



Office de la Propriété
Intellectuelle
du Canada
Un organisme
d'Industrie Canada

Canadian
Intellectual Property
Office
An agency of
Industry Canada

CA 2242225 C 2004/09/28

(11)(21) 2 242 225

(12) BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT

(13) C

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 1996/12/13
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 1997/07/10
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2004/09/28
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 1998/06/25
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 1996/002006
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 1997/024629
(30) Priorité/Priority: 1995/12/26 (95/15483) FR

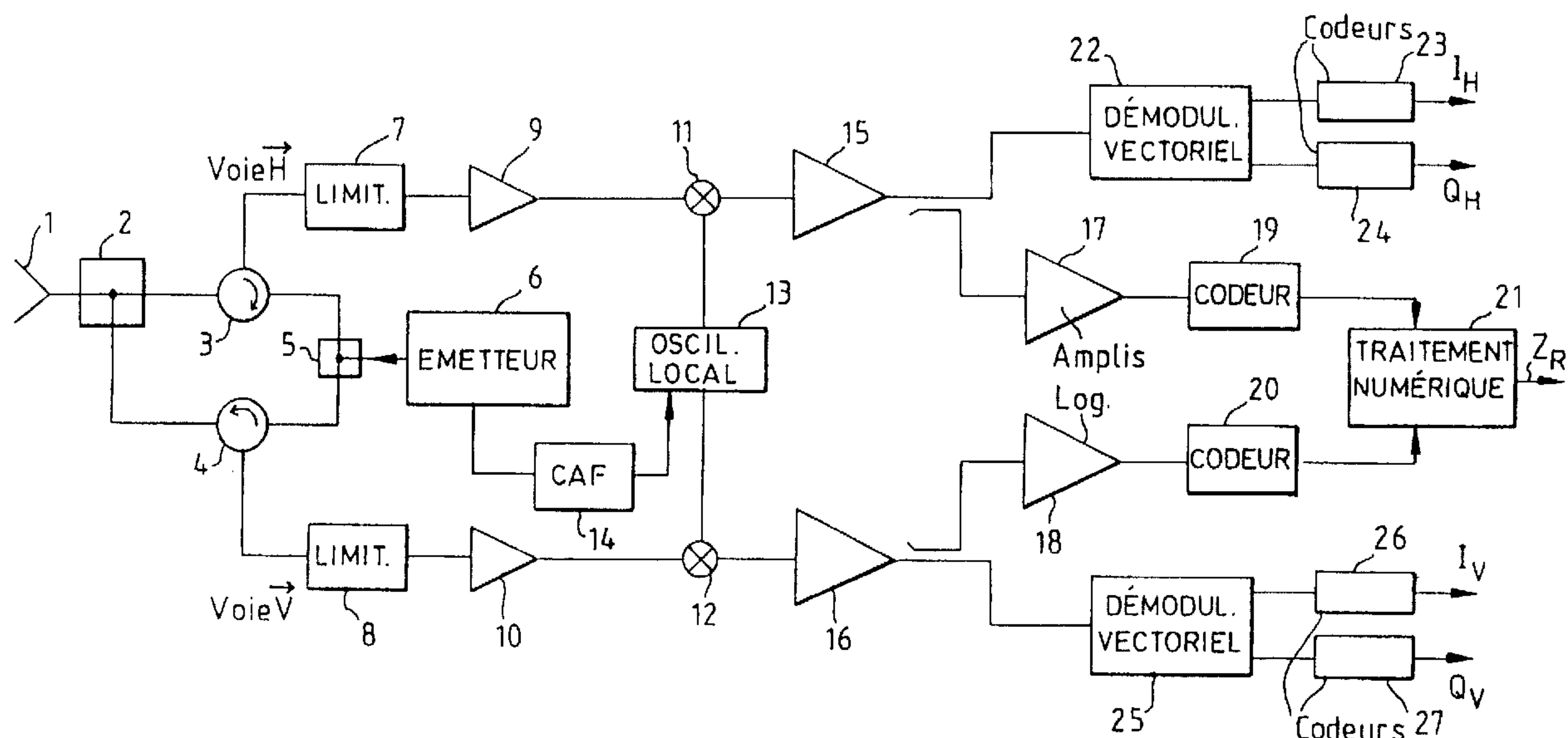
(51) Cl.Int.⁶/Int.Cl.⁶ G01S 13/95

(72) Inventeurs/Inventors:
SAUVAGEOT, HENRI, FR;
BEGUIN, DANIEL, FR;
DEVINNE, REGIS, FR

(73) Propriétaire/Owner:
THOMSON-CSF, FR

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : PROCEDE DE DETERMINATION DU TAUX DE PRECIPITATION PAR RADAR A DOUBLE POLARISATION
ET RADAR METEOROLOGIQUE LE METTANT EN OEVRE
(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE PRECIPITATION RATIO BY DOUBLE POLARISATION RADAR AND
METEOROLOGICAL RADAR FOR IMPLEMENTING SUCH PROCESS



(57) Abrégé/Abstract:

L'invention concerne un procédé de détermination du taux de précipitation par radar à double polarisation et un radar météorologique le mettant en oeuvre. Le procédé consiste, à partir des signaux reçus sur les deux voies de polarisation H et V du radar, à déterminer d'abord sur une seule polarisation une estimation des taux de précipitation R_a (19, 30 à 32) le long du faisceau radar, dans chaque porte en distance i , puis une première valeur estimée (I_1) de l'intégrale des taux de précipitation, enfin, à partir du coefficient de réflectivité atténue ($Z_{Ha}(r)$) une estimation (35 à 38, 47, 48) du coefficient de réflectivité différentielle non atténue ($Z_{DRs}(r)$). Par ailleurs, on détermine (30, 40 à 42) la valeur mesurée du coefficient de réflectivité différentielle atténue ($Z_{DRs}(r)$) et on en déduit (43, 44) l'intégrale (I_2) des taux de précipitation qui est comparée (45, 46) à la première valeur estimée (I_1) de manière à ajuster itérativement un paramètre (α) du procédé appliquée à la polarisation H seule. Lorsque α est ajusté, on dispose (38, 47) des valeurs corrigées du coefficient de réflectivité non atténue et du taux de précipitation. L'invention s'applique aux radars météorologiques.

PCTORGANISATION MONDIALE DE LA PROPRIETE INTELLECTUELLE
Bureau international

DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIEE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIERE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets ⁶ : G01S 13/95, 7/02	A1	(11) Numéro de publication internationale: WO 97/24629 (43) Date de publication internationale: 10 juillet 1997 (10.07.97)
(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR96/02006		(81) Etats désignés: CA, CN, JP, KR, US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).
(22) Date de dépôt international: 13 décembre 1996 (13.12.96)		
(30) Données relatives à la priorité: 95/15483 26 décembre 1995 (26.12.95) FR		Publiée <i>Avec rapport de recherche internationale.</i>
(71) Déposant (<i>pour tous les Etats désignés sauf US</i>): THOMSON-CSF [FR/FR]; 173, boulevard Haussmann, F-75008 Paris (FR).		
(72) Inventeurs; et		
(75) Inventeurs/Déposants (<i>US seulement</i>): SAUVAGEOT, Henri [FR/FR]; (FR). BEGUIN, Daniel [FR/FR]; (FR). DEVINNE, Régis [FR/FR]; Thomson-CSF S.C.P.I., 13, avenue du Président-Salvador-Allende, F-94117 Arcueil Cédex (FR).		
(74) Mandataire: THOMSON-CSF S.C.P.I.; 13, avenue du Président-Salvador-Allende, F-94117 Arcueil Cédex (FR).		

