

用于聚焦和波束成形应用的机械可重构梯度折射率透镜概念

K. Kaboutari^{*†}, X. Liu[†], A. Abraray^{*}, P. Pinho^{*}, S. Shen[†], S. Maslovski^{*}

^{*} Instituto de Telecomunicações and Dept. de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, University of Aveiro, Aveiro, Portugal

{k.kaboutari, abdelghafour.abraray, ptpinho, stanislav.maslovski}^{*}@ua.pt

[†]Department of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, United States of America

{kkabouta, xiuliu, shengshe}[†]@andrew.cmu.edu

摘要—本研究提出了一种机械可重构的梯度折射率 (GRIN) 透镜的前瞻性概念, 用于聚焦和波束成形应用。该透镜由带有褶皱的层构成, 每一层实现了一个用切比雪夫多项式基表示的折射率分布。通过移动 GRIN 透镜层来控制焦点位置。基于几何光学的方法被应用于三个不同焦距距离下的聚焦场景。通过数值模拟验证了几何光学的结果, 但由于建模近似和结构粗粒度的存在, 观察到了一些差异。我们还讨论了所提出概念在红外波长操作中的可扩展性。

Index Terms—可重构梯度折射率透镜, 聚焦, 波束成形, 优化。

I. 介绍

LENSES 是聚焦入射电磁 (EM) 波和形成物体图像的关键。它们已在微波频率 [1]–[3] 下进行了研究, 用于雷达系统 [4], [5]、电信 [6], [7]、无损检测 [8] 以及成像 [9] 等多种应用, 并且在电磁频谱的光学范围内 [10] 也是如此。历史上, 微波透镜遵循了将电介质材料塑造成旋转凸或凹体的光学方法。然而, 这些传统的方法与庞大笨重的设计和昂贵的加工过程相关联。梯度折射率 (GRIN) 透镜是平面光学透镜, 其折射率/介电常数在空间上变化。它们提供了一种解决传统透镜问题如体积大、复杂轮廓和高制造成本的方法。它们可以被实现为由亚波长元素构成的工程结构, 这些元素以周期性排列, 被称为单元胞或超原子, 且显著小于工作波长 λ 。根据有效介质理论, 这种布置可以用有效的介电常数和磁导率来描述。晶胞尺寸必须小于 $\lambda/4$, 以确保这些非均匀周期性材料对于入射波的行为类似于均匀介质 [11]–[13]。这些透镜的体电磁性质由晶胞的配置和

内容决定, 而非像电介质材料那样的原子级组成。实际上, 梯度折射率 (GRIN) 透镜利用材料内部的折射率/介电常数梯度来弯曲和聚焦电磁波, 与传统的依靠曲面根据斯涅尔定律聚焦电磁波的镜头不同。光线逐渐弯曲的原因是波在不同介电常数区域以不同的相速度传播。变化的介电常数诱导了光线的抛物线轨迹, 使得它们可以平滑地汇聚或发散, 从而有助于电磁波的聚焦或准直。这一特性提供了几个优势, 特别是在镜头精度和紧凑性对于高效运行至关重要的应用中。因此, GRIN 透镜可以被设计以表现出特殊的电磁性质, 这使新型透镜的应用成为可能, 而这些应用使用传统技术是难以实现甚至不可能实现的。这些特点允许 GRIN 透镜在更为紧凑的物理结构内提供与传统镜头相当或更好的聚焦能力。在 [9] 中, 设计了一个用于 8GHz 微波成像的 GRIN 超表面透镜。该超表面晶胞包含一个电 LC (ELC) 谐振器, 通过调整晶胞中心的电容间隙来操纵超表面的有效折射率, 从而创建了梯度折射率层。随后, 一个角锥天线作为平面波源入射到透镜上, 以评估透镜的聚焦能力。在 [14] 中表明, 在发射角锥天线上放置一个 GRIN 透镜可以有效重新分布反射器表面的场。这种重新分布将反射孔径上的入射场强度变化减少了 17.6%, 与没有镜头封装的情况相比。这伴随着系统处理能力的显著 47% 增加。处理功率的增加具有实际意义, 表明增强型 GRIN 系统既可以承受更强的入射场, 也可以在发射侧使用更强大的源, 有可能提升系统的性能。[15] 提出的一种用于生物医学应用的可重构 GRIN 透镜提供了

