arXiv:2303.06140v1 [physics.class-ph] 5 Mar 2023

人工磁导体的双各向异性磁化率理论

片段替换

Oscar C´espedes Vicente 和 Christophe Caloz 比利时鲁汶天主教大学（KU Leuven）工程科学学院，3001 鲁汶，比利时

摘要——过去 30 年来，人工磁导体（AMC）在微波领域引起了极大关注。然而，对其描述一直局限于粗略的 RLC 设计或辅助性的传输线网络建模。本文以双各向异性磁化率为基础，提出了一种人工磁导体的电磁理论。

I. 引言

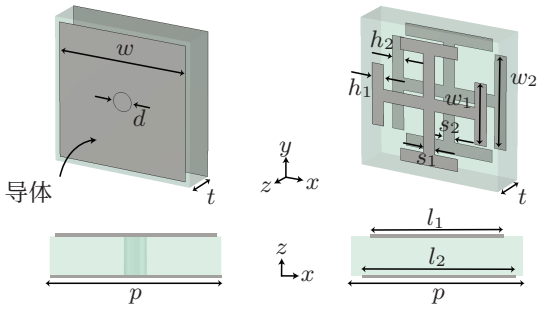
由于磁荷不存在，作为电导体对偶的磁导体并不存在于自然界（原子或分子层面）。然而，人们利用各种形状的谐振“超粒子”实现了人工磁导体（AMC），使其在特定频率下呈现近似理想磁导体（PMC）的响应 [1, 2] ，这些超粒子包括虹膜结构 [3], 蘑菇结构 [4], 贴片 [5], 共面十字结构 [6] 和接地十字结构 [7]。此类人工磁导体因其多种应用而备受关注，例如低剖面天线 [8]，紧凑封装 [9]，比吸收率降低 [10], 等。

遗憾的是，迄今为止，人工磁导体理论大多局限于粗略的 RLC电路建模 [4, 6] 或辅助传输线网络建模 [11, 12], , 而一种更精确、更基础的理论——即真正的电磁理论！——一直严重缺失。

本文借助超表面的最新进展 [13], ，通过用双各向异性表面极化率描述人工磁导体，提出了这样一种理论，并将其应用于蘑菇型人工磁导体和双层十字型人工磁导体。本文为构建更完备的电磁理论铺平了道路；该理论将从偶极响应的角度，对一般人工磁导体结构作出精确解释。

II. 选定的人工磁导体结构

本文提出的理论具有完全普适性，适用于任何人工磁导体结构。不过，为了使理论更加具体，并为第四节中全波演示提供研究案例，我们将图 1 所示的两种特定结构作为代表性示例。第一种结构如图 1(a) 所示，是蘑菇结构（或 Sievenpiper）人工磁导体结构；第二种结构如图 1(b) 所示，是双层十字型人工磁导体结构。



(a) (b)

图 1：本文所研究的典型人工磁导体结构的单元。(a) 蘑菇结构。(b) 双层（非对称）十字形结构。

III. 极化率分析

根据与传统理想电导体的对偶性，我们假设存在一种理想磁导体 [1,2] 人工磁导体，该结构同时具有互易性和非旋磁性。此外，由于篇幅所限，我们仅讨论 s 极化入射、在 zx 平面内散射的情况（场分量为 E_y、 H_z 和 H_x），且入射方向相对于结构法线的角度为 θ 。最后，我们将“超表面”的入射、反射和透射电磁场表达式写出，并施加理想磁导体边界条件，得到 $R = 1$ 和 $T = 0$，其中 R 和 T 分别是结构入射侧的反射系数和透射系数。

