

文章编号 1004-924X(2010)10-2150-06

# 非对称马赫-曾德尔干涉仪型 不等带宽光学梳状滤波器

章宝歌<sup>1</sup>, 李碧琦<sup>2</sup>, 鲁彦<sup>3</sup>

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州城市学院 数学学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 西南交通大学 峨眉校区电气工程系, 四川 峨眉 614202)

**摘要:** 为提高光交错复用器系统带宽的有效利用率, 满足系统中不同传输速率对带宽的要求, 针对信道间隔为 50 GHz 的输入信号提出了新的非对称 MZI 型不等带宽光学梳状滤波器, 研究了该系统的输出谱和制作方法。基于光纤传输理论分析了设计构成, 给出了输出谱表达式及设计中所需要的实验参量。当滤波器的两对光纤干涉臂长度差相等, 各耦合器的耦合系数选取适当时, 该器件实现了奇偶通道上不等带宽输出, 可分别用于 10 Gb/s 和 40 Gb/s 传输, 信道间隔为 0.8 nm, 信道隔离度 > 25 dB; 分析还发现该器件对 3 个耦合器的耦合参数不敏感。实验表明: 该器件不仅能实现不等带宽输出功能, 在实际制作过程中还由于器件对耦合器的耦合参数要求不是十分严格而降低了器件实际制作难度, 因此具有实用价值。

**关键词:** 光纤耦合器; 马赫-曾德尔干涉仪; 不等带宽; 光学梳状滤波器

**中图分类号:** TN253; TN713 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2150

## Asymmetric Mach-Zehnder interleave with different output spectral bandwidths

ZHANG Bao-ge<sup>1</sup>, LI Bi-qi<sup>2</sup>, LU Yan<sup>3</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. School of Mathematics, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China;  
3. Department of Electrical Engineering, Emei Branch, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

**Abstract:** To improve the utilization efficiency of bandwidth in an interleaver system and satisfy the requirements of different transmission speeds for different passbands, a novel design scheme of 50 GHz unequal passband interleaving filter with an all-fiber MZI was put forward. Based on the principle of fiber transmissivity method, the MZI all-fiber optical different output spectra using three single-mode fiber couplers connected with single-mode fibers were analysed, and the complex amplitudes of output spectra were established with the expressions described by the coupling coefficients and length differences. Experiments indicate when the length differences of interference arms show the same value and the appropriate coupling coefficients of the couplers are chosen, the device can split an input beam with

收稿日期: 2009-10-27; 修订日期: 2010-01-18.

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目 (No. 0803RJZA027)

channel space of 50 GHz into two beams, and one is odd channel for 10 Gb/s and the other is even channel for 40 Gb/s. Furthermore, the space between the two channels is 0.8 nm and channel isolation is more than 25 dB. Finally, it points out that the interleaver is not sensitive to the coupling coefficients from three kinds of couplers and the coupling ratios of couplers can be controlled accurately. Obtained experimental results are in good agreement with the analytical ones.

**Key words:** fiber coupler; Mach-Zehnder interferometer; different bandwidth; asymmetric interleaver

## 1 引言

目前,密集波分复用(DWDM)技术已成为发展高速大容量全光通信网的主流技术之一,而 DWDM 系统的核心器件之一是光波分复用/解复用器。光学梳状滤波器(Interleaver)是一种新型光子器件,该器件能够把均匀分布的密集波分复用信道按照奇数和偶数分为两组,从而使信道间隔增倍,它也是一种新型接口器件,是采用不同信道间隔的网络或网络的不同部分之间的枢纽。光学梳状滤波器的出现不仅有效地增加了光纤上复用的信道数,同时避免了器件技术的过分复杂和成本太高,是一种快速发展的很有前景的新型复用/解复用器件。近年来,国内外对光交错复用器做了大量研究<sup>[1-8]</sup>。在现今实用的系统中,10 Gb/s和 40 Gb/s 共存是 DWDM 技术的发展趋势。最佳带宽  $\Delta f$  和传输速率  $v$  存在近似关系: $\Delta f \geq 1.5v$ ,对传输速率  $v$  为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的系统其信道带宽应分别达到 15 GHz 和 60 GHz。由于传统光交错复用器的等信道带宽<sup>[1-7]</sup>输出只能用于一种速率的传输,因此很有必要寻求一种能够科学有效地利用系统带宽的技术方案,于是不等带宽的光学梳状滤波器<sup>[8]</sup>应运而生。该滤波器重新分配了两路输出带宽,能对不同速率提供不同的带宽,可同时用于两种不同传输速率的系统,该滤波器较传统的等带宽 50 GHz 奇偶交错滤波器有更高的带宽利用率,在 10 Gb/s 向 10 Gb/s + 40 Gb/s 升级过程中作为复用/解复用器具有很大优势,可极大地提高系统带宽的利用率并降低成本。

