

Application du lidar à la détection d'objets flottants ou faiblement immergés

Jean-Pierre Tanguy

GESMA
Division Optique-Hyperfréquences
BP 42 29240 BREST NAVAL

RESUME

On considère l'application du lidar à la détection d'objets flottants ou faiblement immergés. Les performances du lidar dépendent non seulement du rapport signal sur bruit, qui tient compte uniquement des bruits du récepteur, mais aussi du contraste, ou rapport signal sur rétrodiffusion. La rétrodiffusion est un bruit lié au signal émis. C'est l'équivalent du clutter en radar et de la réverbération en sonar actif. On donne l'expression du rapport signal sur bruit pour les deux modes de détection usuels en lidar (détections directe et hétérodyne). On mentionne quelques techniques possibles de réduction de la rétrodiffusion, en insistant sur la technique émergente consistant à moduler le signal laser par un signal radar. Cette technique, désignée par détection lidar-radar, est sensée apporter un gain significatif en contraste.

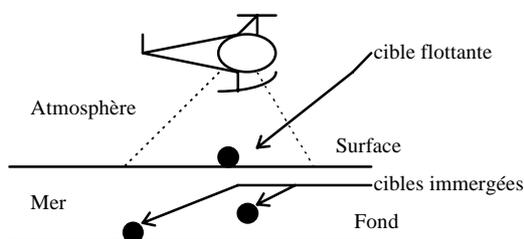
ABSTRACT

The application of lidar for detection of floating or weakly immersed objects is being considered. The performances of a lidar not only depend on the signal to noise ratio, which takes into account the receiver noise, but also on the signal to backscattering ratio, or contrast. Backscattering is a noise related to the transmitted signal. It is the equivalent of clutter in radar or reverberation in active sonar. The expression of the signal-to-noise ratio is given for the two usual detection modes in lidar (direct and heterodyne detection). Some possible techniques for reduction of backscattering are mentioned. Special attention is given on the emerging technique which consists in modulating the laser signal by a radar signal. This technique, denoted as lidar-radar detection, is supposed to bring about a significant contrast improvement.

1 Introduction

Le terme lidar est un acronyme pour « LIGHT DETECTION AND RANGING ». Il sera employé ici pour désigner des systèmes laser destinés à la détection, la classification voire l'identification de cibles flottantes ou faiblement immergées de faibles dimensions. Il utilise comme source active une source laser qui présente comme caractéristiques spécifiques une très grande directivité spatiale (cohérence spatiale) ainsi qu'une quasi-monochromaticité (cohérence temporelle)[1]. La gamme de radiations utilisée pour les objets immergés se situe au voisinage du bleu-vert, soit dans l'intervalle approximatif [410-550 nm] ce qui correspond à la fenêtre de moindre atténuation de l'eau de mer [3]. On se propose de décrire quelques aspects du traitement du signal lidar, le bruit parasite étant constitué par le bruit du récepteur d'une part et par la rétrodiffusion d'autre part.

Pour fixer les idées, on considérera ici le lidar employé en détection verticale, comme indiqué dans le schéma ci-dessous



2 Généralités

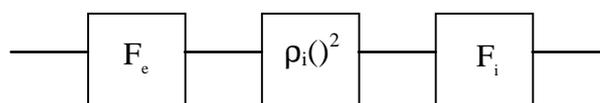
Avant de calculer les rapports signal sur bruit et contrastes, nous allons donner la modélisation du récepteur, du signal utile et de la rétrodiffusion.

On n'insistera pas sur la description du schéma fonctionnel d'un émetteur-récepteur de lidar qui est bien connue [1] et qui présente de grandes similitudes avec le radar ou le sonar.

On notera simplement que le récepteur est constitué d'une optique collectrice, d'un ensemble de filtres optiques spectraux et spatiaux et d'un détecteur proprement dit. Ce dernier peut être, soit un photodétecteur (photomultiplicateur, photodiode,...) [4], soit une caméra CCD, intensifiée ou non [4]. On se limitera ici au cas où le détecteur est un photomultiplicateur.

