

一种新的超材料放大装置简化参数设计方法

梁岩 李廷华 黄铭 杨晶晶 袁刚

云南大学信息学院无线创新实验室, 云南 昆明 650091

摘要 超材料放大装置能够将物体任意放大, 其在小目标识别和检测中有广泛的潜在应用。为了促进该装置的实际应用, 基于变换光学原理提出了一种新的简化材料参数设计方法。该方法通过选择适当的变换方程, 使得材料参数的径向和角向分量为常数而仅轴向分量随半径变化, 同时还能确保装置的外边界与自由空间阻抗完全匹配。全波仿真结果验证了该方法的有效性和放大装置的良好性能。此外, 分析了材料损耗和参数抖动对装置性能的影响, 扩展了变换光学理论的应用, 为超材料器件的参数简化提供了一种新的、可行的解决方案。

关键词 变换光学; 超材料; 放大装置; 简化参数设计; 全波仿真

中图分类号 O41 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101601

A New Simplified Parameter Designing Method for Metamaterial Amplifying Device

Liang Yan Li Tinghua Huang Ming Yang Jingjing Yuan Gang

Wireless Innovation Laboratory, School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China

Abstract Metamaterial amplifying device can make an object enlarged as one desire, and its potential application to small object identification and detection is foreseeable. To facilitate the practical application of such a device, a new simplified parameter designing method is proposed through choosing appropriate transformation equation based on the theory of transformation optics. The virtues of such a method are that not only the radial and azimuthal parameters are constants and only axial parameter varies with radius, but also, there exist no undesired reflections due to perfect impedance matching to free space at outer boundary. Full-wave simulations confirm the effectiveness of the proposed method and the good performance of the designed amplifying device. Moreover, the effects of material loss and parameter deviation on the performance of the device are also investigated. This work expands the application of transformation optics, and also provides a new and feasible solution to simplify the parameters of metamaterial devices.

Key words transformation optics; metamaterials; amplifying device; simplified parameter designing; full-wave simulation

OCIS codes 160.3918; 050.1755; 260.2110; 000.6800

1 引言

近年来, 利用坐标变换方法任意控制电磁波成为科学界研究的热点。2006年, Pendry等^[1-2]基于麦克斯韦方程组在坐标变换前后的形式不变性建立了变换光学理论。这一理论框架在装置性能和材料特性之间搭建了一座桥梁, 为超材料电磁器件的灵活设计开辟了一个全新的途径。许多具有特殊功能的电磁器件如雨后春笋般纷纷涌现, 如电磁斗篷^[3-4]、聚焦器^[5]、透明体^[6]、波导连接器^[7]、超散射^[8]和超吸收^[9]等。此外, 基于

收稿日期: 2014-03-23; 收到修改稿日期: 2014-05-04; 网络出版日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(61161007, 61261002)、云南省自然科学基金重点项目(2013FA006)、中国博士后科学基金(2013M531989)、云南大学优秀博士学位论文培育基金、第六届云南大学研究生科研创新项目

作者简介: 梁岩(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算电磁学及超材料应用等方面的研究。

E-mail: ly709795204@163.com

导师简介: 黄铭(1963—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事无线通信、电磁计算、超材料及微波技术应用等方面的研究。

E-mail: huangming@ynu.edu.cn (通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

物理学其他方程的形式不变性,许多学者逐渐将变换光学思想应用于声学^[10]、物质波^[11]、等离子体^[12]、弹性力学^[13]、热力学^[14]等领域,从而掀起了超材料器件研究的热潮,这也是物理学发展史上又一里程碑式的发现。

伴随着各种超材料电磁器件的相继出现,一种能使视觉上感知与现实存在的真实物体不同的“光学幻影技术”引起了业界的广泛关注,它在许多领域发挥着重要的作用,如为了躲避雷达或其他监测系统侦测的伪装技术。基于变换光学原理,国内外学者先后设计了多种不同的幻影装置^[15-19]。2009年,Lai等^[15]提出了一种有趣的幻影装置,它能使一个任意形状和材料参数的物体在视觉上等效为另一物体。然而,该装置的材料参数不仅各向异性非均匀而且参数为负值,制备相当困难。为了消除负的材料特性,一些更为可行的策略被提出来,如Jiang等^[18]设计了一种可以使任意物体按照人们意愿进行变换的超材料缩小装置。最近,Wang等^[19]设计了一种与超材料缩小装置功能相反的放大装置,这种装置在小目标识别和检测中有潜在应用。需要指出的是:尽管放大装置的材料参数是正值,但它们都是半径的函数。另外,虽然文中给出了简化参数的设计方法,但其会使装置的外边界与自由空间阻抗不匹配,从而引入不必要的散射。

