

基于 Golay 脉冲编码技术的相干激光雷达仿真研究

周艳宗^{1,2**}, 王冲^{1,2}, 魏天问^{1,2}, 上官明佳^{1,2}, 夏海云^{1,2*}

¹中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 针对相干激光雷达远场回波信号信噪比低, 提取困难的问题, 提出了脉冲编码技术, 以改善系统信噪比, 增大雷达探测距离。研究了相干激光雷达系统中 Golay 码的编码和解码原理, 理论分析了采用脉冲编码技术对系统信噪比的提升效果。基于大气分层模型仿真生成了相干激光雷达时域回波信号。基于 Golay 码解码原理得到了脉冲编码系统的风速结果, 仿真结果表明, 时间分辨率为 1 s, 距离分辨率为 60 m 的情况下, 使用 Golay 编码脉冲作为相干激光雷达的探测脉冲, 在 0~5.3 km 范围, 风速误差小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在相同的测量时间内, 相比于传统脉冲相干激光雷达, 基于脉冲编码技术的相干激光雷达将探测距离提高了 2.5 km, 提高了远场弱信号的信噪比。

关键词 遥感; 相干激光雷达; Golay 编码; 大气分层模型; 信噪比

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0810004

Simulation Research of Coherent Lidar Based on Golay Coding Technology

Zhou Yanzong^{1,2**}, Wang Chong^{1,2}, Wei Tianwen^{1,2}, Shanguan Mingjia^{1,2}, Xia Haiyun^{1,2*}

¹School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Aiming at the low signal-to-noise ratio (R_{SN}) and difficult extraction of coherent lidar echo signal in the far field, we propose pulse coding technology to improve the R_{SN} and dynamic range of the system, then we study the encoding and decoding principle of Golay code in coherent lidar system, and theoretically analyze R_{SN} improvement of the system by using pulse coding technology. We simulate the echo signal of coherent Doppler lidar based on the atmospheric slices model, and obtain the wind velocity of the pulse coding system based on the decoding principle. The simulation results show that, when the Golay code pulse is used as the detection pulse of the coherent lidar, the wind velocity error is less than $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the range of 0~5.3 km with the distance resolution of 60 m and the time resolution of 1 s. In the same measurement time, the coherent lidar with pulse coding technique can improve the detection distance by 2.5 km compared with the traditional pulse coherent lidar, which improves the R_{SN} of the far-field weak signal.

Key words remote sensing; coherent lidar; Golay coding; atmospheric slices model; signal-to-noise ratio

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 010.3640

1 引言

多普勒激光雷达有两种基本探测方法, 直接探测激光雷达和相干探测激光雷达。直接探测激光雷达使用光学鉴频器或频谱分析仪将多普勒频移转换为功率或光学模式变化^[1-3]。相干探测激光雷达则是基于大气后向散射和本振信号, 测量拍频信号。相干激光雷达的一个关键特征是后向散射信号经由本地振荡得到“放大”, 对于设计良好的相干激光雷

达, 原则上其检测性能接近量子极限, 相干激光雷达具有高精度、高时空分辨率的特点^[4]。相干激光雷达广泛应用于测量风切变^[5]、大气湍流^[6]、飞机尾流^[7]、微下击暴流^[8]、阵风以及重力波^[9]等, 国内外分别展开了相干激光雷达的相关工作^[10-22]。

激光在大气传输过程中, 受大气衰减及各种复杂天气状况的影响, 相干激光雷达接收的回波信号具有很低的信噪比和很大的随机性^[23]。相干激光雷达信号处理的关键是从弱信号中检测出有用的多

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-04-04; 录用日期: 2018-04-12

* E-mail: hsia@ustc.edu.cn; ** E-mail: yanzong@mail.ustc.edu.cn

0810004-1

普勒频移信息。目前,最常用的多普勒频移估计算法是周期图最大值法,该算法对每个距离门的功率谱最大值所对应的频率值进行提取,该频率值即为多普勒频移值^[24]。当信噪比较低时,信号湮没在噪声中,使频率估计产生偏差,从而增大了测量误差。提高激光雷达回波信号的信噪比,特别是远场弱信号的信噪比,是提高后续数据处理准确性的前提^[25]。

为提高激光雷达回波信号的信噪比,使用适当的编码脉冲作为探测信号既能增加发射信号的能量又不降低空间分辨率^[26]。Golay 互补序列具有理想的自相关和互相关特性,已经应用于分布式光纤传感、微波雷达等领域,并有效地解决了系统信噪比和空间分辨率之间的矛盾。2013 年,西安电子科技大学杜晓林等^[27]将 Golay 码应用到了 MIMO 雷达设计中,利用 Golay 码良好的自相关性和互相关性,降低了发射脉冲之间的相互串扰,并结合零空间向量加权法,提高了目标检测性能。2016 年,西南交通大学罗源等^[28]提出一种结合 Golay 编码技术与差分脉冲对技术混合的方法,将布里渊光时域分析系统(BOTDA)信噪比提高了 4.08 dB。2017 年,南京大学 Wang 等^[29]基于 Golay 互补序列实现布里渊时域反射计系统(BOTDR)的搭建,在 10 km 的传感光纤中实现温度分辨率 0.37 °C 和应力分辨率 7.4 με 的测量,空间分辨率为 2 m。目前,Golay 脉冲编码技术尚未在相干多普勒测风激光雷达中应用。