解决雷达成像算法所面临挑战的一种有前景的方法。通过将球面波前转换为平面波来增强图像算法的准确性。考虑到当前与人体匹配的天线无法产生平面波这一限制，这是一个显著的进步。镜头预计可以减少获得图像中的误差，特别是在对癌症组织进行成像以确定恶性肿瘤的位置、大小，并防止虚假目标形成时（这些往往是由于算法中假设的平面波造成的）。在设计上，通过将水填充到透镜内的空腔中来实现可重构 GRIN 透镜，这改变了透镜的局部有效介电常数。然而，这种方法需要使用笨重的设备如水箱和泵，在某些情况下可能会带来挑战甚至不可能实现。另一项 [16] 中的研究专注于通过 3D 打印实现梯度折射率变化且无极化限制的 GRIN 透镜的超材料实施。该实施方案特别设计用于增强 X 波段微波天线系统的波束扫描方向性。所设计的 GRIN 透镜提供了显著优势，提供了一种操纵电磁波的新自由度，同时保持最佳性能。GRIN 透镜的介电常数是通过有效介质理论估算得出的。优化设计之后，使用各向同性的非均匀介质材料制造了 GRIN 透镜，在其中折射率经过精心设计以匹配空气填充空隙和聚合物混合比例下的理论结果。尽管可以通过这种方法实现任何实际所需的折射率分布，但生产的 3D 打印镜头不具备可重新配置性。与上述研究相比，我们的研究提出了一种新的工作原理，用于机械可重新配置的分层/多层 GRIN 透镜，其可控折射率分布可用于微波、毫米波以及可能近红外频段的聚焦和波束成形应用。各层由不同材料形成，每种材料具有适当的折射率。然后在这些层中蚀刻出与适当基函数对应的预设计图案的凹槽或沟槽。这种方法允许各层的相对介电常数独立变化，在所有基函数组合在一起时生成所需的等效折射率/相对介电常数分布。通过横向移动这些层来控制整体的有效折射率分布，而不是像传统光学系统中的轴向位移。我们预见这项技术在生物医学成像和电信领域具有潜在应用价值。

II. 方法论

在我们的方法中，GRIN 透镜被分成多层，这为将不同材料分配给每一层并独立机械移动各层提供了灵活性。通过在层之间创建适当的折射率分布并相应调整它们的位置来实现波束成形。在这项研究中，我们使用带有不同深度和高度的空气填充沟槽图案来控制传输场相位并在一组焦距点上集中该场，图 1(a) 所示。此图所示的 GRIN 透镜由沿 z 轴排列的多个磁电介质层组成。每一层具有独立材料，厚度和折射率（即相对

介电常数和相对磁导率）各不相同。这些沟槽与 y 轴对齐，这也是入射电场的极化方向，从而避免了在凹槽边界和主体介质中感应出电介质极化电荷。此外，在本研究中，为了简化分析结果和数值结果比较，调整了材料的特征阻抗 η_i ，使得 η_i 等于 $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_{i,\text{eff}}\mu_0}{\epsilon_{i,\text{eff}}\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$ 。这种与自由空间的阻抗匹配可以通过使用磁电介质材料或在介电层之间添加阻抗匹配层（例如，阻抗网格或多表面）来实现。

