

分层手征介质中电磁波的传播矩阵法 及其传播特性研究*

尹文言 万伟

(西北工业大学电子工程系, 西安 710072)

摘要 本文首先建立了任意分层手征介质中的电磁波传播矩阵法, 给出了正向和反向传播矩阵的一般形式。并且分析了两种不同手征介质界面处, 有无金属板衬底的单层手征介质板的反射和透射特性, 特别考虑了手征导纳的影响。

关键词 手征介质; 手征导纳; 传播矩阵; 阻抗匹配

一、引言

无论在电波传播、微波遥感领域, 还是在光学和其它领域, 分层介质中电磁波的传播特性研究是一直引人关注、具有普遍实用价值的问题。例如, 在光学中, 增透膜和高反射膜是由多层介质构成的; 而在反雷达隐身技术中, 结构型复合吸波材料也是由多层损耗介质组成的。最近几年, 人们对分层手征介质中电磁波的传播特性特别感兴趣。手征介质是一种双各向同性的功能材料, 这里“双”字是指手征介质中的电场和磁场是相互耦合的。手征性是指一个物体和它的镜象之间缺乏对称性, 用任何操作都不能使之重合。化学中的具有螺旋结构的高分子化合物, 生物学中的 DNA 螺旋结构图案等都具有手征性。在手征介质中, 传播的特征波是右、左旋圆极化波。早在 1988 年, S. Bassiri 等人^[1]就研究了一般介质与手征介质分界面处平面电磁波的反射和透射特性; M. I. Oksanen 等人^[2]用矢量电路理论分析了手征介质板中电磁波的传播特性; 最近, I. V. Lindell 等人^[3]还用 W.K.B. 近似研究了分层手征介质中电磁波的反射和透射特性。

本文建立了任意分层手征介质中的电磁波传播矩阵法, 而一般分层介质中的电磁波传播矩阵法可以看成是手征导纳 ϵ_s 等于零时的特殊情形。本文还分析了两种不同手征介质界面处, 有无金属板衬底的单层手征介质板对垂直入射和斜入射电磁波的反射和透射特性。结果表明, 手征介质在新型微波、毫米波器件的制作, 天线工程等领域中有潜在的应用价值。

1991.12.09 收到, 1992.08.26 定稿。

* 航空科学基金资助课题。

尹文言 男, 1961 年出生, 讲师, 博士研究生, 从事随机和有序复合介质与电磁波之间的相互作用研究。

万伟 男, 1937 年出生, 教授, 长期从事电磁场和微波技术、无线电和电磁散射等方面的教学和科研工作。

二、分层手征介质中的电磁波传播矩阵法

以电磁波吸收材料为例,它通常是由单层、双层或多层高损耗介质构成的。用传播矩阵法研究多层介质对入射电磁波的反射和透射特性较为方便。对 n 层手征介质来说,如图 1 所示,手征介质的电磁参数分别为 $(\epsilon_1, \mu_1, \xi_1), \dots, (\epsilon_n, \mu_n, \xi_n)$, 各层的厚度由图中坐标确定,这里 d_i 并不是物理量。

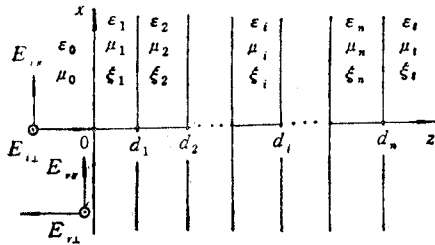


图 1 电磁波垂直入射到任意分层手征介质上

通常第 i 层手征介质的本构方程可以表示成^[4]

$$D_i = \epsilon_i E_i + j\xi_i B_i \quad (1)$$

$$H_i = j\xi_i E_i + B_i / \mu_i \quad (2)$$

其内传播的特征波为两列右、左旋圆极化波 (RCP 和 LCP), 传播波数分别为

$$k_{i1,2} = \pm \omega \mu_i \xi_i + (\omega^2 \mu_i \epsilon_i + \omega^2 \mu_i^2 \xi_i^2)^{1/2} \quad (3)$$

