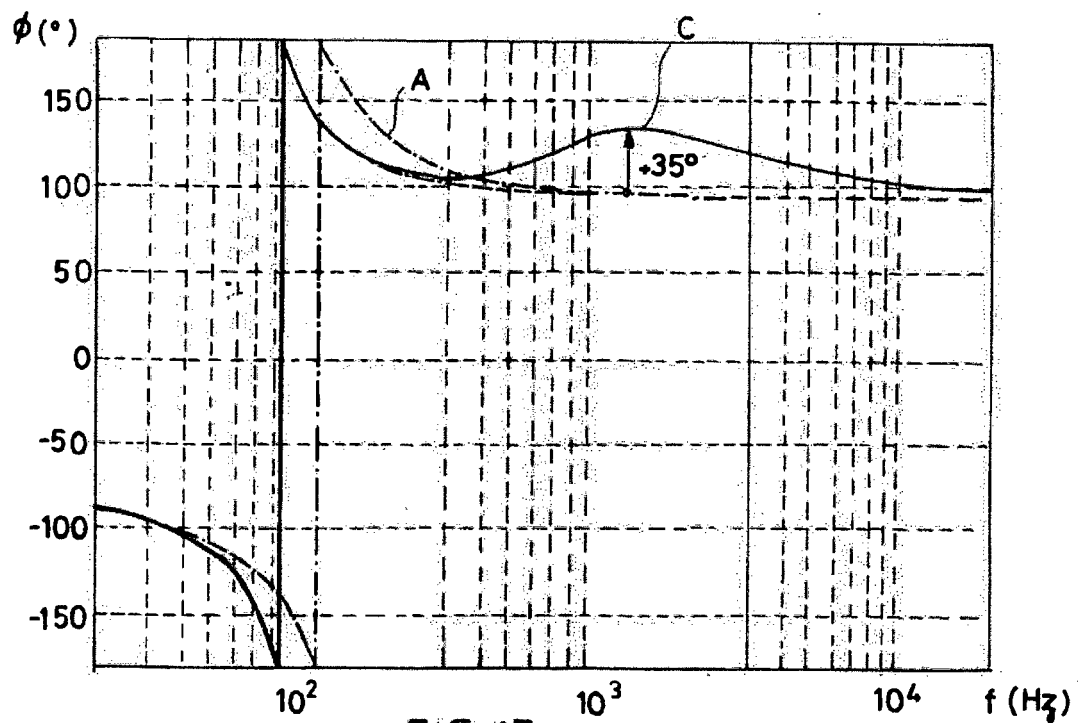
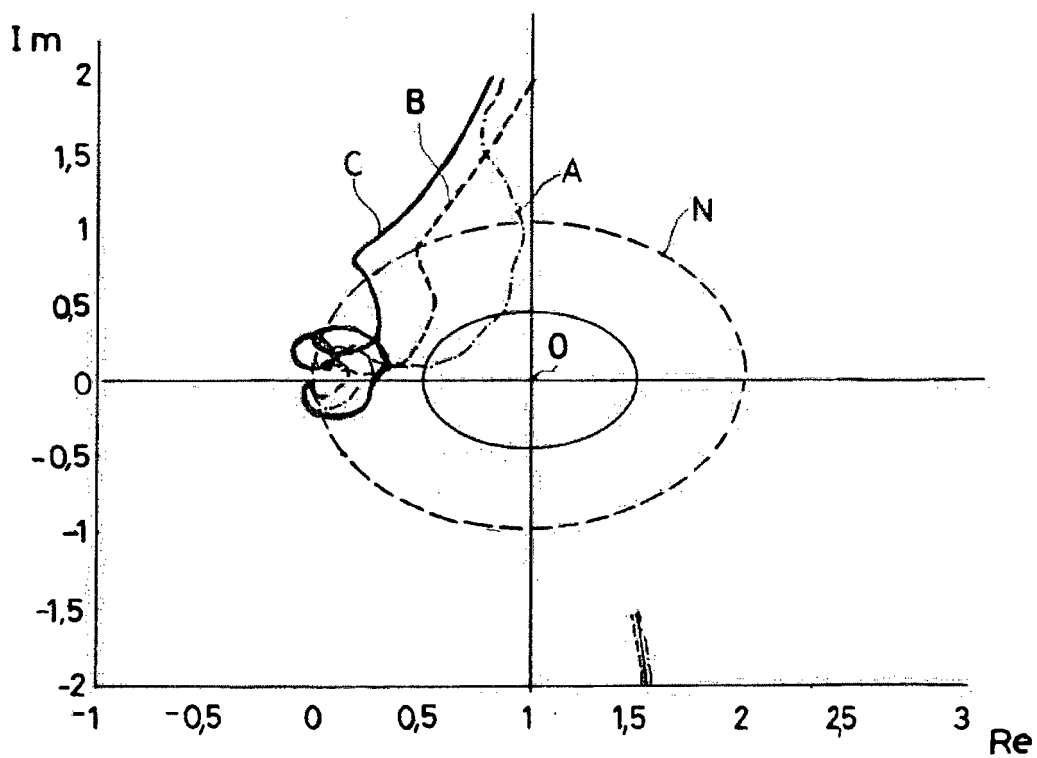


