

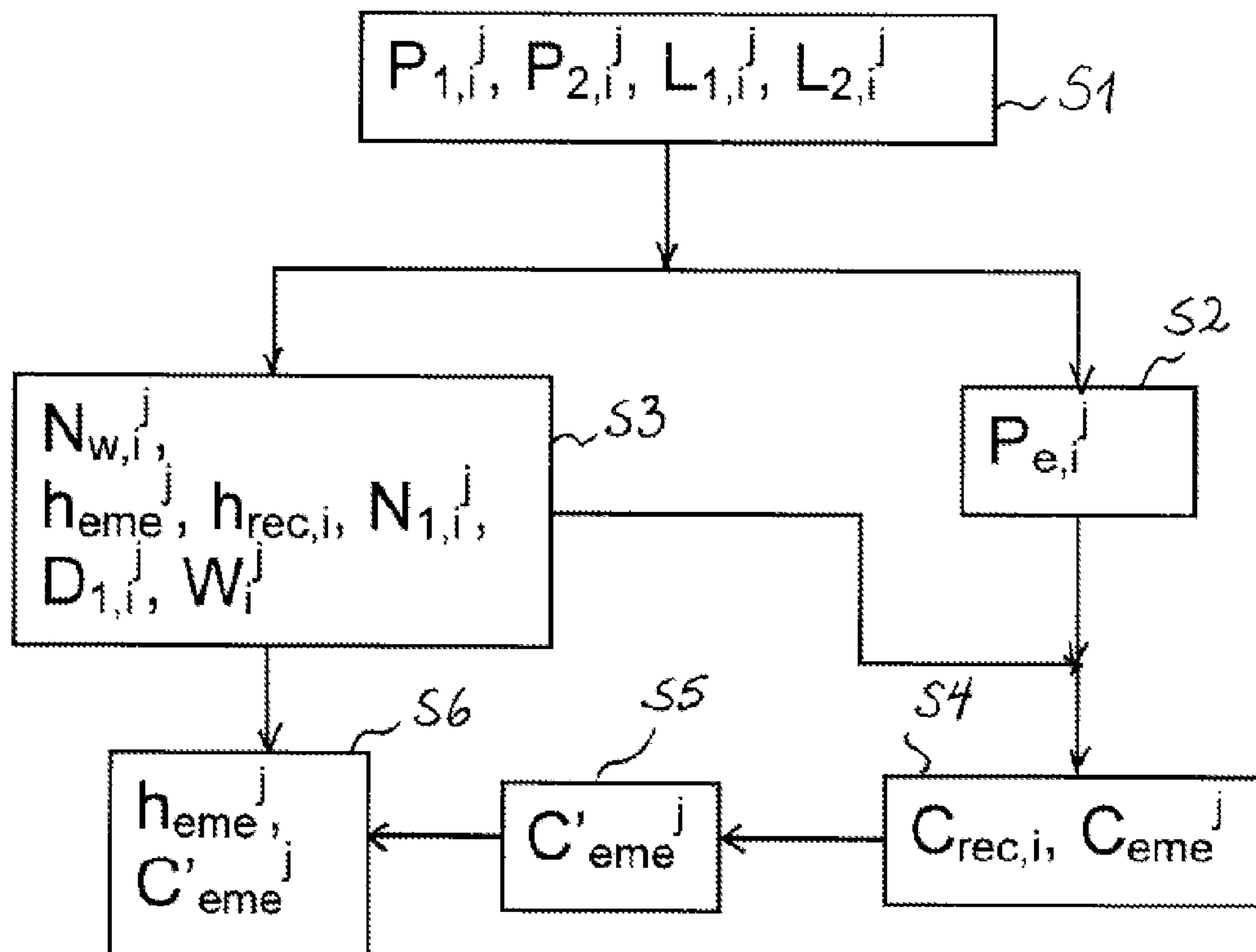


(86) **Date de dépôt PCT/PCT Filing Date:** 2010/03/11
(87) **Date publication PCT/PCT Publication Date:** 2010/09/16
(45) **Date de délivrance/Issue Date:** 2017/05/30
(85) **Entrée phase nationale/National Entry:** 2011/08/30
(86) **N° demande PCT/PCT Application No.:** EP 2010/053129
(87) **N° publication PCT/PCT Publication No.:** 2010/103082
(30) **Priorité/Priority:** 2009/03/13 (FR09 51611)

(51) **Cl.Int./Int.Cl.** **G01S 19/43** (2010.01),
G01S 19/04 (2010.01), **G01S 19/44** (2010.01)
(72) **Inventeurs/Inventors:**
LAURICHESSE, DENIS, FR;
MERCIER, FLAVIEN, FR
(73) **Propriétaire/Owner:**
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES, FR
(74) **Agent:** GOWLING WLG (CANADA) LLP

(54) **Titre : PROCÉDE DE GEOPOSITIONNEMENT UTILISANT DES DONNÉES D'ASSISTANCE**

(54) **Title: GEOPOSITIONING METHOD USING ASSISTANCE DATA**



(57) **Abrégé/Abstract:**

Pour permettre à un récepteur de géopositionnement d'un utilisateur de lever ses ambiguïtés de phase sans nécessairement avoir recours à des observations multi- fréquence, des données d'assistance sont élaborées grâce aux mesures effectuées au niveau d'un réseau de référence (10, 12, 14) et communiquées au récepteur de l'utilisateur. Comme données d'assistance sont utilisées de préférence les valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse (Θ_{eme}) ou des données suffisantes pour reconstituer ces valeurs. Les valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse (Θ_{eme}) sont p. ex. reconstituables à partir des valeurs d'horloge émetteur iono-free (h_{eme}) et des biais d'horloge (C'_{eme}).



(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
16 septembre 2010 (16.09.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/103082 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G01S 19/43 (2010.01) *G01S 19/04* (2010.01)
G01S 19/44 (2010.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2010/053129

(22) Date de dépôt international :
11 mars 2010 (11.03.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
09 51611 13 mars 2009 (13.03.2009) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES [FR/
FR]; 2, Place Maurice Quentin, F-75039 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
LAURICHESSE, Denis [FR/FR]; 3, chemin de la
Branère, F-31170 Tournefeuille (FR). **MERCIER,**
Flavien [FR/FR]; 19, chemin des Ecoles, F-31320
Auzeville (FR).

(74) Mandataires : **BRUCK, Mathis** et al.; BP 48, L-8001
Strassen (LU).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

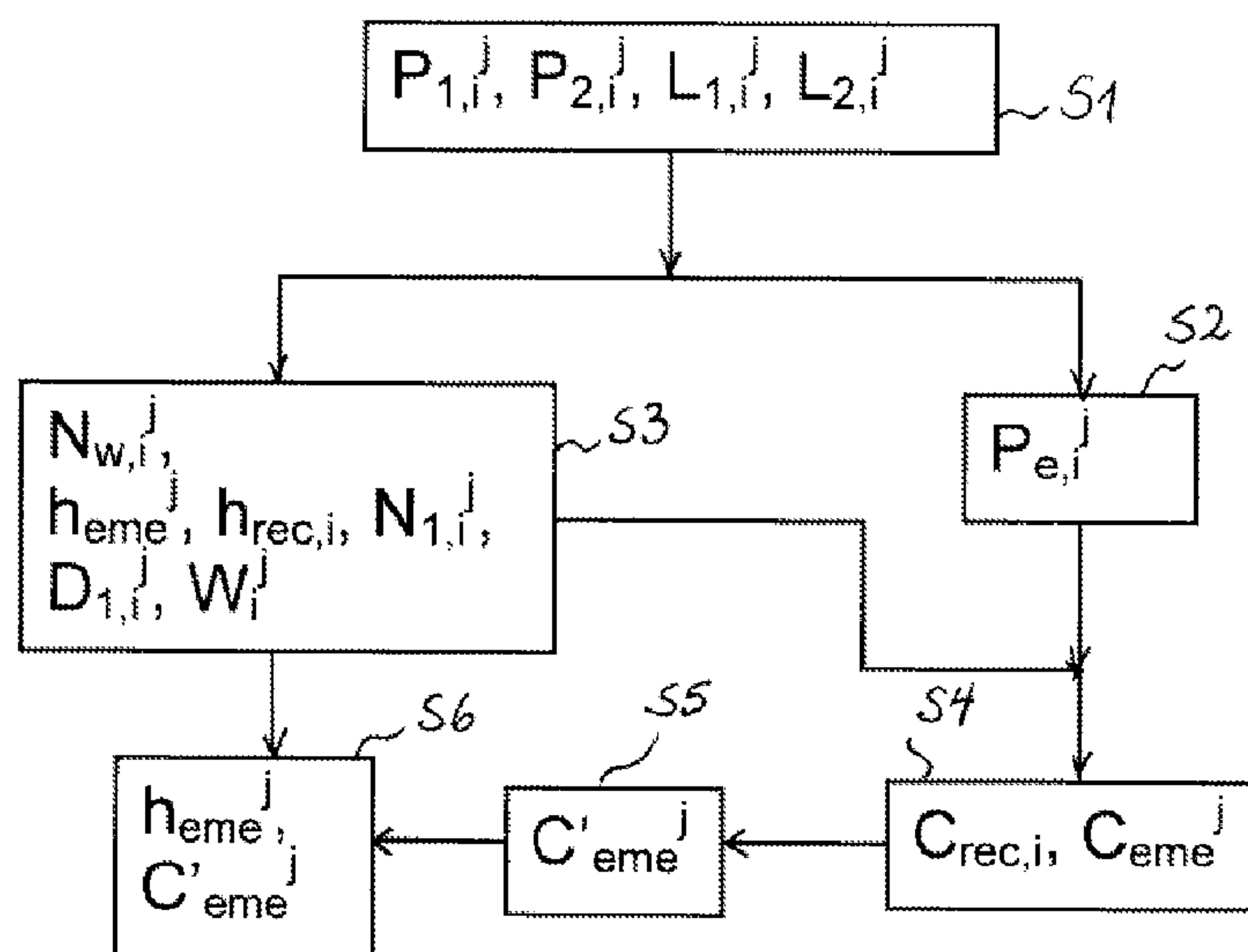
(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), eurasienn (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM,
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : GEOPOSITIONING METHOD USING ASSISTANCE DATA

(54) Titre : PROCÉDE DE GEOPOSITIONNEMENT UTILISANT DES DONNÉES D'ASSISTANCE

Fig. 2



(57) Abstract : In order to enable a geopositioning receiver of a user to resolve phase ambiguities without necessarily using multi-frequency observations, assistance data is developed thanks to measurements made at a reference network (10, 12, 14) and sent to the receiver of the user. The assistance data used preferably consist of transmitter clock values associated with the carrier code sliding combination (Θ_{eme}) or with data sufficient for reconstructing said values. The transmitter clock values associated with the carrier code sliding combination (Θ_{eme}) can be reconstructed from iono-free transmitter clock values (h_{eme}) and clock biases (C'_{eme}), for example.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2010/103082 A1**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

Pour permettre à un récepteur de géopositionnement d'un utilisateur de lever ses ambiguïtés de phase sans nécessairement avoir recours à des observations multi- fréquence, des données d'assistance sont élaborées grâce aux mesures effectuées au niveau d'un réseau de référence (10, 12, 14) et communiquées au récepteur de l'utilisateur. Comme données d'assistance sont utilisées de préférence les valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse (Θ_{eme}) ou des données suffisantes pour reconstituer ces valeurs. Les valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse (Θ_{eme}) sont p. ex. reconstituables à partir des valeurs d'horloge émetteur iono-free (h_{eme}) et des biais d'horloge (C'_{eme}).

