

电磁波集中器散射放大功能的应用与分析

庞旭东 朱守正*

(华东师范大学信息科学与技术学院 上海 200241)

摘要: 变换电磁学是近几年来电磁领域的研究热点。利用坐标变换方法,能够在一定程度上人为调控电磁波的传播路径,结合超材料技术,可以设计出多种具有奇特功能的新颖电磁器件。该文对一系列折线型坐标变换器件做了归纳总结,主要讨论了其中的电磁波集中器;在此基础上从内置隐身飞机模型的散射截面角度进一步研究了电磁波集中器的散射放大功能及其在军事上的应用;最后对该器件参数极值及其归一化分布范围进行了详细的分析。

关键词: 变换电磁学; 超材料; 集中器; 散射放大

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0468-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00791

The Application and Analysis of Scattering Magnifying Function of Electromagnetic Wave Concentrator

Pang Xu-dong Zhu Shou-zheng

(School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Transformation electromagnetics, which has become a hotspot in the research areas recently, provides a new way to manipulate electromagnetic waves with coordinate transformation method. Combined with metamaterials, several new kinds of electromagnetic devices with peculiar functions can now be designed. In this paper, a series of polyline coordinate transformation devices are summarized, among which the electromagnetic wave concentrator is mainly discussed. Based on the theories, the scattering magnifying function and the military applications of electromagnetic wave concentrators are studied through the simulations of embedded stealth aircraft models and the calculations of their scattering cross sections. Each of the parameter extremums of this device and its normalized distributions are analyzed in detail at last.

Key words: Transformation electromagnetics; Metamaterials; Concentrator; Scattering magnifying

1 引言

变换电磁学^[1]是近几年来电磁领域的研究热点,其理论的核心是坐标变换方法。基于 Maxwell 方程的形式不变性原理,最早被提出的是电磁隐身斗篷^[2]。利用变换电磁学的方法,可以根据需要设计特定的介质,使得电磁波在这些介质中以设计者所期望的方式进行传播或散射,从而达到对电磁波的操作^[3,4],结合超材料(metamaterial)技术,可以设计出多种新颖的器件。近几年学者们对这方面的理论做出了发展与深入,研究了多种不同的坐标变换方式,包括折叠变换式隐身器件^[5]。从隐身器件的研究中又衍生出一系列变换电磁学器件,比如电磁波集中器^[6-10]等,有待进一步的研究和完善。

目前对于电磁波集中器的研究缺乏统一性的分类描述和归纳,对其电磁散射放大作用的解释以及

定量研究还不够深入,对其在军事领域的应用也未能有足够介绍,尤其是对材料参数的研究工作是非常欠缺的。本文主要对不同倍率的 2 维圆柱型电磁波集中器的散射放大作用进行了仿真计算、定量验证与物理解释,指出了此类器件在干扰、伪装等方面的潜在应用,并对其参数极值及其归一化分布范围随器件倍率和相对厚度的变化情况进行了详细的分析。

2 折线型坐标变换与电磁波集中器

电磁波集中器^[6-10]属于折线型坐标变换器件中的一种,图 1(a)中电磁波集中器选取了 2 维圆柱模型^[6],内圆 $r = a$ 是器件的内边界,外圆 $r = b$ 是器件的外边界。事实上,从经典隐身斗篷到折叠变换式隐身器件以及其它多种变换媒质,都可以用图 1(b)来给予归纳说明。

