

文章编号:1001-9014(2009)01-0072-05

一种基于 HWD 的图像质量评价测度

路文, 高新波, 曾凯, 何立火

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:提出了一种新的图像质量评价测度. 首先对图像进行 Hybrid Wavelets and Directional Filter Banks (HWD) 分解, 得到相应的尺度和方向子带信息. 然后对各个子带进行对比敏感度掩模, 使不同尺度和方向子带的信息具有相同的灵敏度. 根据人类视觉感知特性设定视觉感知阈值, 获得相应的视觉感知系数并归一化. 利用参考图像和失真图像视觉感知系数差值的变化得到相应的图像质量评价测度. 实验结果表明本测度与主观感知有很好的 consistency, 能准确地反映人眼对图像的视觉感知.

关键词:图像质量评价; 人类视觉系统; 视觉感知; HWD

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A

IMAGE QUALITY EVALUATION METRICS BASED ON HWD

LU Wen, GAO Xin-Bo, ZENG Kai, HE Li-Huo

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel image quality metrics was proposed. Firstly, images were decomposed into subbands with different scales and directions by hybrid wavelets and directional filter banks (HWD). Secondly, in order to offer a uniform visual sensitivity to different scales and directions subbands for human perception, each subband was masked with contrast sensitivity function (CSF). A rational sensitivity threshold was defined, and then the proportion of sensitivity coefficients in each subband was computed. Variation of visual perception coefficient between the reference image and distorted one was used to evaluate image quality. Experimental results illustrate that the proposed metrics agrees quite well with human performance. Thus, it can be used to describe the visual perception of image effectively.

Key words: image quality evaluation; human visual system; visual perception; hybrid wavelets and directional filter banks (HWD)

引言

随着信息技术的快速发展, 数字图像作为一种表示和交流信息的手段获得了极大的发展. 由于图像处理的效果很大程度上依赖于图像质量的好坏, 因此图像质量评价已经发展成为图像处理领域的一个重要研究内容, 诸如图像压缩^[1]、图像增强、图像融合^[2]等. 在大多数应用中, 人眼是图像以及信息的最终接收者, 因此主观评价测度是最有效的图像质量评估测度, 但由于主观评价测度即耗时又花费高, 故而寻求有效的客观图像质量评价测度已经成为亟待解决的问题.

图像几何变换^[3]是一种提取图像特征信息的模型. 例如, 小波变换^[4]可以用于提取图像的点奇

异信息, Contourlet 变换^[5]可以用来提取图像的轮廓信息. 目前小波变换已经成功地应用于图像处理的许多领域, 但由于缺少方向信息, 其仅适用于提取图像的局部特征. 同样, 虽然 Contourlet 能够有效地提取图像的方向信息, 但其存在的冗余性又使其对图像的失真并不敏感, 因此小波变换和 Contourlet 变换都不是表征图像特征的最佳方法. HWD (Hybrid Wavelets and Directional filter banks)^[6]是一种无冗余的图像特征的稀疏表示方法, 它可以有效地提取图像的轮廓和细节信息. 它首先使用小波分解, 再利用增强的方向滤波器进行方向特征提取, 从而能够有效地提取图像的尺度信息和方向信息. 在针对自然图像的非线性逼近的过程中, HWD 在保存图像的轮廓和细节信息上比小波变换和 Contourlet 变换有

收稿日期: 2008-01-18, 修回日期: 2008-11-18

Received date: 2008-01-18, revised date: 2008-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(60771068, 6070261, 60832005); 模式识别国家重点实验室开放基金资助; 深圳大学 ATR 国防重点实验室开放基金资助; 教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)

作者简介: 路文(1981-), 男, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要研究方向为视频增强与通信, 影像质量评价.

