



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101949765 A

(43) 申请公布日 2011.01.19

(21) 申请号 201010273755.0

(22) 申请日 2010.09.07

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 王刚 许博谦 孙敬建

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 王淑秋

(51) Int. Cl.

G01M 9/06 (2006.01)

G01M 9/08 (2006.01)

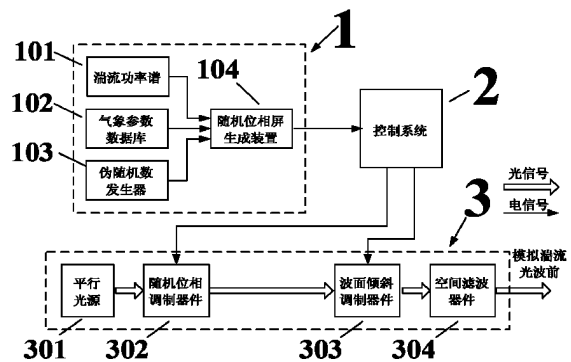
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

大气湍流光波前模拟系统

(57) 摘要

本发明涉及一种大气湍流光波前模拟系统,该系统的随机位相屏生成装置根据湍流功率谱、气象参数数据库及伪随机数发生器提供的数据计算出所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据,并将计算的结果输出至控制系统;控制系统根据接收的模拟湍流波前位相空间分布状态数据输出控制信号,控制随机位相调制器件实时将平行光源输出的平面光波调制为起伏光波面,控制波面倾斜调制器件实时调整随机位相调制器件输出的起伏光波面的倾角;波面倾斜调制器件输出的光波经空间滤波器件滤除光路中的杂散光后输出模拟湍流光波前。本发明能够精确、高速地模拟湍流波面的微小变化,具有高调制深度、高响应频率的特点,适用于各类大口径光学成像、激光通信等系统。



1. 一种大气湍流光波前模拟系统,其特征在于包括湍流波前求解模拟系统(1),控制系统(2),实体湍流波前再现系统(3);所述的湍流波前求解模拟系统(1)包括湍流功率谱(101)、气象参数数据库(102)、伪随机数发生器(103)及随机位相屏生成装置(104);所述的实体湍流波前再现系统(2)包括平行光源(301)、随机位相调制器件(302)、波面倾斜调制器件(303)及空间滤波器件(304);所述随机位相屏生成装置(104)根据湍流功率谱(101)、气象参数数据库(102)及伪随机数发生器(103)提供的数据计算出所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据,并将计算的结果输出至控制系统(2);控制系统(2)根据接收的模拟湍流波前位相空间分布状态数据输出控制信号,控制随机位相调制器件(302)实时将平行光源(301)输出的平面光波调制为起伏光波面,控制波面倾斜调制器件(303)实时调整随机位相调制器件(302)输出的起伏光波面的倾角;波面倾斜调制器件(303)输出的光波经空间滤波器件(304)滤除光路中的杂散光后输出模拟湍流光波前。

2. 根据权利要求1所述的大气湍流光波前模拟系统,其特征在于所述的控制系统(2)包括数据预处理装置(201),波面倾斜状态采集装置(202),波面倾斜调制装置(203),随机位相调制装置(204),输出计时装置(205);

所述数据预处理装置(201)对随机位相屏生成装置(104)输出的湍流波前的位相空间分布状态数据进行预处理,将其转化为适合随机位相调制器件运行格式的起伏波前数据和适合波面倾斜调制器件运行格式的波面倾斜数据,并将起伏波前数据和波面倾斜数据分别传输给随机位相调制装置(204)和波面倾斜调制装置(203);

所述的波面倾斜状态采集装置(202)采集波面倾斜调制器件(303)的波面倾角反馈信号,并将其输出给波面倾斜调制装置(203);

所述的波面倾斜调制装置(203)根据数据预处理装置(201)传输的波面倾斜数据和波面倾斜状态采集装置(202)传输的波面倾角反馈信号输出控制信号,控制波面倾斜调制器件(303)实时调整随机位相调制器件(302)输出的起伏光波面的倾角;

所述的随机位相调制装置(204)根据数据预处理装置(201)传输的起伏波前数据输出控制信号,控制随机位相调制器件(302)实时将平行光源(301)输出的平面光波调制为起伏光波面;

所述的输出计时装置(205)内含有一个计时器,用于计算波面倾斜调制器件(303)和随机位相调制器件(302)对光波前进行调制的持续时间。

3. 根据权利要求1或2所述的大气湍流光波前模拟系统,其特征在于平行光源(301)包括激光光源(812),扩束镜(811),分束镜(831),白光点光源(822),准直镜(821);激光光源(812)发射的激光光束经扩束镜(811)扩束后入射到分束镜(831),再经分束镜(831)反射后入射到随机位相调制器件(302);白光点光源(822)发出的光线经准直镜(821)准直后入射到分束镜(831),再经分束镜(831)透射后入射到随机位相调制器件(302)。

4. 根据权利要求1或2所述的大气湍流光波前模拟系统,其特征在于随机位相调制器件(302)采用反射式空间光调制器、薄膜变形反射镜或者透射式空间光调制器与两块晶体偏振片组成的空间光调制组件。

5. 根据权利要求1或2所述的大气湍流光波前模拟系统,其特征在于波面倾斜调制器件(303)采用压电陶瓷致动的偏转反射镜或电机驱动的偏转反射镜。

6. 根据权利要求1或2所述的大气湍流光波前模拟系统,其特征在于空间滤波器件(304)采用可调整式孔径光阑。

## 大气湍流光波前模拟系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种在实验室条件下,能够精确模拟大气湍流扰动引起的光波前位相随机分布的大气湍流光波前模拟系统。

### 背景技术

[0002] 在外场长距离光成像、光传输系统的研制和应用中,大气湍流扰动引起的信号质量下降是限制系统性能发挥的主要技术瓶颈,如何在实验室条件下建立能精确再现大气湍流、与自适应校正系统测试验证紧密结合的模拟设备业已成为天文、航空甚至航天大口径光学系统及激光通信系统研制水平提升亟待解决的关键所在。传统的湍流模拟方法包括热空气法、折射率/温度梯度法,存在可操作性较差、不具有可重复性等缺点,并不适合在实验室条件下使用。

[0003] 中国专利公报公开了一种“基于微光学技术的大气湍流光学效应实验室模拟系统”(申请号 200610112431.2;公告号:CN 1912563A)。该系统采用旋转随机位相片的方法模拟湍流波前,通过传动装置带动随机位相片转动的方法模拟大气湍流对光波位相的动态调制效应。该方法能够模拟的波面分布种类有限,且模拟的波前具有显著的周期性,与实际的湍流波前差距较大。

[0004] 中国专利公报还公开了一种“具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器”(申请号 200610017114.2;公告号:CN 101126675A)。该模拟器采用液晶器件模拟湍流波前,由于受制于液晶器件的局限性,调制深度低,响应速度较慢,无法模拟瞬息万变的湍流波前。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种在实验室条件下能够精确、高速地模拟开放大气湍流条件下的波前起伏随机过程,具有高调制深度、高响应频率特点的大气湍流光波前模拟系统。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明的大气湍流光波前模拟系统包括湍流波前求解模拟系统,控制系统,实体湍流波前再现系统;所述的湍流波前求解模拟系统包括湍流功率谱、气象参数数据库、伪随机数发生器及随机位相屏生成装置;所述的实体湍流波前再现系统包括平行光源、随机位相调制器件、波面倾斜调制器件及空间滤波器件;所述随机位相屏生成装置根据湍流功率谱、气象参数数据库及伪随机数发生器提供的数据计算出所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据,并将计算的结果输出至控制系统;控制系统根据接收的模拟湍流波前位相空间分布状态数据输出控制信号,控制随机位相调制器件实时将平行光源输出的平面光波调制为起伏光波面,控制波面倾斜调制器件实时调整随机位相调制器件输出的起伏光波面的倾角;波面倾斜调制器件输出的光波经空间滤波器件滤除光路中的杂散光后输出模拟湍流光波前。

[0007] 所述的湍流功率谱根据空间波数  $\kappa$  和湍流外尺度  $L_0$  生成折射率谱密度模型  $\Phi_n$ , 并将其作为随机位相屏生成装置的输入。

[0008] 所述的气象参数数据库存储 Fried 参数  $r_0$ 、实体湍流波前再现系统的光学孔径  $D$  和风速矢量  $\mathbf{V} = (v, \theta_w)$ ，这些参数作为随机位相屏生成装置的输入。

[0009] 伪随机数发生器生成随机位相  $\phi_k$ ，随机位相  $\phi_k$  作为随机位相屏生成装置的输入。

[0010] 所述的随机位相屏生成装置根据湍流功率谱提供的折射率谱密度模型  $\Phi_n$ 、气象参数数据库提供的 Fried 参数  $r_0$ 、实体湍流波前再现系统的光学孔径  $D$ ，风速矢量  $\mathbf{V} = (v, \theta_w)$  及伪随机数发生器提供的随机位相  $\phi_k$  计算出所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据。

[0011] 本发明基于对实际大气湍流场的随机过程和光学效应的深入研究，根据湍流功率谱、气象参数数据及伪随机数，采用数学算法计算出随机位相屏序列，生成湍流扰动虚拟波前，实现大气湍流波前位相的精确求解；由控制系统根据随机位相屏生成模块的计算结果控制随机位相调制器件和波面倾斜调制器件对平行光源输出的平面光波进行调制，输出湍流扰动实体波前，实现了动态模拟，突破了外场试验固定场地与气象因素的限制，为光学工程试验研究提供了虚拟大气湍流介质，从而解决了长期困扰工程界的大气光学湍流实验室逼真模拟问题，并最大限度地节省了人力、物力和财力资源耗费。本发明能够精确、高速地模拟湍流波面的微小变化，具有高调制深度、高响应频率的特点，适用于各类大口径光学成像、激光通信等系统工程。

## 附图说明

[0012] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0013] 图 1 为本发明的大气湍流光波前模拟系统的结构框图。

[0014] 图 2 为随机位相屏生成装置 104 湍流波前求解软件流程图。

[0015] 图 3 为控制系统结构框图。

[0016] 图 4 是启用激光光源 812 时的平行光源光路示意图。

[0017] 图 5 是启用白光点光源 822 时的平行光源光路示意图。

[0018] 图 6 是实施例 1 的实体湍流波前再现系统光路示意图。

[0019] 图 7 是实施例 2 的实体湍流波前再现系统光路示意图。

## 具体实施方式

[0020] 如图 1 所示，本发明的大气湍流光波前模拟系统包括湍流波前求解模拟系统 1，控制系统 2，实体湍流波前再现系统 3；所述的湍流波前求解模拟系统 1 包括湍流功率谱 101、气象参数数据库 102、伪随机数发生器 103 及随机位相屏生成装置 104；所述的实体湍流波前再现系统 2 包括平行光源 301、随机位相调制器件 302、波面倾斜调制器件 303 及空间滤波器件 304；所述的随机位相屏生成装置 104 根据湍流功率谱 101 提供的折射率谱密度模型  $\Phi_n$ 、气象参数数据库 102 提供的 Fried 参数  $r_0$ ，实体湍流波前再现系统 3 的光学孔径  $D$ ，风速矢量  $\mathbf{V} = (v, \theta_w)$  及伪随机数发生器 103 提供的随机位相  $\phi_k$  计算出随机位相屏序列，生成湍流扰动虚拟波前（即所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据），并将计算的结果输出至控制系统 2；控制系统 2 根据接收的模拟湍流波前位相空间分布状态数据输出控

制信号,控制随机位相调制器件 302 将平行光源 301 输出的平面光波调制为起伏光波面,控制波面倾斜调制器件 303 调整随机位相调制器件 302 输出的起伏光波面的倾角,空间滤波器件 304 滤除光路中的杂散光后输出模拟湍流光波前。

[0021] 实体湍流波前再现系统 3 中采用了两个电光调制器件(随机位相调制器件 302 和波面倾斜调制器件 303),二者需要控制系统 2 的控制信号才能实时有效地调制入射光波。

[0022] 所述湍流波前求解模拟系统 1 和控制系统 2 可以共用一台普通的台式计算机实现,也可以分别各用一台计算机实现。

[0023] 所述湍流功率谱 101 和气象参数数据库 102 以数据的形式存在,可以存储在计算机的存储器中;伪随机数发生器 103 通过编程实现,在各种计算机语言(如 C、C++、Matlab)中,均有可以实现伪随机数发生器功能的函数或程序。随机位相屏生成装置 104 也通过编程实现。湍流功率谱、气象参数数据以及伪随机数发生器 103 生成的随机位相  $\Phi_k$  作为随机位相屏生成装置 104 的输入,随机位相屏生成装置 104 根据湍流功率谱 101、气象参数数据 102 和伪随机数发生器 103 提供的初始条件,计算出所要模拟的湍流波前的位相空间分布状态数据。

[0024] 如图 2 所示,所述的随机位相屏序列生成过程包括如下具体步骤:

[0025] 第一步:引入一种典型的折射率谱密度模型  $\Phi_n$ ;

[0026] 所述的模型包括:

[0027] 1) Kolmogorov 模型:

$$[0028] \quad \Phi_n^K(\kappa) = \kappa^{-11/3}$$

[0029] 2) 指数模型:

[0030]

$$\Phi_n^E(\kappa) = \kappa^{-11/3} [1 - \exp(-\kappa^2 / \kappa_{01}^2)]$$

[0031] 3) von Karman 模型:

$$[0032] \quad \Phi_n^V(\kappa) = (\kappa^2 + \kappa_{02}^2)^{-11/6}$$

[0033] 4) Greenwood 模型:

$$[0034] \quad \Phi_n^G(\kappa) = (\kappa^2 + \kappa_{03}^2 \kappa)^{-11/6}$$

[0035] 上式中,  $\kappa$  是空间波数,  $\kappa_{01}$ 、 $\kappa_{02}$ 、 $\kappa_{03}$  都是与湍流外尺度  $L_0$  相关的系数:

$$[0036] \quad \kappa_{01} = 2\pi/L_0, \quad \kappa_{02} = 3.075/L_0, \quad \kappa_{03} = 3.349/L_0$$

[0037] 第二步:计算各阶 Zernike 多项式:

$$[0038] \quad Z_j(r, \theta) = R_n^m(r) \Theta_n^m(\theta)$$

[0039] 其中,径向函数  $R_n^m(r)$ :

$$[0040] \quad R_n^m(r) = \sqrt{n+1} \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} \left(\frac{2r}{D}\right)^{n-2s}$$

[0041] 角向函数  $\Theta_n^m(\theta)$ :

$$[0042] \quad \Theta_n^m(\theta) = \begin{cases} 2(\sqrt{2})^{l-\delta_{0m}} \cos m\theta, & \text{even } j \\ 2\sqrt{2} \sin m\theta, & \text{odd } j \end{cases}$$

[0043] 第三步:根据给定的时间间隔,将  $\Phi_n$  代入 Zernike 多项式系数协方差关于时间的函数  $C_{a_j}(\tau)$ :

$$[0044] \quad C_{a_j}(\tau) = 2c(n+1)D^{-2}r_0^{-5/3} \int_0^\infty d\kappa \kappa^{-1} J_{n+1}^2(\kappa) \Phi_n\left(\frac{2}{D}\kappa, L_0\right) \left[ J_0\left(\frac{2v\tau}{D}\kappa\right) + (-1)^{l+m}(1-\delta_{0m})J_{2m}\left(\frac{2v\tau}{D}\kappa\right) \cos(2m\theta_w) \right]$$

[0045] 其中,  $c$  是常数, 近似值约为 6.16, 精确值:

$$[0046] \quad c = \Gamma(14/3) [4.8 \Gamma(1.2)]^{5/6} [\Gamma(11/6)]^2 / [2\pi^{1/2} \Gamma(7/3) \Gamma(17/6)]$$

[0047]  $r_0$  是 Fried 参数, 光学孔径  $D$ , 风速矢量  $\mathbf{V} = (v, \theta_w)$ ,  $J_1(\cdot)$  是第 1 阶 Bessel 函数。

[0048] 第四步: 对  $C_{a_j}(\tau)$  进行快速 Fourier 变换, 得到 Zernike 多项式系数的瞬时功率谱  $W_{a_j}(f)$

$$[0049] \quad W_{a_j}(f) = 2 \int_0^\infty d\tau C_{a_j}(\tau) \exp(i2\pi f\tau)$$

[0050] 第五步: 通过伪随机数发生器生成  $N$  个介于 0 到  $2\pi$  之间的随机位相  $\phi_k$ ;

[0051] 第六步: 通过以下计算即可获得一组 Zernike 多项式系数

$$[0052] \quad a_j(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k)$$

$$[0053] \quad = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\Delta f \cdot W_{a_j}(k\Delta f)} \sin(2\pi f_k t + \phi_k)$$

[0054] 第七步: 将 Zernike 多项式乘以 Zernike 多项式系数时间序列, 就可以得到一组动态的随机位相屏序列。

[0055] (参考文献)

[0056] Gang Wang. A New Random-Phase-Screen Time Series Simulation Algorithm for Dynamically Atmospheric Turbulence Wave-front Generator. Proc. of SPIE Vol. 6027602716-1 ~ 12

[0057] 所述控制系统 2 可以采用公知的基于计算机的控制系统, 也可以采用基于 ARM 的控制系统或基于 DSP 的控制系统等。

[0058] 如图 3 所示, 控制系统 2 包括数据预处理装置 201, 波面倾斜状态采集装置 202, 波面倾斜调制装置 203, 随机位相调制装置 204, 输出计时装置 205;

[0059] 所述数据预处理装置 201 对随机位相屏生成装置 104 输出的湍流波前的位相空间分布状态数据进行简单的预处理, 将其转化为适合随机位相调制器件运行格式的起伏波前数据和适合波面倾斜调制器件运行格式的波面倾斜数据, 并将起伏波前数据和波面倾斜数据分别传输给随机位相调制装置 204 和波面倾斜调制装置 203;

[0060] 波面倾斜状态采集装置 202 采集波面倾斜调制器件 303 的波面倾角反馈信号, 并将其输出给波面倾斜调制装置 203, 作为校正控制信号的依据;

[0061] 波面倾斜调制装置 203 根据数据预处理装置 201 传输的波面倾斜数据和波面倾斜状态采集装置 202 传输的波面倾角反馈信号输出控制信号, 控制波面倾斜调制器件 303 实时调整随机位相调制器件 302 输出的起伏光波面的倾角;

[0062] 随机位相调制装置 204 根据数据预处理装置 201 传输的起伏波前数据输出控制信号, 控制随机位相调制器件 302 实时将平行光源 301 输出的平面光波调制为起伏光波面;

[0063] 输出计时装置 205 内含有一个计时器, 用于计算波面倾斜调制器件 303 和随机位相调制器件 302 对光波前进行调制的持续时间。

[0064] 控制系统 2 在控制软件开始运行后, 数据预处理装置 201 是首先运行的模块, 其余

四个模块（波面倾斜状态采集装置 202、波面倾斜调制装置 203、随机位相调制装置 204、输出计时装置 205）在数据预处理装置 201 运行完毕之后并行运行。在得到用户的终止命令后，四个模块一并停止。

[0065] 如图 4 所示，平行光源 301 采用双光路、可切换的结构，包括激光光源 812，扩束镜 811，分束镜 831，白光点光源 822，准直镜 821。

[0066] 激光光源 812 发射的激光光束经扩束镜 811 扩束后入射到分束镜 831，再经分束镜 831 反射后入射到随机位相调制器件 302；白光点光源 822 发出的光线经准直镜 821 准直后入射到分束镜 831，再经分束镜 831 透射后入射到随机位相调制器件 302。

[0067] 如图 4 所示，当启用激光光源 812 时，将激光器的开关打开，将白光点光源 822 的开关关闭；如图 5 所示，当启用白光点光源 822 时，将激光器的开关关闭，将白光点光源 822 的开关打开。通过上述操作，可实现在两种光源间的快速切换。

[0068] 平行光源 301 还可以采用如图 6、7 所示的由激光器 402 和扩束镜 403 组成的光路结构。

[0069] 随机位相调制器件 302 的功能是将平行光源 301 出射的平面光波调制为起伏光波面，可以采用反射式空间光调制器或薄膜变形反射镜等，也可以采用透射式空间光调制器与两块晶体偏振片组成的空间光调制组件。

[0070] 随机位相调制器件 302 调制后的起伏波面，再由波面倾斜调制器件 303 调整倾角，以增加位相调制范围。波面倾斜调制器件 303 可以采用压电陶瓷致动的偏转反射镜、电机驱动的偏转反射镜或以其他方式驱动的偏转反射镜等器件中的一种或多种。

[0071] 空间滤波器件 304 的功能是滤除波面倾斜调制器件 303 输出光波中影响输出波面质量的杂散光。空间滤波器件 304 可以采用可调整式孔径光阑。

[0072] [ 实施例 1 ]

[0073] 如图 6 所示，实体湍流波前再现系统 3 中的平行光源 401 由激光器 402 和扩束镜 403 组成。

[0074] 随机位相调制器件采用透射式空间光调制器 405 与两块晶体偏振片 404、404' 组成的空间光调制组件。透射式空间光调制器 405 的前后各放一块晶体偏振片 404、404'。放置两块偏振片时，须保证二者的偏振方向相互垂直。

[0075] 波面倾斜调制器件采用一台压电陶瓷致动的快速偏转反射镜 406，其反射面与入射光路成  $45^\circ$  角，这样使得入射光路与出射光路垂直。通过控制快速偏转反射镜 406 的倾斜，来调整波面的倾角，增加位相调制范围。

[0076] 空间滤波器件采用一枚可调式孔径光阑 407，可以挡住杂散光，提高输出波面的质量。

[0077] 由空间滤波器件输出的光束可以由一组扩束镜 408 扩大至应用所需的范围。

[0078] 晶体偏振片 404、404' 的功能是通过调整入射光的偏振状态，辅助透射式空间光调制器 405 实现调制功能。

[0079] [ 实施例 2 ]

[0080] 如图 6 所示，实体湍流波前再现系统 3 中的平行光源 501 由激光器 502 和扩束镜 503 组成。

[0081] 随机位相调制器件采用一台变形反射镜 504，当变形反射镜的反射面为平面时，反

射面与入射光路成  $45^\circ$  角, 这样使得入射光路与出射光路垂直。

[0082] 波面倾斜调制器件采用一台压电陶瓷致动的快速偏转反射镜 505, 其反射面与入射光路成  $45^\circ$  角, 这样使得入射光路与出射光路垂直。

[0083] 空间滤波器件采用一枚可调式孔径光阑 506, 可以挡住杂散光, 提高输出波面的质量。

[0084] 由空间滤波器件输出的光束可以由一组扩束镜 507 扩大至应用所需的范围。

[0085] 尽管参照在此公开的结构、方法对本发明进行了描述, 但是本发明并不限于所阐述的详细内容, 并且本申请旨在覆盖落在所附权利要求的范围或改进目的之内的那些修改或变化。

[0086] 本发明具有下述优点:

[0087] (1) 在位相调制方式上, 采用了“随机位相调制器件 + 波面倾斜调制器件”的空间光双调制模式的方法, 能够精确、高速地模拟湍流波面的微小变化, 具有高调制深度、高响应频率的特点。

[0088] (2) 平行光源采用了双光路、可切换的结构, 装置的通用性更好, 既能够模拟激光在大气中的传输, 用于研制激光通信等系统; 又能够模拟可见光在大气中的传输, 用于研制各种光学成像系统。

[0089] (3) 在湍流扰动虚拟波前生成算法上, 引入了基于“Monte Carlo 随机位相屏多层共轭”算法和高阶 Zernike 圆域多项式拟合方法, 解算出具有时间演化特性的随机位相空间分布数据, 能够精确地模拟自然界的湍流波前。



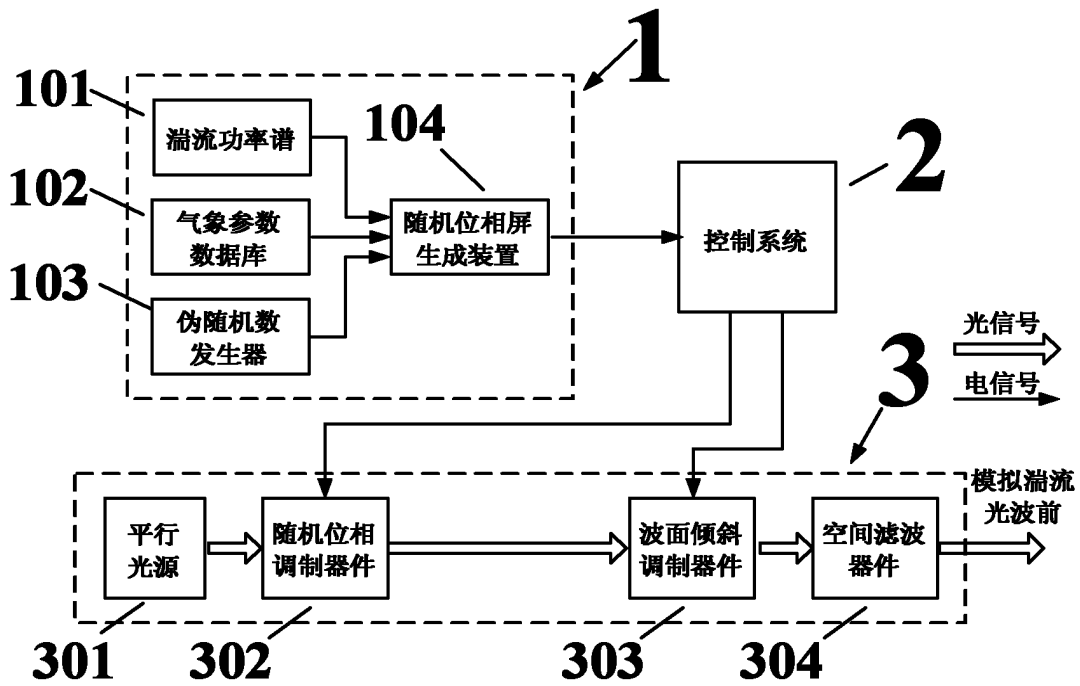


图 1

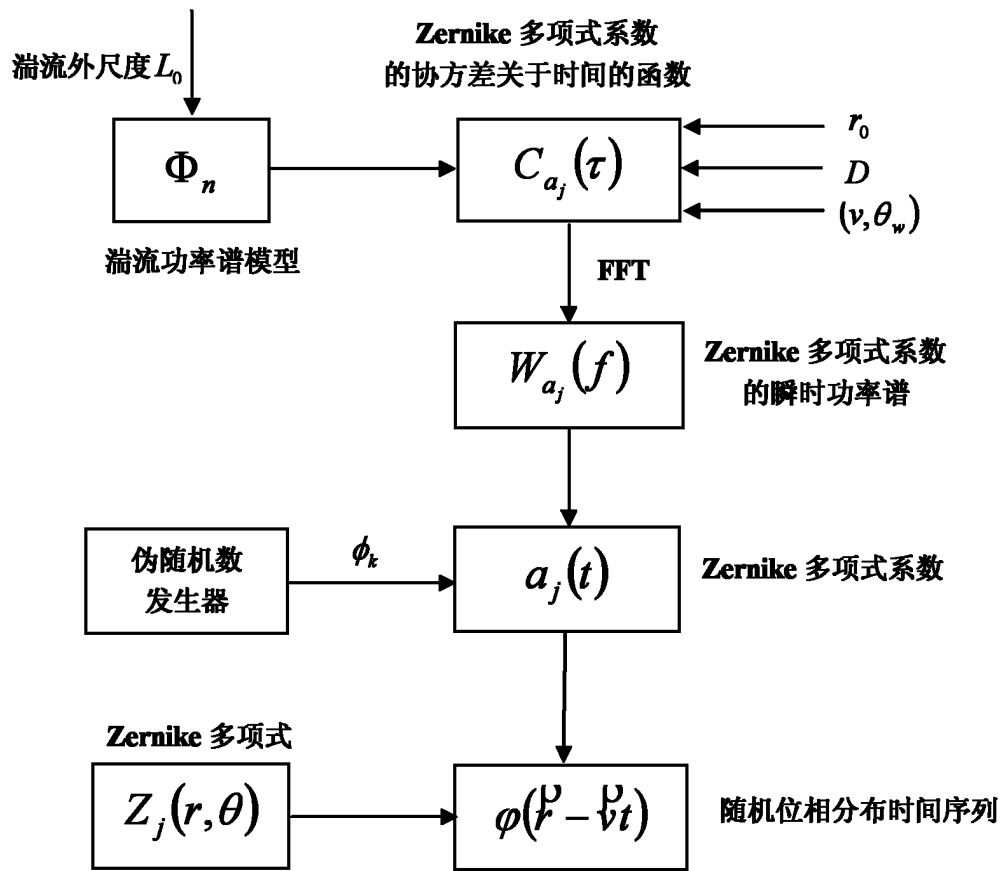


图 2

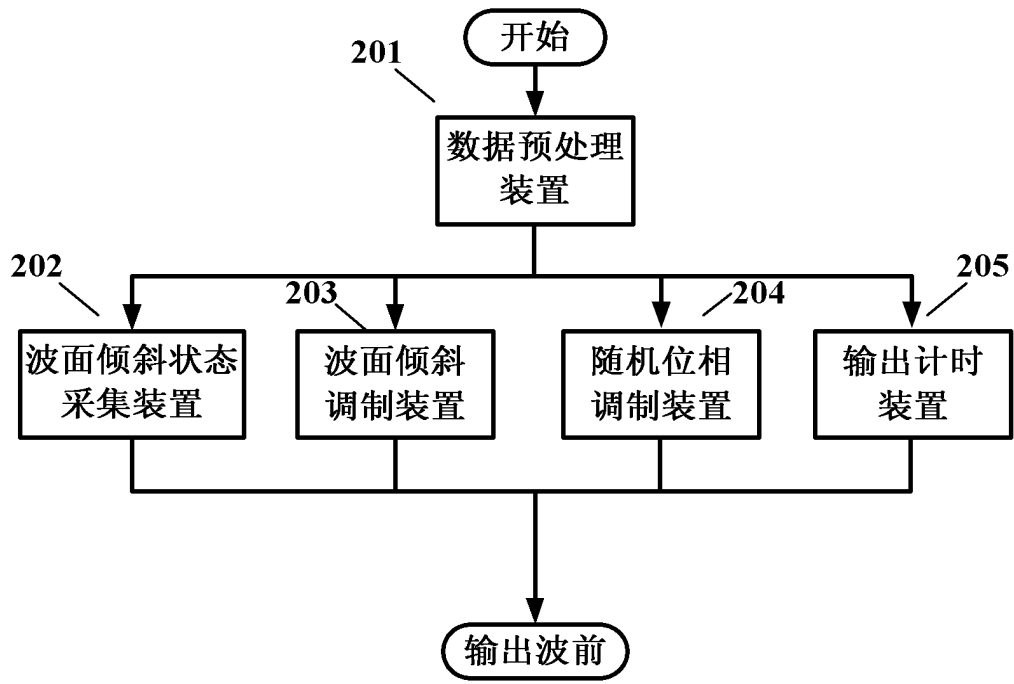


图 3

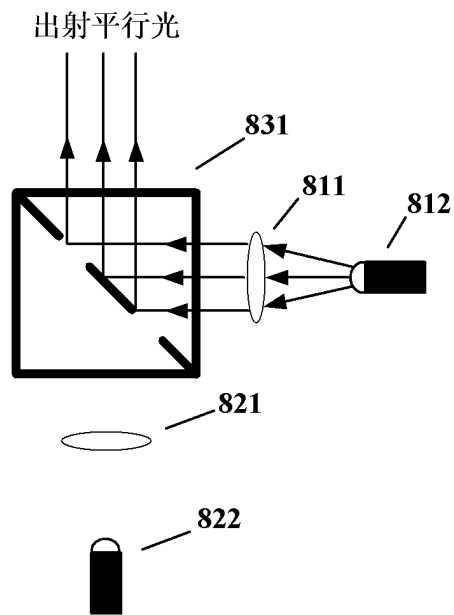


图 4

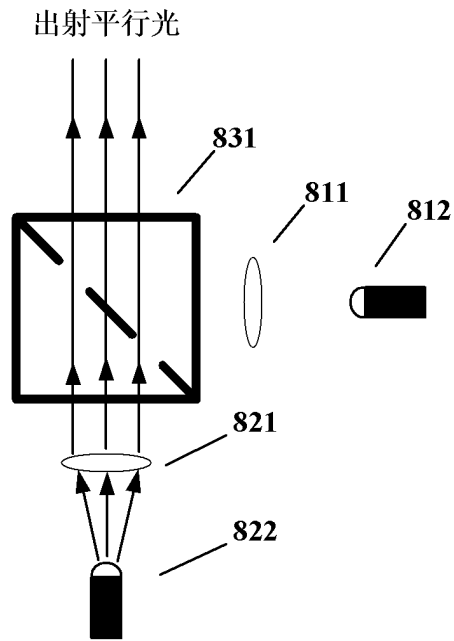


图 5

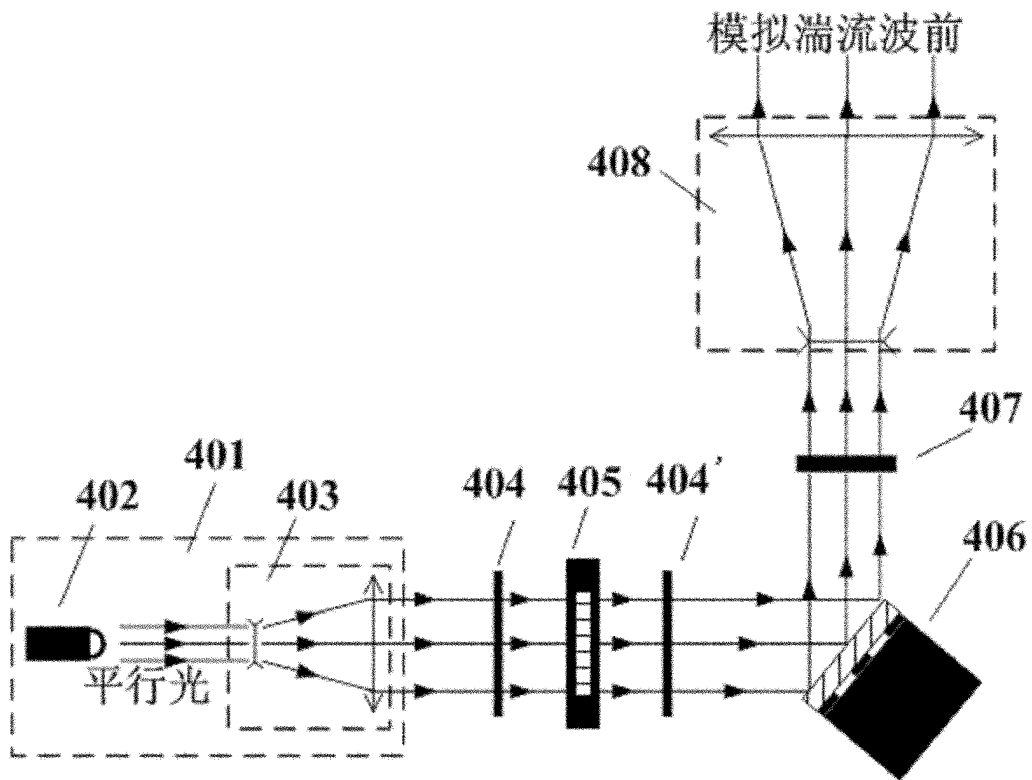


图 6

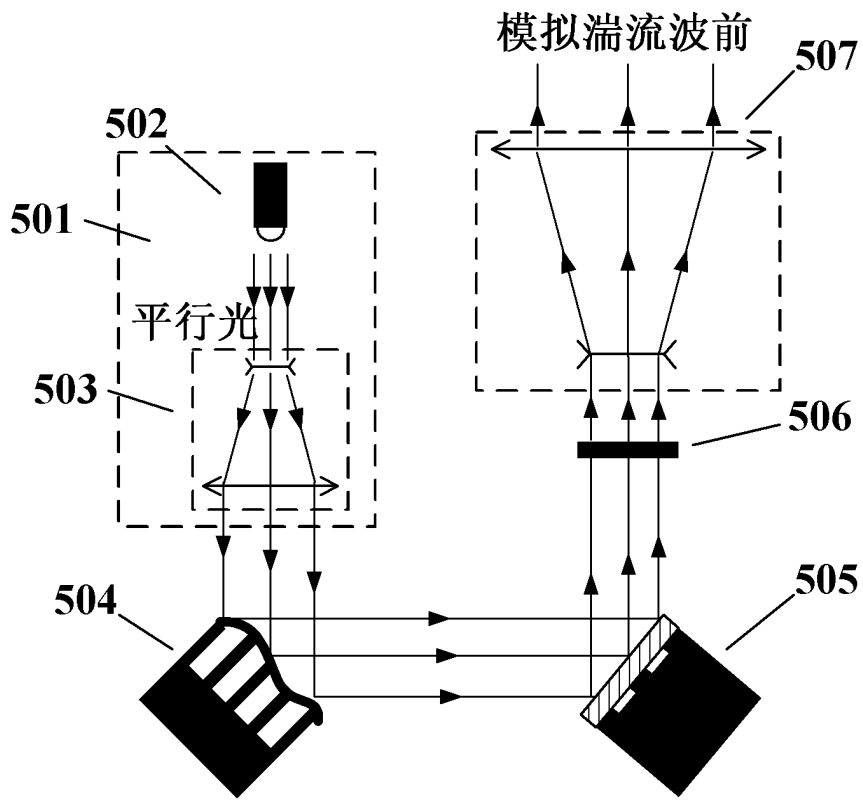


图 7