

# 회전하는 안테나를 가진 레이더를 이용하여 비행체 종말 유도 위한 직하 방향 레이더 영상형성

## Terminal Guidance for Aerial Vehicles through Nadir-Looking Image Formation Using an Imaging Radar with a Rotating Antenna

이 혁 중<sup>1</sup> · 송 성 찬<sup>\*2</sup> · 전 주 환<sup>3</sup>

Hyukjung Lee<sup>1</sup> · Sungchan Song<sup>\*2</sup> · Joohwan Chun<sup>3</sup>

### 요 약

LFM(Linear Frequency Modulated) 펄스 열의 믹서 출력 신호를 이용하면 높은 샘플링 주파수의 ADC 없이 높은 거리 해상도를 얻을 수 있으므로 합성개구레이더(synthetic aperture radar: SAR)에 사용되어 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있다. 하지만 펄스 폭이 길거나 비행체와 표적 간의 상대속도가 빠를 때는 stop-and-go 근사화에 따른 오차가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 근사화 없이 표적의 위치마다 다른 필터를 적용하는 기법인 시간 영역 상관관계(time domain correlation: TDC)를 사용한 직하 방향 영상형성을 제안한다. 특히, 영상에서 고스트 영상(ghost image)이 나타나는 것을 막기 위해 회전하는 안테나 구조를 제안하고, 모의실험 결과에서 회전하지 않는 안테나 구조를 사용했을 때 획득한 영상과 비교, 분석한다.

### Abstract

A linear frequency modulated pulse train waveform can be cost-effective in achieving high range resolution, and thus the synthetic aperture radar may be benefited by using the mixer output of the received signal. However, the image formation process from a mixer output is vulnerable to errors caused by stop-and-go approximation. In this paper, a nadir-looking imaging radar based on time domain correlation is proposed. Furthermore, to prevent the occurrence of ghosting effect in images, antenna placement on a rotating disk is proposed. Simulation results indicate that ghosting effect can be eliminated by employing the proposed antenna placement structure.

Key words: Radar Imaging, Time Domain Correlation, Rotating Antenna Structure

### I. 서 론

미사일의 종말 단계에서 정밀한 유도(guidance)를 위해

서는 진행 방향의 영상이 필요하다<sup>[1]</sup>. 예를 들어, 단거리 대전차 미사일인 Brimstone은 앞쪽 지면의 영상을 얻고<sup>[2]</sup>, 중거리 탄도미사일 Pershing II는 직하 방향 영상을 얻는

「본 연구는 한화시스템 산학협동과제로 수행되었음.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electrical Engineering, KAIST)

\*한화시스템(Hanwha Systems)

1: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0001-5669-3123>), 2: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0003-0965-2091>), 3: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-3506-1722>)

· Manuscript received February 11, 2019 ; Revised March 25, 2019 ; Accepted April 23, 2019. (ID No. 20190211-017)

· Corresponding Author: Hyukjung Lee (e-mail: woa@kaist.ac.kr)

다<sup>3)</sup>. 두 미사일에 쓰인 실개구 안테나 레이더의 단점은 안테나 크기가 작으면 해상도가 떨어진다는 점이다.

작은 안테나로 고해상도를 얻는 방법은 합성개구레이다(synthetic aperture radar: SAR)를 사용하는 것인데, 진행 방향의 영상을 얻기에는 효과적이지 않다. 진행 방향의 영상을 얻는 방법의 하나는 압축 센싱(compressive sensing)을 사용하는 것인데, 몇 개의 분리 되어있는 산란점(scattering points)을 구별하는 해상도는 뛰어나지만, 영상 영역에 산란점이 뭉쳐져 있는 상황에서는 산란점의 위치가 올바르게 표현되지 못한다<sup>4)</sup>.

여기서는 이들 단점을 극복하려는 시도으로써 진행 방향 영상을 얻기 위해 시간 영역 상관관계 기법<sup>5)</sup>을 적용하였다. 특히, 등속도로 비스듬히 떨어지는 상황을 가정했을 때 직하 방향 영상에서 고스트 현상이 나타나게 되는데 이를 막기 위한 새로운 안테나 배치 구조를 제안한다. 또한, 제안하는 영상의 응용으로서 대함 미사일의 종말 유도 상황을 고려하였다.

