



DOI: 10.12086/oe.2019.190081

Golay 编码差分吸收相干激光雷达研究

胡以华^{1,2}, 董 晓^{1,2*}, 赵楠翔^{1,2}

¹国防科技大学电子对抗学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

²国防科技大学电子对抗学院, 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

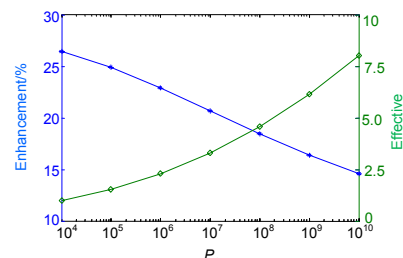
摘要: 针对差分吸收相干激光雷达在 CO₂ 浓度反演时对信号的高信噪比需求, 研究了一种基于 Golay 脉冲编码的差分吸收相干激光雷达及其解码方法, 以改善系统信噪比, 降低浓度反演误差。分析了采用脉冲编码技术对传统大气后向散射信号相干探测信噪比的编码增益, 研究了编码增益随本振光功率、编码长度和 3 dB 耦合器分束比的变化规律, 本振光功率越高、分束比偏离 50% 越多, 则编码增益越低, 且在实际系统中, 存在最优的编码长度。当本振光逐渐增强时, 热噪声对系统的影响逐渐降低, 相干探测系统存在最优的本振光功率, 该功率与回波无关仅与系统的噪声水平有关。脉冲编码后最优本振光功率相对于单脉冲探测时下降, 但其探测信噪比仍优于单脉冲探测, 当 3 dB 耦合器分束比为 0.495 时, 最优本振光功率为 0.93 mW。脉冲编码后, 系统对 CO₂ 的有效探测距离增加, 且在 10⁴~10¹⁰ 范围内进行脉冲积累时, 相较于原系统距离增长率大于 15%。

关键词: 相干激光雷达; 差分吸收; Golay 编码; 编码增益

中图分类号: TN959.98

文献标志码: A

引用格式: 胡以华, 董晓, 赵楠翔. Golay 编码差分吸收相干激光雷达研究[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190081



Research on coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding technology

Hu Yihua^{1,2}, Dong Xiao^{1,2*}, Zhao Nanxiang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract: The detection of CO₂ based on coherent differential absorption LiDAR (CDIAL) requires high signal-to-noise ratio (SNR). To improve the SNR and reduce the inversion error of CO₂, a coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding is proposed and the corresponding decoding method is also studied. The coding gain of SNR in traditional atmospheric backscattering signal detection is also analyzed when the pulse code technology is used. The variations of coding gain with the power of local oscillator (LO), the code length and the splitting ratio of 3 dB coupler are discussed. The higher the local oscillator power is and the more the beam splitting ratio deviates from

收稿日期: 2019-03-01; 收到修改稿日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871389); 国防科技大学重大基金资助项目(ZK18-01-02)

作者简介: 胡以华(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事空间光电技术方面的研究。E-mail: skl_hyh@163.com

通信作者: 董晓(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事相干激光雷达技术方面的研究。E-mail: skl_dongxiao@163.com

50%, the lower the coding gains. In addition, there are optimal code lengths in practical systems. The influence of thermal noise on the detection system decreases when the LO power grows, and there is optimal LO power which is only related to the system noise characteristics. The optimal LO power decreases with respect to single pulse detection after pulse coding, but the SNR is still higher than the traditional single pulse detection. When the splitting ratio of the 3 dB coupler is 0.495, the optimal LO power in coded system is 0.93 mW. The effective detection ranges of CO₂ increase when the pulses are coded, and in the pulse accumulations of 10⁴~10¹⁰, the improvement ratios of effective detection range are higher than 15%.

Keywords: coherent LiDAR; differential LiDAR; Golay coding; coding gain

Citation: Hu Y H, Dong X, Zhao N X. Research on coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190081

1 引言

得益于接近量子探测极限的探测能力和良好的噪声抑制能力,相干激光雷达被广泛应用于大气成分和风场探测领域^[1-4]。在相干探测中,单脉冲探测的信噪比优于直接探测体制,因此需要较少的脉冲积累就能达到需要的信噪比,从而提高了探测的时间分辨率,但该时间分辨率仍需进一步提高。为实现更高的空间分辨率,传统方法往往通过窄脉冲实现,并对脉冲回波信号进行匹配滤波,但这种方式一方面会导致功率谱展宽,另一方面也会引起探测信噪比下降,信噪比和空间分辨率存在相互制约关系^[5]。差分吸收相干激光雷达为获得更高的探测精度和探测距离,往往通过提高发射脉冲能量、增大接收口径等方法,但受限于加工精度和大气湍流等影响,相干接收系统的口径不能过大^[6-7],并且获取高能、窄线宽的激光脉冲在当前仍面临诸多困难。进一步提高现有相干激光雷达的信噪比和远场探测能力是当前研究的重点之一。

使用适当的编码形式对光强进行调制,在不降低空间分辨率的前提下能提高探测的信噪比。因此,脉冲编码技术得到了广泛研究^[8-10]。Golay 互补序列具有理想的自相关和互相关特性,在分布式光纤传感、微波雷达等领域均有应用,有效解决了系统信噪比和空间分辨率之间的矛盾^[11]。2013年,西安电子科技大学将 Golay 互补序列应用于 MIMO 雷达中,降低了各发射脉冲间的串扰,并结合零空间向量加权法,提高了目标检测性能^[12]。2017年,南京大学 Wang 等^[9]将 Golay 互补序列应用于布里渊时域反射计系统中,在 10 km 的传感光纤中,测量结果的温度分辨率为 0.37 °C,应力分辨率为 7.4 με,空间分辨率为 2 m;2018年,中国科技大学周艳宗等^[11]分析了 Golay 编码序列在相干测风激光雷达中应用可行性,仿真结果表明,编码后的

