

基于周期结构负反射的远场增强成像研究

杨丹青 王莉 王新龙

Research on far-field enhanced imaging based on negative reflection of periodic structure

Yang Dan-Qing Wang Li Wang Xin-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双层周期加肋有限长圆柱壳声散射精细特征研究

Acoustic scattering from the finite periodically ribbed two concentric cylindrical shells

物理学报.2014, 63(21): 214301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214301>

局域共振型声子晶体中的缺陷态研究

Defect state of the locally resonant phononic crystal

物理学报.2014, 63(3): 034305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034305>

Scholte 波与含泥沙两相流介质属性关系的分析及仿真验证

Analysis and experimental verification of the relation between Scholte wave velocity and sediment containing two-phase fluid properties

物理学报.2013, 62(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194301>

一种含圆柱形谐振散射体的黏弹材料低频吸声机理研究

Low-frequency acoustic absorption mechanism of a viscoelastic layer with resonant cylindrical scatterers

物理学报.2013, 62(15): 154301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154301>

局域共振复合单元声子晶体结构的低频带隙特性研究

Low-frequency band gaps in phononic crystals with composite locally resonant structures

物理学报.2013, 62(13): 134302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134302>

基于周期结构负反射的远场增强成像研究*

杨丹青[†] 王莉 王新龙

(南京大学声学研究所, 南京 210093)

(2014年7月14日收到; 2014年9月3日收到修改稿)

远场高分辨率成像是近几年来声学和光学领域的研究焦点之一, 倏逝波无法在介质中传播成为将高分辨率成像带入远场的最大困难. 本文提出了一种均匀排列的散射钢柱构成的超构散射体成像方式, 利用周期结构负反射现象将倏逝波信息转化为可传播波来增强成像. 有限元数值模拟被用来研究和验证该方案的可行性, 结果显示波长 3.4 mm 的声波可以在 20 cm 外的远场获得大约 0.6 个波长的成像分辨能力. 通过减小散射体的晶格常数有望达到更高分辨率成像.

关键词: 负反射, 远场, 成像

PACS: 43.20.+g, 43.58.+z, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.64.054301

1 引言

高分辨率成像技术成为光学和声学几年来的热门话题和研究焦点^[1,2]. 自从完美透镜^[3]的概念被提出, 许多人工超材料被尝试用于打破电磁波和声波的衍射极限^[4,5]. 在之前的研究报道中提出了利用光子或声子晶体^[6,7]的负折射效应^[8,9]和各向异性材料^[10,11]与 FabryPerot 共振耦合^[12,13]的办法实现高分辨率成像. 在所有的方案中, 倏逝波的保留和放大是超分辨率成像的关键. 但倏逝波随距离指数衰减, 包含细节信息的大波矢无法到达远场使像点难以聚焦到微小尺度, 导致高分辨率的成像只能在近场获取. 放大的 hyperlens 的提出通过拥有 hyperbolic 色散关系的合成材料实现了将倏逝波沿着径向方向传播放大的能力^[14-16], 最近的研究报道 hyperlens 的运用甚至可以拓展到红外和太赫兹波段^[17,18]. 类似的角谱放大的方案最近也在 Talbot 远场效应^[19]中得到应用. 然而 hyperlens 的超大曲率和复杂的设计结构限制了其在实际中的应用.

我们通过最近的研究报道中声子晶体或者周期共振结构的负反射^[20]和异常聚焦现象^[21]设计

出一种结构相对简单的散射体, 由一圈圆形钢柱排列而成, 通过该散射体的反常反射倏逝波信息加载到可传播模式以实现增强远场成像的目的. 我们的设计实现了角谱放大和声场聚焦双重效果, 即整体放大同时局部聚焦, 利用曲面反射放大的方式, 使得角谱焦点投影在远场处故不必形成微小焦点即可达到高分辨率. 这种结构可以直接成像或者结合透镜成像, 在超声显微镜, 医学成像等领域有潜在的应用价值.