2.1 Modélisation du photomultiplicateur

Un photomultiplicateur convertit un signal optique (flux de photons) en un signal électrique (courant ou tension). D'un point de vue fonctionnel, il peut être modélisé par un système de type « filtrage-carré-intégration » [6]



F_e filtre optique passe-bande centré sur la fréquence du laser et de largeur de bande $2\Delta\nu_e = 1$ nm en monolatéral.

$$\rho_i = \frac{\eta \cdot q}{h\nu_0}$$

réponse du détecteur

η rendement quantique

q charge de l'électron $q = 1.601 \cdot 10^{-19}$ C

h constante de Planck $h = 6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js

ν_0 fréquence du laser

F_i filtre de largeur de bande égale à celle du photomultiplicateur ($\Delta\nu_i = 300$ à 500 MHz en monolatéral).

2.2 Modélisation du signal laser

Comme en radar, le signal émis peut être [5] soit un signal continu soit un signal impulsionnel, modulé ou non. Ce signal a bien sûr les spécificités rappelées dans l'introduction (cohérence temporelle et cohérence spatiale)

2.3 Modélisation de la rétrodiffusion.

Le flux laser de rétrodiffusion reçu à chaque instant (puissance instantanée) provient d'une tranche d'eau d'épaisseur $v\tau/2$ (correspondant à une durée d'impulsion τ). On montre que cette puissance instantanée est donnée par

$$P(t) = \beta(180) \cdot \frac{P_E}{x^2} \cdot S_{opt} \cdot \exp(-\gamma t) \cdot \frac{v\tau}{2}$$

avec $x=v\tau/2$

- γ coefficient d'atténuation de la lumière dans l'eau
- v célérité des ondes optiques dans l'eau de mer ($v= 227000$ km/s)
- t temps écoulé entre l'émission et la réception
- $\beta(180)$ coefficient de rétrodiffusion
- P_E puissance crête émise par le laser
- S_{opt} aire de l'optique de réception

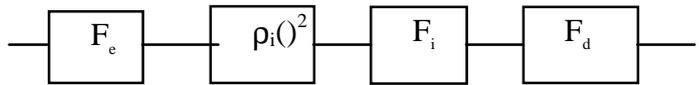
Pour une tranche d'eau située à une immersion comprise entre 0 et 10 m et pour une altitude du porteur de l'ordre de 500 m, on a $x^2 \approx$ constante. La rétrodiffusion a donc l'allure d'une exponentielle décroissante. Un ordre de grandeur usuel pour l'épaisseur de la tranche d'eau est:

$$v \cdot \tau / 2 = 227000 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} / 2 = 1.10 \text{ m avec } \tau = 10 \text{ ns.}$$

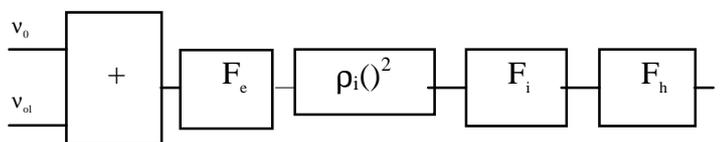
3 Les modes de détection en lidar

La conversion d'un signal lumineux en un signal électrique est par nature une opération quadratique. Le processus naturel de détection est donc constitué par un photomultiplicateur suivi d'un filtre passe-bas de largeur de bande égale à la largeur de bande de l'impulsion reçue, dans

le cas d'un laser impulsionnel, auquel on se limitera ici. Un tel procédé se nomme « détection directe ». Le schéma de principe est donné ci-dessous [2]



Le traitement étant quadratique, toute information de phase disparaît (à moins d'effectuer une modulation de l'enveloppe). Il peut être intéressant d'avoir accès à la phase lorsqu'on veut mesurer des vitesses d'objets mobiles. Ceci conduit à utiliser un autre mode de détection : la détection hétérodyne. Le signal laser reçu est mélangé avec une référence appelée oscillateur local de manière à obtenir un signal à une fréquence égale à la différence entre la fréquence ν_0 du laser et la fréquence ν_{ol} de l'oscillateur local. Le schéma de principe est donné ci-dessous [2]



Le photomultiplicateur est suivi d'un filtre passe-bande F_h centré sur $\nu_0 - \nu_{ol}$ et de largeur de bande égale à la largeur de bande de l'impulsion reçue.