本文基于 Golay 互补序列对发射脉冲进行空时编码,消除了发射脉冲的自相关旁瓣,并且降低了各发射波形之间的时域互相关。将 Golay 互补序列构成的脉冲串作为相干激光雷达的探测脉冲,与大气气溶胶作用,在相同的累计时间范围内,提高了平均发射功率,在不牺牲探测距离分辨率的同时,可以有

效提高相干测风激光雷达的信噪比。

2 Golay 码互补序列及解码运算

2.1 Golay 互补序列

Golay 互补序列是由两种元素组成的低阶的互补序列构成高阶的互补序列^[30],其构造方式为

$$\begin{cases} A_{2^k} = [a_{2^k-1} | b_{2^k-1}] = a_0 \cdots a_{2^k-1} b_0 \cdots b_{2^k-1} \\ B_{2^k} = [a_{2^k-1} | \bar{b}_{2^k-1}] = a_0 \cdots a_{2^k-1} \bar{b}_0 \cdots \bar{b}_{2^k-1} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $N=2^k-1$,表示码长; \bar{b} 为 b 的补码, $\bar{b}=-b$ 。Golay 码具有很好的自相关性,除零位移外其自相关函数为零。假设 A_k 、 B_k 为一对长度为 N 的 Golay 互补序列,则

$$A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k = 2N\delta_k, \quad \delta_k = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: δ_k 为单位冲激函数; \otimes 表示相关。图 1 为 A 、 B 序列的自相关函数及其和,可以看出,Golay 互补码自相关没有旁瓣。Golay 互补码包含一对由“1”和“-1”构成的双极性码,然而,由于在光纤中只能传输正的光脉冲,需要通过对双极性码 A 、 B 采用偏置的方法,将互补序列中每个序列用两个单极性序列表示,即

$$\begin{cases} U_k(t) = (1 + A_k)/2 \\ \bar{U}_k(t) = (1 - A_k)/2 \end{cases}, \begin{cases} W_k = (1 + B_k)/2 \\ \bar{W}_k = (1 - B_k)/2 \end{cases}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出:

$$U_k = \begin{cases} 1, & A_k = 1 \\ 0, & A_k = -1 \end{cases}, \bar{U}_k = \begin{cases} 0, & A_k = 1 \\ 1, & A_k = -1 \end{cases},$$

$$W_k = \begin{cases} 1, & B_k = 1 \\ 0, & B_k = -1 \end{cases}, \bar{W}_k = \begin{cases} 0, & B_k = 1 \\ 1, & B_k = -1 \end{cases}, \quad (4)$$

可知 $A_k = U_k - \bar{U}_k$, $B_k = W_k - \bar{W}_k$ 。

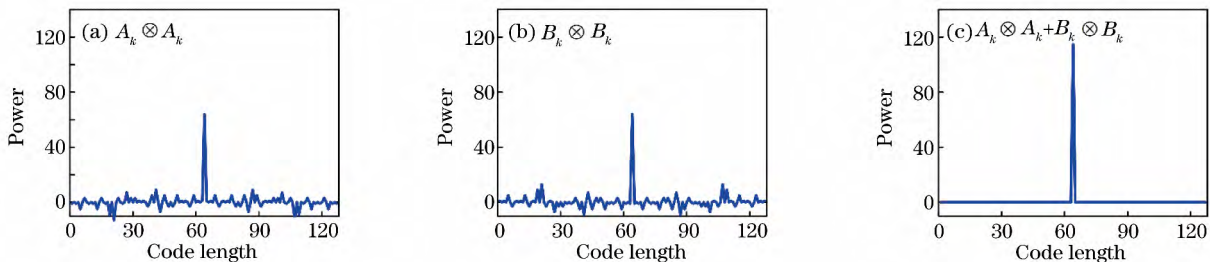


图 1 Golay 互补序列自相关函数。(a) A 序列自相关函数;(b) B 序列自相关函数;(c) A 、 B 序列自相关函数之和

Fig. 1 Autocorrelation function of Golay complementary. (a) Autocorrelation function of A Golay codes ;

(b) autocorrelation function of B Golay codes ; (c) autocorrelation function sum of A and B Golay codes