更好的视觉效果。

基于上述分析,本文提出了一种通过衡量图像特征信息变化来评估图像质量的评价测度.首先对参考图像和失真图像分别进行 HWD 分解,然后通过模拟人类视觉系统,根据人类视觉感知特性,比较参考图像与失真图像之间对应特征信息的变化程度,从而得到一种能有效评价图像质量的测度。

1 HWD

文献[6]中,Eslami 和 Radha 提出了一组新的小波变换与方向滤波器组相结合的图像变换方法 HWD.该方法首先对图像进行小波变换,然后对各子带进行 $m_d(m_d < L, L$ 为小波分解级数)级方向滤波器组分解,根据各细节的不同选用不同的滤波器,得到相应的方向信息.同时对最精细尺度上的系数使用 DFB 和改进型 DFB 来增加小波分解的方向性特征.改进型 DFB 是通过将图像从垂直和水平方向进行分解,构成 VDFB 和 HDFB 这两个方向滤波器组.根据使用的滤波器组的不同,HWD 又可以被分为 HWD1 和 HWD2.方向滤波器频率划分如图 1 所示。

(1)HWD1

- a. 对子波变换后的对角方向子带 (HH_i) 进行 DFB 分解. ($HH_i, (1 \leq i \leq m_d)$)
- b. 对子波变换后的水平方向子带 (HL_i) 进行 HDFB 分解. ($HL_i, (1 \leq i \leq m_d)$)
- c. 对子波变换后的垂直方向子带 (LH_i) 进行 VDFB 分解. ($LH_i, (1 \leq i \leq m_d)$)

(2)HWD2

- a. 对子波变换后的对角方向子带 (HH_i) 进行 DFB 分解. ($HH_i, (1 \leq i \leq m_d)$)
- b. 对子波变换后的水平方向子带 (HL_i) 进行 VDFB 分解. ($HL_i, (1 \leq i \leq m_d)$)
- c. 对子波变换后的垂直方向子带 (LH_i) 进行 HDFB 分解. ($LH_i, (1 \leq i \leq m_d)$)

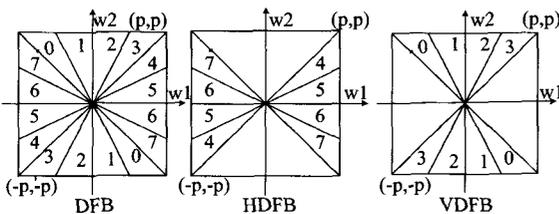


图 1 方向滤波器频率划分

Fig. 1 The diagram of directional filter bank to partition frequency

2 基于 HWD 的图像质量评价测度

本文提出了一种新的图像质量评价测度,首先利用 HWD 对图像进行子带分解,然后统计各子带内视觉感知系数的变化情况,以实现图像的质量评价,首先对图像进行 HWD 分解,将图像分解成不同尺度和方向子带.为了使不同尺度上的系数对于人类视觉感知具有相同的意义,对各个子带进行对比敏感度 (CSF, Contrast Sensivity Function) 加权.然后根据人眼视觉感知特性,确定合理的视觉感知阈值,分别统计视觉感知系数在各子带中所占的比重.最后比较参考图像和失真图像的视觉感知系数量,综合得到图像的质量的客观评价。

2.1 HWD 变换

本文使用的 HWD^[6]分解采用三层小波分解,在最细两层小波子带上均采用三级的 DFB 分解.对小波变换和 DFB 分解,我们分别采用了常见的 Daubechies“db1”滤波器和 McClellan 变换“9-7”滤波器.这样,HWD1、HWD2 最细两层上方向子带数目均为 16 个.为减小在传输过程中的信息传输量,本文只利用最细两层的方向子带,且根据 DFB 分解的性质,在方向子带的选取上,除了低频部分以外,在最细层和次细层上的方向子带均选取一半来进行分析(图 2 中灰色的子带),如图 2 所示。

2.2 CSF 加权

HWD 将图像分解为不同的尺度和方向子带,而人眼对不同空间频率信号的感知程度是不同的.为使不同尺度上的系数对于视觉感知具有相同的意义,需要对不同子带的系数进行加权.鉴于对比敏感度掩模效应可以使人眼对不同的频率具有相同的可视敏感度,本节利用对比敏感度掩模对 HWD 分解后的图像子带进行敏感度加权。

