

主被动复合激光距离选通探测系统最大作用距离的推算

范有臣, 赵洪利, 孙华燕, 郭惠超, 赵延仲

(装备学院 光电装备系, 北京 101416)

摘要: 主被动复合激光距离选通探测系统的最大作用距离包括可见光/红外系统的最远探测距离和激光系统最远成像距离, 分别对其进行建模分析, 建立函数表达式, 分析了探测器灵敏度和发射功率、激光发射角及大气能见度对最大作用距离的影响, 并搭建了 532 nm YAG 激光器和 860 ns 固体激光器两套距离选通实验系统, 仿真分析系统最远作用距离分别为 11.2 km 和 5.5 km, 采用 YAG 激光器分别对 15.7 km、10.9 km、13 km 目标成像, 采用固体激光器分别对 1.3 km、5.1 km、6 km 目标成像, 通过对比验证了系统的最远距离, 实验结果表明, 理论计算的最远作用距离与实际最远作用距离基本相符, 最远作用距离函数能够反映系统的实际性能, 可以作为系统评价的基本参考, 是系统设计的重要参考依据。

关键词: 最大作用距离; 主被动复合; 激光主动成像; 距离选通

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0086-07

Calculation of maximum range of active and passive laser range-gated detection system

Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, Guo Huichao, Zhao Yanzhong

(Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The maximum range of active and passive laser range-gated detection system consists of the most far detection range of the visible/infrared system and the laser system. The furthest distance function of visible/infrared detector and the laser imaging were established respectively. The influence of the detector sensitivity, the transmission power, the laser emission angle and the atmospheric visibility on the maximum range was simulated. Two sets of range-gated system of 532 nm YAG laser and 860 nm solid-state laser were established. Simulation analysis system farthest distance is 11.2 km and 5.5 km respectively. 15.7 km, 10.9 km and 13 km targets are imaged using YAG laser. 1.3 km, 5.1 km and 6 km targets are imaged using solid-state laser. The most remote of the system is verified by comparing the distance between the targets. The experimental results show that the furthest distance from the theoretical calculation is basically consistent with the actual distance. The furthest distance function can reflect the actual performance of the system. It can be used as the basic reference for the evaluation of the system and it is an important reference for the design of the system.

Key words: most far detection range; active and passive; laser active imaging; range-gated technology

收稿日期: 2015-11-13; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61302183)

作者简介: 范有臣(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电信息处理、激光图像处理等方面的研究。Email: love193777@sina.com

导师简介: 赵洪利(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事信息化总体技术等方向的科研。Email: 465377900@qq.com

0 引言

主被动复合激光距离选通探测系统采用可见光/红外被动探测系统在远距离发现跟踪目标,进而精确引导激光距离选通成像系统对目标进行高分辨率成像,甚至可以对静止目标或运动较慢的目标成三维图像,是未来目标探测的主要发展方向之一^[1-2]。其中,可见光/红外系统的最远探测距离和激光系统最远成像距离是系统的关键参数之一,作用距离越远,就能越及时的发现目标,在目前“发现即摧毁”的光电对抗理念下具有更大的战场主动权。

史春波等^[3]通过叠加激光回波能量,对比分析了大视场和小视场对激光引信作用距离的影响,并分析了大视场和小视场下对地观测的优缺点;武琳等^[4]重点考虑了激光在大气传输过程中的效应,重点分析了大气能见度、折射率、大气闪烁、孔径分布效应对作用距离的影响,并采用最小探测功率计算最远作用距离;李海燕^[5]综合考虑了光电探测器的增益、大气环境、目标特性、激光功率与作用距离的关系,探讨了增加作用距离的若干方法;和婷等^[6]针对远距离微弱目标采用猫眼效应探测,分析了影响作用距离各因素与最大作用距离的关系,建立了最大作用距离数学模型。

上述最大作用距离的推算只进行了数值仿真,没有与系统实验结果进行对比分析,模型正确与否还有待确认。为此,文中首先分析了主被动复合激光距离选通探测系统的组成,然后对复合探测系统主要性能参数建模,建立了被动成像最远探测距离和主动成像最远距离函数,最后为了验证模型的准确性,分别进行了数值仿真和外场实验对比。

