

基于正折射率材料参数的旋转放大光学变换器件

梅金硕^{1,2}, 舒 昌³, 贺讯军¹, 张 狂², 吴 群²

- (1. 哈尔滨理工大学 电子科学与技术系, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨学院 工学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要: 基于光学变换理论, 提出了一种新型的具有旋转和放大功能的光学变换器件, 该器件可由具有正折射率参数的超常媒质实现。推导了所提出的器件材料的本构参数张量的通解表达式, 并采用全波电磁仿真软件进行了仿真验证。仿真结果证实了所导出的本构参数张量的正确性, 即该器件可以起到使置于内部的物体旋转和放大的效果。因此, 所提出的器件将在电磁场工程等领域有潜在的应用。

关键词: 光学变换; 超常媒质; 光学器件

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0493-04

Rotatable and amplifying optical transformation device with parameters of positive refraction index

Mei Jinshuo^{1,2}, Shu Chang¹, He Xunjun¹, Zhang Kuang², Wu Qun²

- (1. Department of Electronic Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Technical School, Harbin University, Harbin 150086, China)

Abstract: Based on theory of optical transformation, a novel rotatable and amplifying optical transformation device was proposed, and this device could be realized with metamaterials with parameters of positive refraction index. The constitutive tensors of the proposed device were derived, and then some full wave simulations of the devices based on the above constitutive tensor were performed to confirm the functionality of the proposed device. The simulations results verified that the proposed device can make the inside object rotate and enlarge. Therefore, it is expected that the proposed device will have potential applications in the electromagnetic engineering.

Key words: optical transformation; metamaterials; optical devices

收稿日期: 2013-06-12; 修订日期: 2013-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(60971064); 国家教育部博士点资助项目(20092302110030);
黑龙江省教育厅科研项目(12521094)

作者简介: 梅金硕(1981-), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事电磁场与电磁波等相关研究工作。Email: meijinshuo@126.com

0 引言

基于光学变换理论, Pendry 等于 2006 年提出了一种可以在内部完美隐藏任意形状物体的理想隐身罩^[1]。相比于传统的隐身技术(如外形隐身、吸波材料隐身等)^[2-4], 该隐身罩能够使电磁波绕过被隐身物体, 从而达到隐身效果。同年, Cummer 等采用全波电磁仿真方法对柱坐标系下具有简化电磁参数的隐身罩的性能进行了仿真验证^[5]。Schurig 等采用超常媒质在微波频段实现了电磁隐身罩^[6]。此后, 基于光学变换理论的隐身技术引起了科学界的极大兴趣, 许多学者展开了各种形状及简化参数的隐身罩性能的研究^[7-13]。光学变换理论不仅可以用来实现上述各种隐身罩, 在设计其他新型的光学变换器件方面也获得了巨大进步。例如, 根据光学变换理论, 人们分别提出了场旋转器^[14]、能量集中器^[15]、补偿媒质隐身罩^[16-17]、波导弯头^[18-19]等一些新型光学变换器件。

近年来, Zang 等提出了一种新型光学变换器件^[20]。与以前提出的旋转器件相比, 该器件不仅具有旋转功能, 还具有放大功能。然而, 该器件需要由具有负折射率的各向异性的超常媒质来实现。文中基于光学变换理论提出了一种新型的具有旋转和放大功能的光学变换器件。不同于之前提出的旋转放大器, 该器件可由正折射率的各向异性的超常媒质实现。随着超常媒质技术的迅速发展, 所提出的旋转放大器可在不久的将来实现。

1 旋转放大器本构参数的推导

为简单起见, 考虑二维柱坐标系下的旋转放大器。图 1 为该器件的空间变换示意图。区域 I 和区域 II 被压缩到区域 I 中, 而区域 III 被扩展至区域 III 和区域 II。区域 I 是具有放大功能的区域, 区域 V

$$\bar{\varepsilon}' = \bar{\mu}' = \begin{pmatrix} \frac{(r+(b-a)c/(c-b))}{r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{(r+(b-a)c/(c-b))} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(c-b)^2}{(c-a)^2} \frac{(r+(b-a)c/(c-b))}{r} \end{pmatrix} \quad (6)$$