本文提出一种新颖的由 2 个  $2 \times 2$  耦合器和 1 个一字型  $3 \times 3$  耦合器构建的全新的 MZI 型不

等带宽光学梳状滤波器结构,并对该结构进行了优化设计和制作工艺研究,讨论了器件输出与光纤耦合器耦合比的关系,并对器件制造过程中对光纤耦合器耦合比的敏感性进行了研究。

## 2 光学梳状滤波器结构与原理

由 2 个  $2 \times 2$  光纤耦合器( $C_0$  和  $C_2$ )和一字型的  $3 \times 3$  光纤耦合器  $C_1$  级联构成的全光纤马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器结构如图 1 所示。其中  $C_0$  和  $C_1$  通过一对光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  连接, $C_1$  和  $C_2$  通过另一对光纤干涉臂  $l_3$  和  $l_4$  连接。

假设输入光仅从耦合器  $C_0$  的 1 端口输入,2 端口的输入光为 0,当输入光  $E^{\text{in}}(1,0)$  的光场从输入端口 1 输入时,经过第一级非对称 Mach-Zehnder 干涉仪后,其输出的光场( $C_1$  的 3 个输出端口由上至下为  $E_A^{\text{out}}, E_B^{\text{out}}, E_C^{\text{out}}$ ,因为  $E_C^{\text{out}}$  比较小,所以忽略不计)再经过干涉臂  $l_3, l_4$  输入到耦合器  $C_2$  发生第二次干涉后输出,输出光场为  $T$ 。

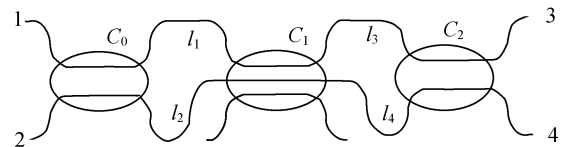


图 1 不等带宽全光纤光学梳状滤波器结构

Fig. 1 Structure of asymmetric interleaver with different bandwidths

忽略光纤传输损耗和光纤耦合器插入损耗, $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别代表两对干涉臂  $l_1$  和  $l_2, l_3$  和  $l_4$  的传输相位差,且有  $\theta_1 = \beta \Delta l_1 = \beta(l_2 - l_1) = 2\pi n_{\text{eff}} \Delta l_1 / \lambda, \theta_2 = \beta \Delta l_2 = \beta(l_4 - l_3) = 2\pi n_{\text{eff}} \Delta l_2 / \lambda, n_{\text{eff}}$  为光纤传导模的有效折射率, $\beta$  为光纤中基模

的传播常数。 $K_n (n=0, 1, 2)$ 为各耦合器的耦合系数,在输出端处光强  $P_3 = |T_3|^2$ ,  $P_4 = |T_4|^2$ , 根据光耦合理论,器件的输出光场表达式为:

$$\begin{bmatrix} P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 \\ \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ \cos(\theta_2 + \theta_1) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

$$a_0 = 0.5 \cos^2 k_2 \sin^2 k_1 \sin^2 k_0 + \cos^2 k_2 \cos^4 0.5 k_1 \cos^2 k_0 +$$

