(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 559 273**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **85 01441**

(51) Int Cl⁴ : G 01 S 13/74, 13/08, 13/70.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 1er février 1985.

(30) Priorité : DE, 4 février 1984, n° P 34 03 947.3.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 32 du 9 août 1985.

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(71) Demandeur(s) : *Société dite : INTERNATIONAL STANDARD ELECTRIC CORPORATION.* — US.

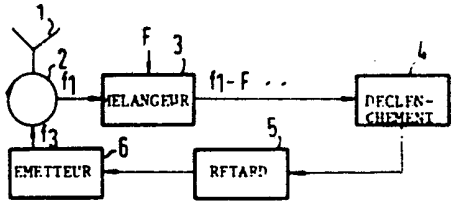
(72) Inventeur(s) : Günter Höfgen et Helmut Euler.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Philippe Kohn, ITT Data Systems France SA.

(54) Système de mesure à distance bidirectionnel.

(57) Système de mesure de la distance bidirectionnel, dans lequel un interrogateur envoie un signal d'interrogation à un répondeur qui détermine le temps d'arrivée du signal d'interrogation et qui, après un retard fixe δ qui suit la réception du signal d'interrogation, envoie un signal de réponse à l'interrogateur, caractérisé en ce que le répondeur détermine 11 l'écart entre le temps de transit du signal d'interrogation et le temps de transit nominal, dû aux conditions de propagation du signal d'interrogation dans le ou les milieux de propagation, et en ce que le retard δ, après lequel le signal de réponse est émis, est raccourci en fonction de l'écart déterminé du temps de transit du signal d'interrogation, de telle manière que les écarts de temps de transit des signaux d'interrogation et de réponse sont éliminés, au moins dans une très large mesure.



FR 2 559 273 - A1

La présente invention se rapporte à un système de mesure de distance bidirectionnel, dans lequel un interrogateur envoie un signal d'interrogation à un répondeur qui détermine le temps d'arrivée du signal d'interrogation et qui, après un retard fixe δ qui suit la réception du signal d'interrogation envoie un signal de réponse à l'interrogateur. De tels systèmes de mesure de la distance sont généralement connus. E. Kramar, auteur de l'ouvrage "Funksysteme für Ortung und Navigation", Verlag Berliner Union GmbH, Stuttgart, 1973, pp. 147-159, décrit un système de mesure de la distance (DME) bidirectionnel dans lequel les signaux d'interrogation et de réponse sont composés de paires d'impulsions.

La précision de la mesure du DME est affectée par des erreurs causées par la propagation le long de trajets multiples. On connaît des moyens qui permettent de réduire de telles erreurs.

Si l'interrogateur et le répondeur sont situés l'un par rapport à l'autre de telle façon que les signaux pénètrent dans la troposphère et l'ionosphère, par exemple, des erreurs sont également causées par les conditions de propagation des signaux dans les milieux formant l'ionosphère et la troposphère. Le temps de transit mesuré est alors plus long que le temps de transit correspondant à la propagation du signal en ligne droite (temps de transit nominal) sur lequel est basé la mesure de la distance.

Cette constatation est faite, par exemple, avec le système de navigation GRANAS, qui fait l'objet de la demande de brevet allemand 33 01 613. Dans le système de navigation GRANAS, les distances entre des satellites et des stations au sol sont mesurées au moyen d'un système DME bidirectionnel.

Les écarts entre les temps de transit des signaux se propageant dans l'ionosphère et/ou la troposphère par rapport au temps de transit nominal ont des effets perturbateurs sur d'autres systèmes également. Dans le système de navigation GPS (Global Positioning System), par exemple, on mesure la distance dans une direction et on sait comment les écarts de temps de transit causés par les conditions de propagation des signaux dans l'ionosphère et/ou la troposphère peuvent être pris en compte pendant

l'évaluation. Référence est faite à un article de E.H. Martin, "GPS User Equipment Error Models", paru dans NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 25, N° 2, 1978, pp 201 à 210 (en particulier pages 207 à 210), et à un rapport de E.E. Altshuler et P.M. Kalaghan, "Tropospheric Range Error Corrections for the NAVSTAR System", Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCRL-TR-74-0198, avril 1974. Pour tenir compte de l'erreur ionosphérique, deux signaux de fréquences différentes sont évalués pour la mesure de la distance dans une direction. L'erreur troposphérique est compensée conformément au modèle d'Altshuler dans lequel sont évalués, entre autres, l'indice de réfraction de la troposphère et l'angle de site de la station de mesure par rapport à la station émettant le signal utilisé pour la mesure de la distance dans une direction.

