

# Low Grazing Angle에서의 코히어런트 해상 클러터 시뮬레이션

## Simulation of Low-Grazing-Angle Coherent Sea Clutter

최상현 · 송지민 · 전현무\* · 정용식 · 김종만\*\* · 홍성원\*\* · 양훈기

Sang-Hyun Choi · Ji-Min Song · Hyeon-Mu Jeon\* · Yong-Seek Chung ·

Jong-Mann Kim\*\* · Seong-Won Hong\*\* · Hoon-Gee Yang

### 요 약

낮은 관측각에서의 해상 클러터 반사계수의 진폭 확률밀도 함수는 각 클러터 패치별 평균 세기가 서로 다르므로 Rayleigh 분포가 아닌 compound Gaussian 분포로 가정하는 것이 일반적이다. 반사계수를 구성하는 텍스처(texture) 성분은 Gamma 분포 및 MNLT(memoryless nonlinear transformation)를 이용해서 발생시키지만, 스펙클(speckle) 성분 시뮬레이션에 대해서는 정형화된 방법은 없다. 수신 신호의 스펙트럼을 Gaussian 형태의 도플러 스펙트럼 형태로 모델링한 후 스펙클 성분을 발생시킨 기존 S. Watt 방법을 소개한 후 본 논문에서 새롭게 제안한 방법을 제시하였다. 제안 방법은 이퀄라이저(equalizer) 필터를 사용해서 인접 클러터 영향을 최소화한 후, 클러터 공분산 행렬에 대해 Cholesky 분해를 통해서 스펙클 성분을 생성하는 방법으로써 제안 방법의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션을 통해 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션(correlation) 함수 관점에서 제안한 방법과 기존 방법을 비교한다.

### Abstract

The probability density function(PDF) for the amplitude of the reflectivity of low-grazing-angle sea clutter has generally been modeled by a compound-Gaussian distribution, rather than by the Rayleigh distribution, owing to the intensity variation of each clutter patch over time. The texture component forming the reflectivity has been simulated by combining Gamma distribution and memory-less nonlinear transformation(MNLT). On the other hand, there is no typical method available that can be used to simulate the speckle component. We first review Watt's method, wherein the speckle is simulated starting from the Doppler spectrum of the received echoes that is modeled as having a Gaussian shape. Then, we introduce a newly proposed method. The proposed method simulates the speckle by manipulating a clutter covariance matrix through the Cholesky decomposition after minimizing the effect of adjacent clutter patches using an equalizer. The feasibility of the proposed method is validated through simulation, wherein the results from two methods are compared in terms of the Doppler spectrum and the correlation function.

Key words: Sea Clutter, Compound-Gaussian, Speckle, Reflectivity, Cholesky, Covariance Matrix

### I. 서 론

클러터 모델링은 클러터 억제 알고리즘 개발이나 CFAR

「이 연구는 국방과학연구소(계약번호 UD170020FD)의 연구비 및 2018년 광운대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

\*한화시스템(Naval MFR, Hanwha Systems)

\*\*국방과학연구소(Agency of Defence Development)

· Manuscript received April 19, 2018 ; Revised June 18, 2018 ; Accepted August 18, 2018. (ID No. 20180419-052)

· Corresponding Author: Hoon-Gee Yang (e-mail: hgyang@kw.ac.kr)

(constant false alarm rate) 탐지기 설계 등을 위해 선행되어야 할 필수적인 과정이다. 이상적인 모델링 방법은 모델링 함수에 여러 파라메타가 포함되어 있어 실제 환경을 잘 표현할 수 있고, 다양한 환경을 시뮬레이션할 수 있다면 더욱 효율적일 것이다.

해상 클러터는 지상 클러터와는 달리 클러터 패치(patch)의 반사계수가 시간에 따라 변하는 복잡성이 존재하며, 레이더의 관측각과 해상도와 같은 레이더 환경에 따라 다르게 모델링될 수도 있다. 전통적으로 낮은 관측각과 낮은 해상도를 가진 기존의 레이더에서는 K분포로 모델링하였다. 그러나 높은 관측각과 높은 해상도로 발전함에 따라 해상클러터 모델링은 KA 분포, KK 분포, Weibull-Weibull 분포 등 다양한 모델링 방법이 제시되었고 최근 들어서는 다중채널 환경에서의 해상클러터 모델링 방법에 대한 연구 결과들이 발표되고 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 해상 클러터의 반사계수는 클러터 평균 세기를 나타내는 텍스처 성분과 도플러 특성을 반영하는 스펙클 성분으로 구성되어 있는 것으로 모델링되었다. 일반적으로 텍스처 성분의 시뮬레이션을 위해서는 MNLT를 이용해서 correlated Gamma 분포를 발생시키는 방법이 주로 이용되었다<sup>[5]</sup>. 코히어런트(coherent) 레이더에 의한 코히어런트 신호처리를 위해서는 클러터의 위상 성분, 즉 스펙클 정보가 포함된 반사계수의 시뮬레이션이 필요하다. G. Davidson은 수신 신호의 코릴레이션 함수의 특성을 가지는 반사계수를 발생시키기 위해 IIR 필터를 이용하였다<sup>[6]</sup>. S. Watt는 측정 데이터로부터 수신 신호의 도플러 스펙트럼이 Gaussian 함수로 모델링이 가능하며, Gaussian 함수의 평균값 및 함수의 폭이 텍스처에 영향을 받는 것을 확인하였고, 이를 이용해서 스펙클을 시뮬레이션 하는 방법을 제시하였다<sup>[7],[8]</sup>.

