

論文2003-40TC-10-1

## 반복 샘플링법을 사용한 임의 역산란 패턴을 위한 유전율 포텐셜 합성에 관한 연구

(A Study on the Synthesis of Dielectric Constant Potential for Arbitrary Inverse Scattering Pattern Using an Iterative Sampling Method)

南準錫\*, 朴義俊\*

(June Seok Nam and Eui Joon Park)

### 요약

라인 소스에 의한 빔 패턴 합성 문제에서 소스 분포함수와 빔 패턴 간의 관계는 푸리에 변환쌍으로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 원하는 lobe형 빔 패턴을 만족시키는 라인 소스 분포함수를 반복 샘플링을 통한 비선형 역변환법을 사용하여 합성하는 일반적인 방법을 제안한다. 이 방법은 유전 매질에 TE 및 TM 평면파 입사시 원하는 역산란 반사계수를 갖도록 하는 연속적으로 분포된 유전율 합성에 적용될 수 있으며, 임의의 반사계수를 갖는 전송선로 합성에도 적용될 수 있는 장점을 가진다. 대역저지 공간 필터 및 분산 특성을 갖는 전송선로 필터에 적용, 분석하므로써 제안한 방법의 타당성을 보인다.

### Abstract

In the beam pattern synthesis problem using line source, the relationship between source distribution function and beam pattern may be represented by Fourier transform pair. In this paper, a general method to synthesize the line source distribution for a desired lobe-like beam pattern is presented by developing the nonlinear inversion method based on an iterative sampling technique. This method can be applied to the synthesis of continuously distributed dielectric constants satisfying the desired inverse scattering coefficient patterns when illuminating by TE-polarized and TM-polarized plane waves to arbitrary dielectric material. Furthermore this method can also be applied to the synthesis of transmission line with arbitrary reflection coefficient patterns. Some bandstop spatial filter and dispersive transmission line filter are illustrated for generality.

**Keywords** : Sampling Method, Inverse Scattering, Pattern Synthesis, Dielectric Constant

\* 正會員, 金鳴工科大學校 電子工學部  
(School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

※ 본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

接受日字:2003年7月16日, 수정완료일:2003年10月10日

### I. 서론

역산란 문제는 일반적으로 비균질 매질에 전자기파를 입사시켜 반사되는 스펙트럼을 분석하므로써 매질의 전자기적 성질을 복구하는 과정이라 볼 수 있다. 특히 일차원 역산란과는 크게 세가지 비선형 미분방정식, 즉 Riccati 방정식, Zakharov-Shabat 방정식, 그리고

Sturm-Liouville 방정식 등으로 표현되어진다<sup>[1,2]</sup>. 각 미분방정식들의 해는 Riccati형, Gel'fand-Levitan-Marchenko형, 그리고 Volterra형 등으로 분류될 수 있으며, 이들은 적분방정식으로 표현된다. 이들 적분방정식들의 피적분함수는 매질의 유전율, 투자율, 도전율 등의 프로필을 나타내는 포텐셜함수로 표현되며 측정된 역산란 반사계수를 만족시키는 이 포텐셜들을 복구하는 과정이 오늘날의 역산란 문제라고 볼 수 있다. 일반적으로 해석적인 방법을 통해 비균질 매질의 포텐셜을 구하기는 매우 어려운 문제가 있으므로 비선형 근사화법<sup>[3]</sup> 혹은 연쇄(successive)근사화법<sup>[4]</sup> 등을 사용하여 포텐셜 함수를 구하였다. 이들 방법들을 사용하여 원하는 반사계수를 갖는 불균일 전송선로 설계<sup>[5,7]</sup>에 많이 적용되어 왔으나, 반사계수 목표치는 특정한 지지대역 창(window)으로 주어지므로서 임의의 반사 패턴을 만족시키는 포텐셜 합성문제에서는 제한적이다. 또한 만약 원하는 역산란 반사계수를 갖는 유전율 포텐셜 프로필을 합성하고자 할 경우 목표치에 따라 비유전율이 1 이하가 될 수 있으므로 물리적으로 성립될 수 없는 경우가 발생하는 단점도 가질 수 있다.

본 연구에서는 원하는 lobe형 역산란 반사계수 패턴의 각 lobe들을 개별적으로 제어하고, 합성된 유전율 프로필이 물리적으로 성립할 수 있도록 Riccati형 적분방정식에 대해 최적화 기법을 통한 반복 샘플링법을 적용할 수 있는 방법을 제안하고, 이를 TM 혹은 TE 평면파 입사시 원하는 반사계수를 갖는 연속적인 유전율 프로필을 합성하는데 적용한다. 또한 이 방법을 불균일 전송선로 합성에도 용이하게 적용됨을 보이고, 합성된 프로필을 사용하여 계산된 반사계수가 목표치와 부합함을 수치적으로 보임으로서 타당성을 입증한다.

