

高重频距离选通水下激光雷达图像噪声特性分析

戴路, 张晓晖

(海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 高重频距离选通水下激光雷达采用多脉冲累积方式成像。分析高重频距离选通水下激光雷达图像噪声特性,是进一步采用图像后期处理方式提高成像质量的必要工作。通过对加性噪声和乘性噪声特性进行分析,对单脉冲距离选通水下激光雷达图像、高重频距离选通水下激光雷达图像和经多帧平均后的高重频距离选通水下激光雷达图像的噪声特性进行了分析。实验结果表明,单脉冲距离选通水下激光雷达图像主要受到乘性噪声的影响,高重频距离选通水下激光雷达图像受到加性噪声和乘性噪声两种噪声的双重影响,并且当对高重频距离选通水下激光雷达图像做多帧累加平均后,图像主要含有乘性噪声。

关键词: 激光雷达; 高重频水下成像; 噪声特性; 互补累积分布函数; 曲线拟合

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0085-04

Noise Characteristic Analysis of High-Repetition-Rate Range-Gated Underwater Lidar Image

DAI Lu, ZHANG Xiao-hui

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: High-repetition-rate range-gated underwater lidar imaging is achieved by multi-pulse accumulation. Noise characteristic analysis of the high-repetition-rate range-gated underwater lidar image is a necessary step for further improving the imaging quality by image post-processing. Through an analysis of the characteristics of both additive noise and multiplicative noise, noise characteristics of the single pulse range-gated underwater lidar image, high-repetition-rate range-gated underwater lidar image and multi-frame averaged high-repetition-rate range-gated underwater lidar image are analyzed. The experimental results show that: 1) The single pulse range-gated underwater lidar image is mainly affected by the multiplicative noise; 2) The high-repetition-rate range-gated underwater lidar image is affected by both the additive noise and multiplicative noise; and 3) After multi-frame averaged, the high-repetition-rate range-gated underwater lidar image mainly contains multiplicative noises.

Key words: lidar; high-repetition-rate underwater imaging; noise characteristic; Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF); curve fitting

0 引言

高重频距离选通水下激光雷达采用高重复频率脉冲激光器作为照明光源、增强电荷耦合器件(Intensified Charge Coupled Device, ICCD)作为成像器件,相对于传统单帧单脉冲距离选通成像系统^[1-2],在一帧成像周期累积多个脉冲,实现多次曝光成像^[3]。在实际

应用中,由于水体对入射光会产生严重的后向散射,以及环境光和成像器件等影响,图像存在大量噪声。因此,对于高重频距离选通水下激光雷达图像噪声的分析是后续进行图像处理提高图像质量的重要前期工作^[4-5]。本文通过对加性噪声和乘性噪声特性进行分析,对单脉冲距离选通水下激光雷达图像、高重频距离选通水下激光雷达图像和经多帧平均后的高重频距离选通水下激光雷达图像的噪声特性进行了分析。实验结果表明,单脉冲距离选通水下激光雷达图像主要受到乘性噪声的影响,高重频距离选通水下激光雷达图像受到加性噪声和乘性噪声两种噪声的双重影响,并

收稿日期:2014-02-20

修回日期:2014-12-31

基金项目:部级预研项目(4010501050401)

作者简介:戴路(1986—),男,山东济南人,博士生,研究方向为激光水下成像图像处理。

且当对高重频距离选通水下激光雷达图像做多帧累加平均后,图像主要含有乘性噪声。

1 图像信号和噪声构成分析

1.1 噪声源分析

高重频距离选通水下激光雷达采用 ICCD 作为系统关键成像器件,其主要由光电阴极、微通道板、荧光屏和 CCD 组成。噪声则由像增强器和 CCD 两部分产生的噪声组成。ICCD 输出图像的噪声是其各组成部分各类噪声的综合,也是整个系统时间域噪声与空间域噪声的综合。