## II. 신호 모델링

그림 1은 비행체가 표적을 향하여 등속도로 비스듬히 떨어지는 개념도를 보인다. 또한, 평면지구(flat earth)를 가정하고, 기준 좌표계  $[X, Y, Z]$ 를 세운 후  $X-Y$  평면상의 관심 영역을  $X \times Y$ 개의 격자점(grid points)으로 나눈다.

본 논문에서는 그림 2와 같이 비행체 앞부분에 있는 탐색기의 송신안테나는 동체 축(body axis) 중앙에 고정되어 있고, 수신안테나는 송신안테나 주변을 일정한 각속도로 회전하는 새로운 안테나 배치 구조를 제안한다. 이때, 시간  $t$ 에 대해서 송신안테나, 수신안테나의 위치를 각각

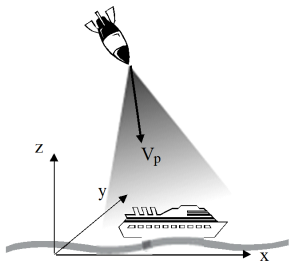


그림 1. 비행체가 표적을 향하여 날아가는 개념도  
Fig. 1. Geometry of areal vehicle flying towards a target.

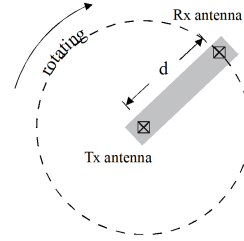


그림 2. 비행체 내부에 탑재된 송수신 안테나의 배치 구조  
Fig. 2. Antenna configuration in the aerial vehicle: an Rx antenna is rotating around a Tx antenna.

$[x_{Tx}(t), y_{Tx}(t), z_{Tx}(t)]$ ,  $[x_{Rx}(t), y_{Rx}(t), z_{Rx}(t)]$ 라고 하면, 송신안테나로부터  $(k, l)$  격자점을 거쳐 수신안테나까지의 왕복 거리는 다음과 같다.

$$R(t, k, l) = \sqrt{(x_{Tx}(t) - k)^2 + (y_{Tx}(t) - l)^2 + (z_{Tx}(t))^2} + \sqrt{(x_{Rx}(t) - k)^2 + (y_{Rx}(t) - l)^2 + (z_{Rx}(t))^2} \quad (1)$$

그림 3에서는 사용하는 레이더 신호 파형을 보였다. 동작 주파수(operating frequency)를  $f_c$ , 대역폭(bandwidth)을  $B$ , 펄스 폭을  $S$ , 펄스 반복 주기(pulse repetition interval: PRI)를  $T_p$ , 처프 비율(chirp rate)을  $K = \frac{B}{S}$ 를 나타낸다.

이때,  $1 \leq i \leq F$ 와  $1 \leq j \leq P$ 를 각각  $i$ 번째 빠른 시간(fast-time) 인덱스,  $j$ 번째 펄스(pulse) 인덱스를 나타낸다.  $F$ 는 샘플링을 시작하는 시점 및 펄스 폭에 의해서 결정되며,  $P$ 는 낙하하는 시간과 영상의 해상도를 고려하여 정해진다. 일반적으로  $P$ 가 클수록 해상도가 개선된다.  $t_{i,j}$ 에서 이산화한 격자점  $(k, l)$ 로부터의 믹서 출력은 다음과 같다.

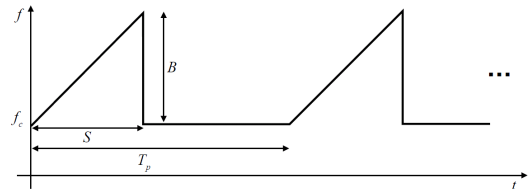


그림 3. 송신하는 선형 주파수 변조 펄스 열  
Fig. 3. Transmitting LFM pulse train.

$$h_{k,l}(t_{i,j}) = \exp[j(2\pi K\tau\tilde{t}_{i,j} + 2\pi f_c\tau - \pi K\tau^2)] \quad (2)$$

위에서  $\tau$ 는 시각  $t_{i,j}$ 에서 격자점  $(k, l)$ 까지의 왕복 시간 지연을,  $\tilde{t}_{i,j} = t_{i,j} - (j-1)T_p$ 는  $j$ 번째 펄스를 기점으로 하는 빠른 시간을 의미한다.