II. 역산란 패턴에 대한 적분방정식 도출

파수  $k$ 를 갖는 정현적인 평면파가 <그림 1(a)>와 같이 입사각이  $\theta$ 인 방향으로 입사되면,  $0 \leq z \leq L$  에서 비유전율 프로필  $\epsilon_r(z, \omega)$ 을 갖는 유전체의 임의 위치에서의 반사계수  $R_A$ 에 대한 1차 비선형 미분방정식은 다음과 같이 표현된다<sup>[8]</sup>.

$$\frac{dR_A}{dz} = j2k\sqrt{S(\omega, z, \theta)}R_A - (1 - R_A^2)\frac{dr}{dz} \quad (1)$$

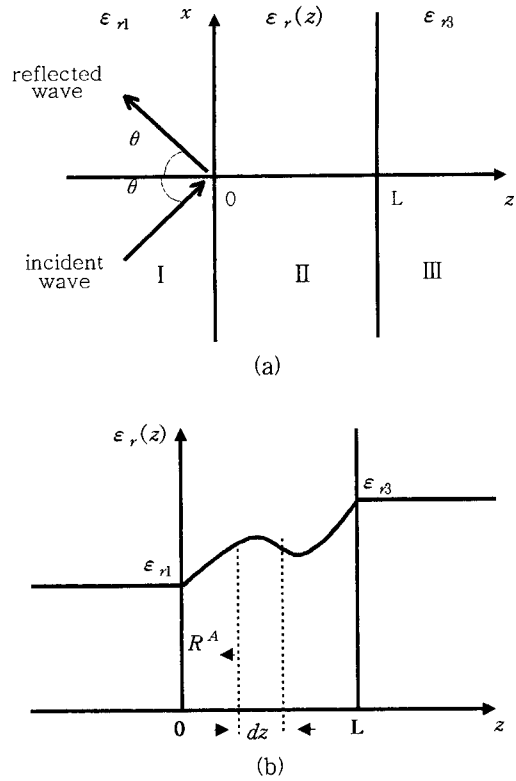


그림 1. 불균일 유전체 슬랩 기하구조. Fig. 1. Geometry of inhomogeneous dielectric slab.

여기서  $S(\omega, z, \theta) = \epsilon_r(\omega, z) - \sin^2 \theta$  이며 TE 및 TM 평파 각각에 대한  $dr$ 은 다음과 같다.

$$dr_{TE} = \frac{d\epsilon_r(\omega, z)}{4S(\omega, z, \theta)} \quad (2)$$

$$dr_{TM} = \frac{\epsilon_r(\omega, z) - 2\sin^2 \theta}{4\epsilon_r(\omega, z)S(\omega, z, \theta)} d\epsilon_r(\omega, z) \quad (3)$$

이때 유전율 프로필은 연속적이고, <그림 1(b)>와 같이  $z=0$  와  $z=L$  인 경계에서 불연속이 존재하지 않는다고 가정한다. 식 (1)로 부터  $R_A^2 \ll 1$  일 경우  $R(\omega, z, \theta) = \tanh^{-1}[R_A(\omega, z, \theta)]$ 로 두면  $z=0$ 에서의 입력반사계수  $R$ 의 해는 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$R_i(\omega, 0, \theta) = \int_0^L \frac{dr}{dz} \exp[-2jk \int_0^z \sqrt{S(\omega, z', \theta)} dz'] dz \quad (4)$$

여기서  $P = 2\pi(z/L - 1/2)$  과  $u = k \int_0^z \sqrt{S} dz' / \pi$ 로 변환하면 식 (4)의 크기는 다음 식의 크기와 같다.

$$R_i(u) = \int_{-\pi}^{\pi} g(p) e^{-ipu} dp \quad (5)$$

여기서  $g(p) = dr/dp$  이며 포텐셜함수를 나타내고,  $\epsilon_r(\omega, z)$  가 주파수에 독립적이라면 식 (2)와 식 (3)로부터  $\epsilon_r(z)$ 는 TE 및 TM 편파 각각의 경우에 대해 다음과 같이 표현된다

TE 편파인 경우 :

$$\epsilon_r(z) = \sin^2 \theta + G(p) / A_1 \quad (6)$$

TM 편파의 경우 :

$$\epsilon_r(z) = \frac{1}{2} [A_1 \epsilon_r^2(0) G(p) + \sqrt{\epsilon_r^2(0) A_1^2 G^2(p) - 4 \sin^2 \theta \epsilon_r^2(0) A_1 G(p)}] \quad (7)$$

여기서

$$A_1 = 1 / (\epsilon_r(0) - \sin^2 \theta)$$

$$G(p) = \exp[4 \int_{-\pi}^p g(p) dp]$$

를 의미한다.

한편 연속적인 전류소스를 갖는 길이  $L$ 인 일차원 라인소스 배열 안테나가  $z$ 방향으로 놓여 있을 경우 정규화된 원거리 전장 패턴, 즉 공간인자(space factor)<sup>[9]</sup>는 식 (5)와 같은 형태를 가진다. 따라서  $g(p)$ 는 라인소스 전류 분포함수에 대응되고  $R_i(u)$ 는 빔 패턴에 대응된다. 라인소스 안테나 빔 패턴 합성 문제는 기본적으로 원하는 빔 패턴이 주어질 경우 해당 전류분포를 합성하는 과정이라 볼 수 있으며, 이는 역 푸리에 변환을 통해 수행된다. 이때 빔 패턴의 목표치는 Hann, Hamming 혹은 Kaiser 창<sup>[9]</sup> 등으로 설정되므로써 주 빔폭 및 sidelobe 크기를 결정할 수 있다. 그러나 이 방법들은 설정한 창에 의해 패턴이 정해지므로 주 빔폭을 임의로 설정할 경우는 적합하지 않으며, 이를 보완한 대표적인 푸리에 변환법이 Woodward-Lawson 샘플링법<sup>[9]</sup>이다. 식 (5)에 Woodward-Lawson 샘플링법을 적용하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_i(u) = \sum_{n=-N}^N R_i(n) \frac{\sin \pi(u-n)}{\pi(u-n)} \quad (8)$$

