

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication : 2 983 026
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
21 N° d'enregistrement national : 11 60642

51 Int Cl⁸ : H 04 R 5/04 (2013.01), G 10 K 11/16, 11/178

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 22.11.11.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 24.05.13 Bulletin 13/21.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : PARROT Société anonyme — FR.

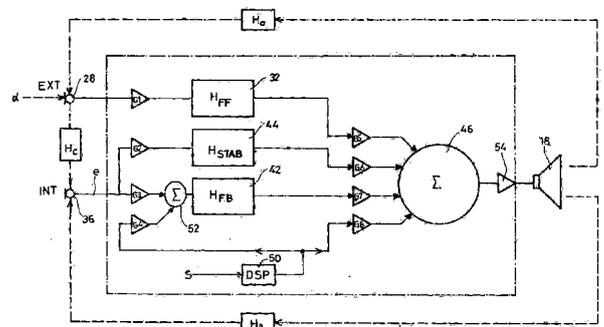
72 Inventeur(s) : HUA PHONG.

73 Titulaire(s) : PARROT Société anonyme.

74 Mandataire(s) : DUPUIS-LATOURE DOMINIQUE.

54 CASQUE AUDIO A CONTROLE ACTIF DE BRUIT DE TYPE NON-ADAPTATIF, POUR L'ECOUTE D'UNE
SOURCE MUSICALE AUDIO ET/OU POUR DES FONCTIONS DE TELEPHONIE "MAINS-LIBRES".

57 Le casque comprend deux écouteurs avec chacun un transducteur (18) de reproduction sonore d'un signal audio, logé dans une cavité acoustique délimitée par une coque pourvue d'un coussinet circumaural. Le contrôle actif de bruit comprend, en parallèle, un filtre passe-bande feed-forward (32) recevant le signal d'un microphone externe (28), un filtre passe-bande feedback (42) recevant en entrée un signal d'erreur (e) délivré par un microphone interne (36), et un filtre passe-bande stabilisateur (44) augmentant localement la phase de la fonction de transfert du filtre feedback dans une zone d'instabilité, notamment une zone d'effet waterbed autour de 1 kHz. Un sommateur (46) délivre une combinaison linéaire pondérée des signaux délivrés par ces filtres ainsi que du signal audio à reproduire (S). Le contrôle est non adaptatif, les paramètres des filtres (32, 42, 44) étant fixes.



FR 2 983 026 - A1



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

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-*
5 *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).

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
10 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.

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
15 appliquée autour de l'oreille de l'utilisateur avec interposition d'un coussinet circumaural isolant l'oreille de l'environnement sonore extérieur.

Lorsque le casque est utilisé dans un environnement bruyant (métro, rue
20 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.

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

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 micro-
30 phone 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,
35 les variations de pression de l'onde acoustique parasite.

La mise en œuvre 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.

5 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 œuvre notamment grâce au développement des techniques de numérisation et de traitement du signal par des processeurs spécialisés, programmés pour mettre en œuvre des
10 algorithmes temps réel.

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

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
20 conséquence une conception relativement complexe et un coût de réalisation assez élevé.

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 pé-
25 riodiques, dans des bandes étroites.

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.

30 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'au-
35 tres termes, ce microphone est disposé à proximité de l'oreille de l'utilisa-

teur, 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
5 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.

Un tel système est notamment décrit par le US 2010/0272276 A1 qui, outre les voies de filtrage *feedback* et *feedforward*, prévoit une troisième
10 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.

15 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.

Les procédés à filtrage fixe présentent toutefois des limitations et des in-
20 convénients.

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'en-
25 droit 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.

Ces variations de réponse acoustique sont susceptibles de produire un effet
35 indésirable appelé *waterbed effect* : au-delà de la bande de fréquen-

ces 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.

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.

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.

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.

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.

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.

5 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
10 soient amplifiés par le même canal et reproduits par le même transducteur.

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 *waterbed* ou Larsen. Cette limitation de la bande passante pourra procurer,
15 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°.

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

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
25 *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.

30 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.

- 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 arc 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.
- 5 Ce casque comporte un système de contrôle actif de bruit avec :
- une première branche *feedforward* en boucle ouverte, avec un premier
10 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
15 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.
- 20 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
25 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 un zone d'instabilité prédéterminée ;
 - 30 – 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
35 ces signaux.

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

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.

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°.

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.

◇

15

On va maintenant décrire un exemple de mise en œuvre 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.

20 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.

30 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.

5 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.

10 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.

15 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 *feedback* du circuit de la Figure 7, également pour différentes configurations.

20 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'atténuation, en boucle fermée, du circuit de la Figure 7, également pour différentes configurations.

25



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.

30

35

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.

5 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.

10 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.

15 La cavité arrière 24 est une cavité fermée, à l'exception d'un évent 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.

20 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.

25 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.

30 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.

Le casque est également pourvu d'un microphone 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.

5 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
- 10 – 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.

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
15 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.

20 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
25 réponse cible sans contrôle actif.

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).

30 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
35 actif de bruit et le microphone additionnel 34 pour les fonctions de com-

munication "mains-libres", ainsi que l'évent 26, constitué par exemple d'une série de petits trous recouverts d'une grille en matière plastique acoustiquement résistive.

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

Le circuit comporte essentiellement trois branches agencées en parallèle, avec un filtre *feedforward* 32, un filtre *feedback* 42 et un filtre stabilisa-
10 teur 44.

