

# THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỆ THỐNG RADAR XUYÊN ĐẤT GẮN TRÊN MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI

ĐÀO NGỌC LONG<sup>(1)</sup>, PHẠM CAO ĐẠI<sup>(2)</sup>  
TRẦN CÔNG ANH<sup>(2)</sup>, NGUYỄN ĐĂNG HẢI<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ

<sup>(2)</sup>Viện Tích hợp hệ thống - Học viện Kỹ thuật Quân sự

## Tóm tắt:

Radar xuyên đất (Ground-Penetrating Radar, GPR) lợi dụng khả năng có thể xuyên qua các vật liệu không nhìn thấy bằng mắt thường để phát hiện và tạo dựng hình ảnh các vật thể bị chôn vùi, ẩn giấu dưới lòng đất đã và đang được sử dụng rộng rãi như một công cụ cảm biến từ xa. Đối với địa hình phức tạp, radar xuyên đất khó triển khai theo phương pháp truyền thống, như đặt trên xe đẩy. Với sự phát triển của nền tảng máy bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), các hệ thống GPR gắn trên UAV giúp mở rộng khả năng làm việc và tăng hiệu quả của GPR. Trong bài báo này, đầu tiên chúng tôi giới thiệu tổng quan các nghiên cứu về hệ thống radar xuyên đất gắn trên UAV. Tiếp theo, dựa trên kết quả phân tích tổng quan, lý thuyết tính toán và yêu cầu thực tiễn, một hệ thống radar xuyên đất gắn trên UAV do chúng tôi thiết kế, chế tạo và thực nghiệm được trình bày chi tiết. Cuối cùng, chúng tôi đánh giá những yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng và các triển vọng tương lai liên quan đến công nghệ này.

Từ khóa: Radar xuyên đất; Máy bay không người lái; Cảm biến từ xa

## 1. Giới thiệu

Radars xuyên đất (Ground-Penetrating Radar, GPR) là một công cụ sử dụng sóng vô tuyến tần số cao để phát hiện và xác định mô hình phân bố của đối tượng bên trong môi trường như đất, đá, nước v.v. GPR có ưu điểm là độ phân giải cao, tốc độ phát hiện nhanh, không gây thiệt hại cho mục tiêu phát hiện, v.v., vì vậy GPR được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực: môi trường, thăm dò khoáng sản, khảo sát địa chất v.v. Nhưng hệ thống GPR thường được bố trí sát bề mặt môi trường quan sát, điều này khiến cho việc triển khai GPR bị hạn chế khi gặp các môi trường quan sát với địa hình phức tạp.

Máy bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) thu hút sự quan tâm nhờ vào sự đơn giản trong sử dụng, chi phí bảo trì thấp và tính linh hoạt cao. Các UAV có thể cất, hạ cánh từ các khu vực nhỏ và có thể di chuyển theo mọi hướng và trên các địa hình phức tạp. Lợi dụng các ưu điểm này, cộng đồng khoa học đã phát triển các hệ thống GPR đặt trên UAV (viết tắt là GPR-UAV) để khắc phục nhược điểm của GPR truyền thống, từ đó mở rộng phạm vi hoạt động của GPR [1], tạo ra các hệ thống ứng dụng trong nhiều bối cảnh, như phát hiện bom mìn [2], [3], tìm kiếm cứu nạn [4], nông nghiệp [5], giám sát môi trường [6], [7], [8], v.v.

Tuy nhiên, so với GPR truyền thống, GPR-UAV có nhiều yêu cầu phức tạp cần xử lý hơn. Do hạn chế tải trọng và đặc điểm của UAV, GPR và các thiết bị hỗ trợ được yêu cầu có kết cấu gọn nhẹ, có khả năng xử lý dữ liệu khi thay đổi độ cao và bị giới hạn về tốc độ di chuyển. Các dữ liệu về độ cao và vị trí của hệ thống là các dữ liệu hỗ trợ phải được cung cấp với yêu cầu có độ phân giải cao, tốc độ cập nhật nhanh. Bên cạnh đó, hệ thống phải có khả năng lưu trữ, truyền dữ liệu và lệnh qua kênh vô tuyến hoặc hữu tuyến.