假定平面电磁波由空气中垂直入射到 $z = 0$ 的分界面上,入射波为

$$E_{i1} = E_i \exp[j(k_0 z - \omega t)] \quad (4)$$

$$H_{i1} = H_i \exp[j(k_0 z - \omega t)] \quad (5)$$

其中 $E_i = (E_{i1} e_x + E_{i2} e_y)$, $H_i = (E_{i1} e_y - E_{i2} e_x) / \eta_0$, $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 。一般地,第 i 层手征介质中正向和反向传播的电磁波为

$$E_{ei}^{\pm} = E_{i1}^{\pm} \exp(\pm j k_{i1} z) + E_{i2}^{\pm} \exp(\pm j k_{i2} z) \quad (6)$$

$$H_{ei}^{\pm} = H_{i1}^{\pm} \exp(\pm j k_{i1} z) + H_{i2}^{\pm} \exp(\pm j k_{i2} z) \quad (7)$$

其中

$$E_{i1}^{\pm} = E_{i1}^{\pm} (\pm e_x + j e_y), E_{i2}^{\pm} = E_{i2}^{\pm} (\pm e_x - j e_y)$$

$$H_{i1}^{\pm} = -j E_{i1}^{\pm} (\pm e_x + j e_y) / Z_i, H_{i2}^{\pm} = -j E_{i2}^{\pm} (\pm e_x - j e_y) / Z_i$$

$$Z_i = (\mu_i / \epsilon_i)^{1/2} / (1 + \mu_i \xi_i^2 / \epsilon_i)^{1/2}$$

同理,第 $i+1$ 层手征介质中正向和反向传播的电磁波为

$$E_{e(i+1)}^{\pm} = E_{(i+1)1}^{\pm} \exp(\pm j k_{(i+1)1} z) + E_{(i+1)2}^{\pm} \exp(\pm j k_{(i+1)2} z) \quad (8)$$

$$H_{e(i+1)}^{\pm} = H_{(i+1)1}^{\pm} \exp(\pm j k_{(i+1)1} z) + H_{(i+1)2}^{\pm} \exp(\pm j k_{(i+1)2} z) \quad (9)$$

其中

$$E_{(i+1)1}^{\pm} = E_{(i+1)1}^{\pm} (\pm e_x + j e_y), E_{(i+1)2}^{\pm} = E_{(i+1)2}^{\pm} (\pm e_x - j e_y)$$

$$H_{(i+1)1}^{\pm} = -j E_{(i+1)1}^{\pm} (\pm e_x + j e_y) / Z_{i+1}, H_{(i+1)2}^{\pm} = -j E_{(i+1)2}^{\pm} (\pm e_x - j e_y) / Z_{i+1}$$

$$k_{(i+1)1,2} = \pm \omega \mu_{i+1} \xi_{i+1} + (\omega^2 \mu_{i+1} \epsilon_{i+1} + \omega^2 \mu_{i+1}^2 \xi_{i+1}^2)^{1/2}$$

$$Z_{i+1} = (\mu_{i+1} / \epsilon_{i+1})^{1/2} / (1 + \mu_{i+1} \xi_{i+1}^2 / \epsilon_{i+1})^{1/2}$$

