

# 항공기 기반 FMCW-SAR 영상복원을 위한 간소화된 분할연산기법

## Simplified Factorizing-Technique for Airborne FMCW-SAR Image Reconstruction

황지환 · 김덕진 · 김진우\* · 옥재우\* · 신희섭\* · 유응노\*

Ji-Hwan Hwang · Duk-Jin Kim · Jin-Woo Kim\* · Jae-Woo Ok\* · Hee-Sub Shin\* · Eung-Noh You\*

### 요 약

본 논문에서는 항공기 기반 FMCW-SAR(Frequency Modulated Continuous Wave - Synthetic Aperture Radar) 영상복원을 위해 적용된 기존 back-projection 알고리즘의 계산 효율을 높이고, 연산과정의 복잡도를 단순화시킨 분할연산기법을 제안하며, 이를 적용한 SAR 영상 복원 과정에 대해 설명한다. 제안된 분할연산기법은 상대적으로 좁은 주사폭과 긴 합성 개구면을 갖는 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템에 효과적으로 적용이 가능하며, back-projection 알고리즘의 영상합성과 정에서 분할된 입력 원시자료와 출력 복원영상 간의 상호 기여도가 낮은 자료를 계산 과정에서 생략하여 계산 효율을 높인 연산법이다. 또한, 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 원시자료 복원과정에 적용하여 계산 효율의 개선 정도를 비교분석하였다.

### Abstract

Simplified factorizing-technique to improve the efficiency on computational procedure and the complexity of the conventional back-projection algorithm, which is used to reconstruct airborne FMCW-SAR image, is suggested, and the reconstruction process of SAR image by this simplified factorizing-technique are presented in this paper. This technique can be efficiently applied to airborne FMCW-SAR having a relatively narrow beamwidth and long synthetic aperture length, and its basic rationale is to exclude the data that has low level of contribution during computational procedure. Using the raw data of practical airborne FMCW-SAR system, performances of this proposed technique such as SAR image quality and processing time were compared and analyzed.

Key words: FMCW-SAR, Factorizing Technique, Back-Projection Algorithm, Airborne System

### I. 서 론

항공기 기반 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상복원을 위해서 시스템 특성에 적합한 다양한 영상복원 알고리즘과 신호처리 기법 등이 활발히 연구되고 있으며<sup>[1],[2]</sup>, 이

중 back-projection 알고리즘은 항공기 요동보상에 대한 우수한 특성으로 다른 알고리즘 기반(예, range-Doppler, frequency scaling, range-migration 등) SAR 영상과의 비교연구를 위해서 활용될 수 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 기존 back-projection 알고리즘은 우수한 요동보상의 장점이 있는 반면에, 긴 처

「이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제와 연구재단 우주핵심기술개발사업(2014M1A3A3A03034799) 지원으로 연구되었음.」

서울대학교 지구환경과학부(School of Earth and Environmental Science, Seoul National University)

\*LIG 넥스원(LIG Nex1) 우주영상연구소

· Manuscript received June, 13, 2017 ; Revised July, 17, 2017 ; Accepted September, 5, 2017. (ID No. 20170613-058)

· Corresponding Author: Duk-jin Kim (e-mail: djkim@snu.ac.kr)

리시간이 걸린다는 단점이 있다<sup>[4]~[6]</sup>.

이와 같은 긴 영상처리시간 문제를 극복하기 위해서 고안된 고속 분할연산기법(fast factorized-BPA)<sup>[7],[8]</sup>은 처리속도 개선 측면에서 우수한 성능을 보이지만, 일반적으로 다층구조의 분할연산기법을 이용한 상대적으로 복잡도가 높은 알고리즘으로 사용자 측면의 활용도가 다소 제한적인 측면이 있다. 이를 보다 직관적이고 단순화된 단일구조의 분할연산기법으로 대체함으로써 SAR 영상복원의 처리속도와 사용자 편의성을 높이고자 하였다.

본 논문에서는 항공기 기반의 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)-SAR 시스템의 레이더 영상복원을 위해 이용되는 back-projection 알고리즘에 간소화된 분할연산기법을 더한 수정된 back-projection 알고리즘을 제안한다. 단순화시킨 분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘은 상대적으로 좁은 주사폭(swath width)과 긴 합성개구면(synthetic aperture)을 갖는 SAR 시스템의 영상복원에 적합하며, 획득된 신호영역과 복원영상 내 신호영역을 일정한 비율로 분할하여 각 영역 간 연산 중요도를 고려해 처리한다. 이때, 분할 영역 간의 영상처리 중 기여도가 낮은 영역 간의 계산과정을 생략함으로써 전체 연산시간을 단축시킬 수 있게 된다.

Back-projection 알고리즘의 기본 연산과정과 본 논문에서 제안된 간소화된 분할연산과정은 각각 2장과 3장에서 설명되며, 제안된 분할연산기법을 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 원시자료에 적용하여 기존 알고리즘의 처리 결과와 그 특성을 4장에서 비교분석하였다.

## II. Back-Projection 알고리즘

Back-projection 알고리즘은 항공기 요동보상기법과 SAR 신호처리 연구를 위한 기준영상과 비교자료 생성 등을 위해서 그 장점을 활용할 수 있으며, 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 영상복원을 위해 적용된 신호모델과 back-projection 알고리즘의 기본 연산과정을 본 장에서 설명한다(그림 1 참조).

