

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION BELGE

(41) Date de publication : 05/06/2025

(21) Numéro de demande : BE2025/5010

(22) Date de dépôt : 07/01/2025

(62) Divisée de la demande de base :

(62) Date de dépôt demande de base :

(51) Classification internationale : G01S 7/00, G01S 13/00, G01S 13/91

(30) Données de priorité :

(71) Demandeur(s) :

CHINA ACADEMY OF SAFETY SCIENCE AND TECHNOLOGY
SRL
100012, BEIJING
Chine

(72) Inventeur(s) :

ZHANG Hao
100012 BEIJING
Chine

YANG Xiaolin
100012 BEIJING
Chine

MA Haitao
100012 BEIJING
Chine

YU Zhengxing
100012 BEIJING
Chine

REN Guiwen
100012 BEIJING
Chine

HOU Shanshan
100012 BEIJING
Chine

WANG Yu
100012 BEIJING
Chine

(54) Un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO

(57) L'invention concerne un système radar de surveillance de déformation d'ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, et concerne le domaine technique de la surveillance de déformation radar. Comprend : un module de génération et de transmission de signaux radar, un module de réception de signaux radar, un module de traitement de signaux radar et un module de surveillance de déformation ; le module de génération et de transmission de signaux radar est utilisé pour générer des signaux PMCW et le module de réception de signaux radar est utilisé pour recevoir des signaux PMCW dispersés ; par cibles Le signal d'écho radar est obtenu et converti en un signal numérique ; le module de traitement du signal radar est utilisé pour traiter le signal numérique reçu afin d'obtenir une image distance-azimut radar haute résolution ; le module de surveillance de la déformation est utilisé pour calculer le radar.

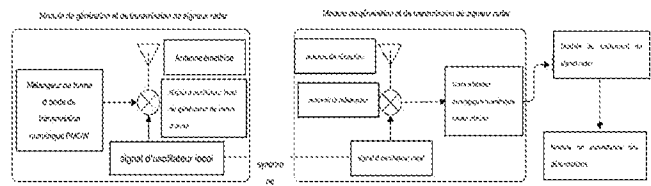


Figure 1

DESCRIPTION

Un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO

5

Domaine technique

La présente invention concerne le domaine de la surveillance des déformations par radar, et plus particulièrement un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO.

10

Technologie de base

On utilise couramment des ondes continues à fréquence balayée (Stepped-Frequency Continuous Wave, SFCW) ou des ondes continues modulées en fréquence (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW) pour effectuer des surveillances de déformation. Cependant, la qualité des images radar bidimensionnelles générées dépend fortement de la plage dynamique de la dimension de distance. Autrement dit, les signaux d'écho des faibles cibles sont souvent masqués par les signaux diffusés des cibles fortement dispersées voisines dans la dimension de distance, ce qui entraîne la perte de détails des cibles dans la zone surveillée lors de la formation de l'image radar et affecte la précision de la surveillance des déformations. Bien qu'il soit possible de réduire les effets des défauts inhérents aux systèmes FMCW et SFCW grâce à des traitements de données comme la fenêtre de temps-fréquence et l'échantillonnage profond, ces méthodes limitent toujours le développement et l'application des radars de surveillance des déformations basés au sol.

Contenu de l'invention

L'objectif de la présente invention est de fournir un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, capable d'améliorer efficacement la précision et la fiabilité de la surveillance des déformations.

Pour réaliser cet objectif, la présente invention propose le système suivant :

Un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, comprenant : un module de génération et d'émission de signaux radar, un module de réception de signaux radar, un module de traitement des signaux radar et un module de surveillance des déformations ;

Le module de génération et d'émission de signaux radar comprend plusieurs groupes de canaux d'émission indépendants les uns des autres. Chaque groupe de canaux d'émission comprend au moins un générateur de forme d'onde numérique PMCW, un mélangeur de forme d'onde d'émission et une antenne d'émission ; le générateur de forme d'onde numérique PMCW est connecté à l'antenne d'émission via le mélangeur de forme d'onde d'émission ; le générateur de forme d'onde numérique PMCW génère un signal de base numérique PMCW et l'envoie au mélangeur de forme d'onde d'émission, lequel génère un signal PMCW qui est ensuite émis par l'antenne d'émission ;

Le module de réception de signaux radar comprend plusieurs groupes de canaux de réception indépendants les uns des autres. Chaque groupe de canaux de réception comprend au moins une antenne de réception, un mélangeur de réception et un convertisseur analogique-numérique haute vitesse ; l'antenne de réception, le mélangeur de réception et le

convertisseur analogique-numérique haute vitesse sont connectés successivement ; l'antenne de réception capte le signal radar réfléchi par la cible et l'envoie au mélangeur de réception ; le mélangeur de réception effectue une modulation de fréquence sur le signal d'écho radar, émettant
5 un signal de base au convertisseur analogique-numérique haute vitesse qui le convertit en signal numérique ;

Le module de traitement des signaux radar est connecté au convertisseur analogique-numérique haute vitesse ; ce module traite les signaux numériques reçus pour obtenir une image radar haute résolution
10 en distance et en azimut ;

Le module de surveillance des déformations est connecté au module de traitement des signaux radar ; ce module détermine la position de la cible déformée et son degré de déformation en fonction de l'image radar haute résolution en distance et en azimut.