由 $z = d_i$ 处的边界条件,即在 $z = d_i$ 处电场强度和磁场强度的切向分量连续,可得

$$\begin{bmatrix} E_{i1}^+ \exp(jk_{i1}d_i) \\ E_{i2}^+ \exp(jk_{i2}d_i) \\ E_{i1}^- \exp(-jk_{i1}d_i) \\ E_{i2}^- \exp(-jk_{i2}d_i) \end{bmatrix} = \bar{U}_{i(i+1)} \begin{bmatrix} E_{(i+1)1}^+ \exp(jk_{(i+1)1}d_{i+1}) \\ E_{(i+1)2}^+ \exp(jk_{(i+1)2}d_{i+1}) \\ E_{(i+1)1}^- \exp(-jk_{(i+1)1}d_{i+1}) \\ E_{(i+1)2}^- \exp(-jk_{(i+1)2}d_{i+1}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$\bar{U}_{i(i+1)} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} A & 0 & 0 & F \\ 0 & B & E & 0 \\ 0 & D & G & 0 \\ C & 0 & 0 & H \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A &= (1 + Z_{i+1}^i) \exp[jk_{(i+1)1}(d_i - d_{i+1})] \\ B &= (1 + Z_{i+1}^i) \exp[jk_{(i+1)2}(d_i - d_{i+1})] \\ C &= (Z_{i+1}^i - 1) \exp[-jk_{(i+1)1}(d_i - d_{i+1})] \\ D &= (Z_{i+1}^i - 1) \exp[-jk_{(i+1)2}(d_i - d_{i+1})] \\ E &= (Z_{i+1}^i - 1) \exp[jk_{(i+1)1}(d_i - d_{i+1})] \\ F &= (Z_{i+1}^i - 1) \exp[jk_{(i+1)2}(d_i - d_{i+1})] \\ G &= (1 + Z_{i+1}^i) \exp[-jk_{(i+1)1}(d_i - d_{i+1})] \\ H &= (1 + Z_{i+1}^i) \exp[-jk_{(i+1)2}(d_i - d_{i+1})] \end{aligned}$$

而

$$Z_{i+1}^i = Z_i / Z_{i+1}$$

注意到(10)式左右两边分别含有 d_i 和 d_{i+1} 因子, 它将相邻两层手征介质中的波振幅联系起来, 定义 $\bar{U}_{i(i+1)}$ 为反向传播矩阵, 其逆矩阵为

$$\bar{V}_{(i+1)i} = \bar{U}_{i(i+1)}^{-1} \quad (12)$$

即

$$\bar{V}_{(i+1)i} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} A' & 0 & 0 & E' \\ 0 & B' & F' & 0 \\ 0 & C' & G' & 0 \\ D' & 0 & 0 & H' \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} A' &= (1 + Z_{i+1}^{i+1}) \exp[jk_{(i+1)1}(d_{i+1} - d_i)] \\ B' &= (1 + Z_{i+1}^{i+1}) \exp[jk_{(i+1)2}(d_{i+1} - d_i)] \\ C' &= (Z_{i+1}^{i+1} - 1) \exp[-jk_{(i+1)1}(d_{i+1} - d_i)] \\ D' &= (Z_{i+1}^{i+1} - 1) \exp[-jk_{(i+1)2}(d_{i+1} - d_i)] \\ E' &= (Z_{i+1}^{i+1} - 1) \exp[jk_{(i+1)1}(d_{i+1} - d_i)] \\ F' &= (Z_{i+1}^{i+1} - 1) \exp[jk_{(i+1)2}(d_{i+1} - d_i)] \\ G' &= (1 + Z_{i+1}^{i+1}) \exp[-jk_{(i+1)1}(d_{i+1} - d_i)] \\ H' &= (1 + Z_{i+1}^{i+1}) \exp[-jk_{(i+1)2}(d_{i+1} - d_i)] \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $Z_{i+1}^{i+1} = (Z_{i+1}^i)^{-1}$. 定义 $\bar{V}_{(i+1)i}$ 为正向传播矩阵.

利用传播矩阵, 可以用某一区域内的波振幅来确定任意区域中的波振幅, 若 $l < m$,

则

$$\begin{bmatrix} E_{l1}^+ \exp(jk_{l1}d_l) \\ E_{l2}^+ \exp(jk_{l2}d_l) \\ E_{l1}^- \exp[-jk_{l1}d_l] \\ E_{l2}^- \exp(-jk_{l2}d_l) \end{bmatrix} = \bar{U}_{lm} \begin{bmatrix} E_{m1}^+ \exp(jk_{m1}d_m) \\ E_{m2}^+ \exp(jk_{m2}d_m) \\ E_{m1}^- \exp(-jk_{m1}d_m) \\ E_{m2}^- \exp(-jk_{m2}d_m) \end{bmatrix} \quad (14)$$

而 $\bar{U}_{lm}$ 是 $m-l$ 个反向传播矩阵的连乘:

$$\bar{U}_{lm} = \bar{U}_{l(l+1)} \cdot \bar{U}_{(l+1)(l+2)} \cdots \bar{U}_{(m-1)m} \quad (15)$$

同理, 正向传播矩阵可以将任意区域 l 中的波振幅用其它区域 $q (q < l)$ 中的波振幅来表示. 需要注意的是, 透射波振幅是指透射区域与相邻手征介质边界上的波振幅, 因此, 用传播矩阵表示透射区域 l 中的透射波振幅时, 应取 $d_l = 0$.

