

Projet PELICAN : un radar imageur pour la cartographie des milieux naturels

Raphaël Rouveure¹, Patrice Faure¹, Laure Moiroux-Arvis¹, Marie-Odile Monod¹,
Stéphane Petit²

¹ Cemagref UR TSCF, 24 avenue des Landais 63172 Aubière raphael.rouveure@cemagref.fr
marie-odile.monod@cemagref.fr

² Véodis-3D, Maison des Sciences de l'Homme, 4 rue Ledru 63057 Clermont-Ferrand
stephane.petit@veodis-3d.com

Résumé : Le processus de perception est un point critique pour les applications en environnement extérieur. Le radar hyperfréquence offre un potentiel important car il permet de résoudre certaines limitations des capteurs optiques. Un capteur de ce type, nommé K2Pi, a été conçu pour des applications de cartographie de l'environnement. Le radar est associé à l'algorithme R-SLAM, développé pour dessiner les cartes radar. La carte radar globale est construite à partir d'un processus de fusion de données, basé sur un principe d'appariement des images radar successives. Les résultats obtenus en milieu extérieur naturel montrent la capacité du radar à prendre en compte des environnements étendus.

Mots clés : radar FMCW, SLAM, cartographie

1 Introduction

Les forces naturelles comme le vent, les vagues, les courants, la pluie, les inondations sont façonnent constamment l'interface entre l'hydrosphère et la lithosphère. Le suivi de l'évolution de cette interface, basée sur des phénomènes d'érosion et d'accrétion, est d'une importance majeure pour mieux comprendre le fonctionnement des rivières et des zones côtières [1]. Le développement de modèles numériques pour surveiller ou prédire les évolutions du littoral et des berges implique la disponibilité de données fiables et redondantes. Mais des solutions robustes pour la perception en environnements extérieurs étendus ne sont pas si courantes, en particulier en ce qui concerne le problème de la résistance aux conditions environnementales. Les systèmes optiques (laser, vidéo) sont particulièrement bien adaptés à l'environnement intérieur, mais ils souffrent de contraintes fortes en milieu extérieur : variations d'éclairage dues à l'alternance jour/nuit ou au passage de nuages, phénomènes météorologiques comme le brouillard, la pluie ou la poussière. Dans le domaine des hyperfréquences, les données peuvent être acquises indépendamment des conditions atmosphériques ou de l'heure de la journée : un système radar hyperfréquence offre une solution alternative pour surmonter les difficultés des capteurs optiques.

En réponse aux nouvelles exigences liées à la surveillance de l'environnement, le Cemagref a développé un radar hyperfréquence de petite taille, facile à embarquer sur différents véhicules dont nous montrons les potentialités dans cet article à travers une application de cartographie de berges.

Le principe et les caractéristiques de l'imageur radar K2Pi sont présentés au paragraphe 2. Le paragraphe 3 décrit l'algorithme de cartographie R-SLAM qui est basé sur une approche d'appariement d'images radar et la description de l'environnement sous la forme d'une grille d'occupation. Les résultats obtenus sur la rivière Allier (France) sont présentés au paragraphe 4.

2 Présentation du radar K2Pi

Pour des applications courtes distances (de l'ordre de quelques centaines de mètres), la technologie classique du radar à impulsions n'est pas la mieux adaptée, car elle impose

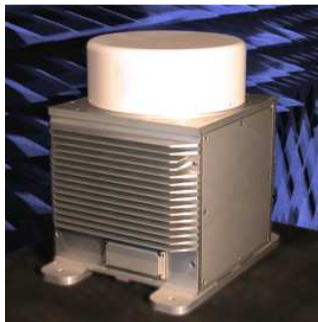
l'utilisation d'une électronique très rapide et onéreuse pour obtenir des précisions de mesure correctes. Nous avons développé le radar K2Pi (scanner 360° dans la bande K, voir Figure 1) en utilisant le principe du radar continu à modulation de fréquence (FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave), principe connu et utilisé depuis plusieurs décennies [2]. Cette modulation présente les avantages (i) d'une faible puissance d'émission, et (ii) d'une transposition des variables temporelles dans le domaine fréquentiel. Un faible intervalle de temps Δt est ainsi transformé en une forte variation de fréquence Δf , plus simple à mesurer.