Trong bài báo này, chúng tôi tập trung giới thiệu về thiết kế, chế tạo một hệ thống GPR-UAV dùng cho mục đích khảo sát, dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất, đặc điểm của các lớp đất đá. Bố cục của bài báo được trình bày như sau: Phần 2 cung cấp một cái nhìn tổng quan chung về các hệ thống GPR-UAV hiện đại. Sau đó, Phần 3 trình bày nguyên lý lý thuyết cơ bản của một hệ thống GPR-UAV. Tiếp theo, trong Phần 4, một hệ thống GPR-UAV thiết kế, chế tạo phục vụ cho mục đích khảo sát, dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất được trình bày. Cuối cùng, Phần 5 kết luận công việc của bài báo và hướng phát triển trong tương lai.

## 2. Tổng quan chung hệ thống GPR gắn trên UAV

ARTINO là hệ thống radar hình ảnh trên không cho hình ảnh ba chiều và quan sát từ đỉnh đầu tiên được phát triển cho nền tảng UAV [9]. ARTINO sử dụng công nghệ tổng hợp mặt mở ăng-ten (SAR) khi UAV di chuyển. Radar sử dụng tín hiệu điều tần liên

tục (FMCW) ở dải tần số Ka. Nhờ đó giúp giảm tiêu thụ năng lượng radar và kích thước của ăng-ten. Tiếp theo, vào năm 2016, Đại học Texas thiết kế một hệ thống radar hình ảnh-UAV đơn giản và nhỏ gọn, được phát triển bằng cách gắn một hệ thống radar thương mại lên nền tảng micro-UAV kết hợp với một camera quang học [6].

Một GPR nhẹ làm việc tại băng thông 56 MHz, được điều chế bởi tín hiệu sóng mang ở 2 GHz dưới dạng bộ lọc cosine nâng (RCF), hai ăng-ten Vivaldi Antipodal được lắp đặt ở cấu hình bistatic với góc nghiêng  $45^\circ$  được công bố vào năm 2017 [1]. Vào năm 2018, Viện Nghiên cứu Bắc Norut (Na Uy) phát triển một GPR để phát hiện tuyết [4]. Một hệ thống GPR nhỏ gọn với băng thông siêu rộng (hoạt động trong dải tần số từ 1-4 GHz) để phát hiện mìn cũng được công bố [2] [3]. Cùng năm, các nhóm nghiên cứu tại Đại học Oviedo và Madrid đã thiết kế một hệ thống GPR-UAV để phát hiện các vật thể chôn dưới đất [10]. Sau đó, một nguyên mẫu tương tự đến từ Đại học Vigo phát triển vào năm 2019 [11].

Đại học Maribor, Slovenia vào năm 2020 công bố một hệ thống GPR-UAV được thiết kế đặc biệt để phát hiện mìn [12]. Trong đó, mô đun radar dựa trên công nghệ SFCW, hoạt động ở cấu hình quasi-monostatic, và có thể sử dụng ở cả chế độ nhìn xuống và nhìn về phía trước. Hai ăng-ten lai Vivaldi-Horn nặng 240g với dải tần số từ 550 MHz đến 2,7 GHz.

Để có một cái nhìn tổng quát hơn, Bảng 1 tổng hợp các hệ thống GPR-UAV và tham số chủ yếu của chúng đã được công bố.