2 理论与方法

2.1 点声源在一维周期散射体附近的反射声场

我们首先考虑一个点声源靠近一个散射面的反射声场, 该散射面由一排小刚性柱间隔距离 d 排列而成, 假设每个散射钢柱尺寸远小于波长. 该散射体可以用多散射理论分析. 考虑钢柱的声源直接反射和其他所有柱体散射波的反射声场,

$$A_{\text{im}}(x) = sA_0 + s^2 \sum_{n=1, \infty} p_n [A_0(x + nd) + A_0(x - nd)], \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 11174140)和国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2013CB632904)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ydq890613@hotmail.com

其中 A 表示入射波在 x 方向上的分布, s 表示散射体的反射系数, p 表示圆柱体散射声压分布, 当散射体相对于波长比较小的时候, 我们只考虑一阶近似的情况, 此时 p 可以用一阶汉克尔函数表示, 其渐近形式也可以写成 $p_n = e^{i2\pi nd/\lambda} [\lambda/nd]^{1/2}$, 通过将上式写成角谱的形式可以得到散射波的角谱分量^[21],

$$A_{\text{im}}(k_x) = sA_0(k_x) + 2s^2 \sum_{n=1, \infty} p_n \cos(k_x nd), \quad (2)$$

其中 k_x 表示波矢在 x 方向上的分量. 我们要研究点源在散射体附近时的反射声场, 于是我们将点声源展开成角谱如(3)式, 代入(2)式, 同时基于散射声波随距离衰减, 我们只考虑每个散射柱附近的二次散射, 即只考虑 $n = 1$ 的情形, 更精细的结果可以通过 Mie 理论讨论.

$$A_0(k_x, k_y, z) = -\frac{1}{(2\pi)^2} \cdot \frac{1}{k_0^2 - (k_x^2 + k_y^2)}. \quad (3)$$

在小反射角的情况下, 反射声波可近似写成如下形式:

$$A_{\text{im}}(k_x) \approx -\frac{1}{4\pi^2} \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_x^2}} \left(s + 2s^2 e^{i2\pi d/\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{nd}} \right) + \frac{1}{2\pi^2} s^2 e^{i2\pi d/\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{nd}} \frac{k_x^2 d^2}{k}. \quad (4)$$

此时可以将散射声分解为一阶和二阶, (4)式前一项代表一阶散射声, 等同于有反射系数的镜面反射. 后一项代表了由于周围散射体造成的二次散射声波, 可以看出其波矢具有高斯分布的形式, 因此其空间分布也具有高斯分布从而形成一束准直的高斯声束, 通过下文所介绍的负反射现象, 我们可以进一步指出该反射声束可以在散射体外产生聚焦.

2.2 周期结构界面负反射

接下来我们讨论周期结构负反射现象. 考虑一系列平面波 $p_0(\mathbf{r}) = p_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ 斜入射到声子晶体界面^[22], 其中波矢 $\mathbf{k} = (k_0 \sin \theta, k_0 \cos \theta)$, $k_0 = \omega/c_0$ 是空气中波数, ω 是角频率, c_0 是空气中声速. 假设该声子晶体由圆形钢柱放置于空气中呈方形排列而成, 晶格常数为 a . 散射声波矢沿边界切向分量满足 $k_t = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + n \frac{2\pi}{a}$, 其中 \mathbf{v} 为边界单位切矢量, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 分别表示 n 阶散射波矢.

任何 n 满足 $\left| \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + n \frac{2\pi}{a} \right| \leq k_0$ 的条件可以对应着一种可传播反射波模式, 反之将以倏逝波或者表面波形式存在. 通过流体中声波的色散关系分析, 当存在 n 使得 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + n \frac{2\pi}{a} < 0$ 时, 反射波方向将与入射波方向处于表面法线的同一侧, 即是与正常反射情形相反的负反射效应, 且反射角可以通过波矢关系导出, 第 n 阶反射波反射角

$$\beta_n = \arcsin \left[\frac{1}{k_0} \left(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + n \frac{2\pi}{a} \right) \right],$$

β 符号的正负分别代表了正反射和负反射情形.

2.3 散射面反射成像

通过以上理论, 我们设计了一种远场增强成像的方案. 如图1所示, 作为对比, 示意图图1(a)显示了一个圆柱刚性散射体对点声源的散射作用, 图中箭头表示声线的传播方向, 一个凸镜面使声波发散无法在远场产生焦点. 图1(b)显示了通过负反射一个点声源在沿径向方向远场处会产生焦点从而帮助成像. 该散射体由一圈小钢柱围绕而成, 中间放置一个大钢柱. 研究表明负反射现象主要由边界切向的周期结构产生, 单层排列的散射体也可

