

# 광역 MIMO SAR 영상 획득을 위한 다중 잡음 OFDM 파형 활용 연구

## Multiple Noise OFDM Waveforms for Wide Swath MIMO SAR

문민정 · 송경민 · 이우경 · 유상범\* · 이현철\* · 이상규\*

Minjung Moon · Kyungmin Song · Wookyung Lee · Sang-Burm Ryu\* · Hyeon-Cheol Lee\* · Sang-Gyu Lee\*

### 요 약

최근 위성 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템의 개발은 광역 관측을 수행하는 동시에, 고해상도 영상을 확보하는 방향으로 확장되고 있다. 일반적인 위성 SAR 시스템에서는 광역의 고해상도 영상을 획득하는 과정에서 방위 및 거리 방향의 모호성 문제가 유발되어 영상 품질의 저하가 발생한다. 다중 입출력 장치를 사용하는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) SAR 기술은 상호 상관성이 낮은 파형군을 적용하여 관측폭을 확장하면서도 영상 품질을 유지하는 기법으로 제안되고 있다. 본 논문에서는 상호 직교 특성을 갖는 다중 잡음 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) 파형을 설계하고, 다중 파형 모드에서의 영상 품질 분석을 수행하여 광역 고해상도 SAR 모드에 적용 가능성을 제시한다.

### Abstract

Future spaceborne satellite synthetic aperture radar(SAR) system is expected to acquire high-resolution images over wide swath areas. Conventional SAR systems suffer from ambiguity problems in both azimuth and range directions that lead to image quality degradation. Recently, multiple input multiple output(MIMO) SAR techniques having multiple orthogonal waveforms are proposed to overcome the conventional ambiguity problems in wide-swath imaging modes. In this paper, noisy orthogonal frequency division multiplex(OFDM) waveforms are developed to reduce the ambiguity problems and suppress the image quality degradation. SAR simulations are performed to evaluate the performance of the proposed technique for wide-swath SAR imaging.

Key words: HRWS SAR, MIMO, OFDM, Ambiguity

### I. 서 론

일반적인 SAR 위성은 다수의 펄스를 주기적으로 송수신하는 방식으로 운용되어 관측폭을 확장하는데 제약이 있다. 일반적으로 광역 관측을 위해 관측폭을 증가시키면, 영상의 해상도가 저하된다. 영상의 해상도와 관측폭 성능을 동시에 만족하는 것은 이론적인 한계가 있으며

이로 인해 SAR 영상 활용에 제약이 발생한다. 그러나 저비용 고효율을 추구하는 최근 우주 개발의 동향에 따라 향후 위성 SAR 시스템의 개발은 넓은 지역에 대한 광역 관측을 수행하면서, 고해상도 영상을 확보하는 것을 요구하고 있다<sup>[1]~[6]</sup>.

광역 고해상도 SAR 영상을 획득하기 위한 기술로 수동형 안테나와 정밀 피드혼 안테나 등을 사용한 빔 조향

「본 연구는 2018년도 한국항공우주연구원의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임.」

한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

\*한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received March 30, 2018 ; Revised April 26, 2018 ; Accepted May 14, 2018. (ID No. 20180330-043)

· Corresponding Author: Wookyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

기술<sup>[7]</sup>, 디지털 빔 형성(Digital Beamforming: DBF) 기술<sup>[8]</sup>, 다중 안테나를 사용하는 MIMO SAR 기술을 적용한 운용 모드들이 제안되고 있다<sup>[9]</sup>. 최근에는 확대된 관측폭을 갖는 광역 SAR 운용 모드에서의 모호성 문제 해결을 위해 가변 샘플링 주파수를 적용하는 기법도 연구되고 있다<sup>[4]</sup>.

광역의 고해상도 영상을 획득하기 위해서는 방위 방향의 도플러 대역폭을 확장해야 하며, 이에 따라 증가하는 방위 방향의 모호성을 억제하기 위해 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency: PRF)를 높게 설정해야 한다. 반면에 넓은 관측폭을 확보하기 위해서는 거리 방향의 모호성을 억제하기 위해 낮은 PRF 설정이 요구된다. 이처럼 광역의 고해상도 SAR 영상 획득을 위해서는 서로 상충하는 모호성 억제 요건을 동시에 만족시켜야 하는 문제가 발생한다<sup>[6]</sup>.

단일 안테나를 통하여 송수신하는 SISO(Single Input Single Output) SAR 시스템은 안테나 크기의 물리적 한계로 인해, 주사폭의 확장과 방위 방향의 해상도 향상에 제한이 있다.

다중 안테나를 사용하는 MIMO SAR 시스템은 서로 다른 안테나의 배열 및 송수신단으로 구성된다. 각 안테나를 통해 독립적으로 수신한 부관측영역(sub-swath)의 신호를 합성하여 확장된 관측폭을 확보하게 된다. 그림 1은 광역 고해상도(High Resolution Wide-Swath: HRWS) 영상 획득을 위한 다중 빔 MIMO SAR의 기하 구조를 나타낸다.