본 논문에서는 수신 신호로부터 측정된 클러터 도플러 스펙트럼이 주워졌을 때 이것으로부터 스펙클을 생성할 수 있는 시뮬레이션 방법을 제시한다. 이를 위해 텍스처는 안다고 가정하였다. 본 논문의 구성은 II절에서 반사계수가 포함된 수신 신호를 모델링하고, III절에서 스펙클을 발생시키는 방법을 기존 대표적인 S. Watt 방법과 비교해서 설명한다. 그리고 IV절에서 생성된 반사계수에 대해서 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수 관점에서 제시한 방법과 기존 방법을 비교한다.

## II. 수신 신호 모델링

### 2-1 기저대역 신호

낮은 관측각에 위치한 레이더가 클러터 성분만 존재하는 표적 공간(target area)에 펄스를 연속해서 송수신하는 해상 환경을 생각하자.  $l$ 번째 펄스로부터 수신된 신호  $g^l(t)$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$g^l(t) = \sum_i x_i^l s(t - \tau_{i,l}) \exp(j2\pi v_{i,l} t) + n(t) \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

여기서  $s(t)$ 는 송신펄스 파형,  $L$ 은 펄스의 개수를 나타내고  $x_i^l, \tau_{i,l}, v_{i,l}$ 는 각각  $i$ 번째 레인지 bin(range bin)에 존재하는 클러터의 반사계수, 왕복 지연시간, 도플러 주파수를 나타내며,  $n(t)$ 는 잡음을 나타낸다. 본 논문에서는 수신신호로부터 반사계수  $x_i^l$ 을 추정하고자 하므로 환경을 단순화해서 레이더가 정지된 경우를 고려하였다. 이 경우, 레이더와 클러터 간의 도플러  $v_{i,l}$ 은 0으로 가정할 수 있고  $\tau_{i,l}$ 은  $l$ 에 관계없이 상수가 된다. 여기서  $v_{i,l}$ 은 평균 도플러이며, 클러터 반사계수에 대한 코릴레이션 특성을 주는 클러터 도플러는  $x_i^l$ 에 포함되어 있다.

수신 신호  $g^l(t)$ 는 레인지 게이팅(range gating) 주파수  $f_s$ 로 샘플링되면 샘플 신호  $g^l[n] = g^l(n/f_s)$ 가 된 후 정합 필터를 통과한다. 이때  $i$ 번째 레인지 bin의 신호  $\mathbf{r}_i$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r}_i = \sum_{n=-(N-1)}^{(N-1)} \mathbf{x}_{i+n} z_s[n] \quad (2)$$

여기서  $N$ 은  $f_s$ 로 샘플링된 송신신호에 포함된 샘플 개수,  $\mathbf{r}_i \in \mathbb{C}^{L \times 1} = [r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^L]^T$ 을 나타내며,  $\mathbf{x}_{i+n}$ 은 복소 반사계수 벡터로  $\mathbf{x}_{i+n} \in \mathbb{C}^{L \times 1} = [x_{i+n}^1, x_{i+n}^2, \dots, x_{i+n}^L]^T$ 을 나타낸다.  $z_s[n]$ 은 송신신호의 자기상관도(auto-correlation) 함수로써 다음과 같이 정의된다.

$$z_s[n] = \sum_{j=0}^{(N-1)} s[j] s^*[j-n], \quad |n| < N \quad (3)$$

## 2-2 이차원 반사계수

반사계수  $x_i^l$  는 하나의 클러치 패치를 구성하는 서로 독립적인 다수의 산란점들의 복소 산란계수들의 합이므로 중앙 값 정리(central limit theorem)에 의해 반사계수의 절대값을 의미하는 클러터 진폭은 Rayleigh 분포를 갖는 것으로 모델링할 수 있다. 해양 클러터의 경우, 각각의 클러터 패치에 존재하는 산란점들의 개수가 서로 다르므로 반사계수의 절대값(또는 절대값 제곱)의 평균, 즉 반사계수의 평균 세기는 클러터 패치별로 다르다<sup>[10]</sup>. 이를 근거로 해상 클러터의 반사계수를 compound Gaussian 분포로 모델링하였다. 이를 고려해 보면  $x_i^l$  는  $\sqrt{T_i^l} a = \sqrt{T_i^l} (a_I + ja_Q)$  로 표현될 수 있으며, 여기서  $T_i^l$  는  $l$  번째 펄스의  $i$  번째 레인지 bin에 해당하는 텍스처, 즉 클러터 패치의 평균 세기를 나타내고,  $a$  는 복소수 스펙클을 나타낸다. 또한 스펙클의 in-phase 성분 및 quadrature 성분은 평균이 0이고, 분산이 1/2인 complex Gaussian 분포로 나타낼 수 있다. 인접한 레인지 bin의 반사계수 값들 간의 코릴레이션은 거의 영(zero)에 가깝지만 동일 레인지 bin의 시간에 따른 반사계수 값들 간의 코릴레이션은 명백히 존재하며 이때의 코릴레이션 특성 함수가 클러터 도플러 스펙트럼 형태를 결정짓는다. 실측 데이터 분석을 통해서 텍스처 간 코릴레이션이 더해진 correlated Gamma 분포발생을 위해서 MNLT가 널리 사용되고 있다<sup>[11]</sup>. 스펙클은 텍스처와 독립적인 값을 갖는 것이 아니고, 텍스처와 연관이 있어서 텍스처와 무관하게 독립적으로 생성시킬 수는 없다. III절에서는 S. Watt가 사용한 기법 및 본 논문에서 제안하는 스펙클 생성방법을 제시한다.