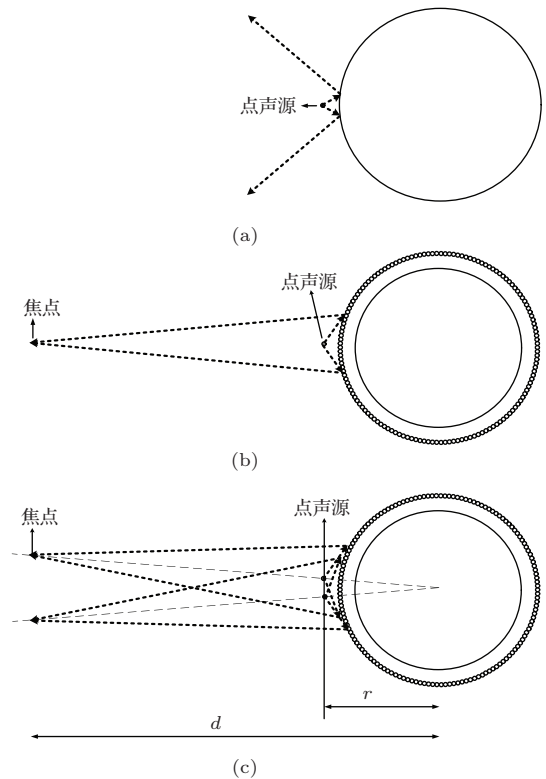


图1 负反射成像原理图 (a) 常规刚性散射体将发散入射声波导致无法聚焦; (b) 通过负反射散射体点源发出的声波将在远场处聚焦成像; (c) 两个相邻点源分别在远场聚焦, 焦点距离较点源距离有放大作用

以达到产生负反射的目的, 为了减少透射声能量损失, 中间放置一个大散射体阻止声波透射. 相对于直接通过凹面镜聚焦, 用负反射聚焦有明显的优势. 其一, 由于柱对称性对各个方向的点声源其像点均匀分布于沿径向方向. 而后, 负反射成像可以利用凹面镜无法提取倏逝波信息以改善成像精度.

如图 1(c) 示意, 显示了两个点声源在散射体成像的. 我们在散射体表面放置相距 l 的两个点声源, 相距散射体中心 r . 远场像点距离散射体距离 d , 于是两个焦点相距 $l \cdot d/r$, 显示出该散射对物体有放大作用, 于是成像分辨距离缩小到焦点宽度的 r/d , 由于远场实现微小聚焦的困难, 这种放大作用对远场高分辨率成像是非常必要的. 这种放大效应等效于将空间转化为角谱, 据此, 提高成像分辨率可以通过拉长焦点距离或者减小散射体半径. 对倏逝波的转化需要减小出射角度, 对应于较大的切向波矢, 不利于减小焦点, 然而通过张角的放大作用, 较大焦点也可以达到高精度的成像.

3 结果与讨论

3.1 周期结构负反射

接下来我们通过有限元 (FEM) 仿真研究声波在弯曲界面声子晶体处的反射关系, 我们放置一束高斯束斜入射到该声子晶体表面. 如图 2, 该声子晶体由 5 层半径为 0.5 mm 的钢柱按弧形排列而成, 该弧形的曲率半径为 100 mm, 钢柱之间间隔 1.5 mm, 每层间隔 1.5 mm. 散射钢柱纵波速度取 7670 m/s, 密度 6000 kg/m³, 空气声速取 343 m/s, 密度 1.2 kg/m³. 由于散射体和空气之间巨大的阻抗差异, 散射体也可以作为刚体近似. 高斯声束入射方向与 x 轴呈 60° 夹角. 图 2 是由有限元计算的声场, 颜色深度代表声压级的大小. 图 2(a) 显示频率为 0.65 MHz 时激发出两种反射波分别位于法线两侧, 显示了负反射效应的存在, 另外透射声波也显示除了正反方向的声波, 其机理与反射类似. 图中负反射对应于 -1 阶散射的作用, 并且通过测量法线此时反射声能量集中于负反射方向. 当把声波频率提高到 0.75 MHz 时如图 2(b) 所示, 可同时观察到两束负反射声波, 当频率继续提高, 满足反射关系的阶数继续增加将会有更多反射模式出现.

值得指出的是如果入射波切向波矢 k_{it} 大于 k_0 , 将形成无法传播的倏逝波, 在常规反射时反射声波任然保持倏逝波波矢特征导致同样不能传播,

然而周期结构负折射提供了一种方式, 使得入射倏逝波得到的反射波切波矢 k_t 小于 k_0 , 例如 $n = -1$ 时设置晶格常数使得 $|k_t| = |\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} - (2\pi/a)| \leq k_0$, 于是倏逝波的信息可以转化为可传播信息, 这对于远场超分辨率成像是至关重要的. 如同负折射效应一样, 负反射同样可以在超声成像中扮演重要的角色.

