

실시간 SAR 영상 생성을 위한 Range Doppler Algorithm의 GPU 가속 GPU Acceleration of Range Doppler Algorithm for Real-Time SAR Image Generation

정 동 민*, 이 우 경**, 이 명 진', **, 정 윤 호', **★

Dong-Min Jeong*, Woo-Kyung Lee**, Myeong-Jin Lee', **, Yun-Ho Jung', **★

Abstract

In this paper, a GPU-accelerated kernel of range Doppler algorithm (RDA) was developed for real-time image formation based on frequency modulated continuous wave (FMCW) synthetic aperture radar (SAR). A pinned memory was used to minimize the data transfer time between the host and the GPU device, and the kernel was configured to perform all RDA operations on the GPU to minimize the number of data transfers. The dataset was obtained through the FMCW drone SAR experiment, and the GPU acceleration effect was measured in an intel i7-9700K CPU, 32GB RAM, and Nvidia RTX 3090 GPU environment. Including the data transfer time between host and devices, it was measured to be accelerated up to 3.41 times compared to the CPU, and when only the acceleration effect of operation was measured without including the data transfer time, it was confirmed that it could be accelerated up to 156 times.

요 약

본 논문에서는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) SAR(Synthetic Aperture Radar) 기반 실시간 영상 형성을 위해 RDA(Range Doppler Algorithm)의 GPU 가속 커널을 개발하였다. Host와 GPU device 사이의 데이터 전송 시간을 최소화하기 위해 pinned 메모리를 사용하였고, 데이터의 전송 횟수를 최소화하기 위해 모든 RDA 연산을 GPU에서 수행하도록 커널을 구성하였다. FMCW 드론 SAR 실험을 통해 데이터셋을 획득하였고, intel i7-9700K CPU, 32GB RAM과 Nvidia RTX 3090 GPU 환경에서 GPU의 가속 효과를 측정하였다. Host-device간 데이터 전송 시간을 포함했을 경우 CPU 대비 최대 3.41배 가속된 것으로 측정되었고, 데이터 전송 시간을 포함하지 않고 연산의 가속 효과만을 측정했을 때, 최대 156배 가속 가능성을 확인할 수 있었다.

Key words : FFT, radar, RDA, SAR, signal processing, acceleration, GPU, CPU

* Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University

** School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

★ Corresponding author

E-mail: yjung@kau.ac.kr, Tel: +82-2-300-0133

※ Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the support from Next Generation SAR Research Laboratory at Korea Aerospace University, originally funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and Agency for Defense Development (ADD).

Manuscript received Aug. 28, 2023; revised Sep. 14, 2023; accepted Sep. 20, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템은 레이더를 사용하여 영상을 획득할 수 있는 시스템이다. 좋은 방위 해상도는 선명한 영상을 형성하기 위해서 필수적이며, 안테나의 크기가 증가함에 따라 향상된다. 하지만, 안테나의 크기를 키우는 데에는 물리적인 한계가 존재하기 때문에, SAR 시스템은 레이더를 항공기와 같은 플랫폼에 탑재 후 이동하면서 데이터를 획득하고, 수학적 합성을 통해 큰 안테나를 사용한 것처럼 좋은 방위해상도를 얻을 수 있으며, 이를 통해 선명한 영상을 획득할 수 있다[1-3].

광학 센서를 사용하여 이미지를 획득하게 되면, 광량이 부족한 밤이나, 비, 구름, 안개등이 심한 악천후에는 제대로 된 이미지를 획득할 수 없지만, SAR 시스템을 사용하여 이미지를 생성했을 때는 주간이나 야간, 악천후 등 다양한 조건에서도 고해상도의 레이다 영상을 획득할 수 있기 때문에, 현재까지 활발하게 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 SAR 시스템에는 상당한 처리 능력과 저장 용량이 필요하므로 인공위성이나 크기가 큰 항공기와 같은 큰 플랫폼에 탑재되어 활용되었으나, 최근 드론 산업의 발전과 신호처리 프로세서 설계 기술의 발전으로 소형 드론에도 SAR 탑재가 가능해지면서 드론 SAR에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4][5].

기상 상태와 관계없이 영상을 획득할 수 있는 SAR의 장점으로 인해, 감시 및 정찰 분야에 활용도가 매우 높아서 국내에선 주로 군사 목적으로 사용되고 있고, 소형 드론 SAR 시스템을 사용했을 때, 사람이 접근하기 어려운 지형을 탐색할 수 있는 장점 때문에 활용도가 높아지고 있다.