脉冲提高了系统远场的探测性能。与探测光纤中布里渊散射光类似,激光雷达探测大气气溶胶的后向散射信号,在探测流程方面具有相似性。当前, Golay 编码技术尚未在差分吸收相干激光雷达中应用,但该方法在提高相干激光雷达空间分辨率和信噪比方面具有可行性。

本文将 Golay 互补码序列应用于差分吸收相干激光雷达中,研究脉冲编码后的系统探测信噪比增益以及影响该增益的因素,定量分析在不同系统条件下脉冲编码系统的最优工作参数以及脉冲编码对差分吸收相干雷达系统探测性能的提升作用,旨在保证激光雷达空间分辨率的同时增强探测信噪比,这对于实现高空分辨的大气成分探测具有重要参考价值。

2 基本原理

2.1 Golay 互补序列特性

在脉冲编码中主要考虑码元的自相关性能。Golay 互补序列具有优良的自相关特性,其自相关没有旁瓣,该序列是一种高阶互补序列,由两种元素组成的低阶互补序列而构成^[13],其构造方式如下:

$$\begin{cases} A_{2^k} = [a_{2^{k-1}} | \bar{b}_{2^{k-1}}] \\ B_{2^k} = [a_{2^{k-1}} | \bar{b}_{2^{k-1}}] \\ A_1 = 1, B_1 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 是编码位数, \bar{b} 是 b 的补码, $\bar{b} = -b$ 。

假设 A_N 和 B_N 互为长度为 $N = 2^k$ 的 Golay 互补序列,则二者的相关运算有以下特性:

$$A_N \otimes A_N + B_N \otimes B_N = 2N\delta_k \quad (2)$$

式中: \otimes 表示相关, δ_k 是单位冲击函数,且仅当 $k=0$ 时, δ_k 取值为 1。

由式(1)可知, Golay 互补码是一种双极性码,由“1”和“-1”组成,在使用光纤的相干激光雷达系统

中, 需要将 Golay 编码进行偏置, 即将双极性码转换成单极性码, 因此两组互补序列共需要 4 组单极性序列表示, 每个码元处对应的转换规则如下:

$$U_k = \begin{cases} 1, A_k = 1 \\ 0, A_k = -1 \end{cases}, \overline{U}_k = \begin{cases} 0, A_k = 1 \\ 1, A_k = -1 \end{cases}, \quad (3)$$

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

2.2 Golay 编码差分吸收相干激光雷达结构

Golay 编码差分吸收相干激光雷达结构如图 1 所示。激光雷达系统包含两台窄线宽激光器, 分别产生 on 光和 off 光, 通过光开关控制两种波长的激光分时输出, 在光开关后经保偏分束器(PM splitter)分成两路光, 一束作为本振光, 一束作为探测光。作为探测光的一路经过声光调制器(acousto-optical modulators, AOM)对光强进行编码调制, 其中 Golay 编码按照式(3)、式(4)由码型产生器(code generator, GC)生成, 码长为 N , 被 AOM 调制后的光同时也发生了移频。在

探测过程中, 光开关对 on/off 光的选通时刻应与 4 组编码脉冲中第一组编码脉冲的初始时刻同步。调制光通过掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)放大, 而后使用光环行器(optical circulator, OC)将放大后的编码脉冲通过收/发光学系统发射到待测空域。激光雷达接收待测空域大气气溶胶的后向散射回波, 通过光环行器输入到偏振分集模块^[14], 实现与本振光混频以及外差探测。由于 on 光位于待测气体吸收峰处, 回波衰减大, off 光位于待测气体吸收峰外, 回波损耗小, 通过回波幅值的差异利用差分吸收方法实现对待测气体成分的测量^[3]。

Golay 码产生及信号解码流程如图 2 所示:

- 1) 利用声光调制器对种子光进行脉冲调制, 得到 4 组脉冲序列, 4 组为一个周期发射;
- 2) 回波信号采集的触发信号以光开关选通信号为基准, 并根据编码位数进行延时, 从各组编码脉冲回波的第二个距离门开始采集, 以避免环形器的串扰, 而后对各组编码脉冲的激光雷达回波按照码元宽度划

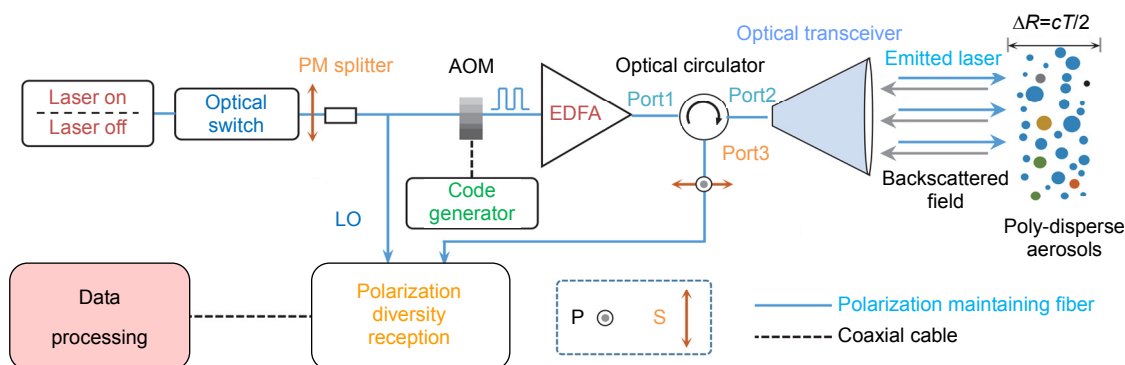


图 1 Golay 编码差分吸收相干激光雷达结构图

Fig. 1 Schematic diagram of coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding

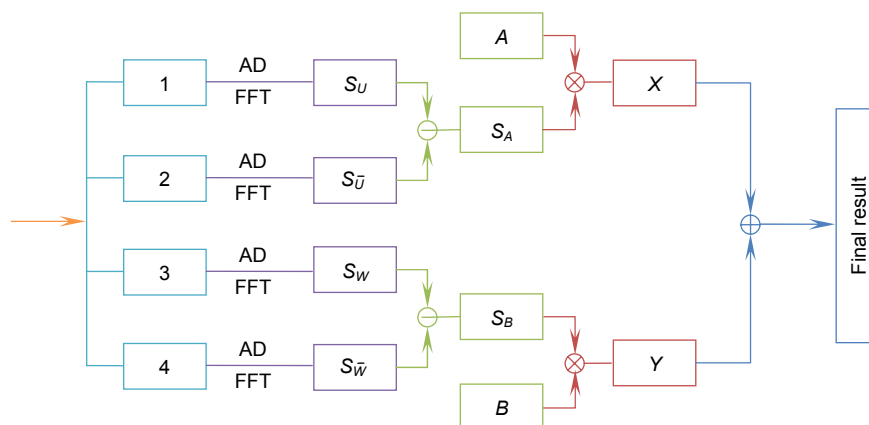


图 2 Golay 码解码流程图

Fig. 2 Decoding flow chart of Golay code

分子距离门,在各个子距离门内计算中频信号的频谱,这样回波频谱与脉冲编码时序具有了对应关系;

3) 将频域信号与对应的 Golay 编码信号在时间上对齐,按式(5)进行解码,得到激光雷达回波幅值在径向上的空间分布信息:

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

式中: $S_{U_k}(f,l)$ 、 $S_{\bar{U}_k}(f,l)$ 、 $S_{W_k}(f,l)$ 和 $S_{\bar{W}_k}(f,l)$ 分别为 4 组编码脉冲在第 l 个子距离门的中频信号的频谱。

4) 对得到的多个周期的幅值信息进行累加,进一步降低噪声,而后按照一定的积分距离 ΔR 进行差分吸收运算,得到待测大气成分的空间分布信息。

3 Golay 编码大气回波外差探测信噪比增益

以编码 U_k 为例,激光编码脉冲大气回波和本振光混频后,探测器表面的总光场可表示为

$$E_U(t) = E_L \cos(\omega_0 t + \varphi_L) + \sum_{n=0}^{N-1} u_n E_S \cos[(\omega_0 + \omega_{if})(t - n\tau) + \varphi_S], \quad (6)$$

式中: E_L 和 E_S 分别是本振光和信号光振幅, ω_0 和 ω_{if} 分别是本振光频率和声光移频器(acousto-optic frequency shifter, AOFS)的移频量, τ 是每个码元脉冲的宽度, φ_L 和 φ_S 分别是本振光和信号光的初相位, u_n 是第 n 位编码的取值。

平衡探测器被广泛应用于相干探测中,其由两个参数近似一致的 PIN 光电探测器组成,能降低本振光过剩强度噪声影响,提高探测信噪比。经 3 dB 耦合器和平衡探测器后,隔离直流项后,输出信号光电流为

$$i_U(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_n R E_L E_S \cos[\omega_{if}(t - n\tau) + \varphi_n], \quad (7)$$

式中: R 是探测器响应度, φ_n 是第 n 位编码脉冲和本振光间的相位差。

同理,当发射其余三种脉冲编码时,仅需将式(6)中的 u_n 替换为对应的码元即可。由式(3)、式(4),Golay 编码下的信号可表示为

$$i_A(t) = i_U(t) - i_{\bar{U}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n R E_L E_S \cos[\omega_{if}(t - n\tau) + \varphi_n], \quad (8)$$

$$i_B(t) = i_W(t) - i_{\bar{W}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} B_n R E_L E_S \cos[\omega_{if}(t - n\tau) + \varphi_n]. \quad (9)$$

经解码后,信号光输出为

$$D(t) = i_A(t) \otimes A(t) + i_B(t) \otimes B(t) = 2NRE_L E_S \cos[\omega_{if}(t) + \varphi_m]. \quad (10)$$

则信号的均方值可表示为

$$\langle D^2(t) \rangle = \langle 16N^2 R^2 P_L P_S \cos^2[\omega_{if}(t) + \varphi_m] \rangle = 8N^2 R^2 P_L P_S, \quad (11)$$

式中: $P_L = 0.5E_L^2$, $P_S = 0.5E_S^2$ 分别表示本振光和信号光的功率。

外差探测中噪声电流主要包含三部分,即热噪声、散粒噪声和过剩强度噪声。由于本振光是连续波,可认为其在探测过程中保持稳定。在解码过程中,外差探测系统噪声的均方值可表示为

$$\sigma_D^2 = E\{(A_k \otimes [e_U(t) - e_{\bar{U}}(t)] + B_k \otimes [e_W(t) - e_{\bar{W}}(t)])^2\} \quad (12)$$

