

基于长脉冲光源的钠信标回光特性实验研究*

王锋[†] 陈天江 维仲祥 鲁燕华 万敏 彭博 尹新启

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2013年7月15日收到; 2013年9月18日收到修改稿)

采用与信标发射接收系统参数匹配的长脉冲光源, 可在脉冲回光时间内产生较亮星等的钠信标, 既有利于提高信标探测的信噪比, 也有利于实现自适应光学系统的高频闭环校正. 基于 450 mm 直径望远镜和大能量长脉冲光源, 开展了钠信标探测实验, 得到了长脉冲光源产生的钠信标回光特性. 通过 CCD 和光电倍增管, 采集得到了不同发射能量、出射偏振态下的回光强度, 并获得了最大强度为 $15 \text{ 万光子}/\text{m}^2/\text{pulse}$ 的回光, 对应脉冲回光时间内约 4.1 等星的亮度. 分析推算了实验条件下钠原子的柱密度. 实验全过程未出现明显的饱和现象, 验证了采用长脉冲钠信标光源避免饱和和效应、得到高亮度钠信标的可行性.

关键词: 激光技术, 钠信标, 脉冲激光器, 能量

PACS: 42.68.Wt, 42.25.Bs, 42.79.Qx, 95.75.Rs **DOI:** 10.7498/aps.63.014208

1 引言

在地基大口径天文望远镜系统中, 大气湍流对信号光的扰动, 使得系统对遥远星体的成像分辨率受到限制. 由激光导星(以下简称信标)系统等组成的自适应光学系统能够校正大气对光束的畸变, 提高天文望远镜系统的成像分辨率和成像质量^[1]. 相对瑞利信标, 海拔更高的钠信标具有聚焦非等量方差小、大气湍流信息探测全面的优势, 在自适应光学领域中受到了广泛的关注.

目前, 对于钠信标, 满足自适应光学系统对回光强度的要求是其能否成功应用关键因素之一. 固体激光类钠信标光源有连续、高重频、宏微脉冲等多种体制^[2], 除长脉冲体制光源外, 其他体制光源的回光特性已有较多理论分析及实验结果^[3-6]. 由于钠层饱和效应的存在, 同等能量条件下, 不同体制信标光源产生钠层荧光的效率不同. 通过优化激光器设计指标, 脉宽百微秒量级、线宽百兆赫兹量级的长脉冲体制信标光源, 能够有效避免钠层饱和效应, 缩短信标探测系统对外探测的曝光时间, 具有实现高回光效率^[7,8]、高探测信噪比的潜力.

本文利用长脉冲体制钠信标光源、小口径望远镜系统、高灵敏度 EMCCD、光电倍增管等, 开展了钠信标回光特性探测实验. 实验过程中, 分别测定了不同单脉冲能量下, 线偏振态与椭圆偏振态信标激光所能得到的钠信标回光强度; 通过调谐信标激光中心波长, 得到钠原子 D_{2a} 线和 D_{2b} 线对应的信标回光强度.

2 实验装置及回光强度理论分析

2.1 实验装置

钠信标回光探测实验装置由望远镜系统、钠信标激光器、信标测量系统、同步控制系统等组成. 钠信标回光探测实验采用激光发射端与回光探测端相隔一定距离的分孔径工作模式. 信标激光出射光斑直径约 200 mm; 望远镜系统接收口径为 450 mm. 信标测量系统内设高速快门, 通过同步控制系统与激光器同步工作, 实现对钠信标回光的距离选通. 其内部安装有高灵敏度可见光相机和光电倍增管, 用于探测钠信标灰度图像和回光光子数.

为有效激发钠原子, 产生高亮度钠信标, 同时

* 国家自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yuan0186@sina.com

不发生饱和效应, 钠信标激光器的波长、线宽、功率等关键参数须与钠层荧光产生条件相匹配^[8]. 为得到高亮度钠信标、实现高探测信噪比, 采用了百微秒量级脉宽的钠信标激光器开展钠信标回光特性探测实验.

钠信标回光强度受大气影响较大, 实验过程中采用大气光学测量系统对大气透射率进行了同步测量.

