

논문 2017-54-5-11

컴팩트 HF 레이더를 이용한 선박 검출 및 추적 연구를 위한 Range-Doppler Map 생성 시뮬레이터

(Range-Doppler Map generating simulator for ship detection and tracking research using compact HF radar)

이 영 로*, 박 상 욱**, 이 상 호***, 고 한 석****

(Younglo Lee, Sangwook Park, Sangho Lee, and Hanseok Ko[©])

요 약

낮은 비용으로 넓은 관측 범위를 갖는다는 장점으로 최근 해양 감시 시스템 개발을 위해 HF 레이더를 이용한 선박 검출 및 추적 연구가 수행되고 있다. HF 레이더를 이용한 해양 감시를 위해 수많은 선박 관측과 추적 알고리즘이 개발되었지만, 각 연구에 사용된 데이터는 선박의 이동 경로와 크기 등 대상 선박에 대한 조건이 다르기 때문에 동등한 조건에서 그 성능을 비교할 수 없다. 본 논문에서는 선박 크기와 이동 경로에 따른 데이터를 생성할 수 있는 컴팩트 HF 레이더 기반 데이터 생성 시뮬레이터를 제안한다. 이를 통해 생성된 데이터를 이용하면 동일한 선박 조건에서 성능 비교가 가능할 것이다. 실험에서는 제안하는 시뮬레이터에서 생성된 데이터와 SeaSonde HF 레이더 사이트에서 실제 관측된 데이터를 비교하였다. 비교 결과, 제안하는 시뮬레이터를 사용하여 생성된 데이터와 실제 환경에서 획득된 데이터가 유사함을 확인할 수 있었다. 그러므로 선박의 크기 및 이동 경로에 따라 생성된 시뮬레이션 데이터를 사용함으로써, 알고리즘의 검출 및 추적 성능을 각각 비교, 분석 할 수 있을 것이다.

Abstract

Due to the merit of having wide range with low cost, HF radar's ship detection and tracking research as maritime surveillance system has been recently studied. Many ship detection and tracking algorithms have been developed so far, however, performance comparison cannot be conducted properly because the states of target ships (such as moving path, size, etc.) differ from each study. In this paper, we propose a simulator based on compact HF radar, which generates data according to the size and moving path of target ship. Given the generated data with identical ship state, it is possible to conduct performance comparison. In order to validate the proposed simulator, the simulated data has been compared with real data collected by the SeaSonde HF radar sites. As a result, it has been shown that our simulated data resembles the real data. Therefore, the performance of various detection or tracking algorithms can be compared and analyzed respectively by using our simulated data.

Keywords: 컴팩트 HF 레이더, 해양 감시, 선박 검출, 선박 추적, 시뮬레이터

I. 서 론

최근 해양 감시 시스템에서는 항만 안전과 관리를 위

* 학생회원, ** 정회원, **** 평생회원, 고려대학교 전기전자 공학과(Dept. of Electronic Engineering, Korea Univ.)

*** 정회원, 군산대학교 해양학과(Dept. of Ocean Engineering, Kunsan Univ.)

© Corresponding Author(E-mail : hsko@korea.ac.kr)

Received : October 10, 2016 Revised : April 18, 2017

Accepted : April 27, 2017

해 레이더, 잠수정, 무인 수상정 등과 같은 다양한 플랫폼들을 사용하고 있다^[1~3]. 레이더 중에서 3-30 MHz 주파수 대역을 사용하는 HF (High Frequency) 레이더는 낮은 비용으로 넓은 관측 범위를 가질 뿐 아니라 상시 구동이 가능하기 때문에 불법 어선을 관측하고 추적하는 데 사용할 수 있는 플랫폼으로 주목을 받고 있다. 이에 따라, HF 레이더를 이용한 선박 검출/추적 알고리즘이 연구되고 있다.^[4~6] HF 레이더 시스템은 수신기의 구조에 따라 위상 배열과 컴팩트 타입으로 분류된다.