式中: $e_i(t)$ ($i = U, \bar{U}, W, \bar{W}$) 分别是 4 组编码脉冲探测时的系统噪声,噪声互不相关,因此 $E[e_i(t)e_j(t)] = 0$ 。由编码 U_k 和 \bar{U}_k 组成的序列 A 为例,编码 U_k 和 \bar{U}_k 引入的系统噪声电流可分别表示为^[15]

$$\sigma_{U_k}^2 = \sum_{n=0}^{N-1} U_n^2 (\sigma_S^2 + \sigma_L^2) + 4k_b TB / R_L, \quad \sigma_{\bar{U}_k}^2 = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{U}_n^2 (\sigma_S^2 + \sigma_L^2) + 4k_b TB / R_L, \quad (13)$$

式中: B 为系统探测带宽, $k_b = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, T 为温度, R_L 是负载阻抗, σ_L^2 表示本振光引入的过剩强度噪声, σ_S^2 是每个码元对应的散粒噪声。则序列 A 的总噪声可表示为

$$\sigma_A^2 = \sigma_{U_k}^2 + \sigma_{\bar{U}_k}^2 = 2eRB \sum_{n=0}^{N-1} (U_n^2 + \bar{U}_n^2) P_L + 8k_b TB / R_L + N\sigma_L^2. \quad (14)$$

在使用单探测器和平衡探测器时,过剩强度噪声可分别表示为^[16]

$$\sigma_L^2 = (RP_L)^2 10^{N_{\text{RIN}}/10} B, \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{lb}}^2 = 10^{N_{\text{RIN}}/10} [\rho_1^2 \varepsilon P_L - \rho_2^2 (1 - \varepsilon) P_L]^2 B, \quad (16)$$

式中: N_{RIN} 表示相对强度噪声,其取值一般在 -160 dBc/Hz ~ -120 dBc/Hz; ρ_1 和 ρ_2 分别为平衡探测器两个探测单元的响应度,通常 $\rho_1 = \rho_2$; ε 是与平衡探测器相连的 3 dB 光纤耦合器的分束比^[15]。

序列 B 的表达式与式(14)类似,按式(5)的规则解码后,按照文献[15]的计算方法,Golay 序列总的噪声电流为两个序列解码后的噪声 σ_{DA}^2 与 σ_{DB}^2 功率之和,可表示为

$$\sigma_D^2 = \sigma_{\text{DA}}^2 + \sigma_{\text{DB}}^2 = 16Nk_b TB / R_L + 4N^2 eBRP_L + 2N^2 \sigma_L^2 = 4N\sigma_L^2 + 2N^2 \sigma_S^2 + 2N^2 \sigma_L^2. \quad (17)$$

因此,使用 Golay 编码的相干激光雷达平衡探测

时的信噪比(signal noise ratio, SNR, 用 R_{SNR} 表示)为

$$R_{SNRc} = \frac{\langle D^2(t) \rangle}{\sigma_{Lb}^2} = \frac{4R^2 P_L P_s}{2\sigma_T^2 / N + \sigma_s^2 + \sigma_{Lb}^2} \quad (18)$$

Golay 编码占用 4 个编码周期, 在单脉冲平衡探测中, 4 个周期信号非相干积累后的信噪比可表示为

$$R_{SNRs} = \frac{2R^2 P_L P_s}{\sigma_T^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{Lb}^2} \sqrt{n} \quad (19)$$

式中 n 是积累脉冲数, 取值为 4。在式(17)~式(19)中, 如果将过剩强度噪声修改为式(15), 可以得到传统相干探测的信噪比。脉冲编码后平衡探测信噪比增益可定义为

$$\rho = \frac{R_{SNRc}}{R_{SNRs}} = \frac{\sigma_T^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{Lb}^2}{2\sigma_T^2 / N + \sigma_s^2 + \sigma_{Lb}^2} \quad (20)$$

编码增益是编码长度和本振光功率的函数, 当本振光功率较高时, 过剩强度噪声和散粒噪声较大, 信噪比增益逐渐趋于 1。但实际上, 由于探测器响应的非线性, 过高的本振功率将引起探测器饱和, 噪声信噪比下降, 因此本振光功率不能无限大, 在相干探测中存在最优的本振功率^[17], 一般在 10^{-3} W 量级。此外, 由于加工工艺的限制, 在实际应用中的 3 dB 光纤耦合器分束比 ϵ 在 50%附近略有偏差。当平衡探测器的两个探测单元响应不一致时, 也可等效成 ϵ 的偏差。当 ϵ 存在偏差时, 由式(15)可知, 过剩强度噪声不能被平衡探测完全抑制, 该噪声对系统影响不可忽略。不同本振光强度下的编码增益如图 3 所示。图中计算条件为 $N_{RIN}=-120$ dBc/Hz, 本振光变化范围 0.1 mW~3 mW。

