

一种新型的散射增强电磁超材料器件的设计及仿真

庞旭东^{1,*} 吴丽萍¹ 陈群¹ 曹蓓蓓¹ 朱守正²

(1. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 2. 华东师范大学, 上海 200241)

【摘要】 传统靶标的散射增强装置之一微波频段的龙伯球/龙伯透镜, 本文引入电磁超材料思想, 从超材料角度重新看待传统的龙伯球功能, 并提出了一种简化参数的散射增强电磁超材料器件模型。通过仿真对比论证可知, 该器件模型保持了一定的散射放大功能, 相比理想超材料模型, 材料参数大幅简化, 明显降低了实际制备难度。该参数简化模型有益于超材料器件是实际制备工作, 并可以应用于电磁迷惑、射频假目标诱饵和电子干扰等。

【关键词】 变换电磁学; 参数简化; 波集中器; 散射特性

SIMULATION AND ANALYSIS OF THE SCATTERING CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC WAVE CONCENTRATOR WITH REDUCED PARAMETER SETS

Xudong PANG^{1,*}, Liping WU¹, Qun CHEN¹, Beibei CAO¹, Shouzheng ZHU²

(1. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai, 200093, China;

2. East China Normal University, Shanghai, 200241, China)

[Abstract] One of the Scattering Enhancement Device of Traditional Target is the Microwave Luneburg Lens. In this Paper, the Idea of Electromagnetic Metamaterials is Introduced, and the Function of Microwave Luneburg Lens is Re-viewed From the Perspective of Metamaterials, and A New Model of Electromagnetic Wave Concentrator with Reduced Parameter Sets is Proposed. The Contrastive Simulation Work Demonstrates that the Reduced Model Also Maintains the Scattering Magnifying Function of the Concentrator and in the Meantime Its Media Parameters are Distinctly Reduced Which Can Obviously Decrease the Practical Fabrication Difficulties. The Parameter-reduced Model of Concentrator Apparently Benefits the Implementation of the Metamaterial, Which Can be Practically Used in Electromagnetic Delusion, Radio Frequency Decoy and Electronic Interference Applications.

[Keywords] Transformation Electromagnetics; Reduced Parameters; Wave Concentrator; Scattering Characteristics

© 2023 by The Authors. Published by Four Dimensions Publishing Group INC. This work is open access and distributed under Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*通讯作者: 庞旭东 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电磁超材料理论、计算机仿真、射频制导仿真技术等。

电子邮箱:

pxd210@163.com

引言

变换电磁学[1-2]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。最早被提出的是电磁隐身斗篷[3]。

从隐身器件的研究中又衍生出一系列变换电磁学器件，比如电磁波扩展器、集中器[4-8]等，有待进一步研究。文献 8 中对于折线型坐标变换器件已经有统一性的分类描述，并对电磁波集中器的散射放大功能做了定量研究，但是其所用器件都是理想参数模型，其所需超材料的各方向参数分量非常复杂，参数分析方法可参考文献 8。对于最早被提出的隐身斗篷[3]，同样遇到材料参数复杂的问题，学者给出过一些参数简化方法[4,9]，本文在前人的研究基础上，提出针对理想参数电磁波集中器的三种参数简化模型，并采用定量方法论证了简化模型 2 同样具有较好的散射放大功能，简化的参数明显降低了超材料的实现难度，介质损耗对器件散射放大功能具有一定的增强作用，进一步加深了其实际应用价值[9]。其散射截面扩大的功能类似射频角反射器，可隐真示假、欺骗迷惑敌人[10]；其散射截面共形放大功能类似射频波段的放大镜，可将低成本的缩比模型放大为较大 RCS 的原目标模型，在靶场打靶的精细目标模拟，以及真假目标混合编队协同突防等方面具有一定应用价值。

传统的散射增强装置是微波频段龙伯球，传统工艺是每层不同介电常数的介质胶接成形，现在的 3D 打印工艺是机器自动化的工艺升级。从超材料设计思想来看，本文用超材料理论推导得出的渐变介质参数亦可与龙伯球逐层可变的介电常数产生相同的散射增强效果，且通过精细化的散射放大设计，倒推材料参数端的严格介电参数变化曲线，可以产生散射等比放大的精细化 RCS 模拟的应用可能。