Dans un système DME bidirectionnel, contrairement au système DME unidirectionnel où l'écart du temps de transit n'est causé que sur un seul trajet du signal, les écarts de temps de transit sont présents sur les deux trajets de signaux (signaux d'interrogation et de réponse).

La présente invention a pour objet un système de mesure de la distance bidirectionnel dans lequel les erreurs provoquées par les écarts de temps de transit sont compensées.

Ce but est atteint en ce que le répondeur détermine l'écart entre le temps de transit du signal d'interrogation et le temps de transit nominal, dû aux conditions de propagation du signal d'interrogation dans le ou les milieux de propagation, et en ce que le retard δ, après lequel le signal de réponse est émis, est raccourci en fonction de l'écart déterminé du temps de transit du signal d'interrogation de telle manière que les écarts de temps de transit des signaux d'interrogation et de réponse sont éliminés, au moins, dans une très large mesure.

L'intérêt du nouveau système DME bidirectionnel réside dans le fait que l'instant de réception du signal de réponse par l'interrogateur correspond déjà à l'instant de réception corrigé, c'est-à-dire qu'à partir de la différence de temps entre l'émission

du signal d'interrogation et la réception du signal de réponse, on peut calculer directement la distance entre l'interrogateur et le répondeur selon une méthode connue en soi, tenant compte du retard fixe (retard nominal) du répondeur et des retards inhérents aux équipements. Pour corriger les écarts du temps de transit des signaux d'interrogation et de réponse, il faut prendre des mesures spéciales, en particulier au niveau du répondeur (outre le fait que l'interrogateur émet deux signaux d'interrogation de fréquences différentes pour compenser l'erreur ionosphérique). Il n'importe pas que les signaux d'interrogation et de réponse soient des signaux d'impulsions ou des signaux appropriés en ondes continues.

Les différents objets et caractéristiques de l'invention seront maintenant détaillés dans la description qui va suivre, faite à titre d'exemple non limitatif, en se reportant aux figures annexées qui représentent :

- la figure 1, est un schéma synoptique des éléments essentiels d'un répondeur classique d'un système DME bidirectionnel.
- les figures 2 et 3, sont des schémas synoptiques de deux réalisations d'une partie du répondeur, et
- la figure 4, est un schéma synoptique d'un répondeur dans lequel les deux réalisations des figures 2 et 3 sont mises en oeuvre.

Avec le nouveau système DME bidirectionnel, les types des signaux d'interrogation et de réponse utilisés n'ont pas d'importance. Par contre, ils ont une grande importance eu égard à la mise en oeuvre des éléments individuels du système. Etant donné que la mise en oeuvre des éléments du système ne revêt pas d'importance dans le cadre de cette invention, elle ne sera pas étudiée ici.

Les signaux d'interrogation émis par un interrogateur ont une porteuse de fréquence f_1. Ils sont reçus par l'antenne 1 du répondeur (fig. 1) et injectés dans un circulateur 2 à destination d'un mélangeur 3 où ils sont combinés à un signal de fréquence F de façon à produire un signal FI. Le signal FI de fréquence f_1-F

est appliqué à un dispositif 4 dans lequel une impulsion de déclenchement est dérivée du signal FI. L'impulsion de déclenchement fournie par le dispositif 4 déclenche uneligne à retard 5 et l'impulsion de déclenchement retardée déclenche un émetteur 6. Ce dernier génère le signal de réponse dont la porteuse a la fréquence f_3. Le signal de réponse est appliqué, en passant par le circulateur 2, à l'antenne 1 qui le rayonne.

Un tel répondeur est connu en soi. Les systèmes de commande automatique qui compensent, par exemple, les variations de retard dues aux changements de température ou au vieillissement des composants ne sont pas examinés ici car ils n'aident pas à comprendre la présente invention. Toutefois, sur un répondeur complet, de tels systèmes de commande automatique sont généralement présents en plus des dispositifs qui seront expliqués à l'aide des figures 2 et 3. Dansles DME, le retard est choisi pour que le signal de réponse soit émis exactement 50 µs après la réception du signal d'interrogation.Dans le système de navigation GRANAS, ce retard est de 1,2 seconde.

Dans la première réalisation, pour laquelle est représenté à la figure 2 un schéma synoptique d'une partie du répondeur, les écarts de retard causés pendant la propagation du signal dans la troposphère sont compensés.

