

负质量密度声学超材料的反常多普勒效应

刘松 罗春荣 翟世龙 陈怀军 赵晓鹏

Inverse Doppler effect of acoustic metamaterial with negative mass density

Liu Song Luo Chun-Rong Zhai Shi-Long Chen Huai-Jun Zhao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 024301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

阵元随机均匀分布球面阵列联合噪声源定位方法

Noise source identification by using near field acoustic holograpy and focused beamforming based on spherical microphone array with random unifrom distribution of elements

物理学报.2017, 66(1): 014303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014303>

海面随机起伏对噪声场空间特性的影响规律

Ocean surface wave effect on the spatial characteristics of ambient noise

物理学报.2017, 66(1): 014301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014301>

高对称型声子晶体自准直弯曲及分束

Bending and splitting of self-collimated beams in high symmetry sonic crystal

物理学报.2016, 65(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094301>

水下掩埋目标的散射声场计算与实验

Acoustic scattering from elastic target buried in water-sand sediment

物理学报.2016, 65(6): 064301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064301>

声学脉冲序列及全透声机理研究

Studies on the mechanism of acoustic pulse train and full transmission

物理学报.2016, 65(6): 064302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064302>

负质量密度声学超材料的反常多普勒效应*

刘松 罗春荣 翟世龙 陈怀军 赵晓鹏†

(西北工业大学理学院, 智能材料实验室, 西安 710129)

(2016年8月30日收到; 2016年10月14日收到修改稿)

能够按照人们的意愿控制声波的传播一直是研究者们想要解决的问题. 一类由人工微结构组成的声学超材料吸引了研究者的注意, 因为它具有许多天然材料所不能实现的奇特性质, 例如负折射、平板聚焦和反常多普勒等. 本文中, 我们制备了一种二维的负质量密度声学超材料, 在频率 1560—5580 Hz 范围内质量密度为负值, 折射率在 1500—5480 Hz 范围内为负值, 设计了一种测量多普勒效应的测试装置, 测试了其在 1200—6500 Hz 内的多普勒效应. 实验结果表明: 在所制备的声学超材料负折射区域内, 以声源的频率为 2000 Hz 为例, 当声源靠近探测器时, 探测器探测到的频率为 1999.27 Hz, 与声源相比有 0.73 Hz 的减小; 而当声源远离探测器时, 探测器探测到的频率为 2000.68 Hz, 与声源相比有 0.68 Hz 的增大, 即在频率点为 2000 Hz 时, 有明显的反常多普勒现象. 对整个负区域内进行选点测量, 发现在整个负区域内有宽频带的反常多普勒效应现象.

关键词: 负质量密度, 声学超材料, 反常多普勒

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 43.28.+h

DOI: 10.7498/aps.66.024301

1 引言

近年来, 人们设计出了各种不同的人工超材料, 以实现自然界中不存在的性质. 将负介电常数金属杆阵列^[1]和负磁导率的开口谐振环^[2]耦合在一起可以实现负介电常数和负磁导率的电磁超材料, 电磁超材料具有负折射效应^[3-8]、完美透镜效应^[9,10]、反常 Cherenkov 辐射^[11]. 由于声波和电磁波的相似性, 声学超材料也成为研究热点. 基于负质量密度^[12-14]和负弹性模量^[15-17]的声学超材料^[18,19]也能够实现自然界中许多奇异特性, 如隐身斗篷^[20]、超棱镜^[21]等. 反常多普勒效应^[22]也是超材料的特性之一, 电磁超材料已经在实验中实现了光频段和微波段的反常多普勒效应^[23,24], 而声学超材料的反常多普勒效应^[25]在实验上研究进展缓慢. 直到 2010 年, Lee 等^[26]利用制备的一维双负声学复合介质, 即在一维长管中排列周期性的薄膜

和侧面开口孔洞, 利用运动的声源测试了反常多普勒现象.

