

空间滤波测速仪中差分滤波器结构的优化

何 鑫,龙兴武,周 健,聂晓明

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要: 空间滤波测速系统中输出信号的基底成分,理论上可以通过差分方法完全消除。但由于由被测物体表面各处散射到光学系统并被探测器接收到的光能量不一致等原因,导致输出信号中仍然有基底成分残留,为信号特别是低频信号的探测带来困难。为了消除差分滤波器输出信号中残留的基底成分,对空间滤波测速仪中的图像传感器型差分滤波器的结构进行了优化设计。列出并分析了图像传感器型差分滤波器的各种可能结构形式,并且选择了几种典型的结构进行了实验。分别在均匀照明和非均匀照明条件下,从功率谱和信噪比两个方面分析了输出信号的质量,为滤波器结构的优化提供了依据。通过对比不同滤波器结构下系统输出信号的质量,得到了一种最为合适的能大大消除输出信号中残留的基底成分的滤波器结构。

关键词: 空间滤波测速仪; 差分滤波器; 信号基底; 功率谱; 信噪比

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3769-06

Configuration optimization of the differential filter in spatial filtering velocimeter

He Xin, Long Xingwu, Zhou Jian, Nie Xiaoming

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The pedestal components in output signals of spatial filtering velocimeter can be completely eliminated by differential method theoretically. However, because of varying amount of radiation energy incident onto the photodetector, some pedestal components still occur in the output signals, making it difficult to pick up desired signals, especially signals having very low frequencies close to zero. To remove the pedestal components in output of differential filters, the configuration of a COMS-type differential spatial filter in spatial filtering velocimeter was optimized. Every possible configuration of a differential filter was listed, and several typical configurations were chosen to analyze in detail by carrying out experiments. The quality of the output signals were analyzed in the aspects of power spectrum and signal-to-noise ratio under the condition of uniformed and non-uniformed illumination respectively. By comparison of quality of output signal from these several typical spatial filters, a most suitable configuration was obtained. This optimized configuration can noticeably eliminate the pedestal components in output signals.

Key words: spatial filtering velocimeter; differential filter; signal pedestal; power spectrum; signal-to-noise ratio

收稿日期:2015-04-07; 修订日期:2015-05-09

基金项目:国家自然科学基金(61308060)

作者简介:何鑫(1987-),男,博士生,主要从事光电检测方面的研究工作。Email: wthexin@nudt.edu.cn

导师简介:龙兴武(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光和光电子技术等方面的研究。Email: xwlong110@sina.com

0 引言

空间滤波测速自从被 Ator 提出并应用于航空相移测量后^[1],由于其简单的光学和机械装置、并不再必须使用激光作为光源,从而在许多领域得到了较为广泛的应用^[2-3],是一种具有巨大潜力和发展前途的光学测速仪。

传统的空间滤波测速系统采用一个透射光栅作为空间滤波元件以及一个光电探测器实现光电转换。但这种系统的输出信号中含有大量的基底信号成分,即低频和零频成分。通常的处理方法就是引入一个高通滤波器,但其对低频信号却束手无策。因此,研究人员对滤波器进行了改进,并提出一种差分型滤波器结构,能够大量消除信号中的基底成分^[4]。这种差分滤波器虽然在理论上能够消除所有信号基底成分^[5],但在实际应用中,输出信号在某些情况下仍然含有部分基底成分^[6]。该基底成分有时候甚至会远远超过有用的信号成分,给信号频率的探测带来困难。对于图像传感器型空间滤波器来说,该基底成分主要来自两个方面:一是图像传感器各像元的光灵敏度不一致;二是由被测量物体表面各处散射到光学系统并被图像传感器接收到的光能量不一致。由于先进的加工工艺,相对于后者,前者的影响可以忽略。

文中以输出信号的质量为依据,对图像传感器型差分空间滤波器的结构进行了优化,从而达到大大消除差分滤波器的输出信号中存在的基底成分的目的。对于同一种被测物体,其对光的散射系数一致,因而由被测物体表面各处散射到光学系统并被图像传感器接收到的光能量不一致主要是照射到被物体各处的光强不一致造成的。因此,在实验过程中分别在均匀照明和非均匀照明条件下,从功率谱密度和信噪比两个方面分析了输出信号的质量,为滤波器结构的优化提供依据。通过对比,得到了一种能大大消除输出信号中残留的基底成分的滤波器结构。

