

論文91-28A-9-7

저대역 필터를 사용한 파수영역에서의 역산란 방법

(A Spectral Inverse Scattering Technique by Using Low Pass Filters)

李 在 敏*, 金 世 潤**, 羅 正 雄***

(Jae Min Lee, Se Yun Kim, and Jung Woong Ra)

要 約

본 논문에서는 파수영역의 역산란 방법으로 구한 유전율 분포에 미치는 잡음의 영향을 살펴보고, 그 영향을 줄일 수 있는 저대역 여파기를 제안하였다. 간단한 모형에 대해 수치계산 결과, 산란 신호에 약간의 잡음이 있을 경우에도 재구성한 유전율 분포에는 엄청난 오차가 있다는 것을 알 수 있었다. 제시한 저대역 여파기를 사용하면, 원래의 분포와 유사한 분포를 구할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 여러가지의 역산란 변수들이 각각 변할 때도 필요한 저대역 여파기의 최적조건이 물리적인 의미와 일치함을 보였다.

Abstract

In this paper the noise contribution to the permittivity profile reconstructed by the spectral inverse scattering scheme is investigated and a low-pass filter is proposed to reduce such the noise effects. Numerical simulations showed that the reconstructed profiles are affected by extremely large error. The suggested low-pass filter made it possible to reconstruct the permittivity profile nearly similar to the original. Furthermore, the optimal condition to the low-pass filter agreed well with the physical meaning even if several variables involved in the inverse scattering scheme were changed.

I. 서 론

임의의 2차원 유전체에 전자파를 가하여 산란된

전자파로부터 유전체 내부의 유전율 분포를 사용 전자파의 파장의하의 정도로 판별할 수 있도록 하는 파수 영역의 역산란 방법이 개발되었다.^{1,2} 이 역산란 방법을 사용하면 신호에 잡음이 없을 경우에 역산란 방법으로 구한 유전체 내부의 유전율 분포는 거의 오차없이 원래의 분포와 같음을 보일 수 있었다.³ 그러나 실제와 같은 상황에서는 주변기기에서 발생하는 간섭신호나 측정장비의 오차와 같은 잡음이 측정 신호에 항상 포함되므로, 이러한 잡음의 영향을 자세히 살펴볼 필요가 있다.

본 논문에서는 수치계산을 위해 Gaussian random

*正會員, 三星電子 情報通信研究所 無線研究室
(R/F Comm's Lab., R & D Center, Samsung Electronics)

**正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室
(Appl. Elec. Lab., KIST)

***正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1991年 6月 22日

잡음을 정확한 산란 전계 스펙트럼에 첨가시키고, 이를 산란전계에 대한 측정자료로 삼아 파수영역의 역산란 방법을 사용하여 유전체 내부의 비유전율 분포를 구하였다. 수치계산 결과 비록 신호에 비해 미약한 잡음이 존재하더라도 재구성된 유전율 분포는 원래의 분포와는 엄청난 차이를 나타내었다. 이는 역산란 문제에 고유한 ill-posedness^[4-6]의 성질에 의한 것으로, 본 역산란 방법에서 파장이하의 물체까지 분별해 내리는 초정밀 분해능(superresolution)^[7]을 얻으려고 함으로 생긴다.

따라서 본 논문에서는 적절한 여파기를 사용하여 잡음의 영향을 줄이는 방법을 제안하였고, 이를 사용하여 실제 잡음을 신호에 첨가시켜 수치계산으로 간단한 유전체 모형에 대하여 비유전율 분포를 구하여 보았다. 특히 잡음의 영향을 줄이면서 원래의 유전율 분포도 잘 재구현할 수 있도록 하는 여파기의 최적조건을 수치계산으로 살펴보았다. 또 이러한 여파기의 최적 조건이 측정거리, 잡음수준, 원래의 유전율 분포등에 따라 달라짐을 조사하였다.