PROCÉDÉ DE GÉOPOSITIONNEMENT UTILISANT DES DONNÉES D'ASSISTANCE

Domaine technique

5 [0001] La présente invention concerne le domaine de la radionavigation ou de positionnement par satellite, en particulier un procédé de géopositionnement qui utilise des données d'assistance calculées à l'aide d'un réseau de récepteurs de référence. L'invention concerne en outre un procédé pour calculer les données d'assistance requises. Le champ d'application de l'invention est notamment la
10 réception de signaux de radionavigation émis par des émetteurs d'un système de positionnement par satellite, p. ex. GPS (de l'anglais « Global Positioning System»), Galileo, Glonass, QZSS, Compass, IRNSS, etc.

Etat de la technique

[0002] De manière générale, les signaux de radionavigation émis par des satellites
15 (ou pseudolites) d'un système de positionnement se présentent sous la forme d'une porteuse modulée par une forme d'onde d'étalement contenant un code binaire pseudo-aléatoire. La modulation de la porteuse provoquant l'étalement du spectre autour de la fréquence de la porteuse, les signaux de radionavigation sont souvent appelés « en spectre étalé ». Les codes pseudo-aléatoires représentent un
20 identificateur du signal et donc du satellite émetteur. Connus des récepteurs, ils permettent à ceux-ci un Accès Multiple à Répartition de Code (AMRC). Accessoirement, certains signaux de positionnement par satellites peuvent aussi transporter des données utiles (p. ex. le message de navigation) sous forme d'une séquence binaire (à rythme nettement moins élevé que le code pseudo-aléatoire)
25 modulée en plus sur la porteuse.

[0003] Dans le cas de GPS, les signaux de radionavigation sont transmis dans les bandes de fréquences L1, centrée sur 1575,42 MHz et L2, centrée sur 1227,6 MHz. Au cours de la modernisation de GPS, la bande L5, centrée sur 1176,45 MHz sera ajoutée. Les satellites de la constellation Galileo transmettront dans les bandes E2-
30 L1-E1 (la portion de bande médiane L1 étant la même que celle du GPS), E5a (qui,

selon la nomenclature Galileo, représente la bande L5 prévue pour le GPS), E5b (centrée sur 1207,14 MHz) et E6 (centrée sur 1278,75 MHz). Notons que les satellites de la constellation Compass transmettent ou transmettront dans la bande B1 (centrée sur 1561,098 MHz), B1-2 (centrée sur 1589,742 MHz), L1 (centrée sur 1575,42 MHz), B2 (centrée sur 1207,14 MHz), et B3 (centrée sur 1268,52 MHz). Les fréquences centrales représentent les fréquences des porteuses des différents signaux.

[0004] La réception d'un signal de radionavigation comprend normalement une première démodulation à l'aide d'une réplique interne de la porteuse générée dans le récepteur par un oscillateur piloté par une boucle de poursuite de porteuse et une seconde démodulation à l'aide d'une réplique interne de la forme d'onde d'étalement produite par un générateur de forme d'onde piloté par une boucle de poursuite de forme d'onde d'étalement (appelée aussi « boucle de poursuite de code »). Les signaux d'asservissement des boucles de poursuite de porteuse et de forme d'onde d'étalement sont utilisés par le récepteur pour déterminer sa position. Le signal d'écart de phase entre la porteuse du signal reçu et la réplique interne de porteuse produit à chaque pas de temps par la boucle de poursuite de porteuse fournit une première observable (l'observable ou mesure de phase). Le signal de décalage temporel entre la forme d'onde d'étalement du signal reçu et la réplique interne de forme d'onde d'étalement produit à chaque pas de temps par la boucle de poursuite de forme d'onde d'étalement représente une deuxième observable (l'observable ou mesure de code).

[0005] Les mesures élémentaires que peut effectuer un récepteur comprennent donc les mesures de code et les mesures de phase de porteuse. Ces mesures élémentaires peuvent évidemment être combinées entre elles. Les mesures de code sont d'une précision métrique tandis que les mesures de phase sont d'une précision de quelques mm. Or les mesures de phase présentent le désavantage qu'elles ne livrent que la partie réelle de la différence de phase de la porteuse entre l'émission par le satellite et le récepteur. Les mesures de phase sont donc ambiguës dans le sens que le nombre de cycles entiers entre l'émetteur (le satellite) et le récepteur est inconnu au départ. Afin de pouvoir bénéficier de la précision des mesures de phase, un récepteur doit résoudre les ambiguïtés dont elles sont entachées.

[0006] La résolution des ambiguïtés de phase est couramment effectuée par différentiation des mesures de phase (simple ou double différentiation). Cette différentiation permet d'éliminer des causes d'erreur (non modélisées) communes à plusieurs mesures, et permet ainsi de faire apparaître une information entière, dont la prise en compte améliore encore les performances. Cependant, cette information entière consiste en des différences d'une ou plusieurs ambiguïtés de phase élémentaires et ne permet pas, en général, de remonter aux ambiguïtés de phase élémentaires.

[0007] La demande de brevet FR 2 914 430 décrit un procédé qui permet de résoudre, de manière cohérente, les ambiguïtés de phase sur un réseau de récepteurs de référence à l'aide d'observations bi-fréquence (c.-à-d. des mesures de code et de phase sur au moins deux fréquences distinctes). En parallèle, ce procédé produit un jeu d'horloges de satellite qui peuvent être utilisées en tant que données d'assistance par un récepteur bi-fréquence extérieur au réseau (p.ex. celui d'un utilisateur qui désire connaître sa position). Ces horloges ont la propriété particulière de mettre en évidence des ambiguïtés de phase entières lors de la résolution des équations de positionnement obtenues par des mesures « élémentaires », c.-à-d. différenciées ni entre satellites ni entre récepteurs. L'inconvénient du procédé de la demande FR 2 914 430 est qu'il ne peut être appliqué que par des récepteurs bi-fréquence.

Objet de l'invention

[0008] Un premier volet de la présente invention a comme objet de proposer un procédé de géopositionnement qui permet à un récepteur de lever ses ambiguïtés de phase sans nécessairement avoir recours à des observations multi-fréquence. Un second volet de l'invention a comme objet de proposer un procédé pour déterminer les données d'assistance requises pour un tel procédé de géopositionnement.

Description générale de l'invention

[0009] De manière générale, l'invention comprend deux volets. D'une part, elle comprend un procédé se déroulant au niveau d'un réseau de récepteurs (stations) de référence lors duquel sont déterminées des informations supplémentaires (données d'assistance) à l'aide desquelles un récepteur d'utilisateur ne faisant pas partie du réseau peut résoudre les ambiguïtés de phase. D'autre part, l'invention comprend le

procédé se déroulant au niveau d'un récepteur ne faisant pas nécessairement partie du réseau qui utilise les informations supplémentaires élaborées à l'aide du réseau de stations de référence et mises à disposition par une voie de communication quelconque.

- 5 [0010] Par souci de clarté, le procédé de détermination de données d'assistance est traité en premier. Dans ce qui suit, on supposera que les signaux de radionavigation proviennent d'un ensemble de satellites de radionavigation, dont chacun diffuse au moins un premier signal de radionavigation sur une première fréquence et un deuxième signal de radionavigation sur une deuxième fréquence
10 distincte de la première.

[0011] Le procédé de détermination de données d'assistance comprend les actions de :

- recevoir des mesures de code et de phase (élémentaires, c.-à-d. différenciées ni entre récepteurs ni entre satellites) des signaux de radionavigation réalisées
15 par des récepteurs d'un réseau de référence ; lesdites mesures de phase présentant chacune une ambiguïté d'un nombre entier de cycles a priori inconnue ;
- résoudre les ambiguïtés des mesures de phase sur la première fréquence de manière cohérente sur l'ensemble des satellites et des récepteurs de
20 référence ;
- déduire un ensemble de valeurs d'horloge émetteur iono-free de phase découlant de la résolution cohérente des ambiguïtés et un ensemble de valeurs d'horloge récepteur iono-free de phase découlant de la résolution cohérente des ambiguïtés ;
- 25 ○ calculer, pour chaque couple satellite – récepteur de référence, une valeur de combinaison de glissement de code porteuse à partir de la mesure de code et de la mesure de phase réalisée sur la première fréquence dans ce récepteur de référence et pour ce satellite, et retrancher de cette valeur la contribution géométrique, la contribution des valeurs d'horloge récepteur iono-free de phase et d'horloge émetteur iono-free de phase ainsi que la contribution de
30 l'ambiguïté de la mesure de phase résolue, ceci résultant dans un résidu de mesure ;

- séparer de manière cohérente sur l'ensemble des satellites et des récepteurs du réseau chacun des résidus de mesure obtenus en une partie émetteur et une partie récepteur ; et
- lisser la partie émetteur desdits résidus de mesure.

5 [0012] De préférence, les valeurs d'horloge émetteur iono-free associées à la résolution cohérente des ambiguïtés ainsi que les parties émetteur lissées des résidus de mesure sont mises à disposition de récepteurs extérieurs au réseau comme données d'assistance.

