光源线宽对相干激光测风雷达探测性能的影响分析

冯力天,赵培娥,史晓丁,靳国华,杨泽后,周鼎富,侯天晋

(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

摘　要:使用窄线宽激光源是相干激光测风雷达的特点之一,为研究不同线宽光源对激光测风雷达探测性能的影响,从理论分析了在相干长度内、外时光电流的频谱特性,并使用了三种不同线宽的激光光源进行实际的测风试验。试验表明,当探测距离在相干长度外时,100 kHz 光源信号幅度较 1 kHz 与 10 kHz 两种光源下降约 30%,且部分频段噪声幅度较大。因此,在设计中近程激光测风雷达,可考虑选用百 kHz 量级线宽光源,而探测距离数千米甚至更远的中远程激光测风雷达,可考虑选取几十千赫级线宽光源。

关键词:线宽;　相位噪声;　相干长度;　激光测风雷达

中图分类号:TN249　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201948.0406005

Influence of light source linewidth on detection performance of coherent wind lidar

Feng Litian, Zhao Pei′e, Shi Xiaoding, Jin Guohua, Yang Zehou, Zhou Dingfu, Hou Tianjin

(Southwest Institute of Technology and Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: One of the characteristics of coherent wind lidar is using narrow linewidth laser source. In order to study the influence of different line width light sources on the detection performance of lidar, the spectrum characteristics of the time current in and out of the coherent length were analyzed theoretically. Experiments show that when the detection distance was outside the coherent length, the signal amplitude of 100 kHz light source was about 30% lower than that of 1 kHz and 10 kHz light source, and the noise amplitude of some frequency bands was larger than that of the other two light sources. Therefore, in the design of short-range wind lidar, hundreds of kHz light source could be considered, while in the medium and long-range lidar with detection distance of several kilometers or more, tens of kHz light source could be considered.

Key words: linewidth;　phase noise;　coherent length;　wind lidar

收稿日期:2018-12-08;　**修订日期**:2019-01-10

基金项目:四川省重大科技专项课题(2018TZDZX0006);中国兵器工业集团联合基金(6141B010254)

作者简介:冯力天(1982-),男,博士生,主要从事激光相干探测方面的研究。Email:fenglitian1982@126.com

导师简介:侯天晋(1955-),男,研究员,主要从事激光技术方面的研究。Email:tianjinhou@sina.com

0 引 言

激光测风雷达的研究始于 20 世纪 70 年代,它是一种利用激光光源与气溶胶相互作用产生的多普勒效应来实现风场遥测的光电仪器。早期的激光测风雷达光源多以固体或气体激光器为主,体积功耗相对庞大。随着光纤通信技术及光纤器件的发展,激光测风雷达开始向光纤化方向发展,其紧凑、可靠、稳定的特点受到世界各国的关注,其中法国 Leosphere 公司的 Windcube 系列激光测风雷达是其中的典型代表。

按照爱因斯坦理论,激光是原子能级间受激辐射放大的结果,一个理想激光光源发出的波列为无限连续,其线宽在频域上表现为 δ 函数,但由于相位或振幅的涨落、量子起伏、振动、温度波动等因素的影响,导致输出波列不再是无限连续,而为有限长度,输出激光也并非绝对单色光,表现为线宽是具有一定宽度的曲线[1]。

光源是影响激光测风雷达性能的主要因素之一,设计激光测风雷达时,除光源波长、偏振、功率之外,光源线宽也需重点考虑。根据干涉理论,当发生干涉效应的最大光程差小于相干长度时,有明显的干涉效果;当光程差大于相干长度时,其干涉条纹对比度下降,甚至不可见[2];光源线宽越窄,单色性越好,相干长度也越长,干涉效果越好。然而,光源价格与线宽宽窄关系密切,kHz 及其以下级别的窄线宽光源在设计实现上难度较大,且价格昂贵,不利于大规模的工程化应用与推广。