기존의 SAR 시스템은 높은 피크 전송 전력이 필요한 펄스 레이더가 주로 사용되는데, 펄스 레이더는 높은 전송 전력과 비용, 하드웨어의 크기 때문에 소형 드론에 탑재되어 운용되기 어려운 문제가 있다. FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더와 SAR의 결합은 펄스 레이더에 비해 낮은 전송 전력, 낮은 비용 및 작은 크기와 같은 여러 이점을 제공하기 때문에 FMCW SAR 시스템은 드론에 탑재되어 운용되기 유리하다[6][7]. 또한, 감시 및 정찰 분야에 활용되기 위해서는 신속한 응답이 필요하고, 이를 위해서는 실시간으로 SAR 영상을 획득하는 것이 매우 중요하다. 그러나, SAR 시스템으로 획득한 원시 데이터는 그 양이 매우 큰 경우가 대부분이고, 영상을 생성하는 데 필요한 복잡한 신호처리 연산이

요구되기 때문에 이를 해결해야 하는 문제가 있다.

SAR 영상을 생성하기 위한 알고리즘에는 RDA(Range Doppler Algorithm), CSA(Chirp Scaling Algorithm), PFA(Polar Format Algorithm), BPA(Back-Projection Algorithm) 등 여러 가지가 존재한다[8-12]. 여러 가지 알고리즘 중 RDA가 영상 품질과 계산 효율성의 trade-off가 가장 좋기 때문에 실시간 SAR 영상 생성을 위한 알고리즘으로 적합하다.

RDA는 거리 압축 연산, RCMC(Range Cell Migration Correction), 방위 압축 연산으로 구성되는데, 거리 및 방위 방향의 압축 연산은 연산량이 많은 FFT(Fast Fourier Transform) 및 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 연산으로 구성되며, 이를 반복 수행해야 하므로 많은 시간이 소요된다. 따라서, 실시간 SAR 영상 생성을 위해서는 이를 가속할 필요가 있다.

실시간 SAR 영상 생성을 위한 하드웨어 가속 방법에는 GPU(Graphics Processing Unit)를 사용하는 방법과 FPGA(Field-Programmable Gate Arrays)를 사용하여 가속하는 방법이 존재한다[13-18]. FPGA는 전력 소비와 성능 간의 trade-off가 우수하고, 어플리케이션별 최적화 로직을 구현하도록 FPGA를 설계할 수 있으므로 특정 경우에 GPU를 능가할 수 있는 최적화된 솔루션을 개발할 수 있다. 그러나 FPGA 개발은 맞춤형 로직 구현의 필요성과 FPGA 설계 언어 및 하드웨어의 낮은 레벨까지 접근해야 하므로 개발 시간이 오래 걸리고 까다로울 수 있으며, 한정된 자원으로 인해 매우 크고 복잡한 데이터의 처리에는 GPU 보다 낮은 효율을 갖는다.

GPU는 뛰어난 병렬 처리 기능을 지원 가능하며, 많은 양의 데이터를 동시에 처리하는 연산에 매우 적합한 특성을 갖는다. 또한, GPU는 개발 프로세스를 단순화할 수 있는 CUDA 및 OpenCL과 같은 잘 확립된 라이브러리 및 프로그래밍 언어의 이점을 제공하기 때문에 개발 속도에 있어 유리한 장점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 FMCW 레이더를 사용하는 드론 SAR의 비행 실험을 통해 원시 데이터를 획득하고, 실시간 SAR 영상 생성을 위해 CUDA를 기반으로 개발한 GPU 커널을 사용하여 RDA의 가속을 수행하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 펄스 레이더 기반의 RDA와 FMCW 레이더 기반의 RDA에 대해 설명하고, 3장에서는 RDA의 가속을 위한 GPU 커널의 구조에 대해 설명한다. 4장에서는 FMCW 레이더 드론 SAR 실험으로 획득한 데이터를 활용한 GPU 기반

RDA 영상 형성의 가속 효과를 확인하고, 5장에서는 주요 결론을 제시한다.

