

文章编号: 0258-7025(2008)01-0106-05

基于分数布朗运动模型的激光雷达目标检测

平庆伟 夏桂芬

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

摘要 研究和分析了激光雷达目标回波与杂波背景的分形特性,以分数布朗运动(FBM)数学模型为基础,通过对不同信噪比(SNR)激光雷达回波的分析,初步证明了激光雷达回波具有布朗运动的特征。针对激光雷达杂波数据具有布朗运动的增量统计自相似性,激光雷达杂波能与分数布朗运动较好地匹配,因此可以采用布朗运动模型对激光雷达回波数据进行分析处理。当信噪比较低时,杂波和含有目标的回波信号的分形维数比较接近,发生重叠,单靠单一的分形维数无法检测出目标。针对这一问题,分析杂波和目标信号在不同尺度上的分形维数,提出基于不同尺度分形维数的变化特征进行目标检测的算法,即基于多尺度分形维数的目标检测算法。理论分析和实验结果表明该方法具有较高的可靠性和准确性。

关键词 激光技术;激光雷达;分数布朗运动;分形;目标检测

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Laser Radar Target Detection Based on Fractional Brownian Motion Model

Ping Qingwei Xia Guifen

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The fractal characteristics of the laser radar's echo and clutter are researched and analyzed. Based on the fraction Brownian motion (FBM) model and analysis of different signal-to-noise ratio (SNR) of the laser radar echo, it proves that the laser radar echo data can be processed has the characteristic of Brownian motion. Because the clutter of the laser radar has increment self-similar characteristic of Brownian motion, it can match the fractal Brownian motion. So the laser radar echo data can be processed by adopting the Brownian motion model. When the SNR of the target echo is small, the fractal dimension of the clutter and target echo is similar. The target can not be detected by the single fractal dimension. But the fractal dimension of the clutter and target is different in the different fractal scale. A method to detect the target by the characteristic of the different fractal dimension of the target and the clutter is advised. This method is called target detect algorithm based on multi fractal dimension. The theory and experiment result shows that this algorithm is reliable and accurate.

Key words laser technique; laser radar; fraction Brownian motion; fractal; target detection

1 引言

激光雷达的弱目标检测是激光雷达的关键技术之一,其主要研究难点,一个是在低信噪比(SNR)下,激光回波闪烁严重、目标强度小,可用于区分目标与背景噪声的特征少。另一个是激光雷达脉冲重复频率低,一般在10 Hz以下,不能采用微波雷达的信号积累技术来提高信噪比。传统的模拟激光信号处理器采用阈值方法对信号进行检测,激光雷达只

能工作在大信噪比条件下,信噪比一般高于7。文献[1]采用数字信号处理技术研制出激光测距机的数字信号处理器,这一技术大大提高了激光雷达的探测能力。文献[2]提出最小二乘估计器和线性滑动窗口构造滤波器的算法,根据目标本身形体的尺度范围特征设定滤波窗口,实现了对目标的识别过程。文献[3]采用神经网络预测方法检测激光水下小目标,但是该算法中神经网络训练时间长,难以实时实现。

收稿日期:2007-03-22;收到修改稿日期:2007-07-10

基金项目:武器装备预研基金(513010501)资助项目。

作者简介:平庆伟(1971—),男,安徽人,讲师,博士,研究方向为实时信号处理。E-mail: pingqingwei@bit.edu.cn

目前,分形逐渐被引入到雷达信号处理中^[4,5],一方面在于分形学的普遍性,另一方在于雷达信号具有分形的特征。在激光雷达方面,文献[6]根据激光雷达回波与噪声的不同特点,从分形的角度利用计盒算法计算回波与噪声的分形维数,提取出目标。该算法对大目标提取比较容易,但是对于弱小目标,目标回波分形维数与杂波分形维数比较接近,难于检测到目标。文献[7,8]针对信号中的噪声进行滤波处理,从而提高信噪比。本文以分数布朗运动(FBM)数学模型为基础,验证了激光雷达回波具有布朗运动特性,提出了多尺度分形维数的目标检测算法,并用实测数据验证了该算法的有效性。

2 分数布朗运动模型

分数布朗运动是常用的有效随机分形模型,是一般布朗运动的推广,其定义为:

1) $B_H(0) = 0$, 并且 $B_H(t)$ 连续;

2) 对于任何 $t \geq 0$ 和 $\Delta t > 0$, 增量 $\Delta B_H(t) = B_H(t + \Delta t) - B_H(t)$ 服从均值为 0, 方差为 $\sigma^2(\Delta t)^{2H}$ 的高斯分布, 即

$$p_r \left[\frac{B_H(t + \Delta t) - B_H(t)}{|\Delta t|} < t \right] = F(t), \quad (1)$$