### 2-1 FMCW-SAR 신호모델

FMCW 신호기반의 레이더 시스템은 기준 송신 신호를

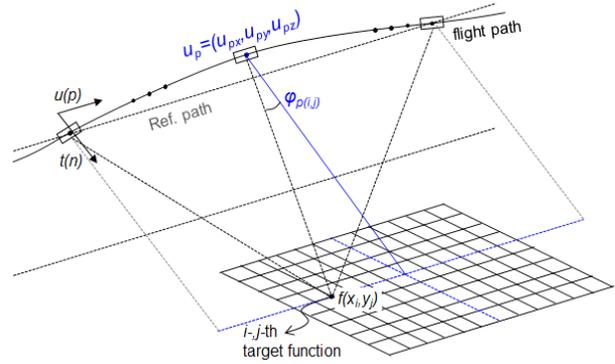


그림 1. FMCW-SAR 시스템 기하구조  
Fig. 1. Geometry of FMCW-SAR system.

이용해 수신신호를 직접 주파수 하향변환(frequency down conversion)하여, 두 신호의 차에 해당하는 비트 주파수(beat frequency) 성분을 수신하고 샘플링하여 레이더 신호처리에 활용한다<sup>[1],[9]</sup>. 이와 같은 과정은 식 (1)~(4)로 정리될 수 있다. 식 (1)은 송신신호로 비트주파수 생성과 레이더 신호처리 과정 중 정합필터(matched filter)로 활용될 기준 신호가 되며, 식 (2)는 목표물 지연시간  $\tau$ 을 적용한 수신 신호가 된다. 식 (3)과 식 (4)는 송·수신신호를 주파수 하향변환시켜 얻은 중간주파수(IF: Intermediate Frequency)의 수신신호와 복원영상 내  $i, j$ -번째 목표물의 지연시간 특성을 각각 나타낸다(여기서,  $t$  샘플링 시간,  $u$  안테나 위치,  $f_0$  중심주파수,  $K_r$  변조율,  $c$  광속을 각각 나타냄).

$$s_t(t) = \exp\left\{2\pi j\left(f_0 t + \frac{K_r}{2} t^2\right)\right\} \quad (1)$$

$$s_r(t) = \exp\left\{2\pi j\left(f_0(t - \tau) + \frac{K_r}{2}(t - \tau)^2\right)\right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s_{IF,r}(t, u) &= s_t(t, u) \cdot s_r^*(t, u) \\ &= \exp\left\{2\pi j\left(f_0 \tau(u) + K_r t \tau(u) - \frac{K_r}{2} \tau(u)^2\right)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau(u) = \frac{2\sqrt{(x_i - u_x)^2 + (y_j - u_y)^2 + u_z^2}}{c} \quad (4)$$

위 수식 식 (1)~(3)은 편의상 신호세기 성분이 생략되었으며, 안테나 빔패턴, 목표물 거리감쇄와 반사도 등이 고려되어야 한다<sup>[10],[11]</sup>.

## 2-2 Back-Projection 알고리즘

기존의 back-projection 알고리즘은 SAR 영상 내  $i, j$ -번째 픽셀의 목표물 복원을 위해서 아래 식 (5)~(7)과 같이 윈도우 함수( $W_p$ )와 샘플링 시간( $t$ )에 대한 푸리에 변환(Fourier transform)이 이루어진 수신신호( $s_{IF,r}(\omega, u_p)$ )를 적용한 정합필터과정을 거치게 되고, 이를 특정 레이더 송·수신 안테나 위치( $u_p, p$ -번째 송신펄스 기준 안테나 위치)에 대해서 목표물( $i, j$ -번째 픽셀)과의 거리 및 지연시간( $t_{dij}$ )을 모든 안테나 위치에 대해 반복 계산하여 그 결과를 누적하는 과정을 수행한다.

$$f(x_i, y_j) = \sum_{p=1}^P \left\{ W_p s_{IF,r}(\omega, u_p) s_M^*(t_{d_{ij}}(u_p)) \right\} \quad (5)$$

$$s_M^*(t_{d_{ij}}(u_p)) = \exp \left\{ -2\pi j \left( f_0 t_{d_{ij}} + \frac{K_r}{2} t_{d_{ij}}^2 \right) \right\} \quad (6)$$

$$t_{d_{ij}}(u_p) = \frac{2\sqrt{(x_i - u_{px})^2 + (y_j - u_{py})^2 + u_{pz}^2}}{c} \quad (7)$$

위 과정에서 윈도우 함수는 거리(range) 방향과 방위(azimuth) 방향을 구분하여 적용할 수 있으며, 특히 방위 방향 위신호(aliasing 또는 azimuth ambiguity)를 낮추기 위한 목적으로 식 (8)과 같은 윈도우 함수를 안테나 위치( $u_p$ )와 복원영상 내  $i, j$ -번째 픽셀 간의 편각( $\phi_{p(i,j)}$ ) 성분을 이용하여 식 (9)와 같이 정의할 수 있고, 이를 정합필터과정에 적용하였다(그림 1 참조). 또한, 최적화된 가중치 적용을 위해 가중치 계수( $\alpha$ )는 10~500 이내의 최적화된 값으로 설정할 수 있다.

$$W_{p,az} = \exp \left\{ -\alpha \left| \phi_{p(i,j)} \right|^2 \right\} \quad (8)$$

$$\phi_{p(i,j)} = \tan^{-1} \left( \frac{(y_j - u_{py})}{\sqrt{(x_i - u_{px})^2 + u_{pz}^2}} \right) \quad (9)$$

그리고 기존 back-projection 알고리즘의 효율적 영상복원을 위해서 입력신호( $s_{IF,r}(\omega, u_p)$ )를 복원영상 내 목표물 지연 시간과 정합필터의 계산 결과가 최적화되도록 입력신호를 고해상 신호로 다시 샘플링(re-sampling)하는 과정을 포함하였다. 이때, 입력 신호는 내삽법(interpolation)을 이용하여 기존 신호 대비 10~100배의 고해상 신호로 변

환하여 정합필터과정에 적용된다.

