

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 30.04.08.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 06.11.09 Bulletin 09/45.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : THALES Société anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : PASSELAIGUE DANIEL, VERYERAS ALEXANDRE et AUTRUSSON BERTRAND.

73 Titulaire(s) :

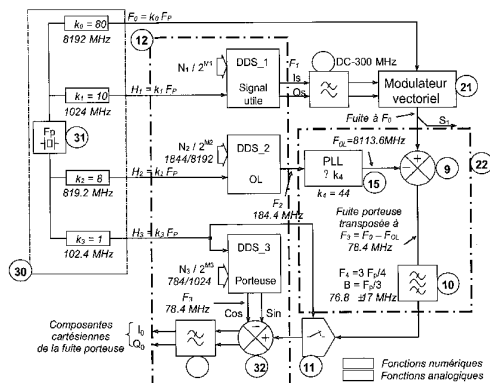
74 Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE.

54 PROCÉDE D'ANNULATION DES IMPERFECTIONS D'UN SIGNAL ANALOGIQUE GÉNÉRÉ PAR UN DISPOSITIF PERMETTANT DE MODULER UN SIGNAL ANALOGIQUE À PARTIR D'UN SIGNAL NUMÉRIQUE DE MODULATION.

57 La présente invention concerne un procédé d'annulation des imperfections d'un signal analogique généré par un dispositif permettant de moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique de modulation. Le dispositif comporte un générateur de forme d'onde et un récepteur de surveillance dans une boucle fermée d'asservissement, le récepteur de surveillance comportant des oscillateurs numériques. Le signal numérique de modulation est asservi sur le signal analogique de manière à annuler des composantes parasites présentes dans le signal analogique.

Le procédé comporte une phase de synchronisation des oscillateurs numériques du récepteur de surveillance. Il comporte également une phase de synchronisation de la phase du générateur de forme d'onde et de la phase du récepteur de surveillance, de sorte à définir une matrice de passage entre un repère de mesure et un repère de modulation. Il comporte également une phase de mesure des composantes spectrales parasites dans le repère de mesure. Il comporte également une phase d'estimation des composantes spectrales parasites dans le repère de modulation.

Application : radars embarqués



Procédé d'annulation des imperfections d'un signal analogique généré par un dispositif permettant de moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique de modulation

La présente invention concerne un procédé d'annulation des imperfections d'un signal analogique généré par un dispositif permettant de moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique de modulation.

5 Elle peut s'appliquer par exemple dans tous les domaines où un signal analogique doit être modulé numériquement, que ce soit en amplitude ou en phase, comme la génération de formes d'onde radar, l'instrumentation de test et de mesure ou encore les télécommunications.

10

Réaliser un générateur de forme d'onde arbitraire large bande, très agile, de résolution très fine et de qualité spectrale comparable à celle d'une source de fréquence fixe n'est pas sans poser de nombreuses difficultés. De manière classique, des formes d'onde peuvent être générées arbitrairement en transposant directement un signal de modulation calculé en bande de base autour d'une porteuse de fréquence fixe au moyen d'un modulateur vectoriel. Mais cette méthode ne permet pas d'obtenir des signaux de grande qualité spectrale, à cause de la non idéalité des composants analogiques qui introduisent des imperfections dans le signal analogique modulé, notamment la fuite porteuse. L'imprécision de la quadrature génère également une raie image parasite et les distorsions dues à l'insuffisance de linéarité génèrent également des raies d'intermode parasites. Il s'agit là de l'un des problèmes techniques que la présente invention se propose de résoudre.

25 Des solutions existantes proposent des dispositifs annexes permettant notamment de compenser en boucle ouverte la fuite porteuse, la raie image et les raies d'intermodes. Mais ces solutions ne permettent pas d'atteindre un niveau de qualité compatible des applications de type radar embarqué, même dans des conditions normales d'utilisation, notamment en raison de leur temps de réponse qui est prohibitif par rapport à l'évolution des

30

perturbations. Il s'agit là encore de l'un des problèmes techniques que la présente invention se propose de résoudre.

Le brevet américain US 6 931 343 B2 propose une solution en boucle fermée pour compenser la fuite porteuse et annuler la raie image.

5 Cette solution sera explicitée plus en détails par la suite. Mais elle ne permet notamment pas de compenser les raies d'intermode, sauf à limiter la puissance de modulation applicable. Il s'agit là encore de l'un des problèmes techniques que la présente invention se propose de résoudre.

10

L'invention a notamment pour but de pallier les inconvénients précités. A cet effet, l'invention a pour objet un procédé d'annulation des imperfections d'un signal analogique généré par un dispositif permettant de moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique de modulation.

15 Le dispositif comporte un générateur de forme d'onde et un récepteur de surveillance dans une boucle fermée d'asservissement, le récepteur de surveillance comportant des oscillateurs numériques. Le signal numérique de modulation est asservi sur le signal analogique de manière à annuler des composantes parasites présentes dans le signal analogique. Le procédé

20 comporte une phase de synchronisation des oscillateurs numériques du récepteur de surveillance. Il comporte également une phase de synchronisation de la phase du générateur de forme d'onde et de la phase du récepteur de surveillance, de sorte à définir une matrice de passage entre un repère de mesure et un repère de modulation. Il comporte également une

25 phase de mesure des composantes spectrales parasites dans le repère de mesure. Il comporte également une phase d'estimation des composantes spectrales parasites dans le repère de modulation.

Avantageusement, la phase de mesure des composantes spectrales parasites peut utiliser des filtres capables de discriminer les

30 différentes composantes spectrales dans le signal analogique modulé, sans interférer avec les raies parasites générées par le dispositif utilisé pour réaliser la mesure.

Dans un mode de réalisation, les filtres mis en œuvre peuvent combiner un plan de fréquences à des filtres à moyenne glissante, les filtres

35 à moyenne glissante étant optimaux en bruit et ayant leurs zéros de

transmission distribués de manière régulière dans le plan de fréquences, de sorte que les composantes parasites peuvent être placées sur les zéros de puissance.

Par exemple, les composantes parasites peuvent inclure une fuite
5 porteuse et/ou une raie image et/ou des raies d'intermode d'ordre 2 et/ou des raies d'intermode d'ordre 3.

L'invention a encore pour principaux avantages qu'elle permet de
10 réduire de plusieurs ordres de grandeur les amplitudes de la fuite porteuse, de la raie image et des principales raies créées par les non-linéarités d'un modulateur vectoriel. Elle permet ainsi la synthèse directe en radio-
fréquences de fréquences agiles très pures ou de signaux arbitraires très précis. Elle est notamment adaptée aux applications de type radar
15 embarqué.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront
à l'aide de la description qui suit faite en regard des figures 1 à 24 annexées.
20

La figure 1 illustre par un synoptique un exemple d'architecture
matérielle implémentant un générateur de signaux arbitraires, selon une
demande déposée antérieurement en France par la demanderesse sous le
25 numéro 0801578. Les signaux arbitraires sont calculés en bande de base
puis transposés directement sur une porteuse hyperfréquence par un
modulateur vectoriel large bande. Ce type de générateur peut
avantageusement être utilisé dans des applications de type radars
embarqués. Il permet de moduler, avec une grande pureté spectrale, un
30 signal analogique dans une large bande de fréquence à partir d'un signal
numérique de modulation. En effet, il comporte des moyens pour surveiller et
corriger en boucle fermée les imperfections de modulation, garantissant la
qualité du signal généré même dans un environnement embarqué perturbé
par des variations de températures rapides ou par des vibrations

microphoniques, pour lesquelles les méthodes de compensation en boucle ouverte ne donnent pas satisfaction.

Le générateur comporte un synthétiseur 20 de signaux en bande de base formé par une interface de commande 1, un générateur de forme d'onde 2, un convertisseur polaire cartésien 3, un correcteur de distorsion 4, un convertisseur numérique-analogique (CNA) vidéo en phase 5, un CNA vidéo en quadrature 6, un CNA fréquence intermédiaire 11, une unité 12 de traitement du signal, un convertisseur polaire cartésien 13 et un CAN fréquence intermédiaire 14. Le synthétiseur 20 fournit deux signaux analogiques I et Q en quadrature à un modulateur vectoriel 21 formé par un modulateur vectoriel radio-fréquence (RF) 7 et des circuits de couplage 8. Le modulateur vectoriel 21 fournit en sortie un signal radiofréquence RF_OUT, en faisant une transposition vectorielle de fréquence autour d'une fréquence porteuse F_0 fournie par un signal radiofréquence RF_IN. Le signal RF_OUT est également transmis à un récepteur de surveillance 22, formé par un mélangeur descendant 9, un filtre anti-repliement 10 et un multiplicateur de fréquence 15 de type boucle à verrouillage de phase, couramment désignée par l'acronyme anglo-saxon « PLL » signifiant « Phase-Locked Loop ». Le récepteur 22 permet de mesurer le signal RF_OUT contenant les imperfections introduites par le modulateur vectoriel 21, à savoir notamment une fuite porteuse, une raie image et des raies d'intermode. Le récepteur 22 transmet la mesure à l'unité de traitement 12 via le CAN 11. Recevant également en entrée la modulation numérique théorique fournie par l'interface 1, l'unité 12 de traitement du signal peut corriger les imperfections dans RF_OUT, en implémentant des procédés de traitement du signal appropriés. Le procédé selon la présente invention peut par exemple être mis en œuvre dans l'unité de traitement 12 pour corriger en boucle fermée les imperfections introduites dans le signal RF_OUT par le modulateur vectoriel 21.

30

La figure 2 illustre par un diagramme de spectre et par un diagramme cartésien les imperfections introduites dans le signal RF_OUT par le modulateur vectoriel 21. Le diagramme de spectre illustre la répartition spectrale de la composante utile et des composantes parasites dans le

35

signal RF_OUT. Le signal RF_OUT contient une composante utile se situant à une fréquence $F_0 + F_m$ où F_0 est la fréquence porteuse d'oscillation fournie par le signal RF_IN et F_m est une fréquence de modulation. Le signal RF_OUT contient également une fuite porteuse se situant à la fréquence F_0 .

- 5 Le signal RF_OUT contient également une raie image se situant à une fréquence $F_0 - F_m$. Le signal RF_OUT contient également des raies d'intermode de rang 2, plus connues sous la désignation anglo-saxonne de « lower second-order intermodulation distortion » (IMD2L) et « upper second-order intermodulation distortion » (IMD2U), se situant respectivement à des
- 10 fréquences $F_0 - 2F_m$ et $F_0 + 2F_m$. Le signal RF_OUT contient également des raies d'intermode de rang 3, plus connues sous la désignation anglo-saxonne de « lower third-order intermodulation distortion » (IMD3L) et « upper third-order intermodulation distortion » (IMD3U), se situant respectivement à des fréquences $F_0 - 3F_m$ et $F_0 + 3F_m$.

- 15 Les mêmes composantes parasites se retrouvent en sortie de tous les dispositifs de l'art antérieur utilisant un modulateur vectoriel pour moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique. Pour compenser ces imperfections, l'art antérieur ne propose quasiment que des solutions classiques de compensation en boucle ouverte, difficilement transposables
- 20 telles qu'elles au dispositif en boucle fermée de la figure 1. Dans ces solutions classiques en boucle ouverte, la fuite porteuse est compensée en ajoutant sur les entrées de modulation I et Q des tensions de polarisation qui génèrent un signal cohérent de la fuite, ces tensions étant ajustées jusqu'à obtenir l'annulation de la somme vectorielle de la fuite et du signal contrôlé.
- 25 Dans ces solutions classiques en boucle ouverte, la raie image est compensée en exprimant la modulation dans un repère orthonormé parfait dans le repère physique de base (I, Q) du modulateur 21, comme illustré par le diagramme cartésien. Ainsi, la contribution de la raie image apparaît clairement sous la forme d'un décalage entre une trajectoire idéale définie
- 30 par I et Q et une trajectoire réelle correspondant au signal RF_OUT mesuré en sortie du modulateur vectoriel 21. L'amplitude relative de la raie image est reliée à l'erreur d'amplitude et de phase par la formule suivante :

$$A_{dBc} \approx 10 \log_{10} \left\{ \Delta A_{dB}^2 + \left(\frac{\Delta \phi_{deg}}{6.6} \right)^2 \right\} - 24.8_{dB}$$

où ΔA_{dB} est l'erreur de gain en décibels (dB) et $\Delta \phi_{deg}$ est l'erreur de phase en degrés. Contrôler la phase et le gain afin de compenser la variation en température, les effets microphoniques et la non-idéalité du modulateur 21 nécessite donc beaucoup de précision et synthétiser une modulation avec une qualité d'annulation de fuite porteuse et de raie image de l'ordre de 75 dBc dans une bande instantanée de 800 mégahertz (MHz) est un défi très difficile. En effet, une amplitude relative de la raie image par rapport au signal utile de -80 dBc correspond à un déséquilibre conjoint de 0.0012 dB en gain et de 0.008 degrés en phase. Par rapport à ce besoin, les tolérances des meilleurs circuits MMIC (« Microwave Monolithic Integrated Circuits ») sont typiquement de 0.1 dB et de 1 degré. Elles se traduisent par une dynamique sans parasites d'à peine 40 dBc ! Dans ces solutions classiques en boucle ouverte, les raies d'intermode d'ordre 2 et 3 ne sont pas compensées, alors que celles-ci génèrent des harmoniques qui se traduisent par la présence de raies parasites non négligeables. C'est pourquoi dans la pratique, pour obtenir la dynamique voulue sans introduire de parasites, il est courant de limiter la puissance de modulation applicable. Mais le bruit plancher est alors pénalisé. Il s'agit là encore de l'une des problèmes techniques que la présente invention se propose de résoudre.

Les solutions classiques en boucle ouverte ne permettent donc pas d'atteindre un niveau de qualité compatible des applications de type radar embarqué, même dans des conditions normales d'utilisation. Ceci est également dû au temps de réponse des solutions en boucle ouverte, qui est prohibitif par rapport à l'évolution des perturbations. En effet, les objectifs de performance exigés par ces applications sont de deux ordres de grandeur plus sévères que les possibilités des circuits analogiques. Et plus la tolérance est étroite, plus il faut rafraîchir fréquemment les paramètres de compensation avant que les perturbations ne les fassent trop évoluer. Il faut donc travailler directement sur le signal utile, puisqu'il n'est plus possible à ce niveau de précision de procéder uniquement en boucle ouverte. Le niveau de performance visé impose d'intégrer le dispositif de mesure *in situ*, en boucle fermée, le modulateur 21 ne pouvant plus être dissocié de son circuit de commande ni de sa charge sans modifier les caractéristiques de la fuite et de la distorsion du fait des différences d'impédance, des faux zéros et des

couplages involontaires. Une propriété remarquable de la modulation vectorielle est que toutes les distorsions présentes en sortie du modulateur 21 peuvent être corrigées en amont en utilisant les signaux de commande appropriés, dans une limite qui ne dépend que de la résolution de ces
5 commandes et de la « durée de vie » de la correction.

La figure 3 illustre par un synoptique une solution de compensation en boucle fermée connue dans l'art antérieur, telle que décrite
10 dans le brevet américain US 6 931 343 B2. Ce brevet divulgue un générateur de forme d'onde utilisant un mélangeur à bande latérale unique 40 pour générer une modulation RF_OUT', qui sera appelé « mélangeur BLU 40 » par la suite, à partir d'un signal porteur RF_IN'. Le générateur comporte un mécanisme de correction en boucle fermée, le retour de boucle se faisant
15 directement en sortie du mélangeur BLU 40 par l'intermédiaire d'un analyseur de spectre 42, d'un calculateur 43 et de deux CNA 44 et 45. Il s'agit de comparer l'amplitude instantanée du signal réel RF_OUT' avec ce qu'elle aurait dû être en des points particuliers de la constellation dans le plan cartésien associé au signal complexe, ceci afin d'estimer des
20 paramètres de compensation à appliquer. Mais cette solution est essentiellement applicable à des applications de synthèse de signaux de télécommunication, elle est beaucoup moins adaptée à des applications de modulation de signaux radar.

En effet, les traitements qu'elle propose pour corriger la
25 modulation sont fortement liés au dispositif de mesure mis en œuvre. D'une part, un voltmètre vectoriel 41 donne le gain et la phase du signal en sortie du modulateur par rapport au signal incident. On peut à partir de ces mesures déterminer par analyse spectrale les composantes indésirables, la modulation étant simulée par une suite de tensions appliquées point par
30 point sur les accès I et Q du mélangeur BLU 40 par un convertisseur polaire-cartésien 46. Mais cette méthode ne prend pas en compte les erreurs dynamiques, ce qui limite beaucoup son intérêt. D'autre part, l'analyseur de spectre 42 permet de mesurer l'amplitude des composantes indésirables dans une grande dynamique. L'annulation de la fuite porteuse et de la raie
35 image peut être obtenue en modifiant itérativement les tensions de décalage

I et Q et les corrections de quadrature jusqu'à extinction satisfaisante. Le brevet américain US 6 931 343 B2 divulgue d'utiliser un détecteur d'enveloppe comme l'analyseur 40 pour réaliser la fonction de surveillance. En effet, la détection logarithmique de l'enveloppe du signal modulé est le
 5 moyen de mesure le plus économique, puisqu'il n'y a pas d'oscillateur local à générer. Cependant, pour une bande d'agilité de plus de 200 MHz, cet avantage est moins évident car il est difficile d'analyser une bande vidéo large bande avec une bonne dynamique. Finalement, le générateur divulgué dans le brevet américain US 6 931 343 B2 permet seulement de corriger de
 10 façon préférentielle les défauts du mélangeur les plus gênants, à savoir la fuite porteuse et la raie image, ceci avec une faible dynamique et sur une bande de modulation étroite. Notamment, il ne permet pas de compenser les raies d'intermode. Il s'agit là encore de l'un des problèmes techniques que la présente invention se propose de résoudre.

