

기상 클러터 효과를 고려한 표면 클러터 반사신호 모노펄스 레이더 공대지 신호 생성

Airborne Monopulse Radar Echo Signal Generation from Surface Clutter Including Weather Clutter Effect

최 지 효 · 고 일 석* · 정 지 현

Jihyo Choi · Il-Suek Koh* · Ji-hyun Jung

요 약

레이더 수신 신호에는 표적에서 되돌아오는 신호뿐만 아니라 클러터의 신호도 존재하고, 이의 정확한 모의는 레이더 특성의 예측과 분석에 필수적이다. 항공기에 탑재된 레이더의 신호 데이터를 얻는 방법은 매우 복잡하고 다양한 환경에서 신호를 획득하는 데 많은 제한이 존재하여, 항공기 레이더의 모의 신호 생성 방법이 필요하다. 본 논문에서는 X 밴드 레이더용으로 개발된 체적 클러터를 모의하는 기상 시뮬레이터와 표면 클러터의 지표면 시뮬레이터를 통합하며, 기상 상황의 영향이 고려된 지표면 반사 신호를 모의한다. 고주파일수록 신호에 대한 기상 상황의 영향이 증가하기 때문에 X 밴드에서 기상 클러터 효과는 매우 중요하다. 시뮬레이터는 실제 데이터를 기반으로 시 영역 신호를 모의하며, 클러터의 무작위 특성 및 항공기의 움직임으로 발생하는 도플러(Doppler) 효과를 모두 신호에 반영한다. 또한 자연계의 클러터에서 되돌아오는 신호뿐만 아닌 높이를 임의로 달리한 구조에서 되돌아오는 신호를 모의하는 방법을 제안한다. 두 시뮬레이터의 통합한 임펄스 신호에 선형 주파수 변조(linear frequency modulation) 파형을 적용해 최종 신호를 생성한다.

Abstract

An airborne radar echo signal includes signals returned from clutter and a target; thus, simulating the signal from the clutter may be crucial for predicting and analyzing accurate radar performance. Because it can be extremely difficult and expensive to obtain real measured signal data for various scenarios, an accurate signal generation method is required. Existing weather clutter and ground clutter simulators for an X-band airborne radar are combined to simulate the echo signal when two clutters exist simultaneously. The weather clutter effect becomes more significant with increasing frequencies, such as in the X-band. The proposed simulator can generate time-domain signals by considering the random characteristics of the clutter signal and the Doppler effect caused by the movement of aircraft and clutter. In addition, a simple scheme is proposed for generating signals from artificial structures. Finally, the finite bandwidth of the transmitted chirp signal is calculated to improve the accuracy of the generated signal.

Key words: Radar Echo Signal, X-Band, Weather Clutter, Ground Clutter

「이 논문은 2020 한화시스템(주)의 재원을 받아 수행된 연구임(U-20-015).」

한화시스템(Hanwha Systems)

*인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

· Manuscript received May 16, 2022 ; Revised June 14, 2022 ; Accepted July 29, 2022. (ID No. 20220516-046)

· Corresponding Author: Il-Suek Koh (e-mail: ikoh@inha.ac.kr)

I. 서론

날씨, 재원 등 여러 요소에 의해 제한을 받는 실제 실험의 어려움으로 항공기에 탑재된 X 밴드 레이더의 공대지 신호를 획득하는 방법은 주로 시뮬레이션 위주로 연구되고 있고, 이는 다양한 응용 분야에서 사용되고 있다^{[1]~[3]}. 시뮬레이션으로 수신 신호를 모의 시, 다양한 운영 상황을 고려해야 하며 또 모사된 신호의 정확도를 높이는 것이 중요하다. 항공기의 공대지 레이더의 수신 신호에는 지표면에서 돌아오는 표면 클러터(surface clutter) 신호 외에 대기 중에 넓은 영역에 분포하는 기상 체적 클러터(volume clutter) 신호도 포함된다^{[4],[5]}. 최근 무인 항공기의 빠른 발전으로 많은 분야에서 무인 항공기의 활용이 늘어나고 있다. 특히, 군사 분야에서는 다양한 기상 상황에서 항공기 운영이 필수적이고, X 밴드 대역과 같이 고주파 신호를 사용하는 경우 기상 클러터에 의한 신호 감쇠/지연 효과가 상대적으로 커^{[6],[7]}, 이의 효과를 정확하게 고려해야 한다. 그러므로 항공기 이동, 기상 상황, 여러 지표면 형상/특성 등 다양한 시나리오의 레이더 반사 신호를 모의하는 것이 매우 중요하다^{[8]~[10]}. 일반적으로 지표면 클러터와 기상 클러터의 수신 신호 생성연구는 각각 독립적으로 수행되어왔다^{[1]~[5]}. 본 논문에서는 두 연구를 통합하여 기상 상황과 지표면의 굴곡, 산란 특성을 동시에 고려하는 공대지 레이더 시뮬레이터를 구현한다.