以往研究人员对光源线宽的研究主要集中在光源的设计与制备上,光源线宽对相干测风探测性能的影响报道不多[3-6]。Hu Qi 等人在 2014 年使用 2.4倍于自身相干长度的光源与另一只相干长度内的光源在近距离的连续波激光测风雷达上进行了比对试验[7]。近年来,国内相关人员就宽线宽光源在相干外差探测上的可行性、光源线宽对相干光通信、微多普勒探测的影响等方面进行了分析与试验,取得了有意义的结论[8-11]。但就光源线宽对中远距离的脉冲相干测风雷达探测性能影响还暂时未见太多研究,文中理论上分析了不同线宽光源频谱的特性,并使用不同线宽的光源进行了测风试验,此举为相干激光测风雷达性能优化、光源合理的选取以及系统低成本研制提供一定的依据,具有重要工程意义。

1 基本原理与数值仿真

在相干探测中,通常是对拍频信号的光电流进行频谱分析得到所需信息,如多普勒频移信息、相位变化、信噪比等,光源线宽的特性也体现在频谱上,因此通过求解拍频信号光电流的频谱可获得线宽频谱特性。

文中暂不考虑随机强度起伏及随机相位起伏,因此,一个理想的本振激光可表示为:

$$E=E_0(\cos\omega(t)+\phi(t)) \tag{1}$$

式中:E_0 为光场幅度;ω 为光频;$\phi(t)$为相位。

根据相干测风原理,发射的激光与气溶胶相互作用后,携带有多普勒频移的信号光与本振光发生拍频,其传输与返回延迟时间为 τ_d,ω_s 为中频信号频率,信号光与本振光强度之比为$\sqrt{k}$ ($\sqrt{k}$<1),信号光表示为:

$$E_s=\sqrt{k}\,E_0\cos[\omega(t+\tau_d)+\phi(t+\tau_d)+\omega_s t] \tag{2}$$

根据平方律公式,本征光与信号光相干拍频产生的光电流为:

$$I(t)=\eta E_0^2+\eta E_0^2 k+\eta E_0^2\sqrt{k}\cos[\omega\tau_d+\omega_s t-\phi(t-\tau_d)+\phi(t)]\} \tag{3}$$

式中:η 为光电探测器光电转换效率,第一项与第二项为直流信号,第三项交流信号,交流信号中存在随机相位部分,随机相位的存在会造成光电流频谱的展宽。由维纳-辛钦定理可知,平稳随机信号的自相关函数和其功率谱密度构成傅里叶变换,因此可先求出光电流的自相关函数,再对自相关函数进行傅里叶变换,获得光电流频谱[2,12-13]。光电流自相关函数如下:

$$\Gamma(t)=\langle I(t)I^*(t+\tau)\rangle \tag{4}$$

令 $\eta E_0^2=A$

$$\begin{aligned}\Gamma(t)=\langle A^2+A^2k^2+\frac{1}{4}A^2k\exp i\{-\omega_s\tau+[\phi(t+\tau-\tau_d)-\\ \phi(t-\tau_d)]-[\phi(t+\tau)-\phi(t)]\}+\\ \frac{1}{4}A^2k\exp i\{\omega_s\tau+[\phi(t+\tau-\tau_d)-\\ \phi(t-\tau_d)]+[\phi(t+\tau)-\phi(t)]\}\rangle\end{aligned} \tag{5}$$

令

$$\Delta\phi(t,\tau)=\phi(t+\tau)-\phi(t) \tag{6}$$

信号及噪声理论认为，激光输出光场的相位波动是一个平稳随机过程[9]，且服从零均值高斯分布，得关系式为[10]：

$$\langle \exp[\pm i\Delta\phi(t,\tau)]\rangle=\exp\left[-\frac{1}{2}\langle\Delta\phi^2(t,\tau)\rangle\right] \tag{7}$$

式中：$\langle\Delta\phi^2(\tau)\rangle=\Delta\omega|\tau|$，其中 $\Delta\omega=2\pi\Delta v$，$\tau_c=2\pi/\Delta\omega$。

考虑 τ 与 τ_d 的关系，对应光电流自相关函数为：

$$\begin{cases}\Gamma(t)=A^2+A^2k^2+\frac{1}{2}A^2k\cos(\omega_s\tau)\exp(-\Delta\omega|\tau|),\ \tau<\tau_d\\ \Gamma(t)=A^2+A^2k^2+\frac{1}{2}A^2k\cos(\omega_s\tau)\exp(-\Delta\omega|\tau_d|),\ \tau\geqslant\tau_d\end{cases} \tag{8}$$

