



(51) Classification internationale des brevets :
G01S 7/481 (2006.01) *G01S 17/89* (2006.01)
G01S 17/02 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2011/050985

(22) Date de dépôt international :
29 avril 2011 (29.04.2011)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1053514 5 mai 2010 (05.05.2010) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
ASTRIUM SAS [FR/FR]; 6, rue Laurent Pichat, F-75016
Paris (FR). CENTRE NATIONAL D'ETUDES
SPATIALES CNES [FR/FR]; 2, place Maurice Quentin,
F-75001 Paris (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : FABRE,
Frédéric [FR/FR]; 20, rue Saint-Henri, F-31000
Toulouse (FR).

(74) Mandataires : BOIRE, Philippe et al.; Cabinet
Plasseraud, 52, rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex
09 (FR).

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

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

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : ALTIMETRIC MEASUREMENT DEVICE

(54) Titre : DISPOSITIF DE MESURE ALTIMETRIQUE

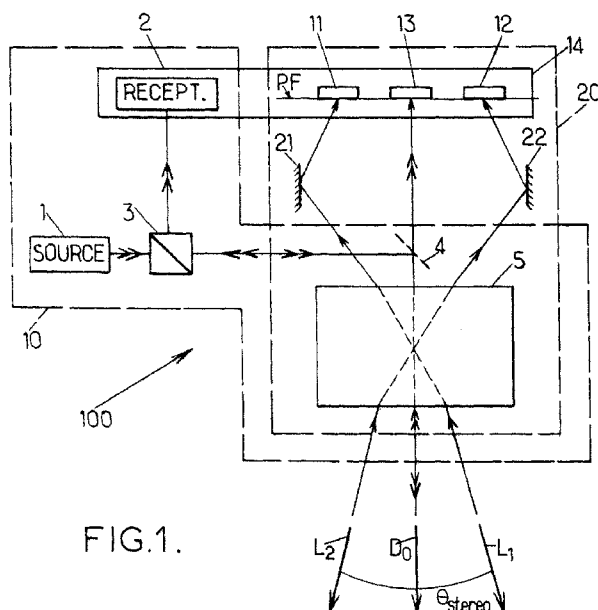


FIG.1.

(57) Abstract : An altimetric measurement device (100) incorporates a LIDAR System (10) and a stereoscopic imaging system (20), which share a single radiation collector (5). Altimetric measurements which are produced by the stereoscopic imaging system may be calibrated by measurements which are produced simultaneously by the LIDAR system. This device makes it possible to propagate the precision of the LIDAR to the measurement span of the stereoscopic imager. In an enhancement of the device, impacts of a radiation implemented by the LIDAR system may appear in additional images which are captured. In this way, sites corresponding to the altimetric measurements of the LIDAR system appear directly in relief maps which are produced by the stereoscopic imaging system.

(57) Abrégé : Un dispositif de mesure altimétrique (100) regroupe un système LIDAR (10) et un système d'imagerie stéréoscopique (20), qui partagent un collecteur de rayonnement (5) unique. Des mesures altimétriques qui sont produites par le système d'imagerie stéréoscopique peuvent être étalonnées par des mesures qui sont produites simultanément par le système LIDAR. Ce dispositif permet de propager la précision du LIDAR à l'étendue de mesure de l'imageur stéréoscopique. Dans un perfectionnement du dispositif, des impacts d'un rayonnement mis en œuvre par le

système LIDAR peuvent apparaître dans des images supplémentaires qui sont saisies. De cette façon, des endroits correspondant aux mesures altimétriques du système LIDAR apparaissent directement dans des cartographies de relief qui sont produites par le système d'imagerie stéréoscopique.



— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

DISPOSITIF DE MESURE ALTIMETRIQUE

La présente invention concerne un dispositif de mesure altimétrique pour explorer ou caractériser des zones de la surface de la Terre à partir d'un aéronef ou d'un satellite. Un tel dispositif permet notamment de réaliser des
5 mesures d'altitude de reliefs terrestres, ou des sondages de volumes semi-transparents tels que des couvertures végétales ou des volumes aquatiques.

Des systèmes optiques stéréoscopiques et des systèmes LIDAR, pour «Light Detection And Ranging», sont déjà utilisés pour explorer la surface terrestre depuis un aéronef ou un satellite, notamment un satellite à basse
10 altitude. Ces deux types de systèmes possèdent des caractéristiques différentes, qui distinguent les applications pour lesquelles chacun des systèmes peut être utilisé.

Les systèmes stéréoscopiques forment plusieurs images, en général deux images, d'une même portion de la surface de la Terre selon des lignes de
15 visée qui ont des inclinaisons différentes. En fait, ces images sont saisies respectivement à des instants différents d'un défilement de l'aéronef ou du satellite au dessus de la surface de la Terre. Pour cela, un système stéréoscopique est adapté pour former et saisir des images selon deux lignes de visée qui présentent entre elles un écart angulaire sélectionné. De tels
20 systèmes stéréoscopiques possèdent un champ d'entrée qui est grand, pouvant correspondre à une largeur de portion de surface terrestre supérieure à quelques kilomètres perpendiculairement à la trace. Par contre, ils sont limités à des mesures altimétriques de reliefs qui sont découverts et aériens. En outre, la précision des mesures altimétriques qui sont réalisées par
25 stéréoscopie est faible, par exemple de l'ordre de quelques mètres, du fait de la séparation physique des deux voies stéréoscopiques et du manque de recalage absolu en altitude.

Les systèmes LIDAR permettent d'obtenir une précision de mesure altimétrique qui est bien meilleure, usuellement inférieure au mètre. Ils
30 permettent en outre de caractériser simultanément des interfaces qui sont

- 2 -

alignées dans une direction de pointage et séparées par des milieux semi-transparents. De telles configurations correspondent par exemple à l'exploration du relief de fond d'un lac à travers la surface du lac, ou à des mesures altimétriques à travers une couverture végétale telle qu'une forêt, ou
5 encore à la mesure de l'épaisseur d'une couverture végétale. Mais, le champ au sol qui est exploré lors d'une mesure LIDAR est petit, typiquement de l'ordre de quelques mètres.

