

거친 바다표면의 마이크로파 반사 계산을 위한 이론적 모델 정확도 검증

Accuracy Verification of Theoretical Models for Estimating
Microwave Reflection from Rough Sea Surfaces

박 신 명 · 오 이 석

Sinmyong Park · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 거친 바다표면의 마이크로파 반사를 계산할 수 있는 이론적 모델의 정확도를 검증한다. 우선 Pierson-Moskowitz 해양 스펙트럼을 이용하여 거친 바다표면을 생성하였다. 생성된 바다표면의 유의파고와 유효높이(root-mean square height)값을 추정하여 풍속에 따른 유의파고, 유효높이 관계식을 유도하였고, 다른 측정 데이터들과 비교하였다. 수치해석적 방법을 이용하여 다양한 거칠기 조건(풍속)에서 생성된 바다표면의 반사계수를 계산하였고, 기존에 반사계수를 계산하기 위해 사용하는 이론적 모델인 Ament 모델, PO(Physical Optics) 모델, GO(Geometrical Optics) 모델, B-M(Brown-Miller) 모델과 비교하였다. 비교적 거칠기가 매우 낮은 경우($kh_{rms} < 0.4$, k 는 파수, h_{rms} 는 RMS 높이) 외에는 Ament 모델은 정확하지 않았다. 또한 거칠기가 크지 않은 바다($kh_{rms} < 10$)에서는 PO, GO, B-M 모델들의 정확도가 보장되지만, 풍속이 높아 거칠기가 높은 바다($kh_{rms} > 10$)에서는 입사각이 70° 이하에서는 PO 모델과 GO 모델이 수치해석결과와 비교적 잘 일치하였으며, 80° 이상에서는 B-M 모델이 수치해석 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다.

Abstract

This paper presents the verification of accuracies of theoretical models for calculating the microwave reflections from rough sea surfaces. First of all, the Pierson-Moskowitz ocean spectrum was used to generate the rough sea surfaces. Then the relationship between the significant wave heights, root-mean-square(RMS) heights and wind speed was derived by estimating the significant wave heights and RMS heights of the generated sea surfaces according to various wind speeds, and compared the derived relationship with other measurement data sets. The reflection coefficients of the sea surfaces were calculated by using a numerical method(the moment method). Then, the numerical results were compared with Ament model, PO(Physical Optics) model, GO(Geometrical Optics) model and B-M(Brown-Miller) model for various roughness conditions(wind speed) and incidence angles. It was found that the Ament model is not accurate except for a very low roughness conditions($kh_{rms} < 0.4$, k is wavenumber and h_{rms} is RMS height). It was also found that at incidence angles lower than 70° , the PO and the GO models agree well with the numerical results, while the B-M model agrees well with the numerical analysis results at incidence angles higher than 80° for very rough sea surfaces with $kh_{rms} > 10$.

Key words: Microwave Reflection, Rough Sea Surface, PO Model, GO Model, Brown-Miller Model

「이 연구는 한국연구재단의 이공학개인지초 후속연구의 기본연구 지원(과제번호: NRF-2016R1D1A1A09918412)으로 연구되었음.」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received May 8, 2017 ; Revised June, 23, 2017 ; Accepted October, 3, 2017. (ID No. 20170508-045)

· Corresponding Author: Yisok Oh (e-mail: yisokoh@hongik.ac.kr)

I. 서 론

최근 지구환경 원격탐사에 대한 관심이 높아지면서 해양 위의 선박 탐지나 조류, 해류 탐지에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 레이더 시스템이 바다표면 위의 목표물을 탐지할 때, 레이더에서 받는 주요 신호는 4가지 1차 다중 산란(1. 목표로부터의 직접 산란, 2. 목표에서 산란되어 바다표면에서 반사, 3. 바다표면에서 반사된 후 목표로부터 산란, 4. 바다표면에서 반사되어 목표에서 산란 된 후, 다시 바다표면에서 반사)의 합으로 나타낼 수 있다^[1]. 따라서 해양의 배나 물체를 원격 탐지하기 위해서는 바다표면의 마이크로파 전방 반사에 대한 정확한 이론적 모델이 필요하다. 해수면의 거칠기는 풍속에 따라 불규칙적으로 변한다. 따라서 풍속에 따라 바다표면 거칠기를 측정하여 해수면의 반사계수를 계산하는 것은 쉽지 않다. 바다표면의 반사 계수를 정확히 계산하기 위해서는 풍속에 해당하는 바다표면 거칠기 조건을 예측해야 하며, 상황에 맞는 반사 모델을 사용해야 한다. 바다표면의 반사 계수를 정확하게 예측하기 위해서는 이론적, 수치해석적, 실험적 연구가 병행되어야 하며, 반사계수 측정 연구^[2~4]와 수치해석적 방법을 이용한 연구^[5]와 이론적 모델 개발 등 여러 연구가 기존에 수행되었다. 바다 표면의 반사계수 계산을 위한 이론적 모델로는 Ament 모델^[6], PO (Physical Optics) 모델, GO(Geometrical Optics) 모델^[7], B-M (Brown-Miller) 모델^[8] 등이 있지만, 반사계수를 정확하게 계산할 수 있는 주파수, 입사각, 풍속의 범위에 대한 연구가 부족하다. 따라서 정확한 반사계수를 예측하기 위해 이론적 반사계수 계산 모델의 정확도를 분석하여 사용할 수 있는 범위를 제시할 필요가 있다.

