

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 1^{er} février 1988.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 31 du 4 août 1989.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : Société dite : THOMSON-CSF. — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Bernard Dumas et Léon Pierre Robin,
Thomson-CSF, SCPI.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Josiane El Manouni, Thomson-CSF,
SCPI.

⑤4 Système de radionavigation.

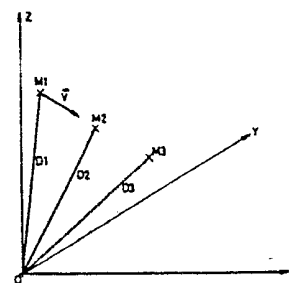
⑤7 Ce système de radionavigation comporte essen-
tiellement :

— des moyens pour déterminer en un point M_1 de la
trajectoire du mobile à localiser, le vecteur vitesse de ce
mobile, et éventuellement les dérivées d'ordre « n » de ce
vecteur vitesse (avec $n \geq 1$);

— des moyens pour effectuer au moins trois mesures
successives de distance respectivement entre un point géodé-
sique au sol et trois positions successives (M_1 , M_2 , M_3) de ce
mobile;

— des moyens pour calculer la position M_3 de ce mobile
par résolution d'un système d'équations à partir des résultats
ainsi obtenus, exprimés dans un même référentiel.

Application : trajectographie.



SYSTEME DE RADIONAVIGATION

La présente invention concerne un système de radionavigation. On connaît à l'heure actuelle deux types de systèmes de radionavigation basés sur des mesures temporelles : les systèmes dits universels (à titre d'exemple le système "Global Positioning System", ou "GPS") et les systèmes dits localisés (à titre d'exemple le système "Trident").

Le système GPS fonctionne avec un récepteur porté par le mobile à localiser (mobile terrestre ou aéronef) et des émetteurs portés par plusieurs satellites. La position du mobile est repérée par recoupement de plusieurs mesures de distance à partir d'un certain nombre de ces satellites (en général 3 ou 4), chaque mesure de distance étant effectuée par mesure du temps séparant l'émission et la réception d'un même signal à partir d'une même référence temporelle (par exemple horloges synchronisées). Chaque satellite fournit dans son message des modèles relatifs à sa trajectoire (éphémérides) et au comportement de son horloge. En réalité la distance brute mesurée, ou pseudo-distance, est entachée d'erreurs diverses telles que celles dues aux fluctuations de propagation ou à la dérive des horloges. On peut cependant réduire très sensiblement la première de ces erreurs, par comparaison par rapport à un récepteur fixe géodésiquement bien défini (mesure différentielle).

Le principal inconvénient du système GPS réside cependant dans le fait que compte tenu de la mobilité de l'élément à localiser, et des temps de propagation, d'acquisition, de calcul ... etc, relativement élevés qui sont mis en jeu dans ce système, celui-ci ne donne pas en temps réel la position réelle du mobile, mais une position prédite à partir de positions déterminées antérieurement, cet inconvénient devenant d'autant plus sensible que le mobile évolue rapidement.

Le système Trident permet par contre, à partir de points géodésiques au sol, équipés de balises répondeuses, de localiser en

temps réel et avec une grande précision un mobile équipé d'un interrogateur. La position du mobile est également repérée par recoupement de plusieurs mesures de distance à partir de plusieurs balises, chaque mesure de distance étant effectuée par mesure du temps séparant interrogations et réponses.

En contrepartie, le système Trident présente l'inconvénient de nécessiter un grand nombre de balises au sol (en général de l'ordre de 30), et de ne pas avoir une large couverture du fait de la localisation au sol des balises répondeuses et de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde radioélectriques utilisées.

La présente invention a pour objet un système de radionavigation qui permette d'obtenir une bonne précision, en temps réel, tout en nécessitant un matériel réduit, aussi bien au sol qu'à bord du mobile.

La présente invention a pour objet un système de radionavigation tel que défini dans les revendications.

D'autres objets et caractéristiques de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'exemples de réalisation, faite en relation avec les dessins ci-annexés dans lesquels :

- la figure 1 est un diagramme destiné à illustrer le principe de l'invention ;
- la figure 2 est un schéma d'un système de radionavigation suivant un premier exemple de réalisation de l'invention ;
- la figure 3 est un schéma du matériel équipant le mobile à localiser ;
- la figure 4 est un schéma d'un système de radionavigation suivant un second exemple de réalisation de l'invention ;
- les figures 5 et 6 sont des exemples de mise en oeuvre du calcul de position du mobile effectué suivant l'invention.

Sur la figure 1, on désigne par X_i , Y_i , Z_i , les coordonnées cartésiennes du mobile M dans le trièdre géodésique OXYZ aux instants t_i , et par D_i la distance OM à ces mêmes instants. Dans ce même repère le vecteur vitesse $\vec{V}$ du mobile M a des composants V_x ,

V_y, V_z . On peut poser $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Comme on va le voir, le problème de la détermination de la position du mobile peut être entièrement résolu à partir d'une valeur de i égale à 3.