是具有旋转功能的区域(旋转角度为 θ_0)。由原始空间到物理空间的转换, 其空间变换的表达式如下。

区域 I:

$$\begin{cases} r' = r b / a \\ \theta' = \theta \quad (0 \leq r \leq a) \\ z' = z \end{cases} \quad (1)$$

区域 II 和 III:

$$\begin{cases} r' = (c-b)r/(c-a) + c(b-a)/(c-a) \\ \theta' = \theta \quad (a \leq r \leq c) \\ z' = z \end{cases} \quad (2)$$

区域 V:

$$\begin{cases} r' = r \\ \theta' = \theta + \theta_0 \frac{d-r}{d-c} \quad (c \leq r \leq d) \\ z' = z \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)表明内部区域($r < c$)被旋转了角度 θ_0 。由于区域 II 和 I 被压缩到区域 I, 当一个小物体(ε_0, μ_0)被放置在区域 I 的中心时, 这个小物体的散射场就等同于一个被旋转了角度 θ_0 的放大物体(放大比 $r'/r = b/a$)的散射场。

根据光学变换理论^[1], 文中所提出的旋转放大器的介电常数和磁导率张量的表达式如下:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}' = \Lambda \bar{\varepsilon} \Lambda^T / \det(\Lambda) \\ \bar{\mu}' = \Lambda \bar{\mu} \Lambda^T / \det(\Lambda) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(\bar{\varepsilon}, \bar{\mu})$ 和 $(\bar{\varepsilon}', \bar{\mu}')$ 分别为实际空间和物理空间的介电常数和磁导率; Λ 为雅克比转换矩阵。

将公式(1)~(3)分别代入公式(4), 可以得到所提出的器件的相对介电常数和磁导率的张量表达式。

区域 I:

$$\bar{\varepsilon}' = \bar{\mu}' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (b/a)^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

区域 II 和 III:

区域 V:

$$\bar{\epsilon}' = \bar{\mu}' = \begin{pmatrix} 1+2p\cos\theta\sin\theta+p^2\sin^2\theta & p^2\cos\theta\sin\theta+p(\cos^2\theta-\sin^2\theta) & 0 \\ p^2\cos\theta\sin\theta+p(\cos^2\theta-\sin^2\theta) & 1-2p\cos\theta\sin\theta+p^2\sin^2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $p = \theta_0(r/(d-c))$ 。

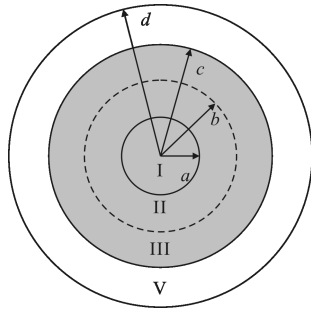


图 1 空间变换示意图

Fig.1 Schematic diagram of space transformation

由公式(5)~(7)可以看出,所提出的旋转放大器可由具有正折射率的超常媒质来实现。随着超常媒质的快速发展,该器件有望在不久的将来实现。

2 数值算例及讨论

为了进一步验证上述设计,利用全波电磁仿真软件仿真 TE 波照射下的器件的旋转和放大性能。仿真频率为 1 GHz,器件的几何尺寸分别为 $a=0.1\text{m}$ 、 $b=0.2\text{m}$ 、 $c=0.3\text{m}$ 和 $d=0.5\text{m}$ 。整个仿真计算区域的四周为完美匹配层来模拟吸收边界条件,器件的内外边界设置为连续边界条件。

图 2 给出了具有不同旋转角度的旋转放大器的电场分布图,其中图 2(a)和 2(b)分别对应的是旋转角度 $\theta_0=45^\circ$ 和 $\theta_0=90^\circ$ 的情况。从图中可以看出,入射平面波在区域 I 分别旋转了 45° 和 90° 。