MIMO SAR 기술을 기반으로 광역 고해상도 영상을 획득하기 위해서는 효율적인 파형 운용 방안이 고려되어야 한다. MIMO SAR에 적합한 파형군은 거리 방향으로 낮은 모호성을 갖고 있어야 하며, 다중 파형 간의 상호 간섭이 낮으면서도 부엽 간섭 특성인 최대 부엽 레벨(Peak Side-Lobe Ratio: PSLR)과 누적 부엽 레벨(Integrated Side-Lobe Ratio: ISLR) 특성이 좋아야 한다<sup>[10]</sup>. 다중 파형 기반 SAR 시스템에서는 각 송신 신호 파형의 모호성이 최소화되어야 하며, 이를 위해 자기 상관 함수는 임펄스 함수의 형태를 보이고, 상호 상관도는 낮아야 한다.

하드웨어에 기반한 광역 고해상도 SAR 관측 시스템은 증가하는 복잡도와 고비용의 단점을 갖는다. 반면, 다중 파형을 적용하면 송수신단에서 소프트웨어적인 신호 처리를 활용하게 되므로 시스템 구현이 용이하고 효율적이다.

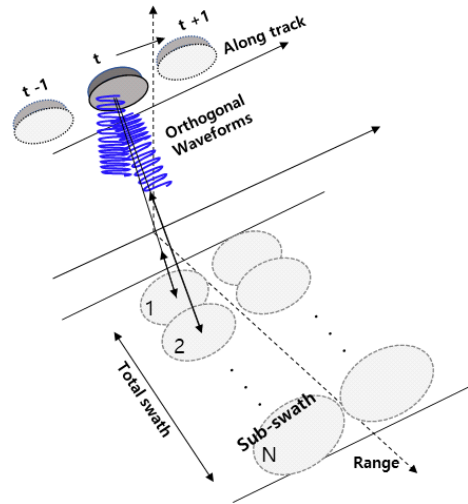


그림 1. 광역 고해상도를 위한 다중 빔 MIMO SAR 기하 구조  
Fig. 1. Geometry of multi-beam HRWS MIMO SAR.

다중 파형 기법인 OFDM 기법은 다중 수신 신호의 불규칙한 감쇄에 강인하며, 공간 다이버시티의 감쇠없이 모호성을 억제하는데 유리하여 최근 MIMO SAR 연구에 활용되고 있다<sup>[11][12]</sup>. 그러나 한정된 대역폭에서 주파수 변조 변환에만 의존하는 기존 OFDM 기법은 적용 가능한 파형군의 개수가 제한적이며, 파형 간의 상호 간섭이 충분히 억제되는 않는다는 단점이 있다. 따라서 고품질의 광역 관측 영상에 적용하기 위해서는 추가적인 성능 개선이 요구된다.

본 논문에서는 기존 OFDM 파형의 한계를 극복하기 위해 잡음 주파수 변조 파형을 제안하고 광역 관측 SAR 시스템에 적용 가능성을 분석한다. 본문 II에서는 랜덤 행렬의 주파수 변조와 잡음 위상 신호를 도입한 잡음 OFDM 파형 설계를 제시하며, III에서는 설계한 파형의 상호 간섭 성능을 분석하고, SAR 모의 실험을 통해 점표적 영상의 품질을 측정하였다.

## II. OFDM 및 잡음 OFDM 파형

### 2-1 MIMO SAR 시스템을 위한 OFDM

Wang<sup>[10]</sup>은 MIMO SAR 시스템의 OFDM 파형 설계를 위해 주파수 변조 구간을 랜덤 변조 행렬로 배치하였다. 도플러 내성이 좋고 높은 해상도를 획득할 수 있는 선형 주

파수 변조(Linear Frequency Modulation: LFM) 신호를 다중 구간으로 분할하고, 이를 재배치하는 방식으로 다중 파형을 생성한다. 기저 LFM 신호는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi\left(f_s t + \frac{1}{2}k_r t^2\right)\right\} \quad (1)$$

$\text{rect}[\cdot]$ 는 윈도우 함수,  $f_s$ 는 시작 주파수,  $k_r$ 은 주파수 변조율(chirp rate),  $T_p$ 는 전체 펄스폭을 표현한다. 다중 OFDM 파형은 시간과 주파수 영역에서 기저 LFM 신호를  $N \times M$  구간으로 분할한 후, 이를 주어진 랜덤 행렬을 기반으로 재배열하여 얻어진다. 랜덤 행렬은 서로 다른 파형 간의 간섭이 최소가 되도록 설계되어야 한다.  $N$ 개의 대역폭과  $M$ 개의 펄스폭을 갖는 OFDM 칩 신호 파형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} u(t - mT_b) \exp\{j2\pi f_{n,m}(t - mT_b)\} \times \exp\{j2\pi k_{r,n,m}(t - mT_b)^2\} \quad (2)$$

식 (2)에서  $f_{n,m}$ ,  $k_{r,n,m}$ 은 각각  $n$ 행,  $m$ 열에서의 주파수 초기값과 변조율이며,  $T_b$ 는 서브 칩 신호의 펄스폭으로써 전체  $T_p/M$ 과 같다.  $n$ 행,  $m$ 열에 대응하는 OFDM의 서브 칩 신호 파형  $\phi(n,m)$ 군의 배열은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi(0,0) & \phi(0,1) & \dots & \phi(0, M-1) \\ \phi(1,0) & \phi(1,1) & \dots & \phi(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi(N-1,1) & \phi(N-1,1) & \dots & \phi(N-1, M-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\phi(n,m)$ 은  $n$ 번째 시간 구간과  $m$ 번째 주파수 구간의 파형을 정의한다.  $k_{r,n,m}$ 은  $\phi(n,m)$ 의 주파수 변조율로서 각 구간에서 독립적으로 정의된다.