15 Optionnellement, le mélangeur de forme d'onde d'émission module le signal de base numérique PMCW avec un signal de fréquence intermédiaire haute fréquence, fonctionnant sur la fréquence centrale du radar, pour générer le signal PMCW.

Optionnellement, le mélangeur de réception module le signal d'écho
20 radar avec le signal local du radar, produisant ainsi le signal de base.

Optionnellement, chaque groupe de canaux d'émission partage le même signal local du radar, tout comme chaque groupe de canaux de réception.

Optionnellement, le module de traitement des signaux radar utilise un
25 filtre de correspondance pour déterminer la distance radiale de la cible.

Optionnellement, le module de traitement des signaux radar utilise une transformation de Fourier FFT ou un algorithme de formation de faisceau numérique DBF pour obtenir l'azimut de la cible.

Optionnellement, le module de surveillance des déformations filtre chaque unité de résolution en distance et en angle dans l'image radar haute résolution, en analysant les amplitudes et phases pour identifier les points cibles.

- 5 En option, le module de surveillance de la déformation compare la différence de phase $\Delta\phi$ de deux signaux réfléchis à partir du même point cible sur la base de l'image distance-azimut radar haute résolution, et détermine la forme du point cible à l'aide de la formule $d = \lambda/(4\pi) \cdot \Delta\phi$. Parmi eux, d est la quantité de déformation ; λ est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.
- 10

Effets techniques de l'invention

- Le système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO proposé par l'invention, en introduisant le système à onde continue modulée en phase (PMCW) dans le radar de surveillance
- 15 des déformations à ouverture réelle, utilise l'orthogonalité des codes numériques PMCW pour améliorer fondamentalement la gamme dynamique de la dimension de distance du radar de surveillance des déformations à ouverture réelle, ce qui améliore la qualité de l'image radar et, par conséquent, la précision de la surveillance des déformations, tout
- 20 en éliminant les risques de sécurité présents dans les processus de surveillance des déformations et en améliorant la fiabilité de la surveillance des déformations.

Description des dessins

- Afin d'expliquer plus clairement les modes de réalisation de la
- 25 présente invention ou les solutions techniques de l'art antérieur, les dessins devant être utilisés dans les modes de réalisation seront brièvement présentés ci-dessous. Évidemment, les dessins dans la description suivante ne sont que quelques-uns des dessins. Selon les

modes de réalisation de la présente invention, pour l'homme du métier, d'autres dessins peuvent être obtenus sur la base de ces dessins sans exercer d'efforts créatifs.

La figure 1 est un diagramme structurel schématique d'un radar de surveillance de déformation à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO
5 fourni par la présente invention ;

La figure 2 est un diagramme distance-azimut à haute résolution d'un radar fourni par la présente invention.

10 **Implémentation détaillée**

Les solutions techniques dans les modes de réalisation de la présente invention seront clairement et complètement décrites ci-dessous en référence aux dessins annexés dans les modes de réalisation de la présente invention. Évidemment, les modes de réalisation décrits ne
15 représentent que certains des modes de réalisation de la présente invention, plutôt que la totalité. les modes de réalisation. Sur la base des modes de réalisation de la présente invention, tous les autres modes de réalisation obtenus par l'homme du métier sans efforts créatifs entrent dans la portée de la protection de la présente invention.

20 Par rapport aux signaux FMCW et SFCW, le PMCW nécessite simplement que chaque canal de réception démodule le signal en utilisant le code correspondant au canal d'émission pour effectuer la séparation des canaux. Cette méthode présente des avantages notables en termes de résistance aux interférences et de haute résolution en distance. Le MIMO
25 (Multiple-Input Multiple-Output) repose sur des antennes à éléments multiples, où les signaux émis par chaque antenne d'émission sont orthogonaux. Au niveau de la réception, un filtre de correspondance est utilisé pour séparer les signaux reçus, qui sont une superposition des

signaux émis par différentes antennes d'émission. Cela permet de former une aperture virtuelle équivalente à un produit du nombre d'antennes d'émission et de réception, ce qui améliore efficacement la résolution angulaire du radar de surveillance des déformations au sol. Par
5 conséquent, l'objectif de cette invention est de fournir un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, afin d'améliorer la précision et la fiabilité de la surveillance des déformations.

Pour rendre les objectifs, les caractéristiques et les avantages de
10 l'invention plus clairs, une description détaillée de l'invention est donnée ci-dessous avec les figures et les modes de réalisation spécifiques.

Comme montré dans la figure 1, l'invention concerne un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO (Phase-Modulated Continuous Wave-Multi-input
15 Multi-Output). Le système comprend les modules suivants : module de génération et d'émission de signaux radar, module de réception de signaux radar, module de traitement des signaux radar, et module de surveillance des déformations.