$$\sin^2 k_2 \cos^2 k_1 \sin^2 k_0 + 0.5 \sin^2 k_1 \cos^2 k_0 \sin^2 k_2$$

$$a_1 = -2 \cos k_2 \cos^2 0.5 k_1 \cos k_0 \sin k_2 \cos k_1 \sin k_0$$

$$a_2 = \cos k_2 \sin^2 k_1 \sin k_0 \cos k_0 \sin k_2$$

$$a_3 = -\sqrt{2} \sin k_0 \sin k_1 \cos k_0 \cdot$$

$$(\cos^2 k_2 \cos^2 0.5 k_1 - \sin^2 k_2 \cos k_1)$$

$$a_4 = \sqrt{2} \cos k_2 \sin k_1 \sin k_2 \cdot$$

$$(\sin^2 k_0 \cos k_1 - \cos^2 0.5 k_1 \cos^2 k_0)$$

$$b_0 = 0.5 \sin^2 k_2 \sin^2 k_1 \sin^2 k_0 + 0.5 \cos^2 k_2 \sin^2 k_1 \cos^2 k_0 +$$

$$\cos^2 k_1 \sin^2 k_0 \cos^2 k_2 + \sin^2 k_2 \cos^4 0.5 k_1 \cos^2 k_2$$

$$b_1 = 2 \cos k_1 \sin k_0 \cos k_2 \sin k_2 \cos^2 0.5 k_1 \cos k_0$$

$$b_2 = -\sin k_2 \sin^2 k_1 \sin k_0 \cos k_2 \cos k_0$$

$$b_3 = \sqrt{2} \sin k_1 \cos k_0 \sin k_0 \cdot$$

$$(\cos^2 k_2 \cos k_1 - \sin^2 k_2 \cos^2 0.5 k_1)$$

$$b_4 = -\sqrt{2} \cos k_2 \sin k_1 \sin k_2 \cdot$$

$$(\sin^2 k_0 \cos k_1 - \cos^2 k_0 \cos^2 0.5 k_1)$$

从输出光强  $P_3$  和  $P_4$  的表达式中,不难发现式中都只包含  $\theta_1, \theta_2, \theta_1 - \theta_2, \theta_1 + \theta_2$ , 而光纤段的传输相位差(臂长差)正是决定传输带宽的主要因素,因此,适当选取 3 个耦合系数和 2 组光纤段的臂长差可以实现不等带宽传输。

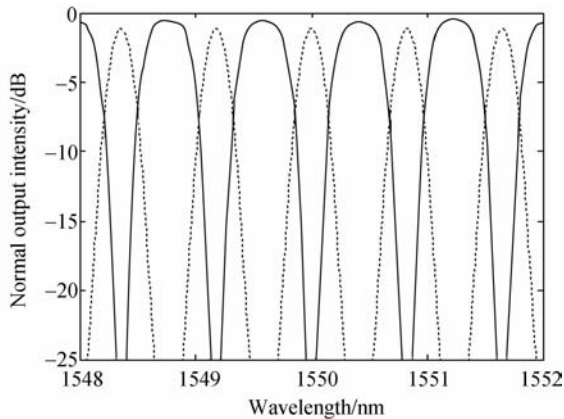
### 3 数值优化

计算中,光纤纤芯的有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.457$ , 耦合器  $C_0, C_1$  和  $C_2$  的耦合系数分别给予不同的

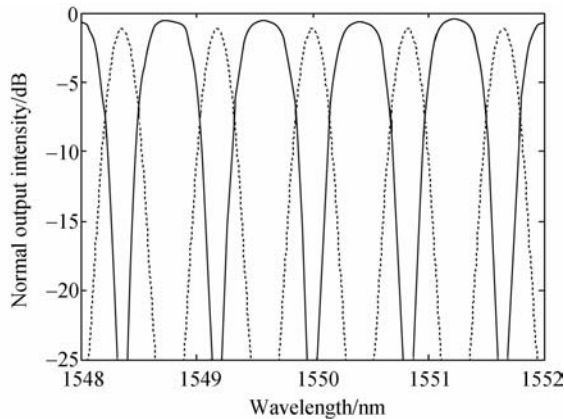
值,光纤臂长差  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 2 \text{ mm}$ 。经计算得到了输出光谱随波长变化的计算结果,如图 2 所示的周期谱图。图 2 中实线代表端口 3 的归一化输出光功率曲线,虚线代表端口 4 的归一化输出光功率曲线,输出谱线清楚地显示器件端口 3 和端口 4 的输出光谱的输出为两组互补的周期性谱线,其通带边缘陡峭,所以该器件可以作为光学梳状滤波器。输出谱线中出现的平顶(flat-top)在应用中是很重要的,它可以抵消信道波长漂移带来的不利影响,使波长交错滤波器能更好地实现其功能。

