

文章编号: 2095-4980(2017)04-0613-04

张量人工阻抗单元的阻抗计算及应用

李 江, 杨 春, 陈 琦, 何晓阳

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 提出了一种张量人工阻抗单元的表面阻抗分析计算方法, 主要对矩形形状单元的表面阻抗开展了研究。通过仿真软件 Ansys-HFSS 提取了人工阻抗单元表面的入射散射场, 再利用等效传输线技术计算出表面的张量阻抗。利用张量阻抗与表面场的关系, 给出了人工阻抗单元的标量阻抗与传播方向的关系, 验证了计算的准确性。最后作为实例, 设计了一种基于张量阻抗单元的圆极化全息天线, 天线具有较好的圆极化特性, 增益大于 21 dB。

关键词: 张量人工阻抗单元; 横向谐振; 全息天线; 圆极化

中图分类号: TN820.1⁺7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0613

Analysis and application of tensor artificial impedance surface

LI Jiang, YANG Chun, CHEN Qi, HE Xiaoyang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The tensor Artificial Impedance Surface(AIS) is analyzed and simulated by using Ansoft HFSS. With the surface incident and scattered electric and magnetic fields, the surface tensor impedance is calculated by transverse resonance technique. As an example, a circularly polarized holographic antenna is designed based on tensor artificial impedance surface, and a simulated gain of 21 dB and some good circularly polarized characteristics are obtained.

Keywords: tensor artificial impedance; transverse resonance; holographic antenna; circularly polarized

从 20 世纪末期开始, 人工电磁材料技术得到快速发展, 它通过将人工的、周期的元胞结构的电小尺寸的复合材料按照特定的规律组成, 形成自然界中材料所不具备的性质。这种宏观的电小尺寸的人工阻抗单元对场的响应模拟了微观的分子、原子对电磁波的响应。人工阻抗表面是二维的人工电磁材料, 通过将周期或准周期的二维单元嵌入介质板内部或表面来实现不同的表面阻抗^[1]。人工阻抗单元主要可分为各向同性和各向异性结构, 也可称为标量人工阻抗单元和张量人工阻抗单元, 相比于各向同性人工电磁材料, 高各向异性的人工阻抗表面可获得更强的表面波调控能力, 可用来设计圆极化天线、表面波导、电磁隐身结构等。Bryan H F, Cui Tiejun 等对标量人工阻抗单元的分析计算以及应用已经开展了相关工作^[2-5], 但对于张量阻抗单元的表面阻抗的分析计算的研究工作还较少^[6-7]。本文主要研究了二维张量人工阻抗单元, 计算了张量人工阻抗单元的表面阻抗, 并验证了分析计算的准确性, 最后利用它设计了一种毫米波圆极化全息天线, 实现了对表面波的调制。

1 张量人工阻抗表面分析与设计

相比于标量人工阻抗单元, 张量人工单元二维平面内是各向异性的, 它的 3 种形式如图 1 所示。单元由正方形的介质基板构成, 底层是全金属的地, 顶层是尺寸不一的金属贴片。张量单元的金属贴片在正交方向上具有不同的尺寸, 因此感应场在各个方向上是不一样的, 在 x - y 面内的表面阻抗呈现各向异性, 可以采用阻抗矩阵表示, 张量表面阻抗定义为:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: E_x, E_y 分别为 x, y 方向的电场强度; J_x, J_y 分别为 x, y 方向的电流强度; Z 为单元的张量阻抗矩阵。

收稿日期: 2015-12-29; 修回日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61302047)

为得到式(1)中的表面阻抗, 本文采用入射散射方法来提取表面场分布, 设入射电场为 E_i , 散射电场为 E_r :

$$\begin{aligned} E_i &= A\bar{x}e^{jk_z z}, \quad E_r = (B\bar{x} + C\bar{y})e^{-jk_z z} \\ H_i &= -\frac{1}{\eta}A\bar{y}e^{jk_z z}, \quad H_r = -\frac{1}{\eta}(B\bar{x} + C\bar{y})e^{-jk_z z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A, B, C 分别为对应方向的电场、磁场的幅度; K_z 为传播常数; η 为波阻抗。