Plus précisément, le module de génération et d'émission de signaux
20 radar comprend plusieurs groupes de canaux d'émission indépendants les uns des autres. Chaque groupe de canaux d'émission comprend au moins un générateur de forme d'onde numérique PMCW, un mélangeur de forme d'onde d'émission et une antenne d'émission. Le générateur de forme d'onde numérique PMCW est connecté à l'antenne d'émission via le
25 mélangeur de forme d'onde d'émission. Le générateur de forme d'onde numérique PMCW est utilisé pour générer des signaux de base numériques PMCW orthogonaux entre eux. Chaque générateur de forme d'onde numérique PMCW dans chaque groupe indépendant de canaux

d'émission peut générer indépendamment un ensemble de signaux de base numériques PMCW, et ces générateurs peuvent être contrôlés pour produire des signaux de base numériques PMCW orthogonaux entre eux. Le générateur de forme d'onde numérique PMCW envoie les signaux de base numériques PMCW générés au mélangeur de forme d'onde d'émission, qui module ces signaux avec un signal de fréquence haute sinusoïdal local fonctionnant à la fréquence centrale du radar, produisant ainsi le signal PMCW. Ensuite, le signal PMCW est irradié via l'antenne d'émission.

10 L'expression complexe numérique en bande de base du signal PMCW peut être exprimée comme suit :

$$s(t) = \sum_{l=0}^{L-1} m(l) \text{rect}\left(\frac{t-nT_c}{T_c}\right) e^{j2\pi f_c t} \quad (1)$$

Parmi eux, $m(l)$ est le l-ième élément de code orthogonal ; T_c est la largeur de l'élément de code ; L est la longueur du code ; f_c est la fréquence porteuse ; t est le temps ; rect est la fonction de fenêtre rectangulaire unitaire.

Pour deux séquences de codes orthogonaux PMCW m_i et m_j des canaux de transmission i et j , leur corrélation mutuelle satisfait :

$$R_{ij}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} m_i(l) m_j^*(l-k) = 0, \forall k \quad (2)$$

20 Parmi eux, l'exposant * représente le nombre complexe conjugué ; $R_{ij}(k)$ est le coefficient de corrélation mutuelle des codes orthogonaux PMCW de deux canaux de transmission i et j ; $m_i(l)$ est le l-ième élément de code orthogonal du i-ème canal de transmission ; k est le délai entre les séquences de symboles,

25 c'est-à-dire que le nombre de décalages cycliques ; $m_j(l-k)$ est le l-ième élément de code orthogonal du j-ème canal de transmission après un délai. Théoriquement, en sélectionnant un codage approprié, les

séquences de symboles des différents canaux de transmission sont strictement orthogonales et la corrélation croisée est égale à 0 pour toute valeur de décalage cyclique k .

Le mélange du signal numérique en bande de base PMCW et du
5 signal porteur peut être exprimé comme suit :

$$s_{tx}(t) = s(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (3)$$

Parmi eux, $s_{tx}(t)$ est le signal mixte transmis.

En tant qu'exemple concret d'implémentation, les formes d'onde d'émission du mélangeur de chaque groupe de canaux d'émission
10 partagent le même signal d'oscillateur local du système radar. Entre différents canaux d'émission, une série de codes orthogonaux est générée à l'aide d'un codage orthogonal, incluant mais sans s'y limiter des séquences M , des codes de Gold ou des codes de Hadamard. En calculant les coefficients de corrélation croisée entre différents fragments
15 de code au sein du groupe, on sélectionne M fragments de code ayant les coefficients de corrélation croisée les plus faibles, où M correspond au nombre de canaux d'émission. Supposons que le générateur de codes orthogonaux produise un fragment de code noté $m_1(l)$, $m_2(l)$,
... $m_i(l)$, ... $m_M(l)$, ... Le principe de sélection optimale des codes consiste
20 à rechercher M groupes de fragments de code, de manière à ce que pour tout i et j , la condition de la formule (2) soit satisfaite.

Ensuite, un modulateur de phase 1 bit est utilisé pour moduler les fragments de code sur chaque canal d'émission.

Basée sur la technologie de modulation d'émission PMCW décrite
25 dans cette invention, les formes d'onde émises par chaque canal d'émission sont orthogonales au même instant, permettant ainsi une émission simultanée à grande échelle par des réseaux d'émission sans

interférence mutuelle.

Le module de réception des signaux radar comprend plusieurs groupes de canaux de réception indépendants. Chaque groupe de canaux de réception indépendants comprend au moins une antenne de réception,
 5 un mélangeur de réception et un convertisseur analogique-numérique haute vitesse (ADC, Analog-Digital Converter). Ces composants sont connectés successivement dans cet ordre : l'antenne de réception, le mélangeur de réception, et le convertisseur analogique-numérique haute vitesse.

10 L'antenne de réception est utilisée pour capter le signal PMCW réfléchi par une cible, générant ainsi un signal d'écho radar, qui est ensuite transmis au mélangeur de réception. Le mélangeur de réception effectue une modulation par mélange entre le signal d'écho radar et le signal d'oscillateur local du système radar, produisant un signal de bande de base
 15 en sortie. Ce signal de bande de base est envoyé au convertisseur analogique-numérique haute vitesse. Ce dernier convertit le signal de bande de base modulé par mélange en un signal numérique.