15

La figure 4 illustre par un synoptique un exemple d'architecture pouvant être mise en oeuvre dans l'unité 12 de traitement du signal pour compenser, selon la présente invention, les imperfections introduites dans le
 20 signal RF_OUT par le modulateur vectoriel 21. Cet exemple illustre le principe de la démodulation vectorielle pour un synthétiseur agile dans une bande instantanée utile de 600 MHz centrée sur une porteuse hyperfréquence de 8192 MHz. Un module 30 de génération de fréquences comporte un pilote à quartz 31 générant une fréquence pilote de référence F_p
 25 à partir de laquelle sont générées les fréquences fixes nécessaires aux différents blocs analogiques et numériques. La porteuse hyperfréquence F_0 en entrée du modulateur vectoriel 21 est choisie telle que $F_0 = k_0 F_p$ où k_0 est un entier tel que F_0 est une puissance de 2 en mégahertz, ceci afin de simplifier les valeurs numériques exprimées en notation décimale. Dans le
 30 présent exemple, $F_0 = 8192$ MHz. Un signal d'horloge $H_1 = k_1 F_p$, où k_1 est un entier, est fourni en entrée d'un module de synthèse numérique directe DDS_1 (« Direct Digital Synthesis ») permettant de générer le signal utile de composantes cartésiennes I_s et Q_s à une fréquence F_1 , fourni en entrée d'un synthétiseur d'étalonnage 16. Un signal d'horloge $H_2 = k_2 F_p$, où k_2 est un
 35 entier, est fourni en entrée d'un module de synthèse numérique directe

DDS_2 permettant de générer l'oscillateur local (OL) de transposition en fréquence intermédiaire de la boucle de retour. Un signal d'horloge $H_3 = k_3 F_P$, où k_3 est un entier, est fourni en entrée d'un module de synthèse numérique directe DDS_3 permettant de générer l'oscillateur de démodulation numérique en bande de base et d'échantillonnage du CAN 11 de mesure.

Toutes ces fréquences peuvent être élaborées de diverses manières, de préférence par division de fréquence ou multiplication indirecte de fréquence, de manière à optimiser le bruit de phase. L'important est qu'elles soient liées entre elles par des rapports de la forme p/q avec p et q entiers, pour permettre une démodulation cohérente sans glissement de phase. Le récepteur de surveillance 22 comporte la PLL 15, le mélangeur 9 qui est équilibré et le filtre anti-repliement 10. Le récepteur 22 permet de générer une fréquence locale d'oscillation F_{OL} , en multipliant dans la PLL 15 un signal à la fréquence F_2 fourni en sortie du module DDS_2 par un entier k_4 . Le convertisseur analogique numérique 11 a une résolution typique de l'ordre de 14 à 16 bits. Un démodulateur numérique en quadrature 32 est piloté par un signal à la fréquence F_3 généré à la sortie du module DDS_3. Il faut comprendre que l'exemple d'architecture de base illustré par la figure 4 peut se décliner suivant diverses variantes sans déroger aux principes de la présente invention.

Cependant, les variantes d'implémentation de la présente invention ont des caractéristiques en commun. Première caractéristique en commun, celle de permettre une mesure vectorielle précise de la composante spectrale utile et des composantes spectrales parasites, ceci en vue de permettre la compensation des composantes spectrales parasites. Ceci implique de maintenir pendant toute la durée d'utilisation la cohérence de phase entre le récepteur de surveillance 22 et le générateur de forme d'onde 2, afin de déterminer une fois pour toutes la matrice de passage entre le repère de mesure et le repère de modulation, c'est-à-dire les valeurs I et Q estimées de la fuite porteuse. La matrice de passage est étalonnée au départ par application d'un décalage arbitraire sur la composante I puis sur la composante Q . Les oscillateurs numériques qui constituent le dispositif de surveillance, à savoir le module DDS_2 qui génère la fréquence auxiliaire d'étalonnage et le module DDS_3 qui génère l'oscillateur numérique de démodulation du récepteur, sont coordonnés de manière à conserver le

repère de référence ainsi défini. Pour modifier leur fréquence sans perdre la mémoire de phase, plusieurs intégrateurs de phase combinés entre eux sont utilisés. Un exemple plus détaillé est explicité par la suite. La compensation peut avoir lieu pendant une séquence d'étalonnage ou en cours d'utilisation
 5 pour maintenir les performances. Par exemple, la bande passante du synthétiseur 20 peut être étendue au-delà des possibilités de la génération en bande de base, en commutant F_0 sur un peigne de fréquences fixes. Un ensemble de codeurs entrelacés peuvent également se substituer au modulateur vectoriel 21. Plusieurs synthétiseurs dont les bandes sont
 10 décalées en fréquence peuvent aussi être combinés.

Par ailleurs, les variantes d'implémentation de la présente invention ont également en commun de mettre en œuvre des filtres particuliers, capables de discriminer les différentes composantes spectrales entre elles sans interférer avec les raies parasites générées par le système
 15 de mesure lui-même, qui a ses propres défauts. Ceci est réalisé en combinant un plan de fréquences particulier à des filtres à moyenne glissante. Ces filtres ont la propriété d'être optimaux en bruit et en même temps de disposer de zéros de transmissions régulièrement distribués, sur lesquels les composantes indésirables peuvent être placées judicieusement.
 20 Un exemple de réalisation est explicité ci-dessous en détails.

Annulation de la fuite porteuse

25 *Choix des fréquences*

Les fréquences H_2 et F_2 sont déterminées par les rangs de multiplication k_2 et k_3 . La fréquence F_2 est choisie proche de $9/40 \times H_2$ pour se placer dans un domaine dégagé des parasites de synthèse les plus forts,
 30 c'est-à-dire entre $H_2/4$ et $H_2/5$. La fréquence F_3 associée à la fuite porteuse est choisie au voisinage d'un multiple impair de $F_p/4$.

Comme illustré par la figure 5, la bande utile du récepteur
 35 numérique est possible dans différentes fenêtres ambiguës appelées

« alias ». Le coefficient p définit l'« alias » dans lequel nous choisissons la fréquence intermédiaire. Ceci se traduit par les relations :

$$\begin{cases} F_0 = k_0 F_p \\ F_{OL} \cong \frac{9 k_2 k_4}{40} F_p \end{cases} \quad F_3 = F_0 - F_{OL} \cong (2p+1) \frac{F_p}{4} \Leftrightarrow k_2 k_4 \cong \frac{40 k_0 - 10 \times (2p+1)}{9}$$

5

Dans l'exemple choisi, $k_0 = 80$, cette condition s'écrit donc :

$$k_2 k_4 \cong \frac{3200 - 10 \times (2p+1)}{9}$$

- 10 Parmi les combinaisons (k_2, k_4) possibles, les rangs pairs sont plus intéressants parce que le facteur de forme d'un diviseur de fréquence de rang pair est symétrique et qu'ils sont plus faciles à réaliser aux fréquences élevées. Nous ne testons donc que les valeurs paires de k_2 . Nous restreignons la recherche de solutions à $p = -2$ ou $+1$. Dans les alias $p = 0$ et
- 15 $p = -1$ les harmoniques du signal en fréquence intermédiaire peuvent être dans la bande utile et pour les alias de rang élevé $p > 2$ ou $p < -3$ le bruit plancher provoqué par la gigue de l'horloge d'échantillonnage en présence d'un signal gêneur puissant, se dégrade proportionnellement à la fréquence. Nous limitons la valeur de k_2 à 10 pour des considérations technologiques de
- 20 vitesse. Ceci conduit au tableau des combinaisons intéressantes ci-dessous :

Alias p	k_2	k_4	$k_2 \times k_4$	$k_2 \times k_4$ th	Ecart	Rang
-2	2	179	358	358,89	0,89	4
-2	4	90	360	358,89	1,11	5
-2	6	60	360	358,89	1,11	5
-2	8	45	360	358,89	1,11	5
-2	10	36	360	358,89	1,11	5
1	2	176	352	352,22	0,22	1
1	4	88	352	352,22	0,22	1
1	6	59	354	352,22	1,78	9
1	8	44	352	352,22	0,22	1
1	10	35	350	352,22	2,22	10

Nous retenons finalement le couple de deux valeurs paires $k_2 = 8$, $k_4 = 44$ pour ce synthétiseur. Une fois les rangs k_2 , k_4 et p fixés, il faut déterminer a

posteriori la commande précise du DDS_2 pour placer la fréquence F_3 associée à la fuite porteuse approximativement au centre du filtre anti-repliement 10. Si M_2 est le nombre de bits utilisé par le synthétiseur d'étalonnage 16 et N_2 le code binaire de la fréquence F_2 , nous avons :

5

$$F_0 = k_0 F_p; \quad F_2 = \frac{N_2}{2^{M_2}} \times k_2 F_p; \quad F_{OL} = F_2 \times k_4 F_p; \quad F_3 = F_0 - F_{OL}; \quad F_4 = \frac{2p+1}{4} F_p;$$

$$F_3 \approx F_4 \Rightarrow N_2 = Arr \left\{ \left(k_0 + \frac{2p+1}{4} \right) \times \frac{2^{M_2}}{k_2 k_4} \right\}$$

10 Pour $k_0 = 80, k_2 = 8, k_4 = 44, p = 1$, on trouve la valeur :

$$N_2 = Arrondi \left[\left(80 - \frac{3}{4} \right) \times \frac{8192}{8 \times 44} \right] = 1844$$

Le jeu des fréquences obtenues est donc finalement :

15

$$\begin{array}{llll} H_2 & = 8 \times 102.4 & = 819.2 \text{ MHz} & F_{OL} = 44 \times 184.4 = 8113.6 \text{ MHz} \\ F_2 & = \frac{1844}{8192} \times 819.2 & = 184.4 \text{ MHz} & F_3 = 819.2 - 8113.6 = 76.4 \text{ MHz} \end{array}$$

Synthèse de F_3

20

La fréquence du synthétiseur DDS_3 doit être rigoureusement identique à celle de la fuite porteuse, modulo la fréquence d'échantillonnage, de manière à ce qu'il n'y ait aucun décalage de phase d'une mesure à l'autre. Pour cela, il faut respecter la relation :

25

$$F_3 = \frac{N_3}{2^{M_3}} \times F_p = \left(k_0 - \frac{k_2 k_4 N_2}{2^{M_2}} \right) \times F_p$$

Ce qui ne pose pas de problème particulier lorsque k_2 et k_4 sont entiers, il suffit de consacrer autant de bits à la synthèse de F_3 qu'à celle de F_2 pour obtenir une solution simple. Pour cet exemple nous trouvons :

$$F_3 = \left(\frac{80 \times 8192 - 8 \times 44 \times 1844}{8192} \right) F_p = \frac{49}{64} \times F_p$$

Il est parfois intéressant de choisir des rapports rationnels (p/q) plutôt qu'entiers. Dans ce cas les choses se compliquent car il n'y a pas de solution entière sur une base binaire. On peut heureusement synthétiser une commande de fréquence fractionnaire en ajoutant ou retranchant périodiquement le résidu de phase approprié pour compenser l'avance ou le retard dû à la partie fractionnaire. Par exemple pour synthétiser la fréquence $\frac{23}{30} F_p$ proche de $\frac{49}{64} F_p$ mais fractionnaire en base 2, on écrit la fraction rationnelle sous la forme suivante :

$$\frac{23}{30} = \frac{23 \times 64}{30 \times 64} = \frac{\left(\frac{23 \times 32}{15} \right)}{64} = \frac{\left(49 + \frac{1}{15} \right)}{64}$$

En programmant la valeur $\frac{49}{64}$ et en ajoutant un incrément de phase supplémentaire une fois sur 15 on obtient exactement la fréquence souhaitée, c'est un principe similaire à celui des pré-diviseurs à deux modules ($p / p+1$).

Relation entre vitesse de mesure et dynamique

25

Le principal facteur qui limite la bande passante possible de l'asservissement pour compenser la fuite porteuse et les autres raies parasites dans une dynamique donnée est le rapport signal sur bruit. Plus la dynamique à corriger est importante et plus il faut intégrer longtemps et
30 comme cela impacte directement le retard pur de la boucle de rétroaction, la

bande passante doit être diminuée. Le bilan typique de la chaîne de surveillance est illustré par le tableau suivant :

Hypothèses		Conséquences	
Pmax BLU	-12,0 dBm	Gain optimal	18,5 dB
NF récepteur	12,0 dB	kT	-174,0 dBm
Psat du codeur	+7,5 dBm	bruit RF	-143,5 dBm/Hz
Fech codeur	102,4 MHz	bruit codeur	-144,6 dBm/Hz
S/B min	15,0 dB	bruit global	-141,0 dBm/Hz
SNR du codeur	75,0 dB	Taux de décimation	573 pts
Marge avant saturation	1,0 dB	Bande d'analyse	178,71 kHz
Durée d'intégration	5,6 μ s	Pmin	-73,5 dBm
		Pmax	+6,5 dBm
		Dynamique	80,0 dB

5

La figure 6 illustre l'évolution de la dynamique en décibels en fonction du temps d'intégration. Ce bilan typique montre qu'il faut disposer d'un temps de mesure d'au moins 5,6 microsecondes (μ s) pour pouvoir compenser la fuite dans une dynamique de 80 dB, avec comme hypothèse de travailler avec une marge de 15 dB pour corriger le modulateur sans en dégrader le bruit. On se rend compte aussi que pour réduire le temps d'intégration d'un facteur 10 il faut sacrifier 10 dB sur la dynamique de correction. Il existe donc une sorte de principe d'incertitude qui fixe une limite pratique entre la bande passante des perturbations et la dynamique sans parasites que l'on souhaite obtenir. Il est intéressant d'évaluer aussi la contribution du codeur analogique numérique sur la dynamique que l'on peut corriger, toutes choses égales par ailleurs.

La figure 7 illustre l'évolution de la dynamique en décibels en fonction des performances du codeur en matière de rapport signal sur bruit en décibels, rapport plus connu sous l'acronyme anglo-saxon « SNR » signifiant « Signal-to-Noise Ratio ». Cette courbe, établie ici pour un temps d'intégration de 5,6 μ s, montre que la dynamique plafonne à environ 85 dB pour des codeurs dont les performances de SNR seraient meilleures que 75 dB, performance associée typiquement à des codeurs de 15 ou 16 bits. Il

va de soi que la dynamique sans parasites doit être en rapport avec la durée du signal généré, parce que la sensibilité d'une analyse spectrale est proportionnelle à la durée d'analyse.

5

Dans le cas d'une modulation basse fréquence, comme illustré par l'exemple de la figure 8, lorsque la modulation appliquée est purement sinusoïdale, le spectre RF brut typique en sortie du modulateur 21 comprend :

- 10 • la raie représentative du signal utile à $F_0 + F_1$,
- la fuite porteuse à F_0 ,
- la raie image à $F_0 - F_1$,
- deux raies latérales d'inter modulation d'ordre 2 à $F_0 + 2 F_1$ et $F_0 - 2 F_1$,
- 15 • deux raies latérales d'inter modulation d'ordre 3 à $F_0 + 3 F_1$ et $F_0 - 3 F_1$.

Ce spectre peut être très resserré, le temps de mesure doit au minimum être d'une période de la modulation pour permettre de séparer les différentes composantes qui le constituent.

20

La figure 9 illustre un autre exemple de spectre RF. Lorsque la fréquence de modulation est inférieure à quelques 5 MHz, le spectre RF du modulateur est intégralement transposé dans la bande utile du filtre anti-
25 repliement, le filtre numérique doit supporter toute la dynamique.

Un signal pur réel se décompose en deux composantes de fréquences opposées, données par les deux relations suivantes :

30

$$\cos(\omega t) = \frac{\exp(j\omega t) + \exp(-j\omega t)}{2}$$

$$\sin(\omega t) = \frac{\exp(j\omega t) - \exp(-j\omega t)}{2j}$$

Le signal numérisé en bande de base comprend donc 14 composantes spectrales symétriques deux à deux données dans le tableau suivante :

Composante	Fréquence +	MHz	Fréquence -	MHz	dBc
Porteuse	F_3	78,4	$F_P - F_3$	24	-45
Signal	$F_3 + F_1$	82,4	$F_P - F_3 - F_1$	20	0
Image	$F_3 - F_1$	74,4	$F_P - F_3 + F_1$	28	-38
Imd2U	$F_3 + 2 F_1$	86,4	$F_P - F_3 - 2 F_1$	16	-58
imd2L	$F_3 - 2 F_1$	70,4	$F_P - F_3 + 2 F_1$	32	-59
Imd3U	$F_3 + 3 F_1$	90,4	$F_P - F_3 - 3 F_1$	12	-55
imd3L	$F_3 - 3 F_1$	66,4	$F_P - F_3 + 3 F_1$	36	-58

5

La figure 10 illustre le spectre du signal numérisé en bande de base, dans le cas où $F_1=4^\circ\text{MHz}$, $F_{OL}=8113,6^\circ\text{MHz}$, $F_{ech}=102,4^\circ\text{MHz}$, $N_{avg}=1$ et $F_3=0$. Comme illustré par la figure 11, une transposition du spectre brut applique un décalage circulaire de fréquence ($-F_3$) qui ramène la fuite porteuse à zéro. Ceci donne le jeu de fréquences du tableau suivant :

10

Composante	Fréquence +	MHz	Fréquence -	MHz	dBc
Porteuse	0	0	$2 F_P - 2 F_3$	48	-45
Signal	F_1	4	$2 F_P - 2 F_3 - F_1$	44	0
Image	$-F_1$	-4	$2 F_P - 2 F_3 + F_1$	-50,4	-38
Imd2U	$2 F_1$	8	$2 F_P - 2 F_3 - 2 F_1$	40	-58
imd2L	$2 F_1$	-8	$2 F_P - 2 F_3 + 2 F_1$	-46,4	-59
Imd3U	$3 F_1$	12	$2 F_P - 2 F_3 - 3 F_1$	36	-55
imd3L	$-3 F_1$	-12	$2 F_P - 2 F_3 + 3 F_1$	-42,4	-58

Filtrage numérique optimum

15

Le filtre numérique le plus efficace en termes de rapport signal sur bruit pour mesurer la composante continue d'un signal est la moyenne. D'autres filtres sont possibles mais la moyenne a des propriétés très intéressantes ici. La fonction de transfert d'un filtre à moyenne de N points est donnée par l'expression :

20

$$H(x) = e^{-i(N-1)x} \frac{\sin(Nx)}{N \sin(x)} \quad \text{avec} \quad x = \pi \frac{f}{f_{ech}}$$

La figure 12 illustre les fonctions de transfert de la moyenne glissante en décibels, pour N pair.

La durée d'intégration doit être choisie égale à un nombre entier de périodes
 5 des composantes spectrales gênantes. Dans l'exemple cité, nous devons éliminer 13 fréquences : -4, 4, -8, 8, -12, 12, 36, 44, 48, 42.4 ($\equiv 60$), -46.4 ($\equiv 56$), -50.4 ($\equiv 52$) MHz modulo 102.4 MHz. Le Plus Grand Commun Diviseur (PGCD) de la fréquence de modulation $F_1 = 4$ MHz et de la fréquence d'échantillonnage $F_P = 102.4$ MHz est $\Delta f = 102.4/128 = 4/5 = 0.8$ MHz. Les
 10 fréquences indésirables sont toutes des multiples (modulo F_P) de la fréquence de modulation $F_3 = 4$ MHz, *a fortiori* multiple du PGCD Δf . Elles sont donc éliminées par un filtre à moyenne glissante multiple de $N_{AVG} = F_P / \text{PGCD}(F_1, F_P)$, ce qui donne $N_{AVG} = 128$ points dans le présent exemple. Cette propriété remarquable n'est vérifiée que parce que la fréquence F_3 a
 15 été judicieusement calée sur un multiple de $\Delta f / 2$, soit $F_3 = 76.4$ MHz = $382 \times 0.4/2$ MHz = $382 \Delta f / 2$. Pour étalonner toutes les fréquences au pas de 1 MHz, il faut intégrer 4 fois plus, soit 512 =points.