## III. 스펙클 생성 알고리즘

식 (2)의  $\mathbf{r}_i$  를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 얻어진 도플러 스펙트럼으로부터 스펙클을 생성하는 과정을 S. Watt가 제시한 방식과 비교하면서 제시한다. 반사계수의 텍스처 값은 스펙클에 비해 느리게 변하는 특성을 가지고 있기 때문에 수십 PRI(pulse repetition interval) 구간 동안에는 텍스처는 상수로 가정할 수 있다. 즉, 이 구간 내에서의 도플러 스펙트럼의 형태를 결정짓는 스펙클의 코

릴레이션 특성은 텍스처와 무관하며, 본 논문에서는 이러한 근거를 바탕으로 텍스처가 주어졌다고 가정하였다.

S. Watt는 측정에 의해 얻어진 도플러 스펙트럼의 통계적 특성을 분석한 후 수신 신호의 도플러 스펙트럼이 통계적 특성을 만족하도록 클러터 스펙클 성분을 시뮬레이션 하였다<sup>[12][13]</sup>. 이를 위해 실수함수이고 Gaussian 형태의 도플러 스펙트럼을 역푸리에 변환해서 얻어진 값들을 가중치로 갖는 FIR 필터에 평균이 0이고, 분산이 1/2인 Gaussian 분포를 갖는 in-phase 성분, quadrature 성분으로 구성된 복소수를 통과시켜 얻어진 필터 출력 값으로 스펙클을 발생시켰다. Gaussian 함수의 역푸리에 변환도 Gaussian 함수이므로 이때 사용된 필터 가중치 값  $w[l]$  은 다음과 같다.

$$w[l] = \exp \left[ -j2\pi m_f \frac{l}{f_r} \right] \exp \left[ -\left( \frac{2\pi s l}{f_r} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서  $f_r$  은 PRF(pulse repetition frequency)를 나타내고,  $m_f$ ,  $s$  는 레이다의 운영 주파수, 편파, 파도의 진행방향 대비 레이다가 바라보는 각도에 의해 정의되고, 두 파라미터 모두 랜덤 변수 값을 가지며, 구체적인 형태는 참고문헌 [6]에 제시되어 있다. S. Watt 방식의 근거는 필터입력으로 적용된 Gaussian 복소 입력은 임펄스에 가까운 코릴레이션 특성이 있으므로 필터 출력은  $w[l] * \delta[l]$  이 되며, convolution 정리에 의해 주파수 도메인에서 필터출력은 도플러 스펙트럼과 같게 될 것으로 간주한 것이다.

다음은 본 논문에서 제안하는 방식이다. 텍스처는 앞에서 언급한 바와 같이 수십 PRI 정도의 시간 구간에서는 상수라고 가정할 수 있다. 이때  $i$  번째 레인지 bin의 클러터 반사계수 벡터  $\mathbf{x}_i$  의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_c$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$\mathbf{R}_c = \langle \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H \rangle = T_i \langle \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^H \rangle = T_i \mathbf{R}_s \quad (5)$$

여기서  $H$  는 hermitian 연산을 나타내고,  $\mathbf{a}_i$  는  $i$  번째 레인지 bin의 스펙클 벡터로서  $l$  번째 펄스의 스펙클이  $a_i^l$  라면  $[a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^L]^T$  로 나타낼 수 있다.  $\mathbf{R}_s$  는 스펙클의 공분산 행렬을 나타낸다. 식 (5)에 의해서 클러터의 도플러 스펙트럼과 스펙클의 도플러 스펙트럼은 상수배 차이를 빼고는 동일한 형태를 가진다. 즉, 수십 PRI 정도의 시간