본 연구에서 고려하는 시나리오는 항공기가 낮은 고도로 운행하고 있는 경우이다. 자연체 외 건물 등은 일반적으로 수치표고모델(digital elevation model: DEM)에 포함되지 않아, 낮은 고도의 항공기 운항에 큰 위협이 된다. 그러므로 이를 레이더로 검출 후 위치, 높이 같은 특성을 추출할 필요가 있어 산악 같은 자연체와 건물이 동시에 존재하는 상황의 레이더 반사 신호 모의가 필요하다. 보통 건물은 매우 큰 레이더 반사 신호를 생성해 레이더 수신 신호의 크기가 크다^{[11],[12]}. 복잡한 건물 등의 정확한 레이더 반사 신호의 해석은 물리 광학(physical optics)과 같은 방법을 사용하여 계산할 수 있다. 그러나 복잡도가 매우 높고, 여기서 고려하는 레이더 응용에서는 레이더의 거리 해상도가 커, 하나의 레인지 빈(range bin)에 건물의 반사 신호가 존재한다. 그러므로 구조물의 정확한 해석보

다 지표면 반사 신호와의 대비가 중요하여, 본 논문에서는 수치표고 모델의 한 패치의 높이와 신호 반사 크기를 조절하여 건물을 모델링한다.

II 절에서는 기존 기상 클러터 및 수치표고 모델을 이용한 클러터 레이더 반사 신호 모델을 정리하고, 이의 통합모델을 제안한다. III 절에서는 건물 모델과 여러 패치에서 돌아오는 신호 사이의 간섭을 근사화하는 방법을 설명한다. 마지막으로 IV 절에서 다양한 경우의 수치해석 결과를 보여준다.

II. 시뮬레이터 통합과 시나리오

2-1 기상 시뮬레이터

기상 클러터의 레이더 모의 신호 생성 방법은 많은 연구가 제안되었으나, 본 논문에서는 참고문헌 [13]에서 제안된 방법을 사용한다. 기상 클러터는 보통 넓은 범위에 비균질적으로 분포하고 있어, 이를 많은 작은 박스로 구성된 하나의 큰 박스로 모델링한다. 각 작은 박스의 산란 특성은 실제 측정된 z-parameter를 작은박스에 할당하여 계산할 수 있고, 동시에 같은 z-parameter를 이용하여 작은 박스를 통과하는 신호의 감쇠, 지연을 예측할 수 있다. 이러한 방법으로 기상 클러터의 비균질성 및 종류 등을 쉽게 고려할 수 있다.

먼저 조향된 빔의 반전력빔폭(half power beamwidth) 내에 작은 박스들을 추출하고 거리 해상도마다 추출된 박스를 묶어 그룹을 형성한다. 거리 해상도 내 작은 박스들은 하나의 시간 축에서 임펄스 신호를 생성한다. 각 작은 박스들의 반사 신호의 크기(A)는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$A = \frac{\pi G}{8\lambda R^2} |K| \sqrt{P_t Z_{H,V} dV} \quad (1)$$

여기서, G , λ , P_t , dV 와 K 는 각각 안테나 게인, 동작 주파수 파장, 전송 전력, 작은 박스의 부피 그리고 물의 유전율이다. 그리고 $Z_{H,V}$ 는 두 편파(H와 V 편파)에 대한 z-parameter이고, R 은 레이더와 작은 박스 중점 사이의 거리이다. 크기 계산 후 기상 클러터 내부의 신호 전파길이에 따른 신호의 감쇠/지연을 고려하여 신호의 크기와 임펄스의 시간 위치를 변화시킨다^[13]. 한 레인지 빈(range

bin)의 신호는 같은 거리 해상도에 속한 작은 박스의 반사 신호를 모두 합하여 생성한다. 항공기 및 기상 클러스터의 움직임은 도플러 효과로 고려할 수 있다. 클러스터의 움직임은 많은 기상 입자들에 의해 무작위 특성을 가지므로, 본 논문에서는 가우시안 랜덤변수로 가정하고, 이의 분산은 입력된 바람의 분산값에 따라 계산된다^[14].

