

DESCRIPTION

TITRE : Système de détection d'objets longue portée

Domaine technique :

- 5 [0001] La présente invention se situe dans le domaine des systèmes de détection d'objets, ou radars. Elle concerne en particulier les systèmes de détection utilisés pour la localisation à trois dimensions (3D).

Technique antérieure :

- 10 [0002] Les forces armées déployées sur les théâtres d'opérations sont confrontées à des menaces à courte portée de plus en plus diversifiées (roquettes, mortiers, missiles, drones, petits avions, véhicules, fantassins...). Les moyens de surveillance actuellement disponibles sont généralement adaptés à la détection et localisation d'un type de menace particulier, notamment en terme de capacité
15 de distance de détection.

[0003] Quand les menaces sont diverses, il est souvent nécessaire de déployer plusieurs types de systèmes hétérogènes en parallèle pour les traiter, ce qui multiplie l'empreinte logistique et humaine lors de la mise en œuvre.

- [0004] Ces systèmes sont souvent des radars courte portée (à deux ou trois
20 dimensions) dont l'aérien est à quelques mètres au-dessus du sol. Il n'existe pas à ce jour de solutions radar unique prenant en compte la diversité de menaces.

- [0005] Si les menaces évoluent dans le temps, par exemple, en étant de plus en plus petites (SER réduite) ou en devant être détecté plus loin (augmentation de portée) pour améliorer le préavis de détection, il est alors nécessaire de faire
25 évoluer/changer les systèmes mis en place.

- [0006] Les solutions permettant d'améliorer la performance en portée d'un radar sont peu nombreuses. Elles consistent à :
- soit augmenter la puissance d'émission et la taille de l'antenne du radar. Ces solutions conduisent rapidement à des systèmes complexes qui ont un impact
30 direct sur le coût de l'équipement et son empreinte logistique. A titre d'exemple,

doubler la surface d'antenne ou la puissance d'émission (+3dB) ne fait gagner que 20% sur la portée du système radar face à une cible de référence, la portée d'un radar évoluant suivant la distance avec une loi en d^4 , avec d la distance ;

- soit augmenter la visibilité radar, en installant le radar :

- 5 o sur un point haut, comme par exemple un point géographique, mais un tel point n'est pas nécessairement disponible,
- o en haut d'un mât de grande hauteur ou d'un pylône, cependant, le poids du système radar fait porter des contraintes importantes sur la structure d'un tel mât, son déploiement et sa hauteur maximale,
- 10 o sous un dispositif aéroporté tel qu'un ballon rempli d'un gaz léger comme l'hélium. Dans ce cas, le dimensionnement du ballon est directement lié à la charge utile à emporter. A titre d'exemple, une charge de 35kg nécessite un ballon de quelques mètres de longueur, tandis qu'une charge de 200kg nécessite un ballon de grande
- 15 dimension (supérieure à 25 mètres). La mise en œuvre est donc complexe dès lors que la masse du radar est supérieure à quelques centaines de kilogrammes, un ballon de grande dimension présentant des coûts d'acquisition et de déploiement importants. En outre, la consommation énergétique et le refroidissement de ces dispositifs
- 20 nécessitent des lignes d'alimentation à forte section, dont le poids peut conduire au dépassement de la charge admissible. Il en est de même lorsque le dispositif aéroporté est de nature différente, comme par exemple un drone.

[0007] Un but de l'invention est donc de proposer un dispositif de détection ayant

25 une portée étendue sur les roquettes, ou autre type de missiles, mais également une capacité simultanée de détection et de localisation 3D sur les menaces aériennes telles que les drones, hélicoptères et ULM, et /ou les véhicules et/ou les humains en déplacement, tout en veillant à ce que le coût du dispositif, son poids, sa complexité d'implémentation et sa complexité de déploiement soient

30 plus faibles que pour les solutions connues.

[0008] La figure 1 représente très sommairement les différents composants d'un dispositif de détection. Celui-ci comprend un dispositif de traitements radar 101,

en charge d'une part de générer ou de jouer un signal radar, et d'autre part de recevoir un ou plusieurs signaux échos, et de mettre en œuvre des algorithmes de traitement du signal afin de localiser les objets dans un environnement à 2 dimensions (2D) ou à trois dimensions (3D).

5 [0009] Le dispositif de traitements radar est relié à un dispositif d'émission 102 configuré pour recevoir du dispositif de traitements radar un signal à émettre, et pour l'émettre selon une configuration donnée, comprenant une puissance d'émission, des instants d'émission, une fréquence d'émission et/ou une direction d'émission. Le dispositif d'émission 102 comprend donc un convertisseur
10 numérique vers analogique (CNA) afin de convertir les signaux qui lui sont transmis par le dispositif de traitements radar lorsque ceux-ci sont numériques, une chaîne radiofréquence d'amplification et de transposition du signal sur fréquence porteuse lorsque celui-ci est reçu en bande de base ou sur une fréquence intermédiaire, ainsi qu'une ou plusieurs antennes d'émission, comme
15 par exemple une antenne omnidirectionnelle telle qu'un dipôle ou d'une antenne directionnelle telle qu'une antenne patch ou une antenne réseau.

[0010] Le dispositif de traitements radar 101 reçoit des signaux depuis un dispositif de réception de signaux 103. Celui-ci est configuré pour recevoir des signaux en écho des signaux émis sur un ou plusieurs capteurs. Chaque capteur comprend
20 au moins un élément rayonnant, omnidirectionnel dans un plan ou directionnel selon la configuration. Ces capteurs peuvent être mis en réseau pour former une antenne directive. Le dispositif de réception de signaux 103 est configuré pour faire l'acquisition des signaux reçus depuis un ou plusieurs capteurs selon des paramètres de configuration donnés, comme par exemple des instants de
25 réception, une fréquence de réception et/ou une direction de réception, et pour les transmettre au dispositif de traitements radars à des fins d'analyse. Chaque capteur est relié à une chaîne radiofréquence configurée pour filtrer et amplifier le signal reçu, et pour le transposer en bande de base ou en fréquence intermédiaire lorsque c'est nécessaire. Si le signal transmis au dispositif de
30 traitements radar est un signal numérique, chaque capteur est également relié à un convertisseur de signal analogique vers numérique (CAN). Alternativement, la chaîne radiofréquence et/ou le convertisseur analogique vers numérique peuvent être intégrés au capteur.

