

距离选通成像系统分辨率模拟测试装置*

李丽^{1,2} 高稚允¹ 王霞¹ 金伟其¹ 马海牡³

(1 北京理工大学 信息科学技术学院 光电工程系, 北京 100081)

(2 防化研究院 北京 1044 信箱 501 号, 北京 102205)

(3 石家庄军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要 距离选通成像系统采用脉冲激光主动照明与 ICCD 选通技术相结合. 为了在室内模拟测试一定大气条件下距离选通成像系统的分辨率, 设计了一套模拟测试装置. 采用两个模拟光源, 分别模拟信号光和后向散射光. 结合大气距离选通成像系统后向散射光和信号光模型的研究结果, 采用阴极面等效辐射照度法, 给出了模拟光源功率的计算方法和功率范围的确定方法, 以 S-20 光电阴极的像增强器与 CCD 耦合为例, 计算了模拟光源功率.

关键词 激光技术; 距离选通; 等效辐射照度; 分辨率; 后向散射

中图分类号 TN241 **文献标识码** A

0 引言

距离选通成像系统采用脉冲激光主动照明与 ICCD^[1,2] 选通技术相结合. 它主要应用于强散射介质中成像, 如水下成像^[3] 和恶劣天气条件下成像^[4,6]. 为了测试一定大气条件下距离选通成像系统的分辨率, 设计了一套在暗室内工作的模拟测试装置. 测试装置采用两个模拟光源, 分别模拟信号光和后向散射光. 模拟光源在光电阴极面上的辐射照度随时间的变化, 等效于实际系统中光电阴极面上所接收的信号光和后向散射光. 结合大气距离选通成像系统的后向散射光和信号光模型(简称 BSMARGIS)的研究结果, 设计了室内模拟测试装置, 给出了确定模拟光源功率的方法.

1 模拟测试装置结构

距离选通成像系统分辨率室内模拟测试装置结构如图 1. 被测试的选通 ICCD 作为接收系统. S 为信号模拟光源, 照明透射式分辨率板(O_r 为分辨率板的中心点), 分辨率板的图案经析光镜(O_m 为析光镜的中心点)反射, 成像在选通 ICCD 的光电阴极面. B 为后向散射模拟光源, 照明透射式背景板(O_b 为背景板的中心点), 背景板透过析光镜成像在选通 ICCD 的光电阴极面. l_1 为物镜到背景板的距离, l_2 为分辨率板中心到析光镜中心的距离, l_3 为析光镜中心到物镜的距离. 为了使分辨率板和背景板同时成像在光电阴极面上, 要求它们到物镜的距离相等, 即 $l_2 = l_1 - l_3$.

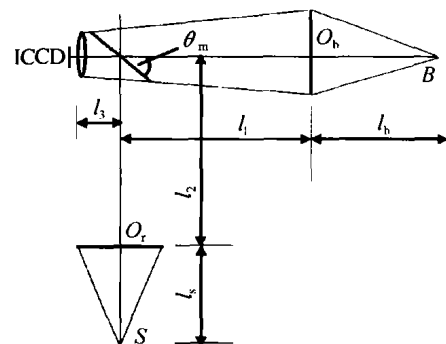


图 1 距离选通成像系统分辨率模拟测试装置结构
Fig. 1 Structure of resolution simulating measurement setup for range-gated imaging system

背景板上的后向散射模拟光源照明光斑和分辨率板上的信号模拟光源照明光斑充满视场, 那么后向散射模拟光源照明光斑的直径 d_b 应满足

$$d_b \geq (l_1/f_0) D_d \quad (1)$$

式中 D_d 为光电阴极面的有效直径, f_0 为模拟测试装置的物镜焦距. 信号模拟光源照明光斑的直径 d_{res} 应满足

$$d_{res} \geq (l_1/f_0) D_d \quad (2)$$

模拟测试装置的物镜口径为 D_0 , 后向散射模拟光源在背景板上的照明光斑对物镜的张角 $\alpha = \arctan[(d_b - D_0)/2l_1]$, 析光镜与光轴夹角为 θ_m , 为使背景板透过析光镜成像在光电阴极面上, 析光镜直径 d_m 应满足

$$d_m \geq (D_0/2 + l_3 \tan \alpha) \left[\frac{\sin(\pi/2 - \alpha)}{\sin(\theta_m + \alpha)} + \frac{\sin(\pi/2 + \alpha)}{\sin(\theta_m - \alpha)} \right] \quad (3)$$

