

高重频激光回波信号检测新方法

郑勇辉, 孙华燕

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要:针对高重频激光回波探测的应用背景,提出了一种基于信号积累和大步长参数下LMS自适应处理过程的微弱周期脉冲信号检测算法,指出脉冲信号在大步长参数下的自适应处理中会引起滤波器估计误差和自适应权向量的反复振荡,生成较大的值,通过观察该参数的变化,并做进一步处理,可以检测出微弱脉冲信号。仿真表明,在适合的步长参数下,该方法有较好的检测性能,对高重频激光微弱回波信号检测有一定价值,另外还分析了脉冲形状和步长参数对检测性能的影响,指出了步长参数选取的重要性。

关键词:大收敛因子;自适应处理;信号积累;周期脉冲信号检测;高重频;信号检测

中图分类号:TN391;TN247

文献标识码:A

New method to detect high-repetition laser return signal

ZHENG Yong-hui, SUN Hua-yan

(Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: A weak periodic pulse signal detection method based on coherent accumulation and least-mean-square (LMS) adaptive process with a large tap-input vector is proposed. The fact that a large amplitude will arise to the Estimation Error under the adaptive processing of a pulse signal with an appropriate large tap - input vector is pointed out, which can be used to detect weak pulse signal after a further processing. Together with the coherent accumulation, this method can be adopted to detect the weak periodic pulse signals, which is of great significance in the return signal detection of high-repetition laser active detection system. The results of the simulation suggest that the method has a nice performance. The influence of the waveforms of the pulse signal and the tap-input vector to the detection performance is also analyzed, which revealed the importance of the selection of the tap-input vector.

Key words: large tap-input vector; adaptive process; signal accumulation; periodic pulse signal detection; high-repetition-rate; signal detection

1 引言

高重频激光探测能够捕捉高速运动的目标,而且能获得更多的目标信息,是未来激光探测的发展趋势,高重频激光微弱脉冲回波信号的检测技术因而具有重要的研究意义和应用价值。

设信号噪声为零均值高斯白噪声,当脉冲信号波形已知时,匹配滤波方法能够有效地实现信号检测,是输出信噪比最大化意义上的线性滤波器^[1-2],但实际中激光脉冲回波信号波形经目标散射和大气传输后会发生畸变,匹配滤波的检测性能则会大幅度下降;高阶统计量的方法^[3]可以较好地抑制掉高斯噪声,而无需信号的先验知识。但高阶统计量的算法计算量大,对硬件要求高,难以实现实时检测。

本文提出了一种基于多脉冲信号累积和梯度LMS自适应过程的微弱周期脉冲信号检测算法,并对其检测性能做了仿真与分析。

2 理论分析

2.1 信号积累

多脉冲信号积累方法的基本原理是对多个脉冲采样,将其结果依据脉冲的相对位置对应相加^[4-6]。设噪声为零均值高斯白噪声,平均功率为 σ^2 ,信号是幅度为A、脉冲周期为N的脉冲信号,定义信噪比

作者简介:郑勇辉(1987-),男,硕士生,主要研究方向为光电信息处理与对抗。E-mail: yonghui1987@163.com

收稿日期:2011-01-15;修订日期:2011-02-19

为信号峰值与噪声等效幅值的比值:

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{V_{s\text{峰}}}{V_{N\text{等效}}} \quad (1)$$

单周期内的被测信号为:

$$x(t) = s(t) + n(t), 0 < t < N \quad (2)$$

对连续 M 个脉冲周期 (M 小于一定值)^[7] 的被测信号进行积累后:

$$y(t) = \sum_{i=1}^M s_i(t) + \sum_{i=1}^M n_i(t) = s'(t) + n'(t) \quad (3)$$

对于确定性脉冲信号 $s(t)$, M 次累加后的幅度会增加 M 倍, 故信号幅值变为 MA , 而噪声功率:

$$\begin{aligned} E[n'(t)^2] &= E\left[\sum_{i=1}^M n_i(t)\right]^2 \\ &= E\left\{\sum_{i=1}^M n_i(t)^2 + 2\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=j+1}^M n_j(t)n_k(t)\right\} \\ &= E\left[\sum_{i=1}^M n_i(t)^2\right] + 2E\left[\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=j+1}^M n_j(t)n_k(t)\right] \\ &= M\sigma^2 + 2E\left[\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=j+1}^M n_j(t)n_k(t)\right] \quad (4) \end{aligned}$$

