文章编号:1001-5078(2021)03-0371-08

·图像与信号处理 ·

基于恒比鉴别和小波变换的脉冲激光雷达成像

左靖昊,张彦梅,栾晨辉

(北京理工大学信息与电子学院,北京 100081)

摘 要:为了提升脉冲激光雷达的成像性能,减小杂波对雷达成像的影响,本文提出了一种将 恒比鉴别算法和小波变换算法相结合的复合算法。利用由激光脉冲发射、杂波干扰、激光脉冲 接收和生成目标图像构成的仿真模型,分别使用恒比鉴别算法,小波变换算法,恒比鉴别和小 波变换的复合算法生成激光雷达图像。同时为了进一步提高新复合算法的性能,提出了一种 基于新型的阈值函数的小波变换算法与恒比鉴别结合,生成激光雷达图像。仿真分析的对比 结果表明,基于恒比鉴别和小波变换的复合算法的雷达图像的均方误差为9.5508,基于恒比 鉴别和改进小波变换的复合算法的雷达图像的均方误差为7.9065,均方误差小于其他算法, 从而证明了新复合算法在杂波识别方面具有更好的性能。

关键词:恒比鉴别;小波变换;脉冲激光雷达成像;杂波识别

中图分类号:TN958.98 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.03.020

Pulse laser radar imaging based on constant ratio discrimination and wavelet transform

ZUO Jing-hao, ZHANG Yan-mei, LUAN Chen-hui

(School of Information and Electrics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the imaging performance of pulsed laser radar and reduce the impact of clutter on radar imaging, this paper presents a composite algorithm that combines constant fraction discrimination (CFD) and wavelet transform algorithms. Through the simulation model composed of laser pulse emission, clutter interference, laser pulse reception and target image generation, the laser radar image is generated by the CFD algorithm, wavelet transform algorithm, CFD and wavelet transform composite algorithm. At the same time, in order to further improve the performance of the new composite algorithm, a wavelet transform algorithm based on a new threshold function and CFD are combined to generate a laser radar image. The simulation analysis results show that the mean square error of the radar image based on the compound algorithm of CFD and wavelet transform is 9.5508. The mean square error of the radar image based on the compound algorithm of CFD and improved wavelet transform is 7.9065. The mean square error is smaller than other algorithms, which proves that the new compound algorithm has better performance in clutter recognition.

Keywords: constant fraction discrimination; wavelet transform; pulsed laser radar imaging; clutter recognition

1 引 言

成像激光雷达在民用和国防目标探测与识别领

域有着广泛的应用。成像系统的分辨率取决于用于 成像的电磁辐射的波长,较短的波长通常会产生较

作者简介:左靖吴(1996 –),女,硕士研究生,主要从事激光探测等方面的工作。E-mail:jhzz68@ foxmail.com 通讯作者:张彦梅(1969 –),女,教授,主要从事目标探测,信号处理等方面的工作。E-mail:0726zym@163.com 收稿日期:2020-05-10;修订日期:2020-05-28 细的细节。由于成像激光雷达的工作波长远小于普 通微波雷达,因此它可以生成高分辨率物体图像,从 而实现精确的目标识别。成像激光雷达的高分辨率 依赖于有效的检测算法来减轻杂波。杂波识别算法 是当前研究的热点。

2007年,瑞典 Saab Bofors 公司与瑞典皇家工学 院合作,建立了激光近炸引信三维成像探测仿真系 统,用于对激光引信数字探测算法进行性能仿 真^[1]。研究中重点对数字恒比鉴别算法与匹配滤 波算法进行了性能仿真对比,通过对比得出数字匹 配滤波算法具有更好性能。2010年,南京理工大学 陈钱、徐彤等对激光近炸引信定距算法进行了研究, 实现了小波变换定距算法^[2]。采用基于 TI 公司 DM642 型号的 DSP 芯片硬件电路, 对示波器采集激 光回波原始数据进行小波变换数字信号处理,算法 最小实现周期为0.992 ms,在10 m 处定距精度达到 了±0.45 m。2016年,北京理工大学李欢、郭海超 等提出了一种新的混合脉冲检测算法,该算法结合 了匹配滤波算法和恒比鉴别(CFD)算法^[3],在减轻 杂波方面具有较好的性能,而且有着较高的测量精 度。然而,当杂波信号较大时,上述方法的成像性能 通常会较差。