II. Background

1. 펄스 기반 Range-Doppler Algorithm

RDA의 연산 과정은 그림 1과 같이 거리 압축, RCMC, 방위 압축 과정으로 수행된다. RDA는 펄스 레이더를 기반으로 제안되었다. 따라서 거리 압축을 수행하는 과정에 있어, 정합 필터 컨볼루션 연산을 주파수 도메인에서 곱셈으로 수행하여 FFT, 곱셈, IFFT의 순서로 진행된다. 이후 방위 압축 연산도 거리 압축과 마찬가지로 진행되는데, 정합 필터를 곱해주는 연산을 수행하기 전에, SAR 시스템의 이동에 의해 변하는 거리에 대한 보정 연산인 RCMC 연산을 수행하게 된다.

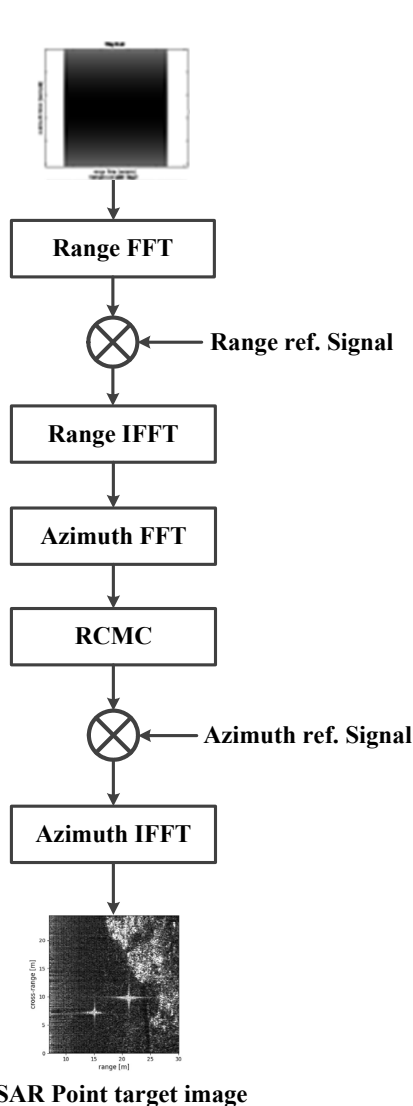


Fig. 1. Pulse radar based range Doppler algorithm flow.
그림 1. 펄스 레이더 기반 range Doppler 알고리즘 흐름

2. FMCW 기반 Range-Doppler Algorithm

펄스 레이더를 사용하는 것을 기준으로 제시된 기존의 RDA와 다르게, FMCW 레이더를 사용하여 RDA를 수행하게 되면 거리방향에 대한 연산이 수정되어야 한다. 펄스 레이더의 경우 FFT를 수행한 뒤, 참조 신호의 곱셈을 진행하고 IFFT를 수행하였지만, FMCW 레이더의 경우 FFT만 수행하게 되어 거리방향 연산 과정에서 참조 신호의 곱셈과 IFFT 과정을 수행하지 않게 된다. 또한, 드론 SAR로 획득한 실제 데이터를 다루는 과정에서 발생하는 커플링 신호를 제거해야 하고, 제로 패딩 및 ROI (Region Of Interest) 추출 등의 여러 가지 데이터 프로세싱 과정이 거리 FFT 연산과 방위 FFT 사이에 포함되어야 하므로 RDA의 연산 과정이 그림 2와 같이 진행되어야 한다.

