

调频连续波相干激光雷达的多脉冲频域相干累积研究

从海胜^{1,2}, 孙建锋^{1*}, 卢智勇¹, 贺红雨^{1,2}, 韩荣磊^{1,2}, 任伟杰^{1,2}, 张龙坤¹, 姜玉鑫^{1,2}, 李超洋¹¹中国科学院上海光学精密机械研究所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 针对相干激光雷达在低空、远距离、高动态目标探测等应用场景中存在的弱信号探测问题, 基于调频连续波相干激光雷达, 采用多脉冲频域相干累积方法提高激光雷达弱回波信号的信噪比。结合调频连续波理论, 分析了信号幅度起伏和相位起伏对多脉冲频域相干累积信噪比效果的影响, 实验结果表明, 经过 M 脉冲周期的频域相干累积, 微弱回波信号对数信噪比可提升 $10 \lg M$ dB, 并且信号幅度起伏、相位起伏可导致多脉冲相干累积信噪比低于理想相干累积信噪比, 对于均值分别为 2.25×10^{-4} 、 1.65×10^{-4} 和相对起伏幅度分别为 0.69%、0.93% 的回波信号而言, 相位补偿后的回波信号在 50 脉冲周期内相干累积信噪比的误差因子最大为 0.57%、0.3%, 该多脉冲频域相干累积方法对相干激光雷达在远距离目标探测、微弱信号接收方面的应用具有重要意义。

关键词 遥感; 调频连续波; 多脉冲频域相干累积; 动态目标; 弱信号探测; 相干激光雷达; 幅度相位起伏

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0310003

1 引言

激光雷达是一种以激光为载体, 实现目标测距、成像以及侦察等功能的主动探测技术, 与传统的微波雷达相比, 它具有高分辨率、高精度、抗干扰能力强等优点^[1-5], 被广泛应用于星地测距、空间碎片测距、激光制导, 以及三维遥感成像等各个方面^[6-8]。然而相干激光雷达在远距离目标探测时, 激光光束受到大气吸收、散射、湍流、目标漫散射以及探测器不理想等因素影响, 导致激光雷达回波信号中夹杂着一定功率的噪声, 并且有时噪声甚至完全覆盖有效信号, 严重影响激光雷达的远距离目标探测性能, 限制了激光雷达应用^[9-10]。

对于低速目标的微弱回波信号, 相干激光雷达通常采用脉冲相干累积的方法^[11-14]。经过多脉冲相干累积后, 微弱回波信号信噪比达到激光雷达系统的探测灵敏度, 被激光雷达系统接收。范东倩等^[12]对相干激光测风雷达在外场风场实验中的微弱回波信号进行相干累积, 其回波信号信噪比有了一定程

度的提高, 然而高速机动目标在相干累积期间容易产生距离徙动和多普勒徙动, 使得目标回波信号相位不一致、频域能量分散, 相干累积时间进一步受到限制, 影响多脉冲相干累积效果^[15-17]。这种情况下, 微波雷达采用 Hough 变换、序列移位-基因算法、加速度盲估计等方法, 对高速运动目标的回波信号实现长时间相干累积^[18-20], 基于宏脉冲光子计数的非相干激光雷达通过脉冲移位、降低时间分辨率实现对高速运动目标的多脉冲相干累积, 同时也降低了系统的测距分辨率, 而相干激光雷达对高速运动目标微弱信号的处理方法目前还未见报道^[21]。提高相干激光雷达对高动态目标弱信号探测接收能力, 是进一步提升相干激光雷达远距离、高动态目标探测性能的关键。

本文基于调频连续波(FMCW)相干激光雷达, 采用多脉冲频域相干累积方法提高激光雷达弱回波信号的信噪比, 结合调频连续波理论, 分析了多脉冲信号幅度起伏和相位起伏对于多脉冲频域相干累积信噪比效果的影响, 并进行了数值仿真和实验验证。

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-06-02; 录用日期: 2021-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0408302)、国家自然科学基金(91938302)

通信作者: *sunjianfengs@163.com

经过相干脉冲压缩、多脉冲频域相干累积后,调频连续波回波信号的相干累积信噪比可提升指数倍。相应地,可大幅度提升系统对运动目标弱回波信号的探测能力,并有效降低激光雷达系统激光器的发射功率。该方法对相干激光雷达在远距离目标探测及微弱信号接收等方面的应用具有重要的参考意义。

2 理论推导

对称三角形调频连续波的频率 $f(t)$ 与时间 t 的关系如图 1 所示,假设调频周期为 T ,调频带宽为 B ,且 $B = f_H - f_L$,则 $k_{up} = |k_{down}| = k = 2B/T$, f_H 为调频连续波的最高调制频率, f_L 为调频连续波的最低调制频率, k_{up} 为上变频系数, k_{down} 为下变频系数, k 为调频系数。

对于运动速度 v 远小于光速 c 的探测目标来

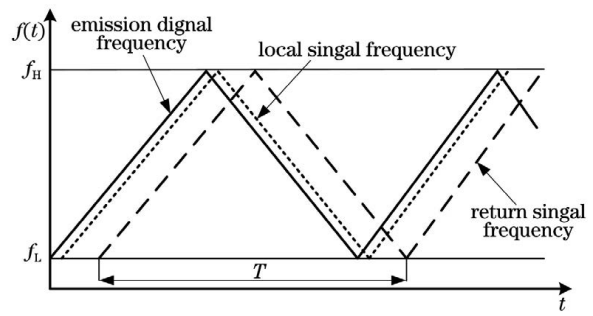


图 1 对称三角形调频连续波调制频率与时间 $f(t)$ 关系及回波拍频信号表现

Fig. 1 Frequency time relationship of symmetrical triangle FMCW modulation and performance of echo beat signal

说,线性调频拍频回波信号是一个包含多普勒频移的单频信号(忽略频率交叉项),经正交解调后,第 m 周期的相干拍频信号的复数化表达式可写为^[22]

$$s(t_f, m) = s_I(t_f, m) + \sqrt{-1} s_Q(t_f, m) = \eta u_{loc}^2(x, y, z) \exp \left\{ j2\pi \left[-(f_d + f_r)t_f - f_d m T + k\tau_0^2 + f_c \tau_0 + \frac{k}{2} t_f^2 + k \frac{2v}{c} t_f^2 \right] + j\Delta\phi_m \right\}, \quad (1)$$

式中, $t_f \in [mT, mT + T/2]$ 且 m 取正整数, $\eta = 4e\gamma G\eta_d\eta_c\eta_h/hf_c$, η_d 表示探测器量子效率, η_c 表示空间光耦合到光纤耦合效率, η_h 表示外差效率, γ 表示回波信号与本振信号的振幅比, G 表示平衡光电探测器增益, e 表示电荷常量, h 表示普朗克常量, $u_{loc}(x, y, z)$ 表示本振信号幅度, $f_r = k\tau_0$ 表示激光光束在激光雷达与目标之间参考距离间的回波频率, τ_0 表示激光雷达与目标之间参考距离间的时间

延迟, f_c 表示调频连续波的中心频率, $f_d = 2v/\lambda_c$ 表示目标多普勒频移, λ_c 表示激光中心波长, $\Delta\phi_m$ 表示第 m 周期拍频信号中相位。

一般而言,真实采集的信号中夹杂着噪声,利用多脉冲频域相干累积方法可提高相干激光雷达系统对微弱信号的探测能力,多脉冲相干累积回波拍频信号(正单频部分)表达式为

$$i_M(x, y, z, t_f) = \sum_{m=1}^M s(t_f, m) + \sum_{m=1}^M n(t_f, m) = \sum_{m=1}^M A_m \exp[-j2\pi(f_r + f_d)t_f] \exp[j2\pi f_d m T + j(\phi_m + \Delta\phi_m)] + \sum_{m=1}^M n(t_f, m), \quad (2)$$

式中,参数 $m = 1, 2, 3, \dots, M$, $i_M(x, y, z, t_f)$ 表示多脉冲相干累积的真实采集电信号, $A_m = \eta u_{loc}^2(x, y, z)$ 表示为第 m 周期的信号幅度, M 表示多脉冲相干累积的周期数, $\phi_m = 2\pi(-k\tau_0^2 - f_c\tau_0 - kt_f^2/2 - 2vkt_f^2/c)$ 表示第 m 周期拍频信号中固定相