Dans cette réalisation, on doit disposer des informations suivantes au niveau du répondeur :

1. Coordonnées X_B, Y_B, Z_B du répondeur ; longitude géographique λ et latitude géographique ϕ de la position du répondeur
2. Coordonnées X_S, Y_S, Z_S de l'interrogateur.
3. Indice de réfraction Ns de la troposphère.

Si l'interrogateur et le répondeur sont tous deux en mouvement, chacun d'eux doit déterminer sa propre position et la position de l'interrogateur doit être transmise au répondeur.

Dans le système de navigation GRANAS, l'interrogateur se trouve à bord d'un satellite et le répondeur est installé dans une station fixe au sol. Les données spécifiant la position du répondeur ne doivent donc être déterminées et stockées qu'une seule fois.

Dans le système de navigation GRANAS, les signaux d'interrogation contiennent les coordonnées du satellite sous forme codée. Il en résulte que la position du satellite (et, par conséquent, la position de l'interrogateur) est connue au niveau du répondeur.

Le répondeur comprend un dispositif classique pour la mesure de l'indice de réfraction Ns de la troposphère.

A partir des valeurs mesurées par ce dispositif, l'écart du temps de transit $\Delta t"$ du signal d'interrogation est déterminé conformément au modèle d'Altshuler. $\Delta t"$ mesure le retard du signal d'interrogation comparé au retard du signal se déplaçant le long d'un trajet direct.

A partir des valeurs mesurées, on calcule $\Delta t"$ à partir de l'équation :

$$\Delta t" = G(\alpha) \cdot H(h) \cdot F(h, Ns) \qquad (1)$$

où

α = angle de site

h = altitude du satellite au-dessus du niveau de la mer

G, H et F = fonctions empiriques.

Ces fonctions ne seront pas étudiées ici car elles sont traitées dans le rapport de Altshuler et Kalaghan. Elles contiennent des valeurs empiriques qui sont déterminées de nouveau à intervalles éloignés (environ 10 ans).

La valeur correctrice ainsi déterminée, $\Delta t"$, est indépendante de la fréquence du signal d'interrogation. L'écart du temps de transit affecte à la fois le signal d'interrogation et le signal de réponse. Le retard δ normalement fixe, qui correspond à l'écart entre la réception du signal d'interrogation et l'émission du signal de réponse, est donc réduite de $2\Delta t"$. La somme des écarts du temps de transit des signaux d'interrogation et de réponse et du retard du répondeur est donc égale à δ, c'est-à-dire, égale à la valeur qui doit être constante conformément aux principes de base du système, est connue par l'interrogateur et sert de base à la mesure de la distance. On obtient donc une correction des erreurs de propagation sans autres opérations au niveau de l'interrogateur.

La figure 2 montre comment le répondeur de la Figure 1 peut être modifié pour corriger l'erreur troposphérique.

Le signal de sortie du mélangeur 3 est fourni non seulement au dispositif 4 pour la production de l'impulsion de déclenchement mais aussi à un démodulateur 13. Ce dernier démodule le signal d'interrogation reçu et décode les coordonnées de l'interrogateur X_S, Y_S, Z_S qui sont contenues dans le signal d'interrogation. Ces coordonnées sont fournies à un calculateur 11 qui contient également les données X_B, Y_B, Z_B, ϕ et λ concernant le répondeur. Le répondeur comprend, par ailleurs, un dispositif de mesure 14 qui mesure l'indice de réfraction Ns de la troposphère. Ns est également fourni au calculateur 11. Dans le calculateur, $2\Delta t"$ est calculé comme il est indiqué ci-dessus.

Alors que la ligne à retard 5 du répondeur de la figure 1 produit un retard fixe, le nouveau répondeur contient une ligne à retard variable. Cette ligne à retard variable est commandée par le calculateur 11 afin de fournir un retard égal à $\delta - 2\Delta t"$.

Dans la seconde réalisation, pour laquelle un schéma synoptique d'une partie du répondeur est donné à la figure 3, les écarts du temps de transit causés pendant la propagation du signal dans l'ionosphère sont compensés.

On sait que l'ionosphère est un milieu dispersif. Un signal se déplace dans l'ionosphère le long de trajets différents en fonction de sa fréquence ; le temps de transit du signal dans l'ionosphère dépend donc également de sa fréquence.

Cette propriété sert à déterminer une valeur correctrice. Au lieu d'un signal d'interrogation, l'interrogateur émet deux signaux d'interrogation de fréquences différentes f_1 et f_2 dont voici un exemple numérique :

f_1 = 1,575 GHz

f_2 = 1,228 GHz

f_3 = 1,654 GHz (f_3 = fréquence du signal de réponse).