20 Dans le cas d'une modulation haute fréquence, comme illustré par l'exemple de la figure 13 avec $F_1 = -128^\circ$ MHz et $F_{OL} = 8192^\circ$ MHz, le spectre brut en hyperfréquence en sortie du modulateur 21 a sensiblement la même allure que pour la modulation basse fréquence, mais il est beaucoup plus large.

25

Comme illustré par la figure 14, qui illustre un exemple de spectre brut en fréquence intermédiaire avec $F_1 = -128^\circ$ MHz, lorsque la largeur spectrale dépasse le double de la fréquence intermédiaire, le spectre se
 30 replie sur la bande utile. Dans certains cas particuliers, une raie indésirable se superpose exactement sur le signal sous test. Une coïncidence parfaite se produit quand $F_3 = \pm k \frac{F_1}{2}$, où $k \geq 1$. Dans la plupart des cas, le filtre anti-repliement atténue suffisamment le niveau du parasite hors bande et la mesure n'est pas perturbée. Lorsque le signal utile se replie exactement sur

le parasite sous test, la protection du filtre analogique ne suffit pas et il faut décaler légèrement la fréquence F_{OL} pour déplacer les fréquences et permettre au filtre numérique d'éliminer le gêneur. Les figures 15 et 16 illustrent des exemples de repliement sur la fréquence intermédiaire utile, dans les cas a et b respectivement.

La figure 17 illustre le lieu des composantes spectrales en fonction de la fréquence de modulation. Le choix de fréquences proposé pour cet exemple permet avec une moyenne de 512 échantillons consécutifs, soit $5^\circ\mu s$, de corriger la fuite porteuse pour toutes les fréquences de la bande d'agilité au pas de 1 MHz.

15 Annulation de la composante image

Modèle comportemental équivalent du modulateur vectoriel, relatif à l'image

La figure 18 illustre par un synoptique un modèle comportemental équivalent au modulateur 21, ce modèle étant relatif à l'image. Le modulateur vectoriel 21 est, vis-à-vis du signal de modulation, utilisé en régime linéaire. On peut donc pour des fréquences OL et IF particulières regrouper arbitrairement l'ensemble des erreurs de gain et de phase au niveau d'une des branches OL du modèle comme indiqué sur la figure 18, en choisissant le plan de référence de phase approprié. Si on applique à ce modulateur imparfait un signal RF idéal, on obtient les relations suivantes :

$$s(t) = A \sin(\Omega t + \Phi) \cos(\omega t) + A \lambda \sin(\omega t + \phi) \cos(\Omega t + \Phi)$$

$$s(t) = A \sin(\Omega t + \Phi) \cos(\omega t) + A \lambda [\sin(\omega t) \cos(\phi) + \cos(\omega t) \sin(\phi)] \cos(\Omega t + \Phi)$$

$$s(t) = A \left\{ \frac{\sin[(\Omega - \omega)t + \Phi] + \sin[(\Omega + \omega)t + \Phi]}{2} + \lambda \cos(\phi) \frac{\sin[(\omega - \Omega)t - \Phi] + \sin[(\omega + \Omega)t + \Phi]}{2} \right. \\ \left. + \lambda \sin(\phi) \frac{\cos[(\omega - \Omega)t - \Phi] + \cos[(\omega + \Omega)t + \Phi]}{2} \right\}$$

Les déséquilibres de gain et de phase se traduisent donc par l'existence d'une composante image de pulsation $(\omega - \Omega)$ symétrique de la pulsation utile $(\omega + \Omega)$, telle que :

$$s(t) = \frac{A}{2} \left\{ \begin{aligned} &(\lambda \cos(\phi) - 1) \sin[(\omega - \Omega)t - \Phi] + \lambda \sin(\phi) \cos[(\omega - \Omega)t - \Phi] \\ &+ (\lambda \cos(\phi) + 1) \sin[(\omega + \Omega)t + \Phi] + \lambda \sin(\phi) \cos[(\omega + \Omega)t + \Phi] \end{aligned} \right\}$$

Amplitude relative de l'image au signal utile

Les modules de ces deux composantes symétriques s'écrivent donc respectivement :

$$\begin{aligned} A_-^2 &= \left(\frac{A}{2} \right)^2 \left\{ [(\lambda \cos(\phi) - 1)]^2 + [\lambda \sin(\phi)]^2 \right\} \\ &= \left(\frac{A}{2} \right)^2 [\lambda^2 - 2\lambda \cos(\phi) + 1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_+^2 &= \left(\frac{A}{2} \right)^2 \left\{ [(\lambda \cos(\phi) + 1)]^2 + [\lambda \sin(\phi)]^2 \right\} \\ &= \left(\frac{A}{2} \right)^2 [\lambda^2 + 2\lambda \cos(\phi) + 1] \end{aligned}$$

On en déduit la formule classique du rapport d'amplitude entre l'image et le signal utile :

$$r = \frac{|image|}{|signal|} = \sqrt{\frac{1 - 2\lambda \cos(\phi) + \lambda^2}{1 + 2\lambda \cos(\phi) + \lambda^2}}$$

Expression vectorielle de l'erreur de quadrature

Dans le plan complexe (Oxy) associé à la modulation, il est intéressant d'associer aux défauts de quadrature un vecteur OM de module λ

phase ϕ proche du vecteur unitaire $OI(1,0)$, et de choisir comme erreur le vecteur IM de module ρ et de phase θ tels que :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} \lambda \cos(\phi) \\ \lambda \sin(\phi) \end{cases} = \overrightarrow{OI} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} + \overrightarrow{IM} \begin{cases} e_x = \rho \cos(\theta) \\ e_y = \rho \sin(\theta) \end{cases}$$

5

La figure 5 illustre une représentation vectorielle de l'erreur de quadrature. Cette notation simplifie l'expression du rapport d'amplitude entre l'image et le signal utile, qui peut ainsi s'exprimer de la façon suivante :

$$10 \quad r = \frac{\rho}{\sqrt{4 + 4\rho \cos(\theta) + \rho^2}} \cong \frac{\rho}{2} \quad (\text{si } \rho \ll 1)$$

De même, le signal modulé peut s'exprimer de la façon suivante :

$$s(t) = \frac{A}{2} \left\{ \begin{array}{l} \rho \cos(\theta) \sin[(\omega - \Omega)t - \Phi] + \rho \sin(\theta) \cos[(\omega - \Omega)t - \Phi] \\ [2 + \rho \cos(\theta)] \sin[(\Omega + \omega)t + \Phi] + \rho \sin(\theta) \cos[(\omega + \Omega)t + \Phi] \end{array} \right\}$$

15

De même, la composante image peut s'exprimer de la façon suivante :

$$S_I(t) = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \exp\{ j[(\omega - \Omega)t - \Phi] \}$$

20

De même, la composante utile peut s'exprimer de la façon suivante :

$$S_U(t) = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} 2 + e_x \\ e_y \end{bmatrix} \exp\{ j[(\omega + \Omega)t + \Phi] \}$$

25

Matrice de distorsion

21

Les défauts de quadrature de la modulation sont représentés par la matrice de passage du vecteur $\overrightarrow{OI} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ au vecteur $\overrightarrow{OM} = \begin{bmatrix} 1+e_x \\ e_y \end{bmatrix}$ que nous appelons « matrice de distorsion », par la relation suivante :

$$5 \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+e_x & 0 \\ e_y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ d_{21} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

Pour compenser la distorsion du modulateur imparfait, il suffit d'appliquer au signal modulant théorique (X, Y) l'opérateur de distorsion inverse pour obtenir la modulation compensée (x_c , y_c), comme indiqué par la relation

10 suivante :

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ d_{21} & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} D_{11} = \frac{1}{d_{11}} & 0 \\ D_{21} = -\frac{d_{21}}{d_{11}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

distorsion opérateur de distorsion
initiale distorsion inverse corrigée

Les matrices de distorsion ont des propriétés intéressantes :

- 15
- le produit de deux matrices de distorsion est une matrice de distorsion ;
 - l'inverse d'une matrice de distorsion est une matrice de distorsion ;
 - une matrice quelconque se décompose de manière unique en un produit non commutatif d'une matrice de rotation par une matrice de
- 20 distorsion :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ -a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{a_{12}^2 + a_{22}^2} & 0 \\ \frac{a_{12}a_{11} + a_{21}a_{22}}{a_{12}^2 + a_{22}^2} & 1 \end{bmatrix} = [R] \cdot [D]$$

- 25
- le choix de la branche de référence du modulateur qui porte les erreurs de gain et phase est arbitraire, il existe une variante duale de

matrice de distorsion dont les coefficients sont en deuxième colonne. On peut aussi imaginer de répartir les erreurs symétriquement mais cela n'apporte pas de simplification ;

- en appliquant une nouvelle matrice de correction à un système partiellement corrigé on améliore la précision de la correction :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ d_{21} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{11}^{(1)} & 0 \\ D_{21}^{(1)} & 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} D_{11}^{(2)} & 0 \\ D_{21}^{(2)} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

modulateur pré-régulé nouvelle correction

Du fait de la forme de la matrice, les règles du produit sont les suivantes :

$$\begin{cases} D_{11}^{(1)+(2)} = D_{11}^{(1)} D_{11}^{(2)} \\ D_{21}^{(1)+(2)} = D_{21}^{(1)} D_{11}^{(2)} + D_{21}^{(2)} \end{cases}$$

- l'implémentation matérielle du correcteur tient compte de la forme particulière des coefficients :
 - $D_{11} = 1 + \varepsilon_1$ $D_{21} = \varepsilon_2$, les coefficients ε_1 et ε_2 sont d'autant plus petits que la quadrature est bonne ;
 - la relation entre l'atténuation relative de l'image au signal est donnée par :

$$RdB = 20 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}{2} \right]$$

où $\varepsilon_{1,2}$ sont les coefficients de correction image ;

- la majorité des modulateurs en quadrature présentent une suppression naturelle d'image meilleure que 24.1 dBc. On majore l'erreur en supposant qu'elle ne porte sur un seul des deux termes :

$$-24.1 \text{ dB} = 20 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{\varepsilon^2}}{2} \right] = 20 \log_{10} [\varepsilon_{\max}] - 6.02 \text{ dB} \Rightarrow |\varepsilon_{\max}| = 10^{\frac{18.1}{20}} = 0.125$$

- la valeur décimale des coefficients d'erreur ε_1 et ε_2 est donc bornée en pratique par :

$$-\frac{1}{8} < \varepsilon_{1,2} < \frac{1}{8}$$

Mesure vectorielle de l'image

5

La mesure des composantes (I_x , I_y) de la raie image donne les termes (e_x , e_y) de l'erreur de modulation dans le repère de mesure. Comme pour la fuite porteuse, on établit la matrice de passage du repère de mesure au repère de commande en appliquant une perturbation connue sur les commandes de correction. Les corrections (ε_x , ε_y) sont déduites par inversion de la matrice de distorsion :

$$\varepsilon_x = D_{11} - 1 = \frac{1}{d_{11}} - 1 = \frac{1}{1 + e_1} - 1 \cong -e_1$$

$$15 \quad \varepsilon_y = D_{21} = -\frac{d_{21}}{d_{11}} = -e_2(1 + e_1) \cong -e_2$$

Lorsque les corrections sont petites, ce qui est toujours le cas en pratique, il suffit de prendre l'opposé des composantes de l'erreur vectorielle pour obtenir les coefficients de la matrice de distorsion inverse. Cette propriété permet de régler la quadrature en adoptant la même procédure que pour la fuite porteuse, en remplaçant l'application de tensions de décalage par l'application des coefficients de la matrice inverse de distorsion. La figure 20 illustre un exemple d'implémentation d'un correcteur de quadrature.

25

Conditions de fréquence

Le principe est le même que pour la mesure de la fuite porteuse, mais le décalage de l'oscillateur local est réglé pour centrer la raie image dans le filtre anti-repliement. Le rang non binaire de la multiplication, qui est de 44 dans le présent exemple, pour générer la fréquence OL nécessite de mettre en œuvre une synthèse fractionnaire de sorte que la fréquence F_3 soit constante et qu'aucune erreur ne soit introduite par le filtre anti-repliement.

30

Par exemple, avec une fréquence de modulation de 100 MHz, on trouve dans l'exemple de référence les fréquences suivantes :

$$\begin{aligned}
 F_{IMAGE} &= 8192 - 100 &&= 8092 \text{ MHz} \\
 F_{OL} &= \left(\frac{1821 + \frac{12}{44}}{8192} \times 819.2 \right) \times 44 &&= 8013.6 \text{ MHz} \\
 F_3 &= 8092 - 8013.6 &&= 78.4 \text{ MHz}
 \end{aligned}$$

5

On note que la fréquence OL est fractionnaire parce que le rang de multiplication $k_4 = 44$ dans notre exemple n'est pas une puissance de 2. Comme illustré par le tableau qui suit pour le présent exemple, un filtre qui calcule la moyenne de 512 points, soit un temps d'intégration de $5^\circ\mu\text{s}$, conserve la raie image et atténue complètement toutes les autres raies qui sont distribuées suivant des multiples entiers de $102.4/512 = 0.2 \text{ MHz}$ pour toutes les fréquences de modulation au pas de 1 MHz :

10

Composante	MHz	MHz
Porteuse	-2,4	50,4
Signal	-4,8	-49,6
Image	0	48
Imd2U	-7,2	-47,2
imd2L	45,6	2,4
Imd3U	-9,6	-44,8
imd3L	43,2	4,8

15 Lorsque l'écart entre la fréquence sous test et une raie perturbatrice du spectre vaut exactement un multiple de la fréquence d'échantillonnage, la fréquence sous test et la raie perturbatrice sont superposées, et la seule manière d'éviter l'ambiguïté. C'est ici le cas pour une modulation de 256 MHz, les fréquences étant les suivantes :

20

$$\begin{aligned}
 F_{IMAGE} &= 8192 - 256 &&= 7936 \text{ MHz} \\
 F_{OL} &= \left(\frac{1785 + \frac{36}{44}}{8192} \times 819.2 \right) \times 44 &&= 7857.6 \text{ MHz} \\
 F_3 &= 7936 - 7857.6 &&= 78.4 \text{ MHz}
 \end{aligned}$$

Comme l'écart entre la fréquence utile et l'image vaut $2 \times 256 \text{ MHz} = 512 \text{ MHz} = 5 \times 102.4 \text{ MHz}$, la fréquence utile se replie après échantillonnage exactement sur la raie image sous test, comme illustré dans le tableau suivant :

5

Composante	MHz	MHz
Porteuse	-51,2	-3,2
Signal	0	48
Image	0	48
Imd2U	-51,2	-3,2
imd2L	-3,2	-51,2
Imd3U	0	48
imd3L	48	0

Comme il est difficile de changer la fréquence d'échantillonnage qui conditionne les traitements, la seule protection est le filtre anti-repliement. Il peut donc être intéressant le cas échéant d'ajouter un filtre passe-bas ou
 10 « stop-bande » d'appoint pour atténuer la fréquence gênante qui est ici de $78.4 + 512 = 590.4 \text{ MHz}$. La figure 21 illustre par un spectre en fréquence intermédiaire, avec $F_1=256^\circ\text{MHz}$, $F_{OL}=7857.6^\circ\text{MHz}$ et $F_3=78.4^\circ\text{MHz}$, les fréquences associées à la mesure de la raie image pour $F_1=100^\circ\text{MHz}$.

15

Annulation des composantes produites par les non-linéarités d'ordre 2 et 3

Les raies parasites concernées résultent de non-linéarités d'ordre
 20 2 et 3. Le principe de la compensation est d'ajouter au signal de modulation des harmoniques 2 et 3 asservies en opposition de phase des parasites, comme pour la composante image.

Matrice de compensation et composantes cartésiennes

25

La figure 22 illustre par une synoptique un modulateur virtuel idéal modulé par un signal monochromatique pur, dont les composantes cartésiennes ont subi une transformation par une matrice [A] arbitraire selon la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Omega t) \\ \sin(\Omega t) \end{bmatrix}$$

Le signal modulé s'écrit :

5

$$\begin{aligned} S(t) &= X \sin(\omega t) + Y \cos(\omega t) \\ &= [a_{11} \cos(\Omega t) + a_{12} \sin(\Omega t)] \sin(\omega t) + [a_{21} \cos(\Omega t) + a_{22} \sin(\Omega t)] \cos(\omega t) \\ &= a_{11} \cos(\Omega t) \sin(\omega t) + a_{12} \sin(\Omega t) \sin(\omega t) + a_{21} \cos(\Omega t) \cos(\omega t) + a_{22} \sin(\Omega t) \cos(\omega t) \end{aligned}$$

En remplaçant les produits trigonométriques par des sommes, il vient :

$$\begin{aligned} S(t) &= \frac{a_{11}}{2} \sin(\omega t + \Omega t) + \frac{a_{11}}{2} \sin(\omega t - \Omega t) - \frac{a_{12}}{2} \cos(\omega t + \Omega t) + \frac{a_{12}}{2} \cos(\omega t - \Omega t) \\ &+ \frac{a_{21}}{2} \cos(\omega t + \Omega t) + \frac{a_{21}}{2} \cos(\omega t - \Omega t) + \frac{a_{22}}{2} \sin(\omega t + \Omega t) - \frac{a_{22}}{2} \sin(\omega t - \Omega t) \end{aligned}$$

10

Soit, en regroupant les termes associés aux fréquences somme et différence :

$$\begin{aligned} S(t) &= \left(\frac{a_{12} + a_{21}}{2} \right) \cos(\omega t - \Omega t) + \left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2} \right) \sin(\omega t - \Omega t) \\ &+ \left(\frac{a_{21} - a_{12}}{2} \right) \cos(\omega t + \Omega t) + \left(\frac{a_{11} + a_{22}}{2} \right) \sin(\omega t + \Omega t) \end{aligned}$$

15

La transformation de coordonnées permet donc de contrôler simultanément deux composantes spectrales symétriques, d'amplitude et de phase arbitraires, ce qui donne le moyen de compenser une paire de raies produites par non-linéarité au moyen des coefficients de la matrice [A].