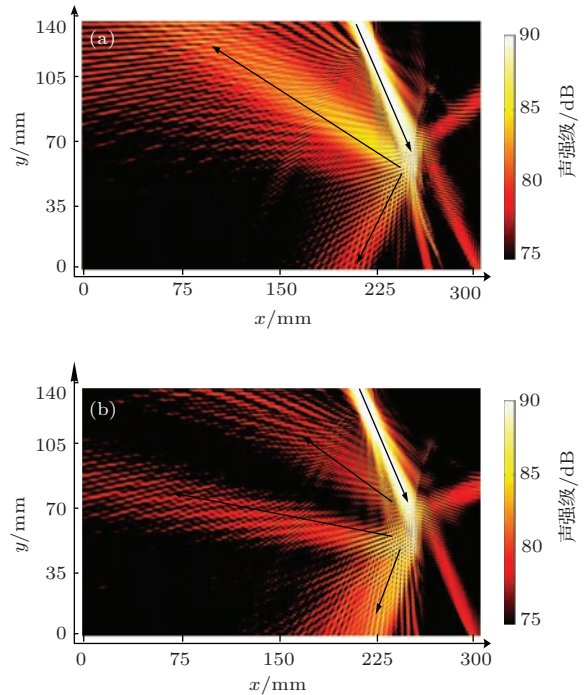


图 2 (网刊彩色) 周期散射体反射的声场分布图 (入射方向与 x 轴呈 60° 夹角) (a) 声源频率为 0.65 MHz 时发生正常反射和负反射; (b) 声源频率提高到 0.75 MHz 时, 产生两个负反射声束

3.2 点源成像

为了验证和进一步分析该设计对成像的作用, 我们借助有限元分析进行仿真分析. 我们所用结构为 120 个小钢柱均匀放置于圆周上每个间隔 3° 放置于空气中, 空气密度选取 1.2 kg/m³, 声速 343 m/s, 小钢柱半径 0.5 mm, 整体结构半径 50 mm, 内部大钢柱选取 42 mm 半径, 声源频率选取 0.1 MHz, 空气中波长 3.43 mm, 图 3(b) 中两个点声源间隔大约 7 mm. 如图 3(a), 我们将点声源放置于非常靠近散射表面处, 得到一条垂直于散射体表面的声束, 声波能量集中于这条准直的声束中, 与前文理论分析符合. 我们在远离结构的地方选取成像平面即可实现聚焦成像. 可以看出声柱越细越有利于成像分辨率. 图 3(c) 表示在距离散射中心 200 mm 处测得的声强级在横向的空间分布, 中心峰表示了成像焦点. 图 3(b) 中设置与之前一致,

只是放置两个点声源在散射体附近相距 7 mm 左右, 图 3(d) 是测量距离散射中心 200 mm 处的声强分布, 距离 7 mm 的两个点声源可以被完全区分. 图 3 中所示焦点的半宽大约为 16 mm, 焦点与散射中心的距离是点源与散射中心的 4 倍, 所以该成像的有效区分极限在 4 mm 左右, 大约 1.2 个波长.

另外, 由图 3 的声场可以看出, 内部大反射刚性柱体不仅减少了透射波损失, 还在于小柱之间形成了一个类似波导的结构使得声波沿圆周方向运动, 对反射波的准直具有很大影响 [23], 我们的研究显示大钢柱半径为 42 mm 左右时反射声波的准直性最好.