Le principe du radar FMCW consiste à mélanger une partie du signal d'émission (qui suit la loi de modulation en fréquence) avec le signal reçu rétrodiffusé par les cibles présentes dans le lobe d'antenne [3]. Considérons ici une modulation en dent de scie de fréquence F_m , avec une excursion en fréquence totale ΔF du signal d'émission, et une distribution de i cibles placées dans le lobe d'antenne à la distance R_i du radar. Lorsque le signal retour est mélangé avec une partie du signal d'émission, on met en évidence un signal de battement S_b [2], [4] :

$$S_b = k \sum_i V_e V_{ri} \cos \left(2\pi \left(2\Delta F F_m \frac{R_i}{c} \right) t + \Phi_i \right) \quad (1)$$

V_e est l'amplitude du signal émis, V_{ri} et Φ_i respectivement l'amplitude du signal reçu et un terme de phase dépendant de la cible i , c la vitesse de la lumière et k un coefficient du mélange.

Les distances radar-cible R_i sont déterminées en mesurant les composantes fréquentielles du signal de battement par le biais d'une analyse spectrale. Contrairement au laser qui donne uniquement la distance au premier écho, l'ouverture du faisceau de l'antenne radar permet la détection de cibles multiples pour un même angle de visée.



(a)

Fréquence centrale d'émission F_0	24.125 GHz
Puissance d'émission P_t	20 dBm
Portée	3 - 100 m
Résolution angulaire	4°
Résolution en distance	0.02 m
Dimension (long×larg×haut) - Poids	27×24×30 cm - 10 kg

(b)

Fig. 1 : Vue générale du radar K2Pi (a) et principales caractéristiques (b).

L'antenne effectue un tour complet (360°) dans le plan horizontal en une seconde. Une analyse est réalisée tous les degrés (soit 360 analyses fréquentielles par tour d'antenne). On appelle "image radar panoramique" les 360 spectres radar successifs affichés selon une représentation de type PPI (Plan Position Indicator), qui permet de représenter les objets détectés en coordonnées polaires (angle, distance). Si l'on considère les effets combinés de la rotation d'antenne et du déplacement du véhicule (translation et rotation) sur lequel est positionné le radar, on observe des distorsions entre spectres dans l'image radar panoramique construite. Pour résoudre ce problème, nous utilisons deux capteurs proprioceptifs afin de déterminer le déplacement du véhicule : un *odomètre* pour mesurer le déplacement longitudinal ; un *gyromètre* pour mesurer la rotation. Une mesure de ces deux capteurs proprioceptifs est effectuée à chaque tour d'antenne, et la correction à appliquer est calculée en coordonnées cartésiennes. Chaque acquisition radar est donc transformée en coordonnées cartésiennes afin de pouvoir appliquer la correction.

Une fois le déplacement du véhicule pris en compte, un filtre anti-speckle est appliqué. L'effet de speckle est une modulation d'amplitude aléatoire du signal radar, inhérente à toute construction d'image radar. Ce bruit peut être diminué par filtrage spatial ou par filtrage multi-

vues. Nous avons sélectionné cette dernière approche : n images radar indépendantes sont combinées de façon incohérente (par filtrage dans le domaine spatial) afin de produire une image radar finale. La trajectoire parcourue durant les n images radar est estimée en faisant l'hypothèse d'une trajectoire curviligne à vitesse constante durant chaque tour d'antenne. La valeur de n est ajustée en fonction de la vitesse du véhicule. On notera que les fréquences Doppler introduites par des objets mobiles ne sont pas prises en compte (hypothèse d'un environnement statique).

Le schéma fonctionnel du radar K2Pi est présenté sur la Figure 2. Ce radar inclut les composants hyperfréquences et les cartes électroniques pour l'émission et la réception des signaux (éléments non décrits dans cet article). L'acquisition et le traitement du signal sont basés sur un Pentium M cadencé à 2 GHz. Les principales caractéristiques du radar K2Pi sont présentées dans la Figure 1(b).

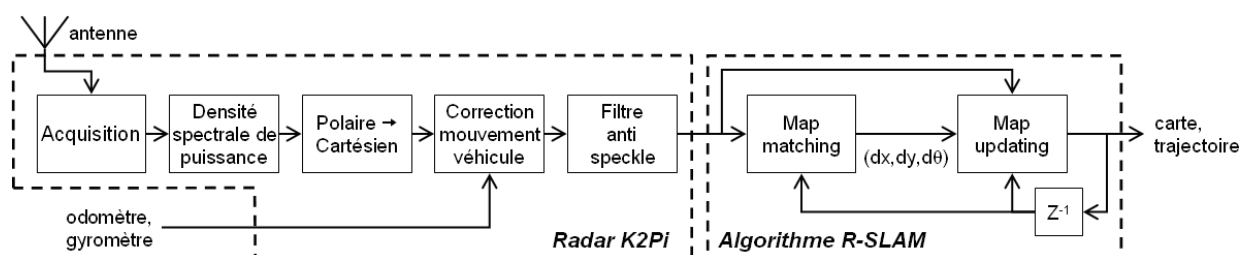


Fig. 2 : Diagramme fonctionnel de l'imageur radar K2Pi.

