

논문 2010-1-5

주기적인 유전체 층을 사용한 안테나용 주파수 선택 반사기의 설계

Design of Frequency-Selective Reflector for Large Reflecting Antennas using a Periodic Dielectric Layer

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요약 본 논문은 유전률 ϵ_1 과 ϵ_2 로 구성된 주기적인 유전체 층을 사용하여 밀리미터 주파수 대역의 주파수 선택 반사기를 설계할 수 있음을 분석하였다. 임의의 각도에서 입사한 밀리미터파에 대하여 유전률 ϵ_1 , ϵ_2 와 주기적인 구조를 구성하는 변수들을 적합하게 선택함으로써 원하는 주파수의 밀리미터파를 전반사시키는 반사기 설계가 가능함을 보였다. 설계된 반사기에서 약 90%의 전반사를 위한 대역폭이 약 90%의 전투과를 위한 대역폭보다 매우 좁은 협대역 특성을 나타내었다.

Abstract This paper examines the feasibility of using periodically varying dielectric layers with dielectric constant ϵ_1 and ϵ_2 at millimeter wave frequency for implementing the frequency-selective reflectors that permit feed separation in large aperture reflecting antenna systems. For oblique incidence, it is found that the total reflection can be obtained at different frequencies for proper choices of ϵ_1 , ϵ_2 and the geometric parameters. In the frequency-selective reflector designed, the bandwidth for 90% reflection is always found to be much narrower than that for 90% transmission.

Key Words : Periodic Layer, Leaky Waves, Frequency-Selective Reflectors

1. 서론

지금까지 큰 aperture로 구성된 반사용 안테나는 주파수 선택특성을 얻기 위하여 주기적인 도체 판을 연결하여 주파수 선택 반사기로서 설계하여 사용되어 왔다^[1-3]. 그러나, 만일 밀리미터 파장 대역에서 도체 판 대신에 유전체 층을 사용하면, absorption loss가 현저하게 줄어든다. 더욱이, 설계에 사용되는 유전체 층의 두께는 파장의 차수에 비례하므로 밀리미터파와 같이 높은 주파수에서 동작하는 반사기의 크기를 소형화할 수 있다.

본 논문에서 분석한 반사기의 구조는 그림 1에서 보듯이 주기적인 유전체 층들이 요철 형태로 구성된 주기적 구조이다. 그 구조는 유전률 ϵ_1 과 ϵ_2 가 직사각형 bar 형태의 모양으로 구성되었다. 이 반사기 구조의 주파수 선택 동작특성을 분석하기 위하여 고려한 입사파는 y 방향으로 편향되어 있으며, 주기적인 구조와 직각인 xz 평면에 입사각 θ 로 입사하는 TE 평면파라고 가정하였다. 수치해석 결과 본 논문에서 제안한 주기적인 층은 입사된 밀리미터파를 하나의 특정 주파수에서 모두 반사되었으며, 그 이외의 다른 주파수들에서는 모든 투과하는 주파수 선택 특성이 존재함을 보였다. 더욱 흥미로운 것은 반사나 투과 대역의 근사적인 위치를 주기적인 층의 평균

*정회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2010.1.28, 수정일자 2010.2.16

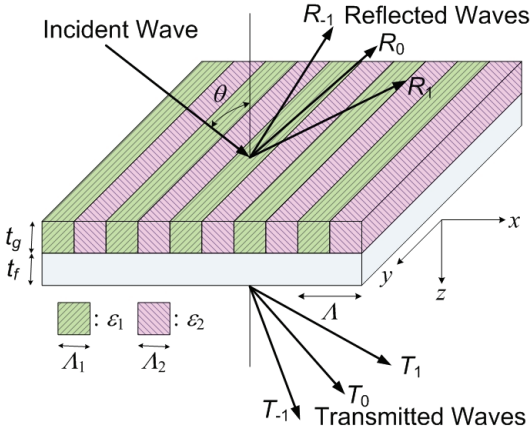


그림 1. 주기적인 유전체 층으로 구성된 주파수 선택 반사기의 구조

Fig. 1. Schematic configuration of frequency-selective reflector composed of periodic dielectric layers.