2 二维负质量密度声学超材料

本文制备了一种基于空心管结构模型的二维负质量密度声学超材料^[12], 其样品实物图如图 1(a) 所示. 图 1(b) 展示了两个横向周期性排列的“超原子”簇模型示意图, 每个“超原子”簇由七种不同长度的“超原子”(空心管) 构成. 根据编号顺序, 这七种“超原子”结构的管长分别为 29, 32.5, 41, 48, 55, 67 和 98 mm. 根据参考文献^[14]我们可以知道, 空气会在每种“超原子”的内腔中来回振荡产生振动速度, 当外界激励声波的频率达到这种“超原子”的共振频率时, 大量的能量会被局域在内腔中而造成空气介质的加速度方向与激励声压的方向相反, 因此就会表现出负的等效质量密度. 此时, 声波的相速度刚好与群速度反向, 因此造成声

* 国家自然科学基金 (批准号: 11674267, 51272215) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921503) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xpzha@nwpu.edu.cn

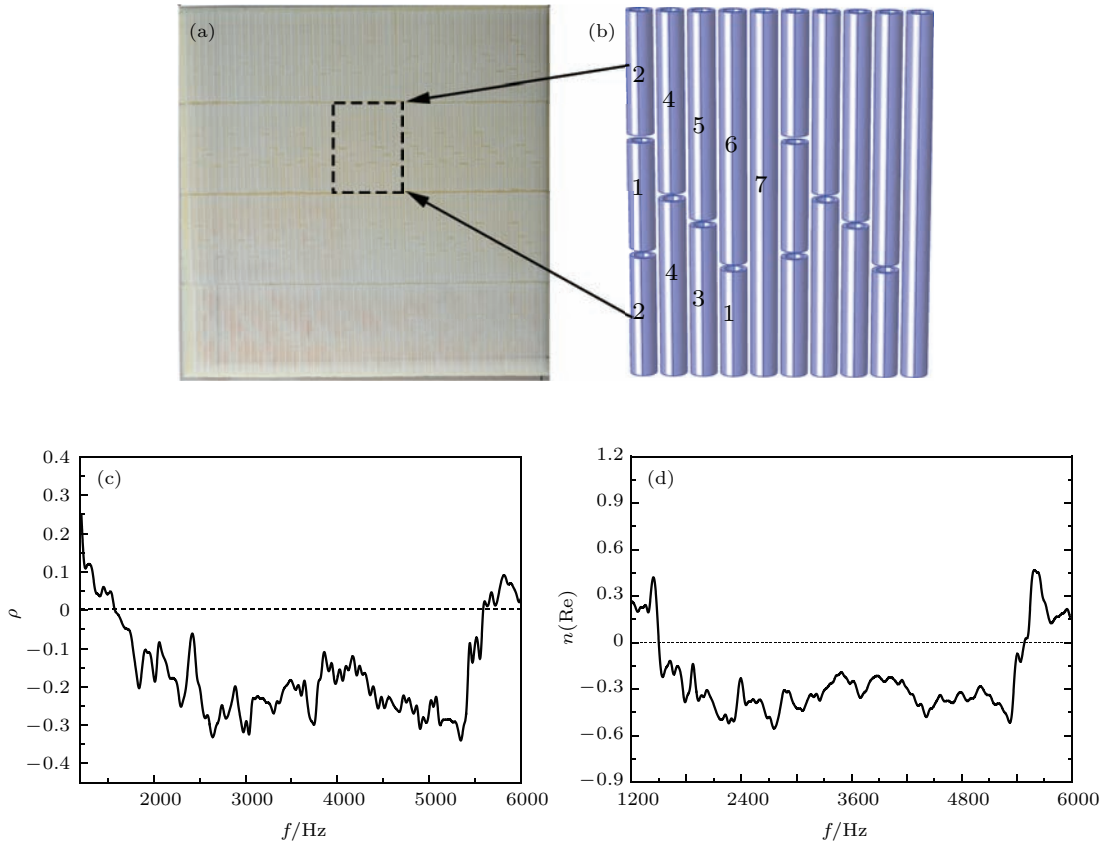


图1 (a) 二维负质量密度声学超材料实物图; (b) 结构单元示意图; (c) 质量密度曲线; (d) 折射率曲线
 Fig. 1. (a) Photograph of the 2D acoustic metamaterial with negative mass density; (b) schematic diagram of the unit cells; (c) mass density as a function of source frequency; (d) refractive index as a function of frequency.

波在这种超材料介质中的反常多普勒效应. 由于不同长度的“超原子”所具有的共振频率是不同的, 而相邻“超原子”之间只存在非常弱的相互作用, 因此将多种“超原子”组合排列形成“超原子”簇就可以展宽整个超材料的负质量密度频带^[12,25]. 在频率 1560—5580 Hz 范围内质量密度为负值, 折射率在 1500—5480 Hz 范围内为负值, 如图 1(c) 和图 1(d) 所示. 通过搭建多普勒实验平台, 研究其在测量区域内的多普勒效应.