최종 OFDM 파형은  $\phi(n,m)$ 으로 구성된  $\Phi$ 에서 임의의 구간만을 선택적으로 추출하고 조합하여 얻어진다. 이를 위해 행렬  $R$ 을 임의로 설계하여 행렬곱을 취한다. 이 과정은 식 (4)와 같이  $R$ 과  $\Phi$ 의 Hadamard 곱( $\odot$ )으로 표

현될 수 있다. 랜덤 행렬  $R$ 은  $N \times M$ 의 크기를 가지며, 0과 1로 구성된다.

$$X = R \odot \Phi \quad (4)$$

### 2-2 랜덤 위상 기반 잡음 OFDM

RPCR(Random Phase and Code Rate Transition) 파형은 LFM 기반의 잡음 파형 신호이다<sup>[13]</sup>. RPCR는 부호율 천이가 적용된 랜덤 위상 성분을 포함하고 있으며, 이를 통해 다중 파형 간의 높은 직교성을 확보하면서도 도플러 내성이 우수한 특징을 갖는다.

본 논문에서는 OFDM 파형에 부호율 천이가 적용된 랜덤 위상을 추가하여 잡음 OFDM 파형을 생성하였다. 이는 랜덤 위상 성분을 적용함으로써 다중 파형의 생성 자유도를 높이고, 부호율 천이 구간 변경에 따른 평균 부호율 감소 효과로 도플러 특성을 개선하는 것을 목적으로 한다<sup>[13]</sup>. 본 논문에서 제안하는 잡음 파형은 OFDM 파형에 다음과 같이 임의로 정의된 랜덤 위상 신호  $g[n]$ 를 곱하여 얻어진다.

$$g[n] = \exp(j\theta_n) \quad (5)$$

$\theta_n$ 은 임의의 값을 가질 수 있으나, 위상 천이가 발생하는 샘플링 주파수는 가변적이다. 균일한 위상값을 갖는 위상 천이 구간에서의 신호는 다음과 같이 길이  $\gamma_m$ 의 군집으로 표현된다.

$$g_R[n, n + \gamma_m - 1] = \begin{bmatrix} g_R[n] \\ g_R[n+1] \\ \vdots \\ g_R[n + \gamma_m - 2] \\ g_R[n + \gamma_m - 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\theta_n) \\ \exp(j\theta_{n+1}) \\ \vdots \\ \exp(j\theta_{n+\gamma_m-2}) \\ \exp(j\theta_{n+\gamma_m-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\theta_m) \\ \exp(j\theta_m) \\ \vdots \\ \exp(j\theta_m) \\ \exp(j\theta_m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$g[n]$ 은 잡음 OFDM 신호 생성에 사용되는 랜덤 위상의 stochastic 신호이다. 랜덤 위상 천이가 발생하는 최대 구간은 다음 식 (7)에서 ( $\gamma, \kappa$ )로 지정될 수 있으며, 이에 따라 다양한 랜덤 성향을 갖는 다중 파형을 생성하게 된다.

$$\theta_m \sim U(0, 2\pi) \in [0, 2\pi\kappa], \gamma_m \sim U(0, \gamma) \quad (7)$$

잡음 OFDM 파형  $X_{noise}$ 는 식 (4)로 정의된 파형에 잡음 위상 변조 함수  $g[n]$ 의 위상 정보를 입력하여 얻어지

며, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$X_{noise} = X \circ g \quad (8)$$

잡음 OFDM 신호의 stochastic 신호는 일정 샘플 간격에 동일한 위상 성분을 할당함으로써 신호의 랜덤 변화 특성을 제어할 수 있다.

그림 2는 복수로 생성된  $N$ 개의 잡음 OFDM 파형  $S_{n\_ofdm}$ 을 MIMO 송수신기에 적용하는 시스템 블록도를 나타낸다.  $N$ 개로 분할된 SAR 관측 영역에 서로 다른 잡음 OFDM 파형이 적용되며, 수신 신호는 각 대응되는 정합 필터를 통과하여 처리된다. 총 관측폭은 획득 가능한 sub-swath 수에 비례하며, 이는 각  $S_{n\_ofdm}$  파형 간의 상호 간섭 품질에 의해 결정된다.

### 2.3 OFDM 및 잡음 OFDM 파형 시뮬레이션

본 논문에서는 기존 논문 사례<sup>[10]</sup>에서 비교적 우수한 사례라고 알려진 파형 중 일부를 기반으로 하여 3개의 잡음 OFDM 파형을 생성하였다.

원래의 OFDM 파형은 편의상 각각  $S_{ofdm1}$ ,  $S_{ofdm2}$ ,  $S_{ofdm3}$ 로 표현한다. 각 파형은 400 MHz의 대역폭과  $8\mu s$  펄스폭을 갖는 LFM을 기본 신호로 생성되며, 이를 8개의 종속 파형으로 나눈 후 임의로 재배치한다. 잡음 OFDM

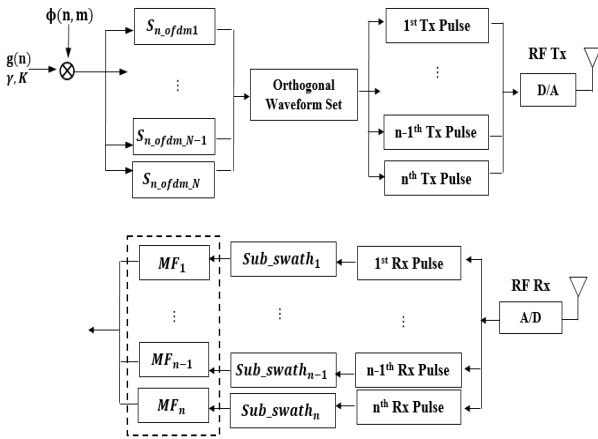


그림 2. 다중 잡음 OFDM 파형에 기반한 MIMO SAR 시스템

Fig. 2. MIMO SAR system block diagram based on multiple noise OFDM waveforms.