Le signal recueilli par le microphone externe 28 est préamplifié par un gain G_1 (par exemple $G_1 = +8$ dB), puis est appliqué au filtre *feedforward* 32.
15

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 G_2 (par exemple $G_2 = 0$ dB), et G_3 (par exemple $G_3 = +9$ dB).
20

Les signaux issus en parallèle des filtres 32, 44 et 42 sont combinés entre eux par un sommateur 46 avec application de gains respectifs G_5 , G_6 et G_7 (par exemple $G_5 = -6$ dB pour le signal issu du filtre *feedforward* 32, $G_6 = +6$ dB pour le signal issu du filtre stabilisateur 44 et $G_7 = 0$ dB pour le signal issu du filtre *feedback* 42).
25

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.
30

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

- avec application d'un gain G_4 (par exemple $G_4 = -14$ dB), au filtre *feedback* 42, et
- avec application d'un gain G_8 (par exemple $G_8 = -6$ dB), à un somma-
35 teur 52 qui combinera ce signal à celui capté par le microphone interne

36 après que ce dernier ait été préamplifié du gain G_3 , pour l'appliquer en entrée du filtre *feedback* 42.

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
5 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
10 graves. Les gains respectifs G_8 et G_4 appliqués à ces deux parties de signal permettent d'équilibrer les graves et les aigus du spectre du signal à reproduire.

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

20 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.

25 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
30 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.

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

Par ailleurs, dans les exemples illustrés, les filtres *feedforward* 32 et *feedback* 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.

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.

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 œuvre du filtre stabilisateur 44.
- 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) :

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

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.

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

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

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

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

- 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).

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.

- 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 $H_{FF} = H_c/H_a$,

ce qui est difficile à atteindre car H_c 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.

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.

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*.

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.

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

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

5 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.

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

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

15 sont données par l'intersection du lieu avec les deux axes passant par le point d'instabilité O, situé à 0 dB et 0°.

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).

20 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'accroître ces valeurs à respectivement +18 dB et plus de 60°.

Les Figures 14 à 17 représentent, sur le circuit de la figure 7 :

- 25 – 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.

On a représenté sur ces figures :

- 30 – 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 ad-
- 35 jonction du filtre stabilisateur 44 avec sa préamplification G2.

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).

- 5 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.

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.

- 10 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
15 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
20 stabilité globale du système.

- 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
25 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
30 actif procuré par le filtre *feedforward* fixe 32.
-

REVENDEICATIONS

1. Un casque audio, comprenant deux écouteurs (10) réunis par un ar-
ceau de maintien (12) et comportant chacun un transducteur (18) de re-
production sonore d'un signal audio à reproduire, ce transducteur étant
logé dans une cavité acoustique délimitée par une coque (14) pourvue
5 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 mi-
crophone externe (28) apte à capter un bruit acoustique (30) régnant
10 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
 - 15 – un circuit de mixage (46), recevant en entrée les signaux délivrés par
les premier, deuxième et troisième filtres ainsi que le signal audio à re-
produire (S), et délivrant en sortie un signal apte, après amplification
(54), à piloter le transducteur (18),
caractérisé en ce que :
 - 20 – le contrôle actif de bruit est un contrôle non adaptatif, les paramètres
des premier, deuxième et troisième filtres (32, 42, 44) étant des para-
mètres prédéterminés ;
 - le troisième filtre (44) est un filtre passe-bande stabilisateur agencé en
parallèle de la deuxième branche *feedback*, recevant en entrée le si-
gnal délivré par le microphone interne, et délivrant en sortie un signal
25 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 un zone d'instabilité prédé-
terminée ;
 - 30 – les première, deuxième et troisième branches sont agencées en paral-
lèle, 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 frac-

tion du signal audio à reproduire (S), avec pondération des gains respectifs (G5-G8) appliqués à ces signaux.

- 5 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.
 - 10 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.
 - 15 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.
 - 20 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.
 - 25 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°.
 - 30 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.
 - 30 8. Le casque audio de la revendication 7, dans lequel le signal audio à reproduire (S) n'est pas appliqué au troisième filtre (44).
-