유전률과 같은 유전률 $\epsilon_a = (\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2) / A$ 로 구성된 균일한 구조의 특성으로부터 예측할 수 있다는 것이다. 이와 같은 특성을 분석하기 위한 모드함수의 기본개념을 2장에서 자세하게 다루었으며, 전파하는 모드함수들의 기인한 주파수 선택 반사기의 반사 및 투과 특성을 3장에서 분석하였다.

II. 유전체 반사형 안테나의 모드함수

그림 1에서 보듯이, y 방향으로 편향되어 있는 격자 전송구조에서 발생하는 필드분포는 아래와 같이 무한한 수의 공간고조파 (Space Harmonics)들의 합으로 나타낼 수 있다. 즉, 임의의 j 번째 균일층 (Non-periodic Layer)에서는

$$\begin{aligned} E_j &= \sum_n \left\{ f_{jn} e^{ik_{zn} x_j} + r_{jn} e^{-ik_{zn} (t_j - x_j)} \right\} e^{ik_{zn} z} \\ &= \sum_n V_{jn}(x_j) e^{ik_{zn} z}, \\ H_j &= \sum_n Y_{jn} \left\{ f_{jn} e^{ik_{zn} x_j} - r_{jn} e^{-ik_{zn} (t_j - x_j)} \right\} e^{ik_{zn} z} \\ &= \sum_n I_{jn}(x_j) e^{ik_{zn} z} \end{aligned} \quad (1)$$

와 같이, 비 균일층 (Periodic Layer)에서는

$$\begin{aligned} E_p &= \sum_m \left\{ f_{pm} e^{ik_{zn} x_p} + r_{pm} e^{-ik_{zn} (t_p - x_p)} \right\} \\ &\cdot \sum_n a_{nm} e^{ik_{zn} z} = \sum_m V_{pm}(x_p) \sum_n a_{nm} e^{ik_{zn} z}, \end{aligned} \quad (2)$$

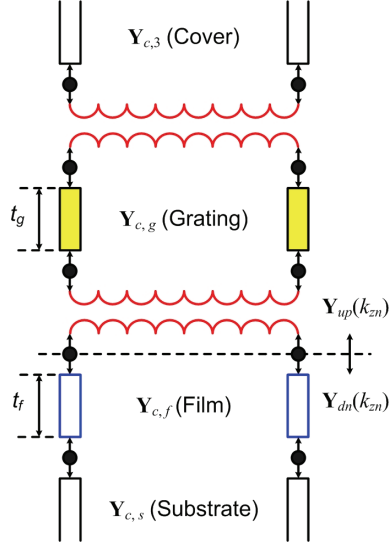


그림 2. 그림 1의 주파수 선택 반사기에 대한 등가전송 선로. Fig. 2. Equivalent transmission line network for the frequency-selective reflector of Fig. 1.

$$\begin{aligned} H_p &= \sum_m Y_{pm} \left\{ f_{pm} e^{ik_{zn} x_p} + r_{pm} e^{-ik_{zn} (t_p - x_p)} \right\} \\ &\cdot \sum_n b_{nm} e^{ik_{zn} z} = \sum_m V_{pm}(x_p) \sum_n b_{nm} e^{ik_{zn} z} \end{aligned}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, n 번째 공간고조파의 전파상수는

$$\begin{aligned} k_{zn} &= k_{z0} + \frac{2n\pi}{A} = \beta + i\alpha + \frac{2n\pi}{A}, \\ k_{xn,j} &= \sqrt{(k_0 n_j)^2 - k_{zn}^2} \quad \text{for all } j \neq p \end{aligned} \quad (3)$$