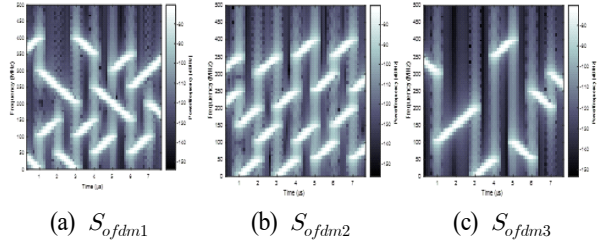


그림 3. LFM 기반으로 생성된 다중 OFDM 파형군  
Fig. 3. LFM based OFDM waveforms.

파형은 원래의 파형에 stochastic 정보를 식 (8)에 적용하여 얻을 수 있으며, 생성된 파형은 각각  $S_{n\_ofdm1}$ ,  $S_{n\_ofdm2}$ ,  $S_{n\_ofdm3}$ 로 표현한다. 본 논문에서는 잡음 지수 ( $\gamma$ ,  $\kappa$ )를 (10, 1)로 설정하였다.

$S_{ofdm1}$ ,  $S_{ofdm2}$ ,  $S_{ofdm3}$ 는 서로 다른  $8 \times 8$ 의 랜덤 행렬을 통하여 생성된 파형으로 각각의 시간-주파수 특성 (Short-Time Fourier Transform: STFT)은 그림 3과 같다.

$S_{ofdm1}$ 의 파형을 생성하기 위해 사용된  $8 \times 8$  랜덤 행렬  $R$ 은 식 (9)와 같다.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$S_{ofdm2}$ 와  $S_{ofdm3}$ 에도 각각 그림 3에 대응되는  $R$  행렬이 적용되어 얻어진다.

잡음 OFDM 파형인  $S_{n\_ofdm1}$ ,  $S_{n\_ofdm2}$ ,  $S_{n\_ofdm3}$ 는 동일한  $R$  행렬을 따르므로 시간-주파수 영역에서는 그림 3과 유사한 결과를 얻게 된다. 두 신호 파형군 간의 차이를 분석하기 위해 주파수 스펙트럼 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4에 도시하였다.

그림 4의 상단 그림은  $S_{ofdm1}$ 의 스펙트럼을 보여주는 데 펄스 에너지가 400 MHz 대역폭에 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 그림 4의 하단 그림은  $S_{n\_ofdm1}$ 의 스펙트럼을 나타낸다. 잡음 성분에 의해 스펙트럼 분포의 균일도가 변화했으나, 전체 대역폭은 일정하게 유지되고 있다.

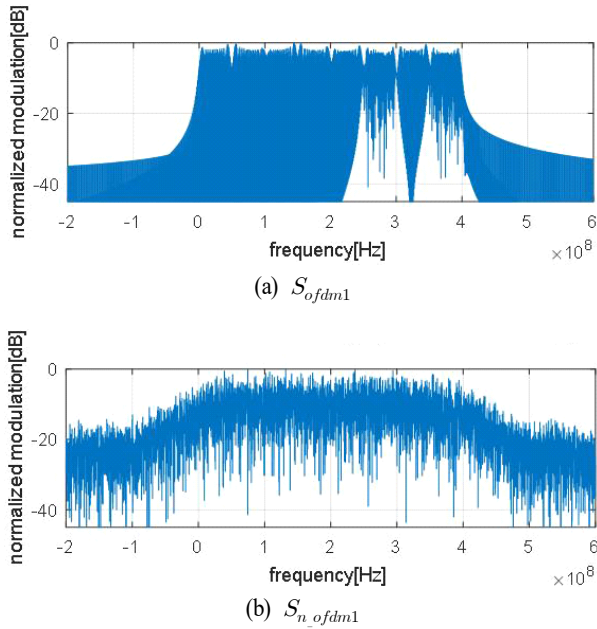


그림 4.  $S_{ofdm1}$  과  $S_{n_ofdm1}$  의 주파수 특성 비교  
 Fig 4. Frequency responses of  $S_{ofdm1}$  and  $S_{n_ofdm1}$ .

일반적인 LFM 기반의 OFDM 신호들은 상호 간섭도가 높아 생성 가능한 파형군의 개수가 제한된다. 반면, 랜덤 부호율 천이를 이용한 잡음 OFDM 신호는 랜덤 위상 천이의 범위를 적절히 변경함으로써 상호 간섭도가 낮은 다양한 파형군을 생성할 수 있는 장점이 있다.