위상 배열 HF 레이더는 여러 수신기를 등 간격으로 서로 평행하게 설치하기 때문에 넓은 설치 공간이 필요하다. 반면, 콤팩트 HF 레이더는 한 몸체에 직교하는 세 개의 안테나 수신기 구조를 갖기 때문에 해안 절벽과 같이 좁은 공간에도 설치할 수 있다. 그러므로 최근 콤팩트 HF 레이더를 이용하여 해양 환경 및 선박 관측에 관한 여러 연구들이 수행되고 있다^[7~9]. 선박 관측에서 주요 쟁점은 불법 조업 선박 탐지와 항만 안전을 위한 선박 관측이다. 따라서 원거리에서 선박자동식별장치 정보가 없는 선박을 관측함으로써 해안가 보안 감시망에 관측되지 않는 사건을 방지할 수 있다^[10~14].

이러한 목적을 달성하기 위해 HF 레이더를 이용한 여러 선박 검출 및 추적 알고리즘이 개발되었다^[15~16]. 하지만, 각 연구에서 사용된 실제 데이터에서는 선박의 이동 경로 및 크기 등 대상 선박에 대한 조건이 다르기 때문에 동등한 조건에서 성능을 비교할 수 없다. 따라서 각각의 알고리즘의 성능을 비교할 수 있는 기준을 세우기 위해 선박의 조건에 따라 데이터를 생성하는 시뮬레이터가 필요하다.

본 논문에서는 기존 연구에서 다루지 않은 여러 가지 중요한 쟁점들이 고려된 시뮬레이터를 제안한다. 첫 번째 중요 쟁점은 해류 관측 목적에 최적화된 HF 레이더로 비롯된다. 하나의 일례로서 HF 레이더의 CPI (Coherent Processing Interval) 는 대개 256 초로 설정된다. 상대적으로 긴 시간 간격 때문에 움직이는 대상 선박은 특정 점이 아닌 흐릿한 도플러 주파수 관측을 갖는다.

두 번째 쟁점은 대상 선박의 위치에 따라 신호의 크기 응답이 각 안테나마다 달라지는 콤팩트 HF 레이더의 구조로 비롯된다. 신호의 크기를 기반으로 대상의 방위를 추정하기 때문에, 콤팩트 HF 레이더는 위상 배열보다 정확도가 낮다^[17]. 제안된 시뮬레이터로 생성한 데이터와 실제 콤팩트 HF 레이더에서 관측한 데이터를 비교하기 위해 통계적 분석을 수행한다. 그리고 두 번째 쟁점에 관하여 성능을 평가하기 위하여 시간에 따라 이동하는 선박 신호를 분석하였다.

본 논문은 2장 본론에서는 HF 레이더 관측 데이터, 시뮬레이터, 시뮬레이터에서 사용된 신호 모델, 3장 실제 데이터와 시뮬레이터 데이터의 비교 실험, 4장 결론으로 구성된다.

II. 본 론

1. Range-Doppler Map 과 시뮬레이터

가. Range-Doppler Map (RDM)

대부분의 HF 레이더 연구에서 출력의 전형적인 형태는 2차원 Range-Doppler Map (RDM) 이다. RDM은 2차원의 이미지로 간주할 수 있으며 도플러 축과 거리 축, 그리고 크기값을 갖는다. 도플러 축은 물체의 이동 속도, 거리 축은 레이더 사이트와 물체의 거리, 그리고 크기값은 수신되는 신호의 세기를 의미한다. 그림 1(a)는 실제 레이더 사이트의 모노-폴 안테나에서 수집한 RDM의 예시를 나타내며 그림 1(b)는 제안된 시뮬레이터에서 생성한 RDM을 나타낸다.

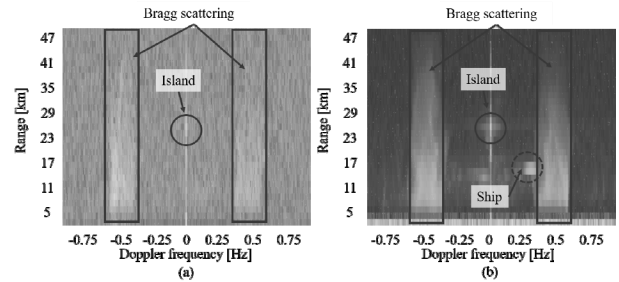


그림 1. 콤팩트 HF 레이더에서 수집된 Range-Doppler Map; (a) 실제 데이터 (b) 시뮬레이터 데이터

Fig. 1. Range-Doppler Map obtained by compact HF radar; (a) real data (b) simulator data.