La détection lidar-radar est une forme de détection directe, puisqu'elle réalise une modulation de l'enveloppe.

Le signal laser étant décrit par un signal à bande étroite de la forme $x(t) = \sqrt{2 \cdot P(t)} \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi(t))$

avec $\nu_0 \approx 5.10^{14}$ Hz

et $0 \leq t \leq \tau$, τ durée de l'impulsion reçue.

(cas du laser NdYAG doublé en fréquence $\lambda = 532nm$), le signal observé en sortie du photomultiplicateur est :

en détection directe [6] $i(t) = \rho_i \cdot P(t)$

en détection hétérodyne [6]

$$i(t) = \rho_i \cdot 2 \cdot \sqrt{P_{ol} \cdot P(t)} \cdot \cos[2\pi(\nu_0 - \nu_{ol})t + \alpha(t)]$$

avec $\nu_0 - \nu_{ol} \approx 10^8$ Hz et $\alpha(t)$ terme de phase.

P_{ol} puissance moyenne du signal d'oscillateur local en détection lidar-radar

$$i(t) = \rho_i [1 + k \cdot \cos(2\pi\nu_m t + \theta(t))]$$

avec ν_m fréquence du signal modulant, k constante et $\theta(t)$ terme de phase. Dans l'étude considérée [8]

$$\nu_m \approx 3.10^9 \text{ Hz}$$

Pour la détection lidar-radar, le schéma de principe de la détection directe reste valable. Le photomultiplicateur doit avoir une bande passante assez large pour récupérer la fréquence ν_m . Le filtre F_d est dans ce cas un filtre passe-

bande centré sur ν_m et de largeur de bande égale à la largeur de bande de l'impulsion reçue.

4 Calcul du rapport signal sur bruit

Le bruit considéré ici est le bruit du récepteur. Si on suppose le bruit ambiant blanc, gaussien, centré et décorréolé du signal utile, le bruit en sortie se calcule de manière très classique [7]. Si, de plus, on prend en compte le bruit Schottky, le bruit de courant d'obscurité et le bruit thermique de la résistance de charge (supposés mutuellement décorréolés), on obtient les expressions suivantes du rapport signal sur bruit en sortie du photomultiplicateur (c'est-à-dire en sortie du filtre F_i sur les schémas) :

en détection directe :

$$\left(\frac{S}{B}\right) = \frac{\rho_i^2 P_{sig}^2}{[\rho_i^2 \frac{\sigma^4}{\Delta \nu_e} (1 + M_d^2) + C_1 \Phi_d + C_2] \Delta \nu_i}$$

en détection hétérodyne :

$$\left(\frac{S}{B}\right) = \frac{2\rho_i^2 P_{sig} P_{ol}}{[\rho_i^2 \frac{\sigma^4}{\Delta \nu_e} (1 + M_h^2) + C_1 \Phi_h + C_2] \Delta \nu_i}$$

avec P_{sig} puissance moyenne du signal utile

$$P_{sig} = E[P(t)]$$

σ^2 puissance moyenne (variance) du bruit ambiant

P_{ol} puissance moyenne du signal d'oscillateur local

$$M_d^2 = \frac{2P_{sig}}{\sigma^2}$$

$$\Phi_d = P_{sig} + \sigma^2$$

$$C_1 = 2q\rho_i$$

$$C_2 = 2qI_{obs} + \frac{4kTF}{R_c}$$

$$M_h^2 = \frac{2.(P_{sig} + P_{ol})}{\sigma^2}$$

$$\Phi_h = \Phi_d + P_{ol}$$

I_{obs} courant d'obscurité

k constante de Boltzmann $k = 1.38032 \cdot 10^{-23}$ J/K

F facteur de bruit

R_c résistance de charge

T température

Remarques importantes :