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE PRECIPITATION RATIO BY DOUBLE POLARISATION RADAR AND METEOROLOGICAL RADAR FOR IMPLEMENTING SUCH PROCESS

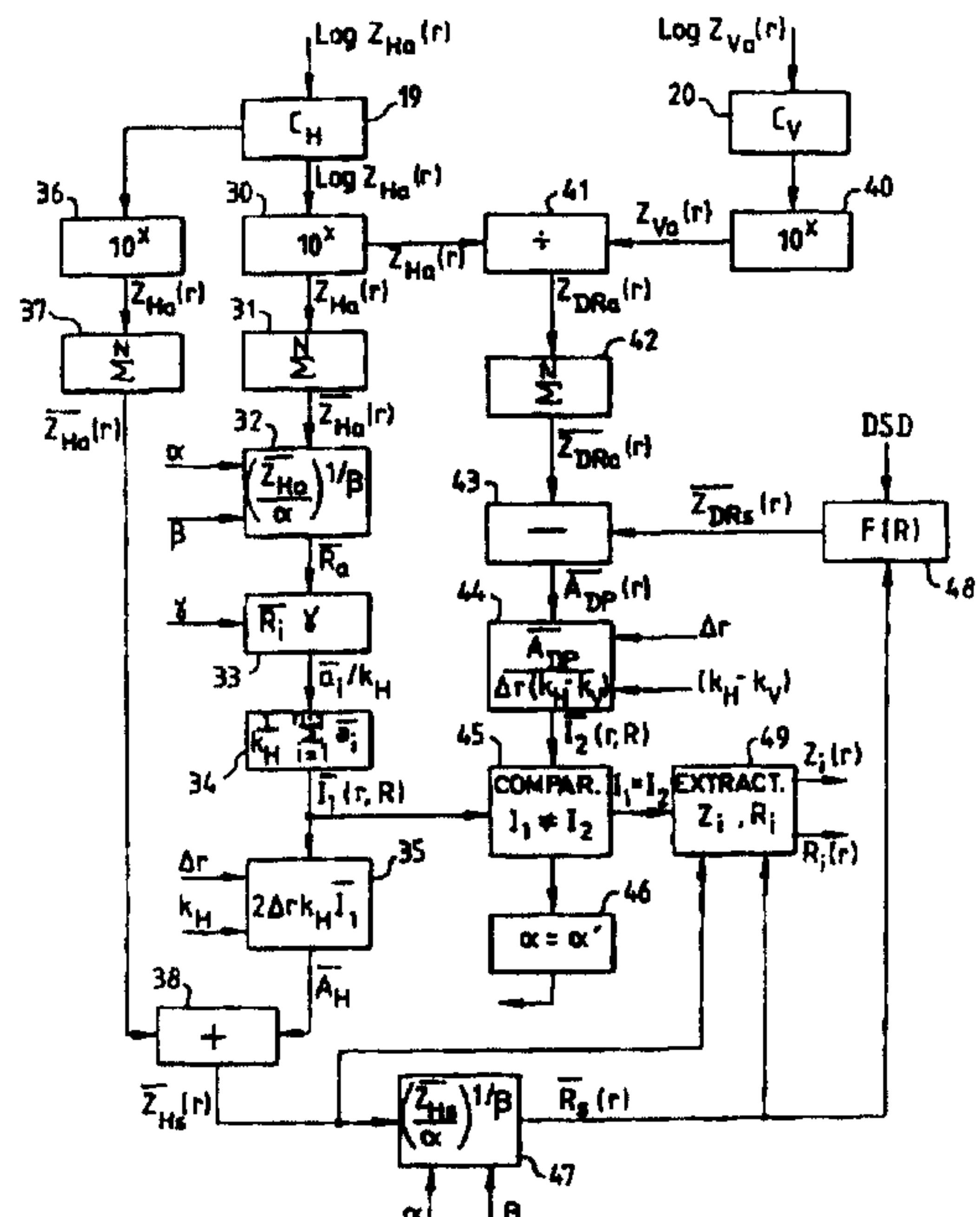
(54) Titre: PROCEDE DE DETERMINATION DU TAUX DE PRÉCIPITATION PAR RADAR A DOUBLE POLARISATION ET RADAR MÉTÉOROLOGIQUE LE METTANT EN OEUVRE

(57) Abstract

The process comprises determining from signals received on the two polarisation channels H and V of the radar, first on a single polarisation, an estimation of the precipitation ratios R_a (19, 30-32) along the radar beam, in each door by distance i , then a first estimated value (I_1) of the integral of precipitation ratios, and finally from the attenuated reflectivity coefficient ($Z_{Ha}(r)$) an estimation (35-38, 47, 48) of the non attenuated differential reflectivity coefficient ($Z_{DRs}(r)$). Additionally, the measured value of the attenuated differential reflectivity coefficient ($Z_{DRs}(r)$) is determined (30, 40-42) and the integral (I_2) is deduced (43, 44) from the precipitation ratios and compared (45, 46) to the first estimated value (I_1) so as to iteratively adjust a parameter (α) of the process applied to the polarisation H alone. When α is adjusted, the corrected values of the non attenuated reflectivity coefficient and of the precipitation ratio are obtained (38, 47). The invention applies to meteorological radars.

(57) Abrégé

L'invention concerne un procédé de détermination du taux de précipitation par radar à double polarisation et un radar météorologique le mettant en oeuvre. Le procédé consiste, à partir des signaux reçus sur les deux voies de polarisation H et V du radar, à déterminer d'abord sur une seule polarisation une estimation des taux de précipitation R_a (19, 30 à 32) le long du faisceau radar, dans chaque porte en distance i , puis une première valeur estimée (I_1) de l'intégrale des taux de précipitation, enfin, à partir du coefficient de réflectivité atténue ($Z_{Ha}(r)$) une estimation (35 à 38, 47, 48) du coefficient de réflectivité différentielle non atténue ($Z_{DRs}(r)$). Par ailleurs, on détermine (30, 40 à 42) la valeur mesurée du coefficient de réflectivité différentielle atténue ($Z_{DRs}(r)$) et on en déduit (43, 44) l'intégrale (I_2) des taux de précipitation qui est comparée (45, 46) à la première valeur estimée (I_1) de manière à ajuster itérativement un paramètre (α) du procédé appliqué à la polarisation H seule. Lorsque α est ajusté, on dispose (38, 47) des valeurs corrigées du coefficient de réflectivité non atténue et du taux de précipitation. L'invention s'applique aux radars météorologiques.



