

文章编号: 0253-2239(2010)12-3481-06

基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型

李 力 裘 溯* 金伟其 王吉晖 黄有为

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 基于近红外或短波红外脉冲激光照明的距离选通成像(RGI)技术能够有效降低后向散射的影响,提高夜间以及恶劣环境下光电成像系统的作用距离。针对近红外 RGI 系统的设计与分析需要,研究提出 RGI 系统的作用距离模型和预测方法,即在按照传统连续(被动)成像模式计算或测试 RGI 系统最小可分辨对比度(MRC)性能的基础上,采用曝光时间积分等效的原理,折算周期性脉冲激光的成像效果,进而采用等效条带图案方式预测 RGI 系统对不同目标的作用距离。该方法预测结果与实际系统实验结果具有较好的一致性,表明该方法的有效性。该方法可用于各种近红外 RGI 系统的设计与性能分析,也可适用于短波红外 RGI 系统的作用距离预测。

关键词 成像系统;距离选通成像;近红外;激光成像;最小可分辨对比率;作用距离

中图分类号 TN219 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3481

Operating Distance Model of Near-Infrared Range-Gated Imaging System Based on Minimum Resolvable Contrast

Li Li Qiu Su Jin Weiqi Wang Jihui Huang Youwei

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The range-gated imaging (RGI) technique based on near-infrared or short-wave infrared pulsed laser illumination can reduce the influence of backscatter effectively, so it can improve the operating distance of the optical imaging system in night and adverse environment. It is researched and brought forwards the operating distance model and the forecasting method of the RGI system according to the needs of the design and analysis of near-infrared RGI system, that is according to the traditional continuous (passive) imaging model calculations or test the performance of RGI system, based on the minimum resolvable contrast (MRC), using an equivalent exposure time integration principle, imaging results of periodic pulsed laser are converted, and then the equivalent band patterns RGI system is used for predicting the role of different target distances. The forecasting results and the actual experimental results have good consistency which indicate that the method is effective. This method can be used to analyze the design and function in many kinds of near-infrared RGI system, and may also apply to forecast the operating distance in the short-wave infrared system.

Key words imaging systems; range gated imaging (RGI); near-infrared; laser imaging; minimum resolvable contrast(MRC); operating distance

1 引 言

连续照明工作模式的主动(近)红外成像技术作

为最早的夜视技术模式,具有技术成熟、成本相对较低、作用距离远和图像质量好等特点^[1],在早期夜间

收稿日期: 2010-02-02; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z207)资助课题。

作者简介: 李 力(1982—),男,博士研究生,主要从事光电成像及其信号处理方面的研究。E-mail: bit.lili@gmail.com

导师简介: 金伟其(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外、图像工程与视频处理、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: edmondqiu@bit.edu.cn

战场侦察、观瞄领域发挥了重要的作用,但是在敌我双方均具有夜视装备的条件下,容易曝露成为其应用的致命问题,因此,随着被动微光夜视技术及红外热成像技术的发展,其逐步淡出主要的军用夜视应用领域。近年来,随着激光器技术以及 CCD/CMOS 成像技术的发展,利用近红外激光辅助照明的 CCD/CMOS 成像技术在夜间边海防监视、安全监控、车辆辅助驾驶等领域获得了成功的应用,但是其作用距离受天气条件影响较大,特别是激光照明所形成的后向散射会更严重地影响观测距离。由于基于近红外或短波红外脉冲激光照明的距离选通成像(RGI)技术能够有效降低后向散射的影响,提高夜间以及恶劣环境下光电成像系统的作用距离^[2],因此,近年来在机载系统、国土安全监视、救援搜索等方面获得应用^[3~7]。同时,一批学者也通过野外实验和理论对 RGI 理论和技术进行了研究^[8~12],INO 公司 Deni Bonnier 等^[9]研究了 RGI 的传递函数 MTF 和信噪比模型;瑞典国防研究中心(FOI)研究了大气中 RGI 的性能极限^[10]和性能模型^[11];美国陆军 NVESD 研究了距离选通模式下辐射对比度的衰减模型,并利用 TTP 模型研究了短波红外 RGI 系统的作用距离模型^[12]。