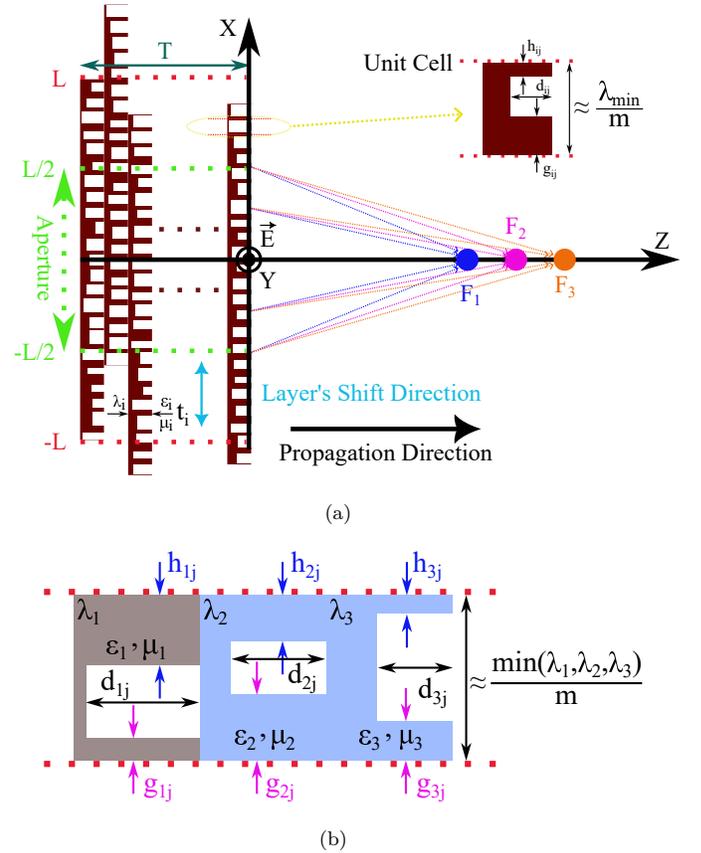


图 1. 所提出的 GRIN 透镜配置的几何结构: (a) 结构示意图和几何光学光线图; (b) GRIN 透镜的超元胞。 ϵ_i 和 μ_i 分别是材料的相对介电常数和磁导率。这里， i 和 j 分别代表层和槽的索引。

如图 1(a) 所示，还描绘了其中一层的一个单元格。单元格沿 x 轴的高度应不超过工作波长的 $1/4$ 。在我们的研究中选择了 m 值为 10。具体值对于 h_{ij} ， d_{ij} 和 g_{ij} 是基于单元格位置处层的必要相对介电常数/折射率建立的。在优化研究中，我们选择了使用三种不同的磁电基板来设计一个梯度折射率透镜。所提出配置的超晶胞如图 1(b) 所示。在这个结构中，第一层的折射率为 $\sqrt{10.2}$ 。第二和第三层的折射率为 $\sqrt{6.15}$ （这些值被选为分别匹配 Rogers RO3010 和 RO3006 基板的折射率）。在此设计中，在第一个机械固定的层上创建凹槽，使其有效折射率分布遵循二阶切比雪夫多项式。另一方

面, 我们的梯度折射率透镜的第二和第三层可以沿 x 轴相互反向进行机械移动。第二层和第三层的槽形轮廓使用关于 $x = 0$ 相互镜像的三次 Chebyshev 多项式确定, 以呈现相对介电常数的最大值和最小值。因此, 透镜的有效相对介电常数可以通过叠加 (即混合规则) 概念来确定, 用于各层的相对介电常数。如上所述, 为了在与入射波相互作用时表现出均匀介质特性, 每个 GRIN 透镜层的厚度应很小 (通常小于 $\lambda_i/4$)。然而, 我们发现当各层阻抗匹配时, 这些条件可以放松而不过多降低 GRIN 透镜的性能, 这将在下一节中讨论。

III. 基函数和分层图案设计用于定制折射率分布和多焦点焦散曲线

选择适当的基函数并在每层蚀刻不同深度的槽是实现沿 x 轴所需的等效折射率分布的关键, 参见图 3(a)。由于这种图案设计, 可以通过沿着 x 轴独立且有目的地移动各层, 在 z 轴 (即主要传播方向) 上创建不同的焦点。选择基函数和层移位至关重要, 并应使用优化方法进行评估, 这对于确保在 x 轴上生成所需的折射率分布至关重要。在我们的研究中, 我们考察了各种多项式基函数及其利用优化算法近似并产生各层层折射率平滑变化的能力。这些包括 Haar 小波、正弦、锯齿波、Legendre 多项式、线性和第一类 Chebyshev 多项式的基函数。根据图 2, 可以观察到所讨论的基函数相对介电常数分布 (折射率分布) 的平方根。选择第一类 Chebyshev 多项式作为主要功能基础是一个重要的发现, 为进一步的研究和应用提供了明确的方向。

IV. 分析和数值结果

在我们的分析几何光学模型中, 我们考虑了三种场景, 使用提出的三层 GRIN 透镜将光线分别聚焦在沿 z 轴的 134 毫米、125 毫米和 119 毫米处。为了实现这一目标, 我们在相应的层上应用了 $[0, 0, 0]$ 、 $[0, -5, +5]$ 和 $[0, -10, +10]$ 毫米的偏移量, 以创建所提出的可重构梯度折射率透镜所需的等效折射率分布, 如图 3(b) 所示。