将包含所有这些条件的平均场和差分场代入位于结构顶层的广义片层跃迁条件（GSTCs） [13] ，经过一些代数运算后，可得到一般的人工磁导体极化率条件

$$\chi_{\mathrm{ee}}^{yy} = \chi_{\mathrm{mm}}^{zz} \sin^2(\theta), \tag{1a}$$

$$\chi_{\mathrm{me}}^{xy} = \frac{2j}{k}, \tag{1b}$$

$$\chi_{\mathrm{mm}}^{xx} \in \mathbb{R} \quad \text{and} \quad \chi_{\mathrm{em}}^{yx} = -\chi_{\mathrm{me}}^{xy}. \tag{1c}$$

这一条件包含两个难点：1）它是欠定的，因为它源自一个含有两个方程、四个未知数的方程组；2）它仅适用于特定角度，而理想情况下，我们希望获得与角度无关的人工磁导体响应。因此，我们将采用

另一种策略：首先放宽人工磁导体条件，然后推导角度相关的反射系数和透射系数的一般公式，最后利用上述欠定性，在两个不同角度下满足理想磁导体条件。

采用与上文相同的步骤，但令 R 和 T 为任意参数，并求解由此得到的关于这两个参数的两个方程，可得

$$R(\theta) = -2\frac{k\chi_{\mathrm{ee}}^{yy} + 2k\chi_{\mathrm{em}}^{yx}c_\theta}{2k\chi_{\mathrm{ee}}^{yy} + 2k\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}c_\theta^2} \cdots \quad \text{PS片段替换}$$
$$\frac{-k\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}c_\theta^2}{-j\left(k^2\left(\chi_{\mathrm{ee}}^{yy}\chi_{\mathrm{mm}}^{xx} + (\chi_{\mathrm{em}}^{yx})^2\right) - 4\right)c_\theta} \cdots \quad (2a)$$
$$\frac{-k_x\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta}{+jkk_x\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta c_\theta - 2k_x\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta}$$

and

$$T(\theta) = j\frac{4c_\theta + k^2\chi_{\mathrm{ee}}^{yy}\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}c_\theta}{4jc_\theta - jk^2\chi_{\mathrm{ee}}^{yy}\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}c_\theta} \cdots$$
$$\frac{k^2(\chi_{\mathrm{em}}^{yx})^2c_\theta}{-jk^2(\chi_{\mathrm{em}}^{yx})^2c_\theta + 2k\chi_{\mathrm{ee}}^{yy} + 2k\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}c_\theta^2} \cdots \quad (2b)$$
$$\frac{-kk_x\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta c_\theta}{-2k_x\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta + jkk_x\chi_{\mathrm{mm}}^{xx}\chi_{\mathrm{mm}}^{zz}s_\theta c_\theta},$$

其中 $c_\theta = \cos\theta$、$s_\theta = \sin\theta$ 和 $k_x = k\sin\theta$。依次令这两个关系分别对 $\theta = 0$ 和 $\theta = \theta_0$ 均满足 $R = 1$ 和 $T = 0$，其中 θ_0 是 $]0, \pi/2]$ 中的任意角度；求解由此得到的关于四个极化率的（四个）方程组成的方程组，可得

$$\chi_{\mathrm{mm}}^{xx} = 0, \quad (3a)$$
$$\chi_{\mathrm{ee}}^{yy} = 0, \quad (3b)$$
$$\chi_{\mathrm{em}}^{yx} = -\frac{2j}{k} = -\chi_{\mathrm{me}}^{xy}, \quad (3c)$$
$$\chi_{\mathrm{mm}}^{zz} = 0. \quad (3d)$$

按照设计，这些异质各向异性条件应当代表角度无关的理想磁导体响应条件。

IV. 全波演示

图2绘出了图1中两种结构经过优化后的AMC结果。蘑菇结构无法呈现角度无关的响应，这是因为它不满足条件(3d)。相比之下，双十字形结构确实呈现出角度无关的AMC响应，因为它满足式(3)中的四个条件。

