

NOUVEAU CONCEPT DE SPECTROMÈTRE POUR LE MOYEN INFRAROUGE AUTOUR DE 3.5 μm UTILISANT LA GÉNÉRATION DE SOMME DE FRÉQUENCES

Abhishek RAI¹, Ludovic GROSSARD¹, François REYNAUD¹,
Mathieu CHAUVET², Florent BASSIGNOT³ et Rodolphe Krawczyk⁴

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, 123 Avenue Albert Thomas, Limoges, 87000, France

² FEMTO-ST Institute, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté,
25000 Besançon, France

³ Femto-Engineering, 15B avenue des Montboucons, 25000 Besançon, France

⁴ Thales Alenia Space, Observation Exploration & Navigation, 5 Allée des Gabians BP 99, Cannes La
Bocca Cedex 06156 France

abhishek.rai@unilim.fr

RÉSUMÉ

Nous proposons un nouveau concept de spectroscopie dédié au moyen infrarouge (autour de 3.5 μm) utilisant la somme de fréquence dans un guide non linéaire de type PPLN ridge. Le spectre de la source est converti vers le proche infrarouge (≈ 820 nm) grâce à un rayonnement de pompe monochromatique autour de 1064 nm accordable sur 2.4 nm.

MOTS-CLEFS : *moyen infrarouge, spectroscopie, somme de fréquences, PPLN*

1. INTRODUCTION

Les systèmes de détection pour l'infrarouge thermique se heurtent à deux difficultés. D'abord, les capteurs sont davantage bruités qu'en visible ou proche infrarouge à cause de leur faible band gap. Ensuite, ils sont soumis au rayonnement thermique de l'ensemble de la chaîne instrumentale, ce qui limite fortement la dynamique de la mesure. Pour limiter ce bruit, il est nécessaire de refroidir l'ensemble de la chaîne. Dans le domaine du spatial, on utilise des systèmes cryogéniques lourds et complexes, qui constituent un point de panne unique pour lequel il est difficile d'avoir de la redondance [1]. D'autre part, ils peuvent être sources de microvibrations, et limitent la durée de vie du satellite pour les systèmes de refroidissement passifs.

Nous avons développé une nouvelle technique hybride de spectroscopie dans l'infrarouge thermique, s'appuyant sur l'optique non-linéaire et la détection en régime de comptage de photons. En transposant le spectre des sources observées du moyen infrarouge vers le proche infrarouge via un processus non linéaire de somme de fréquences [2], nous pouvons utiliser des capteurs plus performants et moins bruités que leurs homologues fonctionnant dans l'infrarouge thermique [3].

PRINCIPE ET MONTAGE EXPÉRIMENTAL

L'idée consiste à convertir le rayonnement moyen infrarouge à analyser autour de $\lambda_s = 3.5 \mu\text{m}$ vers le proche infrarouge autour de $\lambda_c = 820$ nm. La conversion est réalisée en utilisant un processus de somme de fréquences dans un guide PPLN, alimenté par un rayonnement laser de pompe monochromatique, continu, et accordable sur 2.4 nm autour de $\lambda_p = 1064$ nm. L'efficacité de conversion dépend de la condition de quasi-accord de phase entre les trois ondes se propageant dans le cristal non linéaire. Celles-ci doivent également satisfaire à la condition de conservation de l'énergie ($\nu_c = \nu_s + \nu_p$). Ainsi, pour une longueur d'onde de pompe fixée, un échantillon spectral moyen infrarouge de largeur $\Delta\lambda_s$ sera converti efficacement en un échantillon spectral en proche infrarouge de largeur $\Delta\lambda_c$ (profil de type sinc²). En mesurant la puissance contenue dans l'échantillon spectral converti, il est possible de remonter à la puissance contenue dans l'échantillon spectral moyen infrarouge d'origine. En modifiant légèrement la longueur d'onde de pompe, les conditions de quasi accord de phase et de conservation de l'énergie font

que la longueur d'onde moyenne de l'échantillon spectral du signal est également modifiée, tout comme la longueur d'onde moyenne de l'échantillon dans le spectre converti. Le spectre de la source peut alors être reconstruit en balayant en longueur d'onde de pompe, et en mesurant la puissance contenue dans chaque échantillon spectral converti. Le montage expérimental est représenté sur la figure 1. La source moyen infrarouge est un filament chauffé autour de 800°C, émettant ainsi un rayonnement de type corps noir. Ce rayonnement alimente un interféromètre de Michelson dont la différence de marche est égale à 280 μm, « marquant » ainsi la densité spectrale de puissance de la source par une modulation sinusoïdale (cannelures) de période égale à $\delta v_s^M = 1.07$ THz. On injecte ensuite dans le guide non linéaire à la fois le rayonnement de la source et le faisceau de pompe (puissance de pompe de l'ordre de 150 mW). Le rayonnement converti est alors collecté en sortie de guide, puis filtré spectralement pour supprimer les résidus de pompe avant d'être détectée en régime de comptage de photons.