其表面的电磁场关系可以表示为:

$$\begin{pmatrix} -H_y \\ H_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{xx}^{in} & Y_{xy}^{in} \\ Y_{yx}^{in} & Y_{yy}^{in} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ 分别为对应方向的电场、磁场强度; 矩阵 Y 为张量阻抗单元的表面等效电抗。

建立如图 2 所示的单元仿真模型, 空气盒子的四周设置成主从边界, 采用平面波激励, 入射平面波电场的相位零点位于贴片表面, 幅度为 1。通过仿真, 可以得到散射电场 B, C 的值。为解方程组(3)中的导纳, 通过 2 次场提取, 分别设置平面波的极化为 x 和 y 方向, 得到的散射电场对应为 B_1, C_1 ; B_2, C_2 。将式(2)代入式(3), 可得:

$$\begin{aligned} Y_{xx}^{in} &= \frac{1}{\eta_0} \frac{(A+C_2) \times (A-B_1) + C_1 \times B_2}{(A+B_1) \times (A+C_2) + B_2 \times C_1}, \quad Y_{xy}^{in} = \frac{1}{\eta_0} \frac{-B_2 \times (A+B_1) - (A-B_1) \times B_2}{(A+B_1) \times (A+C_2) - B_2 \times C_1}, \\ Y_{yx}^{in} &= \frac{1}{\eta_0} \frac{-C_1 \times (A+C_2) - (A-C_2) \times C_1}{(A+B_1) \times (A+C_2) - B_2 \times C_1}, \quad Y_{yy}^{in} = \frac{1}{\eta_0} \frac{(A-C_2) \times (A+B_1) + C_1 \times B_2}{(A+B_1) \times (A+C_2) + B_2 \times C_1} \end{aligned} \quad (4)$$

采用横向谐振技术, 建立如图 3 所示的等效传输线模型, 单元的金属地等效为短路结构, 顶层金属贴片等效为电抗 $\bar{Y}_{sheet}$, 从顶端看进去的输入阻抗表示为 $\bar{Y}_{surf}$ 。一般情况下, 电磁波从一个介质表面的不同方向入射, 会有不同的表面阻抗, 但人工阻抗单元相比于工作波长是电小尺寸, 在单元内的电磁场可以近似看成是固定不变的, 因此在此处只考虑垂直入射时的表面阻抗。单元的输入阻抗可以表示为:

$$\begin{pmatrix} Y_{xx}^{in} & Y_{xy}^{in} \\ Y_{yx}^{in} & Y_{yy}^{in} \end{pmatrix} = \bar{Y}_{sheet} + \begin{pmatrix} \frac{1}{j\eta} \tan(k_1 d) & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\eta} \tan(k_1 d) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\bar{Y}_{sheet}$ 是表面贴片等效的导纳, 为了求得表面阻抗, 利用修正的等效传输线技术^[8], 将其修改后可以由 $\bar{Y}_{sheet}$ 解得表面阻抗 $\bar{Y}_{surf}$:

$$\bar{Y}_{surf} = \bar{Y}_{sheet} + \begin{pmatrix} \frac{1}{j\eta_{z1}} \tan(k_{z1} d) & 0 \\ 0 & \frac{1}{j\eta_{z1}} \tan(k_{z1} d) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: $k_{z1} = \sqrt{k_0^2(\epsilon_{r1} - 1) + \left(\frac{k_0}{Y_{surf}\eta_0}\right)^2}$; $\eta_{z1} = \frac{\eta_0 k_{z1}}{\epsilon_{r1} k_0}$ 。则求得的张量人工阻抗单元表面阻抗可以表示为:

$$\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{xx}^{surf} & Y_{xy}^{surf} \\ Y_{yx}^{surf} & Y_{yy}^{surf} \end{pmatrix}^{-1} \quad (7)$$