그림 1(b)에서와 같이 시뮬레이터에서 생성한 RDM은 실제 RDM과 마찬가지로 해류에 의해 발생하는 브래그 산란 효과 (Bragg scattering effect), 고정된 물체에 해당하는 점 신호와 도플러 흐림 효과를 갖는 선박 신호를 갖는 것을 확인할 수 있다.

나. 시뮬레이터

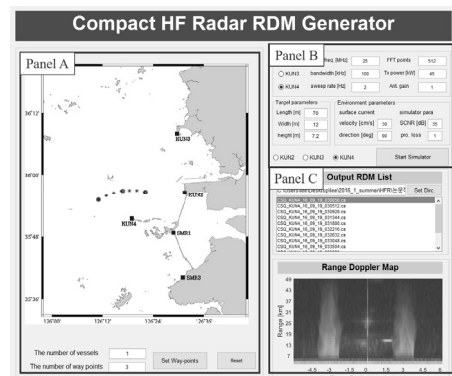


그림 2. 제안된 시뮬레이터의 레이아웃

Fig. 2. Layout of the proposed simulator.

그림 2는 본 논문에서 제안된 시뮬레이터의 레이아웃을 나타낸다. 그림과 같이 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface: GUI)는 세 가지 패널로 이루어진다. 패널 A는 관심 있는 지역을 보여줄 뿐 아니라 대상 선박의 이동 경로, 속도, 가속도를 설정하는 인터페이스를 제공한다. 레이더 변수, 대상 변수 그리고 환경 변수와 같은 제안된 레이더 신호 모델의 변수들이 패널 B에 입력된다. 마지막 패널 C에서는 패널 A에서 정의된 선박 경로의 각 시간 단계 RDM들을 표시한다. 표 1은 본 논문에서 자세히 다뤄질 패널 B에 들어갈 변수들을 나타낸다.

표 1. 제안된 시뮬레이터에서 요구되는 변수 목록
Table1. Parameter list which is required in proposed simulator.

Radar Operating Param.		Environmental Param	
Carrier frequency	f_c	Surf. cur. velocity	v_s
Bandwidth	BW	Surf. cur. direction	ρ_s
Sweep rate	f_w	SCNR	$SCNR$
Tx. power	P_t	Target ship Param.	
Tx. ant. gain	G_t	Length	L
Rx. ant. gain	G_r	Width	W
# of FFT points	N	Height	H
Angular resolution	$\Delta\theta$	[Parameters Unit]	
Default setting		Time [sec]	Length [m]
Elec. permittivity	73.73	Freq. [Hz]	Angle [deg]
Elec. conductivity	4.45	Power [Watt]	

2. 데이터 모델

본 논문에서 수신기에서 수집된 레이더 신호의 모델은 대상 선박 신호 s_t , 브래그 산란을 갖는 표층 해류를 나타내는 수면 클러터 s_c , 그리고 배경 잡음인 b 로 이루어진다^[18]. 모델은 다음과 같다.

$$x^i(R, t) = \sum_{\theta} s_t^i(R, \theta, t) + s_c^i(R, \theta, t) + \gamma_i b(R, t), \quad 0 \leq t \leq CPI \quad (1)$$

여기서 i 는 안테나의 인덱스, R 은 레이더 사이트와 반사 물체 사이의 거리, 그리고 t 는 시간 순서 인덱스이다. 잡음의 양을 결정하기 위해 척도 인자 γ_i 를 잡음 항에 추가한다. 척도 인자 γ_i 는 식 (2)에서처럼 선박 신호의 RMS와 선박 신호와 원치 않는 신호의 비율인 신호 대 잡음비 (SNR)에 따라 결정된다.

$$\gamma_i = \frac{\tilde{s}_{RMS}^i}{2} 10^{-SNR/20}, \quad (2)$$

$$\text{where } \tilde{s}_{RMS}^i = \sqrt{\frac{1}{CPI} \sum_{t=0}^{CPI} [s_t^i(R, t)]^2}$$

식 (1)의 각 요소는 크기 항과 위상 항으로 표시된다. 윈도우잉 (Windowing) 과 고속 푸리에 변환 (FFT: Fast Fourier Transform) 을 수행하여 x 로부터 RDM을 얻을 수 있다.