1. 三种参数简化的电磁波集中器模型

电磁波集中器属于折线型坐标变换器件[8]，图 1(1)中的集中器选取了 2 维圆柱模型[4]，内圆 $r=a$ 是器件的内边界，外圆 $r=b$ 是器件的外边界。理想参数的电磁波集中器材料 r 、 θ 、 z 方向的参数表达式，如下所示[7,8]。其中倍率 $\beta=s/a$ 。其中 s 是折线型坐标变换中的变量[7,8]。

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{(b-s)r}{(b-s)r - b(a-s)} = \frac{1}{\varepsilon_r} \\ \varepsilon_z &= \frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \times \left(\frac{b-s}{b-a}\right)^2\end{aligned}$$

表 1 三种简化模型的电磁波集中器材料参数对比表

简化模型 1	简化模型 2	简化模型 3
$\varepsilon_r = \left[\frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \right]$	$\varepsilon_r = \left[\frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \right]^2 \left(\frac{b-s}{b-a} \right)$	$\varepsilon_r = \left[\frac{(b-s)r - b(a-s)}{(b-s)r} \right]^2 \left(\frac{b-s}{b-a} \right)^2$
$\varepsilon_\theta = 1$	$\varepsilon_\theta = \frac{b-s}{b-a}$	$\varepsilon_\theta = \left(\frac{b-s}{b-a} \right)^2$
$\varepsilon_z = \left(\frac{b-s}{b-a} \right)^2$	$\varepsilon_z = \frac{b-s}{b-a}$	$\varepsilon_z = 1$

当倍率一定时，理想参数模型的 r 方向参数表达式是有关 $1/r$ 的一次函数，而 θ 方向参数与 r 方向参数互为倒数， z 方向参数与 r 方向参数相关，即三个分方向的参数都是渐变、非均匀的，这给材料的实际制备带来巨大困难。从文献 8 对采用理想参数的电磁波集中器的参数分析进一步可知，在实际制备中，简化器件参数是非常重要的课题。基于二维圆柱型电磁隐身斗篷的“参数简化方法[9]”，本文提

出了对理想参数电磁波集中器的简化参数模型，简化后 r 、 θ 、 z 方向的参数如表 1 所示，对基于线性变换方式的简化参数模型-1、简化参数模型-2 和简化参数模型-3 式电磁波集中器进行了对比仿真和材料参数分析，从中可以比较这三种简化模型整体效果的优劣，重点研究了其中的简化参数-2 式电磁波集中器模型。

