바다 표면의 Bistatic Coherent Reflectivity 계산을 위한 Monte-Carlo/모멘트 법과 PO 모델 비교

Comparison of Moment Method/Monte-Carlo Simulation and PO for Bistatic Coherent Reflectivity of Sea Surfaces

김 상 근 · 오 이 석

Sang-Keun Kim · Yi-Sok Oh

요 약

본 논문에서는 바다 표면에서 전파의 페이딩 현상을 해석하는데 필요한 bistatic coherent reflectivity를 Monte-Carlo/모멘트 법과 physical optics(PO) 모델을 이용하여 비교하고 계산하였다. 모멘트 법 계산을 위해서 우선 Gaussian 형태로 불규칙한 바다 표면을 생성하였다. 풍속과 유의 파고 등에 대한 태안 앞바다에서의 실제 측정 데이터를 사용하여 이 표면을 생성하였으며, 두 변수간의 관계식을 유도함으로써 측정하기 쉬운 변수인 풍속에 의해 바다 표면 상태를 예측할 수 있는 모델을 만들었다. 평면에서의 결과를 비교함으로써 모멘트 법 모델을 검증하였고, 거친 표면의 경우에 비교적 정확한 수치 해석 방법인 Monte-Carlo/모멘트 법과 간단히 계산이 가능한 이론식인 PO 모델을 비교함으로써 거친 표면에서 PO 모델의 적용 가능한 조건을 찾아내었으며, 전파 경로 해석법을 이용하여 실제 전파의 페이딩 현상을 해석할 때에 사용되는 PO 모델의 유효성을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes a method of moments(MoM)/Monte-Carlo simulation and Physical Optics(PO) model to determine Bistatic Coherent Reflectivity of sea surfaces at various wind speeds. For the MoM simulation, a Gaussian random rough sea surface was generated based on the data of Tae-An ocean at various wind speeds and sea surface heights. The numerical results of the MoM/Monte Carlo simulations were used to verify the validity region of the PO model. It was found that the numerical result for a flat surface agrees quite well with the Fresnel reflection coefficient. The validity of the PO model on the rough sea surface is shown by using ray tracing method.

Key words : Sea Surface, Coherent Reflectivity, Physical Optics, Monte-Carlo/Method of Moments

Ⅰ. 서 론

바다 위에서의 무선통신의 경우 반사율이 큰 바다 표면의 특성상 전파 다중경로에 의한 신호세기를 무시할 수 없다. 이러한 페이딩 현상을 해석하는 방법으로는 전파 경로 해석법을 이용하여 해석하고자 하는 지형 위에서 반사점을 찾아내고, 그 반사점에서 각도에 따른 반사율을 계산하여 반사파에 대해 해석하는 two-ray 지면 반사 모델이 널리 연구 되어지고 있다[1]. 바다 표면의 경우에는 풍속에 의해 다양한 거칠기를 갖고, 거칠기의 정도 또한 사용하고자 하는 주파수의 파장에 비해 매우 큰 경우가 많으므로 다양한 풍속에 따른 바다 표면 상태를 고려한 bistatic coherent reflectivity 값의 해석이 필요하다.

「본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10101-0) 지원으로 수행되었음.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· 논 문 번 호 : 20051103-123