1 空间滤波测速的基本原理

空间滤波测速的基本思想就是探测运动物体的像在通过空间滤波器后光强的变化,通过解算光强变化的频率来得到物体运动的速度,其基本

原理和一般光学系统如图 1^[7]所示。光源照射到运动物体表面上,成像透镜就将运动物体表面成像到放置在像平面上的空间滤波器上。该空间滤波器由一组等间距的平行狭缝组成。平行狭缝与运动的运动方向垂直。通过平行狭缝的光由聚焦透镜汇聚到光电探测器上。探测器将光强信号转换成电信号。该电信号的频率 f 与物体运动速度 v 之间的关系为:

$$v = \frac{p}{M} f \quad (1)$$

式中: p 为滤波器中平行狭缝之间的间隔,即空间周期; M 为成像系统的放大倍数。通过测量探测器输出的时域信号的频率,就可以得到物体运动的速度。

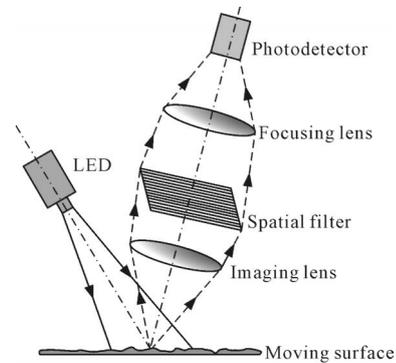


图 1 空间滤波测速仪的基本原理

Fig.1 Basic principle of spatial filtering velocimeter

2 空间滤波器结构设计

线阵 CMOS 图像传感器作为空间滤波器时,其基本结构如图 2 所示。作为一种矩形窗口空间滤波器,其滤波特性国内外很多文献中有详细分析^[8-10],此处不在赘述。图中的灰白条纹都分别表示一个像元。所有 N 个像元(序号从左至右依次为 1~ N)被平均分成 $2M$ 组。其中, M 为滤波器空间周期数。从而图中用白色条纹所表示的像元可以独立地组成一个空间滤波器,在这个滤波器中,白色部分相当于由平行狭缝组成的滤波器中的狭缝,其光强透过率即为

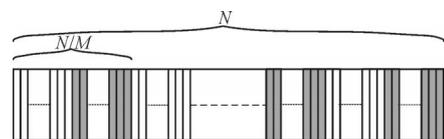


图 2 基于线阵 CMOS 图像传感器的空间滤波器基本结构

Fig.2 Structure of spatial filter based on linear CMOS image sensor

图像传感器中的光电转换效率,为了简便,将其设为 1。与此类似,灰色部分的像元也同样组成一个空间滤波器。这两个空间滤波器在空域上的相位相差 π ,由其产生的两个时域信号在时域上的相位也相差 π 。两个信号相减,就得到了一个差分信号。该差分信号与两个初始信号相比,信号基底得到大大地消除,有用信号的幅度却是两者之和^[6]。从这个意义上讲,原来的两个空间滤波器就构成了一个差分滤波器,其透过率函数由下式表示:

$$t(n) = \begin{cases} 1, & m \frac{N}{M} + 1 \leq n \leq m \frac{N}{M} + \frac{N}{2M}, \\ -1, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为像元按照空间顺序排序的序号; $m=0,1,2, \dots, M-1$ 。公式(2)所表示的是差分滤波器透过率中最基本的一种。其透过率函数的一般表达式为:

$$t(n) = \begin{cases} 1, & m \frac{N}{M} + q \leq n \leq m \frac{N}{M} + \left(\frac{N}{2M} + q - 1 \right), \\ -1, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $q=1,2, \dots, (N/2M)+1$ 。公式(2)即为公式(3)在 $q=1$ 时的形式。在实际应用中,如果公式(3)中 q 的值选择不当,在光照条件变化的情况下,输出信号质量会受到较大的影响。文中即通过选择最优 q 值来达到优化滤波器的目的。

3 测量实验与结果

3.1 实验方法

图像传感器输出的模拟信号经 A/D 采样后转换成数字图像信号。该数字图像信号可由一个含有 N 个元素的一维矩阵 $P_{1 \times N}$ 表示,而滤波器的透过率函数 $t(n)$ 也同样可以用一个一维矩阵 $T_{N \times 1}$ 来表示。从而滤波后的信号 S 可以表示为:

$$S = P_{1 \times N} \cdot T_{N \times 1} \quad (1)$$

上式表示的运算过程以及滤波器透过率矩阵 $T_{N \times 1}$ 的设计全部由 FPGA 完成,运算结果通过串口传输到个人计算机进行后续处理。该系统采用频谱分析法测量信号的频率。在个人计算机上完成的工作有快速傅立叶变换(FFT)、频谱校正和速度大小的计算。FFT 用来得到信号频谱,但其频率分辨率有限。为了得到更加准确的信号频率,采用了基于能量重心法的频谱校正技术。这些工作全部由 LabVIEW 来完成。

