

文章编号: 1001-3806(2005)03-0278-03

基于小波多分辨率分析的激光雷达弱信号处理

陈 涌¹, 王玉兰^{1*}, 周鼎富², 刘 航³

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 3. 电子科技大学, 成都 610054)

摘要: 提出了小波多分辨率分析方法对激光回波弱信号进行处理, 从而突破了传统滤波处理方法, 对于激光回波信号处理十分有效, 提高了信号分析的准确性。结果表明, 采用一台 TEA CO₂ 激光器进行实验, 当采样速率达到 120MHz 时, 对于 $SN \geq 1.2$ 的含噪信号能有效地去掉噪声, 准确可靠地提取出有效信号, 并保持了原信号的特征。采用该数字处理方法可以大幅度提高目前激光雷达的工作能力。

关键词: 小波分析; 多分辨率分析; 激光雷达; 弱信号; 数字信号处理

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A

Faint signal processing of lidar based on wavelet multi-resolution analysis

CHEN Yong¹, WANG Yu-Lan¹, ZHOU Ding-fu², LIU Hang³

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059 China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 3. University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054 China)

Abstract A wavelet multi-resolution analytical method (WMRA) was used to analyze those echo signals. By the measure for those signals with SN above 1.2, the noise can be eliminated, and effective signals can be picked up. When applying the WMRA to a TEA CO₂ DIAL lidar, a satisfying result was obtained. When using this method, the ability of laser radar can be greatly improved.

Key words wavelet analysis; multi-resolution analysis; lidar; faint signal; digital signal processing

引 言

激光雷达由于其固有的优势, 一出现就得到了迅猛的发展。因为系统虚警率和探测概率等的限制, 其传统的模拟信号处理方法要求信噪比较高, 导致了雷达系统的探测能力的相对下降。随着计算机技术在激光雷达信号处理中的应用, 信号处理逐渐从模拟转向数字处理方式。由于数字处理技术本身的优越性, 使其在激光雷达中显得越来越重要。

数字信号处理是将雷达回波的模拟信号经过高速 A/D 转换, 得到回波的数字化信息。实际得到的模拟回波信号带有大量的噪声, 测量距离越远, 噪声相对于信号的幅度越强。通过对数字化信号进行滤波去噪, 从中提取有效的信号, 也就增加了测量系统的作用距离, 故数字信号处理是现今激光雷达信号处理的关键。

传统滤波的一种方法是认为噪声表现高频, 因此, 可以通过傅里叶变换将信号从时域变换到频域, 从而去掉噪声。还有的方法认为噪声和信号不相关, 因此, 可以通过多脉冲的相关算法来去掉噪声^[1]。由于平

稳信号通常表现为低频, 这两种方法对于平稳信号的处理比较有效。在所使用的 CO₂ 差分吸收雷达 (DFAL) 系统中检测到的信号表现为非平稳信号, 噪声干扰和信号存在一定的相关性, 并且连续调谐发射的多个脉冲激光束的输出特性并非相同, 因此, 采用传统的方法滤波效果不好, 得不到满意的结果。

小波分析是当前应用数学中数字处理的一个迅速发展新领域, 在信号处理中得到广泛的应用。该分析方法是同时在时域和频域中对信号进行分析, 因而能解决传统数字处理方法中解决不了的问题^[2]。本文中针对在激光雷达弱脉冲回波信号中难以提取有用信息问题, 首次采用小波多分辨率分析方法, 来对 CO₂ DIAL 中的 CO₂ 激光弱回波信号进行滤波处理, 突破了传统的处理方法, 对于激光回波信号处理十分有效, 提高了信号分析的准确性。目前该技术已经应用于所研制的 CO₂ DIAL 系统中, 并取得满意的结果。

1 基本原理

多分辨率分析是在 $L^2(R)$ 函数空间内, 将函数 f 描述为一系列的近似函数的极限。每一个近似都是 f 的平滑版本, 而且具有越来越精细的近似函数。这些近似函数都是在不同的尺度上得到的, 所以, 这种分析方法叫多分辨率分析^[3]。设 $\{V_j\}$ 是给定的多分辨率

作者简介: 陈 涌 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达信号处理。

* 通讯联系人。E-mail: wangyu@263.net

收稿日期: 2004-08-25; 收到修改稿日期: 2004-09-16

分析 (j 为对应尺度), $\psi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别是相应的小波函数和尺度函数。设输入一维信号 $f(t)$, 由于物理分辨率有限, 可设 $f(t) \in V_{J_1}$ (J_1 为分解的起始级尺度, 通常为 0), 则:

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_{J_1, k} \Phi_{J_1, k} \quad (1)$$

式中, $\{C_{J_1, k}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 具有有限长度 N_{J_1} (k 为对应位移), 利用 Mallat 算法, 可将信号分解成不同的通道成分:

$$f(t) = C_{J_2} f(t) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(t) \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j & j = J_b \dots, J_2 - 1 \\ D_{j+1} = GC_j & j = J_b \dots, J_2 - 1 \end{cases} \quad (3)$$

称 $\{C_j\}$ 和 $\{D_j\}$ ($J_1 + 1 \leq j \leq J_2$) 为对应尺度的低频系数和低频系数, $\{C_{J_2}\}$ 是 J_2 尺度的低频系数 (J_2 为分解的顶级尺度)。 (3) 式中低通滤波器 H 作用在一个序列 $a = \{a_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 的效果为:

$$(Ha)_n = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{k-2n} a_k \quad (4)$$

高通滤波器 G 的效果为:

$$(Ga)_n = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_{k-2n} a_k \quad (5)$$

式中, $\{h_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 与 $\{g_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 是由给定的多分辨率分析确定的镜像滤波器。故基于小波的多分辨率分析是将信号 $f(t)$ 分解成频率小于 2^{-j_2} 成分 $C_{J_2} f(t)$ 和频率介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 之间的成分 $D_j f(t)$ ($J_1 + 1 \leq j \leq J_2$)。噪声和有效信号在进行小波分解后, 低频系数 $\{C_{J_2}\}$ 和高频系数 $\{D_j\}$ ($J_1 + 1 \leq j \leq J_2$) 有不同的变换规律, 因此, 可以将有噪信号在某一尺度下分解到不同的频带内, 通过置零高频系数和低频系数来去掉噪声。这时形成了新的低频系数 $\{C_{J_2}\}$ 和高频系数 $\{D_j\}$ ($J_1 + 1 \leq j \leq J_2$), 再按 Mallat 重构算法:

$$\tilde{C}_{j-1} = \tilde{H} \tilde{C}_j + \tilde{G} \tilde{D}_j \quad (j = J_2, J_2 - 1, \dots, J_1 + 1) \quad (6)$$

式中, \tilde{H} 和 \tilde{G} 分别为重构的低通和高通滤波器。这样就可以得到去噪后的信号为:

$$\tilde{f}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \tilde{C}_{J_1, k} \Phi_{J_1, k}(t) \quad (7)$$

小波基函数的选择是小波多分辨率分析的关键, 也是小波分析应用中需进一步研究的工作。多分辨率分析实质是将函数 $f(t)$ 描述为不同尺度下一系列的小波函数的极限, 即表明各频段上的分量与小波函数系的相似程度。即使对于同一信号, 用不同的小波基函数分析效果也是不相同的。对于激光雷达信号处理而言, 要求能检测到瞬时、峰型尖锐的信号, 所以需要采用在时域和频域同时具有良好的局域性, 且对不规则性较为灵敏的小波^[4]。因此在选择小波的时候, 应着重考

虑时域和频域的紧支性。Daubenchies 小波具有紧支性、规范正交性等特点, 可满足实际处理要求。因此, 作者在数据处理中选用了 Daubenchies 小波系中的 db2 小波。

2 结果与讨论

2.1 仿真信号的计算

首先利用计算机来模拟不含噪声的激光脉冲仿真信号。信号峰型尖锐, 与 TEA CO₂ 激光脉冲波形相似。整个峰由 8 个数据点组成。

在 MATLAB 中对该仿真信号加上大量的随机白噪声, 得到含噪的仿真信号, 并使其信噪比约为 1.5 (见图 1a)。图中 N 代表采样点数, A 代表雷达回波采

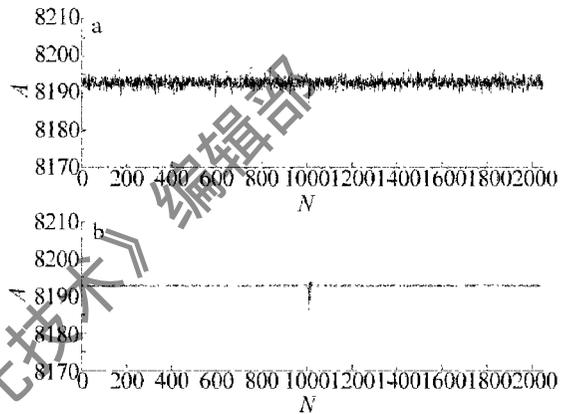


Fig 1 Simulating signal and its processed result a—simulating signal b—the result