여기서  $R_i(n)$  은  $u=n$  일 때  $R_i(u)$ 의 샘플값이며 복소수로 표현될 수 있다. 만약  $R_i(n)$ 이 설정되면  $R_i(u)$ 가 계산되고 해당 포텐셜함수  $g(p)$ 는 다음 식에 의해 합성된다.

$$g(p) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-N}^N R_i(n) e^{inp}, \quad -\pi \leq p \leq \pi \quad (9)$$

Taylor는 sidelobe들 크기가 같도록 함으로서 상대적으로 좁은 주 빔 패턴을 합성하기 위해 소위 연속적인 라인소스 Taylor 패턴<sup>[9]</sup>을 제안하고, 전류분포를 계산하기 위해 Woodward-Lawson 샘플링법을 사용하였다. 그 패턴식은 다음과 같다.

$$R_i(u) = C \frac{\sin \pi u}{\pi u} \frac{\prod_{n=1}^N (1 - (\frac{u}{u_n})^2)}{\prod_{n=1}^N (1 - (\frac{u}{n})^2)} \quad (10)$$

여기서  $u_n$ 은  $u$ 영역에서의 null 점을 나타내며 주빔과 sidelobe 크기의 비로 표현된다. 상수  $C$ 의 크기는 주빔의 최대 크기를 의미한다. 식 (9)로부터  $g(p)$ 는 다음과 같다.

$$g(p) = \frac{1}{2\pi} [R_i(u) |_{u=0} + 2 \sum_{n=1}^N R_i(n) \cos np] \quad (11)$$

식 (10)와 식 (11)으로부터 만약  $u \rightarrow 0$  일 때  $R_i(u) \rightarrow C$ 가 되므로  $u=0$  일 때  $R_i(u)=0$ 가 될 수 없는 단점을 가진다. 즉 유전체의 경우 물리적으로  $\epsilon_r(z) \geq 1$ 의 조건을 만족해야 하고, <그림 1(b)>에서 영역 I, III이 같은 유전율을 가진다고 가정하면 식 (10)에서  $u=0$ 일 때 반사계수  $R_i(u)=0$ 가 되어야 하므로, 이들 조건을 만족시키기 위해 식 (10)과 식 (11)은 일반성을 가지도록 개선되어야 할 필요가 있다.

### III. 개선된 푸리에 변환쌍

식 (9)의  $g(p)$ 를 삼각함수 푸리에 급수 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$g(p) = \sum_{n=0}^N (a_n \cos(np) + b_n \sin(np)) \quad (12)$$

위 식을 식 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$R_i(u) = \sum_{n=0}^N \pi a_n (Sa(\pi(u-n)) + Sa(\pi(u+n))) - j \sum_{n=1}^N \pi b_n (Sa(\pi(u-n)) - Sa(\pi(u+n))) \quad (13)$$

여기서  $Sa(\cdot)$ 는 샘플링함수를 의미하며  $R_i(n) = \pi(a_n - j b_n)$ ,  $R_i(0) = 2\pi a_0$ 가 된다. 그리고 식 (13)의 실수부 및 허수부는 각각  $u$ 영역에서 우함수 및 기함수이므로  $R_i(u) = R_{i,e}(u) + j R_{i,o}(u)$ 로 표현될 수 있다. 따라서  $R_i(u)$ 가 합성되면  $R_i(n)$ 이 계산되고,  $a_n$ 과  $b_n$ 이 계산되어  $g(p)$ 가 합성되며, 식 (6)과 식 (7)로 부터 유전율 프로필이 계산된다. 그러나 만약  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}$ 인 경우  $u=0$ 에서  $R_i(u)=0$ 가 되어야 하므로 우함수  $R_{i,e}(u)$ 는  $u=0$ 일 때  $R_i(u)=0$ 를 연속적으로 통과하는 기함수로 변형되어야 한다. 이 경우 식 (12)와 식 (13)의 관계가 유지되기 위해서는  $R_{i,o}(u)$ 는 우함수로 변형되어야 하고 변형된  $R_i(u)$ 를  $R_i^A(u)$ 로 두면 다음과 같이 표현된다.

$$R_i^A(u) = R_{i,o}^A(u) + j R_{i,e}^A(u) \quad (14)$$

여기서  $R_i^T(u) = j R_i^A(u)$ 로 두면

$$R_i^T(u) = -R_{i,e}^A(u) + j R_{i,o}^A(u) \quad (15)$$

와 같이 되고, 식 (13)로 부터 변형된 우함수 및 기함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_{i,e}^A(u) = R_{i,o}(u) + D_1 \quad (16)$$

$$R_{i,o}^A(u) = R_{i,e}(u) - D_0 - D_2 \quad (17)$$

여기서

$$D_0 = 2\pi a_0 \cdot Sa(\pi u) \quad (18)$$

$$D_1 = 2\pi \sum_{n=1}^N b_n Sa(\pi(u-n)) \quad (19)$$

$$D_2 = 2\pi \sum_{n=1}^N a_n Sa(\pi(u+n)) \quad (20)$$

위 식에서  $D_0$ 는  $u=0$ 일 때  $R_i(u)$ 의 패턴이 0을 통과시키도록 빼지며,  $D_1$ 과  $D_2$ 는 각각 우함수는 기함수로, 기함수는 우함수로 변형시키는 역할을 한다. 결과적으로 다음의 푸리에 변환쌍이 성립한다.