Dans ces conditions, la présente invention a pour but de fournir des mesures altimétriques qui ne présentent pas les inconvénients des systèmes
10 antérieurs. En particulier, elle a pour but de fournir de telles mesures en combinant les avantages du LIDAR, notamment sa bonne précision, et ceux de l'imageur stéréoscopique, notamment un grand champ d'entrée.

Pour cela, l'invention propose un dispositif de mesure altimétrique, qui est adapté pour être embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite et pour
15 effectuer, à partir de celui-ci, une mesure d'altitude d'un relief situé à la surface de la Terre ou un sondage d'un volume semi-transparent situé aussi à la surface de la Terre. Ce dispositif comprend un système LIDAR, qui inclut lui-même :

- un émetteur LIDAR, qui est adapté pour produire un rayonnement
20 LIDAR primaire, avec le dispositif qui est agencé pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire vers la surface de la Terre,
- un collecteur de rayonnement à miroirs, qui est disposé pour collecter un rayonnement LIDAR rétrodiffusé par la surface de la Terre, et
- un récepteur LIDAR, qui est disposé pour recevoir le rayonnement
25 LIDAR rétrodiffusé et collecté.

Le dispositif de l'invention comprend aussi un système d'imagerie stéréoscopique, qui inclut lui-même :

- un ensemble de formation d'image, qui est agencé pour former des images, et
- 30 - deux séries de détecteurs d'images, qui sont disposées pour saisir des images respectives de deux portions décalées de la surface de la

Terre, à travers l'ensemble de formation d'image selon deux lignes de visée différentes.

Selon l'invention, le collecteur de rayonnement est commun au système LIDAR et à l'ensemble de formation d'image du système d'imagerie stéréoscopique. Le dispositif est alors agencé pour diriger une première partie d'un rayonnement total collecté par le collecteur de rayonnement vers le récepteur LIDAR, et une seconde partie de ce rayonnement total collecté vers les deux séries de détecteurs d'images du système d'imagerie stéréoscopique. Un tel agencement peut avantageusement être réalisé à l'aide d'un diviseur de faisceau.

Ainsi, l'invention propose un nouveau dispositif de mesure altimétrique, qui est une combinaison d'un système LIDAR et d'un système d'imagerie stéréoscopique. Ce dispositif possède des dimensions, un poids total et un prix total qui sont réduits, grâce au partage du collecteur de rayonnement entre le système LIDAR et le système d'imagerie stéréoscopique. Un tel dispositif est en outre particulièrement adapté pour être utilisé à bord d'un aéronef ou d'un satellite, notamment parce que ses dimensions et son poids réduits participent à réduire aussi les dimensions d'un tel engin porteur. Dans le cas de l'utilisation à bord d'un satellite, le coût de lancement du satellite est aussi réduit en conséquence.

En outre, un tel dispositif regroupe les avantages qui sont procurés par chacun des systèmes :

- le système LIDAR permet des mesures d'altitude qui sont très précises, et des mesures à travers des volumes semi-transparents, tels que des couvertures végétales ou des milieux aquatiques ; et
- le système d'imagerie stéréoscopique permet de couvrir un champ qui est large à chaque séquence de mesure.

De plus, les mesures qui sont réalisées avec le système LIDAR permettent de corriger l'imprécision des mesures qui sont effectuées avec le système d'imagerie stéréoscopique. Autrement dit, les mesures LIDAR peuvent être utilisées pour étalonner les mesures stéréoscopiques.

Chaque série de détecteurs d'images, qui est associée à l'une des deux lignes de visée du système d'imagerie stéréoscopique, peut être constituée d'un ou plusieurs détecteur(s) d'image(s), qui est (sont) disposé(s) pour constituer un champ total d'entrée selon cette ligne de visée.

5 Selon un premier perfectionnement de l'invention, le collecteur de rayonnement à miroirs peut en outre être disposé pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire vers la surface de la Terre. Dans ce cas, le collecteur de rayonnement possède simultanément les trois fonctions suivantes : transmettre vers la Terre le rayonnement LIDAR primaire qui est
10 produit par l'émetteur LIDAR, collecter le rayonnement LIDAR qui est rétrodiffusé par la surface de la Terre, et collecter le rayonnement provenant de la surface de la Terre qui est utilisé par le système d'imagerie stéréoscopique pour former les images des portions décalées de la surface de la Terre.

 Selon un deuxième perfectionnement de l'invention, un support
15 commun qui est disposé pour porter ensemble les deux séries de détecteurs d'images du système d'imagerie stéréoscopique, peut porter en outre le récepteur LIDAR. De cette façon, la direction de pointage du récepteur LIDAR est fixe par rapport aux lignes de visée des détecteurs d'images du système stéréoscopique. Autrement dit, l'orientation de la direction de pointage LIDAR
20 par rapport aux images qui sont saisies par le système stéréoscopique n'est pas modifiée par des distorsions mécaniques ou des déplacements thermo-élastiques qui affecteraient le récepteur LIDAR et les détecteurs d'images.

 Selon un troisième perfectionnement de l'invention, le dispositif peut inclure en outre un troisième détecteur d'image, qui est adapté pour détecter
25 une partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé reçue à travers l'ensemble de formation d'image. Ce troisième détecteur saisit alors une image d'une troisième portion de la surface de la Terre, qui est formée par l'ensemble de formation d'image avec la partie détectée du rayonnement LIDAR rétrodiffusé. Ce troisième détecteur d'image peut avantageusement être aussi porté par le
30 même support commun que les deux premiers détecteurs d'images du système stéréoscopique. De cette façon, les images qui sont fournies par le système stéréoscopique peuvent comporter une trace de l'impact du faisceau

du rayonnement LIDAR primaire dans la partie de surface de la Terre qui est explorée. Le résultat de la mesure altimétrique LIDAR peut alors être affecté précisément au point de la surface de la Terre qui est superposé à cette trace dans l'image stéréoscopique. Le résultat de la mesure LIDAR peut ainsi servir
5 de valeur de référence pour affiner les résultats de mesure altimétrique qui sont fournis par le système stéréoscopique en dehors du point de mesure LIDAR.