如图 1(b)中所示,横轴 r 表示原始空间圆柱半径,纵轴 r' 表示变换空间圆柱半径。折线族 1, 2, 3,

2012-06-21 收到, 2012-11-02 改回

国家自然科学基金(61172032)资助课题

*通信作者: 朱守正 szzhu@ee.ecnu.edu.cn

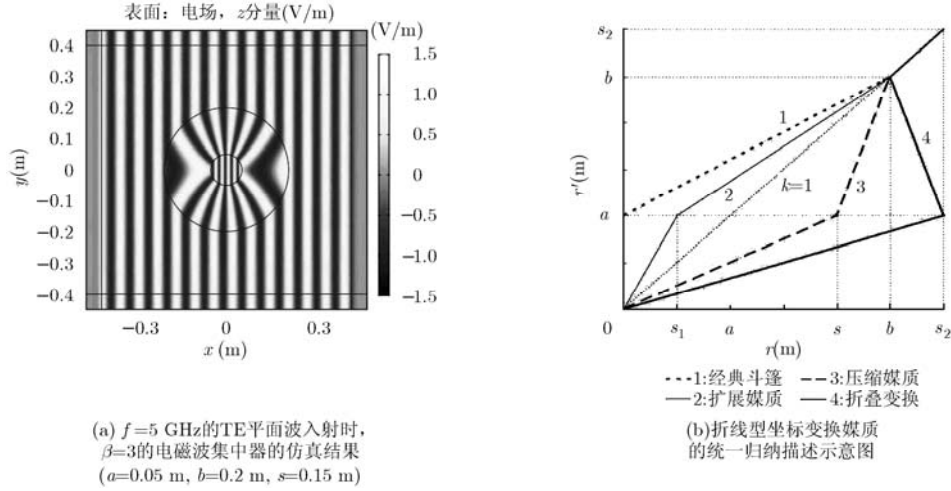


图 1 折线型坐标变换归纳及 2 维圆柱型电磁波集中器

4 分别用不同的样式予以区分, 其中短虚线绘制的线段 1 将 $0 \leq r \leq b$ 区域压缩到 $a \leq r' \leq b$ 区域, 代表经典隐身斗篷; 细实线绘制的折线 2 把 $0 \leq r \leq s_1$ 区域扩展到 $0 \leq r' \leq a$ (其中 $s_1 < a$), 相应的 $s_1 \leq r \leq b$ 区域则被压缩到 $a \leq r' \leq b$, 这种变换得到的是电磁波扩展器(扩展媒质)^[5]; 长虚线绘制的折线 3 把 $0 \leq r \leq s$ 区域压缩到 $0 \leq r' \leq a$ (其中 $a < s < b$), 相应的 $s \leq r \leq b$ 区域则被扩展到 $a \leq r' \leq b$, 这样得到的是电磁波集中器/聚焦器(压缩媒质)^[6-10]; 粗实线绘制的折线 4 把 $0 \leq r \leq s_2$ 区域压缩到 $0 \leq r' \leq a$ (其中 $s_2 > b$), 而 $s_2 \geq r \geq b$ 区域则被变换到 $a \leq r' \leq b$, 且 $s_2 \geq r \geq b$ 区域要被翻折回 $b \leq r' \leq s_2$, 这种变换被称为折叠变换, 所得到的隐身器件可以具有外隐身区域。图中用细虚线标示出的基准线 $k=1$ 代表前后空间 $r=r'$ 时的函数线段。可以发现: 折线中某段斜率 $k > 1$ 时, 代表此区域是空间扩展, 而 $0 < k < 1$ 代表的是空间压缩, $k < 0$ 时此区域存在空间翻折。下面是电磁波集中器的坐标变换表达式^[6]:

$$r' = r/\beta, \theta' = \theta, z' = z, 0 \leq r' \leq a, 1 < \beta < b/a \quad (1)$$

$$r' = a + \frac{b-a}{b-s}(r-s), \theta' = \theta, z' = z, \\ a \leq r' \leq b, s = \beta a \quad (2)$$

$$r' = r, \theta' = \theta, z' = z, r' > b \quad (3)$$

其中倍率 $\beta=s/a$, $s=\beta a$ 。这里可以根据不同的 s 值(或 β 值)取值区间对上述一系列折线型坐标变换进行归纳。折线族 1, 2, 3, 4 对应的是从 $s=0$ 开始增大直到 $s > b$ 时的情况, 比如折线 1 对应了 $\beta=0$, 折线 2 的 $0 < \beta < 1$, $k=1$ 基准线对应 $\beta=1$, 本文重点论述的折线 3 的倍率 $1 < \beta < b/a$ 。这样可以对以上折线型坐标变换进行统一的归纳与描述。电磁波集中器在柱坐标系下 ε 各分量的表达式如下^[10]:

$$\varepsilon_r = \frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{(b-s)r}{(b-s)r - b(a-s)} = \frac{1}{\varepsilon_r} \quad (5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \times \left(\frac{b-s}{b-a}\right)^2 = \varepsilon_r \times \left(\frac{b-s}{b-a}\right)^2 \quad (6)$$