图 4 展示了由 GRIN 透镜孔径中的宏单元产生的相位延迟, 这些相位延迟分别通过传输线理论和 S 参数的后处理分析计算得出。该图显示了分析结果与数值结果之间相当好的一致性, 特别是对于 $[0, -5, +5]$ 毫米偏移的情况进行了特别强调。

在图 5(a-c) 中, 我们描绘了透射电场幅值的全波数值结果, 在这些图中可以识别出沿 z 轴的最大场强点

(即焦点) 分别大约位于 110、87 和 79 毫米的位置。从图中可以看出, 这些焦点偏离了它们预期的位置。这种差异可归因于将几何光学模型应用于非均匀结构 (如所考虑的分层图案化 GRIN 透镜) 时出现的不准确性。然而, 结果清楚地表明提出的重构方法是可行的。

值得注意的是, 与 $[0, -5, +5]$ 和 $[0, -10, +10]$ 毫米位移相关的情况在它们的有效折射率曲线中表现出两个异常, 这是由于第二层和第三层的位移以及基函数值的截断所致, 当创建各层中的槽时应用了这种截断。此外, 人们可能会注意到在 $[0, 0, 0]$ mm 位移的情况下, 折射率在孔径边界处偏离了 1, 图 3(b)。这些不规则性导致有效折射率梯度的间断, 这可能导致焦点位置相对于预期位置发生偏移。

V. 红外应用的可扩展性

虽然可重构金属透镜通常难以在高静态性能和后制造调谐之间取得平衡, 因为调节机制通常会降低原有的静态性能, 我们的梯度折射率透镜概念通过使用第一类切比雪夫多项式的二阶项作为静态轮廓, 并利用更高阶来实现可重构性, 解决了这一挑战。这种方法最小化了扰动, 使具有高性能的调谐金属透镜得以实现。虽然目前仅在微波中展示了这些概念, 但它们可以很容易地扩展到更短的波长, 特别是红外区域。热红外光谱包括中波和远红外频段, 支持传感和成像中的关键应用, 包括宽温度范围内的热成像、分子振动指纹的化学光谱学以及通过大气透过窗口进行的遥感 [17], [18]。然而, 虽然麦克斯韦方程中的场是可以放缩的, 但机械振动源不可以, 这需要不同的材料选择。从微波到红外频率, 典型电介质由于频率色散表现出较低的折射率, 而金属则经历增加的欧姆损耗, 偏离了理想导体行为。然而, 存在有前景的候选材料, 包括 Ge、SiO₂、CaF₂、ZnSe, 尤其是硫族化合物相变材料, 这些材料在远红外区域 [19] 仍保持高折射率和低损耗。制造也可以转向纳米制造方法, 包括光学光刻和纳米打印, 而动态调制可以通过 MEMS [20]、可调焦耳加热 [21], [22] 和相变切换 [19] 实现, 这表明将这些透镜技术扩展到更广泛的应用领域具有广阔的前景。

