

全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究

刁伟峰^{1,2} 刘继桥¹ 竹孝鹏¹ 刘 源¹ 张 鑫¹ 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研制了一套人眼安全的全光纤相干多普勒激光测风雷达系统。系统采用1550 nm全光纤单频保偏激光器作为激光发射光源, 激光器单脉冲能量0.2 mJ, 重复频率10 kHz, 脉冲半高全宽400 ns, 线宽小于1 MHz。激光雷达接收望远镜和扫描器口径100 mm, 采用速度方位显示(VAD)扫描模式对不同方位的视线风速进行测量, 使用平衡探测器接收回波相干信号, 通过1 G/s的模拟数字(AD)采集卡对相干探测信号进行采集, 在现场可编程门阵列(FPGA)数字信号处理器中进行1024点快速傅里叶变换(FFT)得到不同距离门回波信号功率谱信息。对于获得的各方位视线风速, 研究采用非线性最小二乘法对激光雷达测量的风速剖面矢量进行反演。激光雷达与风廓线雷达测量的风速进行了对比, 两者测量的水平风速, 风向和竖直风速相关系数分别为0.988, 0.941和0.966。

关键词 遥感; 风速; 多普勒激光雷达; 风廓线雷达; 相干探测

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0914003

Study of All-Fiber Coherent Doppler Lidar Wind Profile Nonlinear Least Square Retrieval Method and Validation Experiment

Diao Weifeng^{1,2} Liu Jiqiao¹ Zhu Xiaopeng¹ Liu Yuan¹ Zhang Xin¹ Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract An eye-safe all-fiber coherent Doppler wind lidar system is developed. The system employs an all-fiber single-frequency polarization-maintaining laser as emission light at 1550 nm. The laser has pulse energy of 0.2 mJ, repetition frequency of 10 kHz and pulse full width half maximum of 400 ns, and the linewidth is less than 1 MHz. The aperture of the receiver-telescope and scanner of lidar is 100 mm. The system is operated in velocity azimuth display (VAD) scanning mode for wind speeds measurement at different azimuths. The mixing echo signal is received by balanced detector and sampled by 1 G/s analog to digital (AD) acquisition card, then 1024 points fast Fourier transform (FFT) and spectrum accumulation of echo signal at every range gate are implemented in the field programmable gate array (FPGA) signal processor. For the line of sight wind speeds at each azimuth, the nonlinear least square method is used to retrieve three-dimensional wind field vector measured by lidar. The wind speed measured by lidar is compared with that of wind profile radar. Correlation coefficients of horizontal wind speed, wind direction and vertical wind speed of them are 0.988, 0.941 and 0.966.

Key words remote sensing; wind speed; Doppler Lidar; wind profile radar; coherent detection

OCIS codes 280.3340; 010.3640; 010.0280; 030.1640

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(60908036)、中国高分辨率对地观测青年创新基金(GFZX04060103-5)、国家青年科学基金(61308108)

作者简介: 刁伟峰(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事全光纤相干多普勒激光测风雷达等方面的研究。

E-mail: wfdiao@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光遥感和空间全固态激光器等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

相干多普勒雷达(CDL)可以在晴天对大气风场进行主动遥感探测,实现高风速测量精度、高空间分辨率和高时间分辨率的大气三维风速测量,应用前景十分广泛^[1-2],如风力发电选址及风机运行控制、机场风切变测量、飞机尾流监测、晴空湍流和台风跟踪等^[3-6]。近些年随着激光器的发展,相干激光雷达光源经历了从固态激光器至全光纤激光器的应用发展^[7-11]。其中 1.5 μm 波段的测风激光雷达系统,激光源人眼相对较安全,采用全光纤结构系统结构紧凑、维护方便^[12]。另外,1.5 μm 全光纤的相干激光雷达系统,激光光源组部件和探测器可以光通信行业标准器件,可以大幅度降低产品的研发成本,技术相对成熟,维修也较为方便,有利于推进相干测风激光雷达的应用。