利用(3)式产生 4 组单极性 Golay 码调制电光调制器,对发射激光进行空时编码。其中 1 表示发射脉冲光,0 表示不发射脉冲光。通过发射 4 组单

极性脉冲,达到与 Golay 互补序列码相同效果。图 2 为 8 位编码序列发射示意图,其中 T_s 表示发射脉冲的周期。

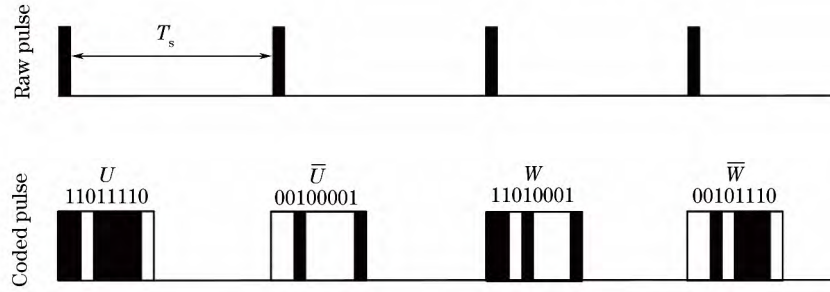


图 2 8 位编码序列发射示意图

Fig. 2 8 bit coding sequence emission diagram

为得到最后的脉冲响应,对 4 组激光雷达信号进行距离门划分,并对时域信号进行模数变换(A/D)和快速傅里叶变换(FFT),得到 4 组激光雷达的频域信号,再按照(5)式的解码方式进行解码。将单极性码 U_k 、 \bar{U}_k 得到的频谱相减,得到的结果和 Golay 码中的序列 A 取相关。同样将单极性码 W_k 、 \bar{W}_k 得到的频谱相减与 Golay 码的序列 B 取相关。最后,将 2 组结果相加,得到单脉冲的后向散射谱。

$$S(f, l) = \text{corr} \langle [S_{U_k}(f, l) - S_{\bar{U}_k}(f, l)], A_k(t) \rangle + \text{corr} \langle [S_{W_k}(f, l) - S_{\bar{W}_k}(f, l)], B_k(t) \rangle, \quad (5)$$

式中: $S_{U_k}(f, l)$ 、 $S_{\bar{U}_k}(f, l)$ 、 $S_{W_k}(f, l)$ 、 $S_{\bar{W}_k}(f, l)$ 分别为编码脉冲 U_k 、 \bar{U}_k 、 W_k 、 \bar{W}_k 产生的频谱; $\text{corr}(\cdot)$ 表示取相关函数。图 3 为应用 Golay 脉冲序列的相干激光雷达的解码流程图。其中: a, b, c, d 表示原始的激光雷达信号; S_A 为频谱 $S_{U_k}(f, l)$ 、 $S_{\bar{U}_k}(f, l)$ 之差, S_B 为 $S_{W_k}(f, l)$ 、 $S_{\bar{W}_k}(f, l)$ 之差; X 和 Y 分别为 S_A 和序列 A 以及 S_B 和序列 B 相关得到的结果。在得到后向散射频谱后,采用周期图最大值法,得到每个距离门处的多普勒频移值,根据多普勒频移和大气风速之间的关系 $\Delta\nu = 2V/\lambda$ ($\Delta\nu$ 为多普勒频移, V 为风速),反演出最后的风速信息。

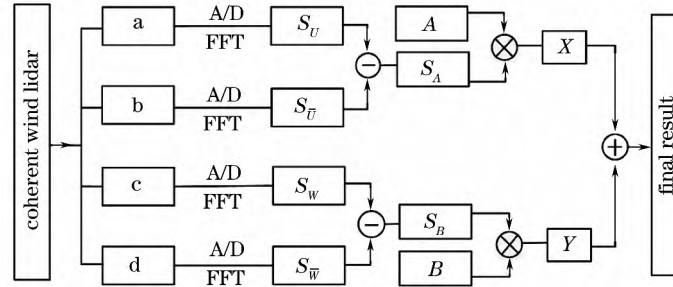


图 3 解码流程图

Fig. 3 Decoding flow chart

相比传统的单脉冲相干测风激光雷达,编码脉冲中每一发脉冲都会产生独立的回波信号,最终探测器的响应是所有回波信号的叠加。通过发射 4 组单极性 Golay 编码脉冲,获得 4 组叠加的原始激光雷达信号,再经过上述信号处理过程,可以在不影响单个脉冲分辨率的同时,将回波信号提取出来,从而增加响应曲线的峰值。

3 Golay 脉冲编码对系统信噪比的影响

相干激光雷达中发射单脉冲得到的回波响应为 $\psi(t)$,系统噪声为热噪声和散粒噪声,二者为不相关的零均值随机噪声,噪声均方差为 σ^2 。结合上述解码过程,在考虑噪声情况下,经过脉冲编码后,得到