와 같고, MTLT의 모드 전류와 전압의 비율로 표시되는 각 영역에서의 특성 어드미턴스 (admittance)는 다음과 같이 정의된다 [4].

$$Y_{jn} = \frac{I_{jn}}{V_{jn}} = \begin{cases} \frac{k_{xn,j}}{\omega\mu_0} & \text{for } TE \text{ modes} \\ \frac{\omega\epsilon_0\epsilon_j}{k_{xn,j}} & \text{for } TM \text{ modes} \end{cases}, \quad (4)$$

$$Y_{pm} = \frac{I_{pm}}{V_{pm}} = \begin{cases} \frac{k_{xm,p}}{\omega\mu_0} & \text{for } TE \text{ modes} \\ \frac{\omega\epsilon_0\epsilon_a}{k_{xm,p}} & \text{for } TM \text{ modes} \end{cases}$$

그때, 식 (4)를 만족하는 그림 1의 장방향 격자로 구성된 주파수 선택 반사기 구조에 대한 등가 전송선로 (Equivalent Transmission-Lines)는 그림 2와 같이 구성할 수 있다. 결국, 구성된 등가 전송선로에 아래와 같은 MTLT의 횡방향 공진조건 (Transverse Resonance Condition) [5]을 적용하면 주파수 선택 반사기에서 전파하는 정확한 모드들의 전파상수 k_{zn} 을 결정할 수 있다.

$$|Y_{up}(k_{zn}) + Y_{dn}(k_{zn})| = 0 \quad (5)$$

여기서, $Y_{up}(k_{zn})$ 과 $Y_{dn}(k_{zn})$ 은 횡방향의 임의의 위치에서 위와 아래로 들여다본 입력 어드미턴스 행렬을 의미한다. 예를 들어, 기판과 두께 t_f 의 얇은 판막 사이의 경계면에서 아래로 들여다본 n 번째 공간 고조파의 반사계수는 식 (4)에 주어진 j -번째 전송 층의 특성 어드미턴스 $Y_{jn} = Y_{c,(s,f)}^{(n)}$ 를 이용하면

$$\Gamma_n = \frac{Y_{c,f}^{(n)} - Y_{c,s}^{(n)}}{Y_{c,f}^{(n)} + Y_{c,s}^{(n)}} \quad (6)$$

와 같고, 정의된 Γ_n 을 이용하여 두께 t_f 의 얇은 판막과 두께 t_g 의 격자 사이의 경계면에서 아래로 들여다본 n 번째 공간 고조파의 입력 어드미턴스를 표현하면 다음과 같다.

$$Y_{in}^{(n)} = \frac{1 - \Gamma_n e^{2ik_{zn}t_f}}{1 + \Gamma_n e^{2ik_{zn}t_f}} Y_{c,f}^{(n)} \quad (7)$$

그때, 격자구조에 기인하여 주파수 선택 반사기에서 발생하는 모든 공간 고조파 성분들을 고려하면, 식 (7)은 다음과 같은 행렬식으로 다시 정의할 수 있다.

$$Y_{dn}(k_{zn}) = Y_{in} = (1 + \mathbf{R}e^{2i\mathbf{K}_f t_f})^{-1} (1 - \mathbf{R}e^{2i\mathbf{K}_f t_f}) \mathbf{Y}_{c,f} \quad (8)$$

여기서, \mathbf{R} 은 반사계수 Γ_n 의 열 행렬이고, $\mathbf{Y}_{c,f}$, \mathbf{Y}_{in} , $\exp(2i\mathbf{K}_f t_f)$,은 각각 요소 $\delta_{mn} \exp(2ik_{xn,j} t_f)$, $\delta_{mn} Y_{c,f}^{(n)}$, $\delta_{mn} Y_{in}^{(n)}$ 로 구성된 대각선 행렬이다. 이와 같은 방법으로 등가전송선로의 임의의 경계면에서 위로 들여다본 입력 어드미턴스 $Y_{up}(k_{zn})$ 에 대한 행렬식도 결정할 수 있다.