The echo signal $s_{rx}(t)$ received by the receiving antenna can be expressed as:

$$20 \quad s_{rx}(t) = \alpha s_{tx}(t - \tau) e^{-j2\pi f_c(t-\tau)} + n(t) \quad (4)$$

Parmi eux, α est le coefficient de réflexion cible ; τ est le retard aller-retour ; $n(t)$ est le bruit additif ; $f_c(t - \tau)$ est la fréquence porteuse retardée ; $s_{tx}(t - \tau)$ est le signal de transmission mixte retardé ;

À titre d'exemple concret d'implémentation, le mélangeur de réception
 25 de chaque groupe de canaux de réception partage le même signal d'oscillateur local du système radar. Le signal d'oscillateur local partagé par le mélangeur de forme d'onde d'émission de chaque groupe de canaux d'émission et celui partagé par le mélangeur de réception de chaque

groupe de canaux de réception sont des signaux synchronisés.

Comme illustré sur la figure 1, le module de traitement des signaux radar est connecté au convertisseur analogique-numérique haute vitesse (ADC). En tant que radar basé sur le principe d'interférométrie micro-ondes pour la surveillance des déformations, le rôle principal du module de traitement des signaux radar de cette invention est de traiter les signaux numériques reçus afin d'obtenir des signaux complexes représentant les échos radar réfléchis par toutes les cibles situées à différentes distances radiales et angles d'azimut dans la zone de surveillance radar. Ces données permettent de générer une image radar haute résolution Distance-Azimut (Range-Azimuth, R-A), également appelée image R-A du radar, comme illustré sur la figure 2. Le module de traitement des signaux radar de cette invention réalise principalement deux fonctions : la mesure de la distance et la mesure de l'angle.

La réponse impulsionnelle $h(t)$ du filtre adapté au signal PMCW peut être exprimée comme suit :

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} m^*(l) \text{rect}\left(\frac{t-nT_c}{T_c}\right) e^{-j2\pi f_c t} \quad (5)$$

Le signal de sortie $y(t)$ après filtrage d'adaptation peut être exprimé comme suit :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{rx}(t) h^*(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Parmi eux, $h(t - \tau)$ est la réponse impulsionnelle retardée.

Comme pour les autres radars, dans un radar PMCW (Phase Modulated Continuous Wave), différents délais correspondent à différentes distances cibles. Ainsi, en appliquant un filtrage adapté avec des retards spécifiques au signal de sortie susmentionné, il est possible d'obtenir le spectre de distance du radar. Sur cette base, un traitement multi-canaux pour la mesure angulaire permet d'obtenir une image radar haute

résolution distance-azimut.

Mesure de distance : Le module de traitement du signal radar applique un filtre adapté correspondant à la forme d'onde PMCW à chaque signal numérique émis par les canaux de réception, afin de déterminer la distance radiale de la cible. Un pic d'écho ne peut être formé que lorsque le signal numérique de la bande de base PMCW du filtre adapté correspond exactement au signal reçu (signal numérique). Cette invention atteint ainsi deux objectifs : 1. Séparation des échos des différents canaux d'émission: Chaque canal de réception mélange les signaux émis simultanément par différents canaux d'émission, dont les formes d'onde numériques sont orthogonales. Par conséquent, il est possible de sélectionner une forme d'onde de filtre adaptée correspondant au canal d'émission i , ce qui permet d'extraire, pour chaque canal de réception, l'écho correspondant au canal d'émission i . Ainsi, les échos des différents signaux émis peuvent être séparés dans les canaux de réception. 2. Détermination de la distance radiale: Pour le signal d'écho provenant du canal d'émission i , le temps écoulé entre l'émission, la réflexion par la cible, et la réception par un canal de réception est τ_i . Lors du passage par le filtre adapté, seul un filtre correspondant à un délai τ_i identique peut générer un pic correspondant à cette cible. Comme la vitesse de la lumière est constante, en obtenant le délai τ_i , la distance radiale de la cible peut être calculée.

Le signal de sortie filtré adapté A du i ème canal d'émission correspondant à chaque groupe de canaux de réception peut être exprimé comme suit :

$$y_i(t) = \alpha_i \sum_{l=0}^{L-1} |m_i(l)|^2 \text{rect}\left(\frac{t-lT_c-\tau_i}{T_c}\right) e^{-j2\pi f_c \tau_i} + \sum_{j \neq i} \alpha_j \sum_{l=0}^{L-1} m_i(l) m_j^*(l) \text{rect}\left(\frac{t-lT_c-\tau_j}{T_c}\right) e^{-j2\pi f_c \tau_j} + n'(t) \quad (7)$$

Parmi eux, le deuxième terme est le terme d'interférence du j -ème

canal de transmission avec le j-ème canal de transmission. Puisque les codes PMCW des deux canaux de transmission sont orthogonaux, alors :

$$\sum_{l=0}^{L-1} m_i(l) m_j^*(l) = 0 \quad (8)$$

Par conséquent, le terme d'interférence est complètement supprimé et la formule (7) peut être exprimée comme suit :

$$y_i(t) = \alpha_i \sum_{l=0}^{L-1} |m_i(l)|^2 \text{rect}\left(\frac{t - lT_c - \tau_i}{T_c}\right) e^{-j2\pi f_c \tau_i} + n'(t) \quad (9)$$

Parmi eux, α_i est le coefficient de réflexion cible correspondant au i-ème canal de transmission ;

τ_i est le retard aller-retour correspondant au i-ème canal de transmission ; $n'(t)$ est le terme d'interférence de bruit blanc gaussien.

$$\tau_i = \frac{2R_i}{c} \quad (10)$$

Parmi eux, R_i est la distance radiale de la cible correspondant au i-ème canal d'émission ; c est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre. A partir de là, la distance radiale de la cible peut être obtenue.