$$R_i(u) \leftrightarrow g(p) = \sum_{n=0}^N (a_n \cos(np) + b_n \sin(np)), \quad (551)$$

$$\epsilon_{r1} \neq \epsilon_{r3} \quad (21)$$

$$R_i^T(u) \leftrightarrow g^T(p) = \sum_{n=1}^N (b_n^A \cos(np) + a_n^A \sin(np)), \quad \epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} \quad (22)$$

여기서  $b_n^A$ 와  $a_n^A$ 는 샘플값  $b_n (= -R_{i,o}(n)/\pi)$ 와  $a_n (= R_{i,e}(n)/\pi)$ 로 부터 원하는  $R_i^T(u)$ 의 패턴을 위해 update 시키므로서 계산될 수 있다. 이는 다음절에서 설명되며 이상의 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제어될 역산란 패턴 lobe의 개수  $N$ 과 각 lobe의 크기를 정한다.
- 2) 식 (10)으로부터 null점  $u_n$ 을 최적화 기법을 사용하여 계산하고  $R_i(u)$ 를 합성한 후  $R_i(u) = \pi(a_n - j b_n)$ ,  $R_i(0) = 2\pi a_0$ 의 관계로부터  $a_n$ 과  $b_n$ 을 계산한다. 그러나 식 (10)은 실수부만 가지므로 여기서는  $b_n = 0$ 이다.
- 3) 식 (21)으로부터 포텐셜함수  $g(p)$ 를 계산하고 식 (6)과 식 (7)로 부터 유전율 프로필을 계산한다.
- 4)  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}$ 인 경우  $\epsilon_{r3} / \epsilon_{r1} \rightarrow 1$  (예를 들어  $\epsilon_{r3} / \epsilon_{r1} \rightarrow 1.001$ )로 두고 과정 2)를 계산한다. 이는 다음 절에서 설명될 최적화 기법에서 수렴성을 고려한 것이다. 이 과정에서  $R_{i,e}(u)$ 와  $R_{i,o}(u)$ 는  $R_{i,e}^A(u)$ 와  $R_{i,o}^A(u)$ 로 식 (14)~식 (20)의 관계를 사용하여 변환된다. 이 때  $R_i^T(u)$ 의  $N$ 개의 lobe 크기는 그대로 유지되며, 과정 1)의 목표치에 부합될 때의  $a_n^A$  및  $b_n^A$ 의 값이 계산된다. 본 연구에서는  $b_n = 0$ 이므로  $b_n^A = 0$ 가 된다. 결과적으로  $R_i(u)$ 는  $u$ 영역에서 우함수로 유지되고,  $R_{i,o}(u)$ 는 0 이므로  $R_i^T(u)$ 는 식 (15)로 부터 기함수가 된다.

#### IV. 반복 샘플링법을 위한 최적화 과정과 결과 분석

식 (10)에서 제어될  $N$ 개의 lobe 각각의 피크치를  $R_{i,p}$ 로 두면 이는 최적화할 목표치가 되며 다음과 같이 오차함수를 정의하였다.

$$E(U) = \sum_{p=1}^N |\ln((R_{i,p}(U)/S_p))|^2 \quad (23)$$

여기서  $U=[u_1, \dots, u_N]$ 을 의미하며 각 lobe의 목표치  $S_p$ 와 계산된  $R_{i,p}$ 와의 대수적 차이의 합을 최소자승법을 사용하여 오차함수로 표현하였다.  $U$ 의 값을 update 시키면서 수렴조건  $E < \epsilon$ 을 만족시킬 때까지  $E$ 를 최소화 하시키게 되며, 이 최소화 과정을 위해 Davidon-Fletcher-Powell 알고리즘을 사용하였다. 초기치는 지수 함수형 패턴을 만족시키는  $U_0=[1, 2, \dots, N]$ 로 두었다.

한편 식 (10)의 상수  $C$ 는  $u \rightarrow 0$ 일 때의  $R_i(u)$ 의 크기 이므로 식 (5)에 식 (2)와 식 (3)을 적용하면  $C$ 는 다음과 같이 표현된다.