2.2 回光强度需求分析

自适应光学系统受回光波面测量原理与实际执行器件的限制^[9], 不能够完全校正大气湍流导致的光束波前畸变. 选取波前探测系统子孔径与大气相干长度 r_0 相等, 仅考虑波前测量倾斜误差与子孔径拟合误差因素, 则校正后的总均方根波前误差为^[10-12]

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{17.4}\right)^2 + \left(\frac{0.61\lambda\eta_c}{4\sqrt{N}}\right)^2}, \quad (1)$$

式中, λ 为信标激光波长, N 为单次探测光子数, η_c 为探测器效率因子.

若单次探测光子数目对校正结果的影响较小, 即要求校正后总波前均方根误差 $\Delta\varphi$ 不大于 $\lambda/17$ 时, 则目标所成像的Strehl比不小于0.85. 此时, 若取探测器效率因子为1.4, 则要求探测器处单次探测光子数不小于290个, 对应波前探测器斜率测量均方根误差0.3 μrad ^[10,11]. 若望远镜系统对信标回光的总传输效率为0.6, 则要求换算至望远镜口处的单帧总光子数不小于466个光子, 即信标回光光子数密度要求为不低于49000 photons/($\text{m}^2 \cdot \text{frame}$).

2.3 基于长脉冲光源的信标回光强度分析

由于钠信标饱和效应的存在, 在钠层过高的信标激光辐射功率密度将导致钠信标发射接收效率的显著下降. 当信标激光在钠层处形成的单频激光辐射功率密度不大于6.4 mW/cm^2 ^[5,6]时, 钠原子未饱和, 忽略由于辐射功率密度变化而引起的回光效率小幅变化, 1 W信标激光所能得到的信标回光可以利用近似式^[13]

$$N = \frac{3 \times 10^{18} n \sigma T_a^2 \kappa}{4\pi(z)H^2} \quad (2)$$

进行计算, 式中, N 为地面处单位时间、单位信标激光功率、单位面积内, 从钠信标处返回的共振散射

荧光光子数; n 为钠层钠原子的柱密度; σ 为原子散射截面; T_a 为大气单程透射率; κ 为光学抽运效率; z 为天顶角; H 为钠层垂直高度.

当信标光源单脉冲能量不大于500 mJ, 脉宽约为200 μs , 线宽约为0.9 GHz时, 综合考虑系统发射口径、激光传输效率等, 对应至的钠层单频辐射功率密度不大于3 mW/cm^2 , 小于前述6.4 mW/cm^2 的单频饱和辐射功率密度, 可用(2)式对钠信标回光进行计算. 当光学抽运效率取1.35, 大气传输取60%, 信标发射接收天顶角为 0° 时, 计算得到单脉冲信标激光在地面处所能产生的信标回光强度如图1所示.

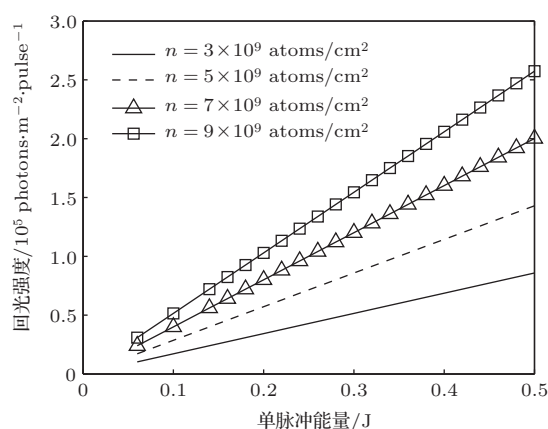


图1 不同柱密度下的回光强度

3 回光强度探测实验

实验采用自由曝光和距离选通两种模式对钠信标进行探测, 两种模式下采集到的图像如图2、图3所示. 实验状态下, 钠信标与近程瑞利后向散射在视场内的分离角约为23". 受大气湍流和光学系统像差等的影响, 信标张角约为5"至7", 即信标直径约为1.5 m至3 m. 在单脉冲能量约220 mJ的