· 수정완료일자 : 2006년 1월 10일

거친 표면에 대한 전자파 산란 모델 연구는 원격 탐사를 목적으로 한 후방 산란 모델에 집중되어 왔고, 지금까지 전방 산란 모델에 대한 연구는 매우 적었다. 하지만 최근 들어 GPS와 무선 통신 환경 및 다수의 위성을 이용한 multi-static 원격 탐사 등의 연구가 활발해지면서 전방 산란 모델에 대한 중요성이 높아지고 있다. 거친 표면에 대한 전자파 산란을 계산하는 방법으로는 이론적인 분석법과 수치 해석적인 방법이 일반적이다. 적분 방정식의 이론적 근사식에 해당하는 PO 모델은 거친 유전체 표면의 coherent forward scattering의 경우 실험적 결과를 통해 검증된 바 있다[2]. PO 모델은 계산이 쉽다는 장점이 있지만, 다중 산란을 포함하지 않기 때문에 바다 표면과 같이 거칠기가 파장에 비해 매우 큰 경우에는 적용할 수 없는 범위가 나타난다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 빠른 계산시간 내에 바다에서의 전자파 세기를 예측할 수 있는 시뮬레이터 제작에 적합한 PO 모델의 신뢰성을 확인한다. 거친 표면에서 비교적 정확한 수치 해석 방법인 MoM/Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 적용하여 다양한 거칠기를 갖는 바다 표면에서의 forward coherent reflectivity를 계산하였으며, 그 결과를 비교함으로써 PO 모델의 신뢰성과 적용가능 범위를 확인하였다. 태안 앞바다에서 측정된 유의 파고와 풍속 데이터를 참조하여[3] 풍속에 따른 표면 거칠기 예측 모델을 만들었으며, 이 모델을 이용하여 실제 시뮬레이션에 사용되는 Gaussian 형태의 불규칙하게 거친 표면을 생성하였다. 본 연구에서는 시뮬레이션 시간의 한계를 고려하여 1차원적으로 거친 표면을 구현하여 2차원 산란을 계산하였다. 2차원 표면을 생성하여 3차원 산란 계산도 가능하나, 이 경우에는 컴퓨터의 계산 능력상 아주 작은 거친 표면 조각에 대해서만 계산이 가능하므로 정확성에 문제가 생기게 된다[4].

Ⅱ. 바다 표면의 생성

전자파 산란 해석에 사용된 바다 표면은 그림 1과 같이 일정한 풍속에 의해 거칠기가 결정되는 Gaussian형태의 불규칙적 거친 표면으로 구현하였다. 이 때의 rms 표면 높이는 태평양과 같은 대양에서의 풍속과 sea state의 관계와 sea state와 파고의 관계를 이용하여 대략적으로 구한 실험식[5]을 사용하지 않고, 태안 앞바다의 경우에 맞는 풍속과 유의 파고 관계 데이터로부터 도출된 실험식으로부터 결정하였다. 여기서, 유의 파고는 1,024개의 측정된 파고 데이터 중에서 높은 쪽에서 1/3의 데이터를 평균한 수치이다. 수심이 낮은 태안 앞바다의 특성으로 인해 기존의 미동부 태평양 연안을 기준으로 한 풍속과 rms 표면 높이의 관계식과의 차이가 그림 1에 잘 나타난다.

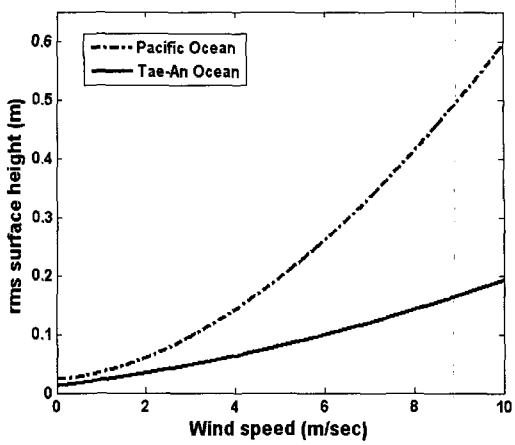


그림 1. 풍속과 rms 표면 높이의 관계
Fig. 1. RMS surface height with respect to wind velocity.

우선, 생성시킨 Gaussian random surface의 rms 표면 높이 σ_{rms}와 유의 파고 h를 통계적으로 비교함으로써 식 (1)을 유도하였다.

$$h = 4.25 \times \sigma_{rms} + 0.0243 \tag{1}$$

그런 다음에 풍속에 따른 유의 파고의 데이터를 분석함으로써 식 (2)와 같은 풍속과 rms 표면 높이의 관계식을 유도하였다.

$$\sigma_{rms} = (8.8768 \times 10^{-4}) \times U^2 + 0.0092 \times U + 0.0128 \tag{2}$$

여기서 U(m/s)는 풍속이고, σ_{rms}의 단위는 m이다.

그림 2는 풍속(U)이 6 m/s (σ_{rms} = 0.1 m)인 서해 앞바다의 표면 조각을 수치적으로 생성한 거친 표면 상태를 보여준다.