TE 편파인 경우 :

$$C = \frac{1}{4} \ln \left( \frac{\epsilon_r(L) - \sin^2 \theta}{\epsilon_r(0) - \sin^2 \theta} \right) \quad (24)$$

TM 편파인 경우 :

$$C = \frac{1}{4} \left[ \ln \left( \frac{\epsilon_r(L)}{\epsilon_r(0)} \right)^2 - \ln \left( \frac{\epsilon_r(L) - \sin^2 \theta}{\epsilon_r(0) - \sin^2 \theta} \right) \right] \quad (25)$$

예로서  $\theta = 30^\circ$ ,  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r3} = 2$  으로 두고,  $N = 5$ ,  $S_p = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]$ 를 목표치로 두면 TE, TM 편파 각각에 대해 식 (10)으로 부터 최적화된 패턴 크기의 결과는 <그림 2(a)>와 같다. 이 그림으로 부터  $u_6$ 부터의 null 점은 정확하게 지수함수형 테이퍼에 의한 패턴을 따름을 확인할 수 있다. 각각의 포텐셜함수  $g(p)$ 는 식 (21)로 부터 <그림 2(a)>에 동시에 보였다. 이 때 식 (10)은 실수이므로  $b_n = 0$  으로 두었다. 식 (6)과 식 (7)로 부터 계산된 유전율 프로파일은 <그림 2(b)>와 같다. <그림 2(c)>는 합성된 유전율을 식 (4)에 대입하여  $\tanh(R_i)$ 를 계산한 주파수특성 결과로서 완만한 유전율 프로파일의 경우 목표로 하는 lobe의 크기를 만족 시킴을 알 수 있다.

한편  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}$ 일 경우, 식 (24), 식 (25)로부터  $\epsilon_r(0) = \epsilon_r(L)$ 이 되어 계산 불능이 되므로 이 특이점을 제거하기 위한 방법으로 제시한  $R_i^T(u)$  패턴 합성을 예로 들면 다음과 같다.  $\theta = 30^\circ$ ,  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 1$ 인 경우  $N = 8$ ,  $S_p = [0.2, 0.1, 0.1, 0.1, 0.883, 0.1, 0.1, 0.1]$ 를 목표치로 두면 앞 절에서 과정 요약 4)에서 언급한 과정을 따른다. <그림 3(a)>는 제어된 목표패턴과

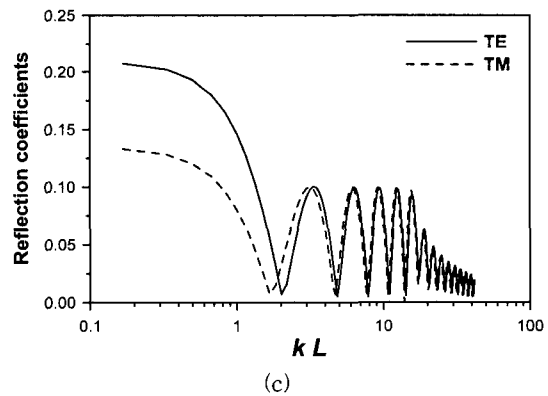
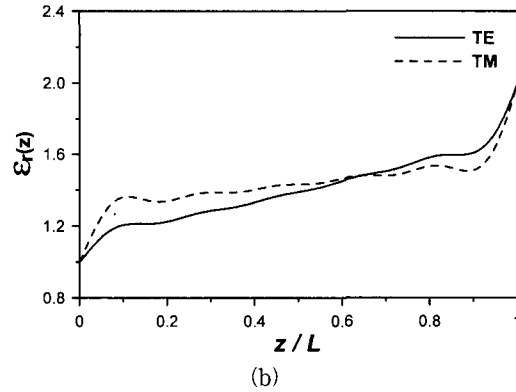
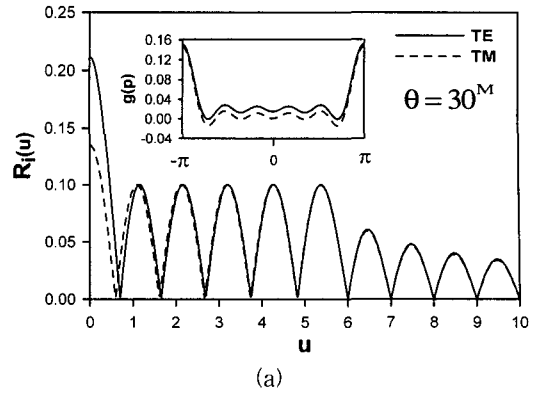


그림 2. 서로 다른 유전율간의 정합 예. (a) 제어된 lobe 패턴과 포텐셜함수. (b) 합성된 유전율 프로파일. (c) 계산된 반사계수

Fig. 2. Examples for matching between different dielectric constants. (a) Controlled lobe patterns and its potential functions. (b) Synthesized dielectric constant profile. (c) Calculated reflection coefficients.

식 (22)로 부터 계산된 포텐셜함수  $g^T(p)$ 를 도식한 것이며 이 경우는  $u = 0$  일 때  $R_i(0) = 0$  이므로 TE 및 TM 각각의 경우에 대해 같은 형태로 합성된다. <그림