相干激光测风雷达,根据工作方式不同,分为连续相干探测和脉冲相干探测体制。其中连续相干激光雷达,主要工作在近距离风速测量,测量范围小于 300 m,脉冲相干激光雷达能够实现近距离至中远距离(≥3 km)大气风速剖面测量。国外开展脉冲相干激光雷达研究主要有法国的 Leosphere 公司^[13]以及日本三菱公司^[8],它们已经推出了相关产品。本文主要研究脉冲全光纤相干激光雷达风速测量,课题组研制了地基相干激光测风雷达,获得了边界层附近大气风场信息^[14],性能进一步优化后实现多方位风速的连续扫描测量,研究采用非线性最小二乘拟合法反演风速剖面,并与风廓线雷达进行对比,进一步验证相干激光测风雷达性能。

2 激光雷达系统组成

全光纤相干多普勒激光测风雷达系统组成根据之前研究的结果^[14],如图 1 所示。激光雷达采用收发同轴结构,激光发射源采用了全光纤单模保偏激光器^[15],环形器实现激光收发分离,激光发出端通过环形器与望远镜光纤连接。通过楔形透镜扫描方式实现光线的偏转,角度误差小于 0.05°。回波信号经过环形器与本振光信号经过耦合器后由平衡探测器(PDB130C, Thorlabs)接收。平衡探测器输出的电信号进入自行研发的高速采集卡进行模数转换,并在现场可编程门阵列(FPGA)数字信号处理器中实现各距离门频谱信号处

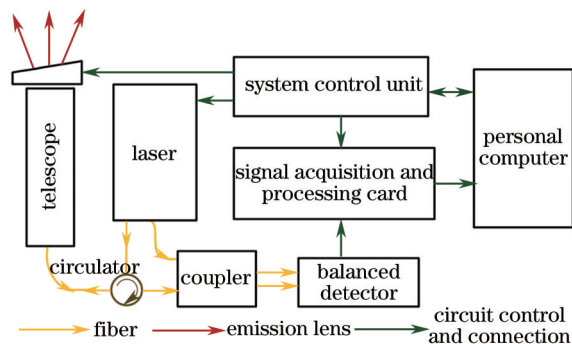


图 1 全光纤相干多普勒激光测风雷达系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of all-fiber coherent Doppler wind lidar system

表 1 全光纤相干多普勒激光测风雷达系统主要参数

Table 1 Main parameters of all-fiber coherent Doppler wind lidar system

Parameter	Value
Single pulse energy	200 μJ
Wavelength	1550 nm
Repetition frequency	10 kHz
Intermediate frequency	80 MHz
Telescope aperture	100 mm
Sampling rate	1 G/s
Fast Fourier transform points	1024
Sampling time	36 μs
Number of azimuth scanning	8
Scanning angle	20°
Single azimuth scanning time	2 s
Range resolution of line of sight wind speed	60 m

理,得到一组距离分辨的视线风速信息。系统控制单元对激光器进行控制并控制激光雷达扫描器工作,通过步进凝视速度方位显示(VAD)扫描,实现了8个不同方位视线风速连续扫描测量,通过对各方位视线风速合成计算三维风速矢量,其中视线风速测量误差范围为 ± 0.38 m/s。表1为全光纤相干激光测风雷达系统主要技术参数。利用该激光雷达系统在上海世博气象站与风廓线雷达开展了对比验证实验。如图2所示,该激光雷达系统尺寸为600 mm \times 600 mm \times 600 mm,质量小于50 kg,功耗约400 W,方便移动开展外场风速测量实验。