以简化模型 2 为例，参数简化后当倍率一定时，

θ 、 z 方向材料参数表达式为常数，仅剩 r 方向参数表达式是有关 $1/r$ 的二次函数，经参数简化后，三个方向的非均匀性被集中到其中一个方向 r 上，大幅

降低了材料参数的复杂度，方便了超材料的实际制备工作。

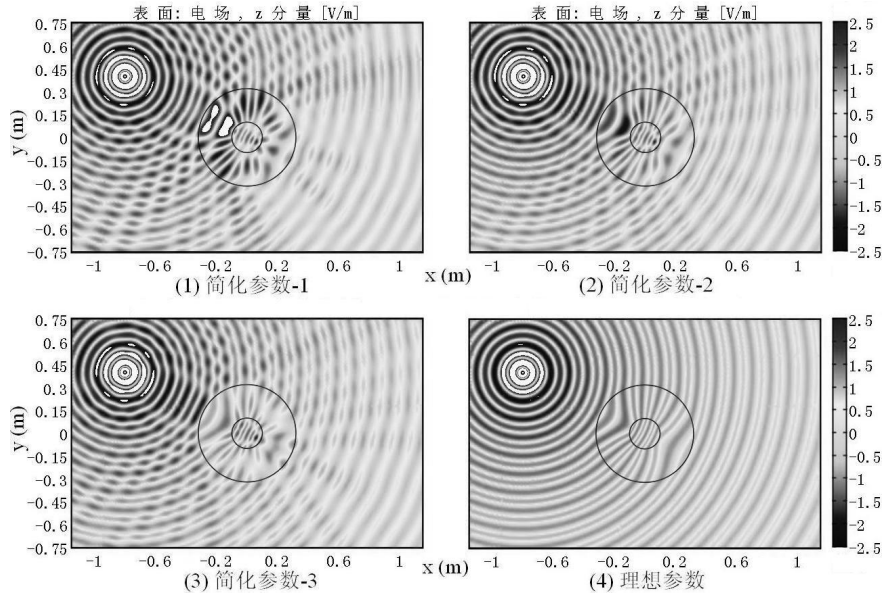


图 1 简化参数模型的电磁波集中器($\beta=2$)的仿真对比图

这里对比研究这三种简化参数模型，这里首先研究倍率 $\beta=2$ 的情形，即 $s=0.2\text{m}$ 。柱面波照射各种简化参数模型，总场分布的仿真结果如图 1 所示，其中图(1)是简化参数模型-1 的仿真结果；图(2)是简化参数模型-2 的仿真结果；图(3)是简化参数模型-3 的仿真结果；图(4)是理想参数模型的仿真结果，作为参照图。从图 1(1)(2)(3)(4)可以看出三种简化参数模型都存在一定的散射，所以在简化参数后，器件的隐身性能均有所下降，综合比较这三种简化模型，可以看出图 1(2)中简化参数模型-2 的电磁波集中器所引起的散射较小，更接近理想参数模型的仿真结果，器件虽然失去了一定的隐蔽性，然而其波束集中的基本特性并没有消失，并且参数得到了大幅简化。图 1(1)和图 1(3)中的器件虽然具备一定的波束汇聚能力，然而引起的散射太大，总场分布的均匀

性已经遭到较严重的破坏。为了给出较为充分的验证，还研究了 $\beta=3$ 时的情形，即 $s=0.3\text{m}$ 。TE 平面波从左向右入射。各种简化参数模型的电磁波集中器的总场分布仿真结果如图 2 所示。图 2(1)(2)(3)分别是简化参数模型 1、2、3 的仿真结果；图 2(4)是理想参数模型的仿真结果。从图 2 中可以得到与图 1 相同的结论，即简化参数模型-2 式电磁波集中器所引起的散射较小，更接近理想参数模型的仿真结果。图 3 是采用简化参数模型-2 的 $\beta=2$ 电磁波集中器 xx 、 xy 、 yy 方向材料参数分量的具体分布情况。从图 3 可以发现，相比理想参数模型的数值，实现难度明显下降，并且器件的基本性能并没有明显损失，所以采用简化参数模型-2 的电磁波集中器是实际应用中较为理想的替代选择。