式中 $F(t)$ 是均值为零, 方差为 σ^2 的高斯随机变量的分布函数; $0 < H < 1$ 为分数标度参量, 又称为 Hurst 参量, 它控制分数布朗运动的粗糙性。它是一

个非平稳过程,但其增量是平稳的高斯随机过程,具有关系

$$E\{|B_H(t + \Delta t) - B_H(t)|\} = C_1 |\Delta t|^H, \quad (2)$$

其中

$$C_1 = E\{|B_H(t + 1) - B_H(t)|\},$$

对式(2)取对数,得

$$\log E\{|B_H(t + \Delta t) - B_H(t)|\} = H \log |\Delta t| + \log C_1, \quad (3)$$

对不同的 Δt , 计算 $E\{|B_H(t + \Delta t) - B_H(t)|\}$, 通过最小二乘线性拟合即可得到 H 参量的估计, 分形维数为

$$FD = D + 1 - H, \quad (4)$$

式中 D 为拓扑维。

3 激光雷达回波的布朗运动特性分析

如果激光雷达杂波数据服从布朗运动模型, 那么其增量需要满足布朗运动的增量统计自相似性。这里, 给定长度为 15000 个点的一组数据 $x(n)$ ($n = 1, 2, \dots, 1000$), 如图 1 所示, 其增量 $d(n)$ 如图 2 所示, 并且令

$$d(n) = x(n + 1) - x(n). \quad (5)$$

图 3 是增量 $d(n)$ 统计, 增量分布情况与正态分布非常相似。这说明激光雷达杂波能与分数布朗运动较好地匹配, 因此可以基于分数布朗运动模型对激光雷达回波数据进行分析处理。