**PROCEDE DE DETERMINATION DU TAUX DE PRECIPITATION
PAR RADAR A DOUBLE POLARISATION ET RADAR
METEOROLOGIQUE LE METTANT EN OEUVE.**

5 La présente invention se rapporte à un procédé de détermination du taux de précipitation et du facteur de réflectivité d'un hydrométéore par radar à impulsions à longueur d'onde atténuée par les hydrométéores et à un radar météorologique à double polarisation mettant en oeuvre ce procédé.

10 En météorologie, on a besoin d'observer les chutes de pluies et autres hydrométéores notamment pour des problèmes de prévision à court terme. A cette fin, on a depuis de nombreuses années pensé à utiliser le radar pour déterminer quantitativement le taux de précipitation qui est un paramètre caractéristique de ces phénomènes. Pour cela on 15 utilise des procédés basés sur la mesure de la réflectivité de la pluie ou des hydrométéores illuminés par un faisceau radar. Cependant pour la plupart de ces procédés, l'atténuation par les hydrométéores constitue un biais pour les mesures et il faut donc fonctionner à des longueurs d'onde aussi peu atténuées que possible, donc relativement élevées.
20 Ceci entraîne des difficultés de mise en oeuvre et un coût important.

Un autre procédé plus attractif a été proposé : celui de l'atténuation sur deux longueurs d'onde et une seule polarisation qui a l'avantage d'être indépendant de la calibration du radar. Mais ce procédé conduit à certaines difficultés techniques pour obtenir des mesures 25 ayant la précision requise. En effet, on rencontre des problèmes relatifs à la coïncidence des faisceaux aux deux longueurs d'onde et à la simultanéité des mesures.

De toutes les études faites, il ressort l'intérêt qu'il y aurait à utiliser des radars à plus faible longueur d'onde permettant de choisir 30 des matériels plus compacts et moins coûteux. Cependant on se heurtait alors à des problèmes de correction d'atténuation très difficiles à résoudre, notamment en présence de fortes précipitations.

Une amélioration a été proposée consistant à utiliser un radar à double polarisation pour déterminer le taux de précipitation en utilisant 35 la réflectivité différentielle. Des solutions de ce type sont décrites par

exemple dans l'article de E. GORGUCCI et al. « A Robust Estimator of Rainfall Rate Using Differential Reflectivity » Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 11, Avril 1994, pages 586-592, ou dans l'article de C.W. ULBRICH et al « Assessment of the contribution of differential polarization to improved rainfall measurements » Radio Science, vol. 19, N° 1, Janvier-Février 1984, pages 49-57. Ces solutions améliorent les résultats obtenus pour des atténuations modérées, mais ne résolvent pas tous les problèmes rencontrés avec de fortes précipitations.

10 L'invention a pour objet un procédé remédiant à ces inconvénients malgré l'utilisation de longueurs d'onde faibles entraînant une atténuation relativement élevée des ondes électromagnétiques sur le trajet aller et retour à travers le milieu absorbant constitué par les hydrométéores (pluie, grêle, nuages).

15 L'invention est basée sur l'utilisation d'un radar à double polarisation pour mesurer les reflectivités selon les deux composantes de polarisation \vec{H} et \vec{V} en corrigeant les effets de l'atténuation sur les valeurs obtenues grâce aux mesures différentielles effectuées.

20 Selon l'invention, il est donc prévu un procédé de détermination du taux de précipitation et du facteur de reflectivité d'un hydrométéore par radar à impulsions à longueur d'onde atténuée par ledit hydrométéore, ledit radar étant un radar à double polarisation fournissant une double série de mesures du facteur de reflectivité atténué ($Z_{H_a}(r), Z_{V_a}(r)$) pour les différentes portes en distance selon 25 chacune des polarisations, procédé dans lequel on estime le taux de précipitation (R) à partir du facteur de reflectivité pour une polarisation (Z_H) et du facteur de reflectivité différentielle non atténué (Z_{DR}), ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

30 A) déterminer, dans chaque porte en distance du radar, une première estimation du taux de précipitation (R_s) à partir du facteur de reflectivité mesuré pour une seule polarisation par une combinaison des relations liant le facteur de reflectivité Z au taux de précipitation R, de la forme $Z = \alpha R^\beta$ où α et β sont des paramètres, et le coefficient d'atténuation sur une seule polarisation au taux de précipitation ;

2 ~~5~~ s

B) obtenir à partir de ladite première estimation du taux de précipitation une valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué (Z_{DRs});

C) déduire de ladite valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué (Z_{DRs}) et de la mesure radar du facteur de réflectivité différentielle atténué (Z_{DRa}) une valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}); et

D) chercher à obtenir l'égalité entre l'intégrale ($I_1(r, R)$) du taux de précipitation estimé dans l'étape A sur une seule polarisation du radar et l'intégrale ($I_2(r, R)$) du taux de précipitation déduite de ladite atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}), par ajustement itératif d'un des paramètres (α) de la relation liant le facteur de réflectivité au taux de précipitation, tandis que l'autre paramètre (β) est maintenu à une valeur prédéterminée constante, de manière à pouvoir extraire les valeurs corrigées du facteur de réflectivité non atténué ($Z_{Hs}(r)$) et du taux de précipitation ($R_s(r)$).

Le grand avantage de ce procédé est qu'il est indépendant de la calibration du radar et de l'atténuation par d'éventuels nuages non détectés car il est basé sur une mesure différentielle.

Selon un autre aspect de l'invention, il est également prévu un radar météorologique à double polarisation fonctionnant à impulsions avec une longueur d'onde atténuee par les hydrométéores, pour la détermination du taux de précipitation et du facteur de réflectivité, ledit radar comportant :

5 - une antenne à double polarisation associée à des moyens pour extraire les modes correspondant à deux voies de polarisation orthogonales \vec{H} et \vec{V} ;

- un émetteur délivrant des impulsions aux deux voies de ladite antenne ;

10 - au moins une voie de réception pour traiter les signaux issus des deux voies de polarisation orthogonales ;

ledit radar étant caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de traitement numérique du signal prévu pour mettre en oeuvre le procédé décrit ci-dessus.

15 L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques et avantages apparaîtront à l'aide de la description ci-après et des dessins joints où :

- la figure 1 est un schéma d'un radar météorologique selon l'invention ; et

20 - la figure 2 est un schéma de principe d'un dispositif de traitement numérique du signal pour la mise en oeuvre du procédé selon l'invention.