II. 이 론

그림1과 같이 임의의 전원으로부터 복사된 평면파 $u^i(x, y)$ 가 z방향으로 분극되어 단면 S내에 비유전율 분포 $\epsilon(x, y)$ 를 갖는 유전체 기둥으로 입사할 경우에, 임의의 점 (x, y) 에서의 전계 $u(x, y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[8]

$$u(x, y) = u^i(x, y) - \frac{jk_0^2}{4} \iint_S dx' dy' p(x', y') H_0^2 \left(k_0 \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right) \quad (1)$$

$$p(x, y) = [\epsilon(x, y) - 1] \cdot u(x, y) \quad (2)$$

여기서 p 는 유전체 내부에 유기된 등가전원을 나타낸다. 식(1)을 y 에 대해 푸리에 적분을 하면 다음과 같은 식으로 표현된다^[2]

$$U(x, \beta) = U^i(x, \beta) + F(x, \beta) \cdot I(\beta) \quad (3)$$

$$F(x, \beta) = -\frac{jk_0^2}{2} \frac{e^{\pm j\sqrt{k_0^2 - \beta^2} x}}{\sqrt{k_0^2 - \beta^2}} \quad (4)$$

$$I(\beta) = \iint_S dx dy p(x, y) e^{\pm j\sqrt{k_0^2 - \beta^2} x + j\beta y} \quad (5)$$

식(4)와 (5)의 복부호중 윗부호는 $x \geq x'$ 일 경우이고, 아래부호는 그 반대의 경우에 사용한다. 식(5)의 적분 방정식을 직접 해석적인 방법으로 풀기 어려우므로, 여기서는 모멘트 방법(moment method)^[9]을 사용하여 수치계산 하고자 한다. 먼저 단면 S를 사용전

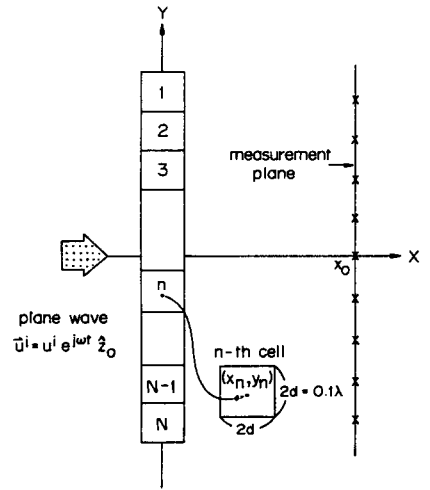


그림 1. 본 수치계산에 사용된 유전체 기본모형
Fig 1. Standard structure of the dielectric object used in this numerical simulation.

자파의 파장보다 작은 여러개의 $2d \times 2d$ 인 정사각형 cell로 나누면, n 번째 cell인 S_n 내에서 전계 및 유전율 분포를 S_n 의 중심인 (x_n, y_n) 에서의 전계 u_n 과 비유전 상수 ϵ_n 으로 근사화 시킬 수 있다. 따라서 이를 식(5)에 대입하여 풀면 다음과 같은 선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$I(\beta) = B(\beta) \sum_{n=1}^N G_n(\beta) p_n \quad (6)$$

여기서

$$B(\beta) = \frac{2\sin(\sqrt{k_0^2 - \beta^2} d)}{\sqrt{k_0^2 - \beta^2}} \cdot \frac{2\sin(\beta d)}{\beta} \quad (7)$$

$$G_n(\beta) = e^{j\sqrt{k_0^2 - \beta^2} x_n + j\beta y_n} \quad (8)$$

$$p_n = [\epsilon(x_n, y_n) - 1] \cdot u(x_n, y_n) = [\epsilon_n - 1] u_n, S_n \quad (9)$$

식(6)을 이용하여 식(3)을 정리하면, 다음과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=1}^N G_n(\beta) p_n = \frac{U(x, \beta) - U^i(x, \beta)}{F(x, \beta) B(\beta)} \quad (10)$$