Ⅲ. Monte-Carlo/모멘트 법 시뮬레이션

거친 표면에서의 전자파 산란에 대한 수치 해석적

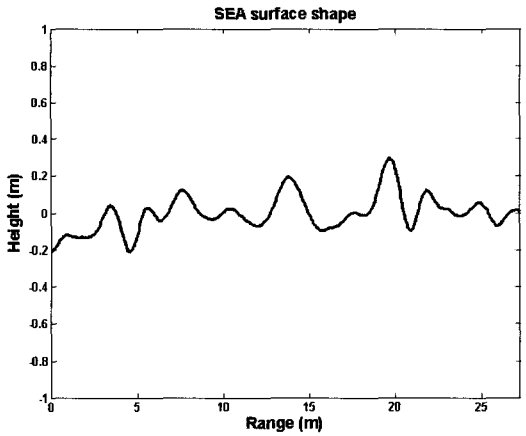


그림 2. 생성된 거친 바다 표면
Fig. 2. Generated rough SEA surface.

인 방법들 중 하나인 MoM(Method of Moments)을 이용하여 거친 바다 표면에서의 전파 반사 계산을 시도하였다[6]. 컴퓨터 메모리 용량의 한계와 계산시간을 고려하여 그림 3과 같은 2차원적 전파 산란 계산을 수행하였으며, 이때의 거친 표면은 1차원적인 거칠기 함수를 갖는다.

MoM 해석은 2.2 GHz에서 $\lambda/10$ cell size × 2,000 cell의 공간을 설정하여 약 27.27 m의 범위에서 이루어졌으며, 바다의 유전율은 $\varepsilon_r = 72 - j\,32$이다. Monte-Carlo 방법으로 20회 반복하여 결과 값을 도출하였다. 1차원으로 구현된 표면에 대한 해석이므로 동일 편파 해석에서 HH-편파의 경우에는 전계를 이용하였고, VV-편파의 경우에는 자계를 이용하였다.

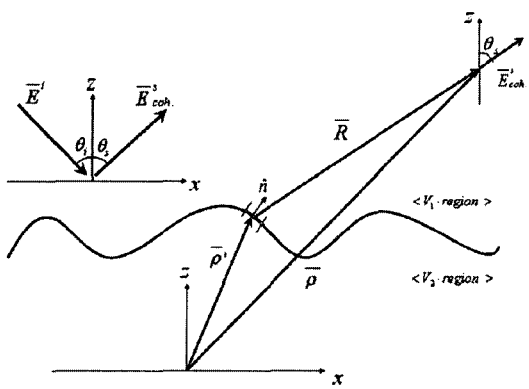


그림 3. Coherent MoM 산란 모델 구조
Fig. 3. Geometry for coherent scattering MoM model.

2차원 적분 방정식을 유도한 후 MoM을 이용하여 미소 표면 전류를 구하고, 그로부터 산란 전계를 계산하였다[7],[8]. 그림 3과 같은 표면에서의 적분 방정식은 time convention $e^{-i\omega t}$을 이용하여 다음과 같다.

$$(\nabla^2 + k^2)\cdot G(\bar{\rho},\bar{\rho}') = -\delta(\bar{\rho}-\bar{\rho}') \tag{3}$$

여기서, $G(\bar{\rho},\bar{\rho}') = \frac{i}{4}H_0^{(1)}(k|\bar{\rho}-\bar{\rho}')$는 2차원에서의 그린함수이다.

$$E_y^i(\bar{\rho}) + \int_c \left[E_y(\bar{\rho}')\frac{\partial G(\bar{\rho},\bar{\rho}')}{\partial n'} - G(\bar{\rho},\bar{\rho}')\frac{\partial E_y(\bar{\rho}')}{\partial n'}\right]dl' = \begin{cases} E_y(\bar{\rho}) & (\bar{\rho}\in V_1) \\ 0 & (\bar{\rho}\in V_2) \end{cases} \tag{4}$$

거대한 바다 표면의 일부분을 잘라서 시뮬레이션하는 방식이므로 그림 3에서 보는 것과 같이 표면의 양쪽의 잘린 면으로 가장자리 영향이 생겨나게 되면서 입사각이 큰 경우에 계산 결과의 오차가 커지는 현상이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 식 (5)와 같은 Tapered 입사파를 사용하였으며, 그로 인해 큰 입사각에서의 오차를 줄이는 결과를 얻었다[9].

$$\bar{E}^i(\bar{r}) = \exp(ik(x\sin\theta_i - z\cos\theta_i)\cdot (1+w(\bar{r})))\exp\left(-\frac{(x+z\tan\theta_i)^2}{g^2}\right) \tag{5}$$

여기서, $w(\bar{r}) = \dfrac{\left(2\dfrac{(x+z\tan\theta_i)^2}{g^2}-1\right)}{(kg\cos\theta_i)^2}$ (6)

또한, g는 tapering parameter로서 200 λ의 시뮬레이션 구간의 경우 전체 구간의 1/4배가 적당하다.