位, $n(t_f, m)$ 表示第 m 周期的噪声信号。

对于采样率为 f_s 的离散信号, $T/2$ 时间内采集数据点数为 N (忽略光束传播延迟),则多脉冲相干累积离散信号可表示为

$$s_M(n) = \sum_{m=1}^M s(n, m) + \sum_{m=1}^M n'(n, m) = \sum_{m=1}^M A_m \exp[-j2\pi(f_r + f_d)n] \exp(j2\pi f_d m T + j\psi_m) + \sum_{m=1}^M n'(n, m), \quad (3)$$

式中, $s(n, m)$ 表示第 m 周期离散拍频信号, $n'(n, m)$ 表示第 m 周期离散噪声信号, 参数 $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, \psi_m = \varphi_m + \Delta\varphi_m$ 表示第 m 周期拍

频信号的相位, 因此多脉冲周期相干累积的有效信号的离散傅里叶变换可表示为

$$S_M(k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} s(n, m) \exp(-j2\pi kn) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} n'(n, m) \exp(-j2\pi kn) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} A_m \exp[-j2\pi(f_r + f_d)n] \exp(j2\pi f_d m T + j\psi_m) \exp(-j2\pi kn) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} n'(n, m) \exp(-j2\pi kn). \quad (4)$$

1) 相邻周期信号间幅度 A_m 、相位 ψ_m 均相同目标的高速运动使得各个脉冲周期回波信号的相位不一致, 导致多脉冲频域相干累积受限, 为此需

要分别对各脉冲周期的回波信号相位补偿, 补偿后多脉冲周期相干累积有效信号的离散傅里叶变换可表示为

$$S_{MC}(k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} s(n, m) \exp(-j2\pi \hat{f}_d m T) \exp(-j2\pi kn) = M \cdot A \exp(j\psi) \times \frac{\sin[\pi(f_r + f_d + k)N]}{\sin[\pi(f_r + f_d + k)]} \exp[-j2\pi(f_r + f_d + k)(N-1)/2], \quad (5)$$

式中, $\hat{f}_d = (f_d T - \frac{\phi}{2\pi})/T = f_d - \frac{\phi}{2\pi T}$ 表示多普勒频率估计值, $\phi = \psi_{m+1} - \psi_m$ 表示相邻脉冲中频信号相位差, 则离散信号功率谱密度为

$$P_s(\xi) = |S_{MC}(k)|^2 / N = M^2 A^2, \quad (6)$$

根据文献[23]中有关结论, 离散高斯白噪声经过离散傅里叶变换后, 其功率谱密度服从参数为 $1/N\sigma^2$ 的负指数分布, σ 为高斯白噪声的频谱功率密度, 则离散高斯白噪声的平均功率密度可表示为

$$P_n(\xi) = \frac{MN\sigma^2}{N^2} = \frac{M\sigma^2}{N}, \quad (7)$$

离散信号对数信噪比可表示为

$$R_{SNideal} = \frac{P_s}{P_n} = R_{SN0} + 10\lg M, \quad (8)$$

相对相干累积信噪比增益表示为

$$\frac{R_{SNideal}}{R_{SN0}} = \frac{P_s}{P_n} = 10\lg M, \quad (9)$$

式中, $R_{SN0} = 10\lg(NA^2/\sigma^2)$ 表示单周期回波信号的对数信噪比。根据(8)式和(9)式不难看出, 对于固定脉冲重复频率的回波信号来说, 经过 M 周期的多

脉冲频域相干累积后的拍频信号对数信噪比比原信号信噪比提升了 $10\lg M$ dB。与此同时, 在同脉冲累积周期数和同目标探测条件下, 对于脉冲重频满足 M 倍的线性调频信号, 则其高脉冲重频回波信号对数信噪比比低脉冲重频回波信号对数信噪比低 $10\lg M$ dB。

2) 相邻周期信号幅度起伏对多脉冲相干累积的影响

假设单脉冲相邻周期信号相位 $\Delta\varphi$ 保持不变, 而幅度 A_m 的对数起伏系数 X_m 满足均值为 μ_x , 方差为 σ_x^2 的正态分布, 其中 $A_m = A_0 \exp(X_m)$, A_0 表示无信号幅度起伏时的信号振幅, 则随机变量 $Y = \exp(X_m)$ 满足对数正态分布^[24-26]。

对于多脉冲周期拍频信号相干累积信号幅度满足 $A_{sM} = \sum_{m=1}^M A_{sm} = \sum_{m=1}^M A_0 \exp(X_m)$, 其均值和方差分别为 $E[A_{sM}] = A_0 M \exp(\mu_x + \sigma_x^2/2)$, $D[A_{sM}] = A_0^2 M [\exp(\sigma_x^2) - 1] \exp(2\mu_x + \sigma_x^2)$ 。

信号功率谱密度均值为

$$E[A_{sM}^2] = A_0^2 M^2 \exp(2\mu_x + \sigma_x^2) \left[1 + \frac{\exp(\sigma_x^2) - 1}{M} \right], \quad (10)$$

多脉冲周期相干累积实际信噪比为

$$R_{SNMA} = 10\lg\left(\frac{N \cdot E[A_{sM}^2]}{M\sigma_n^2}\right) = R_{SNideal} + 10\lg\left\{\exp(2\mu_x + \sigma_x^2) \left[1 + \frac{\exp(\sigma_x^2) - 1}{M} \right]\right\}, \quad (11)$$

定义误差因子为

$$\eta_A = \left| \frac{\Delta R_{SNMA}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \frac{R_{SNideal} - R_{SNMA}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \log \frac{\left[1 + \frac{\exp(\sigma_x^2) - 1}{M} \right] \exp(2\mu_x + \sigma_x^2)}{\frac{MNA_0^2}{\sigma_n^2}} \right|, \quad (12)$$

特别地, 对于 $\mu_x = -\sigma_x^2$ (对衰减系数归一化) 有

$$\eta_A = \left| \frac{\Delta R_{SNMA}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \frac{R_{SNideal} - R_{SNMA}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \log \frac{\left[1 + \frac{\exp(\sigma_x^2) - 1}{M} \right] \exp(-\sigma_x^2)}{\frac{MNA_0^2}{\sigma_n^2}} \right|. \quad (13)$$

当 $\mu_x = 0, \sigma_x^2 = 0$ 时, 幅度起伏对脉冲相干累积的信噪比基本没有影响, 并且对于 $\mu_x = -m\sigma_x^2$ (m 取任意正整数) 时, 误差因子 η_A 随着 $\mu_x, \sigma_x^2, \sigma_n^2$ 值的增大而增大, 多脉冲相干累积周期 M 的增大而减小, 则这说明多脉冲周期幅度起伏、高斯白噪声起伏越大, 多脉冲周期的相干累积信噪比效果越差, 而增加相干累积周期可改善较差的多脉冲相干累积效果。特别地, 当 $\mu_x = -\sigma_x^2$ 时, 误差因子 η_A 大于 0, 说明幅度起伏将使多脉冲相干累积信噪比低于理想相干累积信噪比。

3) 相邻周期信号相位起伏对多脉冲相干累积的影响

假定单脉冲相邻周期信号幅度模幅值 A_0 保持不变, 而附加相位 $\Delta\varphi$ 满足均值为 0, 方差为 $\sigma_{s\varphi}^2$ 的高斯分布。多脉冲频域相干累积, 就是针对信号的频谱复幅度直接进行累积, 其过程遵循矢量叠加规则, 所以实部分量 $A_{msx} = A_0 \cos \theta_m$, 虚部分量 $A_{msy} = A_0 \sin \theta_m$, A_0 表示信号频点幅度, θ 为信号频点复幅度相位。

多脉冲周期信号频点相干累积幅度为

$$A_M = \sum_{m=1}^M (A_{msx} + jA_{msy}) = A \sum_{m=1}^M (\cos \theta_m + j\sin \theta_m), \quad (14)$$

多脉冲周期信号频点功率为

$$P_s = |A_M|^2 = A_0^2 \left[M + 2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{i-1} \cos(\theta_i - \theta_j) \right], \quad (15)$$

对于(15)式中的 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{i-1} \cos(\theta_i - \theta_j)$ 项, 设 $\Delta\theta_l = \theta_i - \theta_j$ ($l = 1, 2, 3, \dots, C_M^2$), 表示任意周期期间信号频点

相位差, 则 $\Delta\theta_l$ 满足均值为 0, 方差为 $2\sigma_{s\varphi}^2$ 的高斯分布。则 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{i-1} \cos(\theta_i - \theta_j) = \sum_{l=1}^{C_M^2} \cos \Delta\theta_l$, 且随机变量