张量阻抗表面能够支持 TM 和 TE 表面波的传播, 由麦克斯韦方程可以得到 TM 和 TE 波的电磁场为:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \bar{a}_z \varphi, \quad \bar{H}_{TM} = \nabla \times \bar{A}, \quad \bar{E}_{TM} = -j\omega \mu \bar{A} + \frac{1}{j\omega \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) \\ \bar{F} &= \bar{a}_z \varphi, \quad \bar{E}_{TE} = -\nabla \times \bar{F}, \quad \bar{H}_{TE} = -j\omega \epsilon \bar{F} + \frac{1}{j\omega \mu} \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) \end{aligned} \quad (8)$$

张量阻抗表面的总场可以表示为^[1]:

$$\bar{E} = \bar{E}_{TM} + \alpha \bar{E}_{TE}; \quad \bar{H} = \bar{H}_{TM} + \alpha \bar{H}_{TE} \quad (9)$$

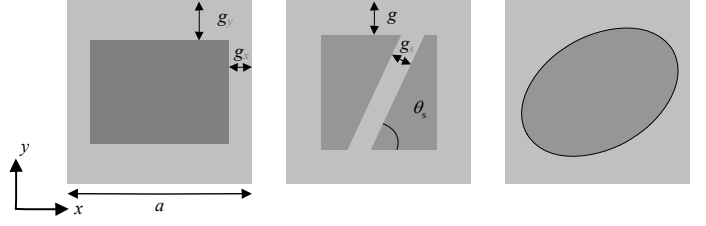


Fig.1 Surface structure of tensor AIS unit cell
图 1 张量阻抗单元表面结构示意图

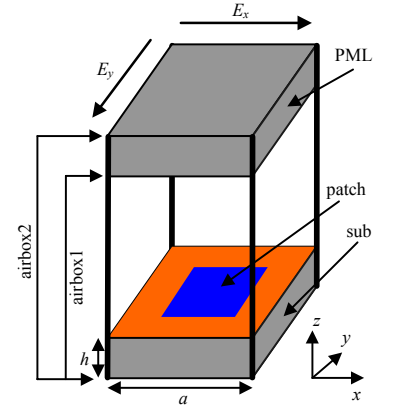


Fig.2 Simulation setup for rectangular tensor AIS unit cell
图 2 人工阻抗单元仿真模型

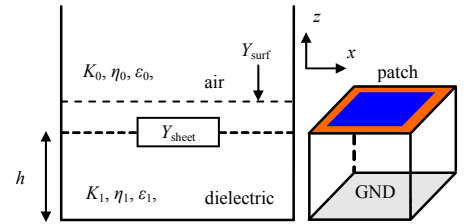


Fig.3 Transmission line model of unit cell
图 3 等效传输线模型示意图

在贴片表面的电场磁场和表面阻抗的关系可以表示为:

$$\vec{E} = Z \cdot \vec{z} \times \vec{H} \quad (10)$$

从而可以由表面的电场和磁场解得不同方向上的标量阻抗见式(11), 其中 θ_k 代表传播方向与 x 轴的夹角。

$$Z_{\theta_k} = j \frac{Z_0}{k_0} \frac{\frac{w^2 u \varepsilon}{2} \left[-\left(\frac{1}{wu} + \frac{Z_{xx} Z_{yy} - Z_{xy} Z_{yx}}{wu} \right) + \sqrt{P} \right]}{\left(Z_{xx} \sin^2 \theta_k - Z_{xy} \sin \theta_k \cos \theta_k - Z_{yx} \sin \theta_k \cos \theta + Z_{yy} \cos^2 \theta_k \right)} \quad (11)$$