Mesure d'angle : le radar de surveillance de déformation d'ouverture réelle de la présente invention est un système MIMO. En définissant les positions de M antennes d'émission et de N antennes de réception dans le radar de surveillance de déformation d'ouverture réelle, il peut être synthétisé en un réseau équivalent de $M \times N$ canaux. Dans les mêmes conditions, plus le nombre de canaux dans le réseau équivalent est grand, plus la résolution angulaire ou la précision angulaire de l'image radar R-A est élevée. Plus précisément, le module de traitement du signal radar peut utiliser des algorithmes de mesure d'angle tels que la transformée de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) ou le Digital Beamforming (DBF) pour obtenir l'angle d'azimut de la cible.

L'expression du spectre de puissance après traitement de mesure

d'angle FFT est :

$$P(\theta) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_m b_n^* e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[(m-1)d_{tx}\sin\theta + (n-1)d_{rx}\sin\theta]} \quad (11)$$

Parmi eux, a_m et b_n sont respectivement les coefficients de poids de la m-ième antenne d'émission et de la n-ième antenne de réception ; d_{tx} et d_{rx} représentent respectivement l'espacement des antennes du réseau d'émission et du réseau de réception ; $(m-1)d_{tx}$ et $(n-1)d_{rx}$ représentent respectivement le déplacement de la m-ième antenne d'émission et de la n-ième antenne de réception par rapport à la position de référence du réseau ; θ représente l'angle entre la direction des ondes dans l'espace et la direction radiale positive du réseau. Le pic du spectre de puissance correspond à l'angle d'azimut de la cible.

Le module de surveillance des déformations est connecté au module de traitement du signal radar. Ce module est utilisé pour déterminer la position des points cibles ayant subi une déformation et leur amplitude de déformation, en se basant sur l'image R-A du radar.

Après avoir obtenu l'image R-A du radar, le module de surveillance des déformations évalue et filtre l'amplitude et la phase de chaque pixel de l'image R-A (c'est-à-dire chaque unité de résolution en distance et chaque unité de résolution en angle). Généralement, les pixels de haute qualité sont sélectionnés comme points cibles (points PS) en fonction de l'écart-type d'amplitude et de phase.

Étant donné que chaque trame radar produit une image R-A, il est possible de surveiller en continu la phase de chaque point PS. Les petites déformations dans la zone correspondant à un point PS entraînent une modification de la phase du signal reçu. En comparant la différence de phase $\Delta\phi$ entre deux signaux réfléchis successifs d'un même point cible, on peut ainsi déterminer l'amplitude de la déformation de ce point cible. Tout de suite:

$$d = \lambda / (4\pi) \times \Delta\varphi \quad (12)$$

Parmi eux, d est la quantité de déformation ; λ est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.

Comparé à la technologie de surveillance de déformation radar existante, le radar de surveillance de déformation à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO proposé par la présente invention présente les avantages suivants.

1. Classification par type de modulation d'onde :

Les radars de surveillance des déformations existants utilisent généralement une modulation en SFCW (Stepped-Frequency Continuous Wave) ou FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Cette invention introduit pour la première fois la modulation PMCW (Phase Modulated Continuous Wave) dans les radars de surveillance des déformations. Les radars de surveillance des déformations basés sur SFCW ou FMCW présentent un phénomène grave d'expansion des lobes secondaires dans la dimension de distance pour les cibles à forte réflexion. Un objectif fortement réfléchissant situé à une distance R peut générer des lobes secondaires qui dépassent le seuil de détection radar sur une large zone autour de sa position. Le rapport entre l'énergie des lobes secondaires et celle du lobe principal représentant la position réelle de la cible exprime la plage dynamique dans la dimension de distance du radar. Si l'énergie d'un lobe secondaire pour une cible forte dépasse celle d'une cible réelle située à la distance correspondante (ou est proche de cette énergie), cette cible réelle, plus faiblement réfléchissante, sera masquée sur l'image radar, ce qui affecte considérablement la qualité de l'imagerie. Dans le cas du système FMCW, des facteurs tels que la linéarité du signal émis, le bruit de phase et l'utilisation de fonctions de fenêtre dans le traitement du signal entraînent la génération de lobes secondaires plus

importants.

Le rapport des lobes latéraux $SLRR$ du signal SFCW/FMCW peut être exprimé comme suit :

$$SLRR = 20 \log_{10} \left| \sum_{l=0}^{L-1} w[l] e^{-j\pi l(l+1)T_s/T_m} \right| \quad (13)$$

- 5 Parmi eux, $w[l]$ est la fonction de fenêtre de distance ; T_s est l'intervalle d'échantillonnage de distance ; T_m est la période de modulation.