2-2 지표면 시뮬레이터

선행 연구에서 제안하는 방법을 이용해 지표면으로 부터 반사된 신호의 모노펄스 신호를 계산한다^{[3],[15],[16]}. 기상 클러스터와 같은 방법으로 펄스 간 상관관계 및 항공기 도플러 효과도 고려할 수 있다. 지표면 형상을 고려하기 위해 DEM 데이터를 이용하고, 이의 반사 신호는 표면 클러스터 종류에 따라 생성할 수 있다. 여기서는 간단히 반사 신호의 크기를 조절할 수 있는 거친 표면(rough surface)을 가정한다^{[3],[15],[16]}. 숲 등 다른 클러스터의 효과는 필요한 후방 산란(backscattering) 모델을 적용하면 고려할 수 있다. USGS(United States Geological Survey)에서 제공하는 DEM 데이터는 지표면이 30×30 m의 정사각형으로 분할되고, 각 꼭짓점들의 (x,y,z) 좌표가 주어진다. 레이더 조향 방향으로 반전력빔폭을 지표면에 투영해 빔폭 안에 들어오는 꼭짓점을 판별하고 이들로 이루어진 표면 패치의 반사 신호를 레이더 방정식을 기반으로 계산한다. 자세한 계산 방법과 수식은 선행 연구에 설명되어 있다^{[3],[15],[16]}.

2-3 통합 시뮬레이터

기상 및 표면 클러스터 시뮬레이터를 합하여 하나의 통합 시뮬레이터를 개발한다. 다양한 기상 클러스터는 2-1절에서 설명한 대로 작은 박스에 다른 z-parameter를 할당하여 고려할 수 있다. 기상 클러스터의 산란특성은 각 DEM 패치에 표 1과 같은 물질 숫자(material number)를 할당하여 패치마다 다른 클러스터 특성을 부여할 수 있다. 물질 숫자가 양수이면 자연체, 음수이면 건물이고, 다른 숫자는 다른 클러스터 종류를 의미한다. 표 1에서 보듯이 거친 표면인 경우, 유전율과 투자율을 바꾸어 다른 후방 산란값을 생성한다^[17]. 건물인 경우 임의의 RCS값을 할당한다. DEM에 모델링이 되지 않은 건물의 생성 및 특성 할당은

표 1. 재질 특성

Table 1. Material characteristics.

Material number	ϵ_r	μ_r
1 (Green)	78.4	1
2 (Yellow)	12.31-j3.55	1
RCS		
-1	23 dB	
-2	25 dB	

3-1절에서 설명한다.

기상과 지표면 최종 신호의 레이더 거리 해상도를 30 m로 가정하고, 두 클러스터에서 반사되는 신호는 독립적으로 생성 후 합하여, 전체 반사 신호를 계산한다. 이때, 기상 클러스터의 존재로 레이더에서 방출되는 신호는 체적 클러스터를 통과 후 지표면에서 반사되어 다시 같은 체적 클러스터를 거쳐 돌아온다. 그러므로 기상 클러스터로 인해 발생하는 신호 감쇠 효과와 위상 지연 효과를 지표면에서 되돌아오는 신호에도 같이 고려해야 한다. 기상 효과 적용을 위해서 각각의 DEM 패치마다 레이더와 패치 중점 사이의 시선 벡터를 계산하고, 이 벡터가 통과하는 기상 클러스터의 존재 여부를 판별한다. 존재하는 경우 기상 클러스터의 신호 감쇠와 위상 지연값을 선행 연구에서 제안된 방식으로 지표면 신호 계산에 적용한다^[13].

기존 연구^[3]에서는 항공기의 고도가 높아, 반전력 빔폭 내 존재하는 지표면 패치의 유, 무를 반전력 빔폭을 높이가 0인 가상의 평면에 투영 후, 이 면적 안에 존재하는 DEM 패치를 선택했다. 이는 항공기의 고도가 DEM 패치보다 매우 높은 경우에는 정확하나, 고도가 낮으면 정확도가 저하된다. 또한 레이더의 방향이 지표면만을 향하는 것이 아닌 공중을 향하는 경우에는 이 방법을 적용할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 안테나의 조향 방향에 따라 레이더와 패치의 중앙을 향하는 벡터와 레이더의 보어사이트(boresight) 벡터 사이의 각도를 계산하고, 이 각도가 반전력 빔폭 안에 들어오는 패치만을 선택하였다. 그 후 선택된 패치의 음영 여부를 결정한다^[3]. 그러나 선택된 패치들이 3 dB 빔폭보다 작은 빔폭 내에 위치하여 최종 생성된 신호의 정확도가 저하될 가능성이 있다. 그러므로 빔폭의 크기를 4 dB로 넓히면, 보다 넓은 영역의 반사 신호를 포함하여 최종 생성 신호의 정확도를 높일