3 Construction d'une carte radar : l'algorithme R-SLAM

L'objectif final est la construction d'une représentation de l'environnement en associant les images radar panoramiques successives. L'un des principaux intérêts de l'algorithme R SLAM développé réside dans sa capacité à dessiner une carte de l'environnement du véhicule au cours de son déplacement, i.e. à localiser chaque objet présent dans cet environnement. Un autre avantage est qu'il ne dépend ni du type de véhicule utilisé, ni de la position du radar sur ce véhicule (la visée du radar ne devant cependant pas être obstruée). La carte globale est construite avec une démarche incrémentale comportant deux étapes (voir Figure 2) :

- appariement entre l'image radar panoramique courante et la carte globale (*map matching*), afin de déterminer le déplacement du radar,
- mise à jour de la carte radar globale via un processus de fusion (*map updating*).

3.1 Appariement

L'image fournie par le radar K2Pi peut être considérée comme une grille d'occupation, divisant l'espace observé en une matrice de cellules régulière. Les grilles d'occupation sont des outils puissants et souples, permettant une représentation pertinente de l'environnement notamment dans les applications d'interprétation des données radar. Chaque cellule représente une petite portion de l'environnement (20×20 cm), repérée par ses coordonnées (x, y) dans un plan arbitraire, et dont la valeur est proportionnelle à la Surface Equivalente Radar (SER) de la zone concernée.

Dans une approche classique de détection et de suivi de cible, il est nécessaire de reconnaître les mêmes cibles d'une image sur l'autre. Cependant, la détection et l'identification non ambiguës de cibles basées sur l'interprétation de signaux radar demeurent des problèmes ouverts. L'idée développée ici consiste à utiliser la forte densité des données radar dans une technique d'appariement (matching), en réalisant une corrélation 3D (deux translations et une rotation) entre l'image radar courante et la carte globale. Le maximum de la matrice de corrélation 3D obtenue fournit le déplacement du radar (translations et rotation), avec un écart-type égal à la magnitude du pic à 3 dB. La précision de la localisation est fixée par la dimension des cellules, définie par la résolution du radar.

3.2 Mise à jour de la carte radar

Une fois le déplacement du radar estimé, il demeure une question importante : comment intégrer l'information de l'image radar courante dans la carte globale ? Le principe retenu pour ce processus de fusion est de considérer que la probabilité pour un objet d'apparaître dans la carte globale est proportionnelle au nombre de fois où il a été observé à la même place. Le calcul est pondéré par un coefficient qui dépend de la distance d_i entre le radar et la cellule (x, y) de l'image i , ainsi que des caractéristiques intrinsèques du radar comme l'ouverture de l'antenne. La carte radar globale est mise à jour à chaque tour d'antenne et croît au fur et à mesure que de nouvelles images sont intégrées.

Le principal avantage de l'algorithme R-SLAM est sa robustesse. La localisation est améliorée par l'utilisation de la carte globale qui est la meilleure estimée de toutes les observations précédentes. Si on utilise seulement la dernière image radar lors de la phase de matching, certaines situations conduisent à de mauvaises corrélations (par exemple en cas d'apparition/disparition d'un obstacle d'une image sur l'autre).

4 Résultats

Une campagne de mesure a été réalisée sur la rivière Allier (latitude 45°01'44" N, longitude 3°28'07" E, altitude 260 m) en partenariat avec la Société Véodis-3D, spécialisée en mesures environnementales. Le radar est positionné à l'avant d'une embarcation du Cemagref, 1.5 m au dessus de la surface de l'eau. Les données radar sont enregistrées en temps réel durant tout le parcours. L'algorithme R-SLAM, implanté sur un Quadri-Core 2.5 GHz Pentium PC, est mis en œuvre en temps différé au laboratoire : 3 secondes sont aujourd'hui nécessaires pour calculer une image radar et l'intégrer dans la carte radar globale. En parallèle avec les acquisitions radar, la Société Véodis-3D a réalisé une campagne de mesure GPS afin de déterminer avec précision la position des rives et de la comparer avec la carte radar obtenue.

Le trajet total réalisé sur la rivière Allier est de 5.7 km, à la vitesse moyenne de 2.5 m/s. Un total de 2093 images radar a été enregistré puis traité en laboratoire afin de construire la carte radar globale et de calculer la trajectoire parcourue. Une vue aérienne (image Google Maps, date : janvier 2008) d'une portion du trajet est présentée à la Figure 3(a). La carte radar correspondante apparaît à la Figure 3(b). Les points bleus indiquent la trajectoire calculée par l'algorithme R-SLAM. La position GPS des rives de la rivière apparaît en rouge dans la carte radar.