*Bảng 1: Tham số chính của một số hệ thống GPR-UAV*

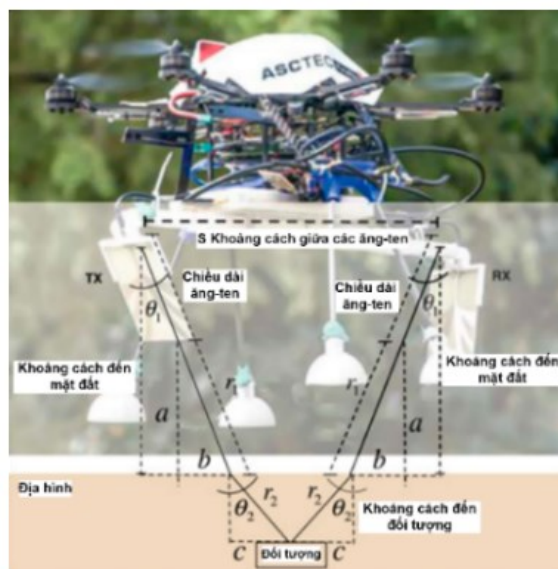
Hệ thống	Kỹ thuật radar	Tần số	Ăng ten	Cấu hình đo lường	UAV
[9]	FMCW	Băng Ka	Ma trận tuyến tính	MIMO	Máy bay nhỏ
[6]	Pulsed Pulson	3,1-5,3 GHz	Helix	Bistatic	DJI Phantom 2

Hệ thống	Kỹ thuật radar	Tần số	Ăng ten	Cấu hình đo lường	UAV
	P410				
[1]	Vô tuyến cấu hình mềm	2 GHz	Ăng-ten Vivaldi đối cực	Bistatic	Hexacopter
[2] [3]	Tần số bước	1-4 GHz	Ăng ten loa	Bistatic	DJI Matrice 600 Pro
[4]	Radar M-Sequence UWB	0,95-6 GHz	1 ăng-ten xoắn ốc TX + 2 ăng-ten Vivaldi RX	Hai Vivaldi	'Kraken' octocopter
[10]	Pulsed Pulson P410	3,1-5,1 GHz	Ăng-ten xoắn ốc	Quasi-monostatic	DJI Spreading Wings S1000+
[11]	Radar M-Sequence UWB	0,1-6 GHz	Hai ăng-ten UWB Vivaldi	Quasi-monostatic	DJI Spreading Wings S1000+
[7]	Pulsed Pulson P440	3,1-4,8 GHz	Hai ăng-ten PCB tuần hoàn logarit	Quasi-monostatic	DJI F550 hexacopter
[13]	FMCW	0,5-3 GHz	Ăng-ten Vivaldi	Bistatic	DJI Matrice 600 Pro
[5]	SFCW Planar R60 VNA	500-700 MHz	Ăng-ten loa	SFCW	X8
[12]	SFCW	0,55-2,7 GHz	Ăng-ten Vivaldi-Loa	Bistatic	DJI Matrice 600 Pro
[8]	Pulsed Cobra Plug-In GPR	0,5-260 MHz	COBRA Plug-in SE-150	Monostatic	DJI Matrice 600 Pro
[14]	Pulsed K2 IDS radar	0,9 GHz	Chưa rõ	Monostatic	Venture VFF_H01

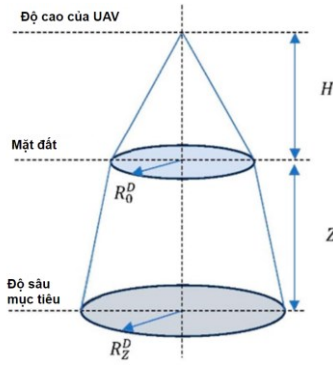
### 3. Lý thuyết cơ bản về hệ thống GPR gắn trên UAV

Phần này chúng tôi giới thiệu mô hình của một hệ thống GPR-UAV, từ đó tiến hành phân tích nguyên lý hoạt động của nó. Hình 1 miêu tả một mô hình điển hình của hệ thống GPR-UAV, trong đó, GPR được đặt trên một UAV bay cách mặt đất một khoảng cách nhất định. Hệ thống GPR sử dụng hai ăng-ten riêng biệt, một ăng-ten phát và một ăng-ten thu.