1. Dans un système utilisé en détection hétérodyne, on fait toujours en sorte que le bruit Schottky dû à l'oscillateur local soit prépondérant. La relation ci-dessus devient alors:

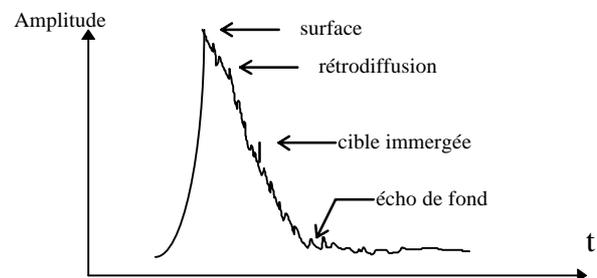
$$\left(\frac{S}{B}\right) = \frac{\eta P_{sig}}{h\nu_0 \Delta \nu_i}$$

2. L'efficacité de la détection hétérodyne dépend du rendement d'hétérodynage qui correspond à la proportion de flux laser contribuant effectivement au mélange avec l'oscillateur local.

5 Techniques de réduction du bruit de rétrodiffusion

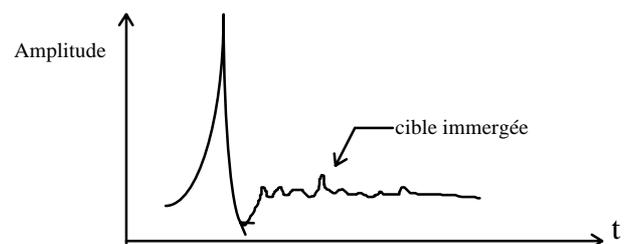
5.1 Généralités

En détection directe, l'allure typique de l'amplitude du signal de sortie du photomultiplicateur en fonction du temps est donnée ci-dessous :



En première approximation (diffusion simple), le signal rétrodiffusé est une exponentielle décroissante. Les fluctuations autour de la valeur moyenne constituent le bruit du récepteur.

En détection lidar-radar, on obtient l'allure suivante :



L'intérêt de ce mode de détection réside dans la possibilité d'effectuer une réduction notable de la rétrodiffusion

D'autres techniques peuvent aussi être envisagées pour réduire le bruit de rétrodiffusion :

La valeur moyenne de la rétrodiffusion peut par exemple être estimée par des approches classiques telles que

- filtrage passe-bas
- moindres carrés
- moyennage à court terme

la valeur estimée étant ensuite soustraite du processus observé. Ces approches risquent cependant de noyer des échos faibles en provenance de cibles immergées.

Une autre approche, assez classique, consiste à moyenniser plusieurs récurrences correspondant à une même zone éclairée.

Une approche plus sophistiquée[6] consiste à estimer la rétrodiffusion tout en préservant les moments jusqu'à un ordre donné. (cette procédure s'apparente au filtrage de Wiener)

5.2 Cas de la détection lidar-radar

D'après [8], ce procédé permet une réduction de la valeur moyenne de la rétrodiffusion de l'ordre de 20 dB pour des échos proches de la surface. Ce résultat, qui n'est pas démontré dans [8], doit être examiné de manière plus approfondie.

On se contentera ici de faire deux remarques:

- En détection lidar-radar, la puissance moyenne de rétrodiffusion due à une tranche d'eau d'épaisseur $v\tau/2$ est constituée par la sommation d'un grand nombre de signaux à phase aléatoire dus aux particules situées dans la tranche considérée (rappelons qu'en détection directe ordinaire, la phase n'intervient pas). Les phases sont en outre mutuellement décorréliées. D'après un résultat classique sur la somme de phaseurs aléatoires, l'amplitude tend vers une loi de Rayleigh et la phase vers une loi uniforme.