On peut en effet écrire les relations circulaires suivantes :

$$5 \quad X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 = D_1^2 \quad (1)$$

$$X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2 = D_2^2 \quad (2)$$

$$X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 = D_3^2 \quad (3)$$

En supposant que durant l'intervalle de temps allant de t_1 à t_3 le vecteur vitesse est resté invariant, les relations (2) et (3) s'écrivent :

$$10 \quad (X_1 + V_x \Delta t)^2 + (Y_1 + V_y \Delta t)^2 + (Z_1 + V_z \Delta t)^2 = D_2^2 \quad (3)$$

$$(X_1 + 2V_x \Delta t)^2 + (Y_1 + 2V_y \Delta t)^2 + (Z_1 + 2V_z \Delta t)^2 = D_3^2 \quad (4)$$

D_1, D_2, D_3 et $V(V_x, V_y, V_z)$ étant mesurés, les relations (1) (3) et (4) déterminent sans ambiguïté les coordonnées X_1, Y_1, Z_1 du mobile au temps t_1 , d'où X_2, Y_2, Z_2 et X_3, Y_3, Z_3 aux instants t_2 et t_3 .

Pour la détermination de l'ensemble de la trajectoire on peut procéder par itération et effectuer les mêmes mesures et le même calcul aux instants $t_2, t_3, t_4 \dots$ etc. Après deux intervalles de temps Δt on aura ainsi en léger différé trois mesures de la position du mobile aux mêmes instants échantillonnés. Ceci permet par des considérations statistiques d'affiner la mesure.

Les composantes du vecteur vitesse $\vec{V}$ peuvent par exemple être fournies par une centrale gyroscopique ou gyrométrique (classique ou à laser) équipant le mobile. Elles peuvent aussi être obtenues en utilisant un système de radionavigation universel tel que le système GPS, auquel cas un récepteur GPS est prévu à bord du mobile. Les mesures de distance peuvent être effectuées au moyen d'un ensemble interrogateur-répondeur Trident.

Ces deux dernières possibilités correspondent au schéma de la figure 2. Dans ce cas l'équipement de base de navigation du mobile comporte donc un récepteur GPS et un ensemble émission-réception Trident (interrogeur). Par rapport au cas où le système Trident
5 serait utilisé isolément la station au sol peut ne comporter qu'une balise répondeur.

Le récepteur GPS de bord fournit le vecteur vitesse filtré à partir de positions successives du mobile, suivant des techniques connues, la mesure de chacune de ces positions successives néces-
10 sitant elle-même trois mesures de distance successives à partir de trois satellites géodésiquement définis. L'ensemble interrogateur-balise Trident fournit la distance entre la station au sol et le mobile.

Le calcul de la position du mobile après n mesures successives ($n \geq 3$) tel que décrit précédemment, est effectué par un calculateur
15 de bord visible sur la figure 3 qui représente les équipements situés à bord du mobile.

Le suivi de trajectoire est effectué à la cadence de renouvellement de l'information de distance, c'est-à-dire ici à la cadence de fonctionnement du système Trident.

20 La cadence de renouvellement de l'information de vitesse est la cadence de fonctionnement du système GPS. L'élaboration de cette grandeur s'effectue à partir d'un nombre de points antérieurs qui peut être un compromis entre la valeur du bruit de mesure et la rapidité de variation du vecteur vitesse.

25 Sur la figure 4 on a représenté une variante de réalisation correspondant au fonctionnement du système GPS en mode différentiel. Comme rappelé dans l'introduction, ce procédé augmente la précision de positionnement du mobile tout en éliminant la nécessité de synchroniser les horloges satellite-récepteur. Le système décrit
30 précédemment est alors complété de la façon suivante : la station au sol comporte, en plus de la balise répondeur Trident, un récepteur GPS ; par ailleurs un système de télécommunications (avec émetteur au sol et récepteur à bord du mobile) permettant la transmission des informations différentielles est adjoint à l'ensemble interrogateur-

répondeur Trident, l'émetteur de ce système de télécommunications pouvant se réduire à un mode de fonctionnement particulier de la balise, et le récepteur pouvant se réduire à un canal de réception de données intégré à l'interrogateur-récepteur Trident.

5 Le système GPS pourrait être remplacé par tout autre système de radionavigation universel tel que : LORAN, OMEGA, DECCA, aboutissant à une vitesse filtrée assez précise tout en donnant une précision en distance pouvant être très inférieure à celle donnée par les systèmes localisés.

10 Le système Trident pourrait être remplacé par tout autre système mesurant la distance avec une bonne précision et pouvant être dérivé d'équipements type radar primaire et secondaire, ou lidar. On citera à titre d'exemple les systèmes DME, Télémètre Laser 1,06 μ , Télémètre laser 10,6 μ .