Khi thiết kế một hệ thống GPR-UAV, các yếu tố cần quan tâm là: độ phân giải không gian, độ sâu quan trắc, diện tích quan sát tối đa, v.v. Hình 2 mô tả cụ thể sơ đồ sử dụng để tính toán các tham số của hệ thống GPR-UAV được cho trên hình 1.



Hình 1: Mô hình hệ thống GPR-UAV



Hình 2: Sơ đồ tính toán tham số

Công thức tính bán kính  $R_0$  của diện tích quan sát tối đa của GPR trên bề mặt trái đất là một hàm của độ cao GPR so với bề mặt trái đất  $H$ , tần số trung tâm  $f$  của GPR và hằng số điện môi trung bình của môi trường  $\epsilon_\alpha$ , và được tính như sau [15] [16]:

$$R_0 = \frac{0.075}{f\sqrt{\epsilon_\alpha}} + \sqrt{\frac{0.075H}{f\sqrt{\epsilon_\alpha}}} \quad (1)$$

trong đó, các đơn vị của hằng số “0.075”,  $H$  và  $f$ , lần lượt là m/ns, m và GHz.

Vì giá trị hằng số điện môi trung bình của không khí bằng 1, nên Phương trình (1) có thể được đơn giản hóa như sau:

$$R_0^D = \frac{0.075}{f} + \sqrt{\frac{0.075H}{f}} \quad (2)$$

trong đó,  $R_0^D$  là bán kính của vùng tiếp xúc tối đa dưới trung tâm GPR khi GPR được đặt trên UAV. Phương trình (2) có thể được đơn giản hóa khi GPR đặt trên mặt đất ( $H \approx 0$ ), ta có:

$$R_0^G = \frac{0.075}{f} \quad (3)$$

Bán kính của vùng quan sát tối đa của GPR

Bảng 2: Thông số cơ bản của hệ thống GPR-UAV được thiết kế

Tên thành phần	Các thông số cơ bản
Radar GPR	- Độ cao cách mặt đất khi bay: $> 2$ m; - Tần số trung tâm: 80 MHz, băng thông 20-140 MHz; - Độ sâu phát hiện đối tượng cực đại: đến 12 m; - Độ phân giải đối tượng cực đại: đến 1 m;
Định vị	- Sai số định vị: $\leq 1$ m
Đo cao	- Sai số đo cao: $\leq 1\%$

ở độ sâu  $Z$ ,  $R_Z$ , tính theo Phương trình (2) là:

$$R_Z^D = \frac{0.075}{f} + \sqrt{\frac{0.075}{f}(\sqrt{H} + \sqrt{\frac{Z}{\epsilon_s}})} \quad (4)$$

Giả sử độ sâu của đối tượng là  $Z$  và độ phân giải theo chiều sâu khảo sát tối đa là  $D_Z$ , đây là những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu được GPR thu thập. Độ phân giải theo chiều sâu ( $D_Z$ ) và kích thước tối thiểu ( $A_{min}$ ) của các vật thể có thể phát hiện được có thể được tính như sau:

$$D_Z = \frac{0.15}{f\sqrt{\epsilon_s}} \quad (5)$$

trong đó, đơn vị của hệ số “0,15” là m/ns, và kích thước tối thiểu của vật thể được tính như sau:

$$A_{min} = \begin{cases} \frac{Z+H}{10}, & \text{if } \frac{Z+H}{10} > D_Z \\ \frac{0.075}{f\sqrt{\epsilon_s}}, & \text{if } \frac{Z+H}{10} \leq D_Z \end{cases} \quad (6)$$

Có thể thấy, độ cao của UAV ảnh hưởng đến độ chính xác của dữ liệu (theo các Phương trình (2), (4) và (6)) và do đó phải được tối ưu hóa.