当平面电磁波垂直入射到两种不同手征介质 $(\epsilon_1, \mu_1, \xi_1)$ 和 $(\epsilon_2, \mu_2, \xi_2)$ 的分界面上时, 由(10)式可见, 这时 $d_i = 0$, 区域 2 中只有透射波, 反向传播矩阵为

$$\bar{U}_{12} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1+Z_1^2)\exp(-jk_{21}d_2) & 0 & 0 & (Z_1^2-1)\exp(jk_{22}d_2) \\ 0 & (1+Z_1^2)\exp(-jk_{22}d_2) & (Z_1^2-1)\exp(jk_{22}d_2) & 0 \\ 0 & (Z_1^2-1)\exp(-jk_{22}d_2) & (1+Z_1^2)\exp(jk_{21}d_2) & 0 \\ (Z_1^2-1)\exp(-jk_{21}d_2) & 0 & 0 & (1+Z_1^2)\exp(jk_{21}d_2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

那么分界面处的反射和透射系数分别为

$$R = \frac{(\mu_1/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_1\xi_1^2/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}} - (\mu_2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_2\xi_2^2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}}{(\mu_1/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_1\xi_1^2/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}} + (\mu_2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_2\xi_2^2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

$$T = \frac{2(\mu_2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_2\xi_2^2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}}{(\mu_1/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_1\xi_1^2/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}} + (\mu_2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_2\xi_2^2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

由(17)式可见, 当 $R = 0$ 时, 有

$$\sqrt{\mu_1/\epsilon_1}/\sqrt{\mu_2/\epsilon_2} = (1+\mu_1\xi_1^2/\epsilon_1)^{\frac{1}{2}}/(1+\mu_2\xi_2^2/\epsilon_2)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

上式是最一般的阻抗匹配关系式.

在图 1 中, 当垂直极化的平面电磁波垂直入射到位于空气中的单层手征介质板上时, 由(10)和(11)式可得手征介质板的反射率和透射率分别为

$$r_{\perp}^2 = 2(Z_1^2 - \eta_0^2)^2 - 2(Z_1 - \eta_0)(Z_1 + \eta_0)^3 \cos(k_{11} + k_{12})d_1/\Delta \quad (20)$$

$$t_{\perp}^2 = 8Z_1^2\eta_0^2[1 + \cos(k_{11} - k_{12})d_1]/\Delta \quad (21)$$

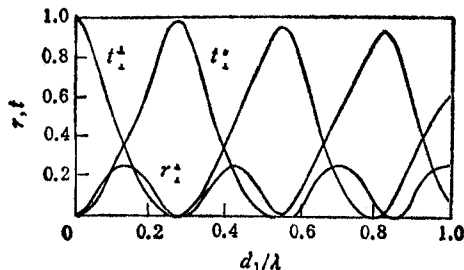


图 2 手征介质板的反射率和透射率随厚度变化曲线
 $f = 10\text{GHz}$, $\epsilon_1 = 2.25\epsilon_0$, $\mu_1 = \mu_0$, $\xi_1 = 2.5 \times 10^{-3}\text{S}$

$$t_{\perp}'' = 8Z_1^2\eta_0^2[1 - \cos(k_{11} - k_{12})d_1]/\Delta \quad (22)$$

$$\text{其中 } \Delta = (Z_1 + \eta_0)^4 + (Z_1 - \eta_0)^4 - 2(Z_1 - \eta_0)(Z_1 + \eta_0)^3 \cos(k_{11} + k_{12})d_1 \quad (23)$$

对给定的电磁参数, 上述诸量随手征介质板的归一化厚度变化曲线如图 2 所示。

显然, $r_{\perp}, t_{\perp}, t_{\perp}''$ 随着 d_1/λ 的变化而呈强烈的振荡现象。对特定的厚度, 共极化透射率 $t_{\perp}$ 可达最大值, 而交叉极化透射率 $t_{\perp}''$ 为零; 同样, $t_{\perp}''$ 可达最大值, 而 $t_{\perp}$ 为零。