VI. 结论

在这项工作中, 我们介绍了一种用于聚焦和波束成形应用的可重构梯度折射率透镜。该透镜沿光轴分层, 通过沿横向机械位移不同材料形成的各层来实现焦距

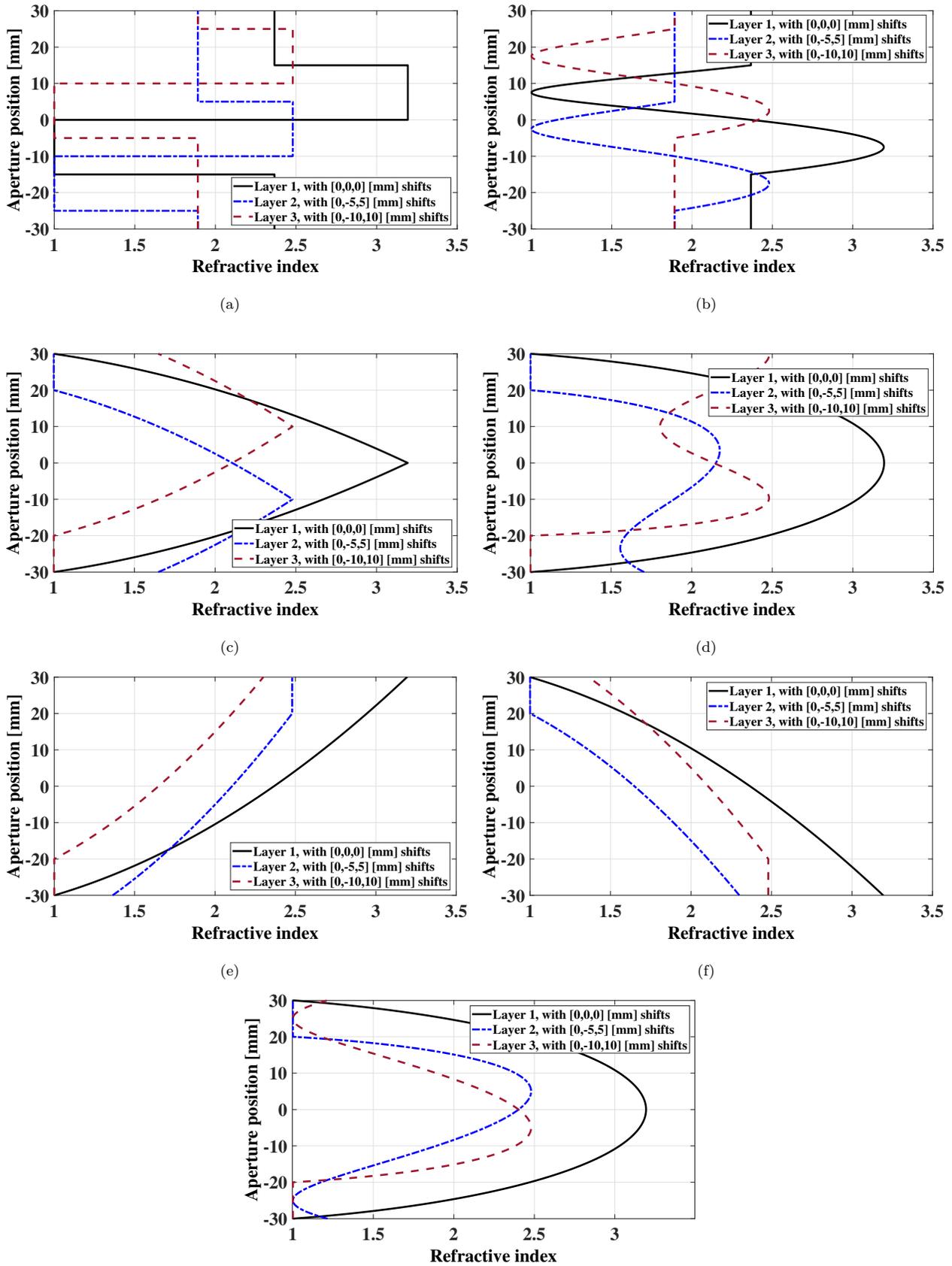
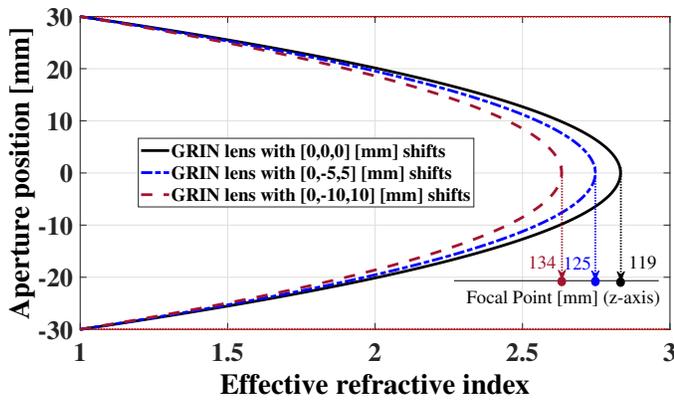
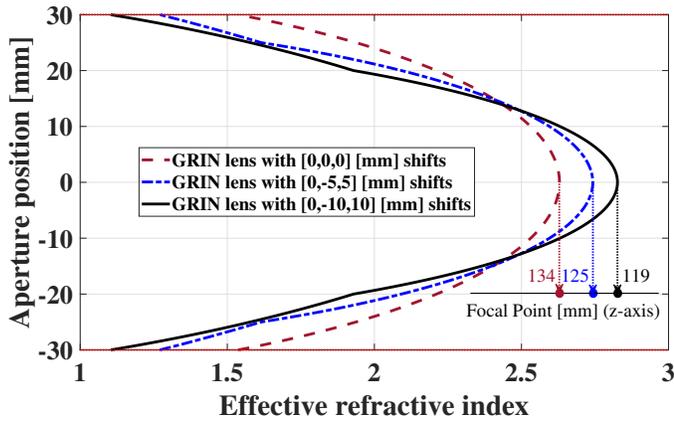