信号模拟光源的半发散角为 θ_{ss} , 后向散射模拟光源的半发散角为 θ_{bs} , S 点到 O_r 点的距离 l_s 为

$$l_s = d_{res}/2 \tan \theta_{ss} \quad (4)$$

B 点到 O_b 点的距离 l_b 为

$$l_b = d_b/2 \tan \theta_{bs} \quad (5)$$

* 国家部委预研项目 (03302020302)

Tel: 010-68912569 Email: huangmingli@bit.edu.cn

收稿日期: 2003-12-19

2 模拟光源功率计算方法

信号模拟光源采用脉冲半导体激光器, 峰值功率为 P_{ss} , 发射角为 θ_{ss} . 为了均匀照明分辨率板, 在分辨率板的背面放置一透射比为 T_{plas} 的乳白塑料(或毛玻璃), 形成均匀的漫射光照明分辨率板, 则分辨率板在光电阴极面上产生的辐射照度为

$$E_{pse} = \frac{\rho_m T_{os} T_{plas}}{4\pi(l_s \tan\theta_{ss})^2} \left(\frac{D_{os}}{f'_{os} + x'_s} \right)^2 P_{ss} \quad (6)$$

式中 ρ_m 为析光镜的反射比, T_{os} 为模拟测试装置中接收光学系统的透射比, x'_s 为光电阴极面成像的离焦量, 模拟系统的标准视场 $\theta_{rs} = \arctan(D_d/2f'_{os})$. 模拟测试装置的离焦量

$$x'_s = \frac{(f'_{os})^2}{l_1 - f'_{os}} \quad (7)$$

后向散射模拟光源也采用半导体激光器, 采用乳白塑料作背景板. 半导体激光器光源透过背景板后形成均匀的漫射光, 背景板在光电阴极面上产生的辐射照度为

$$E_{pbe} = \frac{T_m T_{os} T_{plas}}{4\pi(l_b \tan\theta_{bs})^2} \left(\frac{D_{os}}{f'_{os} + x'_s} \right)^2 P_{bs} \quad (8)$$

式中 P_{bs} 为后向散射模拟光源的峰值功率, T_m 为析光镜的透射比. 由式(6)和式(8)得到信号和后向散射模拟光源的功率分别为

$$P_{ss} = \frac{4\pi(l_s \tan\theta_{ss})^2}{\rho_m T_{os} T_{plas}} \left(\frac{f'_{os} + x'_s}{D_{os}} \right)^2 E_{pse} \quad (9)$$

$$P_{bs} = \frac{4\pi(l_b \tan\theta_{bs})^2}{T_m T_{os} T_{plas}} \left(\frac{f'_{os} + x'_s}{D_{os}} \right)^2 E_{pbe} \quad (10)$$

根据 BSMARGIS 模型, 信号光在光电阴极面上的辐射照度随时间的变化为

$$E'_{pse}(t) = \frac{\rho_{obj} D_0^2 T_0 e^{-\beta_{ext}(z_{obj} + l_{obj})}}{4A_d l_{obj}^2} P_0 \quad (t_{obj} \leq t \leq t_{obj} + t_p) \quad (11)$$

式中 ρ_{obj} 为观察目标的漫反射系数, D_0 为接收光学系统口径, β_{ext} 为大气消光系数, z_{obj} 为目标在脉冲激光发射中心轴(z 轴)上距离, l_{obj} 为目标在接收视场中心轴(l 轴)上距离, A_d 为光电阴极面积, t_p 为照明光源的脉冲宽度, t_{obj} 为对应目标距离的照明光往返时间. BSMARGIS 模型的后向散射光在光电阴极面上的辐射照度随时间的变化为

$$E'_{pbe}(t) = \frac{\pi D_0^2 T_0 \beta_{sca}(\pi)}{4A_d c t_p} \frac{1 + \cos \delta}{\cos^2 \delta} P_0 \int f(z) e^{-\beta_{ext}(z+l)} \frac{1}{t^2} dt \quad (12)$$

式中 $\beta_{sca}(\pi)$ 为大气后向散射系数, z 轴与 l 轴夹角为 δ , c 为光速, $f(z)$ 为重叠系数^[7], 是进入接收视场

的被照面积与激光照射面积之比, 它与激光发射角 $2\theta_l$, 接收视场角 $2\theta_r$ 以及发射和接收装置的间距 d_0 等参量有关.

