

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 1 094 444 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
17.11.2004 Bulletin 2004/47

(51) Int Cl.7: **G10K 11/178**, E01F 8/00,
H04R 1/40

(21) Numéro de dépôt: **00420204.0**

(22) Date de dépôt: **10.10.2000**

(54) **Dispositif actif d'atténuation de l'intensité sonore**

Aktive Vorrichtung zur Abschwächung der Schallintensität

Active device for the attenuation of sonic intensity

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

(30) Priorité: **18.10.1999 FR 9913164**

(43) Date de publication de la demande:
25.04.2001 Bulletin 2001/17

(73) Titulaire: **Comptoir de la Technologie
69300 Caluire (FR)**

(72) Inventeurs:
• **Gaudriot, Lionel
69380 Dommartin (FR)**
• **Martinat, Jacques
69300 Caluire (FR)**

(74) Mandataire: **Palix, Stéphane et al
Cabinet Laurent et Charras
20, rue Louis Chirpaz
B.P. 32
69131 Ecully Cedex (FR)**

(56) Documents cités:
**EP-A- 0 787 340 DE-A- 2 139 941
DE-A- 3 922 185 US-A- 5 315 661
US-A- 5 438 624**

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 009, no. 318 (E-366), 13 décembre 1985 (1985-12-13) & JP 60 150399 A (MATSUSHITA DENKI SANGYO KK), 8 août 1985 (1985-08-08)**
- **BOLTON J S ET AL: "SOUND CANCELLATION BY THE USE OF SECONDARY MULTIPOLES" JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA,US,AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, vol. 98, no. 4, 1 octobre 1995 (1995-10-01), pages 2343-2362, XP000538051 ISSN: 0001-4966**

EP 1 094 444 B1

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

Description

[0001] L'invention se rattache au domaine de l'acoustique. Plus précisément, elle vise les dispositifs fixes d'atténuation des bruits générés par des sources mobiles, telles que notamment les moyens de transport en général, et les avions ou les transports terrestres en particulier.

[0002] L'invention constitue un perfectionnement du dispositif décrit dans le brevet EP 0 787 340 du Demandeur.

[0003] Le Demandeur a décrit dans le brevet précité un dispositif d'atténuation de l'intensité sonore fonctionnant sur le principe de l'émission d'une onde de contre-bruit générée à partir d'informations issues de capteurs, et émises par des sources électro-acoustiques disposées de telle sorte que les ondes de contre-bruit se combinent avec les ondes de bruit qu'elles admettent pour enveloppe.

[0004] Les principes décrits dans ce brevet restent valables pour le présent perfectionnement, de sorte que ledit document est ici cité à titre de référence, et que son contenu ne sera donc pas détaillé plus avant.

[0005] Dans les formes de réalisation illustrées dans ce document, les différentes sources de contre-bruit sont associées par sous-ensembles montés sur des mâts verticaux, c'est-à-dire selon une direction sensiblement perpendiculaire à la direction d'incidence moyenne des ondes de bruit.

[0006] Dans ce document, les différents mâts sont disposés aux alentours de la zone à protéger, et préférentiellement à la périphérie de la zone à protéger.

[0007] Or, on a constaté que l'écartement des mâts tels que décrits dans ce document, ne permet pas d'atténuer suffisamment les ondes sonores présentant une fréquence relativement importante, et notamment supérieures à 500 Hz (Hertz).

[0008] Un problème que se propose de résoudre l'invention est celui de l'atténuation efficace des ondes sonores dans une gamme allant jusqu'au kiloHertz, voire jusqu'à 2 kHz (kiloHertz).

[0009] Le document DE 21 39 941 A décrit un dispositif actif d'atténuation de l'intensité sonore au niveau d'une zone déterminée, par émission d'ondes de contre-bruit, du type comprenant :

- un ensemble de capteurs susceptibles de déterminer les signaux et les directions des ondes émises par des sources de bruit éloignées ;
- des moyens pour traiter les signaux issus desdits capteurs, et pour générer des signaux correspondants aux ondes de contre-bruit ;
- un ensemble de sources électro-acoustiques, lesdites sources étant installées dans l'espace proche de la zone à protéger, et connectées auxdits moyens de traitement, et susceptibles d'émettre des ondes de contre-bruit dans la même direction et dans le même sens que les ondes incidentes, les capteurs et les sources électro-acoustiques étant placés de telle façon que les ondes incidentes atteignent préalablement les capteurs.

[0010] Ce document décrit aussi que les sources électro-acoustiques sont disposées selon une surface continue, et selon un maillage régulier.

[0011] En effet, selon une théorie du fonctionnement de l'écran actif, il apparaît que l'effet d'écrantage continu monocoque, est limité dans le domaine de fréquence du fait de la répartition discrète de ces sources sur la surface. Il s'agit d'un phénomène passe-bas dont la fréquence de coupure est : $f_0 = \alpha \cdot \frac{c_0}{a}$ où :

- "a" désigne la dimension caractéristique de la maille de réseau de source,
- α est un paramètre légèrement supérieur à 1, caractéristique de la forme géométrique de la maille,
- et c_0 est la célérité du son.

[0012] Au-delà de cette fréquence de coupure, les ondes incidentes ne sont plus seulement réfléchies par l'écran, mais également diffractées en amont et en aval de l'écran, avec pour effet d'induire un niveau de pression double du niveau de l'onde incidente, ce qui rend alors ledit écran non pas inopérant, mais perturbateur.

[0013] Le choix d'une maille suffisamment resserrée, de l'ordre de grandeur d'un demi mètre, permet d'obtenir une fréquence de coupure de l'ordre du kiloHertz englobant la majorité du spectre de puissance de l'onde sonore d'un avion par exemple.

[0014] Ainsi, les différentes sources sont disposées selon des surfaces qui peuvent être réalisées par un treillis qui est lui-même surélevé, disposé au-dessus de la zone à couvrir ou au-dessus des bâtiments qui la jouxtent.

[0015] Par surface continue, on entend une surface qui présente une régularité géométrique telle que toutes les sources peuvent être considérées, vis à vis d'une onde de bruit, comme équivalentes dans leur contribution à l'atténuation, à l'effet près de leur orientation.

[0016] De telles surfaces peuvent être planes, ou bien par exemple appartenir à la famille des quadriques, et notamment des cylindres.

[0017] En pratique, on a examiné qu'un maillage hexagonal permettait d'avoir la meilleure compacité de sources,

et donc une meilleure couverture dans une bande de fréquence pour une densité de source identique.

[0018] Le dispositif conforme à l'invention comporte plusieurs ensembles de sources électro-acoustiques disposées selon plusieurs surfaces décalées les unes par rapport aux autres par translation, selon leur normale, le fonctionnement des sources électro-acoustiques de ces ensembles permettant d'accroître la fréquence de coupure du système pour une dimension donnée de la maille.

[0019] Ainsi, lorsque les haut-parleurs qui constituent les sources d'électro-acoustiques sont associés selon des surfaces proches les unes et les autres et sensiblement parallèles, ces ensembles de haut-parleurs ont l'effet d'un haut-parleur de plus grande section, sans en occuper la surface.

[0020] En effet, un seul haut-parleur d'une surface utile identique occuperait une proportion de maillage trop importante, ce qui amoindrirait la transparence visuelle de l'écran.

[0021] Dans des configurations particulières, plusieurs dispositifs peuvent être associés de telle sorte que ces dispositifs sont juxtaposés les uns à côté des autres dans l'espace de la zone à protéger, pour couvrir une zone de géométrie particulière, comme par exemple une intersection de rues. Ces dispositifs pouvant être associés, en continuité avec des surfaces de même nature constituant des écrans passifs, notamment des structures vitrées, pour des raisons architecturales et fonctionnelles.