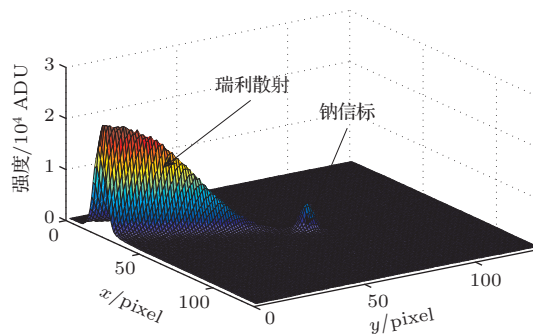


图2 自由曝光模式下信标多次探测平均帧结果

信标激光激发下, 探测器处最高测得了 4850 个钠信标回光光子, 最低测得了 1000 个钠信标回光光子, 这主要取决于实验时的大气透射率与钠原子柱密度.

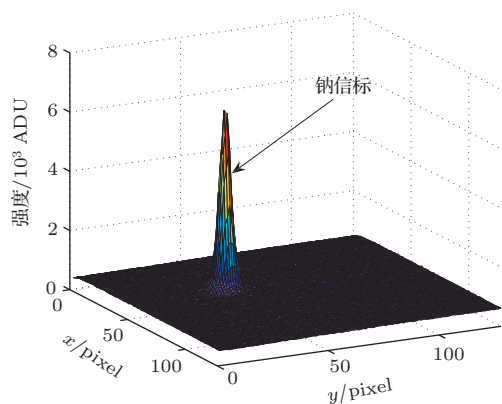


图3 距离选通模式下信标多次探测平均帧结果

3.1 线偏光实验

保持信标激光器输出激光偏振态为线偏振光, 调节信标激光器波长和出射能量, 先后利用标定后的 CCD 和光电倍增管测量 D_{2a} 线和 D_{2b} 线在不同发射能量状态下的回光信号强度, 得到两种传感器测量的回光强度如图 4、图 5 所示 (图中的激光发射能量为发射效率 60% 下的实际激光出射能量).

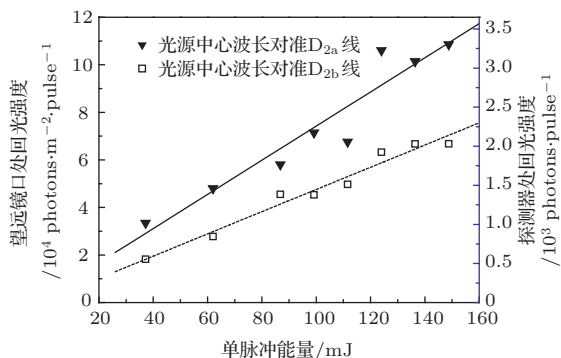


图4 回光强度随线偏振信标激光单脉冲能量的变化 (CCD 采集)

图 5 分别给出了单脉冲采集模式下, 线偏振信标激光在探测器处的光子数实测值和望远镜口处的回光光子数密度. 可以看出, 各数据点随信标激光出射能量变化的趋势存在一定抖动, 同等能量和波长状态下, 两种测量方法得到的数据也有一定偏差. 实验过程耗时长, 各组测量数据点间存在的时间跨度, 大气 (透射率) 与钠层 (丰度及海拔) 随时间的状态变化, 激光器单脉冲能量的起伏等, 是造成

这一现象的主要原因. 实验数据采集自凌晨零点至四点, 同等激光辐射能量下, CCD 与光电倍增管所得测量结果总体符合, 说明了回光探测系统工作正常, 测量结果真实有效.

发射系统最强能够对外发射 148 mJ 的线偏振态信标激光, 当中心波长对准 Na 的 D_{2a} 线时, CCD 测量结果 (以下均为 CCD 测量结果) 表明: 在探测器处产生了最强 3301 photons/pulse 的回光, 对应望远镜口光子数密度约为 1.1×10^5 photons·m⁻²·pulse⁻¹; 当中心波长对准 Na 的 D_{2b} 线时, 在探测器处产生了最强 2019 photons/pulse 的回光, 对应望远镜口光子数密度约为 6.7×10^4 photons·m⁻²·pulse⁻¹.