为了克服这些不足,以便更容易制备超材料放大装置,本文提出了一种基于变换光学的新的简化材料参数设计方法。与之前的方法相比,该方法通过选择适当的变换方程,使得材料参数的径向和角向分量为常数而仅轴向分量是半径的函数,同时这种方法还能确保装置的外边界阻抗与自由空间完全匹配。因此,该方法既能在一定程度上方便放大装置的制备又能很好地消除不必要的散射。全波仿真证实了方法的有效性和装置的良好性能。此外,还详细分析了材料损耗和材料参数偏差对装置性能的影响。

2 理论与仿真模型

图1给出了二维超材料放大装置的坐标变换示意图,其中图(a)和(b)分别表示变换空间和虚拟空间,且两个空间具有相同的外边界。为了实现电磁放大,需要将虚拟空间 $0 \leq r \leq c$ 的区域沿径向压缩到变换空间 $0 \leq r \leq a$ 的区域,而将虚拟空间中的 $c \leq r \leq b$ 区域沿径向扩展为变换空间中 $a \leq r \leq b$ 的区域。通过上述变换,变换空间中超材料放大装置内的小尺寸物体将与虚拟空间中电介圆内一个大尺寸物体光学等效。因此,对于装置外部的电磁探测器来说,其探测到两种情况的电场分布是完全一样的。接下来,将详细介绍提出的简化参数设计方法。

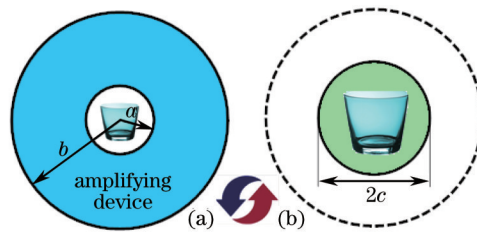


图1 二维超材料放大装置坐标变换示意图。(a) 变换空间; (b) 虚拟空间

Fig.1 Schematic diagram of the 2D metamaterial amplifying device. (a) Transformed space; (b) virtual space
在圆柱坐标系中,坐标变换方程通常表示为:

$$r' = r'(r), \quad \varphi' = \varphi, \quad z' = z, \quad (1)$$

基于麦克斯韦方程在坐标变换前后的形式不变性,相应坐标系下变换空间中相对介电常数 ε 和磁导率 μ 表示为^[20]:

$$\varepsilon_r(r) = \mu_r(r) = \frac{r' dr'}{r dr}, \quad \varepsilon_\varphi(r) = \mu_\varphi(r) = \frac{r dr'}{r' dr}, \quad \varepsilon_z(r) = \mu_z(r) = \frac{r' dr'}{r dr}, \quad (2)$$

式中 $r'(r)$ 表示变换空间与虚拟空间之间的变换方程。为简单起见,但又不失一般性,仅考虑了二维情况下横磁波(TE波)入射时的情况。对于纵磁波(TM波)入射时的情况下,推导过程是类似的,在此不再赘述。值得一提的是对于TE波入射的情况,(2)式中仅 $\mu_r(r)$ 、 $\mu_\varphi(r)$ 和 $\varepsilon_z(r)$ 三个材料参数分量是相关的,且从(2)式不难发现 $\mu_r(r)$ 与 $\mu_\varphi(r)$ 互为倒数,假设 $\mu_\varphi(r)$ 等于常数 m_0 ,即

$$\mu_r(r) = \frac{r dr'}{r' dr} = m_0, \quad (3)$$

通过求解上述差分方程,可得

$$r'(r) = m_1 r^{m_0}, \quad (4)$$

式中 m_0 和 m_1 是未知常数。借助边界条件 $r'(a) = c$ 和 $r'(b) = b$, 即可求出常数 m_0 和 m_1 的值, 则超材料放大装置的材料参数的一般形式可表示为:

$$\frac{1}{\mu_r(r)} = \mu_\varphi(r) = m_0, \quad \varepsilon_z(r) = m_0 \left(\frac{r}{b} \right)^{2(m_0-1)}, \quad (5)$$