三、斜入射时界面处的反射和透射特性

当平面电磁波斜入射到两种不同手征介质分界面上时, 如图 3 所示, 入射波、反射波和透射波均为两列右、左旋圆极化波, 其波场分别为 $(E_{1\pm}, H_{1\pm})$, $(E_{2\pm}, H_{2\pm})$ 和 $(E_{3\pm}, H_{3\pm})$ 。传播波数分别为:

$$\text{在手征介质 1 中: } k_{1\pm} = \pm\omega\mu_1\xi_1 + (k_1^2 + \omega^2\mu_1^2\xi_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$\text{在手征介质 2 中: } k_{2\pm} = \pm\omega\mu_2\xi_2 + (k_2^2 + \omega^2\mu_2^2\xi_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

其中 $k_1^2 = \omega^2\mu_1\epsilon_1$, $k_2^2 = \omega^2\mu_2\epsilon_2$ 。

由分界面处相位匹配条件可知

$$\begin{aligned} k_{1+} \sin \theta_1 &= k_{1-} \sin \theta_2 = k_{2+} \sin \theta_3 \\ &= k_{2-} \sin \theta_4 \end{aligned} \quad (26)$$

现考虑以下几种情形:

(1) 当 $\xi_1 > 0, \xi_2 > 0$ 时, 易知 $k_{1+} > k_{1-}$, $k_{2+} > k_{2-}$, 那么 $\theta_1 < \theta_2, \theta_3 < \theta_4$ 。当 $\theta_4 = 90^\circ$ 时, 波 (E_{1-}, H_{1-}) 的临界角为 θ_{c2} , 它满足

$$\theta_{c2} = \arcsin(k_{2-}/k_{1-}) \quad (27)$$

(2) 当 $\xi_1 < 0, \xi_2 < 0$ 时, 则 $k_{1+} < k_{1-}$, $k_{2+} < k_{2-}$, 那么 $\theta_1 > \theta_2, \theta_3 > \theta_4$ 。当 $\theta_3 = 90^\circ$ 时, 波 (E_{1+}, H_{1+}) 的临界角为 θ_{c1} ,

$$\text{即 } \theta_{c1} = \arcsin(k_{2+}/k_{1+}) \quad (28)$$

(3) 当 $\xi_1 < 0, \xi_2 > 0$ 时, 则 $k_{1+} < k_{1-}, k_{2+} > k_{2-}$, 那么 $\theta_1 > \theta_2, \theta_3 < \theta_4$ 。当 $\theta_4 = 90^\circ$ 时, 波 (E_{1+}, H_{1+}) 的临界角 θ_{c1} 为

$$\theta_{c1} = \arcsin(k_{2-}/k_{1+}) \quad (29)$$

(4) 当 $\xi_1 > 0, \xi_2 < 0$ 时, 则 $k_{1+} > k_{1-}, k_{2+} < k_{2-}$, 那么 $\theta_1 < \theta_2, \theta_3 > \theta_4$ 。当 $\theta_3 = 90^\circ$ 时, 波 (E_{1-}, H_{1-}) 的临界角 θ_{c2} 为

$$\theta_{c2} = \arcsin(k_{2+}/k_{1-}) \quad (30)$$

显然, 手征导纳的引入, 使得电磁波在界面处的反射和透射特性变得很复杂。

在图 3 中, 各波场可以表示成:

$$E_{1\pm} = E_{1\pm}(\cos \theta_{1,2} e_x + \sin \theta_{1,2} e_z \pm j e_y) \exp[jk_{1\pm}(z \cos \theta_{1,2} - x \sin \theta_{1,2})] \quad (31 a)$$

$$H_{1\pm} = \mp j E_{1\pm} / Z_1 \quad (31 b)$$

$$E_{2\pm} = E_{2\pm}(-\cos \theta_{1,2} e_x + \sin \theta_{1,2} e_z \pm j e_y) \exp[-jk_{1\pm}(z \cos \theta_{1,2} + x \sin \theta_{1,2})] \quad (32 a)$$