가. 신호의 세기 모델링

수신된 신호의 세기 P_r 은 전파 손실을 고려한 레이더 수식에서 구할 수 있다^[19].

$$P_r(R, \sigma) = P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma |L(R)|^2 / (4\pi)^3 R^4 \quad (3)$$

여기서 λ 는 송신된 신호의 파장, σ 는 레이더 단면적 (RCS) 그리고 $L(R)$ 은 거리에 따른 전파 손실이다. 본 논문에서는 전파 손실 모델을 적용하기 위해, Ground WAVE (GRWAVE)를 적용하였다^[20]. 이때 필요한 유전율과 전도율을 포함하여, 식 (3)의 나머지 변수들은 표 1에 정리되어 있다.

나. 컴팩트 HF 레이더 안테나 응답 모델링

앞서 언급하였듯이 컴팩트 HF 레이더의 일반적인 물리적 구조는 그림 3처럼 서로 직교하는 3개의 안테나로 구성된다. 각각의 안테나는 원거리의 가정 하에서 평면파를 수신한다. 이 가정을 통해 그림 3에서처럼 반사된 신호가 컴팩트 HF 레이더 사이트에 도착하는 순간을 모델링 할 수 있다.

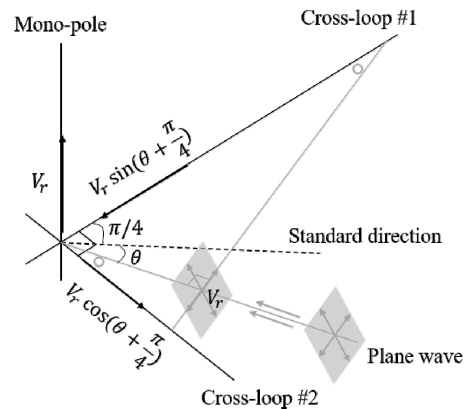


그림 3. 평면파의 전파와 수신되는 신호의 모델
Fig. 3. Propagation of plane wave and receiving procedure model.

반사된 신호의 각도 θ 는 콤팩트 HF 레이더가 향하는 방향을 기준으로 결정된다. 모노폴 안테나가 θ 와 상관없이 균일한 응답을 갖는 반면, 공간적으로 평면파에 직교하는 두 크로스루프 안테나는 투영에 의해 감쇄된 신호를 수신한다. 안테나들 간의 기하학적 구조를 고려했을 때, 안테나 응답을 식 (4)에서처럼 2차 위상 신호로 모델링 할 수 있다.

$$Ap_1(\theta) = e^{j(\theta + \frac{3\pi}{4})}, Ap_2(\theta) = e^{j(\theta + \frac{\pi}{4})}, Ap_3(\theta) = 1 \quad (4)$$

이 때, AP_1, AP_2, AP_3 은 각각 크로스루프 안테나 1, 크로스루프 안테나 2, 모노폴 안테나의 응답이다.

다. 선박 신호 모델링

본 논문에서는 선박 신호를 식 (5)에서처럼 CPI에 의해 결정된 시간 간격 동안 선박의 가능한 움직임에 의해 정의한다.

$$s_t^i(R, \theta, t) = Ap_i(\theta)P_r(R, \sigma_{ship}(t))e^{j2\pi t f_d(t)} \times \delta(\theta - \theta(t)) \quad (5)$$

여기서 f_d 는 대상의 도플러 주파수, σ_{ship} 은 대상의 RCS이다.