从图 2 容易看出,信道间隔为 0.8 nm,中心波长符合 ITU 规定,端口 3 谱线的 3 dB 带宽  $> 60 \text{ GHz}$ ,可用于 40 Gb/s 传输速率;端口 4 谱线的 3 dB 带宽  $> 20 \text{ GHz}$ ,可用于 10 Gb/s 传输速率,因而在 100 GHz 带宽内可实现传输速率 50 Gb/s。同时,图 2 清晰地表明了信道隔离度均大于 25 dB,能满足商业需求,且器件在整个工作频带内具有较高的一致性;从结构上,可以看到  $3 \times 3$  耦合器的 1 个端口的输出没有利用,所以器件的附加损耗以及插入损耗相对有所增加,归一化输出峰值略小于 1。

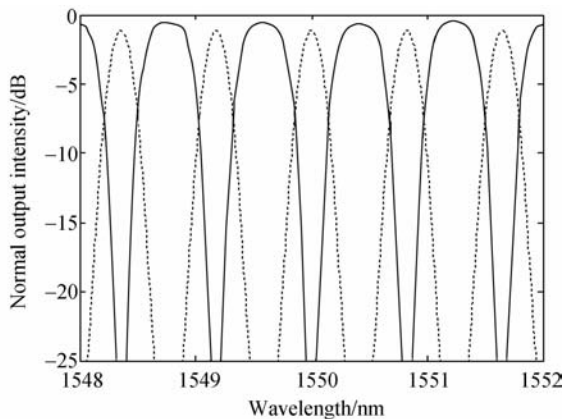
由于工艺条件等原因,耦合器的耦合系数的实测值与期望值之间往往有偏差,研制器件时各参量的偏差的控制非常关键<sup>[9-10]</sup>,因此,为了研究偏差对波长交错器传输特性的影响,选取了 4 组数据进行模拟,其模拟结果如图 2 中(a),(b),(c),(d)。图 2 表明:虽然(a),(b)以及(c),(d)中的  $K_n (n=0, 1, 2)$ 略有变化,比较图 4 可看出,两个输出端的输出谱线形状变化不大(几乎没变化),因此,当 3 个耦合器的耦合系数有所偏差时,对器件的输出光谱并没有大的影响,也就是说,如果耦合器的耦合系数略微偏离最佳值,也能得到比较理想的输出谱图,即器件对耦合器的耦合系数要求不是十分严格,这降低了器件实际制作难度。



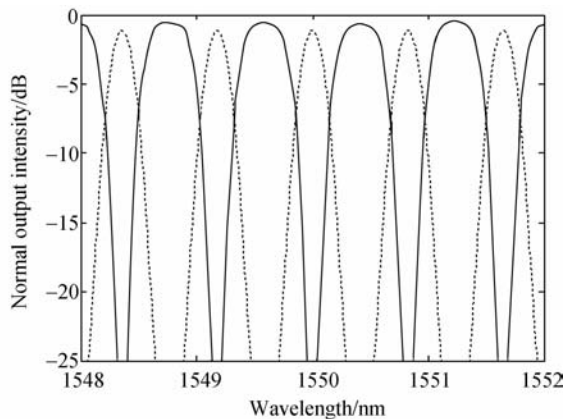
(a)  $k_0 = 5\pi/10; k_1 = 5\pi/71; k_2 = \pi/5$