실제 수신 신호  $z(t_{i,j})$ 는 모든 격자점으로부터 반사된 신호와 잡음(noise)의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$z(t_{i,j}) = \sum_{k=1}^X \sum_{l=1}^Y h_{k,l}(t_{i,j})x_{k,l} + n(t_{i,j}) \quad (3)$$

위에서  $x_{k,l}$ 은 격자점  $(k, l)$ 의 반사율을 의미한다. 수신 신호와 반사율을 벡터로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{z} = [z(t_{1,1}), \dots, z(t_{F,1}), z(t_{1,2}), \dots, z(t_{F,P})]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = [x_{1,1}, \dots, x_{X,1}, x_{1,2}, \dots, x_{X,Y}]^T \quad (5)$$

이에 따라 다음과 같은 측정치 행렬식을 얻는다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad \mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 I) \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{H} \in C^{FP \times XY}$ 는 다음과 같이 주어진 행렬이고

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1}(1,1), \dots, h_{X,1}(1,1), h_{1,2}(1,1), \dots, h_{X,Y}(1,1) \\ \vdots \\ h_{1,1}(F,1), \dots, h_{X,1}(F,1), h_{1,2}(F,1), \dots, h_{X,Y}(F,1) \\ \vdots \\ h_{1,1}(F,P), \dots, h_{X,1}(F,P), h_{1,2}(F,P), \dots, h_{X,Y}(F,P) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{x} \in C^{XY \times 1}$ 는 찾고자 하는 반사율 분포,  $\mathbf{z} \in C^{FP \times 1}$ 는 펄스  $P$  동안 받은 수신 신호이다.

위의 식 (6)의 해를 구하는 방법으로 아래와 같이 정합 필터를 적용할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^H \mathbf{z} \quad (8)$$

위는 위치에 따라 달라지는 측정치를 모사하여 실제 수신 신호와의 상관관계(correlation)를 통해 영상을 형성하는 시간 영역 상관관계 기법을 이산화된 시간 영역에서 적용한 것이다.

### III. 모의실험

본 논문의 모의실험에서는 미사일의 속도가 기준 좌표계에서 다음과 같다고 가정한다.

$$V_p = V_x \hat{\mathbf{x}} + V_y \hat{\mathbf{y}} + V_z \hat{\mathbf{z}} \quad (9)$$

또한, 그림 2와 같이 회전하는 안테나 배치 구조를 사용한다면 시간에 따른 송신안테나 및 수신안테나의 위치는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_{Tx} = V_x t + x_0 \quad (10)$$

$$y_{Tx} = V_y t + y_0 \quad (11)$$

$$z_{Tx} = V_z t + z_0 \quad (12)$$

$$x_{Rx} = V_x t + \frac{d}{2} \cos(2\pi f_r t) \sin(2\pi f_r t) + x_0 \quad (13)$$

$$y_{Rx} = V_y t + \frac{d}{2} \cos(2\pi f_r t) \cos(2\pi f_r t) + y_0 \quad (14)$$

$$z_{Rx} = V_z t + \frac{d}{2} \sin(2\pi f_r t) + z_0 \quad (15)$$

모의실험에 사용한 파라미터는 표 1에 제시하였다.

그림 4는 모의실험을 위해 가정한 표적의 산란점 모델이다. 중심의 좌표가 표적의 중심 위치를 나타낸다. 그림 5는 비스듬히 떨어지지만, 동체에 고정된 안테나 즉,  $f_r = 0$  Hz일 때 얻은 영상 결과이다. 신호 대 잡음비는 신호처리되기 이전의 신호 세기와 잡음 세기의 비율로, 모의실험에서 공통으로 SNR=10 dB를 가정하였다. 영상에서 직각 방향으로 고스트 영상(ghost image)이 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 직각 방향의 고스트가 나타난 부분의 표적 위치가 실제 표적 위치와 정확히 같은 측정치를 가지게 하여 구분이 불가하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 인위적으로 도플러 변화에 차이를 만들기 위해 회전하는 안테나로 수신하는 형태를 제안한다. 회전하면서 수신하면 표적과의 거리 변화가 위치에 따라 달라지므로 위치에 대한 모호성(ambiguity)이 제거되어 고스트 현상을 막을 수 있다. 따라서 그림 6에서는 그림 5에서와 달리 고스트 영상이 사라진 것을 알 수 있다.