유전체 외부인 $x = x_0$ 선상에서 구한 전계 스펙트럼으로부터 유전체 내부의 비유전율 분포를 계산하는 과정은 다음 3단계로 요약할 수 있다. 먼저 입사파로부터 $U^i(x_0, \beta)$ 를 얻을 수 있으므로, β 를 N 개의 서로 다른 공간주파수 β_i 로 취하여 입력자료인 $U(x_0, \beta_i)$ 와 $U^i(x_0, \beta_i)$ 를 구하고, 이를 식(10)에 대입하여 풀

면 p_n 을 구할 수 있다. 다음으로 유전체 내부의 전계 u_n 는 먼저 앞에서 구한 p_n 을 식(10)에 대입하여 유전체 내부를 지나는 $x=x_n$ 선상의 전계 스펙트럼 $U(x_n, \beta)$ 를 구하고, 이를 역푸리에 변환하여 유전체 내부의 점 (x_n, y_n) 에서의 전계를 구하면 된다. 마지막으로 앞에서 구한 유전체 내부의 S_n 에서의 전계와 분극으로부터 S_n 내의 ϵ_n 은 식(2)로 쉽게 얻을 수 있다.

III. 잡음의 영향 및 저대역 여파기

측정된 산란전계 스펙트럼에 잡음이 없을 경우, 앞에서 기술한 역산란 방법으로 유전체 내부의 유전율 분포를 사용전자파의 파장이하로도 구별해 낼 수 있음을 보이 바 있다.³⁾ 그러나 실제 상황에서는 측정된 산란전계 스펙트럼에는 항상 잡음이 존재하므로, 이러한 잡음이 역산란 방법으로 구한 유전율 분포에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다.

먼저 함수 $F(x, \beta)$ 의 역할을 자세히 살펴보자. 신호의 측정이 이루어지는 $x=x_0$ 선상에서 임의의 공간 주파수인 $\beta=\beta_i$ 에 대해 식(4)를 β_i 의 절대값이 k_0 보다 클때와 작을때로 나누어 표현하면 다음과 같다.

$$F(x_0, \beta_i) = \begin{cases} -\frac{jk_0^2}{2} \frac{e^{-\sqrt{k_0^2 - \beta_i^2} x_0}}{\sqrt{k_0^2 - \beta_i^2}}, & |\beta_i| \leq k_0, \\ -\frac{k_0^2}{2} \frac{e^{-\sqrt{\beta_i^2 - k_0^2} x_0}}{\sqrt{\beta_i^2 - k_0^2}}, & |\beta_i| > k_0 \end{cases} \quad (11)$$

식(11)에서 보듯이 $F(x_0, \beta_i)$ 은 $|\beta_i| > k_0$ 일 때 지수적으로 감쇄하여 마치 저대역 여파기와 같은 역할을 하여 이러한 파수 영역의 산란 전계 스펙트럼을 또한 지수적으로 감소시킨다. 그러나 역산란 과정은 일차로 측정된 산란전계 스펙트럼에 $F(x_0, \beta_i) / 1$ 과 같은 고대역 여파기를 곱하여 $I(\beta_i)$ 을 계산해야 한다. 따라서 산란 전계 스펙트럼에 첨가된 미소한 잡음이라도 고주파 성분을 엄청나게 증폭 시키기 때문에 문제가 발생한다. 특히 산란전계의 잡음이 재구성된 등가 유전전류에 미치는 영향은 측정위치가 유전체로부터 멀어져 x_0 가 커질수록 엄청나게 증가함을 식(11)로부터 알 수 있다.