(b)  $k_0 = 5\pi/19; k_1 = \pi/13; k_2 = \pi/5$



(c)  $k_0 = \pi/4; k_1 = \pi/14; k_2 = \pi/5$



(d)  $k_0 = 10\pi/41; k_1 = \pi/14; k_2 = 2\pi/11$

图 2 不等带宽光学梳状滤波器输出谱线

Fig. 2 Output spectra of asymmetric interleaver with different bandwidths

### 4 实验与结果

首先按常规的方法拉制  $2 \times 2$  耦合器  $C_0$ , 在拉制耦合器  $C_1$  时, 往  $C_0$  抽出的 2 根同向光纤中插入另 1 根光纤, 3 根光纤同时熔拉。在熔拉过程中, 利用耦合器  $C_1$  空闲端口作为监视端口, 待耦合比达到要求时停止熔拉, 耦合器  $C_1$  就可以制成。由于避开了光的干涉效应, 使得耦合器  $C_1$  的分光比可以被控制, 再按常规的方法拉制  $2 \times 2$  耦合器  $C_2$ , 熔锥型光纤耦合器及干涉臂长差  $\Delta l_1, \Delta l_2$  的控制方法参照文献[9-10]的方法。

对制作的滤波器进行了性能测试。光源采用 Santec 公司生产的 TSL 2210 型波长可调谐激光器, 调谐波长为 1 540~1 560 nm, 从端口 1 输

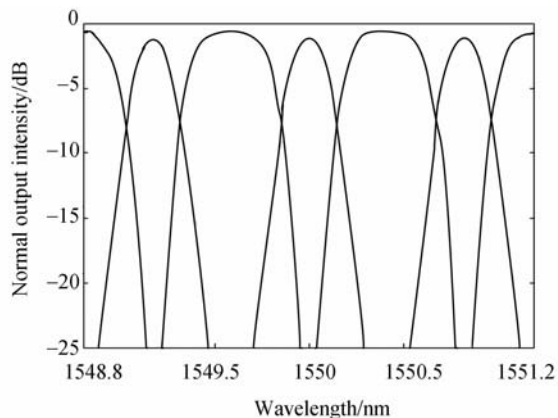


图 3  $k_0 = 5\pi/19; k_1 = 5\pi/69; k_2 = \pi/5, \Delta l_1 = \Delta l_2 = 2$  mm 时, 交错滤波器输出光谱随波长变化的实验测量值

Fig. 3 Experimental results of two output spectral responses of a designed interleaver with  $k_0 = 5\pi/19; k_1 = 5\pi/69; k_2 = \pi/5, \Delta l_1 = \Delta l_2 = 2$  mm

入光功率为 1 mW 的线偏振光,测试采用光谱分析仪(最小分辨力 0.1 nm)。由于实验过程中,光源工作的随机不稳定,光路中的熔接损耗、耦合损耗等问题增加了系统损耗,且干涉臂两两之间的长度差存在误差,使得性能测试实验曲线与图 2 的理论曲线有些差别,但整体趋势非常吻合。

## 5 结 论

本文提出了一种新型的利用非对称 MZI 设计的全光纤不等带宽光学梳状滤波器,该滤波器由 2 个  $2 \times 2$  耦合器和 1 个一字型的  $3 \times 3$  耦合器组成,可用于 40 Gb/s 和 10 Gb/s 两种传输速率同时传输,因而在 100 GHz 带宽内可实现传输速

率 50 Gb/s,充分利用了有效带宽资源。另外,该滤波器信道隔离度均大于 25 dB,信道间隔为 0.8 nm,中心波长符合 ITU 规定。分析发现该滤波器对 3 个耦合器的耦合系数不敏感,且耦合器的分光比以及干涉臂长差可以精确控制,在实际制作这种结构的滤波器时,降低了制作难度。

理论和实验都证明,这种非对称 MZI 型结构的全光纤不等带宽光学梳状滤波器具有信道均匀性好、带宽、一致性高、价格低等优点,可用于 40 Gb/s 和 10 Gb/s 同时传输的系统,比传统的等信道 50 GHz 梳状滤波器具有更高的带宽利用率,同时也为设计全光纤不等带宽光学梳状滤波器的研究及应用提供了理论依据,具有一定的应用前景。

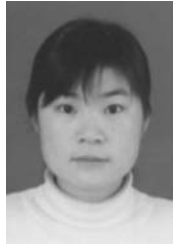
## 参考文献:

- [1] YE X H, ZHANG M, YE P D. Flat-top interleavers with chromatic dispersion compensator based on phase dispersive free space Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2006, 257: 255-260.
- [2] KUMAR N, SHENOY M R, PAL B P. An all-fiber interferometric technique for identification of the coupled-and throughput ports of a fused fiberdirectional coupler [J]. *Optics Communications*, 2005, 253: 301-30.
- [3] KUMAR N, SHENOY M R, PAL B P. Flattop all-fiber wavelength interleaver for DWDM transmission: Design analysis, parameter optimization, fabrication and characterization recipe[J]. *Optics Communications*, 2008, (281): 5156-5164.
- [4] CHAN W Y, CHEN K X, CHAN H P. A flattop PLC polymer waveguide interleaver based on folded two-stage-cascaded Y-junction Mach-Zehnder interferometers [J]. *Optics Communications*. 2009, (282): 883-886.
- [5] 鲁怀伟, 褚衍东, 罗冠炜. 一种新型级联 M-Z 波长交错器的设计与实验[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(12): 1426-1429.  
LU H W, CHU Y D, LUO G W. Design of a new type interleave based on cascaded M-Z interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(12): 1426-1429. (in Chinese)
- [6] 鲁怀伟, 张玉斌, 罗冠炜. 基于  $2 \times 2$  和  $3 \times 3$  耦合器的级联马赫-曾德干涉仪型波长交错滤波器[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1021-1025.  
LU H W, ZHANG Y E, LUO G W. Flat-top interleaver of cascaded M-Zinterferometer with  $2 \times 2$  and  $3 \times 3$  fiber couple[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1021-1025. (in Chinese)
- [7] 王小力, 朱益清, 朱拓. 马赫-曾德尔光纤干涉仪型梳状滤波器优化计算[J]. *应用光学*, 2007, 28(4): 445-448.  
WANG X L, ZHU Y Q, ZHU T. Optimization calculation of interleaver made of cascade Mach-Zehnder fiber interferometer[J]. *Journal of Applied Optic.*, 2007, 28(4): 445-448. (in Chinese)
- [8] 张婷, 陈凯, 赵帅, 等. 双折射光纤环镜不等带宽交错复用器的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(4): 436-439.  
ZHANG T, CHEN K, ZHAO SH, et al.. A novel unequal passband interleaver employing high birefringence fiber sagnac loop mirror [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(4): 436-439. (in Chinese)
- [9] 帅词俊, 段吉安, 钟振. 熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 40-46.  
SHUAI C J, DUAN J A, ZHONG J. Technical sensitiveness in the rheological Manufacture progress of fused tapercoupler [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 40-46. (in Chinese)

[10] WANG Q J, ZHANG Y, SON Y C. All-fiber 3×3 interleaver design with flat-top passband[J]. *IEEE*

*Photon Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 168-170.

#### 作者简介:



章宝歌(1980—),女,河南焦作人,讲师,博士研究生,2003年、2006年于兰州交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤通信、光纤无源器件等教学及科研工作。E-mail: bgzhang@mail.lzjtu.cn



鲁彦(1988—),男,甘肃兰州人,西南交通大学学生,主要参与光纤通信,光纤无源器件等科研工作。Jusuan-ji2004003@163.com



李碧琦(1963—),女,甘肃兰州人,副教授,主要从事光纤通信、光纤无源器件等教学及科研工作。E-mail: xd\_520\_xd@126.com

#### ● 下期预告

## LED 显示屏相机采集影像渐晕修正

张鑫<sup>1,2</sup>, 王瑞光<sup>1</sup>, 陈宇<sup>1</sup>, 汪洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了克服相机影像渐晕在 LED 显示屏逐点一致化校正过程中带来的不均匀性缺陷,从相机影像发生渐晕时的灰度分布规律出发,提出了一种基于图像平滑滤波算法的修正方法。首先,介绍了 CCD 在 LED 显示屏光电参数采集上的成像原理。然后,在分析其成像稳定性的基础上,描述了空域平滑滤波的原理,并选取模板对 CCD 采集得到的 LED 像素亮度空间分布做邻域平均平滑处理,得到了代表相机影像渐晕分布的曲面。最后,介绍了利用该曲面实现影像复原的算法。实验结果表明:经过对相机影像渐晕修正以后,可以使 LED 显示屏的显示均匀性偏差由 12.9% 缩小到 0.73%。该方法克服了修正前 LED 显示屏“中心暗、四周亮”的缺陷,达到了理想的校正效果。