15 La restriction du procédé décrit à un mouvement rectiligne et uniforme pendant deux intervalles d'échantillonnage peut par ailleurs être levée si l'on considère comme connus les éléments cinématiques d'ordre supérieur à 1 de la trajectoire. D'une manière générale si la trajectoire est curviligne et déterminée localement à l'aide d'éléments cinématiques (dérivées vectorielles) jusqu'au $n^{\text{ième}}$ ordre on peut écrire :

$$\vec{M}(t+\Delta t) - \vec{M}(t) = \frac{d\vec{M}}{dt} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{d^2\vec{M}}{dt^2} \Delta t^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3\vec{M}}{dt^3} \Delta t^3 + \dots \frac{1}{n!} \frac{d^n\vec{M}}{dt^n} \Delta t^n$$

(développement limité aux n premiers termes ; l'erreur est inférieure à toute valeur arbitraire pourvu que $|\frac{d^n\vec{M}}{dt^n}|$ reste inférieur à une certaine valeur et que $\frac{\Delta t}{n}$ soit suffisamment petit) :

$$\vec{M}(t + \Delta t) - \vec{M}(t) = \vec{V} \Delta t + \frac{\vec{Y}}{2} \Delta t^2 + \dots \quad (5)$$

Si l'on dispose à l'instant t des éléments filtrés de la trajectoire : vitesse $\vec{V}$, accélération $\vec{Y}$ et éventuellement dérivées vectorielles d'ordre supérieur on peut alors écrire d'une manière
30 similaire, en projetant (5) par exemple sur l'axe des X :

6

$$X_2 = X_1 + v_x \Delta t + \frac{\gamma_x}{2} \Delta t^2 + \left(\frac{d^3 \vec{M}}{dt^3} \right)_x \frac{\Delta t^3}{3!} + \dots \quad (6)$$

et

$$(X_1 + v_x \Delta t + \frac{\gamma_x}{2} \Delta t^2 + \dots) + (Y_1 + v_y \Delta t + \frac{\gamma_y}{2} \Delta t^2 + \dots) + (Z_1 + v_z \Delta t + \frac{\gamma_z}{2} \Delta t^2 + \dots) = D_2^2 \quad (7)$$

$$5 \quad [X_1 + 2v_x \Delta t + \frac{\gamma_x}{2} (2\Delta t)^2 + \dots]^2 + [Y_1 + 2v_y \Delta t + \frac{\gamma_y}{2} (2\Delta t)^2 + \dots]^2 + (Z_1 + 2v_z \Delta t + \frac{\gamma_z}{2} (2\Delta t)^2 + \dots) = D_3^2 \quad (8)$$

$$\text{et toujours } X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 = D_1^2 \quad (1)$$

Les relations (7) (8) et (1) permettent, connaissant

$\vec{V}, \vec{\gamma}, \dots \frac{d^n \vec{M}}{dt^n}$ et Δt de déterminer X_1, Y_1, Z_1 au temps t_1 ainsi que

$$10 \quad X_2, Y_2, Z_2 \text{ et } X_3, Y_3, Z_3 \text{ aux instants } t_2 = t_1 + \Delta t \text{ et } t_3 = t_1 + 2\Delta t.$$

A titre d'exemple, dans le cas d'une trajectoire rectiligne avec mouvement uniformément accéléré, on aurait $\frac{d^n \vec{M}}{dt^n} = 0$ à partir de $n = 3$, et $\vec{\gamma}$ indépendant de t .

$$15 \quad \text{Dans le cas d'une trajectoire circulaire avec facteur de charge } |\gamma| = kg, \text{ on aurait :}$$

$$\frac{d^2 \vec{M}}{dt^2} = - \vec{OM} \, w^2 = \vec{\gamma}$$

$$\frac{d^3 \vec{M}}{dt^3} = - \frac{d\vec{M}}{dt} w^2 = - \vec{V} w^2$$

$$\frac{d^4 \vec{M}}{dt^4} = - \frac{d\vec{M}}{dt} w^2 = - \frac{d^2 \vec{M}}{dt^2} w^2 = - \vec{\gamma} w^2$$

$$\frac{d^5 \vec{M}}{dt^5} = - \frac{d^3 \vec{M}}{dt^3} w^2 = \vec{V} w^4$$

$$20 \quad \frac{d^6 \vec{M}}{dt^6} = - \frac{d^4 \vec{M}}{dt^4} w^2 = \vec{\gamma} w^4$$

Toutes les dérivées vectorielles sont exprimables en fonction

de $\vec{V}$, γ et w (vitesse angulaire). Comme $w = \frac{|\gamma|}{|\vec{V}|}$ tous les éléments de la trajectoire peuvent s'exprimer en fonction des deux paramètres V (vitesse curviligne) et γ (facteur de charge). Ces deux seuls éléments peuvent d'ailleurs être retenus pour une approximation au