1/9

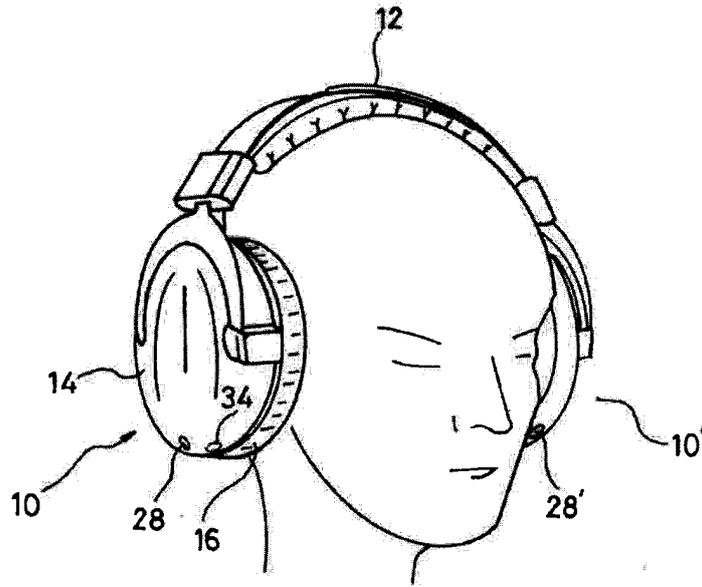


FIG. 1

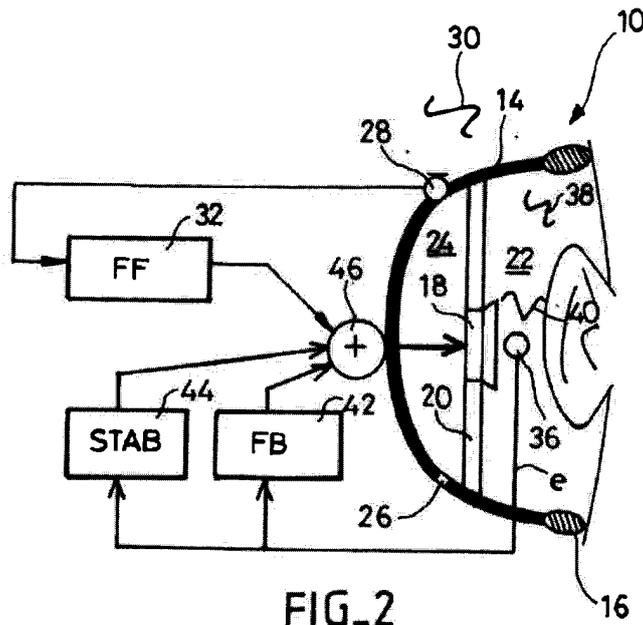


FIG. 2

2/9

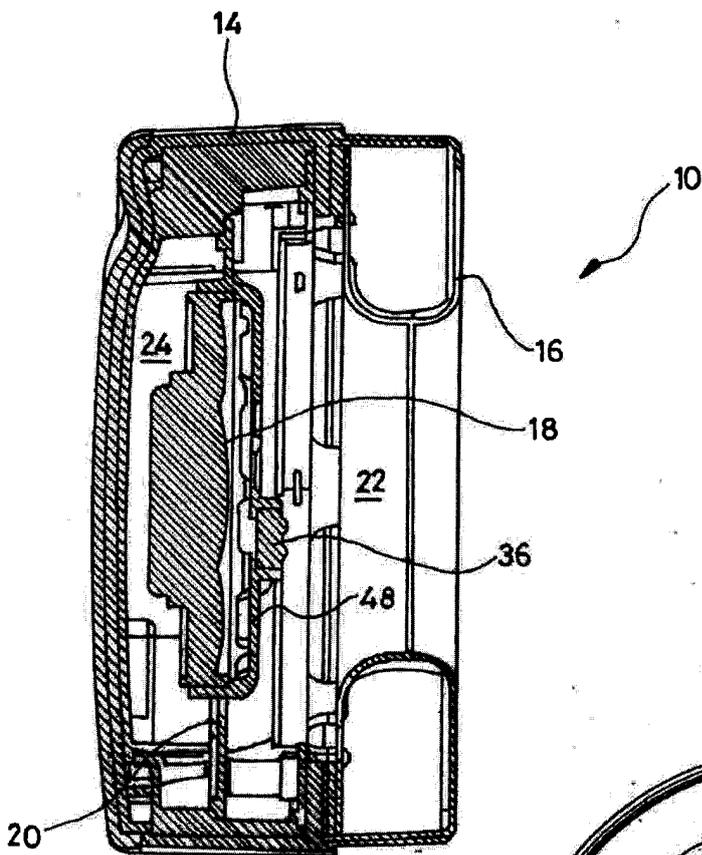