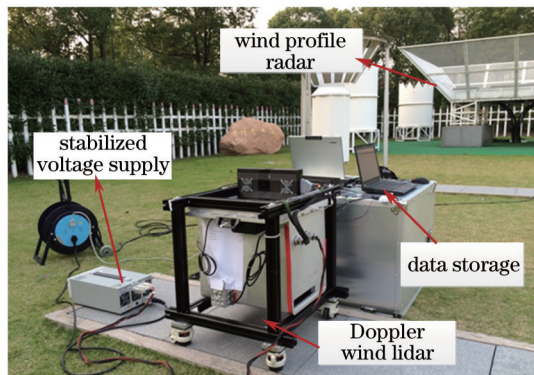


图2 上海世博气象站相干测风雷达与风廓线雷达对比验证系统实验图

Fig.2 Comparison of experimental setup between the coherent wind lidar and wind profile radar in Shanghai Expo meteorological station

3 相干激光雷达风速剖面反演方法

对于系统信号处理的方法在文献[7-8,14]中均有介绍,与之不同的是本文系统采用对称的8个视线方位进行风速测量,相邻的两个视线方位相差 45° ,系统控制单元对扫描器进行连续扫描控制,单方位测量扫描时间为2 s。在回波信号被收集后,对其进行了90个距离门的时域划分,每个距离门对应60 m视线距离分辨率,通过快速傅里叶变换(FFT)得到每个距离门相应的功率谱信息。为增强信噪比,在每个测量方位上,激光雷达系统对10000个脉冲回波信号各距离门进行了频谱累加,累加后计算峰值频谱对应的频率得到一组视线风速信息。实际风速矢量 (V_x, V_y, V_z) 在视线方向的投影,即视线风速 V_{LOS} 可表示为

$$V_{LOS} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \sin \alpha_i \cos(\beta_i - \eta) - V_z \cos \alpha_i, \quad (1)$$

其中

$$\eta = \begin{cases} \arctan \frac{V_y}{V_x}, & V_x > 0 \\ 180 - \arctan \frac{V_y}{V_x}, & V_x < 0 \text{ \& } V_y \geq 0 \\ -180 - \arctan \frac{V_y}{V_x}, & V_x < 0 \text{ \& } V_y < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 α_i 为当前方位的扫描角,即当前视线与铅垂线的夹角,水平静止状态下为 20° , β_i 为扫描透镜的方位角,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内以 45° 为间隔周期变化, i 的取值范围为1,2, \dots ,8,表示8个不同方位。根据(1)式计算,视线风速数值具有周期性,以正弦变化。

三维风速剖面矢量通过至少3组视线风速所反演得到,为了克服实验中的不确定性,系统采用了一个周期8个不同视线风速数据进行处理。为了使反演的三维风速剖面更为接近真实值,定义如下函数

$$F(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [f_i(\mathbf{P})]^2, \quad (3)$$

其中

$$f_i(\mathbf{P}) = V_{LOS_i}^* - \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \sin \alpha_i \cos(\beta_i - \eta) - V_z \cos \alpha_i, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{P}(V_x, V_y, V_z)^T$ 为未知量,是待反演的风速剖面, $V_{LOS_i}^*$ 为任意距离门处的视线风速测量值, i 表示不同的视线风速且为正整数, m 为计算中所选取的视线风速组数,在极限条件下,任意3组线性无关的视线风速均可

以得到对应的三维风速矢量剖面。为了使得到的风速矢量误差最小,(3)式应该满足

$$F'(P) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial V_x}(P) \\ \frac{\partial F}{\partial V_y}(P) \\ \frac{\partial F}{\partial V_z}(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(P) \cdot f_1(P) + \partial f_2(P) \cdot f_2(P) + \dots + \partial f_m(P) \cdot f_m(P)}{\partial V_x} \\ \frac{\partial f_1(P) \cdot f_1(P) + \partial f_2(P) \cdot f_2(P) + \dots + \partial f_m(P) \cdot f_m(P)}{\partial V_y} \\ \frac{\partial f_1(P) \cdot f_1(P) + \partial f_2(P) \cdot f_2(P) + \dots + \partial f_m(P) \cdot f_m(P)}{\partial V_z} \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

