

Estimation de la direction d'arrivée d'un drone en mouvement par formation de voies adaptée à sa signature

Nathan ITARE Jean-Hugh THOMAS Kosai RAOOF

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613,
Institut d'Acoustique-Graduate School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université, 72085, France

Résumé – La problématique traitée est la surveillance acoustique d'une zone dans laquelle se déplace un drone. L'objectif de la méthode présentée est de renseigner la direction d'arrivée du drone en termes d'azimut et d'élévation à partir des données acquises par une antenne de microphones. Toutes les étapes de la méthode, qui tire parti de la signature acoustique du drone, sont définies et une expérimentation en conditions extérieures est décrite.

Abstract – The problem addressed is the acoustic monitoring of an area in which a drone is moving. The aim of the presented method is to inform the direction of arrival of the drone in terms of azimuth and elevation from the data acquired by a microphone array. All the steps of the method, which takes advantage of the drone's acoustic signature, are defined and an experiment in outdoor conditions is described.

1 Introduction

Aujourd'hui les drones peuvent être considérés comme des menaces lorsqu'ils survolent des zones sensibles. La problématique abordée dans ce travail concerne la localisation de drone en vol, à partir du son produit enregistré grâce à une antenne de microphones. Plusieurs travaux de recherche concernent cet aspect et les méthodes utilisées sont variées : formation de voies [1], Music [5], SRP-PHAT [7], SRP-PHAT avec variante [4]. Les travaux englobent parfois aussi d'autres tâches en plus de la localisation comme la détection et l'identification, avec le recours à des techniques d'intelligence artificielle (classification, réseaux de neurones) [1, 3, 5]. L'approche présentée ici cible la localisation et se caractérise par le fait qu'elle tient compte des propriétés d'harmonicité des signaux acoustiques émis par les drones, comme dans [2] à la différence que les signaux ne sont pas filtrés au préalable. La souplesse de la méthode provient de la possibilité de choisir la bande d'énergie dans la représentation temps-fréquence d'un signal focalisé dans une direction azimut-élévation de l'espace. La formation de voies est ainsi implantée dans le temps, contrairement à [1], sans privilégier de contenu fréquentiel à cette étape. La méthode s'appuie sur la connaissance d'une fréquence dont la détermination automatique est un enjeu de la localisation. L'article explique comment il est possible d'améliorer la pertinence du choix de cette fréquence.

Dans la partie 2, les caractéristiques du signal généré par un drone en mouvement sont décrites. L'objectif de la partie 3 est de présenter la méthode proposée en se focalisant sur ses éléments principaux : la formation de voies, la représentation dans le plan temps-fréquence comme outil de visualisation des composantes du signal et la corrélation spectrale harmonique qui permet de sélectionner automatiquement une fréquence cruciale de la signature du drone. La partie 4 insiste sur le mécanisme de choix de cette fréquence fondamentale et sur un algorithme permettant d'améliorer la localisation. Enfin la partie 5 relate une expérimentation de vol de drone suivant une trajectoire circulaire.