결국, 식 (5)의 횡방향 공진조건으로부터 미지수 고유치 k_{zn} 이 결정되면, 주파수 선택 반사기에서 전파하는 정확한 모드들의 그 분산특성뿐만 아니라 설계된 반사기에서 반사되거나 투과하는 모드들의 특성을 분석할 수 있다.

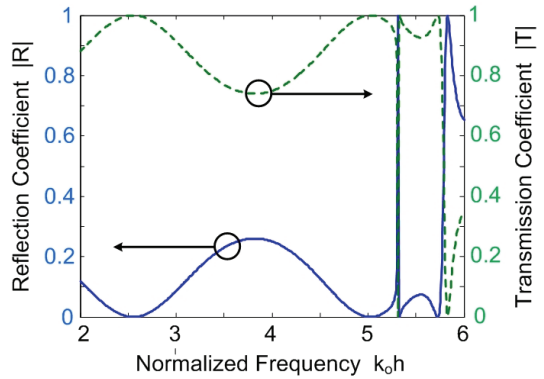


그림 3. 정규화 주파수에 따른 반사계수와 투과계수의 변화도. 여기서, $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ 이고 $t_g/\Lambda = 1.713$ 이다.

Fig. 3. Variation of the reflection and transmission coefficients along with normalized frequency for $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ and $t_g/\Lambda = 1.713$.

III. 유전체 반사형 안테나의 설계특성

앞 장에서 언급한 등가 전송선로 해석법을 사용하여 주파수 선택 반사기에서 발생하는 모드들의 반사계수와 투과계수를 수치 해석하였다. 수치해석을 위하여 설계한 반사기에서 주기적인 구조를 구성하는 각 유전체의 길이는 서로 같게 ($\Lambda_1 = \Lambda_2$) 선택하였으며, 기하학적 변수들

은 $\theta = 45^\circ$, $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ 와 같이 주기에 대한 두께 비율은 $t_g/\Lambda = 1.713$ 와 같이 선택하였다. 또한, 기판을 구성하는 층은 고려하지 않았다. 즉, $t_f = 0$ 으로 선택하였다. 그 때 전파하는 모드들에 대한 반사계수와 투과계수의 수치해석 결과가 그림 3에 자세하게 도시되어 있다. $k_0h < 5.12$ 영역의 경우 $m = 0$ 모드만이 z 축을 따라 반사기에서 전파하였으며, 하나의 모드만 전파하는 이 영역에서 R_0 는 두 개의 주파수 $k_0h \approx 2.26$ 와 5.03 에서 반사되지 않고 모두 투과되었다.

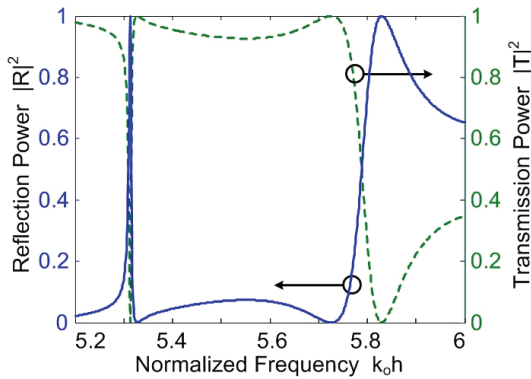


그림 4. 정규화 주파수에 따른 반사률과 투과률의 전력변화도. 여기서, $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ 이고 $t_g/\Lambda = 1.713$ 이다.
 Fig. 4. Variation of the reflection and transmission powers along with normalized frequency for $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ and $t_g/\Lambda = 1.713$.

