

文章编号: 1001-3806(2011)04-0518-04

## 水下激光图像序列的3维噪声分析

韩宏伟, 张晓晖\*, 葛卫龙

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

**摘要:** 为了研究距离选通水下激光成像系统输出图像帧序列的噪声特性, 采用3维噪声分析方法, 进行了理论分析和实验验证。为了解决实验数据集背景不均匀、样本数较少的问题, 根据单帧图像生成综合噪声图像, 组成模拟数据集, 取得了模拟数据集和实验数据集的3维噪声分析计算的数据, 并进行了比较。结果表明, 描述数据集在3个方向上均随机变化的“瞬态像素噪声”分量是距离选通水下激光图像序列的主要噪声源; 同时, 时域噪声的影响远大于空域噪声。这一结果对距离选通水下激光成像系统设计和图像去噪算法设计是有帮助的。

**关键词:** 成像系统; 噪声特性; 3维噪声分析; 综合噪声图像

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.019

### 3-D noise analysis of underwater laser image sequence

HAN Hong-wei, ZHANG Xiao-hui, GE Wei-long

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

**Abstract:** In order to study the noise characteristics of image frame sequence in a range-gated underwater laser imaging system, the method of 3-D noise analysis was adopted. In order to solve the problem of non-uniformity and sample inadequacy of the experimental data sets, simulated data set was composed of synthesized noise images produced according to single image frame. The calculation results of 3-D noise analysis based on the simulated data set and experimental data set were compared, which showed that the instant pixel noise describing the random variety along three directions was the main noise source in range-gated underwater laser image sequence and the effect of temporal noise was more severe than the spatial noise. Those results are helpful in the design of range-gated underwater laser imaging system and image denoising algorithm.

**Key words:** imaging system; noise characteristics; 3-D noise analysis; synthesized noise image

## 引言

为了克服水体及其中悬浮粒子的吸收和散射特性对水下光电成像的影响, 可以采用脉冲激光器和快速选通型成像器件组成距离选通水下激光成像系统, 通过利用后向散射光和目标反射光到达成像系统的时间差来抑制后向散射, 提高图像对比度<sup>[1]</sup>。但是, 当中远距离微弱目标成像时, 距离选通水下激光成像系统输出图像的质量依然可能不好, 其主要原因就是噪声的存在。

目前, 对于距离选通水下激光图像噪声特性的分析多是针对单帧的情况。然而距离选通水下激光成像系统输出的是图像帧序列, 对其噪声特性的分析还应在3维坐标系下进行, 把时间域随机过程和空间域随机过程按时空域随机过程统一描述。为此, 作者引入

3维噪声分析方法<sup>[2]</sup>, 对距离选通水下激光成像系统输出图像序列灰度波动的时空特性进行研究。

3维噪声分析是美国 FLIR92 模型的一部分<sup>[3]</sup>。该模型对热红外成像器件的性能进行建模和评价。但参考文献[4]中指出, 3维噪声分析方法适用于任何阵列成像器件或成像系统的噪声测量和评估。因此, 3维噪声分析方法的适用范围已被扩大, 仅就国内来讲, WANG 等人<sup>[5]</sup>和 LI 等人<sup>[6]</sup>将其用于增强型电荷耦合器件的噪声测量, 而 TANG 等人<sup>[7]</sup>把它应用到卫星图像的质量评价中。本文中是对3维噪声分析方法应用的新尝试, 因为距离选通水下激光成像系统输出图像的干扰既来自成像器件, 也来自水体。

3维噪声分析要求均匀的背景和尽量大的数据集, 而本文中的实验图像并不能完全满足这些要求。为此, 作者首先研究综合噪声图像生成方法, 通过综合噪声图像组成模拟数据集, 再对这些模拟数据集进行3维噪声分析, 最后对实际的小样本非均匀背景的图像序列进行3维噪声分析, 并和模拟数据集的计算结果进行比较。

作者简介: 韩宏伟(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为水下激光成像与图像处理。

\* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohui505@vip.sina.com

收稿日期: 2010-09-15; 收到修改稿日期: 2011-01-11

### 1 综合噪声图像

本文中,所谓综合噪声图像是指利用实际图像上一块背景相对比较均匀的区域生成的符合规定大小的噪声图像。作者提出3种综合噪声图像生成方法。

#### 1.1 3种综合噪声图像生成方法

1.1.1 基于随机抽取的综合噪声图像生成方法 基于随机抽取的综合噪声图像生成方法的核心思想是通过随机抽取样本图像的子块来填充出一幅综合噪声图像。假设样本图像的大小为 $[m, n]$ ,要生成的综合噪声图像的大小为 $[M, N]$ 。对综合噪声图像分块,每块的大小为 $K \times K$ ,块与块之间重叠的像素数为 $k$ 。对每一个子块,随机生成一个坐标 $(i, j)$ ,且 $0 \leq i \leq m - 1, 0 \leq j \leq n - 1$ ,然后把样本图像上以 $(i, j)$ 为中心,大小为 $K \times K$ 的灰度区域复制到综合噪声图像上对应的子块中去。重叠区域的像素以相邻子块上对应位置像素灰度的平均值作为最终的灰度值,以减弱块效应。