## III. 분할연산기법을 적용한 BPA

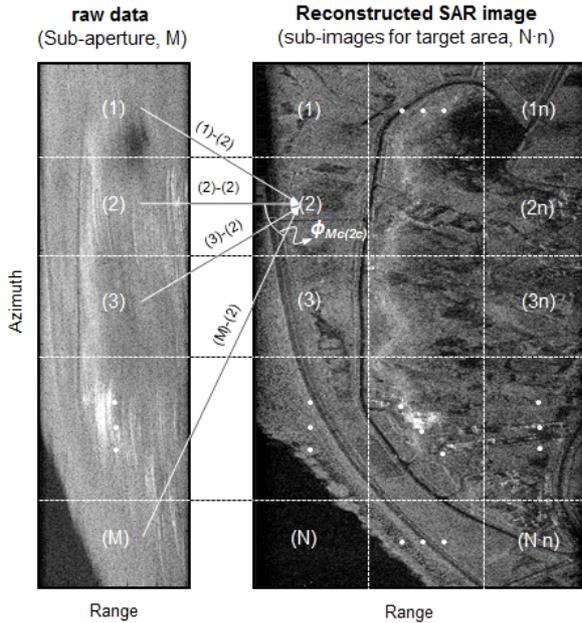
본 장에서는 효율적인 레이더 영상복원을 위해 기존 back-projection 알고리즘에 합성개구면을 기준으로 분할된 입력신호(레이더 수신신호,  $s_{IF,r}(\omega, u)$ )와 출력 복원영상 영역 간의 연산을 기본으로 한 분할연산기법을 추가한 수정된 back-projection 알고리즘에 대해 설명하며, 모의실험을 통해 제안된 분할연산기법의 계산효율과 SAR 영상복원 특성을 검증한다.

### 3-1 간소화시킨 분할연산기법

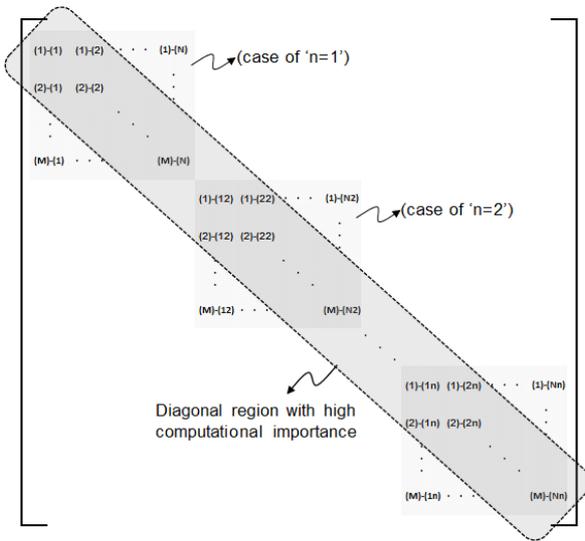
Back-projection 알고리즘은 기본적으로 식 (7)에서와 같이 SAR 영상복원을 위해 설정된 각 픽셀과 안테나 간의 지연시간을 정합필터과정에 적용하여 각각의 계산결과를 해당 픽셀에 누적하는 연산과정을 반복적으로 수행하게 된다. 그러나 레이더 빔 중심에서 상대적으로 멀리 벗어난 픽셀의 경우, 그 계산결과가 복원영상에 미치는 영향은 적으나, 계산상의 중요도가 높은 연산과정과 비교해 동일한 계산시간을 소모하는 특성을 갖게 된다. 이와 더불어 고해상도의 영상복원을 위해 픽셀 수가 증가할수록 back-projection 알고리즘의 정합필터과정 식 (5)의 연산량이 그만큼 증가됨을 알 수 있다.

위 두 가지 관점의 문제점을 개선하기 위해서 간소화시킨 분할연산기법은 먼저 정합필터 연산과정의 계산효율이 최적화될 수 있도록 복원될 SAR 영상을 그림 2(a) 우측과 같이 특정 크기의 영상으로 분할하고, 이와 동일한 위치의 입력신호를 그림 2(a) 좌측과 같이 분할한다. 계산효율을 높이기 위해 소규모로 분할된 영역의 영상복원과정은 기존의 back-projection 알고리즘을 이용해 처리되며, 특정 분할영역의 SAR 영상 복원을 위해서 분할된 모든 입력 수신신호가 적용된다. 이때, SAR 영상 복원을 위해 분할된 영상과 상대적으로 먼 위치에 있어 계산결과에 영향을 덜 미치는 분할 입력신호를 연산과정에서 생략하여 계산시간을 더욱 단축시킬 수 있다.

예를 들어 그림 2(a)에서와 같이 두 번째 분할영상을 복원하기 위해 back-projection 알고리즘의 입력신호는 (1)~(M)-번째까지의 분할 입력신호가 적용될 수 있다. 이 중



(a) 분할된 자료구조  
(a) Factorized data structure



(b) 분할연산기법의 행렬 개념도  
(b) Matrix concept of this factorizing technique

그림 2. 단순화된 분할연산기법 개념도  
Fig. 2. Concept of the simplified factorizing technique.

분할 입력신호와 분할 영상 (2)-(2)의 연산조합이 가장 높은 계산 중요도를 가지며, 상대적으로 가장 먼 거리의 (M)-(2)의 연산조합이 가장 낮은 계산 중요도를 갖게될 것이

다. 이때, 각각의 연산조합이 가장 높은 중요도를 갖는 조합과 이루는 편각(예,  $\phi_{Mc(2c)}$ 는 (M)-(2) 연산조합의 중심점간 연장선과 (2)-(2) 연산조합 연장선이 이루는 각도)을 기준으로 계산 중요도를 결정할 수 있다.

