

Utilisation combinée des techniques GPS et Radar



■ Christian HAGIN et Patrick LATHION

Au début des années 90, les récepteurs GPS étaient des instruments de mesure révolutionnaires dans nos professions, destinés presque exclusivement à des applications géodésiques en post-traitement. Au fil de l'évolution technologique, de nouveaux constructeurs sont apparus, qui ont diversifié et accru les fonctions et les possibilités des récepteurs. Les applications GPS en temps-réel ont rapidement pris le pas sur le post-traitement, et de plus en plus de récepteurs bon marché ouvrent de nouvelles perspectives dans le vaste domaine de la navigation et du guidage de personnes ou de mobiles. Aujourd'hui, le GPS est devenu une technique courante du géomaticien, qui est aussi utilisé de plus en plus en combinaison avec d'autres capteurs. Ce travail d'intégration permet de géoréférencer à l'aide du GPS les données fournies par les capteurs, et par conséquent de réaliser des cartographies thématiques. Cette méthodologie est utilisée par exemple pour des applications bathymétriques, par couplage d'un système GPS et d'un écho-sondeur, ou pour des assainissements de décharge en combinant un capteur de gaz au GPS. Dans cet article, nous nous proposons de présenter plus en détail l'intégration d'un radar au GPS destinée à la surveillance aérienne du manteau neigeux.*

Contexte et objectifs

Depuis quelques années, nous couplons déjà les systèmes GPS à différents instruments tels que capteurs de gaz pour la cartographie des émanations de méthane sur les décharges, ou encore les écho-sondeurs pour la représentation des hauteurs de sédiments et d'eau dans les barrages, lacs ou rivières.

Nous nous intéressons aussi à la combinaison d'un radar (Ground Penetrating Radar, GPR) et d'un système GPS-RTK, embarqués dans un hélicoptère, pour la surveillance du manteau neigeux.

Cette technique permet d'obtenir simultanément les altitudes des différentes interfaces rencontrées par les ondes radar (neige/glace, terrain) avec une

précision décimétrique, sans avoir besoin d'un modèle de terrain a priori. Il est aussi possible de déterminer les caractéristiques physiques de la neige telles que densité et teneur en eau.

Les objectifs prioritairement étudiés dans cette phase de développement sont les suivants :

- **La surveillance aérienne du manteau neigeux** Mesures et suivi de l'évolution de la hauteur de neige dans les zones d'avalanches ou difficiles d'accès, afin d'anticiper au mieux les dangers potentiels ou l'évacuation de zones habitées.
- **Détermination de la densité et de la teneur en eau de la neige** Détermination de la teneur en eau du

manteau neigeux et estimation du volume d'eau disponible sur un bassin versant.

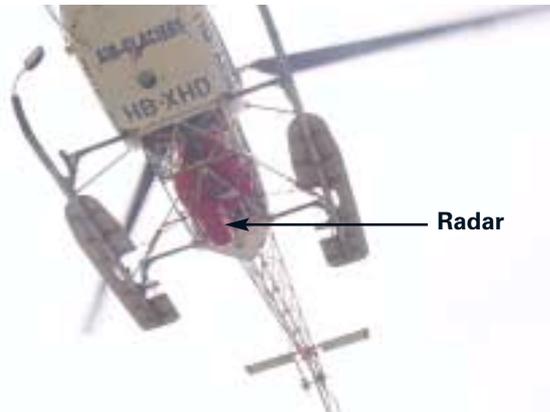
- **Recherche de personnes sous les avalanches** L'image radar obtenue en temps réel permet de distinguer, en fonction de la densité des matériaux, des objets ou personnes intercalées entre le sol et la neige.

La technique radar

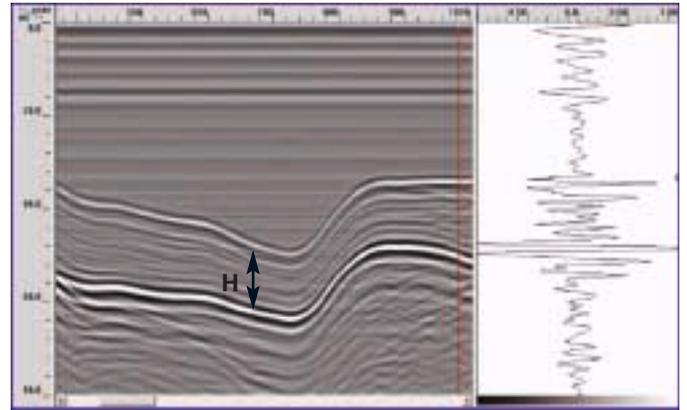
Le principe est l'interprétation des échos radar pour en extraire les informations relatives à la hauteur et à la structure de la neige, afin de pouvoir cartographier ces mesures à l'aide du GPS couplé au radar.