1 主被动复合激光距离选通探测系统组成

主被动复合激光距离选通探测系统主要由可见光/红外被动探测系统、激光发射系统、距离选通成像系统、信号处理系统以及转台跟踪系统组成,如图1所示。

其中,被动成像系统负责大范围的目标搜索与粗跟踪,激光发射系统提供均匀的脉冲激光,距离选通系统与激光发射系统同步,当目标出现时,在高精度跟踪的基础上发射激光照亮目标,进而根据测距系统提供的距离信息进行选通成像。上述三个系统都是安

装在跟踪转台上,统一在信号处理系统控制下运行。

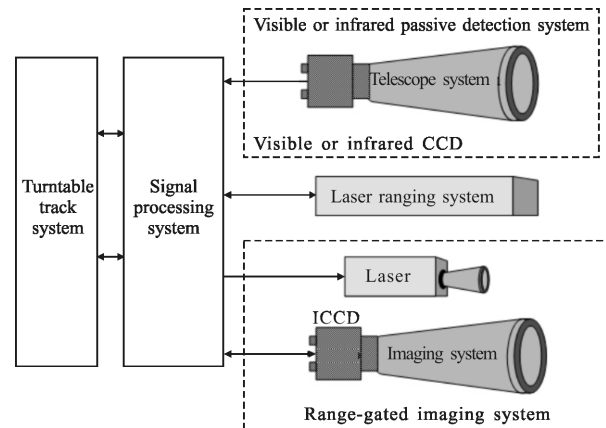


图1 主被动复合激光距离选通探测系统结构框图

Fig.1 Structure block diagram of active and passive laser range-gated detection system

2 复合探测系统主要性能参数建模

从上节中分析可知,对于不同的分系统而言,其关键参数也不一样,被动成像系统的最远探测距离和距离选通成像系统的最远成像距离是整个系统首先考虑的关键参数,两个最远作用距离大部分决定了整个系统性能的优劣,因此有必要对其进行深入讨论,文中分别建立了被动成像最远探测距离函数和激光最远成像距离函数,并分析了影响作用距离的因素。

2.1 被动成像最远探测距离函数

假设物体目标为朗伯圆柱体^[7],其表面由微小面元 dA 组成,设 β_1 为太阳光与目标之间的夹角, β_2 为探测器方向与目标之间的夹角,若 λ 为波长,探测器的响应范围是 450~950 nm, 则其太阳常数 $E_{sun}=703$, 面元 dA 接收到的太阳光通量为^[8]:

$$dQ = \int_{\lambda} E_{sun}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 dA \quad (1)$$

设目标的反射率为 ρ , 则面元发射的光通量为:

$$dQ_s = \rho \cdot \int_{\lambda} E_{sun}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 dA \quad (2)$$

目标在 β_2 方向的发光强度 I 为:

$$I = \frac{dQ_s \cos\beta_2}{\pi} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \int_{\lambda} E_{sun}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA \quad (3)$$

则在探测器处接收到的光通量为:

$$dQ_d = I d\Omega = \frac{\rho \cdot t_r \cdot t_e}{\pi} \cdot \int_{\lambda} E_{sun}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA \frac{ds}{R^2} \quad (4)$$

式中: ds 为入瞳面元; R 表示目标与探测之间的距离; t_r 为接收系统的通过率; t_e 为大气透过率; $d\Omega$ 定义为 $\frac{ds}{R^2}$, 表示入瞳面元所成的立体角。

对所有面元 ds 和 dA 进行积分即为探测器在入射面处的辐射通量:

$$Q_D = \int_A \int_s dQ_D = \int_A \int_s \frac{\rho \cdot t_r \cdot t_e}{\pi} \cdot \int_{\lambda} E_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA \frac{ds}{R^2} \quad (5)$$

由于通常探测情况下, R 值远远大于入瞳半径 s , 对于目标而言入瞳面元 ds 的取向没有差别, 因此在入射面处的辐照度可以表示为:

$$E_m = \frac{Q_D}{s} = \int_A \frac{\rho \cdot t_r \cdot t_e}{\pi R^2} \cdot \int_{\lambda} E_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA \quad (6)$$

另外, 由于 $E_{\text{sun}} = \int_{\lambda} E_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda$, 上式可以表示为:

$$E_m = \frac{\rho \cdot t_r \cdot t_e \cdot E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \int_A \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA \quad (7)$$