본 논문에서는 풍속에 따른 바다표면의 거칠기를 예측하기 위해 Pierson-Moskowitz 해양 스펙트럼을 이용하여 풍속에 따라 바다표면 높이 프로파일을 생성하였으며, 생성된 바다표면과 수치해석적 방법을 이용하여 바다표면에서의 전방산란을 계산하였다. 계산된 전방산란계수와 이론적 모델을 비교하여, 이론적 모델의 사용범위에 대해 분석하였다.

II. 바다표면 생성

2-1 Pierson-Moskowitz 해양 스펙트럼과 바다표면 생성

풍속에 따른 바다표면 높이 프로파일을 생성하기 위해 Pierson-Moskowitz 해양 스펙트럼^[9]을 사용하였다. 바다표면 높이 프로파일 $\zeta(z, t_0)$ 은 공간 스펙트럼 $W(k_x)$ 을 역 푸리에 변환하여 구할 수 있다. 공간 스펙트럼은 주파수 영역 스펙트럼 $S(\omega)$ 과 표면중력파의 분산관계를 이용하여 얻을 수 있다.

$$\zeta(z, t_0) = \frac{1}{L_x} F^{-1} [W(k_x)] \quad (1)$$

$$W(k_x) = S(\omega) \frac{d\omega}{dk_x} \quad (2)$$

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4} \quad (3)$$

여기서, F^{-1} 은 역 푸리에 변환, L_x 는 샘플 길이, $\omega_0 = g/U_{19.5}$, $U_{19.5}$ 는 19.5 m에서의 풍속, $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$, $\alpha = 0.0081$, $\beta = 0.74$ 이다.

2-2 풍속과 바다표면 거칠기의 관계식

우리는 마라도 근처의 해수면의 파고와 풍속 측정 데이터를 사용하여, 유의파고 h_{sig} (significant wave height)와 풍속(U)의 관계식을 유도하였다.

$$h_{sig} = 0.0096 U^2 + 0.0915 U \quad (4)$$

또한 Pierson-Moskowitz 해양 스펙트럼을 이용하여 다양한 풍속에 대해 바다표면을 생성하고, 유의파고를 추정하여 위 식 (4)와 비교하였다. 그림 1에서 수심이 50 m일 때의 Beaufort 등급과 Andreas 관계식^[10]과 equilibrium sea approximation^[10]을 이용한 풍속 별 유의파고 데이터와 마라도 측정 데이터와 생성된 바다표면으로부터 추정된 유의파고 데이터를 비교하였다. 추정된 유의파고 데이터는 Beaufort 등급과 Andreas 관계식, 마라도 측정 데이터보다는 유의파고가 높게 계산되지만, 다른 데이터와는 잘 일치하였으며, 이는 각 모델별 측정 지역에 따라 풍속에 따

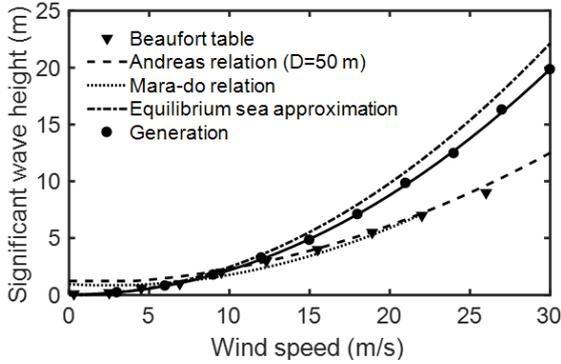


그림 1. 생성된 유효높이 추정식과 다른 데이터들과 비교
Fig. 1. Comparison between the generated relationship and other data sets.