噪声按产生过程可以分为^[6-7]:1)信号的内在噪声,也称作输入噪声或者光子噪声,指光信号辐射过程中出现的光量子随机起伏;2)暗电流噪声,由于温度的影响和材料本身的性质,即使在无光照的情况下光电阴极也会有暗电子逸出;3)读出噪声,即从 CCD 读出信号、量化过程中引入的噪声,如复位噪声和产生复合噪声等。在 ICCD 中,微通道板(Microchannel Plate, MCP)的电子增益倍数很高^[8-9]。在高增益作用下,进入到 MCP 之前引入的噪声对信号的影响将是主要因素,因此对成像质量影响更大的是像增强器的噪声。

根据信号和噪声的关系,噪声可以分为加性噪声和乘性噪声。当噪声与信号呈不相关的独立过程时为加性噪声,当噪声与信号相关时,噪声为乘性噪声^[10]。

1.2 图像噪声统计特性

1.2.1 加性噪声统计特性

图像的加性噪声统计特性可表示为

$$I(i, j) = I_0(i, j) + n_1(i, j) \quad 0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1 \quad (1)$$

式中: $I(i, j)$ 为 (i, j) 处的像素强度; $I_0(i, j)$ 为图像不含噪声处的像素强度; $n_1(i, j)$ 为零均值高斯随机噪声,服从独立同分布,并且标准差为 σ_1 ; M 和 N 为图像的行与列。当图像为均匀图像时,假设目标为具有高斯分布的加性噪声的图像概率密度函数为

$$p_I(I) = \frac{\exp\left[-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma^2}\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma^2}\right]dI} \quad I \geq 0 \quad (2)$$

图像强度用灰度表示,灰度超过阈值 I 的概率 $P(I)$ 为

$$P(I) = \int_I^\infty p_I(I')dI' = \frac{\int_I^\infty \exp\left[-\frac{(I'-I_0)^2}{2\sigma^2}\right]dI'}{\int_0^\infty \exp\left[-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma^2}\right]dI} \quad I \geq 0 \quad (3)$$

由上式可以看出,概率 $P(I)$ 即为灰度值的互补累积分布函数(ICDF)。由于信号与噪声不相关,得出

$I(i, j)$ 噪声方差为

$$\text{var}[I(i, j)] = E[(I(i, j) - E[I(i, j)])^2] = \text{var}[I_0(i, j)] + \text{var}[n_1(i, j)] \quad (4)$$

在均匀目标条件下, $\text{var}[I_0(i, j)] = 0$,则图像方差为

$$\text{var}[I(i, j)] = \sigma_1^2 \quad (5)$$

将一幅图像以某像素点为中心建立 $m \times m$ 模板,则模板的均值和方差为像素点的局部均值和方差。若局部噪声方差相同,则逐点计算像素方差得到的方差图应为一幅相对平坦的图像^[11]。

1.2.2 乘性噪声统计特性

图像的乘性噪声统计特性可表示为

$$I(i, j) = I_0(i, j) \cdot n_2(i, j) \quad 0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1 \quad (6)$$

式中, $n_2(i, j)$ 为独立同分布的归一化均值噪声,标准差为 σ_2 。在均匀目标的假设条件下,并假设乘性噪声服从负指数分布,灰度超过阈值 I 的概率 $P(I)$ (互补累积分布函数)为

$$P(I) = \int_I^\infty p_I(I')dI' = \exp\left[-\frac{I}{\langle I \rangle}\right] \quad (7)$$

可得 $I(i, j)$ 的均值和方差分别为

$$E[I(i, j)] = E[I_0(i, j)] \cdot E[n_2(i, j)] = I_0(i, j) \quad (8)$$

$$\text{var}[I(i, j)] = E[(I_0(i, j) \cdot n_2(i, j) - E[I_0(i, j)] \cdot n_2(i, j))]^2 = I_0^2(i, j) \cdot \sigma_2^2 \quad (9)$$