S'ils sont émis par l'interrogateur au même moment, les deux signaux d'interrogation atteignent le répondeur aux instants τ_1 et τ_2. A partir de ces instants (ou de la différence

$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$) et des fréquences des signaux d'interrogation, on détermine une valeur correctrice Δt. Si les deux signaux d'interrogation ne sont pas émis simultanément, ce déplacement de temps doit être pris en compte lors de la détermination de $\Delta\tau$.

La valeur correctrice utilisée pour réduire le retard δ est 2 Δt, car il se produit un écart du temps de transit à la fois dans le cas des signaux d'interrogation et dans celui du signal de réponse. La valeur correctrice est la suivante :

$$\Delta t = \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}} = \frac{\Delta_\tau}{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}}$$

Comme cela a été indiqué ci-dessus, l'écart de temps de transit dépend de la fréquence. Donc, et puisque la fréquence du signal de réponse diffère des fréquences des signaux d'interrogation, une réduction de δ par $2\Delta t$ donne une correction de l'écart du temps de transit mais cette correction contient une erreur causée par le fait que f_3 diffère de f_1 et de f_2.

On obtient une autre amélioration de la précision si ce fait est pris en compte lors de la détermination de la valeur correctrice.

Comme cela a été mentionné auparavant, l'écart du temps de transit du signal d'interrogation est Δt. L'écart du temps de transit du signal de réponse est donc :

$$\Delta t' = \Delta t \frac{f_1^2}{f_3^2}$$

Pour éliminer les écarts du temps de transit du signal d'interrogation et du signal de réponse, le retard δ est réduit par $\Delta t + \Delta t'$, c'est-à-dire que la valeur correctrice est égale à $\Delta t + \Delta t'$.

Aux fréquences ci-dessus, les valeurs numériques de la différence Δt et de la valeur correctrice Δt peuvent être respectivement :

$$\Delta\tau = -35{,}3 \text{ ns}$$

Δt = 10 ns.

La figure 3 montre comment le répondeur de la figure 1 peut être modifié pour corriger l'erreur ionosphérique.

Puisque le répondeur reçoit deux signaux d'interrogation avec les différentes fréquences f_1 et f_2, le mélangeur 3 fournit les signaux FI avec les fréquences $f_1 - F$ et $f_2 - F$. Le mélangeur 3 est suivi par deux filtres passe-bande 7, 8 qui sont chacun accordés sur l'une de ces fréquences. Les signaux de sortie des filtres passe-bande sont fournis respectivement aux dispositifs de génération du signal de déclenchement 4 et 9.

Les deux signaux de déclenchement sont appliqués à un dispositif 10 de mesure du temps qui mesure la différence de temps $\Delta\tau$ entre les deux impulsions de déclenchement présentes aux instants τ_1 et τ_2. Ce dispositif peut être mis en oeuvre comme un compteur qui commence à fonctionner à la réception de la première impulsion de déclenchement et qui s'arrête à la réception de la seconde impulsion de déclenchement. A partir du comptage et de la fréquence d'horloge du compteur, on peut déduire la différence de temps.

L'impulsion de déclenchement fournie par le dispositif générateur d'impulsions de déclenchement 9 (à l'instant τ_1) est non seulement appliquée au dispositif de mesure de temps 10 mais déclenche également la ligne à retard variable 12. Le retard est commandé par le calculateur 11 comme dans la réalisation de la figure 2. Dans la réalisation de la figure 3, la correction du retard δ normalement fixe est calculée à partir de $\Delta\tau$, f_1 et f_2 ou à partir de $\Delta\tau$, f_1, f_2 et f_3 comme il est décrit ci-dessus.

La correction à apporter dépend de l'application du système DME bidirectionnel et en particulier de la localisation de l'interrogateur et du répondeur car les trajets de propagation des signaux dépendent des positions de ces deux stations. Si les signaux doivent traverser la troposphère et l'ionosphère et si l'on recherche une précision de mesure maximale, les corrections de la réalisation de la figure 2 et les corrections de la réalisation de la figure 3 doivent être apportées. Des corrections

supplémentaires sont possibles en présence d'autres écarts de temps de transit causés par un milieu de propagation. L'idée commune est toujours de déterminer l'erreur du temps de transit du signal d'interrogation induite par le milieu de propagation et de corriger la différence de temps normalement fixe entre la réception du signal d'interrogation et l'émission du signal de réponse afin que les erreurs de temps de transit soient réduites ou éliminées.