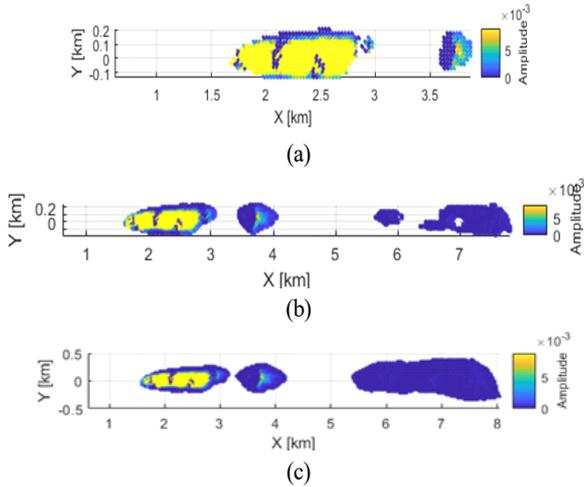


그림 1. 3 dB (a), 4 dB (b)와 5 dB, (c) 빔폭의 지상 투영 영역 비교
 Fig. 1. Projected area comparison for 3 dB (a), 4 dB(b) and 5 dB, (c) beamwidth.

수 있다.

그림 1은 3 dB, 4 dB와 5 dB 빔폭을 사용하는 경우, 지상에 투영된 영역의 비교를 보여준다. 패치의 색은 식 (1)에서 보듯이 거리 및 안테나 빔폭의 효과가 고려된 각 패치의 반사도를 의미한다. 예측한 대로, 4 dB와 5 dB폭 결과가 3 dB 영역이 포함된 영역에 투영되어, 보다 많은 패치의 효과를 고려할 수 있다. 또 4 dB와 5 dB의 경우 투영 영역에 큰 차이가 없고, 거리가 멀어지면 패치의 반사도가 작아져 반사 신호에 주는 영향이 미미하다. 그러므로 여기서는 4 dB 빔폭을 사용한다.

2.4 통합 시뮬레이터 시나리오

시뮬레이션 지역으로 위도와 경도가 36.3295° 와 129.1209° 인 청송군 지역 내 산악지대 DEM을 사용한다. 사용한 전체 DEM의 크기는 100×10 km로, x축으로는 0 ~ 100 km, y축으로는 $-5 \sim 5$ km 범위에 DEM이 놓여있다. 통합 시뮬레이션을 위한 시나리오로 그림 2와 같이 기상 체적 클러터는 (31500, 0, 1050) m를 중점으로 x축으로 3 km, y축으로 1 km 그리고 z축으로 2 km의 크기로 존재한다. 항공기는 초기 위치 (29566, 0, 500) m에서 출발해 x축 방향으로 250 m/s 속도로 일정하게 이동하며,

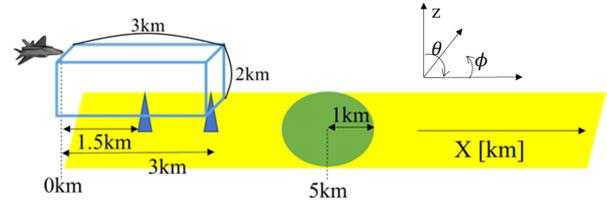


그림 2. 물질 할당 및 시뮬레이션 시나리오
 Fig. 2. Scenario of material allocation and simulation.

표 2. 레이더 송신 파형 파라미터
 Table 2. Radar waveform parameters.

PRI	170 μ s
Number of pulse	40
Pulse width	8 μ s

고도는 전체 DEM 데이터의 최고 높이보다 60 m 높게 설정해 500 m로 고정하였다. 탑재된 레이더는 방위각을 0도로 고정하고, 고각에 따라 스캔하며 반사 신호를 측정한다. 이때 고각은 항공기를 원점으로 z축이 0도이다(그림 2). 각 스캔 각도마다 항공기의 위치를 이동시킨다. 한 고각에서 40개의 펄스에 대한 반사 신호를 생성한다. 자세한 레이더 송신 파형 파라미터는 표 2과 같다. 모노펄스 레이더는 위상 배열 안테나를 이용해 최종 신호는 \sum (sum), ΔEL (delta elevation), ΔAZ (delta azimuth), 세 가지 응답^[3]을 계산하나, 여기서는 \sum 신호의 결과만 보여준다. 세 안테나 패턴은 선행 연구^[3]에 사용한 안테나를 사용하여 계산했다. 표 2의 특성을 갖는 지표면 물질 수는 그림 2와 같이 항공기의 초기 위치를 기준으로 x축 방향으로 5 km 앞에 반경 1 km 원 안에 들어오는 영역은 1로, 나머지는 2로 할당한다. 물질 1의 후방산란계수(σ_0)는 물질 2에 비해 상대적으로 높다.