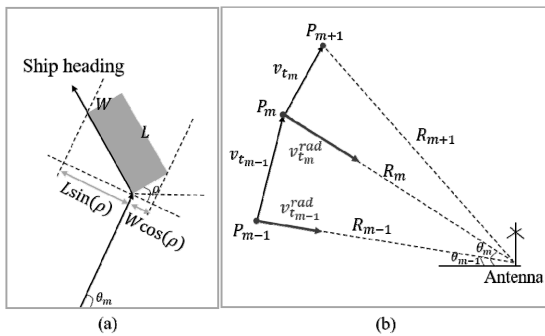


그림 4. 선박 관련 변수 추정: (a) (m) 순간에서의 선박 RCS 계산 (b) 세 개의 연속된 위치에서의 대상 선박 변수; (m-1), (m), (m+1)

Fig. 4. Scenario of ship parameter estimation: (a) Ship RCS calculation at the (m)th moment (b) Target ship parameters at three consecutive position; (m-1), (m), (m+1).

그림 4(a)는 선박의 이동 방향에 따른 RCS의 변화를 보여주며, 그림 4(b)는 각 시점에서 선박과 수신기 사이 거리, 방위, 방사 방향 속도를 보여준다. 선박 신호 생성을 위해 이 같은 변수를 추정해야 하며, 본 논문에서는 각 시점에서 거리, 세기, 방사 방향 속도 그리고 방위를

고려하여 추정하였다. 먼저, 대상의 도플러 주파수를 얻기 위해서 거리 R_m 와 방위 θ_m 가 레이더 사이트에서 대상의 상대적 위치에 따라 계산된다. 그리고 선박 속도를 방사 방향 벡터에 투영함으로써 방사 방향 속도 $v_{t_m}^{rad}$ 을 얻는다. 최종적으로, 도플러 주파수 f_{d_m} 는 식 (6)에 의해 계산된다.

$$f_{d_m} = \frac{2}{c} v_{t_m}^{rad} f_c \quad (6)$$

여기서 c 는 진공에서 빛의 속도이다.

두 번째 요소인 RCS는 그림 4(a)에 나타난다. RCS는 아래와 같이 선박의 거리, 폭 그리고 높이에 따라 근사할 수 있다^[21].

$$\sigma_{ship_m} \approx H(L|\sin(\rho)| + W|\cos(\rho)|) \quad (7)$$

그리고 단계 m 과 $m+1$ 사이에서 발생하는 도플러 주파수를 적용하기 위해 시간 t 에서 RCS는 아래와 같이 등속도 모델에 의해 근사할 수 있다.

$$\sigma_{ship}(t) = \sigma_{ship_{m-1}} + \frac{\sigma_{ship_m} - \sigma_{ship_{m-1}}}{CPI} t \quad (8)$$

$$f_d(t) = f_{d_{m-1}} + \frac{f_{d_m} - f_{d_{m-1}}}{CPI} t \quad (9)$$

$$\theta(t) = \theta_{m-1} + \frac{\theta_m - \theta_{m-1}}{CPI} t \quad (10)$$

라. 표층 해류 모델링

해류의 물리적 특성으로 인하여 해수면에 반사된 신호와 브래그 스퀘터링은 모든 방향에서 수신된다. 그러므로 표층 해류를 모든 방향에서 들어오는 신호들의 중첩으로 나타낼 수 있다^[22-23]. 본 논문에서는 실제 데이터를 활용하여 최소 제곱법 기반의 평균 추정을 사용하여 표층 해류를 모델링 하였다. 이로써 선박 신호를 제외한 모든 신호를 실제 환경과 흡사하게 표현할 수 있다.

마. 배경 잡음 모델링

많은 연구에서 배경 잡음은 평균이 0인 가우시안 모델로 표현된다^[18, 24]. 이와 마찬가지로 HF 레이더의 최대 탐지 거리 R_{max} 의 분산을 갖는 평균이 0인 가우시안 프로세스를 배경 잡음을 모델링한다.

$$b(R, t) \sim N[0, P_r(R_{max}, \sigma_{sea})] \quad (11)$$

III. 실험

1. 실제 데이터베이스에 대한 묘사

본 논문에서는 제안된 시뮬레이터를 입증하기 위해 실제로 군산항에서 구동중인 콤팩트 HF 레이더 사이트에서 실측 데이터를 획득하였다. 모든 사이트는 25 MHz 동작 주파수, 100 kHz 대역폭, 45 Watt 송신 전력, 2 Hz의 주사 속도, 그리고 512-point FFT로 동작한다. 이 설정에서 CPI는 256초이다. 대상 선박의 길이, 폭, 높이는 각각 70 m, 12 m, 7.2 m이다. 데이터베이스는 파도가 잔잔한 5일 동안 수집된 관측값이다.