20

Principe du correcteur de distorsion

25

La figure 23 illustre les principes d'un correcteur de distorsion. Le correcteur calcule la phase du signal de correction en multipliant la phase du signal utile par le rang (2 ou 3) qui correspond à l'harmonique à supprimer, et

applique une transformation matricielle afin de générer deux composantes de fréquences symétriques qui s'ajoutent vectoriellement aux raies parasites créées involontairement par distorsion harmonique. En pratique, le niveau de modulation est réglé pour que l'amplitude des raies parasites créées par inter
5 modulation d'ordre 2 et 3 soit inférieure à -48 dBc. Ceci permet d'économiser 8 bits sur le format des données du CORDIC (« COordinate Rotation DIgital Computer ») et des matrices de correction d'ordre 2 et 3.

10 La méthode de correction par démodulation synchrone et par asservissement cartésien des composantes parasites décrite précédemment permet de bénéficier de la précision de la démodulation numérique, ce qui améliore les performances de qualité spectrale dans une large bande de modulation, et permet de bénéficier d'une meilleure tolérance aux
15 perturbations de l'environnement. L'invention permet de synthétiser des signaux sinus de fréquence agile très purs dans une large bande instantanée, l'étalonnage pouvant être effectué pendant l'utilisation. Les coefficients de correction sont entretenus en mémoire de manière à être disponibles immédiatement après un saut de fréquence ou pour la
20 génération d'une forme d'onde différente, par exemple une rampe de fréquence. Les fonctions de surveillance et d'auto étalonnage peuvent ainsi être étendues dans une application de type radar, comme l'exemple illustré par la figure 24. La fonction de surveillance y peut être organisée de manière à surveiller la puissance et la qualité du signal prélevé après un émetteur,
25 afin de corriger les défauts d'un amplificateur en agissant sur le signal complexe modulant.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'annulation des imperfections d'un signal analogique généré par un dispositif permettant de moduler un signal analogique à partir d'un signal numérique de modulation, le dispositif comportant un générateur de forme d'onde (2) et un récepteur de surveillance (22) dans une boucle fermée d'asservissement, le récepteur de surveillance comportant des oscillateurs numériques (DDS_2, DDS_3), le signal numérique de modulation étant asservi sur le signal analogique de manière à annuler des composantes parasites présentes dans le signal analogique, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte :
 - une phase de synchronisation des oscillateurs numériques (DDS_2, DDS_3) du récepteur de surveillance (22) ;
 - une phase de synchronisation de la phase du générateur de forme d'onde (2) et de la phase du récepteur de surveillance (22), de sorte à définir une matrice de passage entre un repère de mesure et un repère de modulation ;
 - une phase de mesure des composantes spectrales parasites dans le repère de mesure ;
 - une phase d'estimation des composantes spectrales parasites dans le repère de modulation.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la phase de mesure des composantes spectrales parasites utilise des filtres capables de discriminer les différentes composantes spectrales dans le signal analogique modulé, sans interférer avec les raies parasites générées par le dispositif utilisé pour réaliser la mesure.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que les filtres mis en œuvre combinent un plan de fréquences à des filtres à moyenne glissante, les filtres à moyenne glissante étant optimaux en bruit et ayant leurs zéros de transmission distribués de manière régulière dans le plan de fréquences, de sorte que les composantes parasites sont placées sur les zéros de puissance.

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les composantes parasites incluent :

- une fuite porteuse, et/ou ;
- une raie image, et/ou ;
- 5 - des raies d'intermode d'ordre 2, et/ou
- des raies d'intermode d'ordre 3.

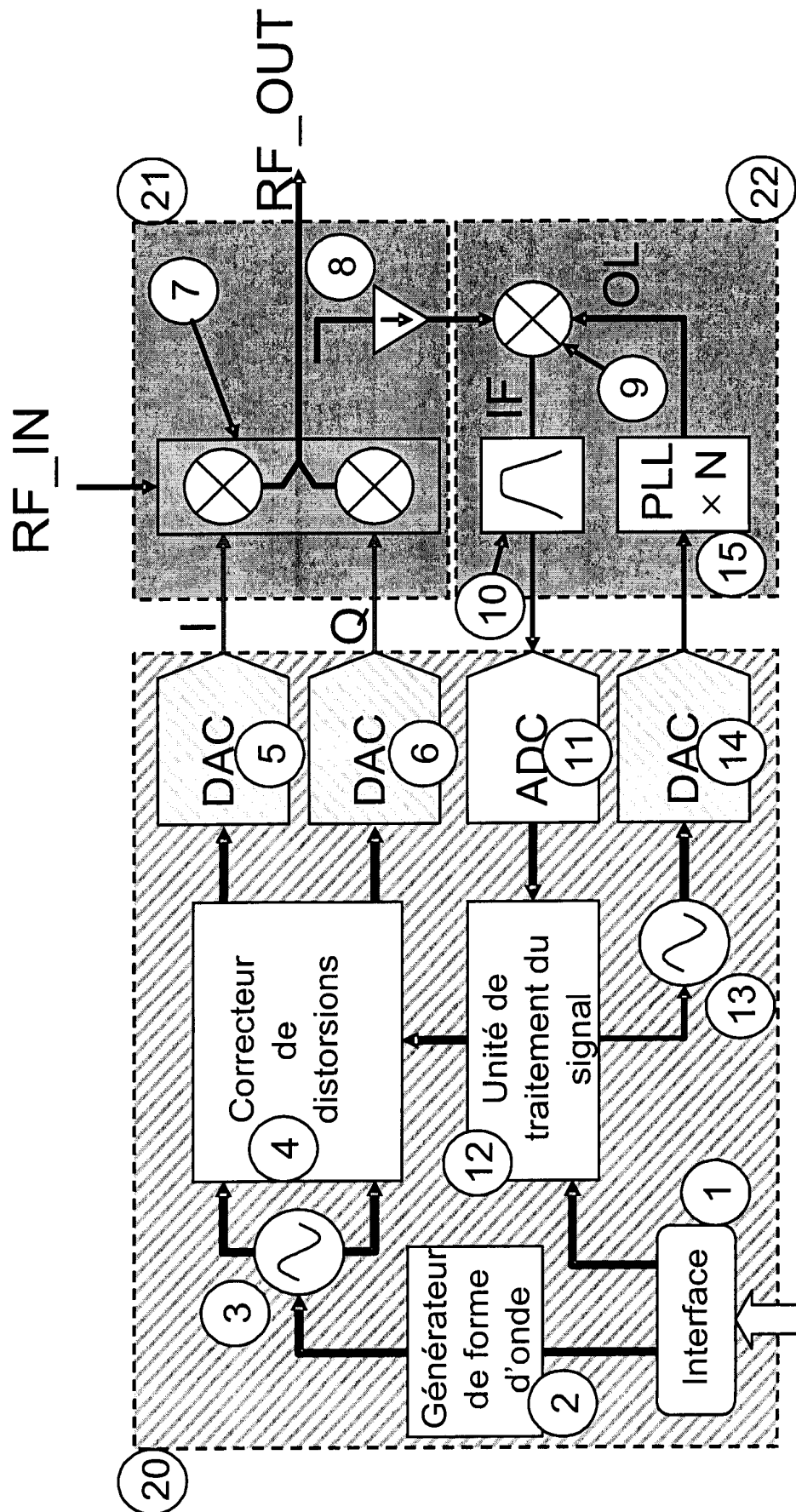


FIG 1

2/24

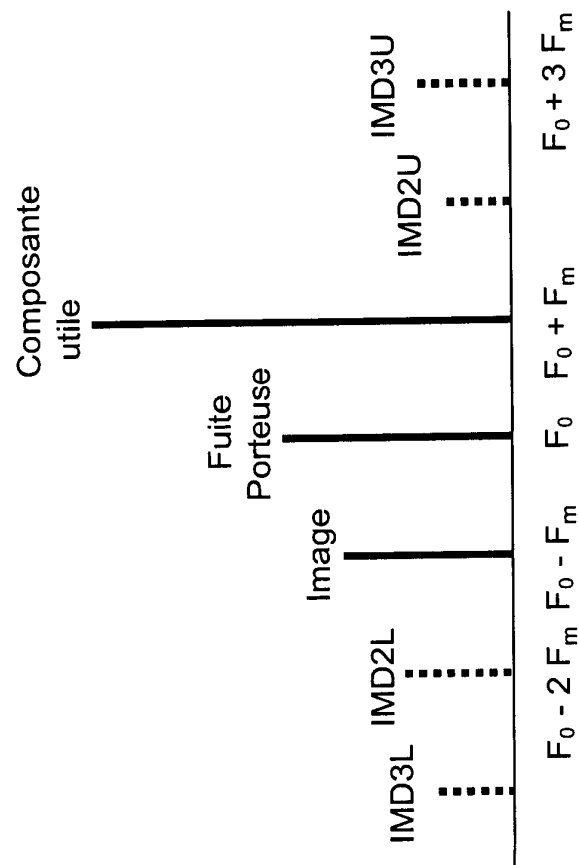
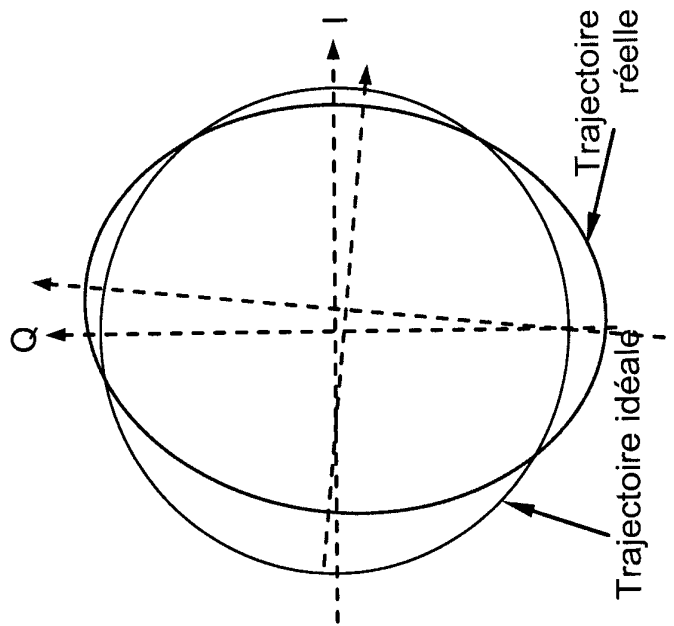