对光电流自相关函数进行傅里叶变换，当延迟时间小于相干时间($\tau_d<\tau$)，即探测距离在相干长度之内时，光电流频谱为：

$$S(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}\Gamma(t)\exp(-i\omega t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

$$S(\omega)=A^2(1+k^2)\delta(\omega)+A^2k\cdot\exp(-\Delta\omega\tau_d)\delta(\omega-\omega_s)+\frac{1}{2}\frac{A^2k\cdot\Delta\omega\cdot\exp(-\Delta\omega\tau_d)}{\Delta\omega^2+(\omega-\omega_s)^2}[\exp(\Delta\omega\tau_d)-\frac{\sin(\omega\tau_d-\omega_s\tau_d)}{\omega-\omega_s}-\cos(\omega\tau_d-\omega_s\tau_d)] \tag{10}$$

当延迟时间大于相干时间($\tau_d>\tau$)，即探测距离在相干长度之外时，光电流频谱为：

$$S(\omega)=\frac{A^2\Delta\omega/\pi}{\left(\frac{\Delta\omega}{2\pi}\right)^2+(\omega-\omega_0)} \tag{11}$$

对延迟时间小于和大于相干时间的两种情况进行仿真：当延迟时间小于相干时间($\tau_d<\tau$)时，假定中频信号频率 ω_s 为 80 MHz，选取三种不同的线宽即 1、10、100 kHz，对应相干长度为 300、30、3 km。对公式(10)进行仿真，三种光源即 1、10、100 kHz 光电流频谱图见图 1。三种线宽的频谱以 80 MHz 为中心对称分布，由于狄拉克函数成分的存在，光电流频谱非常细锐，中频信号能有效提取。三种线宽光源的频谱噪声电平也随线宽的增大而增大，1 kHz 为−14 dB，三者最低，100 kHz 为−12 dB，三者最高。

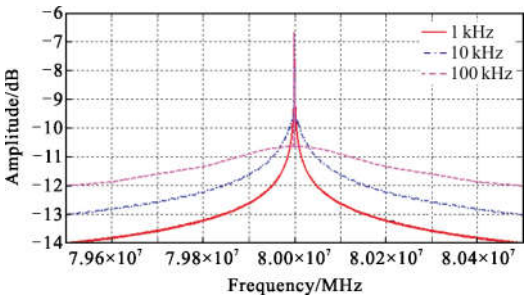


图 1 相干长度之内，1、10、100 kHz 的光电流频谱

Fig.1 Spectrum of 1, 10, 100 kHz within coherent length

当延迟时间大于相干时间($t_d>\tau$)时，对公式(11)进行仿真，仿真时选取探测距离 2 倍于相干长度，三种光源即 1、10、100 kHz 光电流频谱图见图 2。频谱噪声较相干长度之内的噪声要大，噪声普遍增加 5 dB 以上，如 1 kHz 线宽的光源噪声由−14 dB 上升至约−8.7 dB，噪声增加了约 5.3 dB。

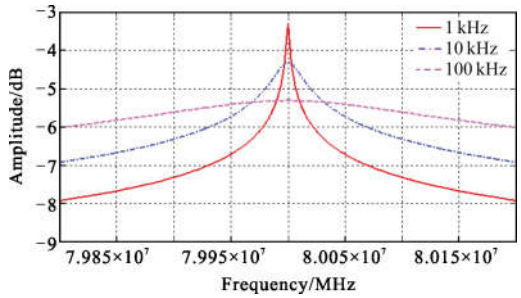


图 2 相干长度之外，1、10、100 kHz 的光电流频谱

Fig.2 Spectrum of 1, 10, 100 kHz beyond coherent length

上述仿真说明，不同线宽光源的频谱噪声与光源线宽有密切联系，在相干长度之内时，光电流频谱噪声随线宽的增大而增大；而在相干长度之外时，光源频谱噪声明显增加，较相干长度之内时，噪声增加 5 dB 以上，原因在于光源线宽越宽，相位噪声越大，进而使频谱噪声变大。

