

항공기 레이더를 위한 모의 지상 클러터 신호의 실시간 생성 방법 개발

Development of Real-Time Generation Methods of Simulated Surface Clutter Signals for Airborne Radar

김태형 · 문현욱 · 이성원 · 유성현 · 양은정*

Tae-Hyung Kim · Hyun-Wook Moon · Sung-Won Lee · Seong-Hyun Ryu · Eunjung Yang*

요 약

일반적으로 실제 클러터 신호와 유사하도록 클러터 신호를 모의하려면 기존의 방법으로는 실시간 신호 생성이 어렵다. 본 논문에서는 타당한 정확성을 가지면서 실시간으로 지면 클러터 신호를 생성하는 방법을 제안하였다. 제안 방법들을 시뮬레이션을 통해 비교하였으며, 제안한 방법을 이용하면 항공기 레이더의 기능 및 성능 시험을 위한 모의신호발생기에서 클러터를 실시간으로 모의할 수 있음을 보였다.

Abstract

It takes considerable time to generate accurate clutter signal using conventional clutter generation scheme. In this paper, real-time schemes are proposed, which have reasonable accuracy and are applicable to testing the radar performance. Proposed methods are compared through the simulation, which represented that clutter signal can be generated in real-time when using proposed methods for simulated signal generator.

Key words: Real-Time Generation of Simulated Surface Clutter, Simulator Signal Generator, Surface Clutter Simulation, Airborne Radar

I. 서 론

항공기 레이더의 경우에는 시험 비용 및 시간의 제약 사항으로 인해 비행시험 전에, 지상에서 레이더의 기능 및 성능을 충분히 시험해 보는 것이 필요하다. 즉, 지상에서 모의 신호 생성기 등의 시험 장비를 이용하여 다양한 시나리오에 대한 레이더 기능 및 성능의 검증이 필요하다. 모의 신호 생성기는 공중에서의 지면 클러터 및 외부

교란 신호를 타당한 정확성(reasonable accuracy)을 가지고 모의할 수 있어야 하며, 항공기와 안테나 빔의 움직임에 따라 즉각적으로 변하는 지면 클러터의 양상을 실시간으로 모의하여야 한다.

항공기 레이더는 LPRF(Low Pulse Repetition Frequency, 또는 Low PRF) 또는 HPRF(High PRF) 파형뿐만 아니라, 각 파형의 취약점들을 극복하기 위하여 MPRF(Medium PRF) 파형을 사용하기도 한다. LPRF와 HPRF의 경우에는

LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received September 9, 2015 ; Revised November 12, 2015 ; Accepted January 8, 2016. (ID No. 20150909-067)

· Corresponding Author: Tae-Hyung Kim (e-mail: thkim07@gmail.com)

거리 축 또는 도플러 축 중에서 하나의 축에 대해서만 표적 정보를 추출하기에 표적을 교란하는 지면 클러터 양상이 상대적으로 단순하여 타당한 정확성을 가지는 모의 클러터 신호를 즉각적으로 만드는 것이 어렵지 않다. 또한, LPRF 및 HPRF 파형의 운영 시에는 표적 정보를 추출하는 축 상에서 표적 존재 영역과 지면 클러터 존재 영역이 상당히 분리되어 있기 때문에, 클러터 모의가 레이더 기능 및 성능 평가하는데 있어서 결정적인 요소가 아닌 경우가 대부분이다. 하지만 MPRF 파형은 거리와 도플러 축을 동시 고려하여 표적 정보를 추출하며, 표적을 교란하는 지면 클러터 양상이 보다 복잡하므로 타당한 정확성을 가지는 지면 클러터를 즉각적으로 모의하기가 복잡하고, 생성 시간이 상대적으로 많이 소요된다^[1].

항공기 레이더에서 MPRF 파형을 사용할 경우, 대부분 지면 클러터가 표적 탐지에 영향을 미치지기 때문에, 모의 신호 생성기를 이용한 레이더 기능 및 성능 평가에 지면 클러터 모의가 중요한 요소가 될 수 있다. 지면 클러터를 실시간 모의하는 외국의 시험장비들은 DRFM(Digital Radio Frequency Memory) 장비를 기반으로 지면 클러터를 모의한다. DRFM 기반의 지면 클러터 모의기는 다소 단순화된 클러터 모의가 가능하며, DRFM 장비는 고가이다. DSP(digital signal processor)에서 완전 디지털 형태로 수시로 변하는 시나리오 상황에 따라 지면 클러터를 실시간으로 생성한 예는 국내에서 아직 찾아보기 어렵다. DSP에서 완전 디지털 형태로 지면 클러터를 모의할 때(DSP 기반 클러터 모의), 보다 실제에 가깝게 모의할수록 지면 클러터 생성 시간이 더 많이 걸리고, 단순화하면 생성 시간을 줄일 수는 있으나, 레이더 기능 및 성능 검증에 유용하지 못할 수 있다. 따라서 타당한 정확성을 가지면서 실시간으로 지면 클러터를 모의하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 MPRF 파형을 사용하는 항공기 레이더를 위한 DSP 기반의 실시간 모의 지상 클러터 신호 생성 기법을 제안하였다. 전체 클러터 신호 생성 단계는 거리/도플러 축에서 지면 클러터를 모의한 뒤, 도플러 축으로 IFFT(inverse fast Fourier transform)하여 시간 축에서의 지면 클러터 신호를 모의한 것으로, 본 논문에서는 거리/도플러 축에서 지면 클러터를 모의하는 방법을 제안하였다.

II장에서 제안한 거리/도플러 축의 지면 클러터 생성

방법을 기술하고, III장에서는 거리/도플러 축의 전력 신호로부터 거리/시간 영역(거리축)의 복소수 클러터 신호를 생성하는 방법을 소개한다. IV장에서는 제안한 지면 클러터 모의 결과를 분석하고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 거리/도플러 축에서 지면 클러터 모의

본 장에서는 거리/도플러 영역에서 지면 클러터 전력 분포를 모의하는 방법을 설명한다. 첫 번째 방법은 일반적으로 알려져 있는 기법으로, 지면 클러터를 조각으로 나누어 계산하여 조합한다. 이 경우, 정확한 모의 신호를 얻을 수 있지만 생성 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 본 논문에서는 편의를 위하여 방법 1로 정의하여 언급하겠다. 두 번째, 세 번째 방법은 모의 시간을 줄이기 위하여 제안한 방법으로, 첫 번째 방법을 기준으로 정확도와 모의 시간을 비교하였다.