可见, 随着本振光功率的增大, 散粒噪声和过剩强度噪声逐渐增强, 直至超过热噪声的量级, 这导致了编码增益逐渐降低, 特别是 ϵ 偏差较大时, 编码增

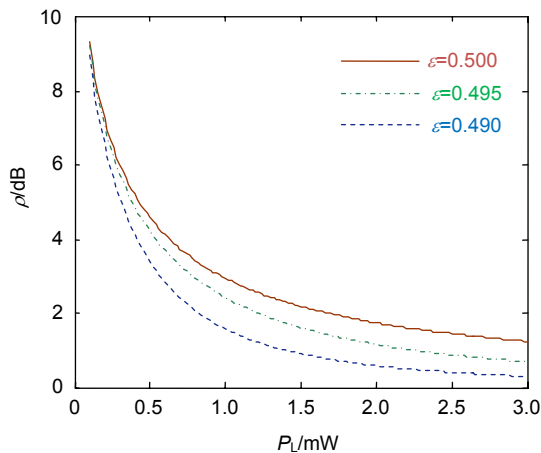


图 3 编码增益随本振光功率的变化关系

Fig. 3 Relationship between the coding gain and the power of LO

益逐渐趋于 0 dB, 但一直优于 0 dB, 即脉冲编码后外差探测系统的信噪比优于 4 组单脉冲积累时的探测性能。

此外, 由式(19)可知, 编码长度也会影响编码增益, 当热噪声占优时, 理想情况下系统的编码增益为 $N/2$; 但在外差探测中, 由于本振光较强, 其引入的散粒噪声和过剩强度噪声量级较大, 不可忽略。在典型本振光功率和 ϵ 值下分别分析了编码增益与编码长度的关系, 如图 4 所示。随着编码长度的增加, 编码增益逐渐增大, 并趋于稳定, 即存在最优的编码长度。此外, 从编码效率和计算复杂度来看, 编码也并非越长越好, 对于毫瓦量级的本振功率, 最长选择 128 位编码即可满足增益需求。

当 EDFA 等功率输出时, 编码越长, 对应的每个码元的能量就越低, 并且 4 组编码输出时, 每个序列中的脉冲数目不尽相同, 造成 4 个序列中各个子脉冲的能量存在一定差异。使用式(5)计算信号能量时, 计算值比实际值偏大, 随着编码长度增加, 每组编码中码元脉冲的数据趋于一致, 对应的解算误差逐步减小, 解算的相对误差如图 5 所示。可见, 使用 Golay 码对脉冲调制时, 码长不应太短, 使用 128 位码的相对误差为 0.794%。

4 Golay 编码差分吸收相干激光雷达探测误差分析

差分吸收相干激光雷达的回波是大气气溶胶粒子后向散射得到的, 气溶胶分布的随机性导致激光回波的相位和幅值有较大起伏, 而差分吸收相干探测的关键参数是回波的幅值, 回波的信噪比制约着差分吸收

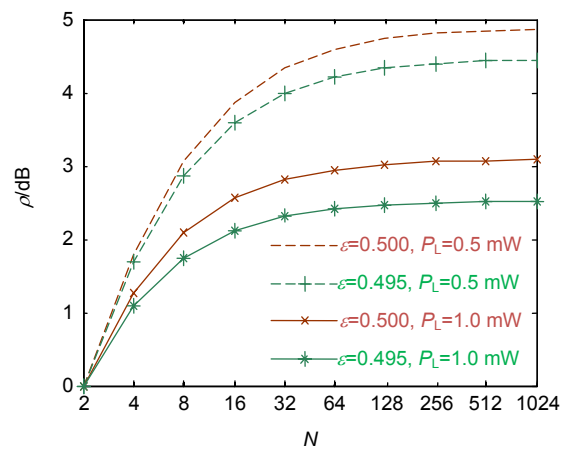


图 4 编码增益随编码长度的变化关系

Fig. 4 The change of coding gain with the code length

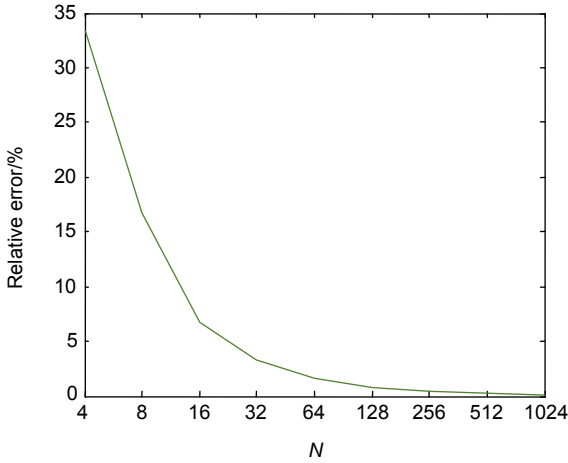


图 5 EDFA 等功率输出时 Golay 解码相对误差
Fig. 5 Relative decoding errors of Golay code with a fixed power EDFA

探测精度和有效探测距离。基于外差探测机理和激光雷达方程，相干激光回波功率可表示为

$$P_s(R) = \gamma_m E_0 \frac{c\beta(R) A}{2 R^2} \times \exp[-2 \int_0^R [N(z)\sigma_i(\lambda) + \alpha(\lambda, z)] dz], \quad (21)$$

式中： E_0 是发射脉冲的能量； $N(z) = 1.048 \times 10^{16} \exp(z/7) \text{ cm}^{-3}$ z 为探测高度； $\sigma_i(\lambda)$, $i = \text{on, off}$ 为待测气体的吸收截面，可由逐线积分公式计算； γ_m 是系统效率，可简化表示为^[18]

$$\gamma_m = \frac{8}{27} \left[1 + \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \frac{k^2 r^4}{9R^2} + \frac{2}{3} \frac{r^2}{\rho_0^2(R)} \right]^{-1}, \quad (22)$$

式中： F 是聚焦点的距离，对于准直系统， $R/F=0$ ， r 是接收光学系统半径， $\rho_0(R)$ 是大气横向相干长度^[19]。

在 1572 nm 附近，大气吸收成分主要是 CO_2 ，在差分吸收探测时，选定 on 光为 1572.335 nm，对应的吸收截面 $\sigma_{\text{on}}(\lambda) = 6.95 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ，off 光为 1572.180 nm，对应的吸收截面 $\sigma(\lambda) = 2.44 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。在该波段附近，后向散射系数和吸收系数的经验公式为^[20]

$$\beta(R) = 0.8398 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{R}{2}\right) + 1.74 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(R-20)^2}{36}\right] + 2 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{R}{7}\right), \quad (23)$$

$$\alpha(R) = 4.2 \times 10^{-2} \exp\left(-\frac{R}{2}\right) + 8.7 \times 10^{-5} \exp\left[-\frac{(R-20)^2}{36}\right] + 1.67 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{R}{7}\right). \quad (24)$$