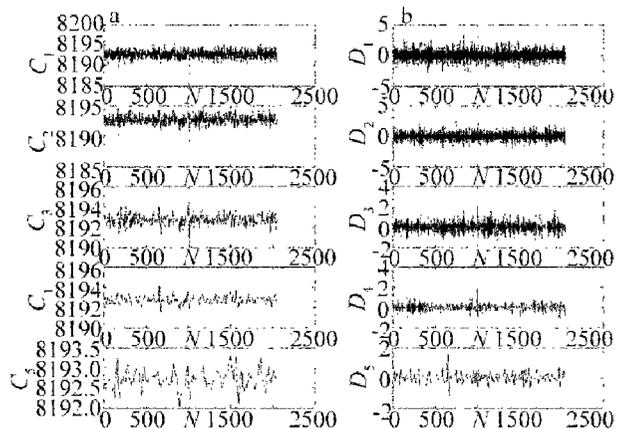


Fig 2 The decomposed coefficients on 5 scales a—the coefficients on low frequency band b—the coefficients on high frequency band

样信号幅值。将该含噪仿真信号进行 5 尺度分解, 得到各层次的低频系数和高频系数如图 2 所示。 $C_1 \sim C_5$ 分别表示第 1 到第 5 尺度的低频系数, $D_1 \sim D_5$ 分别表示第 1 到第 5 尺度的高频系数。从图中可看出, 随着分解尺度的增加, 有效信号的高频系数也越来越明显, 其中在第 3 第 4 个尺度上信号最为明显。按照前面的理论介绍, 在实际处理过程中, 可以在各个尺度上分别找出高频系数模超过设定阈值的最大值及其相应的时间点, 并保留附近点的高频系数值, 其余置为 0 对

于最高尺度的低频系数做相应的处理,再将信号进行重构。当计算达到 5 尺度时,可以得到最后处理结果如图 1b 所示。从图中可以看出,所检测出的有效信号峰型保留了原来的形状,峰值出现的时间点没发生前移或后滞,确定的噪声信号被处理为常数。处理结果与原始信号相比,可以明确得到弱仿真信号的原始特征信息。

2 2 真实激光脉冲弱回波信号的计算

采用一台 TEA CO₂ 激光器对远距离目标进行测距。该激光器输出激光脉冲的半峰全宽 (FWHM) 约为 60ns, 有较长的氮尾 (见图 3)。使用 ADLINK 科技

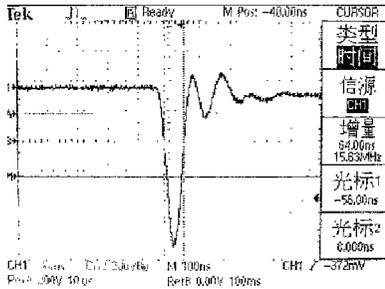


Fig 3 The shape of laser echo pulse

公司的 14 位高速 A/D 采集卡 PC F982Q 对激光脉冲回波信号进行采集。当该卡工作于 120MHz 的“ping-pong”采集模式时,对于 60ns 的激光脉冲,采样点将达到约 14 个。根据 Nyquist 采样定律,可以保证波形的复现性。

将该卡所采集到的激光弱回波信号在显示器上复现,所得到的波形片段如图 4a 所示。从图中可以看出,激光回波信号几乎淹没在随机噪声中,其信噪比约为 1.2。

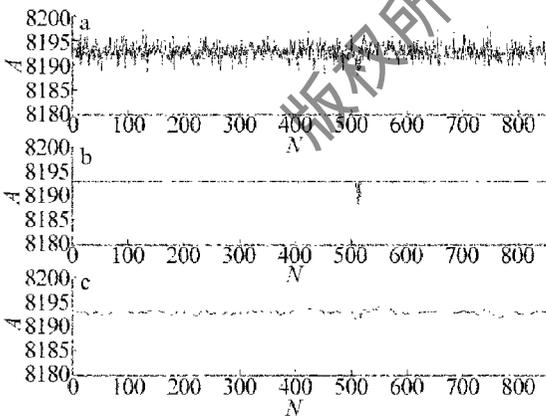


Fig 4 Experimental signal and its processed results with different methods
a—original received echo signals b—WMRA results c—FFT results