实验所采用的装置示意图如图 3 所示。光源使用的是高亮度的 LED 灯珠。被测物体为高精度转台的侧表面,转台转动速度的稳定性达到了 10^{-5} 。由于转台侧表面是一个弧面,因此在平行于 CMOS 平面上的速度分量不一致,由此产生的测量误差在参考文献[11]中有详细分析。在该实验系统中,此误差值在 0.05% 以内,因此对系统测量误差影响不大。转台侧表面被 LED 照亮后,被成像在线阵 CMOS 图像传感器上。在光照均匀和不均匀两种情况下分别研究不同滤波器的结构对输出信号质量进行分析。图 4 中两条曲线分别为均匀照明和非均匀照明两个条件下得到的两幅线阵图像信息。由图 4 可以看出,均匀照明时,图像传感器的 128 个像元接收到的光能量基本一致,而非均匀照明时,各个像元接收到的光能量差别比较大,特别是相距比较远的像元。为了使均匀照明和非均匀照明条件下系统的输出信号更具有可比性,尽量使两种条件下图像传感器接收到的总的光能量基本相同。在图 4 中,均匀照明和非均匀照明条件下平均每个像元产生的灰度值分别为 70.7 和 71.0。

该实验系统中,图像传感器的像元总数为 $N=128$,滤波器的周期数 $M=8$,故 q 取值范围为 1~9 之间的整数。实验时,转台以恒定的角速度转动,在 q 取不同值的条件下分别观察输出信号。由公式(3)可以看

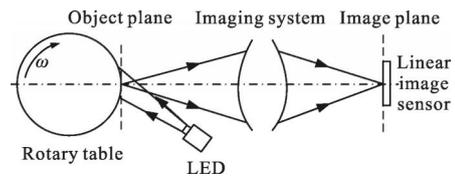


图 3 空间滤波测速仪的实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental setup of spatial filtering velocimeter

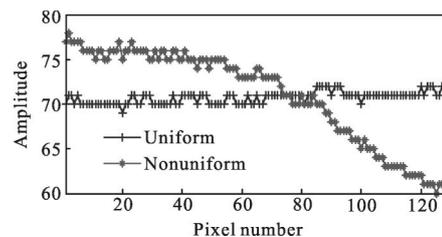


图 4 均匀和非均匀照明下线阵图像传感器的典型输出

Fig.4 Typical output of the linear image sensor under the conditions of uniform and non-uniform illumination

出, $q=1$ 时与 $q=9$ 时的光栅结构关于光栅的中轴对称, 所以这两种光栅对输出信号的影响是一样的。 $q=2, 3, 4$ 与 $q=8, 7, 6$ 时的光栅结构也可依此类推。故在实验时采取较有代表性的三个值 $q=1, 3, 5$ 。

3.2 实验结果

3.2.1 均匀照明

图 5(a)~5(c) 分别为 $q=1, 3, 5$ 时均匀照明条件下三种不同结构滤波器所得到的典型输出信号的频谱图。为了更加清楚地看出信号中各个频谱成分的大小, 频谱图的纵坐标采用对数形式。为了突出显示信号的直流频谱和低频频谱成分, 横坐标也采用了对数形式。从图 5 可以看出, 不同结构滤波器得到的信号的频谱图基本一致, 只是在直流成分的有些不太

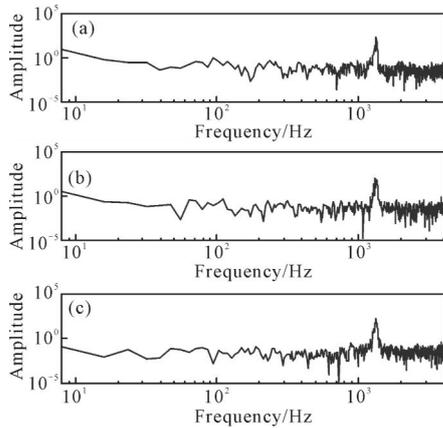


图 5 三种不同结构滤波器典型输出信号的频谱图

Fig.5 Spectra of typical output signals obtained by three spatial filters with different structures

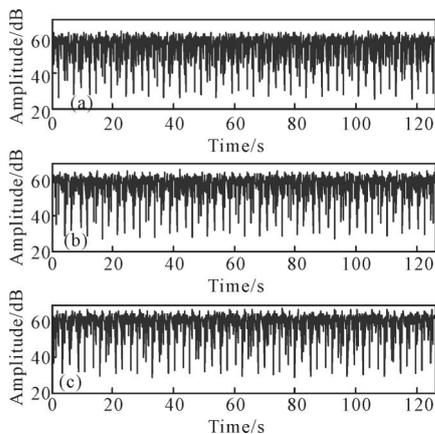


图 6 均匀照明条件下三种不同结构滤波器输出信号的信噪比
Fig.6 Signal-to-noise ratio of output signals obtained by three spatial filters with different structures under the condition of uniform illumination