由白噪声性质, $n_i(t)$ 与 $n_k(t)$ 是不相关的, 式(4)第二项为零, 得到信噪比增益(定义信噪比增益为输出信噪比除以输入信噪比):

$$\frac{\text{SNR}_o}{\text{SNR}_i} = \frac{MA\sqrt{M\sigma^2}}{A\sqrt{\sigma^2}} = \sqrt{M} \quad (5)$$

信号积累后的输出信噪比提高了 $M^{1/2}$ 倍。

在实际中, 若目标相对于激光器是运动的, 回波信号周期则会变化, 信号累积后的信噪比提升则会降低, 设目标相对于激光器的运动速度为 ν (相对运动 ν 为正, 同向运动则为负), 激光发射周期为 T , 则回波信号的周期为 $T \cdot (c - \nu)/(c + \nu)$ 。其中 c 为光速, 由于 ν 较小, 回波信号的周期变化较小, 不会对信号累积造成严重影响。

2.2 梯度 LMS 自适应滤波

梯度 LMS 自适应滤波器^[1] 是一种不用矩阵求逆解正则方程的自适应滤波方法, 通过递推方式寻求权向量的最佳值:

$$W(k+1) = W(k) + 2\mu e(k)X(k) \quad (6)$$

其中, $e(k)$ 为估计误差; $W(k)$ 为权向量, 又称加权系数; $X(k)$ 是与权向量同长度沿时间滑动的信号列向量; μ 为收敛因子, 又称步长参数, 当 $0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}}$ 时系统收敛, 其中 λ_{\max} 为输入信号的相关矩阵 R_{xx} 的最大特征值。

滤波算法的基本步骤:

(a) 设定滤波器权向量的初值:

$$W(0) = 0, 0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}} \quad (7)$$

(b) 计算滤波器实际输出估计值:

$$y(k) = W^T(k)X(k) \quad (8)$$

(c) 计算估计误差:

$$e(k) = x(k) - y(k) \quad (9)$$

(d) 计算 $(k+1)$ 时刻的滤波器权向量:

$$W(k+1) = W(k) + 2\mu e(k)X(k) \quad (10)$$

(e) 将 k 增至 $k+1$, 重复步骤(b), (c), (d)。

在自适应处理中, 权向量的更新过程可以视为一种学习过程, 收敛因子 μ 的值决定着 LMS 算法学习过程的快慢, 当 μ 取较小的值时, 系统稳定性好, 但“学习”过程慢; 当 μ 取较大的值时, 滤波器的“学习”过程快, 但系统的稳定性较差。通常做滤波处理时, μ 一般取较小的值以保证系统的稳定度。

2.3 大收敛因子下含噪脉冲信号的自适应过程

设噪声为零均值的高斯白噪声, 对噪声做大收敛因子下的梯度 LMS 自适应处理, 噪声的统计特性保持不变, 经过一段时间的“学习”过程, 滤波器能够不断“追踪”噪声信号的起伏, 使估计误差 $e(k)$ 稳定在一个接近于零的范围内, 即 $k \rightarrow \infty$ 时, $e(k) \rightarrow 0$, 此时, 由式(10)知, $W(k+1) \rightarrow W(k)$, 联立式(8)(9)两式得:

$$e(k) = x(k) - W^T(k)X(k) \quad (11)$$

又由 $e(k) \rightarrow 0$ 知 $W^T(k)X(k) \rightarrow x(k)$, 即:

$$W(k) \rightarrow (1, 0, 0, \dots, 0) \quad (12)$$

所以, 在一定的收敛因子下, 对噪声信号的处理过程应是收敛的, $e(k)$ 和 $W(k)$ 分别收敛于 0 和 $(1, 0, 0, \dots, 0)$ 。