Sur la figure 1 est représenté le schéma d'un radar météorologique bipolarisation. Ce radar comporte une antenne à double 25 polarisation comprenant une source primaire 1 à double polarisation illuminant un réflecteur (non représenté). Cette source est associée à un extracteur de mode 2 (orthomode) à deux voies de polarisation \vec{H} et \vec{V} . Cette source primaire est alimentée par un émetteur à impulsions (6) fournissant des impulsions à fréquence de répétition adaptée à la portée 30 désirée (par exemple $F_r = 1 \text{ kHz}$ pour une portée de 150 km). La puissance d'émission est distribuée aux deux voies de l'antenne par l'intermédiaire d'un té magique pour obtenir une polarisation orientée à 45° par rapport à l'horizontale ou par un coupleur 3dB, 5, pour obtenir une polarisation circulaire. Ces deux modes d'émission sont a priori équivalents puisqu'on 35 veut émettre et recevoir deux signaux à polarisations orthogonales et les

traiter en amplitude. La polarisation circulaire a un avantage secondaire en ce qui concerne le taux d'ondes stationnaires réfléchi par l'antenne vers l'émetteur.

On prévoit deux voies de réception identiques traitant les signaux 5 prélevés par deux circulateurs de puissance 3 et 4. Chaque voie comprend de manière classique un limiteur 7, 8, un amplificateur 9, 10, un mélangeur 11, 12 pour passer en fréquence intermédiaire, un amplificateur à fréquence intermédiaire 15, 16 puis un amplificateur logarithmique 17, 18 pour obtenir une grande gamme dynamique et un codeur analogique-numérique 19, 20. 10 Les signaux codés sont dirigés vers un dispositif de traitement numérique selon l'invention 21 dont on verra le détail ultérieurement et qui restitue en sortie le facteur de réflectivité Z et le taux de précipitation R corrigés. Les mélangeurs 11 et 12 reçoivent par ailleurs le signal d'un oscillateur local 13 contrôlé par un circuit de commande automatique de fréquence 14.

15 Pour certaines applications météorologiques où on veut obtenir des informations complémentaires sur la nature des hydrométéores, il est intéressant de mesurer la phase des signaux reçus par des voies de réception Doppler supplémentaires. Ces voies comprennent un circuit de démodulation vectorielle 22, 25 suivi de deux codeurs analogique-20 numérique 23, 24 d'une part, 26, 27 d'autre part pour restituer les signaux codés en quadrature I_H, Q_H pour la voie \vec{H} et I_V, Q_V pour la voie \vec{V} .

Le principe du procédé selon l'invention est le suivant. A partir 25 d'une seule polarisation, par exemple la voie \vec{H} , la relation entre le facteur de réflectivité atténué mesuré dans la pluie (ou autre hydrométéore) $Z_{H_a}(r)$ à la distance r et le coefficient d'atténuation a peut s'écrire :

$$Z_{H_a}(r) = Z_o(r) - 2\Delta r \sum_{i=1}^{n-1} a_i \quad (1)$$

où $Z_o(r)$ est le facteur de réflectivité non atténué, Δr est la largeur d'une 30 porte en distance, a_i est le coefficient d'atténuation propre à la porte en distance de rang i, exprimé en dB par unité de longueur, où $Z_{H_a}(r)$ et $Z_o(r)$ s'expriment en dBZ, c'est-à-dire $= 10 \log Z$ en $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$ et où $r = n\Delta r$.

Le coefficient d'atténuation a est lié au taux de précipitation R par la relation connue :

$$a = k_H R^{\gamma_H} \quad (2)$$

où k_H et γ_H sont des paramètres pour la polarisation \vec{H} qui dépendent faiblement de la température et de la distribution de taille des gouttes (DSD pour "Drop Size Distribution") et qui peuvent être calculés pour chaque 5 longueur d'onde.

En combinant les relations (1) et (2), on obtient :

$$Z_o(r) = Z_{Ho}(r) + 2 \Delta r k_H I_1(r, R) \quad (3)$$

avec :

10

$$I_1(r, R) = \sum_{i=1}^{n-1} R_i^{\gamma_H} \quad (4)$$

I_1 représente l'intégrale du taux de précipitation le long du faisceau du radar pour la polarisation \vec{H} choisie, c'est-à-dire qu'il traduit le cumul de l'atténuation dans les $n-1$ portes en distance précédant la porte n .

15

Or il existe une relation connue entre le facteur de réflectivité Z dû à la pluie et le taux de précipitation R :

$$Z = \alpha R^\beta \quad (5)$$

où α et β sont des paramètres. On peut ainsi écrire la relation (4) sous la forme équivalente :

20

$$I_1(r, R) = \alpha^{-\gamma_H \beta} \sum_{i=1}^{n-1} Z_i^{\gamma_H \beta} \quad (4')$$

Les paramètres α et β dépendent fortement de la DSD. En utilisant des valeurs approchées pour les quatre paramètres k , γ , α et β dans les relations (3) et (5), on peut calculer des estimés corrigés $Z'(r)$ à partir de 25 la série de n valeurs mesurées $Z_o(r)$ grâce une méthode itérative proposée par P.H. Hildebrand en 1978 dans "Iterative correction for attenuation of 5cm radar in rain" J.Appl.Meteor., 17, pages 508-514. Comme signalé dans cet article, des erreurs dans la DSD et la température supposées peuvent dégrader sérieusement ces estimés d'atténuation mais ces dégradations 30 sont faibles par rapport à celles résultant d'erreurs de calibration du radar. Les paramètres concernés par l'erreur de calibration en radar étant ceux de la relation entre Z et R , l'incertitude essentielle sur $I_1(r, R)$ résulte de l'incertitude sur les paramètres α et β .

Pour lever ces incertitudes, on fait donc appel à des mesures différentielles utilisant les deux polarisations d'un radar. La réflectivité différentielle Z_{DR} est définie par :

$$Z_{DR} = Z_H - Z_V \quad (6)$$

5 où Z s'exprime en dBZ et où les indices H et V correspondent aux deux polarisations du radar, par exemple horizontale et verticale.

Pour les longueurs d'onde atténuerées, en utilisant la relation (1) pour les polarisation H et V et en soustrayant les termes V des termes H, on obtient :

$$10 \quad Z_{DRa}(r) = Z_{DRs}(r) - 2 A_{DP}(r) \quad (7)$$

où Z_{DRa} est la mesure radar polarimétrique atténuerée, $Z_{DRs} = Z_{OH} - Z_{OV}$ est le coefficient de réflectivité différentielle non atténueré, dû seulement à la forme des gouttes, et A_{DP} est l'atténuation polarimétrique différentielle pour un trajet de l'onde électromagnétique, soit :

$$15 \quad A_{DP}(r) = \Delta r \sum_{i=1}^{n-1} (a_{iH} - a_{iV}) \quad (8)$$

Avec une DSD supposée, le coefficient de réflectivité différentielle Z_{DRs} dû aux formes des gouttes peut être calculé comme une fonction du taux de précipitation :

$$Z_{DRs} = f(R) \quad (9)$$

20 Les coefficients d'atténuation a_{iH} et a_{iV} de la relation (8) sont donnés par la relation (2) pour les polarisations H et V. Pour la DSD supposée, les paramètres k_H , k_V , γ_H et γ_V peuvent être calculés. Le calcul montre que la différence $a_H - a_V$ ne dépend pas de manière significative de la DSD. Pour une longueur d'onde donnée, k_H et k_V sont nettement 25 différents mais $\gamma_H = \gamma_V = \gamma$.