른 유의파고가 다르기 때문이다.

바다표면의 반사계수 계산 모델의 입력 변수인 유효높이 h_{rms} (root-mean-square(RMS) height)와 상관길이 l_c (correlation length)를 생성된 바다표면 프로파일을 이용하여 계산하였다. 다양한 풍속에 따라 여러 바다표면을 생성하였으며, 풍속 U 와 유효높이 h_{rms} 및 l_c 의 관계식을 다음과 같이 유도하였다.

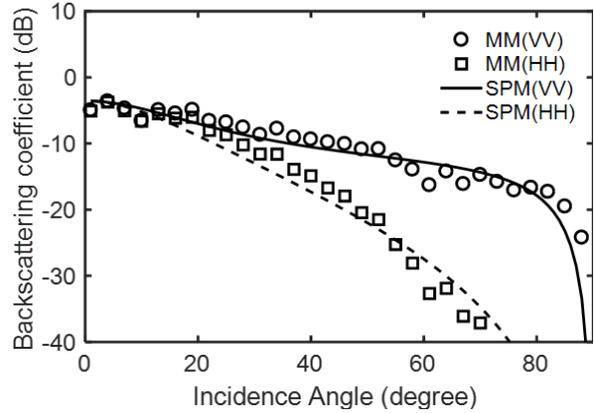
$$h_{rms} = 0.0056 U^2 - 0.0028 U + 0.014 \quad (5a)$$

$$l_c = 0.0974 U^2 - 0.0289 U + 0.2504 \quad (5b)$$

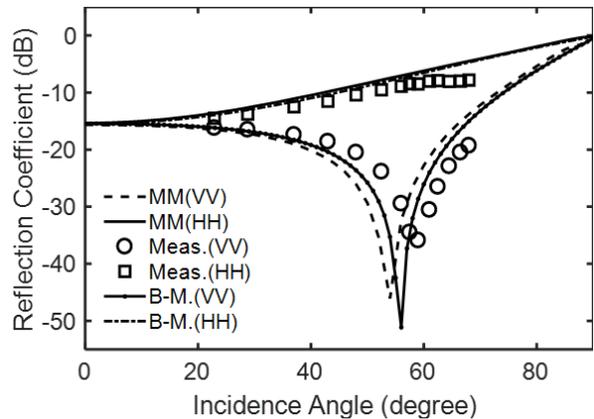
III. 마이크로파 반사 계산 모델

3-1 정확도 검증을 위한 수치해석적 방법

반사계수 계산 모델의 정확도 검증을 위해 수치해석적 방법을 이용하였다. 바다의 경우 표면의 상관길이 l_c 가 길어 수치해석의 변수 개수가 많고, 변수의 개수를 줄이기 위해 임피던스 경계 조건(IBC)를 이용하였다^[11]. 임피던스 경계 조건은 상대 유전율이 대략적으로 10 이상인 경우에 사용할 수 있으며, 바다의 경우 8 GHz에서 유전율이 61.2- j 35.9로 임피던스 경계조건을 사용할 수 있다. 이 수치해석적 방법을 이용하여 후방산란계수와 반사계수 계산의 이론적 모델들의 결과와 비교하였으며, 측정 데이터^[12]와도 비교하였다.



(a) SPM의 후방 산란계수
(a) Backscattering coefficient of SPM



(b) 전방 반사계수 측정과 B-M 모델 계산 결과
(b) Reflection coefficients of measurement and B-M model

그림 2. 수치해석 결과와 이론 모델들 및 측정 결과와 비교
Fig. 2. Comparisons between the numerical technique and theoretical and measurement results.

그림 2(a)는 SPM(Small Perturbation Method)과 모멘트법의 후방 산란계수를 계산하고, 비교한 결과이다. SPM은 kh_{rms} (k 는 파수, h_{rms} 는 거친 표면의 유효높이)가 0.3 미만이고 kl_c (l_c 는 거친 표면의 상관길이)가 3 미만인 경우에 정확하다고 알려져 있으므로, kh_{rms} 는 0.2, kl_c 는 2.0을 사용하였다. 여기서, VV-편파는 수평편파, HH-편파는 수직편파를 나타낸다. 그림 2(b)는 9.25 GHz, 상대 유전율(ϵ_r)은 3, kh_{rms} 는 0.52, kl_c 는 5.4에서 측정된 반사계수 및 같은 조건에서 B-M 모델로 계산한 결과와 수치해석 계산 결과를 비교하여 보여준다. 그림 2에서 보인 것처럼 이 수치 해

석적 방법의 결과를 이론적 모델의 정확성 검증에 이용할 수 있다.