1.1.2 基于功率谱匹配的综合噪声图像生成方法 基于功率谱匹配的综合噪声图像生成方法的基本思想是使综合噪声图像的功率谱和样本图像的功率谱相匹配<sup>[8]</sup>,具体实现过程如下。设样本图像的傅里叶变换为 $W(f_v, f_h), 0 \leq f_v \leq m - 1, 0 \leq f_h \leq n - 1$ ,则样本图像的功率谱为:

$$S(f_v, f_h) = |W(f_v, f_h)|^2 \quad (1)$$

通过对 $S(f_v, f_h)$ 插值的方法得到新的功率谱 $S_u(f_v, f_h), 0 \leq f_v \leq M - 1, 0 \leq f_h \leq N - 1, v$ 和 $h$ 为变量。

接下来,随机生成一幅零均值、单位方差的高斯噪声图像,图像的大小为 $(M, N)$ 。该图像的傅里叶变换为 $\Psi(f_v, f_h)$ 。由此得到综合噪声图像的傅里叶谱为:

$$W_u(f_v, f_h) = \Psi(f_v, f_h) \sqrt{S_u(f_v, f_h)} \quad (2)$$

再通过傅里叶反变换得到最终的综合噪声图像。

1.1.3 基于2维直方图的综合噪声图像生成方法 基于2维直方图的综合噪声图像生成方法的基本思想是根据样本图像中各灰度级的邻域信息来得到综合噪声图像。2维直方图 $\{ \text{num}(G_1, G_2) \}$ 表示图像中满足灰度为 $G_1$ 、而其相关量为 $G_2$ 的像素的个数。在这里, $G_2$ 定义为像素的邻域灰度平均值,因此,对于某个灰度级 $g$ ,有:

$$h_g(k) = \frac{\text{num}(g, k)}{\sum_{l=0}^{255} \text{num}(g, l)}, (0 \leq k \leq 255) \quad (3)$$

这是样本图像中灰度级为 $g$ 的像素的邻域灰度分布的概率密度函数。

生成综合噪声图像时,从上到下,从左到右进行。对位置 $(i, j)$ 处的像素,根据上一个像素的邻域灰度 $g$

得到该位置的邻域灰度,具体做法是求解下式:

$$\sum_{l=0}^k \text{num}(g, l) = \text{rand} \quad (4)$$

式中,rand为 $[0, 1]$ 之间的随机数, $k$ 为所得到的 $(i, j)$ 处像素的邻域灰度。 $k$ 值叠加到 $(i, j)$ 像素的所有邻域像素上,最后通过平均得到最终的综合噪声图像。

#### 1.2 综合噪声图像生成方法比较

选取距离选通水下激光图像上一块背景比较均匀的区域作为样本图像,如图1a所示,大小为 $200 \times 200$ 。根据上节所述的3种方法生成大小为 $576 \times 720$ 的3幅综合噪声图像,图1b、图1c和图1d是从3幅图像上选取的大小为 $200 \times 200$ 的子图像。



Fig. 1 Sample image and synthesized noise images

通过图1b、图1c和图1d与图1a的统计特性的对比来比较3种综合噪声图像生成方法的性能,使用的统计特性指标为<sup>[9]</sup>:(1)均值 mean:数据的算数平均值,是对数据中心位置的度量;(2)内4分位数间距 interquartile:计算数据的75%和25%分位数之差,是对数据整体散度的鲁棒性估计;(3)峰度  $\gamma_1$ :是对单峰数据峰的平坦程度的度量;(4)偏度  $\gamma_2$ :是对数据围绕其平均值的对称情况的度量。如果偏度为负,则数据分布偏向于其均值的左边;反之,则偏向右边。

表1是对图1中4幅图像的统计指标的计算结果。从表中可以看出,方法1所得的综合噪声图像在均值、内4分位数间距和峰度3个指标上与样本图像最接近,而在偏度指标上与样本图像次接近。因此,选择方法1(基于随机抽取的方法)作为最终的综合噪声图像生成方法。