对于圆柱体目标而言, 有如下经验公式:

$$\int_A \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA = \frac{1}{4} dh((\pi - \theta)\cos\theta + \sin\theta)\sin\beta_1 \sin\beta_2 \quad (8)$$

式中: d 为圆柱体直径; h 为高; θ 为入射方向和探测方向的夹角。则在入射面处的辐照度可以表示为:

$$E_m = \frac{\rho \cdot t_r \cdot t_e \cdot E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \int_A \cos\beta_1 \cos\beta_2 dA = \frac{dh\rho t_r t_e E_{\text{sun}}}{4\pi R^2} ((\pi - \theta)\cos\theta + \sin\theta)\sin\beta_1 \sin\beta_2 \quad (9)$$

另外根据照度、辐照度和星等之间的关系, 在入射面处的辐照度也可以表示为:

$$E_m = E_0 \cdot 2.512^{-m} \text{lx} = \left(\frac{1}{683}\right) \cdot 2.65 \times 10^{-6} \cdot 2.512^{-m} \text{W/m}^2 \quad (10)$$

式中: m 表示星等; E_0 表示零星等的光照度; $1/683$ 是单位 lx 与 W/m^2 之间的换算系数。

联合上式可得:

$$\left(\frac{1}{683}\right) \cdot 2.65 \times 10^{-6} \cdot 2.512^{-m} = \frac{dh\rho t_r t_e E_{\text{sun}}}{4\pi R^2} ((\pi - \theta)\cos\theta + \sin\theta)\sin\beta_1 \sin\beta_2 \quad (11)$$

根据 CCD 可探测最小星等即可求出被动成像系统最远探测距离。

2.2 激光最远成像距离函数

以探测系统最小可测辐照度为标准计算系统最大作用距离, 通过系统能量的传递关系建立目标光辐射照度。激光在从发射到目标, 经目标反射回探测器的过程可以分为以下几个步骤。

(1) 激光发射: 激光器发射脉冲激光, 对于功率为 P 的脉冲激光而言, 理想情况下其时间分布函数表示为^[9]:

$$P(t) = h \cdot \exp\left(-0.5 \left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (12)$$

其中 $h = Q \cdot \left(\frac{2}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}}\right)$, $\sigma = \frac{\tau}{2\sqrt{2\ln(2)}}$ 。

式中: Q 表示激光脉冲能量 (单位为 J 或 mJ); τ 表示脉冲宽度 (单位一般为 ns); t_0 为峰值所在时刻。

(2) 大气传输: 大气条件对激光的传输影响很大, 采用透过率描述其影响程度, 透过率函数 τ_{atm} 可以表示为^[10]:

$$\tau_{\text{atm}}(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V_M} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^b \cdot \frac{R}{1000}\right] \quad (13)$$

式中: λ 为激光波长; V_M 表示能见度 (单位为 km); R 表示目标与探测器之间的距离 (单位为 m); b 值由能见度 V_M 决定, 取值如下

$$b = \begin{cases} 1.6 & (V_M \geq 50 \text{ km}) \\ 1.3 & (60 \text{ km} \leq V_M < 50 \text{ km}) \\ 0.16V_M + 0.34 & (1 \text{ km} \leq V_M < 6 \text{ km}) \\ V_M - 0.5 & (0.5 \text{ km} \leq V_M < 1 \text{ km}) \\ 0 & (V_M \leq 0.5 \text{ km}) \end{cases} \quad (14)$$

脉冲激光经过大气传输后到达目标的表达式为:

$$P_1 = P(t) \cdot \tau_{\text{atm}}(\lambda) \quad (15)$$

到达目标前的辐照度表示为:

$$E_1(t) = \frac{P_1(t)}{\pi \left(R \tan \frac{\alpha}{2}\right)^2} \quad (16)$$

式中: α 表示激光发射角; R 表示目标与探测器之间的距离 (单位为 m)。

(3) 目标反射: 若目标为朗伯体, 反射率为 ρ , 则其辐射亮度可以表示为:

$$L(t) = \rho \frac{E_1(t)}{\pi} \quad (17)$$

(4) 光学系统: 目标反射的激光经过大气传输到达光学系统的辐射照度表示为:

$$E_1(t) = \frac{1}{4} \pi L(t) \tau_{opt} \tau_{atm} \left(\frac{D}{f} \right)^2 / \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \right] \quad (18)$$