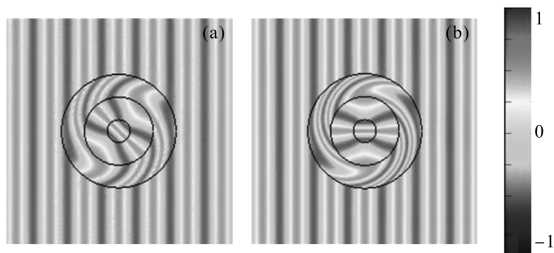
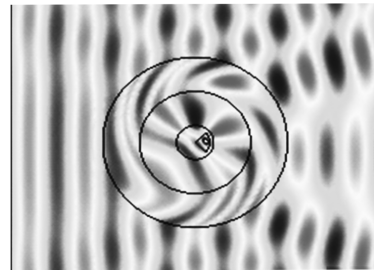
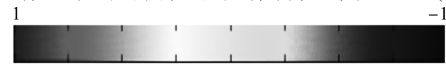


图 2 旋转放大器附近电场分布

Fig.2 Electric-field distribution in vicinity of device

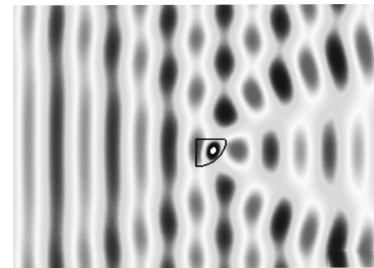
将一个 $1/4$ 圆形的小物体 ($\epsilon_0 = \mu_0 = 4, r = 0.08\text{m}$) 该小物体的散射场分布如图 3(a)所示。根据光学变换理论,置于区域 I 的小物体被等效放大成一个材料参数分别为 $\epsilon'_0 = \epsilon_0/\epsilon' = 1$ 和 $\mu'_0 = \mu_0/\mu' = 4$ 的 $1/4$

圆形的大物体 ($r' = rb/a = 0.16\text{m}$)。图 3(b)给出了上述大物体 ($r' = 0.16\text{m}, \epsilon'_0 = 1, \mu'_0 = 4$) 的散射场分布图。对比图 3(a)和 3(b)可以看出,大物体和小物体在器件外部的电场分布完全相同,这说明小物体被等效成一个被旋转了 45° 并被放大的大物体。图 3(c)给出了旋转放大器旋转角度 $\theta_0 = 90^\circ$ 的情况。将上述小物体 ($r = 0.08\text{m}, \epsilon = \mu = 4$) 放置在旋转放大器区域 I 中, TE 波照射下该小物体的散射场分布如图 3(c)所示。



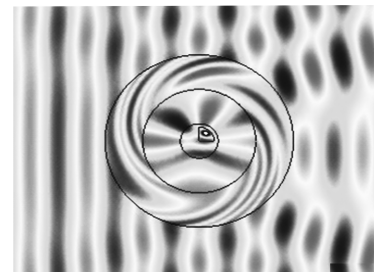
(a) 小物体置于旋转放大器内

(a) Small object covered with the proposed device



(b) 大物体置于真空中

(b) Big object in the free space



(c) 小物体置于旋转放大器内

(c) Small object covered with the proposed device

图 3 电场分布图

Fig.3 Electric-field distribution

对比图 3(c)和 3(b),再次验证了所提出的旋转放大器具有旋转和放大功能。

为了进一步验证所提出的器件的性能,图 4 给出了图 3(a)情形中小物体及图 3(b)中情形中大物体的远场分布图。可以看出,两者的远场分布完全相同,即置于旋转放大器中的小物体被等效成一个被旋转和放大的物体。