### III. 영상 모의 실험 및 성능 분석

#### 3-1 신호 품질 분석

레이다 신호의 품질은 공간 해상도와 도플러 편이 특성으로 분석할 수 있으며, 이는 자기 모호성 함수(self ambiguity)로 표현된다. 그림 5는  $S_{ofdm1}$  과  $S_{n_ofdm1}$  에 대한 자기 모호성 함수를 각각 보인다. 잡음 OFDM 파형인  $S_{n_ofdm1}$  신호에서 임펄스 응답 함수에 가까운 형태로 보여짐을 알 수 있다. 또한 LFM의 장점인 도플러 변이에 대한 내구성은 잘 유지되면서 공간 해상도 특성이 일반적인 OFDM 파형에 비해 상대적으로 우수하게 나타난다. 이러한 특성은 신호 변이에 따른 민감도를 증가시켜 서로 다른 파형 간의 간섭도를 낮추게 될 것으로 기대된다.

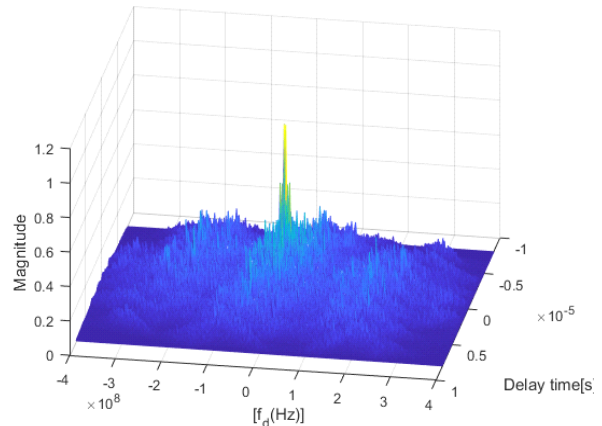
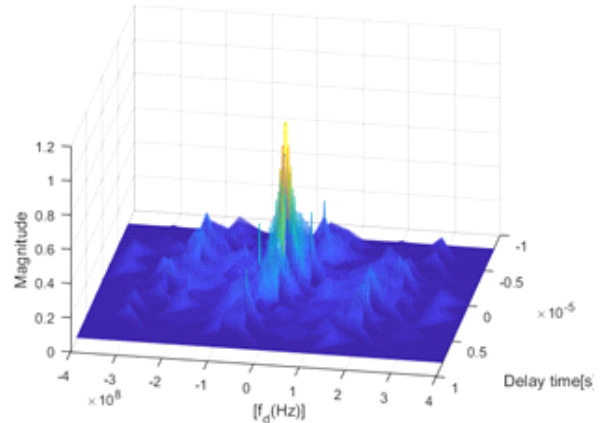


그림 5.  $S_{ofdm1}$  과  $S_{n_ofdm1}$  의 자기 상관 함수 비교  
 Fig. 5. Ambiguity functions of  $S_{ofdm1}$  and  $S_{n_ofdm1}$ .

#### 3-2 다중 파형의 상호 간섭 분석

MIMO SAR 영상 품질은 다중 파형 간의 상호 상관도에 크게 영향을 받는다. 특히 광역의 고해상도 영상을 획득하기 위해서는 서로 다른 영역에서 수신되는 반사파간에 충분한 저간섭성이 유지되어야 한다. 서로 다른 거리 영역에서 수신되는 반사파가 시간차를 두고 겹치는 경우, 거리 모호성에 따른 영상의 품질 저하가 발생하는 데, 이를 억제하기 위해서는 다중 파형 간의 상호 상관도가 매우 낮아야 한다.

본 논문에서는 파형의 직교특성을 분석하기 위한 지표로 신호 파형의 자기상관 함수(Auto-Correlation Function: ACF)와 상호상관 함수(Cross-Correlation Function: CCF)를 사용하였다. 직교 파형군 생성을 위한 성능 기준으로는 상호상관 함수의 최대 레벨(Cross-correlation Peak: CP)이 자기상관 함수의 최대 부엽 레벨(Auto-correlation Sidelobe Peak: ASP)보다 낮아야 하는 조건을 적용하였다.

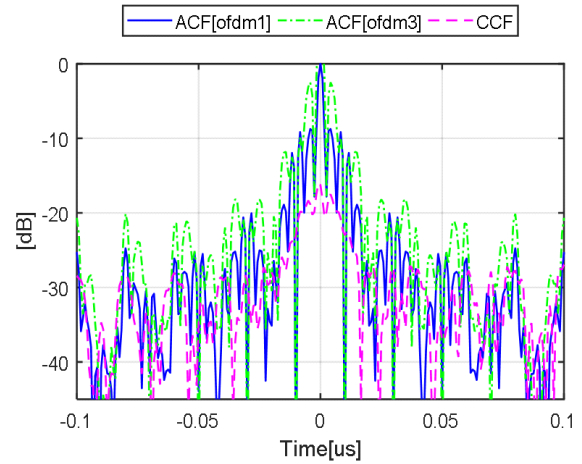
그림 6(a)는 일반적인 OFDM에 속하는  $S_{ofdm1}$  과  $S_{ofdm3}$  의 상호 간섭도를 보여준다. 각 파형의 시간 해상도는 LFM에 비해 저하된 것을 확인할 수 있다. 두 파형 간의 상호상관함수의 최대값 CP는  $-11.73$  dB로 얻어진다. 그림 7(b)는 동일한 과정을 잡음 OFDM에 속하는  $S_{n\_ofdm1}$  과  $S_{n\_ofdm2}$  에 수행한 결과를 보여주는데, 두 파형간의 상호상관함수 CP가  $-22.27$  dB로 크게 개선됨을 확인할 수 있다. 또한 공간 해상도 특성이 일반 OFDM에 비해 크게 개선되었다.

