韓國電磁波學會論文誌 第14卷 第8號 2003年 8月 論文 2003-14-8-04

Levenberg-Marquardt 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용한 유전체 파이프의 영상재구성

Image Reconstruction of Dielectric Pipes by using Levenberg-Marquardt and Genetic Algorithm

김 정 석 · 나 정 웅*

Jeong-Seok Kim · Jung-Woong Ra*

요 약

손실 반공간에 두 개의 원통형 파이프가 묻혀 있는 경우 파이프와 주변 매질의 특성을 반복 기법 최적화 역산란을 적용하여 구했다. 산란 전계는 경계요소법을 이용하여 계산하였으며 파이프의 크기, 위치, 내부매질의 비유전율, 도전율, 주변 매질의 비유전율, 도전율 등의 파라미터는 측정 산란 전계로부터 유전 알고리즘과 Levenberg-Marquardt 알고리즘의 혼합 알고리즘을 이용하여 역으로 계산하였다. 두 파이프가 거의 근접해 있는 경우도 역산란이 가능함을 보였다. 산란 전계의 측정오차에 의한 illposedness는 파수 영역에서 지수 함수적으로 감쇄하는 감쇄모드를 제거하여 안정화시켰다.

Abstract

Several dielectric pipes buried in the lossy half space are reconstructed from the scattered fields measured along the interface between the air and the lossy ground. Iterative inversion method by using the hybrid optimization algorithm combining the genetic and the Levenberg-Marquardt algorithm enables us to find the positions, the sizes, and the medium parameters such as the permittivities and the conductivities of the buried pipes as well as those of the background lossy half space even when the dielectric pipes are close together. Illposedness of the inversion caused by the errors in the measured scattered fields are regularized by filtering the evanescent modes of the scattered fields out.

Key words : Inverse Scattering, Boundary Element Method, Half Space, Optimization Algorithm

I. 서 론

손실이 있는 땅속에 묻혀있는 파이프나 케이블 등의 산란체를 찾아내고 식별하는 것은 Ground-penetration radar의 응용분야에서 아주 중요한 문제 중의 하나이다. Diffraction Tomography 알고리즘[1]을 이용하여 손실이 있는 반공간에 묻혀 있는 2차원 유전체의 위치, 크기, 유전율 분포의 영상을 구현하는 방법이 제안되었으나 산란체의 크기가 파장에 비하여 매우 작고 산란체의 유전율과 주위 땅의 유전율과의 차이가 아주 작은 경우에만 영상구현이 가능하였다[2]. 기울기법인 Newton-Kantorovitch 알고리즘을 이용한 반복 역산란 기법으로 크기가 작은 도체 산란체의 모양[3]이나 크기가 작고 유전율 값이 작은 유전체 산란체의 모양[4]을 재구성하는 방법이 제안되었다. 이러한 기울기법을 이용한 Newton

삼성전자 무선사업부(Samsung Electronics Co., Ltd)
*광주과학기술원(Kwangju Institute of Science and Technology)
· 논 문 번 호 : 20030210-022
· 수정완료일자 : 2003년 6월 9일

유형의 알고리즘은 일종의 steepest descent 방법으로서 시작치에 따라 수렴치가 국부 극소치(Local Minima)에 빠지게 되므로 이를 실 극소치(Global Minimum)로 수렴하도록 하는 최적화 알고리즘이 필요하게 되었다. 이러한 알고리즘으로 확률론적 방법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 이용하여 크기가 큰 도체 산란체의 모양[5]을 구하는 연구가 있었다. 기울기법을 이용한 알고리즘은 국부 극소치에 빠지기 쉬운 단점이 있으며 확률론적 알고리즘은 실극소치를 찾을 수는 있으나 계산 시간이 너무 오래 걸린다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 기울기법 알고리즘으로 Levenberg-Marquardt 알고리즘(LMA)을 이용하고 확률론적 알고리즘으로 Simulated-Annealing 알고리즘(SAA)[6]이나 유전 알고리즘[7]을 이용한 혼합 알고리즘을 파수영역에서 적용하여 산란체의 위치, 크기, 모양에 대한 사전정보 없이 크기가 크고 높은 유전율값을 가지는 2차원 유전체의 모양과 유전율 분포, 도체의 모양[8]을 재구성할 수 있다. 그러나 유전율 분포의 재구성은 Rayleigh criterion으로 인하여 산란체의 해상도에 제한($\lambda/2$)이 오게 되고 illposedness를 극복하게 위하여 진행모드만을 사용해야 하므로 대형 산란체의 영상구현에 어려움이 있다. 따라서 이 혼합알고리즘을 이용한 최적화 기법을 이용하여 cross-borehole 측정으로 얻은 데이터로부터 땅속에 있는 터널의 위치, 크기, 균일한 내부매질의 변수, 배경 매질의 변수, 송, 수신간의 거리 등 11개의 변수를 추출하고 있다[9]. 이 방법은 산란체의 크기에는 제한이 없고 구하고자 하는 변수의 개수의 제한만이 있을 뿐이다. 즉 측정데이터가 구하고자 하는 변수보다 많아야 한다는 것이다.

