

# 水下激光成像系统的 MTF 分析

刘雪明 张明德 孙小菡  
(东南大学电子工程系 南京 210096)

**提要** 讨论了用调制传递函数(MTF)表征水下激光成像质量特性及其影响因素的量值关系,给出了计算该系统 MTF 的理论近似公式,得出了 MTF 与空间角频率、目标距离及接收视场角的关系,结果表明采用窄视场的同步扫描技术能有效地提高系统的成像质量。

**关键词** 成像质量, 调制传递函数, 激光

## 1 引 言

水下激光成像系统是在水下这个特殊介质中进行工作的,由于水介质对光的吸收和散射非常严重,一方面光在水中传输损耗很大,使得成像距离不能很远,另一方面水介质产生的散射光又会影响成像质量。无论是海水还是纯水,水下传输的最佳光波段为 470~ 540 nm<sup>[1]</sup>。与声呐水下成像相比,水下激光成像技术潜在的高分辨率能力,激励着人们探索和寻找新的技术和

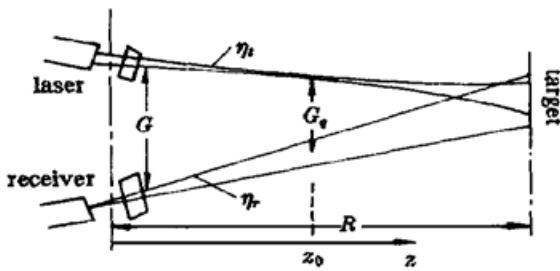


图 1 同步扫描系统的光路原理图

Fig. 1 Schematic light diagram of the synchronous scanning system

和手段来提高它的作用距离和成像质量。其中比较典型的一种技术是同步扫描技术,如图 1 所示。它利用扫描光线和接收视线的同步,尽量减少被照明水体和接收器视场的交叠区域,使得前向、后向散射光尽量少地进入接收器中,有效地扩大了成像距离和改善了成像质量。目前,比较典型的水下同步扫描激光成像系统是美国 Westinghouse 公司为美国海军生产的一种机械同步扫描 SM 2000 型成像系统,该系统在一般条件下,成像距离可达 18 m<sup>[2]</sup>。另外,距离选通技术也能有效地提高水下激

光成像系统的成像距离和成像质量<sup>[3]</sup>。在讨论成像质量好坏时,一般不直接使用分辨率,而是采用调制传递函数(MTF),即从物到像对比度的传递。因为前者不但与测试目标的对比度有关,而且测试结果还与接收器件有关,带有一定的主观性;后者则表示了在不同分辨率水平上测量的图像对比度,反映了分辨率降低的趋势,全面地、客观地评价了像质的好坏。研究光波在混浊介质中传输时,一般采用小角度近似(SAA)和 Monte Carlo 法,其中前者比后者具有模型直观、计算简便等优点<sup>[4-10]</sup>,但它们一般是讨论光波在大粒子颗粒模拟混浊介质中的传输特性,并仅考虑了前向散射光的影响,具有一定的局限性。由于光波在海水介质中传输时,大部分

散射光集中在入射光束方向的小角度附近<sup>[11]</sup>, 于是本文利用小角度近似, 分析了前向散射光和后向散射光对 MTF 的影响。讨论了水下激光成像系统的 MTF 与其主要影响因素的关系。

## 2 水下激光成像系统的 MTF 理论分析和数值计算

### 2.1 MTF 的理论分析

光在水中传输, 接收到的光信息可展开由三部分组成, 如图 2 所示。图 2(a) 表示输入光束。图 2(b) 表示经过水介质吸收、散射损耗后的成像光束(1) 和被目标与接收器之间水介质散射、且直接影响目标细节分辨率的前向散射光(2), 以及被光源与目标之间水介质散射的后向散射光(3)<sup>[12]</sup>。后向散射光进入到接收器中, 重叠在图像上就形成背景光, 降低了图像对比度。图 2(c) 表示三种接收光分量之和。由于后向散射光影响像的对比度, 前向散射光影响像的分辨细节, 且水下激光成像系统可近似为线性系统<sup>[12]</sup>, 于是该系统的前向散射光的 MTF<sub>f</sub> 和后向散射光的 MTF<sub>b</sub> 彼此不相干, 它们的乘积就是该系统的 MTF, 即