Dans le système PMCW de la présente invention, des échos cibles à différentes distances correspondent à des signaux de bande de base
10 numériques PMCW avec des retards différents, de sorte que les lobes latéraux de portée sont considérablement supprimés, améliorant ainsi fondamentalement la plage dynamique des dimensions de portée. amélioration de la qualité des images.

- Le rapport des lobes latéraux $SLRR_{PMCW}$ du signal PMCW peut être
15 exprimé comme suit :

$$SLRR_{PMCW} = \frac{1}{L} \quad (14)$$

- Parmi eux, L est la longueur du code PMCW. Dans le scénario d'application de la présente invention, la valeur L peut être supérieure à un million, de sorte que la plage dynamique de dimension de distance de
20 PMCW est nettement meilleure que celle de SFCW/FMCW.

2. Classification selon le principe d'imagerie dans la dimension angulaire du radar :

- Les radars de surveillance des déformations existants peuvent être classés en deux catégories : radars interférométriques à ouverture
25 synthétique et radars interférométriques à ouverture réelle.

Les radars interférométriques à ouverture synthétique nécessitent généralement des composants mécaniques complexes et de haute

précision, tels que des radars interférométriques à ouverture synthétique sur rail (Rail-InSAR) ou en arc (Arc-InSAR).

Les radars interférométriques à ouverture réelle utilisent généralement la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour l'imagerie dans
5 la dimension angulaire.

Les radars interférométriques à ouverture réelle présentent plusieurs avantages par rapport à ceux à ouverture synthétique : absence de composants mobiles, facilité d'intégration, haute fiabilité, et des bénéfices significatifs en termes de taille, poids et coût. Ils représentent ainsi l'une
10 des principales directions de développement des radars de surveillance des déformations.

Cependant, les radars MIMO à ouverture réelle présentent une plage dynamique inférieure dans la dimension angulaire par rapport aux radars à ouverture synthétique. Cela s'explique par le fait qu'un radar interférométrique à ouverture synthétique n'a besoin que d'une seule paire
15 d'antennes émission-réception, et qu'il n'existe aucun couplage entre les antennes dans l'ouverture synthétique équivalente. En revanche, les radars à ouverture réelle nécessitent un grand nombre d'antennes émission-réception, et le couplage entre ces antennes réduit la plage
20 dynamique angulaire.

Cette invention introduit la technologie PMCW-MIMO à ouverture réelle dans les radars interférométriques. Par rapport aux radars à ouverture réelle utilisant les technologies SFCW ou FMCW, le radar PMCW présente un avantage significatif : les formes d'onde numériques
25 de la bande de base PMCW sont orthogonales, et les signaux de couplage entre les antennes ne peuvent pas s'accumuler de manière cohérente après passage par le filtre adapté. Par conséquent, la plage dynamique angulaire est nettement améliorée, atteignant un niveau proche de celui

des radars interférométriques à ouverture synthétique.

(3) Le radar d'interférométrie à ouverture synthétique nécessite au moins une fois un balayage mécanique pour obtenir une image radar, ce qui prend généralement plus de 10 minutes. Le radar à ouverture réelle, étant exempt de balayage mécanique, peut théoriquement réduire considérablement le temps de formation de l'image. Cependant, les radars d'interférométrie à ouverture réelle existants, afin de réduire les interférences entre les signaux d'émission, utilisent généralement une technique d'émission en alternance, c'est-à-dire qu'ils activent chaque canal d'émission à tour de rôle. Cela entraîne deux problèmes : 1) Il est impossible d'intégrer davantage de canaux d'émission, car leur émission en alternance prolongerait le temps total d'imagerie radar. 2) Il n'est pas possible d'obtenir un temps de formation d'image plus rapide et un taux de rafraîchissement plus élevé. Par conséquent, tout comme le radar à ouverture synthétique, il est impossible de surveiller les déformations rapides qui se produisent entre deux images radar successives (c'est-à-dire le phénomène de perte de cohérence). La présente invention utilise la méthode PMCW pour la surveillance des déformations par interférométrie. Son avantage réside dans le fait qu'elle s'appuie sur l'orthogonalité des signaux numériques PMCW dans la bande de base pour réaliser une émission simultanée sur un grand nombre de canaux d'émission, ce qui permet de réduire le temps de formation de chaque image radar à moins d'une minute, garantissant ainsi des résultats plus précis et réduisant l'impact de la perte de cohérence.

(4) Dans les solutions technologiques existantes pour la surveillance des déformations, le radar à interférométrie à ouverture synthétique, en raison de ses composants mobiles, rencontre des problèmes de volume, de consommation d'énergie, de coût et de fiabilité, ce qui empêche son

utilisation à long terme et sans surveillance dans divers scénarios d'application. En revanche, la technologie MIMO à ouverture réelle existe mais présente des difficultés à résoudre le problème de l'émission simultanée sur un grand nombre de canaux, ce qui limite le nombre de canaux pouvant être intégrés et entraîne des problèmes tels qu'une faible gamme dynamique des angles, ce qui donne des performances relativement faibles. L'invention décrite dans ce document, combinant les avantages des différentes technologies en termes de performance, de fiabilité et de coût, constitue une solution de radar de surveillance des déformations qui peut être largement déployée et utilisée sans surveillance.