이와 같은 큰 오차를 유발하는 높은 파수 성분에 포함된 잡음의 영향을 줄이기 위한 한 방안으로 적절한 형태의 저대역 필터를 사용하여 재구성된 유전율 분포의 오차에 큰 영향을 주는 높은 파수영역의 성분을 줄이는 것이다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 파수영역의 필터를 사용하여 잡음이 첨가된 경우에 유전율 분포를 재구성 하였다.

$$L(\beta) = \begin{cases} 1, & |\beta| \leq \tau \\ e^{-\sqrt{\beta^2 - \tau^2} x_0 / \tau}, & |\beta| > \tau \end{cases} \quad (12)$$

여기서 β 는 선택파수, x_0 는 측정거리의 x 좌표이고, 또 τ 는 주어진 역산란문제에 따라 조절해야 하는 저대역 여파기 L 의 조정 계수이다. 그림2는 저대역 여파기 L 을 여러가지 조정 계수에 대하여 도시한 것이다.

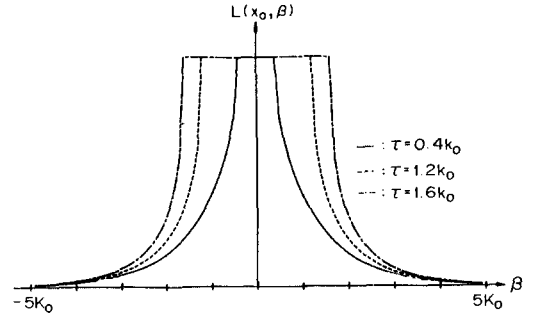


그림 2. 파수영역에서의 저대역 필터
Fig. 2. Low pass filter in the spectral domain.

IV. 모의 계산결과 및 검토

파수영역에서의 역산란 방법을 적용시 잡음의 영향을 줄이는 방안으로 제시한 저대역 여파기의 효용성을 살펴보기 위하여, 간단한 구조를 갖는 유전체 모형에 대한 유전율 분포를 수치 계산으로 구하였다. 본 수치계산에 사용된 유전체의 기본 모형은 그림 1 과 같이 단면의 한변의 길이가 0.1λ 인 정사각형 24 개를 x 축을 따라 24개가 일렬로 나란히 붙여 막대모양을 이루게 하였다. 모형내의 비유전율은 허수부를 0으로 두고, 실수부의 최대치를 3으로 하고 최소치를 1로 하여 삼각형 함수분포를 이루게 하였다. 이와같은 유전체의 기본 모형에 시간조화함수 $e^{j\omega t}$ 를 갖고 z 방향으로 분극된 평면파가 x 축 방향으로 입사할 경우에, 유전체 중심인 원점에서 1λ 떨어진 $x=x_0$ 선상에서의 전계 스펙트럼을 공간 주파수 $\beta=0$ 와 이를 중심으로 공간 주파수 간격이 $0.43k_0$ 씩 떨어진 24개의 점에서 구하여 입력 자료로 하였다. 그림 3 에서 보듯이 잡음이 없을 경우에는 거의 정확히 유전율 분포를 잘 재현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 실제의 상황에서는 측정된 입력 신호인 산란 전계 스펙트럼에는 항상 잡음이 존재한다. 일반성을 잃지 않기 위하여 평균이 0이고 표준편차 1인

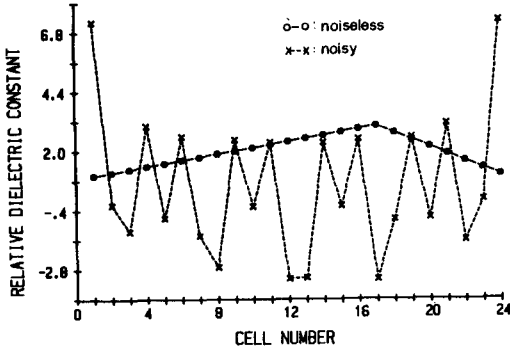


그림 3. 1% Gaussian random 잡음이 있는 경우에 재구성한 유전율 분포
 Fig. 3. Reconstructed profile for 1% gaussian random noise in the scattered field spectrum.