10 [0013] Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, le procédé comprend, pour chaque satellite de l'ensemble de satellites, l'action de calculer une valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse comme somme de la valeur d'horloge émetteur iono-free et du résidu de mesure lissé.

15 [0014] De préférence, les valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse sont mises à disposition de récepteurs extérieurs au réseau comme données d'assistance, p.ex. par une voie de télécommunication, comme l'Internet, la diffusion terrestre ou par satellite, etc.

20 [0015] Le lissage des parties émetteur desdits résidus de mesure peut être réalisé à chaque fois par ajustage d'une fonction sinus d'une période de 12 heures sur la partie émetteur à lisser. Ceci pourra se faire notamment par une méthode des moindres carrés.

[0016] Avantageusement, le procédé de détermination de données d'assistance est implémenté dans un produit de programme d'ordinateur comprenant des moyens de support (mémoire d'ordinateur, disque dur, ondes radio ou optiques, etc.) portant un code de programme d'ordinateur configuré pour mettre en œuvre le procédé
25 lorsque le programme est exécuté sur un ordinateur.

[0017] En ce qui concerne le premier volet de l'invention, un procédé de géopositionnement comprend, au niveau d'un récepteur de signaux de radionavigation, les actions de :

- recevoir, pour chaque satellite dudit ensemble et visible depuis ledit récepteur,
30 au moins ledit premier signal de radionavigation ;

- effectuer, pour chaque satellite visible, des mesures de code et de phase (élémentaires, c.-à-d. différenciées ni entre récepteurs ni entre satellites) du premier signal de radionavigation reçu ; lesdites mesures de phase présentant une ambiguïté d'un nombre entier de cycles a priori inconnue ;
- 5 ○ recevoir un ensemble de données d'assistance, celui-ci comprenant, pour chaque satellite de l'ensemble de satellites, des données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse, déduite de manière cohérente sur l'ensemble de satellites et de récepteurs d'un réseau de référence;
- 10 ○ calculer, pour chaque satellite, une valeur de combinaison de glissement de code porteuse à partir de la mesure de code et de la mesure de phase du premier signal de radionavigation, et retrancher de cette valeur de combinaison de glissement de code porteuse la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse, de sorte à ainsi obtenir une
- 15 observable de glissement code porteuse non-ambiguë ; et
- déterminer la position du récepteur à l'aide des observables de glissement code porteuse non-ambiguës.

[0018] Les données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse comprennent de préférence

20 la valeur d'horloge de satellite associée à la combinaison de glissement code porteuse elle-même. Alternativement, les données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de glissement code porteuse peuvent comprendre les valeurs d'horloge émetteur iono-free de phase associées à la résolution cohérente des ambiguïtés ainsi que les parties émetteur lissées desdits

25 résidus de mesure obtenues par un procédé comme exposé ci-dessus.

[0019] Les procédés selon l'invention sont considérés comme avantageux notamment pour la bande de fréquence L5 (la première fréquence étant dans ce cas 1176,45 MHz). Alternativement, la première fréquence pourrait être 1575,42 MHz, 1227,6 MHz, 1207,14 MHz, 1278,75 MHz, 1561,098 MHz, 1589,742 MHz,

30 1207,14 MHz ou 1268,52 MHz.

[0020] Avantageusement, le procédé de géopositionnement est implémenté dans un produit de programme d'ordinateur comprenant des moyens de support (mémoire

d'ordinateur, disque dur, ondes radio ou optiques, etc.) portant un code de programme d'ordinateur configuré pour mettre en œuvre le procédé.

[0021] De préférence, le procédé de géopositionnement est implémenté dans un dispositif de géopositionnement par satellite, communément appelé « récepteur
5 GNSS (de l'anglais « Global Navigation Satellite System »).

[0022] Le procédé de géopositionnement peut être implémenté en tant que procédé a posteriori ou en tant que procédé en temps réel.

Brève description des dessins

[0023] D'autres particularités et caractéristiques de l'invention ressortiront de la description détaillée d'un mode de réalisation avantageux présenté ci-dessous, à titre
10 d'illustration, avec référence aux dessins annexés. Ceux-ci montrent:

Fig. 1: une illustration schématique d'un réseau de récepteurs de référence ;

Fig. 2: un ordinogramme d'un procédé de détermination de données d'assistance ;

Fig. 3: un ordinogramme d'un procédé de géopositionnement utilisant les données
15 d'assistance qui peuvent être déterminées dans le procédé de la figure 2 ;

Fig. 4: une représentation graphique de la partie émetteur de deux résidus de mesure obtenus chacun par le fait de retrancher d'une mesure de glissement de code porteuse la contribution géométrique (modélisée), la contribution des valeurs d'horloge récepteur et émetteur iono-free de phase ainsi que la contribution de
20 l'ambiguïté de la mesure de phase ;

Fig. 5: une représentation graphique de la partie émetteur de deux résidus de mesure de la figure 4 après lissage.

Description d'une exécution préférée

[0024] Un récepteur de signaux de radionavigation peut réaliser des mesures de
25 code (non ambiguës) et des mesures de phase (ambiguës d'un nombre entier de cycles) sur les signaux de radionavigation qu'il reçoit des différents satellites en visibilité (c.-à-d. au-dessus de l'horizon). Un récepteur multi-fréquence peut effectuer ces mesures sur au moins deux fréquences f_1 et f_2 distinctes. En supposant un récepteur bi-fréquence, on a donc, pour chaque satellite en visibilité et à chaque pas
30 de temps, deux mesures de code, notées P_1 et P_2 , et deux mesures de phase,

notées L_1 et L_2 , sur les fréquences f_1 et f_2 . A chaque pas de temps (t_k), on obtient donc, dans un récepteur, un jeu de mesures de code $P_1^j(t_k)$, $P_2^j(t_k)$, $L_1^j(t_k)$ et $L_2^j(t_k)$, où l'indice supérieur (j) indique le satellite dont le signal provient au récepteur. Comme les satellites orbitent autour de la Terre, seulement une partie d'entre eux est visible à un moment donné depuis le lieu du récepteur. Pour faciliter la notation, la dépendance du temps et l'indice de satellite ne seront pas toujours indiqués explicitement dans ce qui suit.

[0025] On utilisera les notations suivantes :

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2}, \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2}$$

où c représente la vitesse de la lumière. Pour les bandes L1 et L2 du système GPS, on a, par exemple : $f_1 = 154 f_0$ et $f_2 = 120 f_0$, où $f_0 = 10,23$ MHz. Par convention, les mesures de code P_1 , P_2 sont exprimées en unités de longueur, tandis que les mesures de phase L_1 , L_2 sont exprimées en cycles.

[0026] Les mesures de code et de phase remplissent les équations (mesures à gauche, paramètres du modèle à droite) suivantes :

$$\begin{aligned} P_1 &= D_1 + e + \Delta H_{p,1} \\ P_2 &= D_2 + \gamma e + \Delta H_{p,2} \\ \lambda_1 L_1 &= D_1 + \lambda_1 W - e + \Delta H_1 - \lambda_1 N_1 \\ \lambda_2 L_2 &= D_2 + \lambda_2 W - \gamma e + \Delta H_2 - \lambda_2 N_2 \end{aligned} \tag{E1}$$

où

- D_1 représente la distance de propagation entre les centres de phase du satellite et du récepteur pour la fréquence f_1 , incluant l'élongation troposphérique, effets relativistes, etc. – D_2 est la quantité analogue pour la fréquence f_2 ;
- e est le terme d'allongement ionosphérique qui varie en fonction du carré de la fréquence et qui intervient avec un signe opposé entre la mesure de code et la mesure de phase ;
- N_1 et N_2 représentent les ambiguïtés de phase (entières) des deux porteuses ;
- W représente la contribution de l'effet « wind-up » en cycles ; et

- $\Delta H_{p,1}, \Delta H_{p,2}, \Delta H_1, \Delta H_2$ sont les différences entre l'horloge du récepteur et l'horloge de l'émetteur pour les différentes mesures.

[0027] Evidemment, un récepteur mono-fréquence ne peut réaliser qu'une seule mesure de code et une seule mesure de phase par satellite et pas de temps. Sans
5 perte de généralité, on peut admettre que ces mesures sont P_1 et L_1 (au lieu de P_2 et L_2).

[0028] On appelle combinaison « iono-free » de code et on note P_c la combinaison des mesures de code qui élimine la contribution ionosphérique :

$$P_c = \frac{\gamma P_1 - P_2}{\gamma - 1} = \frac{\gamma D_1 - D_2}{\gamma - 1} + \frac{\gamma \Delta H_{p,1} - \Delta H_{p,2}}{\gamma - 1} \quad (E2)$$

10 [0029] Une combinaison « iono-free » de phase (ambiguë) peut être définie de manière analogue. L'intérêt de travailler avec des combinaisons « iono-free » réside principalement dans le fait que l'ionosphère est une source d'erreur relativement mal connue dans le sens où la contribution ionosphérique est difficilement modélisable avec une bonne précision. Or les combinaisons « iono-free » de code et de phase ne
15 sont disponibles que dans un récepteur au moins bi-fréquence.

[0030] Dans un récepteur mono-fréquence, il est cependant possible d'éliminer la contribution ionosphérique à l'aide des mesures sur la fréquence unique, grâce à la combinaison, notée ci-après P_e , dite « de glissement de code porteuse » (aussi appelée combinaison GRAPHIC, ce qui est l'acronyme du terme anglais « GRoup
20 And PHase Ionospheric Correction ») qui utilise la somme de la mesure de phase et de la mesure de code. Pour la fréquence f_1 , cette combinaison peut s'écrire comme moyenne arithmétique de la mesure de code et de la mesure de phase :

$$P_e = \frac{P_1 - \lambda_1 L_1}{2} \quad (E3)$$

[0031] On a donc :

$$25 \quad P_e = D_1 + \frac{\lambda_1 W}{2} + \frac{\Delta H_{p,1} + \Delta H_1}{2} - \frac{\lambda_1 N_1}{2} \quad (E4)$$

[0032] Le terme $\Delta\Theta = (\Delta H_{p,1} + \Delta H_1)/2$ correspond à la différence d'une horloge récepteur associée à la combinaison de glissement code porteuse (commune à tous les canaux du récepteur, notée Θ_{rec}) et d'une horloge émetteur associée à la

combinaison de glissement code porteuse (qui dépend du satellite, notée Θ_{eme}). Cette horloge émetteur Θ_{eme} est a priori inconnue pour chaque satellite (pour chaque canal du récepteur), raison pour laquelle la combinaison de glissement code porteuse était jusqu'à présent de peu d'intérêt pratique dans le cas de mesures non
5 différenciées entre satellites.