5

deuxième ordre de la trajectoire.
Les relations (1) (7) et (8) ci-dessus peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 = D_1^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (X_1 + A)^2 + (Y_1 + B)^2 + (Z_1 + C)^2 = D_2^2 \end{cases} \quad (10)$$

10

$$\begin{cases} (X_1 + A')^2 + (Y_1 + B')^2 + (Z_1 + C')^2 = D_3^2 \end{cases} \quad (11)$$

avec

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + A ; Y_2 = Y_1 + B ; Z_2 = Z_1 + C \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} X_3 = X_1 + A' ; Y_3 = Y_1 + B' ; Z_3 = Z_1 + C' \end{cases} \quad (13)$$

et

15

$$\begin{cases} A = V_x \Delta t + \frac{\gamma_x}{2} \Delta t^2 + \frac{1}{3!} \Delta t^3 \left(\frac{d^3 \vec{M}}{dt^3} \right)_x + \dots \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} B = V_y \Delta t + \frac{\gamma_y}{2} \Delta t^2 + \dots \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} C = V_z \Delta t + \frac{\gamma_z}{2} \Delta t^2 + \dots \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} A' = 2V_x \Delta t + \frac{\gamma_x}{2} (2\Delta t)^2 + \frac{1}{3!} (2\Delta t)^3 \left(\frac{d^3 \vec{M}}{dt^3} \right)_x + \dots \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} B' = 2V_y \Delta t + \frac{\gamma_y}{2} (2\Delta t)^2 + \dots \end{cases} \quad (18)$$

20

$$\begin{cases} C' = 2V_z \Delta t + \frac{\gamma_z}{2} (2\Delta t)^2 + \dots \end{cases} \quad (19)$$

Les relations (10) et (11) peuvent se ramener aux formes linéaires :

$$\begin{cases} AX_1 + BY_1 + CZ_1 = \alpha \\ A'X_1 + B'Y_1 + C'Z_1 = \beta \end{cases}$$

en posant :

$$2\alpha = D_2^2 - D_1^2 - (A^2 + B^2 + C^2)^2 \quad (20)$$

$$2\beta = D_3^2 - D_1^2 - (A'^2 + B'^2 + C'^2)^2 \quad (21)$$

D'où

$$5 \quad X_1 = \frac{\begin{vmatrix} \alpha - CZ_1 & B \\ \beta - C'Z_1 & B' \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (22)$$

$$Y_1 = \frac{\begin{vmatrix} A & \alpha - CZ_1 \\ A' & \beta - C'Z_1 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (23)$$

avec $\Delta = AB' - A'B$

10 On peut développer (22) et (23)

$$\begin{cases} X_1 = \frac{Z_1 (BC' - B'C) + \alpha B' - \beta B}{\Delta} \\ Y_1 = \frac{Z_1 (CA' - C'A) + \beta A - \alpha A'}{\Delta} \end{cases}$$

$$\text{ou } \begin{cases} X_1 = r Z_1 + s \\ Y_1 = r' Z_1 + s' \end{cases} \quad (24)$$

$$(25)$$

15 en posant

$$\begin{cases} r = \frac{BC' - B'C}{\Delta} \\ r' = \frac{CA' - C'A}{\Delta} \end{cases} \quad \begin{cases} s = \frac{\alpha B' - \beta B}{\Delta} \\ s' = \frac{\beta A - \alpha A'}{\Delta} \end{cases}$$

La substitution dans (1) aboutit alors à la relation :

$$(rZ_1 + s)^2 + (r'Z_1 + s')^2 = D_1^2 - Z_1^2$$

20 ou

$$Z_1^2 (r^2 + r'^2 + 1) + 2Z_1 (rs + r's') + s^2 + s'^2 - D_1^2 = 0$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$a Z_1^2 + 2 b Z_1 + C = 0$$

d'où les solutions

$$Z_1 = \frac{-b \pm \sqrt{\delta}}{a} \quad (27)$$

$$\text{avec } \delta = b^2 - ac$$

5 en rappelant que :

$$\begin{cases} a = r^2 + r'^2 + 1 \\ b = rs + r's' \\ c = s^2 + s'^2 - D_1^2 \end{cases} \quad (28)$$

Des relations (24) et (25) on déduit alors X_1, Y_1 .