2 试验结果与分析

为验证上述的理论推导与数值分析的准确性，在实验室构建一套相干测风系统，并利用不同线宽的种子光源进行实际测风试验。其试验原理框图如图 3 所示。

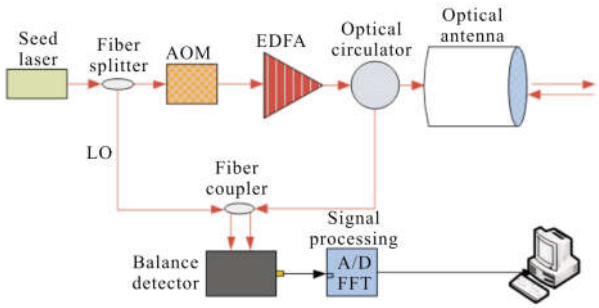


图 3 相干测风系统试验原理框图

Fig.3 Schematic diagram of coherent wind measurement system

图 3 示出,窄线宽种子光源输出的连续激光经过光纤分束器分为两部分，一部分作为相干拍频的本振光(LO);另一部分经声光调制器(AOM)调制成的脉冲,并由光纤放大器放大,输出的脉冲激光经光学环行器和光学天线发射到目标空域。激光与气溶胶相互作用，携有多普勒频移的回波信号光与本振光相干拍频。相干信号经光电探测器转换为光电流,通过信息处理器进行 A/D 采集、滤波、FFT 等处理,即可检测出该相干信号的频谱信息，再利用多普勒频移与风速关系可获得径向风速。图 4 为试验场景。

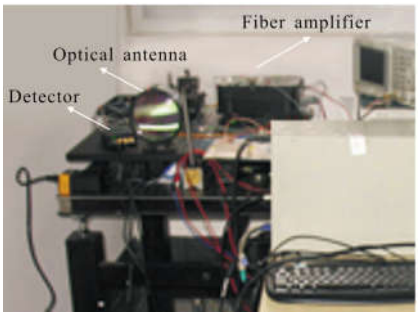
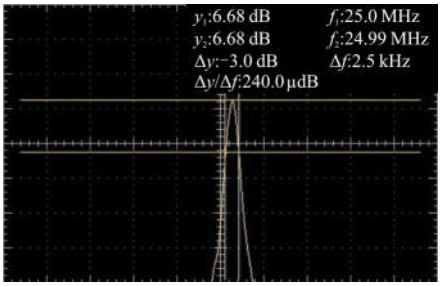


图 4 相干测风试验场景

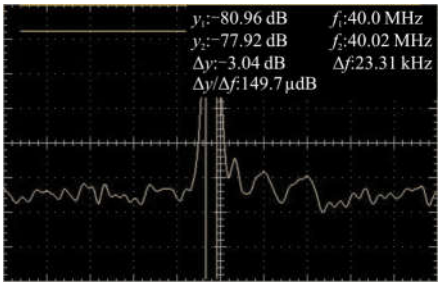
Fig.4 Experiment scence of coherent wind measuremnet