(5)式得到了关于风速矢量的三元方程组,因此可以反演出风速剖面矢量 $P(V_x, V_y, V_z)^T$ 。其中可以通过 V_x, V_y 计算出水平方向的风速大小和风速方向, V_z 的数值为竖直方向风速大小,定义风速竖直向下为正。

4 实验结果

为了验证激光雷达测量性能,在上海世博园气象观测站,将相干测风激光雷达与边界层风廓线雷达(TWP3)进行了对比观测实验,如图2所示。根据(1)式可知,采集的视线风速数值满足一定的三角函数变换。如图3所示,给出了高度为1000 m处测量的视线剖面随时间变化图,连续扫描的视线风速为正弦变化,可以通过多点的视线风速合成得到真实的三维风速矢量信息。实验中风廓线雷达采用5波束(东向、南向、西向、北向和天向)DBS扫描工作模式,采取了1 min数据平均输出,激光雷达系统1 min约扫描4个周期共32组视线风速,用32组视线风速进行三维风速反演。

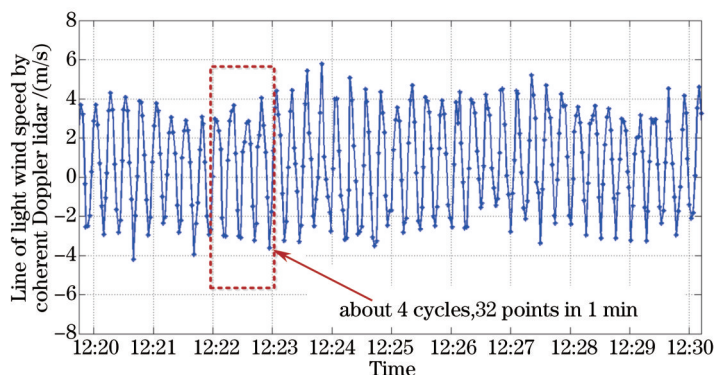


图3 高度1000 m相干多普勒激光测风雷达视线风速随时间变化

Fig.3 Line of sight velocity curves of coherent Doppler wind lidar with time at 1000m altitude

激光雷达和风廓线雷达大量对比数据,选取了从2013年11月8日10:00~14:00,共计4 h。激光雷达获得了8274组视线风速,通过数据反演得到了232组三维风速剖面,每个剖面数据通过减去最后一个距离门来进行探测器本底噪声的去噪处理,由89个距离门组成,距离分辨率60 m,通过时间与高度的一一对应关系与风廓

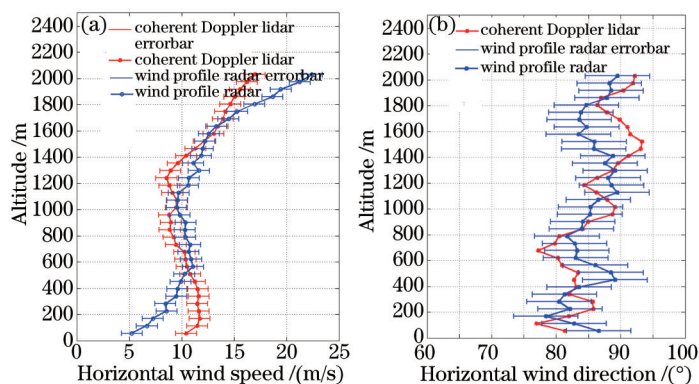


图4 相干激光测风雷达与风廓线雷达风速大小与风速方向对比图。(a) 风速大小;(b) 风速方向

Fig.4 Comparison of wind speed and direction between coherent Doppler wind lidar and wind profile radar.