$\cos \Delta\theta_l$ 满足独立同分布, $\sum_{l=1}^{C_M^2} \cos \Delta\theta_l$ 的均值为

$$E \left[\sum_{l=1}^{C_M^2} \cos \Delta\theta_l \right] = C_M^2 E [\cos \Delta\theta_l] = \frac{C_M^2}{2\sqrt{\pi}\sigma_{s\varphi}} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \Delta\theta_l \times \exp\left(-\frac{\Delta\theta_l^2}{4\sigma_{s\varphi}^2}\right) d\Delta\theta_l, \quad (16)$$

单脉冲周期信号频点功率谱为

$$P_s = |A_M^2| = A^2 \times \left(M + 2 \times \sum_{l=1}^{C_M^2} \cos \Delta\theta_l \right), \quad (17)$$

且均值为

$$E [P_s] = E [|A_M|^2] = MA^2 + 2A^2 C_M^2 E [\cos \Delta\theta_l], \quad (18)$$

实际多脉冲周期相干累积信噪比

$$R_{SNM\varphi} = 10 \lg \left(\frac{N \times E [P_s]}{M\sigma_n^2} \right) = 10 \lg \left(\frac{NA^2}{\sigma_n^2} + \frac{2NA^2 C_M^2 E [\cos \Delta\theta_l]}{M\sigma_n^2} \right), \quad (19)$$

定义误差因子

$$\eta_\varphi = \left| \frac{\Delta R_{SNM\varphi}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \frac{R_{SNideal} - R_{SNM\varphi}}{R_{SNideal}} \right| = \left| \log \frac{M}{\frac{1 - (M-1)E[\cos \Delta\theta_l]}{M} \frac{NA^2 N}{\sigma_n^2}} \right|, \quad (20)$$

从(18)~(20)式中不难看出,多脉冲周期的相位起伏($\Delta\theta_l \neq 0$)可直接导致 $E[\cos \Delta\theta_l] < 1$,使得多脉冲相干累积实际信噪比 $R_{SNM\phi}$ 低于理想相干累积信噪比 $R_{SNideal}$,即相位误差不等于 0,相位抖动越剧烈(σ_{ϕ} 越大),误差因子 η_{ϕ} 就越大,多脉冲相干累积实际信噪比 $R_{SNM\phi}$ 就越低,相干累积效果越差。当 $E[\cos \Delta\theta_l] \sim 1$ 即 $\Delta\theta_l \sim 0$ 时,相位起伏影响可忽略。

3 数值仿真

3.1 幅度起伏对多脉冲频域相干累积的影响

为评价上述理论的正确性和有效性,本节基于不同脉冲重复频率下的线性调频相干激光雷达对同一目标的探测场景进行数值仿真。仿真参数具体为,相干激光雷达的发射中心波长 λ 为 1550 nm,对称三角形线性调频的调制带宽 B 为 2.4 GHz,相应的脉冲重复频率 PRF 为 100 kHz,目标与相干激光雷达的距离 L 为 15 m,相干累加周期数 N 为 1~50(其中 N 取正整数),单周期信号脉冲压缩原始信噪比 R_{SN0} 约为 32 dB(PRF 为 100 kHz,且噪声为高斯白噪声,功率为 10 dBm)。

基于上述仿真参数,建立幅度起伏模型参数如表 1 所示对数正态分布的幅度起伏,并对回波信号

进行仿真,验证上述结论中因环境等因素造成的幅度起伏对多脉冲相干累积的影响,仿真结果如图 3 所示。

表 1 幅度起伏仿真参数

Table 1 Parameters of stimulation							
Number	1	2	3	4	5	6	7
μ	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.5	-1	-1.5
σ_{Amp}^2	0	0.5 ²	1.0 ²	0.1 ²	0.1 ²	0.1 ²	0.1 ²

从图 2 中不难看出,同幅度均值的回波信号经过 1~50 周期的多脉冲频域相干累积后,方差 σ_{Amp}^2 为 0²、0.5²、1.0² 的幅度起伏的回波信号多脉冲频域相干累积信噪比在方差为 0(即理想情况)相干累积信噪比附近摆动,且幅度最大起伏分别为 0 dB、3.71 dB、12.1 dB。这说明幅度起伏方差越大,其回波信号的多脉冲频域相干累积信噪比偏离理想相干累积信噪比的程度越大;除此之外,还可得到均值 μ 分别为 -0.1、-0.5、-1.0、-1.5,方差为 0.1² 的幅度起伏的回波信号多脉冲频域相干累积信噪比和理想相干累积信噪比的关系,其幅度起伏均值越低,多脉冲频域相干累积信噪比越低,基本符合上节(11)式的结论。

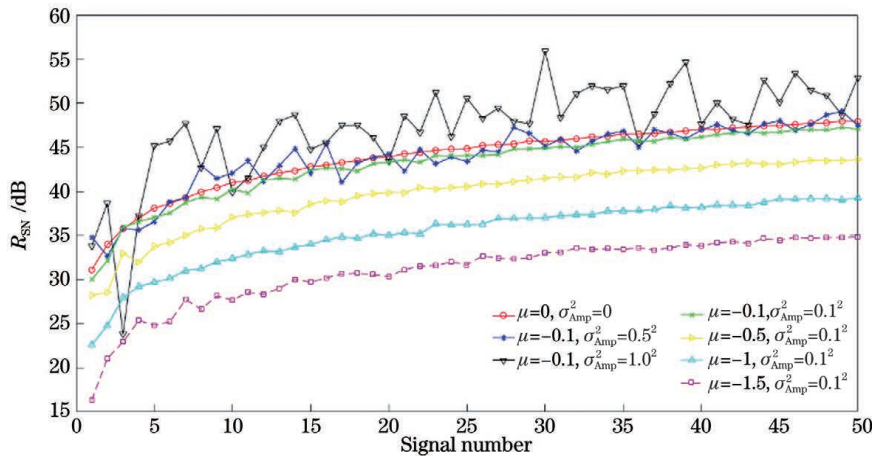


图 2 不同幅度起伏程度的多脉冲相干累积信噪比对比

Fig. 2 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} with different amplitude fluctuations

同样地,进一步得到图 3 所示的不同幅度起伏程度的误差因子之间的关系。在图 3 中,同幅度起伏均值、方差分别为 0²、0.5²、1.0² 的回波信号经过 1~50 脉冲周期的频域相干累积后,多脉冲频域相干累积误差因子逐渐降低,并且对特定幅度起伏程度的回波信号而言,相干累积信噪比误差因子随着脉冲相干累积周期数的增加而变小。这说明幅度起伏会导致多脉冲频域相干累积信噪比低于理想相干

累积信噪比,但增加相干累积周期数使较差的多脉冲相干累积效果得到改善,符合(12)式的结论。

3.2 相位起伏对多脉冲相干累积的影响

基于上述仿真参数,建立相位起伏均值 μ_{pha} 为 0,相位起伏方差 σ_{pha}^2 分别为 0、0.5²、1.0²、1.5²、2.0²、2.5² 的高斯分布的相位起伏模型,并对回波信号脉冲的相干累积进行仿真,验证上述结论中相位起伏对多脉冲频域相干累积效果的影响,仿真结

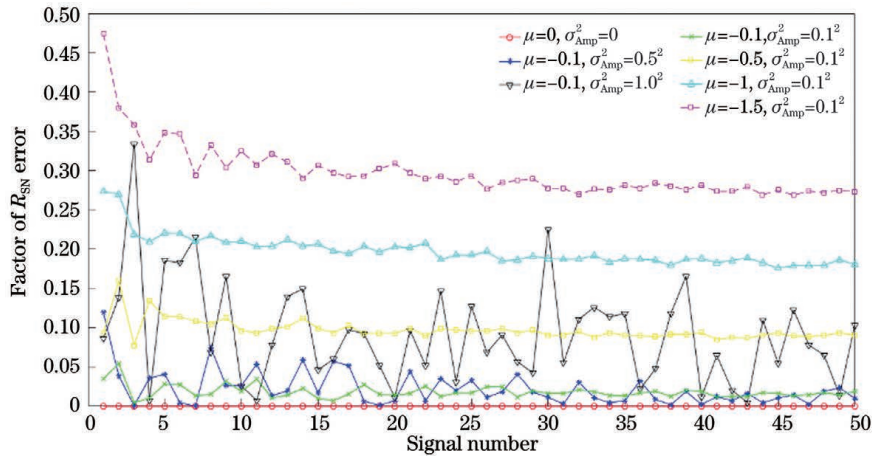


图 3 幅度起伏的多脉冲相干累积信噪比误差因子对比

Fig. 3 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} error factor with amplitude fluctuation