内边界 $0 \leq r' \leq a$ 区域内媒质的相对介电常数 $\varepsilon_{in} = \beta^2$ 。对于本文讨论的折线 3, 即电磁波集中器, 图 1(a)给出了仿真结果, 模型尺寸 $a=0.05$ m, $b=0.2$ m, $s=0.15$ m。TE 平面波由左向右照射器件模型, 波源频率 $f=5$ GHz, 本例中 $\beta=s/a=3$ 。

3 电磁波集中器的散射放大功能

从图 1(a)中, 可以明显发现经过坐标变换后, 器件 $0 \leq r' \leq a$ 区域的场分布显得更加紧密, 入射到 $a \leq r' \leq b$ 这层压缩媒质的电磁波被汇聚于 $0 \leq r' \leq a$ 媒质内, 这样的功能类似于凸透镜对入射波的汇聚作用。凸透镜具有放大成像的作用, 进一步的推理就是电磁波集中器应该具有电磁散射放大作用。具体的理论推断如下: (1)电磁波集中器对于放置于器件内部的物体具有类似凸透镜的散射放大作用, 表现为放大内置物体散射尺寸的效果; (2)对于内置物体的散射尺寸, 其放大倍数就是电磁波集中器的倍率 β 。

下面结合实际仿真计算验证以上推断, 所用软件是有限元法软件 Comsol Mutiphysics。基本的方法是在电磁波集中器模型的内边界以内区域放置一个较小尺寸物体的模型, 然后用柱面波进行照射得到散射模式的仿真结果。这里选取了 F-117A 型隐形飞机^[11]纵截面形状的 2 维仿真模型作为内置物体模型。实际中, F-117A 型隐形飞机的机身总长为 20.02 m, 翼展宽度为 13.2 m, 两者的比值约为 1.5。此处选用的 2 维仿真模型保持了相同的机身纵截面比例, 但是总体尺寸缩小了 111 倍。具体尺寸为:

模型机身长度 $h=0.18$ m, 模型翼展宽度 $w=0.12$ m。对于金属成分居多的飞行体来说, 这里将 2 维仿真模型的边界设置为金属。所用电磁波集中器的尺寸为 $a=0.1$ m, $b=0.35$ m, 柱面波频率 $f=3$ GHz, 波源距离 $d=0.9$ m。

首先对倍率 $\beta=2$ 的电磁波集中器的散射放大效果进行仿真验证, 如图 2(a)-2(c)所示: 图 2(a)是原尺寸(即 $h=0.18$ m, $w=0.12$ m)隐身飞机 2 维仿真模型的散射仿真结果; 图 2(b)是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=2$ 的电磁波集中器内部区域时, 整体的散射效果; 图 2(c)是两倍尺寸(即 $h_2=0.36$ m, $w_2=0.24$ m)共形的 2 维仿真模型的散射仿真结果。从图 2(a)-2(c)中可以发现: 被 $\beta=2$ 的电磁波集中器包裹的原尺寸仿真模型的散射模式等效于其两倍尺寸共形的仿真模型的散射模式。为了充分显示其散射放大效果, 这里对倍率 $\beta=3$ 时器件的散射放大效果也进行了仿真验证, 采用的方法与前文相似, 如图 2(d)-2(f)所示: 图 2(d)是原尺寸仿真模型的散射仿真结果; 图 2(e)是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 的电磁波集中器内部区域时, 整体的散射效果; 图 2(f)是 3 倍尺寸(即 $h_3=0.54$ m, $w_3=0.36$ m)共形的仿真模型的散射仿真结果。从中可以发现: 被 $\beta=3$ 的电磁波集中器包裹的原尺寸仿真模型的散射模式等效于其 3 倍尺寸共形的仿真模型的散射模式。实际情况中 F-117A 型隐形飞机的金属外壳涂有吸波材料以减小其雷达散射截面 RCS, 所以对于 F-117 模型为吸收边界的情况我们也进行了相似的仿真计算, 结果与图 2 中基本相同, 此处省略。

通过上述仿真计算, 可以定性地发现: 隐身飞机 2 维仿真模型散射尺寸的放大倍数等于电磁波集

中器的倍率 β 。为了能定量验证此结论, 这里使用散射截面(Scattering Cross-Section, SCS)来进行考量^[12], 对 2 维模型就是散射宽度(scattering width)。由于用有限元法计算的结果是近场数据, 需要运用 Huygens 原理将近场数据转化为远场数据, 再计算 SCS。计算散射宽度的公式是: $\sigma = 2\pi r |\mathbf{E}^s(\varphi)|^2 / |\mathbf{E}^i|^2$ 。