그리고 식 (4)에서의 미지 전류에 해당하는 값을 pulse basis function과 point matching 방법을 적용한 MoM을 이용하여 구하였다.

$$\begin{bmatrix} Z_{11}^{mn} & Z_{12}^{mn} \\ Z_{21}^{mn} & Z_{22}^{mn} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} g_m \\ h_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기서 $E_y = \sum_{m=1}^{N} g_m P_m$, $\frac{\partial E_y}{\partial n'} = \sum_{m=1}^{N} h_m P_m$이고,

P_m은 pulse basis 함수이며, impedance 행렬 요소들은 다음과 같다.

$$Z_{11}^{mm} = \int_{Cn} \frac{\partial G(\bar{\rho}_m, \bar{\rho}_n')}{\partial n'} dl_n'$$
$$Z_{12}^{mm} = -\int_{Cn} G(\bar{\rho}_m, \bar{\rho}_n') dl_n'$$
$$Z_{21}^{mm} = \int_{Cn} \frac{\partial G(\bar{\rho}_m, \bar{\rho}_n')}{\partial n'} dl_n'$$
$$Z_{22}^{mm} = -\int_{Cn} \varepsilon_r G(\bar{\rho}_m, \bar{\rho}_n') dl_n' \quad (8)$$

MoM을 이용하여 구한 표면 전류값을 이용하여 산란 전계를 구하면 다음과 같고,

$$E_y^s(\bar{\rho}) = \int_c \left[E_y(\bar{\rho}') \frac{\partial G(\bar{\rho}, \bar{\rho}')}{\partial n'} - G(\bar{\rho}, \bar{\rho})' \frac{\partial E_y(\bar{\rho}')}{\partial n'} \right] dl', \quad (9)$$

이로부터 coherent reflectivity 값을 구한다.

$$|\Gamma(\theta)| = \frac{|E_y^s(\theta)|}{|E_y^i(\theta)|}, \quad (\theta = \theta_i = \theta_s) \quad (10)$$

Ⅳ. Physical Optics 모델

거친 표면에 대한 coherent field reflection은 다음과 같다[7].

$$\Gamma_q(\theta) = \Gamma_{qo} e^{-2k^2 s^2 \cos^2\theta} \delta_{pq} \quad (11)$$

여기서, k는 파수, s는 rms 표면 높이이고, δ_{pq}는 동일 편파를 보기 위한 Kronecker delta 함수이며, Γ_{h0}, Γ_{v0}는 각각 수평 편파와 수직 편파에 대한 Fresnel 반사계수이다.

$$\Gamma_{ho}(\theta) = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (12a)$$

$$\Gamma_{ho}(\theta) = \frac{\varepsilon_r \cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\varepsilon_r \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (12b)$$

Ⅴ. 결과 및 검증

그림 4에서 보듯이 완전 평면에 대한 MoM과 PO의 결과는 거의 완벽하게 일치하였다. 평면에서는 rms 높이 s=0 이므로, PO 반사 계수는 Fresnel 반사 계수와 같으므로 PO의 값이 정확하고, MoM에 의한 결과의 신뢰성을 확인할 수가 있다.

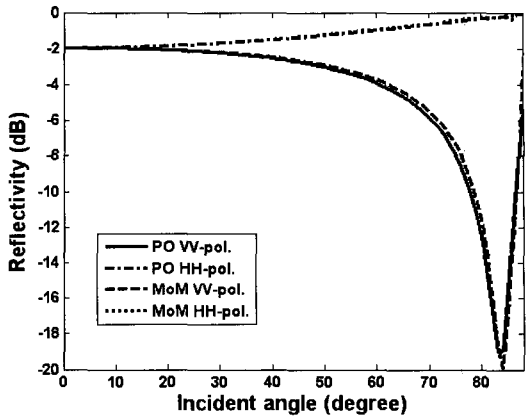


그림 4. PO와 MoM의 평면에 대한 결과 비교
Fig. 4. Compared results of PO and MoM in flat surface.