明显的量的差别。 q 值越靠近中间, 直流成分越少。图 6(a)~6(c) 分别为 $q=1, 3, 5$ 时均匀照明条件下三种不同结构滤波器输出信号的信噪比, 从该图可以看出, 不同结构滤波器得到的信号的信噪比基本一致。因此可以得出, 在均匀照明条件下, 滤波器结构对信号输出的质量影响不大。

3.2.2 非均匀照明

图 7(a)~7(c) 分别为 $q=1, 3, 5$ 时非均匀照明条件下三种不同结构滤波器所得到的典型输出信号的频谱图。频谱图的横纵坐标也采用对数的表示形式。从图 7 可以看出, 三种结构滤波器得到的信号的频谱图都在大约 1330 Hz 处出现了一个尖峰, 由该频率可以解算出物体的运动速度。但是在图 7(a)和(b) 中有较大量的直流成分, 该直流成分的幅度超过了信号频率的幅度。而在图 7(c) 中直流成分很少。图 8(a)~8(c) 分别为 $q=1, 3, 5$ 时非均匀照明条件下三种不同结构滤波器输出信号的信噪比, 从该图可以看出, q 的取值越靠近中间, 信噪比越高。因此可以得出, 在非均匀照明条件下, 滤波器结构对输出信号的质量影响很大。

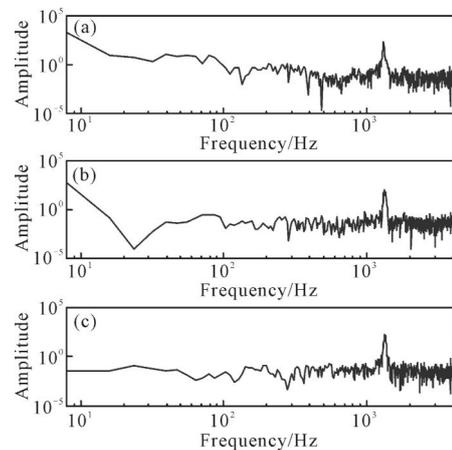


图 7 三种不同结构滤波器典型输出信号的频谱图

Fig.7 Spectra of typical output signals obtained by three spatial filters with different structures

通过比较图 5 和图 7 以及图 6 和图 8 可知, 由 $q=1, 3$ 所表征的滤波器对光照均匀性比较敏感, 而由 $q=5$ 所表征的滤波器对光照均匀性不敏感。因此, 为了消除光照的非均匀性对输出信号质量的影响, 应该采用 $q=5$ 结构的滤波器。

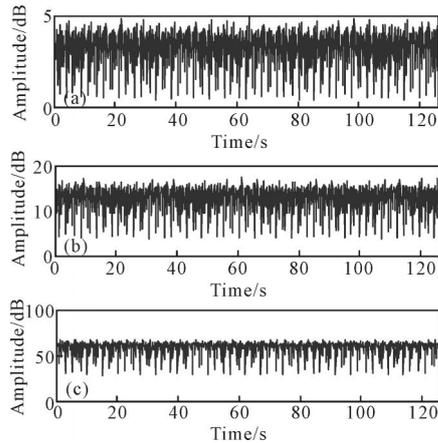


图 8 非均匀照明条件下三种不同结构滤波器输出信号的信噪比
Fig.8 Signal-to-noise ratio of output signals obtained by three spatial filters with different structures

3.3 讨论

图 4 可以看出,在非均匀照明时,相距比较远的像元接收到的光能量差别比相距比较近的像元接收到的光能量差别要大。接收的光能量差别较大时,经过差分滤波器滤波后的信号就较容易含有直流成分。在该系统中,当 $q=1$ 时,前面 16 个像元中前面 8 个和后面 8 个的值做差,剩下的像元中也是每 16 个相互做差。而当 $q=5$ 时,前面 8 个像元中前面 4 个和后面 4 个的值做差,剩下的像元中也是每 8 个相互做差。而相互做差的像元数越少,像元接收到的光能量的差别就越小,从而在信号中产生的直流成分也就越少。因此 $q=5$ 为最佳选择。