式中 $m_0 = \log_{b/a}(b/c)$ 。显然, 材料参数的径向和角向分量为常数, 仅轴向分量随着空间变动, 在一定程度上将大大简化该装置的实际制备过程。另外, 从(5)式可知, 此时外边界的阻抗 $Z|_{r=b} = \sqrt{\mu_\varphi(b)/\varepsilon_z(b)} = 1$, 其与自由空间的阻抗是匹配的, 故不会引入不必要的散射。

对于大尺寸等效虚拟物, 其尺寸是超材料放大装置内小尺寸物体的 c/a 倍, 且其材料参数与小尺寸物体的材料参数关系表示为:

$$\mu_{rv} = \mu_{\varphi v} = \mu_{in}, \quad \varepsilon_{zv} = \left(\frac{a}{c} \right)^2 \varepsilon_{in}, \quad (6)$$

式中 ε_{in} 和 μ_{in} 分别为小尺寸物体的介电常数和磁导率。为验证方法的有效性, 分析超材料放大装置的性能, 在下一部分中采用商业软件 COMSOL 进行全波仿真。

3 仿真结果与讨论

仿真时, 整个计算区域被完全匹配层(PML)包围去吸收向外散射的电磁波, 其中上下 PML 层设置为 y 方向吸收, 左右 PML 层设置为 x 方向吸收, 四个小方形区域设置为 x 和 y 方向都吸收。另外, PML 层的内外边界默认为连续边界和完美导体边界。二维超材料放大装置的内外边界设置为连续边界, 几何参数选择为 $a = 0.1 \text{ m}$, $b = 0.3 \text{ m}$ 和 $c = 0.2 \text{ m}$ 。将几何参数代入(5)式, 可导出该装置的材料参数分布随半径 r 的变化趋势, 如图 2 所示。从图中可以看出, 超材料放大装置材料参数的径向分量 μ_r 和角向分量 μ_φ 均为常量, 只有轴向分量 ε_z 是半径 r 的函数。另外, 注意到所有材料参数分量都是有限的正值。对于这样的参数需求, 可用超材料传输线网络来等效实现^[21]。很明显, 提出的方法与现有方法相比大大简化了放大装置材料参数的分布, 因此在某种程度上提高了设备的可实现性。接下来, 将从以下几个方面对超材料放大装置的性能进行分析。

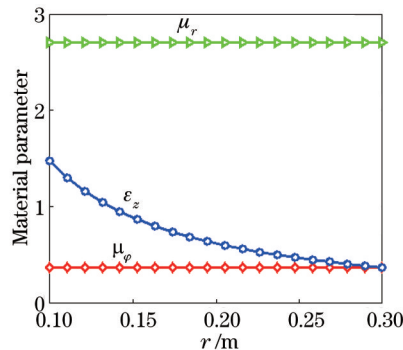


图 2 材料参数随半径 r 的变化

Fig.2 Material parameter of 2D amplifying device as a function of radius r

首先, 为了验证提出方法的有效性并直观地说明超材料放大装置的性能, 将一个小尺寸的有微弱材料损耗的电介质方块放置于超材料放大装置内。小方块的边长 $\alpha = 0.1 \text{ m}$, 介电常数 $\varepsilon' = 2.65 + j0.001 \text{ F/m}$, 磁导率 $\mu' = 1 \text{ H/m}$, 假设它的周围为自由空间。频率为 3 GHz , 幅值为 1 的 TE 极化平面波从左侧入射。图 3(a) 和 (b) 分别表示在没有和有放大装置的情况下, 小尺寸电介质方块附近的电场分布。显而易见, 两种情况的电场分布完全不一样, 这表明电介方块附近的电场分布被放大装置改变了。为了进行比较, 仿真了介电常数为 $\varepsilon'_{in} = (2.65 + j0.001)/4$ 的大尺寸虚拟物放置于介电常数为 $\varepsilon'_{in} = 1/4$ 的电介圆内时其附近的电场分布, 结果如图 3(c) 所示。很明显, 在放大装置的外部, 图 3(b) 和 3(c) 的电场分布是一致的。因此, 该放大装置能使一个小尺寸电介方块的电场分布与预先设定好材料参数的大尺寸电介质方块的电场分布一样。为进一步说明此问题, 图 3(b) 和 3(c) 对应的归一化远场强度分布如图 4 所示。从图中可以看出, 两种情况对应的归一