$$H_{2\pm} = \mp j E_{2\pm} / Z_1 \quad (32 b)$$

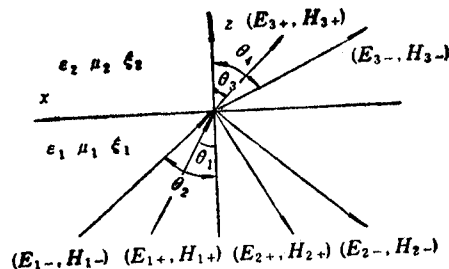


图 3 平面电磁波斜入射到两种手征介质界面上

$$E_{3\pm} = E_{3\pm}(\cos\theta_{3,4}e_x + \sin\theta_{3,4}e_y \pm je_y)\exp[jk_{2\pm}(z\cos\theta_{3,4} - x\sin\theta_{3,4})] \quad (33a)$$

$$H_{3\pm} = \mp jE_{3\pm}/Z_2 \quad (33b)$$

由 $z = 0$ 处的边界条件,可得

$$\begin{bmatrix} -2 & 0 & 1+Z_2^1 & Z_2^1-1 \\ 0 & 2 & 1-Z_2^1 & -(1+Z_2^1) \\ 0 & 2\cos\theta_2 & \cos\theta_3(1-Z_2^1) & (1+Z_2^1)\cos\theta_4 \\ 2\cos\theta_1 & 0 & \cos\theta_3(1+Z_2^1) & (1-Z_2^1)\cos\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2+} \\ E_{2-} \\ E_{3+} \\ E_{3-} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} E_{1+} \\ -E_{1-} \\ E_{1-}\cos\theta_2 \\ E_{1+}\cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

引入界面处的反射和透射系数矩阵,即

$$\begin{bmatrix} E_{2+} \\ E_{2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1+} \\ E_{1-} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} E_{3+} \\ E_{3-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1+} \\ E_{1-} \end{bmatrix} \quad (36)$$

由(34)式可知

$$R_{11} = -\{[1 + (Z_2^1)^2(\cos\theta_3 + \cos\theta_4)(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) + 2Z_2^1[2(\cos\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_3\cos\theta_4) + (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)(\cos\theta_4 - \cos\theta_3)]]/\Delta \quad (37a)$$

$$R_{12} = 2\cos\theta_2[1 - (Z_2^1)^2](\cos\theta_3 + \cos\theta_4)/\Delta \quad (37b)$$

$$R_{21} = 2\cos\theta_1[1 - (Z_2^1)^2](\cos\theta_3 + \cos\theta_4)/\Delta \quad (37c)$$

$$R_{22} = -\{[1 + (Z_2^1)^2](\cos\theta_3 + \cos\theta_4)(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) + 2Z_2^1[2(\cos\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_3\cos\theta_4) + (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)(\cos\theta_3 - \cos\theta_4)]]/\Delta \quad (37d)$$

$$T_{11} = -4\cos\theta_1(1 + Z_2^1)(\cos\theta_2 + \cos\theta_4)/\Delta \quad (38a)$$

$$T_{12} = 4\cos\theta_2(1 - Z_2^1)(\cos\theta_4 - \cos\theta_1)/\Delta \quad (38b)$$

$$T_{21} = 4\cos\theta_1(1 - Z_2^1)(\cos\theta_3 - \cos\theta_2)/\Delta \quad (38c)$$

$$T_{22} = -4\cos\theta_2(1 + Z_2^1)(\cos\theta_1 + \cos\theta_3)/\Delta \quad (38d)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= (1 - Z_2^1)^2(\cos\theta_3 - \cos\theta_2)(\cos\theta_4 - \cos\theta_1) \\ &\quad - (1 + Z_2^1)^2(\cos\theta_1 + \cos\theta_3)(\cos\theta_2 + \cos\theta_4) \end{aligned} \quad (39)$$

由图 3 和(37)~(39)式可见

(1) 将 ξ_1, ξ_2 同时换成 $-\xi_1, -\xi_2$ 时,有

$$R_{11} = R_{22}, R_{21} = R_{12}, T_{11} = T_{22}, T_{21} = T_{12} \quad (40)$$

