

Sujet de thèse

1. Titre ou intitulé de la thèse

Développement de capteurs hyperfréquences pour la détermination d'angle d'arrivée - Application à un système de mesure d'attitude pour projectile.

2. Laboratoires d'accueil

L'institut Franco-Allemand de recherches de Saint-Louis (ISL) possède une longue tradition et une grande panoplie de compétences dans l'étude des projectiles tirés canon (aérodynamique, essais en vol, durcissement à l'accélération, miniaturisation de l'électronique, etc). Notamment, le groupe STC développe des solutions de navigation bas coût pour différentes applications de munitions guidées et des moyens de communications bidirectionnels adaptés aux contraintes projectile.

Le laboratoire XLIM-SRI est spécialisé dans l'étude de systèmes et de réseaux intelligents, et notamment de l'échange d'information entre ces entités. En particulier, une expertise très forte se trouve au niveau de la conception et de la fabrication de composants semi-conducteurs hyperfréquences, nécessaires aux communications sans fil.

3. Objet de la thèse

L'objectif de la thèse est le développement d'un système complet et intégrable dans un projectile permettant la mesure d'angle d'arrivée et la direction de polarisation d'un signal hyperfréquence avec pour application l'estimation d'attitude. Ce travail implique l'étude et la conception de capteurs analogiques de mesure de phase et de puissance dans la bande X, d'un réseau d'antennes puis la caractérisation des performances du système et des démonstrations en vol.

4. Descriptif de la thèse

Le développement de munitions guidées tirées canon nécessite l'utilisation d'unités de navigation spécifiques permettant de connaître en temps réel la position, la vitesse et l'attitude (position angulaire) du projectile. A l'heure actuelle, les solutions de navigation pour projectiles reposent sur l'hybridation d'une centrale inertielle (IMU) constituée d'accéléromètres et de gyromètres MEMS, et d'un récepteur GNSS (dans les cas des tirs de plus longue portée ou sans autodirecteur).

Cette IMU doit être robuste au coup de canon (> 20000 g) et aux forces centrifuges, permettre la mesure de dynamiques élevées (fréquence de rotation supérieures à 300 Hz pour certains projectiles gyro-stabilisés), être bas coût, et enfin européenne ou au moins « ITAR-free ».

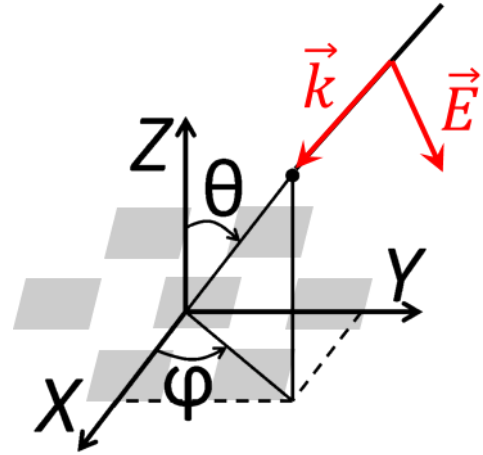
Une seule centrale de navigation qualifiée pour le tir canon (SiIMU02 ou SiNav02 si équipée d'un récepteur GPS) est disponible sur le marché (et dans une gamme de prix 5-10 k€), elle est en outre fabriquée par UTC Aerospace Systems.

Par ailleurs, l'estimation des angles d'attitude (roulis, tangage, lacet) est classiquement effectuée par intégration des mesures provenant des gyromètres et va dériver rapidement du fait de la précision intrinsèque des gyromètres MEMS (erreur de biais, sensibilité, désalignement...), des saturations éventuelles et des conditions initiales imprécises.

D'un autre côté, la position angulaire d'un objet dans l'espace peut aussi être calculée par l'intermédiaire de deux vecteurs de référence externes (problème de Wahba). Classiquement un de ces vecteurs de référence peut être le champ magnétique terrestre. Malheureusement, l'utilisation de magnétomètres embarqués peut s'avérer contraignante car cela nécessite de tenir compte des perturbations magnétiques dues à l'environnement projectile et aux actionneurs

électromécaniques. Il est en effet primordial de compenser la distorsion du champ magnétique terrestre due aux pièces ferromagnétiques ou aux courants induits, tout en supposant que les propriétés magnétiques de ces matériaux restent stables dans le temps (problème du stockage de la munition) ou n'évoluent pas au coup de canon (effet magnétostrictif inverse) et avec la température.

Nous proposons donc une nouvelle approche qui consiste à estimer l'attitude du projectile en mesurant les deux vecteurs suivants : la direction de propagation \vec{k} et la polarisation \vec{E} d'une onde électromagnétique qui peut être émise à partir d'une balise au sol située à proximité du canon. L'estimation de la direction d'arrivée de l'onde incidente est réalisée par l'intermédiaire d'un réseau d'antennes et de capteurs analogiques hyperfréquences mesurant une différence de phase entre deux signaux. La polarisation est mesurée grâce à une antenne polarisée linéairement et un détecteur de puissance. Par rapport à l'estimation d'angle d'arrivée classique, nous proposons de déterminer un troisième angle (celui de la polarisation). Par ailleurs contrairement à ce qui est fait habituellement dans les méthodes de radionavigation de types « Time Of Arrival » (ToA), « Two-Way-Ranging » (TWR) ou « Angle of Arrival » (AoA) qui cherchent à déterminer la position du porteur, l'objectif est ici de développer un capteur d'attitude.