同理,若局部噪声方差相同,则逐点计算像素方差得到的方差与均值平方比图应为一幅相对平坦的图像。计算图像的 ICDF 曲线,并对曲线进行拟合,当原数据曲线更接近高斯分布时,可以判定图像以加性噪声为主;当原数据曲线更接近负指数分布时,则图像以乘性噪声为主。

2 不同水下图像噪声特性分析

本节通过对水池实验得到的单脉冲距离选通水下激光雷达图像、高重频距离选通水下激光雷达图像以及经过多帧累加平均的高重频距离选通水下激光雷达图像进行分析,根据上节的分析观察对两种图像处理得到方差图和方差均值之比图分析,并将图像的 ICDF 曲线与高斯分布及负指数分布的 ICDF 曲线相对比,来得到不同图像噪声特性。

2.1 单脉冲距离选通水下激光雷达图像

图 1a 是单脉冲距离选通水下激光雷达图像的目标靶板部分,成像距离为 25 m,门宽 10 ns,激光器能量为 100%,ICCD 增益为 1400 V;图 1b 和图 1c 分别是图 1a 的方差图和方差与均值平方的比值图。从图 1b 可以看出,白色条纹的方差大,黑色条纹的方差小;而图

1c 目标靶板的黑白条纹的方差与均值平方比值小。

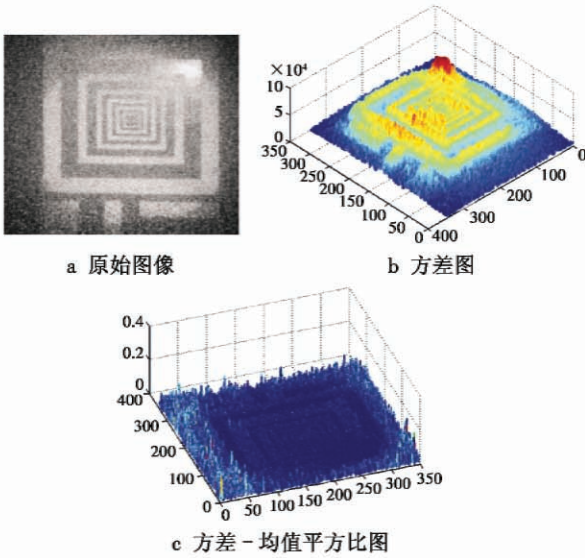


图 1 单脉冲距离选通水下激光雷达图像特性
Fig. 1 Characteristic of single pulse range-gated underwater laser radar image

由图 2 可以看出,单脉冲距离选通水下图像 ICDF 曲线拟合更接近于负指数分布。由上述分析可以得到,单脉冲距离选通水下图像噪声由乘性噪声和加性噪声混合而成,且以乘性噪声为主。

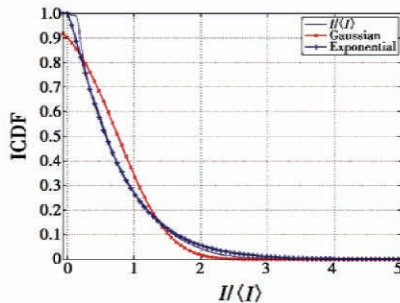


图 2 单脉冲图像像素灰度 ICDF 曲线拟合
Fig. 2 The ICDF fitting curve of the single pulse image grayscale

2.2 高重复脉冲距离选通水下激光雷达图像

图 3a 是高重复距离选通水下激光雷达原始图像,成像距离为 20 m,门宽 20 ns,激光器能量为 100%,ICCD 增益为 1250 V;图 3b 和图 3c 分别是图 3a 的方差图和方差与均值平方的比值图。