随着连续激光主动照明成像技术在国内的推广应用,国内已认识到在特殊环境下 RGI 技术的有效性,各种应用对 RGI 系统的设计方法提出了迫切需求。近年来,我们研究了基于人眼视觉特性的夜视系统性能模型^[13],并基于可见光/近红外光电成像系统的最小可分辨对比度(MRC)模型,提出了基于 MRC 的光电成像系统作用距离模型^[14]。本文将根据低信噪比光电成像理论^[1],研究基于 MRC 的 RGI 系统作用距离模型和预测方法,以期对 RGI 系统的设计和分析提供技术手段。

2 RGI 原理及其系统组成

通常在激光主动照明成像系统中,激光照明器与光电成像系统处于同向,由于传输路径上大气的散射效应,使连续照明光束在路径上的后向散射光与目标场景反射光在探测器曝光时间内一并进入探测器,因而降低了目标场景成像的对比度,影响目标的探测和识别。

图 1 给出 RGI 系统的原理图。典型的 RGI 系统的主要包括脉冲激光器、选通成像系统和时序控制器。对于陆上夜视应用,脉冲激光器主要采用近红外或短波红外脉冲激光器,其发射波长应处于接

收器的光谱响应范围内并具有较高的响应。根据应用要求脉冲宽度从几纳秒到几百纳秒,要求有较稳定的重复频率。目前在近红外波段的 RGI 系统通常选用 Si-CCD/CMOS 的成像器件或选通微光像增强器件(像增强器和增强 ICCD 器件),选通门宽和频率应与激光器相当。由于在选通成像模式下有效曝光时间较短,考虑到采用过大功率的激光器可能带来的不便和成本问题,因此,在较远距离上的距离选通成像系统通常都采用选通像增强模式,以充分利用像增强器的高灵敏度特性。由于距离选通成像属于距离层析式成像,成像景深由成像选通门宽决定,而成像距离则决定于选通门开启与激光发射的时间差,因此需要精密的时序控制器进行控制和调整,以保证在不同距离上的目标成像。

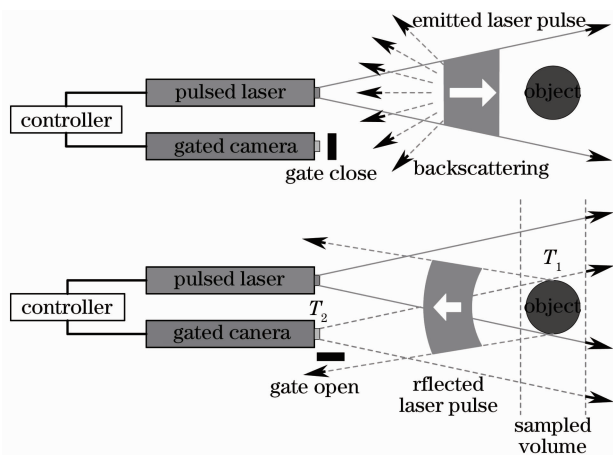


图 1 RGI 技术原理图

Fig. 1 Schematic of RGI technology

3 近红外 RGI 系统作用距离模型

近红外 RGI 技术主要用于夜间低照度或恶劣(如雾、霾)天气条件下的远距离观察,属于低信噪比光电成像技术领域,其成像空间分辨力不仅受系统传递函数限制,而且受目标场景的量子噪声限制,因此,需要基于低信噪比光电成像理论进行系统性能评价方法研究。