2 Signature acoustique d'un drone

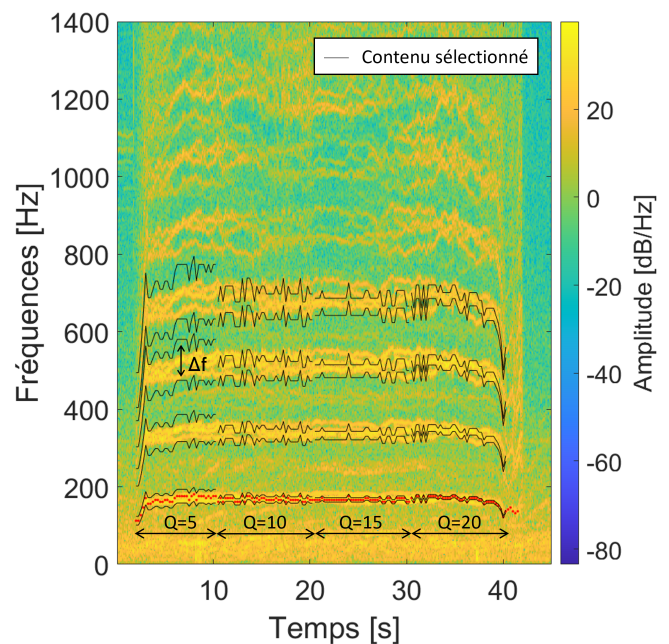


FIGURE 1 : Spectrogramme du signal émis par un drone en mouvement. Les points rouges correspondent à des estimations de f_{pp} obtenues par corrélation spectrale harmonique. Illustration des zones du plan temps-fréquence qui contribuent au calcul d'énergie en fonction de différents facteurs de qualité Q avec ici $N_h = 4 [f_{pp} + 3 \text{ harmoniques}]$ (voir section 3.3).

Les signaux acoustiques émis par un drone en mouvement présentent une structure harmonique due à la vitesse de rotation des moteurs et à la présence de pales. Plusieurs raies sont donc visibles sur les spectres à la fréquence de passage des pales f_{pp} et à ses harmoniques. Le lien entre cette fréquence et la fréquence de rotation f_{rotor} du moteur s'écrit :

$$f_{pp} = N_p \times f_{rotor}, \quad (1)$$

où N_p désigne le nombre de pales du moteur. En fonction du type de drones, donc du nombre de moteurs et du nombre de pales, le contenu fréquentiel diffère mais garde une structure harmonique comme sur la figure 1 représentant le spectrogramme d'un signal émis par un drone quadri-moteurs Phantom IV de DJI en mouvement. f_{pp} correspond aux points rouges et une petite dizaine d'harmoniques sont visibles. Plusieurs traces apparaissent autour de chaque harmonique du fait des variations de rotation des quatre moteurs.

3 Obtention de la direction d'arrivée

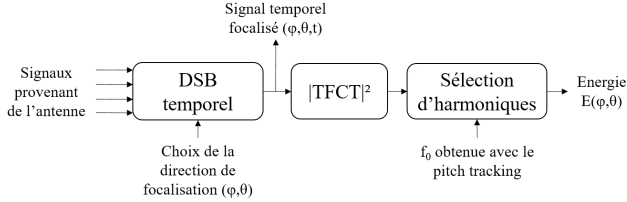


FIGURE 2 : Synopsis de la méthode d'estimation de la direction d'arrivée du drone.

3.1 Chaîne de traitement

L'objectif de la chaîne de traitement mise en œuvre est d'estimer la direction d'arrivée du drone par rapport à un repère constitué d'une antenne de microphones, en prenant en compte la spécificité du signal acoustique émis. Le synopsis de la méthode indiquée en figure 2 conduit à une cartographie d'énergie dans l'espace (φ, θ) des directions d'arrivées où φ et θ désignent respectivement l'azimut et l'élévation. Des exemples de cartographies sont visibles à la figure 3. Les étapes, représentées par les blocs, permettent d'obtenir l'énergie liée à une direction et sont à renouveler pour imager tout l'espace des directions d'arrivée. Le maximum de la cartographie donne la direction du drone. Une répétition du processus au cours du temps permet d'assurer le suivi du drone. Le traitement des directions successives se fait par une formation de voies temporelle (DSB pour Delay and Sum Beamforming) qui permet de maximiser le rapport signal à bruit des signaux captés dans la direction souhaitée. La représentation temps-fréquence (RTF) du signal focalisé, obtenue à partir d'une transformée de Fourier à court terme (TFCT) permet la prise en compte de la signature acoustique du drone. Il s'agit de sélectionner les harmoniques de la fréquence de passage des pales qui vont contribuer à l'énergie calculée. Cette fréquence est déterminée automatiquement par un algorithme de "pitch tracking".

L'antenne de microphones est composée de 10 microphones, avec un microphone au centre et trois microphones sur chaque axe [6], l'un vertical et les deux autres, orthogonaux dans un plan horizontal. Trois espacements inter-microphoniques sont utilisés sur chacun des axes (0.05 m, 0.2 m, 1.1 m), définissant une bande passante de [220, 3430] Hz. Le choix d'une géométrie de la forme d'un repère 3D avec peu de microphones satisfait des contraintes de coût raisonnable et de facilité de mise en œuvre.