式中: D 表示光学系统口径; τ_{opt} 表示光学系统透过率; τ_{atm} 表示大气透过率函数; f 表示焦距。

(5) 探测器: 由于 ICCD 是窄快门成像, 因此其辐射照度与快门时间有关, 采用矩形波形近似真实快门, 表达式如下:

$$g(t) = \begin{cases} 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中: t_1 表示上升沿时刻; t_2 表示下降沿时刻。则激光经过传输最终达到 ICCD 像平面的辐射照度可以表示为:

$$E_p(t) = E_1(t) \times g(t) = \frac{\pi L(t) \tau_{opt} \tau_{atm} (D/f)^2 g(t)}{4(1+0.25(D/f)^2)} = \frac{P(t) \tau_{atm} \tau_{opt} \tau_{atm} (D/f)^2 g(t)}{4\pi \left(R \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2 (1+0.25(D/f)^2)} \quad (20)$$

由于激光发射角一般较小, 只有几个 mrad, 因此 $\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$, 则上式简化为:

$$E_p(t) = \frac{P(t) \tau_{atm} \tau_{opt} \tau_{atm} (D/f)^2 g(t)}{4\pi R^2 \alpha^2 (1+0.25(D/f)^2)} \times g(t) \quad (21)$$

ICCD 的最小可测辐照度 E_m 一般为 0.15 W/m^2 , 通过最小可探测辐照度即可对应找到最大的作用距离。

3 仿真分析

3.1 被动成像最远探测距离函数

设探测器观测波长为 $450 \sim 950 \text{ nm}$, 底面直径为 2 m , 高 2 m , 反射率 0.3 , 接收系统的通过率为 0.9 , $\theta = \pi/2$, $\beta_1 = \beta_2 = \pi/4$, 数值仿真可得不同大气透过率条件下星等与作用距离之间的关系如图 2 所示。从图

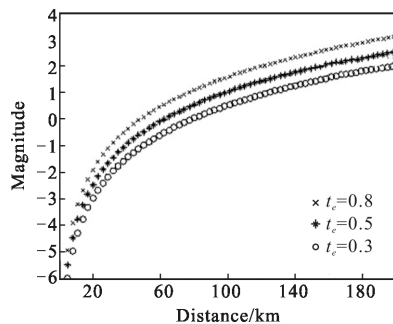


图 2 不同能见度条件下星等与作用距离关系

Fig.2 Magnitude and distance under different visibility conditions

中可以看出透过率越低, 相同星等条件下的最远作用距离越近, 因此需要选择最小可探测星等较大的 CCD, 避免大气等不可控因素的影响。

3.2 激光最远成像距离函数

根据最远成像距离函数可以看出, 影响因素主要有激光器功率、激光发散角、大气能见度以及探测器最小可探测辐照度等等, 为此对各影响因素分别进行数值模拟分析。

数值分析中, 系统各参数为: 激光波长为 860 nm , 激光脉冲发射功率 $P = 4 \times 10^6 \text{ W}$, 发散角为 43 mrad , 发射与接收光学透过率均为 0.9 , 接收光学系统焦距为 420 mm , 口径为 80 mm , 目标发射率为 0.3 , 大气能见度为 20 km , ICCD 最小可探测辐照度为 0.15 W/m^2 , 当某一参数变化时, 其他参数均采用以上数据。

(1) 探测灵敏度对最远成像距离的影响

改变 ICCD 最小可探测辐照度 E_m , 变化范围为 $0.01 \sim 0.8 \text{ W/m}^2$, 最远作用距离如图 3 所示。从图中可以看出, 当 $E_m < 0.3 \text{ W/m}^2$ 时, 随着探测灵敏度的升高, 作用距离急剧增加, 当 $0.3 \text{ W/m}^2 < E_m < 0.8 \text{ W/m}^2$ 时, 最小可探测辐照度与作用距离基本成线性关系, 因此, 在提高作用距离时(几十甚至几百千米)必须采用 EMCCD、ICCD、EBCCD 等增强型 CCD。