用以上方法可以计算出图 2(a)-2(f)中不同情况下 F-117A 隐身飞机 2 维仿真模型的散射宽度值, 如图 3(a)-3(f)所示。图 3(a)是原尺寸隐身飞机仿真模型的散射宽度计算结果; 图 3(b)是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=2$ 的电磁波集中器内部区域时, 散射宽度的计算结果; 图 3(c)是两倍尺寸共形的仿真模型的散射宽度计算结果。图 3(d)也是原尺寸仿真模型的散射宽度计算结果; 图 3(e)是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 的电磁波集中器内部区域时, 散射宽度的计算结果; 图 3(f)是 3 倍尺寸共形的仿真模型的散射宽度计算结果。从图 3 中可以明显发现: 被倍率 β 的电磁波集中器包裹的原尺寸仿真模型的散射宽度与 β 倍尺寸共形的仿真模型的散射宽度基本相等, 且远大于原尺寸仿真模型的散射宽度。这样就对图 2 中电磁波集中器的散射放大功能做出了定量的验证, 结论是: 电磁波集中器对于内置物体模型, 确实具有散射放大功能, 并且物体模型散射尺寸的放大倍数就是电磁波集中器的倍率 β 。

前文提出的理论推断, 与其他学者用幻觉电磁学^[13,14]方法得到的结论是一致的, 文献[14]对此有更详细的论证, 其中就提到对于导体或者吸波体, 不需要做材料参数的变换, 只需要做边界尺寸的变换, 而本文仿真计算中, 隐身飞机模型的边界设置正是