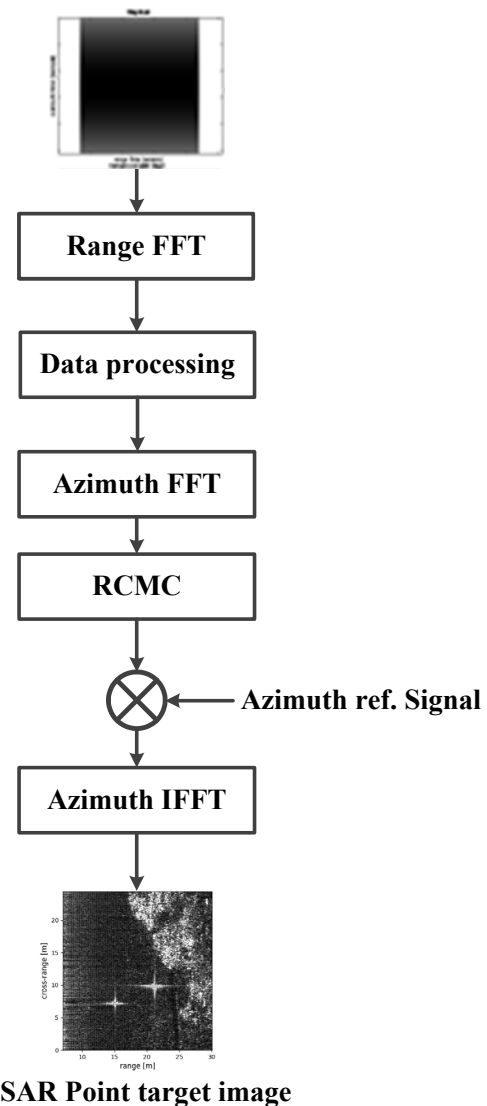


Fig. 2. FMCW radar based range doppler algorithm flow.
그림 2. FMCW 레이더 기반 range doppler 알고리즘 흐름

III. GPU 가속 커널 구조

본 장에서는 RDA의 연산을 가속하기 위해 설계된 GPU 커널 구조에 대해 설명한다. 그림 3은 CPU와 GPU의 연산 과정을 보여준다. CPU는 DDR에서 데이터를 불러온 뒤에는 그 데이터를 바로 연산에 사용하게 된다. 반면에, GPU의 연산은 host(CPU)에서 사용하는 DDR 메모리에서 device(GPU)에서 사용하는 GDDR 메모리로 데이터를 옮기는 과정을 수행한 뒤에 device 내에서 연산을 병렬적으로 처리하고, 연산이 완료된 데이터를 다시 host에서 사용하기 위해 device에서 host로 옮기는 과정이 필요하다.

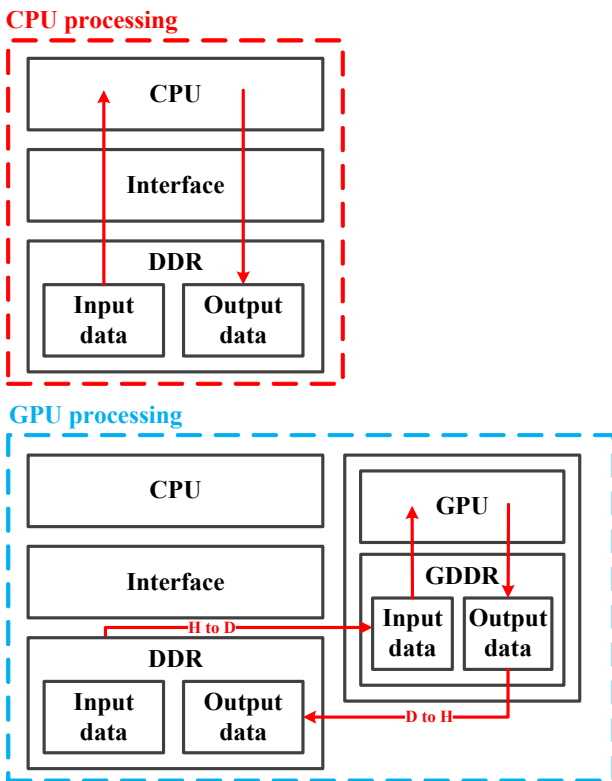


Fig. 3. CPU and GPU processing.
그림 3. CPU 및 GPU 프로세스

GPU를 사용했을 때 가속 효과를 얻기 위해서는 host에서 device로 연산을 수행하고자 하는 데이터를 전송하는 시간, 실제 연산을 수행하는 시간, 연산이 완료된 데이터를 다시 device에서 host로 전송하는 시간의 총합이 CPU에서만 연산했을 경우의 시간보다 짧아야 한다. 즉, GPU는 일반적으로 훨씬 더 빠른 작업 속도 덕분에 병렬 처리가 가능한 시나리오에서 CPU보다 성능이 뛰어나지만, host와 device 사이에서의 데이터 전송 시간을 고려하면 CPU에 비해 가속의 효과가 줄어들거나

없을 수 있다. 이러한 이유로, 특정 시나리오에서는 GPU가 CPU보다 느린 경우가 발생할 수도 있다. 따라서, 연산 자체를 가속하는 것뿐 아니라, host와 device 사이의 데이터 전송 시간을 줄이는 것이 중요하다.