果如图 4 所示。从该图中不难看出,同相位起伏均值的回波信号经过多脉冲累积周期数的频域相干累积后,方差为 0.5^2 、 1.0^2 、 1.5^2 、 2.0^2 、 2.5^2 相位起伏的回波信号多脉冲频域相干累积信噪均低于理想情

况(方差为 0)相干累积信噪比,且相位起伏方差越大,其回波信号的多脉冲频域相干累积信噪比低于在理想相干累积信噪比附近偏离程度越大,基本符合上节理论(18)式的结论。

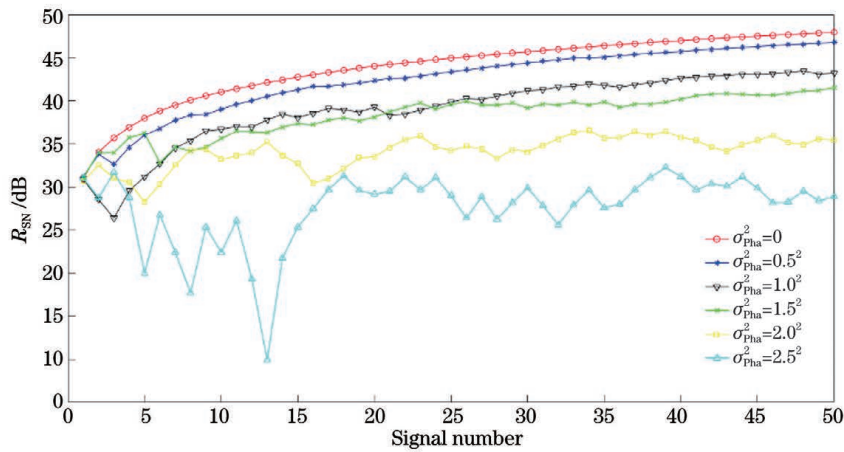


图 4 同均值不同相位起伏程度的多脉冲相干累积信噪比对比

Fig. 4 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} with the same mean and different amplitude fluctuations

进一步得到相位起伏均值为 0, 方差分别为 0、 0.5^2 、 1.0^2 、 1.5^2 、 2.0^2 、 2.5^2 相位起伏的回波信号多脉冲频域相干累积信噪比误差因子分布,如图 5 所示。在图 5 中,可直观得出,在相干累积周期为 30 时,方差为 0.5^2 、 1.0^2 、 1.5^2 、 2.0^2 、 2.5^2 的回波信号相干累积最大信噪比误差分别为 0 dB、1.29 dB、4.51 dB、6.538 dB、11.59 dB、15.81 dB,幅度起伏越大,相干累积信噪比的误差就越大,且满足上节(19)式、(20)式得出的结论。

3.3 运动速度对多脉冲相干累积的影响

采用与上述仿真参数相同的对称三角形线性调频连续波信号,在表 1 中第 1 组、第 3 组、第 6 组所示的幅度起伏情况下,对与激光雷达的距离为

15 m, 速度分别为 20 m/s、40 m/s、80 m/s 的运动目标进行数值仿真,此次单周期信号脉冲压缩原始信噪比 R_{SN0} 约为 22 dB (PRF 为 100 kHz, 且噪声为高斯白噪声, 功率为 20 dBm)。

整体来看,在幅度起伏的情况下,运动速度对多脉冲相干累积信噪比结果基本没有影响。从图 6 的仿真结果来看,多脉冲相干累积周期小于 20 个脉冲周期时,在均值为 -1, 方差为 0.1^2 的幅度起伏情况下,运动速度分别为 20 m/s、40 m/s、80 m/s 目标回波拍频信号的多脉冲相干累积信噪比的最大误差为 2.7 dB。

而在均值为 0, 方差为 0 以及均值为 -0.1, 方差为 0.1^2 的幅度起伏下,运动速度分别为 20 m/s、

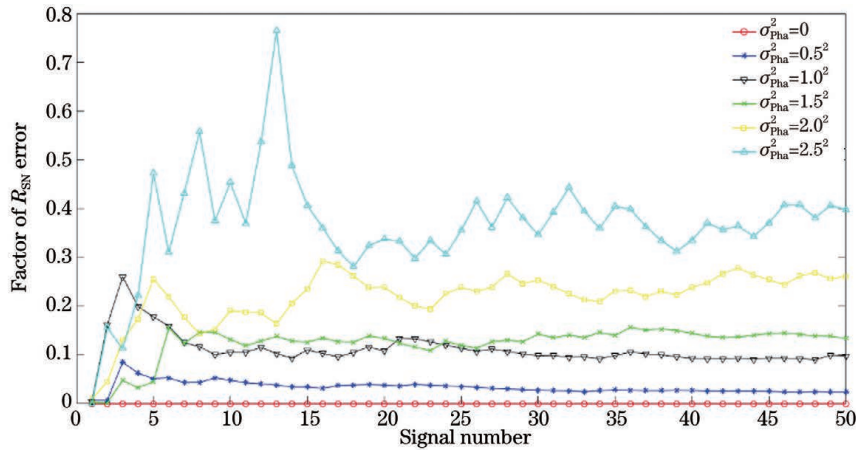


图 5 相位起伏多脉冲相干累积信噪比误差因子

Fig. 5 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} error factor with amplitude fluctuation

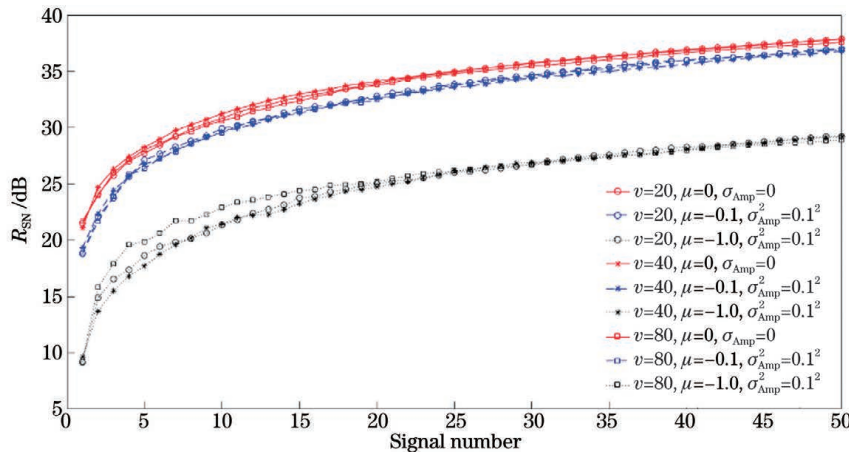


图 6 不同运动速度下幅度起伏的多脉冲相干累积信噪比对比

Fig. 6 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} with different amplitude fluctuation under different moving velocity

40 m/s、80 m/s 目标回波拍频信号的多脉冲相干累积信噪比的最大误差分别为 0.7 dB、0.8 dB；多脉冲相干累积周期大于 20 个脉冲周期时，运动速度分

别为 20 m/s、40 m/s、80 m/s 目标回波拍频信号的多脉冲相干累积信噪比的最大误差均小于 0.5 dB。

同样地，根据图 7，多脉冲相干累积周期小于

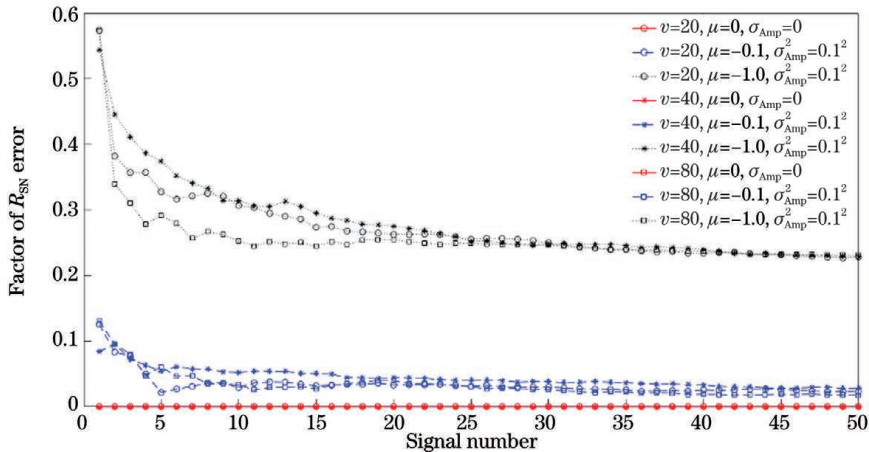


图 7 不同运动速度下幅度起伏的多脉冲相干累积信噪比误差因子对比

Fig. 7 Comparison of multi-pulse coherent accumulation R_{SN} error factor with amplitude fluctuation under different moving velocities

