

激光诱导等离子体干涉图 相位信息的提取

陈汝钧

Y. H. Jin D. C. Emmony

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074) (拉夫伯勒理工大学物理系, 英国)

摘 要 分析了强激光在空气中产生等离子体干涉图的空间频谱特性, 采用高阶契比雪夫数字递归滤波器和阈值自动调整的相位解包算法成功地提取了等离子体干涉图的相位信息。论述了对干涉图样进行数字滤波时的设计考虑, 给出了实验结果。实践表明, 这种方法可用于快速、瞬态光学干涉图样相位信息的提取。

关键词 光学信息处理, 干涉图相位提取, 相位解包。

1 引 言

为了研究等离子体的某些动力学特性, 可以用强激光在空气中激发产生等离子体, 并用马赫-陈德尔干涉仪和 CCD 摄像机记录等离子体的干涉图样, 如图 1 所示。图 1 中部干涉条纹中断处对应在强激光作用下产生的等离子体区域。根据等离子体附近干涉图样的相位变化, 可以计算得到等离子体周围物质承受的压力^[1]。

在二维干涉图样中提取相位信息通常有两种方法^[2]。一种是相位移动法, 它是利用压电元件使干涉反射镜的倾斜角发生微小的变动, 从而使干涉图的载波条纹产生相移。根据多幅(至少是四幅)载波条纹产生了相移的干涉图, 通过计算得到干涉图的相位分布^[3], 但它只能用于静止的或缓变信号的干涉图样。另一种方法是傅里叶变换法, 就是直接对含有载波干涉条纹的单幅干涉图进行傅里叶变换求取主值区的相位值。然后进行相位解包, 以确定相位的真实值^[2]。

作者对图 1 所示的等离子体干涉图进行空间频谱分析后, 直接逐行进行数字滤波处理, 得到主值相位二维分布图, 然后逐行进行相位解包操作, 最后得到真实相位分布的似三维图形。图 1 干涉图的像元数为 512×512 。

2 基本理论

由激光器、马赫-陈德尔干涉仪、CCD 摄像机和计算机等组成快速测量系统, 如图 2 所

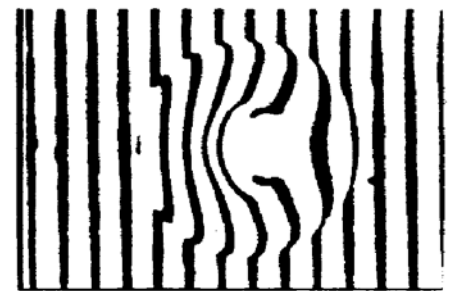


Fig. 1 Interferogram of laser breakdown in air

示。系统的核心部分是马赫-陈德尔干涉仪，它由直径为 100 mm 的两块平面反射镜和两块分光镜组成。光源为脉冲式充氮染料激光器，采用 Coumarin 500 染料，激光的中心波长为 514 nm，脉宽为 500 ps，输出能量为 15 μJ。该光束经准直后送入干涉仪。调 Q Nd:YAG 激光器输出的 1.06 μm 激光与空气相互作用产生等离子体，该激光束经平凹透镜扩束后，聚焦在干涉仪的光路中。干涉仪输出的光信号经透镜会聚并在 CCD 摄像机的焦平面上成像，由帧存储器组成 512×512 的数字图像送入计算机待处理。

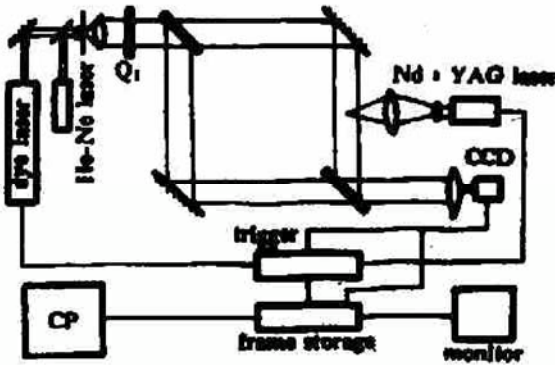


Fig. 2 Experimental arrangement for optical measurements of plasma interferograms

在系统的像平面上，波前的复振幅由两部分组成，一个是经过等离子体的信号光束，其复振幅为 $A(x, y) \times \exp[i\varphi(x, y)]$ ；另一是参考光束，为 $B \exp(ikr \sin\theta)$ ，其中 $k = 2\pi/\lambda$ ， θ 是信号光束与参考光束之间的倾斜角。这样，干涉图样的强度分布可表示为

$$I_1(x, y) = |A(x, y)|^2 + B^2 + 2A(x, y)B \times \cos[kr \sin\theta - \varphi(x, y)]. \quad (1)$$