Dans des premiers modes de réalisation d'un dispositif conforme à l'invention, l'émetteur LIDAR peut être adapté pour produire le rayonnement LIDAR primaire avec une première longueur d'onde qui est comprise entre
10 0,3 μm et 1,6 μm . Le système d'imagerie stéréoscopique peut être simultanément adapté pour former et saisir des images dans toute bande de longueurs d'onde comprises entre 0,3 μm et 1,6 μm . Le dispositif est alors approprié pour mesurer une épaisseur de couverture végétale présente à la surface de la Terre, ou pour caractériser un relief terrestre sous couverture
15 végétale. Pour ces applications, l'invention propose en outre un procédé utilisant un dispositif de mesure altimétrique qui est conforme à ces premiers modes de réalisation, et qui est embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite.

Dans des seconds modes de réalisation d'un dispositif conforme à l'invention, l'émetteur LIDAR peut être adapté pour produire le rayonnement
20 LIDAR primaire avec une première longueur d'onde qui est comprise entre 0,3 μm et 1 μm , et une seconde longueur d'onde qui est comprise entre 0,7 μm et 1,6 μm . Le système d'imagerie stéréoscopique est alors adapté pour former et saisir des images dans toute bande de longueurs d'onde comprises entre 0,3 μm et 1,6 μm . Le dispositif est alors approprié pour effectuer des mesures
25 bathymétriques à travers un volume aquatique présent à la surface de la Terre, tel qu'un lac ou une étendue maritime. Pour réaliser de telles mesures bathymétriques, l'invention propose alors aussi un procédé utilisant un dispositif de mesure altimétrique qui est conforme à ces seconds modes de réalisation, et qui est embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite.

30 D'autres particularités et avantages de la présente invention apparaîtront dans la description ci-après d'exemples de réalisation non limitatifs, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- 6 -

- la figure 1 est un schéma synoptique d'un dispositif de mesure altimétrique selon l'invention ;
- les figures 2a et 2b sont deux schémas de coupleurs optiques pouvant être utilisés alternativement dans un dispositif de mesure altimétrique
5 selon l'invention ;
- la figure 3 est un schéma optique d'un collecteur de rayonnement pouvant être utilisé dans un dispositif de mesure altimétrique selon l'invention ; et
- la figure 4 reproduit dans son principe une cartographie de relief
10 terrestre obtenue en utilisant un dispositif de mesure altimétrique selon l'invention.

Pour raison de clarté, les dimensions des éléments qui sont représentés dans ces figures ne correspondent ni à des dimensions réelles ni à des rapports de dimensions réels. En outre, des références identiques qui sont
15 indiquées dans des figures différentes désignent des éléments identiques ou qui ont des fonctions identiques.

Conformément à la figure 1, un dispositif de mesure altimétrique selon l'invention, qui est désigné dans son ensemble par la référence 100, comprend un système LIDAR 10 et un système d'imagerie stéréoscopique 20.

20 Le système LIDAR 10 comprend lui-même un émetteur LIDAR, qui est noté SOURCE et référencé 1, et un récepteur LIDAR, qui est noté RECEPT. et référencé 2. L'émetteur 1 et le récepteur 2 peuvent être d'un type connu de l'Homme du métier, et disponibles commercialement. L'émetteur 1 est disposé pour émettre un rayonnement LIDAR primaire vers un champ cible qui est
25 distant du dispositif 100. En particulier, ce champ cible peut être une portion de la surface de la Terre lorsque le dispositif 100 est utilisé à bord d'un aéronef ou d'un satellite, pour réaliser des mesures altimétriques dans cette portion de surface terrestre. Conformément au fonctionnement connu d'un système LIDAR, des objets ou reliefs qui sont contenus dans le champ cible produisent,
30 sous l'effet du rayonnement LIDAR primaire, un rayonnement LIDAR rétrodiffusé. Ce rayonnement LIDAR rétrodiffusé est collecté en retour par une optique 5, puis dirigé vers le récepteur LIDAR 2.

- 7 -

De façon générale, l'émetteur 1 et le récepteur 2 sont assemblés au sein du dispositif 100 pour être fixes l'un par rapport à l'autre pendant une utilisation du dispositif. Autrement dit, les positions relatives de l'émetteur 1 et du récepteur 2 sont constantes, de sorte qu'ils ont des axes optiques d'émission et de réception du rayonnement LIDAR qui coïncident en permanence, malgré d'éventuelles distorsions que peut subir le système 10.

De préférence, le système LIDAR 10 est du type monostatique, c'est-à-dire que l'émetteur LIDAR 1 et le récepteur LIDAR 2 utilisent la même optique 5, pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire vers la Terre d'une part et pour collecter le rayonnement LIDAR rétrodiffusé d'autre part. Les voies d'émission et de réception LIDAR qui sont ainsi mises en œuvre et qui ont en commun l'optique 5, constituent le système LIDAR 10 dont le fonctionnement est supposé connu et n'est pas répété ici. Plusieurs coupleurs optiques 3 peuvent être utilisés alternativement pour faire passer simultanément les voies d'émission et de réception LIDAR à travers l'optique 5.

Selon une première possibilité qui est illustrée par la figure 2a, l'émetteur LIDAR 1 peut être adapté pour produire le rayonnement LIDAR primaire avec une première polarisation qui est rectiligne. Le système LIDAR 10 inclut alors en outre :

- une lame quart d'onde 31, qui est disposée entre l'émetteur LIDAR 1 et l'optique 5, pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire en transformant la première polarisation rectiligne en première polarisation circulaire du rayonnement LIDAR primaire qui est transmis par l'optique 5. Simultanément, la lame quart d'onde 31 est aussi disposée pour transmettre en sens inverse le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté qui possède une seconde polarisation circulaire opposée à la première polarisation circulaire, en transformant la seconde polarisation circulaire en seconde polarisation rectiligne, les première et seconde polarisations rectilignes étant perpendiculaires entre elles ;
et
- un séparateur de polarisations rectilignes 32, par exemple sous la forme d'une lame ou d'un cube, qui est disposé pour diriger le rayonnement

LIDAR primaire produit par l'émetteur LIDAR 1 vers la lame quart d'onde 31 d'une part, et pour diriger le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté et transmis par la lame quart d'onde 31 vers le récepteur LIDAR 2 d'autre part.

- 5 La lame quart d'onde 31 et le séparateur de polarisations rectilignes 32 forment alors ensemble le coupleur optique 3. Un tel couplage des voies d'émission et de réception LIDAR est donc basé sur la séparation de polarisations rectilignes du rayonnement LIDAR.