2-1 방법 1(지면 조각에 대해 클러터 전력 계산)

거리/도플러 영역의 지면 클러터 신호는 기본적으로 시스템 잡음 전력이 저장된 거리/도플러 맵을 생성한 후, 각 거리/도플러 셀(cell)에 클러터 전력을 더하여 생성한다. 클러터 전력은 관심영역의 지면을 작은 조각들로 나누어 각 클러터 조각의 전력을 계산하고, 계산된 값은 해당 조각의 중심 위치에 대응되는 거리/도플러 셀에 더하여 지면 클러터의 거리/도플러 신호를 만든다^{[2][3]}. 지면 조각을 거리/도플러 맵 상의 거리/도플러 셀에 정확히 대응되도록 나누면 지면 클러터 모의의 정확도가 높은 반면 지면 클러터를 작게 나누어야 하므로 신호 모의 시간이 길어진다. 따라서 실시간 신호 생성을 위하여 제한 시간에 클러터를 모의하기 위해서는 정확도의 손실을 감수하고, 지면 조각을 크게 쪼개어 클러터 모의를 해야 한다. 즉, 방법 1은 지면 조각을 작게 나누면 모의 정확도를 높일 수 있으나 생성 시간이 길어지고, 지면 조각을 크게 나누면 생성 시간을 단축할 수 있으나 모의 정확도는 떨어진다. 방법 1의 자세한 내용은 참고문헌 [3]의 2장과 appendix A에 기술되어 있다.

2-2 방법 2(클러터 영역 단순 모의)

본 절에서 제안하는 클러터 모의 방법은 클러터 거리/

도플러 특성을 단순화하여 반영한 방법으로 대략적 클러터 분포 영역을 구하고, 해당 영역에 클러터 전력 값을 대입하는 것이다. 방법 1에서와 마찬가지로 먼저 시스템 잡음 전력만 저장된 거리/도플러 맵을 만들어 낸 후, 단순화된 클러터 분포 영역의 클러터 전력 값을 계산하여 해당 영역에 그 계산한 값을 더하여 클러터 맵을 만든다.

MPRF 파형에 대한 거리/도플러 맵에서 주엽 클러터 영역은 보통 도플러 축에서 주엽 클러터 중심 주파수를 중심으로 일정한 폭을 가지면서 전 거리 영역에 퍼져 있다. 한편, 부엽 클러터는 항공기 고도에 의한 AL(altitude line)에 해당하는 거리 축 상의 위치를 시작으로 전 도플러 영역에 펼쳐져 있다. 실제 부엽 클러터 영역은 복잡하게 펼쳐져 있으나, 이를 단순화하기 위하여 거리 축 상의 AL 위치를 시작으로 일정한 폭을 가지면서 맵 상의 전 도플러 영역에 펼쳐지는 것으로 가정한다. 즉, 주엽 클러터와는 반대로 거리 축 상에서 일정한 폭을 가지고 전 도플러 영역에 분포한다.

이 경우, 도플러 축에서 주엽 클러터의 위치와 폭은 다음의 식 (1)과 (2)로 구할 수 있다^[1].

$$f_{MLC} = \frac{2v_a}{\lambda} \cos \psi \tag{1}$$

여기서 f_{MLC} 는 주엽 클러터의 중심 도플러, v_a 는 항공기의 속도, λ 는 송신 파장, ψ 는 항공기의 속도 벡터와 주빔 방향 사이의 각도이다.

$$\beta_{f_{MLC}half} = \begin{cases} \frac{2v_a}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin \psi & \text{Hz, } |\psi| > \frac{\theta}{2} \\ \frac{2v_a}{\lambda} \left[\cos \psi - \cos\left(\psi + \frac{\theta}{2}\right) \right] & \text{Hz, } |\psi| < \frac{\theta}{2} \end{cases} \tag{2}$$

θ 가 주엽 빔의 폭일 경우, $\beta_{f_{MLC}half}$ 는 주엽 클러터 폭의 절반이고, 도플러 축 주엽 클러터 영역은 f_{MLC} 를 중심으로 양쪽으로 $\beta_{f_{MLC}half}$ 폭을 차지한다^[1].

주엽 클러터의 전력은 클러터 전력의 최대치인 주엽 빔의 중심 방향의 레이더 신호 반사파로 결정한다. 주엽 클러터 중심 도플러와 항공기에서 주엽 빔의 중심이 지면과 만나는 지점의 거리에 해당하는 거리/도플러 셀에

대한 클러터 전력은 다음과 같이 구할 수 있다^[2].

$$CNR_c = C_K \frac{G_T G_R \sigma_0 \Delta s}{R_c^4 L} \tag{3}$$

여기에서 C_K 는 레이더 시스템 특성(안테나, 송/수신기, 전송주파수 등)에 따라 결정되는 상수이며, L 은 외부 loss들의 합, G_T 와 G_R 은 주엽 빔 방향의 송신과 수신 안테나 이득이다. R_c 는 항공기에서 주 빔의 중심이 지면과 만나는 지점과의 거리(slant range)이고, σ_0 은 후방 산란 계수로, $\sigma_0 = \gamma \sin(\alpha)$ 로 표현할 수 있고 α 는 grazing angle이다. Δs 는 레이더 신호를 반사를 하는 클러터 패치의 면적으로 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

CNR_c 계산을 위한 클러터 좌표계 및 기하학적 정의는 그림 1과 같다^[2]. 클러터 좌표계 (x, y, z) 는 클러터 계산의 편의를 위하여 관성 좌표계에서의 항공기 속도 벡터 $\vec{V}_a = (v_{x_I}, v_{y_I}, v_{z_I})$ 가 클러터 좌표계의 x-z 평면에 위치하게 한 것이다. 그림 1(a)처럼 회전각도 $\Omega = \tan^{-1}(v_{y_I}/v_{x_I})$ 만큼 관성좌표계 (x_I, y_I, z_I) 를 회전 변환하면 클러터 좌표계가 된다. 클러터 좌표계의 항공기 속도는 $\vec{V}_a = (v_x, v_y, v_z) = (v_{x_I} \cos \Omega + v_{y_I} \sin \Omega, 0, v_{z_I})$ 이다.

그림 1(b)는 클러터 계산에 사용된 기하학적 정의로서, R_a 는 항공기 고도, R_j 는 등가 지구 반지름(기하학적 지구 반지름의 4/3배)이다. 이를 이용하여 그림 1(b)의 c지점(주 빔의 중심이 지면과 만나는 지점)에 대한 항공기의 상대 속력 V_c 등의 관계들을 다음과 같이 얻을 수 있다^[2].

$$\begin{aligned} V_c &= v_x \cos \theta \cos \varphi - v_z \sin \theta \\ R_H^2 &= R_a(2R_j + R_a) \\ \cos \theta &= \frac{R_j}{R_a + R_j} \cos \alpha \\ \sin \theta &= -\frac{R_c^2 + R_H^2}{2R_c(R_a + R_j)} \\ \sin \alpha &= \frac{(R_a + R_j)^2 - R_j^2 - R_c^2}{2R_c R_j} \end{aligned} \tag{4}$$

클러터 패치의 면적 Δs 은 그림 2의 기하학적 정의를 이용하여 식 (5)와 같은 수식을 통해 계산할 수 있다.