En combinant les relations (2) et (8), on a donc :

$$A_{DP}(r) = \Delta r (k_H - k_V) I_2(r, R) \quad (10)$$

avec :

$$30 \quad I_2(r, R) = \sum_{i=1}^{n-1} R_i^\gamma \quad (11)$$

On peut remarquer que l'on peut écrire la relation (11) comme la relation (4'), c'est-à-dire en fonction de Z .

$I_2(r, R)$ représente l'intégrale du taux de précipitation déduite de l'atténuation différentielle A_{DP} , $k_H - k_V$ étant supposé connu avec précision.

Comme elle résulte d'une mesure différentielle, A_{DP} ne dépend pas de la calibration du radar.

Cela étant, dans l'estimation de I_1 et I_2 , seuls les paramètres α et β sont variables en raison de la variabilité naturelle de la DSD dans la pluie et des erreurs de calibration.

Dans le procédé selon l'invention, il est proposé de maintenir β à une valeur constante, égale à une valeur moyenne climatologique qui correspond à la longueur d'onde et au type de chute de pluie observé, et d'ajuster le paramètre α en utilisant l'atténuation différentielle A_{DP} .

10 Cette hypothèse sur β a été confirmée par de nombreuses mesures disponibles dans la littérature.

Le principe est donc de déterminer I_1 à partir de la série de mesures sur une seule des polarisations en choisissant une valeur arbitraire intermédiaire de α , d'estimer I_2 à partir des mesures différentielles du radar et d'un calcul utilisant I_1 pour estimer le facteur de réflectivité différentielle non atténué et de comparer I_1 et I_2 pour modifier éventuellement α jusqu'à ce que $I_1 = I_2$, ce qui permet alors d'extraire les estimations corrigées des coefficients de réflectivité non atténués $Z_i(r)$ et des taux de précipitation $R_i(r)$.

20 Un dispositif de traitement numérique permettant de mettre en oeuvre ce procédé est représenté sur la figure 2. La partie gauche de la figure concerne le traitement d'une seule polarisation, la polarisation H, cependant que la partie droite est relative au traitement différentiel.

Les signaux logarithmiques fournis par le codeur 19 de la voie H 25 sont retraduits en signaux linéaires $Z_{Ha}(r)$ dans l'étape 30. Ces signaux sont moyennés sur N impulsions du radar (étape 31) puis on calcul le taux de précipitation estimé \bar{R}_a à partir de paramètres α et β prédéterminés, arbitrairement pour α , selon la relation (5) (étape 32), ceci pour chaque porte en distance i.

30 L'étape 33 consiste à calculer les coefficients d'atténuation \bar{a}_i à partir de la relation (2).

On en déduit alors la valeur estimée $\bar{I}_1(r, R)$ selon les relations (2) et (4) (étape 34).

Par ailleurs, par les étapes 36 et 37, on calcule le facteur de 35 réflectivité atténué $\bar{Z}_{Ha}(r)$ déduit de la série de mesures sur la seule

polarisation H et, par l'étape 35, on estime le terme d'atténuation \bar{A}_H de la relation (3). En appliquant cette relation (3) par l'étape 38 consistant en une sommation, on obtient un estimé $Z_{Hs}(r)$ du coefficient de réflectivité non atténué pour la polarisation H puis, par l'étape 47, un estimé du taux de précipitation corrigé $\bar{R}_s(r)$ en appliquant la relation (5) avec les paramètres α et β déjà choisis.

A partir de cette valeur estimée, on peut calculer par l'étape 48 une valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué $Z_{DRs}(r)$ selon la relation (9).

D'autre part, en partant des signaux codés des voies H et V fournis par 30 et 40, on effectue (étape 41) le rapport $Z_{Ho}(r)/Z_{Vo}(r)$ qui donne la mesure radar polarimétrique atténuee $Z_{DRa}(r)$ moyennée ensuite sur N impulsions dans l'étape 42. La différence (étape 43) entre cette valeur moyennée et la valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué fournie par 48 constitue l'estimation de l'atténuation polarimétrique différentielle $\bar{A}_{DP}(r)$. L'étape 44 fournit à partir des valeurs Δr et $k_H - k_V$ la valeur estimée de $\bar{I}_2(r, R)$ selon la relation (10). Dans l'étape 45, on compare alors \bar{I}_1 et \bar{I}_2 .

Si $\bar{I}_1 \neq \bar{I}_2$, alors l'étape 46 consiste à modifier le paramètre α d'un incrément $\Delta\alpha$ dans le sens convenable et à appliquer la nouvelle valeur α' aux étapes 32 et 47 pour recommencer les calculs. On renouvelle ces opérations jusqu'à ce que l'on obtienne $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$, ce qui correspond à la bonne valeur donnée à α . On peut alors (étape 49) extraire les valeurs corrigées du facteur de réflectivité non atténué $Z_i(r) = \bar{Z}_{Hs}(r)$ et du taux de précipitation $R_i(r) = \bar{R}_s(r)$.

Dans l'exposé du principe du procédé selon l'invention, on a supposé pour la relation (9) que Z_{DRs} , de même que k_H et k_V pour la relation (10), étaient calculés pour la seule DSD supposée. Ceci est acceptable car, pour des conditions climatiques données, les DSD moyennées ont des paramètres stables. On peut donc choisir une DSD particulière à partir de considérations climatologiques.

D'autre part, il est préférable de choisir des portes en distance à la distance r où le facteur de réflectivité est faible car alors Z_{DRs} est faible et l'erreur d'estimation selon la relation (9) est, elle aussi, faible. Ce choix d'une porte particulière est d'autant plus justifié et facilité qu'on peut

remplacer une porte à la distance r par une autre autour de r avec des facteurs de réflectivité différents sans que les valeurs I_1 , I_2 et α soient modifiées de façon significative.

On peut d'ailleurs calculer α à partir de deux ou trois portes 5 contiguës et utiliser la moyenne pour réduire les effets de dispersion de la DSD.

On peut aussi remarquer qu'on peut subdiviser une direction radiale observée en plusieurs segments auxquels le procédé selon l'invention peut être appliqué successivement.

10 Le procédé décrit ci-dessus est très peu sensible aux erreurs d'échantillonnage aléatoires sur le coefficient de réflectivité mesuré par le radar sur une polarisation ou sur les valeurs différentielles.

Un des principaux avantages du procédé selon l'invention a déjà été mentionné : il s'agit de son indépendance vis à vis de la calibration du 15 radar et de l'atténuation due à des nuages non détectés.

On peut ajouter qu'une autre utilisation possible est la détection qualitative de la grêle. En effet quand de la grêle est présente dans une cellule de pluie, comme les grains de grêle ont une forme presque sphérique, ils produisent un facteur de réflectivité élevé pour les deux 20 polarisations avec $Z_H \approx Z_V$ et donc un facteur de réflectivité différentielle sensiblement nul. Par contre, on a une forte atténuation indépendante de la polarisation d'où une contribution nulle à l'atténuation différentielle A_{DP} . Ainsi la présence de grêle modifie I_1 mais pas de manière correspondante I_2 , contrairement au cas d'une pluie homogène. On constate alors une 25 modification notable de α qui peut être utilisée comme indicateur de grêle.