[0011] Les différents éléments du système de détection peuvent être co-localisés ou regroupés en un seul équipement : on parle alors de radar monostatique. Ils peuvent être également éclatés en plusieurs équipements distincts : on parle alors de radar bistatique lorsque l'émission et la réception sont séparées. Les radars co-localisés utilisent généralement les mêmes antennes pour émettre et recevoir les signaux, afin de diminuer la taille, le poids et le coût de l'équipement.

[0012] Le dispositif de traitements radar 101 est un dispositif de calculs, de préférence numérique, se présentant généralement sous la forme d'un logiciel embarqué sur un composant tel qu'un processeur, un processeur de signal numérique (plus connu sous le sigle anglais de DSP pour « Digital Signal Processor »), ou un circuit spécialisé tel qu'un ASIC (acronyme anglais pour « Application Specific Integrated Circuit ») ou un FPGA (sigle anglais pour « Field-Programmable Gate Array »).

[0013] A partir des signaux émis par le dispositif d'émission et des signaux reçus du dispositif de réception, le dispositif de traitements radar détecte et suit des cibles présentes dans l'espace à surveiller. Celles-ci sont caractérisées par une distance, un azimut et une élévation, et éventuellement par d'autres paramètres comme par exemple leur vitesse Doppler. Pour cela, de nombreuses méthodes sont connues de l'état de la technique. Parmi elles existent les traitements d'interférométries de phase ou d'amplitude, comme par exemple les réseaux de Adcock, les techniques de formation de faisceaux, ou les traitements dits de haute résolution, tel que par exemple l'algorithme MUSIC (acronyme anglais pour Multiple Signal Classification).

[0014] Ces différentes méthodes font peser des contraintes particulières sur le nombre d'éléments rayonnants des antennes d'émission 102 et de réception 103, et sur leurs dispositions : par exemple, un réseau de Adcock requiert plusieurs antennes espacées d'un écart proportionnel à la longueur d'onde des signaux, une antenne réseau comprend une pluralité d'éléments rayonnants espacés d'une distance proportionnelle à la longueur d'onde. Le dimensionnement des systèmes radar est donc lié de près à la fréquence des signaux utilisés. En particulier, les radars basse fréquence nécessitent des antennes d'émission et de réception de grande tailles et très espacées, tandis que les radars haute fréquence sont plus compacts.

[0015] En outre, la détection en trois dimensions nécessite la mise en œuvre d'une antenne directive mécaniquement mobile selon deux axes ou d'éléments rayonnants répartis dans deux plans perpendiculaires.

5 Résumé de l'invention :

[0016] Afin de répondre aux problèmes de l'art antérieur, l'invention décrit un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon trois dimensions comprenant :

- un dispositif d'émission configuré pour émettre des signaux selon un procédé d'émission colorée dans un premier plan,
- un dispositif de réception comprenant au moins deux capteurs disposés dans un deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
- des moyens de traitements (230, 330) des signaux émis et reçus.

[0017] Les moyens de traitements sont configurés pour détecter la présence d'objets et estimer leur direction et distance :

- dans le premier plan à partir des signaux reçus d'au moins un des capteurs du dispositif de réception en utilisant la coloration du signal émis,
- dans le deuxième plan à partir des signaux reçus d'au moins deux des capteurs du dispositif de réception.

[0018] Le dispositif d'émission et le dispositif de réception sont séparés, le dispositif de réception étant surélevé par rapport au dispositif d'émission.

[0019] Avantageusement, et de manière à permettre une détection sur l'ensemble du premier plan, chaque capteur comprend un élément rayonnant omnidirectionnel dans le premier plan.

25

[0020] Selon un mode de réalisation, le premier plan est un plan horizontal, dans lequel les capteurs du dispositif de réception sont disposés dans un plan vertical. Avantageusement, les capteurs du dispositif de réception sont alors reliés par un câble et suspendus sous un dispositif aéroporté permettant de les surélever, tel qu'un ballon gonflable ou un drone. Avantageusement, un seul capteur est utilisé

30

pour détecter la présence d'objets et estimer leur direction et distance dans le premier plan, de préférence le capteur le plus élevé.

[0021] Selon un autre mode de réalisation, le premier plan est un plan vertical et les capteurs du dispositif de réception sont disposés dans un plan horizontal.

- 5 [0022] Les capteurs du dispositif de réception peuvent alors être disposés en ligne, le système disposant en outre de moyens de suppression d'ambiguïtés de la position des objets par rapport aux capteurs dans le plan horizontal.

- 10 [0023] Les capteurs du dispositif de réception peuvent également être disposés de manière à former un triangle, la détection de la présence d'objets et l'estimation de leur direction et distance dans le plan horizontal étant réalisées pour chaque branche du triangle respectivement, puis combinées de manière à supprimer des ambiguïté sur la position des objets par rapport aux capteurs dans le plan horizontal.

- 15 [0024] Avantageusement, les capteurs du dispositif de réception sont reliés aux moyens de traitements par une liaison en fibre optique, les capteurs comprenant en outre de moyens de conversion des signaux reçus vers des signaux optiques. L'utilisation d'une liaison en fibre optique permet de diminuer la masse du câble permettant de transmettre les signaux acquis par les capteurs de l'équipement de
20 réception, et donc la masse de l'ensemble de l'équipement de réception.

- [0025] La détection de la présence d'objets et l'estimation de leur direction et distance dans le deuxième plan peuvent être réalisées par mise en œuvre d'un procédé d'interférométrie ou d'un traitement haute résolution sur les signaux
25 reçus des au moins deux capteurs de l'antenne de réception. De manière alternative, elle peut être mise en œuvre par l'exploitation de la directivité d'une antenne réseau formée par les au moins deux capteurs de l'antenne de réception.