Les différentes hauteurs (terrain, neige, ■■■

* Article disponible aussi en allemand et en anglais



Hélicoptère avec Radar et GPS



Scan radar en temps réel (interface neige-sol)

■ ■ ■ hélicoptère) sont déduites du temps de cheminement aller-retour des ondes électromagnétiques dans les différents milieux traversés, sachant que les vitesses de propagation de ces ondes diffèrent suivant les milieux. La vitesse de propagation de l'onde est liée directement à la constante diélectrique ϵ_r du milieu et peut être interprétée selon la formule suivante : $\epsilon_r = (c/v)^2$

avec : c =célérité et v =vitesse de l'onde dans le milieu.

Selon la précision désirée, un nouveau calibrage est nécessaire à chaque fois que les caractéristiques physiques de la neige changent de manière significative.

Nous sommes actuellement en cours de développement d'une solution permettant d'obtenir simultanément la densité et la hauteur de neige par interprétation des temps de propagation et de mesures d'amplitude du signal radar.

Détermination des hauteurs de neige par technique radar et GPS combinée, embarquée dans un hélicoptère

Ce paragraphe explique la méthodologie développée pour cette application, ainsi que les différents tests réalisés pour estimer la précision des hauteurs livrées par le radar.

■ Description des mesures

La zone de mesures se situe au dessus d'Évolène (Valais, Suisse), dans le secteur de la zone de décrochement de l'avalanche de février 1998 (entre le col de Torrent et la Pointe du Prélet, altitude

2'700 mètres). Plusieurs lignes de vol de 100 mètres, espacées de 20 à 40 mètres, ont été survolées.

Sur ces mêmes lignes, des sondages manuels ont été réalisés (mesures de profondeur de neige) tous les 5 à 10 mètres, et géoréférencés par la méthode GPS RTK (~2-5 cm). D'autre part, des échantillons ont été récoltés par carottage.

■ Navigation et positionnement par GPS

Le système GPS-RTK embarqué nous permet de naviguer de manière précise sur les lignes de vol prédéfinies (zones de danger potentielles), et ainsi d'indiquer avec précision au pilote les points et lignes qu'il faut survoler. Cette méthode permettra aussi lors de mesures répétitives d'effectuer des mesures exactement aux mêmes endroits, ce qui s'avère important pour juger de l'évolution du manteau neigeux. Pour faciliter la navigation et le positionnement des mesures radar, les antennes GPS et radar sont situées

sur un même axe. Les mesures radar sont donc géoréférencées directement sans post-traitement par le positionnement GPS.



Lignes de vol avec les points mesurés précédemment au sol et indication en temps réel de la position de l'hélicoptère (radar monté à la verticale de l'antenne GPS)



Mesures de contrôle par GPS-RTK et sonde, ainsi que par carottage.



Image radar en temps réelle et la navigation par GPS-RTK

Mesures Radar

L'image digitale du radar, le positionnement et la navigation GPS-RTK sont réalisés simultanément et en temps réel dans l'hélicoptère. La précision "on-line" sur la hauteur de neige dépend évidemment des paramètres introduits au cours des mesures (densité de la neige par exemple). En règle générale, nous donnons une valeur globale durant le vol, l'important étant de vérifier la qualité de l'image radar durant les mesures. En effet, il est plus aisé pour l'interprétation d'utiliser des images qui distinguent bien les différentes couches traversées par les ondes radar.

Traitement et calcul

Le calcul des hauteurs de neige sont déduites des images radar et dépendent de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. Cette vitesse varie suivant la densité de la neige. Pour obtenir cette densité, il existe en fait plusieurs méthodes :

- mesure de masse volumique par carottage et prise d'échantillons ;
- mesure de hauteurs de neige avec sonde et mise en correspondance avec une image radar prise à l'endroit du sondage ;
- interprétation des mesures d'amplitude du signal radar (par comparaison à l'amplitude fournie par le radar pour la glace). Cette solution est en cours de développement.