3-2 Ament 모델과 Brown-Miller 모델 비교

거친 표면에서의 반사계수를 계산하기 위한 이론적 모델로는 PO(Physical Optics), Go(Geometrical Optics) 모델, Ament 모델과 Brown-Miller 모델 등이 있다. 식 (6)은 Ament 모델로 Γ_s 는 바다표면 반사 계수, Γ_f 는 평면 반사 계수를 나타낸다. 식 (7)은 Brown-Miller 모델을 나타내며, Ament 모델과 modified Bessel function I_0 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Gamma_s}{\Gamma_f} = \exp[-2(kh_{rms}\cos\theta)^2] \quad (6)$$

$$\frac{\Gamma_s}{\Gamma_f} = \exp[-2(kh_s\cos\theta)^2] I_0[2(kh_s\cos\theta)^2] \quad (7)$$

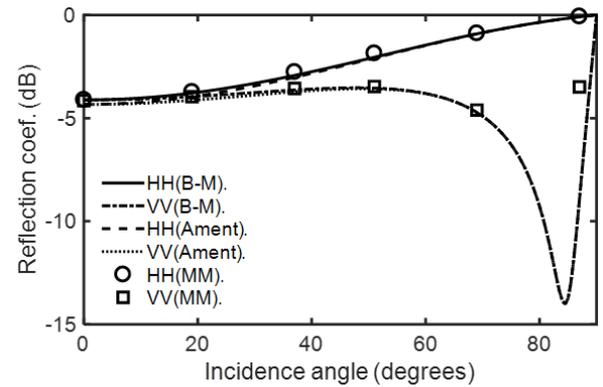
여기서, θ 는 수직 입사각이다.

그림 3은 주파수 1 GHz, 상대유전율 74.46-j75.85에서 다른 유효높이에 따른 두 반사모델 비교를 보여준다. 그림 3(a)에서 보이는 것처럼, 유효높이가 작을 때는 B-M (Brown-Miller) 모델과 Ament 모델의 결과가 매우 유사하다. 하지만 그림 3(b)처럼 유효높이가 조금만 커져도 Ament 모델의 반사계수가 입사각에 따라 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 모멘트 법으로 계산한 반사계수가 B-M 모델과 유사하기 때문에, Ament 모델이 오차가 큰 것을 알 수 있고, 바다 거칠기 변수가 조금이라도 커지면 (e.g., $kh_{rms} > 1$), Ament 모델은 사용할 수 없게 된다. 바다 표면은 표면의 유효높이와 상관길이 매우 큰 표면이기 때문에, 유효높이가 큰 경우에도 정확하게 계산할 수 있는 반사계수 계산 모델이 필요하다. 따라서 우리는 바다 표면 반사계산을 위해 B-M 모델을 사용하였다.

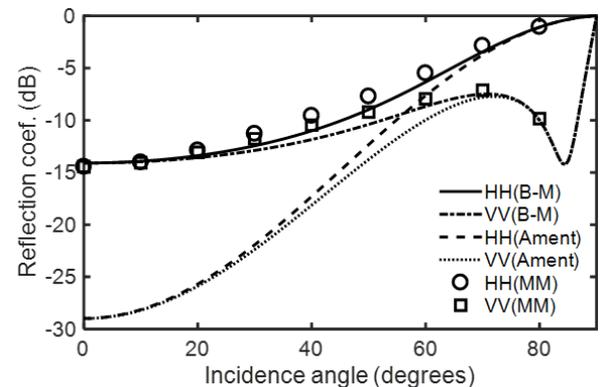
3-3 PO, GO, B-M 모델의 정확도 비교

PO, GO, B-M 이론적 모델들의 정확도를 수치해석적 방법을 이용하여 검증하기 위해, 다양한 풍속에 대하여 바다표면에서의 반사계수를 계산하였다. 그림 4는 8 GHz에서 풍속이 3 m/s, 4 m/s와 6 m/s인 경우에 세 가지 이론