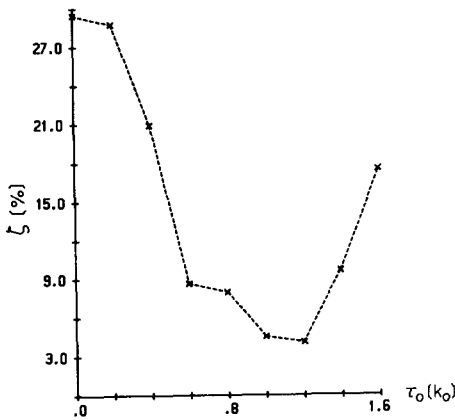


그림 4. 조정계수 τ에 따른 재구성된 오차의 rms값
 Fig. 4. Root mean square value of reconstruction error according to the parameter τ.

Gaussian random 잡음을 가정하여 입력신호인 전개 스펙트럼에 첨가시켜 역산란 방법으로 재구성 하였다. 이때 사용되는 Gaussian 잡음의 크기는 측정파수에서 취한 산란전계 스펙트럼의 합과 잡음의 합의 비로 결정된다. 산란 전계 스펙트럼에 1% Gaussian random 잡음을 첨가시킨 경우에 본 역산란 방법으로 재구성한 유전율 분포를 그림3에 나타내었다. 그림4에서는 그림3에서 주어진 것과 같은 상황인 경우 앞 장에서 제시한 저대역 여파기 $L(\beta, \tau)$ 를 사용하여 재구성한 유전율 분포의 rms값을 조정 계수인 τ

에 대하여 나타내었는데, 이때 사용된 비유전율 분포의 rms값은 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\epsilon_n^t - \epsilon_n)^2}{N}} \times 100[\%] \quad (13)$$

여기서 ϵ_n^t 과 ϵ_n 을 각각 n번째 cell의 원래 및 재구성된 비유전율 분포를 나타낸다. 편의를 위하여 ζ 의 최소인치를 ζ_0 를 갖는 τ 의 값을 τ_0 라 두자. 기본 모형은 τ_0 가 1.2 k_0 일 때, 비유전율의 rms 값의 최소치인 ζ_0 가 4%가 되며, τ 의 값이 1.2 k_0 보다 작거나 커질수록 ζ 의 값이 커진다. 이를 좀더 자세히 관찰하기 위해 τ 를 0.4, 1.2, 1.6 k_0 로 한 세 경우의 유전율 분포를 그림5에 보였다. 여기서 τ 가 1.2 k_0 보다 작을 경우에는 원래의 유전율 분포를 재구성 하기에는 정보가 모자람을 나타내며, τ_0 가 1.2 k_0 보다 클때는 고주파 잡음의 영향이 커지기 때문이다.

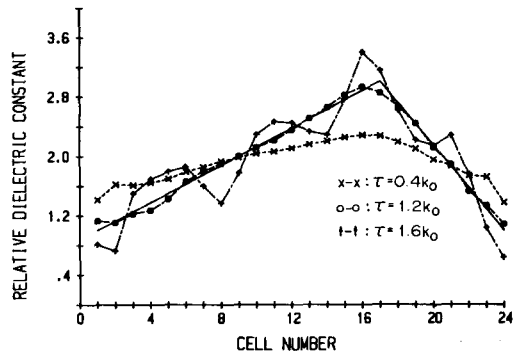


그림 5. 1% Gaussian random 잡음이 있는 경우에 대해 조정계수를 $\tau=0.4, 1.2$ 와 1.6 k_0 로 하였을 때의 여파기의 효과
 Fig. 5. Filtering effects for 1% gaussian random noise for $\tau=0.4, 1.2$, and 1.6 k_0 .