각 분할 입력신호(1~M)와 분할 영상(1~N·n) 간의 연산조합과 그 계산 중요도는 그림 2(b)의 행렬 개념도로 도식화 할 수 있다. 그림 2(b)의 확장된 대각원소(점선 내 원소)들의 연산조합은 계산 중요도가 높아 SAR 영상복원 과정에 필수적이며, 상대적으로 먼 거리의 연산조합(점선 밖 원소)들은 계산과정에서 생략되어 계산시간 단축에 기여한다. 추가적으로 SAR 영상분할 시 거리방향 분할을 추가할 경우( $n \geq 2$ ), 그림 2(b)와 같이 동일한 분할 입력신호를 적용한 연산조합이  $n$ 만큼 반복된다.

### 3-2 분할연산기법을 적용한 Back-Projection 알고리즘

상대적으로 좁은 빔폭과 긴 합성개구면을 갖는 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 경우, 계산 중요도가 낮은 연산조합의 비율이 높아져 제안된 분할연산기법이 효과적으로 적용이 가능하며, 입력자료 분할과 분할연산기법의 적용은 정합필터과정의 연산량과 합성개구면 길이 등을 고려해 기존 back-projection 알고리즘에 쉽게 적용이 가능하다.

$$f'(x,y) = \sum_{l=1}^{Nn} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{p=1}^P \{ W_p s_{IF,r}(w, u_{Mp}) s_M^*(t_{dN}(u_{Mp})) \} \right] \quad (10)$$

$$f''(x,y) = \sum_{l=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P \{ W_p s_{IF,r}(w, u_{Mp}) s_M^*(t_{dN}(u_{Mp})) \} \right] \quad (11)$$

$$f(x,y) = f'(x,y) \approx f''(x,y), \quad (K \leq M \times N \cdot n) \quad (12)$$

식 (10)과 식 (11)은 분할연산기법을 적용한 후, 계산 중요도의 임계치 적용 전·후를 비교한 것으로 전체 연산조합( $M \times N \cdot n$ 개)과 계산 중요도가 높은 연산조합( $K \leq M \times N \cdot n$ 개)을 선택적으로 이용한 목표물 함수특성을 나타낸 것이다. 식(12)는 위의 조건별 목표물 함수의 복원특성을 정리한 것이다. 여기서,  $M$ 번째 분할 입력신호의  $p$ 번째 송수신 안테나 위치는  $u_{Mp}$ 이며,  $N$ 번째 분할 복원영상 영역 내 목표물과의 지연시간은  $t_{dN}(u_{Mp})$ 으로 표현된다.

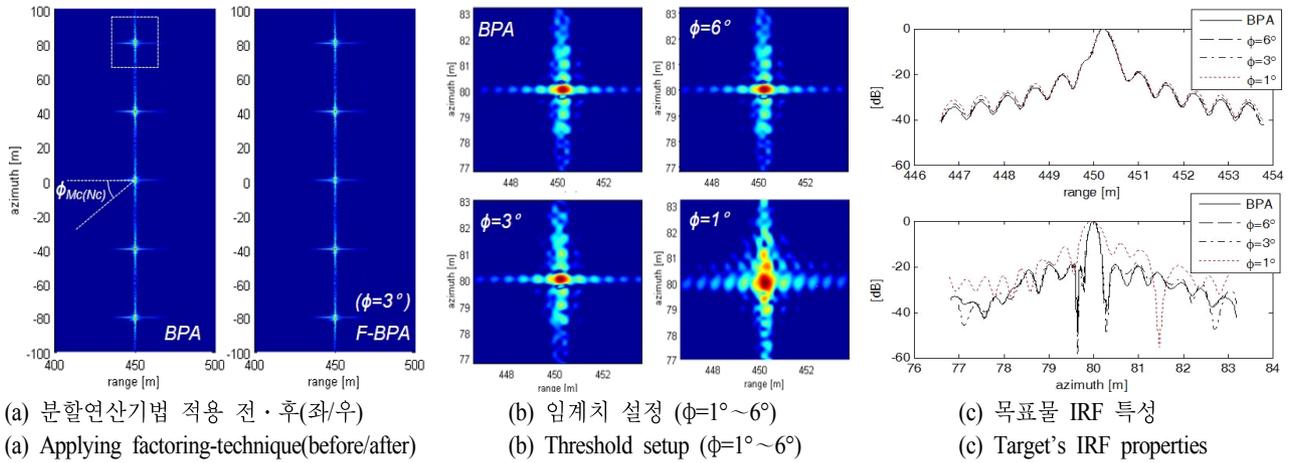


그림 3. 단순화된 분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘 모의실험 결과  
Fig. 3. Simulation results of back-projection algorithm applying the simplified factorizing-technique.

다음으로 분할연산기법 적용을 위한 계산중요도 범위 설정 임계치는 송·수신 안테나의 반전력빔폭( $\phi_{HPBW}$ )을 기준으로 설정이 가능하며, 일반적으로 반전력빔폭 이상의 편각을 갖는 연산조합의 계산 중요도는 back-projection 알고리즘 특성상 그 중요도가 매우 낮아 연산과정에서 쉽게 생략될 수 있다. 반면에 반전력빔폭 이내의 편각을 임계치로 설정할 경우, SAR 영상복원 성능과 계산효율을 고려한 최적화된 임계치 설정이 필요하다.