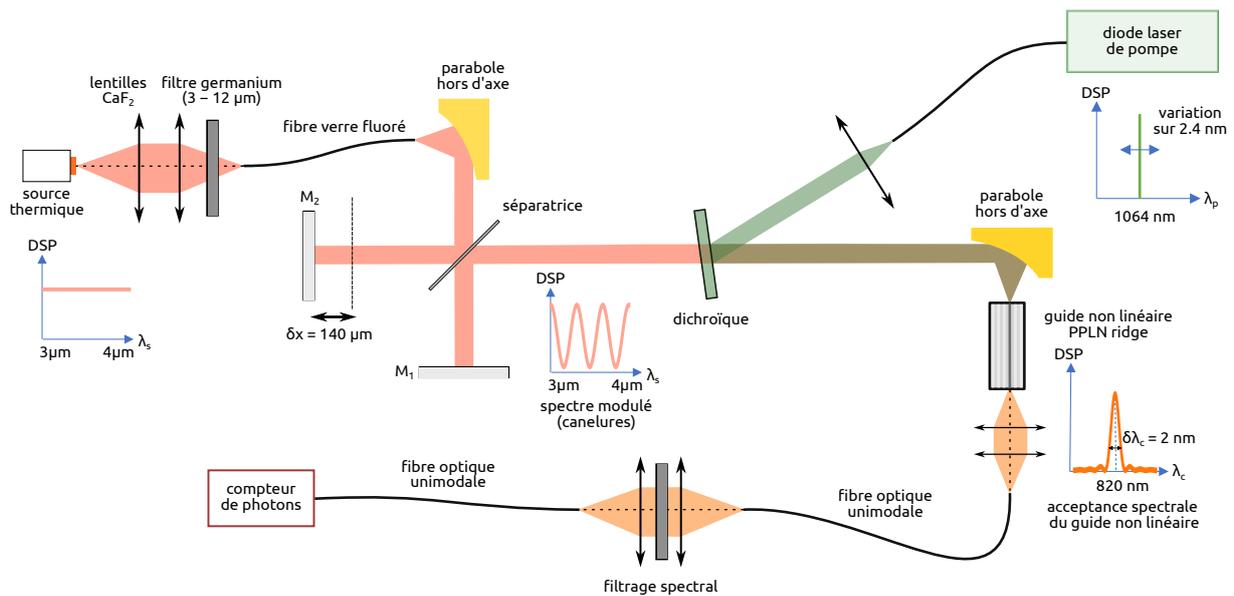


FIGURE 1 : Montage expérimental. Un échantillon spectral de la source infrarouge thermique est converti vers le proche infrarouge (autour de 820 nm) grâce à un rayonnement de pompe monochromatique autour de 1064 nm accordable sur 2.4 nm. Le spectre de la source infrarouge est reconstruit en balayant la longueur d'onde de la pompe au cours du temps. DSP : densité spectrale de puissance.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous avons cherché à retrouver la périodicité imposée au spectre de la source thermique autour de 3.5 μm à partir du rayonnement converti dans le proche infrarouge avec le spectromètre non linéaire. Pour cela, nous avons fait varier de manière discrète la longueur d'onde du rayonnement de pompe sur une plage de 2.4 nm autour de 1064 nm et avons mesuré pour chacune de ces valeurs la puissance convertie autour de 820 nm (photons/s). La figure 2 montre l'évolution de la puissance convertie en fonction de la variation de la longueur d'onde du rayonnement de pompe. Les données ont été normalisées en les corrigeant d'une part de la fluorescence paramétrique générée par la pompe dans le guide non linéaire, et d'autre part des variations de puissance de la pompe en fonction de la longueur d'onde. La courbe obtenue fait alors apparaître une modulation périodique de la puissance convertie, liée à la modulation imposée dans le spectre de la source thermique étudiée. Les données expérimentales ont été ajustées par une fonction sinusoïdale afin de retrouver cette périodicité en fonction de la longueur d'onde du rayonnement de pompe et nous avons obtenu $\delta\lambda_p = 1.4$ nm. En s'appuyant sur les conditions de quasi accord de phase et de conservation de l'énergie, nous avons pu remonter à la périodicité de la modulation dans le spectre de la source thermique : $\delta\lambda_s = 38$ nm soit en fréquence $\delta v_s = 0.87$ THz. Nous retrouvons ainsi une valeur