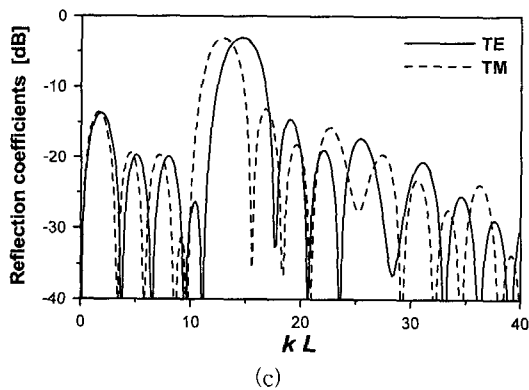
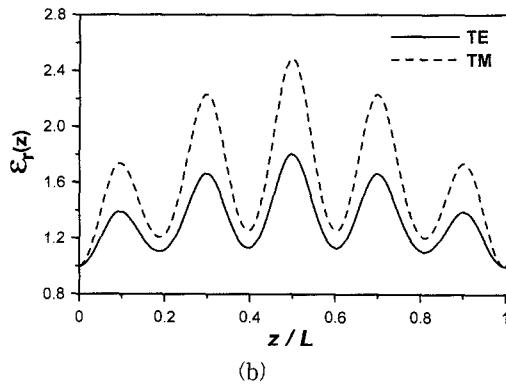
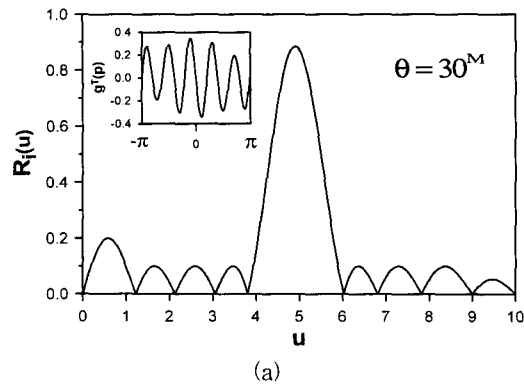


그림 3. 서로 같은 유전율 사이에서 임의의 반사계수를 만족시키는 유전율 합성의 예 (a) 제어된 lobe 패턴과 포텐셜 함수 (b) 합성된 유전율 프로파일 (c) 계산된 반사계수

Fig. 3. Examples for synthesizing dielectric constants satisfying arbitrary reflection coefficients between same dielectric constant. (a) Controlled lobe patterns and its potential functions. (b) Synthesized dielectric constant profile. (c) Calculated reflection coefficients.

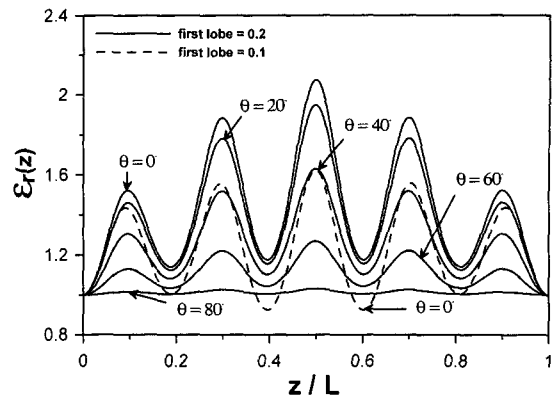


그림 4. TE 입사각 변화에 따른 합성된 유전율 프로파일  
Fig. 4. Synthesized results for dielectric constants profiles corresponding to incident angles in the case of TE.

표 1. 최적화된 푸리에 계수

Table 1. Optimized fourier coefficients.

n	TE		TM	
	$a_n$	$a_n^A$	$a_n$	$a_n^A$
0	$5.301 \times 10^{-5}$	nil	$2.652 \times 10^{-5}$	nil
1	-6.325	-3.100	-6.322	-3.103
2	3.130	1.266	3.129	1.269
3	-3.167	-0.606	-3.165	-0.602
4	2.292	4.893	2.291	-4.903
5	-26.072	-27.758	-26.072	-27.785
6	-7.921	-0.615	-7.908	-0.619
7	0.266	-1.855	0.266	-1.857
8	0.308	1.586	0.313	1.587

3(b)>는 식 (6)과 식 (7)에서  $g(p)$  대신  $g^T(p)$ 를 대입하여 합성한 유전율 프로파일을 나타낸 것이다. 목표치  $S_p$  중  $0.883$ 은  $\tanh(0.883) = -3[dB]$ 를 목표치로 설정한 것이며, 이는 실제 주파수영역에서  $3[dB]$  대역저지 필터특성을 갖도록 설정한 것이다. 합성된 유전율은 물리적으로  $\epsilon_r(z) \geq 1$ 의 조건을 만족해야 하며, 이는 첫번째 sidelobe의 크기에 의해 가장 많이 영향을 받는다. 예로 첫번째 lobe의 목표치를 0.1로 두고 합성한 유전율 프로파일은 <그림 4>와 같이  $\epsilon_r(z)$ 가 1미만으로 될 수 있다. 따라서 첫번째 sidelobe의 크기 목표치를 다른 sidelobe에 비해 조금 크게 설정하였다. <표 1>은 이상의 예에서 계산된  $a_n$ 과  $a_n^A$ 를 보인 것이다.

한편 합성된 유전율 프로파일로 부터 실제 주파수영역

에서 목표로 한 반사계수가 만족함을 보이기 위해 식 (4)를 사용하여 <그림 3(c)>에 도시하였다. 이 식의 피적분함수에서 지수함수는 전기적길이의 차원으로 표현되어 있으므로 길이  $L$ 을 적절히 선정하므로써 주파수 영역 반사계수의 주파수 센터링을 구현할 수 있다. 이 그림으로 부터 목표로 한 sidelobe의 크기와는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는  $3[dB]$  lobe와 같이 큰 목표치를 가질 경우 <그림 3(b)>와 같이 합성된 유전율 프로필이 <그림 2(b)>와는 달리 빠르게(rapidly) 변화하므로 소위 WKB근사해<sup>[1]</sup>가 갖는 오차에 기인한 것이다. <그림 4>는 TE파가 입사할 경우 입사각 변화에 따른 합성 프로필을 도시한 것이다.