化远场强分布完全重叠在一起。上述结果表明:小尺寸物体放置于放大装置内时其附近的电场分布与大尺寸虚拟物放置于电介圆内时其附近的电场分布是完全一样的。

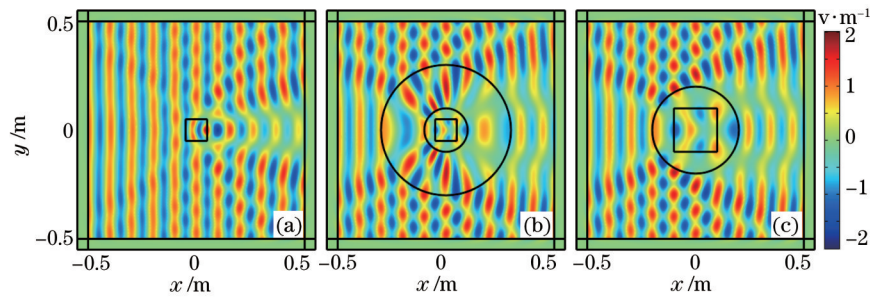


图3 电场分布图。(a) 介电常数 $\varepsilon' = 2.65 + j0.001$ 的小尺寸物体附近的;(b) 小尺寸物体放置于放大装置内时其附近的;(c) 大尺寸虚拟物放置于电介圆内时其附近的

Fig.3 Electric field (E_z) distributions in the vicinity of (a) a small-sized object with permittivity $\varepsilon' = 2.65 + j0.001$; (b) the small-sized object surrounded by the amplifying device; (c) the large-sized virtual object located inside a dielectric circle

其次,考虑到实际应用中超材料往往存在着损耗,因此研究材料损耗对放大装置性能的影响十分有必要。图5给出了材料损耗正切 $\tan \delta$ 变化时图3(b)对应的归一化远场强度分布。从图中可以看出,损耗正切 $\tan \delta$ 为 0.005 和 0.01 的归一化远场强度分布与无损耗时的归一化远场强度分布几乎是完全重叠的。然而,当超材料的损耗正切 $\tan \delta$ 为 0.03 时,由于能量损耗,其对应的归一化远场强度分布受到了明显的影响。因此,从上述仿真结果可以得出这样的结论:在实际应用中,超材料损耗正切 $\tan \delta < 0.03$ 是可以接受的。

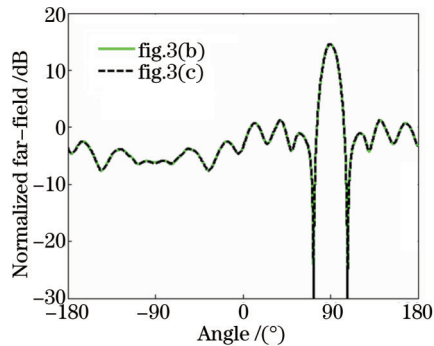


图4 图3(b)和3(c)对应的归一化远场强度分布
Fig.4 Normalized far-field distributions of Figs.3(b) and 3(c)

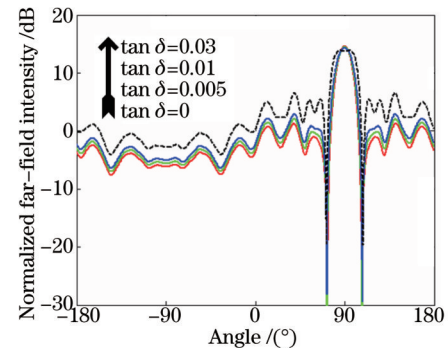


图5 损耗正切 $\tan \delta$ 变化时图3(b)对应的归一化远场强度分布
Fig.5 Normalized far-field distributions of Fig.3 (b) with different loss tangents $\tan \delta$