(2) 若 $Z_2^1 = 1$, 则 $R_{12} = 0, R_{21} = 0, T_{12} = 0, T_{21} = 0$, 这时反射波和透射波具有与入射波相同的极化状态,两种手征介质实现阻抗匹配,其电磁参数满足(19)式,有

$$R_{11} = (\cos\theta_1 - \cos\theta_3)/(\cos\theta_1 + \cos\theta_3) \quad (41)$$

$$R_{22} = (\cos\theta_2 - \cos\theta_4)/(\cos\theta_2 + \cos\theta_4) \quad (42)$$

(3) 若 $\xi_1 \neq 0, \xi_2 = 0$, 对应于平面电磁波在手征介质与一般介质分界面上的反射情形,这时 $\theta_3 = \theta_4$.

(4) 若 $\xi_1 = 0, \xi_2 \neq 0$, 对应于平面电磁波由一般介质斜入射到手征介质界面上,这时 $\theta_1 = \theta_2$. 特别地,若 $\xi_1 = 0, \xi_2 = 0$ 时,即为一般介质分界面情形.

下面以有金属衬底的单层手征介质板为例,当平行极化平面电磁波斜入射到手征介质板上时,反射率 $r_{\parallel}$ 和 $r_{\perp}$ 随板的归一化厚度 d_1/λ 的变化曲线如图 4 所示. 由图中

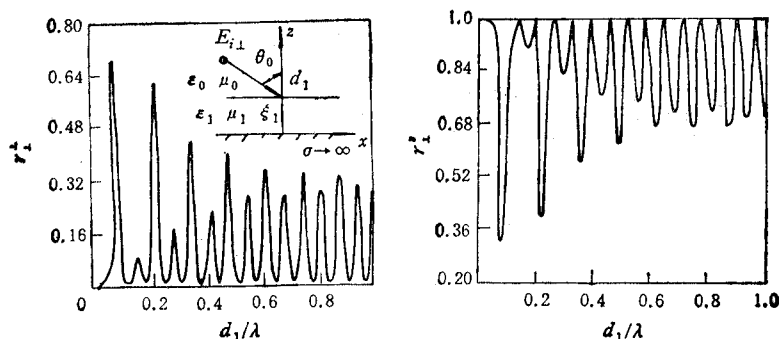


图4 有金属衬底的手征介质板反射率变化曲线

$$f = 10\text{GHz}, \theta_0 = 60^\circ, E_{i\parallel} = 0, \epsilon_1 = 2.5\epsilon_0, \mu = \mu_0, \xi_1 = 10^{-3}\text{S}$$

可见,即使入射波是垂直或平行极化时,反射波同时存在垂直和平行极化分量,而这种交叉极化效应是由于手征介质中的电场和磁场之间相互耦合造成的。

四、结 论

作为一种新型的功能材料,手征介质是一种典型的交叉极化介质。上述研究表明,由于手征介质较易与其它介质实现阻抗匹配,因此可以用作隐身吸波材料中的匹配层。另一方面,通过选择手征介质的电磁参数和几何尺寸,可以任意调节反射场或透射场的极化特性。因此,手征介质在新型微波、毫米波器件的制作等领域都有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] S. Bassiri et al., *J. Opt. Soc. Am. A*, 5(1988)9, 1450—1459.
- [2] M. I. Oksanen et al., *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 4(1990)7, 613—643.
- [3] I. V. Lindell et al., *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 5(1991)10, 1105—1121.
- [4] N. Engheta, W. Kowarz, *J. Appl. Phys.*, 67(1990)2, 639—648.

STUDY ON PROPAGATION MATRIX METHOD OF ELECTROMAGNETIC WAVES AND TRANSMISSION PROPERTIES IN STRATIFIED CHIRAL MEDIA

Yin Wenyan Wan Wei

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The propagation matrix method of electromagnetic waves in stratified chiral media is introduced for the first time, and the general expressions of propagation matrix are derived. The reflection and transmission properties of electromagnetic waves at different chiral interfaces, one layer of chiral medium slab as well as air-chiral medium on metal substrate are analysed, in which the effects of chirality admittance are considered especially.

Key words Chiral media; Chirality admittance; Propagation matrix; Impedance match