Il faut également remarquer que, si la description ci-dessus a été faite dans le cadre de l'utilisation de l'atténuation polarimétrique différentielle A_{DP} , on pourrait aussi faire fonctionner le procédé selon l'invention sur le déphasage différentiel $K_{DP} = K_H - K_V$ exprimé en degré.km de propagation.

30 Bien entendu, les exemples décrits ne sont nullement limitatifs de l'invention. En particulier, le radar météorologique décrit pourrait utiliser une seule voie de réception au lieu des deux voies décrites, les signaux des deux polarisations étant commutés en entrée pour utiliser la voie en partage dans le temps et "décommutés" en sortie. Le rythme de commutation doit

simplement être choisi pour que les signaux reçus sur les polarisations *H et V* ne soient pas décorrélés pendant la durée de la commutation.

D'autre part, peut remarquer que les signaux *I et Q* disponibles sur les sorties des voies Doppler permettent de calculer l'amplitude de 5 signal $\sqrt{I^2 + Q^2}$ dans chacune des voies *H et V*, amplitude qui pourrait être utilisée à la place des signaux issus des codeurs 19 et 20 pour éviter l'utilisation des voies 17, 19 et 18, 20. L'inconvénient serait cependant de ne pas disposer de la dynamique résultant de l'emploi d'amplificateurs logarithmiques.

10 Enfin, dans le dispositif de traitement selon l'invention de la figure 2, on pourrait penser à continuer à utiliser les signaux logarithmiques au lieu de repasser en signaux linéaires.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination du taux de précipitation et du facteur de réflectivité d'un hydrométéore par radar à impulsions à longueur d'onde atténuée par ledit hydrométéore, ledit radar étant un radar à double polarisation fournissant une double série de mesures du facteur de réflectivité atténué ($Z_{H_a}(r), Z_{V_a}(r)$) pour les différentes portes en distance selon chacune des polarisations, procédé dans lequel on estime le taux de précipitation (R) à partir du facteur de réflectivité pour une polarisation (Z_H) et du facteur de réflectivité différentielle non atténue (Z_{DR}), le ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

A) déterminer, dans chaque porte en distance du radar, une première estimation du taux de précipitation (R_s) à partir du facteur de réflectivité mesuré pour une seule polarisation par une combinaison des relations liant le facteur de réflectivité Z au taux de précipitation R , de la forme $Z = \alpha R^\beta$ où α et β sont des paramètres, et le coefficient d'atténuation sur une seule polarisation au taux de précipitation ;

B) obtenir à partir de ladite première estimation du taux de précipitation une valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténue (Z_{DRs}) ;

C) déduire de ladite valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténue (Z_{DRs}) et de la mesure radar du facteur de réflectivité différentielle atténue (Z_{DRa}) une valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}) ; et

D) chercher à obtenir l'égalité entre l'intégrale ($I_1(r, R)$) du taux de précipitation estimé dans l'étape A sur une seule polarisation du radar et l'intégrale ($I_2(r, R)$) du taux de précipitation déduite de ladite atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}), par ajustement itératif d'un des paramètres (α) de la relation liant le facteur de réflectivité au taux de précipitation tandis que l'autre paramètre (β) est maintenu à une valeur pré-déterminée constante, de manière à pouvoir extraire les valeurs corrigées du facteur de réflectivité non atténue ($Z_{Hs}(r)$) et du taux de précipitation ($R_s(r)$).

REVENDICATIONS

- ~~1. Procédé de détermination du taux de précipitation et du facteur de réflectivité d'un hydrométéore par radar à impulsions à longueur d'onde atténuée par ledit hydrométéore, ledit radar étant un radar à double polarisation fournissant une double série de mesures du facteur de réflectivité atténué ($Z_{H_a}(r), Z_{V_a}(r)$) pour les différentes portes en distance selon chacune des polarisations, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :~~
- ~~10 A) déterminer, dans chaque porte en distance du radar, une première estimation du taux de précipitation (R_s) à partir du facteur de réflectivité mesuré pour une seule polarisation par une combinaison des relations liant le facteur de réflectivité au taux de précipitation et le coefficient d'atténuation sur une seule polarisation au taux de précipitation ;~~
- ~~15 B) obtenir à partir de ladite première estimation du taux de précipitation une valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué (Z_{DR_s}) ;~~
- ~~20 C) déduire de ladite valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué (Z_{DR_s}) et de la mesure radar du facteur de réflectivité différentielle atténué (Z_{DR_a}) une valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}) ; et~~
- ~~25 D) chercher à obtenir l'égalité entre l'intégrale ($I_1(r, R)$) du taux de précipitation estimé dans l'étape A sur une seule polarisation du radar et l'intégrale ($I_2(r, R)$) du taux de précipitation déduite de ladite atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}), par ajustement itératif d'un des paramètres (α, β) de la relation liant le facteur de réflectivité au taux de précipitation, de manière à pouvoir extraire les valeurs corrigées du facteur de réflectivité non atténué ($Z_{H_s}(r)$) et du taux de précipitation ($R_s(r)$) .~~
- ~~30 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'étape A) comprend les étapes suivantes :~~
- ~~a) calculer sur une première desdites séries de mesures ($Z_{H_a}(r)$) des valeurs estimées du taux de précipitation (R) pour les différentes portes en distance (1 à n-1) à partir de paramètres (α, β) fixés arbitrairement ;~~

- b) déduire desdites valeurs estimées du taux de précipitation (R_s) une première valeur estimée ($I_1(r, R)$) caractéristique de l'atténuation due aux précipitations, ladite première valeur estimée étant l'intégrale du taux de précipitation estimé sur une seule polarisation ;
- 5 c) déterminer à partir de ladite première valeur estimée ($I_1(r, R)$) et de la première série de mesures ($Z_{H_a}(r)$) une valeur estimée du facteur de réflectivité non atténué ($Z_{H_s}(r)$) et du taux de précipitation corrigé (R_s).

10 3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que ladite étape B) comprend l'étape suivante :

d) calculer, à partir de ladite valeur estimée du taux de précipitation corrigé (R_s) et d'une distribution donnée des gouttes (DSD), une valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué ($Z_{DR_s}(r)$).

15 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ladite étape C) comprend les étapes suivantes :

e) calculer, à partir de ladite double série de mesures du facteur de réflectivité atténué ($Z_{H_a}(r), Z_{V_a}(r)$), la mesure du facteur de réflectivité différentielle atténué ($Z_{DR_a}(r)$) ;

20 f) déduire de la mesure du facteur de réflectivité différentielle atténué ($Z_{DR_a}(r)$) et de la valeur estimée du facteur de réflectivité différentielle non atténué ($Z_{DR_s}(r)$) obtenue lors de l'étape d) une valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}).