[0033] Le mérite des inventeurs est d'avoir reconnu que l'on peut estimer la partie émetteur du terme $\Delta\Theta$ de manière cohérente sur l'ensemble des satellites. Cette estimation se fait à l'aide d'un réseau de récepteurs de référence (ou de stations de référence). La partie émetteur Θ_{eme} de $\Delta\Theta$ peut être communiquée à d'autres
10 récepteurs extérieurs au réseau en tant qu'information d'assistance. Grâce à cela, un récepteur extérieur au réseau peut décomposer le terme $\Delta\Theta$ en sa partie émetteur Θ_{eme} et sa partie récepteur Θ_{rec} , commune à tous les canaux, et réduire ainsi de manière drastique le nombre d'inconnues dans le système d'équations de positionnement. Comme la partie émetteur Θ_{eme} de $\Delta\Theta$ est déterminée de manière
15 cohérente sur l'ensemble des satellites, la solution du système d'équations de positionnement met en évidence les ambiguïtés entières des mesures de phase N_1 pour les différents canaux (c.-à-d. pour les différents satellites).

Nous allons maintenant décrire le procédé qui permet de déterminer les données d'assistance à l'aide d'un réseau de récepteurs de référence, dont une partie est
20 schématiquement montrée en figure 1. Un ordinogramme de ce procédé se trouve en figure 2. Les récepteurs de référence 10, 12, 14 effectuent chacun des mesures de code (non ambiguës) et des mesures de phase (ambiguës) sur les signaux de radionavigation émis par les satellites de radionavigation 16, 18, 20. Chaque satellite émet des signaux de radionavigation 22, 24 sur au moins les fréquences f_1 et f_2 . (Par
25 souci de clarté, la figure 1 ne montre pas toutes les liaisons satellite-récepteur possibles.) A chaque pas de temps (t_k), on obtient donc, pour l'ensemble du réseau, un jeu de mesures de code $P_{1,i}^j(t_k)$, $P_{2,i}^j(t_k)$, $L_{1,i}^j(t_k)$ et $L_{2,i}^j(t_k)$, où l'indice supérieur (j) indique de nouveau le satellite dont les signaux ont été reçus et l'indice inférieur (i) le récepteur ayant fourni la mesure (étape S1 en figure 2). Comme les satellites orbitent
30 autour de la Terre, seulement une partie d'entre eux est visible à un moment donné depuis chaque récepteur de référence. La dépendance du temps, l'indice de récepteur et l'indice de satellite ne seront pas indiqués explicitement, à moins que ce ne soit nécessaire pour la bonne compréhension.

[0034] Il convient de définir le deuxième terme du côté droit de l'équation (E2) comme différence d'horloge « iono-free » de code, notée $\Delta h_p = h_{p,rec} - h_{p,eme}$. De manière analogue, on définit une différence d'horloge « iono-free » de phase, notée $\Delta h = h_{rec} - h_{eme}$. Le système d'équations (E1) devient ainsi :

$$\begin{aligned} P_1 &= D_1 + e + \Delta h_p + \Delta \tau_p \\ P_2 &= D_2 + \gamma e + \Delta h_p + \gamma \Delta \tau_p \\ \lambda_1 L_1 &= D_1 + \lambda_1 W - e + \Delta h + \Delta \tau - \lambda_1 N_1 \\ \lambda_2 L_2 &= D_2 + \lambda_2 W - \gamma e + \Delta h + \gamma \Delta \tau - \lambda_2 N_2 \end{aligned} \quad , \quad (E5)$$

où

- $\Delta \tau = \tau_{rec} - \tau_{eme}$ est le différentiel des biais d'horloge entre le récepteur et l'émetteur entre l'horloge « iono-free » de phase et l'horloge de phase pour la fréquence f_1 – par construction, la quantité correspondante pour la fréquence f_2 est $\gamma \Delta \tau$;
- $\Delta \tau_p = \tau_{p,rec} - \tau_{p,eme}$ est le différentiel des biais d'horloge entre le récepteur et l'émetteur entre l'horloge « iono-free » de code et l'horloge de code pour la fréquence f_1 – par construction, la quantité correspondante pour la fréquence f_2 est $\gamma \Delta \tau_p$.

[0035] Avec cette nouvelle notation, on peut exprimer la combinaison de glissement code porteuse comme suit :

$$P_e = D_1 + \frac{\lambda_1 W}{2} + \Delta h + \frac{\Delta h_p - \Delta h + \Delta \tau_p + \Delta \tau}{2} - \frac{\lambda_1 N_1}{2} \quad (E6)$$

On note que la valeur de cette combinaison (côté gauche de l'équation (E6)) se calcule directement avec les mesures de code et de phase (étape S2 en figure 2) tandis que les valeurs des paramètres de modélisation (côté droit de l'équation (E6)) ne sont pas connues au départ. On reconnaît que :

$$\Delta \Theta = \Delta h + \frac{\Delta h_p - \Delta h + \Delta \tau_p + \Delta \tau}{2} \quad (E7)$$

[0036] Pour calculer les valeurs de Θ_{eme} pour les différents satellites, on détermine, dans une première étape, les valeurs h_{eme} de manière cohérente sur le réseau de récepteurs. Ce procédé (étape S3 en figure 2) est décrit dans la demande de brevet

FR 2 914 430 et dans l'article « Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP » de D. Laurichesse et F. Mercier dans « Proceedings of ION GNSS 2007 », Forth Worth, Texas, 25-28 September, pp. 839-848.

- 5 [0037] Les différences de phase (non ambiguës) entre l'émission des signaux par le satellite et la réception par le récepteur s'écrivent L_1+N_1 et L_2+N_2 , où N_1 et N_2 représentent les ambiguïtés (entières). On pose $N_w=N_2-N_1$, N_w étant appelée ambiguïté widelane (entière).

[0038] On calcule l'allongement ionosphérique de code par :

$$10 \quad eP = \frac{P_1 - P_2}{1 - \gamma} . \quad (E8)$$

[0039] On pose :

$$\tilde{N}_1 = \frac{P_1 - 2eP}{\lambda_1} - L_1 \text{ et } \tilde{N}_2 = \frac{P_2 - 2\gamma eP}{\lambda_2} - L_2 . \quad (E9)$$

Ces quantités ne dépendent que des mesures.

- 15 [0040] Or, les bruits de mesure de code sont tels que, à l'échelle d'un passage (temps de visibilité d'un satellite), les estimées de $\tilde{N}_1$ et $\tilde{N}_2$ souffrent d'un bruit de l'ordre de la dizaine de cycles. On utilise les mesures de code pour déterminer l'ambiguïté widelane.

[0041] On introduit la valeur brute $\tilde{N}_w$ (qui est une valeur estimée) de l'ambiguïté widelane par :

$$20 \quad \tilde{N}_w = \tilde{N}_2 - \tilde{N}_1 \quad (E10)$$

En substituant (E5) dans (E9) on trouve pour N_w une expression de la forme :

$$\tilde{N}_w = N_w + d + \mu_{rec} - \mu_{eme} . \quad (E11)$$

où μ_{rec} est une combinaison linéaire de τ_{rec} , $\tau_{p,rec}$, $h_{rec}-h_{p,rec}$, μ_{eme} est une combinaison linéaire de τ_{eme} , $\tau_{p,eme}$, $h_{eme}-h_{p,eme}$ et d est proportionnel à la différence entre D_1 et D_2 .

- 25 La valeur de d étant généralement inférieure à 0,1 cycles de la widelane, cette quantité pourra être négligée dans ce qui suit. Par calcul de la moyenne sur un passage, on a :

$$\langle \tilde{N}_w \rangle = N_w + \langle \mu_{rec} \rangle - \langle \mu_{eme} \rangle \quad (E12)$$

A l'échelle d'un passage, $\tilde{N}_w$ présente un bruit suffisamment faible (en dessous de la fraction de cycle) pour effectuer une estimation correcte de N_w et donc de μ_{rec} et μ_{eme} (les biais widelane μ_{rec} et μ_{eme} restent constants sur de longues durées).

- 5 [0042] En l'absence d'hypothèses supplémentaires, ce problème mixte entiers-réels est singulier : il est possible de décaler N_w d'un nombre entier si on modifie en même temps la différence $\mu_{rec}-\mu_{eme}$. En outre, μ_{rec} et μ_{eme} ne sont définis qu'à une constante réelle près.

[0043] On commence le processus de calcul par choisir une première station du
10 réseau, de préférence une dont on sait que les μ_{rec} sont stables dans le temps. Pour cette station, on fixe la valeur de μ_{rec} de façon arbitraire, p.ex. en posant $\mu_{rec}=0$. On parcourt alors les passages des satellites en visibilité de cette station. Pour chaque passage, on a $\langle \tilde{N}_w \rangle = N_w - \mu_{eme}$, par définition de la première station (avec $\mu_{rec}=0$).

On décompose alors $\langle \tilde{N}_w \rangle$ en une quantité entière arbitraire (p.ex. l'entier le plus
15 proche), notée N_w , et une quantité pas nécessairement entière correspondant à la différence $N_w - \langle \tilde{N}_w \rangle$, que l'on note μ_{eme} . Cela fournit les μ_{eme} des satellites en visibilité de la première station.

[0044] Pour l'ensemble des satellites dont on connaît maintenant les délais
internes μ_{eme} , on estime les délais μ_{rec} des autres stations. Cette fois-ci, dans
20 l'équation $\langle \tilde{N}_w \rangle = N_w + \mu_{rec} - \mu_{eme}$, la valeur de μ_{eme} est connue. On décompose alors $\langle \tilde{N}_w \rangle + \mu_{eme}$ en un nombre entier arbitraire N_w (de la nouvelle station) et le délai de station μ_{rec} correspondant. On répète ces étapes pour tous les satellites et toutes les stations du réseau de référence. On obtient finalement des valeurs μ_{eme} cohérentes sur tout le réseau de référence. Les valeurs μ_{eme} peuvent être considérées comme
25 constantes sur au moins une journée.

[0045] Après avoir déterminé l'ambiguïté widelane, l'ambiguïté N_1 reste inconnue.