먼저, 데이터 전송 시간을 줄이기 위해 pinned 메모리 방식을 사용하여 host와 device 사이의 데이터 이동을 위한 공간을 고정함으로써 비동기 데이터 전송을 가능하게 하였다. 이에 따라, 데이터 전송 속도의 향상과 동시에, device에서 데이터가 로드되는 동안 CPU가 다른 작업을 계속 수행할 수 있어 전반적인 효율성을 향상시킬 수 있다.

또한, 데이터의 전송 시간을 줄이는 것 외에도 데이터의 전송 횟수를 최소화하는 것도 중요하다. 한번 device로 전송된 데이터를 다시 host로 전송하지 않고, GPU 내에서 대부분의 연산을 처리하게 하면 데이터 전송에 필요한 시간이 매우 줄어들게 된다. 최대의 효과를 보기 위해서 첫 연산을 수행할 때만 host에서 device로 데이터를 전송하고, 모든 연산을 GPU에서 수행한 뒤 최종 결과를 device에서 host로 데이터를 전송하는 구조로 설계하여 데이터 전송이 최대 한 번만 필요하게 하도록 RDA에 필요한 모든 연산에 대한 GPU 커널을 개발하였다. 연산의 복잡도가 높은 연산에 대해서만 GPU를 활용하게 되면 낮은 복잡도의 연산은 CPU에서 수행하게 되어 host와 device 사이의 데이터 전송이 여러 번 존재하게 된다. 반면에, 모든 과정에 대한 연산을 GPU 커널로 개발하여 GPU에서 모든 연산을 수행하게 되면 시작과 끝에서만 host와 device 사이의 데이터 전송이 존재하게 되므로 데이터의 전송 시간을 최소화할 수 있다. 개발된 각각의 커널은 그림 4와 같이 구성되고, 각각의 커널은 CUDA Toolkit 11.4 버전을 이용하여 FFT 및 IFFT, 복소 곱셈, 전치 등의 연산들을 RDA 연산에 최적화하여 개발하였다. RDA의 2차원 데이터에 대해 방위 방향 인덱스만큼 거리 FFT를 수행해야 하는데, GPU의 병렬 프로세서를 통해 FFT를 병렬적으로 수행할 수 있고, 방위 방향 FFT 또한 같은 방식으로 병렬화하여 가속된다. 복소 곱셈 및 전치 연산에 대해서도 각 데이터에 대해서 병렬적으로 동시에 처리될 수 있기 때문에 빠른 가속 효과를 얻을 수 있다.

IV. GPU 기반 RDA 가속 효과 실험

1. FMCW 기반 드론 SAR 실험

데이터 취득을 위한 FMCW 드론 SAR 시스템의 사양

은 표 1과 같다. X-band 대역을 사용하였고, 약 2m/s의 속도로 이동하면서 stripmap 모드로 실험을 진행하였다. SAR 영상 형성을 위한 데이터셋을 얻기 위한 실험으로 2개의 코너 리플렉터를 이용한 실험과 지형관측을 위한 실험을 각각 진행하였고, 코너 리플렉터를 이용한 실험 환경은 그림 5와 같다.

Table 1. System parameter for FMCW drone SAR.

표 1. FMCW 드론 SAR의 시스템 파라미터

Parameters	Value
Tx Power	6 dBm
Sweep Time	4.0008 ms
PRF	249.95 Hz
Bandwidth	700 MHz
Operating Frequency	10 ~ 10.7 GHz
Sampling Frequency	5 MHz
Antenna Gain	17 ~ 18.5 dBi
Antenna Beamwidth	16° ~ 18°
Sensitivity	-125 dBm
Dynamic Range	80 dB
Range Resolution	0.2143 m



Fig. 5. Drone SAR experimental environment.
그림 5. 드론 SAR 실험 환경

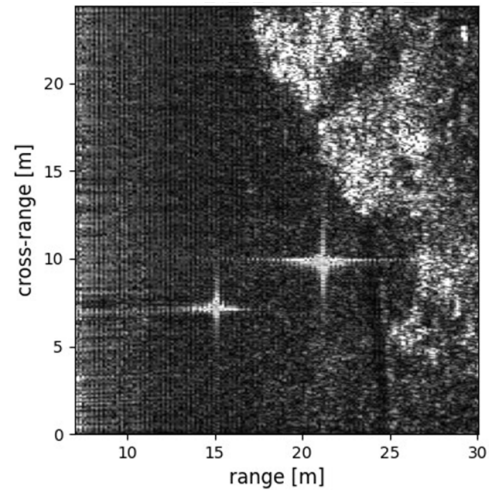


Fig. 6. Point target RDA image.
그림 6. 점표적 RDA 이미지

획득한 데이터셋을 활용하여 RDA 영상 형성을 수행하였다. 그림 6은 2개의 코너 리플렉터를 활용하여 획득한 점표적 데이터에 대한 RDA 영상 결과이고, 그림 7은 지형을 관측한 데이터에 대한 RDA 영상이다. 점표적 영상의 경우 2개의 코너 리플렉터가 제대로 확인되고, 지형을 관측한 영상도 실제 지형과 유사한 결과를 확인할 수 있다.