Table 1 Comparison among synthesized noise image generation methods

	sample	method 1	method 2	method 3
mean	26.0387	25.9047	38.2327	32.4992
interquartile	3	3	7	8
$\gamma_1$	8.0761	12.1278	2.9951	3.2376
$\gamma_2$	1.6613	0.4158	0.0122	0.4943

### 2 3维噪声分析方法

3维噪声分析将复杂的噪声降为易管理的分量集。它所需的实验数据是以一个有均匀恒定的背景为目标,成像系统连续采集噪声图像 $L$ 帧,每一帧图像具有 $M$ 行 $N$ 列,形成一个数据“立方体”。用 $U(t, v, h)$ 代表第 $t$ 帧 $v$ 行 $h$ 列的输出,其包含信号与噪声:

$$U(t, v, h) = S + N_T + N_V + N_H + N_{TV} + N_{TH} + N_{VH} + N_{TVH} \quad (5)$$

式中,  $S$  为 3 维数据组中所有点的总平均值, 它与信号输入的响应有关; 而其余 7 项用以表征沿 3 维方向即时间  $T$ 、空间垂直  $V$  和空间水平  $H$  波动的噪声过程, 这 7 项噪声总称为 3 维噪声, 它们的方差分别为  $\sigma_T, \sigma_V, \sigma_H, \sigma_{TV}, \sigma_{TH}, \sigma_{VH}$  和  $\sigma_{TVH}$ 。在对数据集进行零均值处理后, 7 个噪声项的计算过程可以用图 2 来表示。其中浅颜色的代表中间结果, 深颜色的代表最终的噪声项。

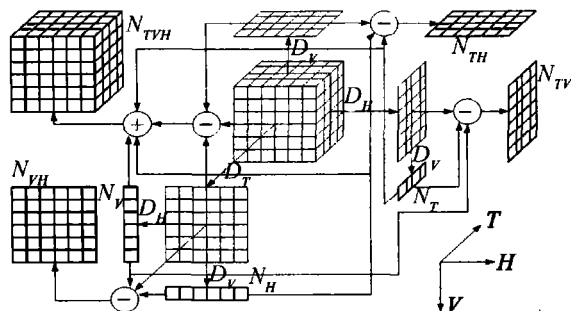


Fig. 2 Framework of 3-D noise calculation

这 7 个噪声项可以分成两类, 其中  $N_H, N_V, N_{VH}$  和时间无关, 被分成 1 类, 称为空域噪声; 第 2 类和 时间有关, 称为时域噪声, 包括  $N_T, N_{TH}, N_{TV}$  和  $N_{TVH}$ 。总的空域和时域噪声方差分为<sup>[10]</sup>:

$$\Omega_{\text{spatial}} = [\sigma_V^2 E_V + \sigma_H^2 E_H + \sigma_{VH}^2 E_V E_H]^{0.5} \quad (6)$$

$$\Omega_{\text{temporal}} = [\sigma_T^2 E_T + \sigma_{TV}^2 E_T E_V + \sigma_{TH}^2 E_T E_H + \sigma_{TVH}^2 E_T E_V E_H]^{0.5} \quad (7)$$

式中,  $E_T, E_V$  和  $E_H$  分别是时域积分因子、垂直积分因子

和水平积分因子, 它们反映了眼睛和大脑的积分作用对图像帧序列波动感官的影响。  $E_T$  的定义为:

$$E_T = \frac{\alpha_T}{F_t e_t} \quad (8)$$

式中,  $F_t$  是成像系统的帧率,  $e_t$  是人眼的积分时间,  $\alpha_T$  是采样校正因子。  $E_V$  和  $E_H$  的定义为:

$$E_V = \frac{\alpha_V}{R_V L_V} \quad (9)$$

$$E_H = \frac{\alpha_H}{R_H L_H} \quad (10)$$

式中,  $\alpha_V$  和  $\alpha_H$  分别为垂直和水平校正因子,  $R_V$  和  $R_H$  分别为垂直和水平采样率 (points/mrad),  $L_V$  和  $L_H$  近似为图像的垂直和水平维数。通常认为  $\alpha_T, \alpha_V$  和  $\alpha_H$  近似为 1。

### 3 实验结果与分析

按方法 1 根据基于随机抽取的方法生成单帧综合噪声图像, 再由这些单帧图像组成 3 维模拟数据集, 共构造了 4 个综合噪声图像帧序列, 大小为  $576 \times 720 \times 200$ 。图 3 是其中的单帧综合噪声图像的一部分 (大小为  $200 \times 200$ )。对这 4 个模拟图像帧序列进行 3 维噪声分析, 所得到的 7 个噪声分量的标准差如表 2 所示。