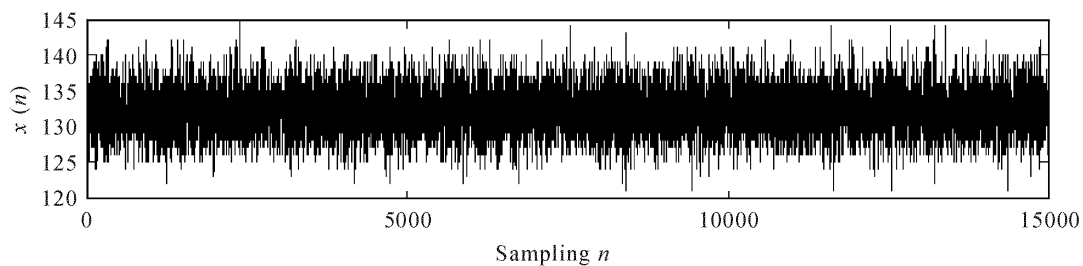


图 1 激光雷达杂波数据

Fig. 1 Data of the laser radar clutter

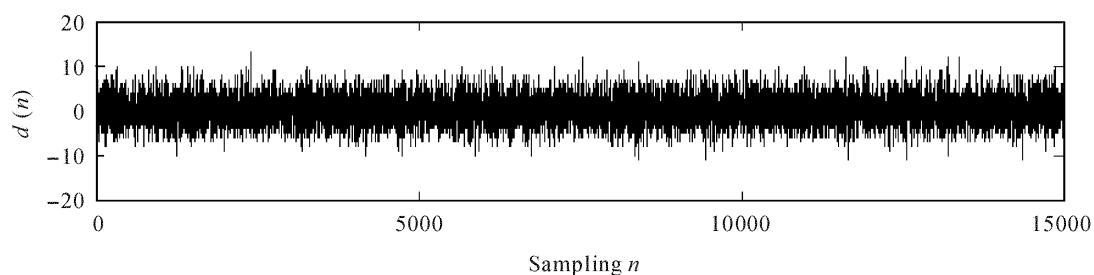


图 2 激光雷达杂波的增量图

Fig. 2 Increment of the laser radar clutter

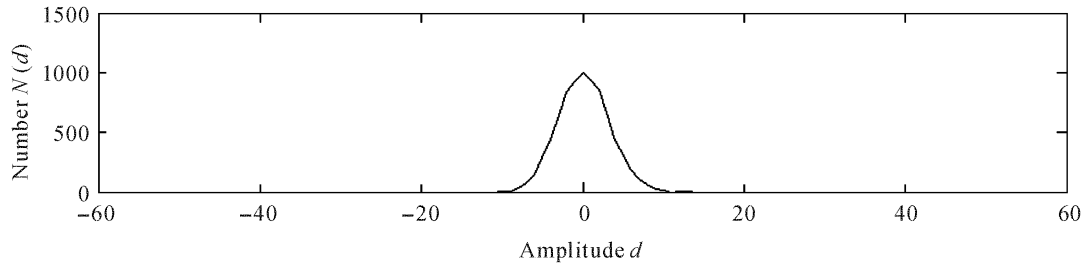


图 3 激光雷达杂波的增量分布

Fig. 3 Increment distribution of the laser radar clutter

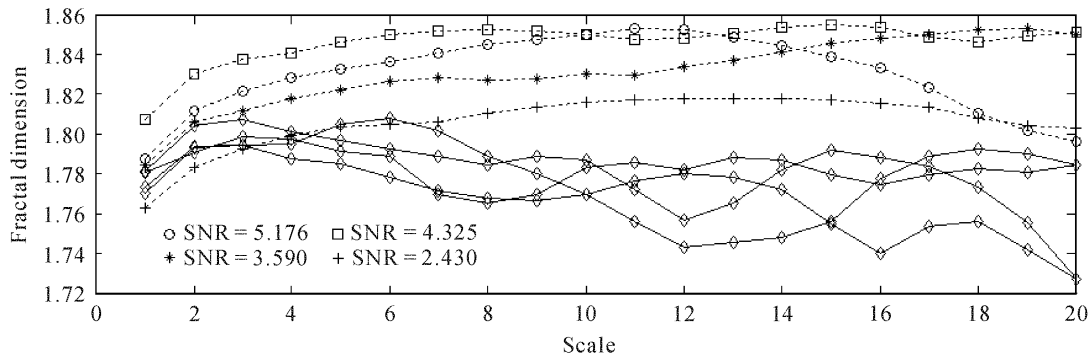


图 4 不同尺度下各种信号的分形维数

Fig. 4 Fractal dimension of the different scale

图 4 是采用分数布朗运动算法对多组激光雷达回波数据计算分形维数,目标回波得信噪比分别为 5.176, 4.325, 3.590 和 2.430。此时,目标回波的幅度与杂波和噪声的幅度基本相当,简单的门限检测无法提取目标。图中 4 条实线表示杂波数据的分形维数,分形维数为 1.760 左右,而包含有目标信号的分形维数大于杂波的分形维数,其大小与信噪比有关,如图中 4 条虚线所示,这是由激光雷达回波目标的特性决定的,激光雷达目标回波信号具有突出的下冲特点,所以目标处的增量值较大,所得的分形维数大于杂波的分形维数。由图可以看出,当分形尺度为 8~18 之间时,目标和杂波的分形维数明显不同,通常将分形维数定在 10~14 之间。因此,可以根据目标和杂波在分形维数上的差异进行目标检测。

但在实际中,激光雷达杂波受大气和随机噪声的影响,其分形维数往往发生变化,与目标回波信号的分形维数发生重叠,使检测性能下降;另一方面,当信噪比较低时,两者的分形维数基本一致,难以检测出目标。因此有必要研究分形维数的其他特征。

理想的分形体在所有尺度上均满足统计自相似性,分形维数与尺度无关。但是对于实际情况,自相似性只体现在很小的尺度范围内,相应的分形维数在较小的尺度范围内具有稳定特征,所以分形维数

随着尺度的改变而改变。对于激光雷达回波,由图 4 可以看出,目标的分形维数随着尺度的增加而增加,但是变化很小,比较平缓;而杂波的分形维数随着尺度的增加而减少,并且达到某一尺度后,分形维数上下波动较大。因此,可以根据杂波和目标信号的分形维数随尺度的变化而表现出的差异进行目标检测,即多尺度分形维数的目标检测算法。

4 基于多尺度分形维数的激光雷达目标检测

多尺度分形维数为分形体在 k 个不同观测尺度下所估计的分形维数集合,即

$$\text{MFD}(s) = \{D_1(s), D_2(s), \dots, D_k(s)\}. \quad (6)$$

在仅适用单一的分形维数难以解决问题时,常采用多尺度分形维数解决。多尺度分形维数是分形体的一种特征,不同的分形体会具有不同的多尺度分形维数,对于两个或两个以上的分形体交叠区域,多尺度分形维数常发生变化,并且与原分形体的多尺度分形维数不同。根据这一理论,王帆等^[9]针对语音信号中元音和浊辅音具有相近的维数,采用了多尺度分形维数较好地地区分了元音和浊辅音。杜干等^[10]根据海杂波和舰船目标的多尺度的分形维数的变化趋势不同,利用分形维数变化量进行了舰船目标的检测,达到了预期的效果。