对该回波信号进行 5 尺度的多分辨率分析,其高、低频系数在 4~5 尺度上表现强烈,最后所得到的数字信号处理结果如图 4b。从该处理结果图中可以看出,有效地检测并提取到了激光脉冲弱回波信号,而高、低频噪声本底信号被有效地滤出掉,并且所找到的回波

信号峰值出现的时间点与原始波形中激光弱回波信号位置一致。通过对多次的回波数据进行处理分析,当信噪比 ≥ 1.2 时,都可以准确、可靠地找出真实的激光脉冲回波信号。

另外,还分别采用 30MHz 及 65MHz 的采样速率对同一目标的激光回波进行了采集,此时对激光脉冲波形的采样点分别只有约 4 个及 8 个。对所到的信号分别进行了多尺度的分析。对于 30MHz 的采样结果,只在第 1 尺度上信号表现较强,而在其它尺度上,信号与噪声都一样越来越弱。分析原因,与信号同噪声的 Lipschitz 指数有关:当采样点太少时,有用信号表现为 δ 函数,其 Lipschitz 指数为 -1,它的高、低频系数随着尺度的增加而减少;而噪声的 Lipschitz 指数同样也为负数,其高频指数也随着尺度的增加而减少。因此,在此种情况下,只有当信噪比大于 2 时,才可以可靠地找出信号。同样对于 65MHz 的采样,处理结果与仿真信号相似,在 3~4 尺度上信号表现得比较强烈,在信噪比接近 1.5 时能可靠地提取出有用信号。

上面的计算及分析结果表明,采样速率越高,从弱信号中提取出有用信号的能力越强,越能体现出小波多尺度分析处理的能力。但另一方面,采样速率越高,数据量越大;计算尺度越多,计算量也越大,对于实时性系统的影响也越来越大。因此,应该综合考虑采样速率与系统信噪比的关系。

为了与传统的滤波方式进行比较,还将同一原始激光回波信号采用快速傅里叶变换 (FFT) 方式进行滤波处理,情况如图 3c 所示。从图中可以看出,通过傅里叶变换滤波后,信号波形要平滑些,信噪比增大,但有效信号脉宽加宽,效果很不理想。这是因为虽然傅里叶变换能将信号的时域特征和频域特征联系起来,但不能把二者有机的结合起来。用小波多分辨率分析能有效的将时域特征和频域特征联系起来,所以效果比傅里叶变换滤波好得多。

3 结束语

针对从激光雷达弱脉冲回波信号中难提取有用信息问题,采用小波多分辨率分析方法进行处理,收到了良好的效果。结果表明:用该方法能解决以前传统方法处理不好的弱信号检测,并能很好地保持原来有用信号的特征。在采样速率达到 120MHz 时,对于 60ns 的 TEA CO₂ 激光脉冲回波信号,能从信噪比接近 1.2 的弱信号中有效地提取出有用信号。此外, Mallat 算法的计算量为 $O(N)$, 优于 FFT 的计算量 $O(N \lg N)$ ^[5], 故计算速度较快,利于实时处理。

该信号处理方法目前已用于 CO₂ 差分吸收雷达系统

(下转第 283 页)

因为模相等条件 (9) 式只是 (8) 式的一个必要条件, 所以, 必须在图 2 中所求得的点的基础上, 找出其中符合相位条件 (10) 式的解。图 3 表示在不同的激励波长时, 各点所满足的相位条件。只有当这些点的相位为 2π 的整数倍时, 才是满足 (8) 式的解 (如图 3 所示, 曲线与相位为 -2π 所对应直线的交点, 即表示模数 $m = -1$ 阶的解)。