$$\text{MTF} = \text{MTF}_f \times \text{MTF}_b \quad (1)$$

无论湖泊水还是海水, 由于水中悬浮物、溶解物质、颗粒粒子等对光的严重散射, 使得散射特征曲线在入射光束方向上明显延伸, 前向散射光的光通量与后向散射光的光通量的比值, 即非对称系数, 一般高达 60~ 80 以上(水分子散射的非对称系数为 1), 并随这些粒子的增大, 前向散射更明显<sup>[11, 13, 14]</sup>。于是我们在分析水下激光成像系统 MTF 时, 使用小角度近似计算。由于水介质的一次和多次散射效应, 一束准直光束并不聚焦于一点而是形成一个模糊圈, 这模糊圈的分布就称为点扩展函数 PSF(point spread function)。水介质中传输的 MTF 比较复杂, 影响 MTF 的主要因素是光在水介质中的散射(为了研究方便, 不考虑太阳光、微生物产生的荧光等噪声光对系统 MTF 的影响)。因此在仅考虑前向散射光具有围绕非散射光的圆对称和小角度情况下, MTF<sub>f</sub> 可由 PSF 的一维傅里叶-贝塞耳的形式表示<sup>[15]</sup>

$$\text{MTF}_f(\psi, R) = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} R^2 \text{PSF}(\theta, R) J_0(2\pi\psi\theta) \theta d\theta \quad (2)$$

式中  $\psi$  为空间角频率,  $R$  为水中光程,  $J_0(2\pi\psi\theta)$  为零阶第一类贝塞尔函数,  $\theta$  为光子流方向的角度,  $\theta_{\max}$  为最大积分角。

点扩展函数 PSF 可以通过体积散射函数 VSF 得出。但不同的水介质, 它的体积散射函数 VSF 有较大的差别。因此, 不同水质的点扩展函数也不相同。在小角度近似下, PSF 与 VSF 的关系是<sup>[15, 16]</sup>

$$D(\psi) = S_t - Q(\psi) \quad (3)$$

$$D(\psi) = -\frac{1}{R} \ln \left[ 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} R^2 \text{PSF}(\theta, R) J_0(2\pi\psi\theta) \theta d\theta \right] \quad (4)$$

$$S_t = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} \text{VSF}(\theta) \theta d\theta \quad (5)$$

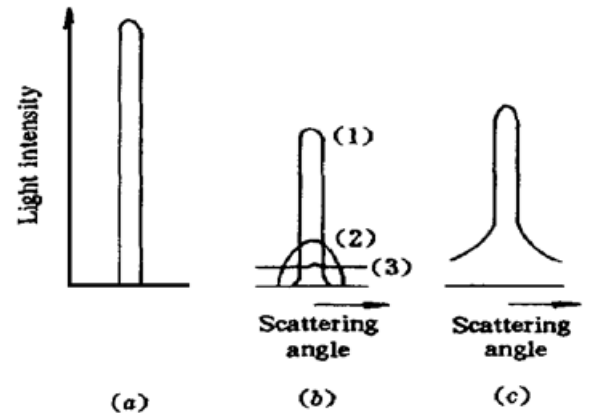


图 2 光强度与散射角的关系

Fig. 2 Relationship of light intensity vs scattering angle

$$Q(\psi) = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} \left[ \int_0^{\theta_{\max}} \text{VSF}(t) dt \right] J_0(2\pi\psi\theta) d\theta \quad (6)$$