最后,对超材料参数抖动对放大装置性能的影响进行了详细讨论。通过对横向参数 (μ_r, μ_e) 乘以系数 δ_1 , 轴向参数 ε_z 乘以系数 δ_2 来引入材料参数在横向和轴向的轻微抖动。基于以下三种情况开展参数抖动对放大装置性能影响的研究:1) 横向参数保持不变;2) 阻抗 $\sqrt{\mu_e/\varepsilon_z}$ 和 $\sqrt{\mu_r/\varepsilon_z}$ 保持不变;3) 折射率 $\sqrt{\mu_e\varepsilon_z}$ 和 $\sqrt{\mu_r\varepsilon_z}$ 保持不变。当对轴向参数引入轻微抖动 δ_2 时,上述三种情况对应横向参数的抖动 δ_1 可很容易求出。仿真时,假设 $\delta_2 = 1.1$, 即轴向参数有正抖动,则情况1)、2)、3)对应横向参数的抖动 δ_1 分别为 1、1.1 和 1/1.1, 相应的电场分布如图6(b)~(d)所示。为了便于比较,图6(a)给出了参数无抖动时放大装置附近的电场分布。由图可知,不论横向参数有无抖动,超材料放大装置的性能都会受到轴向参数抖动的影响。对于情况1),引入参数抖动后,折射率变为 $1.05\sqrt{\mu_e\varepsilon_z}$ 和 $1.05\sqrt{\mu_r\varepsilon_z}$;对于情况2),折射率变为 $1.1\sqrt{\mu_e\varepsilon_z}$ 和 $1.1\sqrt{\mu_r\varepsilon_z}$;对于情况3),折射率保持为 $\sqrt{\mu_e\varepsilon_z}$ 和 $\sqrt{\mu_r\varepsilon_z}$ 。显然,与超材料参数无抖动的情况相比,情况2)的折射率偏差最大,其次是情况1),而情况3)的折射率没有偏差,因此阻抗保持不变的情况对超材料放大装置性能的影响最大,而折射率保持不变的情况对装置性能的影响最小。另外,对于轴向参数有负抖动的情况,其相应仿真结果也是类似的,为简洁起见,不再给出。从上述分析可以得出如下结论:在实际应用中,若超材料参数抖动不可避免,最好保持折射率不变,这样既能尽量减少散射又能保证放大装置的性能。

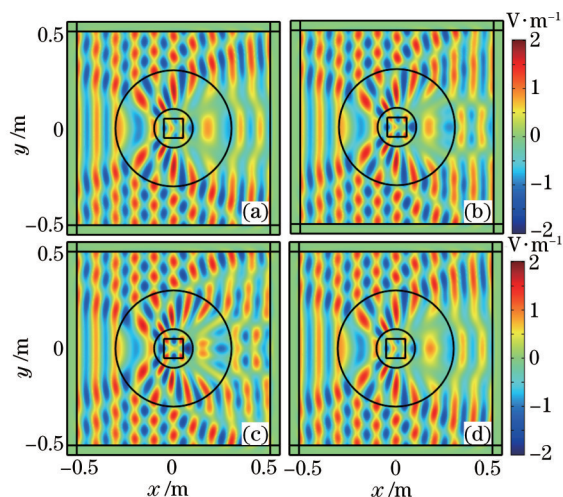


图6 材料参数(a)无抖动($\delta_2 = 1.1$)和(b)、(c)、(d)有抖动($\delta_2 = 1.1$)下小物体放置于放大装置内时其附近的电场(E_z)分布。

(a) 横向参数保持不变($\delta_1 = 1$)的情况; (c) 阻抗保持不变($\delta_1 = 1.1$)的情况; (d) 折射率保持不变($\delta_1 = 1/1.1$)的情况

Fig.6 Electric field (E_z) distributions in the vicinity of the small-sized object surrounded by the amplifying device (a)

without perturbation ($\delta_2 = 1$) and (b), (c), (d) with positive perturbation ($\delta_2 = 1.1$). (b) transverse parameters are

invariant ($\delta_1 = 1$); (c) impedances are invariant ($\delta_1 = 1.1$); (d) refractive index is invariant ($\delta_1 = 1/1.1$)