10 Selon une seconde possibilité qui est illustrée par la figure 2b, le couplage des voies d'émission et de réception LIDAR peut être basé sur une séparation de pupille. Pour cela, le système LIDAR 10 peut inclure en outre un miroir 3 qui est disposé pour réfléchir le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté vers le récepteur LIDAR 2. Ce miroir 3 comporte une ouverture 30 qui est agencée pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire produit par
15 l'émetteur LIDAR 1 vers l'optique 5. La surface de l'ouverture 30 peut être de l'ordre de 10% de celle du miroir 3, par exemple. Cette seconde possibilité permet une détection selon les deux axes de polarisation, dans le cas où la scène observée dépolariserait le rayonnement LIDAR.

20 D'autres réalisations qui sont équivalentes peuvent encore être utilisées pour le coupleur optique interne au système LIDAR 10.

25 Le récepteur LIDAR 2, l'émetteur LIDAR 1 et l'optique 5, par leurs positions respectives, définissent une direction de pointage du système LIDAR 10, qui est notée D_0 . Les résultats de mesures altimétriques qui sont produits par le système LIDAR 10 caractérisent alors la zone du champ d'entrée de l'optique 5 qui est située le long de la direction de pointage D_0 . Pour une mise
30 en œuvre à partir d'un satellite à basse altitude, cette zone possède un diamètre que quelques mètres, par exemple 3 m, à la surface de la Terre.

30 Le système d'imagerie stéréoscopique 20 comprend lui-même un ensemble de formation d'image qui est agencé pour former une image dans un plan focal PF, et deux détecteurs d'images 11 et 12 qui sont disposés dans ce
35 plan focal PF. De cette façon, les détecteurs 11 et 12 peuvent saisir à travers l'ensemble de formation d'image, des images respectives de portions cibles qui

sont contenues dans le champ d'entrée de l'ensemble de formation d'image, et qui sont décalées selon deux lignes de visée différentes. Ces lignes de visée sont référencées L_1 et L_2 sur la figure 1. Selon l'invention, l'ensemble de formation d'image du système 20 inclut l'optique 5 pour recevoir le rayonnement à partir duquel les images sont formées sur les détecteurs 11 et 12. Pour cette raison, l'optique 5 est appelée collecteur de rayonnement du dispositif 100. Eventuellement, l'ensemble de formation d'image du système d'imagerie stéréoscopique peut comprendre, en plus de l'optique 5, un ensemble optique de relais d'image (non représenté) qui est disposé entre l'optique 5 et les détecteurs 11 et 12.

Chacun des détecteurs d'image 11 et 12 peut être constitué par une matrice de photodétecteurs agencés en lignes et en colonnes perpendiculaires entre elles. Eventuellement, chaque détecteur d'image 11 ou 12 peut être constitué lui-même d'une série de telles matrices juxtaposées dans le plan focal PF, pour augmenter le champ optique d'entrée du système d'imagerie stéréoscopique 20 selon chaque ligne de visée.

L'optique 5 est ainsi commune au système LIDAR 10 et au système d'imagerie stéréoscopique 20. Dans une configuration possible du dispositif 100, il peut comprendre en outre un diviseur de faisceau 4. Ce diviseur de faisceau 4 est disposé pour diriger une partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté par l'optique 5, vers le récepteur LIDAR 2, et pour diriger simultanément vers les détecteurs 11 et 12, une autre partie du rayonnement total qui est collecté par l'optique 5 pour former les images qui sont saisies par ces deux détecteurs. Dans une réalisation simple du dispositif 100, le diviseur de faisceau 4 peut être une lame semi-réfléchissante de taille limitée, qui est disposée seulement sur le trajet du rayonnement LIDAR rétrodiffusé, en aval de l'optique 5 par rapport au sens de propagation du rayonnement collecté. Par exemple, une telle lame semi-réfléchissante peut être adaptée pour diriger vers le récepteur LIDAR 2 moins de 85% du flux du rayonnement total qui est collecté par l'optique 5, et pour diriger vers les détecteurs d'images 11 et 12 au moins 15% de ce flux de rayonnement total collecté. Mais d'autres réalisations du diviseur de faisceau 4 peuvent être utilisées alternativement, de façon équivalente. En particulier, une division spectrale peut être utilisée.

Les deux détecteurs d'images 11, 12 et l'optique 5, par leurs positions respectives, définissent les lignes de visée L_1 et L_2 du système d'imagerie stéréoscopique 20. Afin que ces lignes de visée L_1 et L_2 conservent en permanence un écart angulaire $\theta_{\text{stéréo}}$ qui est constant, même si des distorsions mécaniques sont transmises au système d'imagerie stéréoscopique 20, les
5 détecteurs d'images 11 et 12 sont avantageusement portés par un support commun, qui est référencé 14.

Eventuellement, pour déterminer les deux lignes de visée L_1 et L_2 du système d'imagerie stéréoscopique 20 à travers l'optique 5, avec les positions
10 des deux détecteurs d'images 11 et 12, le système 20 peut comprendre en outre une série de miroirs supplémentaires, par exemple deux miroirs supplémentaires 21 et 22. Ces miroirs 21 et 22 sont associés respectivement aux deux détecteurs d'images 11 et 12, et disposés entre l'optique 5 et ceux-ci. De cette façon, l'écartement entre les deux détecteurs 11 et 12 sur le support
15 14 peut être rendu indépendant de l'écart angulaire $\theta_{\text{stéréo}}$ qui est présent entre les deux lignes de visée L_1 et L_2 , en ajustant les orientations des miroirs 21 et 22. De préférence, les miroirs 21 et 22 sont plans.

De préférence, le système LIDAR 10 et le système d'imagerie stéréoscopique 20 sont disposés pour que la direction de pointage D_0 du système LIDAR soit située angulairement au milieu des deux lignes de visée L_1 et L_2 du système d'imagerie stéréoscopique. Un tel ajustement peut être réalisé en inclinant convenablement la lame semi-réfléchissante du diviseur de faisceau 4, par exemple.

Afin d'assurer que la direction de pointage D_0 du système LIDAR 10 possède une orientation constante par rapport aux lignes de visée L_1 et L_2 du système d'imagerie stéréoscopique 20, le support commun 14 peut porter en
25 outre le récepteur LIDAR 2.