특히 흥미있는 것은 역산란 식에 사용되는 여러 변수들이 재구성된 비유전율 분포에 미치는 영향을 살펴보는 일인데, 각각의 변수들은 하나씩만 변화 시키면서 잡음에 의한 오차를 최소화 할 수 있는 저대역 여파기의 조정계수를 살펴보았다. 먼저 그림4와 같고, 측정거리만 달리한 즉 $x_0=0.5, 1.5\lambda$ 인 세 경우에 대해 수치계산으로 구한 비유전율 분포를 살펴보았다. 그림6과 표1에서는 거리에 따라 재구성한 유전율 분포 및 최소의 rms 값 ζ_0 를 주는 여파기 L의 적정 조정계수인 τ_0 값을 나타내었다. 이를보면

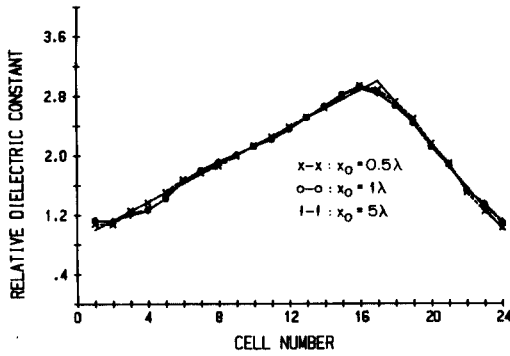


그림 6. 측정 거리에 대한 효과
Fig. 6. Effects of the measurement distance x_0 .

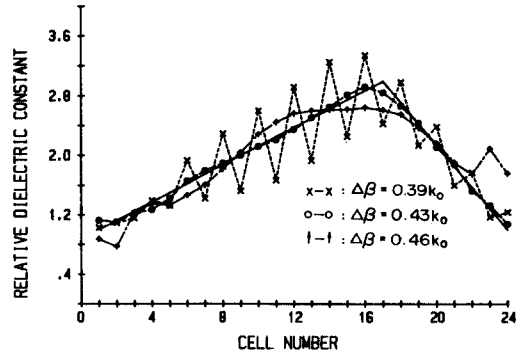


그림 7. 선택파수의 간격에 대한 효과
Fig. 7. Effects of the spectral sampling interval $\Delta\beta$.

표 1. 측정 거리에 따른 최적 Filter
Table 1. Optimal filters for different x_0

$x_0[\lambda]$	$\tau_0[k_0]$	$\zeta_0[\%]$
0.5	1.3	2.7
1	1.2	4.1
5	1.0	4.5

표 2. 선택파수의 간격에 따른 최적 Filter
Table 2. Optimal filters for different $\Delta\beta$

$\Delta\beta[k_0]$	$\tau_0[k_0]$	$\zeta_0[\%]$
0.39	1.1	17
0.43	1.2	4.1
0.46	0.5	22

측정거리가 멀수록 재구현된 비유전율 분포의 오차가 크며, 적정 조정 계수인 τ_0 가 작아짐을 알 수 있다. 이는 그린함수 스펙트럼 중 거리의 함수로 표현되는 $F(x_0, \beta)$ 가 선택 파수중 $|\beta| > k_0$ 를 만족하는 파수에서 거리에 따라 지수함수로 감소하여, 실제 역산란 계산시 산란 전계 스펙트럼에 그 역수가 곱해짐으로 높은 파수에 포함된 고주파 잡음을 증폭시키는 역할을 한다. 따라서 거리가 멀어질 수록 재구현된 비유전율 분포에 포함된 오차가 크고 또한 높은 파수의 잡음의 영향을 줄이기 위해 여파기의 조정 계수인 τ_0 가 작아진다.

그림7과 표2에서는 선택파수의 간격 $\Delta\beta$ 를 각각 $0.38k_0, 0.43k_0, 0.47k_0$ 로 취하고 다른 변수는 기본형과 같이 취한 경우에 대해 역산란 방법으로 재구현한 유전체 모형의 비유전율 분포 및 ζ_0 를 갖는 τ_0 를 나타내었다. $\Delta\beta = 0.34k_0$ 일 때 오차가 가장 적음을 알 수 있고, $\Delta\beta = 0.38k_0$ 및 $0.47k_0$ 를 취한 경우는 분포의 중간 부분 및 경계근방에서 각각 재구성 오차가 커짐을 볼 수 있다. 이것은 산란 전계 스펙트럼으로부터 등가유기전류를 구하는 산란 행렬인 G_n 이 등가유기전류에 대한 1차원 푸리에 변환형으로 되기 때문에 파수 $\Delta\beta = 0.43k_0$ 에 대응되는 공간상의 측정거리가 2.33λ 로 물체의 실제 길이인 2.4λ 에 가