이상의 결과들을 전송선로에 적용할 경우,  $\theta=0^\circ$ 가 되며,  $\epsilon_{r1} \rightarrow Z_0$ ,  $\epsilon_{r2} \rightarrow Z(L)$ ,  $\epsilon_r(z) \rightarrow Z(z)$ ,  $dr \rightarrow d(\ln Z(z)/$

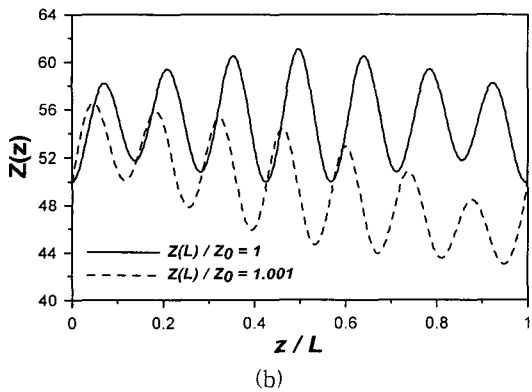
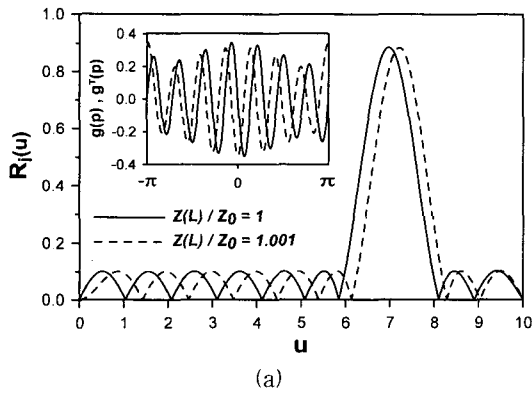


그림 5. 전송선로 필터 합성 예. (a) 제어된 lobe 패턴과 포텐셜함수. (b) 합성된 임피던스 프로파일  
Fig. 5. Example for synthesizing transmission line filters. (a) Controlled lobe patterns and its potential functions. (b) Synthesized impedance profiles.

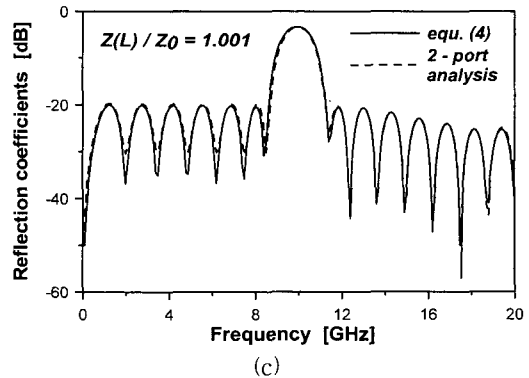
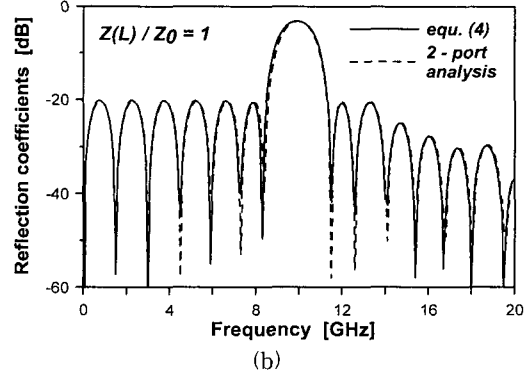
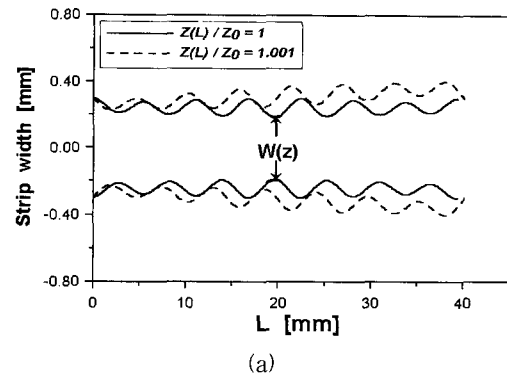


그림 6. 계산된 마이크로스트립 폭과 입력반사계수의 주파수특성  
Fig. 6. Calculated microstrip widths and frequency characteristics of input reflection coefficients.

$Z_0)/2$ ,  $C \rightarrow \ln(Z(L)/Z_0)/2$ 로 대체될 수 있다. 그리고 식 (4)의 지수함수에 포함된  $S$ 는 실효 비유전율  $\epsilon_{r,c}(z, f)$ 로 표현된다.  $g(p)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$g(p) = (d \ln(Z(p)/Z_0) / dp) / 2 \quad (26)$$