为了提升脉冲激光雷达的成像性能,本文基于 MATLAB 创建了由激光脉冲发射、杂波干扰、激光 脉冲接收和生成目标图像构成的仿真模型,提出了 一种恒比鉴别算法和小波变换算法相结合的复合算 法,与恒比鉴别算法,小波变换算法,匹配滤波算法, 恒比鉴别与匹配滤波复合算法相比较,具有更好的 成像性能。同时,提出了一种基于新型的阈值函数 的小波变换与恒比鉴别算法相结合,在减轻杂波方 面具有更好的性能。

2 成像激光雷达仿真模型

成像激光雷达仿真模型由激光脉冲发射、杂波 干扰、激光脉冲接收和生成目标图像四部分构 成^[3]。仿真中使用的激光雷达脉冲发射功率方 程^[4]如公式(1)所示, *P*₀是峰值功率, *T*_{1/2} 为激光脉 冲波形的半功率宽度。

$$P_{t} = P_{0} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{2} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = \frac{T_{1/2}}{3.5}$$
(1)

本文仿真的激光脉冲的半功率宽度为100 ns,

峰值功率为220 W,激光雷达发射脉冲时间分布功率图如图1所示。





Fig. 1 Time distribution power diagram of laser radar transmitting pulse

在不考虑杂波的环境下,激光脉冲回波信号受 到距离、大气等因素的影响,激光雷达接收脉冲功率 方程^[5]可表示为:

$$P_r = \frac{T_A \rho D^2 \eta_i \eta_r M_r}{4R^2} P_i (t - 2R/c)$$
⁽²⁾

其中, T_A 为大气的单程透过率; ρ 为目标的激光漫 反射系数; D 为接收光学系统的孔径; η_i 和 η_r 分别 是发射光学系统和接收光学系统的透过率; M_i 为探 测器的增益系数; R 为目标到激光测距系统的 距离。

激光雷达接收脉冲时间分布如图 2 所示,从图 中可以看出,在不考虑杂波的环境下,受到距离、大 气等因素的影响,激光脉冲回波信号的功率大大 减小。





受到杂波和噪声的干扰。杂波信号主要是由树木、 草丛、建筑物等周围环境反射的回波,常见的杂波有 瑞利分布的杂波,对数正态分布杂波、韦布尔分布 杂波。

瑞利分布杂波幅度概率密度函数如公式(3), 其仿真序列图如图3所示。海杂波地杂波等对低分 辨率雷达的杂波幅度服从瑞利分布模型^[6]:

$$f(\gamma;\alpha) = \frac{\gamma}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\alpha^2}\right)$$
(3)

式中, α 为瑞利参数, 瑞利分布的期望值为:

$$E(\gamma) = \alpha \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tag{4}$$



图 3 瑞利分布仿真序列图

Fig. 3 Rayleigh distribution simulation sequence diagram

对数正态分布杂波概率密度函数如式(5)所示,时间波形图如图4所示。对数正态分布适用于 低入射角或者海面平静的高分辨率海杂波信号的 仿真^[7]。



$$(\gamma > 0, \sigma_c > 0, \mu_m > 0) \tag{5}$$

式中, μ_m 为尺度参数; γ 为中值; σ_c 为形状参数。 对数正态分布的期望值为:

$$E(\gamma) = \exp\left(\mu_m + \frac{\sigma^2}{2}\right) \tag{6}$$

韦布尔分布杂波模型概率密度函数如公式(7) 所示:

$$f(\gamma) = \frac{p}{q} \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{q}\right)^{p}\right]$$
$$(x \ge 0, p > 0, q > 0)$$
(7)

式中, p 为形状参数; q 为尺度参数。韦布尔分布的 期望值为:

$$E(\gamma) = q\Gamma(1 + p^{-1}) \tag{8}$$

式中, **Γ**(•) 为伽马函数。韦布尔分布杂波模型适 应于更广泛的环境,通过调整参数,能得到接近瑞利 分布杂波模型和对数正态分布杂波模型的杂波分 布^[8]。时间波形图如图 5 所示。





Fig. 5 Weibull distribution simulation diagram

由于受到杂波和噪声的影响,激光雷达脉冲接 收信号的表达式如式(9)所示:

 $P_{\text{receive}} = P_r + P_{\text{clutter}} + P_{\text{noise}}$ (9) 其中, P_{clutter} 是杂波的强度信号; P_{noise} 是噪声的强度

信号。噪声一般都是高斯白噪声。 图6显示了激光雷达成像仿真原理。激光雷达 产生激光光束照射到目标物体上,利用算法对接收 激光光束进行信号处理求得目标图像的一个像素点 值,对物体进行扫描遍历目标所有像素点,从而得到 完整的目标图像。将激光光束划分成 m × n 个子区 域,每个子区域可看成是一个点,有相应的发射激光 强度值,激光光束照射到物体并反射回来,这 m × n 个激光光束子区域分别对应 m × n 个接收激光强度 值,通过对 m × n 个接收激光强度值进行信号处理 求得距离值,得到目标图像的一个像素点的灰度值。 目标图像的像素点为 M × N,像素点对应距离值,激 光光束被划分成 m × n 个子区域,生成的目标图像

像素点数为 $\frac{M}{m} \times \frac{N}{n}$ 。



Fig. 6 Laser radar imaging simulation schematic diagram

3 杂波识别算法模型

3.1 恒比鉴别算法

恒比鉴别算法是将输入信号分成两个通道,将一 个通道的输入信号延迟一个脉冲宽度的一半,然后用 原始通道中的信号减去延迟通道的信号,得到 s 形信 号。这种信号的过零点对幅度波动非常不敏感。

3.2 小波变换算法

3.2.1 小波分析降噪过程

小波变换是一种特征提取和低通滤波的综合算 法,其流程图如图7所示。



图 7 小波变换流程图

Fig. 7 Flow chart of wavelet transform

基于阈值的小波变换算法的原理是,选定一种 小波对信号进行 N 层分解,分解过程如图 8 所示, cA_n, cD_n分别反映信号的第 n 层分解的近似系数与 细节系数,近似系数表征了信号的低频部分信息,细 节系数则表征了信号的高频部分信息。

对激光雷达脉冲接收信号单层分解产生的近似 系数与细节系数如图9所示。从图中可以看出,近 似系数主要反映脉冲信号的信息,细节系数主要反 映杂波和噪声的信息。携带信息的脉冲信号在小波 域的能量比较集中,表现为能量密集区域的信号分 解系数的绝对值比较大,噪声和杂波的能量谱比较 分散,其系数的绝对值较小,因此可以通过作用阈值 的方法过滤掉绝对值小于一定阈值的小波系数,对 分解得到的各层系数选择一个阈值,对细节系数软 阈值处理。处理后的系数通过小波进行重建得到原 始信号。



Fig. 8 Flow chart of wavelet transform decomposition





3.2.2 Birge-Massart 阈值法

在小波分析用于降噪的过程中,核心的步骤是 在系数上作用阈值,因为阈值的选取直接影响降噪 的质量,进而影响图像的质量。阈值的确定主要有 以下三个数学模型:由 Donoho-Johnstone 提出的阈 值确定模型,Birge-Massart 策略所确定的阈值模型, 小波包变换中的 penalty 阈值模型,除了 Birge-Massart 策略确定的阈值外,其余方法得到的降噪信号 太过于光滑,失去了原信号本身的一些信息,因此本 文用 Birge-Massart 策略确定的阈值:给定一个指定 的分解层数j,对(j + 1) 及更高层所有系数保留,对 第i层 $(1 \le i \le j)$ 保留绝对值最大 n_i 个系数, n_i 由 式(10)确定:

$$n_i = M \left(j + 2 - i \right)^{\alpha} \tag{10}$$

在求得阈值后,有两种在信号上作用阈值的方法,一种是令绝对值小于阈值的信号点的值为零,成为硬阈值,如式(11)所示,这种方法的缺点是在某些点会产生间断。

$$W_{\iota} = \begin{cases} W, & (|W| \ge \lambda) \\ 0, & (|W| < \lambda) \end{cases}$$
(11)

式中,W表示小波系数的值; W_i 是处理后的小波系数值; λ 是阈值。

另一种软阈值方法是在硬阈值的基础上降边界 出现不连续点收缩到零,如式(12)所示。这样可以 有效避免间断,使重建的信号比较光滑,但是软阈值 函数的原系数和小波分解系数存在恒定偏差。

$$W_{t} = \begin{cases} \left(1 - \frac{t}{|W|}\right)W, & (|W| \ge \lambda) \\ 0, & (|W| < \lambda) \end{cases}$$
(12)