25 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite étape D) comprend les étapes suivantes :

g) déduire de ladite valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle (A_{DP}) une seconde valeur estimée ($I_2(r, R)$) caractéristique de l'atténuation due aux précipitations, qui est l'intégrale du taux de précipitation ;

30 h) comparer lesdites première ($I_1(r, R)$) et seconde ($I_2(r, R)$) valeurs estimées caractéristiques de l'atténuation due aux précipitations ;

i) si ladite comparaison selon l'étape h) indique que desdites première et seconde valeurs estimées sont différentes, modifier au moins un 35 desdits paramètres (α, β) de l'étape a) et reprendre les étapes a) à h) ;

j) si ladite comparaison selon l'étape h) indique que lesdites première et seconde valeurs estimées sont égales, extraire lesdites valeurs estimées du facteur de réflectivité non atténué ($Z_{H_a}(r)$) et du taux de précipitation corrigé (R_s).

5

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que l'étape a) consiste à :

- a.1) moyenner lesdites mesures ($Z_{H_a}(r)$) de ladite première série sur N impulsions du radar ;
- 10 a.2) calculer pour chaque porte en distance (i) des valeurs estimées du taux de précipitation (\bar{R}_i) à partir de paramètres (α, β) fixés arbitrairement selon la relation :

$$\bar{R}_i = \left(\frac{\bar{Z}_{H_a}(r)}{\alpha} \right)^{1/\beta}$$

15

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 6, caractérisé en ce que l'étape b) consiste à :

- b.1) calculer à partir des valeurs estimées du taux de précipitation (\bar{R}_i) les coefficients d'atténuation (\bar{a}_i) dans chaque porte en distance selon la relation :

$$\bar{a}_i / k_H = \bar{R}_i^{\gamma_H}$$

où k_H et γ_H sont des paramètres prédéterminés pour une température et une distribution de taille de goutte données ; et

- b.2) déduire de ces coefficients d'atténuation (\bar{a}_i) ladite première valeur estimée ($\bar{I}_1(r, R)$) selon la relation :

$$\bar{I}_1(r, R) = \sum_{i=1}^{n-1} \bar{a}_i / k_H$$

où n est le nombre de portes en distance pour une distance r du radar.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 7, 30 caractérisé en ce que l'étape c) consiste à :

- c.1) calculer, à partir de ladite première valeur estimée ($\bar{I}_1(r, R)$), une valeur d'atténuation \bar{A} telle que :

$$\bar{A} = 2 \Delta r k_H \bar{I}_1(r, R)$$

où Δr est la largeur d'une porte en distance ;

- c.2) moyenner lesdites mesures ($Z_{H_a}(r)$) de ladite première série sur N impulsions du radar ;
- 5 c.3) faire la somme de ladite atténuation \bar{A} et de la valeur moyennée du facteur de réflectivité atténué $\bar{Z}_{H_a}(r)$ pour obtenir une valeur estimée $\bar{Z}_{H_s}(r)$ du facteur de réflectivité non atténué ; et
- c.4) calculer une valeur estimée \bar{R}_s du taux de précipitation corrigé selon la relation :

$$\bar{R}_s = \left(\frac{\bar{Z}_{H_s}(r)}{\alpha} \right)^{1/\beta}$$

10 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 8, caractérisé en ce que l'étape e) consiste à :

- e.1) faire le rapport des mesures des séries de ladite double série ($Z_{H_a}(r), Z_{V_a}(r)$), pour obtenir les valeurs du facteur de réflectivité différentielle atténuée ($Z_{DR_a}(r)$) du radar ;
- 15 e.2) moyenner lesdites valeurs du facteur de réflectivité différentielle atténué sur N impulsions du radar.

10 10. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'étape f) consiste à effectuer la différence entre ladite valeur estimée du 20 facteur de réflectivité différentielle non atténué ($\bar{Z}_{DR_s}(r)$) obtenue selon l'étape d) et ladite valeur moyennée du facteur de réflectivité différentielle atténué ($\bar{Z}_{DR_a}(r)$) pour obtenir une valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle ($\bar{A}_{DP}(r)$) sur un trajet radar.

25 11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 10, caractérisé en ce que l'étape g) consiste à calculer, à partir de ladite valeur estimée de l'atténuation polarimétrique différentielle ($\bar{A}_{DP}(r)$), ladite seconde valeur estimée $\bar{I}_2(r, R)$ selon la relation :

$$\bar{I}_2(r, R) = \frac{\bar{A}_{DP}(r)}{\Delta r (k_H - k_V)}$$

30 où k_V est un paramètre prédéterminé de la même manière que k_H pour la seconde série de mesures ($Z_{V_a}(r)$).

12. Radar météorologique à double polarisation fonctionnant à impulsions avec une longueur d'onde atténuée par les hydrométéores, pour la détermination du taux de précipitation et du facteur de réflectivité, ledit radar comportant :

5 - une antenne (1) à double polarisation associée à des moyens (2, 3, 4) pour extraire les modes correspondant à deux voies de polarisation orthogonales \vec{H} et \vec{V} ;

 - un émetteur (5, 6) délivrant des impulsions aux deux voies de ladite antenne ;

10 - au moins une voie de réception (7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 ; 10, 12, 13, 16, 18, 20) pour traiter les signaux issus des deux voies de polarisation orthogonales ;

 ledit radar étant caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de traitement numérique du signal (21) prévu pour mettre en oeuvre le procédé selon l'une 15 quelconque des revendications 1 à 11.

13. Radar selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend à la sortie desdites voies de réception des amplificateurs logarithmiques (17, 18) pour augmenter la gamme dynamique et en ce que 20 ledit dispositif de traitement numérique (21) comporte en entrée des moyens de conversion (30, 36, 40) pour retrouver les valeurs des signaux reçus.

14. Radar selon l'une des revendications 12 ou 13, caractérisé en ce qu'il comprend en outre deux voies de réception Doppler (22 à 24 ; 25 à 25 27) associées respectivement aux sorties des voies de réception des deux polarisations.

15. Radar selon l'une quelconque des revendications 12 à 14, caractérisé en ce qu'il comporte une seule voie de réception associée à des 30 moyens de commutation en entrée et en sortie commandés en synchronisme pour traiter alternativement les deux polarisations, le rythme de commutation étant tel que les signaux reçus selon les deux polarisations ne sont pas décorrélés pendant la durée de la commutation.