计算中使用的其它参数如表 1 所示。

差分吸收探测中，在空间距离 R_1 和 R_2 范围内，待测气体浓度可表示为^[21]

$$N(R_1, R_2) = \frac{1}{2\Delta R \Delta \sigma_{\text{on}}} \ln \frac{P_{\text{off}}(R_2) P_{\text{on}}(R_1)}{P_{\text{on}}(R_2) P_{\text{off}}(R_1)}, \quad (25)$$

式中 $\Delta \sigma \approx \sigma_{\text{on}}$ 。由随机误差传统理论，浓度反演误差可表示为

$$\delta N = \frac{1}{2R \Delta \sigma N_0} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{SNR-on}}^2} + \frac{1}{R_{\text{SNR-off}}^2}}, \quad (26)$$

式中： $\Delta \sigma \approx \sigma_{\text{on}}$ ， $N_0 = 2.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ， R_{SNR} 可由平衡探测信噪比方程^[16]得到。考虑到编码增益，Goaly 编码后系统信噪比为

$$R_{\text{SNRc}} = R_{\text{SNR}} \cdot \rho. \quad (27)$$

应注意到，当本振光功率较低时，热噪声影响不能忽略，因此文献[16]中的信噪比公式应改写并为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{i^2}{i_{\text{shot}}^2 + i_{\text{excess}}^2 + i_{\text{T}}^2}, \quad (28)$$

对式(28)化简后，式中各项可表示为

$$i^2 = (\eta_1 + \eta_2)^2 (1 - \epsilon) \epsilon P_s / h\nu,$$

$$i_{\text{shot}}^2 = [\eta_1 \epsilon + \eta_2 (1 - \epsilon)] BW,$$

$$i_{\text{excess}}^2 = 10^{N_{\text{RIN}}/10} / (2h\nu) P_L [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1 - \epsilon)]^2 BW,$$

$$i_{\text{T}}^2 = 4kTBWh\nu / (R_L P_L e^2).$$

可见，当本振光逐渐增强后，噪声总强度增大，且散粒噪声和过剩强度噪声逐渐占优，因此肯定存在

表 1 外差激光雷达参数表

Table 1 Heterodyne LiDAR system parameters

Detector items	Value	Laser items	Value	Optical antenna	Value
ρ_1, ρ_2	1.0	P_{Lo}/mW	0.5~1	A/m^2	$0.15^2\pi/4$
ϵ	0.495/0.505	E_0/mJ	1	Beam truncation ^[18]	$1/\sqrt{2}$
Bandwidth/MHz	20	τ_f/ns	400	Transmittance	1.0
$1/T_s/(\text{Msp})$	800	$N_{\text{RIN}}/(\text{dBc}/\text{Hz})$	-120	Beam type	Gaussian

最佳的本振光功率,且该最优值与信号强度无关,仅与噪声有关。在不同本振光条件下,分别按式(27)和式(28)计算 Golay 编码和传统条件下的探测信噪比,如图 6 所示。图中编码位数 $N=128$,各曲线是对 R_{SNRc} 的最大值归一化的结果。当接入平衡探测器的 3 dB 耦合器的分束比 $\varepsilon=0.495$,传统单脉冲探测时,最优的本振光功率为 2.56 mW;脉冲编码后,最优本振光功率 0.93 mW,且 R_{SNR} 峰值为 R_{SNRc} 的 73.27%;当 3 dB 耦合器的分束比为 0.49 时,传统单脉冲探测的最优本振光功率为 1.29 mW,脉冲编码后最优本振光功率为 0.17 mW,且 R_{SNR} 峰值为 R_{SNRc} 的 56.76%。

使用前述的最优本振光功率计算不同空间距离处差分吸收探测的误差。计算所需的主要参数见表 1,选择本振光功率 0.93 mW,探测方式为斜程探测,仰

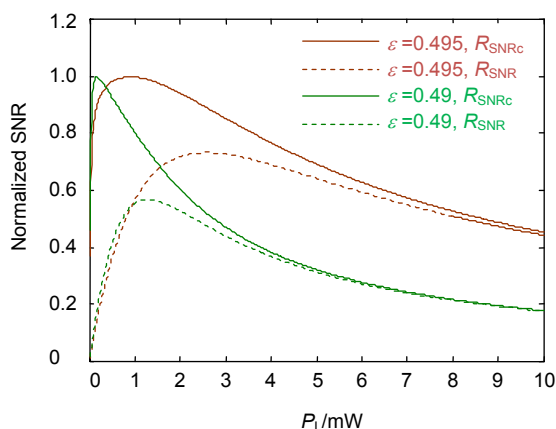


图 6 Golay 编码后系统的归一化信噪比
Fig. 6 Normalized SNR based on Golay coding

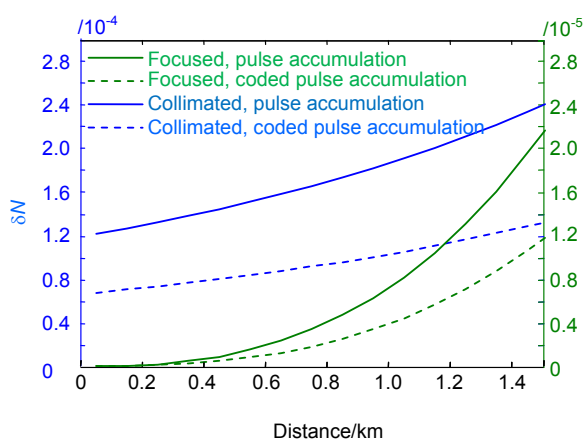


图 7 CO₂ 浓度探测误差随距离的变化关系
Fig. 7 The variation of CO₂ concentration error with detection range