对于激光雷达回波信号,通过前一节的分析,利用单一的分形维数难以检测出弱目标,即当信噪比较低时,杂波和含有目标的回波信号的分形维数比较接近,发生重叠,仅靠单一的分形维数无法检测出目标。但是,比较多个尺度的分形维数,发现叠加上有目标信号的杂波的多尺度分形维数与单一杂波的多尺度分形维数的波形不同,前者比较平坦,后者则波动较大,所以考虑将不同尺度的分形维数的均值表示这一特征,等效于对多尺度的分形维数进行均

值滤波。通过滤波,含有目标的分形维数由于其多尺度分形维数变换比较平缓,变化不大,而杂波的分形维数由于波动较大,将得到抑制,从而使信噪比提高,检测出目标。

定义多尺度分形维数的均值 $M_{MFD}(s)$ 为

$$M_{MFD}(s) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} D_i(s) \quad (7)$$

考虑到运算量的问题,可以选择其中几个尺度的分形维数进行平均,通过对激光雷达回波数据进

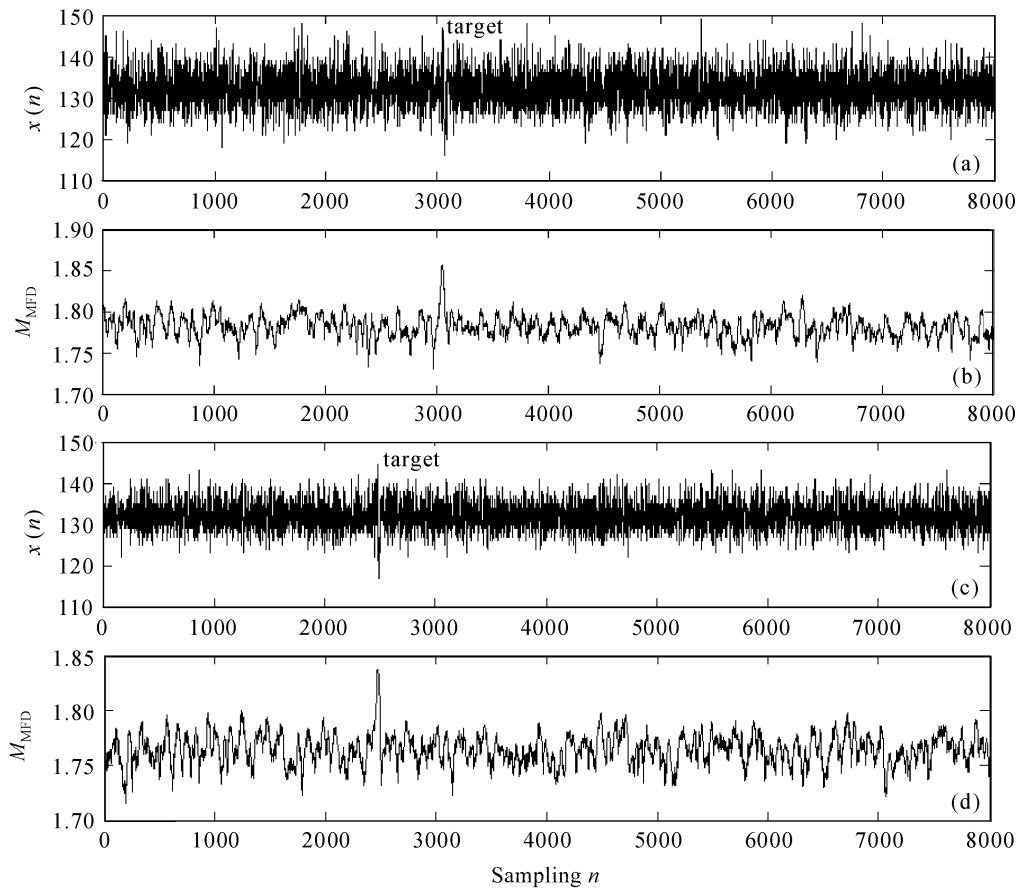


图 5 (a) 激光雷达回波数据 1,信噪比为 3.54;(b) 数据 1 经过多尺度分形维数处理后的结果,信噪比为 5.4;(c) 激光雷达回波数据 2,信噪比为 3.58;(d) 数据 2 经过多尺度分形维数处理后的结果,信噪比为 5.85