由软阈值函数可等价如下方程:

$$W_{t} = \begin{cases} \lambda \operatorname{sign}(W) \left(\left| \frac{W}{\lambda} \right| - 1 \right), & \left(\left| \frac{W}{\lambda} \right| \ge 1 \right) \\ 0, & \left(\left| \frac{W}{\lambda} \right| < 1 \right) \end{cases}$$
(13)

3.2.4 新阈值函数

为了更好地分离有用信号和无用噪声,我们在 新提出的阈值函数,对 W/λ 进行指数化处理,使得 每一个系数与1的偏离程度增大。同时,为了同时 利用到硬阈值法可以更多保留真实信号中的尖峰特 征,以及软阈值法连续性好,重建信号平滑的优点, 我们使用在提出的阈值函数中,引入一个折中余量, 以更好提取到有用信号。本文提出了一种新的阈值 函数,如式(14)所示:

$$W_{\iota} = \begin{cases} \operatorname{sign}(W) \log \left(|W|^{n} - \alpha \lambda^{n} \right)^{\frac{1}{n}}, & \left(|W| \ge \lambda \right) \\ 0, & \left(|W| < \lambda \right) \end{cases}$$
(14)

其中,sign(·)是符号函数; W 表示小波系数的值; W_i 是处理后的小波系数值; λ 是阈值; $0 \le \alpha \le 1$, 本文 α 取 0.5, $n \ge 1$,本文 n 取 3。

图 10 显示了三种阈值函数的图形示意图,从左 到右依次为硬阈值、软阈值和新阈值函数。



图 10 硬阈值、软阈值和新阈值函数的图形

Fig. 10 Hard threshold and soft threshold, new threshold function graph 复合检测算法是将小波变换算法和 CFD 算法相结合的新方法。复合算法的仿真方案如图 11 所示。基于新型小波变换的复合算法的仿真如图 12 所示。







Fig. 11Simulation scheme of compound algorithm





Fig. 12 Simulation scheme of improved compound algorithm

与发射脉冲相比,接收脉冲是一个非常微弱的 信号。因此,为了观看方便,接收脉冲和发送脉冲都 被标准化为220 W。图11(a)以实线示出了由激光 二极管发射的激光脉冲,并且以虚线示出了由激光 检测器接收的激光脉冲。通过小波变换处理发送的 脉冲信号和接收的脉冲信号,处理结果如图11(b) 和图12(b)所示。接下来使用CFD算法,通过处理 图11(b)和图12(b)中的发射脉冲,激光脉冲触发 时间如图11(c)和图12(c)所示。通过处理图11 (b)和图12(b)中接收到的脉冲,激光脉冲回波接 收时间如图11(d)和图12(d)所示。激光飞行距离 等于光速乘以激光脉冲回波接收时间和激光脉冲触 发时间之间的时间差的一半。

4 成像仿真结果

本文仿真的激光雷达探测目标的灰度二维图像 如图 13(a)所示。目标图像的像素数为 76×138。 目标图像中一个像素的灰度值表示激光雷达与该像 素点之间的距离。假设激光雷达图像的像素数为 38×69,采用平均法得到理想的激光雷达图像,如图 13(b)所示。信噪比用于控制杂波干扰的模拟杂波 输入强度。分别使用 CFD 算法,小波变换算法和复 合算法生成激光雷达图像。模拟图像和理想图像之 间的均方误差(MSE),用以评估杂波识别算法的 性能。





图 14 给出了 SNR = 5 时分别使用 CFD,小波变换,复合算法生成的图像与误差图,激光雷达图像与理想图像的绝对距离误差如图 14 右侧所示。并与传统的匹配滤波,CFD 与匹配滤波的复合算法生成的图像比较,如图 15 所示,CFD 与小波变换的复合算法的生成图像的均方误差 MSE 最小,该算法性能更好。



图 14 CFD,小波变换,复合算法的图像 Fig. 14 CFD,wavelet transform,composite algorithm image





本文提出使用新型的阈值函数进行小波变换。 图 16 展示了 SNR = 5 时改进的小波变换与 CFD 的 复合算法生成雷达图像与误差图。由图中可以看 出,改进的小波变换生成的雷达图像的误差更小,有 更好的成像性能。