본 논문에서는 손실 반공간에 두 개의 균일한 원통형 유전체가 묻혀 있는 경우 측정된 산란 전계로부터 산란체의 위치(4), 크기(2), 비유전율(2), 도전율(2), 배경매질의 비유전율(1), 도전율(1) 등의 12개의 미지수를 정의하고 가정된 12개의 미지수로부터 계산된 산란 전계와 측정된 산란 전계의 차이의 제곱을 비용함수로 정의하고 LMA와 GA의 혼합 알고리즘을 이용하여 최종적인 미지수를 구하고자 한다. 여기에서 미리 알고 있는 정보는 산란체가 균일하다는 것과 원통형이라는 것뿐이다. 산란 전계의 계산은 반공간 Green 함수와 경계요소법을 적용하였다. 두 유전체가 멀리 떨어져 있는 경우뿐만 아니라 매우 가까이 있더라도 유전체의 위치와 크기, 유전율, 도전율의 미지수를 혼합 알고리즘을 이용하여 추출해 낼 수 있다.

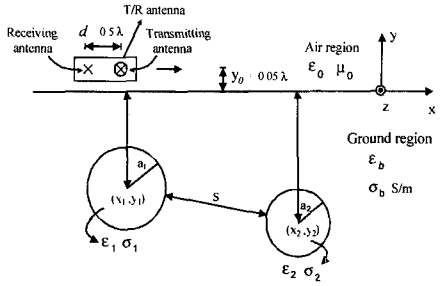

그림 1. 측정 구조
Fig. 1. Geometry.

Ⅱ. 손실 반공간에서 산란체에 의한 산란 전계 계산

그림 1과 같이 유전율, 도전율이 (ε_1, σ_1), (ε_2, σ_2)인 두 개의 원통형 산란체가 유전율 도전율 (ε_b, σ_b)인 손실이 있는 반공간에 묻혀 있으며, d만큼 떨어진 전원점과 관측점이 공기와 땅의 경계면과 나란하게 x축을 따라 움직이며 산란 전계를 측정한다.

전원은 z방향으로 분극된 2차원 선전원으로 가정하였으며, 산란체의 내부매질이 균일하고 배경매질 또한 균일하여 경계요소법을 이용하여 산란전계를 구하고자 한다. z방향으로 무한한 원통형 산란체에 의해 산란된 산란 전계 또한 z방향으로 분극되어 다음과 같이 주어진다. 시간조화 함수로는 e^{jwt}를 사용하였다.

$$u_s(x,y) = \sum_{i=1}^{N} k_0^2 \int\int_{S_i} d\rho' \left\{ \varepsilon_i - \varepsilon_b + \frac{j}{\omega\varepsilon_0}(\sigma_i - \sigma_b) \right\} \times u(\rho')\, G(\rho, \rho') \tag{1a}$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \int_{\Gamma_i} dl' \left\{ u(\rho') \frac{\partial G(\rho, \rho')}{\partial n} - G(\rho, \rho') \frac{\partial u(\rho')}{\partial n} \right\} \tag{1b}$$

여기에서 i=1, 2 , N=2이며 k_0는 $\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$이고 ω는 전원의 각주파수, μ_0와 ε_0는 각각 자유공간에서의 유전율, 도전율이며, $u(\rho')$은 산란체 내부에서의 총 전계이고, $G(\rho, \rho')$은 공기에서의 관측점(ρ)과 원

통형 산란체 내부의 전원점(ϱ')에 의한 반공간 그린 함수이며, $\partial/\partial n$은 산란체 경계면(Γ_i)에 대한 수직방향 미분값이다. $d\varrho'$과 dl'는 각각 산란체에 대한 면적분과 경계면(Γ_i)에 대한 선적분이다.