- En détection directe, la rétrodiffusion en fonction du temps est une exponentielle décroissante et a donc un spectre lorentzien (densité de puissance égale à

$$\frac{1}{(\mathcal{W})^2 + 4\pi^2\nu^2}).$$

La fréquence de coupure est donc égale à $\nu_c = \frac{\mathcal{W}}{2\pi}$.

D'après [3], on a les ordres de grandeur suivants pour le coefficient d'atténuation

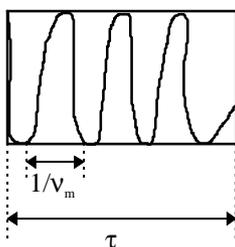
$$\gamma = 0.1m^{-1} \text{ en océan profond}$$

$$\gamma = 0.2m^{-1} \text{ en eau du large}$$

$$\gamma = 0.5m^{-1} \text{ en eau côtière}$$

$$\gamma = 2m^{-1} \text{ en eau turbide}$$

Cela conduit à une fréquence de coupure comprise entre quelques MHz et 100 MHz. La fréquence de modulation doit donc être choisie au-delà de 100 MHz. Le choix de la valeur précise $\nu_m = 3 \text{ GHz}$ reste toutefois une question ouverte. On notera qu'avec ce choix et pour une impulsion de durée $\tau=10 \text{ ns}$, on a environ 30 périodes du signal modulé par impulsion ($1/\nu_m \sim 0.3 \text{ ns}$).



6. Conclusion

Cet article avait pour but de montrer le rôle du traitement du signal dans le cas d'un lidar aéroporté utilisé pour la détection à la verticale d'objets flottants ou faiblement immergés. Le problème est classique en détection directe et hétérodyne dans le cas où le bruit parasite est le bruit du récepteur (détection d'un signal à bande étroite dans un bruit blanc gaussien). On notera que la détection hétérodyne, assez délicate à mettre en oeuvre, semble peu adaptée au milieu marin [7]. Pour s'affranchir du bruit de rétrodiffusion, la technique récente de détection lidar-radar semble prometteuse. Il sera donc intéressant de mener des recherches futures, tant théoriques qu'expérimentales, sur cette technique.

7. Références

- [1] J.L. Meyzonnette, *Radars laser* -Ecole d'Eté Systèmes optiques 1993
- [2] A.V. Jelalian, *Laser Radar Systems*,-ARTECH HOUSE 1992
- [3] A. Le Gall, B.Toullec, G.Kervern, J.Certenais, *Airborne laser bathymetry: a novel technique for shallow water monitoring* -Revue Technique THOMSON-CSF-Vol.25-no 3-Septembre 1993
- [4] Perez, *Optique géométrique et ondulatoire*-MASSON 1994
- [5] G.R.Osche, D.S.Young, *Imaging Laser Radar in the Near and Far Infrared*-Proc. IEEE, vol. 84,n0 2, February 1996
- [6] Dupraz, *Théorie du Signal et Transmission de l'information* - EYROLLES 1989
- [7] Haudidier, *Analyse des conditions d'utilisation des méthodes hétérodynes dans le domaine bleu-vert. Application à la détection en milieu marin et à l'étude de la structure cohérente des sources*- Thèse UBO 1995
- [8] Mullen, Vieira, Herczfeld, *Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection*- IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, vol.43, n° 9, September 1995
- [9] Wong, Antoniou, *One-Dimensional Signal Processing Techniques for Airborne Laser Bathymetry*- IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, vol. 32,no 1, January 1994

8. Remerciements

Je remercie M.MEYZONNETTE, de l'Ecole Supérieure d'Optique, pour ses conseils qui m'ont été utiles dans la rédaction de cet article.