图 16 CFD 与新型小波变换复合算法生成的图像 Fig. 16 Image of CFD and new wavelet transform composite algorithm 三种算法的成像性能呈现出不同的变化趋势。 仿真图像 MSE 趋势图随信噪比变化如图 17 所示。 当 SNR < 6 时,小波变换比 CFD 的均方误差更小。 CFD 算法是利用接收脉冲触发时间测量,接收脉冲 在信噪比过小时受到杂波的严重干扰,小波变换可 以在去噪的同时提取信号的特征。因此信噪比较小时,小波变换在杂波严重的环境中更容易检测到信号,有更好的成像性能。CFD 与小波变换的复合算法生成的图像的 MSE 远远小于 CFD 和小波变换的 MSE,复合算法具有更好的成像性能。



Fig. 17 Curves of MSE and SNR of three algorithms

本文提出的一种改进的小波变换与 CFD 相结 合生成雷达图像方法,和小波变换与改进的小波变 换方法的 MSE 结果如表 1 所示。改进的小波变换 的雷达图像的均方误差小于小波变换的雷达图像的 均方误差,证明了改进的小波变换与 CFD 结合的复 合算法具有更好的成像性能。

表 1 小波变换与改进小波变换的 MSE Tab. 1 Wavelet transform and MSE of improved

wave	let	transform
------	-----	-----------

SNR	小波变换的 MSE	改进小波变换的 MSE
1	9. 486	8. 1136
2	9.459	8.003
3	9. 4801	8. 0557
4	9. 4363	7. 9843
5	9. 5508	7. 9065
6	9. 3487	7. 9055
7	9.41	7. 9817
8	9.44	7. 9448
9	9. 4469	7. 8525
10	9. 4485	7. 9941
11	9. 4663	7. 9285
12	9. 5273	7. 8616
13	9. 5213	7. 8734
14	9. 4569	7. 9079

5 结 论

本文利用由激光脉冲发射、杂波干扰、激光脉冲 接收和生成目标图像构成的仿真模型,提出了 CFD 与小波变换的复合算法进行雷达成像,分别使用恒 比鉴别算法,小波变换算法,恒比鉴别和小波变换的 复合算法生成激光雷达图像。与传统的匹配滤波, CFD 与匹配滤波的复合算法比较,证明 CFD 与小波 变换的复合算法有更好的成像性能。同时为了进一 步提高新复合算法的性能,提出了一种基于新型的 阈值函数的小波变换算法与恒比鉴别结合,新型的 小波变换具有更好的成像性能。对雷达图像处理有 借鉴意义。

参考文献:

- Blanquer E. Ladar proximity fuze-system study [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology(KTH), 2007.
- [2] Xu Tong. Research on the distance determination algorithm of laser proximity fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese) 徐彤. 激光近炸引信定距算法的研究[D]. 南京:南京 理工大学, 2010.

- [3] Zhang Yanmei, Li Huan, Guo Haichao, et al. Clutter discrimination algorithm simulation in pulse laser radar imaging, 2015, 9674:967409 - 967409 - 6.
- [4] Steinvall OK, Carlsson T. Three-dimensional laser radar modeling [C]. Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001:23 - 34.
- [5] Wang Shuai, Sun Huayan, Guo Huichao. Error analysis of time discrimination module based on simulink [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2):137 143. (in Chinese)
 王帅,孙华燕,郭惠超. 基于 Simulink 的时刻鉴别模块 误差分析[J]. 激光与红外,2017,47(2):137 143.
- [6] Accetta J S,Shumaker D L. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. Infrared Information Analys, SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [7] Ran Lilin, Li Quanliang. Discussion on an Air-to-Air missile active laser proximity fuze scheme [J]. Aviation Weapons, 2002, (1):10-13. (in Chinese)
 冉黎林,李全良. 一种空空导弹主动激光近炸引信方案探讨[J]. 航空兵器, 2002, (1):10-13.
- [8] A Burton, J Mountford, A Garrod. An air target engagement simttlation for radar proximity fuze development and performance assessment [J]. IEE Colloguium on Radar System Modelling, 1998:3/1 - 3/7.