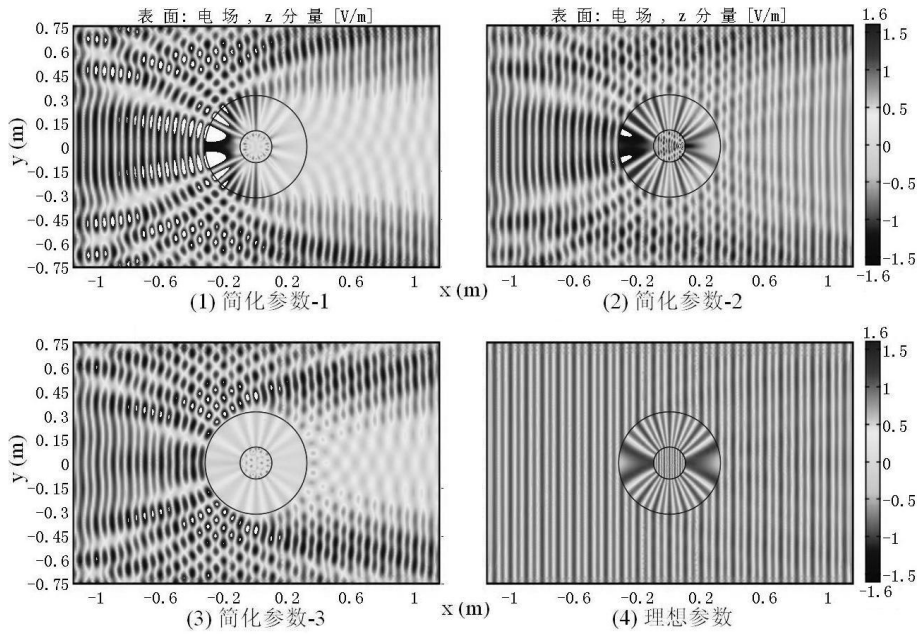


图2 简化参数模型的电磁波集中器($\beta=3$)的仿真对比图

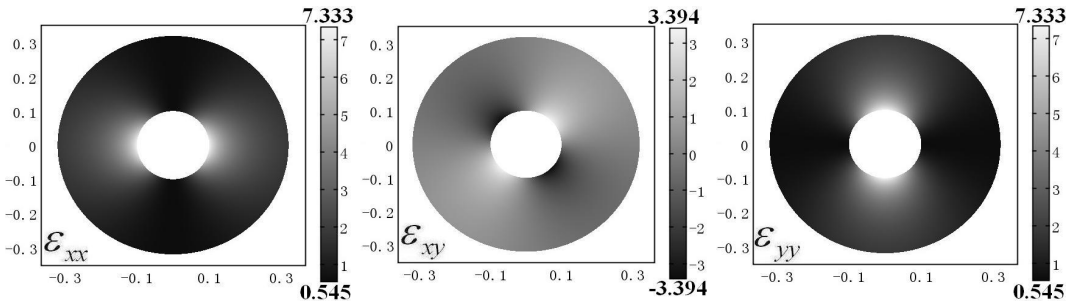


图3 参数简化的 $\beta=2$ 电磁波集中器 xx 、 xy 、 yy 方向材料参数分量的具体分布情况

2. 参数简化型电磁波集中器散射放大功能仿真

以参数简化型-2 电磁波集中器作为研究对象，进一步分析其散射特性，研究其散射放大功能受参数简化的具体影响，所用电磁仿真软件是有限元法软件 Comsol Mutiphysics[7-10]，在理想/简化参数模型的电磁波集中器模型内边界以内区域放置 F-117A 隐形飞机纵截面形状二维缩比模型，然后用柱面波进行照射得到散射模式的仿真结果。内置飞机缩比模型尺寸为：模型机身长度 $h=0.19\text{m}$ ，模型翼展宽度 $w=0.13\text{m}$ ，其边界设置为金属。3GHz 的柱面波从左上方入射。对 $\beta=3$ 的采用简化参数模型-2 的电磁波集中器的散射放大功能也进行了数值仿真验证与计算，如图 4(a)(b)所示：3GHz 的柱面波从左上方入射，(a)图是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 采

用理想参数模型的电磁波集中器内部区域时，整体的散射模式；(b)图是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 的简化参数模型-2 式电磁波集中器内部区域时，整体的散射模式。从图 4 可以定性看出这两者的散射模式非常相近，为了进一步做出定量验证，同样对平面波照射下的散射宽度进行了计算。图 4(a)(b)情况中的散射宽度计算值如图 5(a)(b)所示：(a)图是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 的理想参数模型电磁波集中器内部区域时，散射宽度的计算结果；(b)图是将原尺寸仿真模型放置于 $\beta=3$ 的简化参数模型-2 的电磁波集中器内部区域时，散射宽度的计算结果。从图 4、5 中可以发现：对于参数简化-2 式电磁波集中器，其散射放大的总体效果较之理想参数电磁波集中器有了一定的提升，在实际应用中，建议使用参数简化-2 模型的电磁波集中器代替原先的理想参数模型器件。