$k_0h > 5.12$ 영역의 경우 $m = -1$ 모드가 기본모드와 함께 z 축을 따라 전파하며, 두 개의 주파수 $k_0h \approx 5.32$ 와 5.83 에서 전반사가 발생하였다. 더욱이, 이 두 개의 주파수 근처에서는 반사가 없는 무반사 주파수가 존재하였다. 이와 같은 현상은 주기적인 층에서 전파하는 누설파(Leaky Wave)에 기인한 현상으로 해석할 수 있으며, 다른 구조에서도 이와 같은 현상이 발생됨을 보고한 바 있다 [6], [7].

전반사의 대역폭을 자세하게 분석하기 위하여 $k_0h > 5.12$ 영역에서 발생하는 반사계수와 투과계수의 전력변화를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 전반사가 발생하는 두 주파수 중에서 $k_0h = 5.83$ 인 주파수에서 더욱 넓은 대역특성이 나타났다. $|R|^2 = 0.9$ 에 해당하

는 두 주파수 사이에서 대역폭은 $k_0h = 5.32$ 에서 발생한 대역폭 보다 약 22배 크게 나타났다.

그림 3과 4의 주파수 대역은 오직 두 모드의 밀리미터 파가 주기적인 층을 따라 z 축으로 전파하는 경우에 해당하는 대역이다. 즉, $m = 0, -1$ 인 두 모드만 전파하고, 나머지 다른 모든 고차모드들은 z 축을 따라 전파하지 못하고 차단됨을 의미하는 것이다. 더욱이, 전투과 ($|T|^2 = 1$)가 발생하는 두 개의 낮은 주파수에서는 오직 전파상수가 $m = 0$ 인 하나의 모드만 z 축을 따라 주기적인 층을 따라 전파가 진행함을 보였다. 이 전파모드들의 전파상수는 주기적인 층 대신에 유전률이 ϵ_a 와 같은 평균 유전률로 구성된 균등한 유전체 층으로부터 그 값을 근사적으로 추정할 수 있다. 즉, 균등한 유전체 층에서 전투과를 위한 주파수는 층의 두께 t_g 가 π/k_0 의 배수와 같을 때 발생하는 주파수임을 예측할 수 있다.

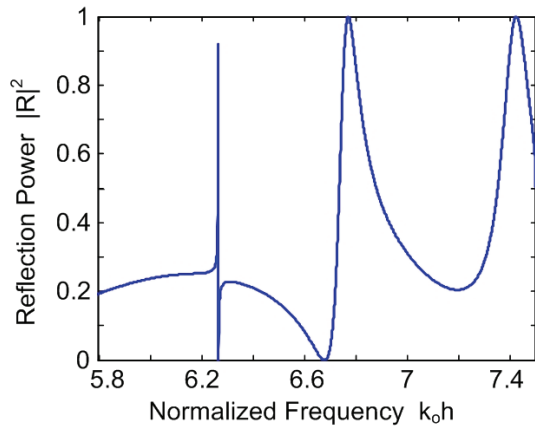


그림 5. 정규화 주파수에 따른 반사률과 투과률의 전력변화도. 여기서, $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ 이고 $t_g/\Lambda = 2.037$ 이다.
 Fig. 5. Variation of the reflection and transmission powers along with normalized frequency for $\epsilon_1 = 2.56$, $\epsilon_2 = 1.44$ and $t_g/\Lambda = 2.037$.

전반사를 발생시키는 주파수와 층을 따라 전파하는 모드들 사이의 관계를 조금 더 분석하기 위하여 주기적인 층의 두께가 증가하였을 경우 반사계수에 대한 전력이 어떻게 변하는지 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, 전반사는 $k_0h = 6.22, 6.67$, 그리고 7.30 인 3개의 주파수에서 발생하였다. 또한, $|R|^2 \geq 0.9$ 인 대역폭은 전반사를

발생시키는 정규화 주파수가 증가함에 따라 증가함을 보였다. 이는 앞에서 언급하였듯이 주기적인 유전체의 기하학적 변수들을 변화시킴으로써 원하는 주파수 선택 반사기의 설계가 가능하다는 것을 의미하는 것이다.