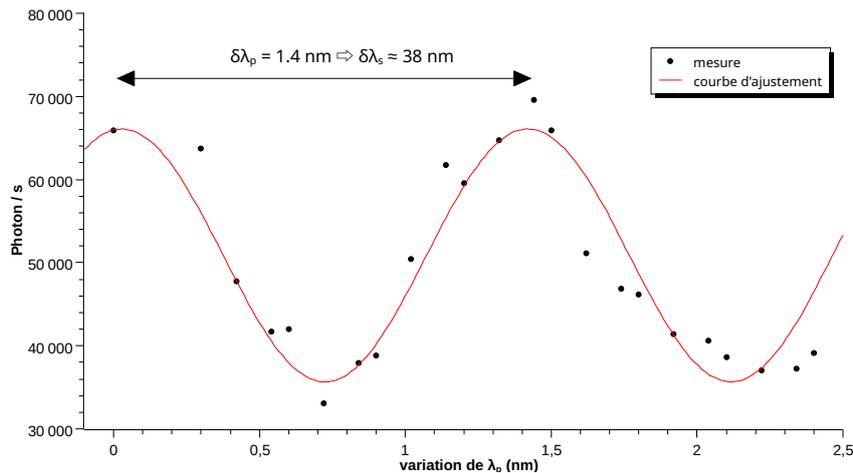


FIGURE 2 : Puissance de chaque échantillon spectral converti en fonction de la variation de longueur d'onde de pompe λ_p . Nous retrouvons dans le spectre reconstruit la modulation spectrale imposée au spectre de la source.

proche de la valeur de la modulation imposée par l'interféromètre de Michelson $\delta v_s^M = 1.07$ THz, avec un écart relatif égal à 19%.

À noter cependant que la largeur de l'acceptance spectrale du guide non linéaire limite la résolution de l'analyse spectrale. En effet, du fait de la faible accordabilité en longueur d'onde du laser de pompe, il n'y a qu'un facteur quatre entre la période de modulation du spectre de la source infrarouge ($\delta\lambda_s = 38$ nm) et l'acceptance spectrale du guide non linéaire ($\Delta\lambda_c = 2$ nm, soit $\Delta\lambda_s = 9$ nm). Ceci réduit considérablement l'amplitude de modulation mesurée dans le spectre reconstruit après conversion de fréquence, faisant chuter le rapport signal sur bruit.

CONCLUSION

Nous Proposons un nouveau concept de spectromètre dans le moyen infrarouge où chaque échantillon spectral de la source est converti vers le proche infrarouge par un processus non linéaire de somme de fréquence. Le spectre est reconstruit par balayage de la longueur d'onde du rayonnement laser de pompe. Nous avons ainsi retrouvé le spectre du rayonnement émis par une source thermique autour de $3.5 \mu\text{m}$ dans lequel des cannelures ont été imposées par un interféromètre de Michelson placé en amont du spectromètre. La périodicité des cannelures a été retrouvée dans le spectre reconstruit avec une erreur de 19%. Nous envisageons pour la suite d'utiliser une source laser de pompe accordable sur une plage de plusieurs dizaines de nanomètres pour convertir le spectre de sources moyen infrarouge sur une plage bien plus importante. Enfin, le spectre reconstruit est le résultat de la convolution du spectre transposé en fréquence par la réponse spectrale du guide non linéaire. On peut ainsi envisager à terme une opération de déconvolution pour remonter au spectre d'origine de la source moyen infrarouge de manière plus exacte.

Ce travail a été en partie soutenu par le réseau français RENATECH et sa plateforme technologique de l'institut FEMTO-ST, et Thales Alenia Space.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Han, A. Zhang, "Cryogenic technology for infrared detection in space." *Sci Rep*, 12, 2349 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06216-5>
- [2] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*. (Acad. Press, 2003)
- [3] L. Lehmann, L. Grossard, L. Delage, F. Reynaud, M. Chauvet and F. Bassignot, "Single photon MIR upconversion detector at room temperature with a PPLN ridge waveguide", *Optics Express*, Optical Society of America, 2019, 27 (14), pp.19233–19241. <https://doi.org/10.1364/OE.27.019233>