Des relations (12) et (13) on déduit $X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3$

10 La levée d'ambiguïté peut s'effectuer par continuité.

La mécanisation du calcul comporte alors les étapes suivantes :

1) Calcul de A, B, C, A', B', C' à partir de Δt , et à partir de

$$\vec{V}(v_x, v_y, v_z), (\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z), \frac{d^3 \vec{M}}{dt^3}, \dots, \frac{d^n \vec{M}}{dt^n}$$

15 (relations 14 à 19)

2) Calcul de Δ et à partir de (26), (28) et de D_1 , calcul de r, r', s, s', a, b, c et δ

3) Calcul de α et β par les relations (20) et (21)

4) Calcul de Z_1 par (27)

20 5) Calcul de X_1 et Y_1 à partir de (22) et (23)

6) Calcul de $X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3$ par (12) et (13)

25 Les figures 5 et 6 sont des exemples de mise en oeuvre des calculs ci-dessus. Sur ces figures on a également représenté un transformateur de coordonnées permettant d'exprimer dans le référentiel géodésique lié au système Trident les coordonnées des vecteurs vitesse, accélération ... etc fournis par le système GPS dans un référentiel lié à celui-ci.

RE V E N D I C A T I O N S

1. Système de radionavigation, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens pour déterminer en un point (M_1) de la trajectoire du mobile à localiser, le vecteur vitesse de ce mobile, et éventuellement les dérivées d'ordre "n" de ce vecteur vitesse (avec $n \geq 1$) ;
- des moyens pour effectuer au moins trois mesures successives de distance respectivement entre un point géodésique au sol et trois positions successives (M_1, M_2, M_3) de ce mobile ;
- des moyens pour calculer la position (M_3) de ce mobile par résolution d'un système d'équations à partir des résultats ainsi obtenus, exprimés dans un même référentiel.

2. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens pour déterminer le vecteur vitesse et éventuellement les dérivées d'ordre "n" de ce vecteur consistent en une centrale gyroscopique ou gyrométrique équipant le mobile.

3. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens pour déterminer le vecteur vitesse et éventuellement les dérivées d'ordre "n" de ce vecteur consistent en des moyens pour estimer ces paramètres à partir de mesures antérieures de position du mobile effectuées dans un système de radionavigation du type universel.

4. Système selon la revendication 3, caractérisé en ce que le système de radionavigation du type universel consiste dans le système GPS, le mobile étant équipé d'un récepteur GPS.

5. Système selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les moyens pour effectuer des mesures de distance consistent en un ensemble interrogateur-répondeur Trident, l'interrogateur étant placé à bord du mobile et le répondeur au point géodésique

considéré au sol.

5 6. Système selon les revendications 4 et 5, caractérisé en ce que le point géodésique au sol est également équipé d'un récepteur GPS, afin de réaliser un système GPS différentiel, et en ce que des moyens de transmission des informations différentielles ainsi obtenues sont prévus entre le point géodésique au sol et le mobile.

 7. Système selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'émission des informations différentielles se réduit à un mode de fonctionnement particulier du répondeur Trident.

10 8. Système selon l'une des revendications 6 et 7, caractérisé en ce que la réception d'informations différentielles est effectuée au moyen d'un canal de réception de données intégré à l'interrogateur-récepteur Trident.

1/4

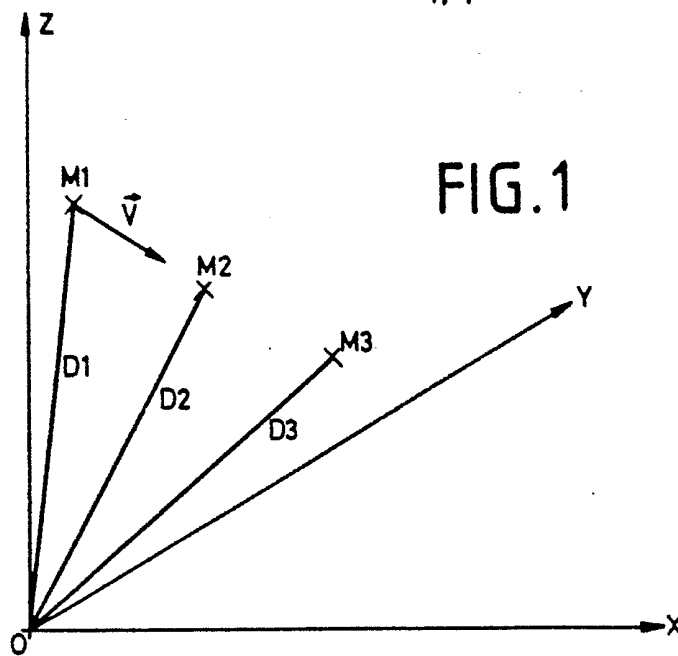
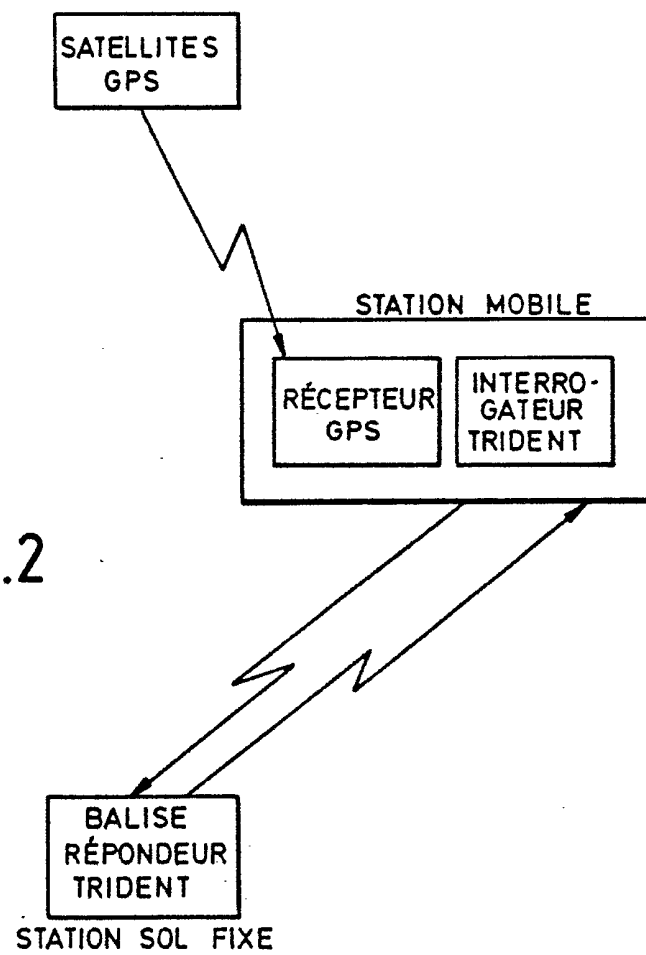