$$\text{式中 } P = \left(\frac{1}{wu} + \frac{Z_{xx} Z_{yy} - Z_{xy} Z_{yx}}{wu} \right)^2 - \frac{4}{w^2 u \varepsilon} \left(Z_{xx} \sin^2 \theta_k - Z_{xy} \sin \theta_k \cos \theta_k - Z_{yx} \sin \theta_k \cos \theta + Z_{yy} \cos^2 \theta_k \right) \times \\ \left(Z_{xx} \cos^2 \theta_k - Z_{xy} \sin \theta_k \cos \theta_k - Z_{yx} \sin \theta_k \cos \theta + Z_{yy} \sin^2 \theta_k \right)$$

2 张量单元仿真结果

本文主要对矩形单元的表面阻抗做相应研究, 通过 HFSS 仿真得到散射场后, 可计算出表面的张量阻抗。矩形单元的结构如图 1 所示, 介质板采用 Rogers Duroid 5880, 厚度 h 为 0.508 mm, 介电常数为 2.2, 单元周期 a 为 1.6 mm, 工作频率为 35 GHz, 通过计算不同单元尺寸人工阻抗表面, 可以得到间隙与表面阻抗的关系如图 4、图 5 所示, 由于其结构的对称性, 得到的 Z_{xy}, Z_{yx} 为 0。

为了验证计算的张量阻抗的准确性, 采用式(11), 可以得到人工阻抗单元各个传播方向上的标量阻抗, 如图 6 所示, 当 x 和 y 方向上的间隙不相等时, 各个方向上的阻抗呈现一个花生形; 当 x 和 y 方向上的间隙相等时, 阻抗单元是各向同性的, 各个方向的标量阻抗相等。

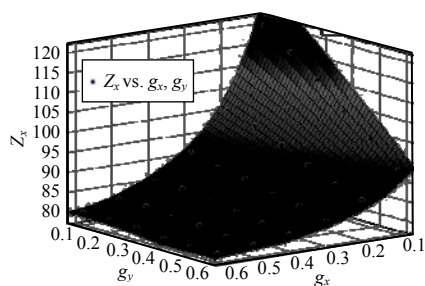


Fig.4 Impedance Z_x versus g_x and g_y . With the gap increases, the impedance will decrease.

图 4 Z_{xx} 与间隙 g_x, g_y 的关系

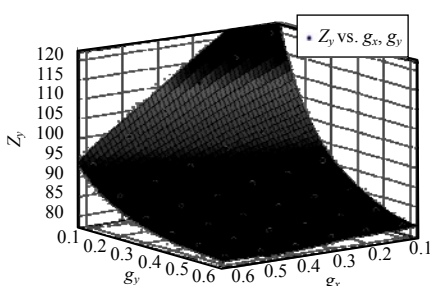


Fig.5 Impedance Z_y versus g_x and g_y . With the gap increases, the impedance will decrease.

图 5 Z_{yy} 与间隙 g_x, g_y 的关系

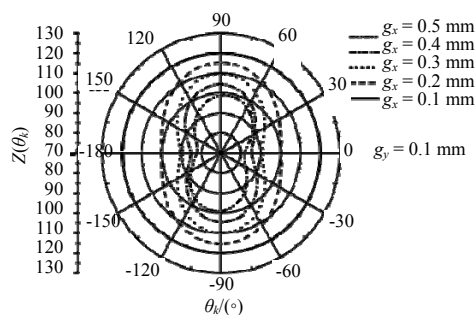


Fig.6 Effective scalar impedance as the surface wave propagation direction with different θ_k

图 6 各个方向的标量阻抗与传播方向的关系

3 张量人工阻抗单元的应用

张量人工阻抗表面具有调控电磁波的幅度和相位的能力, 在全息天线、表面波波导、漏波天线和完美透镜中具有重要应用。利用前文设计的矩形张量人工阻抗单元, 设计了一种圆极化全息天线, 天线由 51×51 个人工阻抗单元构成, 在中心采用探针激励馈电。天线工作在 Ku 波段, 在主波束宽度范围内, 具有良好的轴比特性。图 7 天线在 35 GHz 的方向图 HFSS 仿真结果如图 8 所示, 最大增益达到 21 dB, 且具有较好的圆极化特性。