的单脉冲响应为

$$\begin{aligned} \hat{\psi}(t) &= \frac{1}{2N} \{ A_k \otimes [A_k \times \psi(t) + e_{U_k}(t) - e_{\bar{U}_k}(t)] + \\ & B_k \otimes [B_k \times \psi(t) + e_{W_k}(t) - e_{\bar{W}_k}(t)] \} = \\ & \psi(t) + \frac{1}{2N} \{ A_k \otimes [e_{U_k}(t) - e_{\bar{U}_k}(t)] + \\ & B_k \otimes [e_{W_k}(t) - e_{\bar{W}_k}(t)] \}, \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $e_{U_k}(t)$ 、 $e_{\bar{U}_k}(t)$ 、 $e_{W_k}(t)$ 、 $e_{\bar{W}_k}(t)$ 分别为 U_k 、 \bar{U}_k 、 W_k 、 \bar{W}_k 脉冲引起的系统噪声; $\hat{\psi}(t)$ 为经过脉冲编码后得到的激光雷达脉冲响应。由于每次测量的噪声不相关, $E[e_i(t)e_j(t)] = 0$, 其中 $E[\cdot]$ 表示取期望,经过脉冲编码后,噪声的有效值为

$$\sqrt{E\{\hat{\psi}(t) - \psi(t)\}^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (7)$$

为提高系统信噪比,传统激光雷达常采用的方法是对信号进行累加平均。为证明采用 Golay 脉冲编码后对系统信噪比的提升,选择单脉冲系统累加平均后的信噪比作参考。经过 n 次叠加后,得到的激光雷达信号为 $\bar{\psi}(t) = \sum_{i=1}^n \psi(t) + \sum_{i=1}^n e(t)$ 。

经过累加后噪声功率为

$$\sqrt{E[\bar{\psi}(t) - \psi(t)]} = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i(t)} = \left[\sum_{i=1}^n e_i^2(t) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} e_i(t)e_j(t) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{n}\sigma. \quad (8)$$

从脉冲发射时序图 2 中可以看出,发射一组互补码需要的时间内单脉冲系统可进行 4 次累加平均。此时的 n 值为 4,则噪声的有效值为

$$\bar{e}_{\text{pulsed}}(t) = \frac{\sqrt{n}\sigma}{4} = \frac{1}{2}\sigma. \quad (9)$$

结合(7)式和(9)式,经过脉冲编码后,系统信噪比增益为^[26]

$$R_{\text{SN}_k}^{\text{coded}}/R_{\text{SN}_k}^{\text{pulsed}} = \frac{\psi(t)/(\sigma/\sqrt{N})}{\psi(t)/(\sigma/2)} = \frac{\sqrt{N}}{2}. \quad (10)$$

4 相干激光雷达时域信号生成算法

相干激光雷达的光电流信号是大气后向散射信号和本振信号拍频的结果。若将激光束的初始发射功率表示为 $P_1(t - R/2c) = E_x/\Delta T$, 式中: R 为传输距离; c 为光速; ΔT 为采样间隔; E_x 为激光器发射的能量。令激光散射厚度 $\Delta R = c\Delta T/2$, 忽略常数相位, 外差电流的完整形式可表示为

$$i_h(t) = 2\Re[\eta P_{\text{LO}} P_1(t - R/2c) \times T(R)^2 c\beta(A_r/R^2)]^{1/2} \exp(-j2\pi\Delta\nu t), \quad (11)$$

式中: \Re 为探测器响应; η 为激光雷达效率; P_{LO} 为本振光功率; $A_r = \pi D^2/4$, 其中 $D(m)$ 为望远镜口径; β 为气溶胶的后向散射系数, 单位为 $\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$; $T(R)$ 为传输距离为 R 处的大气透过率; $\Delta\nu$ 为多普勒频移。

(11)式描述的是单个粒子的外差电流随时间的变化关系,而在实际的激光传输过程中,大气中与激光作用的粒子数量巨大,可达到 10^7 , 并且由于大气中气溶胶粒子分布不均匀,光强和相位具有很大随机性,光电流信号大小无法预知,(11)式无法满足外差信号电流的真实描述。

采用基于端到端的大气分层模型可以模拟生成

相干激光雷达的时域信号。大气分层模型由 Salameitou 等^[31]于 1995 年提出,该模型将与激光作用的气溶胶散射体分成厚度为 ΔR_m 的 M 层,并假设层与层之间的回波信号独立,每层的散射粒子大气特性相同,即每层粒子运动散射系数、速度大小和方向等相同。最后,将散射体内所有分层回波信号进行非相干叠加并与本振光拍频,得到最后的光外差电流信号^[31-33]