FIG-15



FIG_16

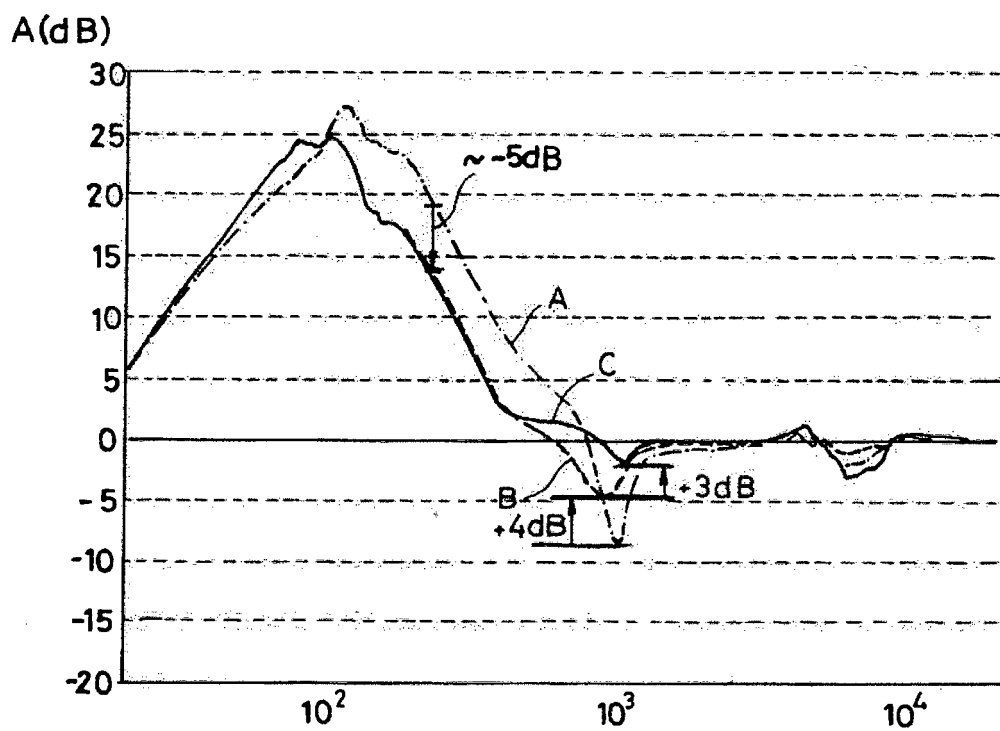


FIG. 17

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- DE 3733132 A1 [0010]
- US 6041126 A [0010]
- US 20030228019 A1 [0010]
- WO 2005112849 A2 [0010]
- US 20100272276 A1 [0015] [0030]