2. 신호 세기 모델 비교

시뮬레이터 생성 데이터와 실제 데이터를 직접 비교하기 위해서 식 (3)에서 정의된 신호 세기 모델의 변수들은 SeaSonde 레이더 사이트와 동일하게 조정되었으며 표층 해류는 이전 절에서처럼 식 (14)에 따라 정해졌다.

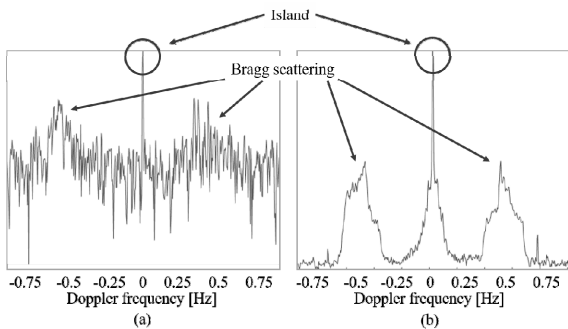


그림 5. 16 번째 거리 셀에서의 실제 데이터(a)와 시뮬레이션 데이터(b)의 신호 세기 비교

Fig. 5. Real data(a) vs simulation data(b) in power [dB] for range cell 16.

그림 5는 시뮬레이터 생성 데이터와 실제 데이터간의 신호 세기를 섬이 존재하는 16 번째 거리 셀에서 비교한 그림이다. 파란 선은 실제 데이터를 의미하며, 빨간 선은 시뮬레이션 생성 데이터를 의미한다.

결과를 보면 실제 데이터에서 관측할 수 있는 브래그 산란 효과와 도플러 주파수 0 Hz 부근의 국부 봉우리가 시뮬레이션 생성 데이터에서도 유사하게 관측되는 것을 확인할 수 있다. 도플러 주파수 0 Hz 부근에서 신호 세기의 국부 봉우리는 레이더 사이트에서 일정 거리 만큼 떨어진 섬에 의해 발생한다.

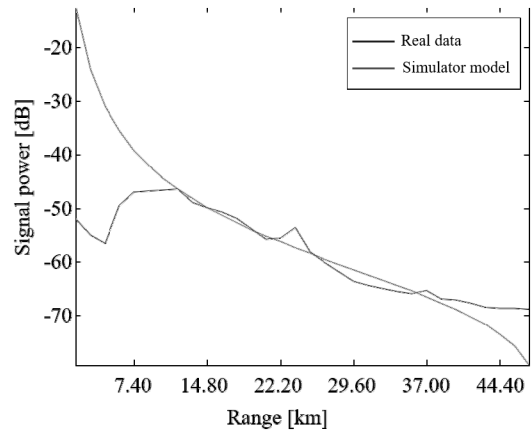


그림 6. 거리에 따른 실제 데이터(파란 실선)와 시뮬레이션 데이터(빨간 실선)의 신호 세기 비교

Fig. 6. Real data(red line) vs simulation data(blue line) in power [dB] for varying distance from the receiver.

그림 6은 레이더 수신기와의 거리를 변수로 한 시뮬레이션 생성 데이터와 실제 데이터이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실제 데이터에 관측할 수 있는 7km-37km 구간의 신호 세기 감쇄를 시뮬레이션 데이터에서도 비슷하게 확인할 수 있다. 하지만 7km 미만과 37km 초과 구간에서는 시뮬레이션과 실제 데이터는 매우 큰 것으로 보인다. 왜냐하면 실제 HF 레이더 사이트에서 얻은 데이터에 대해서는 추가적인 신호 처리가 이루어지기 때문에 이러한 오류가 발생하는 것으로 볼 수 있다.