3 实验系统与测量结果

反常多普勒实验装置如图 2 所示, 本实验的测试装置包括声频信号发生器、扬声器、麦克风、示波器和电动平移台等. 发出固定频率的扬声器声源固定在一维的电动平移台上, 位移台的移动速度为 50 cm/s. 灵敏麦克风作为探测器, 灵敏麦克风的一端连接在示波器上, 而示波器连接在电脑上, 利用

示波器自带的软件分析波形软件——Labview 软件, 把灵敏麦克风接收到的声波信号传输到示波器中, 通过 Labview 软件在电脑中显示出波形图. 灵敏麦克风的接收端放置在样品中间接收位移台从一端运动到另一端的波形信号, 最终会在电脑中显示出来. 从所接收到的波形图中可以读取到声源靠近样品和远离样品测得的频率. 与声源发出的频率相比, 可以计算出靠近与远离的频移变化. 在靠近时, 如果测得频率比声源发出的频率减小, 而远离时增大, 那么可以验证超材料在这个频率段内发生反常多普勒效应.

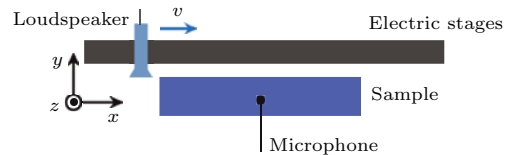


图2 多普勒实验装置图
 Fig. 2. Sketch of the experimental setup of the Doppler shifts.

多普勒公式表示为

$$f_1 = f \frac{v_p \pm v_{\text{观}}}{v_p \mp v_{\text{源}}}, \quad (1)$$

其中 $v_{\text{源}}$ 为波源相对介质的速度, $v_{\text{观}}$ 为观察者相对于介质的速度, v_p 表示波在静止介质中的传播速度, f 表示波源所发出的频率, f_1 表示探测器的实际频率; 当观察者朝波源运动时, $v_{\text{观}}$ 前的运算符号取正号; 当观察者背离波源运动时, $v_{\text{观}}$ 前取负号; 当波源靠近观察者运动时, $v_{\text{源}}$ 前取负号; 当波源背离观察者运动时, $v_{\text{源}}$ 前取正号.

而在超材料中, 当观察者靠近波源时, 接收到的频率会减小; 远离波源时, 接收到的频率会增大, 即出现了反常的多普勒现象. 在超材料中应取声波在超材料中的运动速度 v'_p , 与超材料样品的折射率的关系为 $v'_p = v/n$, 其中 v 表示空气中的声速, n 表示超材料的折射率. 多普勒公式变为

$$f'_1 = f' \frac{v/n \pm v'_{\text{观}}}{v/n \mp v'_{\text{源}}}, \quad (2)$$

这里的 $v'_{\text{源}}$ 为波源相对介质的速度, $v'_{\text{观}}$ 为观察者相对于介质的速度, f' 表示波源所发出的频率, f'_1 表示探测器的实际频率. 本文中源的速度设定为 50 cm/s, 探测器即麦克风的的速度为 0. 那么其多普勒频移 $\Delta f'$ 可以表示为

$$\Delta f' = f'_1 - f' = f' \frac{\pm v'_{\text{源}}}{v/n \mp v'_{\text{源}}}, \quad (3)$$

当观察者靠近波源时取“+”; 远离波源时取“-”.

利用文献 [12] 中所设计的超材料样品测量反常多普勒效应. 超材料样品由不同长度的塑料管组成, 样品的大小为 415 mm × 415 mm × 34 mm. 在文献中我们知道相同管长的塑料管在其共振频率附近具有负的质量密度和负的折射率; 而不同管长组合成的超材料在 1500—5480 Hz 具有负的折射率. 实验中在负折射区域内进行了多点的多普勒测量, 并在非负折射区域进行选点测量, 以便对比和验证.

4 讨论

利用图 2 的测试装置测量了不同管长组合的声学超材料样品.

根据测试的波形图, 读取单位时间内的波形个数, 计算出探测器靠近波源与远离波源时测得的频率, 来判定多普勒效应. 以声源频率为 2000 Hz, 位

移台的速度为 50 cm/s 为例, 在示波器中读取到的波形图如图 3 所示, 可以看出靠近波源时频率减小, 远离波源时频率增大, 出现反常的多普勒效应.