Une réalisation dans laquelle les erreurs troposphériques et ionosphériques sont corrigées sera maintenant détaillée en se reportant à la figure 4. La figure 4 est composée des schémas synoptiques des figures 1 à 3. Les dispositifs similaires sont désignés par des références similaires.

Le signal reçu par l'antenne 1 est fourni au mélangeur 3 en passant par le circulateur 2. Le signal de sortie du mélangeur est appliqué aux deux filtres passe-bande 7 et 8, qui sont suivis par les dispositifs générateurs d'impulsions de déclenchement 4 et 9, respectivement. Les signaux de sortie de ces derniers sont amenés au dispositif 10 pour mesurer la différence de temps $\Delta\tau$. Le signal de sortie du dispositif générateur d'impulsions de déclenchement 9 (instant τ_1) est appliqué à la ligne à retard variable 12. Le signal de sortie du dispositif de mesure de temps 10 ($\Delta\tau$) est amené au calculateur 11 qui reçoit également les valeurs f_1, f_2, f_3 et les coordonnées de l'interrogateur (X_S, Y_S, Z_S) qui ont été déterminées par le démodulateur 13. Le signal d'entrée au démodulateur 13 est le signal de sortie du mélangeur 3. Le dispositif de mesure 14 détermine l'indice de réfraction Ns de la troposphère et amène cette valeur au calculateur 11. Ce dernier reçoit également les coordonnées du répondeur X_B, Y_B, Z_B, ϕ, λ. A partir de ces valeurs, le calculateur 11 calcule une valeur correctrice qui permet de raccourcir le retard normalement fixe du répondeur comme il est décrit auparavant. La valeur correctrice est appliquée à la ligne à retard variable 12. Le signal de sortie de la ligne à retard variable 12 commande l'émetteur 6 qui fournit le signal de réponse à la fréquence f_3.

REVENDICATIONS

1. Système de mesure de la distance bidirectionnel, dans lequel un interrogateur envoie un signal d'interrogation à un répondeur qui détermine le temps d'arrivée du signal d'interrogation et qui, après un retard fixe δ qui suit la réception du signal d'interrogation envoie un signal de réponse à l'interrogateur, caractérisé en ce que le répondeur détermine (11) l'écart entre le temps de transit du signal d'interrogation et le temps de transit nominal, dû aux conditions de propagation du signal d'interrogation dans le ou les milieux de propagation, et en ce que le retard δ, après lequel le signal de réponse est émis, est raccourci en fonction de l'écart déterminé du temps de transit du signal d'interrogation de telle manière que les écarts de temps de transit des signaux d'interrogation et de réponse sont éliminés, au moins, dans une très large mesure.

2. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit à la revendication 1, caractérisé en ce que l'interrogateur émet deux signaux d'interrogation ayant des fréquences différentes (f_1, f_2), et en ce que le répondeur détermine les temps d'arrivée (τ_1, τ_2) des deux signaux d'interrogation, en ce que la différence ($\Delta\tau$) entre les deux moments d'arrivée est déterminée (10), en ce que l'écart du temps de transit est déterminé sur la base de ladite différence de temps et des fréquences des deux signaux d'interrogation et en ce que la valeur par laquelle le retard δ est raccourci est dérivée dudit écart du temps de transit.

3. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit à la revendication 2, caractérisé en ce que, en outre, la fréquence du signal de réponse (f_3) est prise en compte lors de la détermination de la valeur par laquelle le retard δ est raccourci.

4. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit à la revendication 2, caractérisé en ce que la valeur par laquelle le retard δ est raccourci est calculée à l'aide de l'équation :

$$2\,\Delta t = \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}} \cdot 2$$

où τ_1 et τ_2 sont les temps d'arrivée des deux signaux d'interrogation de fréquences f_1 et f_2.

5. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit aux revendications 3 et 4, caractérisé en ce que la valeur par laquelle le retard δ est raccourci est égale à $\Delta t + \Delta t'$, $\Delta t'$ étant calculé à l'aide de l'équation :

$$\Delta t' = \frac{f_1^2}{f_3^2}\ \Delta t$$

où f_3 est la fréquence du signal de réponse.

6. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit à la revendication 1, caractérisé en ce que la valeur par laquelle le retard δ est raccourci est déterminée à partir de l'indice de réfraction Ns du milieu dans lequel se propage le signal d'interrogation, de l'altitude h de l'interrogateur au-dessus du niveau de la mer et de l'angle de site α de l'interrogateur par rapport au répondeur.

7. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit à la revendication 6, caractérisé en ce que les données relatives à la position de l'interrogateur sont transmises au répondeur et que l'angle de site α est déterminé à partir des données de positions de l'interrogateur et du répondeur.

8. Système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit aux revendications 6 ou 7, caractérisé en ce que le répondeur contient un dispositif (14) de mesure de l'indice de réfraction du milieu de propagation.

9. Station au sol pour un système de mesure de la distance bidirectionnel comme décrit dans l'une des revendications 1 à 8, caractérisée en ce qu'une première unité (11) est fournie qui détermine les valeurs par lesquelles le retard (δ) doit être raccourci et qu'une ligne à retard variable (12) est commandée

de telle façon que le temps entre la réception d'un signal d'interrogation et l'émission du signal de réponse est égal au retard corrigé.

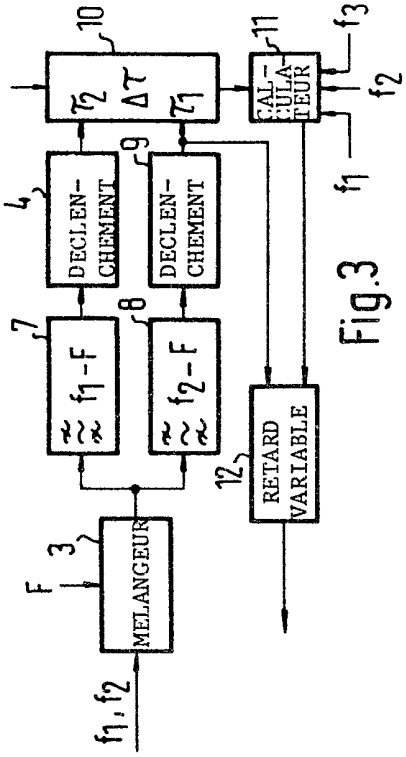


Fig.3

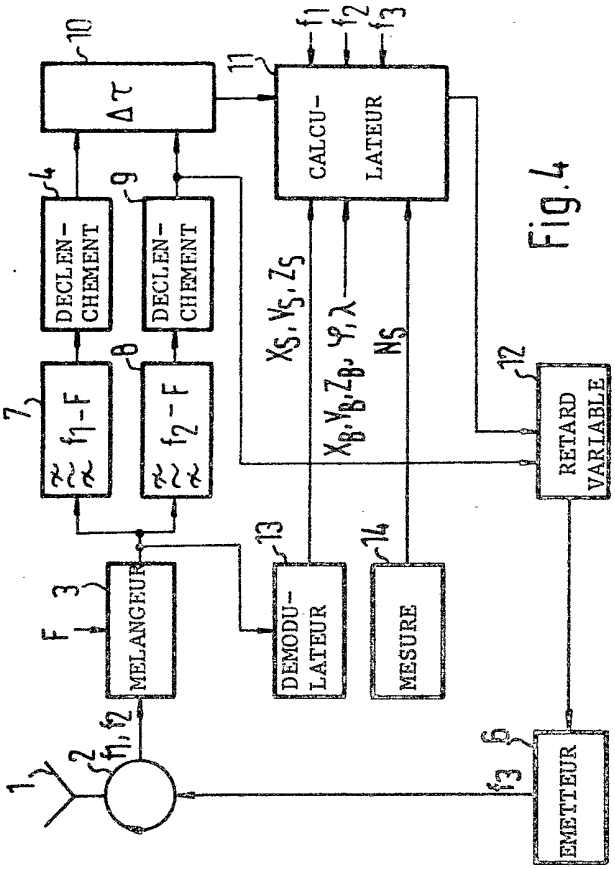


Fig.4

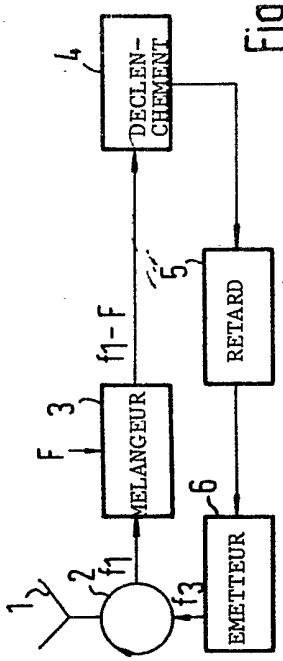


Fig.1

Fig.2