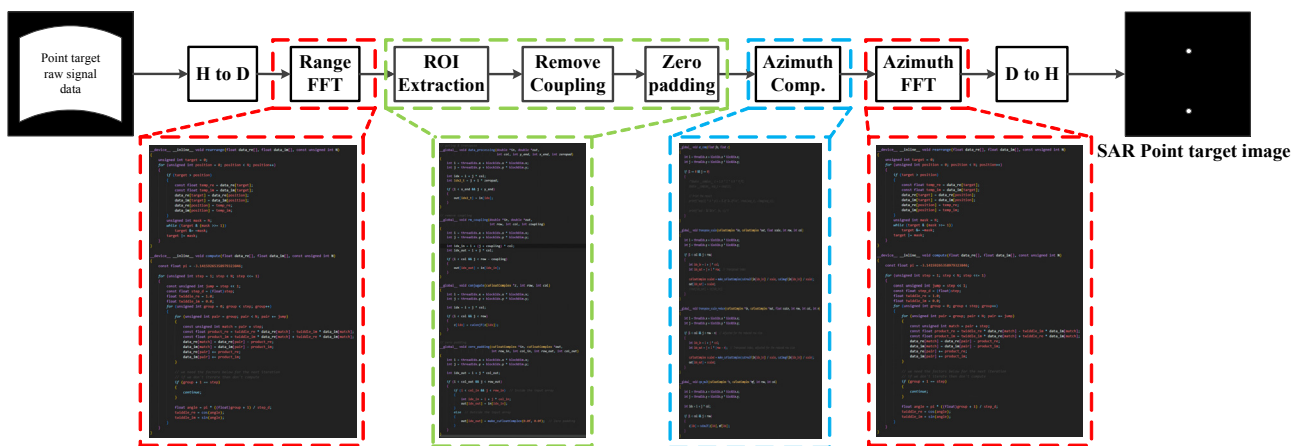


Fig. 4. GPU acceleration kernel for RDA.
그림 4. RDA 연산의 GPU 가속 커널

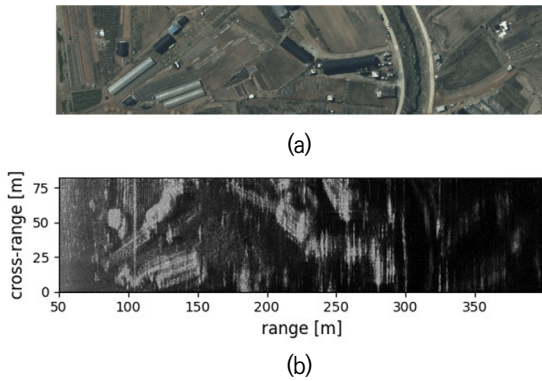


Fig. 7. (a) Aerial photographs of the experimental site, (b) RDA image

그림 7. (a) 실험 현장의 항공 사진, (b) RDA 이미지

2. GPU 가속 효과 분석 결과

RDA의 가속 효과를 확인하기 위한 실험을 진행하였다. intel i7-9700K CPU, 32GB RAM과 Nvidia RTX 3090 GPU 환경에서 수행되었으며, python 언어의 PyCUDA 모듈을 통해 개발한 GPU 커널들을 사용하여 측정하였다.

점표적 데이터의 경우 거리방향으로 18004, 방위 방향으로 2097의 크기 데이터이며, CPU를 사용한 RDA의 처리 시간은 약 0.8초이고, 본 논문에서 최적화한 GPU 커널을 이용한 경우, 처리 시간은 약 0.29초로 GPU에서 약 2.76배의 가속 효과를 확인할 수 있었다.