- [0026] L'invention décrit également un procédé de mise en œuvre d'une détection de
30 présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon trois dimensions dans un système de détection comprenant :

- un dispositif d'émission configuré pour émettre des signaux selon un procédé d'émission colorée dans un premier plan,
- un dispositif de réception comprenant au moins deux capteurs disposés dans un deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
- 5 - des moyens de traitements des signaux émis et reçus.

[0027] Le procédé comprend les étapes de :

- émission d'un signal selon un procédé d'émission coloré dans un premier plan,
- réception de signaux depuis au moins deux capteurs disposés dans un
- 10 deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
- mise en œuvre d'un procédé de détermination de la présence d'objets et d'estimation leur direction et distance dans le premier plan par exploitation des propriétés de coloration du signal reçu par au moins un des capteurs, et dans le deuxième plan à partir des signaux reçus d'au moins deux des capteurs.

15

Brève description des figures :

[0028] L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques et avantages apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit, donnée à titre non limitatif, et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- 20 - la figure 1 représente un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance, ou radar, tel que connu de l'état de la technique ;
- la figure 2 représente un premier mode de réalisation d'un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance
- 25 selon l'invention ;
- la figure 3 représente un deuxième mode de réalisation d'un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon l'invention ;
- la figure 4 représente un troisième mode de réalisation d'un système de
- 30 détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon l'invention ;

- la figure 5a représente les pertes liées aux franges d'interférences, pour un équipement situé au niveau du sol ;
 - la figure 5b représente les pertes liées aux franges d'interférences, pour un équipement situé à 50 mètres de hauteur ;
- 5 - la figure 6 représente les étapes d'un mode de réalisation d'un procédé de mise en œuvre d'une détection d'objets en trois dimensions selon l'invention.

[0029] Par la suite, lorsque des mêmes références sont utilisées dans des figures différentes, elles désignent les mêmes éléments.

10 **Description détaillée :**

[0030] Afin de répondre aux problèmes posés par les dispositifs de l'art antérieur, l'invention fait le constat que le dispositif d'émission a un poids beaucoup plus important que le dispositif de réception. Ceci est dû en particulier à la présence obligatoire d'amplificateurs de forte puissance, d'éléments d'électronique de puissance tels que des condensateurs à forte capacité, d'éléments nécessaires
15 pour assurer le refroidissement des amplificateurs, ainsi que de lignes d'alimentation à forte section nécessaires pour alimenter l'ensemble. L'invention propose de séparer la partie émission de la partie réception, à la manière d'un radar bistatique, et de surélever en priorité le dispositif de réception. De cette
20 manière, la masse de la charge à surélever est réduite dans des proportions importantes, ce qui simplifie la mise en œuvre du système, et permet d'améliorer les conditions de propagation pour la partie réception à moindre coût. En outre, surélever l'antenne de réception permet de limiter significativement les franges d'interférence et les pertes pour les cibles à basse altitude.

25 [0031] Pour permettre la localisation en trois dimensions d'objets tout en réduisant la complexité d'implémentation, l'invention propose de s'appuyer sur un procédé d'émission colorée des signaux, aussi connue sous le nom d'émission multiple simultanée. Ce procédé, cité par exemple dans l'article « Emission colorée pour antenne active radar », François Le Chevalier, Laurent Savy, REE N°03, *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, mars 2005, pages 48-52, consiste à découper
30 l'espace dans lequel émet l'antenne d'émission en sous-réseaux en utilisant des procédés de traitements MIMO (acronyme anglais pour « Multiple Input Multiple

Output ») ou MISO (acronyme anglais pour « Multiple Input Single Output »). En mettant en forme le signal transmis depuis les différents éléments rayonnants de l'antenne d'émission, des signaux différents sont envoyés sur chacun des sous-réseaux, réalisant ainsi un codage spatio-temporel de l'espace. Les signaux se combinent alors dans l'espace selon des jeux de phase ou des retards qui dépendent de la direction visée. Il en résulte un signal global qui diffère d'une direction à l'autre. A la réception, pour détecter un signal issu d'une direction donnée, le traitement effectue un filtrage adapté au signal associé à cette direction. Ce filtre n'est pas adapté aux signaux issus des autres directions puisque le signal n'est plus le même dans ces autres directions.

[0032] La demande de brevet Européen EP 2 296 007 A1 décrit un radar à agilité de faisceau dans lequel la détection est réalisée dans un plan à partir de la coloration des signaux, et dans le plan orthogonal par formation de faisceaux.

[0033] La figure 2 représente un premier mode de réalisation d'un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance en 3D selon l'invention. De manière évidente à l'homme du métier, le système de détection selon l'invention permet également de détecter d'autres caractéristiques des objets, tels que par exemple leur vitesse. Dans ce mode de réalisation, le dispositif d'émission 201 est disposé en haut d'un mat télescopique autoporté par un véhicule, mais il pourrait être également être directement installé au sol. La hauteur h_1 du mat télescopique est contrainte par le poids important du dispositif d'émission.

[0034] Le dispositif d'émission est configuré de manière à émettre un signal de manière colorée dans le plan horizontal. Ceci peut être réalisé à partir d'une antenne directive émettant un signal coloré dont la direction et la couleur varient dans le temps, ou à partir d'une antenne réseau comprenant plusieurs éléments rayonnants émettant chacun un signal. Les émissions peuvent être directives ou omnidirectionnelles, dans le plan horizontal et/ou dans le plan vertical. Le dispositif d'émission est relié à un dispositif de traitements radar 230, qui dans l'exemple est embarqué sur le véhicule porteur, mais dont la disposition importe peu.