구간에서 클러터의 도플러 스펙트럼으로부터 스펙클의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_s$ 를 시뮬레이션할 수 있다. 수신 신호의 도플러 스펙트럼에 대한 통계적 특성이 주어져 있으므로 위너-킨친 정리(Weiner-Khinchine theorem)에 의해 도플러 스펙트럼을 역푸리에 변환하여 자기상관함수를 얻을 수 있으며, 이를 이용해서  $\mathbf{R}_s$ 를 구할 수 있다<sup>[10]</sup>. 제안 방법에서는 공분산 행렬이  $\mathbf{R}_s$ 가 되는 신호 벡터를 생성하면 되므로  $\mathbf{R}_s$ 를  $\mathbf{L}\mathbf{L}^H$ 의 형태로 Cholesky 분해한 후  $\mathbf{L}$ 에 uncorrelated complex Gaussian 분포를 갖는 랜덤변수를 element로 갖는 벡터  $\mathbf{c}$ 를 곱하여 얻어진 벡터, 즉  $\mathbf{L}\mathbf{c}$ 에 의해 스펙클을 생성할 수 있다. 왜냐하면  $\mathbf{L}\mathbf{c}$  벡터의 공분산 행렬은  $\mathbf{L}\mathbf{c}(\mathbf{L}\mathbf{c})^H = \mathbf{L}\mathbf{c}\mathbf{c}^H\mathbf{L}^H \approx \mathbf{L}\mathbf{I}\mathbf{L}^H = \mathbf{R}_s$ 에 의해서 여전히  $\mathbf{R}_s$ 가 되기 때문이다. 만약 펄스의 개수, 즉  $\mathbf{c}$ 의 element 개수가 적은 경우 element 간에 코릴레이션이 존재해서  $\mathbf{c}\mathbf{c}^H$ 를 identity matrix  $\mathbf{I}$ 로 근사화할 수 없다. 펄스의 개수는 임의로 크게 할 수 없으므로  $\mathbf{c}$ 를 여러 번 반복발생해서 평균값, 즉  $\mathbf{c} = \frac{1}{M}(\mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2 + \dots + \mathbf{c}_M)$  ( $\mathbf{c}_m$ 는  $m$ 번째 발생한  $\mathbf{c}$  벡터)가 되도록 한다면  $\mathbf{c}\mathbf{c}^H$ 은  $\mathbf{I}$ 와 유사해질 것이다.

S. Watt가 통계적 특성을 조사한 도플러 스펙트럼의 경우, 식 (2)의  $\mathbf{r}_i$  벡터 element에 대해 푸리에 변환하여 얻었다. 만약 송신 신호가 임펄스 함수이고, 그 신호를 수신할 수 있다면 수신된 신호만을 가지고 클러터를 모델링할 수 있으나, 이러한 송신신호를 생성하는 것은 매우 넓은 대역폭을 필요로 한다. 식 (2)를 보면 정합필터에 의해 펄스 압축(pulse compression)은 이루어지나, 압축된 펄스, 즉 식 (2)의  $z_s[n]$ 이 임펄스 함수는 아니기 때문에  $\mathbf{r}_i$ 는  $i$ 번째 레인지 bin의 클러터 패치뿐만 아니라 인접한 클러터 패치 성분들의 영향이 포함될 수 있다. 이러한 영향을 억제하기 위해 윈도우(windowing)를 사용할 수 있으나, 윈도우를 적용할 경우 부엽성분의 크기를 낮출 수 있으나 펄스 압축된 신호의 피크 퍼짐 현상이 더 크게 발생할 수 있다. 그러므로 인접 패치의 영향 제거를 위해서 FIR 필터 형태의 zero-forcing 이퀄라이저를 이용하였다. Zero-forcing 이퀄라이저 임펄스 응답이  $e[n]$ 이라면  $e[n]$ 은  $z_s[n]*e[n] \simeq \delta[n]$ 를 만족해야 하며, 이때 이퀄라이저 출력  $\hat{x}_i^l$ 은 근사적으로  $x_i^l$ 과 거의 같아진다. 이퀄라이저

탭 개수는 레인지bin 크기로 측정된  $z_s[n]$ 의 피크 퍼짐 현상 정도에 따라 정해진다.

위 과정을 추가 요약하자면 다음과 같다.

- 1) Zero-forcing 이퀄라이저를 통과하여 얻어낸  $\hat{x}_i^1, \hat{x}_i^2, \dots, \hat{x}_i^L$ 으로부터 획득한 도플러 스펙트럼을 역푸리에 변환하여 자기 상관함수를 얻는다.
- 2) 획득한 자기 상관함수를 통해서 공분산행렬  $\mathbf{R}_s$ 를 구성한다.
- 3)  $\mathbf{R}_s$ 를 Cholesky 분해하여 얻어진  $\mathbf{L}$ 과 uncorrelated Gaussian 분포를 element로 갖는  $\mathbf{c}$ 를 곱함으로써 스펙클을 생성한다.

#### IV. 시뮬레이션

제시된 방법과 기존 방법(S. Watt 방법)을 비교하기 위해 다음의 절차에 의해 시뮬레이션을 수행했다. 우선 S. Watt 논문에서 제시된 과정을 따라 최초 텍스처와 스펙클, 즉 최초 반사계수를 설정하였다. 이어서 수신신호 및 정합필터를 통과한 신호를 시뮬레이션하였고 여기서 얻어진 결과로부터 III절에 설명한 기존 방법 및 제시된 방법에 따라 각각 스펙클을 발생시켰다. 마지막으로 텍스처를 안다고 가정하고 각각의 방법에 따라 반사계수를 얻은 후 코릴레이션 함수와 도플러 스펙트럼을 얻고, 최초 반사계수에 의한 코릴레이션 함수와 도플러 스펙트럼과 비교하였다. 표 1은 시뮬레이션을 위해 사용된 레이다 파라메타이다.