### 3-3 모의실험 결과분석

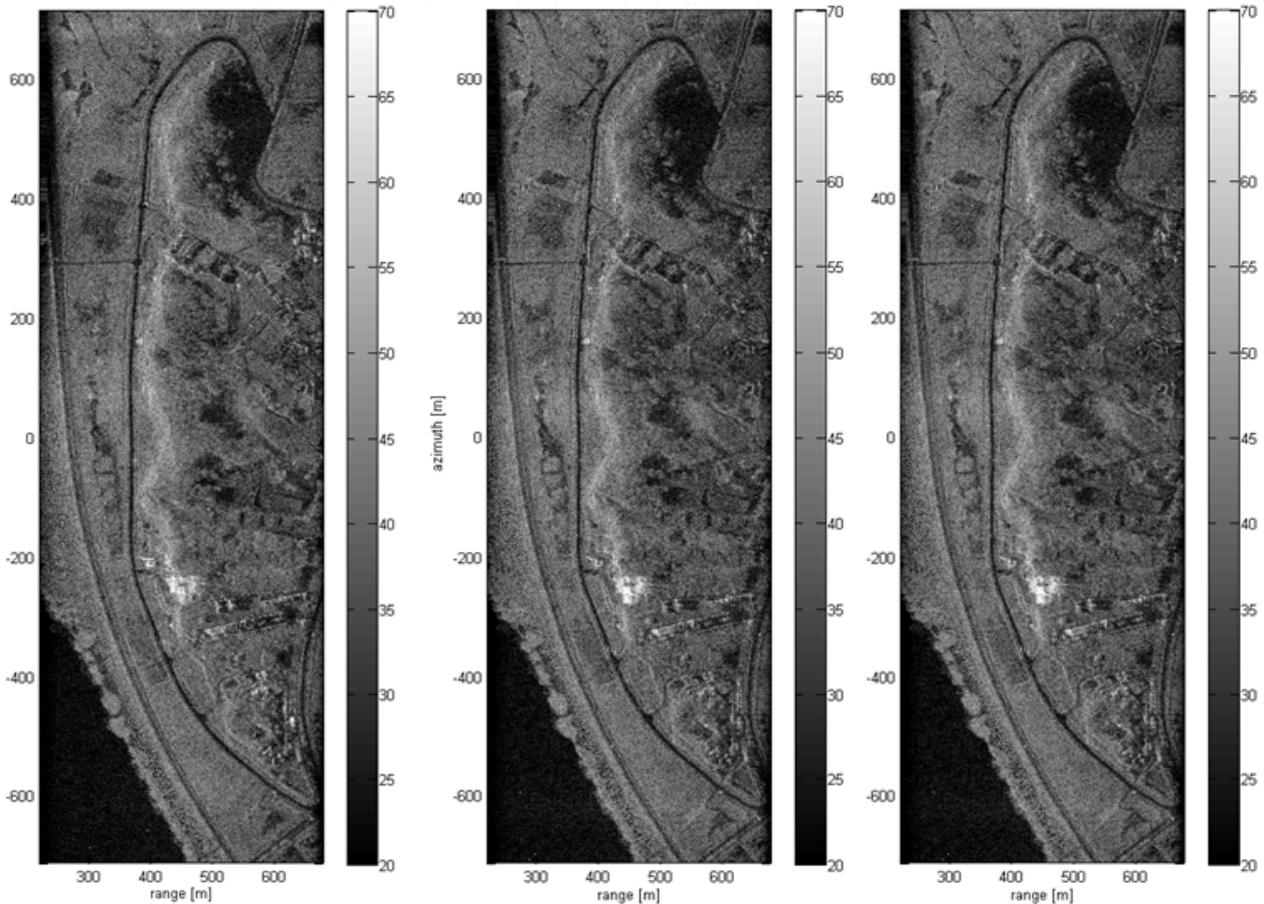
분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘의 성능분석을 위해 그림 3과 같은 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위한 설정 조건은 본 연구에 사용된 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 설정값(표 1 참조)을 기준으로 하였으며, 목표물 거리 450 m, 주파폭 100 m 그리고 방위방향 거리 200 m의 SAR 원시신호(샘플개수 1,252×4,000 개)와 복원영상을 모의실험하였다. FMCW-SAR 시스템의 성능분석을 위해 분할연산기법 적용 전·후 특성과 계산중요도 범위설정을 위한 다양한 임계치(연산조합 간 편각 기준,  $\phi=1^\circ\sim6^\circ$ ) 적용 시 변화된 IRF(Impulse Response Function) 특성을 비교하였다. 점목표물의 특성 변화 분석은 분할연산기법 적용과 좁은 임계치 적용 시 그 특성변화가 민감할 것으로 예측되는 방위방향 양 끝단의 목표물 중 위쪽에 위치한 목표물을 기준으로 비교분석하였다.

모의실험 결과, 분할연산기법의 설정 임계치  $\phi=1^\circ$ 인 경우, 거리/방위방향 해상도는 각각 0.29 m와 0.37 m로 설정 임계치  $\phi=3^\circ$  이상의 기준 해상도 0.29 m와 0.18 m보다 나빠지는 특성을 확인할 수 있다. 또한, 계산시간은 분할연산기법 적용 전 144.8초, 적용 후 임계치  $\phi=6^\circ, 3^\circ, 1^\circ$ 의 설정 조건에 따라 각각 30.2초, 21.26초, 7.1초로 감소하였으며, 모의실험 결과 분할연산기법의 계산 중요도 범위 설정을 위한 임계치는 FMCW-SAR 시스템의 송·수신 안테나의 반전력빔폭 기준 50 % 미만의 설정값( $\phi<3^\circ$ )에서 복원영상의 급격한 왜곡을 확인 할 수 있었으며, 50 % 이상의 임계치 설정값( $\phi\geq 3^\circ$ )을 권한다.

분할연산기법을 적용한 SAR 영상복원 및 신호처리 전 과정은 MATLAB 프로그래밍과 개인 연구용 PC(CPU i5 3.8 GHz, 메모리 16 GBytes)를 기반으로 수행되었다.

표 1. 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 제원  
Table 1. Specification of airborne FMCW-SAR system.