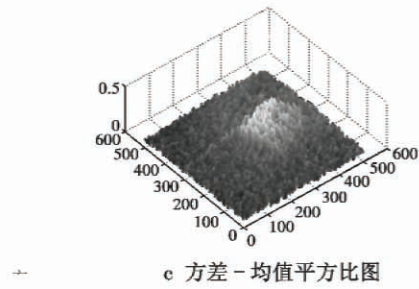
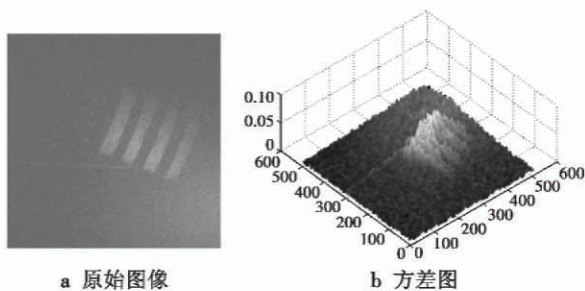


图 3 高重复距离选通水下激光雷达图像特性
Fig. 3 Characteristic of high-repetition-rate range-gated underwater laser radar image

由图 3 可以看出,高重复距离选通水下激光雷达图像中目标白色条纹的方差和方差与均值的比值均高于黑色条纹以及背景,图像不平坦。高重复图像像素灰度 ICDF 曲线拟合如图 4 所示。

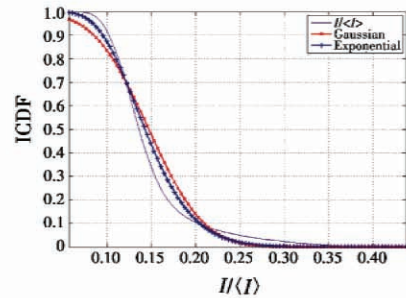
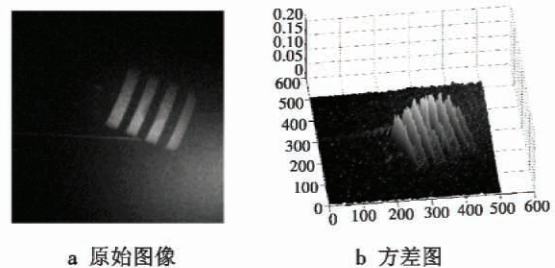
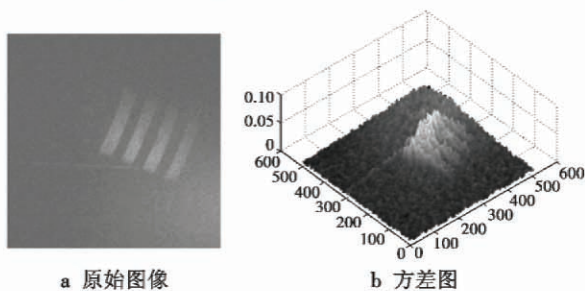


图 4 高重复图像像素灰度 ICDF 曲线拟合
Fig. 4 The ICDF fitting curve of the high-repetition-rate image grayscale

由图 4 可以看出,高重复距离选通水下图像 ICDF 曲线拟合既不服从负指数分布,也不服从高斯分布,但是相对来说接近负指数分布。因此,可以判定高重复距离选通水下激光雷达图像同时受到加性噪声和乘性噪声的影响,且两种噪声的影响都很大。

2.3 经多帧平均的高重复脉冲距离选通水下激光雷达图像

图 5a 是经过多帧累加平均的高重复距离选通水下激光雷达原始图像,成像距离为 20 m,门宽 20 ns,激光器能量为 100%,ICCD 增益为 1250 V;图 5b 和图 5c 分别是图 5a 的方差图和方差与均值平方的比值图。



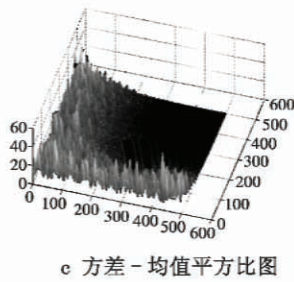


图5 经多帧平均的高重复距离选通水下激光雷达图像特性

Fig. 5 Characteristic of high-repetition-rate range-gated underwater laser radar image