20 个脉冲周期时,在均值为 -1 ,方差为 0.1^2 的幅度起伏下,不同运动速度目标回波拍频信号的多脉冲相干累积信噪比误差因子的最大误差为 0.10 ;而在均值为 -0.1 ,方差为 0.1^2 及均值为 0 ,方差为 0 的幅度起伏下,不同运动速度目标回波拍频信号的多脉冲相干累积信噪比误差因子的最大误差因子分别为 0.04 、 0 。

当多脉冲相干累积周期大于 20 个脉冲周期时,在三种不同幅度起伏情况下,不同运动速度目标回波拍频信号的多脉冲相干累积误差因子均小于 0.02 ,因此,在幅度起伏的情况下,运动速度对多脉冲相干累积信噪比结果基本没有影响。

4 实验验证

为验证基于线性调频连续波的多脉冲频域相干累积方法对相干激光雷达微弱信号接收探测性能提升的正确性和有效性,设计相关验证实验。在该验证实验中,相干激光雷达通过发射如表 2 所示参数的线性调频激光信号照射待测目标,然后经过目标反射后的线性调频激光脉冲信号被相干激光雷达接收端接收,并与本地线性调频激光信号进行相干拍频,同时被光电探测器转换为电信号,最后使用 Tektronix 公司的型号为 MDO4034B-3 的四通道示波器进行离线存储分析、处理,获得该目标的距离和速度信息。另外,该验证实验分别从静止目标和运动目标两个角度来验证多脉冲频域相干累积方法对线性调频连续波相干雷达系统微弱信号接收目标探

测性能的影响。

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of experiment

Parameter	Value
Laser central wavelength	1550 nm
Modulation bandwidth	2.4 GHz
Pulse repetition frequency	100 kHz
Target distance	~ 15 m
Laser transmission power	7 mW
Size of optical transceiver telescope	5 mm
Target motion velocity	0 m/s & 0.5 m/s

4.1 静止目标

本次实验中,将位于 Newport 公司、长度为 1 m 的运动平台上,且与相干激光雷达距离约 15 m 的白纸作为待测运动目标并搭建验证实验光路。实验室开始前,首先使用电脑设置好运动平台的运动参数,如图 8 所示,其运动速度 v 设置为 0 ,目标初始位置 $P_1 = -500$ mm,相干激光雷达仍然使用脉冲重复频率为 100 kHz,调制带宽为 2.4 GHz 的线性调频信号探测与之距离 15 m 的运动目标。开启相干激光雷达,并调整好实验光路,使得激光雷达的发射光斑在目标运动过程中始终照射在目标的同一位置上。使用 Tektronix 公司的型号为 MDO4034B-3 的四通道示波器在采样率为 2.5 G/s,采集时间为 2 ms 的情况下对回波拍频电信号进行多脉冲周期采集。

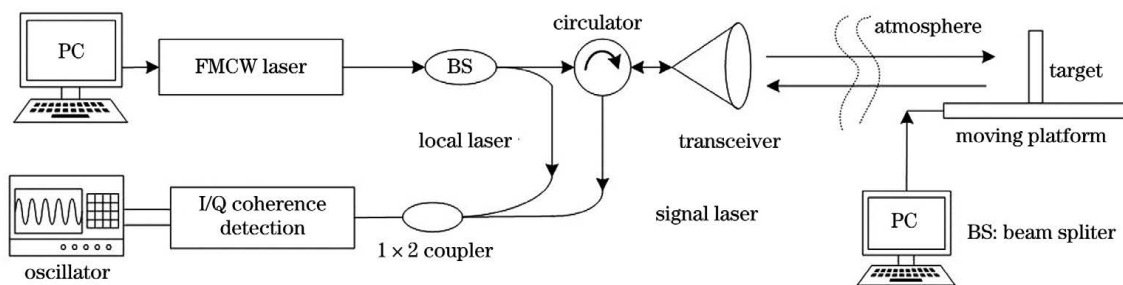


图 8 试验方案图

Fig. 8 Chart of experiment scheme

被 Tektronix 四通道示波器采集的拍频电信号需进行多脉冲频域相干累积的离线处理,其处理流程如图 9 所示。在处理流程中,首先对每个周期的拍频时域电信号进行脉冲压缩,执行快速傅里叶变换操作,然后选取若干周期信号在频域直接进行非相干累积,目的是通过非相干累积查询并初步确定微弱信号中的有效频率信号。为使后续多周期频域

的相干累积效果更明显,此时需提取有效信号频率值及相应相位,并利用该频率值和相位值对整个周期进行频率滤波和相位补偿。最后对单周期频域信号进行多脉冲频域相干累积,实现相干累积信噪比指数倍增加。

选取采集信号中的 50 个回波信号进行图 9 所示的数据处理分析,对 50 个周期信号中的信号频点

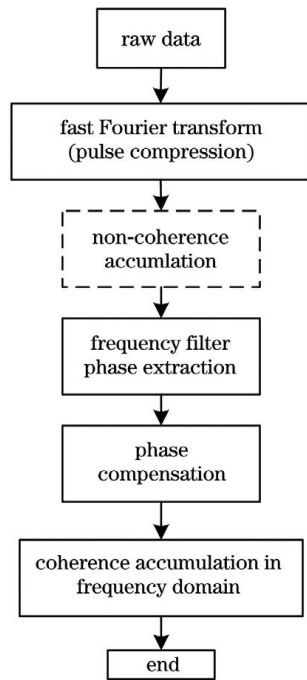


图 9 数据处理流程图

Fig. 9 Data processing flowchart

进行幅度提取,可得到图 10 所示的多脉冲周期信号幅度分布。从图 10(a)中可以看出,50 个周期信号频点幅度在 2.25×10^{-4} 附近摆动,摆动幅度峰-峰值为 2.047×10^{-4} ,相对起伏幅度为 0.69。根据 (14) 式可知,各周期信号幅度的起伏程度可直接导致多脉冲频域相干累积信噪比偏离其相应理论信噪比。该幅度起伏可由线性调频信号功率、探测器噪声、大气湍流、偏振退化等因素造成。

对多脉冲周期信号频点进行相位提取,可得到如图 10(b)所示的信号频点原始相位分布,从图中可看出在 50 个周期信号中,频点相位随时间基本不变,维持在 1.562 rad 附近,消除其常数相位后,可得到图 10(c)所示相位,说明测试过程中频点相位变化不剧烈,但对后续多脉冲相干累积效果仍有影响。相位补偿后得到如图 10(d)所示相位残差分布情况。可以看到,每个周期的信号频点经过相位补偿后,相位残差基本在 10^{-16} rad 量级,相位起伏因子 $\eta_{\varphi} \sim \lg \{50 / \{1 + (50 - 1) E [\cos 10^{-16}]\}\} \approx 0$,其影响可忽略不计。