#### 4. Thiết kế, chế tạo hệ thống radar xuyên đất gắn trên UAV dùng cho khảo sát, dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất

##### 4.1. Yêu cầu cơ bản của hệ thống

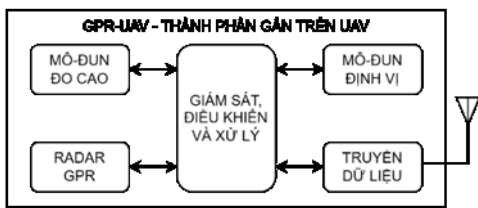
Trong phần này, bài báo giới thiệu một hệ thống GPR-UAV được thiết kế để khảo sát, dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất và đặc điểm của các lớp đất đá phục vụ cho hoạt động nghiên cứu, khảo sát tài nguyên và môi trường. Các tham số cơ bản của hệ thống được cho tại Bảng 2.

Tên thành phần	Các thông số cơ bản
Truyền dữ liệu	- Cự ly truyền: đến 500 m; Tốc độ truyền: đến 15 Kbit/s.
Khối lượng	- Khối lượng tổng thể các thành phần đặt trên UAV: $\approx 5$ Kg

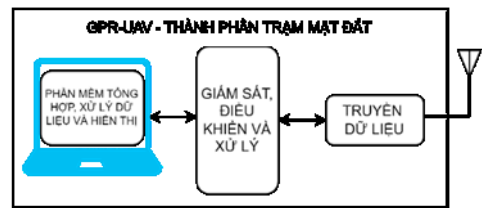
#### 4.2. Cấu trúc chung và các thành phần chính của hệ thống GPR-UAV

Hệ thống GPR-UAV được thiết kế gồm hai phần như mô tả trên hình 3: Thành phần gắn trên UAV và thành phần trạm mặt đất. Trong đó: i/ Thành phần đặt trên UAV thực

hiện chức năng của radar xuyên đất và thu thập các dữ liệu về vị trí, độ cao của hệ thống; ii/ Thành phần trạm mặt đất thực hiện việc điều khiển hoạt động, thu nhận dữ liệu của thành phần trên UAV qua kênh truyền dữ liệu vô tuyến, từ đó tiến hành xử lý, hiển thị và lưu trữ kết quả.



(a) Thành phần gắn trên UAV

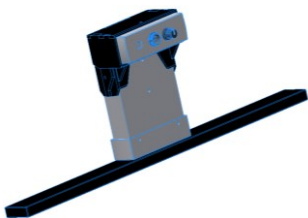


(b) Thành phần trạm mặt đất

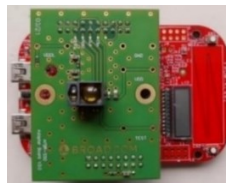
Hình 3: Sơ đồ cấu trúc hệ thống GPR-UAV thiết kế

4.2.1. Radar GPR: Radar GPR là thành phần cốt lõi của hệ thống GPR-UAV. Radar GPR là thành phần được thiết kế, chế tạo và tích hợp sử dụng trong hệ thống. Đây là loại radar tín hiệu xung hẹp với độ rộng xung dưới 10ns. Radar GPR được cấu thành bởi hai mô-đun thu/phát riêng biệt và do mô-đun thu xử lý điều khiển, đồng bộ. Các mô-đun thu/phát

được gắn với ăng-ten như trong hình 4(a) và được cố định vào hai đầu đối xứng trên giá đỡ chung của hệ thống. Việc điều khiển hoạt động và thu thập dữ liệu của radar GPR được thực hiện từ Mô-đun giám sát, điều khiển và xử lý gắn trên UAV thông qua cổng USB được gắn trên mô-đun thu, xử lý.