3.1 微光成像系统的 MRC 模型

定义目标与背景的对对比度 C 为

$$C = (L_t - L_b) / (L_t + L_b), \quad (1)$$

式中 L_t 和 L_b 分别为目标和背景的亮度。

按照定义^[13~15],微光成像系统的 MRC 是基于信噪比的可测试性能参量^[14],适合低信噪比光电成像系统的性能评价。典型光电成像系统对应不同场景平均亮度的 MRC- f 曲线如图 2 所示,其中 MRC 曲线以上的区域为可分辨区域。

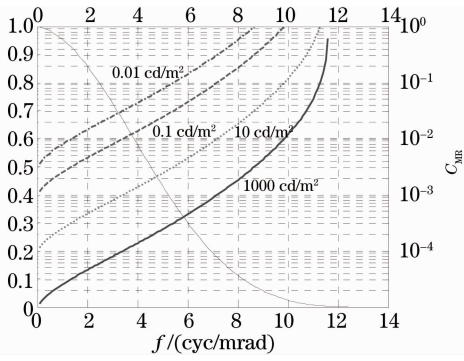


图 2 典型光电成像系统的 MRC 曲线

Fig. 2 MRC curves of the optoelectric imaging system

3.2 基于等效曝光量的 RGI 系统评价方法及其参数转化

由于 RGI 系统可以通过选通控制设定为常开模式,此时可利用常规的微光系统性能评价和测试方法,确定系统在不同场景条件下的性能参数。但在 RGI 模式下,不同脉冲激光和选通门宽均直接影响系统的性能,因此,应研究能够有效评价选通成像系统性能的方法。

在 RGI 过程中,由于人眼视觉、CCD 成像系统和微光像增强系统均具有时间积分性,其中夜间人眼视觉的响应时间为秒级;CCD 类成像器件通常在数十毫秒到亚毫秒级(帧周期或电子快门),而微光像增强器件通常在亚毫秒级(如荧光屏余晖时间^[1]),与 RGI 的纳秒级选通门宽呈数量级的差异,故 RGI 系统性能评价可采用等效曝光量方式,将脉冲激光选通曝光量等效转换为连续工作模式下的曝光量,用连续工作模式下测得的系统在等效曝光量条件的性能参量进行评价。

3.2.1 激光照明条件下场景和光敏面上的辐照度

假设激光选通成像系统 O 距离目标 T 的距离为 l (图 3),激光照明波长为 λ ,轴向光强 $I(t)$,目标处形成照度 E_0 为

$$E_0(t, \lambda) = \frac{I(t) \tau_a(l, \lambda)}{l^2} = \frac{I(t)}{l^2} \exp\left[-\frac{3.912}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q l\right], \quad (2)$$

式中 $\tau_a(l, \lambda)$ 为路径 l 上的大气光谱透射比; R_v 为大气能见度; λ_0 为能见度测试波长,通常取 $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ 或 $\lambda_0 = 0.61 \mu\text{m}$; q 为大气特征参量^[1]。

若目标和背景的反射比分别为 ρ_t 和 ρ_b ,则景物

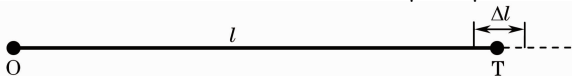


图 3 目标距离与成像景深

Fig. 3 Target distance and imaging depth of the field

在光阴极上形成的照度为

$$E_{cr}(t, \lambda) = \frac{1}{4} \frac{I(t)}{l^2} \rho_a \tau_a^2(l, \lambda) \tau_0 \times \left(\frac{D}{f'_0}\right)^2 \left/ \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f'_0}\right)^2\right]\right. \quad (x = t, b), \quad (3)$$