- [0035] Le dispositif de réception comprend plusieurs capteurs 211 à 215 séparés du dispositif d'émission, disposés en ligne et verticalement, composant ainsi ensemble une antenne réseau de réception. Les capteurs sont reliés par un câble à un point haut tel qu'un ballon gonflable 221 ou à tout autre élément permettant de suspendre le dispositif de réception (drone, grue, pylone, etc...), de manière à ce qu'ils soient disposés entre le sol et le point haut. Les capteurs du dispositif de réception sont en outre reliés à un dispositif de traitements radar 230 par un câble 220 qui assure le transport des signaux et des alimentations. Ce câble peut être le même que celui assurant le maintien des capteurs, et/ou celui assurant le maintien en position du ballon 221. La solution dans laquelle le câble utilisé pour la transmission des signaux est différent du câble maintenant le ballon 221 est cependant préférable afin de faciliter le déploiement et le repliement du dispositif. De par le faible poids des capteurs, la hauteur h_2 du capteur le plus haut peut être supérieure ou très supérieure à la hauteur h_1 à laquelle est fixé le dispositif d'émission 201. Un but de l'invention étant de positionner les capteurs du dispositif de réception le plus haut possible afin d'augmenter la visibilité directe et de diminuer les franges d'interférences dues aux réflexions sur le sol, ce but est donc atteint grâce à la distinction entre dispositif d'émission et dispositif de réception.
- [0036] Les capteurs du dispositif de réception 211 à 215 comprennent des éléments rayonnants omnidirectionnels dans le plan horizontal, comme par exemple des antennes dipôles montées verticalement, ce qui rend l'antenne équivalente formée par le réseau de capteurs omnidirectionnelle en azimut et directive en élévation. Les capteurs peuvent également être directionnels si le but de l'antenne n'est pas d'assurer une surveillance à 360° dans le plan horizontal. Avantageusement, chaque capteur comprend en outre un amplificateur faible bruit permettant de remonter le niveau du signal avant sa transmission au dispositif de traitements radar 230.
- [0037] Lorsque le câble assurant la liaison entre le dispositif d'émission 201 et le dispositif de traitements radar 230 transporte un signal numérique, le dispositif d'émission 201 comprend d'un convertisseur numérique vers analogique. De même, lorsque le câble 220 assurant la liaison entre les capteurs du dispositif de réception 211 à 215 et le dispositif de traitements radar 230 transporte un signal

numérique, les capteurs du dispositif de réception comprennent chacun d'un convertisseur analogique vers numérique. Le dispositif de traitements radar comprend les convertisseurs inverses.

[0038] Avantageusement, la liaison reliant les capteurs du dispositif de réception au dispositif de traitements radar est une liaison optique. L'utilisation de fibre optique permet de diminuer la section et la masse du câble 220. Cette solution est préférable à l'utilisation d'un câble en cuivre car elle permet encore d'alléger le dispositif, et de positionner les capteurs de l'antenne de réception le plus haut possible. Elle permet également de faciliter le déploiement/repliement du dispositif de réception. Dans ce cas, les capteurs disposent également chacun de convertisseurs des signaux reçus, analogiques ou numériques, vers des signaux optiques, pour transmettre les signaux acquis par les éléments rayonnants au dispositif de traitements radar, ainsi que, lorsqu'ils comprennent un amplificateur faible bruit, un convertisseur d'énergie optique vers électrique pour l'alimenter. Le dispositif de traitements radar comprend les convertisseurs inverses.

[0039] Les avantages du mode de réalisation décrit par rapport à l'état de l'art proviennent de la séparation des éléments d'émission et des éléments de réception. La masse du dispositif de réception étant faible comparée à celle du dispositif d'émission, il peut être déployé en hauteur beaucoup plus facilement que s'il avait fallu surélever l'ensemble des équipements d'émission/réception.

[0040] Dans ce mode de réalisation, la détection des objets et l'estimation de leur azimut, c'est-à-dire la détermination de leur direction et distance dans un plan horizontal, sont réalisées en utilisant les propriétés de coloration des signaux émis. Cette détermination se fait à partir du signal reçu depuis l'un des capteurs du dispositif de réception selon des procédés connus de l'homme du métier. Avantageusement, le capteur sélectionné à cet effet est le capteur le plus élevé, car c'est celui pour lequel les franges d'interférences sont les plus réduites. Avantageusement encore, de manière à apporter du gain à la détection dans le plan horizontal, cette opération est réalisée sur les signaux reçus de plusieurs capteurs du dispositif de réception.

- [0041] Estimer l'azimut des objets détectés en utilisant les propriétés de coloration permet d'éviter d'avoir à disposer plusieurs séries de capteurs en parallèles pour créer une antenne réseau directive dans le plan horizontal. De cette manière, l'antenne réseau unidimensionnelle constituée par les capteurs permet de mettre en œuvre des procédés de localisation 3D qui ne sont habituellement possibles qu'en utilisant des antennes réseau bidimensionnelles. Le passage de deux à une dimension permet donc de réduire l'encombrement, le coût et la complexité de déploiement/repliement du dispositif. Cela permet également d'avoir une antenne plus grande verticalement que les dispositifs connus à poids constant.
- 10 [0042] La détection des objets et l'estimation de leur élévation, c'est-à-dire la détermination de leur direction et distance dans le plan vertical des capteurs 211 à 215 du dispositif de réception, sont réalisées par le dispositif de traitements radar 230 à partir des signaux reçus de l'ensemble des capteurs ou d'une sélection d'au moins deux capteurs, en utilisant les propriétés de directivité de l'antenne réseau ainsi constituée. La sélection de capteurs utilisés peut être faite à partir de considérations portant sur la bande de fréquence de fonctionnement, l'écartement entre les capteurs, ainsi que les performances en directivité et le gain recherchés. Pour déterminer la position des cibles dans le plan vertical, l'antenne multi-capteurs peut être utilisée comme une antenne réseau directive balayant le plan vertical, en ajustant la phase et l'amplitude des signaux reçus de chacun des capteurs et en les recombinaison pour orienter le faisceau de l'antenne. Egalement, les signaux reçus d'au moins deux capteurs peuvent être exploités par un procédé d'interférométrie ou par un traitement haute résolution.
- 20 [0043] En pratique, la détection peut être réalisée d'abord dans un premier plan, par exemple dans le plan horizontal pour déterminer l'azimut de l'objet, puis dans un deuxième plan, par exemple le plan vertical pour déterminer l'élévation en considérant l'azimut déterminé dans le premier plan. La détection peut également être réalisée simultanément dans les deux plans, ce qui permet de bénéficier d'un gain de traitement permettant d'améliorer la précision de la mesure.
- 30 [0044] Idéalement, le dispositif de réception est déployé sur une longueur correspondant à plusieurs fois la demi-longueur d'onde à la fréquence maximum envisagée, voire plusieurs dizaines ou centaines de fois, et comprend un grand nombre de capteurs. Ceci est possible car les capteurs utilisés par l'antenne de

