

회전하는 안테나를 가진 레이다를 이용하여 비행체 종말 유도를 위한 직하 방향 레이다 영상형성

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

이 혁 중¹ · 송 성 찬^{*2} · 전 주 환³

Hyukjung Lee¹ · Sungchan Song^{*2} · Joohwan Chun³

요 약

LFM(Linear Frequency Modulated) 펄스 열의 믹서 출력 신호를 이용하면 높은 샘플링 주파수의 ADC 없이 높은 거리 해상도를 얻을 수 있으므로 합성개구레이다(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^[1]. 예를 들어, 단거리 대전차 미사일인 Brimstone은 앞쪽 지면의 영상을 얻고^[2], 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)

다³⁾. 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 못한다⁴⁾.

여기서는 이들 단점을 극복하려는 시도으로써 진행 방향 영상을 얻기 위해 시간 영역 상관관계 기법⁵⁾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

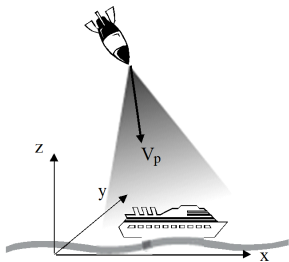


그림 1. 비행체가 표적을 향하여 날아가는 개념도
Fig. 1. Geometry of areal vehicle flying towards a target.

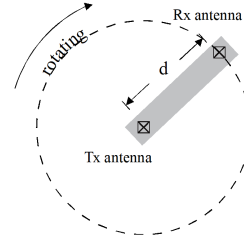


그림 2. 비행체 내부에 탑재된 송수신 안테나의 배치 구조
Fig. 2. Antenna configuration in the aerial vehicle: an Rx antenna is rotating around a Tx antenna.

$[x_{Tx}(t), y_{Tx}(t), z_{Tx}(t)]$, $[x_{Rx}(t), y_{Rx}(t), z_{Rx}(t)]$ 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.

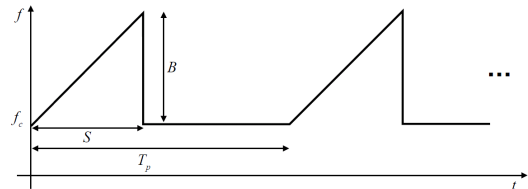


그림 3. 송신하는 선형 주파수 변조 펄스 열
Fig. 3. Transmitting LFM pulse train.

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

위에서 τ 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.

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

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

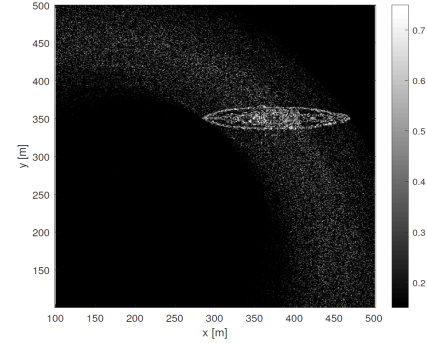


그림 6. SNR=10 dB에서 회전하는 수신 안테나로 얻은 결과
Fig. 6. Result with a rotating Rx antenna when SNR=10 dB.

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 ℓ_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.

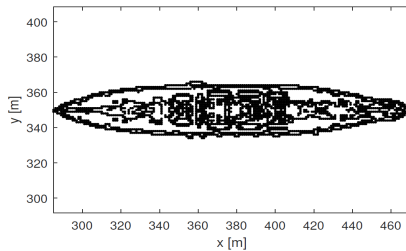


그림 4. 모의실험을 위해 점으로 표현된 표적
Fig. 4. Scattering points model of a target.

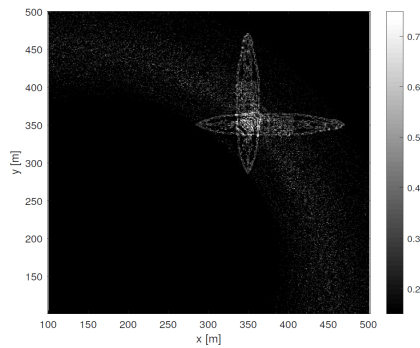


그림 5. SNR=10 dB에서 고정된 안테나로 얻은 결과
Fig. 5. Result with fixed antennas when SNR=10 dB.