FIG 2

3/24

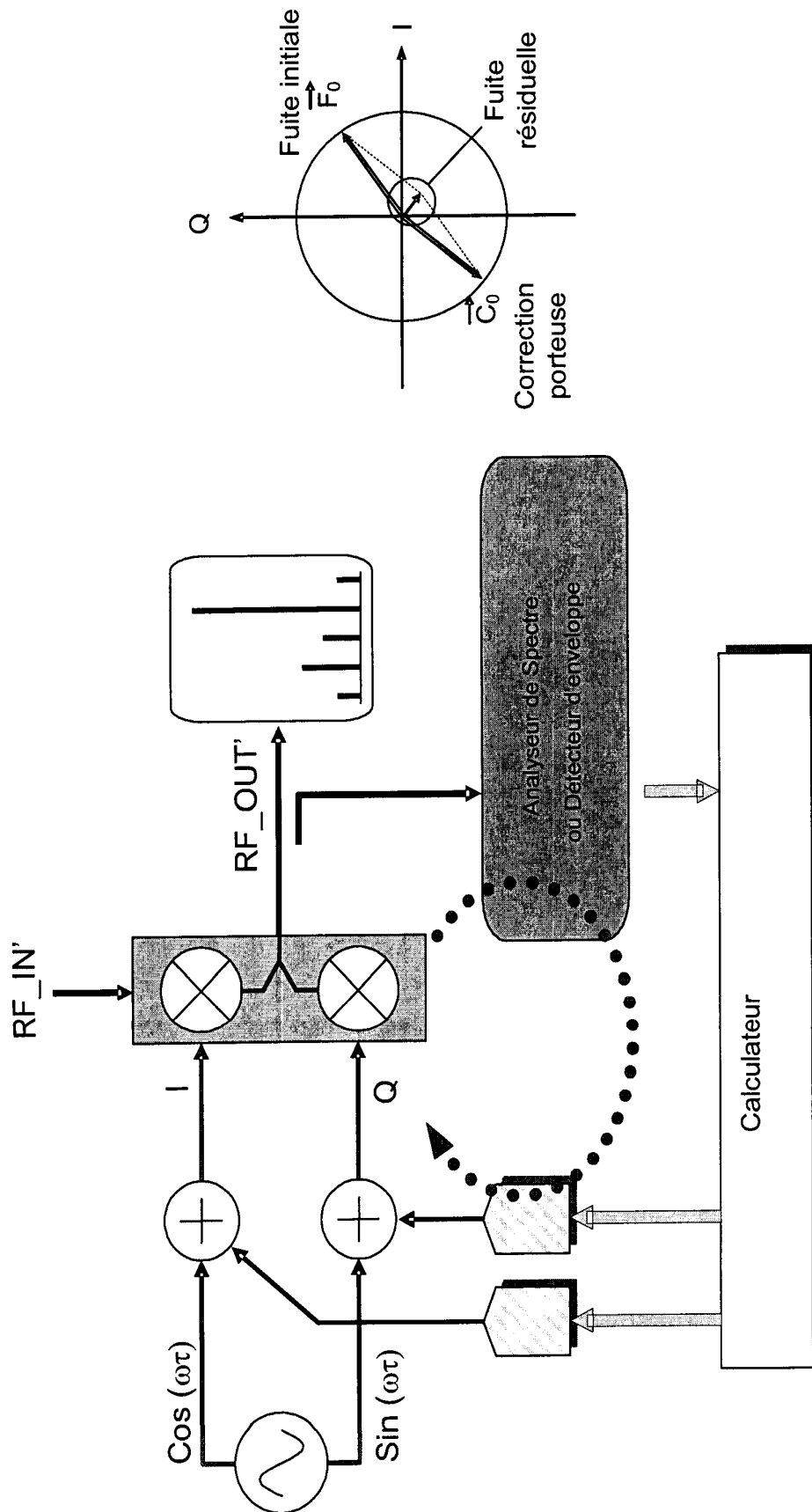


FIG 3

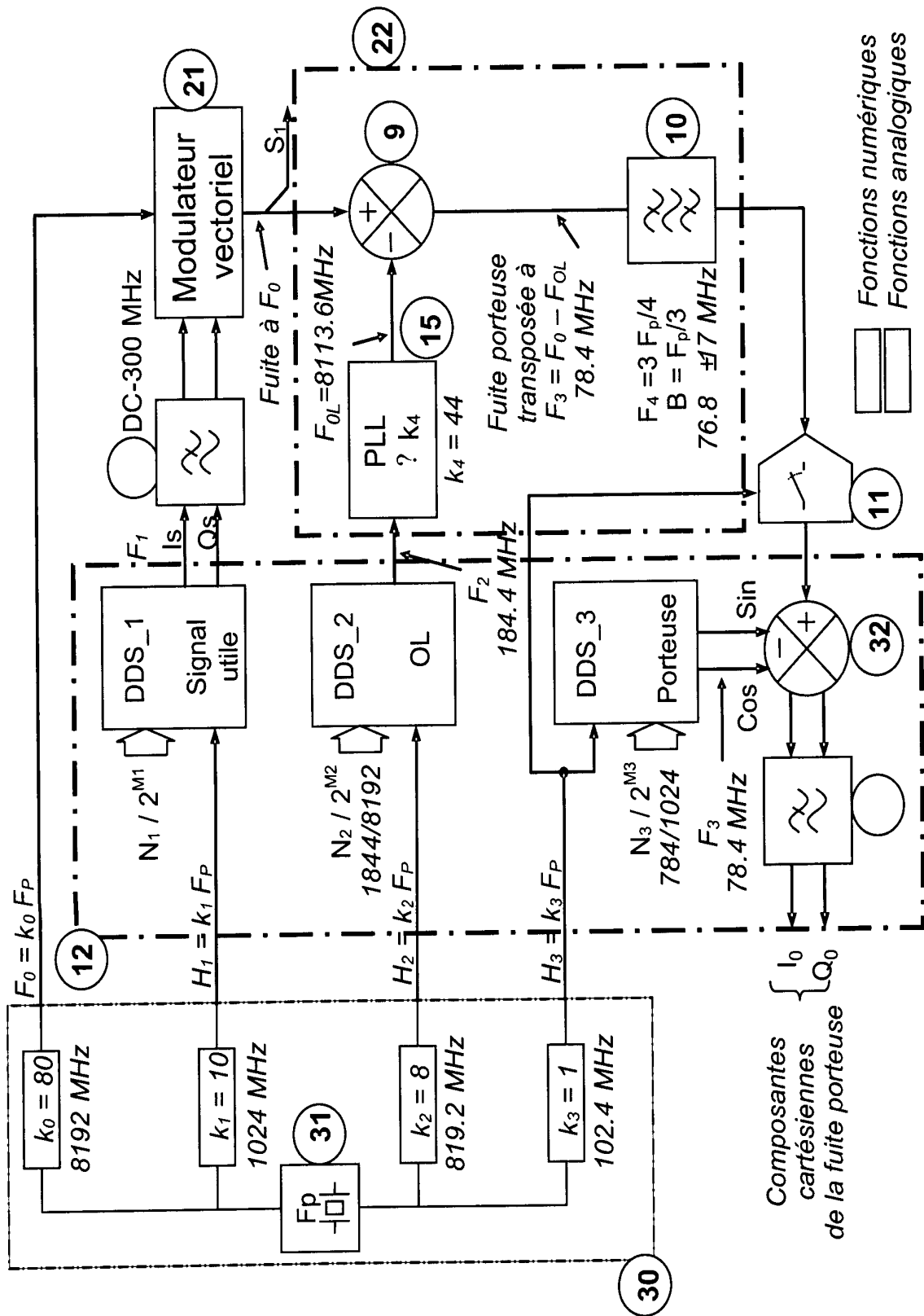


FIG 4

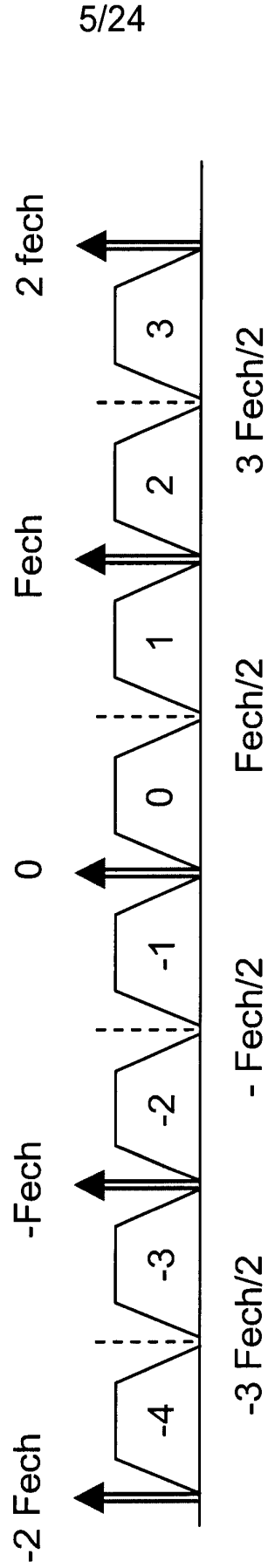


FIG 5

6/24

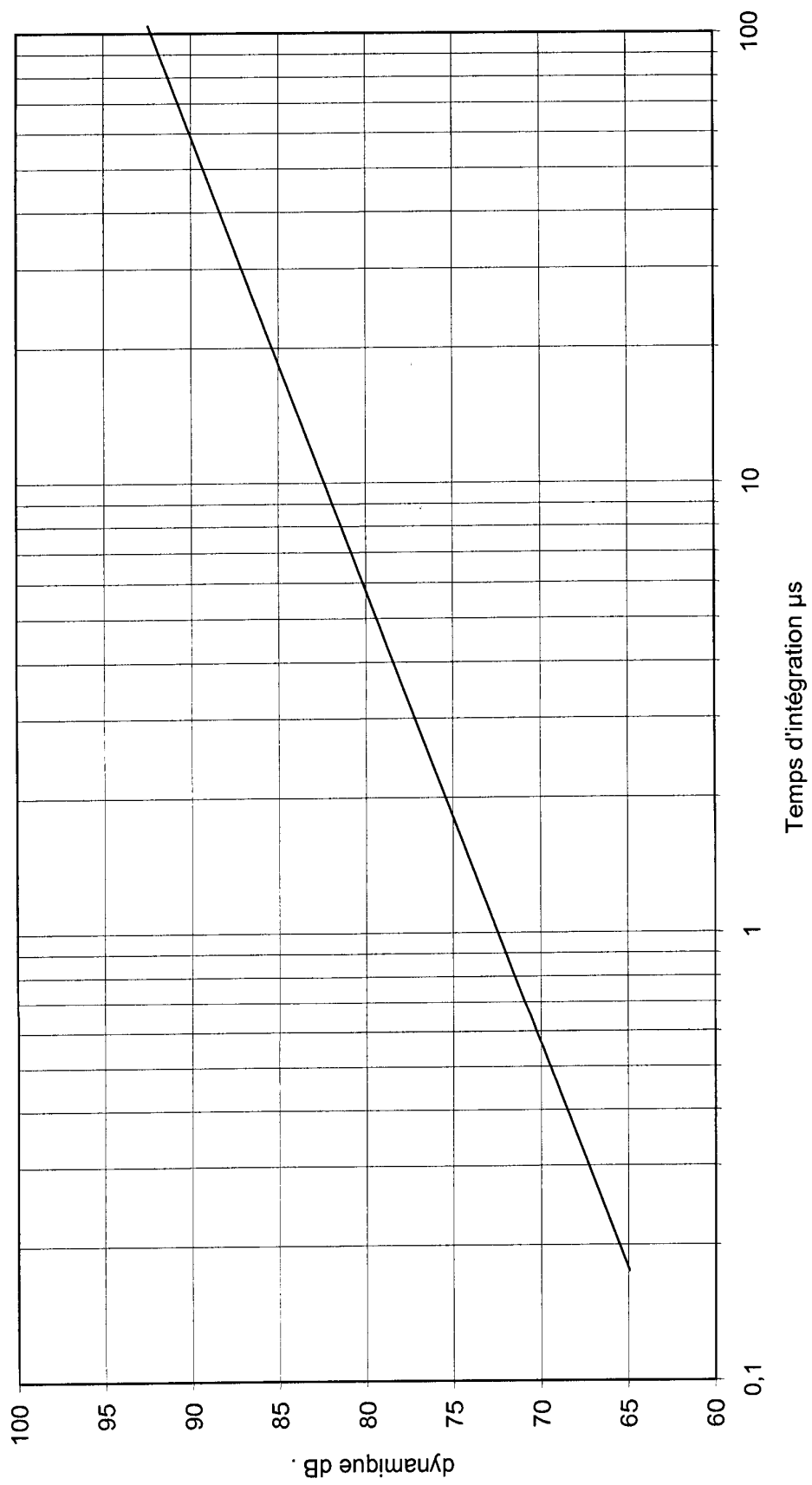


FIG 6

7/24

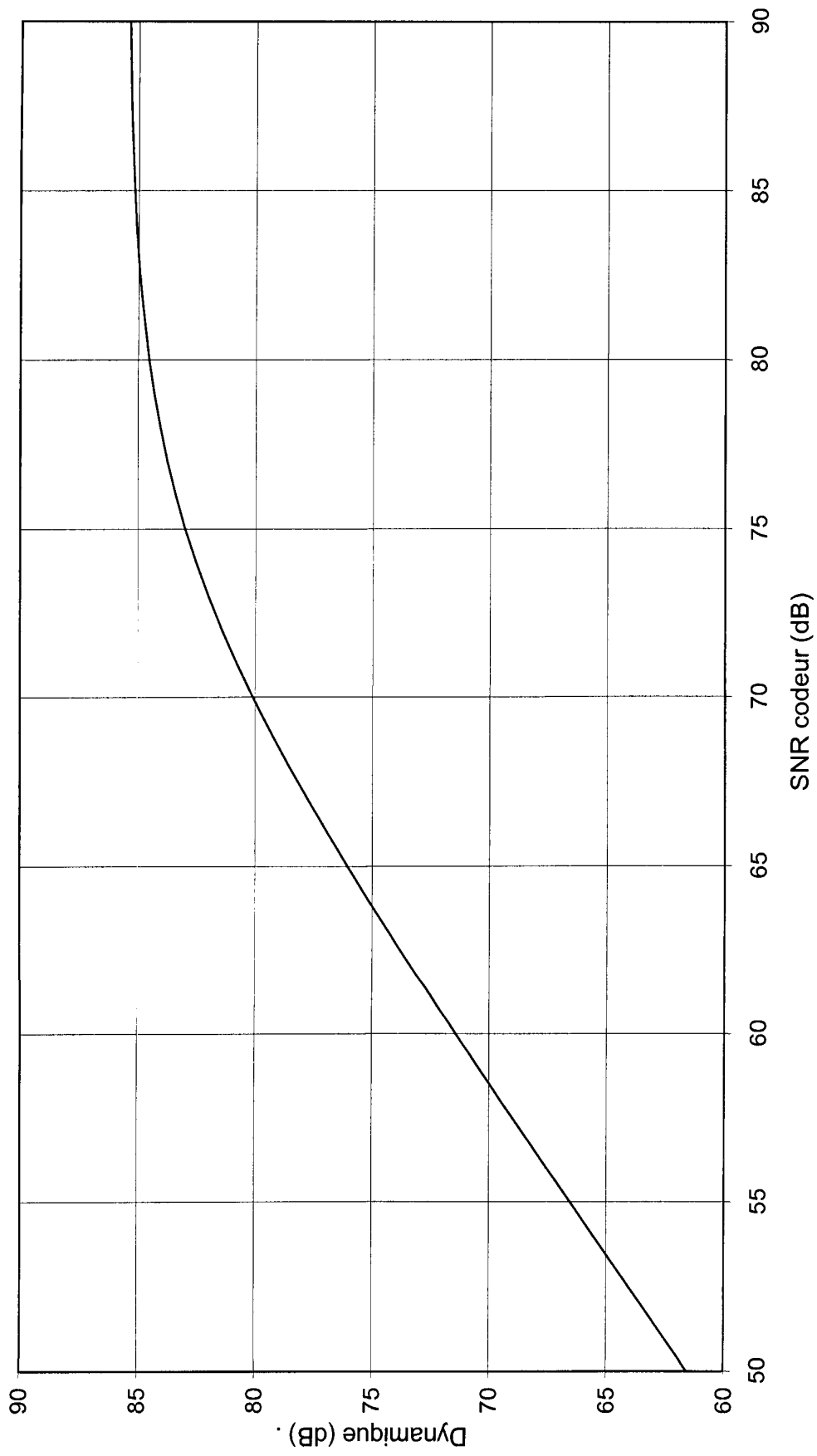


FIG 7

8/24

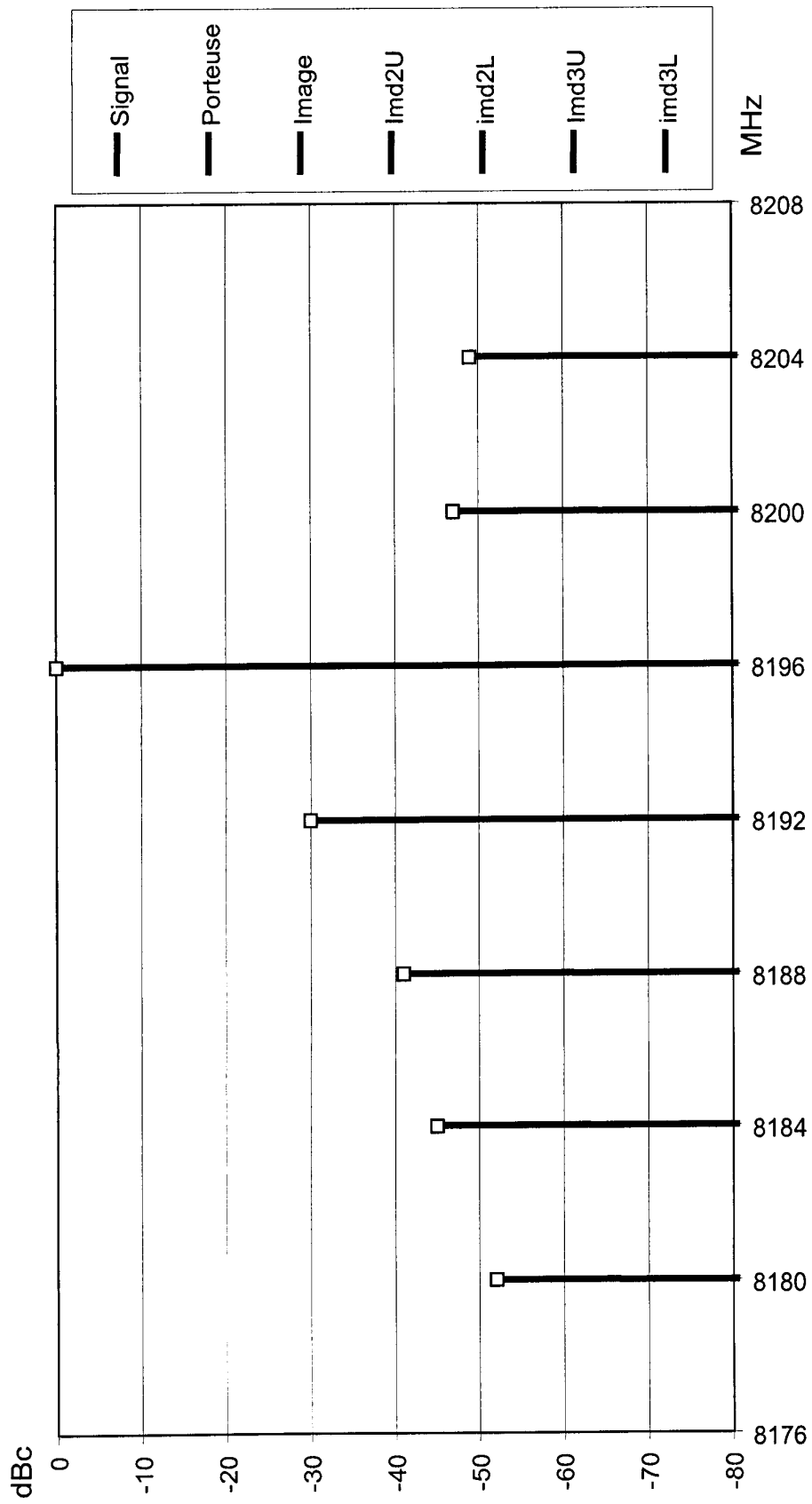


FIG 8

9/24

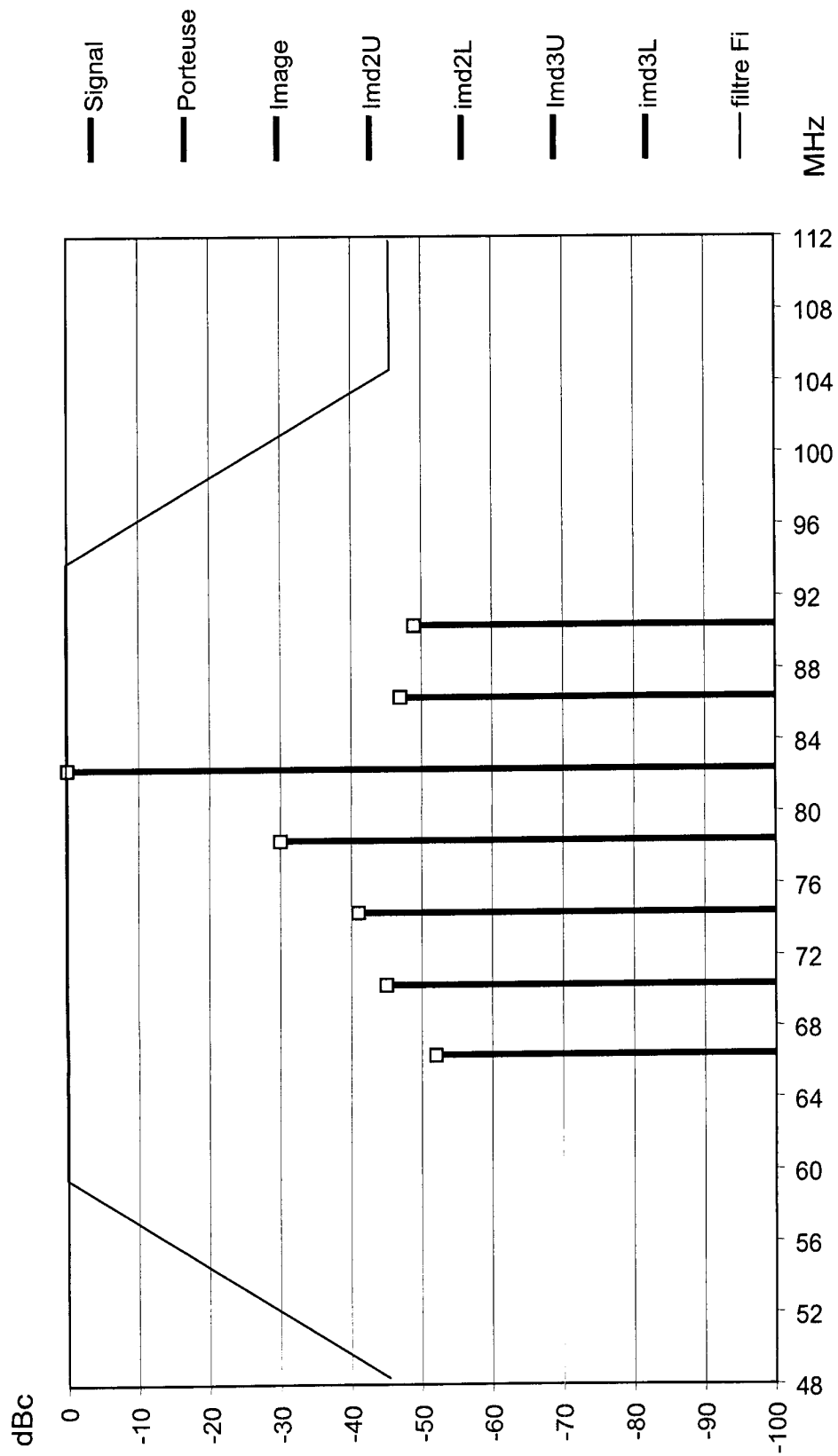


FIG 9

10/24

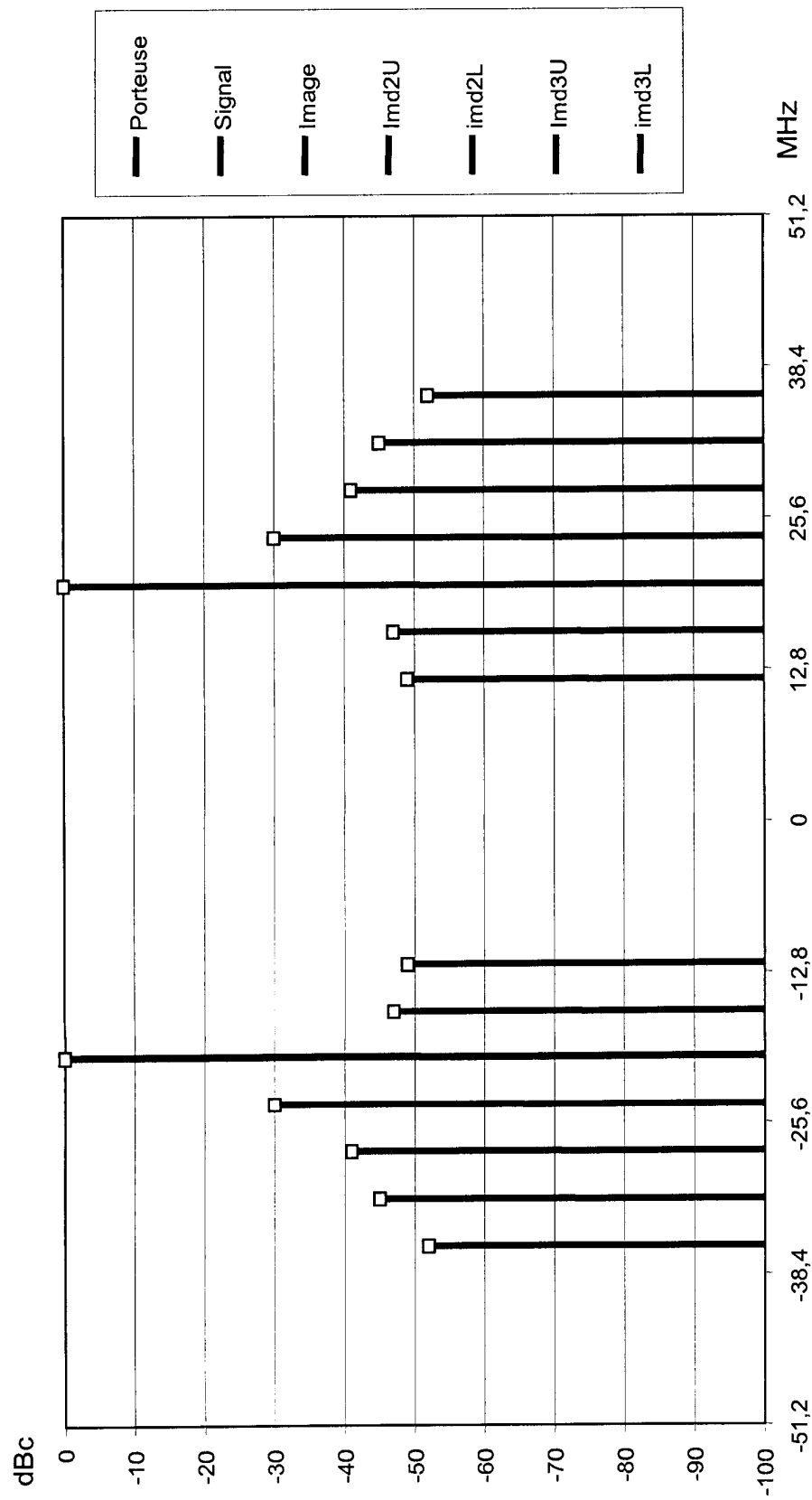


FIG 10

11/24

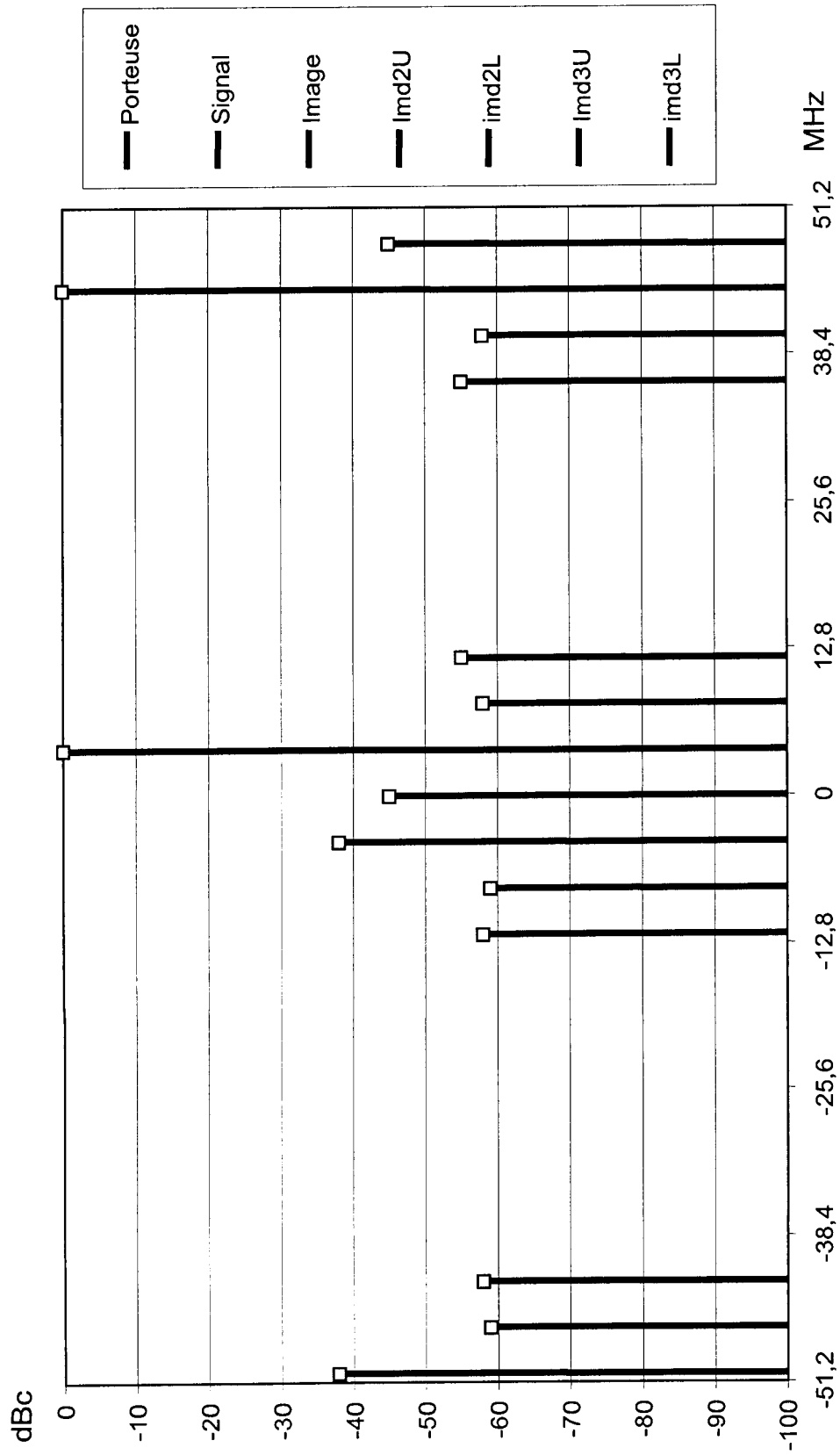


FIG 11

12/24

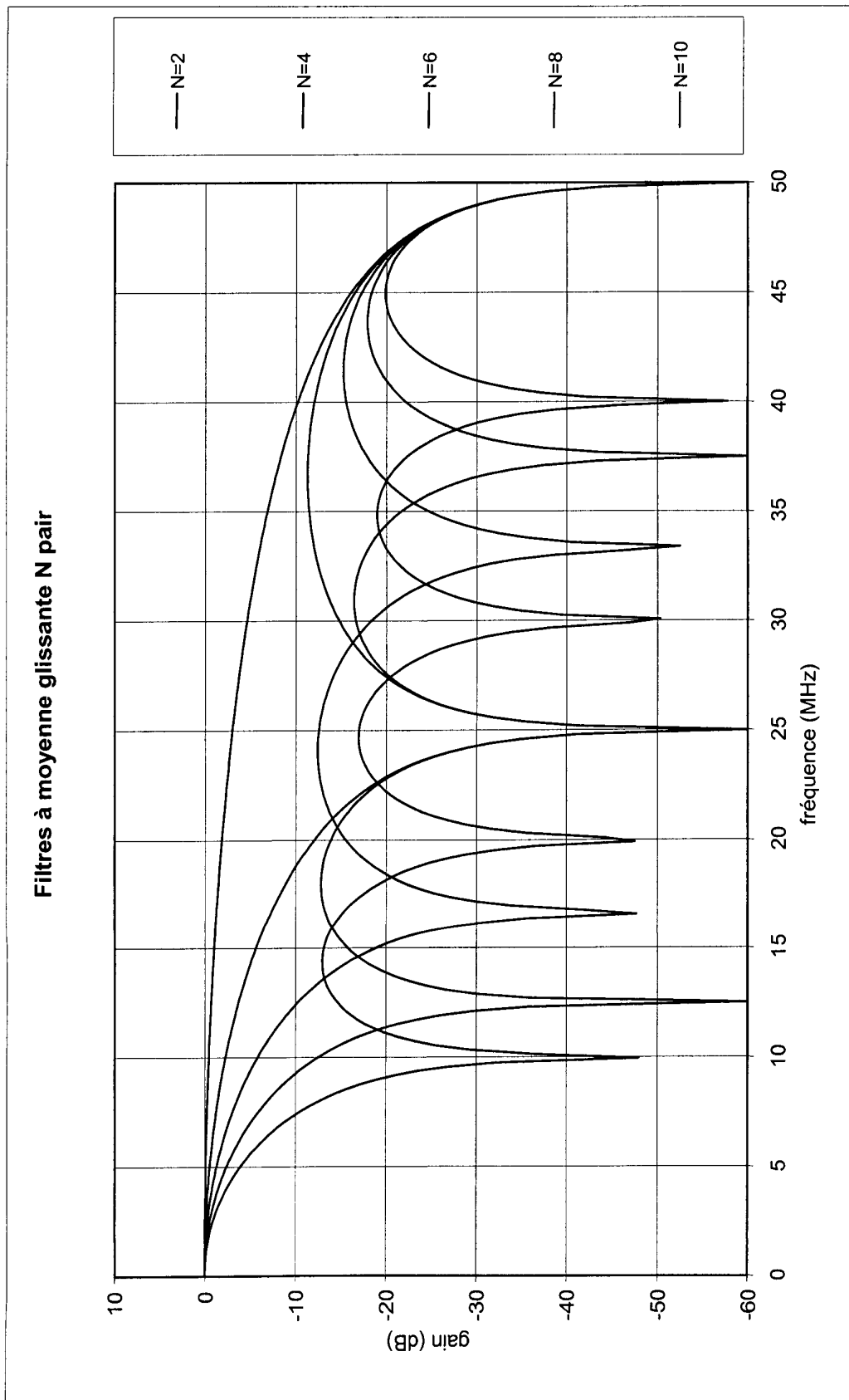


FIG 12

13/24

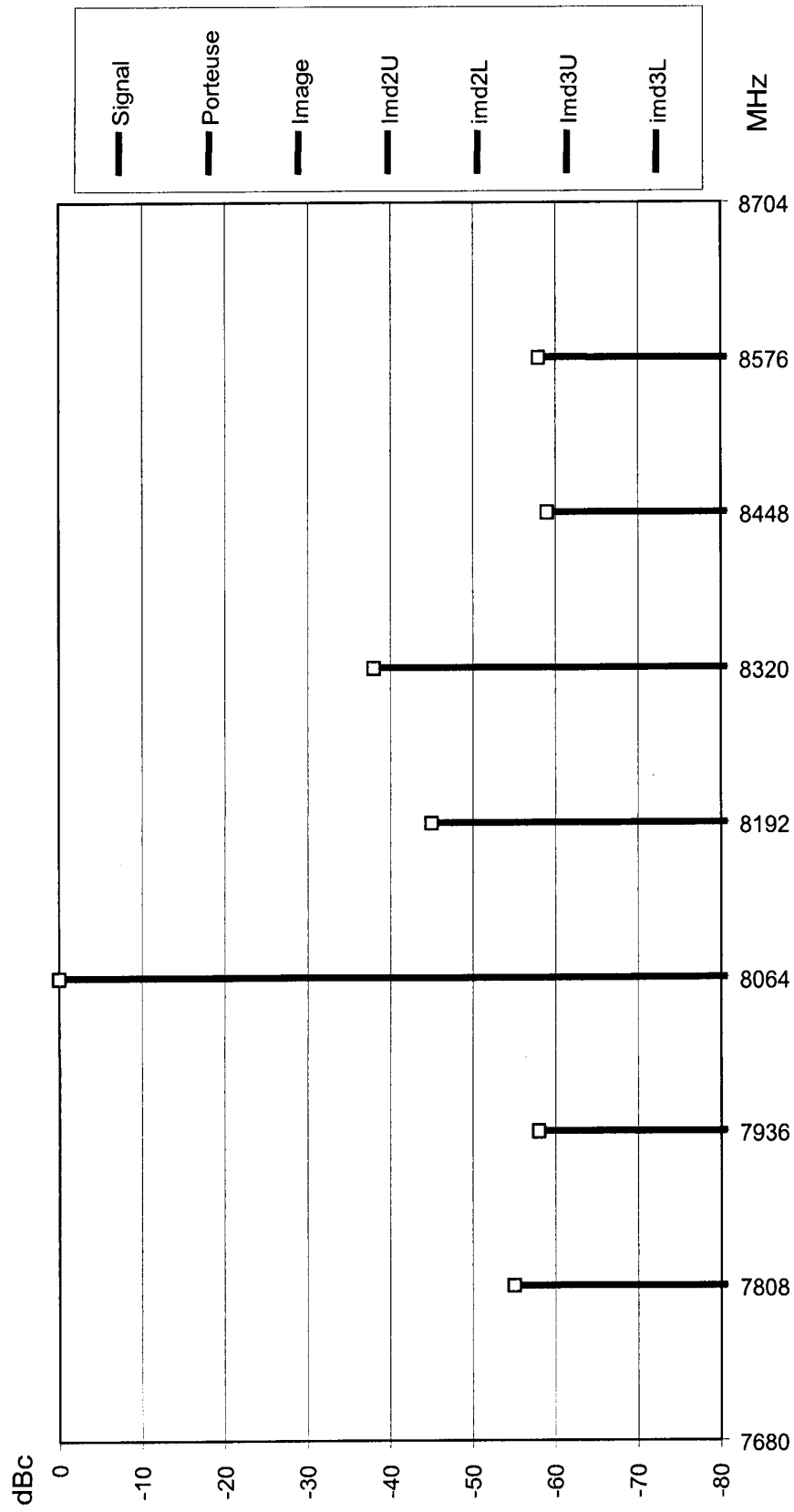


FIG 13

14/24