式中  $D(\psi)$  为频率衰减函数。

后向散射光的  $\text{MTF}_b$  可由调制传递函数定义求, 即

$$\text{MTF}_b = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (7)$$

式中  $L_{\max}$  为接收器端接收到的最大辐射亮度, 其值等于相距接收器  $R$  处目标反射回来的辐射亮度  $L_t(R)$  (包括前向散射光和非散射光) 与背景辐射亮度  $L_b(R)$  之和; 而  $L_{\min}$  为接收到的最小辐射亮度, 其值为  $L_b(R)$ , 它等于接收器与目标之间的后向散射光的辐射亮度。设目标是均匀漫反射物体, 则有  $L_t(R) = E_t(R)/\pi^{[13]}$ ,  $E_t$  为目标反射回来的辐射照度;  $L_b(R)$  也近似为  $E_b(R)/\pi$ ,  $E_b$  为背景辐射照度, 于是(7) 式化为

$$\text{MTF}_b = \frac{E_t(R)}{E_t(R) + 2E_b(R)} \quad (8)$$

式中<sup>[15, 17]</sup>

$$E_b = \int_0^{\infty} dz \left[ \text{BSC}(z) 2\pi K \int_0^{\infty} dx \left[ x \exp \left[ -2cz - 2bz \frac{1 - \exp(-0.12\pi x z)}{-0.12\pi x z} \right] J_0(2\pi x G_q) \right] \right] \quad (9)$$

$$E_t = \rho I \left[ \frac{1}{R^2} \exp(-cR) + \frac{k}{4\pi R} \exp(-kR) \right] \exp(-kR) \quad (10)$$

$$\text{BSC}(z) = \text{VSF}[\pi - 2\arctan(G/2z)] \quad (11)$$

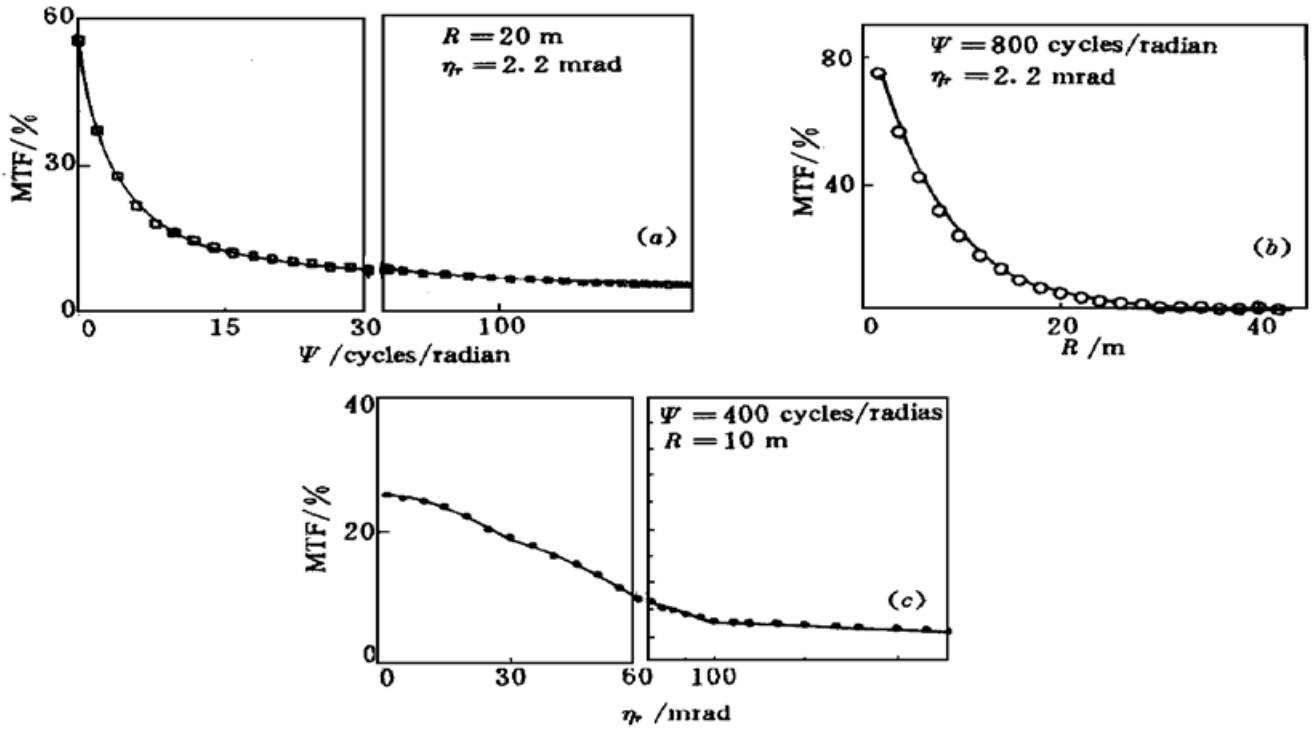
$$K = \frac{\pi}{4} \eta_r^2 P \quad (12)$$