试验用种子光源中心波长为 1 550 nm，线宽分别为 1、10、100 kHz，调节每只种子激光器使输出功率均为 10 mW;种子激光器注入脉冲光纤放大器后，



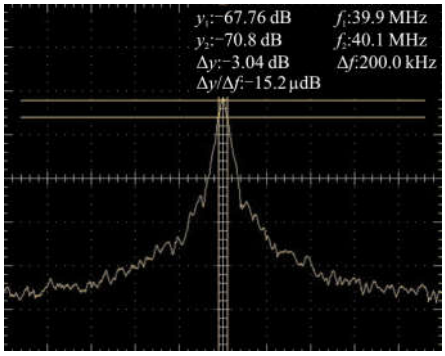
(a) 1.0 kHz 线宽种子光源

(a) Seed source of 1.0 kHz linewidth



(b) 10 kHz 线宽种子光源

(b) Seed source of 10 kHz linewidth



(c) 100 kHz 线宽种子光源

(c) Seed source of 100 kHz linewidth

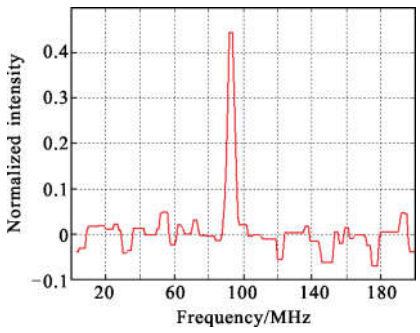
图 5 各种子光源线宽图

Fig.5 Picture of seed source of linewidth

最后输出能量为 100 μJ；试验使用的光学天线口径 100 mm;系统中心频率为 80 MHz;选取距离门长度为 100 m。通过使用三种不同线宽的种子光源,比较在相干长度内、外相同距离门 (相同距离条件下)的频谱特性以及噪声特性。

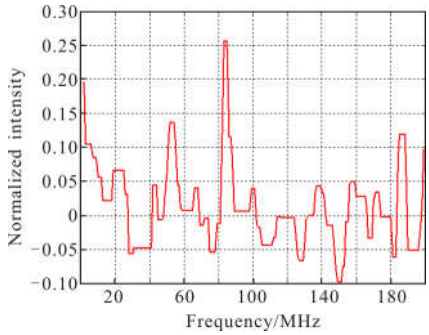
对试验数据进行处理后，得到不同距离下的信号频谱。图 6(a)为使用 100 kHz 种子光源在第 10 个距离门,即 1 km 处风场频谱,此时探测距离在该种子光源相干长度之内，图中纵轴为做归一化处理后的频谱幅度,横轴为频率,信号频谱中心约在80 MHz 左右,细锐清晰,信号频谱幅度超过 0.4,噪声幅度在 0.02 附近。

图 6(b)为使用 100 kHz 种子源在第 30 个距离门,即 3 km 处风场频谱,此时探测距离在该光源相干长度之外，信号频谱幅度相比 1 km 时降低约 30%,下降至 0.25,且“尖峰”噪声增多,噪声幅度大多接近 0.05,部分频段噪声幅度甚至超过 0.1。



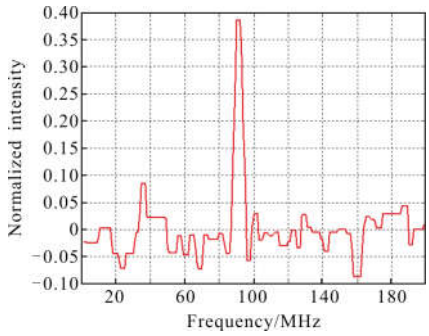
(a) 100 kHz 种子光源,1 km 处频谱

(a) Spectrum of 100 kHz seed source at 1 km



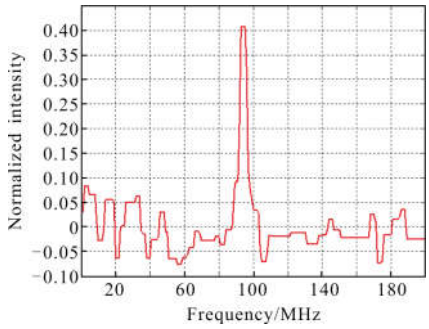
(b) 100 kHz 种子光源，3 km 处频谱

(b) Spectrum of 100 kHz seed source at 3 km



(c) 10 kHz 种子光源，3 km 处频谱

(c) Spectrum of 10 kHz seed source at 3 km



(d) 1 kHz 种子光源，3 km 处频谱

(d) Spectrum of 1 kHz seed source at 3 km

图 6 不同线宽光源在不同距离处的频谱

Fig.6 Spectrum of different linewidth light sources at different distances

图 6(c)与图 6(d)分别为使用 10 kHz、1 kHz 的种子光源在第 30 个距离门，即 3 km 处风场频谱，此时探测距离都在上述两个种子光源相干长度之内。10 kHz 线宽光源信号频谱幅度接近 0.4，1 kHz 线宽光源信号频谱幅度超过 0.4，而噪声幅度仍然保持较低水平，多数频段噪声幅度仍然在 0.02 附近，与 100 kHz 种子光源在相干长度之内时具有一致性。