Fig. 3 Synthesized noise image frame sequence

Table 2 Standard deviation error of noise components in the four simulated image frame sequences

	$S$	$\sigma_T$	$\sigma_H$	$\sigma_V$	$\sigma_{TH}$	$\sigma_{TV}$	$\sigma_{VH}$	$\sigma_{TVH}$
sequence 1	34.5060	0.0565	0.1049	0.0953	0.4793	0.5080	0.4610	4.5427
sequence 2	78.4182	0.1960	0.4195	0.1806	1.5513	1.5880	1.3456	13.4283
sequence 3	161.1132	0.1451	0.3199	0.2428	1.1935	1.1649	0.9449	9.4559
sequence 4	238.6776	0.0171	0.0723	0.0730	0.1764	0.1908	0.2459	2.3402

根据 (6) 式和 (7) 式计算总的空域噪声标准差  $\Omega_{\text{spatial}}$  和总的时域噪声标准差  $\Omega_{\text{temporal}}$ 。设成像系统的帧率为 5Hz, 人眼的积分时间为 0.1s, 即  $F_t = 5, e_t = 0.1$ ; 设视场角为 0.1rad, 图像大小为  $576 \times 720$ , 则  $R_V = 5.76, R_H = 7.2$ , 另  $L_V = L_H = 200$ , 计算结果如表 3 所示。

Table 3 Comparison between spatial and temporal noise in the four simulated image frame sequences

	sequence 1	sequence 2	sequence 3	sequence 4
$\Omega_{\text{spatial}}$	0.0028	0.0084	0.0078	0.0020
$\Omega_{\text{temporal}}$	0.0824	0.2746	0.2105	0.0253

从表 2 可以看出, 随着图像平均灰度的上升, 各噪声项的标准差也升高, 表明它们的波动性增加, 但由于图像动态范围的限制, 当图像平均灰度上升到一定程度后, 噪声项的波动性将下降。

在某一固定的图像亮度下, 各个噪声项的扰动程度不一样。当只考虑单一变量的影响时, 噪声的方差并不是很大; 增加 1 维变量后, 噪声的方差有所增大; 而描述数据集在 3 个方向上均随机变化的“瞬态像素噪声”  $N_{TVH}$  在所有噪声分量中所占比重最大, 其方差  $\sigma_{TVH}$  远大于其它噪声分量。

从表 3 可以看出, 时域噪声的标准差远大于空域噪声的标准差。这是由于  $N_{TVH}$  分量的主导作用, 和时间有关的随机波动对人眼的影响大于单纯由行列灰度变化所产生的随机波动对人眼的影响。

以上是对模拟数据集的 3 维噪声分析结果, 对实际距离选通水下激光图像序列的分析由于受当时实验条件和存储空间的限制, 图像并不是针对均匀背景的,

且图像帧数有限。图4是用来进行分析的10段实际

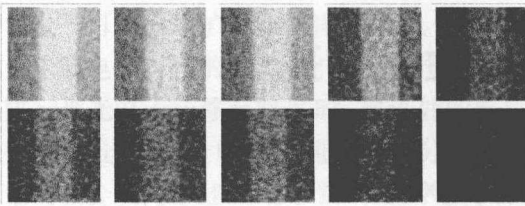


Fig. 4 Experimental images used for 3-D noise calculation

Table 4 Result of 3-D noise calculation for target at 25m far away

$Q_0/mJ$	$S$	$\sigma_T$	$\sigma_H$	$\sigma_V$	$\sigma_{TH}$	$\sigma_{TV}$	$\sigma_{VH}$	$\sigma_{TVH}$
200	236.9836	0.6012	3.0859	1.1056	0.8547	1.2958	1.8115	3.7896
195	227.3130	0.7190	5.7242	2.8172	1.1174	2.6540	2.5649	6.5490
190	224.6623	1.2131	4.9397	1.8730	1.0964	2.8518	2.8486	6.8591
185	183.1060	1.3559	5.2527	1.8390	1.4119	4.0428	3.8786	9.7563
180	121.1460	1.3565	4.8249	2.7259	2.7597	6.1272	5.5799	14.8442