Il est actuellement encore difficile d'obtenir des résultats définitifs de hauteurs

de neige en temps réel depuis un hélicoptère. En revanche, il est relativement aisé d'obtenir ces hauteurs en temps réel lorsque le radar se trouve en contact direct avec la neige (mesures sur pistes avec ou sans dameuses, par exemple).

Résultats

L'extrait du fichier-résultats montre le principe du calcul pour arriver à la détermination de la hauteur/altitude de la neige et/ou du terrain. Dans cet exemple, deux zones géographiques ont été survolées, sur

lesquelles deux valeurs de calibration ont été utilisées (2.12m et 1.7m).

D'une manière générale, l'on remarque que la profondeur mesurée avec la sonde est inférieure aux mesures par radar. Cela s'explique par le fait que les couches inférieures de neige sont relativement dures et qu'il est difficile d'atteindre avec la sonde le terrain naturel.

La densité de la neige varie drastiquement suivant l'exposition de la pente. Par exemple, sur le site de mesures, la densité de la neige variait de 332 kg/m³ (pente nord) à plus de 600 kg/m³ (pente

Point	Latitude	Longitude	Level	Time Snow (min)	Time ground (min)	Time G-G (min)	Calibration (m)	Depth radar (m)	Depth anomaly (m)	Height value (m)	Height snow interface (m)	Height ground interface (m)	Height total above snow (m)	Velocity (m/s)	Dielectric constant	Density
Zone radar 01 - Ardenne (pente 1) - up and go																
1	50° 51' 14.74	10° 52' 42.1	2111.52	8.00	7.00	0.96	2.12	2.12	0.12	2111.52	2110.38	2110.38	0.14	4.2361	1.6461	8.332
2	50° 51' 19.27	10° 52' 42.35	2111.42	4.45	3.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.42	2111.86	2111.86	0.12			
3	50° 51' 24.75	10° 52' 42.35	2111.38	5.45	4.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.38	2111.86	2111.86	0.12			
4	50° 51' 29.22	10° 52' 42.35	2111.34	6.45	5.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.34	2111.86	2111.86	0.12			
5	50° 51' 33.69	10° 52' 42.35	2111.30	7.45	6.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.30	2111.86	2111.86	0.12			
6	50° 51' 38.16	10° 52' 42.35	2111.26	8.45	7.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.26	2111.86	2111.86	0.12			
7	50° 51' 42.63	10° 52' 42.35	2111.22	9.45	8.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.22	2111.86	2111.86	0.12			
8	50° 51' 47.10	10° 52' 42.35	2111.18	10.45	9.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.18	2111.86	2111.86	0.12			
9	50° 51' 51.57	10° 52' 42.35	2111.14	11.45	10.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.14	2111.86	2111.86	0.12			
10	50° 51' 56.04	10° 52' 42.35	2111.10	12.45	11.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.10	2111.86	2111.86	0.12			
11	50° 52' 00.51	10° 52' 42.35	2111.06	13.45	12.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.06	2111.86	2111.86	0.12			
12	50° 52' 04.98	10° 52' 42.35	2111.02	14.45	13.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2111.02	2111.86	2111.86	0.12			
13	50° 52' 09.45	10° 52' 42.35	2110.98	15.45	14.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.98	2111.86	2111.86	0.12			
14	50° 52' 13.92	10° 52' 42.35	2110.94	16.45	15.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.94	2111.86	2111.86	0.12			
15	50° 52' 18.39	10° 52' 42.35	2110.90	17.45	16.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.90	2111.86	2111.86	0.12			
16	50° 52' 22.86	10° 52' 42.35	2110.86	18.45	17.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.86	2111.86	2111.86	0.12			
17	50° 52' 27.33	10° 52' 42.35	2110.82	19.45	18.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.82	2111.86	2111.86	0.12			
18	50° 52' 31.80	10° 52' 42.35	2110.78	20.45	19.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.78	2111.86	2111.86	0.12			
19	50° 52' 36.27	10° 52' 42.35	2110.74	21.45	20.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.74	2111.86	2111.86	0.12			
20	50° 52' 40.74	10° 52' 42.35	2110.70	22.45	21.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.70	2111.86	2111.86	0.12			
21	50° 52' 45.21	10° 52' 42.35	2110.66	23.45	22.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.66	2111.86	2111.86	0.12			
22	50° 52' 49.68	10° 52' 42.35	2110.62	24.45	23.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.62	2111.86	2111.86	0.12			
23	50° 52' 54.15	10° 52' 42.35	2110.58	25.45	24.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.58	2111.86	2111.86	0.12			