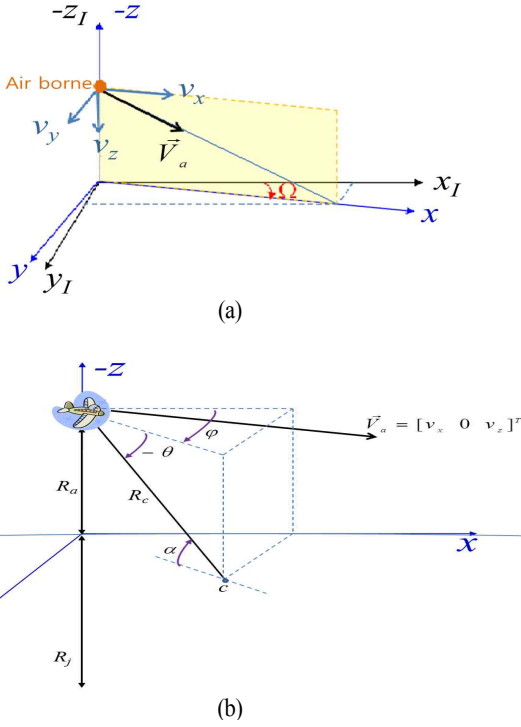


그림 1. 클러터 계산을 위한 (a) 클러터 좌표계 및 (b) 기하학적 정의

Fig. 1. (a) Clutter coordinate system and (b) Geometric definition for clutter calculation.

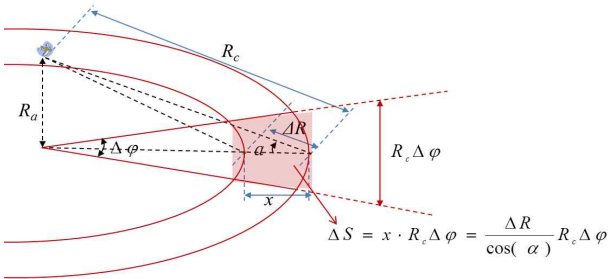


그림 2. 클러터 패치의 면적
Fig. 2. Area of clutter patch.

$$\Delta s = \frac{\Delta R}{\cos \alpha} R_c \Delta \varphi \quad (5)$$

ΔR 는 거리해상도이며, $\Delta \varphi$ 는 도플러 해상도를 기준으로 결정된다. 도플러 해상도 $\Delta f = f_{PRF}/N_p$ 이며, 속도 해상도는 $\Delta v = \lambda \Delta f/2$ 이다. f_{PRF} 는 PRF 값, N_p 는 펄스 수이다. 거리/도플러 맵에서 주엽 클러터 중심 도플

러의 도플러 셀에 대응하는 $\Delta \varphi$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[2].

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \arccos(A_1) - \arccos(A_2), \\ A_1 &= \min \left(1, \max \left(-1, \frac{V_c - \Delta v/2 + v_z \sin \theta}{v_x \cos \theta} \right) \right), \\ A_2 &= \min \left(1, \max \left(-1, \frac{V_c + \Delta v/2 + v_z \sin \theta}{v_x \cos \theta} \right) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

이를 이용하여 식 (3)의 CNR_c 을 다음의 식 (7)과 같이 다시 정리하여 표현할 수 있다.

$$CNR_c = C_K \frac{G_T G_R \gamma \sin \alpha (\Delta R / \cos \alpha) \Delta \varphi}{R_c^3 L} \quad (7)$$

여기서 C_K 및 G_T , G_R , ΔR , L 는 레이더 시스템에서 정해지는 값이며, γ 는 고려하는 지면 특성에 따라 정하는 값, \vec{V}_a 및 θ , φ 는 시험 시나리오에 의해 결정되는 값이다. 여기에서 θ , φ 는 주 빔 시선의 고각과 방위각이고, $\sin \alpha$ 및 $\cos \alpha$, $\Delta \varphi$, R_c 는 식 (4)와 (6)에 의해 결정한다. MPRF 파형의 경우, 거리/도플러 모호성에 의해 한 셀에 다른 거리/도플러를 가지는 서로 다른 클러터 패치들이 fold over 되어 존재할 수 있는데, 이 같은 클러터 전력들은 상대적으로 작으므로 생략하거나 L 값에 반영할 수 있다. 따라서 식 (7)로 계산된 값을 거리/도플러 맵의 주엽 클러터 영역에 더하여 주엽 클러터에 대한 클러터 맵을 형성한다. 이 때 주엽 클러터 영역에 가우시안 형태의 가중치를 곱하여 주엽 클러터 전력 분포 모양이 가우시안 형태가 되도록 할 수도 있다.

부엽 클러터의 위치는 $\text{mod}(R_a, R_{PRI})$ 로 결정할 수 있다. 여기서 $R_{PRI} = v_{LS}/f_{PRF}/2$ 는 한 PRI(pulse repetition interval)에 해당하는 거리이고, $\text{mod}(a, b)$ 는 a 를 b 로 나눌 때의 나머지를 나타내며, v_{LS} 는 광속이다. 부엽 클러터의 폭은 부엽 클러터 전력을 고려하여 결정해야 하며, 먼저 한 PRI 내에서 거리 축 방향에 대한 부엽 클러터 전력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} CNR(r_c) &= C_K \frac{G_s^2 \gamma \sin \alpha \Delta S(r_c)}{r_c^4 L}, \\ r_c &= R_a + n \Delta R, \quad n = 1, 2, \dots, N_s \end{aligned} \quad (8)$$

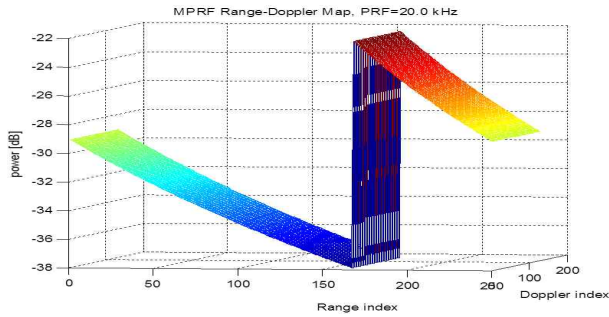


그림 3. 식 (8)에 의해 모의한 지면 부엽 클러터 맵
Fig. 3. Surface sidelobe clutter map by the equation (8).

여기서 G_s 는 안테나 부엽 중 가장 높은 이득 위치의 값이고, $\Delta S(r_c)$ 는 거리 r_c 위치의 클러터 패치의 면적으로서 $\Delta S(r_c) = \pi((r_c + \Delta R/(2\cos\alpha))^2 - (r_c - \Delta R/(2\cos\alpha))^2)$ 이다(면적은 ΔR 폭을 가진 도넛(ring) 모양이다). N_s 는 $\text{ceil}(R_{PR}/\Delta R)$ 이며, $\text{ceil}(a)$ 는 실수 a 값에 가장 근접한 a 보다 크거나 같은 정수를 나타낸다. 식 (8)은 한 거리 셀의 모든 도플러 클러터 전력을 누적하여 계산된 클러터 전력이므로, 이를 도플러 셀의 개수 N_p 로 나눈 $CNR(r_c)/N_p$ 이 해당 거리/도플러 셀의 클러터 전력 값이 된다. 그림 3은 앞서 설명한 방법으로 부엽 클러터를 생성하였을 경우의 3차원 거리/도플러 맵이다.