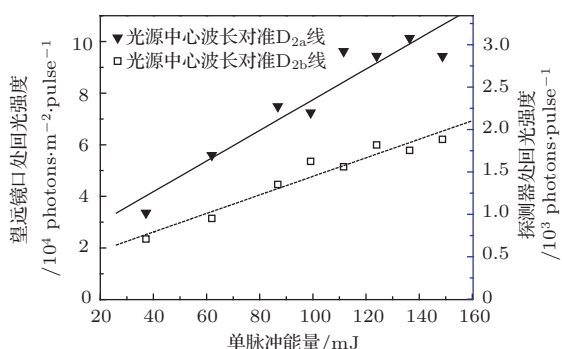


图5 回光强度随线偏振信标激光单脉冲能量的变化 (光电倍增管采集)

由测量结果, 长脉冲钠信标激光激发下, D_{2a} 线相应回光强度明显强于同样为线偏振态下的 D_{2b} 线, 这与基于单频连续激光器的实验结果相符 [4]. 忽略由测量时刻不同所带来的钠原子柱密度和大气透射率变化, 在线偏振态下, D_{2a} 线所产生的回光强度约为 D_{2b} 线的 1.60 倍.

3.2 圆偏光实验

将信标激光出射光束偏振态调整为圆偏光. 调节信标激光器波长和出射能量, 采用光电倍增管探测中心波长为 D_{2a} 线和 D_{2b} 线时不同发射能量状态下的回光信号, 所得回光强度变化情况如图 6 所示.

图 6 中分别给出了单脉冲采集模式下, 圆偏振信标激光在探测器处的光子数实测值和望远镜口处的回光光子数密度. 对于 D_{2a} 线和 D_{2b} 线, 仅在信标激光辐射强度趋于零时, 二者回光强度趋于相等. 图 6 中, 低单脉冲能量下, D_{2a} 线与 D_{2b} 线回光强度接近相等, 信标收发及探测器探测过程中各影响因素的随机变化是造成这一结果的主要原因, 不代表二者在此能量下应有相同的回光强度.

对比线偏振态测量结果, 圆偏振态的信标激光激发了更强的回光强度, 当中心波长对准 Na 的 D_{2a} 线时, 在探测器处产生了最强 4510 photons/pulse 的回光, 相应望远镜口光子数密度约为 $1.5 \times 10^5 \text{ photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{pulse}^{-1}$, 平均为先前线偏振态的 1.2 倍; 当中心波长对准 Na 的 D_{2b} 线时, 在探测器处产生了最强 2680 photons/pulse 的回光, 相应望远镜口光子数密度约为 $8.9 \times 10^4 \text{ photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{pulse}^{-1}$, 平均为先前线偏振态的 1.3 倍. 信标激光在产生高回光光子数的同时, 总体趋势未见到明显的饱和现象, 与设计预期相符合.

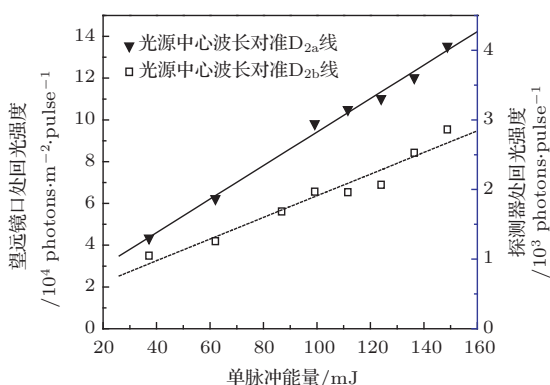


图 6 回光强度随圆偏振信标激光单脉冲能量的变化

对比 D_{2a} 线与 D_{2b} 线的回光强度数据, 低信标激光单脉冲能量下 D_{2a} 线与 D_{2b} 线的回光强度相差不多, 近乎相等. 随着单脉冲能量的提高, 二者差距逐渐增大, D_{2a} 线回光强度明显强于同样为线偏振态下的 D_{2b} 线, 这与线偏振态测量结果一致. 同理, 计算得到圆偏振态下, D_{2a} 线所产生的回光强度约为 D_{2b} 线的 1.35 倍.

需要注意的是, 根据文献已有基于单频信标激光得到的理论分析结果和实验数据, 对同一偏振态, 钠原子 D_{2a} 线的回光强度是 D_{2b} 线的 2 倍以

上 [4,14]; 对 D_{2a} 线中心波长, 钠原子对圆偏光的散射强度是对线偏光散射强度的 1—3 倍. 这些结果未能在本次实验中完全反映, 实验使用宽线宽钠信标激光器以及中继反射镜的退偏效应是造成该现象的主要原因.