24	50° 52' 58.62	10° 52' 42.35	2110.54	26.45	25.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.54	2111.86	2111.86	0.12			
25	50° 53' 03.09	10° 52' 42.35	2110.50	27.45	26.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.50	2111.86	2111.86	0.12			
26	50° 53' 07.56	10° 52' 42.35	2110.46	28.45	27.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.46	2111.86	2111.86	0.12			
27	50° 53' 12.03	10° 52' 42.35	2110.42	29.45	28.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.42	2111.86	2111.86	0.12			
28	50° 53' 16.50	10° 52' 42.35	2110.38	30.45	29.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.38	2111.86	2111.86	0.12			
29	50° 53' 20.97	10° 52' 42.35	2110.34	31.45	30.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.34	2111.86	2111.86	0.12			
30	50° 53' 25.44	10° 52' 42.35	2110.30	32.45	31.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.30	2111.86	2111.86	0.12			
31	50° 53' 29.91	10° 52' 42.35	2110.26	33.45	32.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.26	2111.86	2111.86	0.12			
32	50° 53' 34.38	10° 52' 42.35	2110.22	34.45	33.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.22	2111.86	2111.86	0.12			
33	50° 53' 38.85	10° 52' 42.35	2110.18	35.45	34.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.18	2111.86	2111.86	0.12			
34	50° 53' 43.32	10° 52' 42.35	2110.14	36.45	35.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.14	2111.86	2111.86	0.12			
35	50° 53' 47.79	10° 52' 42.35	2110.10	37.45	36.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.10	2111.86	2111.86	0.12			
36	50° 53' 52.26	10° 52' 42.35	2110.06	38.45	37.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.06	2111.86	2111.86	0.12			
37	50° 53' 56.73	10° 52' 42.35	2110.02	39.45	38.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2110.02	2111.86	2111.86	0.12			
38	50° 54' 01.20	10° 52' 42.35	2109.98	40.45	39.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.98	2111.86	2111.86	0.12			
39	50° 54' 05.67	10° 52' 42.35	2109.94	41.45	40.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.94	2111.86	2111.86	0.12			
40	50° 54' 10.14	10° 52' 42.35	2109.90	42.45	41.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.90	2111.86	2111.86	0.12			
41	50° 54' 14.61	10° 52' 42.35	2109.86	43.45	42.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.86	2111.86	2111.86	0.12			
42	50° 54' 19.08	10° 52' 42.35	2109.82	44.45	43.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.82	2111.86	2111.86	0.12			
43	50° 54' 23.55	10° 52' 42.35	2109.78	45.45	44.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.78	2111.86	2111.86	0.12			
44	50° 54' 28.02	10° 52' 42.35	2109.74	46.45	45.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.74	2111.86	2111.86	0.12			
45	50° 54' 32.49	10° 52' 42.35	2109.70	47.45	46.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.70	2111.86	2111.86	0.12			
46	50° 54' 36.96	10° 52' 42.35	2109.66	48.45	47.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.66	2111.86	2111.86	0.12			
47	50° 54' 41.43	10° 52' 42.35	2109.62	49.45	48.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.62	2111.86	2111.86	0.12			
48	50° 54' 45.90	10° 52' 42.35	2109.58	50.45	49.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.58	2111.86	2111.86	0.12			
49	50° 54' 50.37	10° 52' 42.35	2109.54	51.45	50.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.54	2111.86	2111.86	0.12			
50	50° 54' 54.84	10° 52' 42.35	2109.50	52.45	51.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.50	2111.86	2111.86	0.12			
51	50° 54' 59.31	10° 52' 42.35	2109.46	53.45	52.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.46	2111.86	2111.86	0.12			
52	50° 55' 03.78	10° 52' 42.35	2109.42	54.45	53.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.42	2111.86	2111.86	0.12			
53	50° 55' 08.25	10° 52' 42.35	2109.38	55.45	54.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.38	2111.86	2111.86	0.12			
54	50° 55' 12.72	10° 52' 42.35	2109.34	56.45	55.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.34	2111.86	2111.86	0.12			
55	50° 55' 17.19	10° 52' 42.35	2109.30	57.45	56.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.30	2111.86	2111.86	0.12			
56	50° 55' 21.66	10° 52' 42.35	2109.26	58.45	57.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.26	2111.86	2111.86	0.12			
57	50° 55' 26.13	10° 52' 42.35	2109.22	59.45	58.95	0.45	1.43	1.43	0.14	2109.22	2111.86	2111.86	0.12			
58	50° 55' 30.															