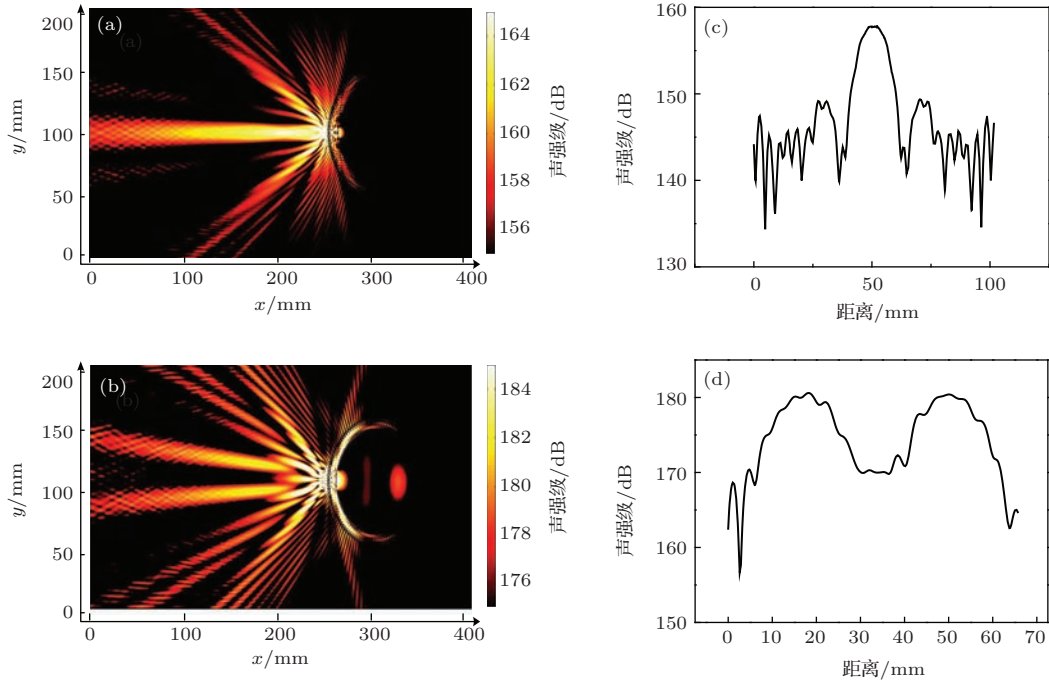


图 3 (网刊彩色) 负反射成像声场图 (a) 单个点声源聚焦成像; (b) 两个点声源聚焦成像; (c) 对应 (a) 距离散射中心 200 mm 处屏上声场强度分布; (d) 对应 (b) 距离散射中心 200 mm 处屏上声场强度分布

3.3 二次聚焦与增强成像

根据上文讨论的结果, 利用我们所提出的负反射成像可以达到略大于一个波长尺度的分辨能力. 然而实现更高精度的成像则更具价值和吸引力. 我们在远场像点处放置一个常规声透镜用于再次聚焦像点, 声透镜也放置于距离散射中心 200 mm 处,

如图 4(a) 所示. 经过声透镜的二次聚焦, 焦点尺度有了明显的改善, 同样我们测量新焦点处的声强级, 如图 4(b) 所示, 相对于无透镜情况焦点尺度有了明显缩小, 测量半宽大约 8 mm. 此时区分极限大约为 $2 \text{ mm} \approx 0.6\lambda$, λ 代表波长. 借助该散射结构的角谱放大作用, 透镜成像获得了更高精度的分辨能力.

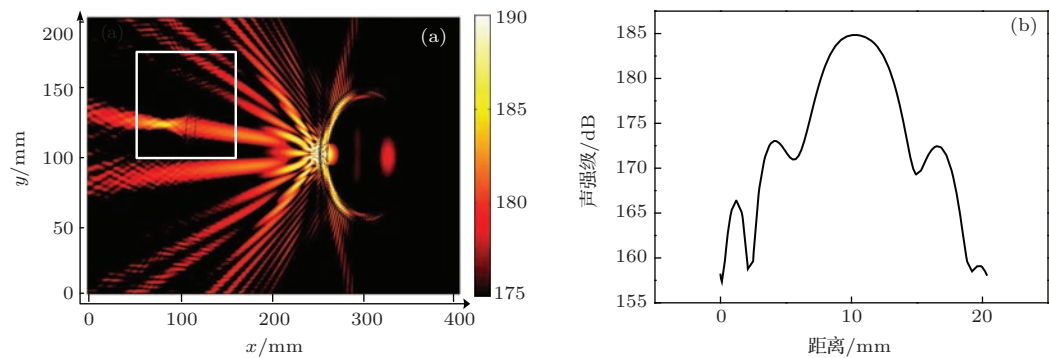


图 4 (网刊彩色) 经过声透镜二次聚焦声场图 (a) 放大图显示了声透镜的聚焦效果缩小了声柱; (b) 图中放大的焦点处声强分布, 焦点有明显缩小

除了增加透镜进行二次成像,减小声子晶体的晶格常数也是提高分辨率的必要手段,然而减小晶格常数意味着负反射所需的反射阶数更高,将声波能量集中于所需要的反射阶数还需要更多的设计优化.