[0022] Les différents écrans sont pilotés par un système microphonique de captation situé en amont proche de l'écran. Ce système de captation des ondes de bruit a la capacité de séparer et caractériser ces ondes respectivement en direction et en signal, de façon à permettre aux sources de contre-bruit de les contrecarrer additivement.

[0023] Dans le cas d'une source unique de bruit, tous les échos portent pratiquement le même signal, à savoir celui de l'onde directe. Il s'agit donc du signal de la première onde captée avec un facteur d'amplitude et un décalage dans le temps.

[0024] Les moyens de commande sont aptes, en utilisant les algorithmes appropriés, à extraire le signal commun de référence ainsi que les paramètres d'amplitude et de délai propres à chaque signal écho, à partir d'un ensemble ou d'une base de capteurs microphoniques placés en amont des écrans.

[0025] Le nombre minimal de capteurs à mettre en oeuvre dans la base microphonique est au moins égal au nombre de signaux à discriminer, mais pratiquement supérieur pour s'affranchir de l'effet de bruits parasites d'origine proche.

[0026] Dans le cas de figures plus complexes les sources de bruit sont multiples et indépendantes, comme par exemple pour des bruits générés par les moyens de transport terrestres, tels que véhicules, automobiles ou wagons.

[0027] Dans ce cas, le nombre de signaux propres, sources indépendantes, est supérieur à la dizaine. On utilisera alors des bases microphoniques complémentaires nombreuses et directives, disposées de préférence au plus près des sources.

[0028] Par exemple, les bases microphoniques peuvent être disposées le long de la chaussée ou de la voie de chemin de fer de manière à acquérir sélectivement, par proximité, les divers signaux de référence propres aux sources indépendantes, telles que les trains de roue, les boggies, et les couches limites aérauliques.

[0029] De la sorte, on facilite par connaissance préalable, la séparation des différentes ondes de bruit, au niveau de l'écran.

[0030] Mais dans ce cas, les signaux qui se propagent depuis la base microphonique jusqu'aux écrans, sont soumis aux aléas de la propagation atmosphérique du son dont il faut tenir compte dans les algorithmes de séparation des signaux dans la base microphonique proche de l'écran.

[0031] Dans tous les cas, les principes algorithmiques utilisés pour la sélection des signaux requièrent une grande précision. Cette précision des algorithmes est déterminée par la précision globale de restitution des ondes de contre-bruit, qui s'évalue de la manière suivante.

[0032] En supposant que l'écran actif est destiné à s'opposer à une onde de bruit d'amplitude $b(t)$, en générant une onde de contre-bruit d'amplitude $cb(t)$, l'amplitude du bruit résiduel est : $e(t) = b(t) - cb(t)$. La norme quadratique, ou son énergie évaluée sur la durée caractéristique de la perception auditive des signaux du bruit (de l'ordre du dixième de seconde) est la suivante : $e^2 = b^2 - 2cb.b + cb^2$ où la barre supérieure désigne l'effet de moyennage temporel.

[0033] Le facteur d'atténuation $A_{tt} = \frac{e}{b}$ s'exprime selon la formule suivante :

$$A_{tt} = 2r \left(1 + \frac{M}{2}\right) + (1 - r) \frac{M^2}{4}$$

dans laquelle:

- "r" est le coefficient de défaut à l'unité de corrélation des signaux $b(t)$ et $cb(t)$, donné par la formule suivante :

$$1 - r = \frac{\overline{b \cdot cb}}{\sqrt{\overline{b^2 \cdot cb^2}}}$$

- 5 - et "M" est le rapport des énergies, selon la formule suivante :

$$1 + M = \frac{\overline{cb^2}}{\overline{b^2}}$$

10 **[0034]** Pour obtenir un facteur d'atténuation de l'ordre de 20 décibels, il est donc nécessaire que le coefficient de corrélation du signal de contre-bruit au signal de bruit soit de 0,995, valeur qui traduit la très grande similarité à obtenir entre des signaux de bruit, à large bande.

15 **[0035]** Cette valeur implique globalement que les différents éléments intervenant dans le dispositif d'atténuation, doivent avoir une précision quadratique de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$, non atteinte dans le domaine de la reproduction sonore usuelle.

Description sommaire des figures

20 **[0036]** La manière de réaliser l'invention, ainsi que les avantages qui en découlent ressortiront bien de la description des modes de réalisation particuliers qui suivent, à l'appui des figures annexées dans lesquelles :

La figure 1 est une vue en perspective sommaire d'une zone d'habitation équipée de plusieurs écrans.

La figure 2 est une représentation en perspective sommaire d'une habitation située à proximité d'une voie de circulation, et équipée d'écrans.

La figure 3 est une représentation schématique d'un écran, ainsi que des différents blocs de commande de chacun des éléments actifs de l'écran.

La figure 4 est une représentation schématique d'une source électro-acoustique monocouche utilisée dans un écran dans une maille du réseau.

La figure 5 est une vue schématique illustrant une association bi-couche de sources. Dans ces deux dernières figures, on a tracé les lignes tangentes à l'axe principal le plus long des hodographes particuliers acoustiques.

La figure 6 représente une embrasure de fenêtre protégée par une pluralité de sources électroacoustiques.

La figure 7 est une vue schématique en perspective d'un ensemble de sources associées selon trois plans parallèles.

Manière de réaliser l'invention

[0037] Comme déjà dit, l'invention concerne un perfectionnement du dispositif d'atténuation du bruit tel que décrit dans le brevet EP 0 787 340.

40 **[0038]** Un tel dispositif comprend un certain nombre de surfaces regroupant des sources électroacoustiques. Ces surfaces sont continues de manière à couvrir une superficie pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres carrés, ces surfaces sont disposées à des altitudes de l'ordre de 10 à 15 m, voire plus, au-dessus des lieux à protéger.

[0039] Ces surfaces sont réalisées par exemple par des treillis de tubes ou de câbles à l'intersection desquels sont fixées les sources de contre-bruit.

45 **[0040]** Comme on le voit à la figure 1, la zone à protéger peut comporter un certain nombre d'écrans plans A, B, C, D, destinés à assurer cette protection.

[0041] Les écrans A, B, C sont disposés au-dessus de la rue à protéger R1 tandis que l'écran D est placé en hauteur, en travers de la rue R1, et est destiné à bloquer les ondes guidées, par réflexions multiples sur les façades le long de la rue.

50 **[0042]** Dans le cas particulier de la figure 1, le dispositif permet de protéger une partie de l'agglomération contiguë à un aéroport, vis à vis des bruits d'avions au décollage et à l'atterrissage selon une trajectoire sensiblement parallèle à la rue R1 illustrée à la figure 1, à une distance horizontale de l'ordre d'un demi kilomètre.

[0043] Plus précisément, les écrans A et C sont placés immédiatement au-dessus des façades d'immeubles, en face de la zone à protéger. Ils sont disposés de telle manière à être inclinés par rapport à la verticale.

55 **[0044]** L'écran B est quant à lui placé en travers d'une rue perpendiculaire R2 à la rue principale R1 parallèle à la trajectoire de l'avion. Cet écran B ferme la trouée offerte aux bruits d'avions, lorsque celui-ci surplombe cette rue perpendiculaire R2.

[0045] L'écran D est quant à lui placé de la même façon, au travers de la rue R1 de manière à réfléchir le bruit qui

parvient à la zone à protéger de manière guidée, par réflexion préalable et multiple le long des façades dans la rue R1.

[0046] Les écrans B et D sont également inclinés pour améliorer l'efficacité du dispositif d'atténuation.

[0047] Dans une autre forme de réalisation, telle qu'illustrée à la figure 2, le dispositif est destiné à protéger une habitation isolée (10) située en bordure d'une voie autoroutière (11) vis à vis du bruit de circulation.