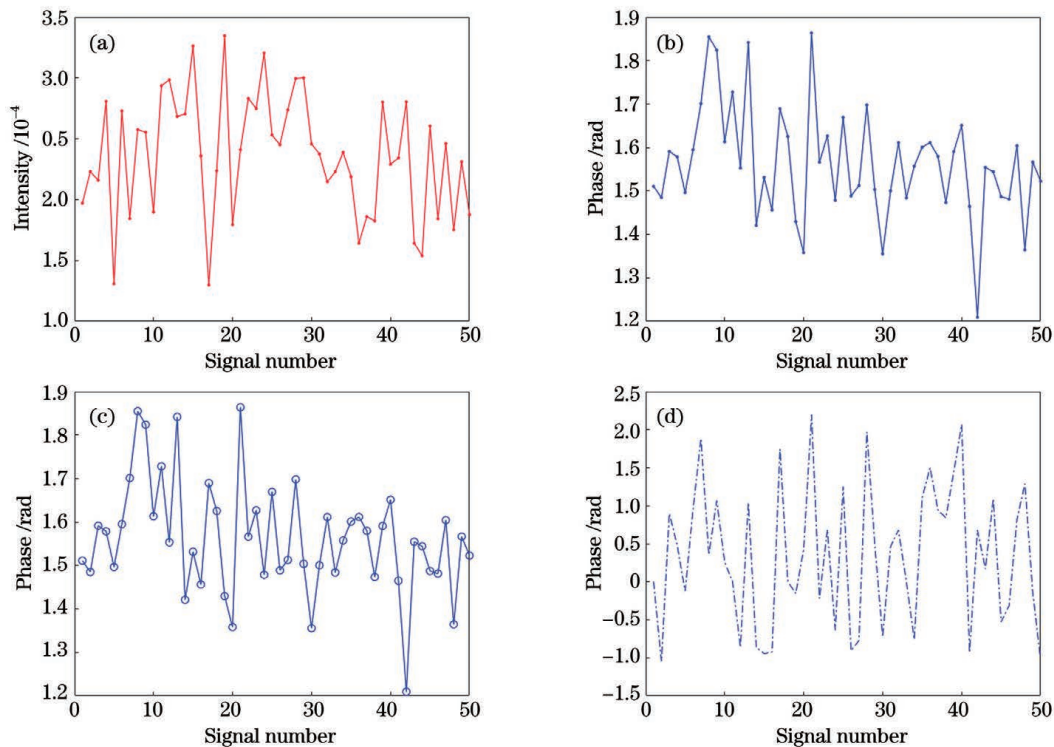


图 10 静止目标回波幅度和相位。(a) 静止目标幅度起伏;(b)静止目标原始相位;(c)相位补偿前相位;(d)相位补偿后的相位残差

Fig. 10 Amplitude and phase of stationary target. (a) Amplitude fluctuation of stationary target; (b) original phase of the stationary target; (c) phase before phase compensation; (d) phase residual after phase compensation

对单脉冲信号从 1 至 50 个周期进行多脉冲频域相干累积,可得到静止目标回波相干累积增益因

子与多脉冲相干累积周期数的关系,如图 11(a)中圆圈线(-o-)所示。可以看出,相位补偿后回波信号

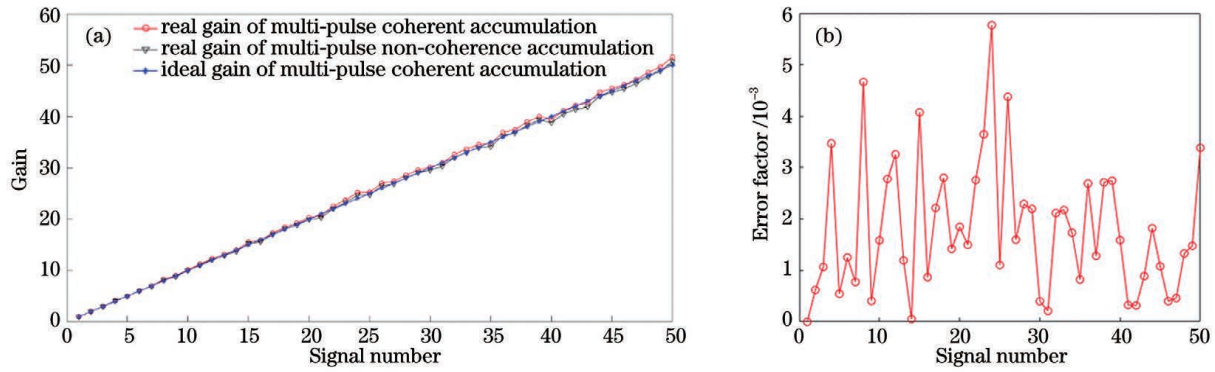


图 11 静止目标下多脉冲频域相干累积。(a)非相干累积信噪比、相干累积实际信噪比及理想相干累积信噪比增益对比；(b)信噪比误差因子

Fig. 11 Multi-pulse frequency-domain coherent cumulative signal-to-noise ratio. (a) Incoherent cumulative signal-to-noise ratio, coherent cumulative actual signal-to-noise ratio and corresponding ideal signal-to-noise ratio gain index comparison; (b) signal-to-noise ratio error factor

的相干累积增益因子与多脉冲相干累积周期数呈斜率为 1 的线性关系,这说明经过 M 脉冲周期的相干累积,回波信号对数信噪比提升了 $10\lg M$ dB。此外,图 11(a)中倒三角形线(-▽-)所示的回波信号的多周期频域非相干累积因相位漂移不明显[如图 10 (b)],导致多脉冲累积信噪比与相干累积理想信噪比曲线[星形线(-*-)]基本相同。在 1~50 脉冲周期内,如图 11(b)所示,相干累积的补偿误差因子最大误差为 0.57%。结合(11)式、(12)式,这主要受线性调频信号功率起伏、探测器热噪声起伏、大气湍流、偏振扰动等因素影响,其幅值摆动越剧烈,经多脉冲频域相干累积后信噪比与相应理论信噪比的误差越大。

4.2 运动目标

和静止目标探测时类似,本次实验将静止目标的运动速度 V 设置为 0.5 m/s,目标初始位置 $P_1 = -500$ mm,最终位置 $P_2 = +500$ mm,图 12 所示。

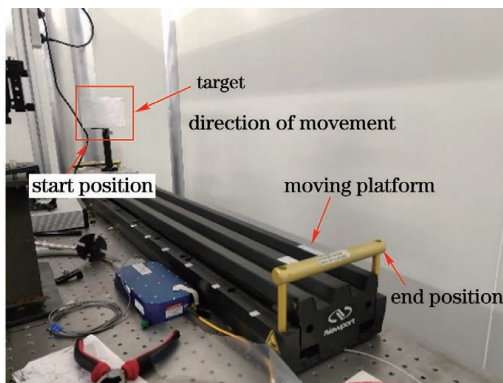


图 12 待测运动目标及运动平台位置设置

Fig. 12 Position setting of moving target and moving platform to be measured

相干激光雷达仍然使用脉冲重复频率为 10 kHz,调制带宽为 2.4 GHz 的线性调频信号探测与之距离 15 m 的运动目标。开启相干激光雷达,并调整好实验光路,使得激光雷达的发射光斑在目标运动过程中始终照射在目标的同一位置上。启动运动平台,运动目标开始运动,同时使用 Tektronix 公司的型号为 MDO4034B-3 的四通道示波器在采样率为 2.5 G/s,采集时间为 2 ms 的情况下对回波拍频电信号进行多脉冲周期采集。

一般来说,在高脉冲重复频率的线性调频理论分辨距离 $\delta L = c/(2 \times B)$ 内,可认为目标运动速度不变。为此选取采集数据中 50 个周期的运动目标信号按照图 7 所示流程处理,对每个周期信号进行快速傅里叶变换(脉冲压缩),并分别提取 50 个周期的信号频点幅度,得到运动目标下多周期的频点幅度起伏分布,如图 13(a)所示。运动目标的频点幅度在 0.011 附近起伏,起伏峰-峰值大致为 1.65×10^{-3} ,其相对起伏幅度为 0.93,为静止目标的频点相对起伏幅度的 1.35 倍,小于静止目标的频点相对起伏幅度。结合上述理论,相位补偿后的运动目标频点幅值的幅度起伏,除受到线性调频信号功率起伏、大气扰动、探测器热噪声起伏等固有因素影响外,还与目标运动时表面形变、振动等自身因素有关。

提取 50 个周期信号中各周期信号频点的相位,如图 13(b)所示,运动目标的相位变化与其运动速度有关。消除其固定相位和因运动造成的线性相位后,得到图 13(c)所示相位。经相位补偿后可得到 50 个周期信号中频点相位补偿残差,如图 13(d)所示,在 10^{-16} rad 量级,其相位起伏因子