반면에 거칠기가 있는 표면에서는 다중 산란을 포함하지 않는 PO 모델이 오차를 갖게 된다. 풍속이 2, 4, 6, 8 m/s인 바다 표면에서의 전파 반사를 계산하였으며, 그림 5는 풍속이 2 m/s인 거칠기가 작은 표면에서의 MoM 수치 해석적 계산 결과와 PO 근사식 계산 결과를 비교하여 보여준다. 이 그림에서 두 결과 간에 생기는 약간의 불일치를 확인할 수 있고, 그림 6에서는 풍속이 6 m/s 인 표면에서의 비교 결과를 보인다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 풍속이 증가함에 따라 바다 표면의 거칠기가 증가하게 되면 낮은 입사각에서의 반사도는 다중 산란을 고려하지 못하는 PO 모델의 특성상

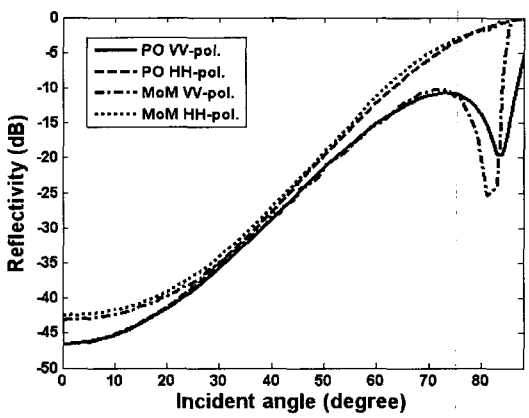


그림 5. PO와 MoM의 결과 비교(U=2 m/s)
Fig. 5. Compared results of PO and MoM(U=2 m/s).

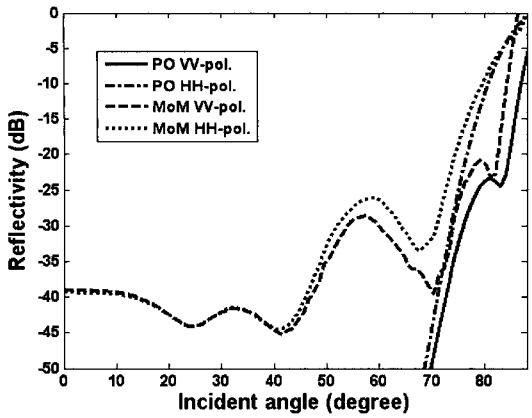


그림 6. PO와 MoM의 결과 비교(U=6 m/s)
Fig. 6. Compared results of PO and MoM(U=6 m/s).

거친 표면에서 정확한 MoM에 의한 결과와 맞지 않게 되는 결과가 발생한다. 즉, PO 모델의 결과는 높은 각도에서만 신뢰성을 갖게 되고, 바다 표면이 거칠어짐에 따라 신뢰성을 갖기 시작하는 입사 각도가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다.

이 결과로부터 바다 표면의 전파 산란 모델을 예측하는데 있어서 PO 모델을 적용할 수 있는 범위를 찾아내었고, 그 결과는 그림 7과 같다. 풍속이 2 m/s 이상의 경우에 PO 모델이 맞지 않게 되는 입사각에서의 영역이 생겨나게 되고, 거칠기가 매우 큰 풍속이 8 m/s에 해당하는 경우에도 73° 이상의 입사각에서는 PO 모델이 정확한 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

또한 1 km 상공의 일정한 고도로 송신기가 수신기

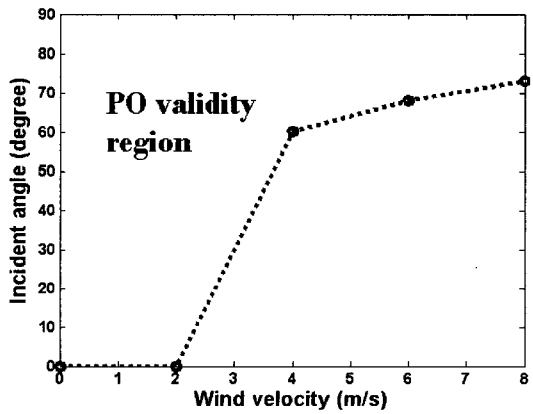


그림 7. PO 모델의 유효영역
Fig. 7. Validity region of PO model.