반공간 Green 함수는 $y=\pm\infty$에서 복사조건과 $y=0$에서의 경계조건을 만족해야 한다. 송수신점이 모두 땅속에 있는 경우 Green 함수는 전원점에서 관측점으로 직접 도달하는 직접파와 경계면에 반사되어 도달하는 반사파의 합으로 주어지고 전원점이 땅속, 관측점이 공기에 있는 경우는 굴절파만이 존재하며 x방향의 파수 k_x에 대하여 각각의 평면파 성분들의 합으로 주어진다. 즉 반공간 Green 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G(\varrho,\varrho') = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} dk_x \frac{e^{-jk_x(x-x')}}{2j\sqrt{k_2^2-k_x^2}} \times\left[e^{-j\sqrt{k_2^2-k_x^2}|y-y'|} + \frac{\sqrt{k_2^2-k_x^2}-\sqrt{k_0^2-k_x^2}}{\sqrt{k_2^2-k_x^2}+\sqrt{k_0^2-k_x^2}} e^{-j\sqrt{k_2^2-k_x^2}(y+y')}\right], \quad y'\le 0,\ y\le 0 \tag{2a}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} dk_x \frac{e^{-jk_x(x-x')}}{j(\sqrt{k_2^2-k_x^2}+\sqrt{k_0^2-k_x^2})} \times e^{j\sqrt{k_2^2-k_x^2}y'} e^{-j\sqrt{k_2^2-k_x^2}y},\quad y'\le 0,\ y\ge 0 \tag{2b}$$

여기에서 k_2는 땅속매질의 파수이다.

산란체와 배경매질이 균일한 매질이므로 경계요소법을 이용하여 산란체 경계면에서 경계조건을 만족하는 산란 전계와 산란 전계의 수직방향 미분성분을 구할 수 있다. 산란체 외부에서의 총전계는 입사 전계와 수식 (1b)의 Kirchhoff integral의 합으로 표시할 수 있으며 손실 반공간에서 산란체의 경계를 따라 경계면에서의 전계와 전계의 수직방향 미분성분에 수식 (2a)의 반공간 Green 함수와 그것의 미분성분을 곱한 항의 적분으로 표현할 수 있다. 산란체 내부에서의 전계는 수식 (1b)에서 Green 함수가 산란체의 유전율과 도전율로 가득 차 있는 공간에서의 Green 함수로 대체되어 표현된다.

두 개의 Kirchhoff integral로부터 수치계산을 통하여 경계면에서의 산란체 내, 외부 경계면 전계를 구할 수 있으며 산란체의 경계면을 작은 조각으로 나누어 각 점에서 산란체 외부와 내부에서의 전계(u)와 전계의 수직방향 미분성분($\partial u/\partial n$)이 연속이 되는 경계조건을 적용하면 작은 조각으로 나눈 각 점에서 산란체 경계면에서의 전계(u)와 전계의 수직방향 미분성분($\partial u/\partial n$)을 구할 수 있다. 이러한 경계요소법으로부터 구한 산란체 경계면에서의 전계와 수직방향 미분성분으로부터 땅 위 측정점에서의 전계는 전원점에서 관측점으로 입사하는 입사 전계와 수식 (1b)와 수식 (2b)의 Green 함수로부터 계산되는 산란전계의 합으로 주어진다.

Ⅲ. 반복기법 최적화 역산란

다변수 최적화 역산란[9] 방법에 의하여 배경매질과 산란체의 미지수를 구할 수 있다. 측정된 산란전계의 파수 스펙트럼 U_M^S과 가정된 미지수들 즉, 산란체의 크기, 위치, 매질변수(유전율, 도전율), 배경매질의 매질변수(유전율, 도전율)들로부터 계산된 산란 전계의 파수 스펙트럼 U_C^S의 차이의 제곱을 다음과 같이 비용함수 F로 정의한다.

$$F_k = \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=1}^{M}\left| U_M^S(k_m,f_l) - U_C^S(k_m,f_l;p_k)\right|^2 \tag{3}$$

여기에서 f_l과 k_m은 각각 l번째 주파수와 m번째 파수이며 p_k는 가정된 미지수들의 k번째 값들이다. L과 M은 각각 사용된 총 주파수의 개수와 사용된 스펙트럼의 개수이다.