式中  $\rho$  为目标的反射率,  $I = P/\eta_r$  为激光源的辐射强度,  $P$  为激光器的光功率,  $\eta_r$  为激光束的发散角,  $c$  为总衰减系数,  $k$  为辐照度衰减系数,  $\text{BSC}(z)$  为体积散射系数,  $G$  为激光器与接收器的距离,  $z$  为光束传输到某位置与接收器的距离,  $x$  为空间频率 ( $x = \psi/R$ ),  $G_q$  为在  $z_0$  点处接收视线与传输光束的距离 (如图 1 所示),  $b$  为散射系数,  $\eta_r$  为接收器的视场角 ( $\eta_r = 2\theta_{\max}$ )。

## 2.2 数值计算及结果分析

由式(1)~(12)可知,  $\text{MTF}$  不但与水介质的固有光学性质, 如散射系数、衰减系数、体积散射函数等有关, 而且与空间角频率、目标距离、接收视场角、激光束的准直程度 (即光束的发散角) 等因素也有直接的关系。在数值模拟过程中, 我们利用一般海水的典型值<sup>[15]</sup>, 即  $\text{VSF}(\theta) = [1.7 + \theta^{-3} + 2.9(\cos\theta)^2] \times 10^{-4}$ ,  $c = 0.145 \text{ m}^{-1}$ ,  $b = 0.122 \text{ m}^{-1}$ ,  $k = 0.063$ , 并设  $\rho = 0.5$ ,  $\lambda = 488 \text{ nm}$ ,  $\eta_r = 1 \text{ mrad}$ ,  $P = 1 \text{ W}$ ,  $G = 1 \text{ m}$ 。图 3(a)~(c) 分别为  $\text{MTF}$  与空间角频率  $\psi$ , 目标到接收器距离  $R$  和接收视场角  $\eta_r$  的关系图。

从图 3(a) 不难发现, 成像质量与空间角频率  $\psi$  有很大关系。 $\psi$  从较小值增大时,  $\text{MTF}$  迅速下降, 但当  $\psi$  值增加到一定值后, 趋于平稳。由图 3(b) 可知, 随着目标与接收器距离  $R$  的增大,  $\text{MTF}$  下降的趋势很快。其原因是, 当  $R$  增大时, 一方面光斑变大, 使得光斑的功率密度变小, 于是从目标反射回的信号光的功率密度也变小; 另一方面, 后向散射光的累积值增大, 使像的对比度变小, 同时前向散射光的功率密度也增大, 降低了目标的细节分辨率, 这样就使得  $\text{MTF}$  值迅速下降。从图 3(b) 还可发现, 当  $R > 25 \text{ m}$  时,  $\text{MTF} < 2\%$ 。为了探测到目标, 除了提高物的对比度、接收器件的分辨能力外, 还应该有效地消除背景噪声, 提高信噪比。随着接收视场角  $\eta_r$  的增大,  $\text{MTF}$  开始变化缓慢, 然后呈下降趋势, 并随  $\eta_r$  的增大下降更快, 但当  $\eta_r$  增加到一定值后,  $\text{MTF}$  的下降趋于平缓 (见图 3(c))。这是由于激光束在水中传输时水介质的多次散射使得

图3 MTF与 $\Psi$ ,  $R$ 及 $\eta_r$ 的关系图Fig. 3 Curves of  $\Psi$ ,  $R$  and  $\eta_r$  vs MTF

光斑扩散较大, 当 $\eta_r$ 从较小的值增大时, 一方面接收到的散射光功率增加, 另一方面从目标反射回的信号光功率也增大, 于是 MTF 值变化缓慢。当 $\eta_r$ 值增大到某一值后, 增大 $\eta_r$ 角时, 接收器接收到的信号光功率增加缓慢, 而后向散射光却近似平方增加<sup>[15,17]</sup>, 于是 MTF 下降较快。但当 $\eta_r$ 增大到一定值后, 继续增大 $\eta_r$ , 信号光功率和散射光功率的变化都趋于缓慢, 于是 MTF 也平缓。