在文献[7]中,Nadenau 等人提出了一种 CSF 模型,其数学表达式为:

$$H(f) = 2.6(0.192 + 0.114f)e^{[-(0.114f)^{1.1}]}, \quad (1)$$

其中, $f = f_n \cdot f_s$, 单位为 cycles/degree, f_s 是采样频

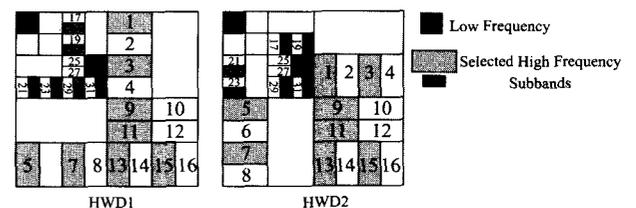


图 2 图像经 HWD 分解后子带选取示意图

Fig. 2 Decomposition of image by HWD

率, f_n 是子带归一化频率, f_s 由文献[7]求得, f_n 是子带归一化中心频率, 利用带内平均掩膜方法, 同一尺度上的方向子带系数的 f_n 是相同的. 如果图像采样频率满足 Nyquist 采样频率, 则数字图像的频率 f 范围为 $[0, f_s/2]$, f_n 的范围为 $[0, 0.5]$.

图像经过 HWD 变换, 可以获得一系列的子带系数 $c_{i,j}^k$, k 代表分解的尺度数, i 代表某一尺度上的子带数目, j 代表某一子带的系数个数. 经过 CSF 子带加权后, 系数 $c_{i,j}^k$ 被量化为:

$$x_{i,j}^k = H(f_k) \cdot c_{i,j}^k \quad (2)$$

2.3 感知门限

由于人类视觉系统仅对方向子带内幅值较大的系数敏感, 幅值较大的系数对于保持图像的质量起主要作用, 因此幅值较大的系数的变化可以用来衡量图像质量的变化, 据此我们定义了一个视觉感知门限 T , 将大于该门限的子带系数定义为感知系数,

$$T = \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

其中, $x_{i,j}$ 为最精细尺度上第 i 个方向子带的第 j 个系数, \bar{x}_i 为第 i 个方向子带系数的均值, M 为所选方向子带的数目, N 为每个子带中系数的总个数.

2.4 感知系数归一化

利用感知门限, 我们能获得每一个子带上感知系数的数目, 定义为 $C_r(n)$, 整个子带的系数个数定义为 $C(n)$, 利用式(4), 分别计算参考图像和失真图像各方向子带中视觉感知系数所占的比重.

$$P(n) = \frac{C_r(n)}{C(n)} \quad (4)$$

2.5 图像质量测度

基于式(4), 可以获得参考图像和失真图像的感知系数归一化值 $P_R(n)$ 和 $P_D(n)$, 本文中, 定义图像质量的评价测度 Q

$$Q = \frac{1}{1 + \log_2 \left(\frac{S}{Q_0} + 1 \right)} \quad (5)$$

其中, $S = \sum_{n=1}^L |P_R(n) - P_D(n)|$, L 为被选取子带的总个数, Q_0 为调整因子, 实验中取 $Q_0 = 0.1$.

3 实验结果与分析

为了测试我们提出的测度的合理性和有效性, 设计了以下两组测试实验: 一是所提出的测度与主观感知的一致性实验; 二是所提出的测度的有效性实验.

3.1 所提出的测度与主观感知的一致性实验

表1 HWD 与已有评价测度的比较结果
Table 1 Comparison of HWD with existing metrics

Model	JPEG			JPEG2000		
	CC	ROCC	OR	CC	ROCC	OR
PSNR	0.9230	0.8905	0.1890	0.9330	0.9041	0.094
MSSIM	0.9670	0.9485	0.0400	0.9490	0.9368	0.065
WNISM	0.9290	0.9069	0.1490	0.9261	0.9135	0.118
HWD1	0.9700	0.9526	0.0510	0.9540	0.9333	0.049
HWD2	0.9730	0.9535	0.0340	0.9540	0.9362	0.047

我们使用 LIVE 图像质量评估数据库^[8]. 在这个数据库中 29 幅高分辨率的 RGB 图像被压缩成 175 幅 JPEG 图像和 169 幅 JPEG2000 图像, 其中还包括他们的原始图像和主观评价数据以及其它信息. 首先, 通过本文测度计算图像的客观评价成绩, 然后使用 VQEG (Video Quality Evaluation Group) 定义的 3 个评价标准来对客观预测和主观评价的一致程度进行评估. 其一为客观评价成绩与主观评价成绩相关系数 (CC, Correlation Coefficient), 它反映了客观测度预测的精确性. 其二为 Spearman 等级次序相关系数 (ROCC, Rank Order Correlation Coefficient), 它反映了客观测度预测的单调性. 其三为非线性回归分析后的离出率 (OR, Outlier Ratio), 它反映了客观测度预测的稳定性.