式中 D, f'_0 和 τ_0 分别为成像物镜的通光口径、焦距和透射比。

3.2.2 脉冲激光照明的脉宽与占空比

若成像景深为 Δl (图 3),则在不考虑脉冲辐射在空间展宽的条件下,激光脉宽和选通门宽 Δt 为

$$\Delta t = \Delta l / c, \quad (4)$$

式中 c 为光速。

为了避免多个激光脉冲的后向散射同时进入一个选通成像周期,应在一个脉冲进入系统后再发射第二个脉冲,即从激光发射到选通成像系统开启的延时时间为

$$t_y = 2l / c, \quad (5)$$

即脉冲激光的最大占空比 η_{\max} 和最大重复频率 k_{\max} 为

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta t}{t_y + \Delta t}, \quad k_{\max} = \frac{1}{t_y + \Delta t}, \quad (6)$$

即实际脉冲激光器的重频 k_L 应小于等于 k_{\max} ,实际脉冲激光的脉冲周期 t_d 和占空比 η 为

$$t_d = \frac{1}{k_L}, \quad \eta = \frac{\Delta t}{t_d} = k_L \frac{\Delta l}{c}. \quad (7)$$

在此脉冲激光周期性照射下,对应(2)式和(3)式中的激光辐射强度可表示为

$$I(t) = I_0 [u(t) - u(t - \Delta t)] \quad (0 \leq t < t_d). \quad (8)$$

3.2.3 脉冲激光照明条件下的激光脉冲功率

如图 4 所示,光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 是表征光电阴极光谱转换效率的重要特性(mA/W),为了综合表示光谱灵敏度,通常采用色温 2856 K 的标准光源照射下光电阴极的积分灵敏度 S_0 来表示(单位 $\mu\text{A}/\text{lm}$)。对于色温 T 的标准光源,假设其辐射归一化

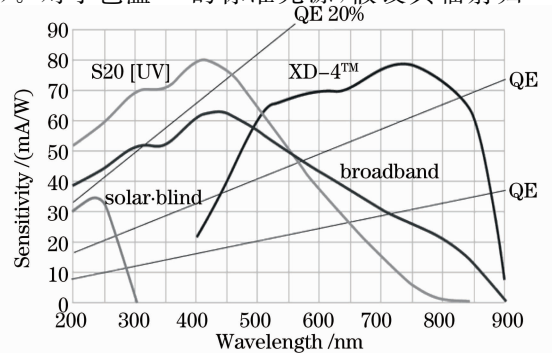


图 4 几种典型光电阴极的光谱灵敏度

Fig. 4 Spectral sensitivity of typical photocathodes

光谱分布为

$$m_0(\lambda, T) = \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^{-5} \left[\frac{\exp(c_2/\lambda T) - 1}{\exp(c_2/\lambda_m T) - 1} \right]^{-1}, \quad (9)$$

式中 $\lambda_m = \frac{2898}{T} = \frac{2898}{2856} = 1.0147 \mu\text{m}$; c_2 为第二辐射系数^[1]。

设像增强器最小可工作光阴极面照度为 E_{cmin} , 则对应的光阴极最小工作电流密度 J_{min} (mA/m²) 为

$$J_{\text{min}} = \frac{E_{\text{cmin}} \int_0^{\infty} m_0(\lambda, T) S(\lambda) d\lambda}{683 \int_0^{\infty} V(\lambda) m_0(\lambda, T) \Delta\lambda} = \frac{E_{\text{cmin}} \alpha_{\text{c}}(T)}{683 \alpha_{\text{eye}}(T)}, \quad (10)$$

式中 $V(\lambda)$ 为视见函数; $\alpha_{\text{c}}(T)$ 和 $\alpha_{\text{eye}}(T)$ 分别为光电阴极和人眼对色温 T 光源的光谱匹配系数^[1]。

当波长 λ_L 的单色脉冲激光进行照明时, 光阴极景物等效辐亮度和等效工作电流密度分别为

$$L_{\text{cx}}(\lambda_L) = \frac{1}{\pi} \frac{I_0}{l^2} \eta \rho_x \tau_a^2(l, \lambda_L), \quad (11)$$

$$J_{\lambda_L} = S(\lambda_L) E_{\text{cx}}(t, \lambda_L) = \frac{R_{\lambda_L}}{4} \frac{I_0}{l^2} \eta \rho_x \tau_a^2(l, \lambda_L) \tau_0 \times \left(\frac{D}{f'_0}\right)^2 \left/ \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f'_0}\right)^2 \right] \right. \geq J_{\text{min}}, \quad (12)$$