3.3 钠原子柱密度估算

钠原子柱密度是决定信标回光强度的重要因素, 相同信标收发参数和大气条件下, 高钠层柱密度有益于产生强钠信标回光. 利用实验结果, 结合实验状态参数对钠原子柱密度进行外推是验证实验结果可靠性的重要手段.

选取了三种具有代表性的典型数据, 回光强度如图 7 所示. 三种实验结果所对应的大气透射率分别为 68%, 60%, 35%.

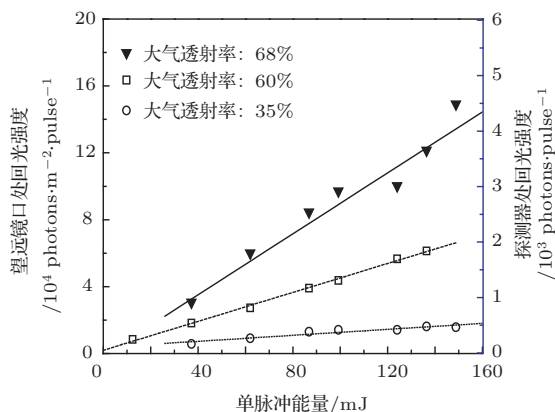


图 7 不同大气条件下回光强度随信标激光单脉冲能量的变化

由于实验地点并非理想的天文站址, 实验期间内钠原子柱密度不断变化的同时, 大气透射率也变化剧烈, 这些是上述回光强度斜率明显不同的主要原因. 利用实验状态参数、大气透射率、回光强度等, 分析计算出各组数据相应的钠原子柱密度及脉冲回光时段内的视星等如表 1 所示.

表 1 不同时间的钠原子柱密度

名称	第一种大气条件	第二种大气条件	第三种大气条件
采集时间	03:38—03:53	18:33—18:55	22:28—22:37
望远镜口最大回光强度/(photons·m ⁻² ·pulse ⁻¹)	149151	61348	15770
大气透射率/%	68	60	35
钠层柱密度/(atoms/cm ²)	8.4×10^9	4.4×10^9	3.5×10^9
视星等	4.1	5.1	6.5

钠原子的柱密度一般在 2×10^9 atoms/cm² 至 8×10^9 atoms/cm² 之间变化, 随季节显示出一定周期性^[15-17]. 由表 1 可见, 钠原子柱密度估算结果与国际相关实验研究成果相比, 具有较好的一致性, 均在 10^9 atoms/cm² 量级. 另外, 钠层柱密度在不同时刻也有较大差异, 说明钠原子柱密度可能一直处于一个相对剧烈的变化状态中, 这一点也与相关研究成果取得较好的印证^[15-17].

4 结 论

采用与信标发射接收系统参数匹配的大能量脉冲光源, 能够在脉冲回光时间段内产生较亮星等的钠信标, 这有利于提高钠信标探测的信噪比, 也有利于实现自适应光学系统的高频率闭环校正. 采用分孔径发射接收方式, 首次利用大脉冲能量、宽线宽、长脉冲钠信标光源, 激发产生了直径约 2 m 的钠信标, 并测得钠信标回光强度与信标偏振态、脉冲能量等光源特性的关系. 在单脉冲对应的信标回光时间段内, 探测到了最强约 4.1 等星的钠信标, 且实验全程未出现明显的饱和现象. 实验验证了采用宽线宽长脉冲光源避免钠信标饱和效应的技术途径, 为自适应光学中信标技术的研究提供了重要的实验依据.