[0046] Du fait que l'ambiguïté widelane est connue, la résolution de l'ambiguïté de phase N_1 ou N_2 (ambiguïté narrowlane) est facilitée de façon significative, en particulier en ce qui concerne les précisions de modélisation nécessaires.

[0047] Les mesures de code P_1 et P_2 dépendent de plusieurs paramètres dont la distance géométrique entre les points d'émission et de réception, les effets ionosphériques, les effets troposphériques ainsi que les horloges d'émetteur et de récepteur. Pour identifier les ambiguïtés restantes, il faut disposer d'une modélisation suffisamment précise de ces grandeurs, ce qui va nécessiter une résolution globale sur le réseau de récepteurs à traiter, à cause des horloges.

10 [0048] On pose :

$$\hat{Q}_c = \frac{\gamma\lambda_1(L_1 + \hat{N}_1) - \lambda_2(L_2 + \hat{N}_1 + N_w)}{\gamma - 1} \quad (\text{E13})$$

où $\hat{N}_1$ est une estimée entière de N_1 , p. ex. l'entier le plus proche de $\langle \tilde{N}_1 \rangle$. $\hat{N}_1$ peut être éloignée de la vraie valeur de N_1 d'une dizaine de cycles à cause du bruit de mesure sur le code.

15 [0049] $\hat{Q}_c$ représente donc une estimée de la combinaison iono-free non-ambiguë de phase Q_c (qui n'est pas mesurable directement) :

$$Q_c = \frac{\gamma\lambda_1(L_1 + N_1) - \lambda_2(L_2 + N_1 + N_w)}{\gamma - 1} \quad (\text{E14})$$

[0050] En posant $\delta N_1 = N_1 - \hat{N}_1$, on a le système :

$$\begin{aligned} P_c &= D + \Delta h_p \\ Q_c &= D_w + \Delta h + \lambda_c \delta N_1 \end{aligned} \quad (\text{E15})$$

20 où $\lambda_c = (\gamma\lambda_1 - \lambda_2)/(\gamma - 1)$, $D = (\gamma D_1 - D_2)/(\gamma - 1)$ (distance géométrique entre les centres de phase, contribution ionosphérique compensée), et $D_w = \lambda_c D$.

[0051] Au lieu de calculer directement N_1 , on détermine d'abord δN_1 . Pour ce faire, il faut une modélisation précise de D_w qui fait notamment intervenir les éléments suivants :

- combinaison des centres de phase bi-fréquence : il s'agit de la combinaison iono-free des centres de phase antenne (L1 et L2) récepteur et émetteur ;
- les orbites précises des satellites ;
- 5 - loi d'attitude des satellites (loi d'attitude nominale en lacet) ;
- effets relativistes dus à l'excentricité des satellites ;
- modélisation précise de la position du récepteur (avec modèle de marées terrestres) ;
- 10 - modélisation de l'allongement troposphérique (un allongement vertical par station avec la fonction de rabattement dépendant du site telle que définie dans le Stanag) ;
- modélisation du Wind-up (rotation géométrique de phase).

[0052] Les paramètres estimés par le filtre sont :

- 15 - à chaque pas de temps, les horloges h_{eme} et h_{rec} des satellites et des stations ;
- pour chaque passage, une ambiguïté de phase constante δN_1 (sans la contrainte qu'il s'agit d'un nombre entier)
- un allongement troposphérique vertical pour chaque station, avec une variation lente dans le temps (typiquement un segment constant toutes
- 20 les 4 heures) ;
- des orbites précises des satellites (si des orbites précises ne sont pas fournies comme données d'entrée).

[0053] Le filtre peut être en formulation moindres carrés ou en formulation de Kalman, plus compatible avec un traitement temps-réel. Les valeurs d'entrée

25 utilisées par le filtrage sont les valeurs de code iono-free et de phase iono-free, avec leurs bruits respectifs, qui sont de l'ordre de 1 m pour le code et 1 cm pour la phase.

[0054] A l'issue de cette étape, on obtient des estimées des résidus δN_1 identifiés calculés par $(\hat{Q}_c - D_w - \Delta h) / \lambda_c$. Des exemples de résidus δN_1 sont montrés à la

fig. 1. (Les δN_1 ne sont pas entiers car aucune hypothèse sur les entiers n'a été faite lors du filtrage.)

[0055] Cette étape de filtrage sert avant tout à calculer proprement le terme D_w (modélisation géométrique). Les horloges identifiées à cette étape sont utilisées par la suite comme valeurs initiales ce qui permet par la suite de travailler sur des petites variations d'horloges, mais ce n'est pas indispensable.

[0056] Avec la valeur de D_w obtenue par le filtrage, on cherche maintenant, au niveau du réseau de référence les valeurs entières des δN_1 . On utilise de nouveau l'équation

$$\hat{Q}_c - D_w = \lambda_c \delta N_1 + h_{rec} - h_{eme}, \quad (E16)$$

où D_w prend maintenant la valeur trouvée par le filtrage. On remarque que l'équation possède une inobservabilité globale. En effet, on peut décaler les valeurs δN_1 concernant un émetteur donné et les valeurs h_{eme} et/ou h_{rec} correspondantes en conservant l'équation valide :

$$\hat{Q}_c - D_w = \lambda_c (\delta N_1 + \alpha) + (h_{rec} - \lambda_c \alpha) - h_{eme} \quad (E17)$$

A cette étape, on calcule de façon itérative les valeurs h_{eme} en commençant avec une première station (un premier récepteur de référence) dont l'horloge est prise comme horloge de référence, et en rajoutant successivement des stations afin de compléter la totalité du réseau.

[0057] Pour la première station, on choisit $\delta N_1 = 0$ et $h_{rec} = 0$. Ce choix est arbitraire et résulte en un jeu de h_{eme} pour les satellites visibles depuis la première station tel que l'équation (E16) est vérifiée.

[0058] L'ajout d'une station est effectué comme suit. Avec le jeu de h_{eme} connus avant l'ajout de la station on calcule les résidus $\delta N_1 + h_{rec} / \lambda_c$ qu'il faut exprimer sous la forme d'une valeur entière par passage (le δN_1), et un réel à chaque pas de temps (correspondant à l'horloge h_{rec} de la station ajoutée). La fig. 2 montre les résidus $\delta N_1 + h_{rec} / \lambda_c$ pour une station nouvellement ajoutée. On remarque que les résidus sont espacés de valeurs entières et que leur décalage par rapport à la valeur entière la plus proche est identique. On peut donc poser que le décalage entre le résidu et la

valeur entière la plus proche correspond à h_{rec}/λ_c et la valeur entière elle-même à δN_1 .

[0059] On note que pour une nouvelle station, les horloges des satellites, et donc les résidus $\delta N_1 + h_{rec}/\lambda_c$ ne sont connus, a priori, que sur une partie des passages.

5 Mais comme δN_1 est constante par passage (les sauts de cycles sont comptabilisés dans $\hat{Q}_c - D_w$), on peut l'étendre à la totalité du passage. Les époques auxquelles un satellite donné est visible à partir d'une station ne correspondent qu'en partie aux époques auxquelles le même satellite est visible pour une station voisine. Plus les stations sont distantes, moins les durées de temps d'observation commune sont
10 grandes. Ceci implique qu'on ajoute toujours une station voisine au moins à une des stations précédentes.

[0060] On note qu'ensemble avec le jeu de δN_1 entiers, on obtient aussi un jeu d'horloges de satellite h_{eme} et de récepteurs h_{rec} cohérents, ayant comme horloge de référence celle de la première station.

15 [0061] A l'aide des valeurs $\{\mu_{eme}^j\}$ (valides pendant au moins une journée) et $\{h_{eme}^j\}$ (devant être mises à jour à chaque époque), un récepteur bi-fréquence extérieur au réseau peut déterminer les ambiguïtés N_1 de manière efficace pour les satellites en vue.

[0062] Par contre, pour trouver la quantité Θ_{eme} , il faut encore connaître la partie
20 émetteur du deuxième terme sur le côté droit de l'équation (E7), c.-à-d. $(h_{p,eme} - h_{eme} + \tau_{p,eme} + \tau_{eme})/2$, que l'on notera C_{eme} par la suite. On définit en outre : $C_{rec} = (h_{p,rec} - h_{rec} + \tau_{p,rec} + \tau_{rec})/2$ et $\Delta C = C_{rec} - C_{eme}$.

[0063] Dans le réseau de récepteurs de référence, les valeurs de μ_{rec} , N_w , N_1 , h_{rec} et h_{eme} sont connues grâce aux calculs précédents. La quantité ΔC est donc
25 observable :

$$\Delta C = \frac{P_1 + \lambda_1 L_1}{2} - D_1 - \frac{\lambda_1 W}{2} - \Delta h + \frac{\lambda_1 N_1}{2} = C_{rec} - C_{eme} \quad (E18)$$

[0064] On note que ΔC correspond au résidu de mesure que l'on obtient en retranchant de la combinaison de glissement de code porteuse (c.-à-d. du terme $(P_1 + \lambda_1 L_1)/2$), la contribution géométrique (modélisée) qui inclut la distance et l'effet

windup (c.-à-d. le terme $D_1 + \lambda_1 W/2$), la contribution des valeurs d'horloge récepteur et émetteur iono-free de phase (c.-à-d. le terme Δh) ainsi que la contribution de l'ambiguïté de la mesure de phase (c.-à-d. le terme $-\lambda_1 N_1/2$). On peut calculer les parties récepteur et émetteur C_{rec} et C_{eme} du résidu de mesure par exemple par la

5 méthode des moindres carrés à chaque pas de temps (étape S4 en figure 2). En tenant compte de tous les récepteurs du réseau, on a un système d'équations de la forme :

$$\{\Delta C_i^j = C_{\text{rec},i} - C_{\text{eme}}^j\}_{i,j}, \quad (\text{E19})$$

ce qui peut s'écrire $\overrightarrow{\Delta C} = \Gamma \vec{x}$, où Γ est la matrice des dérivées partielles et $\vec{x}$ est le

10 vecteur des inconnues : $\vec{x} = (C_{\text{rec},1}, \dots, C_{\text{rec},I}, C_{\text{eme}}^1, \dots, C_{\text{eme}}^J)^T$, avec I = nombre de récepteurs dans le réseau et J = nombre de satellites.