표 1은 본 논문에서 사용한 OFDM 파형군에서의 상호 간섭도를 계산하여 정리한 결과를 보인다.  $S_{ofdm1}$  과  $S_{ofdm2}$  의 상호 관계를 볼 때 ASP보다 CP의 값이 충분히 억제되지 않아 두 함수의 직교성이 낮다고 할 수 있다. 다른 경우에도 ASP와 CP의 분리가 충분하지 않아서 다중 파형으로의 활용도가 떨어질 것으로 예상된다. 표 2는 잡음 OFDM 파형군에 대해 동일한 모의 실험을 수행한 결과를 보인다. 서로 다른 파형 간의 상호 상관 함수값 CP가 ASP에 비해 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.  $S_{n\_ofdm1}$  과  $S_{n\_ofdm2}$  파형 간의 CP 값은  $-28.78$  dB로 계산되었다. 다른  $S_{n\_ofdm3}$  와의 CP가 최대 부엽 레벨인 ASP에 비해 충분히 낮아 우수한 직교성이 확보된다고 할 수 있다.

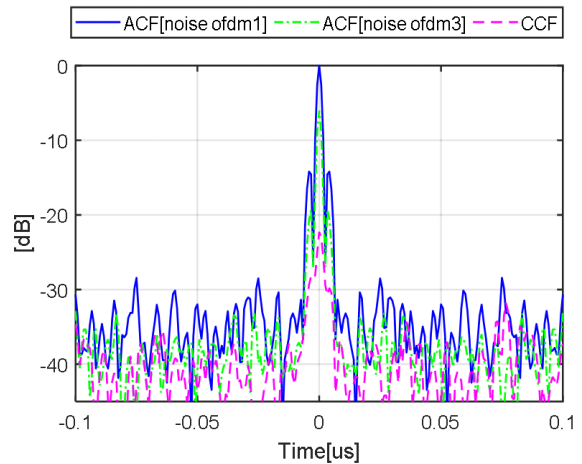
### 3.3 점표적 영상 분석

다중 잡음 OFDM 기반으로 구현된 MIMO SAR 영상의 품질 평가를 위해 광역 점표적 영상과 거리 방향의 모호성 특성을 분석하였다.

점표적 영상은 원시 데이터를 송수신하여 거리 압축과 방위 압축의 과정을 통해 획득된다. OFDM 파형 기반의 원시 신호 데이터는 식 (10)을 통해 생성된다.  $A_0$ 는 표적의 반사파의 신호 강도이며,  $\eta$ 는 방위 방향 시간이다.  $w_r(\tau)$ 와  $w_a(\eta)$ 는 각각 거리 및 방위 방향으로의 안테나 패턴



(a)  $S_{ofdm1}$  과  $S_{ofdm3}$ 의 자기 및 상호 상관 함수  
(a) Self- and cross-correlation function of  $S_{ofdm1}$  and  $S_{ofdm3}$



(b)  $S_{n\_ofdm1}$  과  $S_{n\_ofdm3}$ 의 자기 및 상호 상관 함수  
(b) Self- and cross-correlation function of  $S_{n\_ofdm1}$  and  $S_{n\_ofdm3}$

그림 6. OFDM과 잡음 OFDM 파형의 자기 및 상호 상관 함수 성능 분석  
Fig. 6. Self- and cross-correlation functions of OFDM and noise OFDM waveforms.

표 1. OFDM 파형의 직교성 분석

Table 1. Orthogonality analysis of OFDM waveforms.

dB	$S_{ofdm1}$	$S_{ofdm2}$	$S_{ofdm3}$
$S_{ofdm1}$	-8.11	-7.88	-11.73
$S_{ofdm2}$	-7.88	-8.52	-11.45
$S_{ofdm3}$	-11.73	-11.45	-8.74

표 2. 잡음 OFDM 파형의 직교성 분석

Table 2. Orthogonality analysis of noise OFDM waveforms.

dB	$S_{n\_ofdm1}$	$S_{n\_ofdm2}$	$S_{n\_ofdm3}$
$S_{n\_ofdm1}$	-14.25	-28.78	-22.27
$S_{n\_ofdm2}$	-28.78	-18.03	-17.47
$S_{n\_ofdm3}$	-22.27	-17.47	-13.56

에 의한 진폭 변화율을 나타낸다. 표적의 위상은 SAR의 플랫폼과 표적 간의 상대적 위치 및 OFDM 파형의 위상 변화  $\phi_{ofdm}$  에 의해 결정되는 함수이다.