图 2. 折射率分布为相对介电常数的梯度折射率透镜层剖面: (a) 哈尔小波, (b) 正弦波, (c) 锯齿波, (d) 列 egendre 多项式, (e) 线性增加, (f) 线性减少, 以及 (g) 第一类 Chebyshev 多项式的三种相互位移情况。



(a)



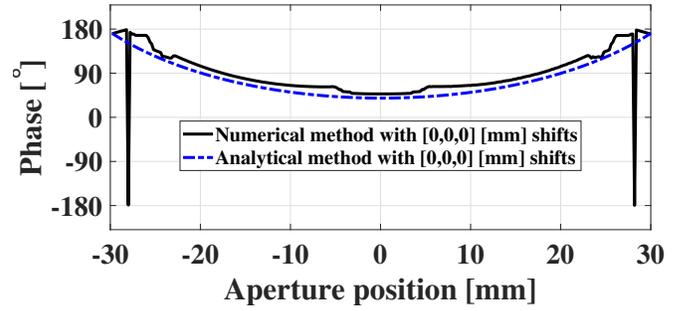
(b)

图 3. 有效折射率分布和焦点: (a) 三种相互位移情况的理想分布, 以及 (b) 用于三种相互位移情况的 3 层梯度折射率透镜, 各层厚度分别为 1.02、0.508 和 0.508 毫米。

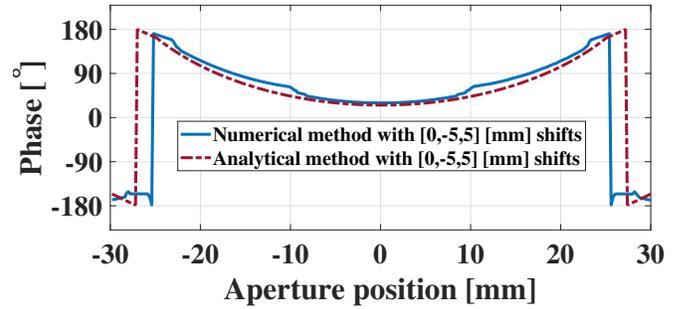
控制。沟槽按照适当的函数基所规定的轮廓在层中蚀刻, 以达到所需的等效折射率分布。选择基础函数、材料和层的偏移是基于优化算法指导的。经过广泛的评估, 第一类切比雪夫多项式被选作基本函数。我们获得了一个 3 层可重构梯度折射率透镜的分析和数值结果, 该透镜具有与 Rogers RO3006 和 RO3010 基板类似的等效折射率, 并且阻抗匹配的磁电介质层。所获得的分析和数值结果清晰地证明了提出的可重构梯度折射率透镜概念在物理上的有效性。我们的方法也易于扩展到红外频段, 只需对材料选择和制造方法进行适当调整即可实现更广泛的应用范围。

致谢

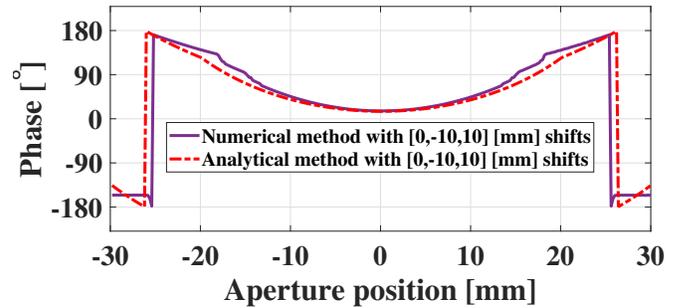
本工作得到了 FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P. 的资助, 项目参考号为 UIDB/50008/2020, 并具有 DOI 标识符 10.54499/UIDB/50008/2020。K.K. 感谢 Fundação



(a)