FIG-3

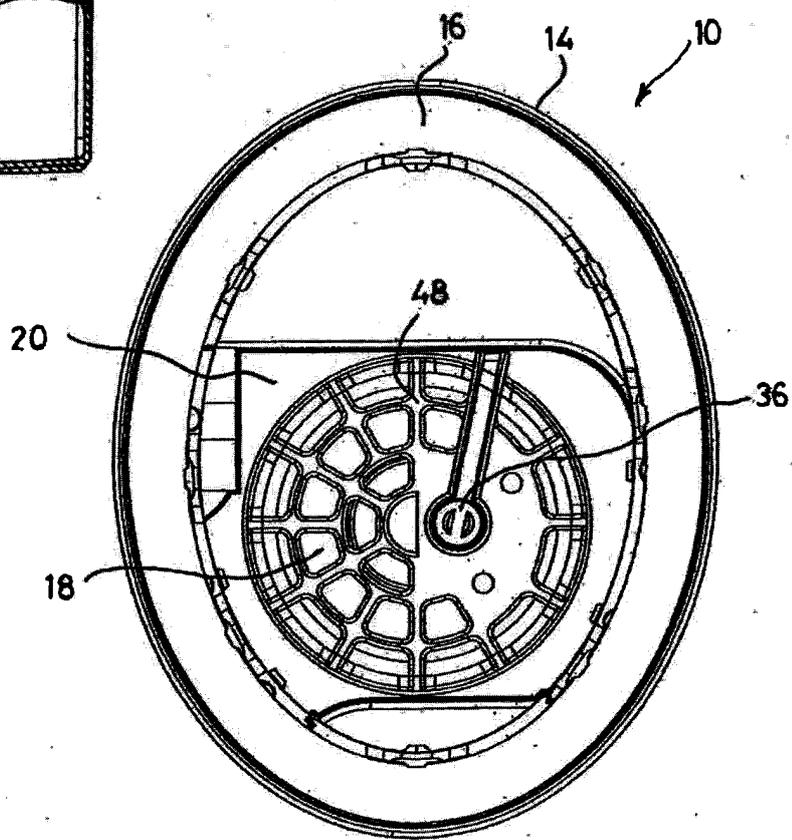
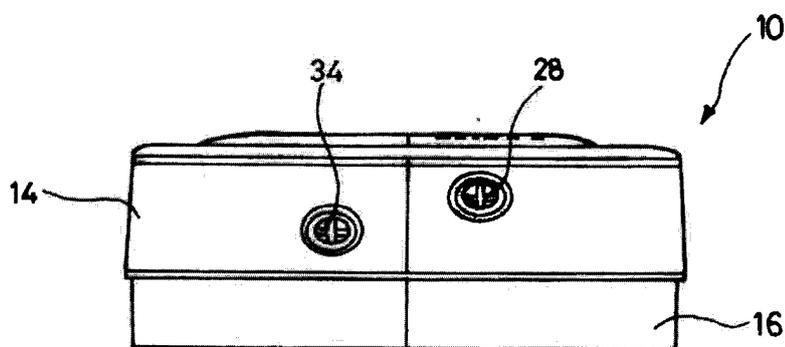
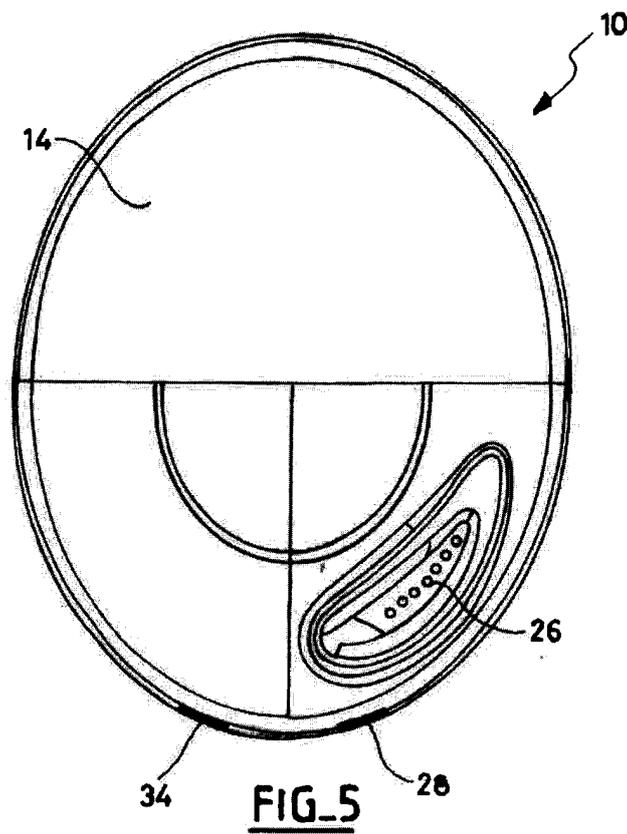