측정 오차(잡음)에 의하여 역산란 과정에서 감쇄모드가 지수적으로 증폭되어 나타나는 illposedness는 파수 스펙트럼 영역에서 감쇄모드를 제거하고 진행모드만을 역산란의 데이터로 사용하여 해결할 수 있다.

수식 (3)의 비용함수를 LMA와 GA[6],[7]의 혼합 알고리즘을 이용하여 원래의 값이 나올 때까지 미지수 pk를 반복 계산하여 최소화 할 수 있다. LMA로부터 비용함수의 국부 극소치를 찾게 되면 LMA에서 GA로 전환하여 이전 국부 극소치보다 더 낮은 값을 찾게 된다. 그 뒤 다시 LMA로 전환하여 더 낮은 극소치를 찾게 되고 이러한 과정이 반복됨에 따라 실 극소치를 구할 수 있다. 이상의 과정을 그림 2에 요약하였다.

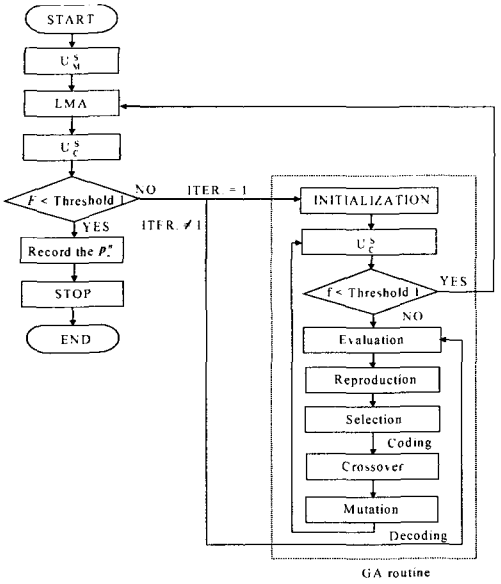

그림 2. 최적화 알고리즘의 개념도
Fig. 2. Iterative Reconstruction Algorithm.

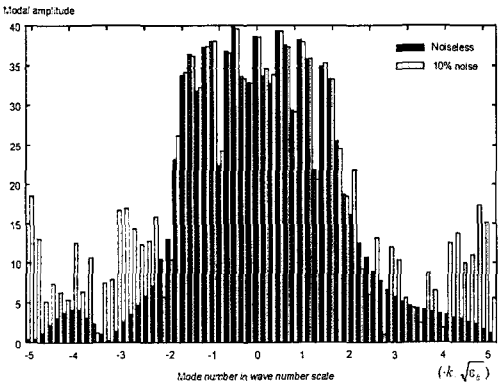

그림 3. 10 %의 가우시안 잡음이 들어갔을 때 산란 전계의 파수 스펙트럼
Fig. 3. Spectrum of the scattered fields when 10 % Gaussian-distributed measurement error is included.

Ⅳ. 두 개의 원통형 산란체의 재구성

그림 1에서 볼 수 있듯이 손실이 있는 땅속에 두 개의 원통형 산란체가 묻혀 있으며 송, 수신안테나가 일정한 거리를 유지하고 공기와 땅의 경계면을 따라 움직이며 측정한다. 주파수는 60 MHz를 사용하였다. 두 개의 산란체를 모두 직경이 1 λ이고, 유전율이 80, 도전율이 0.1 S/m 인 유전체로 가정하였

표 1. 두 원통형 산란체간의 거리가 1 λ일 때의 재구성 결과
Table 1. Reconstructed results of two cylinders buried and separated by 1.0 λ in the ground.