En résumé, afin d'améliorer de manière significative la qualité de l'imagerie radar, l'invention propose de manière innovante un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, réalisant un contraste élevé dans l'imagerie et permettant une surveillance des déformations à haute gamme dynamique, augmentant ainsi la sécurité et la fiabilité de la surveillance des déformations. Le radar de surveillance des déformations à ouverture réelle proposé dans cette invention peut surveiller à distance les déformations microscopiques des cibles dans le champ de vision du radar par rapport au radar, et fournir des alertes de risques, protégeant ainsi la vie et les biens. Les objets typiques à surveiller comprennent les pentes abruptes, les mines à ciel ouvert, les barrages de résidus, les barrages, les ponts et les bâtiments de grande hauteur.

En résumé, afin d'améliorer de manière significative la qualité de l'imagerie radar, l'invention propose de manière innovante un système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, réalisant un contraste élevé dans l'imagerie et permettant

une surveillance des déformations à haute gamme dynamique. Cela améliore la sécurité et la fiabilité de la surveillance des déformations. Le radar de surveillance des déformations à ouverture réelle proposé dans cette invention peut surveiller à distance les déformations microscopiques des cibles dans le champ de vision du radar par rapport au radar, et fournir des alertes de risques, protégeant ainsi la vie et les biens. Les objets typiques à surveiller comprennent les pentes abruptes, les mines à ciel ouvert, les barrages de résidus, les barrages, les ponts et les bâtiments de grande hauteur.

10 Cet article utilise des exemples spécifiques pour illustrer les principes et les méthodes de mise en œuvre de la présente invention. La description des modes de réalisation ci-dessus est uniquement utilisée pour aider à comprendre le procédé et l'idée centrale de la présente invention en même temps, pour ceux de la présente invention. Conformément à la présente invention, l'homme du métier connaîtra des changements dans les procédés de mise en œuvre spécifiques et dans la portée d'application des idées. En résumé, le contenu de cette description ne doit pas être interprété comme une limitation de la présente invention.

REVENDEICATIONS

1. Système de radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO, caractérisé par le fait qu'il comprend : un module de génération et d'émission de signal radar, un module de
- 5 réception de signal radar, un module de traitement de signal radar et un module de surveillance des déformations ; le module de génération et d'émission de signal radar comprend plusieurs groupes de canaux d'émission indépendants les uns des autres ; chaque groupe de canaux d'émission comprend au moins un générateur de forme d'onde numérique
- 10 PMCW, un mélangeur de forme d'onde d'émission et une antenne d'émission ; le générateur de forme d'onde numérique PMCW est connecté à l'antenne d'émission via le mélangeur de forme d'onde d'émission ; le générateur de forme d'onde numérique PMCW génère un signal numérique de base PMCW et l'envoie au mélangeur de forme
- 15 d'onde d'émission, lequel génère un signal PMCW qui est irradié et émis via l'antenne d'émission; le module de réception de signal radar comprend plusieurs groupes de canaux de réception indépendants les uns des autres ; chaque groupe de canaux de réception comprend au moins une antenne de réception, un mélangeur de réception et un convertisseur
- 20 analogique-numérique à haute vitesse ; l'antenne de réception, le mélangeur de réception et le convertisseur analogique-numérique sont connectés de manière séquentielle ; l'antenne de réception reçoit le signal radar de retour après réflexion par l'objectif et l'envoie au mélangeur de
- 25 de retour, envoie un signal de base au convertisseur analogique-numérique et le convertit en un signal numérique ; le module de traitement de signal radar est connecté au convertisseur analogique-numérique à haute vitesse ; le module de traitement de signal

radar est utilisé pour traiter les signaux numériques reçus, afin d'obtenir une image radar haute résolution en distance et azimuth; le module de surveillance des déformations est connecté au module de traitement de signal radar ; le module de surveillance des déformations est utilisé pour
5 déterminer la position et la quantité de déformation du point cible en fonction de l'image radar haute résolution en distance et azimuth.

2. Système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que le mélangeur de forme d'onde d'émission module en fréquence le signal de
10 base numérique PMCW avec un signal local à haute fréquence fonctionnant à la fréquence centrale du radar, et sort un signal PMCW.

3. Système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que le mélangeur de réception module en fréquence le signal radar de retour
15 avec le signal local du système radar, et sort un signal de base.

4. Système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que les mélangeurs de forme d'onde d'émission de chaque groupe de canaux d'émission partagent le même signal local du système radar ; et les
20 mélangeurs de réception de chaque groupe de canaux de réception partagent également le même signal local du système radar.

5. Système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que le module de traitement de signal radar applique un filtre adapté
25 correspondant à la forme d'onde PMCW à chaque signal numérique sorti par les canaux de réception, afin de déterminer la distance radiale du cible.

6. Système radar de surveillance des déformations à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que le module de traitement de signal radar utilise un algorithme de transformation de Fourier FFT ou de formation de faisceau numérique DBF pour déterminer l'angle azimutal du cible.

7. Système radar de surveillance de déformation à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 1, caractérisé en ce que le module de surveillance de déformation détecte chaque unité de résolution de distance et chaque unité de résolution de distance de l'image distance-azimut haute résolution du radar ; l'unité de résolution effectue un jugement et un filtrage d'amplitude et de phase pour déterminer le point cible.