本文所用来比较的客观评价测度包括传统的全参考测度 PSNR 和 MSSIM^[9], 以及基于 Wavelet 域统计特性的部分参考型测度 WNISM^[10]. 实验采用 LIVE 图像质量评估数据库^[8] 的 JPEG 和 JPEG2000 图像分别进行测试, 本文提出测度在 α 取不同值时与所比较测度的实验结果见表 1、图 3. 由表 1 可知, α 在很多取值时, 本文提出的测度不但优于文献[10]中经典的部分参考型测度, 还优于经典的全参考测度 MSSIM, 特别是采用 HWD2 时, 当 α 取 3 时, 本文方法对 JPEG 图像有很好的评测效果. 而对 JPEG2000 图像, α 取 5 时有很好的评测效果. 总体而言, 本文方法比较简单且计算量小, 同时对图像的几何失真也很敏感.

由图 3 可以看出, HWD1 和 HWD2 得出的客观评价价值与主观 MOS 值的非线性拟合曲线逼近效果最优. 相对现有测度, HWD 与主观评价价值有较高的相关系数, 有较低的离出率, 较小的均方误差和绝对误差.

3.2 所提出测度的有效性实验

为了测试本文测度的有效性, 本实验的测试图像序列选用标准的“Lena”图像, 使用四种失真类型, 它们分别为: 窗口大小为 $W \times W$ 的平均窗模糊, 加入方差为 V 的零均值高斯噪声, 加入密度为 D 的

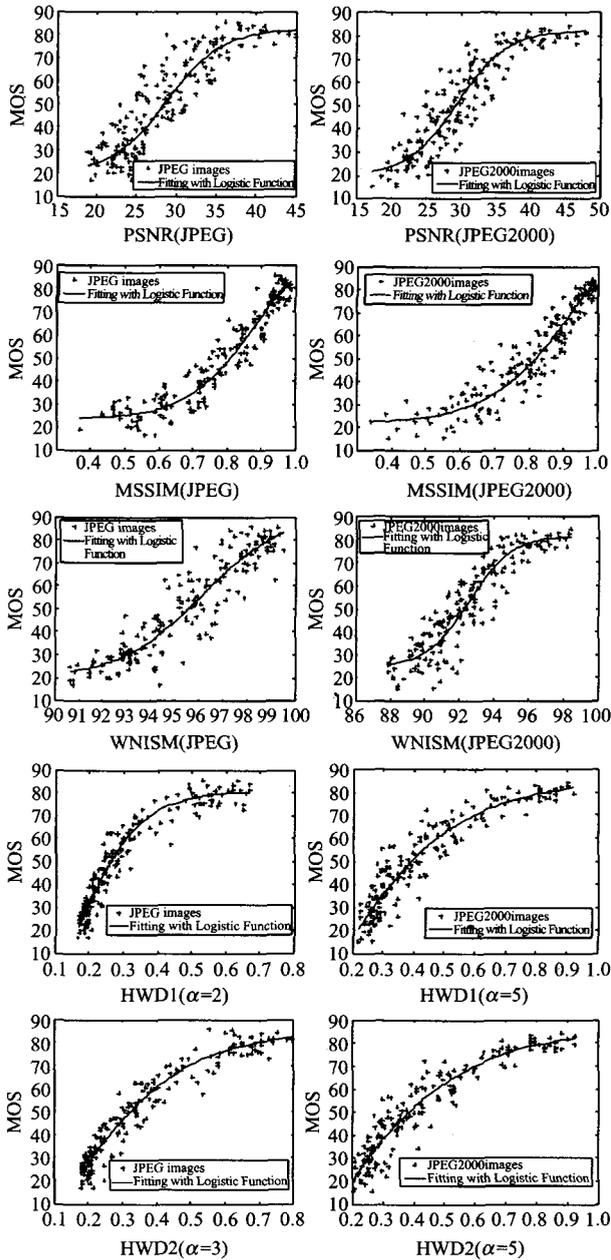


图 3 客观测度对主观 MOS 值的预测曲线图
 Fig. 3 Estimating graphs of objective metrics versus subjective mean opinion score(MOS)

椒盐噪声,以及进行压缩比为 R 的 JPEG 压缩后所形成的一系列失真图像.图 4、图 5 分别给出了客观评价随着不同失真强度的增加变化的曲线图(HWD1、HWD2 评价测度中,参数 α 均取 4).