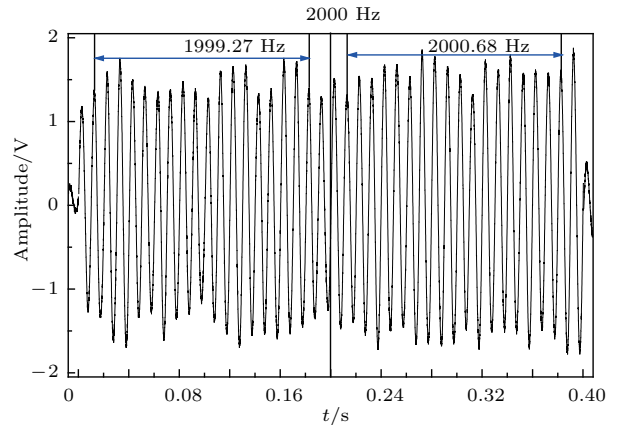


图 3 声源为 2000 Hz 时的波形图

Fig. 3. Detected oscillograms when the source frequency is 2000 Hz.

针对文献 [12] 内有不同管长组成的宽频带负质量密度声学超材料的样品, 进行了详细的多普勒实验测试. 测量的频率范围为 1500—5480 Hz. 对负区间内和区间外的频率进行多点测量, 并利用多普勒公式进行理论上的计算, 结果如图 4 所示.

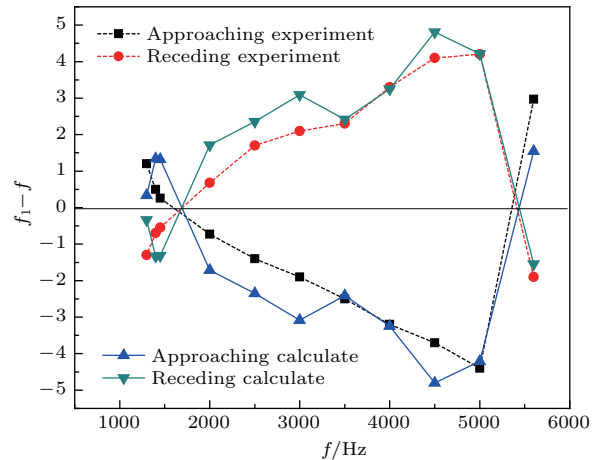


图 4 多普勒频移图

Fig. 4. Frequency shift as a function of source frequency.

从图 4 中可以看出, 声学超材料在负区域内出现反常的多普勒效应, 当探测器靠近声源时, 测量的频率减小, 反之增加; 而在负区域外当探测器靠近声源时, 测量的频率增加, 反之减小. 我们已经在前期的工作 [25] 中证明了虽然反常多普勒频移在负区域的边界处会逐渐减小, 但是实验测得的结果并不会受到实验误差的影响.

5 结 论

利用已设计的声学超材料样品, 测量了在负折射频段内的多普勒效应. 以声源的频率为2000 Hz为例, 当声源靠近探测器时, 探测器探测到的频率为1999.27 Hz, 与声源相比有0.73 Hz的减小; 而当声源远离探测器时, 探测器探测到的频率为2000.68 Hz, 与声源相比有0.68 Hz的增大, 即在频率点为2000 Hz时, 有明显的负折射现象. 对整个负区域内进行选点测量, 发现在整个负区域内有宽频带的多普勒效应现象, 实验结果表明在1500—5480 Hz频率段内有反常的多普勒效应, 根据推导的反常多普勒公式理论上计算了超材料1500—5480 Hz频率段内多普勒频移, 并与实验结果进行了对比, 发现实验结果与理论计算相一致.