Radar parameters	Specifications	Notes
Frequency	10.0~10.5 GHz	BW = 500 MHz
Tx power	Max 1 watt	(Max 30 dBm)
Sampling rate	1.2 MHz	1,024 samples
Sensing time	~30 sec	PRF = 1,000 Hz
HPBW	~12°	Horizontal polarization
Altitude	425 m	-



(a) 기존 BPA 적용한 SAR 영상 (a) SAR image reconstructed by BPA  
 (b) 분할연산기법 적용( $K=M \times M_n$ ) (b) by factorized-BPA( $K=M \times M_n$ )  
 (c) 분할연산기법 적용( $K < M \times M_n$ ) (c) by factorized-BPA( $K < M \times M_n$ )

그림 4. 분할연산기법을 이용한 SAR 영상복원(1,534×4,756) 결과비교; 합성개구면 길이 1.5 km

Fig. 4. Comparative results of SAR images(1,534×4,756) applied the proposed factorizing-technique; SA length 1.5 km.

#### IV. 분할연산기법을 적용한 항공기 SAR 영상복원

간소화된 분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘 성능검증을 위해 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템으로부터 획득된 레이다 원시자료를 활용하였다. 사용된 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 제원은 표 1과 같으며, 이론적인 경사거리(slant-range) 해상도 30 cm의 성능을 갖는다.

##### 4.1 분할연산기법을 이용한 SAR 영상복원

분할연산기법을 적용한 SAR 영상복원 결과를 비교·검증하기 위해서 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템

으로부터 획득된 원시자료를 back-projection 알고리즘을 기반으로 SAR 영상을 복원하였다. 처리결과 비교분석을 위해서 2016년 1월 대부도 인근 지역에서 획득된 레이다 원시자료(합성개구면 길이 약 1.5 km, 주사폭 약 450 m, 샘플 개수 1,024×28,000개, 용량 ~480 MBytes)를 이용하였다.

그림 4는 기존 back-projection 알고리즘과 간소화된 분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘의 영상복원 결과를 각각 비교한 것으로, 그림 4(a)는 분할연산기법 적용 전의 기존 back-projection 알고리즘의 처리결과이고, 그림 4(b)와 그림 4(c)는 분할연산기법을 적용한 결과로 각각 모든 분할연산조합을 계산한 결과와 중요도가 높은 연산조합을 선택적으로 계산한 결과를 비교한 것이다. 다

시 말해, 그림 4(b)의 반복연산횟수( $K$ )는 분할연산조합의 전체 수( $M \times N \cdot n$ )와 동일하며, 그림 4(c)는 계산중요도를 반영해 생략된 분할연산조합의 수만큼 줄어든 반복연산 횟수( $K < M \times N \cdot n, \phi = 5^\circ$ )로 계산된 결과이다(식 (12) 참조).

그림 4의 각각의 처리결과는 기존 back-projection 알고리즘을 이용한 처리결과와 비교하여 간소화된 분할연산 기법 적용과 계산중요도를 고려한 선택적 계산으로도 동급의 영상품질을 얻을 수 있음을 보여준다. 이때, 복원된 SAR 영상(픽셀 개수 1,534×4,756개) 내 픽셀크기는 거리/방위 방향 각각 30 cm로 계산되었다. 최적화된 영상복원

을 위해 정합필터 과정의 입력신호는 20배 증가된 re-sampling 과정을 포함하였다.

그림 5는 동일한 합성개구면 길이(200 m)와 분할연산기법 적용을 위한 임계치 설정( $\phi = 3^\circ$ ) 조건에서 복원영상의 해상도(영상 내 픽셀크기 1 m/0.5 m/0.3 m)를 변화시킨 것으로 동일한 관측 조건에서 획득된 자료에 대한 기존 back-projection 알고리즘과 분할연산기법을 적용한 영상복원 결과를 비교한 것이다. 이는 상대적으로 짧은 합성개구면을 이용한 관측 조건에서도 분할연산기법이 효율적으로 적용됨을 보이기 위한 것으로 그림 5의 (a), (c), (e)는 기존 back-