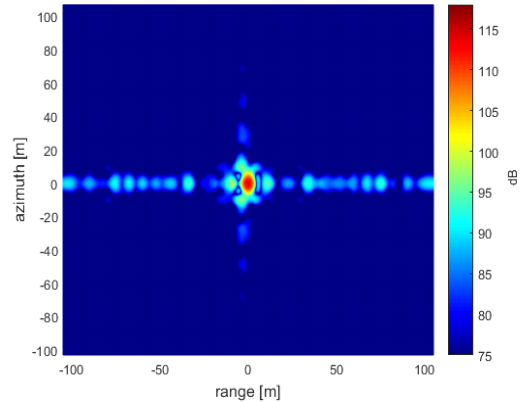
$$S_m(\tau, \eta) = A_0 w_r \left[ \tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_a [\eta - \eta_c] \times \exp \left( -j4\pi f_0 \frac{R(\eta)}{c} \right) \times \exp \left( j\pi k_r \left( \tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right)^2 + j\phi_{ofdm} \right) \quad (10)$$

원시 신호의 신호 대 잡음비를 최대화 하기 위해 정합 필터를 적용하여 신호의 압축을 수행한다. 그림 2에서와 같이  $N$ 개의 다중 파형을 사용할 경우 각 파형에 부합하는  $N$ 개의 독립된 정합필터가 필요하게 된다.  $k$  ( $k \leq N$ ) 번째 파형인  $S_k$ 가 수신되어 정합필터  $h_k$ 를 통과하여 얻어지는 출력  $Y_k$ 는 다음과 같다.  $Y_k$ 는 그림 1에서  $k$ 번째 sub-swath의 영상에 해당된다.

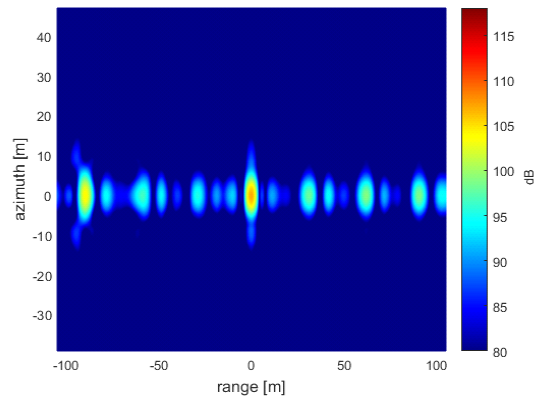
$$Y_k(t) = S_k(t) * h_k(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_k(u) h_k(t-u) du \quad (11)$$

본 논문에서는 그림 1에서  $N$ 이 3인 경우를 가정하여 SAR 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7(a)는  $S_{n\_ofdm1}$  파형으로 생성한 점표적 영상이다. 잡음 OFDM 신호는 랜덤 위상 천이로 발생된 대역폭 확산 효과에 의하여 거리 해상도가 개선될 수 있다. 반면, 랜덤 위상의 천이에 의해 부엽 간섭이 증가하므로 위상 변이값을 적절히 선택할 필요가 있다.

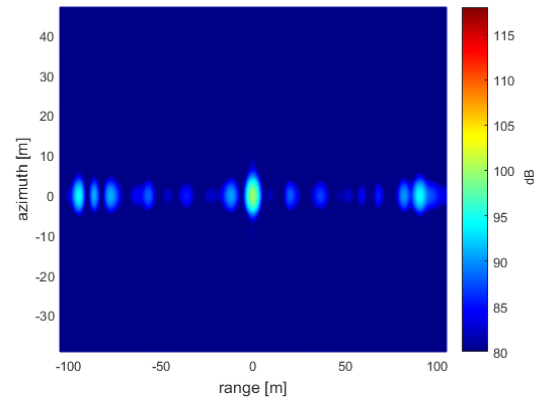
그림 7(b)와 그림 7(c)는 각각 기존 일반 OFDM과 잡음 OFDM 파형의 거리 모호성에 의해 생성되는 SAR 영상에서의 허위 표적을 보인다. 일반 OFDM 파형에 의해 생성되는 거리 모호성 표적은 원래의 표적에 비교될 정도로 높



(a) 잡음 OFDM의 2차원 점표적 영상  
(a) Noise OFDM 2D SAR point target



(b) OFDM SAR의 거리 모호성 특성  
(b) Range ambiguity in OFDM SAR



(c) 잡음 OFDM SAR의 거리 모호성 특성  
(c) Range ambiguity in noise OFDM SAR

그림 7. 잡음 OFDM 점표적 영상 및 거리 모호성 비교  
Fig. 7. Noise OFDM SAR point target image and range ambiguity performance.

은 반면, 잡음 OFDM 파형군에 의해 발생한 허위 표적 레벨은 상대적으로 크게 억제되어 있음을 확인할 수 있다.

이를 수치적으로 분석해 보면 그림 7(b)에서 일반 OFDM 파형의 점표적 영상 대비 모호성의 비율(Ambiguity to Signal Ratio: ASR)은  $-7$  dB로 계산된다. 이에 비해 잡음 OFDM 파형을 사용한 그림 7(c)의 ASR은  $-17$  dB의 값을 갖는다. 잡음 OFDM 파형을 사용하였을 때 거리 방향의 모호성에서  $-10$  dB 이상의 성능 개선 효과를 얻을 수 있었다. 잡음 OFDM은 파형 간의 직교 특성이 상대적으로 우수하며, 이에 따라 SAR 영상에서 모호성 감소 효과가 억제된 것으로 해석된다. 본 논문에서는 3개의 파형에 대해서만 분석하였으나, 파형군의 개수를 증가시키므로써 광역 관측폭을 추가적으로 증가시킬 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고해상도 광역 관측 SAR 구현을 위해 서로 낮은 상관도를 갖는 다중 파형 생성 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해 랜덤 위상 성분이 포함된 잡음 OFDM 파형을 생성하고, SAR 수신단에서의 성능을 분석하였다. 동일 대역을 공유하는 복수의 파형군에 대해 자기상관 함수와 상호상관 함수를 분석하였으며, 영상 품질에 영향을 미치는 모호성 분석을 위해 광역 관측 모드에서의 SAR 점표적 시뮬레이션을 수행하였다.