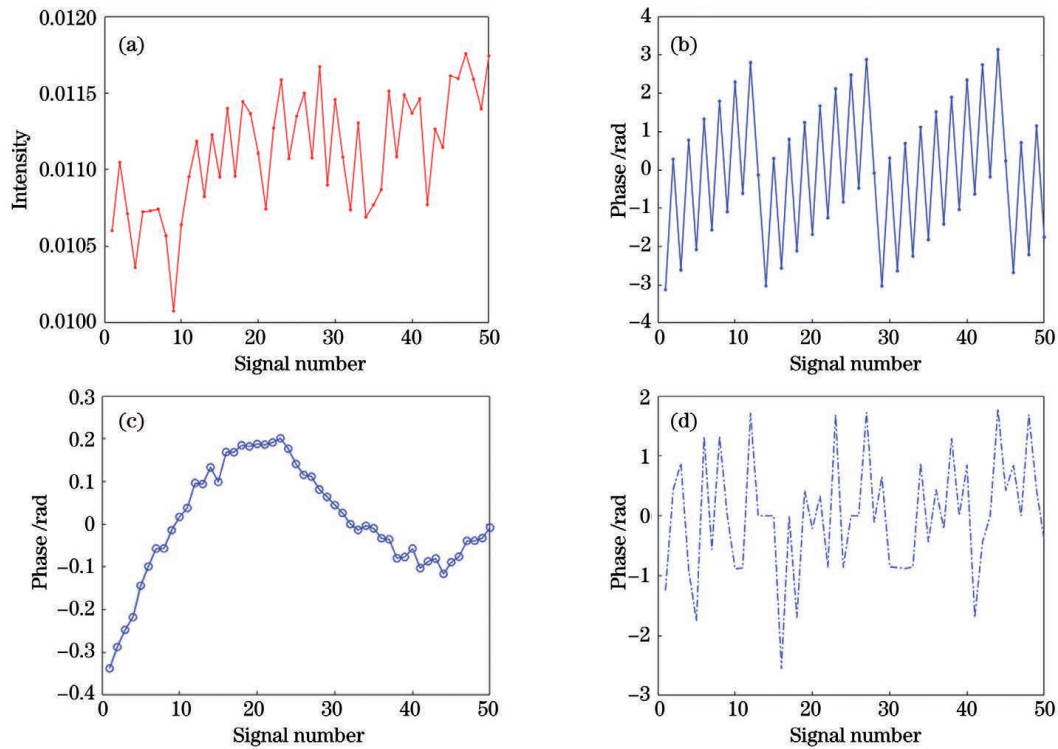


图 13 运动目标幅度和相位。(a)幅度起伏;(b)运动目标频点相位;(c)相位补偿前相位;(d)相位补偿残差

Fig. 13 Amplitude and phase of moving target. (a) Amplitude fluctuation; (b) phase of frequency point of moving target; (c) phase before the phase compensation; (d) phase compensation residual

$E[\cos 10^{-16}] \sim 1 \rightarrow \eta_\varphi \approx 0$, 对多脉冲频域相干累积的累积效果影响可忽略不计。

经过相位补偿后,单周期运动目标信号开始从 1 至 50 个周期的多脉冲频域相干累积处理。最后可得到运动目标回波信号相干累积增益与多脉冲相干累积周期数的关系,如图 14(a)所示。可以看出,图 14(a)中倒三角形形线(-▽-)表示多周期非相干累积因相位漂移[图 13(b)],插图为该曲线的放大图,

导致其多脉冲累积信噪比增益与累积周期数表现为非线性关系,而相位补偿后的多脉冲频域相干累积信噪比增益曲线[圆圈线(-o-)]基本与理论相干累积信噪比曲线[星形(-*-)]吻合,运动目标回波信号经过 M 脉冲周期相干累积后的信噪比比单脉冲周期信噪比提升了 $10\lg M$ dB,即经过多脉冲频域相干累积后,回波信号信噪比得到指数级提升。此外,其补偿误差因子如图 14(b)所示,相干累积的补偿

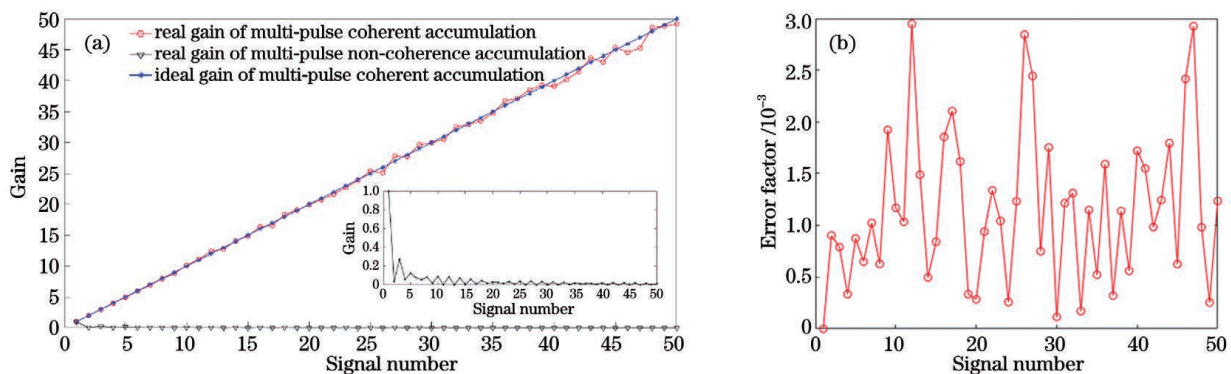


图 14 运动目标下多脉冲频域相干累积。(a)非相干累积信噪比、相干累积实际信噪比及理想信噪比增益对比;(b)信噪比误差因子

Fig. 14 Multi-pulse frequency-domain coherent cumulative signal-to-noise ratio. (a) Incoherent cumulative signal-to-noise ratio, coherent cumulative actual signal-to-noise ratio and ideal signal-to-noise ratio gain index comparison; (b) signal-to-noise ratio error factor

误差因子最大误差为 0.3%，与幅度起伏的理论值相差 0.117%，并且与静止目标相比，其补偿因子更小，这主要与单周期信号频点幅值起伏程度有关，其幅值起伏越剧烈，经多脉冲频域相干累积后信噪比与相应理论信噪比的误差越大。同样地，结合(11)式和(12)式，相干累积信噪比误差一方面来源于线性调频信号功率起伏、探测器热噪声起伏等因素，另一方面与目标运动时振动、表面形变等自身因素有关。

5 结 论

针对调频连续波相干激光雷达在远距离、高动态目标探测等应用场景中存在的弱信号探测问题，本文采用基于调频连续波的多脉冲频域相干累积方法来提高相干激光雷达弱回波信号的接收性能。基于调频连续波的多脉冲频域相干累积理论，结合数值仿真和实验结果，可得出结论：1)对于固定脉冲重复频率的回波信号来说，经过 M 周期的多脉冲频域相干累积后的拍频信号信噪比比原信号对数信噪比提升了 $10\lg M$ dB，实现回波信号弱信噪比的指数倍提升；2)在同脉冲累积周期数和同目标探测条件下，对于脉冲重复频率之间满足 M 倍的调频连续波，则单周期高重复单脉冲回波信号比低重复信号的信噪比高 $-10\lg M$ dB；3)信号幅度起伏、相位起伏均会使多脉冲相干累积信噪比低于理想相干累积信噪比，对均值分别为 2.25×10^{-4} 、 1.65×10^{-4} ，起伏相对起伏幅度分为 0.69、0.93 的幅度起伏而言，回波信号在 50 脉冲周期内的多脉冲相干累积信噪比的误差因子最大为 0.57%、0.3%，其主要是回波信号的幅度起伏、线性调频功率起伏等因素造成的。

多脉冲频域相干累积通过对激光雷达微弱信号的相干累积，提高了激光雷达系统对微弱信号的探测能力，对相干激光雷达在远距离目标探测、微弱信号接收方面的应用具有重要意义。接下来结合调频连续波的多脉冲频域相干累积理论以及幅度、相位起伏对相干累积影响规律，针对低于相干激光雷达系统灵敏度的弱回波信号的多脉冲相干累积将展开深入研究。

参 考 文 献

- [1] McManamon P. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 060901.
- [2] Lu Z Y, Ge C F, Wang Z Y, et al. Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190038.
- [3] Li Y X, Sun J F, Zhou Y, et al. Interference suppression of coherent laser micro Doppler radar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1010001.
- [4] Cai X Y, Sun J F, Lu Z Y, et al. Distortion compensation technology of coherent frequency modulation continuous wave lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0910003.
- [5] Xu Z Y, Zhang H X, Chen K, et al. Progress of frequency-modulated continuous-wave lidars [J]. *Vacuum Electronics*, 2019(4): 18-26, 40.
- [6] Paul F M. LiDAR technologies and systems [M]. Bellingham: SPIE Press, 2019: 1-6.
- [7] Ji D B. Research on the link channel model and link compensation method of the satellite-ground laser ranging [D]. Xi'an: Xidian University, 2017: 1-6.
- [8] Long M L, Zhang H F, Deng H R, et al. Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer-level distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0228002.
- [9] Cai X P, Liu J B, Han Q, et al. Denoising to the pulsed laser radar return waves based on pulses accumulation and wavelet filter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8562: 85621I.
- [10] Dolfi-Bouteyre A, Canat G, Lombard L, et al. Long-range wind monitoring in real time with optimized coherent lidar [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(3): 031217.
- [11] Hao H, Lan T, Zhang Y C, et al. The analysis of signal-to-noise ratio of airborne LIDAR system under state of motion [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7843: 78431E.