On note encore une fois que les C_{eme} ne dépendent que des satellites tandis que les C_{rec} ne dépendent que des récepteurs. Comme le système (E19) comprend une équation de moins que d'inconnues, il convient de rajouter une équation de

15 contrainte, qui fixe par exemple la somme ou moyenne des C_{eme} à 0 :

$$\sum_j C_{\text{eme}}^j = 0 \quad (\text{E20})$$

[0065] Les valeurs C_{eme} que l'on trouve sont très bruitées à cause du bruit de code sur les mesures. Deux exemples de tracés 26, 28 de C_{eme} sont représentés en figure 4. De préférence, on lisse les valeurs C_{eme} par un modèle (étape S5 en

20 figure 2). On a trouvé que l'on utilise de préférence une fonction sinus à la période de 12 heures pour l'ajuster sur chaque C_{eme} . On trouve ainsi les valeurs lissées $C'_{\text{eme}}{}^j(t)$. La figure 5 montre les tracés de la figure 4 après lissage avec des fonctions sinus.

[0066] Comme données d'assistance, on a finalement (étape S6 en figure 2) les valeurs d'horloge émetteur iono-free h_{eme} (une valeur par pas de temps et par satellite) et les valeurs C'_{eme} (identifiées par les paramètres des fonctions sinus) qui

25 peuvent être transmises à un récepteur extérieur au réseau et utilisées par celui-ci pour fixer les ambiguïtés N_1 .

[0067] Un procédé de géopositionnement dans un récepteur extérieur au réseau de référence qui met à disposition les valeurs h_{eme} et C'_{eme} est montré

30 schématiquement en figure 3. Le récepteur effectue des mesures de code et de phase pour les satellites visibles depuis son lieu géographique (étape S7 en

figure 3). En outre, il reçoit les valeurs h_{eme} et C'_{eme} (étape S8 en figure 3). Avec les mesures de code et de phase sur la fréquence f_1 , le récepteur peut dériver l'observable de glissement de code porteuse (étape S9 en figure 3). En utilisant en outre les données d'assistance, le récepteur peut ensuite calculer les quantités :

$$5 \quad \frac{P_1^j + \lambda_1 L_1^j}{2} + h_{eme}^j + C'_{eme}^j = D_1^j + \frac{\lambda_1 W^j}{2} - \frac{\lambda_1 N_1^j}{2} + h_{rec} + C_{rec} \quad (E21)$$

[0068] Dans le système (E21), les indices de satellite ont été utilisés pour mieux mettre en évidence quels termes sont communs à tous les satellites (tous les canaux du récepteur). On note que le terme $h_{rec} + C_{rec}$ est commun à tous les canaux du récepteur et équivaut à une horloge globale, à estimer à chaque pas de temps (c.-à-d. pour chaque mesure). L'ambiguïté de phase N_1 , qui dépend du satellite, ne prend qu'une seule valeur par passage (temps de visibilité du satellite) si on admet que l'observation n'est pas interrompue pendant ce temps et que les sauts de phase sont détectés et comptabilisés dans la mesure de phase L_1 . Il est utile de remarquer qu'il suffit au récepteur de connaître les valeurs $h_{eme} + C'_{eme}$; les valeurs h_{eme} et C'_{eme} n'ont donc pas besoin d'être transmises séparément. Notons aussi que $h_{rec} + C_{rec}$ correspond à Θ_{rec} tel que défini plus haut ; on a de même : $h_{eme} + C'_{eme} = \Theta_{eme}$.

[0069] Si la position du récepteur et l'allongement troposphérique correspondant sont connus (c.-à-d. si D_1 est connu), les quantités $(P_1 + \lambda_1 L_1)/2 - \lambda_1 W/2 - D_1 + h_{eme} + C_{eme}$ s'agrègent autour de valeurs séparées entre elles par des écarts égaux à des multiples entiers de $\lambda_1/2$.

[0070] Si on souhaite déterminer la position du récepteur (D_1 étant dans ce cas inconnu au départ), on peut, par exemple, résoudre un problème de moindres carrés sur une certaine durée (p.ex. quelques heures), dans lesquels les paramètres suivants sont à déterminer (étape S10 en figure 3) :

- 25 ○ la position du récepteur (incluse dans la modélisation de D_1) ;
- l'allongement troposphérique à la verticale (inclus dans la modélisation de D_1) ;
- l'horloge récepteur associée à la combinaison de glissement code porteuse ($h_{rec} + C_{rec}$) ; et
- 30 ○ les ambiguïtés de phase (une valeur par passage).

[0071] Les ambiguïtés peuvent ensuite être fixées par un mécanisme de « bootstrap » : une ambiguïté est fixée sur un entier arbitraire, suite à quoi les autres ambiguïtés s'agrègent autour de valeurs entières et peuvent être fixées de manière itérative.

- 5 [0072] A l'aide des informations h_{eme} et C'_{eme} , la mesure de glissement de code porteuse devient une observable non ambiguë, libérée de la contribution ionosphérique (« iono-free »), qui possède un bruit valant la moitié du bruit de code. Le PPP (de l'anglais « Precise Point Positioning » - positionnement précis de point) a une précision de 20 à 50 cm en positionnement purement stochastique. Sa précision
- 10 augmente rapidement si on réalise un positionnement statique du récepteur en stockant plusieurs minutes de mesures. A titre d'exemple, on obtient une précision de positionnement de l'ordre de 10 cm pour un quart d'heure de mesures et d'environ 2 cm pour une demi-heure de données (avec un récepteur qui n'est pas trop affecté par les multi-trajets). Les temps d'initialisation sont de l'ordre d'une heure.

Revendications

1. Procédé de détermination de données d'assistance facilitant le traitement de signaux de radionavigation provenant d'un ensemble de satellites de radionavigation, dont chacun diffuse au moins un premier signal de radionavigation sur une première fréquence et un deuxième signal de radionavigation sur une deuxième fréquence distincte de la première, le procédé comprenant les actions :
recevoir des mesures de code et de phase desdits signaux de radionavigation réalisées par des récepteurs d'un réseau de référence ; lesdites mesures de phase présentant chacune une ambiguïté d'un nombre entier de cycles a priori inconnue ; résoudre les ambiguïtés des mesures de phase sur la première fréquence de manière cohérente sur l'ensemble des satellites et des récepteurs de référence ; déduire un ensemble de valeurs d'horloge émetteur iono-free de phase découlant de la résolution cohérente desdites ambiguïtés et un ensemble de valeurs d'horloge récepteur iono-free de phase découlant de la résolution cohérente desdites ambiguïtés ;
caractérisé par les actions :
calculer, pour chaque couple satellite – récepteur de référence, une valeur de combinaison de décalage de code et de porteuse à partir de la mesure de code et de la mesure de phase réalisée dans ce récepteur de référence pour ce satellite sur la première fréquence, et retrancher de cette valeur la contribution géométrique, la contribution des valeurs d'horloge récepteur iono-free de phase et d'horloge émetteur iono-free de phase ainsi que la contribution de l'ambiguïté de la mesure de phase résolue, de sorte à obtenir ainsi un résidu de mesure ;
séparer de manière cohérente sur l'ensemble des satellites et des récepteurs du réseau chacun des résidus de mesure obtenus en une partie émetteur et une partie récepteur ; et
lisser la partie émetteur desdits résidus de mesure.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les valeurs d'horloge émetteur iono-free associées à la résolution cohérente des ambiguïtés ainsi que les parties

émetteur lissées desdits résidus de mesure sont mises à disposition de récepteurs extérieurs au réseau comme données d'assistance.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, comprenant, pour chaque satellite dudit ensemble de satellites, l'action de calculer une valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse comme somme de la valeur d'horloge émetteur iono-free et du résidu de mesure lissé.
4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel lesdites valeurs d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse sont mises à disposition de récepteurs extérieurs au réseau comme données d'assistance.
5. Procédé selon la revendication 2 ou 4, dans lequel ladite mise à disposition est effectuée par une voie de télécommunication.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le lissage des parties émetteur desdits résidus de mesure est réalisé à chaque fois par ajustage d'une fonction sinus d'une période de 12 heures.
7. Produit de programme d'ordinateur comprenant des moyens de support portant un code de programme d'ordinateur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 lorsqu'il est exécuté sur un ordinateur.
8. Procédé de géopositionnement par signaux de radionavigation provenant d'un ensemble de satellites, dont chaque satellite diffuse au moins un premier signal de radionavigation sur une première fréquence et un deuxième signal de radionavigation sur une deuxième fréquence distincte de la première, le procédé comprenant, au niveau d'un récepteur de signaux de radionavigation, les actions : recevoir, pour chaque satellite dudit ensemble et visible depuis ledit récepteur, au moins ledit premier signal de radionavigation ; effectuer, pour chaque satellite visible, des mesures de code et de phase du premier signal de radionavigation reçu ; lesdites mesures de phase présentant une ambiguïté d'un nombre entier de cycles a priori inconnue ; recevoir un ensemble de données d'assistance ; le procédé étant caractérisé

par le fait que l'ensemble de données d'assistance comprend, pour chaque satellite de l'ensemble de satellites, des données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse, déduite de manière cohérente sur l'ensemble de satellites et de récepteurs d'un réseau de référence;

et les actions :

calculer, pour chaque satellite, une valeur de combinaison de décalage de code et de porteuse à partir de la mesure de code et de la mesure de phase du premier signal de radionavigation, et retrancher de cette valeur de combinaison de décalage de code et de porteuse la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse, de sorte à ainsi obtenir une observable de décalage de code et de porteuse non-ambiguë ; et

déterminer la position du récepteur à l'aide des observables de décalage de code et de porteuse non-ambiguës.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse comprennent la valeur d'horloge de satellite associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse.

10. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les données suffisantes pour reconstituer la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse comprennent les valeurs d'horloge émetteur iono-free de phase associées à la résolution cohérente des ambiguïtés ainsi que les parties émetteur lissées desdits résidus de mesure obtenues par un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 ou 8 à 10, dans lequel la première fréquence est sélectionnée parmi 1575,42 MHz, 1227,6 MHz, 1176,45 MHz, 1207,14 MHz, 1278,75 MHz, 1561,098 MHz, 1589,742 MHz, 1207,14 MHz ou 1268,52 MHz.

12. Produit de programme d'ordinateur comprenant des moyens de support portant un code de programme d'ordinateur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 10 lorsqu'il est exécuté sur un ordinateur.