(b)



(c)

图 4. 由超元胞生成的 3 层 GRIN 透镜的解析和数值缠绕相位分布: (a) 层移为 [0,0,0] [毫米], (b) 层移为 [0,-5,5] [毫米], 以及 (c) 层移为 [0,-10,10] [毫米]。

para a Ciência e a Tecnologia (葡萄牙科学和技术基金会) 通过卡内基梅隆大学葡萄牙计划下编号 PRT/BD/154201/2022 的奖学金共资助。A.A. 感谢 Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) 在 PhD 助学金 ref 下的资金支持。2022.13933.BD

参考文献

- [1] W.E. Kock, "Metal-Lens Antennas," *Proceedings of the IRE*, Vol. 34, No. 11, pp. 828–836, 1946.
- [2] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier optics," *Publisher: Roberts and Company publishers*, 2005.
- [3] G. Peeler and D. Archer, "A two-dimensional microwave luneberg lens," *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–23, 1953.

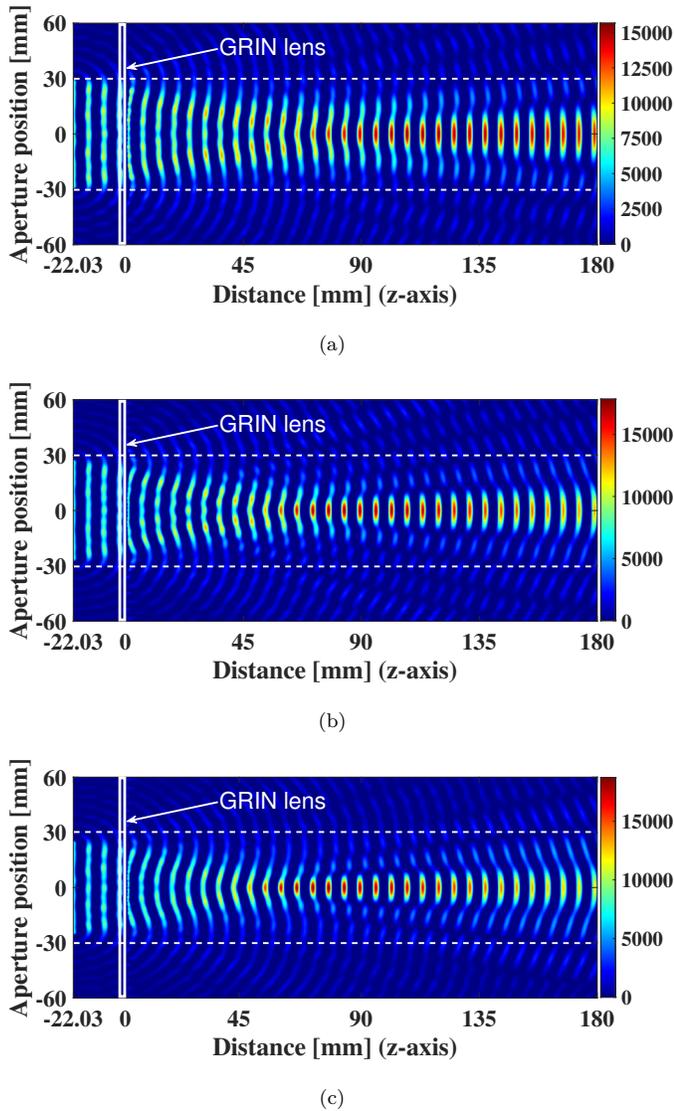


图 5. 焦场附近三层层状 GRIN 透镜的电场强度分布, 对于不同的层位移: (a) 无位移; (b) $[0, -5, +5]$ 毫米位移; (c) $[0, -10, 10]$ 毫米位移。

[4] S. Raman, N.S. Barker and G.M. Rebeiz, “A W-band dielectric-lens-based integrated monopulse radar receiver,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol. 46, No. 12, p.p. 2308–2316, 1998.

[5] W. Tang, J. Chen and T.J. Cui, “Metamaterial Lenses and Their Applications at Microwave Frequencies,” *Advanced Photonics Research*, Vol. 2, No. 10, p.p. 2100001, 2021.

[6] X. Chen, H.F. Ma, X.Y. Zou, W.X. Jiang and T.J. Cui, “Three-dimensional broadband and high-directivity lens antenna made of metamaterials,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, No. 4, p.p. 044904, 2011.