III. 건물과 최종 신호 생성

3-1 건물 생성

앞서 설명한 바와 같이 건물의 정확한 형태는 고려하지 않고 놓인 위치에서 높이의 변화만 고려한다. 먼저 정사각형 DEM 패치를 삼각형으로 재분할하여 꼭짓점의 높이 변화에 따른 패치의 연속성을 보장한다. 구조물은 꼭



그림 3. 건물의 패치
Fig. 3. Patch for building structure.

표 3. 건물 사양
Table 3. Building structure specification.

	Building 1	Building 2
Height	50 m	70 m
x ahead from flight	1.5 km	3 km
y coord.	10 m	10 m
Material number	-1	-2

깃점 한 개의 높이를 변경해 여섯 개의 DEM 패치에 할당하며, 생성하고자 하는 위치의 패치 높이값을 변화시킨다. 먼저 구조물의 위치를 입력하면 입력 좌표와 가장 가까운 DEM 데이터를 찾아 원래의 z값에 구조물 높이를 더해, 패치 높이 정보를 변경한다. 그림 3은 생성된 건물의 형상을 보여준다. 높이가 변경되어 패치가 육각형 모양으로 형성되며, 각 삼각형 패치의 중점을 이용하여 음영 여부를 결정한다. 여기서는 두 건물을 고려했고, 구체적 위치 및 물질 숫자는 표 3이 보여준다. 그리고 각 건물의 산란 특성은 주변 표면 클러터와 다르게 할당되고, 표 1과 같이 총 RCS로 주어진다.

3-2 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation)

기상 클러터는 균일한 박스로 나누어져 있어 각 작은 박스의 반사 신호는 일정한 간격(여기서는 30 m)을 두고 들어온다. 그러므로 수신 펄스 사이의 간격이 넓어 무한대역폭을 가정한 임펄스로 근사할 수 있다. 그러나 지표면의 경우 패치의 높이에 따라 레이다로부터 거리가 달라져, 반사 신호의 시간 축 위치가 변하여, 유한 대역폭에 따른 신호 사이의 간섭효과가 중요하다. 정확하게 간섭효과를 계산하는 것은 상당한 계산 시간이 필요하여, 선행 연구^[8]에서 제안한 방법을 이용하여 근사적으로 간섭을

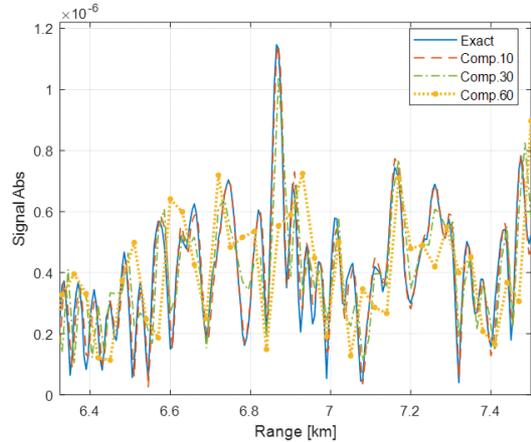


그림 4. 샘플링 간격을 달리하며 근사된 LFM 신호와 정확한 신호의 비교
Fig. 4. Comparison of exact LFM signal and approximated signal with different sampling rate.

계산한다. 그림 4는 간섭효과를 근사한 결과와 정확히 계산한 신호를 비교하였다. 거리 해상도를 달리하면 해상도 크기에 따라 신호 근사 결과가 달라진다. 그림 4는 해상도가 10, 30, 60 m일 때를 비교하며, 예측한 대로 해상도가 작아지면 오차가 같이 줄어들음을 알 수 있고, 30 m 해상도의 오차는 충분히 작음을 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

2-3절에서 기술한 시나리오를 시뮬레이션하면, 레이다가 공중을 향하는 안테나 고각이 85도 이하에서는 지표면에서 반사되는 신호가 없고, 기상 클러터 신호만 존재한다. 110에서 87도 사이에는 두 클러터에서 반사되는 신호 모두 존재하고, 112도 이상에는 지표면 신호만 생성한다. 펄스를 전송하는 동안 그리고 PRI 이후에는 신호를 수신하지 못하는 특성을 반영하여 신호를 생성한다. 그림 5~7은 고각이 90도일 경우 Σ 신호의 결과를 보여준다.