实际上， $k \sin\theta$ 就是干涉条纹的空间频率，记为 $k \sin\theta = \omega_x$ 。(1) 式右边第一项为低频分量，第二项为直流分量。用快速傅里叶变换对图 1 的一行信号进行空间频谱分析，得到图 3 所示的频谱图。从频谱图中可以看到，信号谱瓣分列在直流分量的两边。可以在光谱平面中心设置适当大小的光阑除去(1)式右边的前两项，也可以在信号处理时采用带通或高通滤波器取出信号谱瓣而滤除这两项。滤除这两项后，(1)式将变为

$$I_2(x, y) = 2A(x, y)B \cos[\omega_x x - \varphi(x, y)]. \quad (2)$$

采用逐行处理的办法处理(2)式所表示的信号，将(2)式表示的光强分布分别乘以 $\cos \omega_x x$ 和 $\sin \omega_x x$ ，得到

$$I_3(x, y) = I_2(x, y) \cos \omega_x x = A(x, y)B \cos[2\omega_x x - \varphi(x, y)] + A(x, y)B \cos \varphi(x, y), \quad (3)$$

和

$$I_4(x, y) = I_2(x, y) \sin \omega_x x = A(x, y)B \sin[2\omega_x x - \varphi(x, y)] + A(x, y)B \sin \varphi(x, y). \quad (4)$$

(3)式和(4)式的右边第一项都是不必要的高频项，可以用低通滤波器取出低频项而将这些高频项除去，这样就得到

$$I_5(x, y) = A(x, y)B \cos \varphi(x, y) \quad (5)$$

$$I_6(x, y) = A(x, y)B \sin \varphi(x, y). \quad (6)$$

由(5)式和(6)式即可得到主值相位分布 $\varphi(x, y)$ ：

$$\varphi(x, y) = \text{arctg}[I_6(x, y)/I_5(x, y)]. \quad (7)$$

如上所述，为了得到相位分布 $\varphi(x, y)$ ，对干涉图样逐行进行低通、带通(或高通)滤波，所用的滤

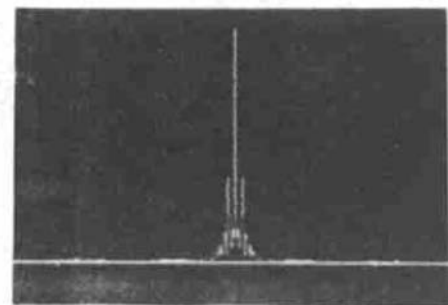


Fig. 3 Spatial spectrum of plasma interferogram

波器都应该具有陡峭的幅频特性，并且在通带内具有线性相位特性。在进行这些滤波操作时，一个重要的问题是要准确地确定干涉载波的空间频率 ω_x ，这可以利用干涉图上没有等离子体作用的干涉条纹来得到。首先取出一行这样的信号，用低通滤波器进行平滑，然后对该

行信号的幅度求平均，再将该行信号减去平均值以后求取过零点的次数，就可以准确地求得空间载波频率 ω_s 。

3 高阶数字滤波的实现

为了用高阶数字递归滤波器来实现上述的滤波操作，设计了 8 阶契比雪夫(Chebyshev)数字低通滤波器和 8 阶契比雪夫数字带通滤波器。这些滤波器均采用二阶递归滤波节级联而成，具有如下形式的转移函数：

$$Y(z) = A \prod_{n=1}^4 \frac{1 + a_n z^{-1} + b_n z^{-2}}{1 + c_n z^{-1} + d_n z^{-2}} \tag{8}$$

式中 A 为滤波器的增益系数； m 为级联的级数，此处为 4 级； a_n 、 b_n 、 c_n 和 d_n 为第 m 级二阶滤波节的系数。这种级联形式便于用图 4 所示的方式来实滤波的算法。在图 4 中， $m = 2$ ； z_0 、 z_1 、 z_2 和 z_3 为对应的存储变量， Y_1 为第一滤波节的输出； Y_2 为第二滤波节的输出； W_1 和 W_2 分别为两个滤波节中间环节的加法器的输出。相应的具体算法如下：

$$\begin{cases} W_1 = -c_1 z_0 - d_1 z_1 + Ax, & Y_1 = W_1 + a_1 z_0 + b_1 z_1; \\ W_2 = -c_2 z_2 - d_2 z_3 + Y_1, & Y_2 = W_2 + a_2 z_2 + b_2 z_3 \end{cases} \tag{9}$$

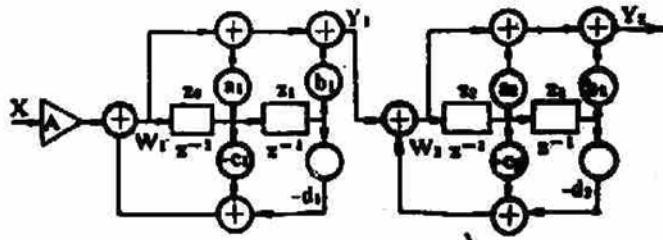


Fig. 4 Cascade canonical form of digital recursive filters

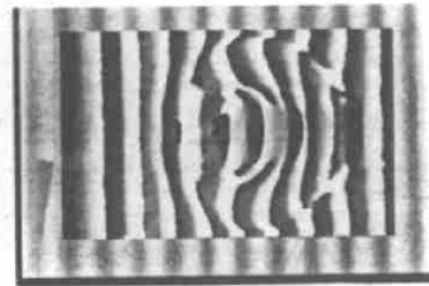


Fig. 5 Wrapping phase distribution of the interferogram

将图 4 所示的级联形式顺次扩展，很容易得到 8 阶数字递归滤波器和对应的算法。各滤波节的系数和增益 A 的具体数值可以根据数字滤波器的标准设计方法^[7]得到。作者用 C++ 编制了所需的 8 阶低通和带通契比雪夫数字递归滤波器，以函数调用的方式安排在程序中随时调用，非常方便。用高阶数字滤波器对等离子体干涉图进行逐行处理，得到图 5 所示的相位分布图。可以看到，这样得到的相位分布图具有较高的信噪比。

4 相位解包

(7)式中反三角函数的值限制在主值区间，这样求得的相位值就被限制在 $\pm \pi$ 的范围内。这种情况通常称为相位包裹，为了得到相位的真实值，就需要进行相位解包。在表现形式上，相位包裹是使相位分布出现不连续的跳变点。所谓相位解包，就是寻找这些不连续的跳变点，并对跳变点处的相位值进行修正，从而得到连续的相位分布。图 6 说明了相位解包的意义。其中上图为未解包的某一行的相位分布曲线，有多处不连续跳变点。下图为解包后的相位分布曲线。很明显，经过相位解包操作之后，相位的真实值得以恢复。图 6 表明，可以用设置阈值的方法来寻找主值相位的不连续点。当相位分布函数 $\varphi(x, y)$ 是以抽样的形式处理时，不连续处的相位跳变幅度小于 2π ，而当抽样的频率接近奈斯特极限时，相位跳变的幅度实际上接近于 π ^[4]。因此，对于没有噪声的数据信号，使寻找主值相位不连续点的阈值定为 π 总

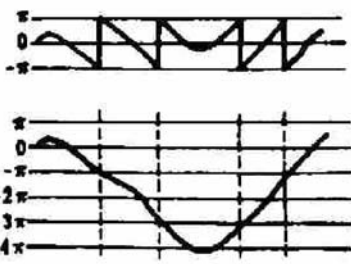


Fig. 6 Scheme of phase unwrapping

是很安全的^[4]。噪声的存在可能使主值相位跳变点的寻找产生差错，那么相位的解包也就不正确了。Kazuyoshi Itoh 曾给出了一个一维相位解包的通用算法^[5]。在实验中，作者发现当干涉图样或者主值相位分布图的信噪比较高时，采用自动阈值调整法，相位解包可以较简单地实现。在干涉图样空间载波频率固定的情况下，主值相位不连续跳变点的个数与干涉条纹数是一致的，记为 n_0 。因此，在对干涉图样的某一行进行

相位解包的同时，记下相位跳变点的个数 n ，当 $n = n_0$ 时，可判定相位解包的结果是正确的；当 $n \neq n_0$ 时，将阈值增大 ($n > n_0$) 或减小 ($n < n_0$) 一个小量，重新进行解包操作，直至 $n = n_0$ 为止。

5 实验结果及结论

用高阶数字滤波和阈值自动调整的相位解包算法提取干涉图样相位信息的流程如图 7 所示。实验中，取初始阈值为 4 rad.，阈值自动调整的步进值为 0.2 rad.。用阈值自动调整法对图 5 的主值相位分布图逐行进行相位解包操作后，得到了真实的相位分布图，图 8 就是真实相位的似三维分布图。

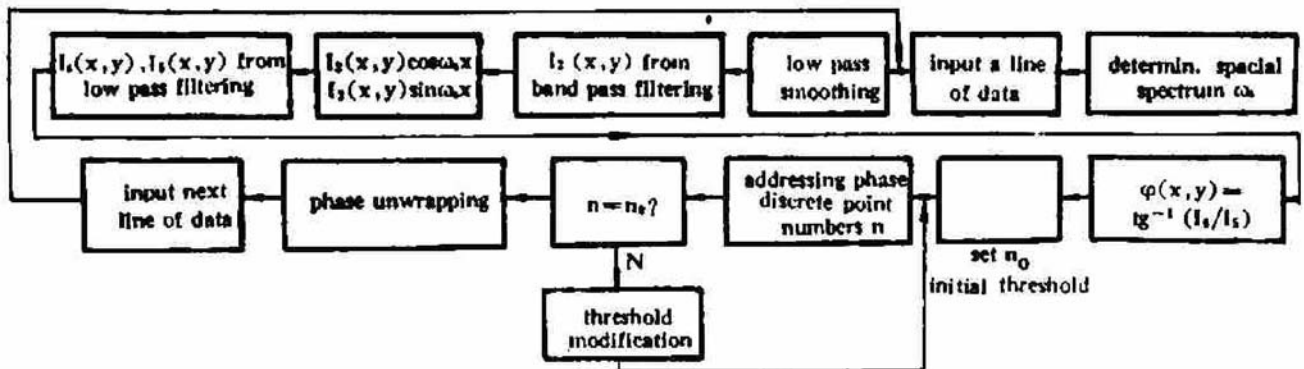


Fig. 7 Block diagram of the program for extracting phase information from the interferogram

采用数字滤波直接从干涉图中提取相位信息，较之相位步进法显然要方便得多，而且可适用于快速和瞬态过程的光学干涉图样的相位信息提取；较之傅里叶变换法也更为直接和简便，所需的计算量较小，速度较快。

与模拟滤波相比较^[6]，数字滤波可以很方便地修改滤波器的参数，以适合于不同空间载波频率的干涉图样。另外，由于模拟电子元件的精度限制，因而高阶数字滤波器的特性更理想。本文采用的是 8 阶数字递归滤波器，也曾使用过 12 阶、16 阶的数字递归滤波器，设计和实现都很方便。采用高阶滤波，得到的主值相位分布图具有较高的信噪比，这就为实现相位解包创造了很好的条件。



Fig. 8 Pseudo 3D distribution of true phase after unwrapping

实验表明，自动阈值调整相位解包算法将二维相位解包变为一维处理，能够准确地寻找主值相位的不连续跳变点，恢复相位的真实值，具有简洁、快速、准确的特点。这种相位解包

算法与高阶数字滤波相结合, 就可以快速而准确地从光学干涉图中提取相位信息。

参 考 文 献

- [1] Y. H. Jin, R. J. Chen, S. Shaw *et al.*, Optical investigation of laser interaction with material. *Proc. SPIE*, 1994, **2321**: 616~619
- [2] J. M. Huntley, H. Saldner, Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- [3] P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju, Digital phase-shifting interferometry; a simple error-compensating phase calculation algorithm. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2504~2506
- [4] D. C. Ghiglia, G. A. Mastin, L. A. Romero, Cellular-automato method for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(1): 267~279
- [5] Kazuyoshi Itoh, Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14): 2470
- [6] Y. Ichioka, M. Inuiya, Direct phase detecting system. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(7): 1507~1514
- [7] Jackson L. B., *Digital Filters and Signal Processing*, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1986

Extracting Phase Information from the Interferogram of Laser Breackdown in Air

Chen Rujun

(*Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

Y. H. Jin D. C. Emmony

(*Department of Physocs, Loughborough University of Technology,
Loughborough, Leics, LE113TU, United Kindom*)

(Received 4 November 1994; revised 3 January 1995)

Abstract The spacial spectrum of the interferogram of plasma induced in air by high power infrared laser radiation is analysed. And the phase information successfully is extracted from the interferogram by using high-order Chebyshev digital recursive filters and the phase unwrapping algorithm with threshold auto-adjustment. The designing considerations of high-order digital recursive filters are described and experiment results are given in this paper. The results show that this approach can be used for extracting phase information from high-speed or instant optical interferograms.

Key words optical information processing, extracting phase information from interferograms, phase unwrapping.