上述试验结果表明：探测距离在光源相干长度之内时，中频信号频谱都可有效提取，且有较高的信噪比；但随着探测距离增加，超过相干长度时，信号强度开始下降，噪声增多，信噪比降低。

3 结束语

文中根据经典的相干探测理论，依据光电转换的平方律定理推导出相干探测光电流频谱函数，并对其仿真。同时采用 1、10、100 kHz 三种不同线宽的激光光源进行实际的测风试验，试验表明，当探测距离在 1 km 之内时，100 kHz 线宽光源信号幅度均在 0.4 左右，信噪比较高，均可有效提取；当探测距离在 3 km 时，1 kHz 与 10 kHz 线宽光源信号幅度仍然在 0.4 左右，而 100 kHz 线宽光源由于探测距离超过相干长度，3 km 处的信号幅度较相干长度之内时下降约 30%，至 0.25。同时不同频段上的噪声增多，尽管也能测得信号，但在浓雾、极高能见度等复杂天气环境下，若使用此光源，会对测风雷达的信息处理、算法设计提出新的要求。因此，在设计中近程激光测风雷达，可考虑选用百 kHz 量级线宽光源，而探测距离数千米甚至更远的中远程激光测风雷达，可考虑选取几十 kHz 级线宽光源。此举为相干激光测风雷达性能优化、光源合理的选取以及系统低成本研制提供一定的依据，具有重要的工程意义。

参考文献：

[1] Amnon Yariv, Pochi Yeh. Optical Electronics in Modern Communication [M]. Sixth ed. Chen Heming, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
Amnon Yariv, Pochi Yeh. 光子学-现代通信光电子学[M]. 第 6 版. 陈鹤铭, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.

[2] Liao Yanbiao. Optics: Principles and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
廖延彪. 光学原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[3] Christine Spiegelberg, Jihong Geng, Hu Yongdan, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2004, 22(1): 57-62.

[4] Dolfi-Bouteyre A, Canat G, Valla M, et al. Pulsed 1.5 μm LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on

high-brightness large-core fiber amplifier[J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2009, 15(2): 441-450.

[5] Zhang Xin, Diao Weifeng, Liu Yuan, et al. Eye-safe signal-frequency single-mode polarized all-fiber pulsed laser with peak power of 361 W [J]. ***Appled Optics***, 2014, 53(11): 2465-2469.

[6] Song Zhaoyuan, Yao Guibin, Zhang Leilei, et al. Influence factors of phase noise of single frequency fiber laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 46(3): 0305005. (in Chinese)
宋昭远, 姚桂彬, 张磊磊, 等. 单频光纤激光器相位噪声的影响因素[J]. 红外与激光工程, 2016, 46(3): 0305005.

[7] Hu Qi, Peter John Rodrigo, Christian Pedersen. Remote wind sensing with a CW diode laser lidar beyond the coherence regime[J]. ***Optics Letters***, 2014, 39(16): 4875-4878.

[8] Li Chengqiang, Wang Tingfeng, Zhang Heyong, et al. Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection [J]. ***Acta Physical Sinica***, 2016, 65(8): 084206. (in Chinese)
李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 激光光源线宽对外差探测性能的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 084206.

[9] Kong Yingxiu, Ke Xizheng, Yang Yuan. Influence of laser linewidth on the performance of space coherent [J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2017, 38(7): 1669-1674. (in Chinese)
孔英秀, 柯熙政, 杨媛, 等. 激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1669-1674.

[10] Zhang Haiyang, Zhao Changming, Yang Suhui, et al. The methods of decreasing the phase noise influence in micro-doppler ladar[J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2011, 40(5): 753-757. (in Chinese)
张海洋, 赵长明, 杨苏辉, 等. 激光微多普勒探测系统中降低相位噪音影响的方法研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(5): 753-757.

[11] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese)
胡杨, 朱鹤元. 1.55 μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130001.

[12] Vaccaro D D. Electronic Warfare Receiving System [M]. Translated by Fu Damao, Hu Yongfu. Beijing: The Fourth Department of the General Staff Headquarters, 1996: 116-117.

[13] Townes C. Ideas and stumbling blocks in quantumelectronics [J]. ***Journal of Quantum Electronics***, 1984, 20(6): 547-550.