그림 5는 하나의 펄스에 대한 반사 신호의 크기를 보여준다. 23 μs 이전에는 기상 클러터 신호만 존재하고, 그 후에는 지표면에서 신호가 반사되어 돌아온다. 기상 클러터가 지표면보다 레이다에 가까운 위치에 존재하여 신호의 크기가 상대적으로 크다. 그림 6은 그림 5의 신호의 지표면에 투영된 패치의 반사도를 보여준다. DEM 패치들

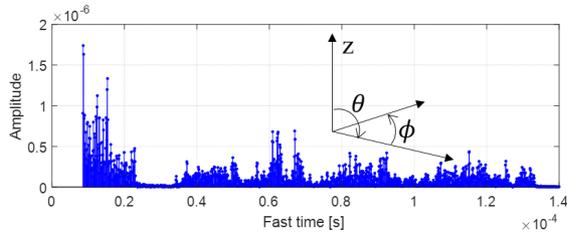


그림 5. 90도 고각의 경우 레이더 수신 Σ 신호 크기
Fig. 5. Radar echo Σ signal amplitude at 90° elevation.

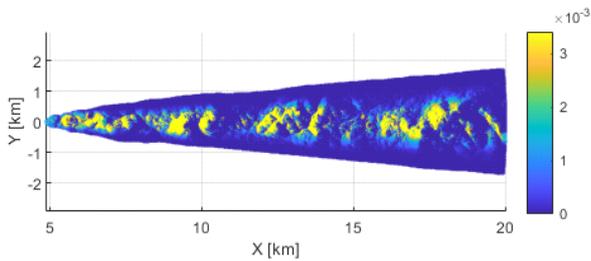


그림 6. 90도 고각의 경우 DEM 패치 각각의 반사도
Fig. 6. Reflectivity of DEM patch at 90° elevation.

의 높낮이와 패치의 법선벡터 방향마다 신호의 크기가 달라짐을 보여주고, 가까운 영역에서도 음영 영역 내 패치의 반사도는 0이 됨을 알 수 있다. 특히 빔의 중간($y=0$)에서 y 축으로 멀어질수록 안테나 빔 패턴의 효과로 반사도가 작아진다. 각 패치에서 돌아오는 신호가 합하여 그림 5의 신호가 생성되므로 높은 반사도 패치가 많은 부분이 그림 5의 신호의 크기가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 7은 다수의 펄스를 쌓아 생성된 이차원 신호를 FFT(fast fourier transform)를 이용해 처리 후 생성된 RD (range-Doppler) 맵이다. 처리된 신호의 크기도 거리에 따

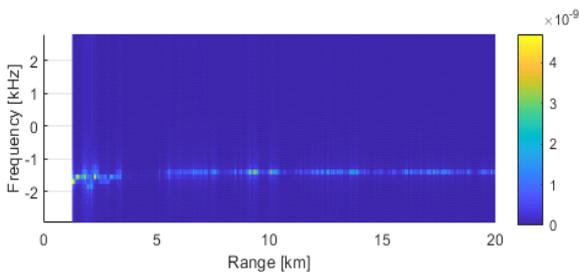
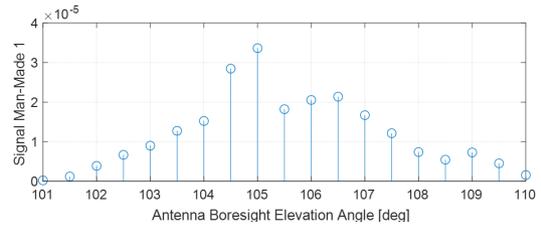


그림 7. 90도 고각의 경우 Σ 신호의 RD 맵
Fig. 7. RD map of Σ signal at 90° elevation.

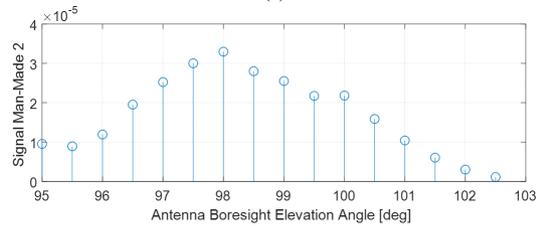
라 다르며, 그림 5의 일차원 신호와 비슷한 경향을 보인다. 거리가 가까운 경우 기상 클러터의 존재로 도플러 주파수 변화가 상대적으로 크다. 항공기 속도가 250 m/s이므로 예측된 도플러 주파수는 16,181 Hz로 RD맵에서 래핑되어 그림 7과 같이 -1.5 kHz 근방에 피크가 존재한다.