$$i_h(t) = 2\Re \exp(j2\pi f_{\text{AOM}} t) \times \sum_M a_m [\eta P_{\text{LO}} P_1(t - R_m/2c) T_m(R_m)^2 c\beta_m(A_r/R_m^2)]^{1/2} \times \exp(-j2k v_m t), \quad (12)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为发射激光波长; f_{AOM} 为由声光调制器(AOM)产生的频移; v_m 为第 M 层的风速, a_m 为散斑效应产生随机信号,符合圆随机分布,即 $\langle a_m a_l \rangle = 0$, $\langle a_m^* a_l \rangle = \delta_{ml}$, 其中 δ 为狄拉克函数,选取激光工作波长为 1550 nm,望远镜为收发同置,直径为 80 mm,发射激光的脉冲半峰全宽为 400 ns,本振光功率为 1 mW,声光频移量为 80 MHz。假设风速服从正弦分布,即 $v = 30\sin(2\pi \times L_{\text{bins}})$, 其中 L_{bins} 表示距离门。在相干激光雷达系统中,除上述散斑效应产生的圆随机变量外,还存在散粒噪声、热噪声等,仿真模拟时等效为叠加一定功率的高斯白噪声。并结合(12)式得到图 4(b)所示的相干激光雷达时域信号仿真图。表 1 为模拟时用到的具体参数。

表 1 相干激光雷达时域信号模拟参数

Table 1 Simulated parameters for coherent lidar time-domain signal

Indicator	Parameter	Value
Laser	Wavelength /nm	1550
	Pulse duration /ns	400
	Pulse repetition /kHz	10
	Local oscillator power /mW	1
Telescope	Frequency shift produced by AOM /MHz	80
	Diameter /mm	80
Detector	Balanced detector bandwidth /MHz	200
	$\Re /(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	1.52
Aerosol	$\beta / (10^{-8} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$	8

为了验证大气分层模型的准确性,分别取 0.3, 1.5, 3.0 km 所在的距离门,分别对应第 5 个、25 个和 50 个距离门,进行快速傅里叶变换,得到图 4(c)~(e)所示的功率谱。根据多普勒频移和大气风速之间的关系 $\Delta\nu = 2V/\lambda$, 反演出 3 处的风

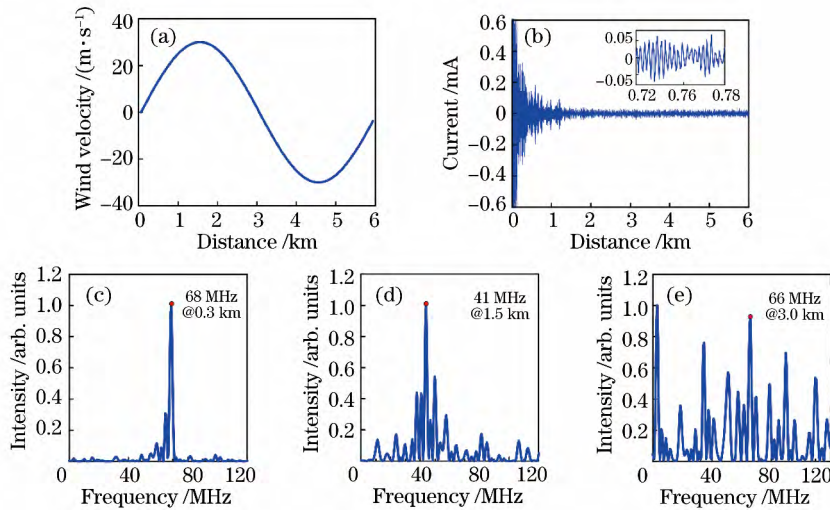


图 4 基于正弦风模型的相干激光雷达时域信号仿真图及不同距离门处的功率谱。

(a)理想的正弦风速;(b)相干激光雷达时域信号仿真图;(c)~(e) 0.3,1.5,3.0 km 处的功率谱

Fig. 4 Signal simulation of coherent lidar in time domain based on sinusoidal wind model and power spectra at different range gates. (a) Ideal sinusoidal wind velocity; (b) coherent lidar time-domain signal simulation; (c)-(e) power spectra at 0.3, 1.5, 3.0 km

速分别为 $8.68, 30.20, 10.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过和理想正弦风速进行比较,3 个距离处产生的风速误差分别为 $0.59, 0.20, 10.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 4 可以看出,在远距离处,信号淹没在噪声中,频率估计产生较大的偏差。

5 风速反演结果

为了评估提出的脉冲编码技术对信噪比的影响,对传统的单脉冲相干激光雷达信号进行累加平均。解码一组编码信号需要 4 组时域信号,为了使传统的单脉冲相干激光雷达和编码的相干激光雷达

测量次数相同,对 FFT 后的单脉冲时域信号进行 10000 次叠加,得到如图 5(a)所示的单脉冲累加后的频谱图。

第 3 节理论分析了脉冲编码技术对相干激光雷达系统信噪比的提升。为了验证上述理论,利用(4)式,生成 4 组 64 位的单极性 Golay 码,对发射脉冲进行空时编码,结合大气分层模型,得到 4 组时域信号。对每组时域信号进行 FFT,其中 FFT 窗函数的长度为 100,补零到 256 个点,得到其频谱。对得到的频域信号进行 2500 次叠加,以提高系统信噪比。解码得到正弦风速的频谱图,如图 5(b)所示。