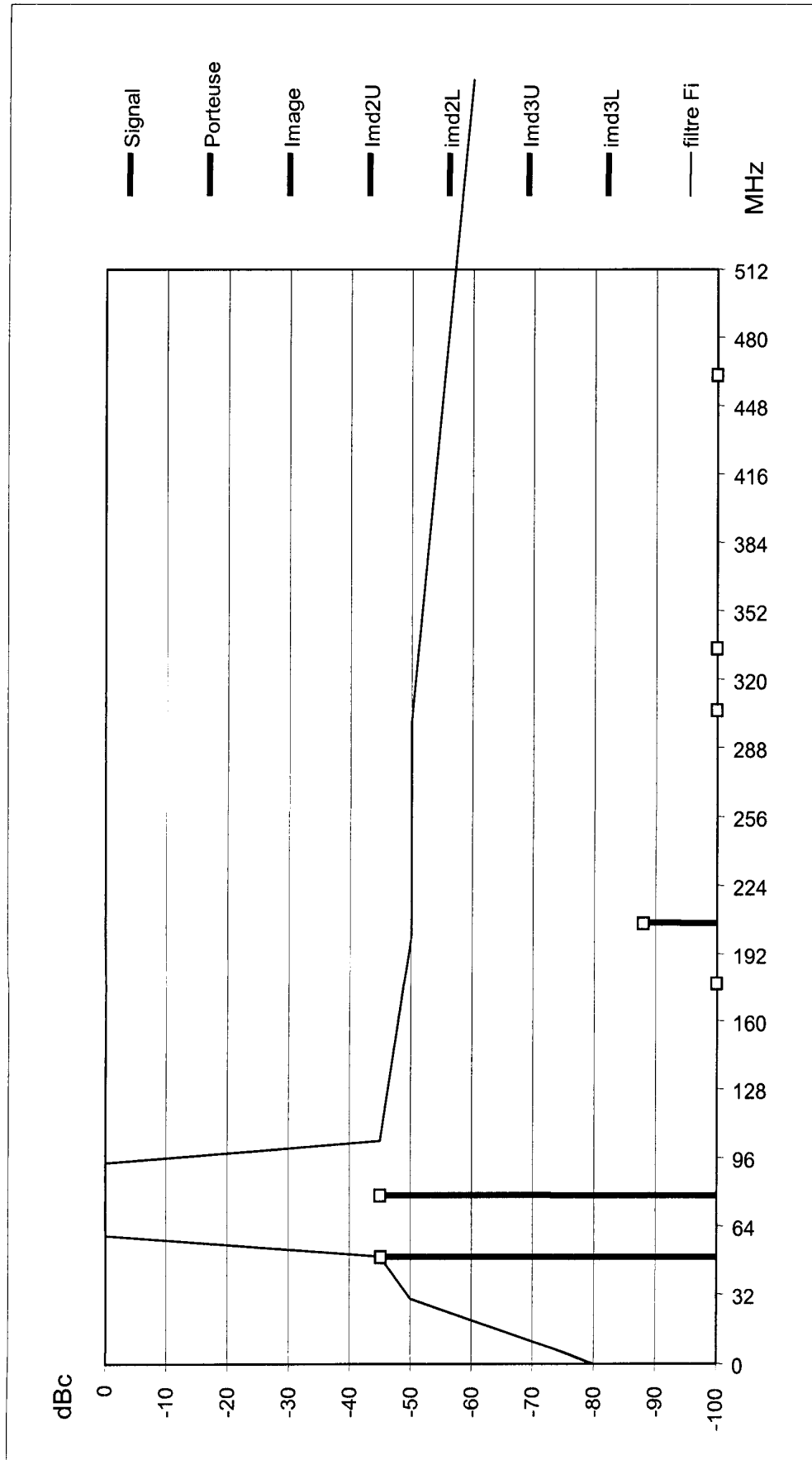


FIG 14

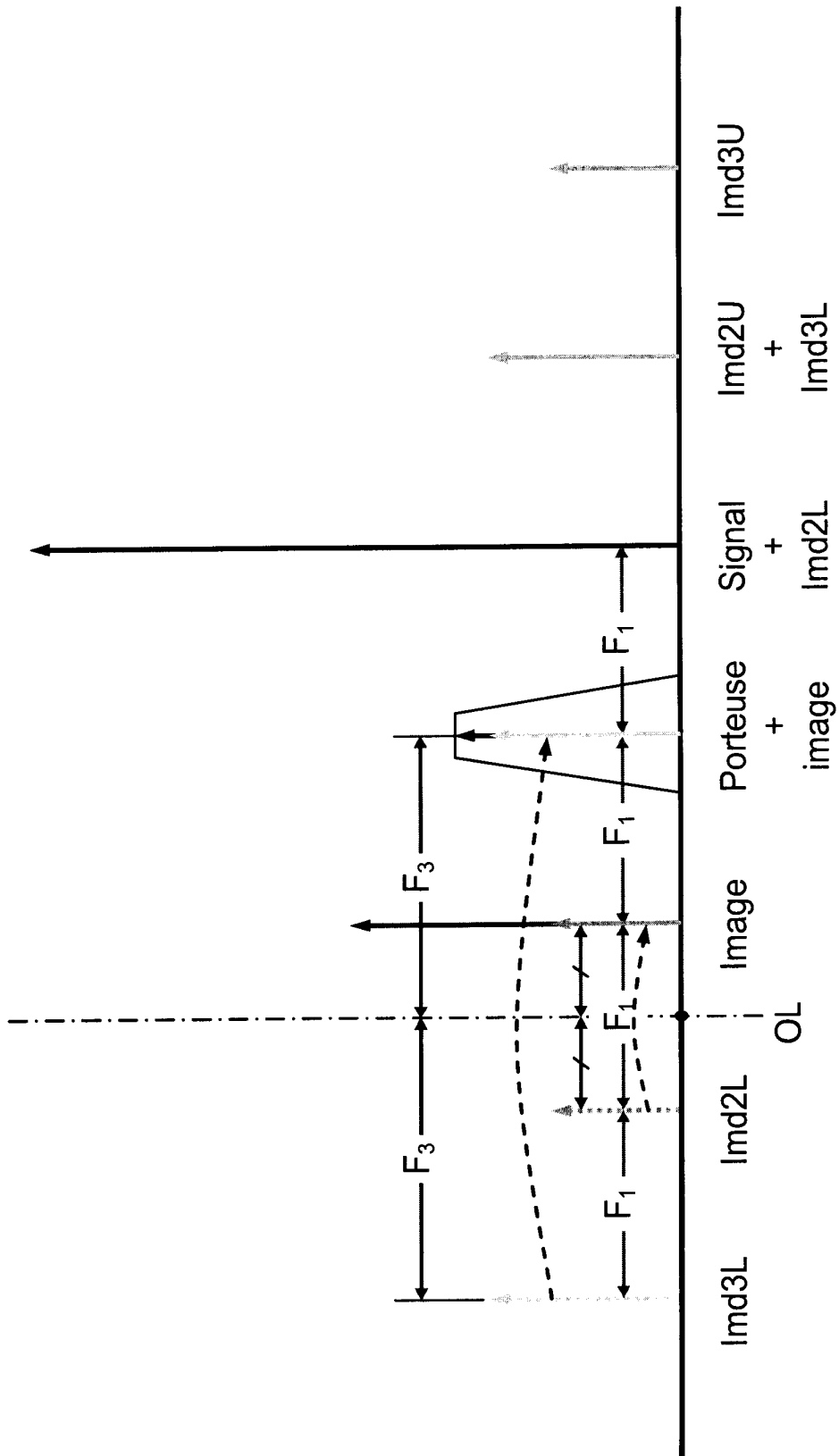


FIG 15

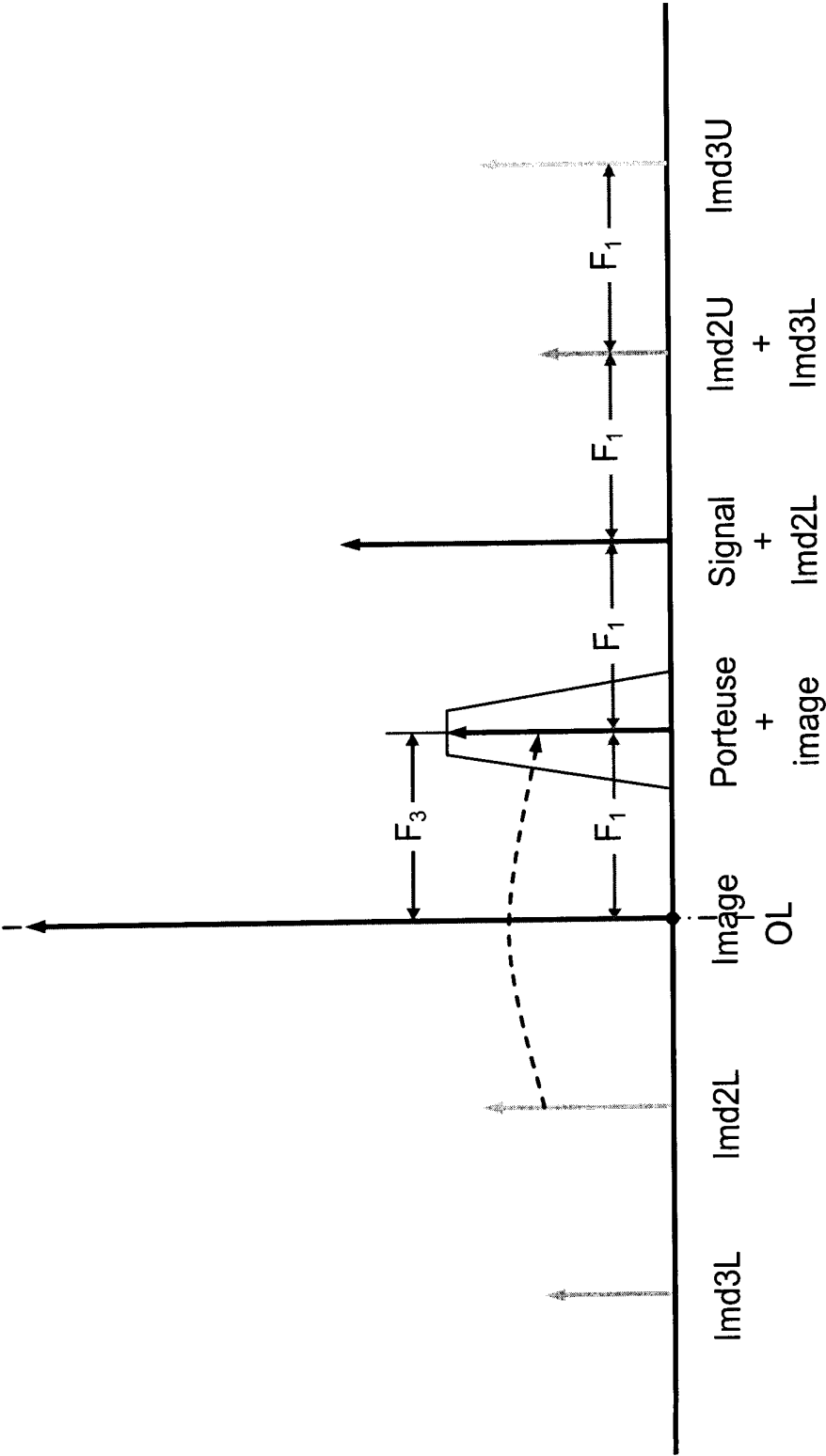


FIG 16

17/24

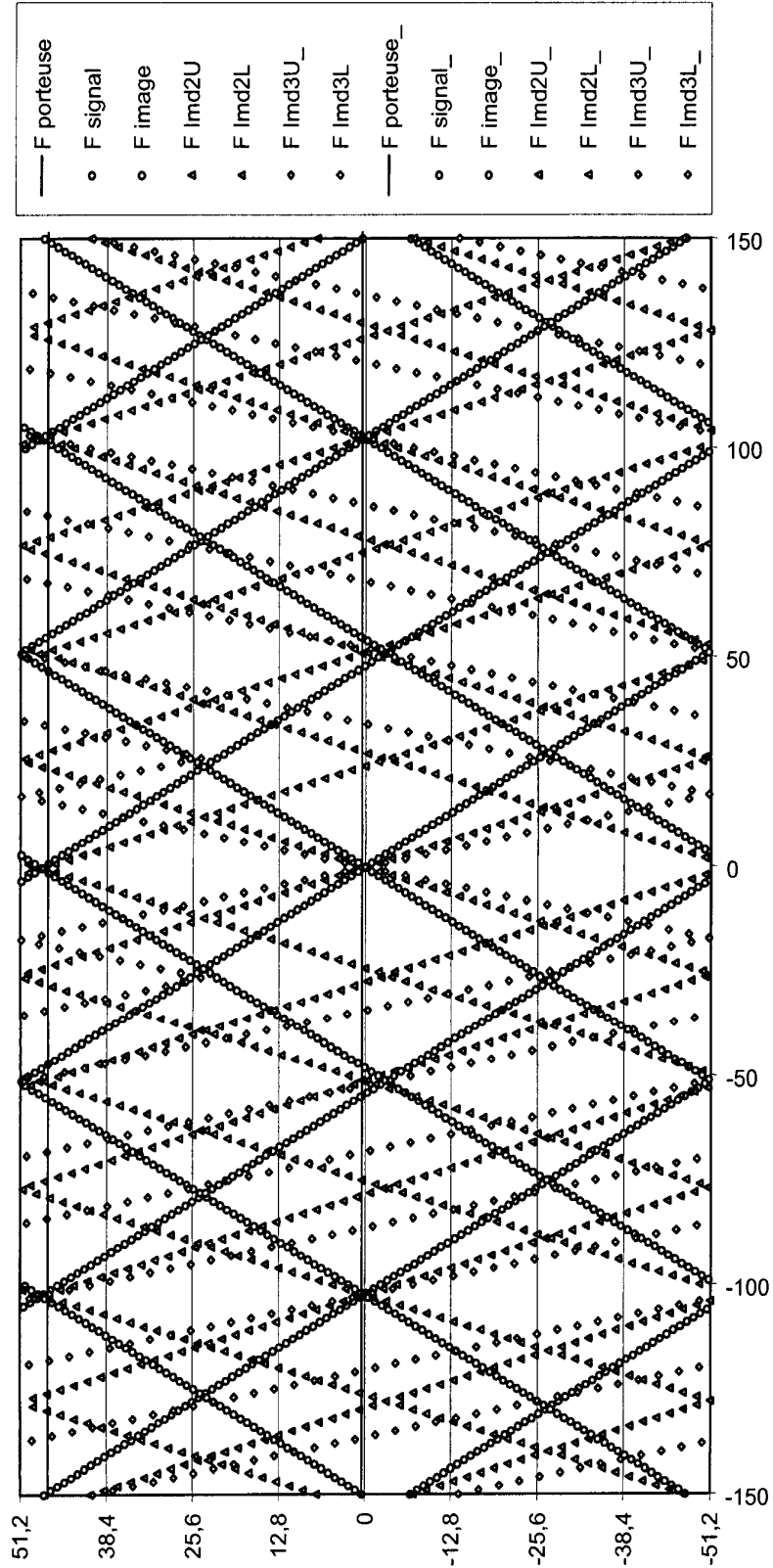


FIG 17

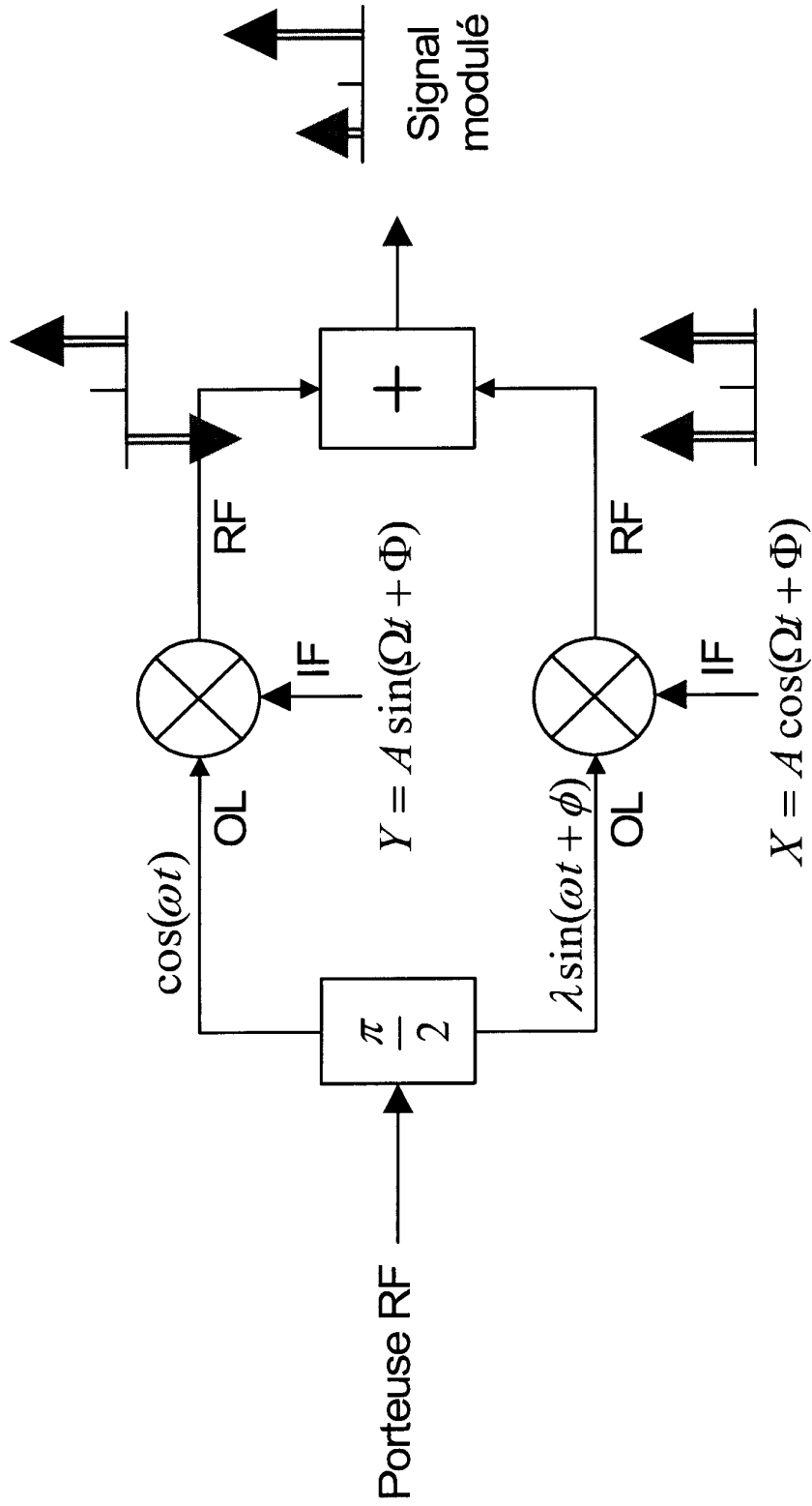


FIG 18

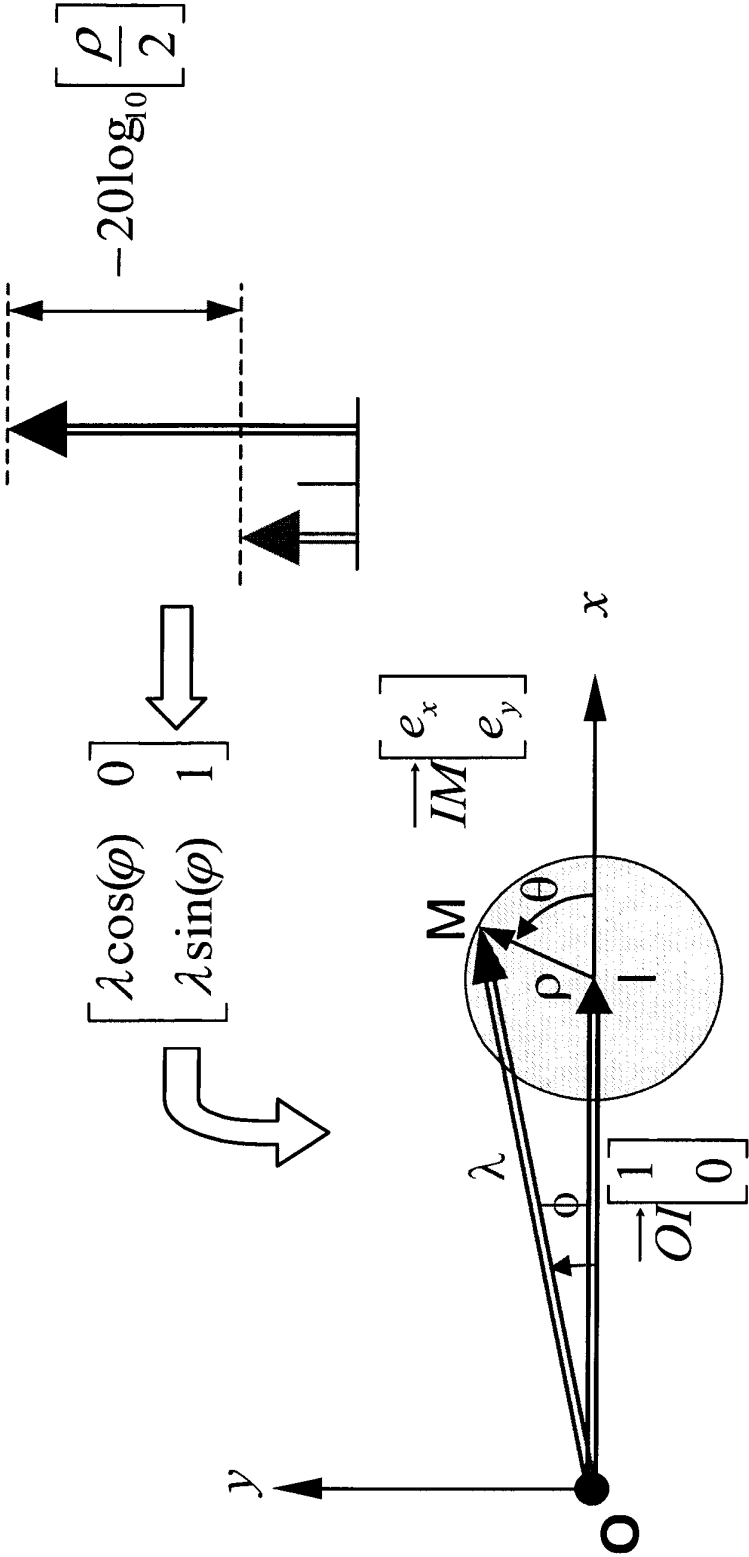


FIG 19

20/24

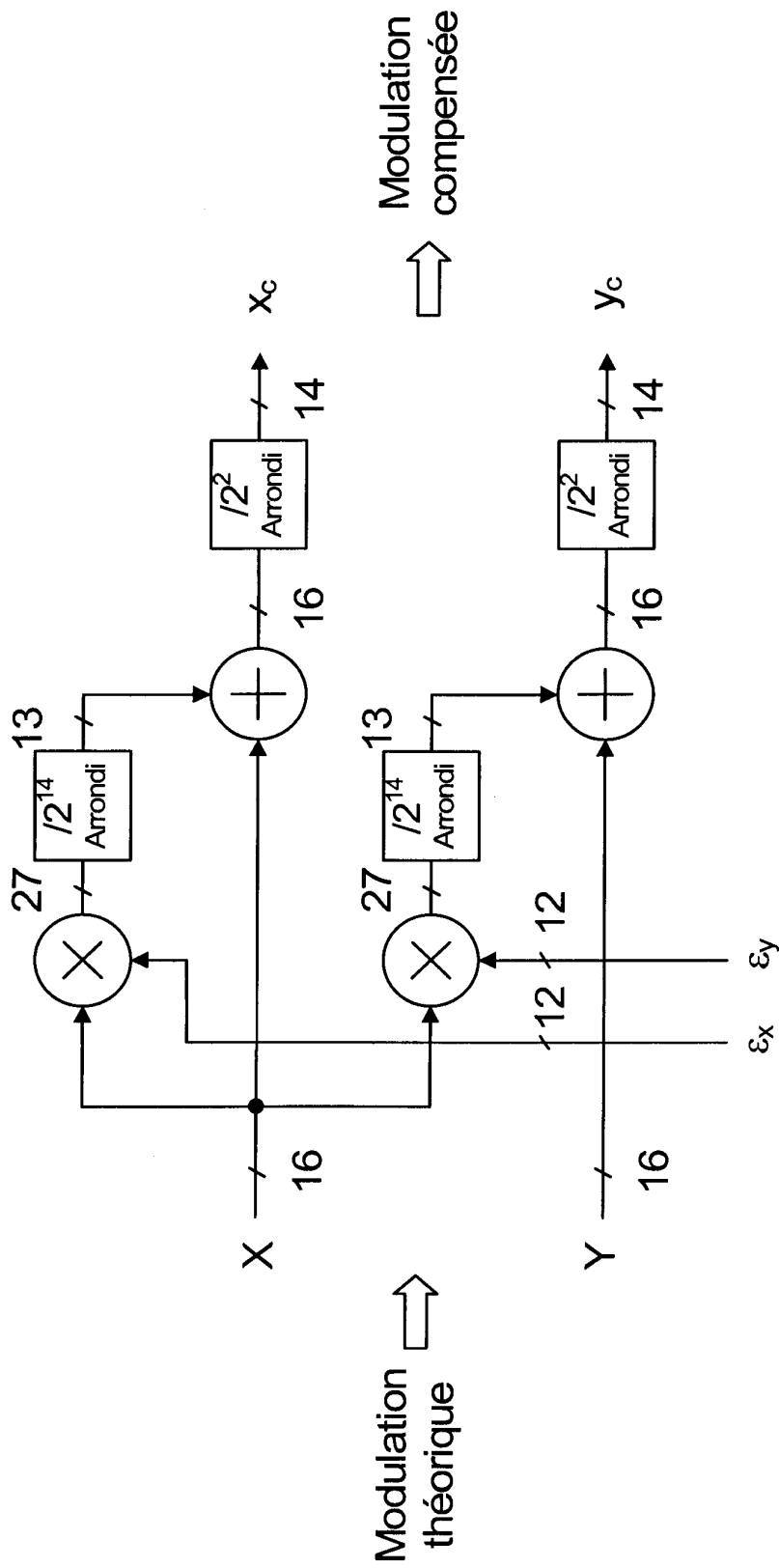


FIG 20

21/24

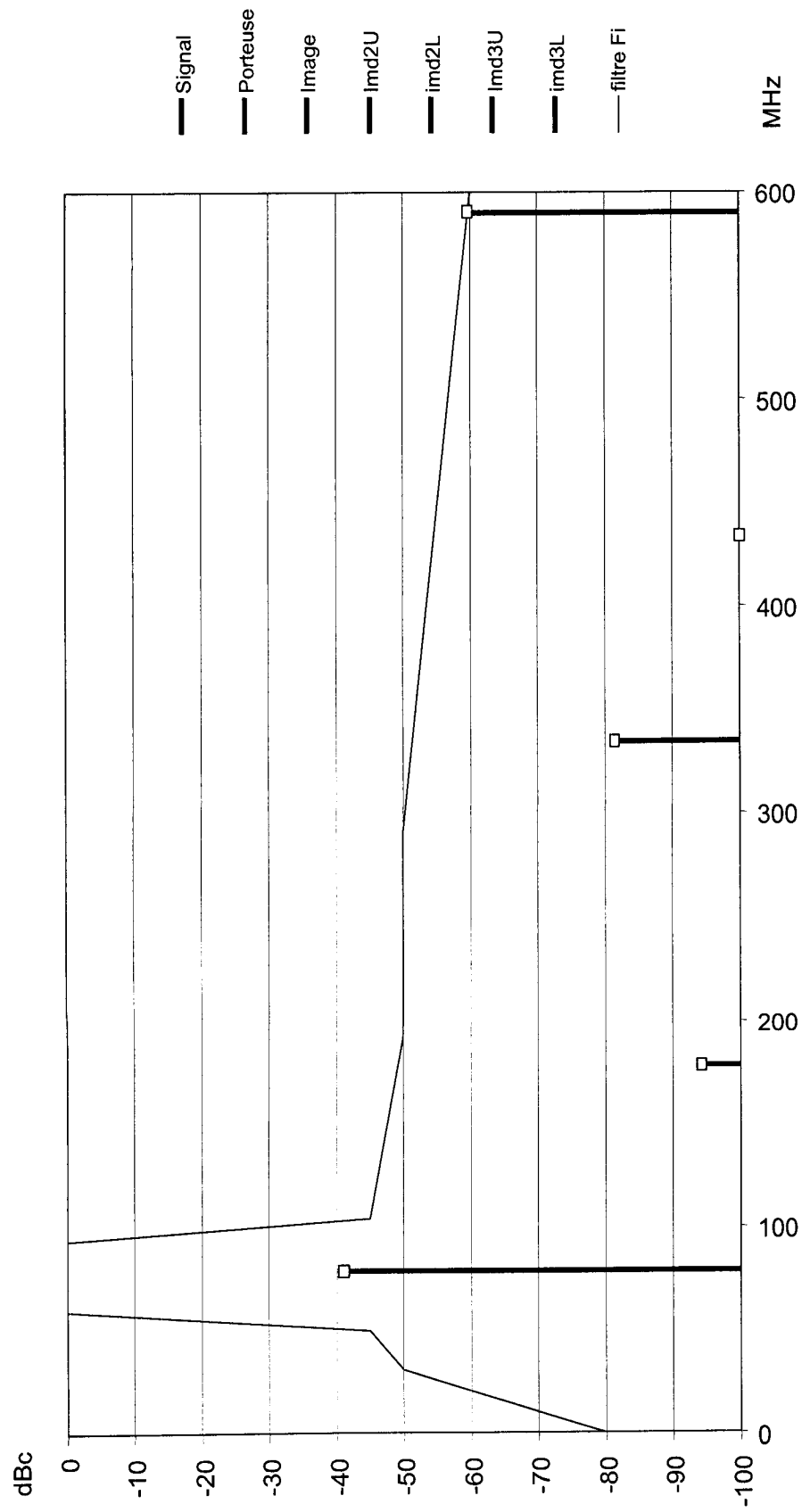


FIG 21

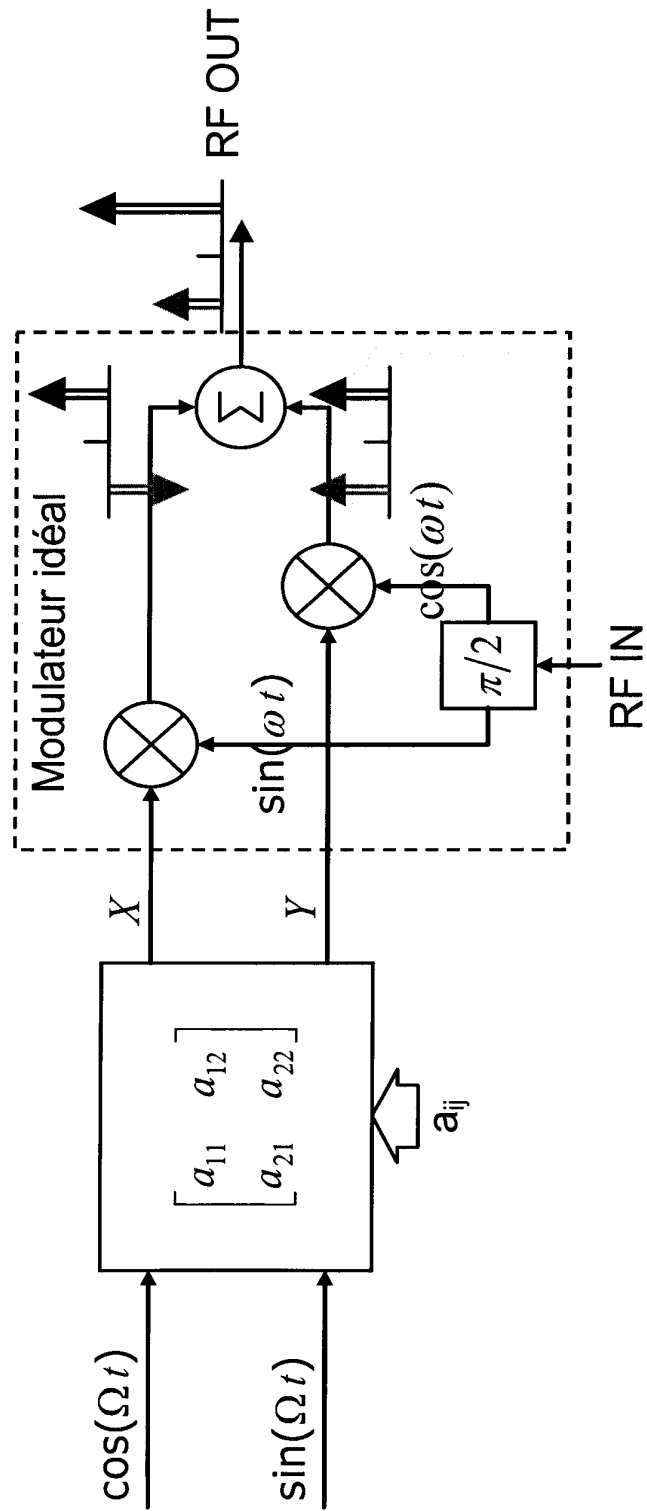


FIG 22

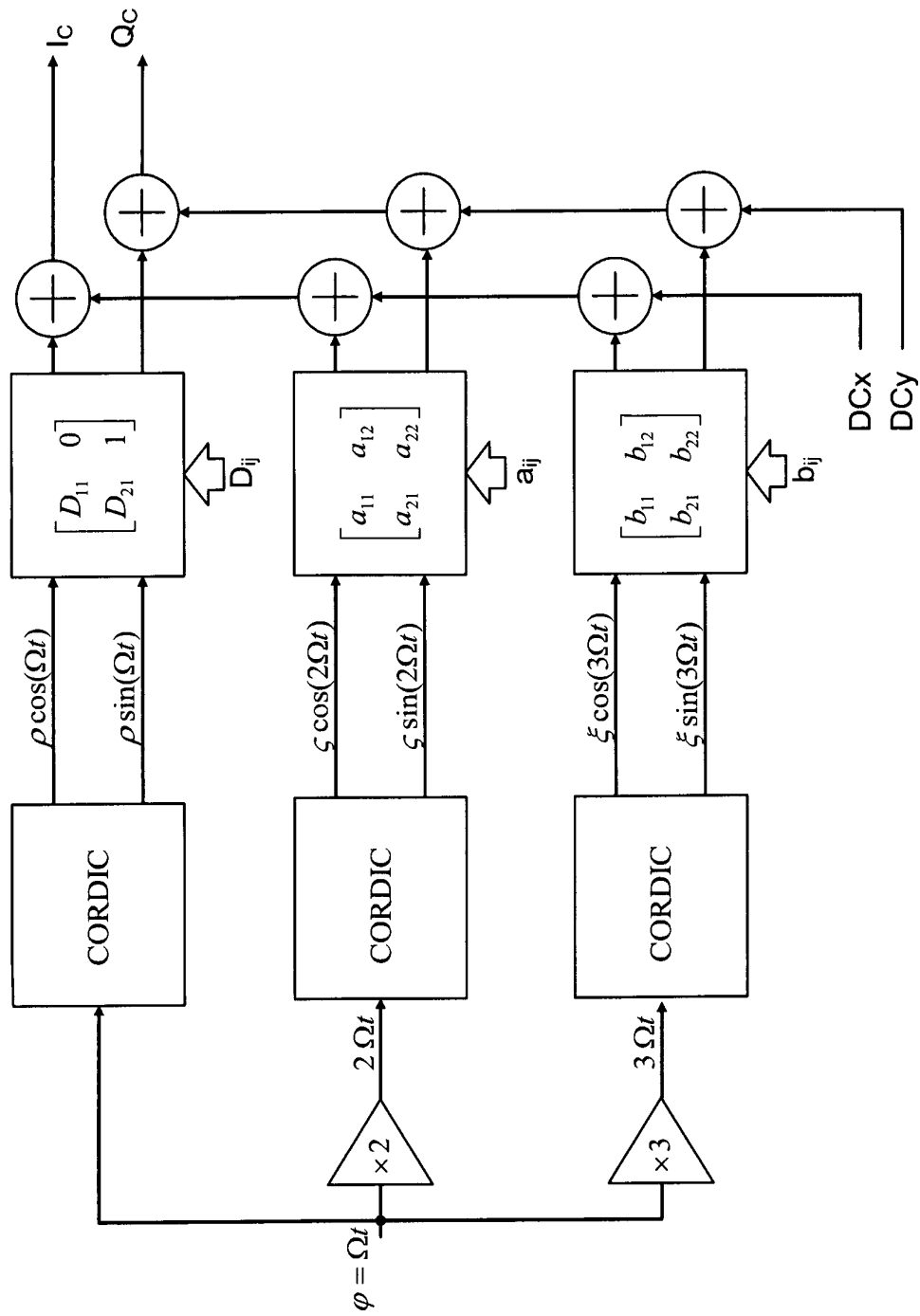


FIG 23

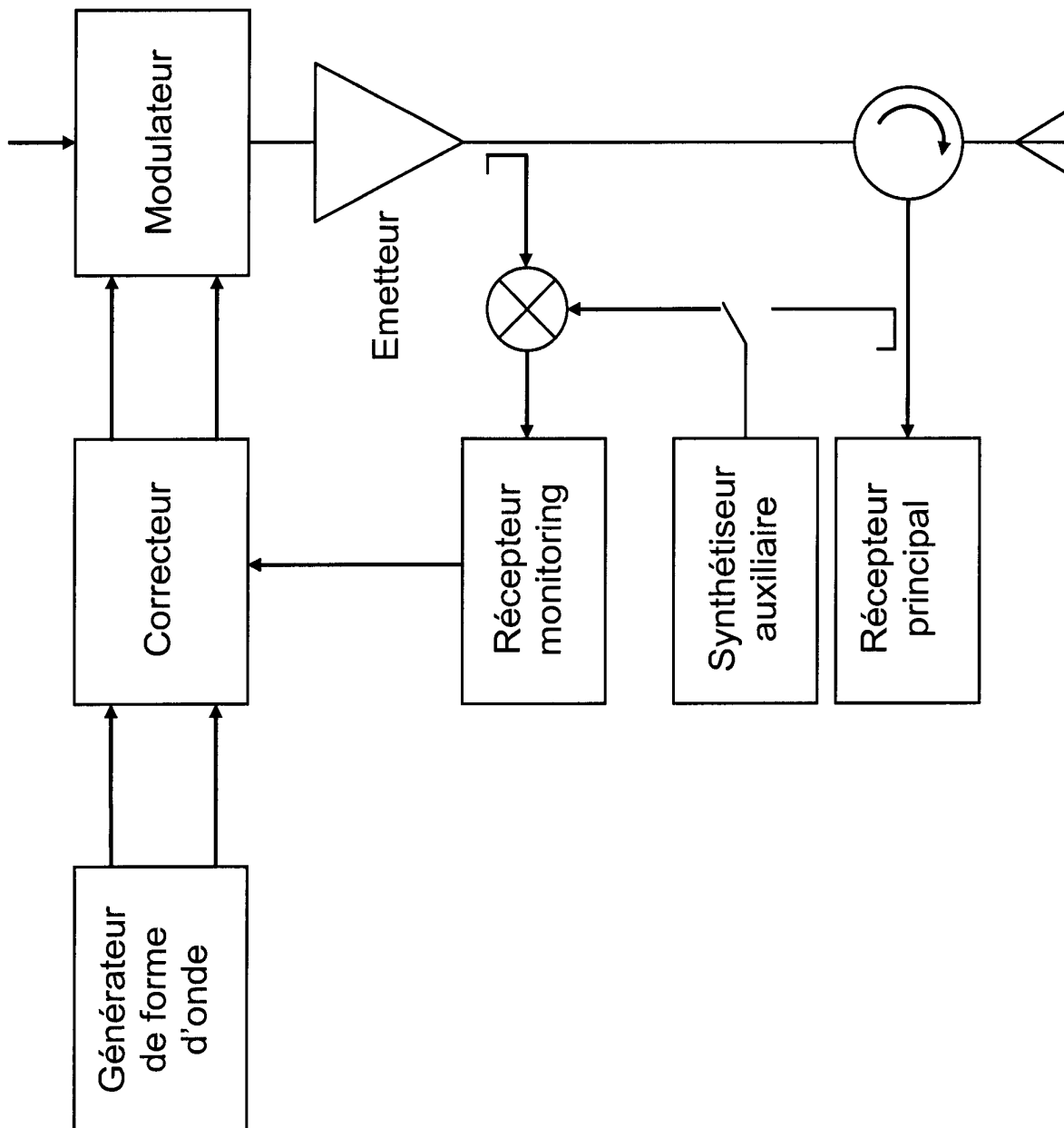


FIG 24



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 709058