지형 데이터의 경우 거리방향으로 18004, 방위 방향으로 10827의 크기 데이터이며, CPU를 사용한 RDA의 처리 시간은 약 3.7초이고, 본 논문에서 최적화한 GPU 커널을 이용한 경우, 처리 시간은 약 1.1초로 GPU에서 약 3.41배의 가속 효과를 확인할 수 있었다. 점표적에 대한 데이터와 지형에 대한 데이터 각각에 대한 RDA의 세부적인 각 과정에 대해서는 표 2와 표 3에서 확인할 수 있는데, 추후 SoC(System On Chip) 플랫폼을 활용한 구현을 고려하여 데이터 전송 시간을 제외한 내부 연

Table 2. RDA execution time for point target data.

표 2. 점표적 데이터에 대한 RDA 실행 시간

Step	Execution time (s)	
	CPU	GPU
Host to Device	x	0.2657
Range FFT	0.6717	0.0038
Data processing	0.0055	0.0028
Azimuth FFT	0.0642	0.0001
Azimuth compression	0.0147	0.0009
Azimuth IFFT	0.0438	0.0009
Device to Host	x	0.0150
Total	0.7999	0.2891

산 시간만을 측정하였을 때 각각 94배, 156배의 가속 효과를 달성하는 것을 표 4에서 확인할 수 있다. 제안하는 GPU 커널 구조를 사용함으로써, 데이터의 전송을 연산의 시작과 끝에만 수행되게 하여 시간을 최소화할 수 있었고, 내부 연산의 최적화를 통해 높은 가속 효과를 달성할 수 있었다.

Table 3. RDA execution time for surface observation data.

표 3. 지표면 관측 데이터에 대한 RDA 실행 시간

Step	Execution time (s)	
	CPU	GPU
Host to Device	x	0.9629
Range FFT	2.3973	0.0146
Data processing	0.0457	0.0048
Azimuth FFT	0.6977	0.0009
Azimuth compression	0.1438	0.0019
Azimuth IFFT	0.4805	0.0029
Device to Host	x	0.1180
Total	3.7651	1.1050

Table 4. Data transfer time exclusion RDA acceleration comparison.

표 4. 데이터 전송 시간 제외 RDA 가속 비교

Data	Execution time (s)		Acceleration Rate
	CPU	GPU	
Point target	0.7999	0.0085	x94.105
surface observation	3.7651	0.0241	x156.228

V. 결론

본 논문에서는 FMCW 드론 SAR의 실시간 영상 형성을 위한 알고리즘으로 영상의 품질과 연산 속도의 trade-off가 우수한 RDA를 선택하였고, 이를 가속하기 위한 GPU 가속 커널을 개발하였다. 실제 드론으로 점표적 데이터와 지형 데이터를 획득하기 위한 실험을 진행하였고, 획득한 데이터를 기반으로 CPU와 GPU의 RDA 영상 형성 시간을 비교하여 가속 효과를 확인하였다. GPU의 가속 효과를 최대화하기 위해 각 연산에 대한 커널의 최적화를 수행하였으며, 데이터 전송 시간을 줄이기 위한 pinned 메모리 방식을 사용하고, 데이터의 전송 횟수를 줄이기 위해 RDA의 모든 연산을 GPU 커널로 개발함으로써 RDA 연산의 처음과 끝에만 데이터의 전송이 수행되게 구성하였다. 데이터 전송 시간을 포함했을 경우, 점표적 데이터로 실험한 가속 효과는 CPU보다 GPU가 약 2.76배, 지표면 관측 데이터로 실험한 가속 효과

는 약 3.41배로 측정되었고, 데이터 전송 시간을 줄이기 위한 NVLink와 같은 여러 기술들을 사용한다면 더욱 빠른 가속이 가능할 수 있으므로, 데이터 전송 시간을 제외하고 측정했을 경우 각각 약 94배, 156배 빨라진 것을 확인할 수 있었다. 따라서, FMCW 드론 SAR의 실시간 영상 형성이 충분히 가능하다는 것을 확인하였으며, 본 연구의 결과는 향후 FMCW 드론 SAR의 다양한 응용에서 사용될 수 있음을 보여준다.