réception ne comprennent pas d'électronique de puissance et sont donc de dimension et de poids très réduits. L'antenne de réception peut alors facilement être positionnée à des hauteurs très élevées en utilisant un ballon 221 de taille raisonnable, une grue, ou tout autre dispositif permettant d'accrocher l'antenne de réception à un point haut, et transporter un grand nombre de capteurs.

[0045] La hauteur importante du dispositif permet de réduire de manière considérable les franges d'interférences et les pertes pour les cibles à basse altitude par rapport à un équipement d'émission/réception positionné au niveau du sol ou en haut d'un mat télescopique. Le poids du câble 220 devenant dimensionnant lorsque la hauteur du dispositif augmente, il peut avantageusement être réduit en étant réalisé en fibre optique.

[0046] L'utilisation d'un grand nombre de capteurs dans le dispositif de réception permet d'augmenter le gain de l'antenne équivalente et d'obtenir une très grande résolution angulaire dans le plan vertical.

[0047] A titre d'exemple, le tableau suivant donne la longueur de l'antenne en fonction de la fréquence et du nombre de capteurs de réception :

Fréquence (MHz)	100	200	450	1200	3000
Longueur d'onde (m)	3,00	1,50	0,67	0,25	0,10
Nb de capteur	64	64	64	256	512
Longueur antenne totale (m)	95	47	21	32	26

[0048] La mise en œuvre d'un dispositif de détection fonctionnant pour une fréquence de 100 MHz et disposant de 64 capteurs requiert donc des capteurs de réception disposés verticalement sur une hauteur de 95 m, ce qui est contraignant lorsque réalisé à partir de dispositifs conventionnels tel que des mâts, mais que l'invention, qui dissocie émission et réception et utilise la coloration des signaux pour limiter le nombre de capteurs, permet de réaliser à faible coût en utilisant un dispositif aéroporté.

[0049] La figure 3 représente un deuxième mode de réalisation d'un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance en trois dimensions selon l'invention. Contrairement au premier mode de réalisation,

l'antenne formée par les capteurs de réception n'est pas disposée dans le plan vertical mais dans le plan horizontal.

[0050] Le dispositif d'émission 301 est disposé en haut d'un mat télescopique autoporté par un véhicule, mais pourrait être directement installé au sol. La
5 hauteur h_1 du mat télescopique est contrainte par le poids important du dispositif d'émission. Le dispositif d'émission comprend plusieurs éléments rayonnants, et est configuré de manière à émettre un signal de manière colorée dans le plan vertical. Ceci peut être réalisé à partir d'une antenne directive émettant un signal coloré dont la direction et la couleur varient dans le temps, ou à partir d'une
10 antenne réseau comprenant plusieurs éléments rayonnants émettant chacun un signal. Le faisceau de l'antenne peut être directif ou omnidirectionnel, dans le plan horizontal et/ou dans le plan vertical. Il est relié à un dispositif de traitements radar 330.

[0051] Le dispositif de réception comprend plusieurs capteurs 311 à séparés du
15 dispositif d'émission, disposés en ligne et horizontalement, ce qui rend l'antenne réseau formée par le réseau de capteurs omnidirectionnelle en élévation et directive en azimuth lorsque les capteurs utilisés sont omnidirectionnels dans le plan vertical. Les capteurs du dispositif de réception sont reliés par un câble qui les maintient en position. Dans ce mode de réalisation, le câble est tendu entre
20 au moins deux pylônes 321 et 322, de manière à ce que les capteurs soient placés à une hauteur h_3 , mais ces derniers pourraient de manière équivalente être chacun disposés en haut d'un pylône ou d'un mât. Les capteurs du dispositif de réception sont reliés au dispositif de traitements radar 330 par un câble 320 qui assure le transport des signaux et des alimentations. Ce câble peut être le
25 même que celui assurant le maintien des capteurs, ou être un câble indépendant. De manière alternative, chaque capteur peut être relié indépendamment au dispositif 330. De par le faible poids des capteurs, la hauteur h_3 à laquelle ces derniers sont disposés peut être supérieure à la hauteur h_1 du dispositif d'émission 301. Un but de l'invention étant de positionner les capteurs le plus
30 haut possible afin d'augmenter la visibilité directe et de diminuer les franges d'interférences dues aux réflexions sur le sol, ce but est donc atteint grâce au traitement différencié du dispositif d'émission et du dispositif de réception.

[0052] Les capteurs 311 à 315 du dispositif de réception comprennent des éléments rayonnants omnidirectionnels dans le plan vertical, comme par exemple des antennes dipôles montées horizontalement. Les capteurs peuvent également être directionnels si le but de l'antenne n'est pas d'assurer une surveillance à 360° dans le plan vertical. Avantageusement, chaque capteur comprend en outre un amplificateur faible bruit permettant de remonter le niveau du signal avant sa transmission au dispositif de traitements radar 330.

[0053] Lorsque le câble assurant la liaison entre le dispositif d'émission 301 et le dispositif de traitements radar transporte un signal numérique, le dispositif d'émission 301 comprend d'un convertisseur numérique vers analogique. De même, lorsque le câble 320 assurant la liaison entre les capteurs 311 à 315 du dispositif de réception et le dispositif de traitements radar 330 transporte un signal numérique, les capteurs comprennent chacun d'un convertisseur analogique vers numérique. Le dispositif de traitements radar comprend les convertisseurs inverses.