参考文献

- [1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 10
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [5] Bongard F, Lissek H, Mosig J R 2010 *Phys. Rev. B* **82** 094306
- [6] Zhang S, Park Y S, Li J S, Lu X C, Zhang W L, Zhang X 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 023901
- [7] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 3
- [8] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, Ulin-Avila E, Genov D A, Bartal G, Zhang X 2008 *Nature* **455** 376
- [9] Zhang X, Liu Z W 2008 *Nat. Mater.* **7** 435
- [10] Liu Z W, Lee H, Xiong Y 2007 *Science* **315** 1686
- [11] Chen H S, Chen M 2010 *Mater. Today* **14** 34
- [12] Chen H J, Zhai S L, Ding C L, Liu S, Luo C R, Zhao X P 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 054905
- [13] Zhai S L, Chen H J, Ding C L, Zhao X P 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 475105
- [14] Chen H J, Zeng H C, Ding C L, Luo C R, Zhao X P 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 104902
- [15] Ding C L, Zhao X P, Hao L M, Zhu W R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044301 (in Chinese) [丁昌林, 赵晓鹏, 郝丽梅, 朱卫仁 2011 物理学报 **60** 044301]
- [16] Ding C L, Hao L M, Zhao X P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074911
- [17] Zeng H C, Luo C R, Chen H J, Zhai S L, Ding C L, Zhao X P 2013 *Solid State Commun.* **173** 14
- [18] Cheng Y, Zhou C, Yuan B G, Wu D J, Wei Q, Liu X J 2015 *Nat. Mater.* **14** 1013
- [19] Cheng Y, Xu J Y, Liu X J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 045134
- [20] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [21] Zhu J, Christensen J, Jung J, Martin-Moreno L, Yin X, Fok L, Zhang X, Garcia-Vidal F J 2011 *Nat. Phys.* **7** 52
- [22] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Uspekhi* **10** 509
- [23] Chen J B, Wang Y, Jia B H 2011 *Nat. Photonics* **5** 239
- [24] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [25] Zhai S L, Zhao X P, Liu S, Shen F L, Li L L, Luo C R 2016 *Sci. Rep.* **6** 32388
- [26] Lee S H, Park C M, Seo Y M, Kim C K 2010 *Phys. Rev. B* **81** 241102

Inverse Doppler effect of acoustic metamaterial with negative mass density*

Liu Song Luo Chun-Rong Zhai Shi-Long Chen Huai-Jun Zhao Xiao-Peng[†]

(Smart Materials Laboratory, School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 30 August 2016; revised manuscript received 14 October 2016)

Abstract

It is always an issue for researchers to control the propagation of sound wave at will. A kind of acoustic metamaterial built with artificial microunits attracts the attention of researchers, because it possesses many unique properties that cannot be realized by natural materials, such as negative refractive index, slab focusing, and cloak. The Doppler effect leads to the frequency change of a wave because of the relative motion between the observer and the source. In 1968, Veselago [Veselago V G 1968 *Soviet Physics Uspekhi* **10** 509] theoretically proposed that a metamaterial with a negative refraction can result in an inverse Doppler effect. The investigation of inverse Doppler effect has been developed with the improvement of metamaterials. However, the design methods of these metamaterials generally need ideal material parameters, which are difficult to obtain experimentally. Besides, although the inverse Doppler effects are realized by some electromagnetic metamaterials in optical and microwave frequencies, the relevant researches in acoustic metamaterials make slow progress. In this work, a 2D acoustic metamaterial with negative mass density is fabricated. Our previous work has demonstrated that the air in the internal cavity of the unit cell will vibrate back and forth to generate the vibration velocity when the air is driven by a sound source. As the source frequency reaches the resonant frequency, large amounts of energy will be stored in the internal cavity. This accumulation of energy will cause the acceleration of the air in opposite direction to the sound pressure, thus this metamaterial will exhibit negative mass density. In this case, the direction of the phase velocity is exactly opposite to that of the group velocity of the sound wave. Therefore, the inverse Doppler effect of sound wave can be realized by this metamaterial. Since the unit cells with different lengths have different resonant frequencies and there is only weak interaction among the adjacent unit cells, the frequency band of the metamaterial with negative mass density can be broadened by combining several different unit cells. Our previous experiments have demonstrated that the mass density and refractive index of this metamaterial are negative over a broad frequency range from 1560 Hz to 5580 Hz and 1500 Hz to 5480 Hz, respectively. A testing equipment is constructed to measure the Doppler effect of this metamaterial from 1200 Hz to 6500 Hz. The experimental results show that when the sound source with a frequency of 2000 Hz approaches to the detector, the detected frequency is 1999.27 Hz, which is 0.73 Hz smaller than the source frequency; when the sound source recedes from the detector, the detected frequency is 2000.68 Hz, which is 0.68 Hz larger than the source frequency. Therefore, the inverse Doppler effect appears at 2000 Hz. The experimental results within the whole frequency range of negative refractive index show broadband inverse Doppler phenomena.

Keywords: negative mass density, acoustic metamaterial, inverse Doppler effect

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 43.28.+h

DOI: [10.7498/aps.66.024301](https://doi.org/10.7498/aps.66.024301)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674267, 51272215) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921503).

[†] Corresponding author. E-mail: xpzhaonwpu@nwpu.edu.cn