Le perfectionnement de l'invention qui est maintenant décrit permet de superposer une trace de l'impact au sol du rayonnement LIDAR à des images supplémentaires qui sont saisies de la zone terrestre étudiée. Pour cela, un
30 troisième détecteur d'image 13 est ajouté sur le support commun 14. Ce peut être une autre matrice de photodétecteurs, par exemple du même type que

celles des détecteurs d'images 11 et 12. Le détecteur 13 est destiné à détecter une partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé qui est reçue à travers l'ensemble de formation d'image du système d'imagerie stéréoscopique 20. Autrement dit, une image supplémentaire est formée par l'optique 5 sur le

5 détecteur 13, à partir d'une partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé qui est collectée et transmise vers le support 14 par le diviseur de faisceau 4. Cette image supplémentaire correspond à la partie de la zone cible qui reçoit le rayonnement LIDAR, centrée sur la direction de pointage D_0 du système LIDAR 10. En connaissant les positions relatives des trois détecteurs 11, 12 et

10 13, il est alors possible de situer précisément la position de la zone cible qui reçoit le rayonnement LIDAR au sein du champ de mesure du système stéréoscopique 20. Eventuellement, le détecteur 13 peut correspondre à un champ d'entrée qui est plus large que la zone cible qui reçoit réellement le rayonnement LIDAR primaire, de sorte que cette zone cible du système LIDAR

15 10 soit toujours incluse dans une image d'une portion plus large de la surface de la Terre qui est saisie par le détecteur 13, même en présence de distorsions mécaniques résiduelles. Avantageusement, lorsque la direction de pointage D_0 est située angulairement entre les lignes de visée L_1 et L_2 , la position du détecteur d'image 13 peut être ajustée sur le support commun 14 pour que ce

20 détecteur 13 définisse une troisième ligne de visée à travers l'optique 5, qui soit superposée à la direction de pointage D_0 .

Un système d'imagerie stéréoscopique, qui peut notamment être mis en œuvre à partir d'un aéronef ou d'un satellite, est caractérisé usuellement par le quotient de stéréoscopie B/H . H est la distance entre le système et le sol,

25 c'est-à-dire l'altitude du satellite, et B est la longueur de déplacement du système au dessus du sol, entre les deux instants de saisie d'images d'une même portion cible du sol, respectivement selon les deux lignes de visée. La précision d'une mesure d'altitude par le système stéréoscopique dépend, d'une façon connue, de la valeur du quotient B/H et de la taille de la pupille d'entrée

30 de l'ensemble de formation d'image pour chaque ligne de visée. Cette précision de mesure altimétrique croît en fonction de la valeur du quotient B/H , et en fonction de la taille de pupille. Or il est difficile de réaliser un système d'imagerie stéréoscopique avec la même optique 5 qui est commune aux deux

voies stéréoscopiques, et pour lequel le quotient B/H et la pupille soient simultanément importants. Ainsi, l'ensemble de formation d'image a de préférence soit une valeur importante du quotient B/H avec une pupille qui est plus petite, soit une valeur du quotient B/H qui est plus faible avec une pupille
5 qui est plus grande.

En référence à la figure 3, on décrit maintenant un ensemble de formation d'image qui peut constituer l'optique 5, et qui correspond à une valeur du quotient de stéréoscopie B/H comprise entre 0,2 et 0,4, de préférence entre 0,25 et 0,35. Par exemple, le quotient B/H est égal à 0,3.
10 Autrement dit, en reprenant les références des composants du dispositif 100 de la figure 1, les deux détecteurs d'images 11 et 12 du système d'imagerie stéréoscopique 20 sont disposés de sorte que les deux lignes de visée L_1 et L_2 soient séparées angulairement de $2 \times \text{Arctan}(0,5 \times B/H)$, c'est-à-dire θ_{stereo} est égal à 17° (degrés) pour $B/H = 0,3$, sans prendre en compte la rotondité de la
15 Terre. Une telle optique 5 peut posséder, pour chaque ligne de visée L_1 et L_2 , un diamètre de pupille d'entrée qui est supérieur à 0,2 m, voire compris entre 0,25 m et 0,35 m. Dans ce mode de réalisation qui est donné à titre d'exemple non limitatif, l'optique 5 comprend, pour chaque ligne de visée L_1 et L_2 , une portion d'un miroir primaire concave M_1 , une portion d'un miroir secondaire convexe M_2 , et une portion d'un troisième miroir M_3 qui est concave. En outre,
20 ces miroirs sont agencés pour constituer un télescope à trois miroirs anastigmatique («Three Mirror Anastigmat telescope» ou TMA en anglais). Les miroirs M_1 , M_2 et M_3 peuvent être continus entre les portions de chacun d'eux qui sont utiles pour réfléchir des rayons qui parviennent aux détecteurs 11 et
25 12, respectivement selon les lignes de visée L_1 et L_2 . Alternativement, ils peuvent être limités à ces portions utiles qui sont alors séparées latéralement. Dans cette configuration de l'optique 5, sa pupille peut être positionnée sur le miroir primaire M_1 ou sur le miroir secondaire M_2 .

Pour raison de clarté, le diviseur de faisceau 4 n'a pas été représenté
30 sur la figure 3, ni le troisième détecteur d'image 13, ni les miroirs optionnels 21 et 22. Le cas échéant, le détecteur 13 pourrait être situé sur le support 14, entre les détecteurs 11 et 12.