		Noiseless	10 % noise	Original value
Cylinder 1	center x_1	1.994 [m]	1.988 [m]	2.0 [m]
	center y_1	-1.993 [m]	-1.95 [m]	-2.0 [m]
	radius a_1	0.98 [m]	0.94 [m]	1.0 [m]
	ε_1	77.8	83.28	80.0
	σ_1	0.03 [S/m]	0.03 [S/m]	0.1 [S/m]
Cylinder 2	center x_2	-2.00 [m]	-2.00 [m]	-2.0 [m]
	center y_2	-2.02 [m]	-2.04 [m]	-2.0 [m]
	radius a_2	1.02 [m]	1.03 [m]	1.0 [m]
	ε_2	77.3	83.19	80.0
	σ_2	0.097 [S/m]	0.044 [S/m]	0.1 [S/m]
Earth medium	ε_b	6.01	6.0	6.0
	σ_b	9.8×10^{-4} [S/m]	1×10^{-3} [S/m]	1.0×10^{-3} [S/m]

으며 s만큼 떨어져 있고 0.5 λ의 깊이에 묻혀 있고 배경매질인 땅은 유전율이 6.0, 도전율이 0.001 S/m으로 가정하였고 송, 수신안테나의 거리는 0.5 λ이며 땅의 경계면으로부터 0.05 λ 떨어져 있다. 여기에서 λ는 배경매질의 파장으로 $\lambda_0\sqrt{\varepsilon_b}$로 주어지고 λ_0는 자유공간에서의 파장이고 ε_b는 배경매질의 비유전율이다. 0.1 λ의 간격으로 총 6 λ의 측정구간에서 경계요소법을 이용한 수치 계산으로부터 산란전계를 구했으며, 그림 3에서 볼 수 있듯이 10 %의 가우시안 잡음이 첨가되었을 때 경계면을 따라 산란전계의 푸리에 변환을 통하여 파수 스펙트럼을 구하였다. 감쇄모드를 제거하고 진행 모드만을 이용하기 위하여 x방향의 파수가 최대 $2k_0\sqrt{\varepsilon_b}$가 되어야 하므로 25개의 진행모드를 얻을 수 있다. 산란 전계의 측정 데이터를 이용하여 반복기법 최적화 역산란[9] 기법을 이용하여 산란체를 재구성할 수 있다. 여기에서 이미 알고 있는 정보는 측정안테나의 위치와 원통형 산란체의 개수, 산란체와 배경매질의 균일성 뿐이다. 미지수는 두 산란체의 중심위치 $(x_1, y_1; x_2, y_2)$, 크기 $(a_1; a_2)$, 비유전율과 도전율 $(\varepsilon_1, \sigma_1; \varepsilon_2, \sigma_2)$, 그리고 배경매질인 땅의 비유전율,

표 2. 두 원통형 산란체간의 거리가 0.1 λ일 때의 재구성 결과

Table 2. Reconstructed results of two cylinders buried and separated by 0.1 λ in the ground.

		Noiseless	10 % noise	Original value
Cylinder 1	center x_1	1.077 [m]	1.15 [m]	1.1 [m]
	center y_1	-1.91 [m]	-1.71 [m]	-2.0 [m]
	radius a_1	0.91 [m]	0.767[m]	1.0 [m]
	ε_1	68.3	93.5	80.0
	σ_1	0.5 [S/m]	0.43 [S/m]	0.1 [S/m]
Cylinder 2	center x_2	-1.095 [m]	-1.09 [m]	-1.1 [m]
	center y_2	-1.896 [m]	-2.05 [m]	-2.0 [m]
	radius a_2	0.93 [m]	1.077 [m]	1.0 [m]
	ε_2	89.9	91.2	80.0
	σ_2	0.5 [S/m]	0.019[S/m]	0.1 [S/m]
Earth medium	ε_b	5.93	5.98	6.0
	σ_b	1.44×10^{-3} [S/m]	1.4×10^{-3} [S/m]	1.0×10^{-3} [S/m]

도전율 (ε_b, σ_b)의 12개이다. 수치계산을 위하여 미지수의 범위를 $0\le x_1\le 3\lambda$, $-3\lambda\le x_2\le 0$, $-2\lambda\le y_1$, $y_2\le 0$, $0.25\lambda\le a_1, a_2$, $\le 0.75\lambda$, $0\le\varepsilon_1,\varepsilon_2\le 100$, $0.001\le\sigma_1,\sigma_2\le 1$, $3\le\varepsilon_b\le 12$, $10^{-5}\le\sigma_b\le 0.1$와 같이 정하였다.