角为 30°,大气湍流按 H-V5/7 模型计算。非相干脉冲积累数目为 $P_n=10^4$,积分距离 $\Delta R=300$ m。分别采用两种探测模式:聚焦模式和准直模式。CO₂ 浓度反演误差随距离的变化关系如图 7 所示。

图 7 表明,在近程利用气溶胶回波对大气中 CO₂ 进行距离分辨探测时,使用聚焦模式更有助于提高探测信噪比,主要是准直模式在近程的系统效率太低,导致 CO₂ 差分吸收探测的解算误差较大。在大气 CO₂ 探测中,探测精度优于其含量的 1%(即 4 ppm)是对探测系统的基本要求。脉冲积累数目越多,探测越精确,但由于激光器重频固定,大量脉冲叠加降低了时间分辨。

将探测误差等于 4 ppm 时对应的距离定义为有效探测距离。传统的单脉冲积累达到 4 ppm 精度时,有效探测距离为 0.795 km,使用脉冲编码提高了系统的探测信噪比,有效探测距离提高至 1.01 km,提高了 26.43%。实际上,通过更多脉冲积累,有效探测距离稳定加大,如图 8 所示。图 8 中左侧数据为脉冲编码后对有效探测距离的提升比例,右侧数据为脉冲编码后对应的有效探测距离。

5 结论

Golay 编码具有优良的自相关和互相关特性,将该编码序列应用于差分吸收相干激光雷达中代替单个探测脉冲,能提高探测信噪比。脉冲编码带来的增益与本振光功率、编码长度以及平衡探测过程中器件的参数等因素有关。本振光功率较小时,探测系统的热噪声不能忽略,脉冲编码方式对于抑制热噪声有有效

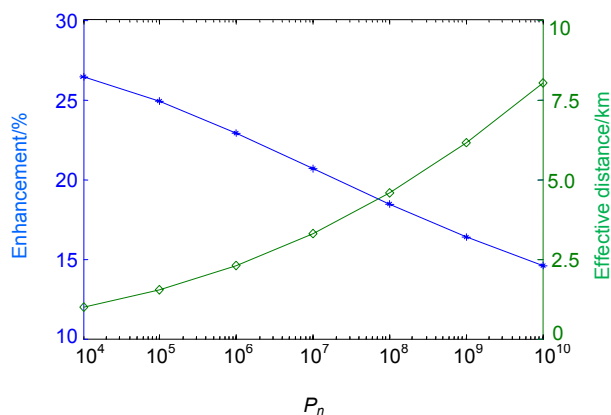


图 8 脉冲编码后对有效探测距离影响
Fig. 8 The influence of Golay coding on effective detection range

果,且编码增益大;随着本振光功率增强,存在最优的本振光功率使编码后系统的信噪比最高,该最优功率仅与探测过程的噪声水平有关,与回波光无关,其具体取值受平衡探测中各器件参数制约。对差分吸收相干激光雷达的发射脉冲进行 Golay 编码后,由于提高了信噪比,系统的有效探测距离增大,且增大比例优于 15%;随着积累脉冲数目的进一步提高,脉冲编码后系统的有效探测距离稳步增大。此外,如果进一步缩小各个码元的持续时间,则能提高距离分辨率。本文主要提出了 Golay 编码差分吸收激光雷达的基本结构和解码方法,后期将完善实验系统,重点提高声光调制器的隔离度和脉冲光放大器的平均发射功率,验证编码增益的变化规律,确定脉冲编码后系统的最优本振光功率,并针对大气 CO₂ 开展 Golay 编码差分吸收外场探测实验,提高现有差分吸收激光雷达的时空分辨率和有效探测距离。