FIG.2



2/4

FIG.3

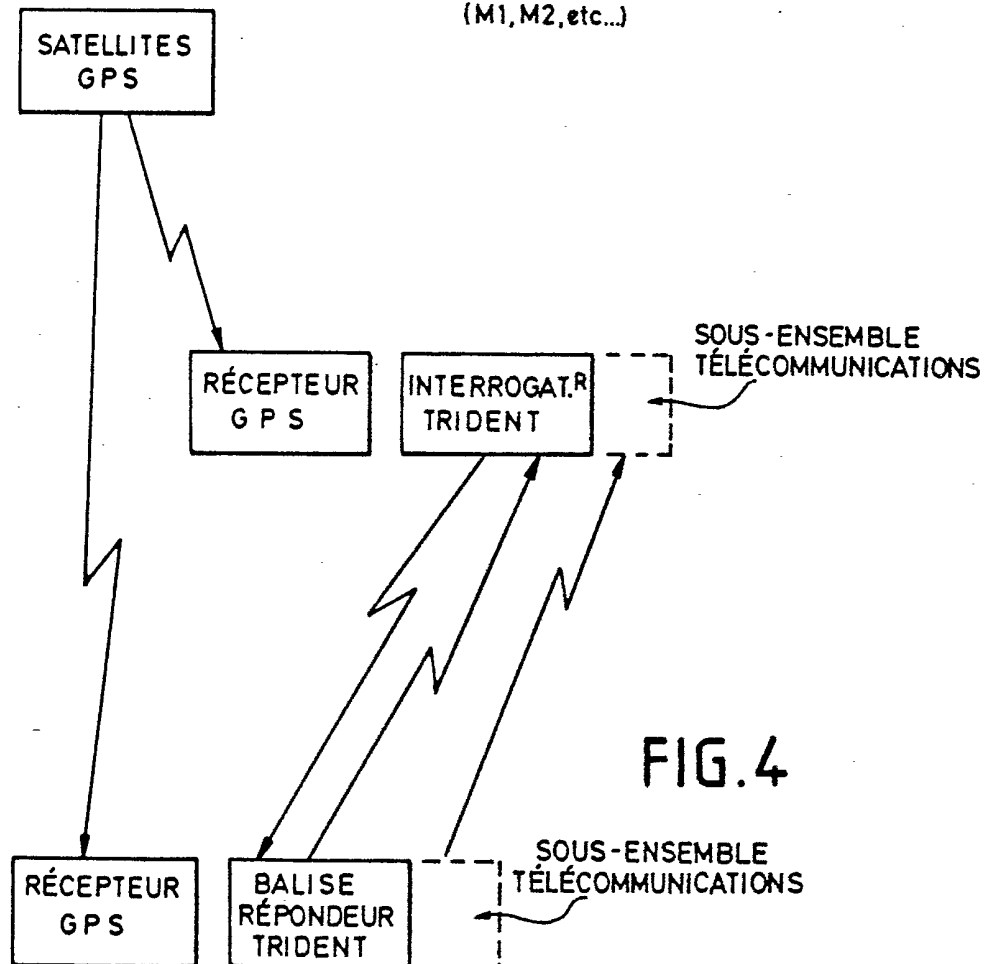
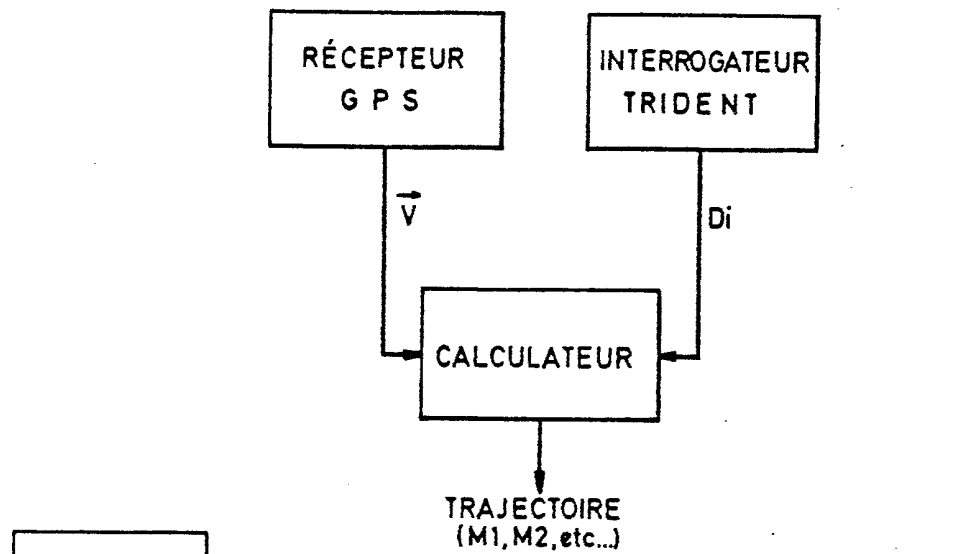