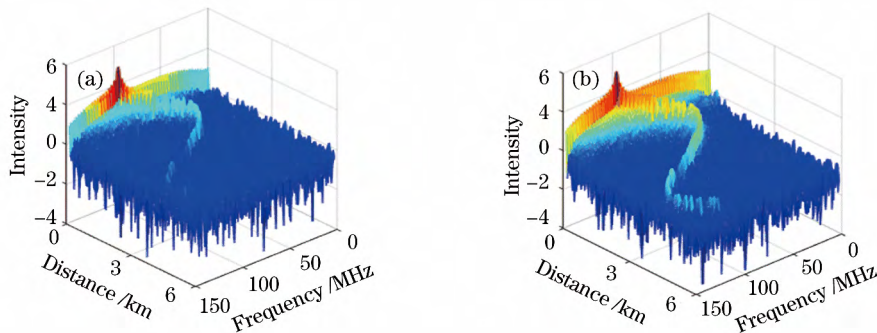


图 5 基于单脉冲累加技术和脉冲编码技术反演的频谱图。(a)单组编码时间内单脉冲累加后频谱;

(b)单组编码时间内 64 位编码脉冲频谱

Fig. 5 Spectra based on single-pulse accumulation technique and pulse coding technique. (a) Spectrum with cumulative single-pulse in single group coding time; (b) spectrum with 64-bit pulse coding in single group coding time

在得到其频谱图后,利用周期图最大值法,对每个距离门内的多普勒频移值进行提取,根据多普勒

频频移和大气风速之间的关系 $\Delta\nu = 2V/\lambda$,反演得到如图 6(a)、(b)所示的风速图。为了表征反演结

果的优劣,对反演结果和理想风速作差,得到图 6(c)所示的风速误差图。从图 6 可以看出,传统的单脉冲相干激光雷达经过 10000 次累加平均后,在 0~2.8 km 距离范围内表现出较小误差,在

2.8 km 之后,风速误差超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而经脉冲编码后的相干激光雷达,在 0~5.3 km 的范围内,除个别奇点外,风速误差基本保持在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内,最远的有效估计可达 5.3 km。

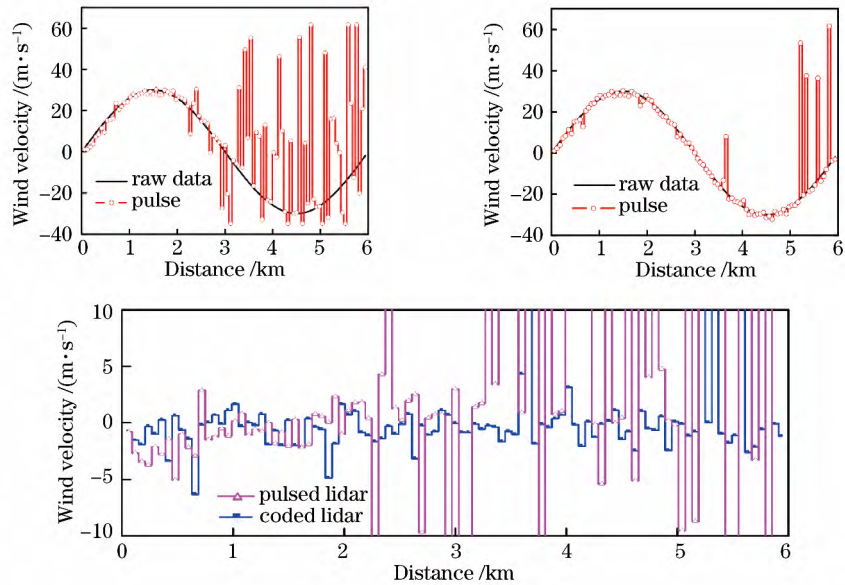


图 6 基于脉冲编码技术和单脉冲累加技术风速反演结果及风速误差图。(a)单组编码时间内单脉冲累加后风速;
(b)单组编码时间内编码脉冲风速;(c)风速误差

Fig. 6 Wind velocity inversion results based on pulse coding technique and single pulse accumulation technique and wind velocity error map. (a) Wind velocity with cumulative single-pulse in single group coding time ;
(b) wind velocity with pulse coding in single group coding time ; (c) wind velocity errors