3.2 Formation de voies temporelle

La formation de voies par retards et somme consiste à compenser les retards des signaux perçus par les N microphones de l'antenne afin d'obtenir un signal focalisé dans une direction $\Omega = (\varphi, \theta)$ [8]. L'implémentation temporelle de l'algorithme permet de conserver les informations fréquentielles captées par les microphones. Le formalisme temporel est décrit par l'équation 2 où w_i sont des poids ou termes de normalisation. Le signal temporel $p_i(t)$ correspond au signal reçu par le $i^{\text{ème}}$ microphone. Le retard τ_i est calculé selon l'équation 3, avec $\|\mathbf{x}_0\mathbf{M}\|$ la distance entre la source \mathbf{M} et la position du microphone de référence \mathbf{x}_0 , $\|\mathbf{x}_i\mathbf{M}\|$ la distance entre la source et la position du $i^{\text{ème}}$ microphone, et c la vitesse de propagation du son dans l'air, fixée à 343 m.s^{-1} .

$$p(t, \Omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i p_i(t + \tau_i(\Omega)), \quad (2)$$

$$\tau_i(\Omega) = \frac{\|\mathbf{x}_0\mathbf{M}\| - \|\mathbf{x}_i\mathbf{M}\|}{c}. \quad (3)$$

3.3 Représentation temps-fréquence

Chaque signal focalisé dans une direction d'arrivée possible du drone est représenté dans le plan temps-fréquence τ, f afin de mettre en évidence son contenu fréquentiel. La TFCT du signal focalisé $p(t, \Omega)$ s'écrit :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t, \Omega) u^*(t - \tau) e^{-2j\pi ft} dt, \quad (4)$$

où $u(t)$ désigne une fenêtre de pondération. Le spectrogramme $|S(\tau, f)|^2$ va ainsi permettre de sélectionner les composantes correspondant à la signature acoustique du drone. Prendre en compte toute l'énergie sera désigné dans la suite par l'appellation "DSB standard". L'intérêt de l'approche présentée ici est de considérer, dans le calcul d'énergie $E(\varphi, \theta)$, uniquement les échantillons temps-fréquence situés dans le voisinage d'harmoniques du signal de drone. Ceci est possible à condition de connaître les harmoniques et donc la fréquence de passage des pales f_{pp} , obtenue automatiquement par un algorithme de "pitch tracking". Avec l'information de f_{pp} et le choix d'un nombre d'harmoniques N_h , des intervalles autour de cette fréquence sont définis pour le calcul d'énergie. Afin de sélectionner plus de contenu à mesure que la fréquence augmente, les intervalles sont dépendants de leur fréquence centrale f_c , par analogie avec les filtres de facteur de qualité Q , $\Delta f = \frac{f_c}{Q}$. Ainsi, tous les échantillons contenus dans les intervalles $[i \cdot (f_{pp} - \frac{f_{pp}}{2Q}); i \cdot (f_{pp} + \frac{f_{pp}}{2Q})]$, avec $i = 1, \dots, N_h$ sont utilisés pour le calcul d'énergie. La figure 1 illustre le principe. Les zones délimitées par les tracés en noir autour des harmoniques de f_{pp} dépendent du facteur de qualité choisi. Plus les harmoniques sont élevées, plus la zone est large permettant de prendre en considération l'énergie due aux variations de vitesse des différents moteurs.

3.4 Corrélation spectrale harmonique

L'algorithme de Corrélation Spectrale Harmonique (CSH) [9] permet de retrouver automatiquement la fréquence de passage des pales. Il conduit à plusieurs candidats pour f_{pp} . Le pic de plus haute intensité correspond à la fréquence recherchée. La corrélation spectrale harmonique est définie par :

$$CSH(\tau, f) = \sum_{f'=-\frac{L_w}{2}}^{\frac{L_w}{2}} \prod_{r=1}^{N_H+1} S(\tau, rf + f'), \quad (5)$$

avec L_w la longueur de la fenêtre spectrale en fréquence, N_H le nombre d'harmoniques (pas forcément égal à N_h le nombre des harmoniques utilisés pour le calcul d'énergie) et $S(\tau, f)$ l'amplitude de la TFCT à l'échantillon τ et à la fréquence f . $CSH(\tau, f)$ représente à quel point des multiples de f sont corrélés entre eux. La fenêtre en fréquence permet au CSH d'être moins sensible au bruit. Des exemples de résultats de CSH sont présentés en figure 3.