(a) Wind speed; (b) wind direction

线雷达进行数据比对。选取了11:52, 2 km以下激光雷达与风廓线雷达的风速与风速方向的垂直廓线,如图4所示,可以看出两部雷达在低空和2 km高度处风速大小具有一定的偏差,这可能是因为测量原理不同而产生的,激光雷达风速方向的测量值大部分落入在风廓线雷达的误差范围内,具有一定的一致性。

由于风廓线雷达和激光雷达探测性能受各自信噪比的影响,剔除信噪比低的无效点后,最终选取了7194个有效的数据对比点。对风廓线雷达和激光雷达测量的相同时间下和同一距离门的风速和风向进行了对比,给出了线性拟合曲线。图5为两者水平风速测量对比图,相关系数为0.988,风速测量差异受到各自系统测量时本身的风速误差影响。图6给出了两者水平风向测量对比图,相关系数为0.941,实际风速方向的误差还与风向大小有关系。图7给出了两者垂直风速测量对比图,相关系数为0.966,两者的测量结果具有很好的一致性。从以上对比分析可知,相干激光测风雷达与风廓线雷达开展三维风速剖面时,两者相关性优于0.9,在低空风速测量时,相干激光测风雷达具有较高的空间分辨率,能够更好的满足晴空风速测量,可以与风廓线雷达进行互补,完成对大气风场的综合遥感探测。

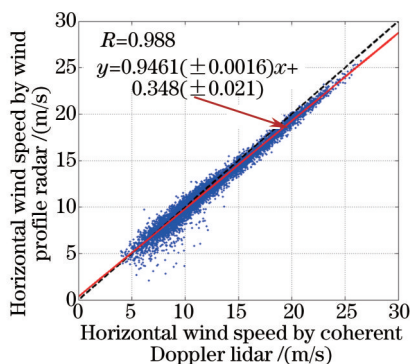


图5 相干激光测风雷达与风廓线雷达水平风速大小对比

Fig.5 Comparison of horizontal wind speed between coherent Doppler lidar and wind profile radar

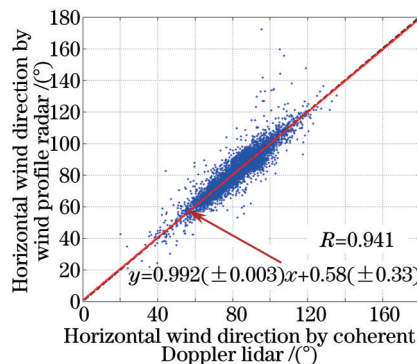


图6 相干激光测风雷达与风廓线雷达水平风速方向对比

Fig.6 Comparison of horizontal wind direction between coherent Doppler lidar and wind profile radar

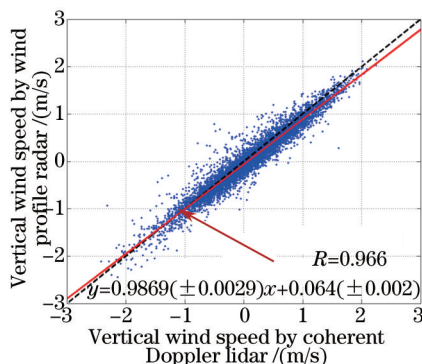


图7 相干激光测风雷达与风廓线雷达垂直风速大小对比

Fig.7 Comparison of vertical wind speed between coherent Doppler lidar and wind profile radar

根据图5~7中的7194组数据,统计激光雷达与风廓线雷达之间风速测量的偏差的平均值和标准差,如表2所示。其中水平风速大小偏差的平均值为0.32 m/s,标准差为0.64 m/s,总体来看两雷达的水平风速偏差小于1 m/s,在测量误差范围之内,因此激光雷达系统的测量结果具有很高的可信度。水平风速方向的偏差平均值为1.06°,标准差计算值为4.02°,风向偏差与风速大小及设备测量误差相关,偏差小于5°,在测量误差范围内。对于竖直风速大小,两雷达偏差在0.3 m/s范围内,具有较好的匹配,也证明了两部雷达的测量结果均有较高的相关性。