적 모델과 모멘트법 계산 결과를 보여준다. 그림 4(a)는 풍속이 3 m/s이고, kh_{rms} 는 8.46, kl_c 는 154.16이며, 세 모델 모두 수치해석 계산 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 풍속이 4 m/s일 때 kh_{rms} 는 15.48, kl_c 는 283.70이며, 반사계수 계산결과를 보여준다. 입사각이 70° 미만에서는 PO 모델과 GO 모델이 수치해석 결과와 잘 일치하지만, B-M 모델은 수치해석 결과보다 약 6 dB 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 입사각이 80°보다 큰 경우에는 B-M 모델이 수치해석 결과와 더 일치한다. 그림 4(c)는 풍속이 6 m/s일 때 kh_{rms} 는 33.91, kl_c 는 1409.33이며, 입사각 70° 미만에서 PO 모델과 GO 모델은 수치해석 결과와 잘 일치하지만, B-M 모델은 약 12 dB 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 입사각 80° 이상에서는 B-M 모델



(a) $h_{rms}=1.9$ cm($kh_{rms}=0.4$)



(b) $h_{rms}=6$ cm($kh_{rms}=1.26$)

그림 3. 표면 거칠기에 따른 두 이론적 반사모델 비교
Fig. 3. Comparison of two theoretical reflection models for different roughness.

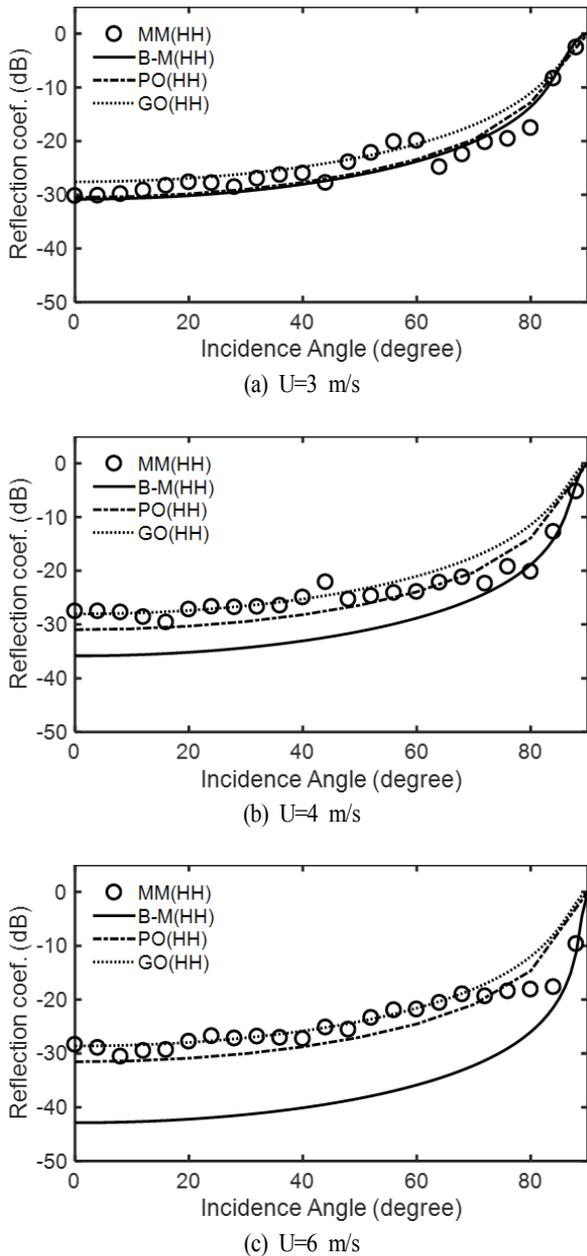


그림 4. 세 개의 풍속에 따른 비교 결과
 Fig. 4. Comparisons for three different wind speeds.