而当有脉冲信号出现时, 脉冲过程相对于噪声的分布具有突变的特性, $e(k)$ 和 $W(k)$ 会渐渐偏离 0 和 $(1, 0, 0, \dots, 0)$, 当某一时刻, $X(k)$ 的峰值特性较为明显, 由式(10), $W(k+1)$ 会进一步偏离 $(1, 0, 0, \dots, 0)$, 这又使得 $e(k+1)$ 的模值进一步增大, 由于大收敛因子的引导, $W(k+2)$ 会向着相反方向做一个大幅度调整, 若式(10)中 $2\mu e(k) > 2$, $W(k+1)$ 则会过度失调, 进而得到模值更大的 $e(k+1)$, 如此下去, $e(k)$ 和 $W(k)$ 会反复振荡, 生成较高量级的数值。脉冲结束后, 输入信号的统计特性恢复, $X(k)$ 的随机分布则会消除式(10)中对 $W(k)$ 的振荡作用, 使得 $W(k)$ 和 $e(k)$ 渐渐恢复。

利用以上特性, 可以通过观察 $e(k)$ (或 $W(k)$) 的变化判断是否存在脉冲信号。为方便后续的检测处理, 可以对 $e(k)$ 信号再做进一步处理, 消除振荡, 简单的处理方法如下:

$$E(k) = |e(k) - e(k-1)| \quad (13)$$

由以上分析知, μ 值的选取是信号检测的关键, μ 值过小则引不起系统参数的反复震荡, 不能检测出信号; μ 值偏大, 系统的稳定性降低, 因而提高虚

警概率。而 μ 值的选取与背景噪声的幅度及分布特性密切相关,因此可以将系统在信号检测前对噪声信号进行学习,根据噪声的分布特性选取合适的值,为提高检测概率,应使 μ 值在保证系统对背景噪声保持稳定的前提下尽可能的大。

3 数值仿真与分析

根据以上的原理分析,对微弱脉冲信号的处理仿真如下:

3.1 单脉冲信号的检测仿真与分析

对信噪比为 2.45 dB 的高斯脉冲信号做了检测仿真,其中噪声为零均值高斯白噪声,对噪声 $n(t)$ 和含噪信号 $x(t)$ 分别做了大收敛因子下的 LMS 自

适应处理,其中 $\mu = 0.8$,权向量长度取 4,仿真证明本方法能够实现脉冲信号的检测,而且能够得到极高的峰值输出。实验结果如图 1 所示。

图 1(a)为脉冲波形,图 1(b)为加噪后的信号波形,图 1(c)、图 1(d)分别是对 $n(t), x(t)$ 处理后的估计误差 $e(k)$ 的变化,可见脉冲信号引起了高幅值的振荡,对图 1(d)中信号做式(13)处理得到 $E(k)$ 如图 1(e)所示,将振荡信号转化成了正脉冲。对 $x(t), n(t)$ 处理的权向量更新过程分别如图 1(f)和图 1(g)所示,其中对 $n(t)$ 处理中 $W(k)$ 收敛于 $(1, 0, 0, \dots, 0)$,证实了前面的分析。