4 结 论

根据变换光学的思想,通过选择适当的变换方程提出了一种仅轴向分量随半径变化的简化参数设计方法。以超材料放大装置为例,导出了相应材料参数的表达式,并通过全波仿真验证了该方法的有效性和装置的良好性能。该方法简化了材料参数的同时还确保了装置的外边界与自由空间阻抗匹配,从而很好地减少了装置自身引入的散射。此外,数值仿真结果表明:材料损耗正切 $\tan \delta < 0.03$ 时对放大装置的性能几乎没有影响;当折射率保持不变时放大装置对材料参数的抖动具有较好的稳健性。相信这项工作将会对放大装置的实际制备产生积极的影响,并对其他超材料器件的设计有很好的借鉴作用。

参 考 文 献

- 1 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- 2 Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. Science, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- 3 Alitalo P, Tretyakov S. Electromagnetic cloaking with metamaterials[J]. Materials Today, 2009, 12(3): 22-29.
- 4 Novitsky A, Qiu C W, Zouhdi S. Transformation-based spherical cloaks designed by an implicit transformation-independent method: theory and optimization[J]. New J Phys, 2009, 11(11): 113001.
- 5 Yang J J, Huang M, Yang C F, *et al.* Metamaterial electromagnetic concentrators with arbitrary geometries[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 19656-19661.
- 6 Li T H, Huang M, Yang J J, *et al.* Diamond-shaped electromagnetic transparent devices with homogeneous material parameters[J]. Journal of Physics D: Appl Phys, 2011, 44(32): 325102.
- 7 Zhang K, Wu Q, Meng F Y, *et al.* Arbitrary waveguide connector based on embedded optical transformation[J]. Opt Express, 2010, 18(16): 17273-17279.
- 8 Yang T, Chen H, Luo X, *et al.* Superscatterer: enhancement of scattering with complementary media[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 18545-18550.
- 9 Ng J, Chen H, Chan C T. Metamaterial frequency-selective superabsorber[J]. Opt Lett, 2009, 34(5): 644-646.
- 10 Chen H, Chan C T. Acoustic cloaking and transformation acoustics[J]. J Phys D: Appl Phys, 2010, 43(11): 113001.
- 11 Zhang S, Genov D A, Sun C, *et al.* Cloaking of matter waves[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(12): 123002.
- 12 Yu Z Z, Feng Y J, Wang Z B, *et al.* Manipulating surface plasmon waves by transformation optics: design examples of a beam squeezer, bend, and omnidirectional absorber[J]. Chin Phys B, 2013, 22(3): 034102.
- 13 Brun M, Guenneau S, Movchan A B. Achieving control of in-plane elastic waves[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(6): 061903.
- 14 Li Tinghua, Mao Fuchun, Huang Ming, *et al.* Research and design of thermal concentrator with arbitrary shape based

- on transformation thermodynamics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 054401.
- 李廷华, 毛福春, 黄 铭, 等. 基于变换热力学的任意形状热集中器研究与设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 054401.
- 15 Lai Y, Ng J, Chen H Y, *et al.*. Illusion optics: the optical transformation of an object into another object[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(25): 253902.
- 16 Chen Z H, Wang L, Wang C, *et al.*. General complementary media: Electromagnetically transforming a small rectangle object to a large convex/concave pentagon object[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(2): 021601.
- 17 Li T H, Huang M, Yang J J, *et al.*. Design of an optical device with three functions based on coordinate transformation [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(9): 091602.
- 18 Jiang W X, Cui T J, Yang X M, *et al.*. Shrinking an arbitrary object as one desires using metamaterials[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(20): 204101.
- 19 Wang S Y, Liu S B. Amplifying device created with isotropic dielectric layer[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(2): 024104.
- 20 Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, *et al.*. Nonmagnetic cloak with minimized scattering[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(11): 111105.
- 21 Li C, Liu X, Li F. Experimental observation of invisibility to a broadband electromagnetic pulse by a cloak using transformation media based on inductor-capacitor networks[J]. *Phys Rev B*, 2010, 81(11): 115133.