이 수치해석 결과와 잘 일치한다. 그림 4에서 나타나는 결과처럼 표면 거칠기 조건이 중간 정도까지($kh_{rms} < 10$)는 PO, GO, B-M 모델이 모두 정확했지만, 표면 거칠기 조건이 커지는 경우($kh_{rms} > 10$)에는 입사각에 따라 모델의 정확도가 달라지는 것을 확인할 수 있다. VV-편파 역시 HH-

표 1. 각 모델 별 반사계수 오차

Table 1. Error of reflection coefficient for each model

Input parameters		Error (dB)			
Wind speed (m/s)	Incidence angle (°)	Ament	PO	GO	B-M
3	20	>100	2.16	0.76	2.50
	50	>100	2.80	0.10	3.15
	88	1.22	1.01	0.96	0.87
4	20	>1000	3.10	0.17	7.97
	30	>1000	2.42	0.52	7.29
	88	1.09	2.93	3.46	1.06
6	20	∞	3.09	0.15	14.41
	30	∞	1.08	1.86	12.41
	88	11.00	7.67	7.72	0.49

편파와 비슷한 결과를 보여주었다. 표 1은 주파수, 입사각, 풍속 각각에서 각 모델별 반사계수 오차를 나타낸다. 오차는 각 모델별 반사계수와 모멘트법을 이용하여 계산한 반사계수의 차로 계산하였다. 표 1과 그림 4를 통해 각 모델의 적용범위를 가늠할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 바다표면에서의 반사계수를 정확하게 계산하기 위해 해양 스펙트럼을 이용하여 풍속에 따른 바다표면을 생성하고, 표면 거칠기 조건을 계산하였으며, 거친 표면의 반사계수 계산 모델을 비교하였고, 모델의 정확도 검증을 위해 수치해석적 방법인 모멘트법을 이용하여 다양한 풍속에서 입사각별로 바다 표면의 반사계수를 계산하였다. 표면 거칠기가 매우 낮은 경우($kh_{rms} < 1$)를 제외하면 Ament 모델은 사용하지 못한다는 것을 알았다. 표면 거칠기가 중간 정도까지는($kh_{rms} < 10$) PO, GO, B-M 모델 모두 비교적 잘 일치하였으나, 표면 거칠기가 큰($kh_{rms} > 10$) 경우에는 입사각에 따라 모델의 정확도가 달라짐을 확인할 수 있었다. 입사각이 70° 이하에서는 PO 모델과 GO 모델이 수치해석결과와 비교적 잘 일치하였으며, 80° 에서는 B-M 모델이 수치해석결과와 비교적 잘 일치하였다.

References

[1] F. Xu, Y. Q. Jin, "Bidirectional analytic ray tracing for fast computation of composite scattering from electric-large target over a randomly rough surface", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 27, no. 5, pp. 1495-1505, May 2009.

[2] C. I. Beard, "Remote sensing of ocean significant wave height by forward scattering: examples from L-band data", *Nava Research Laboratory Memorandum Report MR-3968*, Washington DC.

[3] J. R. Smith, S. J. Russell, B. E. Brown, P. M. Haldeman, D. D. Hayden, D. G. Morgan, R. D. Pierce, J. W. Shan, W. T. Stephens, and M. S. Mirotznik, "Electromagnetic forward-scattering measurements over a known, controlled sea surface at grazing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, no. 6, pp. 1197-1207, Jun. 2004.

[4] K. D. Ward, J. Baker, and S. Watts, "Maritime surveillance radar. I. Radar scattering from the ocean surface", *Proceedings of the IEE*, vol. 137, pp. 51-62, Apr. 1990.

[5] D. E. Freund, N. E. Woods, H. C. Ku, and R. S. Awadallah, "Forward radar propagation over a rough sea surface: A numerical assessment of the Miller-Brown approximation using a horizontally polarized 3-GHz line source", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 54, no. 4, pp. 1292-1304, Apr. 2006.

[6] W. S. Ament, "Toward a theory of reflection by a rough surface", *Proceedings of the IRE*, vol. 41, pp. 142-146, Jan. 1953.

[7] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol. 2, Artech House, 1986.

[8] R. M. Brown, A. R. Miller, "Geometric-optics theory for coherent scattering of microwaves from the ocean surface", NRL Report 7705, 1974.

[9] W. J. Pierson, Jr., L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii", *J. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 5181-5190, Dec. 1964.

[10] E. L. Andreas, S. Wang, "Predicting significant wave height off the northeast coast of the United States", *Ocean Engineering*, vol. 34, pp. 1328-1335, Jun, 2007.

[11] T. B. A. Senior, J. L. Volakis, *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*, The Institution of Electrical Engineers, 1995.

[12] R. D. De Roo, *Theory and Measurement of Bistatic Scattering of X-band Microwave from Rough Dielectric Surface*, PHD Thesis, University of Michigan, p. 181, 1996.

박 신 명



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2014년~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, 레

이다 산란모델

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터과학과 (공학박사)

2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
 2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
 1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 2009년~현재: IEEE Fellow
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이다, 안테나