由此可得激光器最小有效辐射功率 I_{emin} 为

$$I_{\text{emin}} = \frac{E_{\text{cmin}} l^2}{683 S(\lambda_L) \eta \rho_x \tau_a^2(l, \lambda_L) \tau_0} \times (1 + 4F^2) \frac{\alpha_{\text{c}}(T)}{\alpha_{\text{eye}}(T)}, \quad (13)$$

考虑到激光器的功效 δ , 实际激光器的功率 I 为

$$I = I_{\text{emin}}/\delta, \quad (14)$$

如果照射激光束的束散角为 $\alpha \times \beta$, 则按均匀分布情况下的激光束能量 Φ 为

$$\Phi_e = I\alpha\beta. \quad (15)$$

3.2.4 脉冲激光照明的大气路径散射影响

由于脉冲激光 RGI 主要用于夜视成像, 因此, 大气传输路径附加的辐射主要表现为脉冲激光的后向散射和前向散射, 景物的表观对比度可表示为

$$C(\lambda_L, l) = C_0(\lambda_L) T_a(l) = \frac{\rho_t(\lambda_L) - \rho_b(\lambda_L)}{\rho_t(\lambda_L) + \rho_b(\lambda_L)} T_a(l), \quad (16)$$

式中大气对比度恶化系数 T_a 可表示为^[1]

$$T_a(l) = \left[1 + \frac{2\Phi_a(l)}{\Phi_t(l) + \Phi_b(l)} \right]^{-1}, \quad (17)$$

式中 Φ_a 为脉冲激光的路径后向/前向散射辐射。在选通成像模式下, 由于选通门宽较小且采用近红外

激光, 对应波长的大气透射比较高, 因此, 可忽略该项影响, 即 $\Phi_a = 0, T_a = 1$ 。

3.3 近红外激光距离选通成像系统作用距离模型

对于扩展源目标, 通过光电成像系统能够探测、识别和认清目标的条件是: 目标具有足够的张角; 目标/背景的表观对比度应大于等于光电成像系统的最小可分辨对比率(MRC) C_{MR} 。即

$$\frac{d}{Nl} \geq \frac{1}{f}, \quad (18)$$

$$C(\lambda_L, l) \geq C_{\text{MRa}}[f, L_m(l)], \quad (19)$$

式中 $L_m(l) = L_{m0} \cdot \tau_a(l) + L_a(l)$ 为景物表观平均亮度; $L_a(l)$ 为路程的脉冲后向散射等效气柱亮度; $L_{m0} = (L_t + L_b)/2$; d 为目标等效尺寸; C_0 为目标与背景固有对比度; 目标条带图案的周期数 N 由视觉任务及概率要求确定, 根据 Johnson 准则^[1], 在 50% 概率条件下的条带周期数为 50 (探测为 1, 识别为 4, 认清为 6.4)。 f 为按照视觉任务下所需的系统分辨率。满足(19)式的最大距离 l_{max} 即为系统在对应任务(探测、识别和认清)及其概率条件下的作用距离。

在给定路径和大气条件下, 近红外激光距离选通成像系统对给定目标的作用距离预测过程如下:

1) 在标准光源照明目标场景亮度条件下, 按照连续工作模式计算或测试方法, 得到距离选通成像系统的 MRC 曲线;

2) 给定某初始目标距离 l ;

3) 按照(18)式计算给定视觉任务(N)是所需的系统频率 f ; 采用(2)式或现有大气传输模拟软件包(如 Lowtran、Modtran)计算路径大气传输特性, 并按(16)式计算目标场景表观对比度 $C(\lambda_L, l)$;