식 (8)에 의한 부엽 클러터 전력이 잡음 레벨 이상인 값만 거리/도플러 맵에 추가하면 자연스럽게 클러터 맵에서 부엽 클러터 영역의 폭이 형성된다.

2.3 방법 3(클러터 곡선식 이용)

본 절에서는 빠르면서도 세밀한 지면 클러터 모의를 위하여 지면 클러터의 위치 및 영역 경계를 표현하는 곡선식을 유도하고, 이 곡선식을 이용하여 클러터 전력 분포를 표현한 거리/도플러 맵을 만드는 방법을 제안한다.

우선 거리/도플러 축에서 지면 클러터 위치를 표현하는 곡선식을 유도해야 하는데, 그림 1의 지점 c 에 대한 도플러 성분 f_d 에 대한 식 (9)로부터 시작한다.

$$f_d = \frac{2V_c}{\lambda} = \frac{2(v_x \cos\theta \cos\phi - v_z \sin\theta)}{\lambda} \quad (9)$$

식 (4)를 이용하면 식 (9)는 식 (10)으로 표현할 수 있

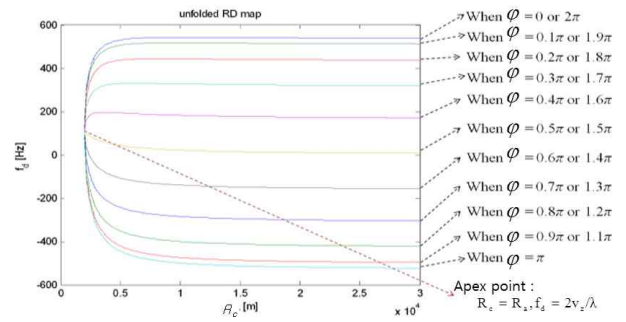


그림 4. 지면 클러터 곡선식과 클러터 위치
Fig. 4. Surface clutter curve and clutter positions.

고, 이 경우 도플러 주파수 f_d 는 R_c 와 ϕ 에 대한 함수이다.

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{v_x R_j}{R_a + R_j} \sqrt{1 - \left(\frac{R_H^2 - R_c^2}{2R_c R_j} \right)^2} \cos\phi + \frac{v_z (R_c^2 + R_H^2)}{2R_c (R_a + R_j)} \right) \quad (10)$$

다른 파라미터인 R_j 는 주어진 값이고, R_a 및 v_x, v_z 는 시나리오에 의해 결정된다. ϕ 를 0에서 2π 까지 변화시키면서 변수 R_c 에 대한 f_d 에 대한 곡선을 그리면 그림 4와 같다. 이를 통해 각 ϕ 별로 클러터 위치를 파악할 수 있다.

우선 주엽 클러터의 위치와 영역을 식 (10)과 주엽 빔의 지면 자국을 이용하여 살펴본다. 주엽 빔은 그림 5와 같은 지면 영역에 미친다. 그림 5에서 θ_{el} 과 ϕ_{az} 는 각각 주엽 빔의 시선 고각과 방위각이다. 지면 자국을 표현하

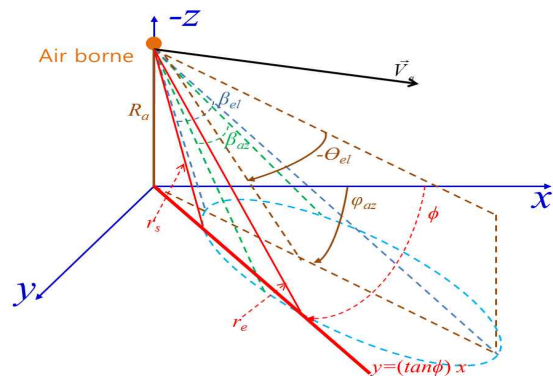


그림 5. 주엽 빔의 지면 자국
Fig. 5. Foot print of main beam.

기 위하여 주엽 빔의 고각 폭 β_{el} 과 방위각 폭 β_{az} 를 이용하여 타원뿔을 수식화하면

$$(z/\tan(\beta_{el}/2))^2 + (y/\tan(\beta_{az}/2))^2 = x^2 \quad (11)$$

이며, 타원뿔을 y 축 중심으로 θ_{el} 만큼, 다시 z 축 중심으로 φ_{az} 만큼 회전하고, z 축 방향으로 $-R_a$ 만큼 이동하면

$$\begin{aligned} & \left(\frac{x \sin \theta_{el} \cos \varphi_{az} + y \sin \theta_{el} \sin \varphi_{az} + (z + R_a) \cos \theta_{el}}{\tan(\beta_{el}/2)} \right)^2 \\ & + \left(\frac{-x \sin \varphi_{az} + y \cos \varphi_{az}}{\tan(\beta_{az}/2)} \right)^2 \\ & = (x \cos \theta_{el} \cos \varphi_{az} + y \cos \theta_{el} \sin \varphi_{az} - (z + R_a) \sin \theta_{el})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

이다. xy 평면위에서의 주엽 빔의 지면자국은 식 (12)에서 $z = 0$ 을 대입하여 식 (13)과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{x \sin \theta_{el} \cos \varphi_{az} + y \sin \theta_{el} \sin \varphi_{az} + R_a \cos \theta_{el}}{\tan(\beta_{el}/2)} \right)^2 \\ & + \left(\frac{-x \sin \varphi_{az} + y \cos \varphi_{az}}{\tan(\beta_{az}/2)} \right)^2 \\ & = (x \cos \theta_{el} \cos \varphi_{az} + y \cos \theta_{el} \sin \varphi_{az} - R_a \sin \theta_{el})^2 \end{aligned} \quad (13)$$

xy 평면위에서 식 (13)의 주엽 빔 지면 자국 곡선과 직선 $y = (\tan \phi)x$ 의 교점 $(x_s, 0), (x_e, 0)$ 을 구하면, 이 부분이 각도 ϕ 에서 주엽 클러터 신호의 경계가 된다. 교점을 구하면 이로부터 각 교점과 항공기까지의 경사거리 $r_s = \sqrt{x_s^2 + ((\tan \phi)x_s)^2 + R_a^2}$ 와 $r_e = \sqrt{x_e^2 + ((\tan \phi)x_e)^2 + R_a^2}$ 를 구할 수 있다. 이로부터 식 (10)에 $\varphi = \phi$ 로 대입하고, 변수 R_c 에 r_s 부터 r_e 까지 ΔR 간격의 거리 값들을 대입함으로써 두 교점과 그 사이의 지점들에 대한 거리/도플러 값을 구할 수 있다. x_s, x_e 는 다음처럼 구한다.

$$x_{s,e} = \frac{-(AB - DE) \pm \sqrt{(AB - DE)^2 - (A^2 + C^2 - D^2)(B^2 - E^2)}}{A^2 + C^2 - D^2} \quad (14)$$

여기서 $A = \frac{\sin \theta_{el} \cos \varphi_{az} + \tan \phi \sin \theta_{el} \sin \varphi_{az}}{\tan(\beta_{el}/2)}$, $B = \frac{R_a \cos \theta_{el}}{\tan(\beta_{el}/2)}$, $C = \frac{-\sin \varphi_{az} + \tan \phi \cos \varphi_{az}}{\tan(\beta_{az}/2)}$, $D = \cos \theta_{el} \cos \varphi_{az} + \tan \phi \cos \theta_{el} \sin \varphi_{az}$, $E = -R_a \sin \theta_{el}$ 이다.