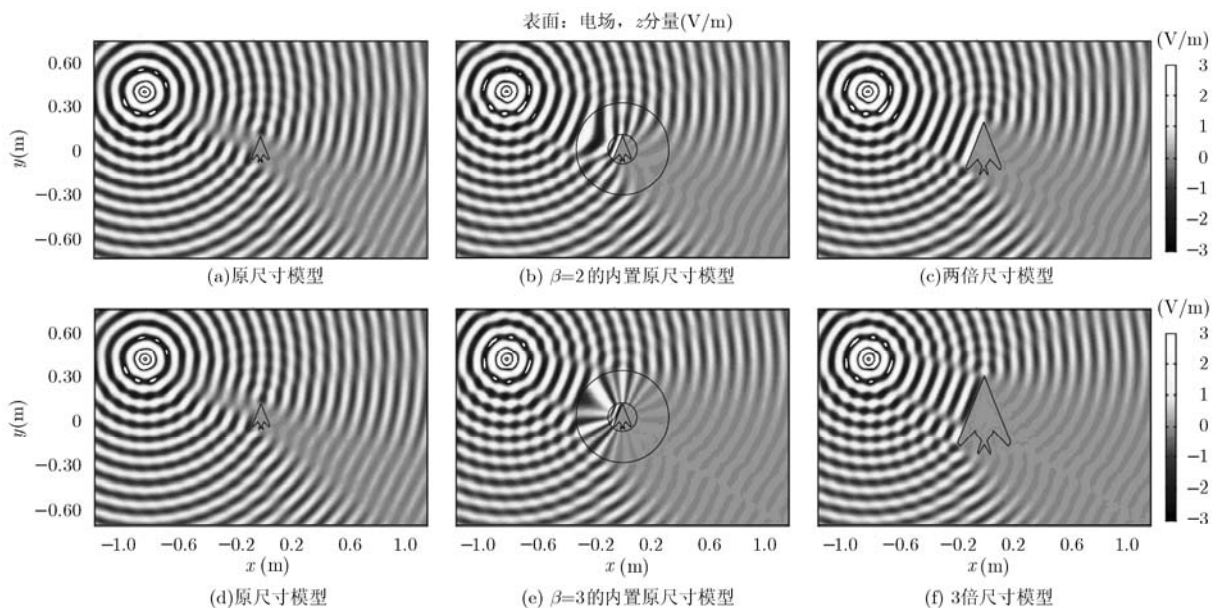


图 2 对电磁波集中器散射放大功能的仿真验证

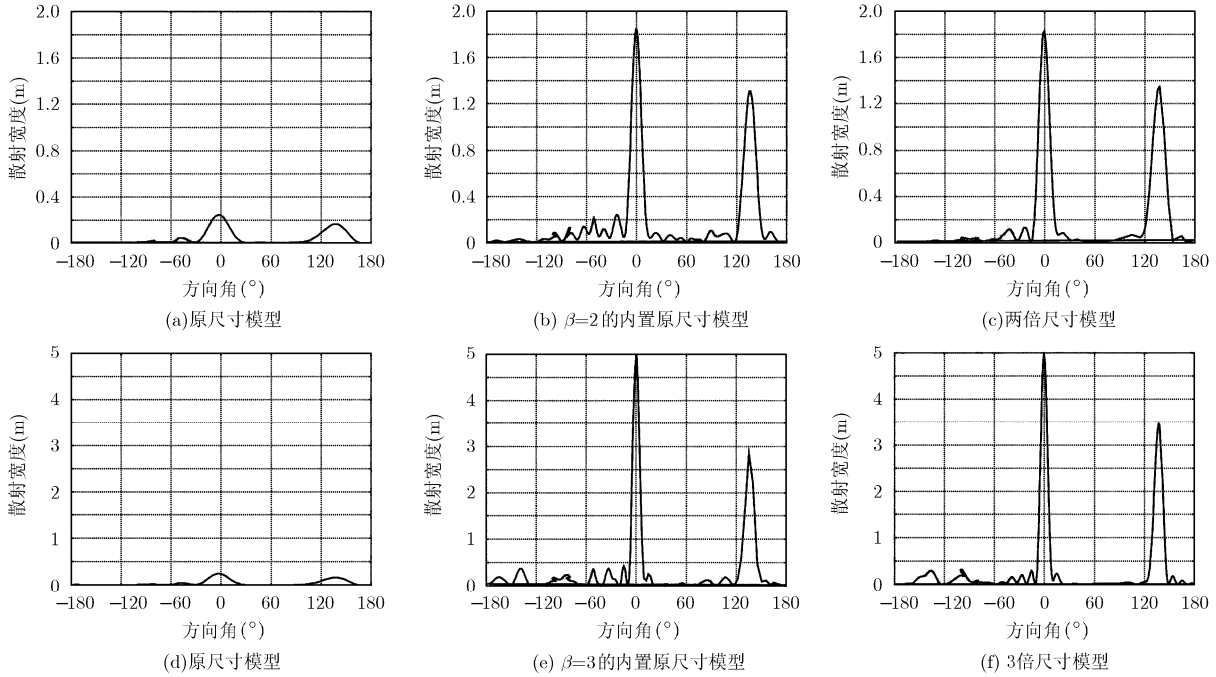


图 3 对图 2(a)-2(f)中不同情况下隐身飞机 2 维仿真模型散射宽度的计算

金属边界和吸收边界这两种情况。图 2 和图 3 中的工作充分验证了本节开始提出的理论推断。以上的结果表明，在电磁波集中器内部的物体，其散射模式可以等效于自由空间中一个较大的物体，这种等效可以用来设计超散射^[15]，看不见的门^[16]等新颖的变换电磁学器件。

从变换电磁学的研究中可以知道：电磁波集中器并没有改变物体的实际尺寸，只是随着局部空间的压缩，内部的场分布也连同一起被挤压，进而导致放置于器件内部的物体的散射尺寸会被放大的假象(幻觉电磁学)，这也是对电磁波集中器散射放大作用的物理解释。

在军事领域，电磁波集中器的散射放大作用有着潜在的应用价值：在军事行动中，有时需要隐蔽本方的重要目标，比如 F-117A 隐身飞机就是在外壳涂覆了特殊的吸波材料使得其雷达散射截面非常小，以达到能避开对方雷达探测的反侦查目的。有时却需要用诱饵目标尽量迷惑和误导对方的军事行动，这就是所谓的军事干扰行动。比如在防空作战时，如果能将本方造价较低的无人飞机伪装为散射截面更大的战斗机，使得对方在雷达上无法辨别来袭机群中具有致命攻击力的战斗机的真正数量而延误时机，或是分散对方的防空力量甚至导致其采取错误的军事行动，这样就达到了伪装和干扰的战略目标，帮助本方取得战略上的优势。电磁波集中器的这种散射放大作用在诱饵机和干扰机的应用方面具有潜在的军事价值。