A titre d'exemple, les rayons de courbure moyens peuvent être 4789,32 mm (millimètre) pour le miroir primaire concave M_1 , 1717,90 mm pour le miroir secondaire convexe M_2 , et 2618,52 mm pour le troisième miroir concave M_3 . L'Homme du métier saura alors sélectionner les valeurs des coefficients de conicité et d'asphérisation des trois miroirs. Les trois miroirs M_1 , M_2 et M_3 sont disposés chacun symétriquement par rapport à un plan (O, Y, Z) d'un système d'axes orthogonaux (X, Y, Z) d'origine O. Le plan (O, Y, Z) contient leurs sommets respectifs, aussi appelés «apex» en anglais, ainsi que leurs axes optiques respectifs. A l'intérieur du plan (O, Y, Z) et par rapport à l'axe X, l'axe optique du miroir M_1 est incliné de $5,31^\circ$ (degré), l'axe optique du miroir M_2 est incliné de $5,91^\circ$, et l'axe optique du miroir M_3 est incliné de $12,75^\circ$. Simultanément, les sommets des miroirs sont décalés par rapport à l'axe Z, parallèlement à l'axe Y, de 257,36 mm pour le miroir M_1 , 134,61 mm pour le miroir M_2 , et 602,71 mm pour le miroir M_3 . Les sommets respectifs des miroirs M_1 et M_3 sont simultanément décalés par rapport au sommet du miroir M_2 , le long de l'axe Z, de 1305 mm et 1144 mm, respectivement. Dans ces conditions, le plan focal PF qui contient les détecteurs 11 et 12 est situé à 1687 mm du sommet du miroir M_3 , encore le long de l'axe Z. Le télescope qui est ainsi formé par l'optique 5 est du type hors d'axe. Il est alors entendu que chacun des trois miroirs réels correspond à une partie utile de la surface optique correspondante qui vient d'être définie, sans nécessairement en contenir le sommet. Par exemple, les dimensions et formes des miroirs peuvent être : 1290 mm x 490 mm pour le miroir M_1 rectangulaire, un diamètre de 136 mm pour le miroir M_2 circulaire, et 1040 mm x 322 mm pour le miroir M_3 rectangulaire.

La figure 4 reproduit une cartographie de relief terrestre qui peut être obtenue à l'aide d'un dispositif 100 selon l'invention, embarqué à bord d'un satellite. Les directions V et F sont respectivement la direction de défilement du satellite ou de l'aéronef au dessus du sol et la direction perpendiculaire à ce défilement, parallèle à la surface de la Terre. La direction F est appelée direction de largeur de fauchée dans le jargon de l'Homme du métier. Les lignes de niveau N sont déduites des images stéréoscopiques qui sont produites par le système 20. Les points notés S_{LIDAR} sont les images du

faisceau de rayonnement LIDAR, qui sont saisies par le détecteur d'image 13 lorsque celui-ci est utilisé. Le système LIDAR 10 fournit des valeurs d'altitude qui sont précises pour chacun des points S_{LIDAR} . Ces valeurs de mesure LIDAR peuvent alors être utilisées pour étalonner les lignes de niveau N, à l'emplacement de chaque point S_{LIDAR} . Un tel étalonnage peut ensuite être propagé dans toute la cartographie grâce au système d'imagerie stéréoscopique 20. Ainsi, un dispositif 100 selon l'invention peut fournir une cartographie de relief terrestre avec une précision supérieure. La zone qui est désignée par W dans la cartographie de la figure 4 correspond à un lac. Le système d'imagerie stéréoscopique 20 ne fournit donc pas de lignes de niveau dans cette zone W qui est radiométriquement uniforme. Toutefois, le système LIDAR 10 produit une mesure de la profondeur du lac en chacun des points S_{LIDAR} qui sont situés dans la zone W.

Eventuellement, la largeur de fauchée selon la direction F peut être augmentée en réalisant un balayage de la surface terrestre perpendiculairement à la direction V de défilement du satellite. De façon connue, un tel balayage peut être réalisé en basculant le satellite dans son ensemble, ou bien, lorsque l'attitude du satellite est constante, en variant l'orientation du dispositif 100 par rapport au satellite ou en variant l'orientation d'un miroir mobile qui est placé devant l'entrée de l'optique 5.

Enfin, il est rappelé qu'il n'est pas indispensable pour l'invention que le rayonnement LIDAR primaire soit transmis par l'émetteur LIDAR 1 vers la Terre à travers l'optique 5. Il peut être transmis vers la Terre à travers une optique séparée, de sorte que l'optique 5 n'appartienne pas à la voie d'émission LIDAR. L'optique 5 n'est alors partagée que par la voie de réception LIDAR et le système d'imagerie stéréoscopique 20. Dans le jargon de l'Homme du métier, le système LIDAR 10 est alors dit monostatique en réception et bi-statique en émission.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de mesure altimétrique (100), adapté pour être embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite et pour effectuer, à partir dudit aéronef ou satellite, une mesure d'altitude d'un relief situé à la surface de la Terre ou un
5 sondage d'un volume semi-transparent situé à ladite surface de la Terre, ledit dispositif comprenant :

- un système LIDAR (10) incluant lui-même :

10 . un émetteur LIDAR (1) adapté pour produire un rayonnement LIDAR primaire, le dispositif (100) étant agencé pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire vers la surface de la Terre (T),

. un collecteur de rayonnement à miroirs (5) disposé pour collecter un rayonnement LIDAR rétrodiffusé par ladite surface de la Terre, et

15 . un récepteur LIDAR (2) disposé pour recevoir le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté ; et

- un système d'imagerie stéréoscopique (20) incluant lui-même :

. un ensemble de formation d'image agencé pour former des images, et

20 . deux séries de détecteurs d'images (11, 12) disposés pour saisir des images respectives de deux portions décalées de la surface de la Terre, à travers l'ensemble de formation d'image selon deux lignes de visée différentes (L_1 , L_2),

le dispositif (100) étant caractérisé en ce que le collecteur de rayonnement (5) est commun au système LIDAR (10) et à l'ensemble de formation d'image du
25 système d'imagerie stéréoscopique (20), ledit dispositif étant agencé pour diriger une première partie d'un rayonnement total collecté par le collecteur de rayonnement (5) vers le récepteur LIDAR (2), et une seconde partie dudit rayonnement total collecté vers les deux séries de détecteurs d'images (11, 12) du système d'imagerie stéréoscopique.