3. 선박 신호 모델 검증

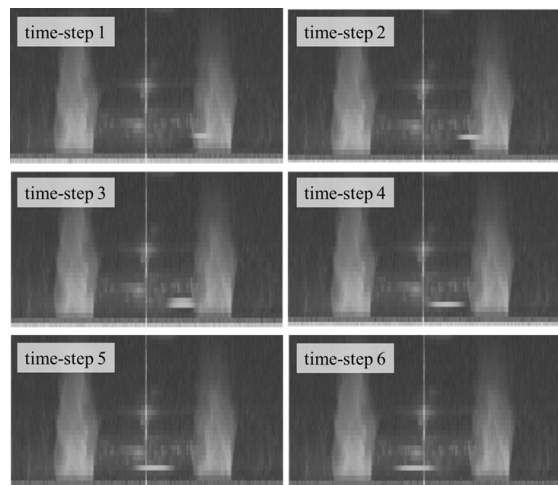


그림 7. 시뮬레이터 생성 Range-Doppler Map
Fig. 7. Range-Doppler Map generated by simulator.

선박 신호 모델을 검증하기 위해서 시뮬레이터 생성 데이터의 RDM을 그림 7에 나타내었다. 선박이 이동함에 따라 방사 방향 속도와 거리가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히 시간 단계 4, 5, 6에서는 콤팩트 HF 레이더의 긴 CPI에 따른 도플러 흐림 효과가 반영된 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

콤팩트 HF 레이더를 이용한 수많은 선박 관측과 추적 알고리즘들이 개발되었지만, 각 연구에서 사용된 데이터에서 선박의 이동 경로, 또는 크기 등 선박에 대한 조건이 다르기 때문에 동등한 조건에서 성능을 비교할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 콤팩트 HF 레이더의 직교 구조나 긴 CPI 같은 주요 쟁점을 고려할 뿐 아니라, 선박의 크기와 이동 경로에 따라 데이터를 생성할 수 있는 콤팩트 HF 레이더 기반 데이터 생성 시뮬레이터를 제안하고 입증하였다. 제안된 시뮬레이터를 입증하기 위해 시뮬레이터 생성 데이터는 SeaSonde HF 레이더에서 얻은 실제 데이터와 비교되었다. 통계적 특징 면에서 시뮬레이터는 실제와 높은 유사성을 보인다. 그러므로 본 시뮬레이터를 사용하면 동일한 환경 요건에서 선박 관측에 관한 여러 알고리즘의 성능을 비교할 수 있을 뿐 아니라 관련 연구에서 데이터 획득에 대한 어려움도 해결할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 무작위로 발생하는 클러터 신호와 다중 선박 상황을 반영하여, 보다 실제 환경과 유사한 콤팩트 HF 레이더 기반 데이터 생성 시뮬레이터를 개발할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(국가해양영토 광역 감시망 구축 기반연구).

REFERENCES

- [1] Fischer, Yvonne, and Alexander Bauer. "Object-oriented sensor data fusion for wide maritime surveillance." 2010 International WaterSide Security Conference. IEEE, 2010.
- [2] Johannsson, Hordur, et al. "Imaging sonar-aided navigation for autonomous underwater harbor surveillance." *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2010.
- [3] Shah, Brual C., et al. "Trajectory planning with adaptive control primitives for autonomous surface vehicles operating in congested civilian traffic." 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014.
- [4] Roarty, Hugh J., et al. "Expanding maritime domain awareness capabilities in the arctic: High Frequency radar vessel-tracking." 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13). IEEE, 2013.
- [5] Fujii, Satoshi, et al. "An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries." *Ocean Science Journal* 48.1 (2013): 69-97.
- [6] Maresca, Salvatore, et al. "Multiple oceanographic HF surface-wave radars applied to maritime surveillance." *Information Fusion (FUSION)*, 2014 17th International Conference on. IEEE, 2014.
- [7] Kuo, Tien-Hsia, et al. "Surface currents observed by the HF radar Northeast of Taiwan." *OCEANS 2014-TAIPEI*. IEEE, 2014.
- [8] Liu, Yonggang, et al. "HF radar performance in a low-energy environment: CODAR SeaSonde experience on the West Florida Shelf*." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27.10 (2010): 1689-1710.
- [9] Chung, Yu-Jen, Laurence ZH Chuang, and Wen-Chang Yang. "Feasibility studies of ship detections using seasonde HF radar." 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS. IEEE, 2013.
- [10] Roarty, Hugh J., et al. "Performance evaluation of SeaSonde high-frequency radar for vessel detection." *Marine Technology Society Journal* 45.3 (2011): 14-24.
- [11] Smith, Michael, et al. "Methods of associating CODAR seasonde vessel detection data into unique tracks." 2013 OCEANS-San Diego. IEEE, 2013.
- [12] Maresca, Salvatore, et al. "Maritime surveillance using multiple high-frequency surface-wave radars." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52.8 (2014): 5056-5071.
- [13] Maresca, Salvatore, et al. "A network of HF surface wave radars for maritime surveillance: Preliminary results in the German Bight." 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2014.
- [14] Grosdidier, Samuel, and Alexandre Baussard. "Ship detection based on morphological component analysis of high-frequency surface wave radar images." *IET Radar, Sonar & Navigation* 6.9