주엽 빔 폭 영역에 해당하는 방위각들의 집합 Φ 에 의한 지면위의 직선식 $y = (\tan \phi)x$ 과 주 빔의 지면 자국 곡선과의 교점들 사이의 지점들(ΔR 간격의 거리 지점)에 대한 전력 값을 계산하면 주엽 클러터에 대한 거리/도플러 맵을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \{\phi_n | \phi_n = \varphi_{az} + n\beta_{az}/2, (n = -n_{az}, -n_{az} + 1, \dots, n_{az})\}, \\ n_{az} &= \text{round}\left(\frac{\beta_{f_{MLC}half}}{(f_{PRF}/N_p)}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 $\text{round}(a)$ 는 실수 a 값의 소수점 첫째자리에 반올림한 정수이다. 즉, 식 (15)에 의한 $(2n_{az} + 1)$ 개의 방위각들에 대해 식 (14)와 식 (10)을 이용하여 ΔR 간격으로 구한 거리/도플러 지점들을 구할 수 있다. 그리고 구한 거리/도플러 지점들에 대한 전력 값은, 식 (4)에서 $\varphi = \phi_n$ 으로 대입 및 해당 방위각 ϕ_n 에서 ΔR 간격으로 구한 거리 지점 값들을 R_c 에 대입하고, 식 (6)과 (7)을 이용하면 구할 수 있다.

부엽 클러터의 위치 및 영역 역시 식 (10)을 이용하여 파악할 수 있는데, 부엽 클러터의 경계가 φ 값이 0 (또는 2π)과 π 일 때의 곡선임을 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 다음은 식 (10)의 수학적 부엽 클러터의 경계의 타당성을 보기 위하여, 2-1절의 방법 1으로 구한 클러터 맵과 식 (10)의 φ 값이 0 과 π 일 때 형성되는 곡선을 함께 표현한 것이다. 그림 6(a)와 6(b)는 서로 다른 환경에서의 클러터를 형성한 결과이며, 각 그림에서 실선 부분이 수식에 의해 구한 경계를 의미한다. 부엽 클러터의 경계 부분이 일치함을 알 수 있고, 이로서 부엽 클러터 경계곡선에서부터 부엽클러터 위치 및 영역을 파악하는데 식 (10)을 이용할 수 있다.

한편, 그림 6에서 먼 거리의 해당하는 곡선 부분이 겹쳐서(folded) 표현되었는데, 부엽 클러터 영역 파악에서 먼 거리에 해당하는 부분은 무시할 수 있음을 볼 수 있다. 부엽 클러터의 전력은 항공기의 고도에 해당하는 거리(AL)에서부터 한 PRI 거리 폭 만큼(R_{PRI})의 영역에 집중되고, 그 보다 먼 거리의 영역의 전력은 무시할 수 있다. 따라서 식 (10)으로 얻은 경계곡선에서부터 ($R_a + R_{PRI}$) 거리까지의 범위를 부엽 클러터 영역으로 파악할 수 있

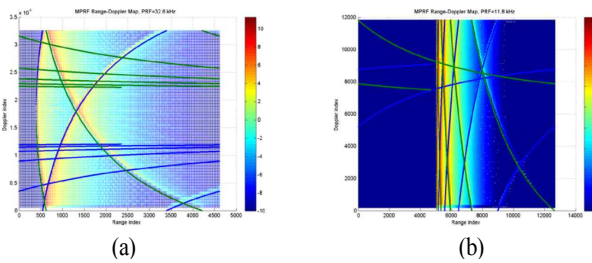


그림 6. 방법 1의 클러터 맵과 경계 곡선의 일치성
 Fig. 6. Conformity of boundary curve (by Eq. (10)) to clutter map (by method 1).

다. 이제 해당 영역의 부엽 클러터 전력을 구하면 클러터 맵을 구할 수 있는데, 먼저 부엽 클러터의 경계곡선에 해당하는 거리/도플러 맵 상의 지점을 구한다. 이 때 지점들은 ΔR 간격으로 R_a 에서 $(R_a + R_{PRI})$ 사이의 값만 구하면 된다. 부엽 클러터의 경계곡선에 해당하는 지점에 부엽 클러터 전력은 식 (4)의 R_c 에 ΔR 간격으로 구한 거리 값을 대입하고 식 (6)과 (7)을 이용하면 구할 수 있다. 부엽 클러터 영역에 대한 전력은 순차적으로 도플러 셀의 위치마다 거리 방향으로 부엽 클러터 영역을 구하고, 이에 해당하는 거리 셀들에게 전력 값을 부여함으로써 얻을 수 있다. 이 때, 각 도플러 셀 위치에서 거리 셀들에게 전력 값을 부여할 때는 거리 방향으로 부엽 클러터 경계의 거리 셀 지점에서부터 $(R_a + R_{PRI})$ 거리까지의 거리 셀들에 대하여

$$k_d e^{0.035(n - n_d)}, n = n_d, \dots, 1 \quad (16)$$

와 같이 exponentially 감소하는 전력 값을 부여한다. k_d 는 해당 도플러 셀 위치의 부엽 클러터 경계 거리 셀 지점에서 부엽 클러터 전력이며, n_d 는 해당 도플러 셀 위치에서 거리 쪽으로 부엽 클러터 경계의 거리 셀 지점에서부터 $(R_a + R_{PRI})$ 거리까지의 거리 셀의 총 개수, n 은 해당 도플러 셀 위치에서 부엽 클러터 영역의 거리 셀들에 대한 색인으로서 $n = n_d$ 는 부엽 클러터 경계 거리 셀 지점, $n = 1$ 는 $(R_a + R_{PRI})$ 거리 셀 지점을 의미한다. 식 (16)은 경험치를 반영한 식으로서 그림 3과 같은 거리 방향으로 부엽 클러터 전력의 평균적 분포 형태를 반영한 것이다.

III. 시간 축에서 모의 지면 클러터 생성

실제 레이더의 반사와 신호는 거리/시간 영역 즉 시간 축의 신호로, 본 장에서는 II장에서 모의한 거리/도플러 영역의 클러터 신호를 이용하여 거리축의 클러터 모의신호 생성 방법을 제안하였다. 전체적인 지면 클러터 모의 방법은 그림 7과 같은 블록도로, 이는 레이더 신호처리 과정을 역으로 수행한 것이다.