参考文献

- [1] Foy R, Labeyrie A 1985 *Astronomy and Astrophysics* **152** 29
- [2] Lu Y H, Huang Y F, Zhang L, Zhang K, Tang C, Wang W M, Ma Y 2011 *Laser & Optoelectronics Progress* **48** 071406 (in Chinese) [鲁燕华, 黄园芳, 张雷, 张凯, 唐淳, 王为民, 马毅 2011 激光与光电子学进展 **48** 071406]
- [3] Craig A D, Paul D H, Gerald T M, John M T, Joseph E P, Jack D D, Robert Q F 2005 *Proc. of SPIE* **5707** 46
- [4] Craig A D, Jack D D, Mark L E, Eickhoff, Robert Q F, Paul D H, Steven J N, John M T 2006 *Proc. of SPIE* **6272** 6272L-1
- [5] Edward K 2008 *Proc. of SPIE* **7015** 70150M-1
- [6] Ronald H, Simon M R, Thomas P, Domenico B C, Dmitry B, James M H, Wolfgang H 2010 *Proc. of SPIE* **7736** 77360V
- [7] John M T, Peter W M, Paul D H 1998 *Proc. of SPIE* **3264** 37
- [8] Wang F, Ye Y D, Hu X Y, Luo Z X, Yan H, He L 2012 *Infrared and Laser Engineering* **41** 1471 (in Chinese) [王锋, 叶一东, 胡晓阳, 雒仲祥, 颜宏, 何丽 2012 红外与激光工程 **41** 1471]
- [9] Chen L H, Rao C H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 09701 (in Chinese) [陈林辉, 饶长辉 2011 物理学报 **60** 09701]
- [10] Timothy J K, Byron M W, Chester S G, Laird A T 1989 *Proc. of SPIE* **7736** 77360V
- [11] Gardner C S, Welsh B M, Thompson LA 1990 *Proc IEEE* **78** 1721
- [12] Zhang J H, Cai L, Zhang X F, Gao G C, Yang Y C, Chen L Z, Tan B T 2013 *Acta Optica Sinica* **33** s101001 (in Chinese) [张己化, 蔡雷, 张晓飞, 高国昌, 杨雨川, 陈力子, 谭碧涛 2013 光学学报 **33** s101001]
- [13] Ageorges N, Dainty C 2000 *Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy* (Berlin: Springer Netherlands) p58
- [14] John T, Jack D, Paul H, Craig D 2008 *Proc. of SPIE* **6878** 68780G
- [15] Ge J, Jacobsen B P, Angel J R P, McGuire P C, Roberts T, McLeod Brian A, Lloyd-Hart M 1998 *Proc. of SPIE* **3353** 242
- [16] Liu X Q, Hu S X, Li C, Hu H L, Zhang Y C, Xue X H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1944 (in Chinese) [刘小勤, 胡顺星, 李琛, 胡欢陵, 张寅超, 薛向辉 2006 强激光与粒子束 **18** 1944]
- [17] Yang G T 2009 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [杨国韬 2009 博士学位论文 (武汉: 中国科学院研究生院)]

Experimental study on backscattering characteristics of sodium beacon based on a long pulse laser*

Wang Feng[†] Chen Tian-Jiang Luo Zhong-Xiang Lu Yan-Hua
Wan Min Peng Bo Yin Xin-Qi

(*Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China*)

(Received 15 July 2013; revised manuscript received 18 September 2013)

Abstract

A sodium beacon with bright magnitude can be obtained during backscattering time, by utilizing a long pulse laser with parameters matched with a sending and receiving beacon system. This is helpful to get high SNR in detecting beacon, and to achieve a closed-loop correction at high frequency. Based on a 450 mm telescope and a high-energy long pulse laser, the detection experiment of sodium beacon was carried out, and the backscattering characteristics of sodium beacon were obtained. The intensity data of backscattering light with different launching energy and polarization were collected by CCD and PMT. As high as $\sim 15,000$ photons/m²·pulse⁻¹ of backscattering light was detected, and the brightness is close to 4.1 magnitudes during backscattering time. The column density in experiment was derived from analyzing and calculating experimental data. No saturation phenomenon was observed during the whole experimental process. And the feasibility to avoid saturation is verified and a bright sodium beacon is obtained by utilizing a long pulse laser.

Keywords: laser technique, sodium beacon, pulsed laser, energy

PACS: 42.68.Wt, 42.25.Bs, 42.79.Qx, 95.75.Rs

DOI: [10.7498/aps.63.014208](https://doi.org/10.7498/aps.63.014208)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China.

[†] Corresponding author. E-mail: yuan0186@sina.com