4 电磁波集中器的参数分析

本节将详细分析压缩媒质参数随不同变量(放大倍率 β 或者器件相对厚度 D)的变化情况，以及整体参数分布的变化规律。这里定义器件相对厚度 $D=(b-a)/a$ ， a, b 分别是 2 维圆柱型电磁波集中器模型的内、外圆半径。

首先保持相对厚度不变来研究 $\epsilon - \beta$ 的关系。这里分别对不同倍率值的电磁波集中器压缩媒质 ϵ 参数各方向分量的极值进行了数据采集并绘制成散点曲线图。所用的器件模型尺寸变为 $a=0.05\text{ m}, b=0.5\text{ m}$ ，这样 $\beta \in [1,10)$ ，以方便采集更多的数据。

图 4 是 ϵ 各方向分量极值随放大倍数 β 的变化曲线，由于纵轴 ϵ 数值大小的差别，分为图 4(a), 4(b) 两图。其中 ϵ 各个分方向包括 r, θ, z 以及 xx, xy, yy 。在图 4(a)中，同时也绘制了内边界区域内相对介电常数 $\epsilon_{in} = \beta^2$ 的曲线作为参照(图中虚线 1)，曲线 2, 3, 4 用不同符号形式标记，分别表示 $\epsilon_{rmax} = \epsilon_{xxmax} = \epsilon_{yymax}, |\pm\epsilon_{xy}|_{max}, \epsilon_{rmin}$ 的数据散点曲线， ϵ_{xy} 的极值是绝对值相等的一对正负数值，这里以 $|\pm\epsilon_{xy}|_{max}$ 来表示，这 6 组数据的 ϵ 值较大，所以共同放在图 4(a)中以便比较。可以发现 $\epsilon_{in}, \epsilon_{rmax}, \epsilon_{xxmax}, \epsilon_{yymax}, |\pm\epsilon_{xy}|_{max}, \epsilon_{rmin}$ 随着倍率 β 的增大逐渐增大。图 4(b)中，曲线 1, 2, 3 分别表示 $\epsilon_{zmax}, \epsilon_{\theta max} = \epsilon_{zmin}, \epsilon_{\theta min} = \epsilon_{xxmin} = \epsilon_{yymin}$ ，这 6 组数据的 ϵ 值较小，所以共同放在图 4(b)中，可以发现除了 ϵ_{zmax} 随着 β 的增大先变大后变小以外，其余数据都

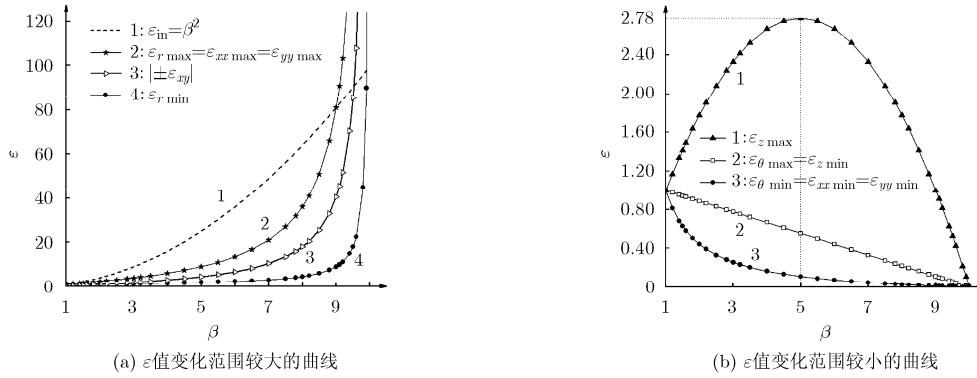


图 4 ϵ 各方向分量极值随放大倍数 β 的变化曲线

呈一直减小的趋势，其中 $\epsilon_{\theta, \max}$ 和 $\epsilon_{z, \min}$ 线性减小。

下面保持放大倍率不变，来研究 $\epsilon - D$ 的关系。为了具体表示电磁波集中器压缩媒质 ϵ 各方向分量的极值与器件相对厚度之间的定量关系，计算并采集了约 38 组数据绘制成散点曲线图。所用模型 $a=0.05$ m, $s=0.15$ m, $\beta=3$, 外径 b 的取值范围从 0.15 m 开始逐渐增大。