Fig. 5 (a) original data of the laser radar echo, SNR is 3.54; (b) fractal dimension processing outcome of Fig. 5(a), SNR is 5.4; (c) original data of the laser radar echo, SNR is 3.58; (d) fractal dimension processing outcome of Fig. 5(c), SNR is 5.85

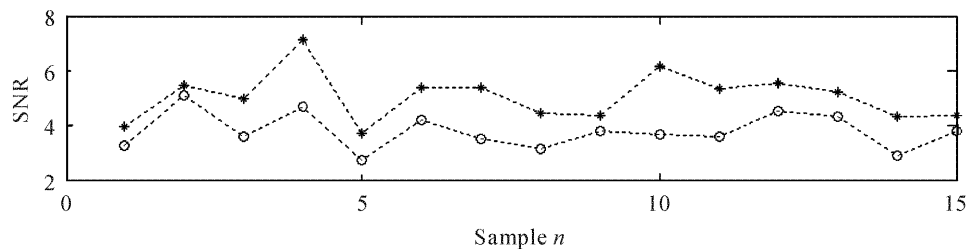


图 6 多尺度分形维数对信噪比改善的统计(*:处理后的信噪比,○:原始信号信噪比)

Fig. 6 Statistics of SNR increment of the multi-scale fractal dimension

(*: SNR after procession, ○ : SNR of the original data)

行实验,选择 $D_8, D_{12}, D_{16}, D_{20}$ 效果比较好,如图 5 所示。

由图 5 所示的两组数据可以看出,多尺度分形维数可以有效地提高信噪比,提高约 1.5 倍,原始信号中,目标淹没在噪声中,很难检测出来,通过多尺度分形维数处理后,可以很容易地检测到目标。对多组样本数据仿真,统计结果如图 6 所示。

由图 6 的统计结果可以看出,利用多尺度分形维数对激光雷达回波信号进行处理,可以有效地提高信噪比,理论分析和实验结果都表明该算法是一种有效的激光雷达弱目标检测算法。

5 结 论

通过分析激光雷达目标的分数布朗运动特性,提出了多尺度分形维数算法,理论分析和实验结果表明该算法可以有效提高信噪比,为激光雷达弱小目标检测提出了新的思路。但是,该算法需对每一点做分形维数估计,计算量大,难以实现实时性。因此,如何优化算法,是进一步要研究的课题。

参 考 文 献

- 1 Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun *et al.*. Study on digital signal processor of the high resolution middle and long range laser ranger [J]. *Laser and Infrared*, 2003, **33**(4):261~264
平庆伟,何佩琨,赵保军等. 高分辨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
- 2 Fu Ling, He Anzhi, Li Zhenhua. Algorithmic study of target recognition from lidar range image [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(4):46~47
付林,贺安之,李振华. 激光雷达一维距离像的目标识别算法研究[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(4):46~47
- 3 Cheng Wenqing, He Jianhua, Shen Chunlei. A new NN detection method in underwater target with blue-green laser [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 1999, **27**(3):56~58
程文清,何建华,沈春蕾. 一种基于神经网络的激光水下目标探测方法[J]. *华中理工大学学报*, 1999, **27**(3):56~58
- 4 D. Gan, Z. Shouhong. Detection of sea-surface radar targets based on multifractal analysis [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(13):1144~1145
- 5 G. Du. Detection of sea-surface radar targets based on fractal model [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(14):243~249
- 6 Ping Qingwei, He Peikun, Zhao Baojun. Target detection algorithm of laser echo [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2):218~220 (in English)
- 7 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1207~1211
钟丽云,张以谟,吕晓旭. 合成孔径数字全息图的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1207~1211
- 8 Li Ziqin, Li Jinxin, Wang Qi. Suppressed algorithm of lidar's range image background [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1469~1472
李自勤,李金新,王 骐. 激光雷达距离像背景抑制算法研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1469~1472
- 9 Wang Fan, Zheng Fan, Wu Wenhui. Multiscale fractal dimension based I/F segmentation for Mandarin speech [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2002, **42**(1):68~71
王 帆,郑 方,吴文虎. 基于多尺度分形维数的汉语语音声韵切分[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, **42**(1):68~71
- 10 Du Gan, Zhang Shouhong. Radar ship targets detection based on fractal characteristics [J]. *Journal of Xidian University*, 1999, **26**(4):498~501
杜 干,张守宏. 基于分维特征的舰船目标的检测[J]. *西安电子科技大学学报*, 1999, **26**(4):498~501