4 Choix automatique de la fréquence de passage des pales

La fréquence de passage des pales obtenue par corrélation spectrale harmonique occupe un rôle crucial dans le processus de traitement. Cette fréquence est en effet déterminante dans la sélection des zones de la représentation temps-fréquence pour le calcul d'énergie. Elle influence ainsi la direction d'arrivée obtenue. Dans la pratique, le maximum du CSH ne conduit pas forcément à la fréquence f_{pp} optimale conduisant à la vraie direction d'arrivée. Un nouveau critère, autre que le maximum, est proposé ici. Il s'agit de prendre en compte la position précédente du drone et ainsi privilégier une fréquence f_{pp} conduisant à une continuité de trajectoire réaliste. Le critère dit de continuité permet de valider le choix de f_{pp} si la direction obtenue $\Omega_t = (\varphi_t, \theta_t)$ à l'instant t respecte les conditions $|\varphi_t - \varphi_{t-1}| \leq 20^\circ$ et $|\theta_t - \theta_{t-1}| \leq 10^\circ$. Dans le cas contraire, une nouvelle fréquence est recherchée parmi la liste des fréquences candidates classées dans le sens des amplitudes décroissantes. Le processus est réitéré jusqu'à ce que la direction trouvée soit pertinente ou que l'amplitude du CSH pour la fréquence considérée n'atteigne pas un seuil fixé.

Le principe du critère de continuité est illustré en figure 3. La figure 3(a) représente la cartographie d'énergie dans l'espace (φ, θ) à un instant t_1 , obtenue en calculant l'énergie autour de N_h harmoniques de f_{pp} conformément à la figure ???. $f_{pp}=183.1$ Hz correspond au maximum du CSH [cf figure (b)] et la direction d'arrivée est indiquée par la croix bleue. Elle est différente de celle donnée en considérant toute l'énergie (cercle rouge) selon le DSB standard. La cartographie à l'instant suivant t_2 en figure 3(c) conduit à une direction $(-76^\circ, 0^\circ)$ si f_{pp} correspond au maximum du CSH [voir figure 3 (d)], soit 109.9 Hz. La direction proposée n'est pas réaliste par rapport à celle de l'instant précédent. En choisissant le 2ième pic du CSH [figure 3 (f)], soit $f_{pp}=180.7$ Hz, le maximum de la cartographie, figure 3 (e), rend l'estimation de la direction d'arrivée du drone réaliste.