References

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol.1, no.1, pp.6-43, 2013. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301
- [2] W. M. Brown and L. J. Porcello, "An introduction to synthetic-aperture radar," *IEEE Spectrum*, vol.6, no.9, pp.52-62, 1969. DOI: 10.1109/MSPEC.1969.5213674
- [3] Cumming, Ian G., and Frank H. Wong. "Digital processing of synthetic aperture radar data," *Artech house I.3*: 108-110, 2005.
- [4] A. Bekar, M. Antoniou and C. J. Baker, "Low-Cost, High-Resolution, Drone-Borne SAR Imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.60, pp.1-11, 2022. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3085235
- [5] J. Yan, Z. Peng, H. Hong, H. Chu, X. Zhu and C. Li, "Vital-SAR-Imaging With a Drone-Based Hybrid Radar System," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.66, no.12, pp.5852-5862, 2018. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2874268
- [6] A. Meta, P. Hoogeboom and L. P. Ligthart, "Signal Processing for FMCW SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.45, no.11, pp.3519-3532, 2007. DOI: 10.1109/TGRS.2007.906140
- [7] R. Wang, O. Loffeld, H. Nies, S. Knedlik, M. Hagelen and H. Essen, "Focus FMCW SAR Data Using the Wavenumber Domain Algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.48, no.4, pp. 2109-2118, 2010. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2034368
- [8] W. M. Brown and R. J. Fredricks, "Range-Doppler Imaging with Motion through Resolution Cells," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.AES-5, no.1, pp.98-102, 1969. DOI: 10.1109/TAES.1969.309826
- [9] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming and F. H. Wong, "Precision SAR processing using chirp scaling," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.32, no.4, pp.786-799, 1994. DOI: 10.1109/36.298008
- [10] J. L. Walker, "Range-Doppler Imaging of Rotating Objects," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-16, no.1, pp.23-52, 1980. DOI: 10.1109/TAES.1980.308875
- [11] M. D. Desai and W. K. Jenkins, "Convolutional backprojection image reconstruction for spotlight mode synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.1, pp.505-517, 1992. DOI: 10.1109/83.199920
- [12] Carra, W., R. Goodman, and R. Majewski. "Spotlight synthetic aperture radar-signal processing algorithm," *Artech House: Norwood*, 1995.
- [13] B. Liu, K. Wang, X. Liu and W. Yu, "An Efficient SAR Processor Based on GPU via CUDA," *2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*, Tianjin, China, pp.1-5. 2009. DOI: 10.1109/CISP.2009.5304418
- [14] M. Wielage, F. Cholewa, C. Fahnemann, P. Pirsch and H. Blume, "High Performance and Low Power Architectures: GPU vs. FPGA for Fast Factorized Backprojection," *2017 Fifth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, pp.351-357. 2017. DOI: 10.1109/CANDAR.2017.101
- [15] F. Zhang, C. Hu, W. Li, W. Hu and H. -C. Li, "Accelerating Time-Domain SAR Raw Data Simulation for Large Areas Using Multi-GPUs," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.7, no.9, pp.3956-3966, 2014. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2330333

[16] D. L. N. Hettiarachchi and E. J. Balster, "Fixed-Point Processing of the SAR Back-Projection Algorithm on FPGA," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol.14, pp.10889-10902, 2021.

DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3119007

[17] Choi, Yeongung, et al. "Fpga implementation of the range-doppler algorithm for real-time synthetic aperture radar imaging," *Electronics 2021*, Vol.10, No.17, pp.2133, 2021.

DOI: 10.3390/electronics10172133

[18] Lee, Jaehyeon, et al. "FPGA Implementation of the Chirp-Scaling Algorithm for Real-Time Synthetic Aperture Radar Imaging," *Sensors, Vol.23*, No.2, pp.959, 2023. DOI: 10.3390/s23020959

BIOGRAPHY

Dong-Min Jeong (Member)



2021 : BS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

2022 : MS degree in Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University.

2022~present : Ph.D degree course in Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University.

Woo-Kyung Lee (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, KAIST.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.

1999 : Ph.D degree in Electrical Engineering, University College London.

1999~2002 : Research professor, Satellite Technology Research Center, KAIST.

2003~2004 : Research Engineer, Samsung Advanced Institute of Technology.

2004~present : Professor, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Myeong-Jin Lee (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, KAIST.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.

2001 : Ph.D degree in Electrical Engineering, KAIST.

2001~2004 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2004~2007 : Assistant professor, Department of Electrical Engineering Kyungsoo University.

2007~present : Professor, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Yun-Ho Jung (Member)



1998 : BS degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2000 : MS degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2005 : Ph.D degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2005~2007 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2007~2008 : Research professor, Institute of Information Engineering, Yonsei University.

2008~present : Professor, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.