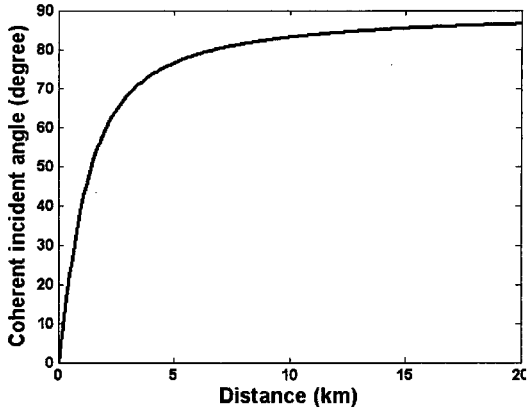


그림 8. 송수신기의 거리에 따른 입사각
Fig. 8. Incident angle with respect to the distance between transmitter and receiver.

로부터 멀어지는 경우 반사점에서 송수신기간에 형성되는 입사각도 값을 광선 추적법을 사용하여 구하면 그림 8과 같다. 송수신기간의 거리가 약 7 km 이상으로 멀어지게 되는 경우 입사각이 형성되는 각도가 80° 이상인 것을 확인할 수가 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 바다 표면의 coherent 전파 산란을 예측하기 위해 우선 태안 앞바다의 실제 측정 자료를 근거로 풍속과 rms 표면 높이에 대한 관계식을 정의하였다. 이 관계식으로부터 Gaussian 함수 형태로 불규칙한 거친 바다 표면들을 생성하였으며, 다양한 풍속에 따라 생성된 바다 표면으로부터 수치 해석적인 방법인 MoM/Monte-Calro 방법으로 coherent 전파 산란을 계산하였고, 이론적 근사식인 PO 모델 결과와 비교하였다. 그 비교 결과로부터 PO 모델은 바다 표면의 거칠기에 따라 특정 입사각 이하에서 MoM의 결과와 차이가 나게 되는 한계 영역이 존재함을 찾을 수가 있었다. 이 영역은 주파수가 2.2 GHz에 해당하는 결과이고, 높은 주파수일수록 상대적인 거칠기가 커지므로 PO의 한계 영역은 작아질 수 있다. 또한 실제 바다 표면 반사에 의한 페이딩 현상을 해석하는데 있어서 ray tracing 방법을 이용하여 찾은 반사점에서의 coherent 입사각의 경우 일반적으로 80° 이상이기 때문에 간단한 이론식에 해당하는 PO 모델만으로도 바다 표면 반사에 대한 상당히 정확한 해석이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications - Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, 2002.

[2] R. D. DeRoo, F. T. Ulaby, "Bistatic specular scattering from rough dielectric surfaces", *IEEE Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 2, Feb. 1994.

[3] 실시간 해양 관측자료(한국해양연구원 웹페이지) http://realtime.kordi.re.kr

[4] 차형준, 오이석, "불규칙적으로 거친 유전체 표면에서의 레이더 산란계수 수치해석적 계산", 대한원격탐사학회지, 16(1), pp. 65-72, 2000년 3월.

[5] W. Morchin, *Radar Engineer's Sourcebook*, Boston, Artech House, 1993.

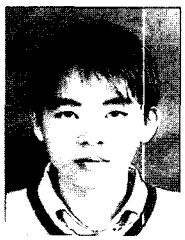
[6] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, New York: IEEE Press, 1993.

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

[8] L. Tsang, J. A. Kong, *Scattering of Eletromagnetic Waves Numerical Simulation*, Wiley-Interscience Publication, 2001.

[9] Jin A. Kong, Leung Tsang, "Tapered wave with dominant polarization state for all angles of incidence", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, Jul. 2000.

김 상 근



2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2005년 2월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나, 전파산란, 이동통신

오 이 석

1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 컴퓨터과학과 (공학박사)
1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
[주 관심분야] 전파산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나