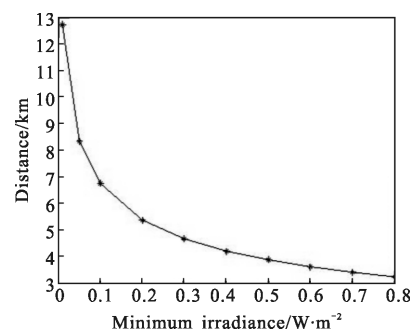


图 3 最小可探测辐照度与作用距离关系

Fig.3 Relationship of minimum irradiance and distance

(2) 激光脉冲功率对最远成像距离的影响

从公式中可以显而易见的看出, 增加激光功率, 最远作用距离必然增加。带来的问题是, 激光功率的增加会极大的增加功耗, 增加成本, 在功率增加与成本之间必然有一个平衡点, 假设激光功率 P 变化范围为 $1 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ W}$, 最远距离变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 当 $P = 1 \times 10^5 \text{ W}$ 时, $R = 1.1 \text{ km}$, 功率增加 250 倍, 当 $P = 2.5 \times 10^7 \text{ W}$ 时, $R = 10.2 \text{ km}$, 最远

作用距离仅仅增加了 10 倍,因此在实际应用中,一定避免为了提高作用距离一味单纯增加激光功率,必须优化其他关键参数才能更有效地增加作用距离。

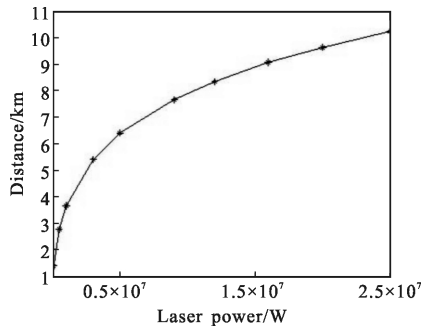


图 4 激光功率与最远距离关系

Fig.4 Relationship of laser power and distance

(3) 激光发散角对最远成像距离的影响

激光发散角 α 取值为 5~90 mrad, 最远作用距离数值模拟如图 5 所示。随着发散角的增加,作用距离急剧降低,与最小可探测辐照度有一定的相似之处,当 $\alpha < 20$ mrad 时,随着发散角的减小,作用距离增加显著,当 $20 \text{ mrad} < \alpha < 90$ mrad 时,发散角与作用距离也基本成线性关系,一般情况下,激光发散角必须与视场匹配才能达到应用标准,特殊情况下,为了增加作用距离,对远距离目标成像时,可以适当减小发散角。

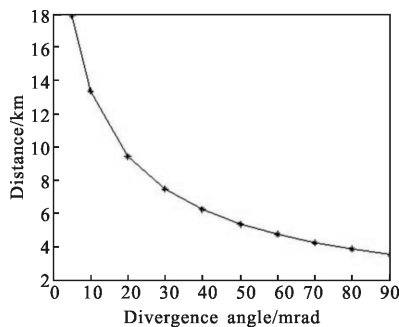


图 5 激光发散角与最远距离的关系

Fig.5 Relationship of laser divergence angle and distance

(4) 大气能见度对最远成像距离的影响

大气能见度对最远成像距离的影响是最直接最不可控的因素(见图 6),设定大气能见度变化范围为 1~70 km,随着能见度的增大,最大作用距离也不断增加,因此在实际应用中要考虑大气的影响,尽量选择好的天气进行远距离实验。

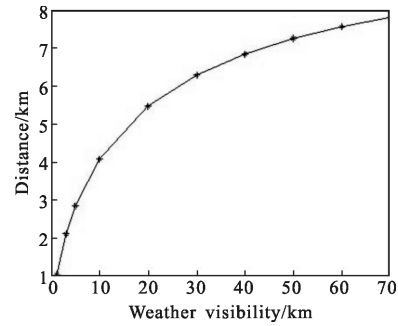


图 6 大气能见度与最远距离的关系

Fig.6 Relationship of atmospheric visibility and distance

4 实验验证

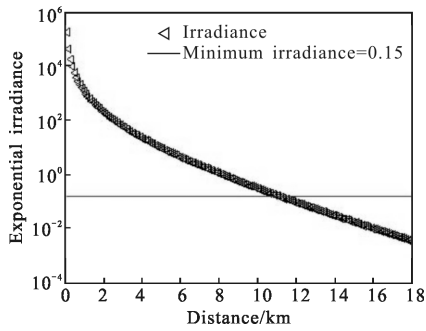
通过对最远成像距离函数影响因素分析,找出影响成像距离的关键因素,并应用于实验系统,验证函数模型的正确性,一般情况下,可见光/红外 CCD 的最小可探测星等在 0 以上,根据仿真结果作用距离可以推算到 100 km 以上,目前实验室无法进行实验验证,因此文中主要验证主动成像的模型正确性。分别搭建了两套距离选通成像系统,仿真计算出最远作用距离,并对最远作用距离的目标成像,对比最远距离的成像效果,对比仿真最远作用距离与实际最远作用距离,进而验证模型的准确性,实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