레이더 반사와 신호는 복소수 형태의 디지털 데이터로 시간 축에서 샘플링(그림 7의 M_T 데이터) 되며, 펄스 압축을 수행한다. FFT(fast Fourier transform)를 이용한 도플러 처리 과정 후, 복소수 신호 데이터들(그림 7의 M_C 데이터)에 대한 전력(power) 값을 구하여 거리/도플러 전력 맵 형태의 데이터(그림 7의 M_P 데이터)를 얻는다. 그러므로 거리/도플러 맵(전력 맵)에서 그림 7과 같이 역 과정을 거쳐서 시간 축(거리/시간) 디지털 복소수 데이터를 얻을 수 있다.

II장에서 언급한 기법으로 생성한 거리/도플러 클러터 맵은 클러터의 전력 값으로 복소수의 위상 성분은 없고 복소수 크기의 제곱(M_P 데이터) 성분만을 가지고 있다. 즉, IFFT를 이용하여 시간 축에서의 디지털 복소수 데이터를 얻기 위해서는 M_P 데이터를 M_C 데이터로 변화하는 과정이 필요하다. 거리/도플러 영역에서 잡음의 위상은 랜덤(random)으로 표현할 수 있고, 지면 클러터 신호의 위상은 안테나 구조 및 플랫폼 속도, 안테나 빔 방향 등의 레이더 시스템 및 시나리오 상황을 고려하여 결정할 수 있다. 지면 클러터의 위상 값은 레이더 응용 분야(항공기 레이더의 공대지 및 공대해 관련 분야)에 따라 중요한 고

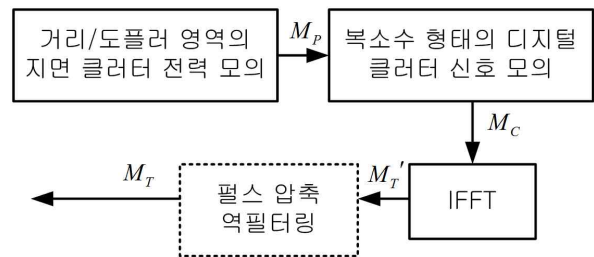


그림 7. 시간 축 모의 지면 클러터 생성의 데이터 흐름
 Fig. 7. Data flow of generation of time-domain simulated surface clutter.

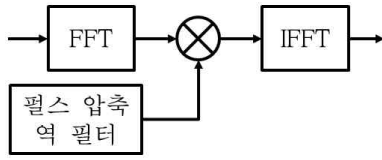


그림 8. 펄스 압축 역 필터링
Fig. 8. Inverse filtering for inverse pulse compression.

려 대상이 될 수 있으나, 항공기 레이더의 공대공 분야는 대부분 지면 클러터의 위상 성분이 쓰이지 않는다. 따라서 본 논문에서는 지면 클러터의 위상 성분을 잡음과 같이 랜덤으로 고려한다. M_P 전력 데이터 형태에서 M_C 복소수 데이터 형태로 식 (17)을 이용하여 변환한다.

$$M_C(n) = \sqrt{M_P(n)} e^{j2\pi r}, \quad n = 1, \dots, N_M, \quad (17)$$

여기서 N_M 은 거리/도플러 영역 데이터의 총 셀 수, $M_P(n)$ 은 거리/도플러 전력 맵의 n 번째 셀의 값, r 은 0과 1 사이의 uniform distribution을 가지는 랜덤 값, $M_C(n)$ 은 복소수 데이터 M_C 의 n 번째 값이다.

이렇게 구한 복소수 데이터 M_C 를 도플러 방향으로 IFFT를 수행함으로써 M_T' 데이터를 얻을 수 있다.

레이더 신호처리 과정에 펄스 압축 과정이 있는 경우 이를 고려해야 하는데, 그림 7의 점선 블록의 펄스 압축 역 필터링(inverse filtering) 과정이 시간 축 클러터 신호 모의에 필요하다. 그림 7의 M_T' 시간 축 클러터 신호는 펄스 압축된 신호로, 펄스 압축 전의 수신 데이터 M_T 를 얻기 위해서 펄스 압축 역 필터링 처리를 수행한다. 펄스 압축 역 필터링 과정은 그림 8과 같다.

펄스 압축에 사용하는 필터의 도플러 응답이 $H(\Omega)$ 일 경우, 펄스 압축 역 필터는 $1/H(\Omega)$ 로, 펄스 압축의 효과를 상쇄하기 위하여 펄스 압축 필터로 나누어준다. 이는 펄스 압축 과정을 역으로 수행하는 것으로 볼 수 있다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 제안한 지면 클러터 생성 방법의 성능 검증을 위하여 모의실험 결과를 분석한다. 표 1은 모의실험에 사용된 레이더 파라미터 값이다.

4.1 거리/도플러 영역에서의 클러터 모의

표 1. 모의실험을 위한 레이더 파라미터

Table 1. Radar system parameters.

파라미터	값	파라미터	값
중심 주파수	10 GHz	펄스폭	7.68 usec
PRF	20 kHz	펄스 개수	128
샘플링 주파수	5 MHz	항공기 고도	5,000 m
빔폭	7.5 degree	항공기 속도	300 m/s

항공기가 고도 5,000 m에서 속도 300 m/s으로 수평 비행하며, 주빔(mainbeam) 방향이 방위각 30° , 고각 -10° 일 때 거리/도플러 영역에서의 클러터 신호를 모의하였다. 균일한 표면의 지면 클러터를 가정하였고, 후방 산란 계수 모델은 $\gamma = 0.3$ 인 constant gamma model^[3]을 사용하였다. 그림 9은 방법 1을 사용한 결과로, 그림 9(a)는 지면을 여러 개의 조각으로 세밀하게 나누어 모의한 결과이고, 그림 9(b)는 신호 생성 시간을 줄이기 위하여 보다 큰 단위로 지면을 쪼개어 모의한 결과이다. 그림 9(b)는 지면 클러터 모의가 그림 9(a)보다 거친(coarse) 것을 볼 수 있다. 반면, 모의 시간은 MATLAB을 사용할 경우 그림 9(a)의 경우와 비교하여 1/187배로 줄일 수 있다. 따라서 방법 1의 경우는 클러터 신호 모의의 정확성 요구도에 따라 모의 시간을 고려하여 적절한 크기로 지면을 나누는 작업이 필요하다.

방법 2를 사용하여 클러터를 모의한 결과는 그림 10과 같다. 그림 10의 모의는 그림 9과 유사하지만 부엽 클러터 묘사가 섬세하지 못한 것을 알 수 있다. 하지만 레이더의 기능 및 성능 시험에서는 방법 2를 사용하여 모사한 클러터만으로 충분히 시험을 수행할 수 있다. MATLAB 코드를 사용한 경우 그림 9(b)의 모의 시간과 비교하여

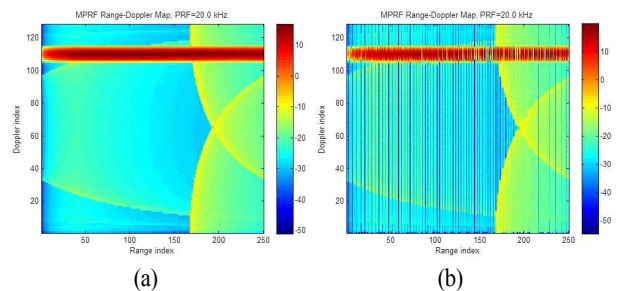


그림 9. 방법 1에 의해 모의한 지면 클러터 맵
Fig. 9. Surface clutter map generated by the method 1.