식 (7)의 열 간의 상관관계가 작을수록 인접한 위치와의 값의 차이가 벌어지므로 영상의 해상도는 높아진다. 따라서, 표적과 레이다 간의 거리 변화가 위치에 따라 크게 변하게 하기 위해서는  $d$ 를 크게 하고,  $f_r$ 은  $f_s$ 에 따라 수신안테나의 궤적이 복잡하도록 조절해야 한다.

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value
Operating frequency $f_c$	94 GHz
Initial altitude of the missile $h$	1 km
$V_x$	100 m/sec
$V_y$	100 m/sec
$V_z$	-300 m/sec
Bandwidth $B$	300 MHz
Sweep time $S$	1 ms
Sampling frequency $f_s$	200 kHz
PRI $T_p$	11 ms
Rotating frequency of receiver antenna $f_r$	50 Hz
Radius of rotation of receiver antenna $d$	30 cm
The number of fast-time samples $F$	199
The number of pulses $P$	150
The number of grids in direction of $x$ $X$	400
The number of grids in direction of $y$ $Y$	400

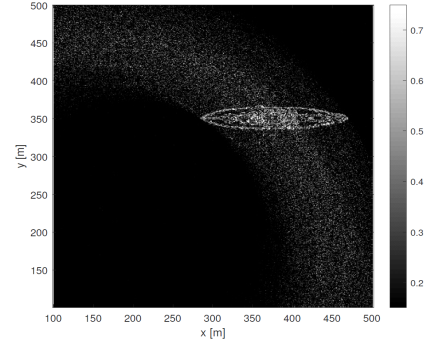


그림 6. SNR=10 dB에서 회전하는 수신 안테나로 얻은 결과  
Fig. 6. Result with a rotating Rx antenna when SNR=10 dB.

#### IV. 결 론

시간 영역 상관관계를 기반으로 지면을 격자로 나누어 2차원 영상을 획득하는 기법으로 직하 방향 레이더 영상을 획득하였다. 특히, 고스트 영상을 제거하기 위해 회전하는 수신안테나가 있는 새로운 안테나 배치 구조를 제안하였으며, 모의실험을 통해 그 효과를 입증하였다.

#### References

- [1] R. Fjortoft, J. M. Gaudin, N. Pourthie, J. C. Lalaurie, A. Mallet, and J. F. Nouvel, et al., "KaRIn on SWOT: Characteristics of near-nadir Ka-band interferometric SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 4, pp. 2172-2185, Apr. 2014.
- [2] B. Graham, *Introduction to Sensors for Ranging and Imaging*, Chennai, SciTech Pub. Inc., 2009.
- [3] S. X. Tsai, "Introduction to the scene matching missile guidance technologies," National Air Intelligence Center Wright-Patterson AFB OH, NAIC-ID(RS) T-0379-96, 1996.
- [4] 이혁중, 전주환, 송성찬, "재가중치  $\ell_1$ -최소화를 통한 밀리미터파(W 밴드) 전방 관측 초해상도 레이더 영상 기법," *한국전자과학회논문지*, 28(8), pp. 636-645, 2017년 8월.
- [5] 이혁중, 전주환, 황성현, 유성진, 변우진, "시간 영역 상관관계 기법을 통한 곡선운동을 하는 차량용 전방 관측 역산란 합성 영상 형성," *한국전자과학회논문지*, 30(1), pp. 60-69, 2019년 1월.

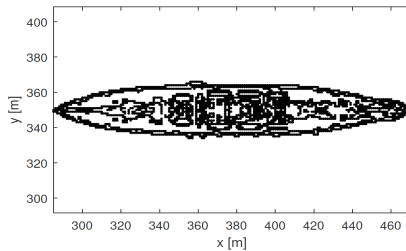


그림 4. 모의실험을 위해 점으로 표현된 표적  
Fig. 4. Scattering points model of a target.

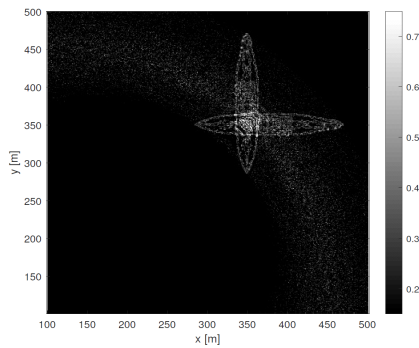


그림 5. SNR=10 dB에서 고정된 안테나로 얻은 결과  
Fig. 5. Result with fixed antennas when SNR=10 dB.