FR 0802418

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2006/062324 A1 (NAITO MASASHI [JP] ET AL) 23 mars 2006 (2006-03-23)	1-4	H04B15/06 H04L27/144 H04L27/34
Y	* figures 2-4 * * alinéa [0073] - alinéa [0080] * * alinéa [0089] - alinéa [0093] * * alinéa [0099] - alinéa [0102] * * alinéa [0124] - alinéa [0127] * -----	2,3	
Y	US 2004/136470 A1 (DEBRUYN WILLIAM P [US] ET AL) 15 juillet 2004 (2004-07-15) * figure 2 * * alinéa [0027] - alinéa [0031] * -----	2,3	
A	WO 01/08293 A (WIRELESS SYSTEMS INT LTD [GB]; KENINGTON PETER [GB]) 1 février 2001 (2001-02-01) * figure 1 * -----	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H03D H04L H03C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 janvier 2009		Chave, Julien	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0802418 FA 709058

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **22-01-2009**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2006062324 A1	23-03-2006	JP 2006115463 A	27-04-2006
US 2004136470 A1	15-07-2004	CN 1518209 A	04-08-2004
		DE 102004002239 A1	29-07-2004
		GB 2398683 A	25-08-2004
		KR 20040066003 A	23-07-2004
WO 0108293 A	01-02-2001	AU 5692200 A	13-02-2001
		GB 2352570 A	31-01-2001
		US 6583739 B1	24-06-2003