1/2

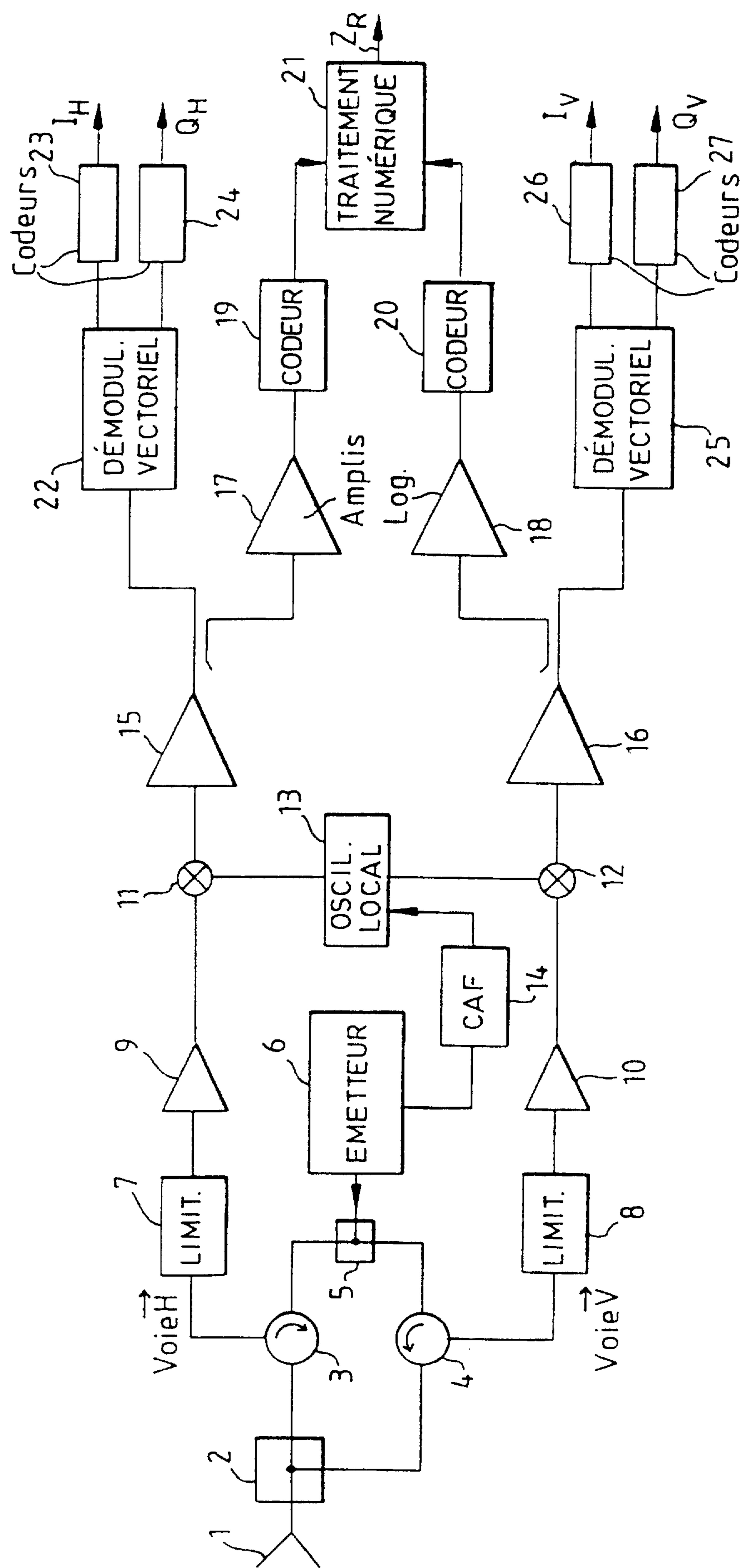


FIG. 1

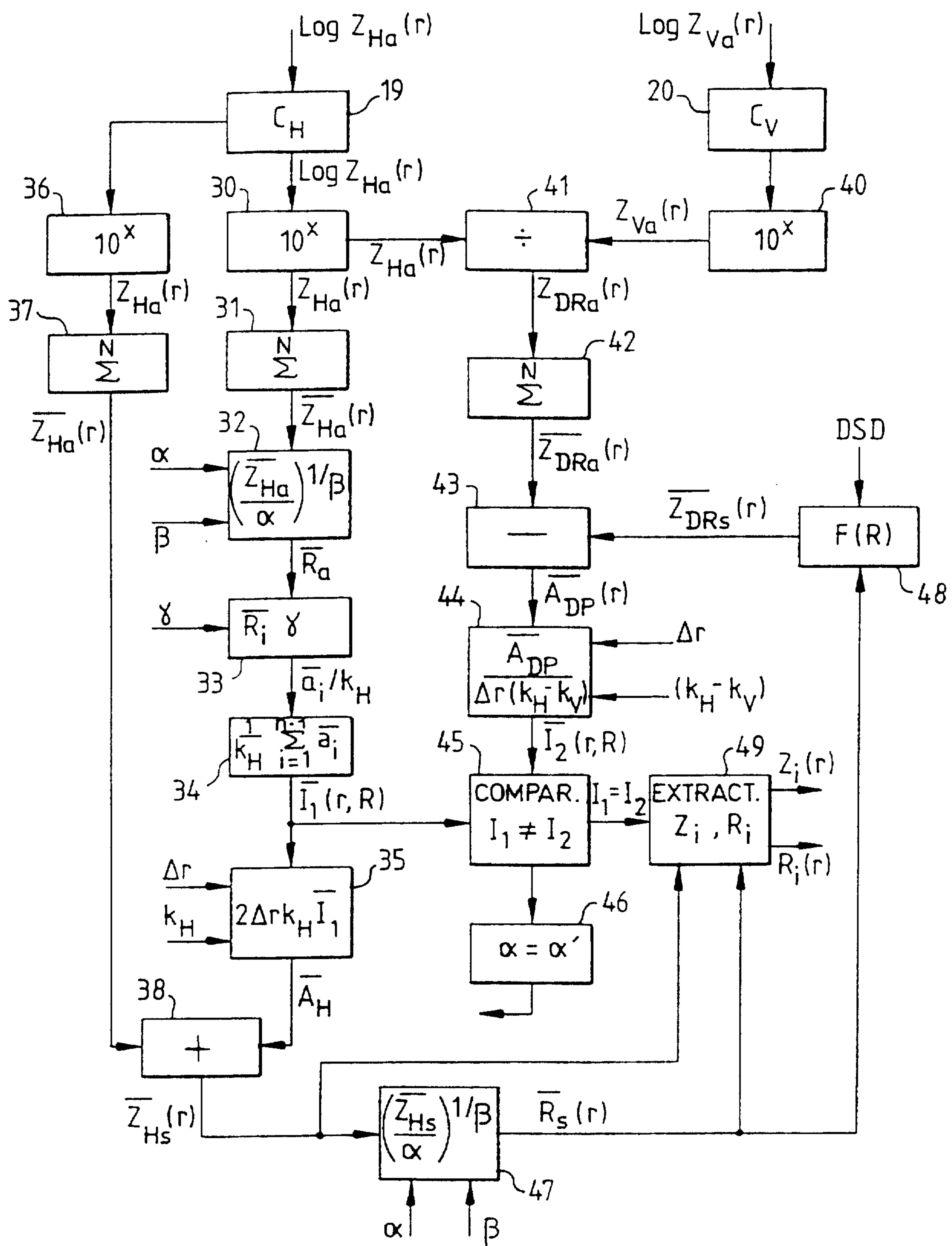


FIG.2