기존 단순 OFDM 파형만을 사용한 경우에 비교하여 랜덤 위상 천이를 적용한 잡음 OFDM 파형에서 우수한 거리 방향 모호성 억제 효과를 얻을 수 있었고, 이에 따라 광역 관측 모드에서의 SAR 영상 품질이 향상됨을 보였다.

본 논문에서 제시한 다중 파형군을 사용하여 MIMO SAR 광역 관측을 수행할 경우, 서로 다른 거리에 대응되는 다중 빔에서 도플러 특성 및 중심 주파수 변이가 발생하는 문제가 예상된다. 따라서 실제 SAR 시스템에 적용을 위해서는 서로 다른 관측 지점과의 거리 변화에 따른 도플러 변수 수정이 요구되며, 이는 후속 연구를 통해 수행될 예정이다.

#### References

[1] R. Zhou, J. Sun, Y. Hu, and Y. Qi, "Multichannel high

resolution wide swath SAR imaging for hypersonic air vehicle with curved trajectory," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 411, 2018.

[2] Y. Liu, R. Lu, D. Zhao, H. Chen, C. Fang, and J. Chen, "A novel Doppler centroid estimation method for multi-channel HRWS SAR," in *Applied Computational Electromagnetics Society Symposium(ACES), 2017 International, IEEE*, 2017.

[3] G. Krieger, F. Queiroz de Almeida, S. Huber, M. Villano, M. Younis, and A. Moreira, et al, "Advanced L-band SAR system concepts for high-resolution ultra-wide-swath SAR imaging," in *ESA Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments(ARSI)*, Noordwijk, Netherlands, 2017.

[4] W. Tan, W. Xu, P. Huang, Z. Huang, Y. Qi, and K. Han, "Investigation of azimuth multichannel reconstruction for moving targets in high resolution wide swath SAR," *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1270, 2017.

[5] N. Gebert, G. Krieger, and A. Moreira, "Digital beamforming for HRWS-SAR imaging: System design, performance and optimization strategies," in *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver, 2006, pp. 1836-1839.

[6] C. Wang, J. Xu, G. Liao, X. Xu, and Y. Zhang, "A range ambiguity resolution approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging using frequency diverse array," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 336-346, Mar. 2017.

[7] A. Currie, M. A. Brown, "Wide-swath SAR," in *IEE Proceedings F(Radar and Signal Processing), IET Digital Library*, Apr. 1992, vol. 139, no. 2, pp. 122-135.

[8] T. Yang, Y. Wang, and G. Chen, "Digital beamforming in elevation for spaceborne HRWS SAR based on sparse DOA estimation," *Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 448-457, 2017.

[9] D. Cerutti-Maori, I. Sikaneta, J. Klare, and C. H. Gierull, "MIMO SAR processing for multichannel high-resolution wide-swath radars," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 8, pp.



5034-5055, Aug. 2014.

[10] W. Q. Wang, "MIMO SAR OFDM chirp waveform diversity design with random matrix modulation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 3, pp. 1615-1625, Mar. 2015.

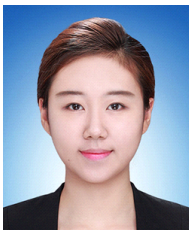
[11] J. Wang, L. Y. Chen, X. D. Liang, C. B. Ding, and K. Li, "Implementation of the OFDM chirp waveform on MIMO

SAR systems," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 9, pp. 5218-5228, Sep. 2015.

[12] W. Q. Wang, *Multi-Antenna Synthetic Aperture Radar*, CRC Press, 2013.

[13] 이기웅, 이우경, "도플러 특성 개선을 위한 랜덤 위상 및 부호율 천이 기반 저피탐 레이더 파형," 한국전자과학회논문지, 26(11), pp. 999-1011, 2015년 11월.

문 민 정



2016년 2월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)  
 2016년 3월~현재: 한국항공대학교 전자 및 항공전자정보공학과 석사과정  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격탐사, 위성전자 레이더 탑재체

유 상 범



1996년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2010년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학박사)  
 [주 관심분야] 지구관측위성, 마이크로파 원격탐사, 위성통신 시스템, 원격측정 명령계

송 경 민



2015년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)  
 2018년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자정보공학과 (공학석사)  
 [주 관심분야] 위성전자 레이더 탑재체, SAR 시스템 설계

이 현 철



1989년~1997년: 국방과학연구소 정찰용 무인기개발실  
 1997년~2001년: Texas A & M University 전기공학과 (공학박사)  
 2002년~2003년: Texas A & M University 전산학과 Post-Doctorate  
 2003년~현재: 한국항공우주연구원 책임연구원

[주 관심분야] 영상레이더 신호처리, 위성통신

이 우 경

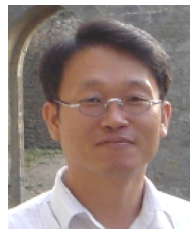


1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자공학과 (공학박사)  
 1999년 9월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수

2003년 1월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수  
 [주 관심분야] 위성전자 시스템, 위성 및 무인기 레이더 탑재체, SAR/ISAR 레이더 영상 신호처리, 탐지 레이더 시스템

이 상 규



1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 1995년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2011년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)  
 [주 관심분야] 영상코딩, 안테나 및 전자파전파, EESS 통신시스템, 위성통신