[0048] Plus précisément, le dispositif est constitué d'un écran cylindrique (12) adapté à la protection de la façade principale de l'habitation (10) exposée aux bruits.

[0049] On remarque également sur la figure 2, la présence d'une pluralité de microphones (15) disposés en bordure immédiate de la chaussée (11), et destinés à capter le bruit propre des véhicules (16).

[0050] Les signaux générés par les microphones (15) sont acheminés vers l'unité de pilotage de l'écran (12) par un moyen approprié et notamment par liaison filaire (non représentée).

[0051] Comme représenté, les écrans sont constitués par des pylônes (20-22) de forme appropriée supportant des panneaux (24) de treillis régulier à mailles triangulaires, carrées ou préférentiellement hexagonales, au centre desquelles sont fixées les sources (25) de contre-bruit. Ces sources peuvent être simples-couches, ou préférentiellement multi-couches, c'est-à-dire constituées de l'association de plusieurs haut-parleurs décalés les uns par rapport aux autres, et selon la normale à la surface de référence.

[0052] Comme représenté à la figure 3, à chaque panneau (24) est associée une base (30) de captation microphonique et un système électronique (40) de contrôle qui comprend des blocs fonctionnels suivants :

- un bloc (41) de caractérisation des ondes de contre-bruit ;
- un bloc (42) de commande des sources de contre-bruit ;
- des blocs (43) de commande intégrée.

[0053] Plus précisément, le bloc (41) de caractérisation des ondes de bruit permet de déterminer les caractéristiques principales des ondes incidentes directes et réfléchies par le sol et divers obstacles.

[0054] Ce bloc de caractérisation (41) détermine les directions respectives des normales à ces ondes, les signaux acoustiques propres à chacune d'entre elles ainsi que leurs positions relatives dans le temps.

[0055] Le délai de chacun de ces signaux par rapport au signal de l'onde directe est déterminé par rapport à un point unique O_i de référence, appelé "point de référence de la base microphonique", situé généralement en son barycentre.

[0056] Le bloc (42) de commande des sources de contre-bruit assure un filtrage linéaire identique pour chacun des signaux caractéristiques des ondes de bruit issues des blocs (41) de caractérisation précités.

[0057] Ce filtrage a pour but d'égaleriser les temps de groupe des sources électroacoustiques sur l'étendue de la bande de fréquence d'action de l'écran.

[0058] Chacun des signaux filtrés est ensuite acheminé, par exemple par multiplexage, sur un bus commun (44) vers les blocs de commande intégrés (43) des sources de contre-bruit.

[0059] Parallèlement, et de manière cadencée, les délais caractéristiques des signaux sont également transmis sur ce bus (44). Ces délais évoluent continûment selon le mouvement de la source de bruit, et avec les aléas de la propagation sonore.

[0060] Chaque source de contre-bruit est elle-même dotée de son propre bloc de commande intégré (43) dont la double fonction est :

- de positionner dans le temps les signaux propres aux différentes ondes, en leur appliquant par des "lignes à retard" réglables, les délais qui correspondent à leur position géométrique. Ainsi, les sources de contre-bruit doivent délivrer des signaux en concomitance stricte avec ceux que portent les différentes ondes balayant leurs surfaces actives. Les délais sont calculés à partir des délais de référence transmis sur le bus, selon la position géométrique de la source vis à vis du point de référence de la base microphonique M ;
- de sommer tous les signaux ainsi recalés dans le temps ;
- de les appliquer, après un décodage numérique-analogique, à des amplificateurs propres à chaque source élémentaire de contre-bruit.

[0061] Les sources de contre-bruit situées sur le pourtour des écrans sont soumises à des commandes semblables à l'ensemble, mais réglées de façon particulière en niveau et délai pour régulariser les effets de bord.

[0062] Il est par ailleurs avantageux de disposer à l'intérieur du volume situé en aval de l'écran, c'est-à-dire sous sa protection acoustique, un ou plusieurs microphones (32) de contrôle du bruit résiduel, dont les signaux sont retournés au bloc de commande (42) des sources de contre-bruit, de manière à assurer des fonctions complémentaires telles que :

- la supervision du fonctionnement local du système avec un ajustage permanent par une boucle de retour, ayant une constante de temps de quelques secondes, permettant de pallier les dérives paramétriques et d'assurer ainsi

la meilleure conformité des signaux acoustiques de contre-bruit vis à vis des signaux de bruit;

- le réglage adaptatif fin des lois de commande des sources de contre-bruit et particulièrement des sources de contour vis à vis des effets de bord des écrans en fonction du mouvement de l'avion, et ce, selon une constante de temps de l'ordre de la seconde,
- la détection d'anomalies de fonctionnement avec une possible mise en arrêt éventuel et une signalisation ;
- la possibilité d'exécuter des procédures automatiques de test.

[0063] Comme exposé précédemment, pour obtenir une performance d'atténuation de l'ordre de 20 décibels, il est nécessaire que la précision globale de la chaîne de mesure et de restitution soit de $5 \cdot 10^{-3}$ en linéarité, ce qui impose une précision sur chaque composant du système de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$.

[0064] En conséquence, s'agissant des sources de contre-bruit, à savoir les différents haut-parleurs et les amplificateurs analogiques associés, le taux de distorsion non linéaire doit être inférieure à $2 \cdot 10^{-3}$, au niveau maximal délivré.

[0065] Cette exigence de précision requiert une attention particulière pour la conception des haut-parleurs et de leurs circuits de commande.

[0066] S'agissant des microphones qui constituent la base de captation des différentes ondes de bruit, l'effet des paramètres physiques d'environnement, tels que température, pression atmosphérique, taux d'humidité, sont compensés pour ne pas affecter la linéarité de la réponse au-delà du taux de $2 \cdot 10^{-3}$ exigé.

[0067] Les effets du vent sur les microphones, à faible constante de temps, typiquement inférieure à la seconde, sont limités par voie aérolitique, en utilisant par exemple des corps poreux profilés en tant qu'enveloppes de protection, ainsi que par voie électronique pour ne pas perturber les signaux de commande de contre-bruit dans la bande de fréquence de fonctionnement du système.

[0068] S'agissant du bloc (41) de caractérisation des signaux propres aux ondes incidentes à traiter par l'écran, la précision et l'extraction des signaux doit être de l'ordre de 10^{-3} , ce qui implique en particulier un taux de diaphonie inférieur à cette valeur, et fixe ainsi la performance globale des algorithmes conçus pour assurer, en temps réel, cette discrimination.

[0069] Outre, les exigences concernant la linéarité des différents organes de traitement, une exigence particulière est requise pour la résolution du calage dans le temps des signaux de commande des sources de contre-bruit, nécessaire à assurer leur concomitance vis à vis des signaux des ondes de bruit, et donc en fonction inverse de la limite de fréquence haute de la bande de fonctionnement du système.

[0070] Plus précisément, pour obtenir le taux d'atténuation de 20 décibels, on a déterminé qu'il était nécessaire que le coefficient de corrélation du signal de contre-bruit au signal de bruit soit supérieur à 0,995, ce qui implique un déphasage maximal entre leurs composantes spectrales de 6° , soit $1/60^{\text{ème}}$ de période.

[0071] Il en résulte que la résolution temporelle des signaux doit être typiquement meilleure que 17 micro secondes pour la fréquence d'un kiloHertz.

[0072] Ainsi, la cadence de l'horloge qui fixe le pas de calage dans le temps des signaux dans les blocs de commande des haut-parleurs, sera supérieure à 60 kiloHertz. Traduite en longueur d'ondes, cette résolution temporelle correspond à une résolution en position géométrique du soixantième de la longueur d'onde maximum, soit 5 mm pour une fréquence maximum de 1 kiloHertz.