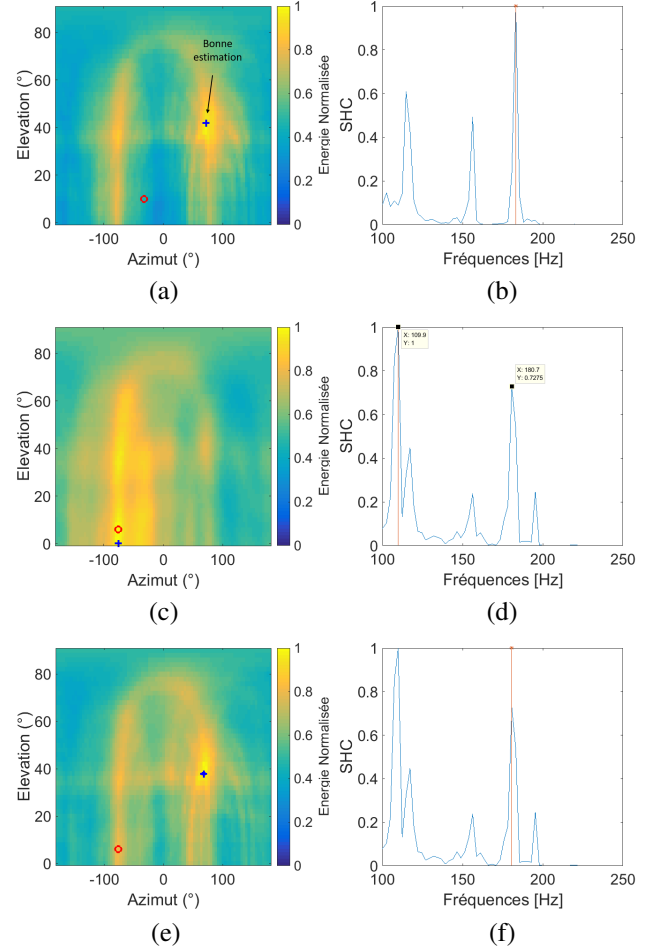


FIGURE 3 : Cartographies d'énergie (a), (c), (e) et corrélations spectrales harmoniques correspondantes (b), (d), (f), pour deux instants consécutifs (t_1 ligne 1, t_2 lignes 2 et 3) illustrant le critère de continuité de trajectoire. Les croix bleues et cercles rouges correspondent respectivement aux estimations obtenues par sélection de l'énergie dans le plan temps-fréquence et par DSB standard.

5 Application à une trajectoire réelle

L'approche proposée est testée sur une trajectoire circulaire du drone Phantom IV à une altitude d'environ 15 m au dessus de l'antenne. La direction d'arrivée est estimée à partir du signal focalisé sur des tronçons de 5000 échantillons avec un recouvrement de 50 %. La grille de focalisation dans le plan (φ, θ) a une résolution de 4° en azimut et 2° en élévation. Les signaux captés par l'antenne sont échantillonnés à 20 kHz. La RTF utilise des tronçons de 4096 points avec un recouvrement de 50 %. La sélection des zones concerne 10 harmoniques de f_{pp} et un facteur $Q = 5$. Le CSH est calculé sur 8192 échantillons. Un GPS embarqué permet d'obtenir une référence de la trajectoire, en noir sur les graphes de la figure 4, qui tient compte d'un biais systématique. Les autres tracés correspondent aux résultats obtenus en sélectionnant des zones autour des harmoniques de f_{pp} [figures 4 (c-f)] ou non [figures 4 (a-b)]. Prendre en compte la totalité de l'énergie du signal focalisé dans une direction n'est pas avantageux. Du reste, même s'il est intéressant de sélectionner des parties de la RTF correspondant à la signature du drone, l'utilisation

du critère du maximum pour le choix de f_{pp} entraîne des fluctuations sur les positions en azimut et en élévation [figure 4 (c-d)]. Les résultats avec le critère de continuité montrent une amélioration nette du suivi de la direction d'arrivée [figure 4 (e-f)]. La table 1 présente les erreurs moyennes et écarts-types des résultats de la figure 4 avec et sans prise en compte de la signature du drone et selon les critères de maximum et de continuité. Restreindre le calcul d'énergie à des zones autour des harmoniques de f_{pp} permet de diminuer l'erreur. Le critère de continuité permet d'obtenir de meilleures performances avec des erreurs autour de 10° en azimut et 9.2° en élévation.