그림(그림 1~5)에서 ‘Original’이라고 나타낸 커브는 각종 해상 환경과 레이다 파라메타를 설정했을 때 주어지는 도플러 스펙트럼의 통계적 특성에 기반 해서 얻어진 최초 반사계수에 대한 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션

표 1. 레이다 파라메타  
Table 1. Radar parameters.

Parameter	Value
Carrier frequency	9 GHz
PRF	5 kHz
Pulse bandwidth	100 MHz
Pulse duration	10 $\mu$ sec

함수이다. 즉, 송신 펄스가 임펄스라 가정하면 식 (1)의 수신 신호  $g'(t)$ 는 반사계수 그 자체가 되며, 그때의 스펙트럼 및 코릴레이션 함수를 나타낸다. 여기서 해상환경과 레이더 파라메타에 따라 달라지는 도플러 스펙트럼의 통계적 특성은 스펙트럼의 폭과 평균 도플러 주파수 그리고 스펙트럼 진폭을 의미하며, 본 논문에서는 해상상태가 7, 파도가 치는 방향 대비 레이더가 파도를 바라보는 방향은  $31^\circ$ , 빔폭(beam width)은  $1.8^\circ$ , 편파는 VV, 관측각은  $1.27^\circ$ 인 상황을 고려했으며, 이들 값들에 근거해서 시뮬레이션을 진행하였다. 스펙클에 비해 상대적으로 느리게 변하는 임의의 한 레인지 bin에서의 텍스처를 발생시키기 위해 64개 PRI에 해당하는 시간마다 Gamma 확률분포를 갖는 랜덤변수를 발생시켰고, MNLT를 적용해서 발생시킨 텍스처들간에 코릴레이션이 있도록 하였다. 또한 correlated Gamma 랜덤 값들의 중간 값들에 대해서는 S. Watt가 사용한 선형 보간법(linear interpolation)을 적용해서 매 PRI의 텍스처 간에 코릴레이션을 주었다.

그림(그림 1~5)에서 'After matched filter'로 표시한 커브는 주어진 반사계수로부터 수신 신호를 시뮬레이션하고, 다시 정합 필터를 통과시킨 후 얻어진 결과로써 식 (3)의  $z_s[n]$  함수가 임펄스 함수가 아니므로 인접 클러터 패치의 영향이 포함되어 있다. 즉, 그림 1을 통해 실제 클러터 반사계수와 정합필터를 통과한 수신신호간의 스펙트럼이 다름을 확인할 수 있다. 그림 2에서 'Conventional'

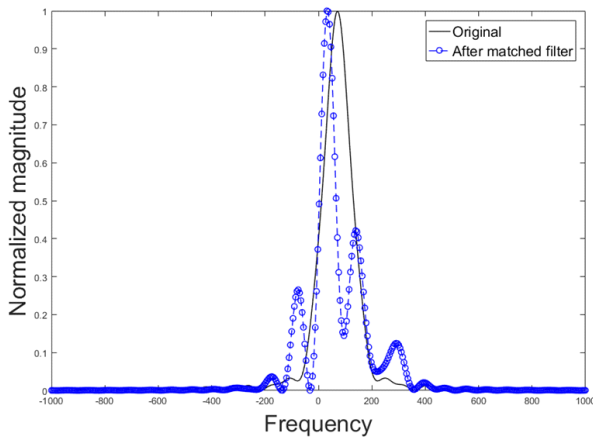
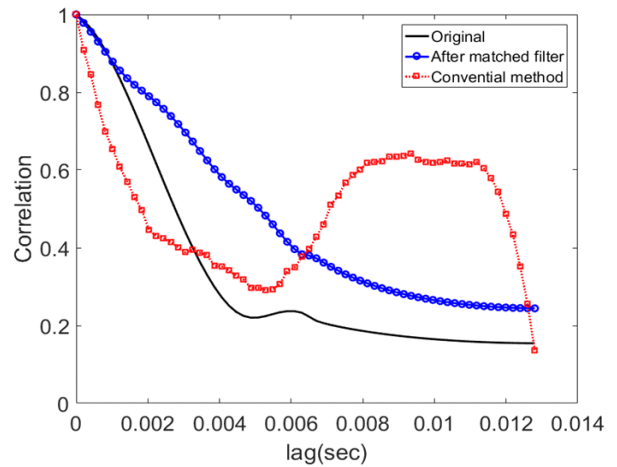
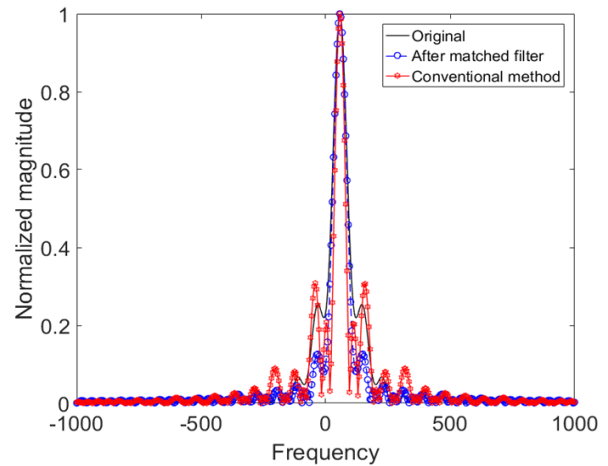


그림 1. 수신신호의 도플러 스펙트럼  
Fig. 1. Doppler spectrum of received signal.