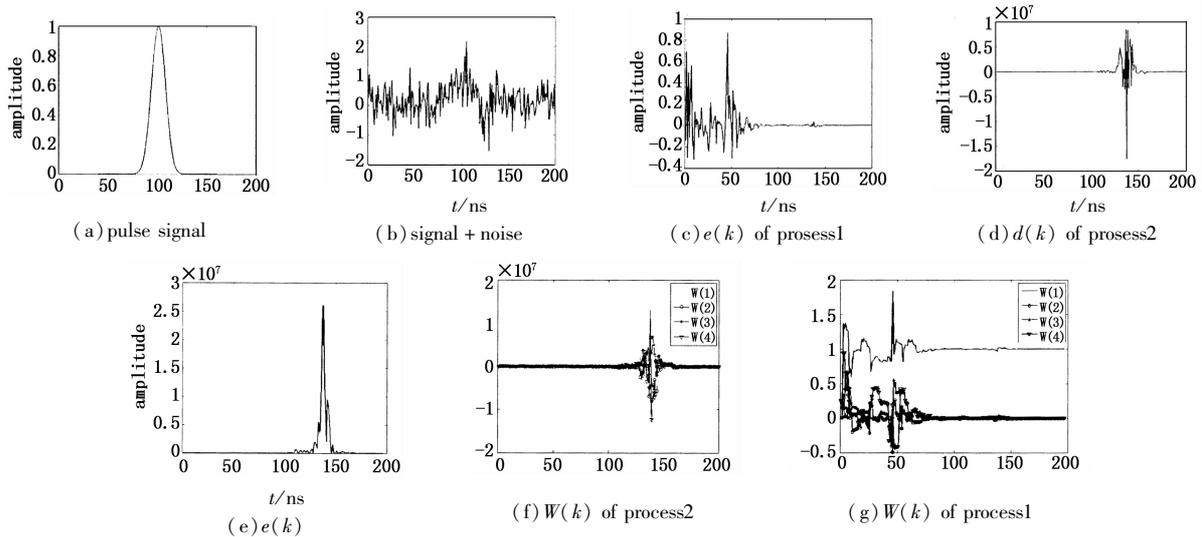


图 1 单脉冲信号检测

Fig.1 single pulse signal detection

3.2 周期脉冲信号的检测仿真与分析

选取信噪比为 -2.45 dB 的周期高斯脉冲信号,对 10 个脉冲周期做积累、归一化后做大收敛因子下的 RMS 自适应处理,权向量长度取 4, $\mu = 0.8$,

仿真结果如图 2 所示。其中图 2(a)为单帧数据,图 2(b)为 10 次积累后结果,图 2(c)为自适应处理中的 $e(k)$ 变化,做式(13)处理得到图 2(d)。

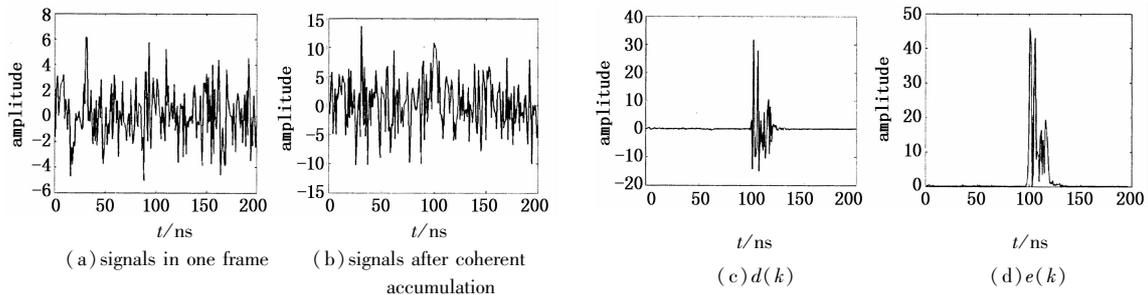


图 2 周期脉冲信号检测

Fig.2 periodic pulse signal detection

由仿真结果可以看出,在低信噪比下,通过信号累积和自适应处理之后,估计误差仍能振荡出较大的值,可用于高重频激光微弱回波的检测。

3.3 检测性能仿真与分析

考虑到脉冲波形以及不同信噪比对本方法的检

测性能的影响,对高斯脉冲、非对称高斯脉冲和三角脉冲三种波形在不同信噪比下作了仿真分析,其中高斯脉冲和三角脉冲含有相同的脉宽(定义脉宽为半峰值点的距离),非对称高斯脉冲由高斯脉冲峰值两边取不同高斯方差 σ^2 得到,因此两边有不同的

升降速度,波形如图3所示。

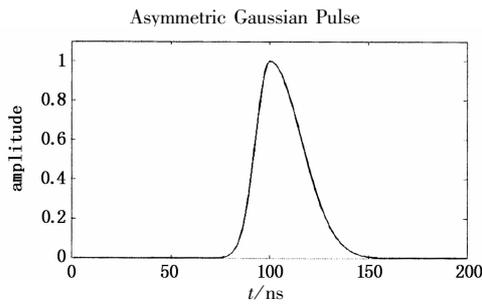


图3 非对称高斯波形

Fig. 3 asymmetric gaussian waveform

在不同信噪比下做了多次重复检测实验,选取合适的 μ 值,恒虚警概率下($<5\%$),系统的检测概率如表1所示,可见脉冲的波形对检测性能有一定影响。

表1 不同脉冲波形不同信噪比下探测概率

Tab. 1 detection probability for different waveforms under different SNR

	0 dB	1.73 dB	2.45 dB	3 dB
高斯脉冲/%	13.2	40.0	76.5	100
非对称高斯脉冲/%	15.6	61.1	92.4	100
三角脉冲/%	4.9	25.8	68.5	100