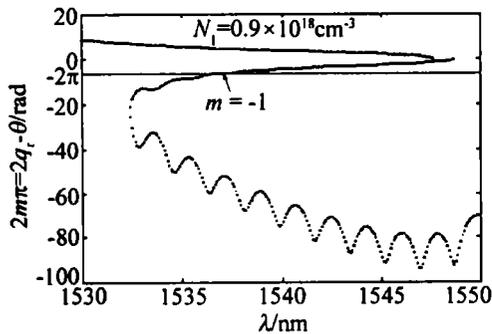


Fig 3 Condition of the phase

上述求解过程得到的是一组 $(N_{1m}, N_{2m}, \lambda_m)$ 解, 当 N_1 取值不同时, 重复上述求解过程, 最终可以得到不

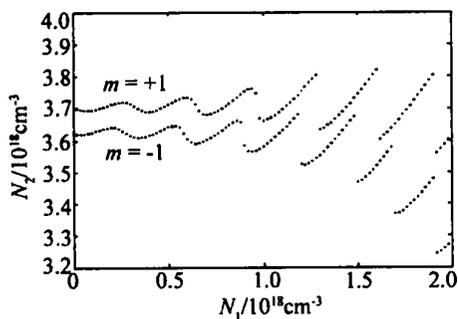


Fig 4 Relation of N_1 and N_2 in different modes

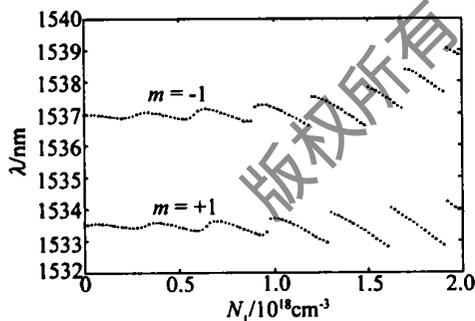


Fig 5 Relation of N_1 and λ in different modes

同模式下 N_1 和 N_2 及 N_1 和 λ 的对应关系曲线, 如图 4 图 5 所示。

图 4 图 5 中给出了 $m = \pm 1$ 两个模式。在数值求解过程中, 发现当 $N_1 < 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 没有零阶模。针对这一现象, 笔者认为可由单段式 DFB 的阻带理论来解释。在所给出的两个模式中, 根据优先激励原理, $m = -1$ 阶模优先激励。由图 4 可以看出, N_1, N_2 的连续变化, 导致波长在一定范围内调谐。并且随着 N_1 的不断增大, N_2 出现跳变现象, 调谐波长也随之出现区间性的振荡 (见图 5)。而最大的连续调谐发生在 N_1 从 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 对应的调谐范围为 1536.5nm 到 1537.5nm, 大约有 1nm, 与实验观察到的相一致^[7]。

3 结论

提出了一种新的两段式 DFB 激光器的模式区分方法, 它是在参考了单段式 DFB 激光器模式区分理论的基础上而得到的。与传统的传输矩阵法相比较, 它避免了建立传输矩阵模型这种复杂的非线性算法, 大大简化了运算步骤, 并且在理论上得到了 DFB 激光器的模式区分表达式, 该表达式对分析两段式 DFB 激光器的不同模式有着直观的物理意义。

参考文献

- [1] KIKUCHI K, TOMOFUJII H. Analysis of oscillation characteristics of separated-electrode DFB laser diodes [J]. IEEE J Q E, 1990 26 (10): 1717~1727
- [2] 沈丹勋, 顾晓仪, 徐大雄. 一种新的双电极 DFB 激光器阈值分析方法 [J]. 光通信研究, 1999 (3): 47~49
- [3] RIGOLE P, CHAWKIM J, AUFFRET R. Numerical analysis of the tuning characteristics of two-electrode DFB lasers [J]. J Opt Commun, 1991, 12 (2): 69~71
- [4] 闫璐, 罗斌, 潘炜. 两段式 DFB 激光器波长调谐特性分析 [J]. 激光技术, 2003, 27 (3): 223~225
- [5] KOGELN K H, SHANK C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. JA P, 1972 43(5): 2327~2335.
- [6] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed. New York: van Nostrand Reinhold Company, 1993 323~333.
- [7] 罗斌, 吕鸿昌, 杨新民. 两段式 DFB 半导体激光器波长调谐实验研究 [J]. 高技术通讯, 1997, 7(8): 30~32

(上接第 280 页)

的实验中, 并取得了很好的效果。同时, 该方法可以用于其它种类的激光雷达回波信号的数字算法处理中。此外, 本文中所提出的方法对处理窄脉冲信号有一定的效果, 可用于其它领域的弱脉冲信号处理。

参考文献

- [1] 章正宇, 晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术研究和仿真 [J]. 中国激光, 2002, 29(7): 661~665.

- [2] BOGGESS A, NARCOWICH F J. A first course in wavelets with Fourier analysis [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002 144~244.
- [3] 徐佩霞, 孙功究. 小波分析与应用实例 [M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 1~120
- [4] 熊玲玲, 刘会金, 傅志伟. 基于小波包变换的电压骤降信号分析 [J]. 继电器, 2004 632(11): 8~12
- [5] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析——应用算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 86~87