FIG.4

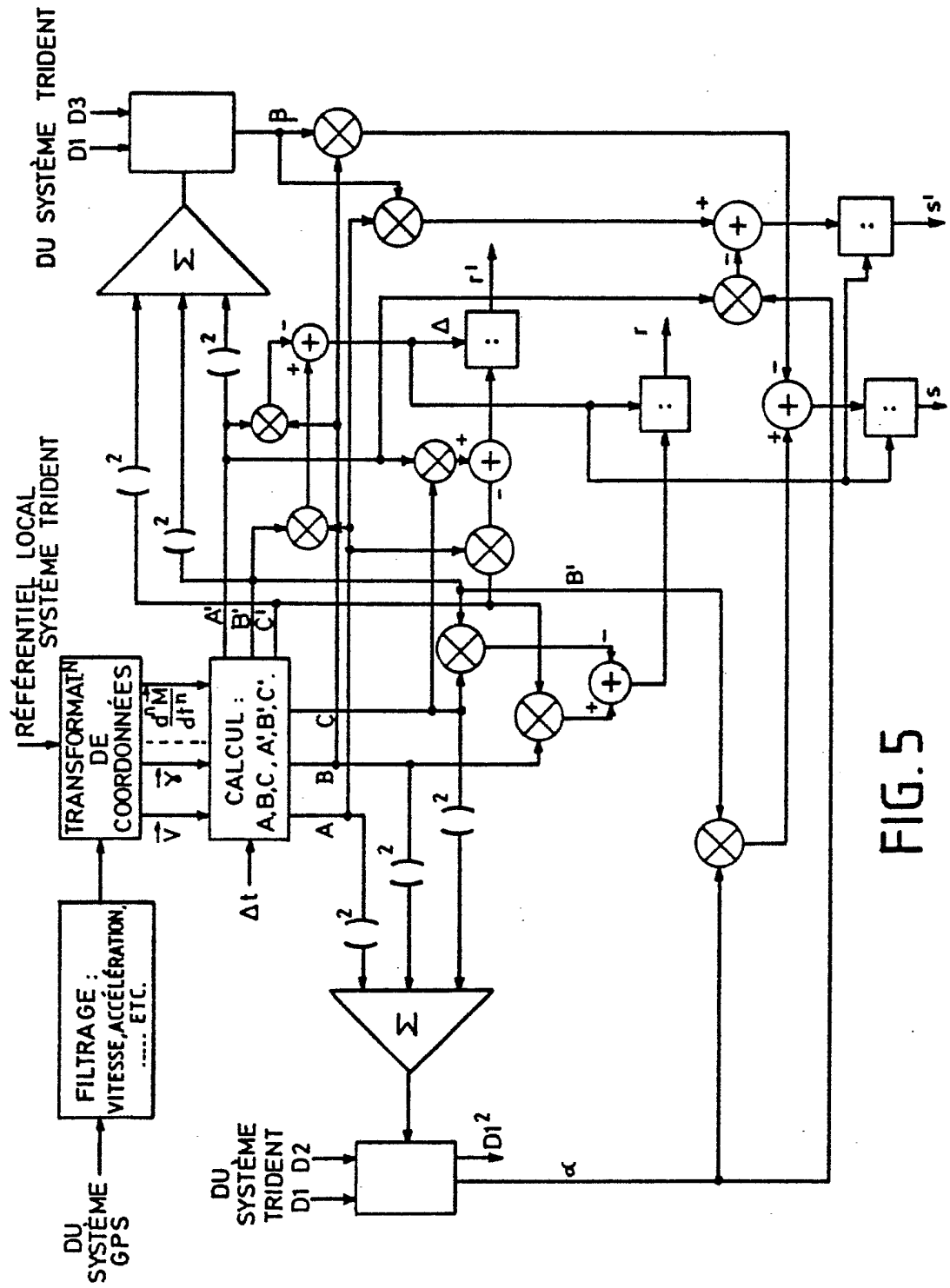