13. Récepteur GNSS pour mettre en œuvre un procédé de géopositionnement par signaux de radionavigation provenant d'un ensemble de satellites, dont chaque satellite diffuse au moins un premier signal de radionavigation sur une première fréquence et un deuxième signal de radionavigation sur une deuxième fréquence distincte de la première, ledit récepteur GNSS étant configuré pour:
- 5 recevoir, pour chaque satellite dudit ensemble et visible depuis ledit récepteur GNSS, au moins ledit premier signal de radionavigation ;
- effectuer, pour chaque satellite visible, des mesures de code et de phase du premier signal de radionavigation reçu ; lesdites mesures de phase présentant une
- 10 ambiguïté d'un nombre entier de cycles a priori inconnue ;
- recevoir un ensemble de données d'assistance ;
- ledit récepteur GNSS étant caractérisé en ce que :
- l'ensemble de données d'assistance comprend, pour chaque satellite de l'ensemble de satellites, des données suffisantes pour reconstituer la valeur
- 15 d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et de porteuse, déduite de manière cohérente sur l'ensemble de satellites et de récepteurs d'un réseau de référence;
- et le récepteur GNSS est en outre configuré pour:
- calculer, pour chaque satellite, une valeur de combinaison de décalage de code et
- 20 de porteuse à partir de la mesure de code et de la mesure de phase du premier signal de radionavigation, et retrancher de cette valeur de combinaison de décalage de code de porteuse la valeur d'horloge émetteur associée à la combinaison de décalage de code et porteuse, de sorte à ainsi obtenir une observable de décalage de code et de porteuse non-ambiguë ; et
- 25 déterminer la position du récepteur à l'aide des observables de décalage de code et de porteuse non-ambiguës.