장 가깝기 때문이다. 그러나 $\Delta\beta = 0.39k_0$ 는 공간상의 대응하는 실제 측정거리가 유전체의 길이보다 긴 2.56λ 가 되고, $\Delta\beta = 0.46k_0$ 에 대응되는 측정거리가 2.17λ 로 실제 유전체의 길이보다 짧기 때문이다.

유전체 내의 유전율 분포의 변화가 기본형인 삼각형 분포보다 완만하거나 변화가 심한 경우에 나타나는 현상을 살펴보기 위하여, 분포의 변화만을 변화시킨 경우에 대하여 살펴보자. 그림8 및 표3은 분포의 변화가 cosine, 삼각형 및 계단형을 갖는 3경우에 대해 비유전율 분포와 τ_0 의 값을 나타내었다. 유전율 분포의 변화가 빠를수록 높은 파수의 산란전계 스펙트럼을 필요로 하며, 또 높은 파수의 성분을 가져 올수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 여기서 여파기의 τ_0 가 유전율 분포가 심할수록 그 값이 커지는데, 이는 원래 분포의 변화가 심할수록 높은 파수의 산란 전계 스펙트럼을 갖고 있으므로, 재구현시에는 높은 파수 성분의 산란 전계 스펙트럼을 필요로 하기 때문이다. 그러나 높은 파수의 성분은 그린함수의 영향으로 그 크기가 파수에 따라 지수함수적으로 감소하여 낮은 파수 성분에 비해 상대적으로 잡음의 영향을 받기 쉽다. 따라서 유전율 분포의 변화가 심할수록 그 오차가 커짐을 알 수 있다.

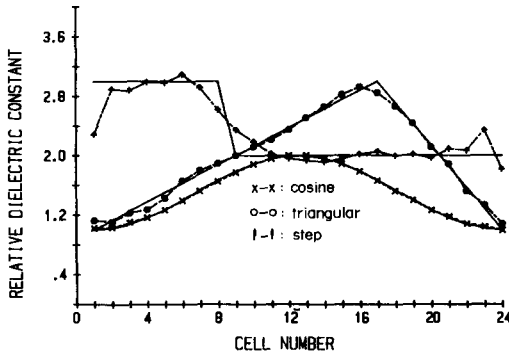


그림 8. 유전율 분포의 변화에 대한 효과
Fig. 8. Effect of different permittivity distributions.

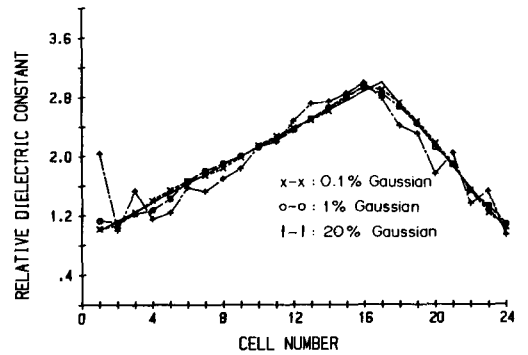


그림 9. 첨가된 Gaussian random 잡음의 크기에 대한 효과
Fig. 9. Effects of the added gaussian random noises level.