5 Conclusion

Pour la perception en milieu extérieur naturel, le radar hyperfréquence est un capteur qui présente un important potentiel, notamment par sa capacité à dépasser les limites de fonctionnement imposées aux systèmes optiques. Avec l'objectif de construire des cartes cohérentes de l'environnement exploré, l'algorithme R-SLAM présenté dans cet article exploite toute la richesse du signal délivré par le radar K2Pi, en évitant la problématique de la détection, de l'identification et du suivi de cibles. L'algorithme R-SLAM calcule simultanément la carte de l'environnement et la trajectoire parcourue dans cet environnement sans utiliser d'outil de localisation absolu de type GPS. La portée du radar, combinée avec les performances de l'algorithme R-SLAM permet de prendre en compte des environnements étendus faiblement structurés.

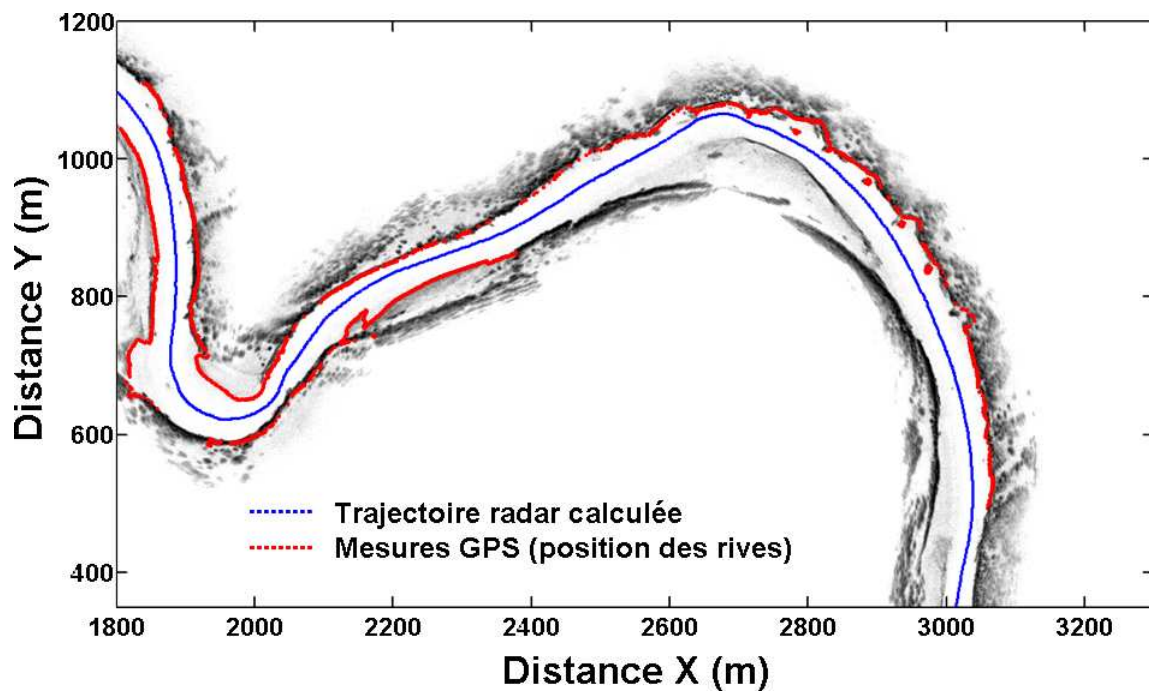
Bibliographie

- [1] A.L. Wilson, R.L. Dehaan, R.J. Watts, et al, "Managing flow for geomorphic form: erosion and accretion of river benches," Proc. of the 5th Australian Stream Management Conf. , 2007.
- [2] M. O. Monod, "Frequency modulated radar: a new sensor for natural environment and mobile robotics," Ph.D. Thesis, Paris VI University, France, 1995.

- [3] M. I. Skolnik, "Introduction to radar systems," In Electrical Engineering Series, McGraw-Hill International Editions, 1980.
- [4] R. Rouveure., M. O. Monod, and P. Faure, "Multiple targets detection with a FMCW radar dedicated to mobile robotics," RADAR 2004 International Conference on Radar Systems, 3p, 2004.



(a)



(b)

Fig. 3 : Résultat obtenu sur la rivière Allier. (a) Image aérienne (Google Maps). (b) Cartographie radar et trajectoires (en bleu) calculées. Les points rouges indiquent la position des rives relevée par GPS.

Le projet est soutenu par un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (Programme Emergence 2010)