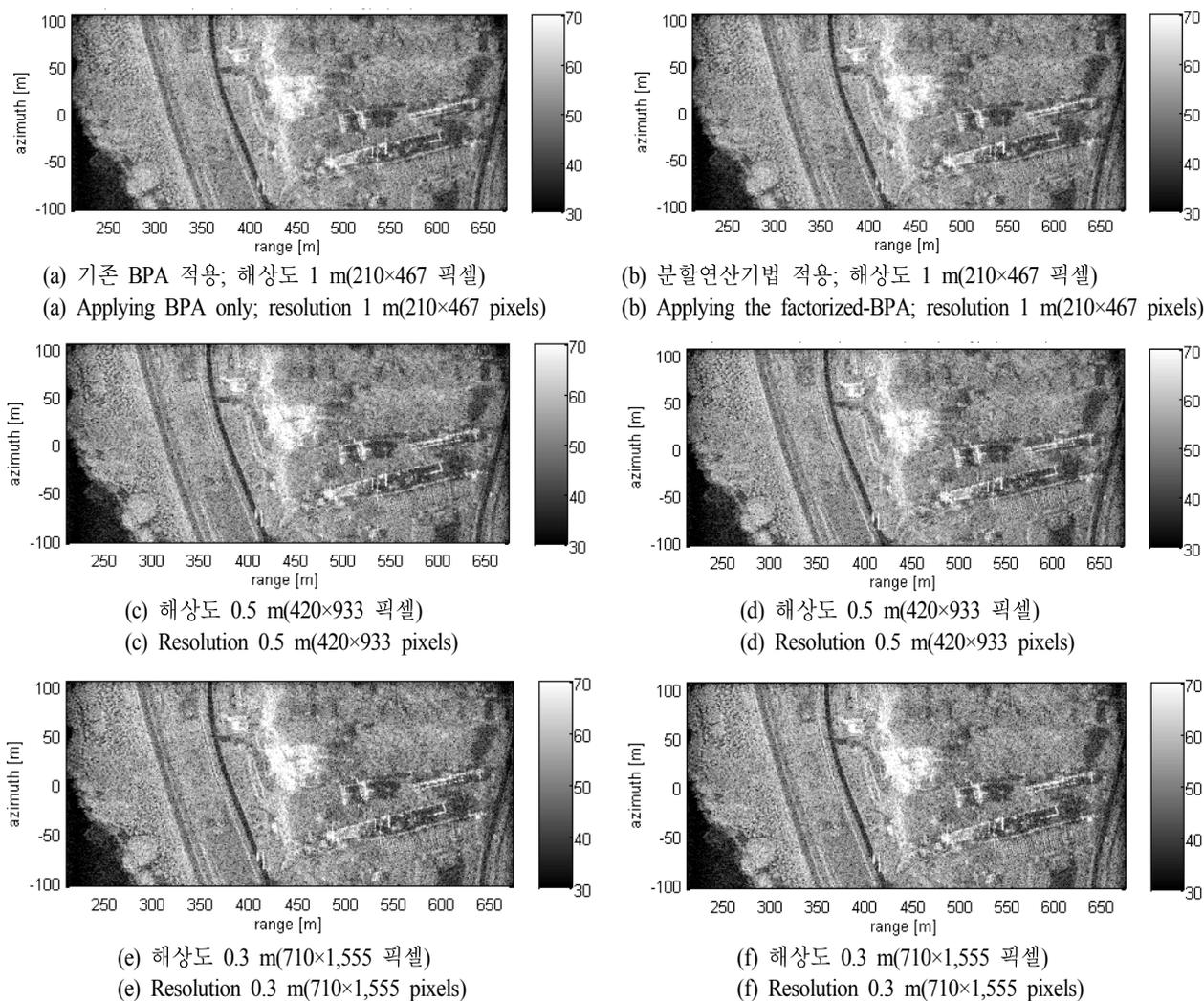


그림 5. 분할연산기법을 이용한 SAR 영상복원 결과비교; 원시자료 샘플개수 1,024×4,096개

Fig. 5. Comparative results of SAR images applied the proposed factorizing-technique; raw data 1,024×4,096 samples.

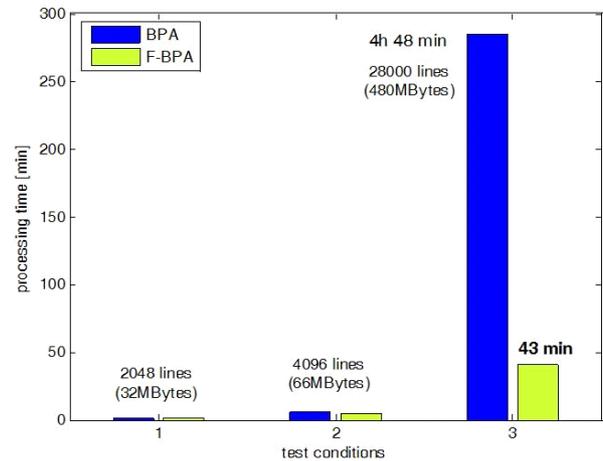
projection 알고리즘을 이용해 복원한 영상이며, 그림 5의 (b), (d), (f)는 간소화된 분할연산기법을 적용한 결과이다.

#### 4-2 SAR 영상복원 결과 비교분석

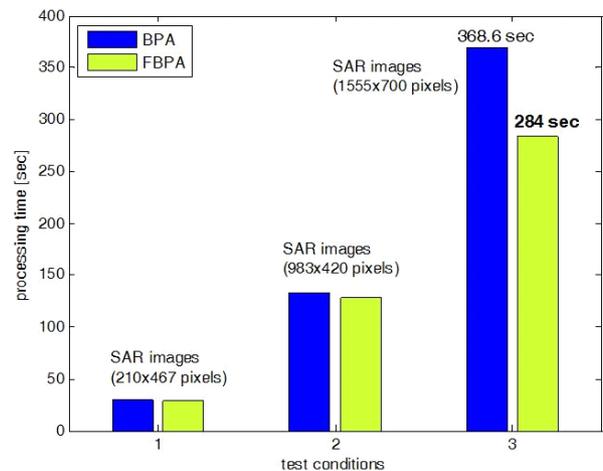
분할연산기법을 적용해 복원된 SAR 영상의 비교분석을 위하여 앞선 그림 4의 예시에서 사용된 원시자료를 포함해 방위방향 샘플개수를 각 2,048/4,096/28,000개(합성개구면 길이 100/200/1,500 m)로 구분한 3종 9개의 원시자료 샘플을 이용해 각각의 처리속도를 비교분석하였다. 또한, 상대적으로 짧은 합성개구면 길이 200 m를 갖는 원시자료(샘플개수 1,024×4,096개)를 이용해 다양한 해상도(1 m/0.5 m/0.3 m)로 복원된 영상처리 결과를 비교분석하였다.

그림 6은 분할연산기법을 적용한 back-projection 알고리즘의 영상처리속도를 분석한 것으로 영상복원을 위한 분할연산기법의 계산효율을 두 가지 측면에서 비교한 것이다. 그림 6(a)는 복원영상의 동일한 해상도 조건을 기준으로 입력 원시자료의 합성개구면 길이와 자료용량 크기 변화를 비교한 것이며, 그림 6(b)는 상대적으로 짧은 합성개구면 조건에서 획득된 동일 자료의 SAR 영상복원을 위해 서로 다른 해상도를 적용시켜 픽셀 수 증가에 따른 연산량 변화를 분할연산기법의 처리속도 측면에서 비교/분석한 결과이다.