由图5可以看出,经过多帧累加平均的高重复距离选通水下激光雷达图像中目标白色条纹的方差高于黑色条纹以及背景,图像不平坦;目标区域的方差与均值平方的比值相对于背景不明显,目标区域平坦。经多帧平均的高重复图像像素灰度 ICDF 曲线拟合如图6所示。

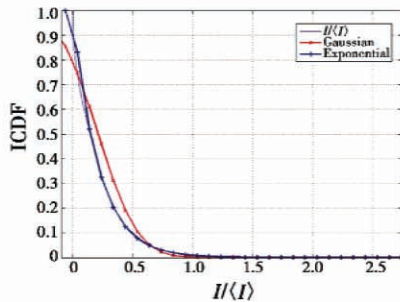


图6 经多帧平均的高重复图像像素灰度 ICDF 曲线拟合

Fig. 6 The ICDF fitting curve of the high-repetition-rate image grayscale

由图6可以看出,经过多帧累加平均后的高重复距离选通水下图像 ICDF 曲线拟合近似服从负指数分布,多帧累加平均后图像的加性噪声得到了有效的抑制,与图5的分析结果一致。但是图像的乘性噪声并不能通过累加消除,只能通过后期图像处理消除。

3 结论

分析图像噪声特性,是进一步采用图像后期处理方式提高成像质量的必要工作。本文对高重复距离选通水下激光雷达图像噪声特性进行了分析。通过对加性噪声和乘性噪声特性进行分析,对单脉冲距离选通水下激光雷达图像、高重复距离选通水下激光雷达图像和经多帧平均后的高重复距离选通水下激光雷达图像的噪声特性进行了分析。实验结果表明,单脉冲距离选通水下激光雷达图像主要受到乘性噪声的影响,高重复距离选通水下激光雷达图像受到加性噪声和乘性噪声两种噪声的双重影响,并且当对高重复距离选通水下激光雷

达图像做多帧累加平均后,图像主要含有乘性噪声。

参考文献

- [1] GE W L, HAN H W, ZHANG X H, et al. A new kind of underwater photoelectric imaging system [C]//SPIE, 73824T. doi:10.1117/12.835729.
- [2] HAN H W, ZHANG X H, GE W L. Performance evaluation of underwater range-gated viewing based on image quality metric[C]//Proceedings of ICEMI, 2009:441-444.
- [3] 戴路,张晓晖. 脉冲计数可调式高重复水下距离选通成像系统[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(4):78-82. (DAI L, ZHANG X H. High-repetition-rate underwater range-gated imaging system with adjustable pulse number [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(4):78-82.)
- [4] 韩宏伟,张晓晖,葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1):220-226. (HAN H W, ZHANG X H, GE W L. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1):220-226.)
- [5] 左昉,高雅允. 微光成像系统信噪比及图像探测特性研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(2):185-187. (ZUO F, GAO Z Y. Research on SNR and image detecting property of low light level imaging system[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(2):185-187.)
- [6] WANG X W, ZHOU Y, FAN S T, et al. Range-gated laser stroboscopic imaging for night remote surveillance [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(9):94-97.
- [7] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):709-713 (YAN F, YU Z J, YU X, et al. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4):709-713.)
- [8] 周跃,闫丰,谷勇强,等. “日盲”紫外 ICCD 的信噪比[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11):2712-2717. (ZHOU Y, YAN F, GU Y Q, et al. SNR of solar blind ultraviolet ICCD [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11):2712-2717.)
- [9] MORAN S E, ULICH B L, ELKINS W P. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance[J]. SPIE, 3137:430-457.
- [10] 赵云,李卫江,王友强,等. ICCD 增益对激光主动成像系统成像品质的影响[J]. 装备制造技术, 2011(4):37-39. (ZHAO Y, LI W J, WANG Y Q, et al. Influence on image quality of laser active imaging system ICCD gain [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(4):37-39.)