FIG-4

3/9



4/9

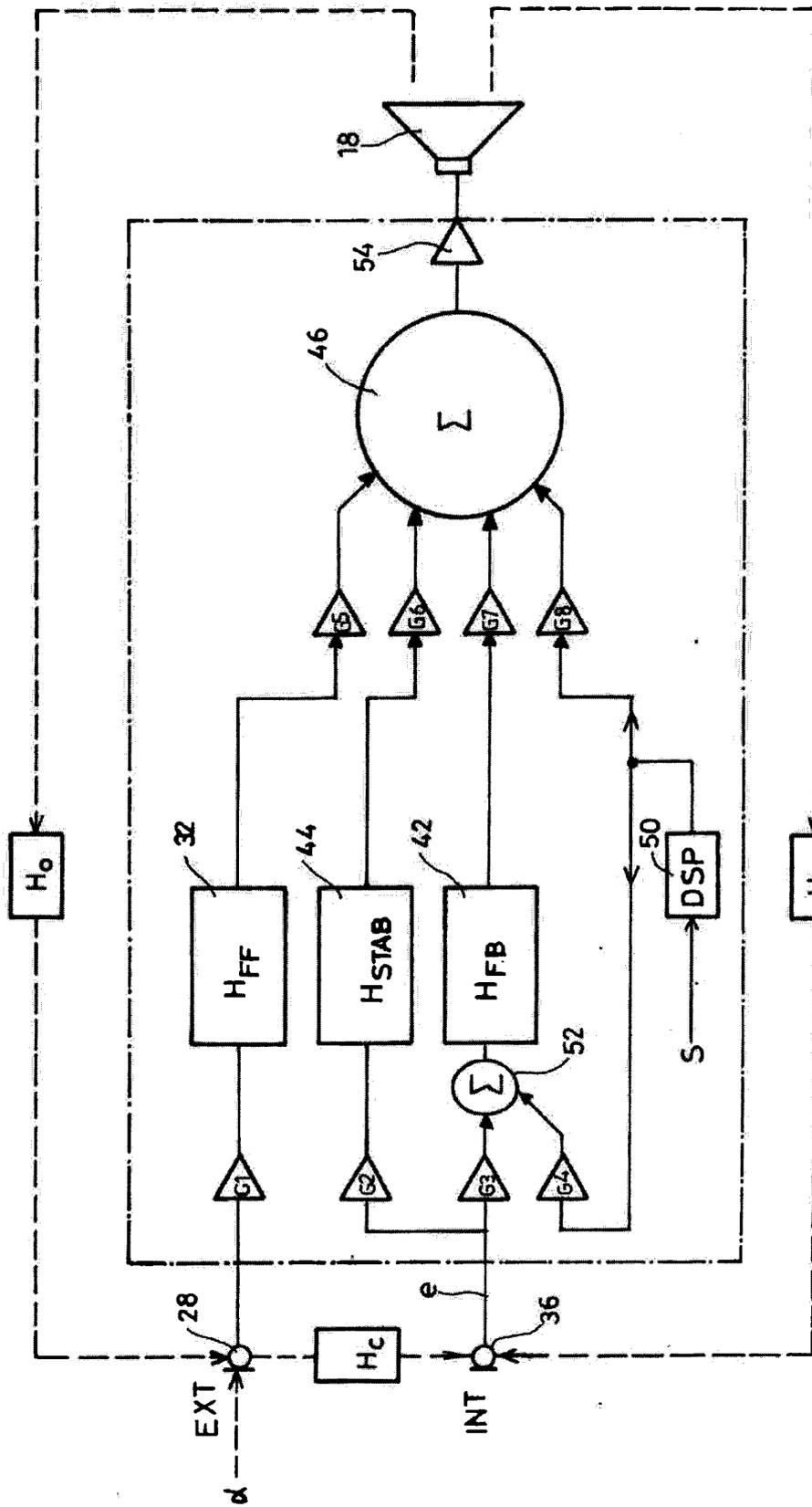
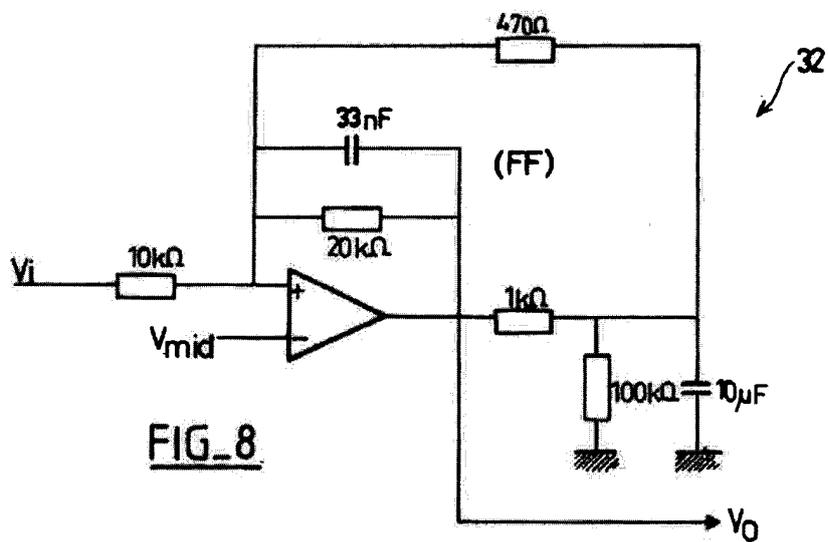
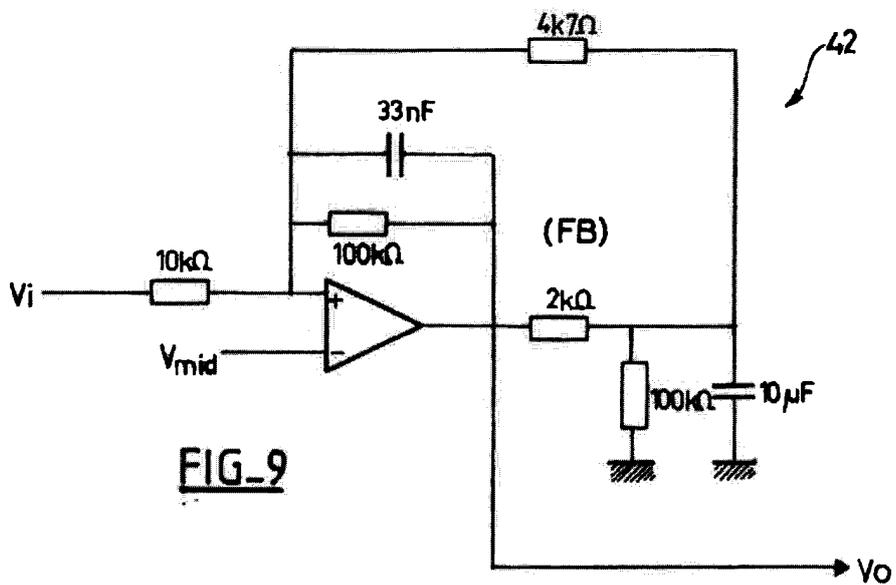