[0073] Cette valeur correspond à l'exigence de rigidité de la structure support, qui lie la base microphonique au panneau de sources de contre-bruit.

[0074] Sa déformation, notamment sous la charge due au vent, ne doit donc pas induire des déplacements relatifs supérieurs à cette valeur, pour conserver un taux d'atténuation de l'ordre de 20 décibels.

[0075] Le fonctionnement de l'écran actif anti-bruit en tant que dispositif d'atténuation d'ondes sonores en espace libre, est déjà décrit dans le brevet EP 0 787 340 du Demandeur. Il s'agit donc d'un système rapproché de sources de contre-bruit, agencé et piloté en signal pour générer des ondes de contre-bruit algébriquement opposées aux ondes tangentes de bruit.

[0076] Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'invention, il peut être utile de donner une description physique directe et efficace du fonctionnement, expliquant la nécessaire concomitance spatiale et temporelle au niveau des sources de contre-bruit.

[0077] Ainsi, s'agissant d'une onde incidente parvenant au système sous la forme fondamentale d'un front d'onde de bruit, c'est-à-dire d'un saut d'accélération particulière, à filtrer linéairement dans la bande de fréquence utile, l'action des sources de contre-bruit vis à vis de ce front consiste, pour chaque source, à interagir avec ce front à l'instant exact de son passage, et de telle manière que ce front ne se propage pas au-delà de la source, en direction de la zone aval à protéger.

[0078] Les sources de contre-bruit créent donc en concomitance, des conditions aux limites adaptées à réfléchir ou à absorber le front d'onde incident. Les sources de contre-bruit constituent ainsi des écrans réalisant, en termes acoustiques, des conditions aux limites particulières.

[0079] Dans la mesure où ces sources de contre-bruit sont constituées par des haut-parleurs électrodynamiques,

elles se comportent naturellement, dans la gamme de fréquence où on les utilise, comme des sources de variation de débit acoustique.

[0080] Au courant injecté dans la bobine du haut-parleur, correspond une force de Laplace qui rencontre comme réaction principale la force d'inertie de l'équipage mobile du haut-parleur. Cet équipage mobile prend une accélération proportionnelle audit courant.

[0081] Par le système de commande, on règle cette accélération, et donc la variation de débit acoustique délivré par la membrane des haut-parleurs, et de manière concomitante, au double du débit normal de l'onde acoustique de bruit sur la surface de la maille propre au haut-parleur, cette source de contre-bruit réalisant, sur ladite maille, une condition aux limites de réflexion totale de l'onde.

[0082] La pression est en effet nulle sur la surface de l'écran, et la charge acoustique est donc nulle au niveau de la source.

[0083] Il s'agit là du mode de fonctionnement théorique d'un écran actif constitué d'une seule couche de haut-parleurs. Cependant, comme déjà évoqué, un tel mode de fonctionnement avec une source unique présente une fréquence de coupure qui n'est pas suffisamment élevée pour contrecarrer la partie gênante du spectre des ondes émises par les moyens de transport classiques, dans la mesure où l'on limite la densité surfacique des haut-parleurs pour préserver la transparence visuelle de l'écran.

[0084] En effet, et comme illustré à la figure 4, on a constaté qu'il s'établit entre l'onde de bruit incidente et l'onde réfléchie par les sources, au voisinage de ces dites sources, un champ interférentiel dont on schématise les "lignes de courant" (50), par les tangentes en chaque point à l'axe principal majeur des hodographes particulières acoustiques.

[0085] Ce champ s'organise spatialement en réseau, par cellules tubulaires qui se répètent périodiquement selon les mailles de l'écran, dès que ces mailles sont suffisamment nombreuses, pour que l'organisation du champ interférentiel soit pratiquement invariante d'une maille à une autre.

[0086] Dans chaque cellule, les "lignes de courant" permettent de définir des tubes de courant acoustique qui viennent converger sur la surface active de la source de contre-bruit, c'est-à-dire la membrane du haut-parleur (25).

[0087] Ces tubes constituent autant de guides d'ondes fictifs à l'intérieur desquels s'établit le champ interférentiel.

[0088] Le schéma de la figure 4 permet d'illustrer les phénomènes suivants.

[0089] En effet, par rapport à la surface d'ondes phase de référence Φ , la différence de marche des ondes guidées s'accroît à mesure que les tubes s'éloignent de l'axe de révolution pour devenir pratiquement égale au diamètre "a" de la cellule.

[0090] Le phénomène de coupure survient pour : $\frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0} = \frac{a}{2}$, quand le régime stationnaire le long du tube extrême présente une demi-longueur d'ondes de différence de marche $\frac{a}{2}$ par rapport au tube central, et est donc en opposition de phase avec le débit de la source de contre-bruit.

[0091] La fréquence de coupure f_0 est donc voisine de $\frac{c}{a}$, comme énoncé ci-avant.

[0092] Au-delà de cette fréquence, l'onde progressive incidente guidée dans le tube extrême ne peut plus être contrôlée par la source de contre-bruit, et traverse l'écran en donnant naissance à des ondes réfractées, obliques, qui obèrent le rôle protecteur conféré à l'écran.

[0093] Les sources sont disposées par sous-ensembles selon des écrans parallèles les uns aux autres, et le fonctionnement est alors illustré à la figure 5.

[0094] En effet, le fonctionnement de sources multi-couches permet d'accroître la fréquence de coupure du système pour une dimension donnée de la maille du réseau. Plus précisément, et selon le schéma illustré à la figure 5, les différentes sources (27, 28) d'une même maille sont commandées, avec un décalage de phase déterminé, pour agir sur le tube extrême (51) de manière à lui éviter d'échapper au-dessus de la fréquence f_0 , en continuant à faire que les "lignes de courant" restent canalisées vers la source de la couche appropriée.

[0095] En effet, et en référence à la figure 5, le long de l'axe (52) des sources (27, 28), et donc sous la source première (27), une suite de sources secondaires (28), commandées avec les phases et modules voulus, permet de capter et de réfléchir le débit acoustique de l'onde incidente, pour les lignes de courant qui échappent à la source première (27), ce en respectant la structure interférentielle du champ acoustique, proche du haut-parleur, telle que décrite précédemment.

[0096] De façon simplifiée, la figure 5 représente une seule source secondaire.

[0097] On observe sur les lignes de courant tracées, un retard de marche pour atteindre la seconde source (28) de l'ordre de $d + a$, où "d" représente la distance entre les membranes de haut-parleurs (27, 28), et "a" la demi-maille de l'écran.

[0098] Ce retard de marche est compensé par le dispositif de commande, qui alimente cette seconde source (28) par un signal retardé sensiblement de $\frac{d+a}{c}$, cette valeur pouvant être ajustée avec plus de précision : de manière à assurer strictement l'orthogonalité du champ source aux modes obliques du réseau.

[0099] La fréquence de coupure est ainsi portée au double de la fréquence initiale, elle-même voisine de $\frac{c}{a}$.

[0100] Dans cet esprit, les débits des sources sont réglés en proportion des surfaces des tubes de courant contrôlés.

[0101] Le principe peut s'étendre à un nombre supérieur de sources, et le tableau ci-après présente la fréquence

de coupure pour des nombres différents de couches de sources de contre-bruit, pour deux cas de figures de densité surfacique de sources.

Nombre de couches		1	2	3	4
Fréquence de coupure en Hertz	Une source multiple pour 1 m ²	370	700	1000	1300
	Une source multiple pour 5 m ²	170	300	450	600

[0102] Les sources telles que représentées sur la figure 5, par des haut-parleurs d'axe commun, peuvent être avantageusement réalisées par des ensembles contigus de sources de plus petites dimensions, convenablement assemblées et commandées avec les retards appropriés pour assurer la meilleure régularité au champ de débit acoustique.