Fig. 1

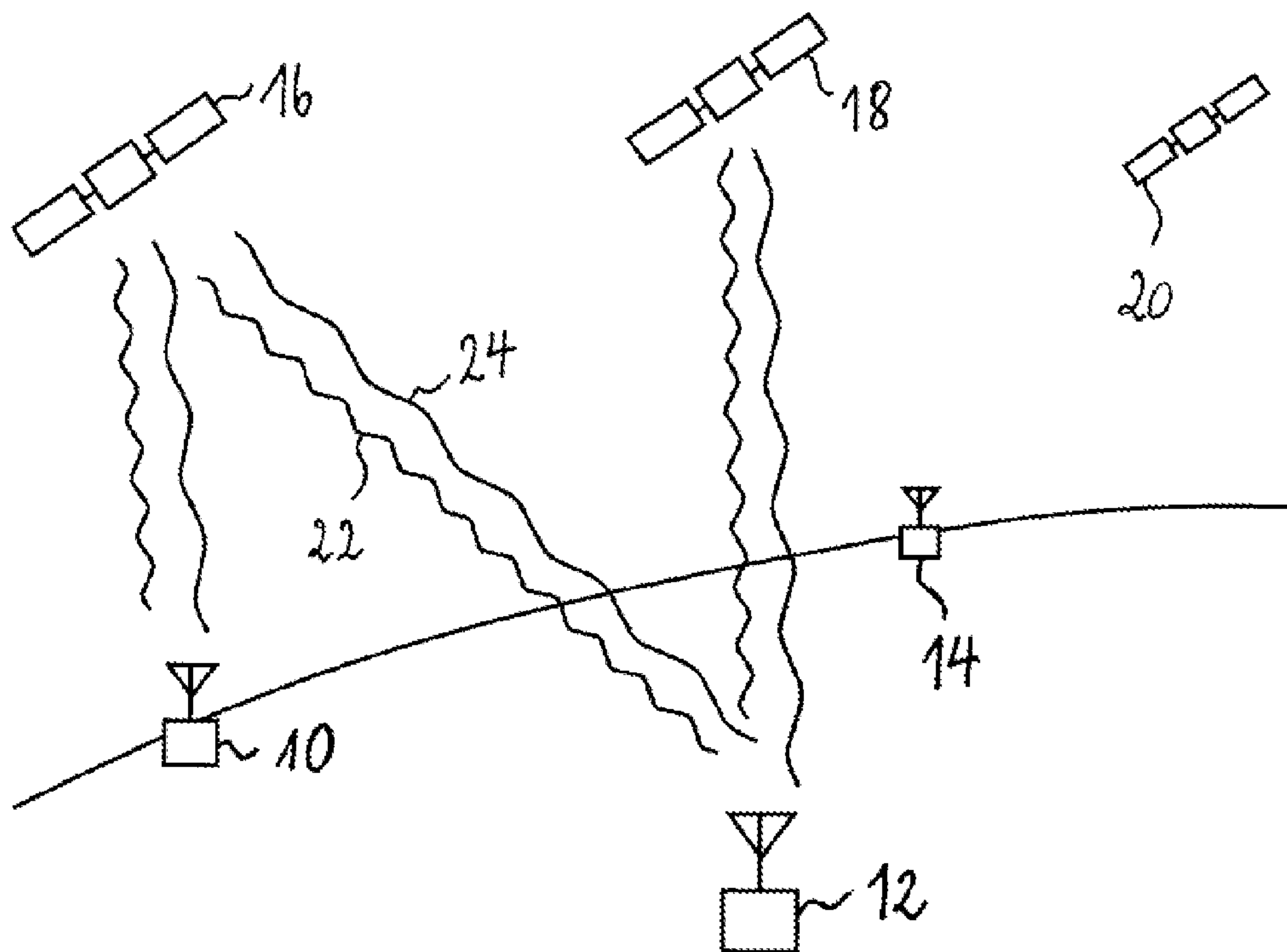


Fig. 2

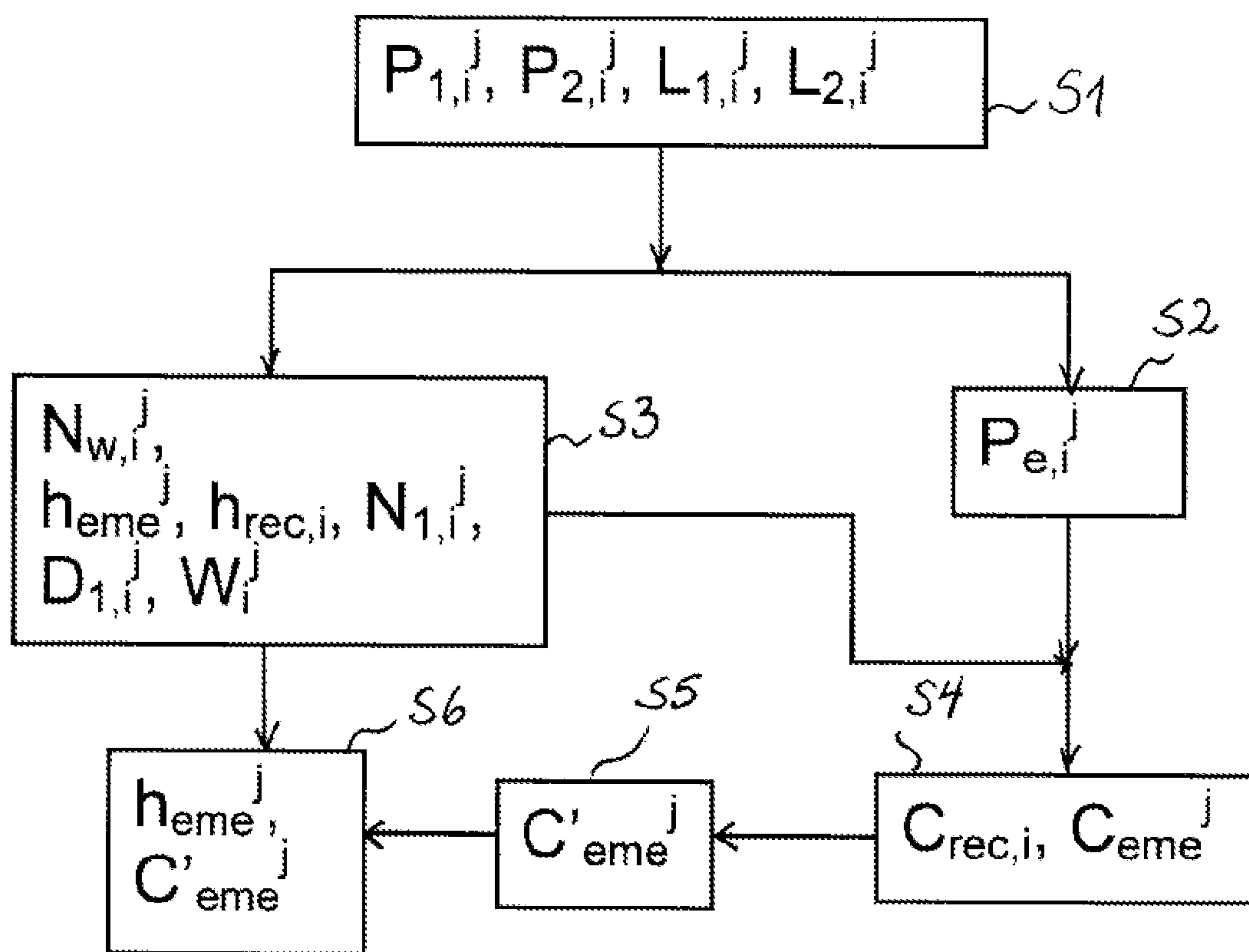


Fig. 3

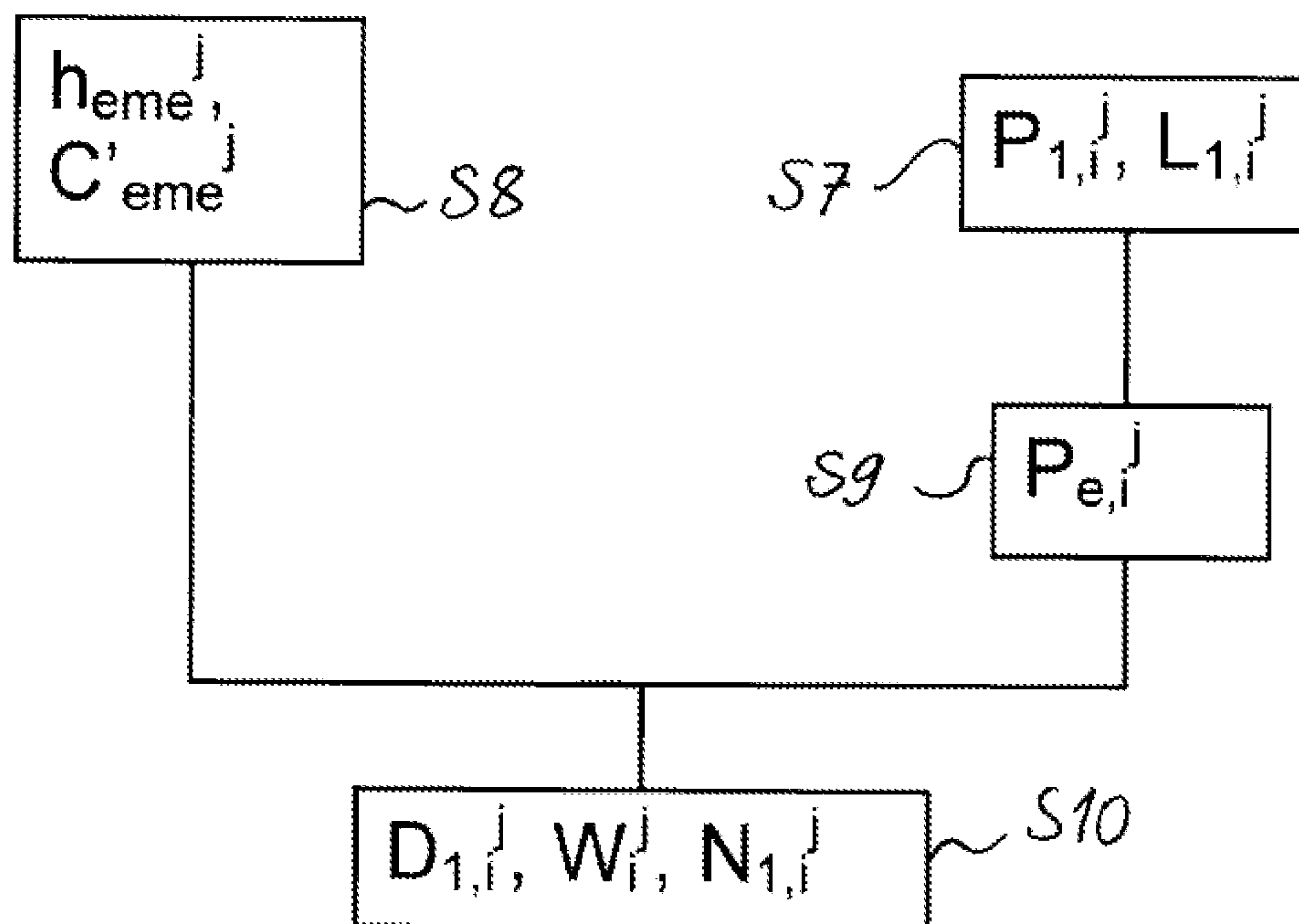


Fig. 4

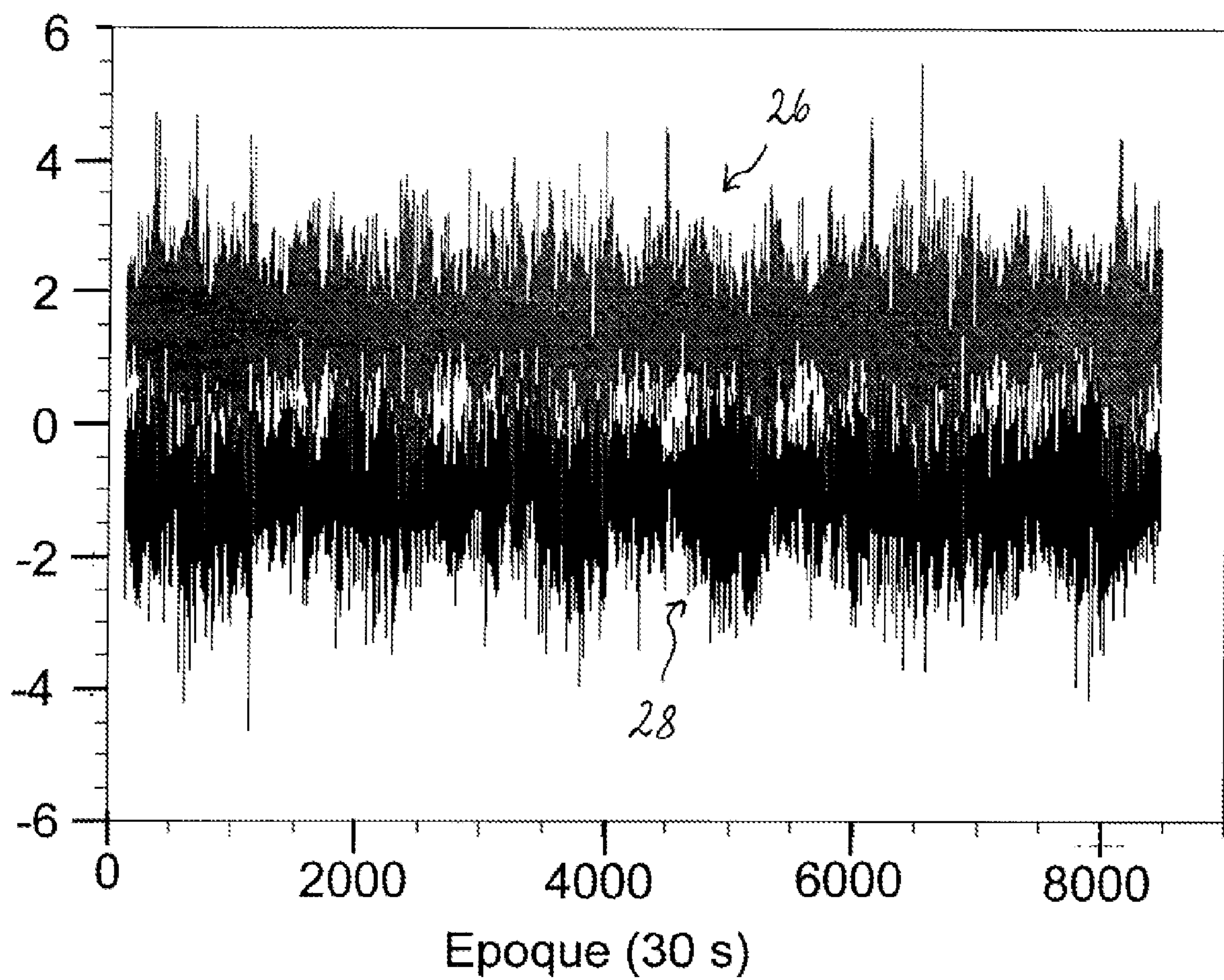


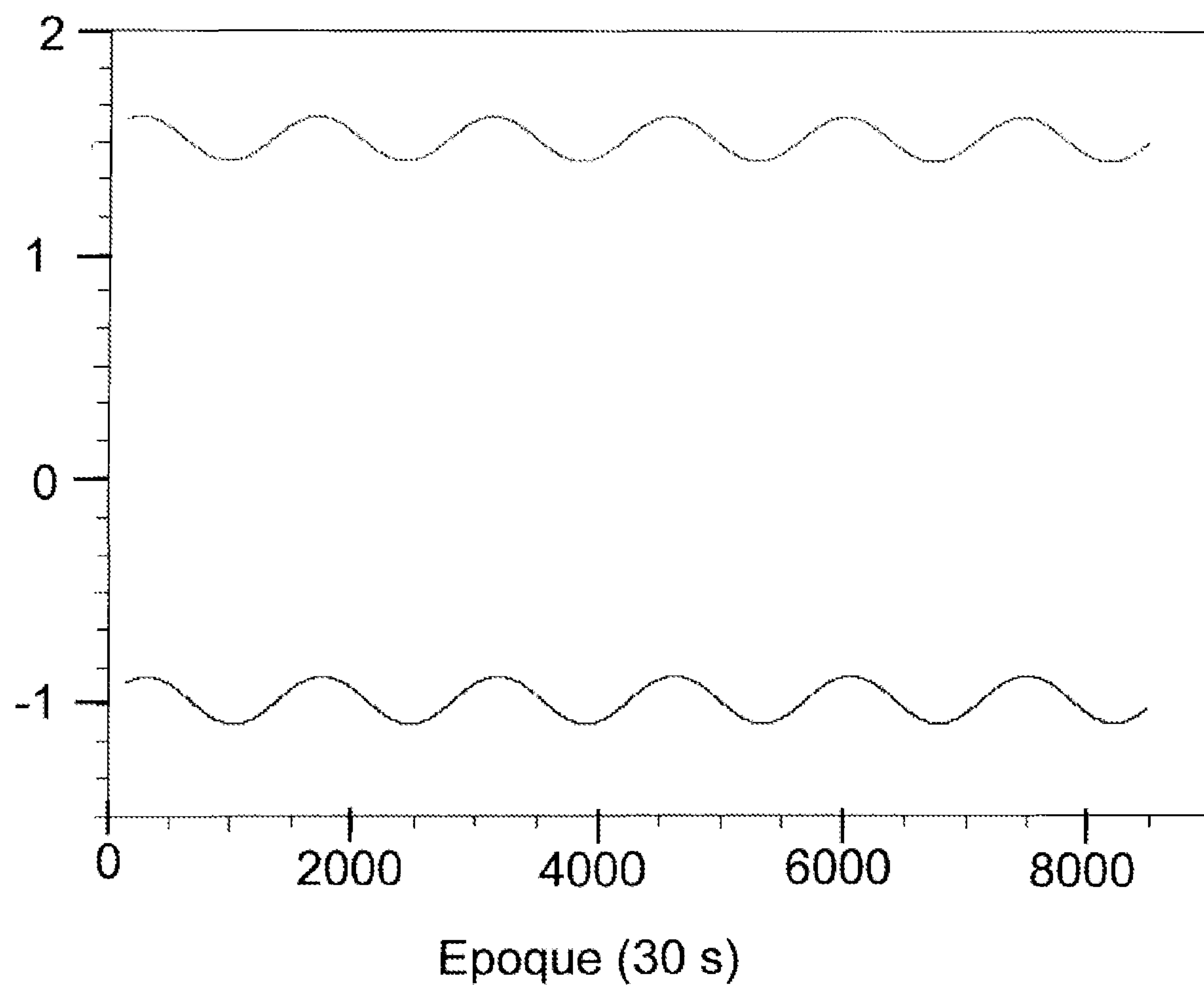
Fig. 5

Fig. 2