图 5 是 ϵ 各方向分量极值随器件相对厚度 D 的变化曲线，由于纵轴 ϵ 值大小的差别，同样分为图 5(a), 5(b) 两图。图 5(a) 中，曲线 1, 2, 3 分别表示 $\epsilon_{r, \max} = \epsilon_{xx, \max} = \epsilon_{yy, \max}$, $|\pm \epsilon_{xy}|$, $\epsilon_{r, \min}$ 的数据散点曲线，这 5 组数据的 ϵ 值范围较大，共同放在图 5(a) 中。可以发现 3 条曲线随着 D 的增大均逐渐减小并分别趋于不同的极限值，其中曲线 1 趋于 3，曲线 2 趋于 $4/3$ ，曲线 3 趋于 1。图 5(b) 中，曲线 1, 2, 3 分别表示 $\epsilon_{z, \max}$, $\epsilon_{\theta, \max} = \epsilon_{z, \min}$, $\epsilon_{\theta, \min} = \epsilon_{xx, \min} = \epsilon_{yy, \min}$ ，这 6 组数据的 ϵ 值较小，所以共同放在图 5(b) 中以方便区分比较，可以发现 3 条曲线随着 D 的增大都逐渐增大至不同的极限值，曲线 1 趋于 3，曲线 2 趋于 1，曲线 3 趋于 $1/3$ 。

图 6 中定义归一化材料参数分布范围 $\eta = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \epsilon_{\max} \times 100\%$ 。对图 4 的数据计算整理

后可以得到归一化材料参数分布范围 η 随放大倍数 β 变化的曲线，如图 6(a) 所示，其中曲线 1, 曲线 2 分别表示 $\eta_{xx, yy}$ 和 $\eta_{r, \theta, z}$ ，这两条曲线都是随着倍率 β 的增大而增大，表明随着电磁波集中器放大能力的提高，所需压缩媒质材料参数的分布范围也在不断增大，意味着材料实际实现的难度在不断增加。对图 5 的数据进行计算整理可以得到 η 随器件相对厚度 D 变化的曲线，如图 6(b) 所示，其中曲线 1, 曲线 2 分别表示 $\eta_{xx, yy}$ 和 $\eta_{r, \theta, z}$ ， $\eta_{xx, yy}$ 随着 D 的增大而减小至极限值 88.89% 即 $8/9$ ，随着电磁波集中器相对厚度的增加， x 和 y 方向所需压缩媒质材料参数的分布范围逐渐减小，其实际实现的难度在逐渐降低。但是 $\eta_{r, \theta, z}$ 并不随 D 的增加而发生变化，一直保持 66.67%，即 $2/3$ 值不变。因为本例中倍率 $\beta=3$ 是一个特殊值，在尝试不同倍率数值进行验证后，最终得到以下一般化的表达式： $\eta_{xx, yy} \rightarrow 1 - (1/\beta^2)$, $\eta_{r, \theta, z} = 1 - (1/\beta)$ 。

5 结束语

本文首先通过多组折线型坐标变换的对比示意图，归纳描述了一系列线性分段折线式变换器件，更一般化地解释了这几类变换电磁学器件，其中重

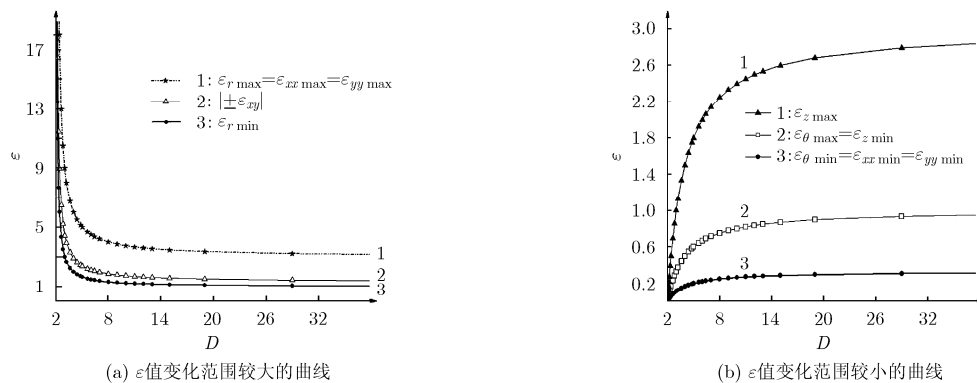
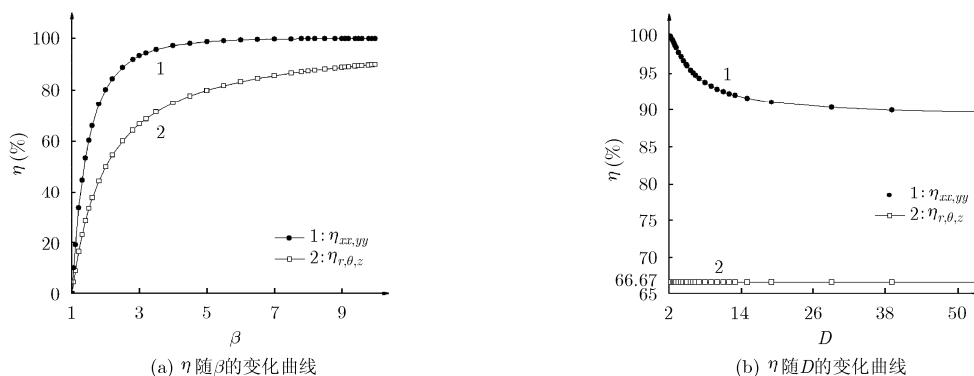