[0103] Il ressort de ce qui précède que le dispositif conforme à l'invention assure une atténuation du bruit dans une bande de fréquence couvrant la majorité du spectre des ondes de bruits des moyens de transports tels qu'avions ou chemin de fer.

[0104] Le fonctionnement de l'écran décrit est un fonctionnement en réflecteur actif vis à vis des ondes incidentes de bruit, il est néanmoins possible d'envisager un fonctionnement en absorbeur parfait de ces ondes dans la mesure où les ondes réfléchies pourraient présenter, dans certaines situations, un effet nocif vis à vis du site environnant.

[0105] Pour cela, il convient théoriquement d'associer aux sources de variation de débit acoustique, des sources de variation de pression acoustique, de manière à réaliser sur la surface de l'écran la condition aux limites mixtes d'adaptation : $\frac{\partial p}{\partial t} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot \frac{\partial V_n}{\partial t}$, où

- p désigne la pression acoustique,
- V_n la vitesse acoustique normale à l'écran,
- $\rho_0 \cdot c_0$ l'impédance acoustique de l'air.

[0106] Ces deux types de sources étant commandées en concomitance à partir des mêmes signaux propres aux ondes incidentes de bruit.

[0107] Ne disposant pas pratiquement de sources de pression acoustique, on est conduit à réaliser la même condition à partir d'une double distribution de sources de variation de débit, placées sur deux surfaces parallèles distantes de e , e étant inférieur à la demi longueur d'onde minimale.

[0108] Dans ces conditions, un modèle simple montre qu'en pilotant la source aval en quadrature avec l'onde incidente, et la source amont décalée dans le temps de e/c_0 , à même amplitude, on assure la condition d'adaptation requise sur une décade de fréquence, avec un variateur de débit de source de l'ordre de trois fois plus élevée que pour un écran simple.

[0109] Dans ce fonctionnement, la source aval est déchargée acoustiquement et c'est la source amont qui absorbe la puissance du bruit.

[0110] D'autre part, les écrans acoustiques actifs réflecteurs décrits peuvent être associés dans leur fonctionnement à des écrans passifs contigus. Ces écrans passifs peuvent être constitués par des surfaces construites préexistantes (toits et façades d'immeubles selon la figure 1). Ils peuvent être également mis en place pour des raisons acoustiques, en complémentarité des écrans actifs, et réalisés selon des techniques architecturales adaptées, notamment à l'aide de surfaces vitrées d'épaisseur convenable, selon des arguments d'usage ou d'esthétique, propres à l'aménagement de sites particuliers.

[0111] De tels écrans passifs provoquent alors une réflexion du type duale du type décrit pour les écrans actifs, à savoir qu'acoustiquement "durs", ils créent les conditions aux limites approchant l'annulation de la vitesse acoustique normale, et le doublement de la pression acoustique à leur surface.

[0112] Des précautions doivent être prises à la jonction de ces deux types d'écrans pour éviter que les forts gradients de pression résultants n'altèrent localement les effets propres de réflexion recherchés, entraînant par là-même des fuites acoustiques vers le volume à protéger.

[0113] La préconisation du présent brevet est d'adoucir ces gradients en passant plus progressivement du contrôle actif de type écran réfléchissant "dur" (vitesse normale nulle) vers celui décrit d'écran réfléchissant "mou" (se caractérisant par une pression nulle).

[0114] Pour réaliser un écran actif "dur", on utilise des sources à contrôle de variation de pression. Il s'agit de sources dont on ne dispose pas a priori, les divers type de haut-parleurs usuels approchent au contraire des sources de variation de débit, et leur délai de réponse rend illusoire leur contrôle en variation de pression.

[0115] On réalise de telles sources par association, par paire de sources de variation de débit opposées, montées dos à dos, constituant un dipole acoustique.

[0116] De telles sources sont en particulier à employer pour réaliser des écrans actifs sur des ouvertures en façade

d'immeubles, fenêtres ou baies, de manière à assurer la condition de réflexion en situation "fenêtre ouverte", évitant ainsi au bruit externe de pénétrer à l'intérieur des habitations.

[0117] On réalise pour cela des sources multiples de type bipolaires, par exemple quatre sources (26) aux quatre coins de l'embrasement, selon le montage décrit à la figure 6.

[0118] De telles sources multiples peuvent être réalisées, comme illustré à la figure 7, par l'association de plusieurs sources élémentaires (27) déposées selon des plans parallèles. Chaque source élémentaire (27) est une source bipolaire présentant deux faces parlantes en opposition.

Revendications

1. Dispositif actif d'atténuation de l'intensité sonore au niveau d'une zone déterminée, par émission d'ondes de contre-bruit, du type comprenant :

- un ensemble de capteurs (30) susceptibles de déterminer les signaux et les directions des ondes émises par les sources de bruit éloignées ;
- des moyens pour traiter les signaux $b(t)$ issus desdits capteurs, et pour générer des signaux $cb(t)$ correspondant aux ondes de contre-bruit ;
- un ensemble de sources électro-acoustiques (25), lesdites sources étant installées dans l'espace proche de la zone à protéger, et connectées auxdits moyens de traitement, et susceptibles d'émettre des ondes de contre-bruit dans la même direction et dans le même sens que les ondes incidentes, les capteurs et les sources électro-acoustiques étant placés de telle façon que les ondes incidentes atteignent préalablement les capteurs, lesdites sources électro-acoustiques (25) étant disposées selon une surface continue (24), et selon un maillage régulier,

caractérisé en ce qu'il comporte plusieurs ensembles de sources électro-acoustiques (27, 28) disposées selon plusieurs surfaces décalées les unes par rapport aux autres par translation, selon leur normale, le fonctionnement des sources électro-acoustiques de ces ensembles permettant d'accroître la fréquence de coupure du système pour une dimension donnée de la maille.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les sources électro-acoustiques (25) sont disposées selon un maillage hexagonal.

3. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le maillage présente un pas inférieur à deux mètres.

4. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les surfaces continues présentent une géométrie plane, ou une géométrie de quadrique, notamment cylindrique.

5. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il est associé à une structure rigide formant un écran solide.

6. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que certaines des sources électroacoustiques sont associées par paires pour constituer des dipôles acoustiques.

7. Ensemble composé de plusieurs dispositifs selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel les différents dispositifs sont juxtaposés dans l'espace de la zone à protéger.

Claims

1. An active device for attenuating the intensity of sound in a defined region, by the emission of antinoise waves, of the type comprising :

- a set of sensors (30) capable of determining the signals and the directions of the waves emitted by the remote noise sources ;
- means for processing the signals $n(t)$ coming from said sensors and for generating signals $an(t)$ corresponding to the antinoise waves ;
- a set of electroacoustic sources (25), said sources being installed in the space close to the region to be pro-

tected and connected to said processing means and being capable of emitting antinoise waves in the same direction and in the same sense as the incident waves, the sensors and the electroacoustic sources being placed in such a way that the incident waves reach the sensors beforehand, said electroacoustic sources (25) being arranged on a continuous surface (24) and in a uniform lattice,

characterized in that it comprises several sets of electroacoustic sources (27, 28) arranged over several surfaces offset one with respect to the other by translation, along their normal, the functioning of the electroacoustic sources of these sets increasing the cutoff frequency of the system for a given dimension of the cell.

2. The device as claimed in claim 1, wherein the electroacoustic sources (25) are arranged in a hexagonal lattice.
3. The device as claimed in claim 1, wherein the lattice has a pitch of less than two meters.
4. The device as claimed in claim 1, wherein the continuous surfaces have a plane geometry or a quadric, especially cylindrical, geometry.
5. The device as claimed in one of claims 1 to 4, wherein it is combined with a rigid structure forming a solid screen.
6. The device as claimed in one of claims 1 to 5, wherein some of the electroacoustic sources are combined in pairs to form acoustic dipoles.
7. A system composed of several devices as claimed in one of claims 1 to 6, wherein the various devices are juxtaposed within the space of the region to be protected.