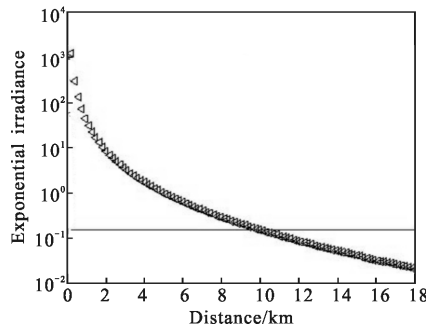
Tab.1 Experimental parameters

Experimental conditions		First	Second
Laser parameters	Laser	YAG laser	Solid-state laser
	Wavelength/nm	532	860
	Repetition frequency/Hz	50	2 000
	Power/W	8×10 ⁶	2 000
	Pulse width/ns	10	500
	Divergence angle/mrad	1.5	43
Detector parameters	Gain voltage/V	4	4
	Shutter Time/ns	100	80
Receiving parameters	Minimum irradiance/W·m ⁻²	0.15	0.15
	Focal length/mm	1 800	420
	Caliber/mm	150	120
	Transmission rate	0.9	0.9
Atmospheric visibility/km		20	25
Theoretical calculation of distance/km		11.2	5.5

根据上述参数计算辐照度随距离的变化情况,如图 7 所示。当最小可测辐照度为 0.15 W/m^2 时,分别获得系统一的最大作用距离为 11.2 km ,系统二的最大作用距离为 5.5 km 。



(a) 系统一
(a) First system



(b) 系统二
(b) Second system

图 7 最小可探测辐照度与最大作用距离

Fig.7 Relationship of minimum irradiance and distance

为了验证理论计算的可靠性,采用系统一对 10.9 km 的烽火台成像,并延伸到 13 km 处的大楼成像,采用系统二对 5.1 km 处的大楼成像,并延伸到 6 km 处的大山成像,实验结果如图 8 和图 9 所示。

图像中目标区域的亮度 m 、信噪比 SNR 和对比度 $C^{[10]}$ 分别定义如下。

亮度:

$$m = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N g(x, y) \quad (22)$$

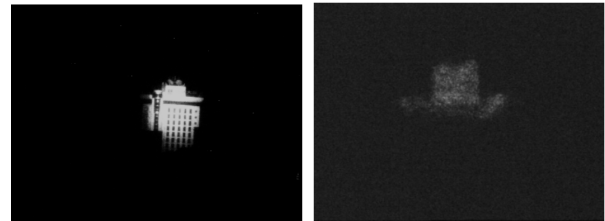
信噪比:

$$\text{SNR} = 10 \log(m / \text{LSD_mean}) \quad (23)$$

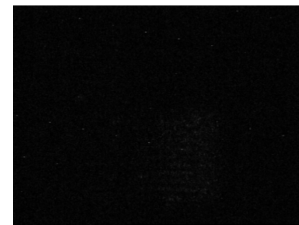
对比度:

$$C = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\mu_T + \mu_B} \quad (24)$$

式中: $g(x, y)$ 表示原始图像; M, N 分别对应行数和列数; LSD_mean 表示图像分割成 4×4 区域的标准差均值; μ_T, μ_B 分别为目标图像均值、背景图像均值。



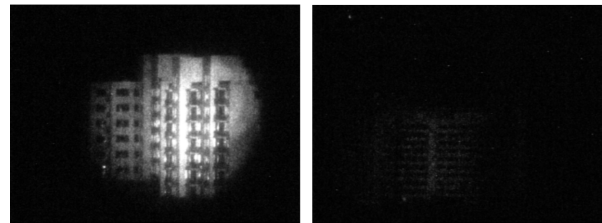
(a) 5.7 km 大楼
(a) 5.7 km building
(b) 10.9 km 烽火台
(b) 10.9 km beacon