로 표시한 커브는 정합 필터를 통과한 출력에 대해서 S. Watt 방식에 따라 스펙클을 시뮬레이션한 후 알고 있다고 가정한 텍스처 값의 진폭 즉,  $\sqrt{T_i}$ 를 곱해서 최종 반사계수를 얻은 후 이 반사계수에 대해 푸리에 변환을 적용해서 얻어진 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수를 나타낸다. 그림 3에서 'Proposed'로 표시한 커브는 정합 필터를 통과한 출력에 대해서 III절에서 제시한 제안 방식에 따라 스펙클을 시뮬레이션한 후 알고 있다고 가정한



(a) 시간에 따른 코릴레이션 계수  
(a) Correlation coefficient versus time



(b) 도플러 스펙트럼  
(b) Doppler spectrum

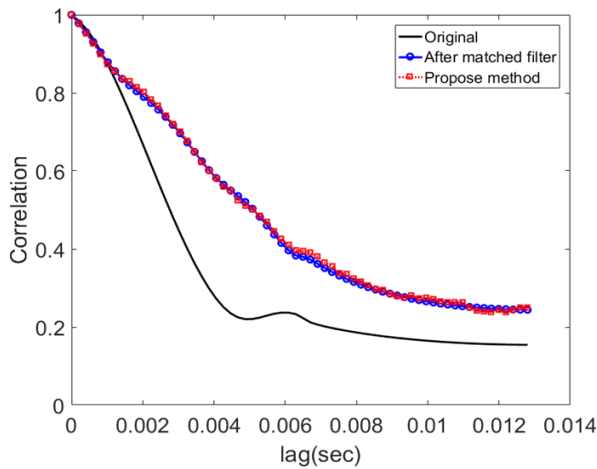
그림 2. S. Watt 방식의 결과  
Fig. 2. Results for S. Watt's method.

$\sqrt{T_i}$ 를 곱해서 최종 반사계수를 얻은 후 이 반사계수에 대한 푸리에 변환을 적용해서 얻어진 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수를 나타낸다. 그림 2 및 그림 3에서 정합 필터를 통과한 후 신호에 대한 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수가 ‘Original’로 표시된 커브와 약간의 차이가 발생하는 것은 인접 클러터의 영향을 제거하지 못했기 때문이다.

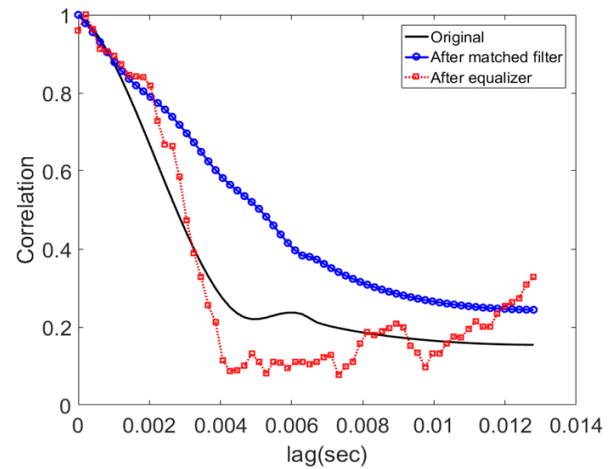
그림 2에 나타난 S. Watt 방법 결과를 보면 코릴레이

션 시간이 짧아지고, 그로 인해 왜곡된 스펙트럼이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3에서 보여준 제시된 방법의 결과는 S. Watt 방법에 비해 정합 필터 출력 결과와 매우 유사하지만 ‘Original’ 커브와는 여전히 차이가 있었다.

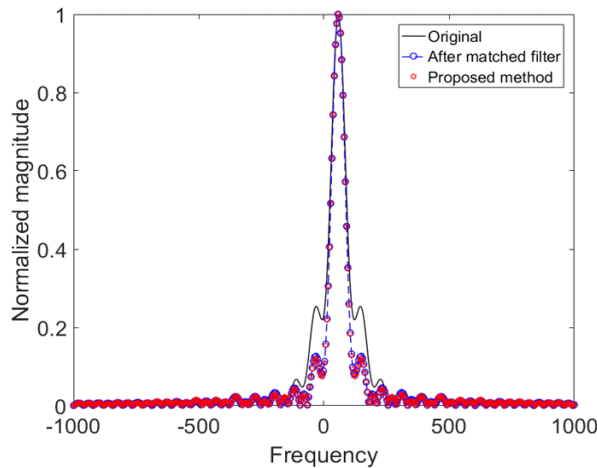
그림 4 및 그림 5에는 ‘Original’ 커브와 ‘Proposed’ 커브 간의 오차를 보정하기 위해 이퀄라이저로 인접 클러터 패치의 영향을 최소화한 후 제안 방법을 적용해서 얻어진 결과이다. 설계된 이퀄라이저는 LFM 송신파형이 필