Patentansprüche

1. Aktive Vorrichtung zur Abschwächung der Schallintensität im Bereich einer bestimmten Zone durch Emission von Gegenlärmwellen, des Typs, welcher folgendes umfaßt:

- eine Anordnung von Aufnehmern (30), welche die Signale und die Richtung der von entfernten Lärmquellen emittierten Wellen ermitteln können;
- Mittel zur Verarbeitung der von den genannten Aufnehmern abgegebenen Signale $b(t)$ und zur Erzeugung von Signalen $cb(t)$, welche den Gegenlärmwellen entsprechen;
- eine Anordnung elektro-akustischer Quellen (25), wobei die genannten Quellen in dem Raum nahe der zu schützenden Zone angebracht und mit den genannten Verarbeitungsmitteln verbunden sind und Gegenlärmwellen in der gleichen Richtung und im gleichen Sinn wie die einfallenden Wellen emittieren können, wobei die Aufnehmer und die elektro-akustischen Quellen derart angeordnet sind, daß die einfallenden Wellen die Aufnehmer vorher erreichen, wobei die genannten elektro-akustischen Quellen (25) entlang einer kontinuierlichen Oberfläche (24) und in einem gleichmäßigen Maschenwerk angeordnet sind,

dadurch gekennzeichnet, daß sie mehrere Anordnungen elektro-akustischer Quellen (27, 28) umfaßt, welche entlang mehreren durch Translation entlang ihrer Normalen zueinander versetzten Oberflächen angeordnet sind, wobei die Funktionsweise der elektro-akustischen Quellen dieser Anordnungen es ermöglicht, die Grenzfrequenz des Systems für eine gegebene Abmessung der Masche zu erhöhen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** die elektro-akustischen Quellen in einem hexagonalen Maschenwerk angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Maschenwerk eine Teilung von weniger als zwei Meter aufweist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** die kontinuierlichen Oberflächen eine ebene Geometrie oder eine Geometrie einer Quadrik, insbesondere einer zylindrischen, aufweisen.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** sie einer starren Struktur zugeordnet ist, welche einen festen Schirm bildet.

EP 1 094 444 B1

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** einige der elektro-akustischen Quellen paarweise zugeordnet sind, um akustische Dipole zu bilden.
7. Anordnung, zusammengesetzt aus mehreren Vorrichtungen nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei der die verschiedenen Vorrichtungen in dem Raum der zu schützenden Zone nebeneinanderliegen.