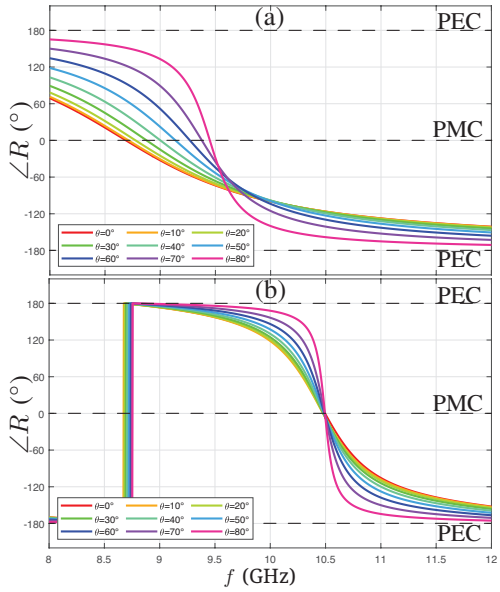


图 2：不同照射角下 R 的相位随频率变化关系。（a）蘑菇结构。（b）十字形结构。

参考文献

[1] J. Kong，《电磁波理论》。Wiley-Interscience 出版物，Wiley，1986年。[2] R. Harrington，《时谐电磁场》。Wiley-IEEE Press，2001年。[3] R. M. Walser、A. P. Valanju、W. Win、M. F. Becker、R. W. Bene 和 A. B. Buckman，“用于自适应微波特征控制的新型智能材料”，载于《智能结构与材料1993：智能材料》，第1916卷，第128–139页，国际光学工程学会，1993年。[4] D. Sievenpiper、L. Zhang、R. F. Broas、N. G. Alexopolous 和 E. Yablonovitch，“具有禁带的高阻抗电磁表面”，《电气电子工程师学会微波理论与技术汇刊》，第47卷，第11期，第2059–2074页，1999年。[5] Y. Zhang、J. Von Hagen、M. Younis、C. Fischer 和 W. Wiesbeck，“平面人工磁导体与贴片天线”，《电气电子工程师学会天线与传播汇刊》，第51卷，第10期，第2704–2712页，2003年。[6] F.-R. Yang、K.-P. Ma、Y. Qian 和 T. Itoh，“单平面紧凑型光子带隙（UC-PBG）结构及其在微波电路中的应用”，《电气电子工程师学会微波理论与技术汇刊》，第47卷，第8期，第1509–1514页，1999年。[7] M. Hosseini 和 M. Hakkak，“基于耶路撒冷十字的人工磁导体特性估算”，《电气电子工程师学会天线与无线传播快报》，第7卷，第58–61页，2008年。[8] A. P. Feresidis、G. Goussetis、S. Wang 和 J. C. Vardaxoglou，“人工磁导体表面及其在低剖面高增益平面天线中的应用”，《电气电子工程师学会天线与传播汇刊》，第53卷，第1期，第209–215页，2005年。[9] A. A. Brazalez、A. U. Zaman 和 P.-S. Kildal，“采用钉状盖板进行理想磁导体封装以改进微带滤波器”，《电气电子工程师学会元器件、封装与制造技术汇刊》，第2卷，第7期，第1075–1084页，2012年。[10] H. R. Raad、A. I. Abbosh、H. M. Al-Rizzo 和 D. G. Rucker，“用于远程医疗应用的柔性紧凑型AMC天线”，《电气电子工程师学会天线与传播汇刊》，第61卷，第2期，第524–531页，2012年。[11] M. Rahman 和 M. Stuchly，“平面微波光子带隙结构的传输线—周期电路表征”，《微波与光学技术快报》，第30卷，第1期，第15–19页，2001年。[12] O. Luukkonen、C. Simovski、G. Granet、G. Goussetis、D. Lioubtchenko、A. V. Raisanen 和 S. A. Tretyakov，“由金属条带或贴片构成的平面栅格与高阻抗表面的简明准确解析模型”，《电气电子工程师学会天线与传播汇刊》，第56卷，第6期，第1624–1632页，2008年。[13] K. Achouri 和 C. Caloz，《电磁超表面：理论与应用》。约翰·威立父子公司，2021年。