여기서  $Z_0$ 는  $z=0$ 에서의 특성임피던스이며  $Z(L)$ 은

부하임피던스를 의미한다. 따라서  $Z_0, Z(L)$ 일 경우에는 위에서 예로 든  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$ 인 경우와 같이 테이퍼선로 설계로 간주될 수 있으며,  $Z_0 = Z(L)$ 인 경우는 입, 출력임피던스가 서로 같을 때 원하는 대역저지 필터 설계에 적용될 수 있다. 예로  $N=9$ ,  $S_p = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.883, 0.1, 0.1]$ 로 두고 3[*dB*] 대역저지 필터를 목표로 하였다. <그림 5>는  $Z(L)/Z_0 = 1.001$ 과  $Z(L)/Z_0 = 1$ 의 각각의 경우에 대해 제어된  $u$ 영역에서의 반사계수와 포텐셜함수 및 합성한 임피던스 프로필을 보인 것이다. 여기서  $Z_0 = 50[\Omega]$ 으로 두었다. 식 (21)과 식 (22)로부터  $g(p)$  및  $g^7(p)$ 가 각각 우함수 및 기함수로 표현되므로 식 (26)으로부터 각각의 임피던스 프로필은 기함수 및 우함수로 표현된 결과이다. 이 임피던스 프로필을 마이크로스트립 기판( $\epsilon_r = 10.2$ , 유전체 높이  $h = 0.635[mm]$ ) 상에 구현할 경우 기판의 실효 비유전율이  $\epsilon_r(f)$ 와 같이 주파수에 의존하여 분산특성이 존재하지만 높은 주파수대에서 그 주파수 의존성은 완만하게 나타나므로 WKB근사해를 만족하게 된다. 따라서 lobe의 높이를 제어하여 길이  $L$ 의 선택에 따라 높이는 거의 변화되지 않은 상태에서 반사패턴의 주파수영역 센터링이 가능하므로 분산 처리 문제는 자동적으로 해결될 수 있다. 합성된 임피던스 프로필을 설계주파수  $f_0 = 2[GHz]$ 에서 마이크로스트립 선로로 구현하여 계산한 스트립폭은 <그림 6(a)>와 같다. 이때 중심주파수 10[GHz]에서  $Z(L)/Z_0 = 1$ 과  $Z(L)/Z_0 = 1.001$ 의 경우에 대한 각각의 길이는 39.5[mm]와 40.2[mm]이다. <그림 6(b)>와 <그림 6(c)>는 식(4)로부터 계산된  $\tanh(R, f)$ 와 합성된 스트립폭을 300개로 분할하여 직렬연결시켜 분산식<sup>(10)</sup>이 고려된 2-포트 해석한 결과를 비교한 그림이다. 이 결과로부터 목표로 한 반사패턴 형상을 잘 만족시킴을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 연속적인 유전율 프로필을 갖는 유전체 층에 TE 및 TM 편파를 갖는 평면파가 임의 방향으로 입사될 경우 원하는 역산란 반사계수 패턴을 만족시키는 유전율 합성을 위한 효율적인 비선형 역변환 방법을 제안하였다. 유전율 분포 정보를 갖는 포텐셜함수와 역산란 반사계수 간의 관계를 나타내는 Riccati형 적분

방정식에서 푸리에 변환에 대한 기존의 샘플링법을 개선시켜 최적화 기법을 사용한 반복 샘플링법을 제안하므로써, 원하는 반사계수에 대한 포텐셜함수 도출 과정을 일반화시켰다. 이 방법은 테이퍼 전송선로 설계에도 적용될 수 있으며, 입, 출력 유전율 혹은 특성임피던스가 서로 같을 경우에도 반사계수의 제어가 가능함을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] W. C. Chew, Waves and fields in inhomogeneous media. IEEE Press, 1995.
- [2] E. J. Park, "A general perturbational approach for synthesizing the Riccati-type nonuniform transmission lines with arbitrarily specified reflection properties," Microwave and Optical Tech. Lett., vol. 38, no. 1, pp. 52-56, July 2003.
- [3] D. L. Jaggard and Y. Kim, "Accurate one-dimensional inverse scattering using a nonlinear renormalization technique," J. Opt. Soc. Amer., vol. A-2, pp. 1922-1930, Nov. 1985.
- [4] P. V. Frangos and D. L. Jaggard, "A numerical solution to the Zakharov-Shabat inverse scattering problem," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 39, pp. 74-79, Jan. 1991.
- [5] G. Xiao, K. Yashiro, N. Gaun and S. Ohkawa, "A new numerical method for synthesis of arbitrarily terminated lossless nonuniform transmission lines," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, No. 2, pp. 369-376, Feb. 2001.
- [6] P. Pramanick and P. Bhartia, "A generalized theory of tapered transmission line matching transformers and asymmetric couplers supporting non-TEM mode," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 37, No. 3, pp. 1184-1191, Aug. 1989.
- [7] S. Uysal, Nonuniform line microstrip directional couplers and filters. Artech House, 1993.
- [8] J. A. Kong, Electromagnetic wave theory. John Wiley & Sons, 1990.
- [9] H. L. V. Trees, Optimum array processing. John



Wiley & Sons, 2002.

- [10] M. Kirchning and R. H. Jansen, "Accurate model for effective dielectric constant for

microstrip with validity up to millimeter-wave frequencies," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 272-273, 1982.

---

저 자 소 개



南準錫(正會員)

2002년 2월 : 금오공과대학교 전자공학과 공학사. 2002년 3월~현재 : 금오공과대학교 전자공학부 석사과정. <주관심분야 : 마이크로파 회로 및 안테나 패턴 합성 등>



朴義俊(正會員)

1983년 2월 : 동아대학교 전자공학과 공학사. 1986년 8월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 1990년 2월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 공학박사. 1990년 2월~현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수.

<주관심분야 : 전자장이론 및 안테나, 마이크로파 전송선로 및 회로설계 등>