건물은 항공기 초기 위치에서 x 축으로 1.5 km와 3 km 앞에 위치해, 고각이 110도에서 95도 사이일 경우 레이더 반사 신호에 영향을 준다. 그림 8은 두 건물의 반사 신호 크기를 스캔하는 각도에 따라 보여준다. 건물이 없는 경우와 존재하는 경우 두 신호의 차로 건물에서 발생하는 신호를 계산하였다. 빌딩 1의 경우 꼭대기 점이 (31074 7.5 110)로 안테나의 꼭대기 점을 향하는 LOS 벡터 104.7도이고, 빌딩 2의 경우 꼭대기 점이 (32574 7.5 130)로 LOS 벡터 각도가 97.2도로 각각의 예측 각도 부근에서 신호의 크기가 커지고 다른 각도에서는 안테나 빔 패턴 및 거리 효과로 크기가 줄어든다. 예측했던 위치에서 안테나 패턴 및 거리 효과를 반영한 건물의 신호가 생성됨을 알 수 있다.

마지막으로 기상 클러터의 신호 감쇠 효과와 위상 지연 효과가 지표면 신호 생성에 미치는 영향을 분석하기 위해 선행 연구에서 사용된 실측된 z-parameter 데이터를



(a)



(b)

그림 8. (a) 빌딩 1, (b) 빌딩 2의 각도별 신호 크기
Fig. 8. Signal amplitude of (a) Building 1, (b) Building 2 v.s. elevation angle.

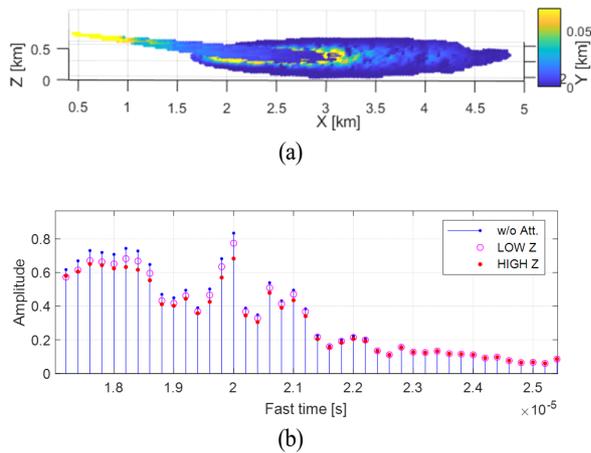


그림 9. 100도 고각의 경우 (a) 기상 클러터와 지표면 반사도, (b) 다른 z-parameter의 영향이 고려된 지표면 반사 신호 크기 비교
 Fig. 9. (a) Reflectivity of weather clutter and DEM patch, (b) Echo signal amplitude considering different z-parameter at 100°.

사용한다^[13]. 그림 9는 클러터 효과를 적용해 생성한 지표면 신호를 보여준다. 클러터의 z-parameter 크기에 따른 감쇠 정도를 비교하기 위해 클러터 신호의 랜덤 효과 없이 계산한다. 고각이 100도일 경우로 그림 9(a)는 4 dB 빔 폭 내 기상 클러터와 투영 지표면을 나타내며, 그림 9(b)는 감쇠 없는 신호와 z-parameter를 달리할 때 감쇠가 적용된 신호들을 보여준다. 빌딩 2에서 반사되는 신호는 시간 축에서는 20 μs 근처에서 생성되고, 기상 클러터의 z-parameter가 높을 때 신호의 감쇠가 커짐을 알 수 있다. 또 3.23 km 이후부터는 레이다 가시선이 기상 클러터를 통과하지 않아, 21.5 μs 이후의 신호는 기상 클러터에 의해 감쇠되지 않는다.

V. 결 론

앞서 개발된 표면 및 기상 클러터 신호 생성 시뮬레이터를 통합하여 항공기에 탑재된 X 밴드 레이다의 공대지 반사 신호 생성 시뮬레이터를 개발하였다. 낮은 항공기 높이로 인한 레이다 빔 폭 내 존재하는 DEM 패치를 계산하는 새로운 방법을 제안하였다. 레이다 고각을 스캔하는 시뮬레이션을 수행하여 기상 상황에 따라 지표면으로부터

터 반사되는 수신 신호를 생성했다. 이 신호로부터 기상 클러터에 의한 신호 감쇠 효과를 확인하였다. 또한 건물의 레이다 반사 신호를 모델링하기 위해 DEM 데이터의 높이를 변화하고, 클러터와 다른 산란 특성을 할당하여 주변 환경과 다른 반사 신호를 생성하였다. 실레이다에서 사용하는 펄스를 이용하여 수신 신호를 생성, 이의 RD맵을 계산하여 도플러 등 생성된 신호의 특성을 검증하였다. 또, 유한 대역폭의 효과를 근사적으로 계산하여 신호 사이의 간섭효과를 고려하였다.