상대적으로 긴 합성개구면을 갖는 원시자료를 이용한 SAR 영상 복원 시 계산중요도를 고려한 분할연산기법의 임계치 설정과 그에 따른 연산량 감소는 처리속도 개선에 직접적인 영향을 미치며, 합성개구면이 길어질수록 다시 말해 입력 원시자료의 방위방향 자료길이가 커질수록 분할연산기법의 연산효율이 증가함을 알 수 있다. 이와 더불어 특정조건에 동일한 원시자료를 각기 다른 해상도를 갖도록 복원된 결과는 복원과정에서 픽셀 수가 증가하여 연산량이 증가될수록 분할연산기법의 효과가 두드러지게 된다. 그 이유는 최적의 연산효율을 위해 설정된 특정 픽셀 수를 기준으로 한 분할영역 크기 설정값이 상대적으로 많은 수의 픽셀로 구성된 영상복원과정에서 그 효과가 더욱 크게 나타나기 때문이다. 다시 말해, 상대적으로 적은 수의 픽셀로 구성된 SAR 영상의 경우 영상분할이 적게 이루어지고, 그만큼 분할연산기법의 기대효과가 점차 줄어들어 분할연산기법 적용 전 back-projection 알고리즘의 처리속도에 수렴되는 결과를 나타낸다.



(a) 다양한 크기의 원시자료  
(a) Various size of raw data



(b) 다양한 해상도 SAR 영상  
(b) Various resolutions of SAR images

그림 6. SAR 영상복원을 위한 처리속도 비교  
Fig. 6. Comparative results of SAR processing time.

#### V. 결 론

본 논문에서 제안한 간소화된 분할연산기법은 기존 back-projection 알고리즘을 기반으로 한 SAR 영상 복원과정의 계산효율을 개선하고, 보다 직관적이고 단순화된 분할기법을 제시하여 분할연산기법의 복잡도를 낮췄다. 앞서 설명한 간소화된 분할연산기법의 특징은 상대적으로 긴 합성개구면과 좁은 주사폭을 갖는 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템에 적합하며, 항공기 요동보상과 다양한 신호

처리 기법 연구를 위한 비교자료 획득을 위한 영상복원에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 기대된다.

### References

[1] A. Meta, L. P. Ligthart, "Signal processing for FMCW SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3519-3532, Nov. 2007.

[2] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Generalized frequency scaling and backprojection for LFM-CW SAR processing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 53, no. 7, pp. 3600-3614, Jul. 2015.

[3] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 2990-2998, Oct. 2008.

[4] A. Ribalta, "Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 2990-2998, May 2011.

[5] 선선구, 조병래, 박규철, 남상호, "무인 차량 탑재형 전방 관측 영상 레이다 가능성 연구", *한국전자과학회논문지*, 21(11), pp. 1285-1294, 2010년 11월.

[6] 황지환, 정정교, 김덕진, 김진우, 신희섭, 옥재우, "항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 보정", *한국전자과학회논문지*, 28(5), pp. 410-418, 2017년 5월.

[7] L. M. H. Ulander, H. Hestén, and G. Stenstrom, "Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 3, pp. 760-776, Jul. 2003.

[8] 선선구, 조병래, 이정수, 박규철, 하중수, 한승훈, "근거리 bistatic 전방 관측 레이다의 시간 영역 영상화 기법", *한국전자과학회논문지*, 22(11), pp. 1054-1062, 2011년 11월.

[9] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Inc., New York, 2008.

[10] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 47-135, 1999.

[11] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, Boston/London, pp. 40-112, 2005.

### 황 지 환



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)

2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)

2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원

2009년 3월~2013년 2월: 홍익대학교 전

장정보통신공학과 (공학박사)

2015년 1월~현재: 서울대학교 기초과학연구원 연수연구원

[주 관심분야] 레이다, 전파산란, 마이크로파 원격탐사

### 김 덕 진



1999년 2월: 서울대학교 지구시스템학과 (이학사)

2001년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)

2005년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)

2001년 9월~2002년 3월: 미국 NASA/JPL (제트추진연구소) & 캐나다 University of Manitoba 방문 연구원

2005년 3월~2005년 10월: 서울대학교 기초과학연구원 박사후 연구원

2005년 10월~2006년 1월: 캐나다 University of Manitoba 박사후 연구원

2006년 2월~2007년 6월: 미국 University of Michigan 박사후 연구원

2007년 7월~2008년 8월: 한국항공우주연구원 선임연구원

2014년 8월~2015년 7월 NASA/JPL(제트추진연구소) 방문연구원

2008년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 부교수

[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, 항공기 SAR, SAR 영상 활용

김진우



2004년 2월: 인하대학교 자연과학부 (이학사)  
2008년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)  
2014년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)  
2014년 4월~2014년 8월: UNIST 도시환경공학부 박사후연구원

2014년 9월~현재: LIG Nex1 우주영상연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, SAR 체계공학, SAR신호처리

신희섭



2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
2009년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2009년 1월~현재: LIG Nex1 우주영상연구소 수석연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리

옥재우



2009년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2011년 2월: Postech 전자전기공학과(공학석사)  
2011년 2월~현재: LIG Nex1 우주영상연구소 선임연구원  
[주 관심분야] SAR Processing, 마이크로파 원격탐사

파 원격탐사

유응노



2001년 2월: 한양대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2003년 2월: 한양대학교 전자전기공학부 (공학석사)  
2003년 2월~현재: LIG Nex1 우주영상연구소 수석연구원  
[주 관심분야] SAR 체계설계/검증