FIG. 5

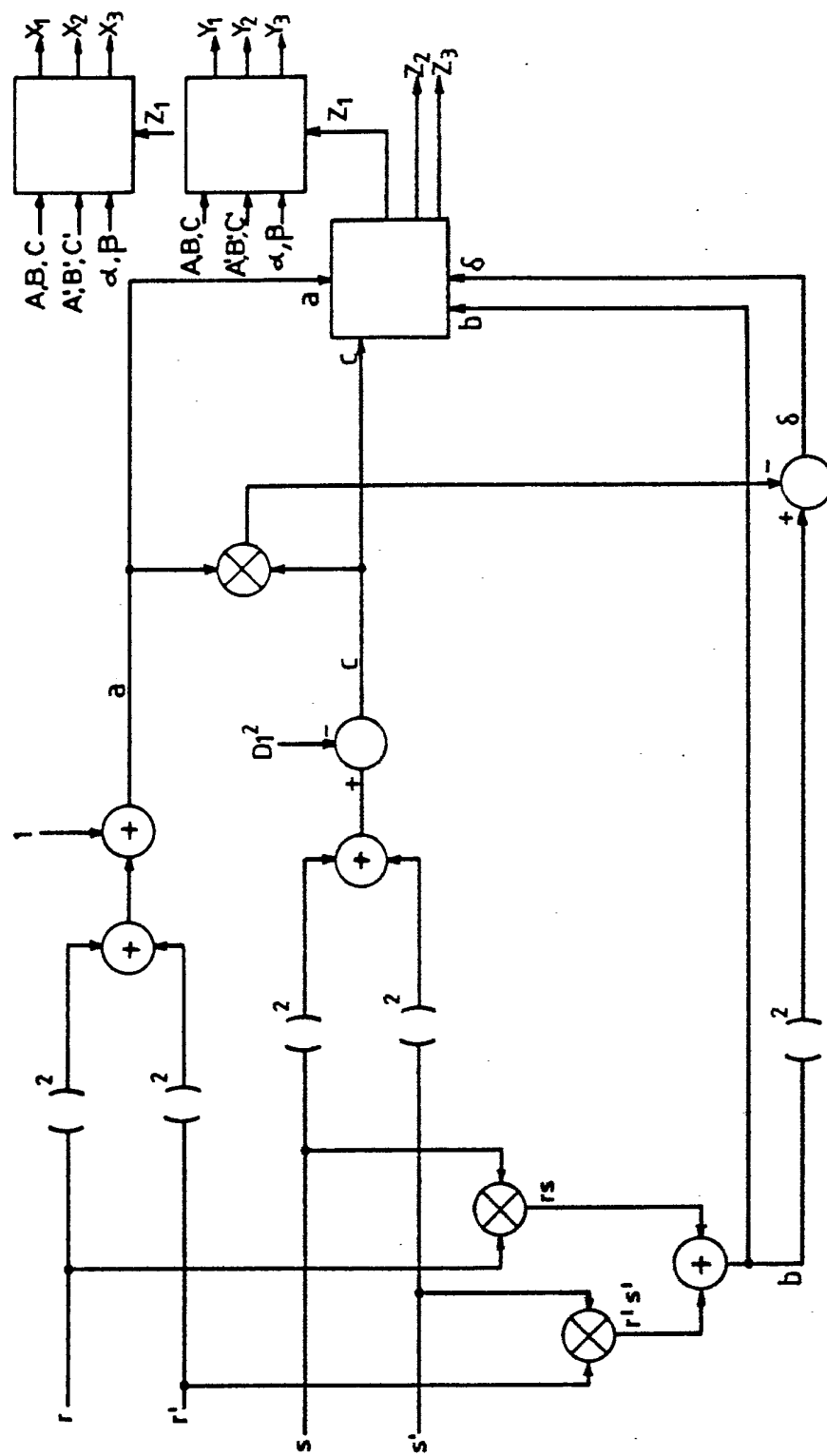


FIG. 6