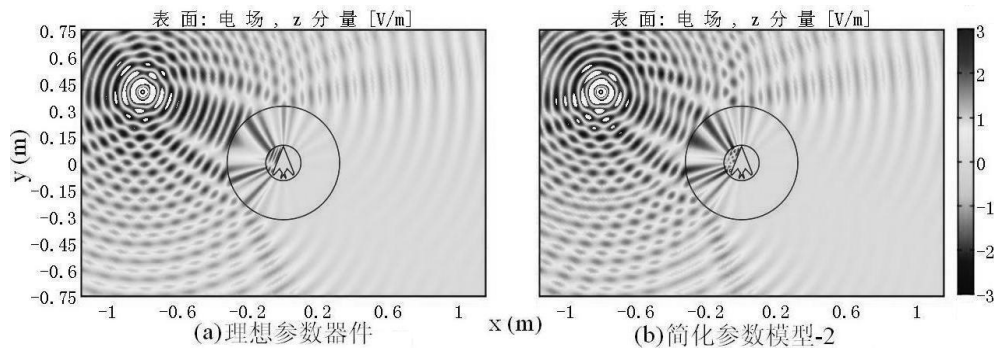


图 4 对 $\beta=3$ 的简化参数模型-2 式电磁波集中器散射放大功能的数值仿真和对比

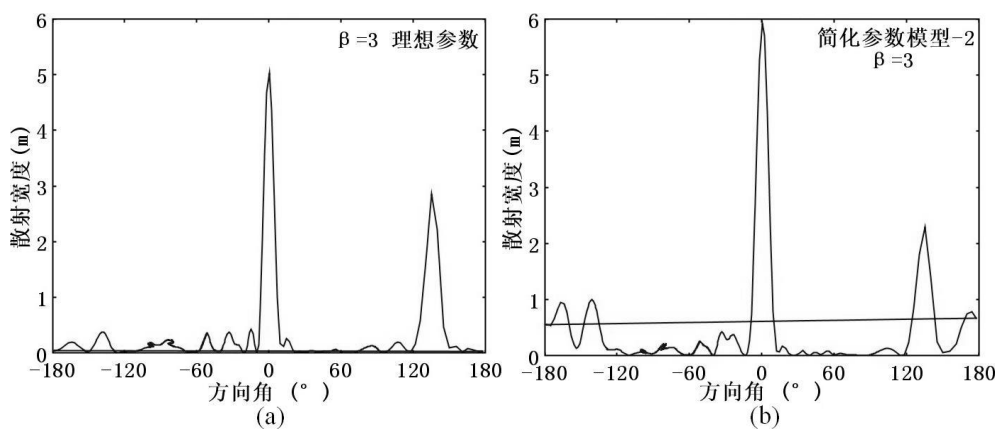


图 5 上图中两种情况下飞机二维仿真模型的散射宽度

可以得出结论：参数简化 2 型电磁波集中器，其散射放大功能相对理想参数器件并没有减弱，进一步考虑到简化后的参数易于制备，在实际应用中，建议采用参数简化型电磁波集中器来代替理想参数模型的原器件，可以作为散射截面扩大的装置应用于飞行器侦查、突袭中的干扰、伪装等行动。

3. 结论

在理想参数电磁波集中器的研究基础上，本文提出了一种参数简化型集中器模型，通过仿真对比论证可知：其散射特性接近理想参数器件，但材料参数大幅简化，明显降低了超材料的实际制备难度；参数简化 2 型电磁波集中器不但保持了散射放大功能，较之理想参数集中器甚至有了一定提升。实际中可以考虑用参数简化 2 型电磁波集中器来代替原有的理想参数电磁波集中器，可以明显降低实际制备时的难度，增加了其潜在的实用性。该类器件可以作为散射截面扩大的装置在电磁欺骗、射频假目标迷惑、低成本的缩比模型 RCS 放大、靶机目标的精细模拟，以及多目标混合编队协同突防等方面具有一定应用价值。学术思想上，本文亦可理解为用

前沿超材料的设计思想重新认识了传统的多层龙伯球及其散射增强功能的内部机理。

致谢

基金项目：国家自然科学基金(61172032)。

参考文献

- [1] Zhang, P., Yan, Y., Liu, Y. et al. A look at field manipulation and antenna design using 3D transformation electromagnetics and 2D surface electromagnetics. *Front Inform Technol Electron Eng* 21, 351–365 (2020).
- [2] Shining Zhu, Xiang Zhang, *Metamaterials: artificial materials beyond nature*, National Science Review, 5(2), 131 (2018).
- [3] Cui TJ, Qi MQ, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light Sci Appl*, 3(10): 218(2014).
- [4] Chen H, Ng J, Lee C W J, et al. General

transformation for the reduced invisibility cloak[J]. Physical Review B, 2009, 80(8): 085112..

- [5] Cheng Fu Yang, Ming Huang, Jing Jing Yang, et al. Arbitrarily shaped homogeneous concentrator and its layered realization, Optics Communications, 435, 150-158(2019).
- [6] Pang X, Wu L, Cao B, et al. Simulation of Electromagnetic Metamaterial Carpet for Ground Target Radar Stealth[C]//2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2022: 95-98.
- [7] Pang X, Cao B, Wu L, et al. Simulation and Analysis of the Scattering Minifying Function of Electromagnetic Wave Expander[C]//Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems: 21st Asia Simulation Conference, AsiaSim 2022, Changsha, China, December 9-11, 2022, Proceedings, Part I. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 441-448.
- [8] 庞旭东, 朱守正. 电磁波集中器散射放大功能的应用与分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 468-473.
- [9] 庞旭东, 朱守正. 电磁隐身斗篷奇异性问题的处理与分析 [J] 电波科学学报, 2013, 28(1):169-175.
- [10] Pang X, Cao B, Wu L, et al. A Portable Radar Jamming Simulation System Used for Flight Mounted Target[C]//Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems: 21st Asia Simulation Conference, AsiaSim 2022, Changsha, China, December 9-11, 2022, Proceedings, Part I. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 165-170.