### 3 结 论

利用窄视场角接收的同步扫描技术能明显地减少后向散射光, 也能有效地提高 MTF 值、改善高成像质量。因此, 窄视场角接收的同步扫描系统的成像质量明显地优越于全视场角接收的普通水下摄像系统。实验系统证明, 使用同步扫描技术的水下激光成像系统的成像距离可达 5~6 倍衰减长度, 比普通水下摄像机提高了 3~5 倍, 也有效地改善了成像质量<sup>[2,3]</sup>。探测距离对 MTF 的影响近似指数衰减。空间角频率比较小时, 在相同的条件下, 能提高成像距离。

### 参 考 文 献

- 1 R. C. Smith, K. S. Baker. Optical properties of the clearest natural waters (200~ 800 nm). *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 177~ 184
- 2 L. R. Marshall. Blue-green lasers plumb the mysteries of the deep. *Laser Focus World*, 1993, (4): 185 ~ 197
- 3 G. R. Fournier, D. Bonnier, J. L. Forand *et al.*. Range-gated underwater laser imaging system. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(9): 2185~ 2190
- 4 E. P. Zege, A. A. Kokhannovsky. Analytical solution to the optical transfer function of a scattering medium with large particles. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(27): 6547~ 6554

- 5 Y. Kuga, A. Ishimaru, H. W. Chang *et al.*. Comparisons between the small-angle approximation and the numerical solution for radiative transfer theory. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21): 3803~ 3805
- 6 H. T. Yura. Small-angle scattering of light by ocean water. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(1): 114~ 118
- 7 Y. Kuga, A. Ishimaru. Modulation transfer function of layered inhomogeneous random media using the small-angle approximation. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(23): 4382~ 4385
- 8 P. Brusaglioni, P. Donelli, A. Ismaelli *et al.*. A numerical procedure for calculating the effect of a turbid medium on the MTF of an optical system. *J. Mod. Opt.*, 1991, **38**(1): 129~ 142
- 9 P. Donelli, P. Brusaglioni, A. Ismaelli *et al.*. Experimental validation of a Monte Carlo procedure for the evaluation of the effect of a turbid medium on the point spread function of an optical system. *J. Mod. Opt.*, 1991, **38**(11): 2189~ 2201
- 10 P. Brusaglioni, P. Dornelli, A. Ismaelli *et al.*. Monte Carlo calculations of the modulation transfer function of an optical system operating in a turbid medium. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(15): 2813~ 2824
- 11 O. Ulloa, S. Sathyendranath, T. Platt. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7070~ 7077
- 12 J. S. Jaffe. Computer modeling and the design of optical underwater imaging system. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1990, **15**(2): 101~ 111
- 13 N. G. JIrov. Oceanic Optics. Beijing: Science Press, 1981. 13~ 14, 40, 45~ 46 (in Chinese)
- 14 Xivlin. Oceanic and Atmosphere Optics. Qingdao: Qingdao Ocean Press, 1991. 23~ 26 (in Chinese)
- 15 L. E. Mertens, F. S. Replogle, Jr.. Use of point spread and beam spread functions for analysis of imaging systems in water. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(8): 1105~ 1117
- 16 W. H. Wells. Loss of resolution in water as a result of multiple small-angle scattering. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(6): 686~ 691
- 17 Liu Xueming, Tan Zhifei, Hu Zhengrong. Theoretical analysis of distances about underwater laser imaging for synchronous scanning. *J. Southeast University* (东南大学学报), 1996, **26**(6A): 29~ 34 (in Chinese)

## Analysis of the MTF for an Underwater Laser Imaging System

Liu Xueming   Zhang Mingde   Sun Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** The modulation transfer function(MTF) to characterize the quantity relationships for imaging quality of an underwater laser imaging system and its influence factors is discussed and its approximate formula is given. The relationships of MTF with spatial angle frequency, target distance and the received view angle are derived. The results show that imaging quality can be effectively improved by using synchronous scanning technology with narrow view.

**Key words** imaging quality, modulation transfer function, laser