图 7 为不同风速模型下,基于脉冲编码技术和单脉冲累加的结果。图 7(a)~(c)是基于线性风速得

到的反演结果,图 7(d)~(f)是基于 NASA 阵风模型得到的反演结果。通过不同风速模型下的对比可

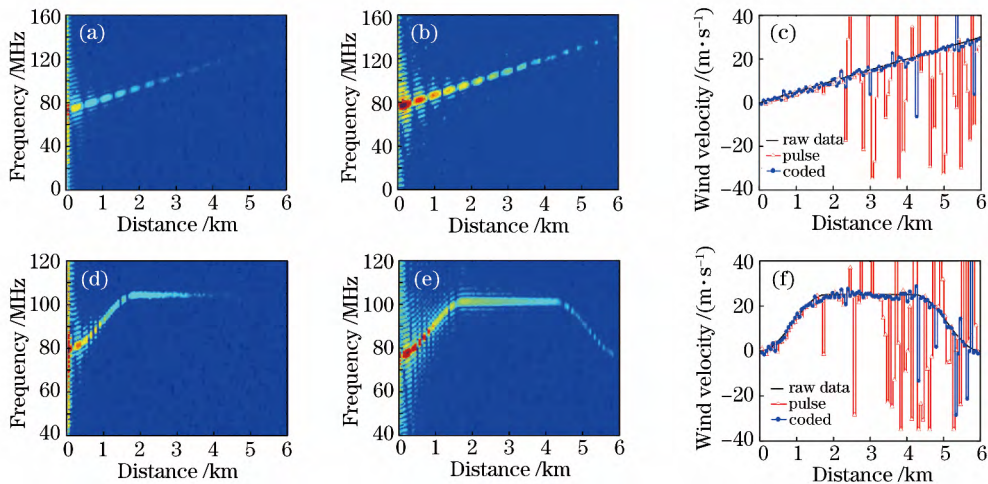


图 7 基于脉冲编码技术和单脉冲累加技术反演的不同风速模型的频谱图及风速结果图。(a)线性风累加平均频谱图;
(b)编码脉冲频谱;(c)线性风速反演;(d) NASA 阵风风累加平均频谱图;(e) NASA 阵风风编码脉冲频谱;(f) NASA 阵风风速反演

Fig. 7 Spectral maps and wind velocity inversion results based on pulse coding and single pulse accumulation technique of different wind velocity models. (a) Linear wind cumulative average spectrum ; (b) pulse coded spectrum ;
(c) linear wind velocity inversion ; (d) NASA gust cumulative average spectrum ; (e) NASA gust pulse coded spectrum ;
(f) NASA gust wind velocity inversion

以发现,在相同的测量时间内,相比于传统的单脉冲相干激光雷达,经过脉冲编码后,系统的信噪比,特别是远场弱信号的信噪比得到较大提升,提高了远场弱信号频率估计的准确性。

目前,Golay 脉冲编码技术已应用于微波雷达和光纤传感领域,微波雷达中,Golay 互补序列具有良好的自相关性,减小了波形的自相关旁瓣,提高了目标检测能力。微波雷达可以直接调制出双极性的 Golay 脉冲波形,激光雷达只能发射正脉冲,但通过偏置的方法使发射的单极性脉冲互补序列和双极性脉冲序列效果一样。

基于相干探测的 BOTDR 和相干激光雷达系统相似,二者皆采用外差探测的方式,实现不同参数的测量。相干激光雷达是遥感大气中的参数,BOTDR 则对光纤中的物理量进行测量,BOTDR 系统的光功率远小于相干激光雷达系统,以保证其光功率值在受激布里渊阈值之下,BOTDR 系统对距离分辨率要求更高,以满足其不同领域的应用。BOTDR 系统已经成功应用 Golay 编码技术解决了系统信噪比和空间分辨率之间的矛盾。从图 6 和图 7 中可以看出,Golay 脉冲编码技术同样提高了相干激光雷达系统的信噪比,这也为基于 Golay 脉冲编码技术的相干激光雷达系统实验搭建提供了工程指导意义。

6 结 论

基于多普勒测风激光雷达时域信号大气分层模型,模拟生成了正弦风速下的大气回波信号。并对 Golay 码的编码和解码原理以及编码技术对系统信噪比的提升进行了介绍。通过对相干激光雷达系统应用脉冲编码技术,在相同累积时间范围内,反演得到了正弦风、线性风以及 NASA 阵风模型的脉冲编码的风速结果和单脉冲累加的风速结果。对比发现,使用 Golay 编码脉冲作为相干激光雷达的探测脉冲,显著提高了相干激光雷达信噪比,有效提高了探测距离,且不需要脉冲积累时间,不牺牲距离分辨率,提高了远场弱信号风速估计准确性。该技术可以有效解决光纤激光器脉冲峰值功率受限、增大发射激光脉冲脉宽导致牺牲距离分辨率等问题。