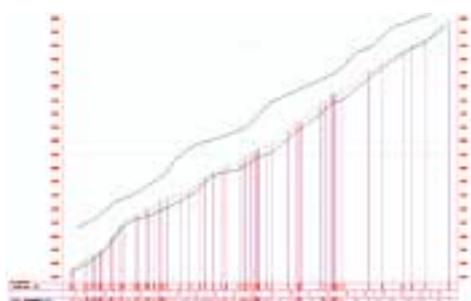
zone	# de mesures	Moyenne	Écart-type	Densité
1 (ubac)	17	5.9 cm	8.2 cm	0.332
2 (adret)	13	8.0 cm	8.1 cm	0.675

Le tableau ci-dessus montre une statistique sur la précision des mesures effectuées.

■■■ sud). En négligeant cette variation et en utilisant une valeur constante de 300 kg/m^3 sur tout le site de mesures, nous aurions constaté des erreurs sur les hauteurs de neige de l'ordre de 20 % pour une densité de 600 kg/m^3 . Afin d'obtenir des résultats précis, il est donc important d'effectuer un calibrage lors de modifications significatives de la physiologie du manteau neigeux.

■ Représentation des mesures

Il est ensuite aisé de représenter les hauteurs et altitudes obtenues à l'aide de modèles numériques de terrain ou de neige, de profils incluant la hauteur du terrain et de la neige, ou encore sous forme de cartes thématiques.



Domaines d'applications

Concernant les deux autres applications citées ci-dessus, nous pouvons actuellement donner les informations suivantes :

- pour les estimations de teneur en eau, des expériences et mesures pratiques réalisées en Suisse et dans les pays nordiques nous montrent que l'on peut prévoir avec une probabilité de 90-95%, la quantité d'eau contenue dans la neige sur le bassin versant d'un lac ou d'un barrage.
- pour la recherche de personne sous les avalanches, la complexité des images radar rend leur interprétation "on-line" très difficile. De nombreux tests et développements doivent encore être réalisés afin de pouvoir lire ces scans de manière fiable en temps réel pour une telle application.

La méthodologie expliquée dans cet article pour des mesures au travers de la neige peut être extrapolée à d'autres milieux (avec ou sans hélicoptère). La fréquence utilisée par le radar est le paramètre qui détermine la profondeur d'investigation dans ce milieu, ainsi que la résolution.

Des hautes fréquences (1 GHz par exemple) donnent des images radar

très détaillées, mais ne pénètrent que quelques mètres dans le sol. Par contre, les basses fréquences (20 MHz par exemple) permettent de sonder très profondément, avec une résolution très grossière. Finalement, un système embarqué (airborne system en anglais) n'est pas toujours approprié. En effet, les échos radar peuvent soit être trop faible, soit se trouver en interférence avec certains systèmes électroniques de l'avion ou de l'hélicoptère. Il est dans ces cas judicieux d'utiliser des antennes spécialement conçues pour ce type d'applications airborne.

Les applications possibles pour cette technique sont par conséquent multiples. On citera quelques exemples non exhaustifs :

la glaciologie : évolution des glaciers

la géologie/hydrogéologie : recherche de nappes, structure de la roche

l'archéologie : recherche de site, caverne

le génie forestier : MNT en forêt, hauteur de la couverture végétale

le génie civil : recherches de canalisations, de fissures dans des ouvrages d'art. ●

Contacts

Christian Hagin, ing. dipl EPF/SIA

Patrick Lathion, ing dipl. EPFL

GEOSAT SA

26, Ch. de la Métralie

CH-3960 Sierre

Tél : 0041 27 455 25 00

info@geosat.ch

ABSTRACT

In the early nineties, GPS, were revolutionary instruments in our profession. They were used almost exclusively for geodetic applications in post-processing. As technology advanced, new manufacturers appeared, diversifying and developing the performance of GPS receivers. At present, real-time GPS replace the post-processing applications and the low-cost receivers became available, offering new possibilities in navigation and tracking system.

Today, GPS has become an every day technique used by surveyors in combination with other types of sensors. This integration with assistance of GPS enables to reference the information captured by receivers and consequently the production of thematic maps. This method is used, for example, in bathymetry applications, by combining a GPS system with echo sounder, also in rubbish controls by using gas meters with GPS. In this article, we present in greater detail, the integration of radar and GPS for aerial surveillance of snow cover.