4 结 论

利用周期结构布拉格散射导致的负反射和聚焦效应,我们设计出一种新型的结构较为简单的远场超声成像方式.这种成像可以同时达到整体放大和局部聚焦的效果,并且可以将倏逝波转化为可传播波来增强成像.我们通过有限元数值计算模拟了该设计的性能,在我们的参数设置下,该方案的分辨能力达到大约1.2个波长.另外这种基于反射波成像方式可以结合已有的透镜成像,在我们的工作中配合传统声透镜分辨能力可以达到0.6个波长.我们还指出通过更进一步减小散射体间距有望得到更高分辨率的成像效果.

参考文献

- [1] Zhang X, Liu Z W 2008 *Nature Mater.* **7** 435
- [2] Wong A M H, Eleftheriades G V 2013 *Scientific Reports* **10** 1038
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Christensen J, de Abajo F J G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 124301
- [5] Garcia-Chocano V M, Christensen J, Sanchez-Dehesa J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 144301
- [6] Liu H, Liu D, Zhao H, Gao Y h 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194208 (in Chinese) [刘会, 刘丹, 赵恒, 高义华 2013 物理学报 **62** 194208]
- [7] Zhan S G, Liang B M, Zhu X F, Chen J B, Zhuang S L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154212 (in Chinese) [湛胜高, 梁斌明, 朱幸福, 陈家璧, 庄松林 2014 物理学报 **63** 154212]
- [8] Quan X L, Yang X B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5313
- [9] Yu G J, Bu S, Wang X, Ji H Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194703 (in Chinese) [于国君, 卜胜利, 王响, 纪红柱 2012 物理学报 **61** 194703]
- [10] Li C H, Jia H, Ke M Z, Li Y X and Liu Z Y 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 135102
- [11] Ao X Y, Chan C T 2008 *Phys. Rev. E* **77** 025601
- [12] Christensen J, Jung J, Martin-Moreno L, Yin X, Fok L, Zhang X, Garcia-Vidal F J 2011 *Nature Phys.* **7** 52
- [13] Cheng Y, Zhou C, Wei Q, Wu D J, Liu X J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 224104
- [14] Salandrino A, Engheta N 2006 *Phys. Rev. B* **74** 075103
- [15] Jacob Z, Alekseyev L V, Narimanov E 2006 *Optics Express* **14** 8247
- [16] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, Sun C, Zhang X 2007 *Science* **10** 1126
- [17] Andryieuski A, Lavrinenko A L 2006 *Phys. Rev. B* **86** 121108
- [18] Zhang T, Chen L, Li X 2013 *Optics Express* **21** 20888
- [19] Azana J, Chatellus G 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 213902
- [20] Zhao D G, Ye Y T, Xu S J, Zhu X F, Yi L 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 043503
- [21] Cheng Y C, Redondo J, Staliunas K 2014 *Phys. Rev. A* **89** 033814
- [22] Xu S, Qiu C, Liu Z 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 094505
- [23] Lu M H, Feng L, Ni X, Chen Y F, Zhu Y Y, Zhu S N, Ming N B 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 164301

Research on far-field enhanced imaging based on negative reflection of periodic structure*

Yang Dan-Qing[†] Wang Li Wang Xin-Long

(Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Received 14 July 2014; revised manuscript received 3 September 2014)

Abstract

Far-field high resolution imaging is one of the research focus in the field of acoustics and optics in recent years. The greatest difficulty for high resolution imaging in the far field is the evanescent waves not being able to propagate in the medium. A kind of scatterers composed of uniformly spaced steel columns is presented in this work. Negative reflection of periodic structure can change the evanescent waves to the waves that can propagate to enhance imaging. A finite element simulation has been used to study and verify the feasibility of the scheme. Results show that with the sound wave of 3.4 mm wavelength one can obtain an imaging resolution of about 0.6 wavelength in the far field of 20 cm. We further note that by reducing the lattice constant of scatterers a higher far-field resolution imaging can be hopefully reached.

Keywords: negative reflection, far field, imaging

PACS: 43.20.+g, 43.58.+z, 43.35.+d

DOI: [10.7498/aps.64.054301](https://doi.org/10.7498/aps.64.054301)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174140), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB632904).

[†] Corresponding author. E-mail: ydq890613@hotmail.com