[0054] Avantageusement, la liaison reliant les capteurs du dispositif de réception au dispositif de traitements radar est une liaison optique. L'utilisation de fibre optique permet de diminuer la section et la masse du câble 320. Cette solution est préférable à l'utilisation d'un câble en cuivre car elle permet encore d'alléger le dispositif, et de positionner les capteurs de l'antenne de réception le plus haut possible. Elle permet également de faciliter le déploiement/repliement du dispositif de réception. Dans ce cas, les capteurs du dispositif de réception disposent chacun de convertisseurs des signaux reçus, analogiques ou numériques, vers des signaux optiques, pour transmettre les signaux acquis par les éléments rayonnants au dispositif de traitements radar, ainsi que, lorsqu'ils comprennent un amplificateur faible bruit, un convertisseur d'une énergie optique fournie par le dispositif de traitements radars 330 vers une énergie électrique pour l'alimenter. Le dispositif 330 de traitements radar comprend les convertisseurs inverses.

[0055] Dans ce mode de réalisation, la détection des objets et l'estimation de leur azimut, c'est-à-dire la détermination de leur direction et distance dans le plan horizontal des capteurs 311 à 315 du dispositif de réception, sont réalisées par le dispositif de traitements radar 330 à partir des signaux reçus de l'ensemble des

capteurs ou d'une sélection d'au moins deux capteurs, en utilisant les propriétés de directivité de l'antenne réseau ainsi constituée. Le choix du nombre de capteurs utilisés peut dépendre de la bande de fréquence du signal, de l'écartement entre les capteurs, ainsi que des performances en directivité et gain
5 recherchés. Pour déterminer la position des cibles dans le plan horizontal, l'antenne multi-capteurs peut être utilisée comme une antenne réseau directive balayant le plan horizontal, en ajustant la phase et l'amplitude des signaux reçus de chacun des capteurs et en les recombinaut pour orienter le faisceau de l'antenne. Egalement, les signaux reçus d'au moins deux capteurs peuvent être
10 exploités par un procédé d'interférométrie ou par un traitement haute résolution.

[0056] Idéalement, le dispositif de réception est déployé sur une longueur correspondant à plusieurs fois la demi-longueur d'onde à la fréquence maximum envisagée, voire plusieurs dizaines de fois, et comprend un grand nombre de capteurs, afin d'augmenter le gain de l'antenne et d'obtenir une très grande
15 résolution angulaire dans le plan horizontal.

[0057] La détection des objets et l'estimation de leur élévation, c'est-à-dire la détermination de leur direction et distance dans un plan vertical, sont réalisées en utilisant les propriétés de coloration des signaux émis. Cette détermination peut être faite à partir du signal reçu depuis un seul des capteurs du dispositif de
20 réception selon des procédés connus de l'homme du métier, ce qui présente l'avantage d'être peu complexe et peu coûteux en ressources de calcul. De manière alternative, la détermination dans le plan vertical peut être réalisée à partir des propriétés de coloration des signaux reçus par une pluralité de capteurs, pour bénéficier d'un gain de traitement permettant d'améliorer la
25 performance de la détection.

[0058] En pratique, la détection peut être réalisée séquentiellement ou simultanément dans les deux plans.

[0059] Tout comme le premier mode de réalisation, le mode de réalisation de la figure 3 permet de positionner les capteurs de l'antenne de réception plus hauts
30 que si l'ensemble du radar devait être surélevé. Cependant, il a le défaut de présenter une ambiguïté concernant la position avant/arrière des objets détecté dans le plan horizontal lorsque les éléments rayonnants des capteurs de

l'antenne de réception sont omnidirectionnels dans ce plan, c'est-à-dire que la position est déterminée à plus ou moins π près car le diagramme d'antenne est symétrique par rapport à l'axe de l'antenne de réception. Ce défaut n'apparaît pas dans le premier mode de réalisation où l'azimut des cibles est identifié grâce aux propriétés de coloration du signal et non en utilisant les propriétés de directivité de l'antenne de réception formée par les différents capteurs de réception. Avantageusement, afin de lever l'incertitude sur la direction des objets dans le plan horizontal du deuxième mode de réalisation, des moyens permettant de rendre le faisceau d'antenne directif peuvent être déployés, comme par exemple un plan réflecteur ou un isolant diélectrique disposé d'un côté de l'antenne pour bloquer et réfléchir ou atténuer le faisceau dans une moitié du plan horizontal. De manière alternative, il est possible d'utiliser des éléments rayonnants directifs pour ne surveiller le plan horizontal que sur un horizon inférieur à π .

[0060] La figure 4 représente un troisième mode de réalisation d'un système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance en trois dimensions selon l'invention. Celui-ci diffère de celui décrit à la figure 3 qu'en ce que les capteurs 411 à 416 du dispositif de réception ne sont plus disposés en ligne mais sont disposés de manière à former un triangle ou toute autre forme géométrique permettant de lever l'ambiguïté sur la direction d'arrivée avant/arrière dans le plan horizontal.

[0061] En estimant la direction d'arrivée dans le plan horizontal à partir des capteurs de chacune des branches du triangle indépendamment, puis en utilisant conjointement les trois résultats, il est possible de lever l'ambiguïté existant dans le dispositif de la figure 3. Dans l'exemple de la figure 4, où le dispositif de réception comprend six capteurs, une mise en œuvre possible consiste à estimer la direction d'arrivée dans le plan horizontal à partir des triplets de capteurs suivants : (411, 412, 413), (413, 414, 415), et (415, 416, 411), puis à utiliser l'information de position ambiguë détectée par chaque triplet pour lever l'ambiguïté sur la position d'arrivée dans le plan vertical. Pour un nombre de capteurs donnés, cette détermination entraîne cependant une perte sur le gain de l'antenne par rapport au mode de réalisation de la figure 3.