5

10

15

20

25

30

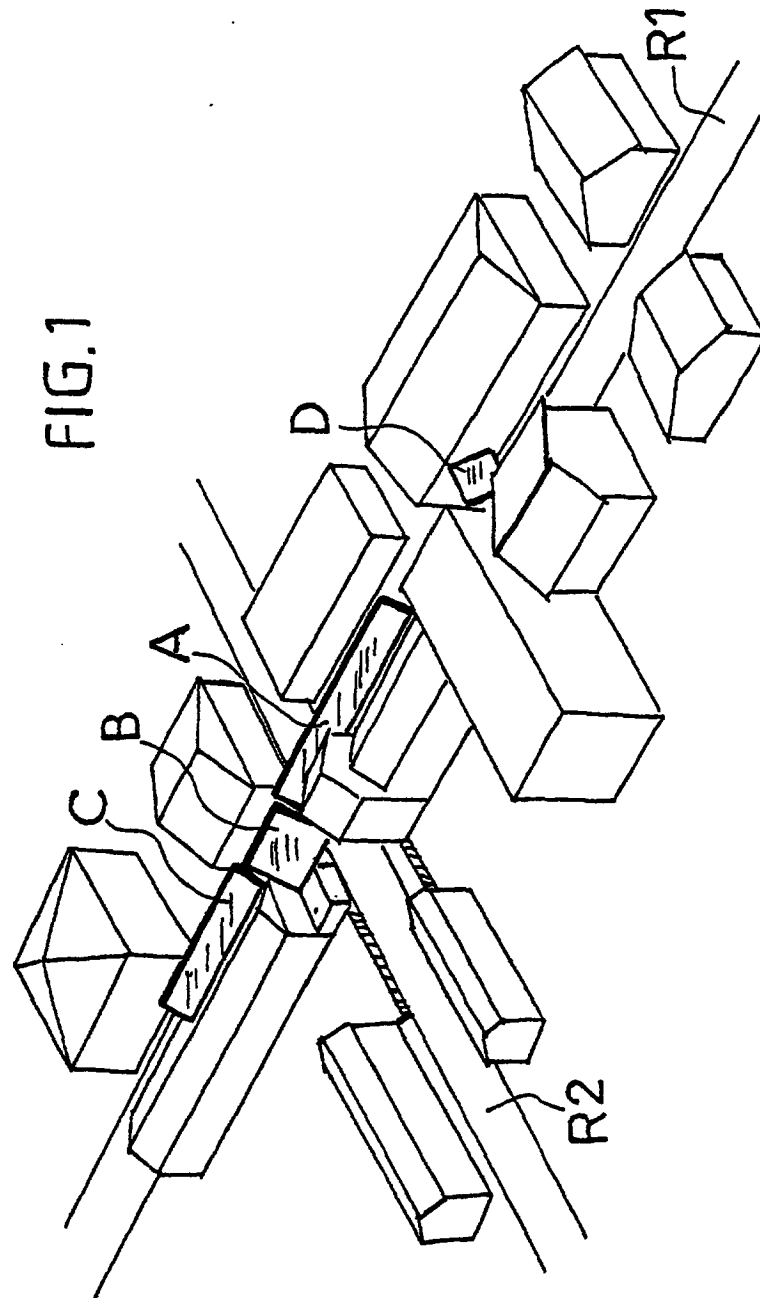
35

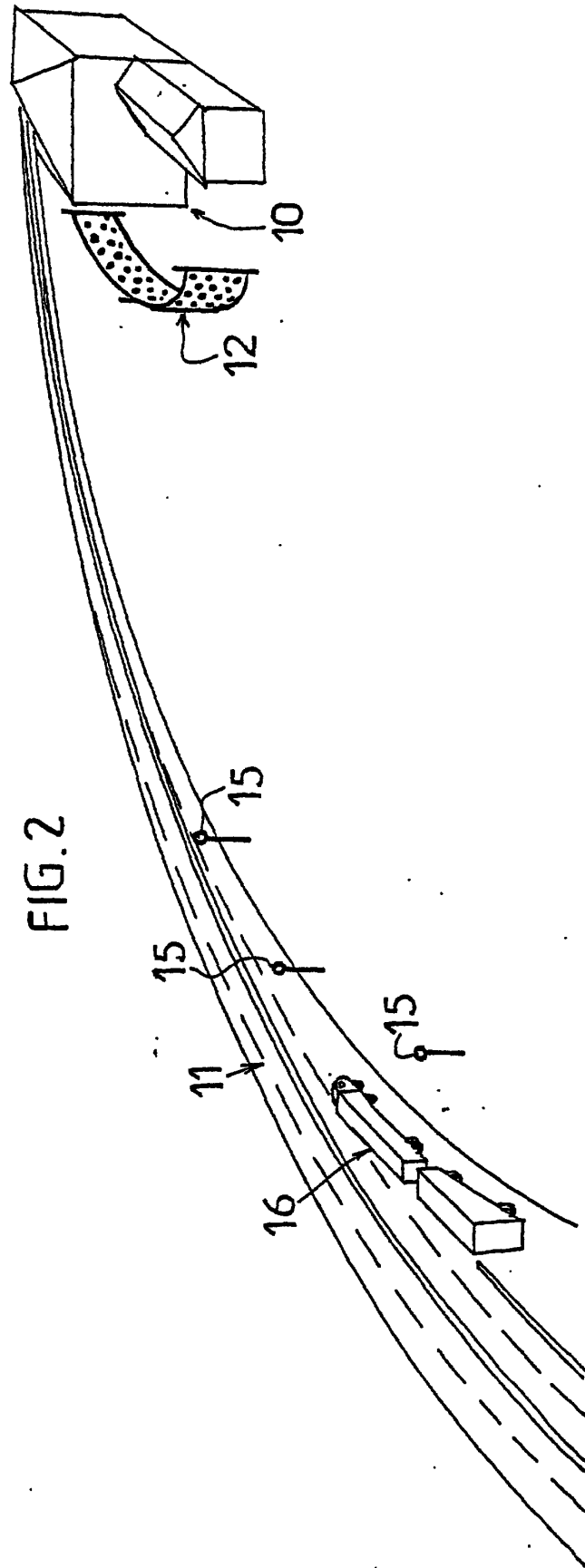
40

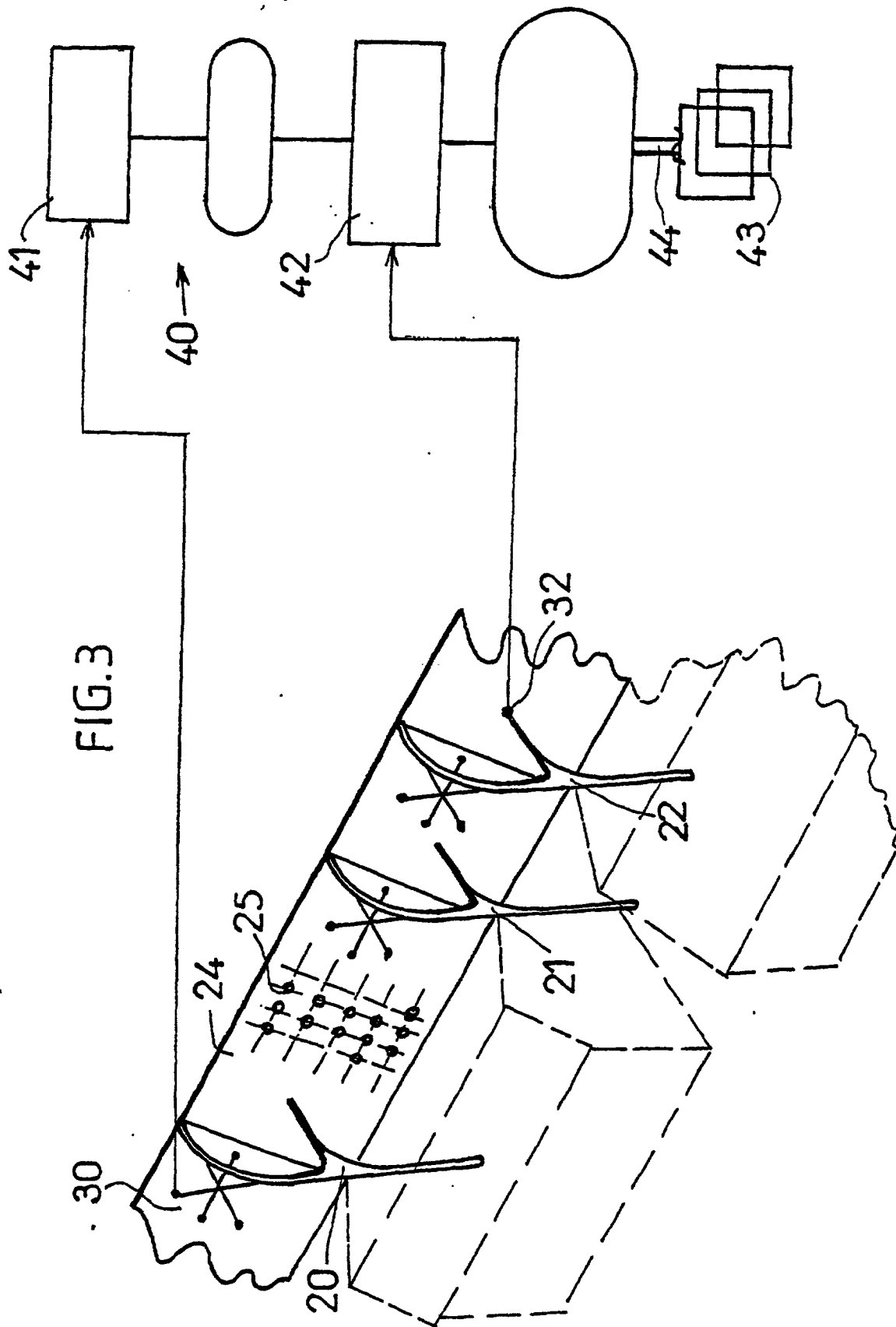
45

50