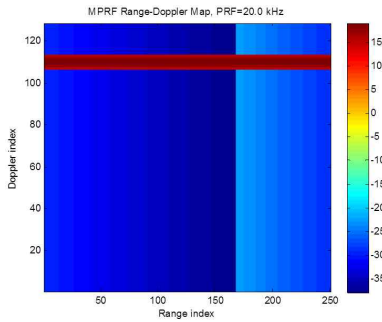


그림 10. 방법 2에 의해 모의한 지면 클러터 맵
Fig. 10. Surface clutter map simulated by the method 2.

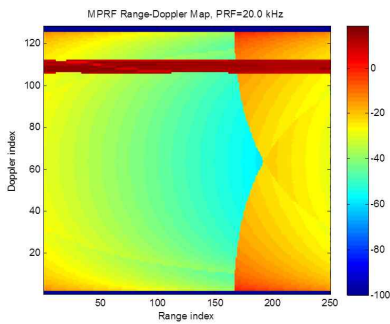


그림 11. 방법 3에 의해 모의한 지면 클러터 맵
Fig. 11. Surface clutter map simulated by the method 3.

그림 10의 모의 시간은 1/50배 정도로 빠른 모의 시간을 보여준다.

그림 11은 방법 3을 이용하여 클러터를 모사한 결과로 그림 10에 비하여 섬세한 클러터 특성을 보여준다. 이는 그림 9(a)와 비교하여도 클러터 특성을 잘 반영하고 있다. 방법 3은 모의시간 측면에서 방법 2에 비하여 8배 정도 더 많은 시간이 걸리지만 방법 1(그림 9(b))에 비해서는 1/6배 정도의 시간이 필요하다. 방법 3은 어느 정도 섬세하게 묘사하면서도 빠른 클러터 모의시간을 보여준다.

4-2 거리/시간 영역의 클러터 모의

본 절에서는 III장에서 제안한 방법으로 거리/시간 영역에서의 클러터신호를 모의하였다. 앞 절(4-1)과 동일한 레이다 파라미터와 동일한 항공기 시나리오 상에서, 주빔 방향이 방위각 50°, 고각 -30°인 경우 클러터 신호는 그림 12와 같다.

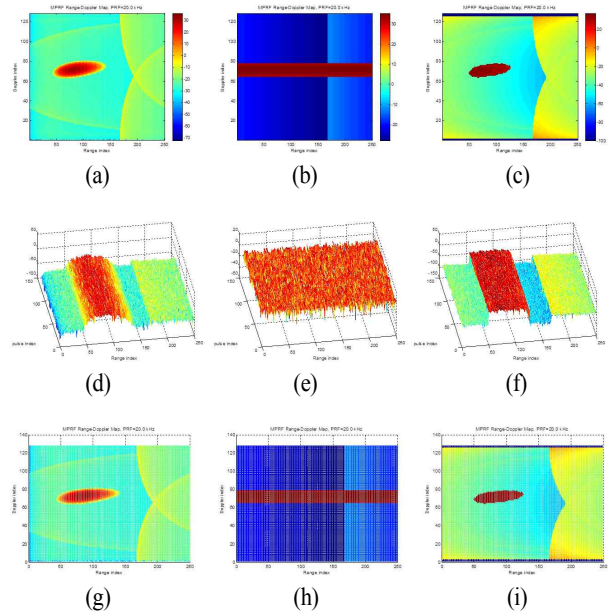


그림 12. 각 방법에 의한 지면 클러터 전력 맵 모의와 시간 축 클러터들의 비교

Fig. 12. Surface clutter power maps by each method, and comparing simulations of time-domain clutterers.

그림 12는 왼쪽 열(column)부터 순서대로 1번 방법부터 3번 방법까지의 결과이다. 위에서부터 차례로 첫 번째 행(row)은 지면 클러터의 거리/도플러 영역의 전력 맵이고, 두 번째 행은 식 (17)을 이용하여 거리/도플러 영역의 전력 맵을 진폭 및 위상을 가지는 형태로 변환 후 IFFT한 거리/시간 영역의 클러터 신호이다. 그림은 모의 신호의 전력 크기를 거리, 펄스, 크기(dB) 축에 3차원으로 표현한 것이다. 세 번째 행은 모의 결과의 신뢰성을 확인하기 위한 과정으로 두 번째 행의 결과를 다시 도플러 처리하여 거리/도플러 전력 맵을 얻은 것이다. 각 방법의 첫 번째 행의 결과와 세 번째 행의 결과(그림 12(a)와 12(g), 12(b)와 12(h), 12(c)와 12(i))에서 알 수 있듯이, 클러터 전력 맵으로부터 얻은 거리/시간 영역 클러터 모의 신호가 지면 클러터를 합당하게 모사하고 있다. 그림 12(d)에서 거리 방향에 대한 주엽 클러터와 부엽 클러터의 위치 및 크기가 잘 나타나 있고, 도플러 처리에 의한 클러터 전력 맵(g)도 (a)의 정보를 그대로 표현하고 있다. 그림 12의 (d)와 (f)가 거의 유사한 것은 (a)와 (c)가 거의 유사하게 모의

되었기 때문이다. 그림 12의 (e)가 (d) 및 (f)와 다른 것은 방법 2에 의한 클러터 전력 분포 모의가 다른 방법들에 비해 상대적으로 정밀하지 못하여 주엽 클러터의 분포가 조금 다르게 묘사되었기 때문이다. 그림 12의 (b)에서 주엽 클러터가 해당 도플러 영역의 모든 거리 셀에 높은 전력을 가지면서 분포하기 때문에 (e)에서 거리/시간의 전 영역에 클러터가 균일하게 분포하는 것으로 묘사되었다.

그림 13은 펄스 압축 역필터링을 묘사하기 위한 모의 실험으로, 그림 12와 동일한 시나리오 상에서 방법 3으로 거리/도플러 영역의 클러터 전력 맵을 형성한 후, 거리/시간 영역의 클러터 신호를 모의한 것이다. 그림 13의 (a)는 그림 12의 (f)와 동일한 결과로 펄스 압축된 거리/시간 축 클러터 신호이다. 그림 13의 (b)는 해당하는 데이터에 펄스 압축 역 필터링 처리를 하여 펄스 압축이 되기 전의 거리/시간 축 클러터 신호를 구하여 신호 전력 크기를 3차원으로 표현한 것이다. 그림 13의 (b)의 결과를 다시 역으로 펄스 압축 처리를 하면 그림 13의 (c)인데, 이는 그림 13(a)와 동일한 결과로 펄스 압축 역 필터링의 타당성을 확인할 수 있다. 그림 13의 (d)는 그림 13의 (c)에 해당하는 데이터에 도플러 처리를 하여 얻은 거리/도플러 전력 맵을 나타낸 것이며, 그림 12의 (i)와 동일한 것을 볼 수

있다. 이를 통해 그림 13의 (b)에 해당하는 펄스 압축이 되기 전의 시간 축 클러터 신호 모의가 제대로 된 것임을 확인할 수 있다.