(a) Mô-đun thu/phát GPR



(b) Mô-đun Lidar



(c) Mô-đun định vị GNSS

Hình 4: Các mô-đun chính của thành phần GPR-UAV đặt trên UAV

4.2.2. Mô-đun đo cao và mô-đun định vị: Trong hệ thống GPR-UAV, radar GPR gắn trên UAV nên khoảng cách tới mặt đất là không biết trước và thay đổi theo thời gian, địa hình, v.v. Như vậy, để tính được độ sâu của mục tiêu (Length to Target) thì trước tiên phải biết được độ cao từ GPR tới mặt đất (Length

to Ground). Vì vậy, trên hệ thống GPR-UAV, thiết bị đo cao là mô-đun bắt buộc để biết độ cao theo thời gian của GPR so với mặt đất, dùng trong tính toán chính xác độ sâu của mục tiêu. Mô-đun định vị cung cấp thông tin vị trí của hệ thống để thực hiện việc tính toán, tái tạo quỹ đạo khảo sát, v.v. Để đảm bảo tính độc



lập và linh hoạt trong sử dụng, hệ thống GPR-UAV thiết kế sử dụng mô-đun đo cao và định vị riêng. Theo đó, đo cao được thực hiện bởi mô-đun Lidar sử dụng bộ thu/phát AFBR-S50 của hãng BroadCom như trên hình 4(b), có khả năng đo cự ly đến 10 m, với sai số phép đo dưới 1% cự ly đo [17]. Hệ thống thiết kế sử dụng mô-đun định vị GNSS C94-M8P sử dụng công nghệ GPS RTK có thể đạt độ chính xác cao ở mức cm của hãng Ublox [18] như mô tả trên hình 4(c).

**4.2.3. Các mô-đun chức năng phần cứng khác:** Hệ thống GPR-UAV là hệ thống tích hợp đa mô-đun, do đó, cả thành phần đặt trên UAV và thành phần trạm mặt đất đều cần một mô-đun giám sát, điều khiển và xử lý để điều khiển và đồng bộ hoạt động, truyền nhận dữ liệu, lệnh điều khiển giữa các thành phần. Công nghệ LoraWan được áp dụng để truyền nhận dữ liệu theo kênh vô tuyến giữa hai thành phần. Máy tính tại trạm mặt đất được cài đặt phần mềm có chức năng giao tiếp người dùng, điều khiển toàn bộ hoạt động của hệ thống và hiển thị, lưu trữ kết quả.

### 4.3. Kết quả thiết kế và thử nghiệm

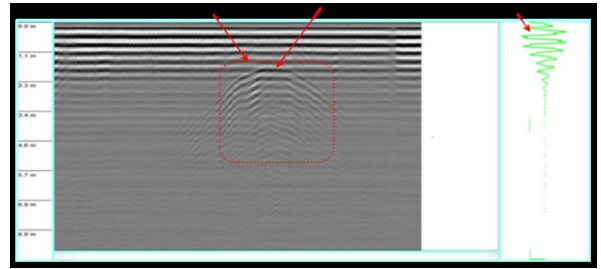
Dựa vào kết quả nghiên cứu và các yêu cầu đặt ra, chúng tôi đã thiết kế, chế tạo và tích hợp thành công một hệ thống GPR-UAV ở tần số 80 MHz, gắn được trên thiết bị UAV dùng cho khảo sát tại các địa hình phức tạp. Trên hình 5 mô tả hình ảnh của hệ thống GPR-UAV được thiết kế. Trong đó, hình 5(a) là hình ảnh của thành phần đặt trên UAV sau khi chế tạo tại Phòng thí nghiệm, hình 5(b) mô tả hệ thống GPR-UAV được gắn trên UAV và thực hiện bay khảo sát ngoài thực địa. Khối lượng tổng thể của thành phần gắn trên UAV là  $\approx 5$  Kg.