(下转第94页)

- [13] JIANG Z P, LAURENT P. Design of robust adaptive controllers for nonlinear systems with dynamic uncertainty [J]. *Automatica*, 1998, 34(7):825-840.
- [14] 张天平,高志远. 具有动态不确定性的自适应动态面控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28(10):1541-1546, 1553. (ZHANG T P, GAO Z Y. Adaptive dynamic surface control including dynamic uncertainties[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(10):1541-1546, 1553.)
- [15] LIN W, QIAN C J. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems; a non-smooth feedback framework [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(5):757-774.
- [16] 夏晓南,张天平. 具有未建模动态系统的自适应动态面输出反馈控制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12):2129-2136. (XIA X N, ZHANG T P. Adaptive dynamic surface output feedback control for systems with unmodeled dynamics [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(12):2129-2136.)

(上接第 67 页)

- [5] 周旭宜,刘满仓. 国外激光制导武器现状与发展分析[J]. *飞航导弹*, 2013(11):25-29. (ZHOU X Y, LIU M C. Analysis of foreign laser guided weapons development [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2013(11):25-29.)
- [6] 夏新仁,冯金平. 激光制导武器的现在与将来[J]. *中国航天*, 2009(12):22-26. (XIA X R, FENG J P. Development of laser-guided weapons [J]. *Aerospace China*, 2009(12):22-26.)
- [7] 张翼飞,邓方林. 激光制导技术的应用及发展趋势[J]. *中国航天*, 2004(6):41-44. (ZHANG Y F, DENG F L. The status and future development of laser-guided weapons [J]. *Aerospace China*, 2004(6):41-44.)
- [8] 白毅,仲海东,秦雅娟,等. 国外制导炮弹发展综述[J]. *飞航导弹*, 2013(5):33-38. (BAI Y, ZHONG H D, QIN Y J, et al. Foreign guided projectile development review [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2013(5):33-38.)
- [9] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5):651-655. (WANG K B. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5):651-655.)
- [10] 李建中,彭其先,李泽仁,等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4):1117-1123. (LI J Z, PENG Q X, LI Z R, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4):1117-1123.)
- [11] 刘勇. 对激光主动成像制导武器告警探测技术分析[J]. *舰船电子对抗*, 2009, 32(6):47-50. (LIU Y. Analysis of warning and detecting technology for active laser imaging guided weapon [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2009, 32(6):47-50.)
- [12] 张英远. 激光对抗中的告警和欺骗干扰技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012. (ZHANG Y Y. Warning and deception jamming technology of laser countermeasure [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.)
- [13] 梁阔,冯源. 激光精确制导技术及其干扰技术分析[J]. *飞航导弹*, 2011(2):80-84. (LIANG K, FENG Y. Analysis of precision-guided laser technology and interference [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2011(2):80-84.)
- [14] 沈涛,宋建社. 激光制导武器实时波门选通信号技术分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2006(4):398-400. (SHEN T, SONG J S. Analysis of laser guidance weapon's real-time gate signal choosing technology [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006(4):398-400.)
- [15] 许毅芬,徐军. CO₂ 激光成像雷达及其在制导技术中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2008(s3):303-306. (XU Y F, XU J. CO₂ laser imaging radar and its application in guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(s3):303-306.)
- [16] 庄昕宇,陈兆兵. 半主动激光精确末制导武器的发展现状与趋势[J]. *舰船电子工程*, 2011(6):6-10. (ZHUANG X Y, CHEN Z B. Current status and its developing trend of semiactive laser guided weapon [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011(6):6-10.)

(上接第 88 页)

- [11] 李自勤,李琪,王骐. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. *中国激光*, 2004, 31(9):1081-1085. (LI Z Q, LI Q, WANG Q. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9):1081-1085.)