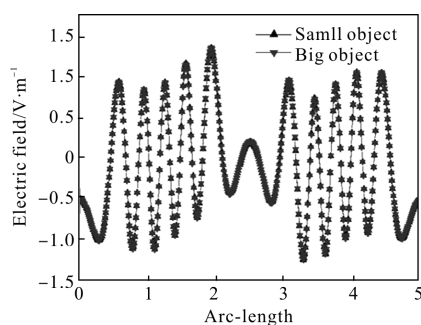


图 4 置于旋转放大器中的小物体(图 3(a))
及置于真空中的大物体(图 3(b))远场图

Fig.4 Far-field patterns of small object covered with the device
(as shown in Fig.3(a)) and big object (as shown in Fig.3(b))

3 结 论

基于光学变换理论提出了一种具有旋转和放大功能的新型光学变换器件。推导了该器件的本构材料张量的表达式,并采用全波电磁仿真软件仿真验证了推导得出的本构参数张量的正确性。仿真结果表明,该器件具有旋转和放大功能。即可以使置于内部的小物体等效成一个被旋转和放大的物体。该器件可由具有正折射率的超常媒质实现,因此所提出的器件将在电磁场工程等领域有潜在的应用。

参考文献:

- [1] Pendry J B, Schuring D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [2] Wu Shiwei, Wang Zhihui, Hu Chuanxin. Infrared intelligent gradient stealthy coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 999-1002. (in Chinese)
- [3] Fan Youyu, Yang Yi, Jiang Xiongwei, et al. New mid-infrared material and its radar stealth function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 12-16. (in Chinese)
- [4] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Design of double infrared stealth coating based on photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2578-2582. (in Chinese)
- [5] Cummer S A, Popa B I, Schuring D, et al. Full-wave simulation of electromagnetic cloaking structures [J]. *Phys Rev E*, 2006, 74: 036621-036625.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Yan Wei, Yan Min, Qiu Min. Non-magnetic simplified cylindrical cloak with suppressed zeroth order scattering [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(2): 021909-3.
- [8] Ma Hua, Qu Shaobo, Xu Zhu, et al. Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks [J]. *Phys Rev A*, 2008, 77(1): 013825-013828.
- [9] Hu Jin, Zhou Xiaoming, Hu Gengkai. Nonsingular two dimensional cloak of arbitrary shape [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(1): 011107-3.
- [10] Li Chao, Li Fang. Two dimensional electromagnetic cloaks with arbitrary geometries [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13414-13420.
- [11] Xu Xiaofei, Feng Yiyun, Xiong Shuai, et al. Broad band invisibility cloak made of normal dielectric multilayer [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(15): 154104-3.
- [12] Chen Xianzhong, Luo Yu, Zhang Jingjing, et al. Macroscopic invisibility cloaking of visible light [J]. *Nat Commun*, 2011 (2): 176.
- [13] Zhang B, Luo Y, Liu X G, et al. Macroscopic invisibility cloak for visible light [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 033901.
- [14] Chen Huangyang, Chan C T. Transformation media that rotate electromagnetic fields [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90 (24): 241105-3.
- [15] Zhang Kuang, Wu Qun, Fu Jiahui, et al. Cylindrical electromagnetic concentrator with only axial constitutive parameter spatially variant [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28 (6): 1573-1577.
- [16] Lai Yun, Chen Huanyang, Zhang Zhaoqing, et al. Complementary media invisibility cloak that cloaks objects at a distance outside the cloaking shell [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(9): 093901.
- [17] Yang Chengfu, Yang Jingjing, Huang Ming, et al. An external cloak with arbitrary cross section based on complementary medium and coordinate transformation [J]. *Opt Express*, 2011, 19(2): 1147-1157.
- [18] Han Tiancheng, Qiu Chengwei, Tang Xiaohong. Adaptive waveguide bends with homogeneous nonmagnetic and isotropic materials [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(2): 181-183.
- [19] Mei Jinshuo, Wu Qun, Zhang Kuang. Design of electromagnetic refractor and waveguide bends using complementary medium [J]. *Physica B*, 2013, 426: 150-154.
- [20] Zang Xiaofei, Jiang Chun. A rotatable and amplifying optical transformation device [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(5): 1082-1087.