(a) Thành phần đặt trên UAV



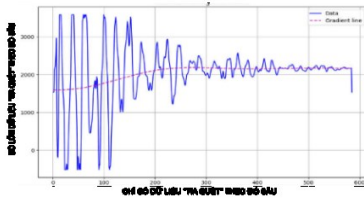
(b) Hệ thống lắp lên UAV và thử nghiệm  
Hình 5: Hệ thống GPR-UAV thiết kế



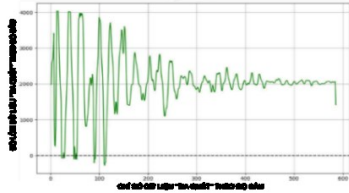
Hình 6: Kết quả thử nghiệm của hệ thống GPR-UAV chế tạo

Hình 6 mô tả một kết quả khảo sát thực tế của hệ thống GPR-UAV thiết kế, chế tạo. Theo đó, tổng hợp hình ảnh tín hiệu radar GPR được mô tả tại khung giữa của giao diện, dạng tín hiệu hiện thời của một “tia” quét radar GPR được mô tả trong khung bên phải của giao diện phần mềm. Kết quả phân tích hình ảnh tín hiệu radar GPR thu được cho thấy có một đối tượng được phát hiện nằm trong khung đường màu đỏ nét đứt. Vị trí đỉnh của đối tượng được xác định tại độ sâu 2 m, phù hợp với đối tượng được khảo sát là một đường ống thoát nước tại độ sâu 2 m.

Khi lắp đặt lên UAV, các yếu tố môi trường (các đối tượng xung quanh, sự thay đổi độ cao, v.v.) và ảnh hưởng từ UAV (mất cân bằng, rung lắc, v.v.) dẫn tới tín hiệu thu bị nhiễu động, ví dụ như hiện tượng trục “tia quét” bị uốn cong như trên hình 7(a).



(a) Dữ liệu bị nhiễu



(b) Dữ liệu sau xử lý nhiễu

Hình 7: Xử lý tác động của nhiễu khi đặt trên UAV

Một số giải pháp kỹ thuật được áp dụng như hiệu chuẩn trực “tia quét” dựa trên gradient, lấy trung bình tín hiệu... giúp loại bỏ được phần lớn ảnh hưởng của nhiễu như hiển thị trên hình 7(b). Do đó, kết quả khảo sát của radar GPR trên giao diện là có thể sử dụng để phân tích, phát hiện và đánh giá các đối tượng dưới mặt đất.

#### 4. Kết luận

Hệ thống GPR-UAV được nghiên cứu, phát triển và ứng dụng từ nhu cầu thực tiễn và điều kiện công nghệ hiện nay. Một hệ thống GPR-UAV dùng cho khảo sát, dò tìm, đo đạc đối tượng dưới mặt đất và đặc điểm của các lớp đất đá phục vụ cho hoạt động nghiên cứu, điều tra, khảo sát tài nguyên và môi trường do chúng tôi thiết kế, chế tạo, tích hợp và tiến hành thử nghiệm đã được giới thiệu trong bài báo này. Kết quả khảo sát và thử nghiệm chứng minh khả năng hoạt động thông suốt của hệ thống và xử lý nhiễu phát sinh khi GPR đặt trên UAV. Thông qua thiết kế mẫu này, chúng tôi hi vọng trong tương lai có nhiều hệ thống GPR-UAV tối ưu hơn phục vụ cho các mục tiêu khoa học và ứng dụng khác nhau được nghiên cứu phát triển trong nước. Vấn đề về xử lý triệt để các nhiễu tác động từ môi

trường và điều kiện hoạt động trên UAV đòi hỏi phải nghiên cứu, áp dụng thêm các giải pháp kỹ thuật và thử nghiệm. Đây cũng là định hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