8. Système radar de surveillance de déformation à ouverture réelle basé sur PMCW-MIMO selon la revendication 7, caractérisé en ce que le module de surveillance de déformation compare deux signaux de réflexion du même point cible sur la base de l'image distance-azimut haute résolution du radar ; la différence de phase $\Delta\varphi$ est utilisée pour déterminer l'ampleur de la déformation du point cible à l'aide de la formule $d = \lambda / (4\pi) \times \Delta\varphi$; parmi eux, d est la quantité de déformation ; λ est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.

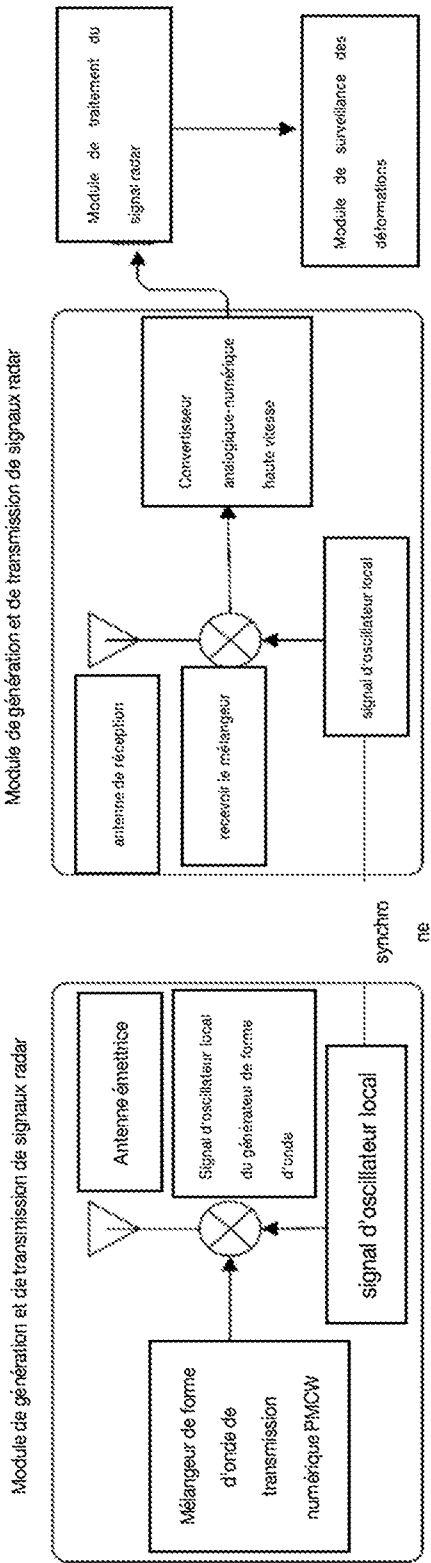


Figure 1

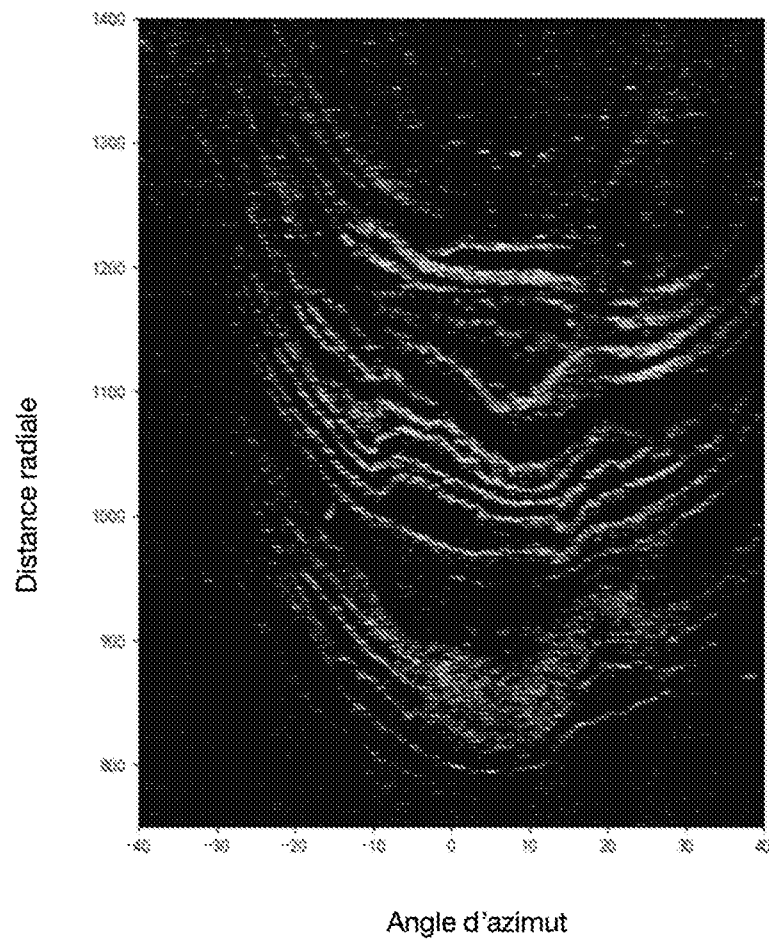


Figure 2