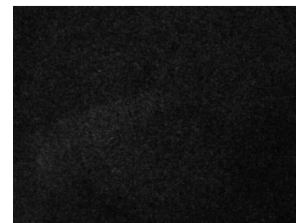
(c) 13 km 大楼
(c) 13 km building

图 8 系统一目标实验图像

Fig.8 Experimental image of the first system



(a) 1.3 km 大楼
(a) 1.3 km building
(b) 5.1 km 大楼
(b) 5.1 km building



(c) 6 km 山体
(c) 6 km mountain

图 9 系统二目标实验图像

Fig.9 Experimental image of the second system

计算个图像的亮度 m 、信噪比 SNR 和对比度如表 2 所示。

表 2 不同图像的比较

Tab.2 Comparison of different images

	SNR	C	m
Fig.8(a)	19.371 1	0.851 7	95.924 9
Fig.8(b)	7.852 7	0.386 6	34.631 4
Fig.8(c)	1.572 4	0.096 3	17.031 9
Fig.9(a)	21.565 6	0.862 6	97.100 3
Fig.9(b)	6.637 1	0.318 0	41.095 0
Fig.9(c)	1.907 3	0.142 3	19.815 2

从上表中可以看出,对 10.9 km 和 5.1 km(理论计算最远距离附近)的目标成像时,图像亮度、对比度和信噪比都急剧降低,当对更远的目标 13 km 大楼和 6 km 山体成像时,图像亮度和对比度达到最低,目标几乎淹没在背景之中,也进一步验证了系统的最远距离是 11 km 和 5 km 左右,与理论计算结果基本相符。因为大气能见度等不可控原因造成的距离误差在 1~2 km 范围之内,进而验证了最远作用距离函数的正确性。

5 结 论

文中分别对两个最远作用距离进行建模分析,建立了可见光/红外最远探测距离函数和激光最远成像距离函数,通过数值仿真可知,被动成像最远探测距离与 CCD 的最小可探测星等有关,一般的 CCD 即可满足百公里的需求,主动成像最远探测距离影响因素众多,在激光功率一定的情况下,最主要的影响因素是探测器的灵敏度和激光发散角,同时受天气条件制约,在提高作用距离上,激光功率的增加对最大作用距离增大不如压缩发散角和提高探测器灵敏度明显,一般情况下,激光发散角是可以调节的,因此若要提高作用距离,应该采用灵敏度更高的探测器更为有效。通过外场实验和数值仿真最远距离对比可知,数值仿真的最远距离具有很强的指导意义,与实际作用距离基本相符,在系统设计之初,可以采用该数学模型推算其他各系统参数,同时也能作为评价已有系统

的参数之一。下一步将结合系统信噪比、探测概率、选通探测距离精度以及转台性能对探测系统进行综合评价,客观公正的反映系统整体性能。

参 考 文 献 :

- [1] Guo Huichao, Sun Huayan, Du Lin. Range information calculation method for 3D imaging based on serial images by time-slice technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3258-3262. (in Chinese)
- [2] Mu Jinlong, Wang Qi, Li Qi, et al. Target detection emulation on long-wave infrared active-passive imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 634-638. (in Chinese)
- [3] Shi Chunbo, Ma Xianhua. Analysis of the detecting visual field influenced on the operating distance of the laser fuse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (6): 368-371. (in Chinese)
- [4] Wu Lin, Zhou Zhongliang, Zhou Bing, He Yongqiang. Research on the operating range of imaging type [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1192-1195. (in Chinese)
- [5] Li Haiyan. Operating range estimation for laser active jamming system[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 416-420. (in Chinese)
- [6] He Ting, Niu Yanxiong, Zhang Peng, et al. Study on active laser detection distance [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 217-220. (in Chinese)
- [7] Peng Xiaodong, Liu Bo, Meng Xin, et al. Research on remote sensing image generation modeling in the visible regions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(7): 1106-1111. (in Chinese)
- [8] Zhao Bin. Active-Passive hybrid detection of short-distance noncooperative space targets[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 70-100. (in Chinese)
- [9] Repasi Endre, Lutzmann Peter, Steinvall Ove, et al. Mono-and bi-static SWIR range-gated imaging experiments for ground applications [C]//SPIE, 2008, 7114: 71140D.
- [10] Qiao Jian. Analysis on detection ability of shipborne optical-electronic equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2510-2526. (in Chinese)