[7] Y. Meng, J. Yi, Sh.N. Burokur, L. Kang, H. Zhang and D.H. Werner, “Phase-modulation based transmitarray convergence lens for vortex wave carrying orbital angular momentum,” *Opt. Express*, Vol. 26, No. 17, p.p. 22019–22029, 2018.

[8] N. Gopalsami, S. Bakhtiari, S.L. Dieckman, A.C. Raptis and M.J. Lepper, “Millimeter-wave imaging for nondestructive evaluation of materials,” *Materials Evaluation*; (United States), Vol. 52, No. 3, 1994.

[9] S. Datta, A. Tamburrino and L. Udupa, “Gradient Index Metasurface Lens for Microwave Imaging,” *Sensors*, Vol. 22, No. 21, 2022.

[10] A.M. Hanninen and E.O. Potma, “Nonlinear optical microscopy with achromatic lenses extending from the visible to the mid-infrared,” *APL Photonics*, Vol. 4, No. 8, p.p. 080801, 2019.

[11] B.A. Slovick, Zh.G. Yu and S. Krishnamurthy, “Generalized effective-medium theory for metamaterials,” *Phys. Rev. B*, Vol. 89, No. 15, p.p. 155118, 2014.

[12] T. Makkissy, R. Gillard, E. Fourn, M. Ferrando-Rocher, E. Girard, H. Legay and L. Le Coq, “Phoenix’ reflectarray unit cell with reduced size and inductive loading,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 10, No. 12, p.p. 1363–1370, 2016.

[13] A. Alù, “First-principles homogenization theory for periodic metamaterials,” *Phys. Rev. B*, Vol. 84, No. 7, p.p. 075153, 2011.

[14] R.J. Chaky, E.B. Whiting, C.A. Mussman, B. Mackertich Sengerdy, S.D. Campbell, P.L. Werner and D.H. Werner, “Improved Reflectarray Feeds Using Gradient Index Lenses,” *2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI)*, p.p. 1523–1524, 2023.

[15] S.A. Rezaeieh, A. Darvazehban, M. Khosravi Farsani and A.M. Abbosh, “Body-Matched Gradient Index Lens Antenna for Electromagnetic Torso Scanner,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 69, No. 10, p.p. 6165–6174, 2021.

[16] J.W. Allen and B.I. Wu, “Design and fabrication of an RF GRIN lens using 3D printing technology,” *International Society for Optics and Photonics*, Vol. 8624, p.p. 86240V, 2013.

[17] D.G. Baranov, Y. Xiao, I.A. Nechepurenko, A. Krasnok, A. Alù and M.A. Kats, “Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters,” *Nat. Mater.*, Vol. 18, p.p. 920 –930, 2019.

[18] Y. Li, W. Li, T. Han, X. Zheng, J. Li, B. Li, Sh. Fan and Ch.W. Qiu, “Transforming heat transfer with thermal metamaterials and devices,” *Nat Rev Mater.*, Vol. 6, p.p. 488 –507, 2021.

[19] H. Kim, X. Liu, Z. Wang, X. Fang, G. Piazza and S. Shen, “Hybrid Plasmonic-GeTe Active Metasurfaces with High Tunability,” *Advanced Photonics Research*, p.p. 2400132, 2024.

[20] X. Liu and W.J. Padilla, “Reconfigurable room temperature metamaterial infrared emitter,” *Optica*, Vol. 4, no. 4, p.p. 430–433, 2017.

[21] X. Liu, Lin Jing, X. Luo, B. Yu, Sh. Du, Z. Wang, H. Kim, Y. Zhong and S. Shen, “Electrically driven thermal infrared metasurface with narrowband emission,” *Applied Physics Letters*, Vol. 121, no. 13, p.p. 131703, 2022.

[22] X. Liu, Y. Zhong, Z. Wang, T. Huang, S. Lin, J. Zou, H. Wang, Zh. Wang, Zh. Li, X. Luo, R. Cheng, J. Li, H. S. Yun, H. Wang, J. Kong, X. Zhang and S. Shen, “Electrically Programmable Pixelated Graphene-Integrated Plasmonic Metasurfaces for Coherent Mid-Infrared Emission,” *arXiv:2403.07145 [physics.optics]*, 2024.