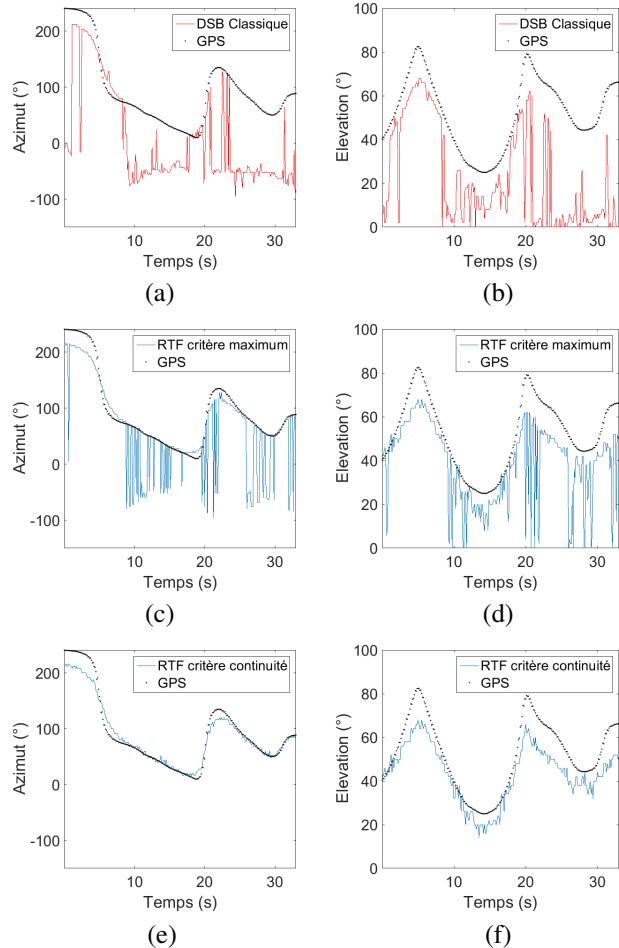


FIGURE 4 : Évolution de l'azimut et de l'élévation en fonction du temps pour la trajectoire circulaire avec la méthode DSB standard (a), (b) et la sélection dans la RTF à partir des critères du maximum (c), (d) et de continuité (e), (f).

6 Conclusion

Une méthode de localisation et de suivi de drone à partir des signaux acoustiques captés par une antenne de microphones a été proposée. Basée sur une formation de voies temporelle, elle conduit à une cartographie représentant l'énergie en chacun des points d'une zone prédéfinie de l'espace azimut-élévation. Pour le calcul de cette énergie, utiliser une représentation temps-fréquence du signal focalisé permet de sélectionner des composantes de la signature acoustique du drone. Un point clé de la méthode réside dans l'obtention automatique au cours du temps de la fréquence de passage des pales. Un critère satisfaisant une continuité réaliste de la trajectoire a

été implémenté pour le choix de cette fréquence. La méthode de localisation a été testée sur une trajectoire réelle d'un drone avec des résultats encourageants. L'approche nécessitera d'être testée dans le futur dans des conditions plus difficiles avec notamment la présence de plusieurs drones.

TABLE 1 : moyenne (μ) et écart-type (σ) des erreurs d'estimation expérimentales en azimut (φ) et élévation (θ).

	Azimut φ ($^\circ$)		Élévation θ ($^\circ$)	
	μ	σ	μ	σ
DSB standard	90.5	64.6	29.4	20.7
Crit. max	35	51	14.6	14.5
Crit. continuité	10	10.4	9.2	6.5

Références

- [1] V. BARON, S. BOULEY, M. MUSCHINOWSKI, J. MARS and B. NICOLAS : Drone localization and identification using an acoustic array and supervised learning. *In Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications*, Proc. SPIE 11169, 2019.
- [2] T. BLANCHARD, J.-H. THOMAS and K. RAOOF : Acoustic localization and tracking of a multi-rotor unmanned aerial vehicle using an array with few microphones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 148(3):1456–1467, 2020.
- [3] M. BLASS, A. MALY, F. GRAF, P. WELLIG and B. OTT : Towards mobile microphone array based UAV tracking. *In Quiet Drones Second International e-Symposium on UAV/UAS Noise*, Paris, France, juin 2022.
- [4] X. CHANG, C. YANG, J. WU, X. SHI and Z. SHI : A surveillance system for drone localization and tracking using acoustic arrays. *In Proceedings of the 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pages 573–577, Sheffield, UK, 2018.
- [5] C. DUMITRESCU, M. MINEA, I. M. COSTEA, I. C. CHIVA and A. SEMENESCU : Development of an acoustic system for UAV detection. *Sensors*, 20(17):4870, 2020.
- [6] N. ITARE, J.-H. THOMAS, K. RAOOF and T. BLANCHARD : Acoustic Estimation of the Direction of Arrival of an Unmanned Aerial Vehicle Based on Frequency Tracking in the Time-Frequency Plane. *Sensors*, 22(11):4021, 2022.
- [7] A. SEDUNOV, D. HADDAD, H. SALLOUM, A. SUTIN, N. SEDUNOV and A. YAKUBOVSKIY : Stevens drone detection acoustic system and experiments in acoustics UAV tracking. *In Proceedings of the International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pages 1–7, Boston, MA, 2019.
- [8] B. D. VAN VEEN and K. M. BUCKLEY : Beamforming : A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Mag.*, 5(2):4–24, 1988.
- [9] S. A. ZAHORIAN and H. HU : A spectral/temporal method for robust fundamental frequency tracking. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(6):4559–4571, 2008.