另外,对于信噪比为1.73 dB的非对称高斯脉冲信号,还分析比较了 μ 值对系统检测性能的影响。经仿真与统计,系统探测概率和虚警概率随 μ 值变化过程如图4所示,可以看出,只有当步长参数在一

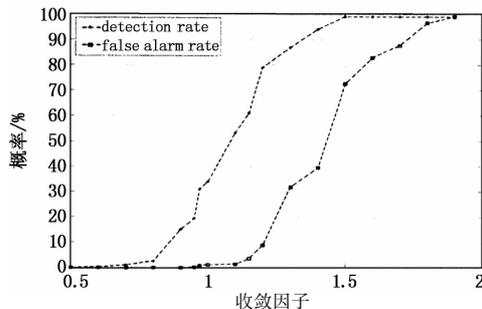


图4 探测概率和虚警概率随 μ 的变化

Fig. 4 detection rate and faulse alarming rate within a growing tap-input vector

定的范围内才能获得较好的检测性能, μ 值过小,检测概率低,过高则虚警概率迅速升高。

4 结论

本文提出了一种基于大收敛因子下的梯度LMS自适应处理过程的微弱脉冲信号检测方法,说明了脉冲信号在自适应处理中会由于系统的低稳定性而使得自适应权向量和系统估计误差振荡出高量级的幅值,通过选取合适的收敛因子,观察自适应过程中的参数变化可以在低信噪比下检测出微弱脉冲信号,有较强的噪声抑制能力。针对高重频激光探测的应用背景,指出利用信号积累,可

以将该方法用于周期脉冲信号检测,并能进一步降低信噪比门限。

通过仿真实验,该方法能有效检测出脉冲信号,但只能检测脉冲的有无,且检测性能依赖于收敛因子的选取,收敛因子选取的不当将严重影响检测性能。如何准确地确定最佳收敛因子,进一步改善算法的检测性能,还有待继续研究。

参考文献:

- [1] Zhang Xianda. Modern signal processing[M]. Beijing; Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [2] Ping Qingwei, He Peikun. Study on digital signal processor of the high resolution middle and long range laser ranger [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(4): 261-264. (in Chinese)
平庆伟, 何佩琨. 高分辨率中远程激光测距机的数字信号处理研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 261-264.
- [3] Chen Shu, Ren Dameng, Li Chengjie. Study on signal detection method in a stronger noise background [J]. Information Technology, 2003, 27(6): 67-68. (in Chinese)
陈澍, 任大孟, 李呈杰. 强噪声背景下的信号检测方法研究[J]. 信息技术, 2003, 27(6): 67-68.
- [4] Sang Huiping, Deng Jiahao, Hu xiujuan. Study on digital detection technique of weak echo signals in pulse laser fuzes [J]. Acta Armamentarii. Laser & Infrared, 2007, 28(4): 420-424. (in Chinese)
桑会平, 邓甲昊, 胡秀娟. 脉冲激光引信微弱回波信号数字检测技术研究 [J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 420-424.
- [5] Zhang Haiwu, Li Songshan. Digital signal detection and simulation of weak echo Based on low SNR [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(3): 211-213. (in Chinese)
张海武, 李松山, 耿林. 低信噪比激光弱小回波信号的数字化检测和仿真 [J]. 激光与红外, 2007, 37(3): 211-213.
- [6] Ping Qingwei, Xia Guifen, Zhao Baojun. The signal detection of laser radar Based on dynamic programming [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10): 985-987. (in Chinese)
平庆伟, 夏桂芬, 赵保军. 基于动态规划的激光雷达信号检测 [J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 985-987.
- [7] Wang Chunyong, Li Xin. Video frequency accumulation for the improvement of signal-to-noise ration in laser probing [J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 335-338. (in Chinese)
王春勇, 李新. 时频累积提高激光探测信噪比的方法研究 [J]. 激光技术, 2010, 34(3): 335-338.