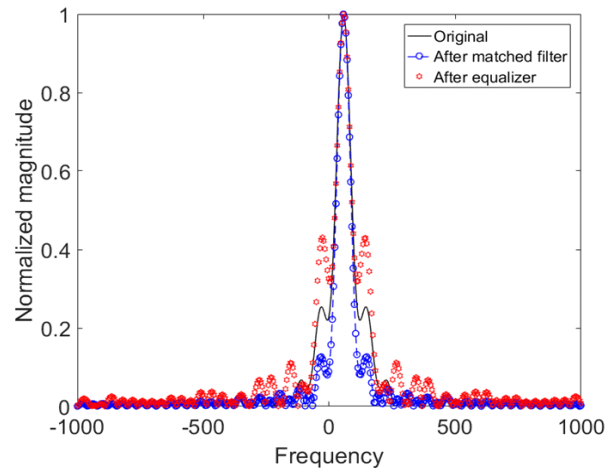
(a) 시간에 따른 코릴레이션 계수  
(a) Correlation coefficient versus time



(a) 시간에 따른 코릴레이션 계수  
(a) Correlation coefficient versus time



(b) 도플러 스펙트럼  
(b) Doppler spectrum

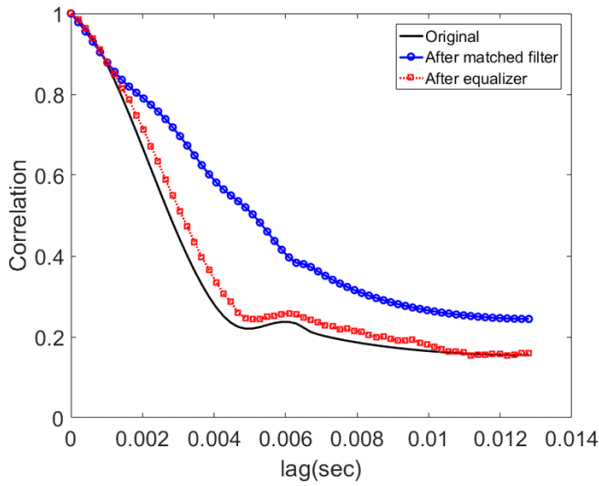


(b) 도플러 스펙트럼  
(b) Doppler spectrum

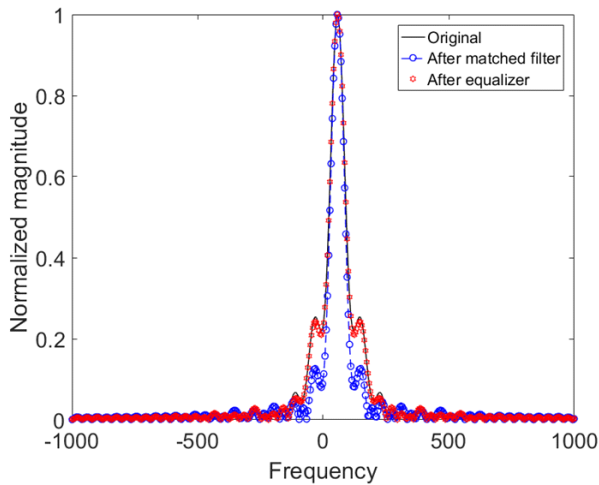
그림 3. 제안한 방식의 결과  
Fig. 3. Results for proposed method.

그림 4. 이퀄라이저가 적용된 제안 방법(경우 1)  
Fig. 4. Proposed method using equalizer(case 1).

스 압축되었을 때 발생하는 피크 이외의 성분을 피크 성분 대비 약 12 dB 차이 나게 억제하기 위해 11개의 탭을 사용하였다.  $R_s$ 를 Cholesky 분해되어 생성한 매트릭스  $L$ 에  $c$  벡터를 곱하는 과정에서 그림 4의 경우는 10번 발생시킨  $c$  벡터들의 평균을, 그림 5는 1,000번 발생시킨  $c$  벡터들의 평균을 사용한 경우이다. 그림 4의 결과는  $c$  벡터 element들이 i.i.d(independent and identically distributed)



(a) 시간에 따른 코릴레이션 계수  
(a) Correlation coefficient versus time



(b) 도플러 스펙트럼  
(b) Doppler spectrum

그림 5. 이퀄라이저가 적용된 제안 방법(경우 2)

Fig. 5. Proposed method using equalizer(case 2).

하지 않은 경우,  $c$ 가 스펙클의 공분산 행렬  $R_s$ 에 영향을 미쳐 왜곡된 클러터 성분이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 그림 5를 보면 제시된 방법으로 얻어진 결과는 정합 필터 결과보다도 오히려 'Original'로 표시된 커브와 유사하였다. 이는 수신 신호 및 송신 펄스 파형만 주어졌다면 제시된 방법을 통해서 'Original' 스펙클이 갖는 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 특성을 가진 스펙클을 생성할 수 있음을 보여준다.