FIG-7

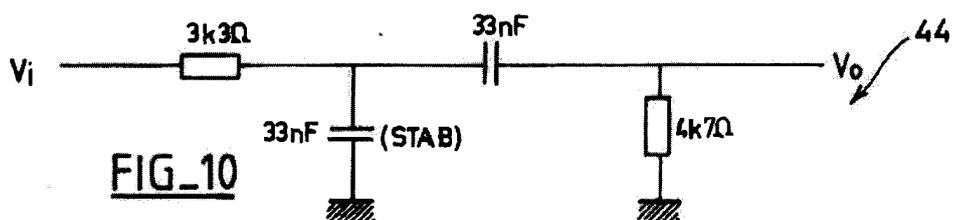
5/9



FIG_8



FIG_9



FIG_10

6/9

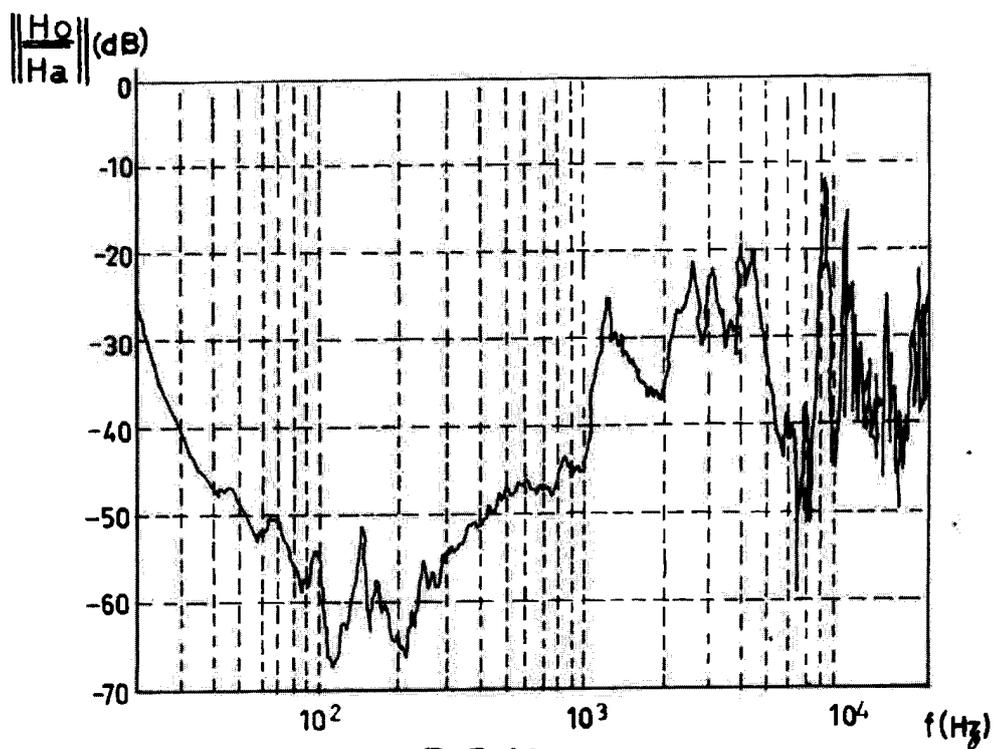


FIG-11

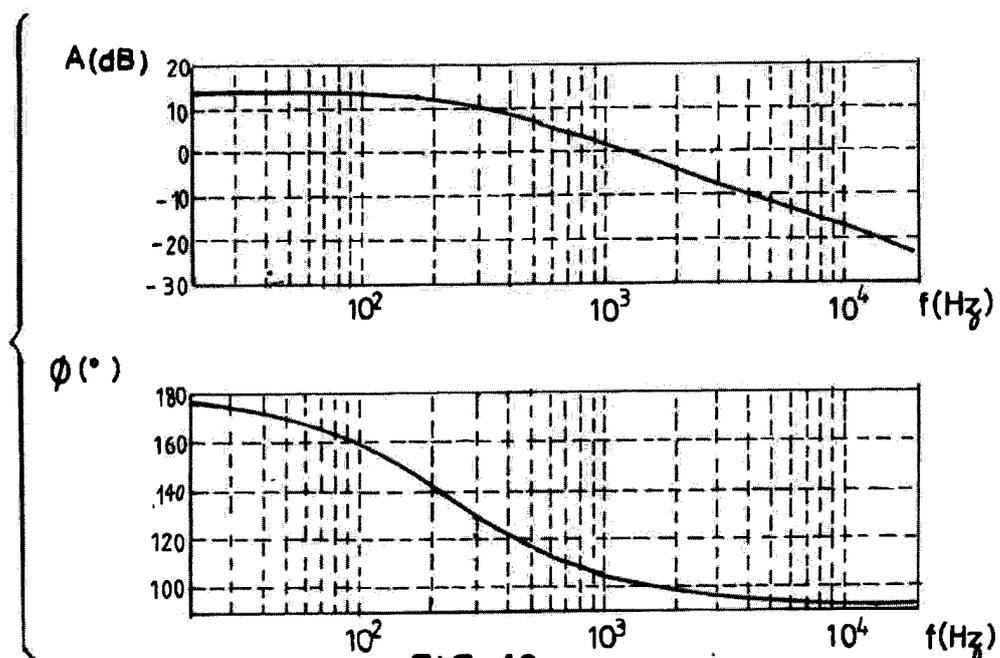
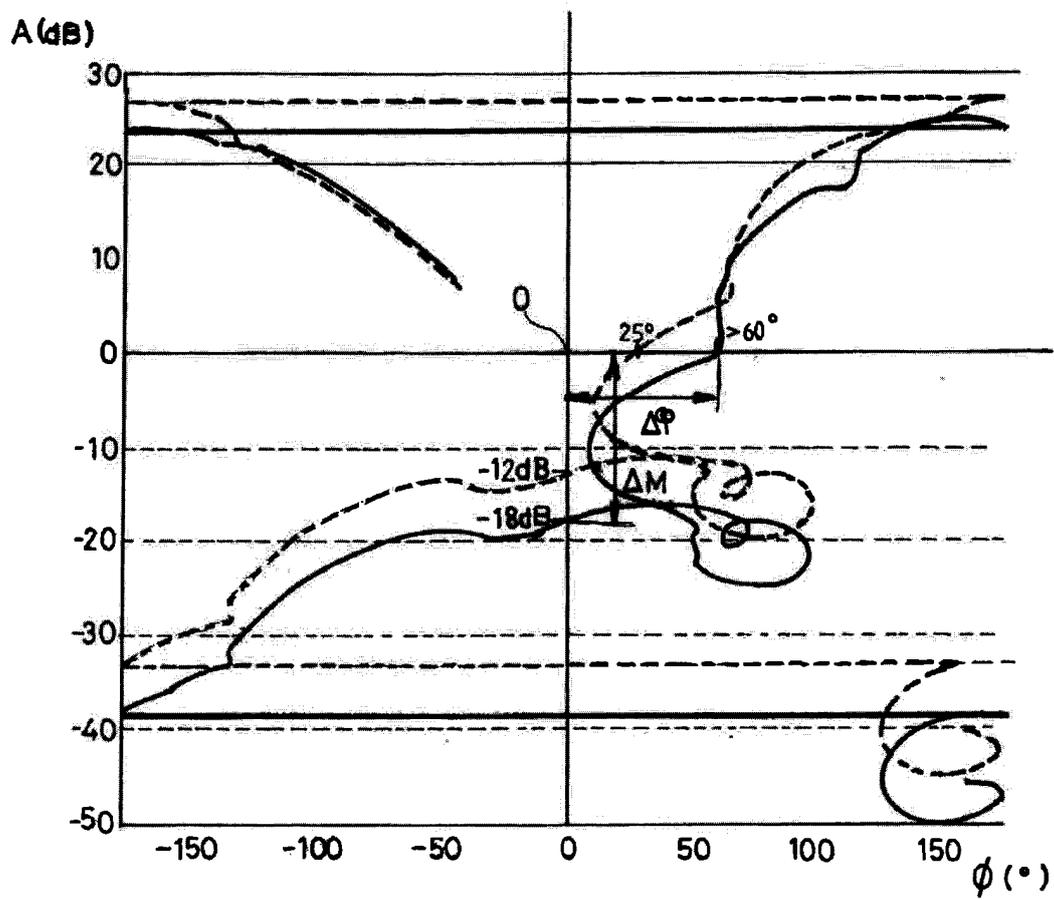