信号和后向散射模拟光源照射光电阴极面所产生的光电流密度分别为

$$J_{ps} = S(\lambda_{ss}) E_{pse} \quad (13)$$

$$J_{pb} = S(\lambda_{ss}) E_{pbe} \quad (14)$$

$S(\lambda_{ss})$ 为光电阴极在模拟光源波长 λ_{ss} 的辐射灵敏度^[5]. BSMARGIS 模型的信号光和后向散射光照射光电阴极面所产生的光电流密度分别为

$$J'_{ps} = S(\lambda_s) E'_{pse} \quad (15)$$

$$J'_{pb} = S(\lambda_s) E'_{pbe} \quad (16)$$

$S(\lambda_s)$ 为光电阴极在 BSMARGIS 模型照明光源波长 λ_s 的辐射灵敏度.

信号和后向散射模拟光源照射光电阴极面所产生的光电流密度, 分别等于实际系统的信号光和后向散射光照射光电阴极面所产生的光电流密度, 才能保证模拟测试装置所获得图像的亮度和对比度与实际系统所获得图像的亮度和对比度相同, 即 $J_{ps} = J'_{ps}$, $J_{pb} = J'_{pb}$, 因此由式(13)至式(16)推导可得到模拟光源在光电阴极面的辐射照度与实际系统光电阴极面所接收的辐射照度之间的关系为 $E_{pse} = [S(\lambda_s)/S(\lambda_{ss})] E'_{pse}$, $E_{pbe} = [S(\lambda_s)/S(\lambda_{ss})] E'_{pbe}$. 这里引入等效辐射照度的概念, 它是指采用波长 λ_{ss} 模拟光源来模拟实际工作波长为 λ_s 的系统时, 所需要的与实际系统光电阴极面上辐射照度相对应的辐射照度. 因此, 信号模拟光源在光电阴极面上的辐射照度 E_{pse} 称为信号光等效辐射照度, 后向散射模拟光源在光电阴极面上的辐射照度 E_{pbe} 称为后向散射光等效辐射照度.

模拟测试装置采用阴极面等效辐射照度法来模拟实际系统的信号和后向散射光. 因此, 推导得到信号和后向散射光模拟光源的功率分别为

$$P_{ss}(t) = \frac{4\pi(l_s \tan\theta_{ss})^2}{\rho_m T_{os} T_{plas}} \left(\frac{f'_{os} + x'_s}{D_{os}} \right)^2 \frac{S(\lambda_s)}{S(\lambda_{ss})} \cdot \frac{\rho_{obj} T_0 D_0^2 e^{-\beta_{ext}(z_{obj} + l_{obj})}}{4A_d l_{obj}^2} P_0 (t_{obj} \leq t \leq t_{obj} + t_p) \quad (17)$$

$$P_{bs}(t) = \frac{4\pi(l_b \tan\theta_{bs})^2}{T_m T_{os} T_{plas}} \left(\frac{f'_{os} + x'_s}{D_{os}} \right)^2 \frac{S(\lambda_s)}{S(\lambda_{ss})} \cdot \frac{\pi D_0^2 T_0 \beta_{sca}(\pi)}{4A_d c t_p} \frac{1 + \cos \delta}{\cos^2 \delta} P_0 \int f(z) e^{-\beta_{ext}(z+l)} \frac{1}{t^2} dt \quad (18)$$

3 模拟光源功率范围的确定方法

帧频为 f_z 的 ICCD 在光照度为 E_{psv} 的连续光照明下, 光电阴极面在一帧时间内所产生的光电量密

度为 $E_{psv} S_0 / f_z$, S_0 为积分灵敏度^[8]. 脉冲宽度为 t_p , 重复频率为 f_{ss} 的信号模拟光源照射光电阴极面, 在一帧时间内产生的光电量密度为 $E_{psc} S(\lambda_{ss}) t_p f_{ss} / f_z$. 认为 ICCD 在一帧时间内, 光电阴极面在连续光与脉冲光照射下所产生的光电量密度相同, 即光电子数密度相同, 则它们所获得图像的亮度相同. 即

$$E_{psc} = \frac{E_{psv} S_0}{S(\lambda_{ss}) Du_s} \quad (19)$$

式中信号模拟光源的占空比 $Du_s = t_p f_{ss}$. 使信号模拟光源的阴极面等效辐射照度为 E_{psc} , 则由式(9)和式(19)可以写出信号模拟光源的峰值功率为

$$P_{ss} = \frac{4\pi(l_s \tan \theta_{ss})^2 (f'_{os} + x'_s)^2 S_0}{\rho_m T_{os} T_{plas} D_{os}} \frac{S_0}{S(\lambda_{ss}) Du_s} E_{psv} \quad (20)$$

由式(20)可以看出: 增加占空比可以降低模拟光源的峰值功率.