## V. 결 론

본 논문에서는 수신 신호의 도플러 스펙트럼이 주어진 경우, 도플러 스펙트럼으로부터 코히어런트 반사계수를 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다. 인코히어런트 클러터 시뮬레이션을 위한 텍스처 성분의 발생은 Gamma 분포 및 MNLT를 이용해서 일반적으로 발생시키므로 주어졌 있는 것으로 가정하였고, 텍스처에 곱해지는 복소 스펙클 성분을 발생시킬 수 있는 시뮬레이션 방법을 새롭게 제안하였다. 제시된 방법의 평가를 위해 기존 S. Watt 방식으로 스펙클을 발생시킨 후 제안 방법의 결과와 비교하였다. 성능 비교를 위해 최초 반사계수의 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수와 두 방법으로 얻은 반사계수의 도플러 스펙트럼 및 코릴레이션 함수를 비교하였다. 비교 결과, 제안한 방법이 최초 반사계수의 통계적 특성과 훨씬 유사하게 클러터 반사계수를 시뮬레이션할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] Y. Dong, "Distribution X-band high resolution and high grazing angle sea clutter," *Electronic Warfare and Radar Division Defense Science and Technology Organization*, Australia, DSTO-RR-0316, 2006.
- [2] M. Farshchian, F. L. Posner, "The Pareto distribution for low grazing angle and high resolution X-band sea clutter," in *2010 IEEE Radar Conference*, Washington, DC, May 2010, pp. 789-793.
- [3] S. Kemkemian, J. F. Degurse, V. Corretja, and R. Cottion,

- "Sea clutter modelling for space-time processing," in *2016 17th International Radar Symposium(IRS)*, Krakow, 2016, pp. 1-6.
- [4] 정재훈, 이재민, 윤재혁, 신희섭, "항공용 레이더를 이용한 잠망경 탐지 MMTI 신호처리 기법 연구 및 성능 분석," *한국전자과학회논문지*, 28(8), pp. 661-669, 2017년 8월.
- [5] R. J. A. Tough, K. D. Ward, "The correlation properties of gamma and other non-Gaussian processes generated by memoryless nonlinear transformation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 23, pp. 3075-3084, 1999.
- [6] G. Davidson, "Simulation of coherent sea clutter," *IET Radar Sonar Navigation*, vol. 4, no. 2, pp. 168-177, Apr. 2010.
- [7] S. Watts, "Modeling and simulation of coherent sea clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 3303-3317, Oct. 2012.
- [8] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2005.
- [9] S. P. Sira, D. Cochran, A. Papandreou-Suppappola, D. Morrell, W. Moran, and S. Howard, "A subspace-based approach to sea clutter suppression for improved target detection," in *2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, Nov. 2006, pp. 752-756.
- [10] N. D. Sidiropoulos, F. Gini, R. Chellappa, and S. Theodoridis, *Academic Press Library in Signal Processing: Volume 2: Communications and Radar Signal Processing*, New York, NY, Academic Press, 2014.
- [11] G. V. Weinberg, L. Gunn, "Simulation of statistical distributions using the memoryless nonlinear transform," *Defence Science and Technology Organisation*, Australia, DSTO-TR-2517, 2011.
- [12] K. D. Ward, R. J. A. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, Institution of Engineering and Technology, London, Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [13] S. Kemkemian, L. Lupinski, R. Cotton, and S. Watts, "Performance assessment of multi-channel radars using simulated sea clutter," in *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, Arlington, VA, May 2015, pp. 1015-1020.
- [14] S. Watts, L. Rosenberg, "Coherent radar performance in sea clutter," in *2015 IEEE Radar Conference*, Johannesburg, 2015, pp. 103-108.

## 최 상 현



2011년 3월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)  
 2017년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 무선통신 시스템, 레이더 신호처리

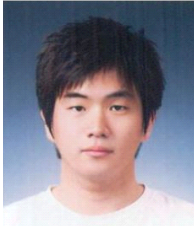
## 송 지 민



2011년 3월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)  
 2017년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 무선통신 시스템, 레이더 신호처리



## 전 현 무



2012년 3월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
 2017년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)  
 2018년 9월~현재: 한화시스템 레이더 PGM 연구소 전문연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템 설계/성능 분석

## 홍 성 원



2010년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학사)  
 2012년 2월: 경북대학교 모바일통신공학과(공학석사)  
 2017년 2월: 경북대학교 전자공학부(공학박사)  
 2017년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리

## 정 용 식



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)  
 2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수  
 2006년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수  
 [주 관심분야] 전자파수치해석 및 EMI/EMC, Radar 신호처리

## 양 훈 기



1985년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1987년 5월: 미국 SUNY at Buffalo University 전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 1992년 4월: 미국 SUNY at Buffalo University 전기컴퓨터공학과 (공학박사)  
 1993년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수  
 [주 관심분야] 무선통신 시스템, UWB, RFID, 스펙트럼공학, 레이더 신호처리

## 김 중 만



2002년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2005년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원  
 [주 관심분야] 레이더 시스템 및 탐지/추적