2. Dispositif selon la revendication 1, comprenant en outre un diviseur de faisceau (4) disposé pour diriger la première partie du rayonnement total collecté par le collecteur de rayonnement (5) vers le récepteur LIDAR (2), et la seconde partie dudit rayonnement total collecté vers les deux détecteurs d'images (11, 12) du système d'imagerie stéréoscopique (20).
3. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel le diviseur de faisceau (4) est une lame semi-réfléchissante.
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le collecteur de rayonnement à miroirs (5) est en outre disposé pour transmettre vers la surface de la Terre (T) le rayonnement LIDAR primaire produit par l'émetteur LIDAR (1).
5. Dispositif selon la revendication 4, dans lequel l'émetteur LIDAR (1) est adapté pour produire le rayonnement LIDAR primaire avec une première polarisation rectiligne, le système LIDAR (10) incluant en outre :
- 15 - une lame quart d'onde (31) disposée entre ledit émetteur LIDAR (1) et le collecteur de rayonnement (5) pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire en transformant ladite première polarisation rectiligne en première polarisation circulaire du rayonnement LIDAR primaire transmis par ledit collecteur de rayonnement, et pour transmettre en sens inverse le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté ayant une
20 seconde polarisation circulaire opposée à ladite première polarisation circulaire, en transformant ladite seconde polarisation circulaire en seconde polarisation rectiligne perpendiculaire à ladite première polarisation rectiligne ; et
 - 25 - un séparateur de polarisations rectilignes (32) disposé pour diriger le rayonnement LIDAR primaire produit par l'émetteur LIDAR (1) vers la lame quart d'onde (31) d'une part, et pour diriger le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté et transmis par la lame quart d'onde vers le récepteur LIDAR (2) d'autre part.

6. Dispositif selon la revendication 4, dans lequel le système LIDAR (10) inclut en outre un miroir (3) disposé pour réfléchir le rayonnement LIDAR rétrodiffusé et collecté vers le récepteur LIDAR (2), ledit miroir comportant une ouverture (30) agencée pour transmettre le rayonnement LIDAR primaire produit par l'émetteur LIDAR (1) vers le collecteur de rayonnement (5).
7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre un support commun (14) disposé pour porter ensemble les deux détecteurs d'images (11, 12) du système d'imagerie stéréoscopique (20), ledit support commun portant en outre le récepteur LIDAR (2).
8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel le support commun (14) porte en outre un troisième détecteur d'image (13) adapté pour détecter une partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé reçue à travers l'ensemble de formation d'image du système d'imagerie stéréoscopique (20), et pour saisir une image d'une troisième portion de la surface de la Terre formée par ledit ensemble de formation d'image avec ladite partie du rayonnement LIDAR rétrodiffusé.
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le système LIDAR (10) et le système d'imagerie stéréoscopique (20) sont disposés de sorte qu'une direction de pointage (D_0) dudit système LIDAR soit située angulairement au milieu des deux lignes de visée (L_1 , L_2) dudit système d'imagerie stéréoscopique.
10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre une série de miroirs supplémentaires (21, 22) associés aux deux séries de détecteurs d'images (11, 12) du système d'imagerie stéréoscopique (20), pour déterminer avec des positions des dits deux séries de détecteurs d'images, les deux lignes de visée (L_1 , L_2) dudit système d'imagerie stéréoscopique à travers le collecteur de rayonnement (5).
11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- les deux séries de détecteurs d'images (11, 12) du système d'imagerie stéréoscopique (20) sont disposées de sorte que les deux lignes de visée (L_1 , L_2) dudit système d'imagerie stéréoscopique sont séparées angulairement de $2 \times \arctan(0,5 \times B/H)$, B/H désignant un quotient de stéréoscopie compris entre 0,2 et 0,4 ; et

- pour chaque ligne de visée (L_1 , L_2), le collecteur de rayonnement (5) comprend une portion d'un miroir primaire concave (M_1), une portion d'un miroir secondaire convexe (M_2), et une portion d'un troisième miroir concave (M_3), les dits miroirs étant agencés pour constituer un télescope à trois miroirs anastigmatique.

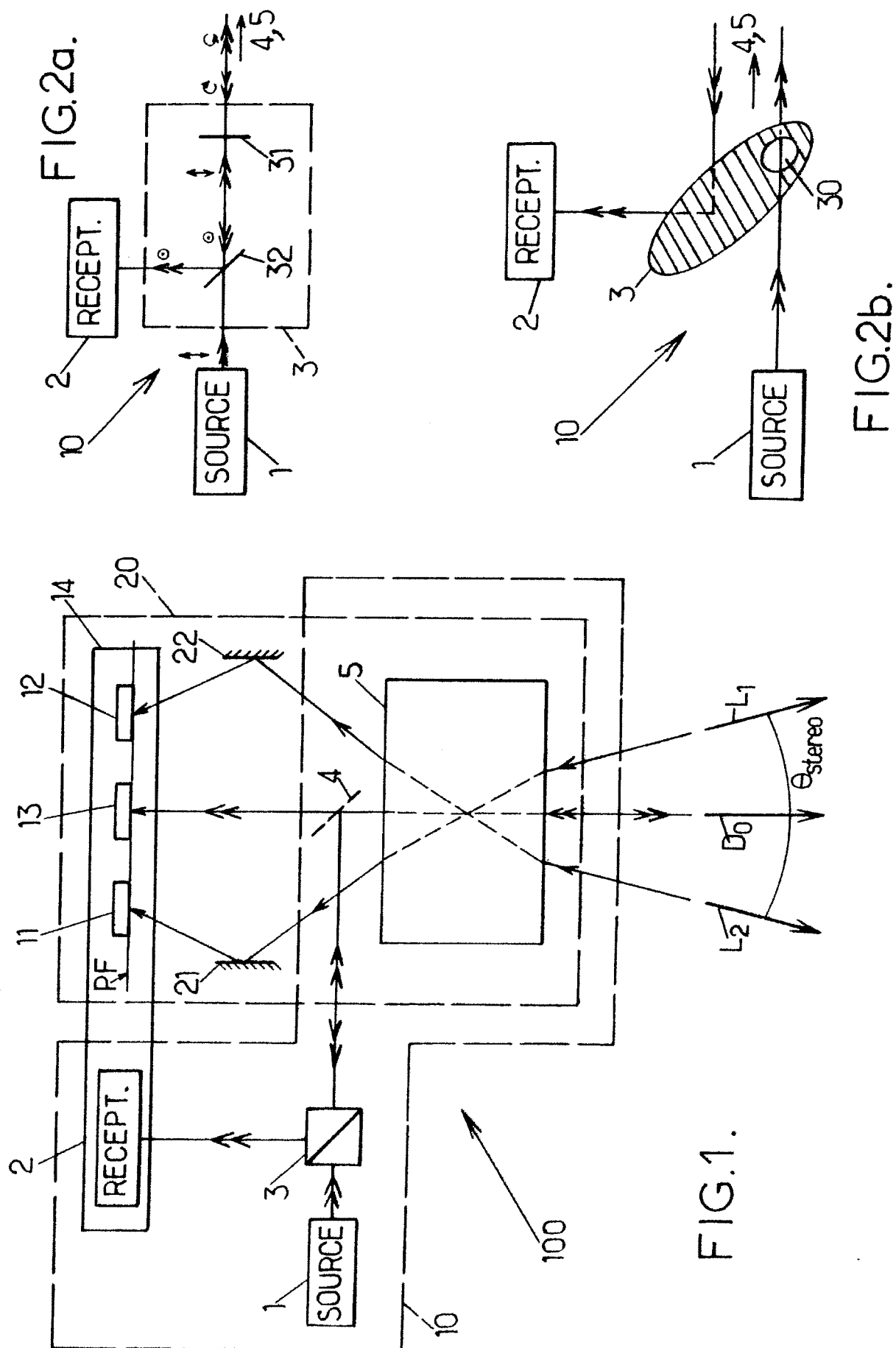
12. Dispositif selon la revendication 11, dans lequel le quotient de stéréoscopie B/H est compris entre 0,25 et 0,35.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel l'émetteur LIDAR (1) est adapté pour produire le rayonnement LIDAR primaire avec une première longueur d'onde comprise entre $0,3 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$, et dans lequel le système d'imagerie stéréoscopique (20) est adapté pour former et saisir des images dans toute bande de longueurs d'onde comprises entre $0,3 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel l'émetteur LIDAR (1) est adapté pour produire le rayonnement LIDAR primaire avec une première longueur d'onde comprise entre $0,3 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$, et une deuxième longueur d'onde comprise entre $0,7 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$, et dans lequel le système d'imagerie stéréoscopique (20) est adapté pour former et saisir des images dans toute bande de longueurs d'onde comprises entre $0,3 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$.