参考文献

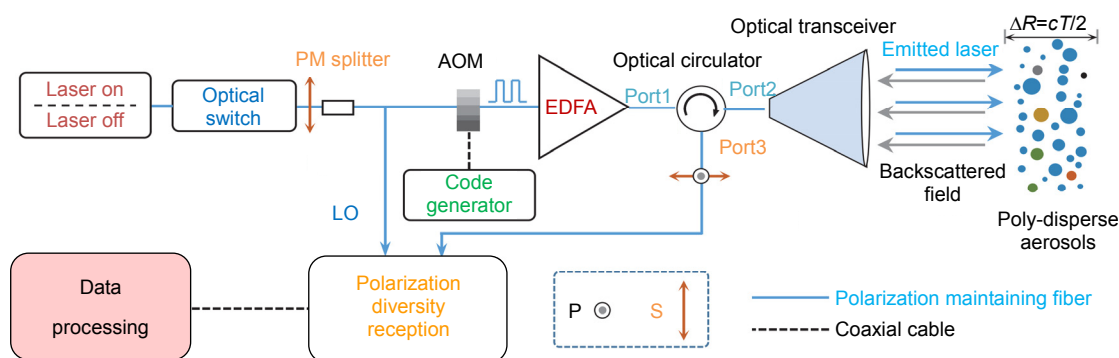
- [1] Ishii S, Koyama M, Baron P, et al. Ground-based integrated path coherent differential absorption lidar measurement of CO₂: foothill target return[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(5): 1359–1369.
- [2] Ishii S, Mizutani K, Fukuoka H, et al. Coherent 2 μm differential absorption and wind lidar with conductively cooled laser and two-axis scanning device[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10): 1809–1817.
- [3] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al. 2-μm Ho emitter-based coherent DIAL for CO₂ profiling in the atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3093–3096.
- [4] Wu S H, Liu B Y, Liu J T, et al. Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10): A762–A780.
- [5] Wang C, Xia H Y, Liu Y P, et al. Spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar using joint time–frequency analysis[J]. *Optics Communications*, 2018, **424**: 48–53.
- [6] Belmonte A. Analyzing the efficiency of a practical heterodyne lidar in the turbulent atmosphere: telescope parameters[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(17): 2041–2046.
- [7] Hu Y H, Dong X, Zhao N X, et al. System efficiency of heterodyne lidar with truncated Gaussian Schell-Model beam in turbulent atmosphere[J]. *Optics Communications*, 2019, **436**: 82–89.
- [8] Muanenda Y S, Taki M, Nannipieri T, et al. Advanced coding techniques for long-range raman/BOTDA distributed strain and temperature measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(2): 342–350.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhou Y Z, Wang C, Wei T W, et al. Simulation research of coherent lidar based on golay coding technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(8): 0810004.
周艳宗, 王冲, 魏天问, 等. 基于 Golay 脉冲编码技术的相干激光雷达仿真研究[J]. *中国激光*, 2018, **45**(8): 810004.
- [12] 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.
- [13] Pezeshki A, Calderbank R A, Moran W, et al. Doppler resilient golay complementary waveforms[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, **54**(9): 4254–4266.
- [14] Hu Y H, Dong X, Guo L R. Coherent detection of backscattered polarized laser with polarization diversity reception[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services*, Shanghai, 2016: 271–277.
- [15] Li Y Q, Wang W P, Li X J, et al. Modeling analysis and optimization design of a Golay coding Brillouin Optical Time Domain Reflectometer system with APD detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(11): 1122002.
李永倩, 王文平, 李晓娟, 等. APD 检测 Golay 编码 BOTDR 系统的建模分析与优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(11): 1122002.
- [16] Yang Y L, Li Y C, Gao L, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(10): 1918–1922.
杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(10): 1918–1922.
- [17] Holmes J F, Rask B J. Optimum optical local oscillator power levels in coherent detection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **1982**: 157–63.
- [18] Frehlich R G, Kavaya M J. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence[J]. *Applied Optics*, 1991, **30**(36): 5325–5352.
- [19] Ren Y X, Dang A H, Liu L, et al. Heterodyne efficiency of a coherent free-space optical communication model through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(30): 7246–7254.
- [20] Dong X, Hu Y, Zhao N, et al. Numerical analysis of linewidth demands in heterodyne lidar[C]//*Proceedings of the Advanced Sensor Systems and Applications VIII*, Beijing, 2018: 1082113.
- [21] Hu Y H, Dong X, Zhao N X, et al. Fast retrieval of atmospheric CO₂ concentration based on a near-infrared all-fiber integrated path coherent differential absorption lidar[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **92**: 429–435.

Research on coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding technology

Hu Yihua^{1,2}, Dong Xiao^{1,2*}, Zhao Nanxiang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China



Schematic diagram of coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding

Overview: The differential absorption LiDAR (DIAL) can obtain the spatio-temporal distribution information of atmospheric CO₂, which needs high signal-to-noise ratio (SNR). To improve the detection SNR, the coherent detection and heterodyne detection are widely used and have been combined with DIAL due to the excellent noise-reducing ability. In this paper, we propose a coherent differential absorption LiDAR (CDIAL) based on Golay coding to further reduce the detection errors, and the decoding method is also analyzed. The coding gain formula of SNR due to Golay coding is deduced, which is related to the local oscillator (LO) power, the code length, the splitting ratio of the 3 dB coupler. When the LO power is lower, the thermal noise should not be neglected, and the coding gain is higher, which is mainly due to the suppression of thermal noise. The higher the local oscillator power is and the more the beam splitting ratio deviates from 50%, the lower the coding gains are, because these two factors can improve the shot noise and the relative intensity noise, and thus the influence of thermal noise decreases. In addition, there are optimal code lengths in actual heterodyne detection systems, when the code length is higher than the optimal code length, the increase of coding gain is not obvious. The influence of thermal noise on the detection system decreases when the LO power grows, and there are optimal LO power which is only related to the system noise characteristics. The optimal LO power decreases with respect to single pulse detection after pulse coding, but the SNR is still higher than the traditional single pulse detection. When the splitting ratio of the 3 dB coupler is 0.495, the optimal LO power in coded system is 0.93 mW, and the maximum SNR in traditional pulse LiDARs is 73.27% of that in coded pulse LiDARs. When the splitting ratio is 0.49, the optimal LO power can be further lower. To analyze the improvement of CDIAL performance when the Golay coding is used, we calculate the detection error of CDIAL under different LO power. Two operation mode of CDIAL system are considered, including the collimated mode and the focused mode. The focused mode has better performance in short range detection duo to its relatively higher system efficiency. The detection accuracy of CO₂ should be better than 4 ppm, and we define the range corresponding the error of 4 ppm as the effective range. And the effective range is longer with the coded pulses. In the pulse accumulations of 10⁴~10¹⁰, the improvement ratios of effective detection range are higher than 15%. In addition, the Golay coding technology can both improve the SNR and the spatial resolution of LiDARs, which will be discussed in the future research.

Citation: Hu Y H, Dong X, Zhao N X. Research on coherent differential absorption LiDAR based on Golay coding technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190081

Supported by National Natural Science Foundation of China (61871389) and Major Fund Program of National University of Defense Technology (ZK18-01-02)

* E-mail: skl_dongxiao@163.com