또한, 입사각의 변화에 따른 반사계수와 투과계수의 전력 변화를 그림 6과 7에 나타내었다. 그림 6의 $t_g/\Lambda = 1.713$ 인 경우에서 보듯이, 전반사는 $\theta = 27.5^\circ$ 와 41° 인 2개의 입사각에서 발생하였으며, 입사각이 큰 경우에 대역폭도 커짐을 보였다. 이와 같은 특성이 $t_g/\Lambda = 2.037$ 인 경우에도 유사하게 발생하였다. 그림 7에서 보듯이, 전반사는 $\theta = 27.5^\circ$ 와 36.5° 인 2개의 입사각에서 발생하였으며 그림 6의 경우에 비하여 전반사가 발생하는 대역폭이 매우 좁게 나타났다.

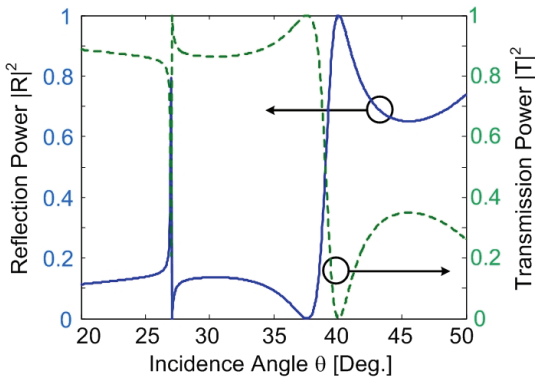


그림 6. 입사각에 따른 반사계수와 투과계수의 전력 변화도. 여기서, $\epsilon_1 = 2.56, \epsilon_2 = 1.44$ 이고 $t_g/\Lambda = 1.713$ 이다.

Fig. 6. Variation of the reflection and transmission powers along with the angle of incidence for $\epsilon_1 = 2.56, \epsilon_2 = 1.44$ and $t_g/\Lambda = 1.713$.

이와 같은 주파수 선택 반사기의 특성들은, 전반사와 전투과를 발생시키는 주파수에서 주기적인 층을 따라 전파하는 파의 여기특성에 의하여 그 물리적 특성을 쉽게 이해할 수 있다. 주기적 특성이 없는 균일한 층에서 전파하는 파는 자유공간에서 전파하는 파의 전파속도보다 더욱 빠른 속도로 전파하는 표면파 (bound surface wave)의 특성을 나타낸다. 결국, 이 파들은 전파 층의 위와 아래에서 전파하는 전송파로 에너지를 결합할 수 없다. 그러나, 전송 층이 주기적인 경우에 그와 같은 결합이 쉽게 발생할 수 있다. 왜냐하면, 주기적인 구조에서 발생하는

공간 고조파들이 표면파에서 누설파 (leaky wave)로 변형되기 때문이다. 그런 경우에, 임의의 각도로 입사된 누설파 형태의 평면파는 그에 대응하는 누설파를 전송 층에 여기할 것이고, 그 전파하는 누설파는 전송 층의 위와 아래의 자유 공간에 평면 파 성분들을 재 방출할 것이다.

이와 같은 전파특성을 보았을 때, 전송 층 위로 방출되는 전체 필드는 (1) 주기적인 유전체 층의 표면에서 직접 발생하는 평면파와 (2) 누설파의 여기에 기인하여 재 방출되는 평면파 성분들의 합으로 표현할 수 있다. 이 두 필드 성분들이 같은 위상을 갖고 결합된다면 강한 반사특성이 발생할 것이다. 반면에, 서로 위상이 다른 두 필드 성분이 결합된다면 반사는 거의 발생하지 않을 것이다. 결국, 이 위상 차는 주파수에 의존하기 때문에 유전체 반사형 안테나의 설계 시에 그 반사특성은 주파수 선택특성을 갖는 것이다.