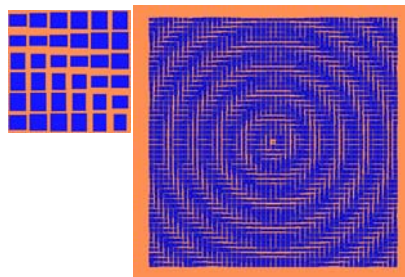


Fig.7 Photograph of antenna with normal radiation

图 7 基于张量人工阻抗单元的圆极化全息天线仿真模型

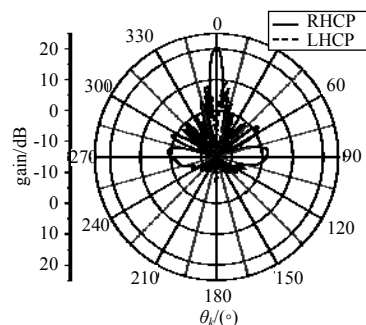


Fig.8 Simulated circularly polarized antenna radiation patterns at $f_0=35$ GHz

图 8 圆极化天线左右旋方向图

4 结论

本文提出了一种利用等效传输线模型分析计算张量人工阻抗表面的方法。利用等效传输线技术计算了矩形张量人工阻抗单元的表面阻抗。这种高各向异性的表面结构在天线、微波透镜、电磁隐身结构中具有较大应用

价值。最后利用矩形张量阻抗单元设计了一种右旋圆极化全息天线, 仿真结果验证了单元计算的准确性, 同时该天线还具有低雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)的应用前景。

参考文献:

- [1] FONG H B, COLBURN S J, OTTUSCH J, et al. Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 56: 1624–1632.
- [2] ZHANG Yuan, OUYANG Jun, ZHANG Kaizhi, et al. Conformal antennas based on holographic artificial impedance surfaces[C]// 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Memphis, TN, USA: IEEE, 2014: 1552–1553.
- [3] SIVASEETHARAMAN P, CONSTANTINE A B. Antenna beam forming using holographic artificial impedance surface[C]// 2014 16th International Symposium Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). Victoria, BC, Canada: IEEE, 2014: 1–2.
- [4] LI Yunbo, CAI Bengeng, CUI Tiejun. Design of multi-beam holographic leaky-wave antenna with one/two-dimension frequency sweep[C]// 2014 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). Palm Beach, Netherlands Antilles: IEEE, 2014: 582–584.
- [5] SHI Hongyu, LI Jianxing, ZHANG Anxue, et al. Gradient metasurface with both polarization controlled directional surface wave coupling and anomalous reflection[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14): 104–107.
- [6] QUARFOTH Ryan, SIEVENPIPER Daniel. Broadband unit-cell design for highly anisotropic impedance surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4143–4152.
- [7] PATEL A M, GRBIC A. Analytical modeling of a printed-circuit tensor impedance surface[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 1–3.
- [8] PATEL A M, GRBIC A. A printed leaky-wave antenna based on a sinusoidally-modulated reactance surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6): 2087–2096.

作者简介:



李 江(1989–), 男, 四川省阆中市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线、微波超材料. email: chnlij@sina.com.

杨 春(1973–), 男, 陕西省宝鸡市人, 博士, 研究员, 研究方向为电磁场与微波技术.

陈 琦(1981–), 男, 重庆市人, 硕士, 副研究员, 主要研究领域为毫米波太赫兹天线、光子晶体与超材料.

何晓阳(1983–), 男, 湖北省嘉鱼县人, 博士, 副研究员, 主要研究领域为共形天线、太赫兹技术.