这个结论对频移系统^[12]有很大的指导意义。频移系统就是在系统的输出信号上加一个固定的频率偏置,主要用于物体运动方向的识别。频移系统中,滤波器的结构是随着时间变化的。例如,在第一帧图像的时候,滤波器取 $q=1$,而在下一帧则取 $q=2$,并依次类推。在这种情况下, q 不可避免地要取尽所有能取的值,而不是仅取一个值。图 9 为不同照明条件下频移系统典型输出信号的频谱图,纵坐标采用对数形式。该频移系统的频率大小为 1 014.610 Hz。在图 9(a)中有两个小尖峰,分别在 1 014.610 Hz 和 2 345.28 Hz 位置。前者为频移信号,而后者才是速度信号。在图 9(b)中,频移信号的幅度已经大大减小了,而

信号的幅度基本保持不变。因此,在频移系统中,光照应尽量均匀,不然会在信号中产生不利的频谱成分。

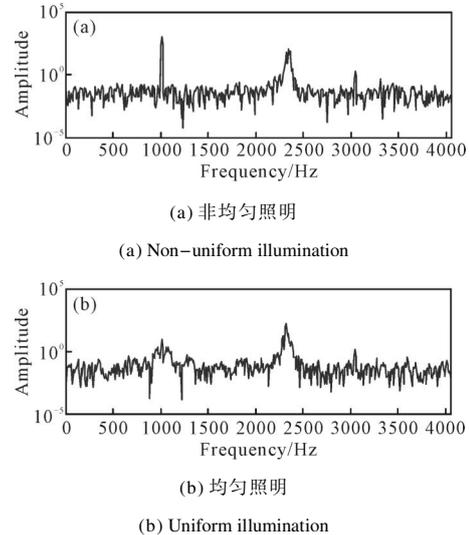


图 9 采用频移时典型输出信号的频谱图
Fig.9 Spectra of typical output signals with frequency shifting

4 结论

文中采用图像传感器作为空间滤波测速仪中的空间滤波器,详细介绍了图像传感器型空间滤波器的结构和实现方法,并对其结构进行了优化设计。分别在均匀照明和非均匀照明条件下,实验得到了输出信号的频谱图和信噪比,并以这两个方面作为评价信号质量的标准,从而为滤波器结构的优化提供依据。通过对比在不同照明条件下由不同结构滤波器得到的输出信号的质量,得到了一种在非均匀照明条件下能大大消除输出信号中残留的基底成分的滤波器结构。同时,该结论对频移系统也具有指导意义,为了避免频移系统的输出信号中出现不利的频谱成分,应尽量使用均匀照明。

参考文献:

- [1] Ator J T. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53 (12): 1416-1422.
- [2] He Xin, Long Xingwu, Zhou Jian, et al. Spatial filtering velocimeter using frequency shifting by the method of rotating kernel[J]. *Measurement*, 2015, 73: 15-23.
- [3] He Xin, Zhou Jian, Nie Xiaoming, et al. Spatial filtering

- self-velocimeter for vehicle application using a CMOS linear image sensor[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 34110.
- [4] Tsuyoshi Ushizaka, Toshimitsu Asakura. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(12): 1870-1874.
- [5] Yoshihisa Aizu, Tsuyoshi Ushizaka, Toshimitsu Asakura. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating: a differential type[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(5): 627-635.
- [6] Zheng Lina, Kuang Haipeng, Li Wenming, et al. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 211001. (in Chinese)
郑丽娜, 匡海鹏, 李文明, 等. 基于线阵 CCD 的空间滤波测速信号基频消除方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 211001.
- [7] He Xin, Zhou Jian, Nie Xiaoming, et al. A novel spatial filtering velocimeter based on a linear image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4117-4122. (in Chinese)
何鑫, 周健, 聂晓明, 等. 基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (12): 4117-4122.
- [8] Aizu Y, Asakura T. *Spatial Filtering Velocimetry: Fundamentals and Applications*[M]. New York: Springer, 2005.
- [9] Ando S, Nara T, Kurihara T. Spatial filtering velocimetry revisited: exact short-time detecting schemes from arbitrary small-size reticles[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(2014): 85001.
- [10] He Xin, Long Xingwu, Nie Xiaoming, et al. Direction discrimination and low-speed measurement for spatial filtering velocimeter [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015 (s): 203-216.
- [11] He Xin, Nie Xiaoming, Zhou Jian, et al. Vehicle self-velocimeter for navigation system based on a linear image sensor [C]//*Photonics Asia 2014: Advanced Sensor Systems and Applications VI*, 2014.
- [12] Itakura Y, Sugimura A, Tsutsumi S. Amplitude-modulated reticle constructed by a liquid crystal cell array [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(16): 2819-2826.