표 3. 유전율 분포의 변화에 따른 최적 Filter
Table 3. Optimal filters for different permittivity distributions.

profile shape	$\tau_0 [k_0]$	$\xi_0 [\%]$
cosine	0.9	2.4
triangular	1.2	4.1
step	1.2	8.2

표 4. 잡음수준에 따른 최적 Filter
Table 4. Optimal filters for different noise levels.

noise level [%]	$\tau_0 [k_0]$	$\xi_0 [\%]$
0.1	1.6	2.2
1	1.2	4.1
20	0.5	23.7

마지막으로 잡음의 정도가 재구현된 유전율 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 잡음을 각각 0.1%, 1%, 20%로 한 세 경우의 비유전율 분포 및 τ_0 의 값을 그림9와 표4에 나타내었다. 첨가되는 잡음의 정도가 심할수록 재구현된 분포의 오차가 커지고, 최소치 ξ_0 를 갖는 여파기의 τ_0 가 작아짐을 알 수 있다. 이는 잡음이 커짐에 따라 신호에 비해 상대적으로 크기가 큰 잡음을 줄이기 위하여 더 작은 τ_0 를 가져야 하기 때문이다.

V. 결 론

파수영역의 역산란 방법의 잡음에 대한 영향을 조사하기 위하여 간단한 2차원 유전체에 대하여 얻어진 산란 전계 스펙트럼에 Gaussian 형의 잡음을 첨가시켜, 파수영역의 역산란 방법으로 유전체 내부의 유전율 분포를 재구현하여 잡음의 영향을 살펴 보았다. 수치계산에 의해 재구현된 유전율 분포에는 원래의 분포와는 달리 상당히 많은 높은 파수의 잡음이 존재함을 살펴볼 수 있었다. 이러한 높은 파수의 잡음을 줄이는 방법으로 파수영역에서 저대역 필터를 사용하는 방법이 제안되었고, 이를 간단한 유전체 모형에 대하여 적용하여 봄으로써 비유전율 분포에 포함된 오차를 크게 줄일 수 있음을 볼 수 있었다.

또 유전체의 특성에 따라 달라지는 신호의 특성을 고려할 수 있도록 제한한 저대역 필터에 조절 변수를 둬으로써 여러가지 상황에서도 크게 오차를 줄일 수 있었다.

參 考 文 獻

- [1] J.M. Lee, S.Y. Kim, and J.W. Ra, 'A spectral inverse technique for reconstruction of complex permittivity profiles,' *Electron. Lett.* vol. 24, pp. 556-558, 1988.
- [2] 김세운, 이재민, 나정용, '파수영역에서의 모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산방법, I: 이론,' 전자공학회논문지, 제25권, 제10호, pp. 1-9, 1988.
- [3] 이재민 김세운, 나정용, '파수영역에서의 모멘트 방법을 이용한 새로운 역산란 계산방법, II: 수치계산,' 전자공학회논문지, 제25권, 제10호, pp. 10-17, 1988.
- [4] A.N. Tikhonov, and V.Y. Arsenine, *Solution of Ill-posed Problems*, Wiston, Washington, 1977.

- [5] B. Bertero, C. De Mol, and G.A. Viano, 'The stability of inverse problems,' in *Inverse Scattering Problems in Optics*, H. P. Baltes, Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1980, Ch. 5.
- [6] C.W. Groetsch, *The Theory of Tikhonov Regularization for Fredholm Equation of the First Kind*, Pitman, New York, 1984.
- [7] H.G. Schmidt-Weinmar, 'Spatial resolution of subwave length source from optical far zone data,' in *Inverse Source Problems in Optics* H.P. Baltes, Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1978, Ch. 4.
- [8] J.H. Richmond, 'Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross-sectional shape,' *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 13, pp. 334-341, 1965.
- [9] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, 1968.

 著 者 紹 介

李 在 敏 (正會員)

1959年 9月 24日生. 1982年 경북대학교 전자공학과 졸업. 1984年 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 공학석사 취득. 1989年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사 취득. 1989年~현재 삼성전자 정보통신부문 기흥연구소 선임연구원.

金 世 潤 (正會員) 第25卷 第10號 參照

현재 한국과학기술연구원 응용전자연구실 선임연구원

●

羅 正 雄 (正會員) 第25卷 第8號 參照

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수