[0062] Pour le reste, le fonctionnement du troisième mode de réalisation reprend celui du deuxième mode de fonctionnement:

- le dispositif d'émission 301 émet des signaux de manière colorée dans le plan vertical,
- 5 - l'azimut des objets détectés est déterminé en considérant indépendamment chacune des branches du triangle formé par les capteurs, puis en comparant les résultats pour lever l'ambiguïté sur la direction des objets détectés,
- l'élévation des objets détectés est déterminée à partir des signaux reçus d'un ou plusieurs capteurs en considérant la couleur des signaux émis par le dispositif
- 10 d'émission. Cette mesure peut le cas échéant être confirmée à partir des signaux reçus d'un ou plusieurs autres capteurs.

[0063] Les traitements dans le plan horizontal et le plan vertical peuvent être réalisés séquentiellement ou simultanément, de manière à bénéficier d'un gain de traitement.

15

[0064] Les avantages des deuxième et troisième modes de réalisation décrits aux figures 3 et 4 par rapport à l'état de l'art proviennent de la séparation des éléments d'émission et des éléments de réception. La masse du dispositif de réception étant faible comparée à celle du dispositif d'émission, il peut être

20 déployé en hauteur beaucoup plus facilement que s'il avait fallu surélever l'ensemble des équipements d'émission/réception. En outre, les différents capteurs qui composent le dispositif de réception peuvent être surélevés indépendamment les uns des autres.

[0065] L'emploi de fibre optique pour la transmission des signaux acquis par les

25 différents capteurs permet d'alléger encore le dispositif de réception.

[0066] Enfin, l'utilisation d'un procédé de coloration des signaux radars émis dans le plan vertical permet de déterminer la direction des objets détectés dans ce plan à partir des signaux reçus des mêmes capteurs que dans le plan horizontal, et donc de diminuer de manière considérable le nombre de capteurs requis pour

30 assurer une détection en trois dimensions. De ce fait, le coût de l'antenne et sa complexité de déploiement sont réduites, et les capteurs peuvent être installés à des hauteurs importantes, améliorant ainsi les conditions de réception.

- [0067] Ainsi, les différents modes de réalisation d'un système de détection selon l'invention sont particulièrement adaptés pour la surveillance en trois dimensions des théâtres d'opération. La souplesse et légèreté du dispositif de réception, la simplicité de déploiement du radar et la possibilité d'ajouter facilement des capteurs au dispositif de réception et de sélectionner les capteurs utilisés pour adapter le gain de l'antenne de réception et sa directivité lui permettent d'avoir une capacité multi rôles que n'offrent pas les dispositifs selon l'état de l'art.
- [0068] En outre, la fréquence de fonctionnement du système de détection peut être adaptée très simplement, en sélectionnant un ensemble de capteurs parmi les capteurs de l'antenne de réception en fonction de leurs écartements et de la longueur d'onde souhaitée. Le dispositif de traitements radar étant en mesure de sélectionner les capteurs à partir desquels les traitements de détection sont réalisés, l'antenne de réception peut comprendre des capteurs hétérogènes adaptés pour fonctionner à des fréquences différentes, ce qui confère une capacité multifréquence venant renforcer l'aspect multi-rôle du dispositif.
- [0069] Enfin, le dispositif de traitements radar selon l'invention est multi-rôles puisqu'il permet, à partir des signaux reçus des différents capteurs, de paralléliser la mise en œuvre d'algorithmes de détection différents dont les paramètres, comme par exemple la zone de recherche, le temps d'intégration des données ou la fréquence de fonctionnement, sont adaptés à un type précis de cible.
- [0070] Les différents modes de réalisation décrits aux figures 2 à 4 sont donnés ici à titre d'illustration de certains des modes de réalisation de l'invention. Ils ne limitent en aucune manière la portée de l'invention, qui est définie par les revendications, et de nombreux ajustements évidents à l'homme du métier pourraient être apportés à la disposition relative des différents éléments, sous réserve que soient respectés les principes suivants :
- Dissociation des équipements d'émission et de réception,
 - Emission de manière colorée dans un plan, dit premier plan,
 - Mise en œuvre de la réception par une antenne de réception comprenant une

pluralité de capteurs disposés dans un plan perpendiculaire au premier plan, chaque capteur comprenant un élément rayonnant omnidirectionnel ou non dans le premier plan,

- Détermination de la direction d'arrivée dans le premier plan en utilisant les propriétés de colorations des signaux reçus d'un ou plusieurs capteurs de l'antenne de réception,
- Détermination de la direction d'arrivée dans un plan perpendiculaire au premier plan en utilisant les propriétés de directivité de l'antenne de réception multi-capteurs.

10

[0071] Les figures 5a et 5b représentent les pertes liées aux franges d'interférences, pour un équipement situé au niveau du sol (figure 5a) et pour un équipement placé à 50 mètres de hauteur (figure 5b). Les différentes textures de remplissage désignent les niveaux de pertes liés aux franges d'interférences, en fonction de l'altitude et de la distance de la cible.

15

[0072] Les franges d'interférences sont liées aux réflexions multiples des signaux au cours de sa propagation, et à la manière dont ces trajets se recombinent.

[0073] On observe sur la figure 5a que les pertes à basse altitude pour un équipement positionné au niveau du sol varient entre -8 dB et -14dB (zone 501).

On observe sur la figure 5b que ces pertes sont très réduites dès lors que l'équipement est surélevé (zone 502). Ce phénomène s'explique notamment en ce que le trajet direct est nécessairement plus marqué lorsque l'équipement est haut.

20

[0074] Ainsi, le système selon l'invention, dans lequel le dispositif de réception des signaux radar peut être surélevé à moindre coût, a bien pour effet de réduire de manière conséquente les franges d'interférences subies par les signaux, et donc d'améliorer les performances du dispositif.