Table 5 Result of 3-D noise calculation for target at 30m far away

$Q_0/mJ$	$S$	$\sigma_T$	$\sigma_H$	$\sigma_V$	$\sigma_{TH}$	$\sigma_{TV}$	$\sigma_{VH}$	$\sigma_{TVH}$
200	151.9531	2.2312	1.9590	3.1132	2.3326	6.2711	4.8103	13.3901
195	140.3808	1.6801	1.9567	3.2191	2.5545	7.3739	5.0665	14.5986
190	128.2103	4.6047	1.3988	3.0046	3.4799	8.1565	5.6880	15.2378
185	97.9526	2.8220	1.1340	4.0866	3.7583	8.7627	5.6872	16.6402
180	56.5128	1.6709	1.7374	2.6070	2.0524	6.7210	4.3970	13.2774

准差的计算结果。表6是对实验图像序列时域与空域

Table 6 Comparison between spatial and temporal noise in the experimental image frame sequences

	$Q_0/mJ$	200	195	190	185	180
25m	$\Omega_{spatial}$	0.1239	0.2435	0.2000	0.2103	0.2129
	$\Omega_{temporal}$	0.8549	1.0306	1.7248	1.9338	1.9577
30m	$\Omega_{spatial}$	0.1490	0.1529	0.1359	0.1757	0.1266
	$\Omega_{temporal}$	3.1795	2.4194	6.5324	4.0292	2.3986

噪声的计算结果。从以上3个表可以看出,由于样本数较少和背景内容的影响,各个噪声项随激光器能量或图像平均亮度变化的规律比较混乱,但仍然比较显而易见的是:首先, $N_{TVH}$ 分量的方差相比于其它噪声分量的方差仍然占绝对主导地位,尤其是当目标回波能量较弱时;其次,时域噪声对人眼感观的影响仍然远大于空域噪声。这都是与模拟数据集的计算结果相符的。从这些计算结果可以得出:在距离选通水下激光成像雷达去噪滤波器的设计中应着重时域滤波器的设计;另外,时域噪声和空域噪声的差异除了作为时域噪声一项的 $N_{TVH}$ 分量的作用外,还因为加权因子 $E_T$ 的作用比较明显。因此,提高激光重复频率从而提高图像的帧率可以提高图像序列的信噪比。

#### 4 结论

为了从时空统一的角度分析距离选通水下激光系统输出图像序列的噪声特点,采用了3维噪声分析方法。为了解决实验样本数据集背景不均匀、样本数较少的问题,首先根据综合噪声图像生成方法生成模拟3维数据集,然后比较模拟数据集与实验数据集的3

的距离选通水下激光图像帧序列,每段的大小为 $100 \times 100 \times 30$ 。其中,图4第1行是目标板距离成像系统25m、激光器单脉冲输出能量 $Q_0$ 从200mJ等间隔变化到180mJ时的成像结果;第2行是在相同的激光器能量变化条件下,目标板距离成像系统30m时的成像结果。

表4是对25m目标图像序列各噪声项标准差的计算结果。表5是对30m目标图像序列各噪声项标

准差的计算结果。结果表明, $N_{TVH}$ 噪声是图像序列的主要噪声,且时域噪声的影响大于空域噪声,从而指出提高激光频率、进行时域滤波可以提高距离选通水下激光图像序列的信噪比。

#### 参考文献

- [1] XU X W, GUO J, YU Q Y, *et al.* Key technique of laser range gated imaging[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 603-605 (in Chinese).
- [2] D' AGOSTINO J, WEBB C. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1488: 110-121.
- [3] SCOTT L, D' AGOSTINO J. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1689: 194-203.
- [4] SCOTT L. Modeling staring thermal system with FLIR92[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1969: 21-26.
- [5] WANG J P, WANG Sh R, SONG K F, *et al.* Image noise suppression and performance evaluation of ICCD[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(8): 1032-1034 (in Chinese).
- [6] LI Sh C, XUN Z Ch, XIAO Sh W. 3-D noise measurement and analysis for a low-light-level ICCD imaging system[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(3): 463-466 (in Chinese).
- [7] TANG H R, XIANG M Sh, WU Y R, *et al.* A noise analysis method to evaluate image quality of optical satellites[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(3): 370-374 (in Chinese).
- [8] EDDIE J, CHA J, KRAPELS K. Assessment of 3-D methodology for thermal sensor simulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4372: 154-161.
- [9] LI T, HE Y J, LIU Zh J, *et al.* Application guide of matlab toolbox applied mathematics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 20-33 (in Chinese).
- [10] KOC C. Modeling and experimental testing for future development of night vision electro-optic (NVEO) FLIR92 model[R]. Monterey, USA: Naval Postgraduate School, 1995: 33-34.