参 考 文 献

- [1] Xia H Y, Sun D S, Yang Y H, *et al.* Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7120-7131.
- [2] Shangguan M J, Xia H Y, Shu Z F, *et al.* Effect of splitting ratio on the inversion of wind in the dual edge Rayleigh wind measurement technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0714001. 上官明佳, 夏海云, 舒志峰, 等. 双边瑞利测风技术中信号通道分光比对风速反演的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0714001.
- [3] Shangguan M J, Xia H Y, Wang C, *et al.* Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3541-3544.
- [4] Fujii T, Fukuchi T. *Laser remote sensing*[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2005: 472-523.
- [5] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(5): 637-655.
- [6] Banakh V A, Smalikho I N, Rahm S. Estimation of the refractive index structure characteristic of air from coherent Doppler wind lidar data[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4321-4324.
- [7] Köpp F, Rahm S, Smalikho I. Characterization of aircraft wake vortices by 2- μm pulsed Doppler lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(2): 194-206.
- [8] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, *et al.* High-energy 2- μm Doppler lidar for wind measurements[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 116201.
- [9] Witschas B, Rahm S, Dörnbrack A, *et al.* Airborne wind lidar measurements of vertical and horizontal winds for the investigation of orographically induced gravity waves[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(6): 1371-1386.
- [10] Targ R, Steakley B C, Hawley J G, *et al.* Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 μm [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(36): 7117-7127.
- [11] Frehlich R G, Kavaya M J. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(36): 5325-5352.
- [12] Targ R, Kavaya M J, Huffaker R M, *et al.* Coherent lidar airborne windshear sensor: performance evaluation[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 2013-2026.
- [13] Huffaker R M, Hardesty R M. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO₂ coherent laser systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 181-204.
- [14] Ando T, Kameyama S, Hirano Y. All-fiber coherent

- Doppler lidar technologies at Mitsubishi Electric Corporation[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 012011.
- [15] Cariou J P, Sauvage L, Thobois L, *et al.* Long range scanning pulsed coherent lidar for real time wind monitoring in the Planetary Boundary Layer[C/OL]// Proceedings of 16th Conference on Coherent Laser Radar, 2011-06-20 [2018-01-28]. <https://pdfs.semanticscholar.org/c0be/0e4f9045724ad875564925e614766441b39e.pdf>.
- [16] Wang C, Xia H Y, Shangguan M J, *et al.* 15 μm polarization coherent lidar incorporating time-division multiplexing[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20663-20674.
- [17] Pan J Y, Wu S Y, Guo L, *et al.* Wind measurement techniques of coherent wind lidar[J]. Infrared & Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720-1724.
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720-1724.
- [18] Diao W F, Zhang X, Liu J Q, *et al.* All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 072801-072804.
- [19] Shan G, Li S, Lu W, *et al.* Experiment of coherent lidar using light at 1.55 μm [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9674: 96740A.
- [20] Zhai X C, Wu S H, Liu B Y. Doppler lidar investigation of wind turbine wake characteristics and atmospheric turbulence under different surface roughness[J]. Optics Express, 2017, 25(12): A515-A529.
- [21] Bu Z C, Zhang Y C, Chen S Y, *et al.* Noise modeling by the trend of each range gate for coherent Doppler lidar[J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 063109.
- [22] Fan Q, Zhu K Y, Zheng J F, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210003.
范琪, 朱克云, 郑佳锋, 等. 不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210003.
- [23] Frehlich R, Cornman L. Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(3): 355-366.
- [24] Jin X H, Wang Y F, Zhu X P, *et al.* Doppler-shift estimation method in low SNR region for coherent doppler lidar [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(3): 10-14.
- 靳笑晗, 汪岳峰, 竹孝鹏, 等. 相干多普勒测风激光雷达低信噪比区域回波信号的估计方法[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(3): 10-14.
- [25] Frehlich R G, Yadlowsky M J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(5): 1217-1230.
- [26] Nazarathy M, Newton S A, Giffard R P, *et al.* Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(1): 24-38.
- [27] Du X L, Su T, Wang X, *et al.* Golay complementary sequence with space time coding for MIMO radar waveform design [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(8): 1966-1971.
杜晓林, 苏涛, 王旭, 等. 基于 Golay 互补序列空时编码的 MIMO 雷达波形设计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1966-1971.
- [28] Luo Y, Yan L S, Shao L Y, *et al.* Golay-differential pulse hybrid coding technology based on brillouin optical time domain analysis sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806002.
罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806002.
- [29] Wang F, Zhu C H, Cao C Q, *et al.* Enhancing the performance of BOTDR based on the combination of FFT technique and complementary coding[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3504-3513.
- [30] Pezeshki A, Calderbank A R, Moran W, *et al.* Doppler resilient Golay complementary waveforms [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(9): 4254-4266.
- [31] Salamitou P, Dabas A, Flamant P H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar [J]. Applied Optics, 1995, 34(3): 499-506.
- [32] Guo X B, Guo P, Zhang Y C, *et al.* Performance analysis of maximum likelihood spectral estimator compared with PM estimator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0314001.
郭贤斌, 郭磐, 张寅超, 等. 最大似然频谱估计法与周期图最大值法的性能比较分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0314001.
- [33] Bai X, Guo P, Chen S Y, *et al.* Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0114003.
白雪, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114003.