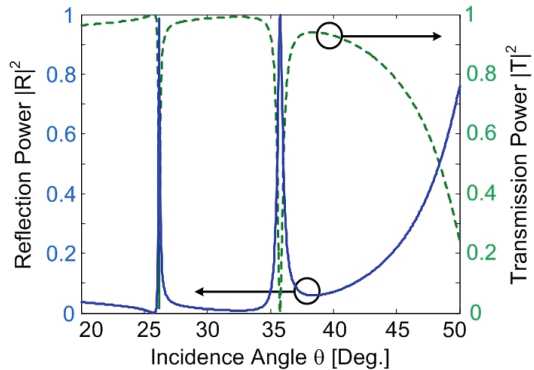


그림 7. 입사각에 따른 반사계수와 투과계수의 전력 변화도. 여기서, $\epsilon_1 = 2.56, \epsilon_2 = 1.44$ 이고 $t_g/\Lambda = 2.037$ 이다.

Fig. 7. Variation of the reflection and transmission powers along with the angle of incidence for $\epsilon_1 = 2.56, \epsilon_2 = 1.44$ and $t_g/\Lambda = 2.037$.

IV. 결론

주파수 선택 반사와 투과가 주기적으로 변하는 유전체 층에서 발생함을 보였다. 전반사와 전투과가 발생하는 주파수를 수치해석적으로 분석하였다. 이 주파수들은 균일한 유전률 ϵ_a 로 구성된 층에서 전송되는 파들의 특성에 의하여 추정할 수 있음을 알았으며, 주기적인 유전

체 층에서 z 축을 따라 하나의 모드만이 전파하는 낮은 주파수 대역에서는 전투과가 층의 두께 t_g 가 π/k_o 의 배수와 같을 때 발생함을 보였다.

또한, 높은 주파수 대역에서는 두 개의 모드가 주기적인 유전체에서 전파하였으며 이 주파수 대역에서 발생한 전반사는 유전체 층에 형성된 누설파에 의존하여 나타나기 때문에 주파수가 조금만 변하여도 무반사 특성이 나타나는 주파수가 존재함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] V. D. Agrawal and W. A. Imbriale, "Design of a dichroic Cassegrain subreflector," IEEE Trans. Antennas Propagation, vol.27, pp.466-473, 1979.
- [2] E. L. Pelton and B. A. Munk, "Scattering from periodic arrays of crossed dipoles," IEEE Trans. Antennas Propagation, vol.27, pp.323-330, 1979.
- [3] W. V. T. Rusch, "The current state of the reflector antenna are," IEEE Trans. Antennas Propagation, vol.32, pp.313-329, 1984.
- [4] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal modal transmission-line theory (L-MTLT) of multilayered periodic waveguides," IEICE Trans. Electronics, vol. E88-C, no. 2, pp. 270-274, 2005.
- [5] T. Tamir and S. Zhang, "Modal transmission-line theory of multilayered grating structures," J. Lightwave Technol., vol. 14, pp. 914-927, 1996.
- [6] A. Hessel and A. A. Oliner, "A new theory of Wood's anomalies in optical gratings," Appl. Opt., vol.38, pp. 2073-2094, 1966.
- [7] C. W. Hsue and T. Tamir, "Lateral displacement and distortion of beams incident upon a transmitting layer configuration," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 2, pp. 978-988, 1985.

※ 본 연구는 2009년도 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.

저자 소개

호 광 춘(정회원)



- 1996년 Polytechnic Institute of NYU, Electrical Eng., Ph.D.
- 1988-1990 육군사관학교 전자공학과 전임강사
- 1997-1998 한국통신 연구개발본부 무선통신연구소, 선임연구원
- 2001-현재 한성대학교 정보통신공학과, 교수

<주관심분야 : Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices>