



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102662178 B

(45) 授权公告日 2013. 11. 27

(21) 申请号 201210134975. 4

审查员 陈树

(22) 申请日 2012. 05. 03

(73) 专利权人 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 王建立 王斌 刘莹奇 汪宗洋
赵金宇

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务
所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

G01S 17/89 (2006. 01)

G01S 7/495 (2006. 01)

G01J 9/00 (2006. 01)

G02B 23/00 (2006. 01)

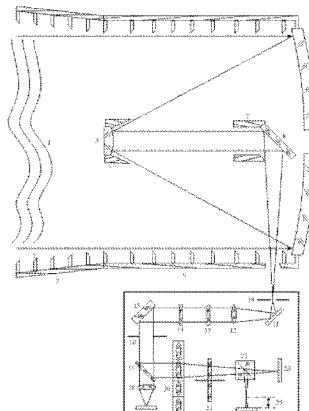
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

空间目标白天高分辨率光电成像探测系统

(57) 摘要

空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，涉及空间目标光电探测识别领域。具体涉及一种融合光学设计与位相差异图像复原技术的高分辨率成像方案，通过分光棱镜增加一路离焦成像通道，并且该离焦通道的离焦量是已知的和可测的，位相差异散斑法通过对同一空间目标同时采集焦面和离焦面的双通道多帧短曝光图像，联合恢复受白天强湍流大气污染的空间目标图像和解算波前相位信息。解决了空间目标的白天捕获、探测问题，以及消强杂散光与高亮度天空背景的抑制问题。该系统结构简单，设计及生产成本低，维护费用低廉以及探测能力强等优势。



1. 空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，该系统包括光学系统和位相差异高分辨率图像处理单元两部分，所述的光学系统包括主镜(6)、次镜(5)、三镜(8)、视场光阑(10)、折转反射镜(11)、准直镜组(12)、快反镜(15)、里奥光阑(16)、分色片(17)、精跟踪成像镜组(18)、精跟踪探测器(19)、变焦距镜组(20)、分光棱镜(22)、在焦探测器(23)以及离焦探测器(24)；所述的位相差异高分辨率图像处理单元包括在焦探测器数据采集接口(26)、离焦探测器数据采集接口(27)、同步数据采集模块(28)、数据预处理模块(29)、基于位相差异散斑法的图像恢复模块(30)以及对复原后图像存储模块(31)；其中数据预处理模块(29)、基于位相差异散斑法的图像恢复模块(30)以及对复原后图像存储模块(31)为相位差异系统的计算部分，任务是根据输入的图像对波前进行估计并进行图像恢复；

目标光束依次经过主镜(6)、次镜(5)以及三镜(8)，到达视场光阑(10)后，再经折转反射镜(11)进入准直镜组(12)，经过快反镜(15)，到达里奥光阑(16)，到达里奥光阑(16)的光经分色片(17)分成两束光束，一束透射进入精跟踪成像镜组(18)，最后进入精跟踪探测器(19)；另一束光经分色片(17)反射到达变焦距镜组(20)，进入分光棱镜(22)，从分光棱镜(22)反射的光进入离焦探测器(24)，从分光棱镜(22)透射的光进入在焦探测器(23)，在焦探测器(23)与离焦探测器(24)同时采集目标光束在焦面和离焦面的图像数据，相位差异高分辨率成像系统数据预处理模块(29)对采集到的图像进行噪声估计、配准、平背景场、截取子图像等处理，图像恢复模块(30)是在基于位相差异散斑法的基础上，对所采集目标光束图像数据进行处理，最终恢复受白天强湍流大气污染的空间目标图像和解算波前相位分布。

2. 根据权利要求1所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，所述的光学系统还包括次镜遮光罩(4)、三镜遮光罩(7)、外遮光罩(2)、镜筒遮光罩(9)以及挡光环(3)，所述的镜筒遮光罩(9)位于镜筒外部，所述的外遮光罩(2)位于镜筒遮光罩(9)的前端，所述的次镜遮光罩(4)、三镜遮光罩(7)依次位于次镜(5)、三镜(8)的外部，所述的挡光环(3)位于外遮光罩(2)和镜筒遮光罩内部，所述的挡光环(3)在外遮光罩(2)内部楔角朝里，在镜筒遮光罩(9)内部楔角朝外。

3. 根据权利要求1所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，所述的光学系统还包括偏振片(13)、大气色散校正镜(14)和轮式滤光片(21)，偏振片(13)、大气色散校正镜(14)和轮式滤光片(21)组合提高系统白天探测空间目标的信噪比。

4. 根据权利要求1所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，主镜(6)与里奥光阑(16)为共轭成像关系。

5. 根据权利要求1或2所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，视场光阑(10)和里奥光阑(16)的孔径大小可调。

6. 根据权利要求1或2所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，变焦距镜组(20)为四档切换式。

7. 根据权利要求1或2所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，精跟踪探测器(19)、在焦探测器(23)和离焦探测器(24)工作在近红外波段。

8. 根据权利要求1或2所述的空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，其特征在于，所述的在焦探测器(23)与离焦探测器(24)都是外触发模式的EMCCD相机。

空间目标白天高分辨率光电成像探测系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种空间目标白天高分辨率光电成像探测系统,可应用于口径 1m 及其以上地基大型光电望远系统的高分辨率成像输出终端,属于空间目标光电探测与识别技术领域。

背景技术

[0002] 地基光电望远镜的高分辨率成像技术可以实现对空间目标等目标的监视和详查,对于空间目标的态势感知具有重要意义。然而,地基大口径望远镜因受大气扰动的限制,其分辨率无法达到衍射极限。如一台口径为 5m 的望远镜,若在一般平原地区工作,因受大气湍流的影响,其分辨率并不比口径为 0.1 ~ 0.2m 口径的望远镜高。尤其在白天,由于太阳光照射造成的近地面大气湍流比较强,加之白天高亮度天空背景与杂散光,使得空间目标在白天高分辨率成像受到大气的污染更加严重。自适应光学是克服大气扰动成像的一种有效手段,但其在白天难于找到用于波前探测的参考源。大约 75% 的空间目标分布在高度 200 ~ 1500km 的中低轨道上运行,由于地球的遮挡,只有晨昏时刻和白天,空间目标被太阳光照亮时才能通过光电设备进行探测,还有一些特殊的空间目标只在白天通过,一些感兴趣的空间目标可能需要几周才能在昼夜分界处出现。目前国内外的地基空间目标光电成像系统一般都选择在昼夜分界或者大气视宁度较好的夜晚工作,每天从可见光到近红外波段有效观测时间仅 3 ~ 4h,严重制约地基光电成像终端的观测效率。

[0003] 因此,空间目标的白天高分辨率成像技术是未来全天时空间目标探测与监视识别领域中的关键技术。短曝光能冻结大气扰动,保留目标的高频信息。近年,美国的某些地基光电望远镜采用基于单相机的短曝光散斑成像方法,在空间目标白天外场成像实验中取得较好的效果,但其专门开发的相机具有高帧频和高动态范围特性,国内较难得到。中国专利 200610112434.6 公开了一种适合于白天工作的高分辨力成像望远镜,主要基于近红外哈特曼波前探测器和能动光学器件变形镜等的自适应光学系统来实现白天高分辨率成像,该系统结构复杂。

[0004] 位相差异散斑法的核心思想是在成像系统的焦面和离焦面上同时采集一对或者多对短曝光图像,在已知离焦量的前提下解算出波前相位分布并恢复出目标。位相差异散斑法已成功的应用于太阳观测领域,获得了高分辨率的太阳表面组织图像。

发明内容

[0005] 为了解决现有成像技术分辨率无法达到衍射极限,空间目标在白天高分辨率成像受到大气的污染严重,地基光电成像终端的观测效率低以及系统结构复杂等问题,本发明的目的就在于提供一种空间目标白天高分辨率光电成像探测系统,该系统基于位相差异散斑法,特别适合于白天时段空间目标跟踪、探测及高分辨率成像,可有效抑制白天高亮度天空背景与杂散光,克服强湍流大气扰动对高分辨率成像的影响。

[0006] 本发明解决技术问题的技术方案是,空间目标白天高分辨率光电成像探测系统,

该系统包括光学系统和位相差异高分辨率图像处理单元两部分，所述的光学系统包括主镜、次镜、三镜、视场光阑、折转反射镜、准直镜组、快反镜、里奥光阑、分色片、精跟踪成像镜组、精跟踪探测器、变焦距镜组、分光棱镜、在焦探测器以及离焦探测器；

[0007] 目标光束依次经过主镜、次镜以及三镜，到达视场光阑后，再经折转反射镜进入准直镜组，经过快反镜，到达里奥光阑，到达里奥光阑的光经分色片分成两束光束，一束透射进入精跟踪成像镜组，最后进入精跟踪探测器；另一束光经分色片反射到达变焦距镜组，进入分光棱镜，从分光棱镜反射的光进入离焦探测器，从分光棱镜透射的光进入在焦探测器，在焦探测器与离焦探测器同时采集目标光束在焦面和离焦面的图像数据，位相差异高分辨率图像处理单元在基于位相差异散斑法的基础上，对所采集目标光束图像数据进行处理，最终恢复受白天强湍流大气污染的空间目标图像和解算波前相位分布。

[0008] 本发明的有益效果为：本发明基于地基大口径望远镜的大气湍流成像理论，将光学设计与位相差异散斑法有机融合起来，解决困扰白天空间目标高分辨率成像受到大气的污染严重，地基光电成像终端的观测效率低等问题。光学系统的设计起到白天捕获、探测空间目标的作用，并具有消强杂散光与抑制高亮度天空背景的特性，且满足后端位相差异高分辨率图像处理单元的光学特性要求。在单相机短曝光散斑成像方法的基础上，增加已知离焦量的相位差异成像通道，双通道的使用改善了反演问题的病态性，多帧短曝光图像的使用增加噪声抑制能力和提高恢复空间目标图像的信噪比。该系统结构简单，设计及生产成本低，维护费用低廉以及探测能力强等优势。

附图说明

[0009] 图1为空间目标白天高分辨率成像探测系统原理示意图。

[0010] 图2为相位差异高分辨率图像处理单元示意图。

[0011] 图中：1、受大气扰动波前，2、外遮光罩，3、挡光环，4、次镜遮光罩，5、望远镜次镜，6、望远镜主镜，7、三镜遮光罩，8、三镜，9、镜筒遮光罩，10、视场光阑，11、折转反射镜，12、准直镜组，13、偏振片，14、大气色散校正镜，15、快反镜，16、里奥光阑，17、分色片，18、精跟踪成像镜组，19、精跟踪探测器，20、变焦距镜组，21、轮式滤光片，22、分光棱镜，23、在焦探测器，24、离焦探测器，25、离焦量，26、在焦探测器数据采集接口，27、离焦探测器数据采集接口，28、同步数据采集模块，29、数据预处理模块，30、图像恢复模块，31、复原后图像存储模块。

具体实施方式

[0012] 以下结合附图对本发明的具体实施方式作进一步详细地说明。

[0013] 本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0014] 由图1和图2所示，空间目标白天高分辨率光电成像探测系统，该系统包括光学系统和位相差异高分辨率图像处理单元两部分，所述的光学系统包括受大气扰动波前1、主镜6、次镜5、次镜遮光罩4、三镜8、三镜遮光罩7、外遮光罩2、挡光环3、镜筒遮光罩9、视场光阑10、折转反射镜11、准直镜组12、偏振片13、大气色散校正镜14、快反镜15、里奥光阑16、分色片17、精跟踪成像镜组18、精跟踪探测器19、变焦距镜组20、轮式滤光片21、分光棱镜

22、在焦探测器 23 以及离焦探测器 24；外遮光罩 2 位于镜筒遮光罩 9 的前端，挡光环 3 位于外遮光罩 2 和镜筒遮光罩 9 内部；外遮光罩 2、次镜遮光罩 4、三镜遮光罩 7 和镜筒遮光罩 9 规避白天太阳等视场外强杂散光源，避免其直接入射在次镜 5、主镜 6、三镜 8 等关键反射光学部件。

[0015] 所述的位相差异高分辨率图像处理单元包括在焦探测器数据采集接口 26、离焦探测器数据采集接口 27、同步数据采集模块 28、数据预处理模块 29、基于位相差异散斑法的图像恢复模块 30 以及对复原后图像存储模块 31；

[0016] 目标光束入射至外部罩有镜筒遮光罩 9 的镜筒，依次经过主镜 6、外部罩有次镜遮光罩 4 的次镜 5、外部罩有三境遮光罩的三镜 8，到达视场光阑 10 后，再经折转反射镜 11 进入准直镜组 12，依次经过偏振片 13、大气色散校正镜 14、快反镜 15，到达里奥光阑 16，到达里奥光阑 16 的光经分色片 17 分成两束光束，一束透射进入精跟踪成像镜组 18，最后进入精跟踪探测器 19；另一束光经分色片 17 反射到达变焦距镜组 20，经轮式滤光片 21 进入分光棱镜 22，从分光棱镜 22 反射的光进入离焦探测器 24，从分光棱镜 22 透射的光进入在焦探测器 23；同一时刻在焦探测器 23 与离焦探测器 24 通过外触发模式采集到拥有指定的离焦量 25 的两幅图像作为一帧数据，假设一共采集了 T 帧，位相差异高分辨率图像处理单元在基于位相差异散斑法的基础上，对所采集目标光束图像数据进行处理，最终恢复受白天强湍流大气污染的空间目标图像和解算波前相位分布。

[0017] 本实施方式所述的位相差异高分辨率图像处理单元在同步数据采集模块 28 的控制下，在焦探测器数据采集接口 26 和离焦探测器数据采集接口 27 分别从在焦探测器 23 和离焦探测器 24 同时采集两幅图像并由同步数据采集模块 28 组合成一帧数据发送到数据预处理模块 29，数据预处理模块 29 的主要工作是把含有目标的图像减去背景场，以提高信噪比，然后再把感兴趣的区域通过图像配准在两幅图像上分别抠出以减少后续工作的重量，最后把预处理后的子图像排列到一个待发送队列，当队列的长度为 T 时，把这 T 帧数据作为一个数据包发送给基于位相差异散斑法的图像恢复模块 30，图像恢复模块 30 是一台 GPU 计算平台，它以公式（1）为目标函数，以各帧图像所对应的波前为未知变量进行最优化搜索，最终将得到目标的恢复后图像 31 以及各帧所对应的波前。

[0018]

$$L(\{\alpha\}_t) = \frac{1}{2N} \sum_u \left(\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |D_{tc}|^2 - \frac{\left| \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^* \right|^2}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2} \right) \quad (1)$$

[0019]

$$S_{tc} = F^{-1} \left\{ P(v) e^{j\phi_{tc}(v)} \right\} \quad (2)$$

[0020]

$$\phi_{tc}(v) = \theta_c(v) + \sum_{m=4}^M \alpha_{tm} Z_m(v) \quad (3)$$

[0021]

$$Fimg = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_{tc} S_{tc}^*}{\gamma + \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_{tc}|^2} \quad (4)$$

[0022] 其中, u 表示频域坐标, T 和 C 分别表示使用的帧数和通道数, 如本文是双相机试验, 那么 C = 2; N 表示单幅图像的像素总数; {a}ₜ 表示需要求解的 t 帧泽尼克 (zernike) 系数 $a_{tm} \in \{a\}_t$, 表示第 t 帧图像所对应的 zernike 系数向量中的第 m 项系数; Zₘ 表示第 m 项泽尼克多项式基底, θ_c 表示第 c 通道已知的固定离焦相位; σ_c^{-2} 为通道 c 的噪声读出方差的倒数; F 为傅里叶变换, F^{-1} 表示傅里叶逆变换, v 表示光瞳面坐标, P 表示光瞳函数; $D_{tc} = F(d_{tc})$, 式中 d 表示 CCD 上采集到的实际目标图像; γ 表示非负的正则项系数; 当搜索算法退出的时候, 对 Fimg 求傅里叶逆变换就得到了目标的恢复图像。

[0023] 本实施方式所述的挡光环 3 进一步抑制杂散光, 挡光环 3 在外遮光罩 2 附近楔角朝里, 在镜筒遮光罩 9 内部楔角朝外。

[0024] 本实施方式所述的偏振片 13、大气色散校正镜 14 和轮式滤光片 21 组合提高系统白天探测空间目标的信噪比, 空间目标偏振特性强于天光背景, 偏振片 13 进一步提高系统探测空间目标的信噪比, 大气色散校正镜 14 校正不同波长光大气折射与色散对成像的影响, 轮式滤光片 21 装有颜色滤光片和中性滤光片, 通过光谱滤波和调节光度提高系统信噪比。

[0025] 本实施方式所述的主镜 6 与里奥光阑 16 为共轭成像关系, 准直镜组 12 将主镜 6 位置的系统入瞳成像在里奥光阑 16 位置。准直镜组 12 采用特殊玻璃材料来复消色差。

[0026] 本实施方式所述的视场光阑 10 和里奥光阑 16 的孔径大小可调, 里奥光阑 16 孔径比光瞳像略小, 其大小可根据不同强弱衍射杂散光进行调节。

[0027] 本实施方式所述的变焦距镜组 20, 变焦范围 12 倍, 为四档切换式, 分别对应 30 μ rad, 60 μ rad, 180 μ rad, 360 μ rad 视场角, 起到捕获空间目标的作用, 其与可变视场光阑 10 组合, 能最大限度的扣除天光背景, 使系统信噪比最大。

[0028] 本实施方式所述的精跟踪成像镜组 18 和精跟踪探测器 19 组合探测波前整体倾斜误差, 控制快反镜 15 实现对空间目标的精跟踪, 精跟波段 900 ~ 1500nm, 其与成像通道的分色采用分色片 17 来实现。

[0029] 本实施方式所述的精跟踪探测器 19、在焦探测器 23 和离焦探测器 24 均工作在近红外波段。

[0030] 本实施方式所述的在焦探测器 23 与离焦探测器 24 都是拥有外触发模式的 EMCCD 相机, 以保证良好的探测能力, 并且可以同时进行图像的采集, 由分光棱镜 22 产生增加一路离焦成像通道, 在焦探测器 23 与离焦探测器 24 采用外触发的方式同时采集多帧短曝光图像, 曝光时间控制在 50ms 以内, 在目标亮度允许的情况下, 曝光时间越短越好。

[0031] 本实施方式所述的离焦量 25 是已知且可测的, 离焦量 25 控制在对应波前的 PV 值为 1.5 λ 以内, 由高速计算机恢复受污染的空间目标图像序列。

[0032] 本实施方式所述的光学系统口径 1.2m, 成像波段 600 ~ 900nm、视场角 30 ~ 360 μ rad, 光学系统设计达到衍射极限。为保证位相差异图像处理算法的需要, 长焦位置艾利斑半径与单个像元尺寸满足 2 倍以上采样频率的关系。

[0033] 本发明技术方案的关键部分已试用于地基 1.23 米大口径光电望远镜项目，在白天取得了良好的外场空间目标高分辨率成像效果。

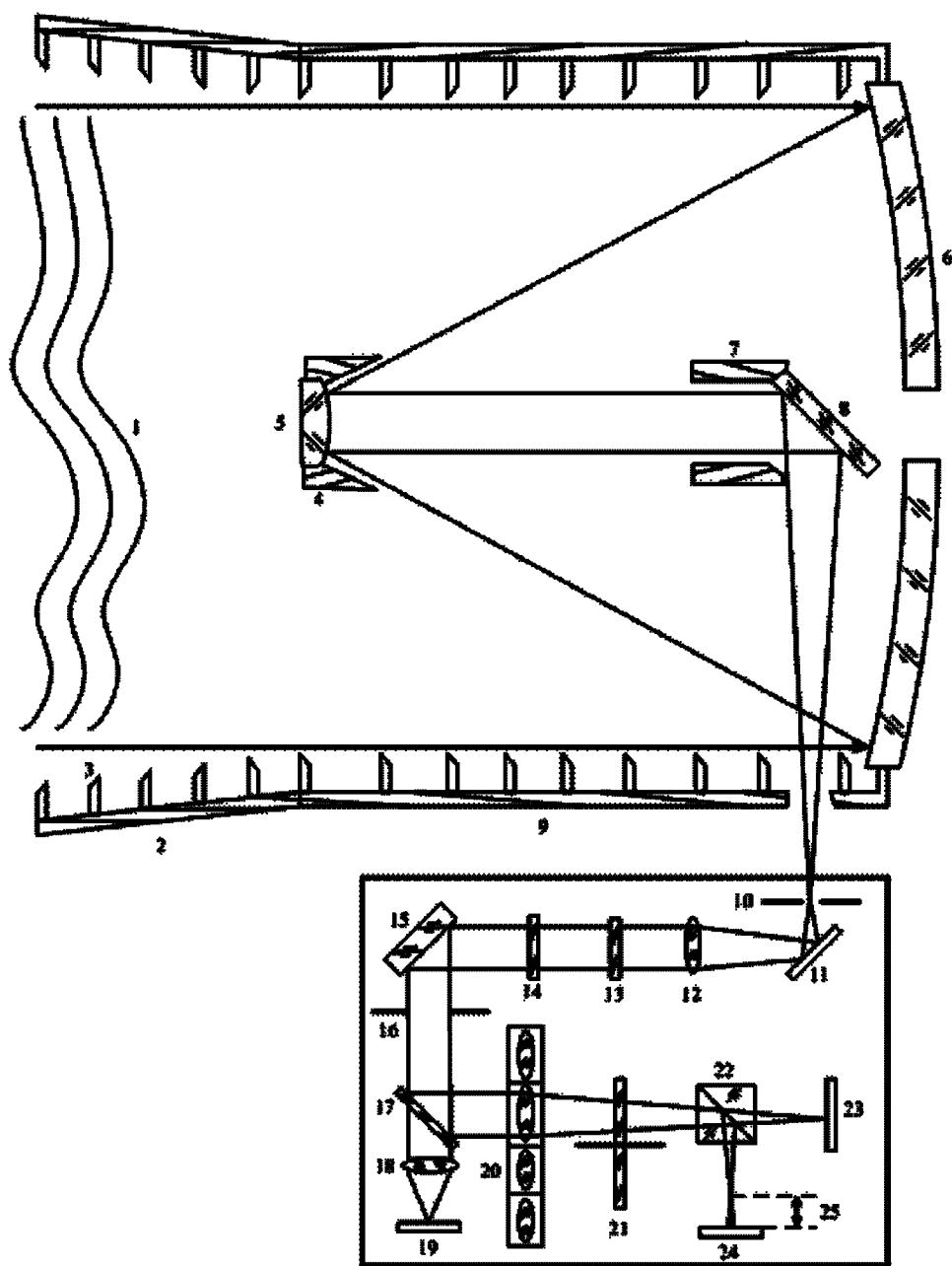


图 1

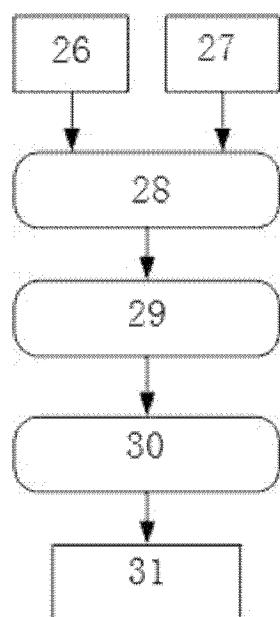


图 2