**Lời cảm ơn:** Bài báo này là sản phẩm của Đề tài nghiên cứu khoa học độc lập cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường “Nghiên cứu thiết kế lắp đặt bộ máy đo radar xuyên đất gắn trên thiết bị bay không người lái (UAV) phục vụ hoạt động nghiên cứu, điều tra, khảo sát tài nguyên và môi trường”, mã số TNMT.2022.03.05. Thông qua đây, tập thể tác giả xin chân thành cảm ơn.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Colorado, et al. "An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an autonomous drone." *Advanced Robotics* 31, no. 15 (2017): 791-808.
- [2]. Burr, et al. "Design and Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection." In *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility*, pp. 1-4. IEEE, 2018.
- [3]. Burr, et al. "UAV-borne FMCW InSAR for focusing buried objects." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 19 (2021): 1-5.
- [4]. Jenssen, et al. "Drone-mounted ultrawideband radar for retrieval of snowpack properties." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 69, no.1 (2019): 221-230.
- [5]. Wu, Kaijun, et al. "A new drone-borne GPR for soil moisture mapping." *Remote Sensing of Environment* 235 (2019): 111456.
- [6]. Li, et al. "High-resolution, downward-looking radar imaging using a small consumer drone." In *ISAP*, pp. 2037-

2038. IEEE, 2016.

[7]. Ludeno, et al. "Assessment of a micro-UAV system for microwave tomography radar imaging." *Remote Sensing of Environment* 212 (2018): 90-102.

[8]. Saponaro, et al. "A UAV-GPR fusion approach for the characterization of a quarry excavation area in Falconara Albanese, Southern Italy." *Drones* 5, no. 2 (2021): 40.

[9]. Weib, et al. "A 3D imaging radar for small unmanned airplanes-ARTINO." In *European Radar Conference, 2005. EURAD 2005.*, pp. 209-212. IEEE, 2005.

[10]. Fernández, et al. "Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle." *IEEE Access* 6 (2018): 45100-45112.

[11]. Garcia-Fernandez, et al. "Autonomous airborne 3D SAR imaging system for subsurface sensing: UWB-GPR on board a UAV for landmine and IED detection." *Remote Sensing* 11, no. 20 (2019): 2357.

[12]. Šipoš, et al. "A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection." *Sensors* 20, no. 8 (2020): 2234.

[13]. Schreiber, et al. "Advanced buried object detection by multichannel, UAV/drone carried synthetic aperture radar." In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5. IEEE, 2019.

[14]. Vergnano, et al. "Drone-borne ground-penetrating radar for snow cover mapping." *Remote Sensing* 14, no. 7 (2022): 1763.

[15]. Lang, et al. *Israel Antiquities Authority (IAA): Tel Aviv, Israel, 2022.*

[16]. Klotzsche, et al. "Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress." *Vadose Zone Journal* 17, no. 1 (2018): 1-9.

[17]. <https://www.broadcom.com/products/optical-sensors/time-of-flight-3d-sensors/afbr-s50mv85g>

[18]. <https://www.u-blox.com/en/product/c94-m8p>

## Summary

### **Design and implementation of ground-penetrating radar system mounted on drones**

*Dao Ngoc Long, The Viet Nam Institute of Surveying and Mapping*

*Pham Cao Dai, Truong Cong Anh, Nguyen Dang Hai*

*Institute of System Integration - Le Quy Don Technical University*

Ground-Penetrating Radar (GPR) takes advantage of the ability to penetrate invisible materials to detect and build images of buried or hidden objects underground and has been widely used as a remote sensing tool. However, ground-penetrating radar is difficult to deploy for complex terrain in traditional ways, such as mounted on carts. With the development of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) platforms, UAV-based GPR systems help expand the working capabilities and increase the efficiency of GPRs. This paper first provides a general overview of the current UAV-based GPR systems and some challenges. Next, based on the overview results, a fabricated UAV-based GPR system is presented in detail. The test results prove the system's correctness and feasibility. Finally, we summarize the results and prospects of this promising technology.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Drones; Remote sensing.