BSMARGIS 模型中, 照明光源的脉冲宽度 t_p , 重复频率 f_s , 占空比 $Du = t_p f_s$. 在一帧时间内, 信号模拟光源与实际系统的信号光照射光电阴极面所产生的光电子数密度相同, 即认为达到了模拟的要求

$$E_{psc} S(\lambda_{ss}) t_p f_{ss} / f_z = E'_{psc} S(\lambda_s) t_p f_s / f_z \quad (21)$$

BSMARGIS 模型中的信号光在光电阴极面上的辐射照度为

$$E'_{psc} = \frac{S(\lambda_{ss}) f_{ss}}{S(\lambda_s) f_s} E_{psc} \quad (22)$$

由式(11)可得到 BSMARGIS 模型中, 系统其它参量不变时照明光源的峰值功率

$$P_0 = \frac{4A_d l_{obj}^2}{\rho_{obj} D_0^2 T_0 e^{-\beta_{ext}(z_{obj} + l_{obj})}} E'_{psc} \quad (23)$$

$(t_{obj} \leq t \leq t_{obj} + t_p)$

BSMARGIS 模型中, 后向散射光在光电阴极面上的辐射照度为

$$E'_{pbe}(t) = \frac{\pi D_0^2 T_0 \beta_{sca}(\pi)}{4A_d c t_p} \frac{1 + \cos \delta}{\cos^2 \delta} \cdot P_0 \int f(z) e^{-\beta_{ext}(z+l)} \frac{1}{t^2} dt \quad (24)$$

后向散射模拟光源的阴极面等效辐射照度为

$$E_{pbe} = \frac{S(\lambda_s)}{S(\lambda_{ss})} \frac{f_s}{f_{ss}} E'_{pbe} \quad (25)$$

利用式(10)的后向散射模拟光源与在光电阴极面上产生的辐射照度关系, 最终确定后向散射模拟光源的功率.

4 计算实例

被测试器件是采用 S-20 光电阴极的像增强器^[9]与 CCD 耦合. 对于表 1 所给出的 BSMARGIS 模型参量和表 2 所给出的模拟测试装置参量, 根据前面给出的相关参量确定方法进行了实例计算.

首先需要确定背景板、析光镜和分辨率板的尺寸. 计算结果为: 取 $d_b = d_{res} = 400$ mm, 满足 $d_b \geq \frac{l_1}{f_{os}}$ $D_d = 360$ mm 条件; $d_m \geq 155$ mm; $l_s = l_b = 1.14$ mm.

表 1 BSMARGIS 模型参量

λ_s /nm	D_0 /mm	D_d /mm	t_p /μs	d_0 /mm	δ /mrad	θ_r, θ_t	T_0
808	200	18	2	500	0	0.2°	70%
ρ_{obj}	l_{obj} /m	$\beta_{ext}/\text{Km}^{-1}$	f_s/kHz	f_z/Hz	$\beta(\pi)/\text{Km}^{-1} \text{sr}^{-1}$	$S(\lambda_s)/(\text{mA}/\text{W})$	A_{obj}/m^2
0.3	800	1.955	15.625	25	0.0391	2	6

表 2 距离选通成像系统分辨率模拟测试装置参量

$\lambda_{ss}, \lambda_{bs}$ /nm	D_{os} /mm	f_{os} /mm	T_{os}	l_1 /m	l_2 /m	l_3 /m	$S(\lambda_{ss})/(\text{mA}/\text{W})$
650	100	100	70%	2	1.94	0.06	30
θ_{ss}, θ_{bs}	T_{plas}	θ_m	T_m	ρ_m	f_{ss}/Hz	S_0 (μA/lm)	
10°	30%	45°	50%	0.5	15.625	300	

第二步, 根据像增强器的动态范围, 来确定信号模拟光源的峰值功率范围和 BSMARGIS 模型中照明光源的峰值功率. 如果像增强器的动态范围是 $E_{psv} = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ lx, 计算结果如表 3.