图 4、图 5 给出了随着失真程度的增加,本文测度对图像的评价值逐渐下降的曲线图.结果表明,随着图像质量的下降,本文提出测度对图像的评价值也跟着下降,这充分表明了本文提出测度的有效性.

4 结论

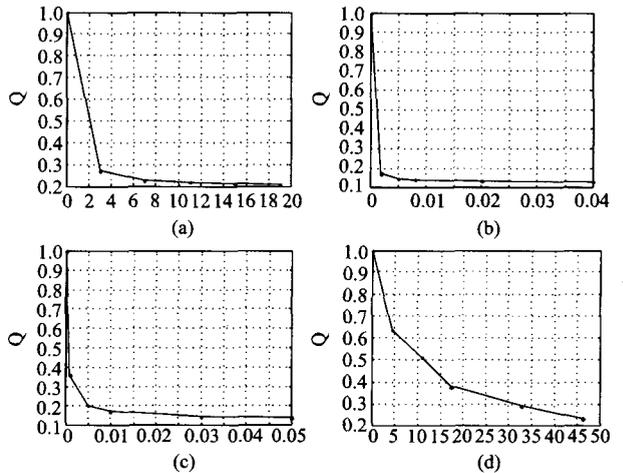


图 4 HWD1 随不同失真变化示意图 (a) 平均窗模糊 (b) 高斯噪声 (c) 椒盐噪声 (d) 压缩
 Fig. 4 Variation graph with different types of distortion for HWD1 (a) Blurring (b) Gaussian (c) Impulsive Salt-Pepper Noise (d) JPEG Compression

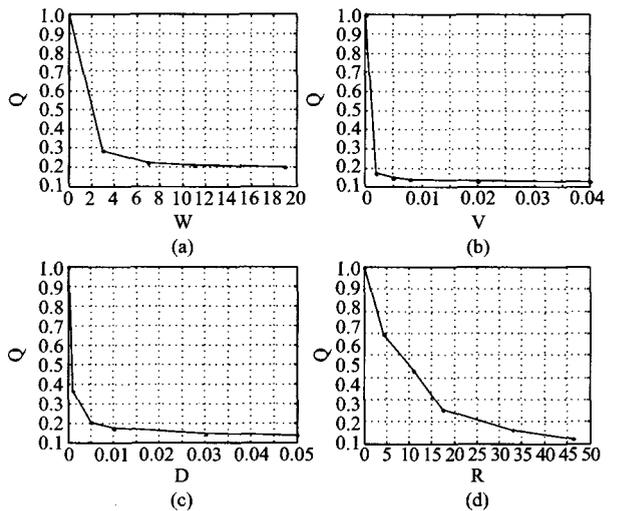


图 5 HWD2 随不同失真变化示意图 (a) 平均窗模糊 (b) 高斯噪声 (c) 椒盐噪声 (d) 压缩
 Fig. 5 Variation of HWD2 graph with different types of distortion (a) Blurring (b) Gaussian (c) Impulsive Salt-Pepper Noise (d) JPEG Compression

本文提出了一种基于 HWD 的部分参考型图像质量客观评价测度.根据失真图像可能会引起原始图像的纹理、方向等信息变化的性质,利用一种能有效反映图像视觉感知情况的图像稀疏表示测度 HWD 变换,通过统计图像失真过程中视觉敏感系数的变化情况,得到了一种与人类对图像的主观感知度有很好一致性的图像质量评测测度.虽然本测度取得了很好的效果,但视觉感知阈值的选取不够精确, α 值的选取为经验值,下一步将寻找一个更有效的测度来提取视觉感知阈值和合理地选取 α .