표 1과 표 2에 땅속에 묻혀 있는 두 개의 원통형 산란체의 재구성 결과가 산란체간의 거리가 각각 1 λ일 때와 0.1 λ일 때, 산란 전계에 10 %의 가우시안 잡음이 첨가되었을 때 산란체와 배경매질의 원래 값과 비교되어 나와 있다. 재구성된 12개의 미지수들은 원래 값에 근접하여 나타났으며 두 산란체의 거리가 가까워지더라도 두 산란체를 구분하고 식별하는데 어려움은 없다.

V. 결 론

반공간 역산란 과정에서 일어나는 illposedness를 $-2k_2\sim 2k_2$ 사이의 전파모드만을 사용하여 극복하고 매설 산란체의 위치, 크기, 비유전율, 도전율, 배경매질의 비유전율, 도전율을 다변수 최적화 역산란 기법을 이용하여 구해 보았다. 산란 전계 계산은 경계요소법을 이용하였으며 최적화 알고리즘은 Levenberg-Marquardt 알고리즘과 genetic 알고리즘의 혼합 알고리즘을 이용하여 변수들을 구해 보았다. 산란체의 위치, 크기뿐만 아니라 산란체의 유전율과 도전율을 모두 실제값에 근접한 값으로 구할 수 있음을 보였다. 또한 산란체 사이의 거리가 줄어들더라도 재구성이 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] M. Slaney, A. C. Kak and L. E. Larsen, "Limitation of imaging with first-order diffraction tomography", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, pp. 860-874, 1984.

[2] T. J. Cui, W. C. Chew, "Novel diffraction tomographic algorithm for imaging two dimensional targets buried under a lossy earth", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,* vol. 38, pp. 14-20, 2000.

[3] H. T. Lin, Y. W. Kiang, "Microwave Imaging for a dielectric cylinder", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1572-1579, 1994.

[4] C. C. Chiu, Y. W. Kiang, "Electromagnetic inverse scattering of a conducting cylinder buried in a lossy half space", *IEEE Trans Antennas Propagat.*, vol. 40, pp. 1562-1565, 1992.

[5] C. C. Chiu, P. T. Lin, "Image reconstruction of a perfectly conducting cylinder by the genetic algorithm", *IEE Proc. Microwave Antenna Propagat.*, vol. 143, pp. 249-253, 1996.

[6] C. S. park, S. K. Park and J. W. Ra, "Moment method and iterative reconstruction of two-dimensional complex permittivity by using effective modes with multiple sources in the presence of noise", *Radio Sci.*, vol. 31, pp. 1877-1886, 1996.

[7] S. Y. Yang, H. K. Choi and J. W. Ra, "Reconstruction of a large and high-contrast penetrable object by using the genetic and Levenberg-Marquardt algorithm", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 17-21, 1997.

[8] S. K. Park, C. S. Park and J. W. Ra, "Iterative angular mode inversion of a conducting cylin-

der", *Microwave Opt Technol Lett.*, vol. 10, pp. 173-177, 1995.

[9] H. K. Choi, J. W. Ra, "Detection and Identification of a tunnel by iterative inversion from cross-borehole CW measurement", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 21, pp. 458-465, 1999.

[10] S. Kagami, I. Fukai, "Application of boundary element method to electromagnetic field problems", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 32, pp. 455-461, 1984.

김 정 석

1972년 1월 13일생
1994년: 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
1996년: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
2001년: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
2001년~현재: 삼성전자 무선사업부 책임연구원
[주 관심분야] 전자파 수치해석, 전자파 역산란, 지하탐사, 안테나

나 정 웅

1941년 7월 10일생
1963년: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
1967년: Polytechnic Institute of Brooklyn (공학석사)
1971년: Polytechnic Institute of Brooklyn (공학박사)
1971년~2002년: 한국과학기술원 교수
1997년: 대한전자공학회 회장
1990년~1991년: IEEE Korea MTT chapter 회장
1992년~현재: Microwave & Optical Technology Letters-Editorial Board Members
1994년~현재: International nion of Radio Science(URSI), Korea 회장
1996년~1998년: IEEE MTT-S Administrative Committee 집행위원
2002년~현재: 광주과학기술원 원장
[주 관심분야] 안테나, 전자파 산란, 전자파 역산란, 전파전파