4) 由 f 和 $C(\lambda_L, l)$ 查 $C_{\text{MR}}(f)$ 曲线得到满足(19)式所需的成像系统处等效景物亮度(或照度), 确定光阴极最低可工作照度, 进而由(10)~(15)式确定所需的照明激光功率(或脉冲能量);

5) 如果激光器功率满足/不满足要求, 则增加/减小目标距离, 返回 2) 继续循环; 在允许误差内满足关系时, 结束循环过程, 所对应的目标距离 l_{max} 就是激光距离选通成像系统对目标完成指定视觉任务条件下的作用距离。

4 模型的模拟验证

ARGC-750 观测系统^[2,16](图 5)选用三代选通像增强器(Omin 4)加标准模拟视频 CCD 成像组件, 选通门宽与激光脉冲宽度相当; 光学系统口径

100 mm, 视场 FOV 为 $0.5^\circ \sim 10^\circ$ (对应焦距大致为 2000 ~ 100 mm, 最大 F 数约为 20); 激光波长 808 nm, 束散角与变倍望远镜视场 FOV 一致, 平均功率大于 7.5 W, 脉宽约 200 ns ~ 6 μ s, 重复频率 17 ~ 30 kHz; 对典型车辆目标和人的识别 (Recon) 和认清 (ID) 距离如图 6 所示。



图 5 ARGC-750 距离选通观测系统

Fig. 5 ARGC-750 RGI system

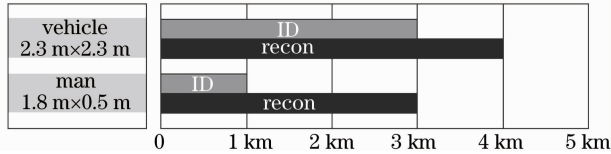


图 6 ARGC-750 对典型目标的作用距离

Fig. 6 Typical target operating distance of ARGC-750

从决定使用效果的品质因素 FM (决定于 MTF 和 SNR) 来看^[17], 美国 Omin 4 三代像增强器具有与欧洲高性能超二代像增强器 (XD-4, XR-5) 相当的品质因素, 即虽然两者在光电灵敏度等方面存在差别, 但两者在应用效果上基本相当, 故在下面采用实测的超二代 ICCD 系统的 MRC 值 [如图 7, 场景平均亮度 L 为 1.18×10^{-3} cd/m², 其中横坐标是实际空间频率 f 和系统截止频率 f_c (为 450TVL) 之比]^[18] 进行对比分析。测得 808 nm 处背景绿色草坪反射率 $\rho_b = 71\%$, 近红外隐身绿色迷彩涂敷的典型车辆目标反射率为 $\rho_t = 39\%$, 即固有对比度为 $C_0 = 29.1\%$ 。由于夜间距离选通成像模式下, 大气传输程辐射及激光后向散射明显减小, 故假定表观对比度只下降 20%。

在长焦 (2000 mm) 条件下, 计算得到识别 4 km 处典型车辆所需的分辨力为 73TVL/H, 即 $f/f_c \approx 0.16$, 以此频率以及光学系统 F 数和透射比等, 折算出满足分辨景物表观对比度所需的场景平均亮度。进而按照本文方法计算得到: 在无月有云 (约 10^{-4} lx) 的夜晚, 良好能见度 $R_v = 20$ km, $R_v = 15$ km 以及中等能见度 $R_v = 10$ km 时, 所需激光功率分别约为 5.1, 6.9 和 13 W。与 ARGC-750 系统大于 7.5 W 的参数基本相当。此外, 利用本文方法

还设计了某手持式近红外距离选通微光夜视直视观察仪, 设计的作用距离与样机实际野外测试结果基本一致, 可使微光夜视仪从被动观察的 800 m 识别坦克目标, 提高到距离选通主动探测的 1500 m 识别坦克目标, 表明了方法的有效性。