(2012): 813-821.

[15] Sevgi, Levent. "Stochastic modelling of target detection and tracking in surface wave HF radars." International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields 11.3 (1998): 167-181.

[16] Sevgi, Levent, Anthony Ponsford, and Hing C. Chan. "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars. 1. Theoretical background and numerical simulations." IEEE antennas and propagation magazine 43.4 (2001): 28-43.

[17] Tony de Paolo, Tom Cook, and Eric Terrill. "Properties of HF radar compact antenna arrays and their effect on the MUSIC algorithm." OCEANS 2007. IEEE, 2007.

[18] G. A. Fabrizio, A. B. Gershman, and M. D. Turley. "Robust adaptive beamforming for HF surface wave over-the-horizon radar." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 40.2 (2004): 510-525.

[19] B. R. Mahafza. Radar signal analysis and processing using MATLAB. CRC Press, 2016.

[20] Ground Wave Propagation (GRWAVE), Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland. [online]. Available: <http://www.itu.int/en/pages/default.aspx>

[21] D. Barrick (2011, Feb.). HF Radar Cross Section Primer, CODAR, [online]. Available: http://support.codar.com/Technicians_Information_Page_for_Sea_Sondes/About_SeaSondes_files/RCS_Primer.pdf

[22] L. Sevgi, and S. Sanal. "Surface wave HF radar simulator." Radar 97 (Conf. Publ. No. 449). IET, 1997.

[23] K. E. Laws, D. M. Fernandez, and J. D. Paduan. "Simulation-based evaluations of HF radar ocean current algorithms." IEEE journal of oceanic engineering 25.4 (2000): 481-491.

[24] E. W. Gill, and John Walsh. "A combined sea clutter and noise model appropriate to the operation of high frequency pulsed Doppler radar in regions constrained by external noise." Radio Science 43.4 (2008).

저 자 소 개



이 영 로(학생회원)
 2015년 고려대학교 전기전자전파 공학부 공학사
 2017년 현재 고려대학교 전기전자 공학과 석박사통합과정
 <주관심분야: 신호처리, 패턴인식>



박 상 욱(정회원)
 2012년 중앙대학교 전자전기공학부 공학사
 2017년 현재 고려대학교 전기전자 공학과 석박사통합과정
 <주관심분야: 신호처리, 패턴인식>



이 상 호(정회원)
 1977년 서울대학교 지구과학교육과 학사
 1982년 서울대학교 해양학과 석사
 1989년 서울대학교 해양학과 박사
 2017년 현재 군산대학교 해양학과 교수
 <주관심분야: 해양과학, HF레이더>



고 한 석(평생회원)-교신저자
 1982년 Carnegie-Mellon Univ. 전기공학 공학사
 1988년 Johns Hopkins Univ. 전자공학 공학석사
 1997년 Catholic Univ. of America 전자공학 공학박사
 2017년 현재 고려대학교 전기전자공학과 교수
 <주관심분야: 신호처리, 패턴인식>