25

[0075] L'invention porte également sur un procédé de mise en œuvre d'une détection d'objets en trois dimensions. Le procédé comprend une étape 601 d'émission d'un signal selon un procédé d'émission coloré dans un premier plan,

30

comme par exemple le plan horizontal pour une mise en œuvre dans un cas de figure correspondant à la figure 2, ou le plan vertical pour les figures 3 et 4.

5 [0076] Le procédé comprend une étape 602 de réception de signaux depuis au moins deux capteurs disposés dans un deuxième plan, perpendiculaire au premier plan. Ces capteurs peuvent comprendre des éléments rayonnants omnidirectionnels dans le premier plan, pour une couverture à 360° dans ce plan, ou des éléments rayonnants couvrant une partie seulement du premier plan.

10 [0077] Enfin, le procédé comprend une étape 603 de détermination de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance. Cette détermination est réalisée dans le premier plan en exploitant les propriétés de coloration du signal reçu par au moins un des capteurs. Elle est réalisée dans le deuxième plan en exploitant les signaux reçus d'au moins deux des capteurs du dispositif de réception, mais le gain de l'antenne sera d'autant plus important que le nombre de capteurs considérés est grand. L'exploitation des signaux reçus peut
15 se faire par mise en œuvre d'un procédé d'interférométrie ou d'un traitement haute résolution sur les signaux reçus. De manière alternative, une antenne réseau directive peut être constituée à partir des différents capteurs. En faisant varier la direction du faisceau de cette antenne réseau, il est possible de balayer l'espace pour localiser l'objet dans le deuxième plan.

20

REVENDICATIONS

1. Système de détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon trois dimensions comprenant :
 - un dispositif d'émission (201, 301) configuré pour émettre des signaux selon un procédé d'émission colorée dans un premier plan,
 - un dispositif de réception comprenant au moins deux capteurs (211, 212, 311, 312, 411, 412) disposés dans un deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
 - des moyens de traitements (230, 330) des signaux émis et reçus,le système de détection étant caractérisé en ce que les moyens de traitements sont configurés pour détecter la présence d'objets et estimer leur direction et distance :
 - dans le premier plan à partir des signaux reçus d'au moins un des capteurs du dispositif de réception en utilisant la coloration du signal émis,
 - dans le deuxième plan à partir des signaux reçus d'au moins deux des capteurs du dispositif de réception,et en ce que le dispositif d'émission et le dispositif de réception sont séparés, le dispositif de réception étant surélevé par rapport au dispositif d'émission.
2. Système de détection d'objets en trois dimensions selon la revendication 1, dans lequel chaque capteur comprend un élément rayonnant omnidirectionnel dans le premier plan.
3. Système de détection d'objets en trois dimensions selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel le premier plan est un plan horizontal, et dans lequel les capteurs (211, 212, 213, 214, 215) sont disposés dans un plan vertical.
4. Système de détection d'objets en trois dimensions selon la revendication 3 dans lequel les capteurs du dispositif de réception sont reliés par un câble et suspendu sous un dispositif aéroporté (221).

5. Système de détection d'objets en trois dimensions selon l'une des revendications 3 et 4, dans lequel un seul capteur est utilisé pour détecter la présence d'objets et estimer leur direction et distance dans le premier plan.
- 5 6. Système de détection d'objets en trois dimensions selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel le premier plan est un plan vertical, et dans lequel les capteurs (311, 411) sont disposés dans un plan horizontal.
- 10 7. Système de détection d'objets en trois dimensions selon la revendication 6, dans lequel les capteurs (311, 312, 313, 314, 315) sont disposés en ligne, le système disposant en outre de moyens de suppression d'ambiguïtés de la position des objets par rapport aux capteurs dans le plan horizontal.
- 15 8. Système de détection d'objets en trois dimensions selon la revendication 6, dans lequel les capteurs (411, 412, 413, 414, 415, 416) sont disposés de manière à former un triangle, la détection de la présence d'objets et l'estimation de leur direction et distance dans le plan horizontal étant réalisées pour chaque branche du triangle respectivement, puis combinées de manière à supprimer des ambiguïtés sur la position des objets par rapport aux capteurs dans le plan horizontal.
- 20 9. Système de détection d'objets en trois dimensions selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les capteurs du dispositif de réception sont reliés aux moyens de traitements par une liaison (220, 320) en fibre optique, les capteurs comprenant en outre de moyens de conversion des signaux reçus vers des signaux optiques.
- 25 10. Système de détection d'objets en trois dimensions selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la détection de la présence d'objets et l'estimation de leur direction et distance dans le deuxième plan comprend la mise en œuvre d'un procédé d'interférométrie ou un traitement haute résolution sur les signaux reçus des au moins deux capteurs de l'antenne de réception, ou par exploitation de la directivité d'une antenne réseau formée par les au moins deux capteurs de l'antenne de réception.
- 30

11. Procédé de mise en œuvre d'une détection de la présence d'objets et d'estimation de leur direction et distance selon trois dimensions dans un système de détection comprenant :
- 5 - un dispositif d'émission (201, 301) configuré pour émettre des signaux selon un procédé d'émission colorée dans un premier plan,
 - un dispositif de réception comprenant au moins deux capteurs (211, 212, 311, 312, 411, 412) disposés dans un deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
 - 10 - des moyens de traitements (230, 330) des signaux émis et reçus, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend le positionnement séparé du dispositif d'émission et du dispositif de réception de manière à ce que le dispositif de réception soit surélevé par rapport au dispositif d'émission, et en ce qu'il comprend les étapes de :
 - 15 - émission (601) d'un signal selon un procédé d'émission coloré dans un premier plan,
 - réception (602) de signaux depuis au moins deux capteurs disposés dans un deuxième plan perpendiculaire au premier plan, et
 - détermination de la présence d'objets et estimation leur direction et distance
 - 20 (603) dans le premier plan par exploitation des propriétés de coloration du signal reçu par au moins un des capteurs, et dans le deuxième plan à partir des signaux reçus d'au moins deux des capteurs.