15. Procédé de mesure d'une épaisseur de couverture végétale présente à la surface de la Terre, ou de caractérisation d'un relief terrestre sous couverture végétale, utilisant un dispositif de mesure altimétrique (100) selon la revendication 13, embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite.

16. Procédé de mesure bathymétrique à travers un volume aquatique présent à la surface de la Terre, utilisant un dispositif de mesure altimétrique (100) selon la revendication 14, embarqué à bord d'un aéronef ou d'un satellite.



2/3

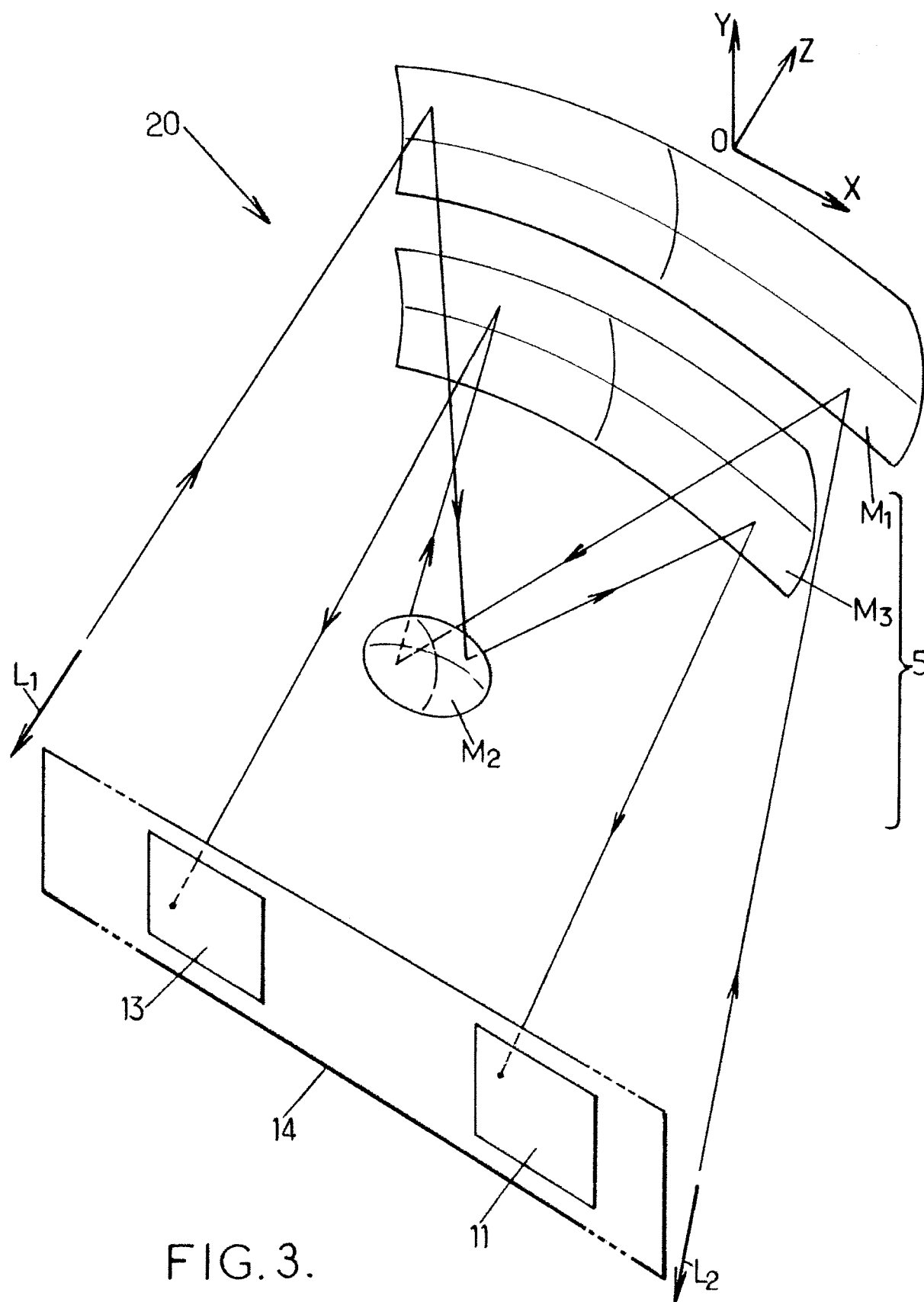


FIG. 3.

FIG.4.