4.3 모의 지면 클러터 생성 기법들의 비교

전체적인 클러터 모의 과정은 II장에서 설명한 거리/도플러 지면 클러터 전력 맵 방법에 따라 생성시간이 달라진다. 표 2는 그림 7의 전체 클러터 모의 과정을 통한 신호 생성 시간을 각 방법에 따라 측정한 결과이다. 4.1절의 모의실험과 동일한 시나리오에서 intel core i5 3.2 GHz CPU를 가진 PC에서 MATLAB을 이용하여 모의 신호를 생성하였다.

MATLAB 코드로 구현된 알고리즘을 실제 구현 시 C 언어 등으로 변환 및 코드 최적화를 거쳐 DSP(digital signal processing) 보드에 타게팅(targeting)하면 시간을 1/10 이하 수준으로 줄일 수 있다. 따라서 방법 2는 충분히 실시간 구현이 가능하고, 방법 3 또한, 코드 최적화를 거치면 실시간 지면 클러터 모의에 사용할 수 있다.

방법 1에서 그림 9(b)와 같은 거친 클러터 모의는 섬세함을 포기하고 거칠게 클러터를 모의할수록 모의 신호 생성 시간을 줄일 수 있다. 그러나 너무 거친 클러터 모의는 클러터 모의 신호의 유용성을 떨어뜨리므로 방법 1에서 모의 신호 생성시간을 줄이기는 힘들다. 방법 1에 의한 지면 클러터 모의는 실시간 클러터 모의보다는 비실시간으로 지면 클러터를 상세하고, 실제와 아주 유사하게 모의하여 비실시간 클러터 모의를 이용한 레이더 성능 시험 등이 가능한 상황에서 사용할 수 있다.

방법 2에 의한 지면 클러터 모의는 섬세하지는 못하지만, 클러터 분포 영역 및 클러터 전력 등 큰 특징을 유용

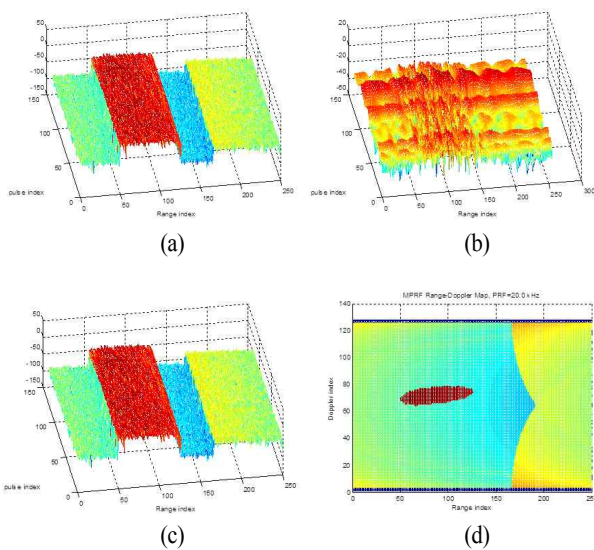


그림 13. 펄스 압축을 고려한 시간 축 모의 클러터의 예
Fig. 13. Example of time-domain simulated clutter considering pulse compression.

표 2. 시간 축 지면 클러터 모의 신호 생성 시간
Table 2. Generation time for time-domain simulated surface clutter signal.

클러터 전력 맵 생성 방법	모의 신호 생성 시간
방법 1(그림 9(a), 섬세한 모의)	75.067초
방법 1(그림 9(b), 거친 모의)	0.401초
방법 2	0.008초
방법 3	0.064초

하게 사용할 수 있도록 모의하고 있다. 무엇보다도 단시간에 클러터 모의 신호를 생성할 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 방법 2는 지면 클러터를 빠르게 모의하면서 레이더의 성능보다는 기능 시험을 위한 용도로 유용하게 사용할 수 있다.

방법 3에 의한 지면 클러터 모의는 시나리오 상황에 따라 레이더 성능 시험에 이용할 수 있을 만큼 어느 정도 섬세하게 지면 클러터를 모의하며, 모의 신호 생성 시간도 실시간 구현이 가능할 수준으로 최적화 할 수 있다.

V. 결 론

항공기 레이더의 시험 장비 등에 이용할 수 있는 실시간 지면 클러터 모의 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 디지털 복소수 데이터 형태로 거리/시간 영역의 지면 클러터 신호를 모의하는 기법이다. 3가지 방법의 거리/도플러 영역의 지면 클러터 모의 방법을 제시하였고, 이중 실시간 구현 가능한 방법 2와 3을 제안하였다. 또한, 이를 이용하여 거리/시간 영역으로 변환하는 기법을 제안하였다.

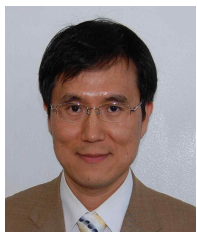
제안한 방법 2와 3을 항공기 레이더의 기능 및 성능 시험을 위한 모의신호발생기 구현에 이용하면, 시험 시나리오에 따라 수시로 변하는 지면 클러터를 기능 및 성능 시험이 가능할 정도로 섬세하게 모의하여 실시간으로 발생시킬 수 있다.

논문에서 제시한 3가지 지면 클러터 모의 방법은 항공기 레이더 시험 상황 및 용도에 따라 적절하게 선택하여 사용할 수 있다.

References

- [1] 김태형, 김은희, 이성원, "MPRF 파형을 사용하는 항공기 레이더에서 탐색/추적을 위한 실시간 PRF 선택", 한국전자과학회논문지, 25(10), pp. 1050-1061, 2014년 10월.
- [2] 김태형, 김은희, 김선주, "항공기 위상 배열 레이더에서 시간 영역의 지상클러터 생성 모델", 한국전자과학회논문지, 24(7), pp. 730-736, 2013년 7월.
- [3] Guy Morris, Lindar Harkness, *Airborne Pulsed Doppler Radar*, 2nd edition, Artech House, Inc., 1996.

김 태 형



1999년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)
 2010년 11월: 국방과학연구소 연구원
 2010년 12월~현재: LIG넥스원(주) ISR 연구센터 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 패턴인식 등

문 현 욱



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2014년 3월~현재: LIG넥스원(주) ISR 연구센터 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시험장비

이 성 원



2009년 2월: 아주대학교 정보컴퓨터공학
(공학석사)
2014년 2월: 아주대학교 컴퓨터공학과 (공
학박사)
2014년 1월~현재: LIG넥스원(주) ISR 연
구센터 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더
시스템, 무선통신

양 은 정



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)
2006년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)
2011년 1월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] 레이더 신호처리

유 성 현



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과
(공학석사)
2005년 2월~2008년 3월: LG전자 MC사
업무
2008년 4월~현재: LIG넥스원 ISR 연구센
터 선임연구원
[주 관심분야] 능동위상배열레이더 시스
템 설계