5. Programme de la thèse

La thèse se déroulera en deux grandes phases qui s'effectueront successivement à XLIM-SRI puis à l'ISL.

Les objectifs du travail proposé seront en premier lieu l'étude et la conception de capteurs de mesure de phase et de puissance dans la bande X. Après analyse du cahier des charges, deux approches seront considérées : soit le développement du capteur à partir de composants discrets, ou soit la conception et réalisation d'un circuit intégré en technologie BiCMOS. La première solution permet d'avoir une certaine autonomie sur le choix des composants discrets, cependant elle est très difficilement reproductible et donc peu fiable aux fréquences envisagées. D'un point de vue technique, la seconde alternative offre la possibilité de disposer d'un circuit totalement optimisé à l'application visée en termes de précision de mesures de phases, de puissance reçue, de consommation et de reconfigurabilité fréquentielle, et de plus elle est parfaitement reproductible.

Les premiers prototypes développés lors de cette thèse, rentreront dans le cadre de multi-projets à coûts limités. Par contre, dans une phase industrialisation, le seul inconvénient est que cette solution impose un coût de développement initial plus important, lié à la première phase de fabrication. Par contre, une fois la mise au point terminée, le coût final en production pour des volumes important sera bien inférieur à celui d'une solution utilisant des éléments discrets. Rajoutons également que cette solution, dans le cadre d'un partenariat européen tel que STMicroelectronics, assurerait une autonomie purement européenne.

Dans un deuxième temps, un design et une fabrication d'un réseau d'antennes intégrable dans un projectile sera effectué, il faudra notamment identifier le nombre d'antennes requis pour assurer les fonctions demandées, déterminer l'effet de la géométrie du réseau sur les performances du système. Par ailleurs il faudra étudier si l'ambiguïté de phase inhérente à la technique de repérage spatial par rapport à la direction de polarisation peut être résolue.

La caractérisation du système (capteurs et réseau d'antennes) pourra s'effectuer en premier lieu dans une des chambres anéchoïques de l'ISL et sur différents bancs tournants ou de positionnement pour les tests dynamiques. Une modélisation du système complet et une quantification des erreurs est en outre nécessaire pour pouvoir analyser l'impact de ce type de capteur d'attitude sur la navigation pour munitions guidées.

Finalement, après conception d'une électronique de conditionnement adaptée et un durcissement aux accélérations, le système sera embarqué à bord d'un projectile et des démonstrations en vol sur le terrain d'essai de l'ISL seront réalisées.

6. Références

- [1] L. Bernard, R. Adam, D. Schmoltzi, C. Thomas, J. Kreitz and A. Schneider, "Instrumentation of the basic finned reference projectile for attitude measurements at supersonic velocities," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 31, no. 2, pp. 32-40, February 2016.
- [2] C. Campo, L. Bernard, H. Boeglen, S. Hengy, J.-M. Paillot, "Software- Defined Radio System for Tracking Application ", EUCAP 2018.
- [3] H. Covic, R. Adam, C. Thomas, F. Saada, L. Bernard and A. Schneider, "Spin rate estimation of projectiles from microwave signals," ICEAA, Cartagena des Indias, 2018.
- [4] C. Combettes, S. Changey, R. Adam E. Pecheur, "Attitude and velocity estimation of a projectile using low cost magnetometers and accelerometers", 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS).
- [5] R. Adam, E. Pecheur, L. Bernard, S. Changey, "In-flight roll angle estimation for a guided high spin projectile", 2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS).
- [6] M Kanoun, B Jadav, D Cordeau, JM Paillot, H Mnif, M Loulou. « A Fully Integrated 5.8 GHz BiCMOS SiGe:C tunable active phase shifter for Beamforming », 30th IEEE International Conference on Microelectronics (ICM2018), Sousse, Tunisie.
- [7] J. Hyvert, D. Cordeau, JM Paillot. « Analysis and design of a very low phase-noise Ku-band coupled VCO using a modified cascode architecture in 0.25 μm SiGe:C BiCMOS technology ». Microelectronics Journal, May 2018.
- [8] J Hyvert, D Cordeau, JM Paillot. « A Very low phase-noise Ku-band coupled VCO in 0.25 μm SiGe:C BiCMOS technology with low frequency pushing ». In Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), 2017 IEEE, page 17374884, Miami, United States, October 2017a.
- [9] JC Nallatamby, M Prigent, D Cordeau, JM Paillot. « Noise sources characterization and its compact modelling based on physical device simulations for designing low phase noise oscillators ». In Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2017 Joint Conference of the European, Besançon, France, July 2017.

7. Encadrants

Jean-Marie Paillot
XLIM UMR CNRS 7252
05 45 67 32 28
jean.marie.paillot@univ-poitiers.fr

Ronan Adam
ISL
03 89 69 51 60
ronan.adam@isl.eu