5 结 论

本文根据低信噪比光电成像理论和近红外 RGI 系统的特点, 研究提出 RGI 系统的作用距离模型和预测方法, 即首先按照传统连续 (被动) 成像模式计算或测试 RGI 系统的 MRC 性能; 然后采用曝光量等效的原理, 折算周期性脉冲激光的成像效果; 进而采用等效条带图案方式预测 RGI 系统对不同目标的作用距离。本文方法预测结果与实际系统实验结果具有较好的一致性, 表明该方法的有效性。只需进一步考虑水下光的散射影响^[19] 和补充短波红外 RGI 系统性能模型, 该方法也可用于蓝绿光水下 RGI 系统和短波红外 RGI 系统的作用距离预测。

参 考 文 献

- Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Low-Light-Level and Infrared Imaging System [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995
- 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- E. Belin, F. Christnecher, F. Taillade *et al.*. Display of an analytical model for backscattered luminance and a full-field range gated imaging system for vision in fog [C]. *SPIE*, 2008, **7088**: 708800-1-9
- Bonnier D., Larochelle V.. A range-gated active imaging system for search and rescue and surveillance operations [C]. *SPIE*, 1996, **2744**: 134~145
- T. McDonald, G. Yates, F. Cverna *et al.*. Range gated imaging experiments using gated intensifiers [C]. *SPIE*, 1999, **3642**: 142~148
- Bonnier D., Lelièvre S., Demers L.. On the safe use of long-range laser active imager in the near-infrared for Homeland Security [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060A
- Duncan S., Copley J., Harvey G. *et al.*. Advances in laser gated imaging in an airborne environment [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060A-1-9
- Steinval O., Andersson P., Elmqvist M. *et al.*. Overview of range gated imaging at FOI [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 654216-1-13
- Larochelle V., Bonnier D., Roy G. *et al.*. Performance assessment of various imaging sensors in fog [C]. *SPIE*, 1998, **3364**: 66~75
- Bonnier D., Chatigny S., Lutz Y. *et al.*. Modelling of active TV system for surveillance operations [C]. *SPIE*, 1999, **3698**: 217~228
- Klasén L., Steinval O., Bolander G. *et al.*. Gated viewing in the atmosphere. a study of performance limits [C]. *SPIE*, 2002, **4723**: 57~68
- Steinval O., Chevalier T., Andersson P. *et al.*. Performance modeling and simulation of range-gated imaging systems [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 654218-1-16

- 12 Jacobs E., Vollmerhausen R.. Modeling active imager performance[C]. *SPIE*, 2004, **5407**: 201~210
- 13 Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Lingxue *et al.*. Optimal angle magnification for CCD imaging systems based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2125~2130
王吉晖, 金伟其, 王岭雪等. 基于最小可分辨对比度的 CCD 成像系统最佳角放大率研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2125~2130
- 14 Jin Weiqi, Gao Shaoshu, Wang Jihui *et al.*. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1552~1556
金伟其, 高绍妹, 王吉晖等. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1552~1556
- 15 Arthur G.. Prediction and measurement of minimum resolvable contrast for TV sensors[C]. *SPIE*, 1994, **2223**: 533~542
- 16 Portable, long-range range-gated surveillance camera ARG-750 [OL]. www.obzerv.com
- 17 Zhou Liwei. On figure of merit of low light level image intensifiers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 331~337
周立伟. 关于微光像增强器的品质因素 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 331~337
- 18 Li Shengcai, Jin Weiqi, Zhang Weiqiang. A novel method-based on forced-choice for MRC measurement [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(2): 230~233
李升才, 金伟其, 张未强. 一种基于强迫性选择 MRC 测量的新方法 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(2): 230~233
- 19 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *et al.*. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2185~2190
孙 健, 张晓晖, 葛卫龙等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2185~2190