REFERENCES

- [1] YANG Shu-Yuan, WANG Min, JIAO Li-Cheng. High-ratio compression of remote sensing image based on ridgelet and neural network[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(杨淑媛,王敏,焦李成.基于脊波和神经网络的大压缩比遥感图像压缩. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4), 297—301.
- [2] LIU Sheng-Peng, FANG Yong. Infrared image fusion algorithm based on contourlet transform and improved pulse coupled neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘盛鹏,方勇.基于Contourlet变换和IPCNN的融合算法及其在可见光与红外线图像融合中的应用. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3), 217—221.
- [3] JIAO Li-Cheng, Tan Shan Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*(焦李成,谭山.图像的多尺度几何分析:回顾和展望. *电子学报*), 2003, **31**(12):1975—1981.
- [4] Mallat S A. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674—693.
- [5] Do M N, Vetterli M V. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005, **14**(12):2091—2106.
- [6] Eslami R, Radha H. A new family of non-redundant transforms using hybrid wavelets and directional filter banks[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(4):1152—1167.
- [7] Nadenau M J, Reichel J, Kunt M. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, **12**(1):58—70.
- [8] Sheikh H R, Wang Z, Bovik A C, et al. Image and Video Quality Assessment Research at LIVE [DB]. <http://live.ece.utexas.edu/rese-arch/quality/>, 2003. s.
- [9] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2004, **13**(4):600—612.
- [10] Wang Z, Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model [J]. *Human Vision and Electronic Imaging X. Proc.*, 2005, **5666**(1):149—159.

(上接第 24 页)

实元件模拟和测量的 S_{21} 参数. 在 C 和 D 两种 CRLH TLs 的单负区, 即 I 和 III 区, 3 种光子晶体分别出现了一定的通带, 其中 $(C_2D_2)_5$ 和 $(C_3D_3)_4$ 在 C 的单负区和高频段分别出现了 Bragg 带隙, Bragg 带隙在低频也随着晶格尺度的增大而向高频移动, 而在高频性质相反. 约在 2.65GHz 处, 3 种光子晶体均出现了 $zero-\bar{n}$ 带隙, 带隙的位置和带宽在单元长度同时增大 2 倍、3 倍时基本上也没有发生移动, $zero-\bar{n}$ 带隙也可以理解作为一种等效的单负带隙.

4 结语

由一维光子晶体的色散关系出发, 得出由特异性材料构成的光子晶体具有 Bragg 带隙和等效的单负带隙, 等效的单负带隙在晶格尺度同时改变相同倍数时基本不发生移动, 带边分别由 $\bar{\epsilon} = 0$ 和 $\bar{\mu} = 0$ 决定. 在实验上, 通过 CRLH TLs 实现了一维的 Metamaterials, 基于 CRLH TLs 单元构成了光子晶体, 并测试、分析了其传输特性. 实验和理论结果表明由特异材料构成的一维光子晶体在 $\bar{\epsilon} \cdot \bar{\mu} > 0$ 的条件下形成通带或 Bragg 带隙, Bragg 带隙随着晶格尺度的改变而发生移动. 在 $\bar{\epsilon} \cdot \bar{\mu} < 0$ 的条件下形成等效的单负带隙, $zero-\bar{n}$ 带隙和 $zero-\Phi_{\text{eff}}$ 带隙可以理解为一种等效的单负带隙.

REFERENCES

- [1] TANG Bing-Shu, SHEN Ting-Gen, Effect of disorder on transmission spectra of two-dimensional photonic crystals with transfer matrix method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汤炳书,沈延根.用转移矩阵法研究无序对二维光子晶体透射谱的影响. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 73—76.
- [2] FANG Wei-Hai, XU Shan-Jia. New frequency selective surface composed of left-handed materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (方维海,徐善驾.由左手媒质构成的新的频率选择表面. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):121—124.
- [3] LI Yan, XU Shan-Jia, ZHANG Zhong-Xiang. Novel microstrip antenna array FED with left-handed transmission line [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李雁,徐善驾,张忠祥.新型左手传输线馈电微带阵列天线. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):137—140.
- [4] Li J, Zhou L, Chan C T. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 0839011-0839014.
- [5] Gao L, Tang C T, Wang S M. Photonic band gap from a stack of single-negative materials [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2006, **301**(2):371—377.
- [6] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4):509—514.
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18):4184—4187.
- [8] Zhang L W, Zhang Y W, He L, et al. Experimental study of photonic crystals consisting of ϵ -negative and μ -negative materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(5):0566151-0566156.
- [9] Weng Y, Wang Z G, Chen H. Band structures of one-dimensional subwavelength photonic crystals containing metamaterials [J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **75**(4):046601-0466014.
- [10] Fredkin D R, Ron A. Effectively left-handed (negative index) composite material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(10):1753—1755.