References

- [1] P. K. Zwagerman, "Air-to-ground ranging using electronic roll stabilization of monopulse data," in *Proceedings of IEEE National Radar Conference*, Ann Arbor, MI, Apr. 1988.
- [2] J. Naganawa, H. Miyazaki, and H. Tajima, "Measurement-based evaluation on detection probability of extended squitter for air-to-ground surveillance," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 8883-8894, Oct. 2017.
- [3] J. W. Rim, I. S. Koh, and J. H. Song, "Simulation of air-to-ground ranging mode of airborne monopulse radar over complex terrain," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 14, no. 12, pp. 1991-1999, Dec. 2020.
- [4] H. H. Benzon, T. Bovith, "Simulation and prediction of weather radar clutter using a wave propagator on high resolution NWP data," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 12, pp. 3885-3890, Dec. 2008.
- [5] H. Kikuchi, E. Yoshikawa, T. Ushio, F. Mizutani, and M. Wada, "Adaptive pulse compression technique for X-band phased array weather radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 1810-1814, Oct. 2017.
- [6] Y. A. Oh, D. Lee, S. H. Jung, K. Y. Nam, and G. W. Lee, "Attenuation correction effects in rainfall estimation at X-band dual-polarization radar: Evaluation with a

- dense rain gauge network," *Advances in Meteorology*, vol. 2016, p. 9716535, Jun. 2016.
- [7] R. Meneghini, "Application of a threshold method to airborne-spaceborne attenuating-wavelength radars for the estimation of space-time rain-rate statistics," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 37, no. 9, pp. 924-938, Sep. 1998.
- [8] A. Guerra, D. Dardari, and P. M. Djurić, "Dynamic radar network of UAVs: A joint navigation and tracking approach," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116454-116469, Jun. 2020.
- [9] A. Brown, D. Anderson, "Trajectory optimization for high-altitude long-endurance UAV maritime radar surveillance," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 3, pp. 2406-2421, Nov. 2019.
- [10] Z. Zhang, J. Wu, J. Dai, and C. He, "A novel real-time penetration path planning algorithm for stealth UAV in 3D complex dynamic environment," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122757-122771, Jul. 2020.
- [11] D. Xiang, T. Tang, Y. Ban, and Y. Su, "Man-made target detection from polarimetric SAR data via nonstationarity and asymmetry," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, pp. 1459-1469, Apr. 2016.
- [12] W. Wu, H. Guo, and X. Li, "Urban area SAR image man-made target extraction based on the product model and the time - frequency analysis," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 3, pp. 943-952, Mar. 2015.
- [13] J. Choi, I. S. Koh, and J. Jung, "Time-domain signal simulation of weather clutter for airborne radar based on measured data," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 403-411, Jul. 2022.
- [14] G. Galati, G. Pavan, "Computer simulation of weather radar signals," *Simulation Practice and Theory*, vol. 3, no. 1, pp. 17-44, Jul. 1995.
- [15] J. H. Nam, J. W. Rim, H. Lee, I. S. Koh, and J. H. Song, "Modeling of monopulse radar signals reflected from ground clutter in a time domain considering Doppler effects," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 190-198, May 2020.
- [16] J. H. Nam, H. Lee, I. S. Koh, J. H. Song, and C. S. Bae, "Performance assessment of mono-pulse radar air-to-ground ranging algorithm for various clutter environments," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 7, pp. 631-639, Jul. 2020.
- [17] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 370-381, Mar. 1992.
- [18] J. Choi, I. Koh, "Efficient algorithm to calculate time-domain echo signal from moving targets based on physical optics and application to autonomous driving simulation," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 5, Nov. 2022.

최 지 효 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1553-6484>



2020년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)

2022년 1월 ~ 현재: 한화시스템 레이더연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이

다 신호처리 등

정 지 현 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7410-6033>



2004년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

2006년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)

2011년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)

2015년 12월: 한국과학기술연구원 영상미

디어연구단 위촉연구원

2016년 3월 ~ 현재: 한화시스템 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이더 신호처리

고 일 석 [인하대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0014-2466>



1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 4월: LG전자 연구원

2004년 3월 ~ 2010년 3월: 인하대학교 정보통신대학원 교수

2010년 4월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Theoretical Electromagnetics, Numerical Analysis, Wave Propagation through Complex Media