表2 相干激光雷达与风廓线雷达测量数据偏差比较

Table 2 Comparison of the data deviation between coherent Doppler lidar and wind profile radar

	Average of the deviation	Standard deviation
Horizontal wind speed $/(m/s)$	0.32	0.64
Horizontal wind direction $/(^{\circ})$	1.06	4.02
Vertical wind speed $/(m/s)$	-0.12	0.16

5 结 论

研制了一套人眼安全的全光纤相干多普勒激光测风雷达系统,采用了1550 nm波段的单频保偏激光器作为发射光源,通过周期性8个视线方位扫描对大气风场进行实时遥感测量,提出了采用非线性最小二乘法进行三维风速反演处理方法,得到了风速剖面矢量。开展了相干激光测风雷达外场实验,与风廓线雷达进行了对比验证,两者测量的水平风速、风向和垂直风速获得了较好一致性,相关系数优于0.9。两雷达测量水平风速和风向之间差值标准偏差分别小于1 m/s和5°。将进一步开展相干激光雷达与探空气球的风速测量对比实验,推进相干激光测风雷达在低空实时高精度风速测量中的应用。

参 考 文 献

- 1 R M Huffaker, A V Jelalian, J A L Thomson, *et al.*. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(3): 322-326.
- 2 P J Rodrigo, Pedersen C, *et al.*. Field performance of an all-semiconductor laser coherent Doppler lidar[J]. Opt Lett, 2012, 37(12): 2277-2279.
- 3 M Akbulut, J Hwang, F Kimpel, *et al.*. Pulsed coherent fiber lidar transceiver for aircraft in-flight turbulence and wake-vortex hazard detection[C]. SPIE, 2011, 8037: 80370R.
- 4 C J Karlsson, F A A Olsson, D Letalick, *et al.*. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. Appl Opt, 2000, 39(21): 3716-3726.
- 5 Wang Yun, Liu Jifang, Lu Zhenzhong, *et al.*. Laser Doppler method for the detection of wake bubbles[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0813002.
王 贇, 刘继芳, 鲁振中, 等. 尾流气泡群的激光多普勒检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0813002.
- 6 M C Heintze, N W Chang, F Jeaneret, *et al.*. Single-pulse measurement of wind velocities using an Er: Yb: glass coherent laser radar [J]. Appl Opt, 2011, 50(21): 4017-4023.
- 7 Xiaopeng Zhu, Jiqiao Liu, Decang Bi, *et al.*. Development of all-solid coherent Doppler wind lidar[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(1): 012801.
- 8 S Kameyama, T Ando, K Asaka, *et al.*. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1953-1962.
- 9 Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Hongjie, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-Erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202003.
刘 毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202003.
- 10 Fang Yang, Xin Zhang, Yan He, *et al.*. High speed pseudorandom modulation fiber laser ranging system[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(8): 082801.
- 11 J Liu, W Chen, X Zhu. Development of all-fiber coherent Doppler lidar to measure atmosphere wind speed[J]. Renewable Energy and the Environment, 2012.
- 12 Yuan Liu, Jiqiao Liu, Weibiao Chen, *et al.*. Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 090604.
- 13 J P Cariou, M Boquet, S Lolli, *et al.*. Validation of the new long range 1.5 μm wind lidar WLS70 for atmospheric dynamics studies [C]. SPIE, 2009, 7479: 747900.
- 14 Weifeng Diao, Xin Zhang, Jiqiao Liu, *et al.*. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(7): 072801.
- 15 X Zhang, W F Diao, Y Liu, *et al.*. Eye-safe single-frequency single-mode polarized all-fiber pulsed laser with peak power of 361 W [J]. Appl Opt, 2014, 53(11): 2465-2469.

栏目编辑: 苏 岑