55







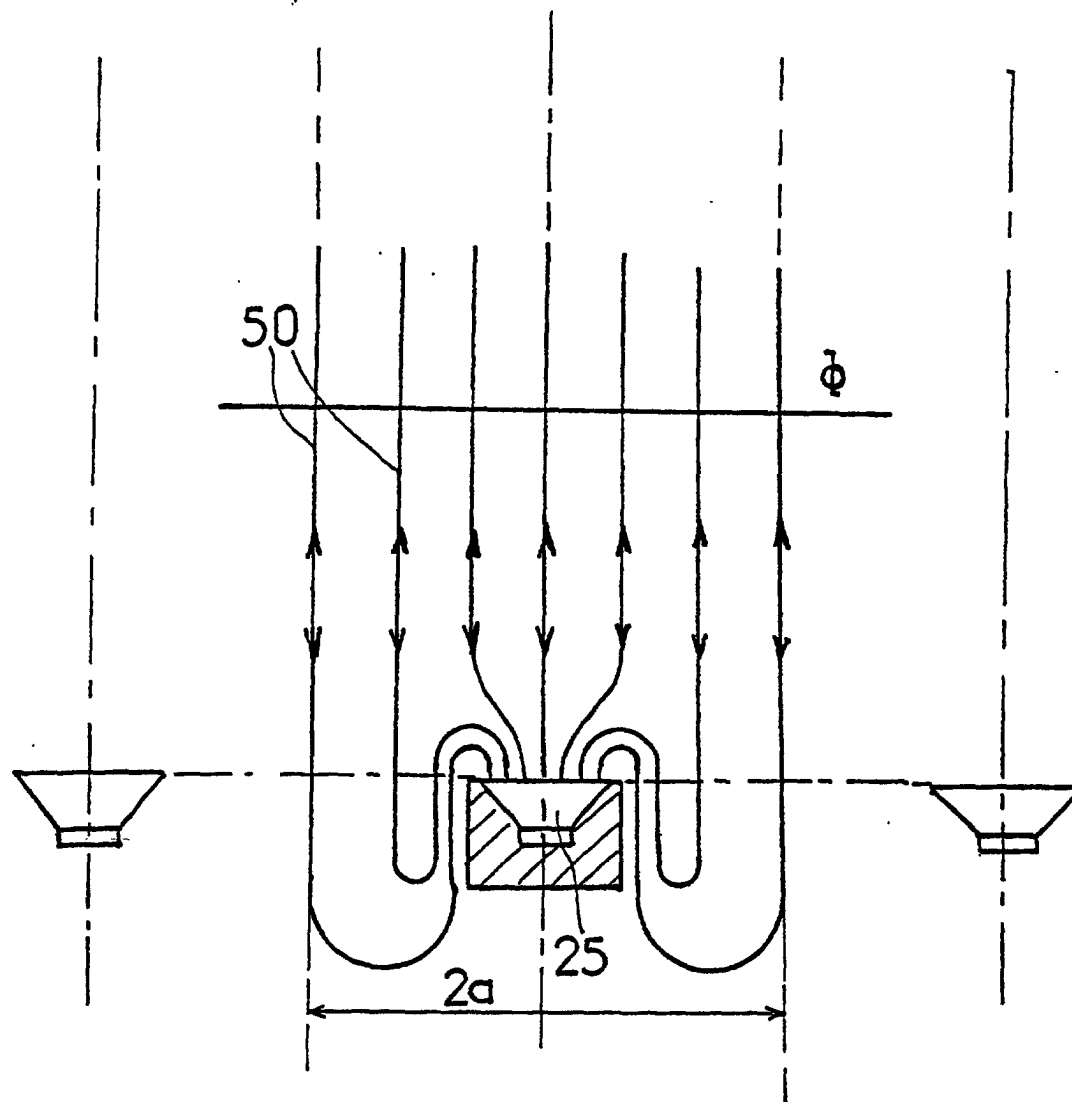


FIG. 4

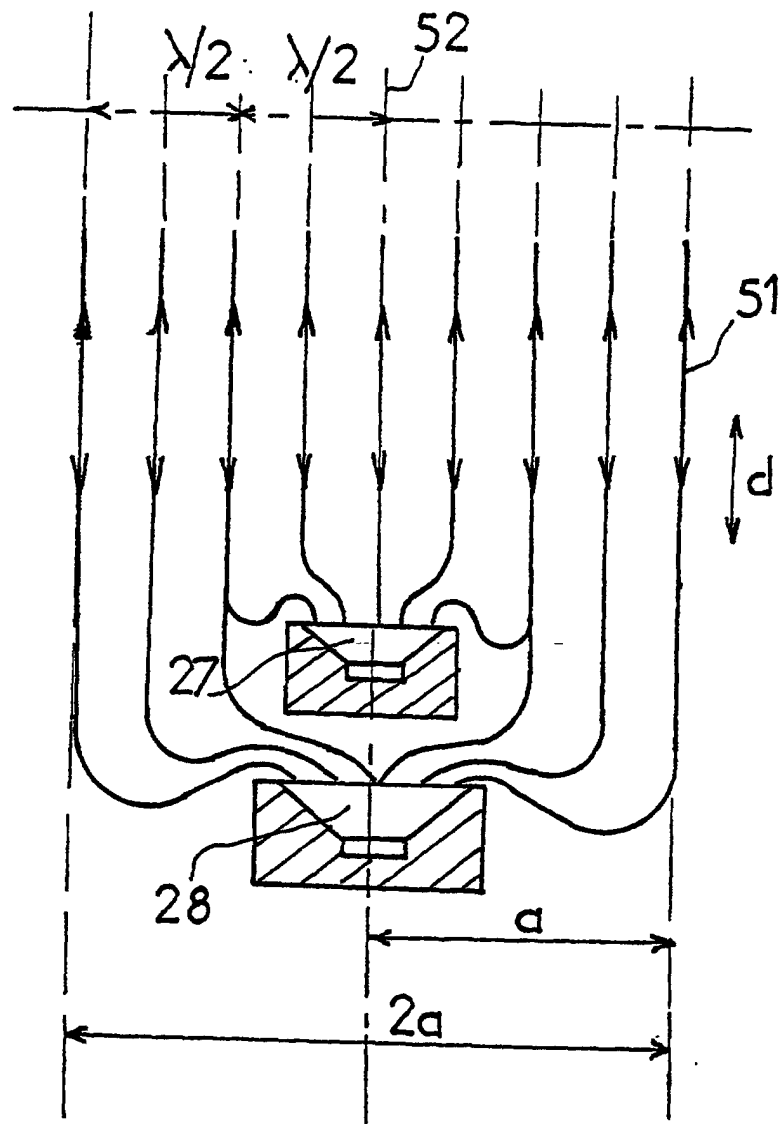


FIG. 5

FIG. 6

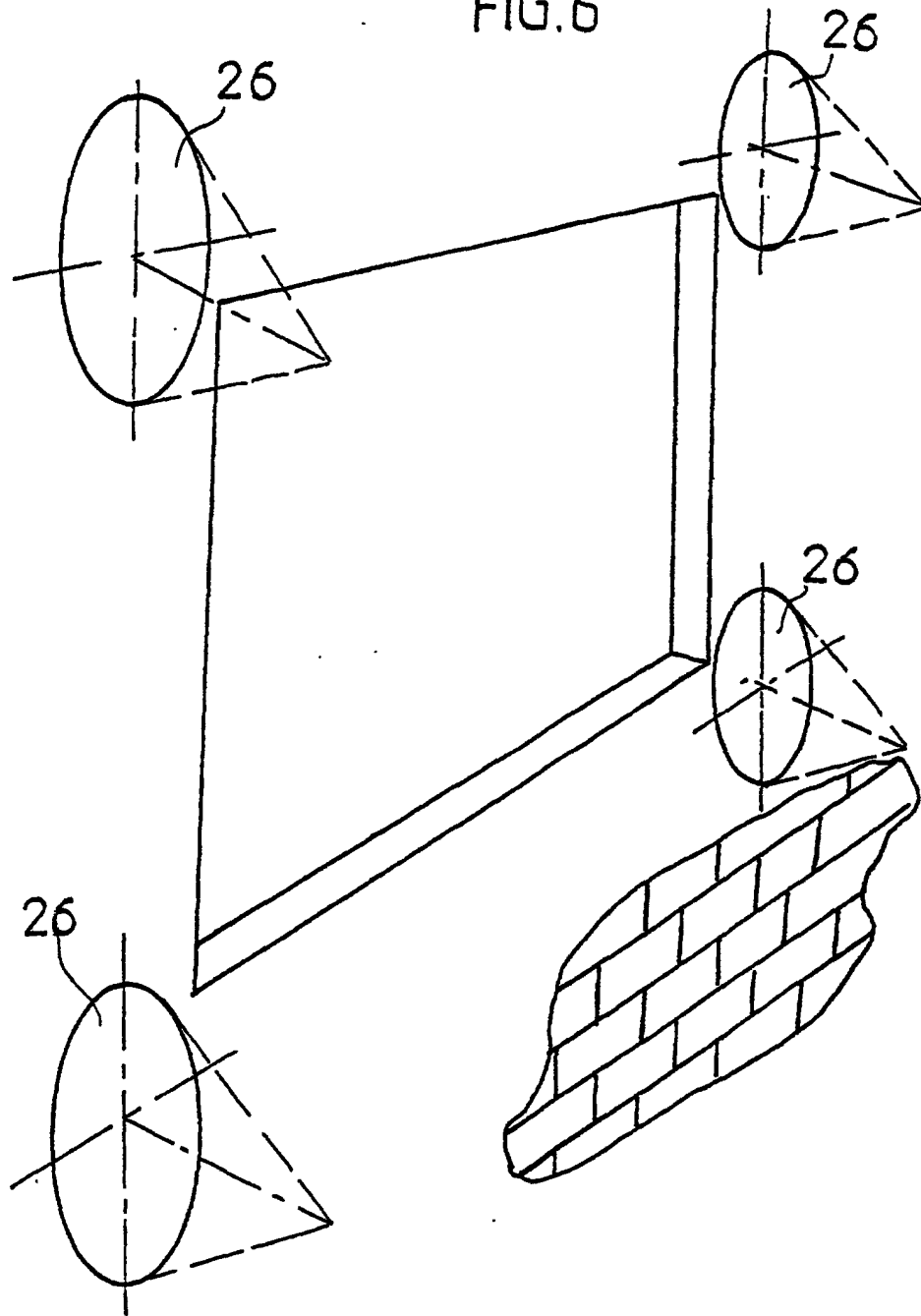


FIG. 7