图 5 ϵ 各方向分量极值随器件相对厚度 D 的变化曲线

图6 归一化材料参数分布范围 η 随 β 和 D 的变化曲线

点介绍了电磁波集中器。其次对电磁波集中器散射放大功能与凸透镜的工作原理进行了对比研究,利用有限元软件 Comsol Mutiphysics, 对不同倍率值的电磁波集中器的散射放大效果进行了仿真,并对2维仿真模型的散射宽度进行了定量计算,证明了文中的理论推断,并进一步阐述了此类器件在干扰、伪装等军事领域的潜在应用。最后对电磁波集中器的参数极值及其归一化分布范围随着器件放大倍数和相对厚度的变化情况进行了详细的分析整理。通过以上工作完善了此方向的研究。

参考文献

- [1] Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [3] Pendry J B, Schurig D and Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [4] Li Ting-hua, Yang Jing-jing, Huang Ming, *et al.*. Arbitrary control of the electromagnetic field in two-dimensional waveguide and slit using metamaterials[J]. *Applied Physics A*, 2011, 105(2): 509-515.
- [5] Chen H, Chan C T, and Shen P. Transformation optics and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010, 9: 387-396.
- [6] Zhang Kuang, Wu Qun, Fu Jia-hui, *et al.*. Cylindrical electromagnetic concentrator with only axial constitutive parameter spatially variant[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(6): 1573-1577.
- [7] Yang Jing-jing, Huang Ming, Yang Cheng-fu, *et al.*. Metamaterial electromagnetic concentrators with arbitrary geometries[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19656-19661.
- [8] Li Wei, Guan Jian-guo, and Wang Wei. Homogeneous-materials-constructed electromagnetic field concentrators with adjustable concentrating ratio[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(12): 125401, 6.
- [9] Li T, Huang M, Yang J, *et al.*. Three dimensional electromagnetic concentrators with homogeneous material parameters[J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2011, 18: 119-130.
- [10] 杨成福, 黄铭, 杨晶晶, 等. 基于超材料的正多边形电磁波聚焦器设计[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(10): 2485-2489. Yang Cheng-fu, Huang Ming, Yang Jing-jing, *et al.*. Design of the N-sided regular polygonal electromagnetic concentrator using metamaterials[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2485-2489.
- [11] Zadeh H G, Dehrizi H G, and Haddadnia J. Identification of F117 fighter with image processing by using labview[C]. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC), Coimbatore, Dec. 28-29, 2010: 1-4.
- [12] Gente R, Jansen C, Geise R, *et al.*. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(4): 424-431.
- [13] Lai Yun, Ng J, Chen Huan-yang, *et al.*. Illusion optics: the optical transformation of an object into another object [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 253902, 4.
- [14] Luo Yang, He Lian-xing, Zhu Shou-zheng, *et al.*. Changing the scattering of sheltered targets[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(4): 043809, 7.
- [15] Yang Tao, Chen Huan-yang, Ma Hong-ru, *et al.*. Superscatterer: enhancement of scattering with complementary media[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18545-18550.
- [16] Luo Xu-dong, Yang Tao, Gu Yong-wei, *et al.*. Conceal an entrance by means of superscatterer[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(22): 223513, 3.

庞旭东: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为超材料理论及应用。
朱守正: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型天线、计算电磁学、超材料及其应用、无线技术与无线通信等。