FIG-12

7/9



FIG_13

8/9

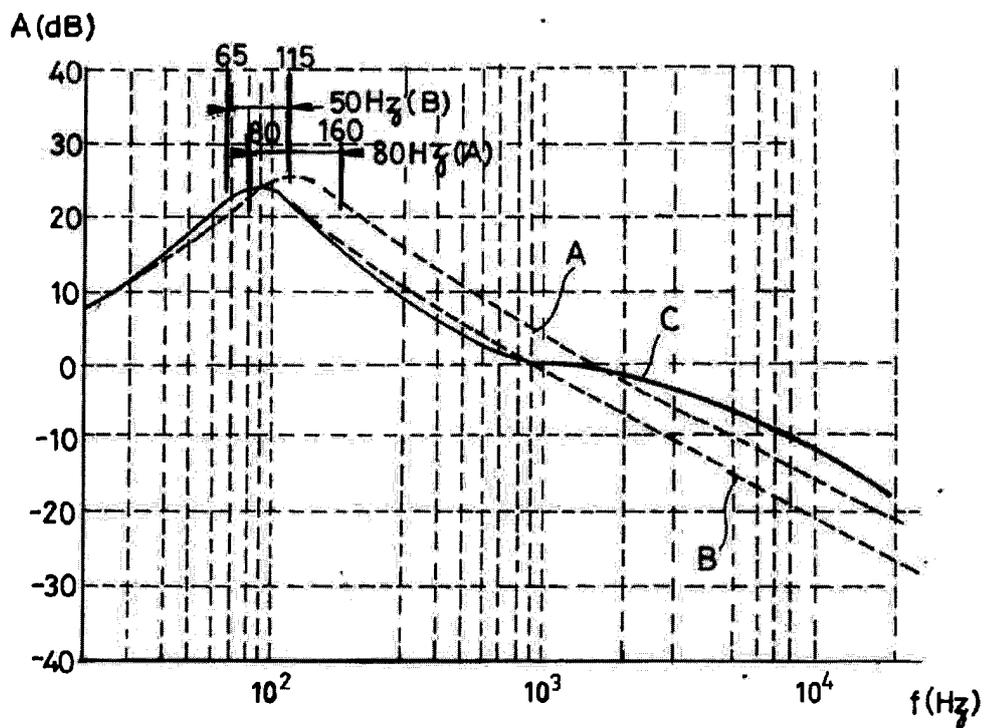


FIG-14

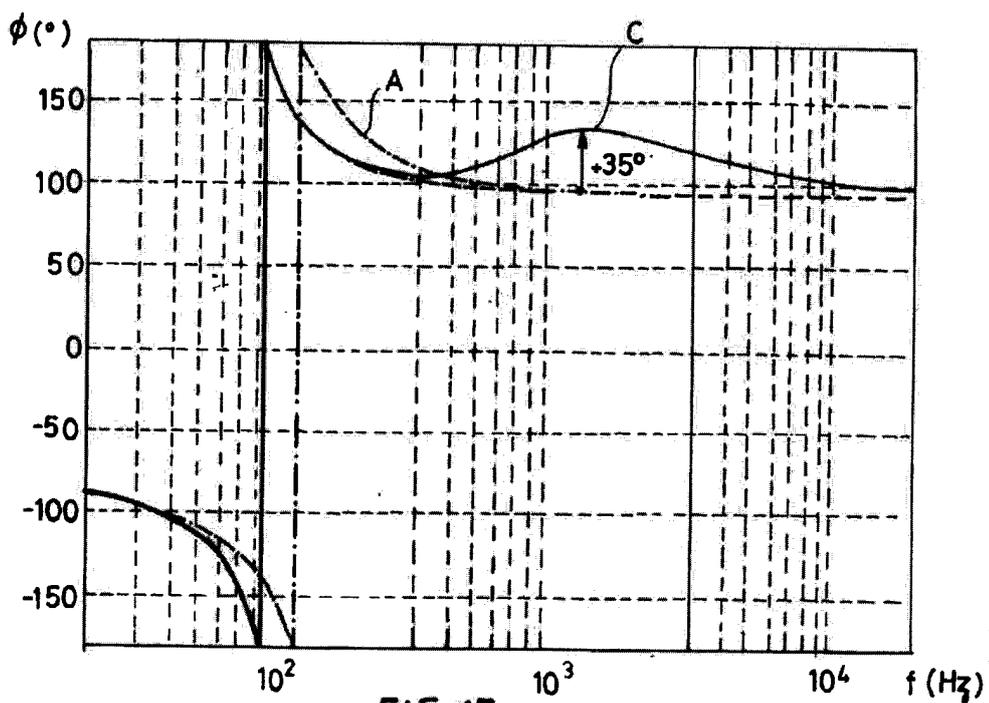
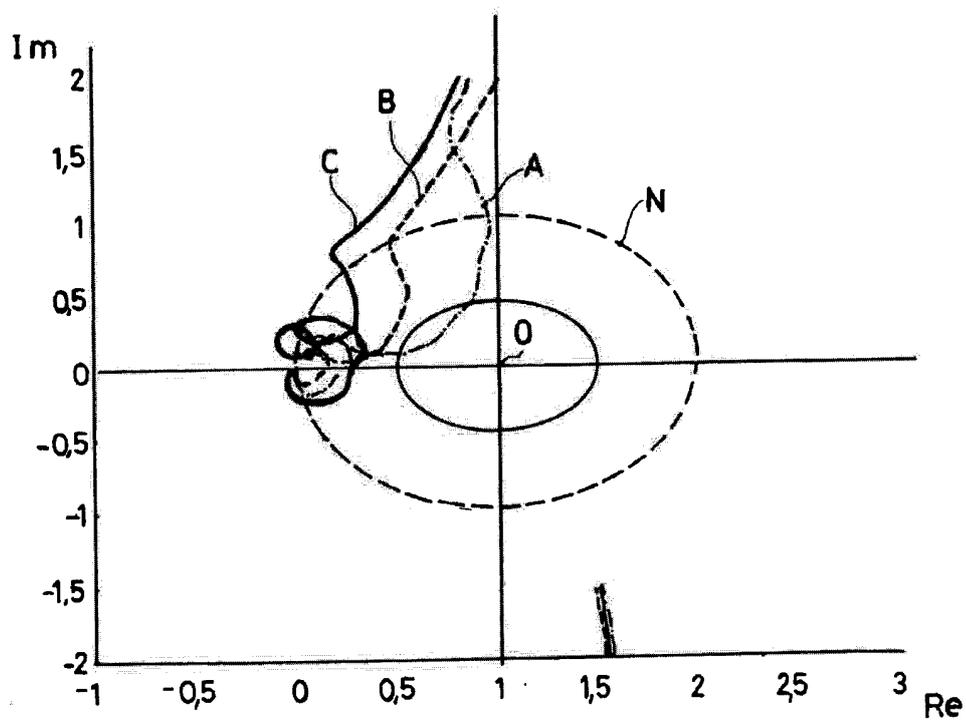
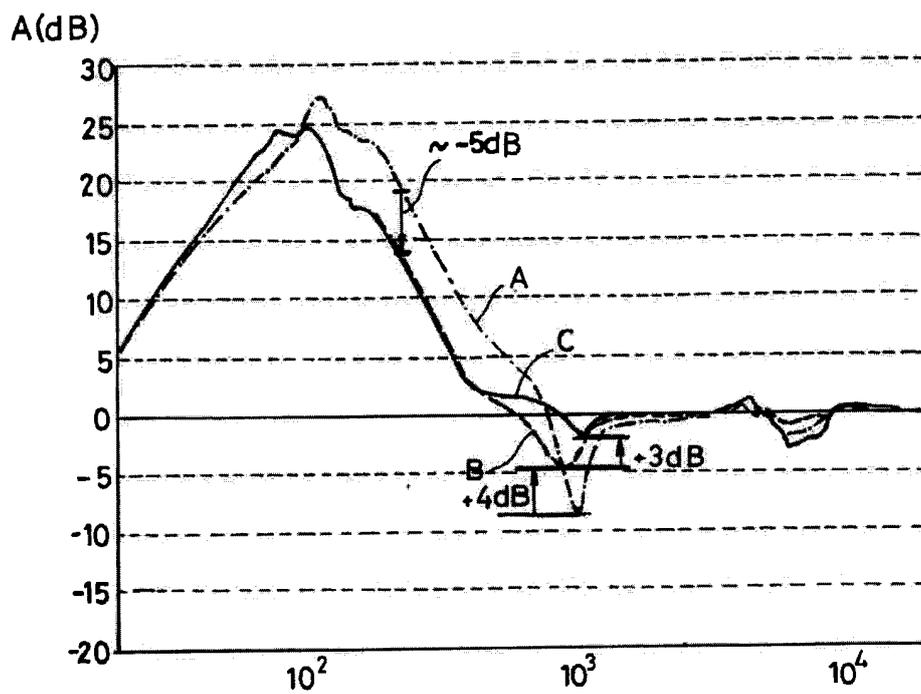


FIG-15

9/9



FIG_16



FIG_17



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 762132
FR 1160642

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A,D	US 2010/272276 A1 (CARRERAS RICARDO F [US] ET AL) 28 octobre 2010 (2010-10-28) * abrégé * * figures 1,3a,3b *	1-8	H04R5/04 G10K11/16 G10K11/178
A	US 6 449 369 B1 (CARME CHRISTIAN [FR] ET AL) 10 septembre 2002 (2002-09-10) * abrégé * * figures 1,2 *	1-8	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H04R G10K
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 août 2012		Fülöp, István	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1160642 FA 762132**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **21-08-2012**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2010272276	A1	28-10-2010	AUCUN

US 6449369	B1	10-09-2002	AT 209813 T 15-12-2001
			AU 719457 B2 11-05-2000
			AU 7136096 A 17-04-1997
			CA 2231071 A1 03-04-1997
			DE 69617449 D1 10-01-2002
			DE 69617449 T2 01-08-2002
			EP 0852793 A1 15-07-1998
			FR 2739214 A1 28-03-1997
			US 6449369 B1 10-09-2002
			WO 9712359 A1 03-04-1997