- [12] Fan D Q. Experimental research on the pulse coherent accumulation technology of wind lidar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 22-23.
范东倩. 激光测风雷达脉冲相干累加技术的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 22-23.
- [13] Wu J. Research of the key technology of coherent range and range-rate detection lidar with large dynamic range and high-repetition-rate[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 64-67.
吴军. 大动态范围高重频相干激光测距测速关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015: 64-67.
- [14] Wang T. Experimental research on the enhancement of signal to noise ratio using coherent Doppler lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 12-13.
王婷. 激光测风雷达信噪比提高方法实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 12-13.
- [15] Li W T. Research on long time integration algorithm for radar signal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 13-27.
李文韬. 雷达信号长时间积累技术算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 13-27.
- [16] Guan J, Chen X L, Yu X H. Long-time coherent integration-based detection method for high-speed and highly maneuvering radar target[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(S1): 1-8.
关键, 陈小龙, 于晓涵. 雷达高速高机动目标长时间相参积累检测方法[J]. 信号处理, 2017, 33(S1): 1-8.
- [17] Tian J. Study on long-time coherent integration for radar maneuvering targets[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 3-20.
田静. 雷达机动目标长时间积累信号处理算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 3-20.
- [18] Dong H Z, Liu Y, Yang C P, et al. Coherent accumulation by using sequence shifting and genetic algorithm[J]. Optik, 2017, 138: 137-144.
- [19] Wang Z, Zheng X H, Chang X L. Long-time coherent accumulation algorithm based on acceleration blind estimation [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(21): 7440-7443.
- [20] Zhang J Q, Li J W, Ma H Z, et al. High-speed moving target detection and tracking method based on speed estimation [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(20): 6637-6641.
- [21] Yu Y, Liu B, Chen Z, et al. A macro-pulse photon counting lidar for long-range high-speed moving target detection[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2204.
- [22] Liu H. Research and data analysis of linear frequency modulated continuous wave radar signal processing [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016: 10-12.
刘贺. 线性调频连续波雷达信号处理研究及数据分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 10-12.
- [23] Liu Q Y, Li Z S. Statistical characteristics and application of Gaussian white noise sequence spectrum[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2003(1): 9-11.
刘庆云, 李志舜. 高斯白噪声序列谱的统计特性及应用研究[J]. 声学 & 电子工程, 2003(1): 9-11.
- [24] Shi W Q, Shi X W, Xu L. RCS characterization of stealth target using X^2 distribution and lognormal distribution [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2012, 27: 1-10.
- [25] Huang H K. Influence of atmospheric turbulence near earth on amplitude fluctuation of laser transmitted signal[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 36-51.
黄宏坤. 近地大气湍流对激光传输信号幅度起伏特性的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 36-51.
- [26] Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2813-2819.

Multi-Pulse Coherent Accumulation in Frequency Domain Based on Frequency-Modulation Continuous-Wave Coherent Lidar

Cong Haisheng^{1,2}, Sun Jianfeng^{1*}, Lu Zhiyong¹, He Hongyu^{1,2}, Han Ronglei^{1,2},
Ren Weijie^{1,2}, Zhang Longkun¹, Jiang Yuxin^{1,2}, Li Chaoyang¹

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

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

Abstract

Objective When coherent lidar detects a target at a long distance, the laser beam is affected by atmospheric absorption, scattering, turbulence, diffuse scattering of target and nonideal detection. Consequently, the noise exceeds the signal, severely influencing the detection ability for long-range targets. For the weak signal of low-speed moving targets, coherent lidar usually uses the pulse coherent accumulation method and can receive lower-signal power, which greatly improves its sensitivity. Range and doppler migrations easily occur in the coherent accumulation of high-speed manoeuvring targets, resulting in phase inconsistency of the echo signal, energy dispersion in the frequency domain, and limited coherence accumulation time, which affects the multi-pulse coherent accumulation. In this case, microwave radars use Hough transform, sequence shift gene algorithm, acceleration blind estimation to achieve long-time coherent accumulation of the echo signals of high-speed moving targets. Non-coherent lidar achieves coherent accumulation of multiple pulses for high-speed moving targets using pulse shift and time-resolution reduction. Meanwhile, the range resolution of the system is also reduced. However, the processing method for the weak signals of high-speed moving targets using coherent lidar has not been reported. Improving the detection performance of high dynamic targets in long-distance and high-dynamic targets is a challenge. In addition, the amplitude and phase fluctuations of the signals considerably affect multi-pulse coherent accumulation; thus, investigating their effects is necessary.

Methods The theory of multi-pulse coherent accumulation in frequency domains based on frequency modulation continuous wave (FMCW) coherent lidar was confirmed through a laboratory verification experiment. The experiment was conducted through the following steps. First, fast Fourier transform and multi-pulse non-coherent accumulation were used to find the signal frequency point. Then, the phase of the signal frequency point in each pulse was extracted, and phase matching was performed for each pulse. Finally, multi-pulse period signals were selected for coherent accumulation and to improve R_{SN} . In addition, the theory under amplitude and phase fluctuations and speeds was established, and its performance was confirmed through simulations. The relevant theory was used to compare the experimental results and errors after multi-pulse coherent accumulation in the frequency domain based on FMCW coherent lidar with phase matching.

Results and Discussions After coherent accumulation in the frequency domain of 1~50 pulse periods, the error factor of coherent accumulations in the frequency domain of multiple pulses gradually decreased for echo signals with the same amplitude fluctuation mean value and variance of 0.0^2 , 0.5^2 and 1.0^2 (Fig. 2). With amplitude fluctuations, the R_{SN} of coherent accumulation of multi-pulse in the frequency domain was lower than that of ideal coherent accumulation, but the effect of poor coherent accumulation of multi-pulse was improved by increasing the number of coherent accumulation cycles. R_{SN} with variances of 0.5^2 , 1.0^2 , 1.5^2 , 2.0^2 and 2.5^2 was lower than that of the ideal case (variance = 0), and the variance of the phase fluctuation was higher. These results show that the R_{SN} of echo signals is lower than the ideal R_{SN} . Furthermore, the R_{SN} error-factor distribution of multi-pulse coherent accumulation in the frequency domain of echo signals with phase-fluctuation mean value of 0 and variances of 0 , 0.5^2 , 1.0^2 , 1.5^2 , 2.0^2 and 2.5^2 was obtained (Fig. 5). When the coherent accumulation period was 30, the maximum coherent accumulation R_{SN} errors of echo signals with variances of 0.5^2 , 1.0^2 , 1.5^2 , 2.0^2 and 2.5^2 were 0, 1.29, 4.51, 6.538, 11.59 and 15.81 dB, respectively. The greater the amplitude fluctuation, the greater the coherent accumulation R_{SN} error. In addition, multi-pulse coherent accumulation in the frequency domain based on FMCW coherent lidar was independent of the target speed (Fig. 6). For actual moving targets, the R_{SN} of FMCW coherent lidar increased logarithmically (Figs. 11 and 14), and their maximum error factors in a 50-pulse period

were 0.57% and 0.3% at pair mean values of 2.25×10^{-4} and 1.65×10^{-4} and relative amplitude fluctuations of 0.69 and 0.93, respectively.

Conclusions In this study, we verified the theory of multi-pulse coherent accumulation in the frequency domain based on FMCW coherent lidar through laboratory experiments. For echo signals with fixed pulse repetition rates, the R_{SN} of beat frequency signals after M -cycle coherent accumulation in the frequency domain was $10\lg M$ dB higher than the $\log R_{SN}$ of the original signal, and the weak R_{SN} of the echo signal increased exponentially. Under the same pulse accumulation period and target detection, for the frequency modulated continuous wave whose pulse repetition frequency meets m times, the R_{SN} of the single-cycle high repetition frequency single-pulse echo signals was $-10\lg M$ dB higher than that of low-repetition frequency signals. With the amplitude and phase fluctuations of signals, the multi-pulse coherent accumulation R_{SN} was lower than the ideal coherent accumulation R_{SN} , and the pair mean values were 2.25×10^{-4} and 1.65×10^{-4} with relative amplitude fluctuations of 0.69 and 0.93, respectively, and the maximum error factors of the multi-pulse coherent accumulation R_{SN} of the echo signal in the 50-pulse period were 0.57% and 0.3%, respectively, which are attributed to the amplitude fluctuation of the echo signal, linear frequency modulation power and fluctuations.

Key words remote sensing; frequency modulation continuous wave; multi-pulse coherent accumulation in the frequency domain; dynamic target; weak signal detection; coherent lidar; amplitude and phase fluctuation