表 3 信号模拟光源和 BSMARGIS 模型中照明光源的峰值功率计算结果

E_{psv}/lx	$E_{psc}/(\text{W}/\text{m}^2)$	P_{ss}/mW	P_0/kW
10^{-4}	3.3×10^{-5}	0.18	0.876
10^{-3}	3.3×10^{-4}	1.8	8.76
10^{-2}	3.3×10^{-3}	18	876

最后, 根据 BSMARGIS 模型中照明光源峰值功

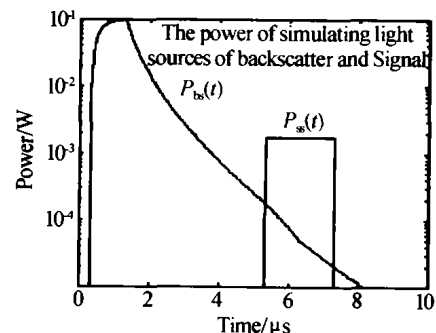


图 2 后向散射模拟光源和信号模拟光源的功率随时间变化 Fig. 2 Power of the simulating light sources of backscatter and signal vs. time

率来确定后向散射模拟光源的功率. 根据表 3 的计算结果, 信号模拟光源的峰值功率选用比像增强器动态范围下限高一个数量级所对应的计算结果, 即 $P_{ss} = 1.8 \text{ mW}$. 图 2 给出了信号和后向散射模拟光源的功率, $P_{ss}(t)$ 表示信号模拟光源功率随时间的变化, $P_{bs}(t)$ 表示后向散射模拟光源功率随时间的变化.

5 结论

结合大气距离选通成像系统后向散射光和信号光模型的研究结果, 设计了距离选通成像系统分辨率室内模拟测试装置, 给出了确定模拟测试装置结构参量的方法. 采用阴极面等效辐射照度法, 给出了模拟光源功率的计算方法和功率范围的确定方法, 并以 S-20 光电阴极的像增强器与 CCD 耦合为例, 计算了模拟光源功率.

参考文献

- 1 王耀祥, 田维坚, 黄琨. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析. 光子学报, 2004, 33(3): 318 ~ 321
Wang Y X, Tian W J, Huang K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3): 318 ~ 321
- 2 邱孟通, 张美, 罗建辉. 微带像增强器的选通特性研究. 光子学报, 2003, 32(4): 505 ~ 508
Qiu M T, Zhang M, Luo J H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 505 ~ 508
- 3 王忠厚, 李自田, 李建安. 一个新型的水下实况微光高速电视记录系统. 光子学报, 2003, 32(8): 1007 ~ 1009
Wang Z H, Li Z T, Li J A. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1007 ~ 1009
- 4 Kevin J. Snell, Andre Parent, Marc Levesque, et al. An active range-gated near-IR TV system for all-weather surveillance. *Proc of SPIE*, 1997, 2935: 171 ~ 181
- 5 Deni Bonnier, Vincent Larochelle. A range-gated active imaging system for search and rescue, and surveillance operations. *Proc of SPIE*, 1996, 2744: 134 ~ 145
- 6 Vincent Larochelle, Pierre Mathieu, Jean-Robert Simard. Tow generations of Canadian active imaging systems: ALBEDOS and ELVISS. *Proc of SPIE*, 1999, 3698: 229 ~ 243
- 7 宋正方. 应用大气光学基础. 北京: 气象出版社, 1990. 165 ~ 166
Song Z F. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics*. Beijing: Meteorological Publishing House, 1990. 165 ~ 166
- 8 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理. 北京: 国防工业出版社, 1999. 82
Xiang S M, Ni G Q. *The principle of photoelectric imaging devices*. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 82
- 9 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举. 红外与微光技术. 北京: 国防工业出版社, 1998. 340
Wu Z F, Liu M L, Zhang S J. *Infrared and low level light technology*. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 340

The Resolution Simulating Measurement Setup for Range-gated Imaging System

Li Li^{1,2}, Gao Zhiyun¹, Wang Xia¹, Jin Weiqi¹, Ma Haimu³

1 Dept. of Optical Engineering, School of Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081

2 Research Institute of Chemical Defense, No. 501, Postbox 1044, Beijing 102205

3 Shi Jiazhuang Military Mechanic Engineer College, Shijiazhuang 050003

Received date: 2003-12-19

Abstract The range-gated imaging system combines the technologies of pulsed laser illuminating and range-gated ICCD. To measure and evaluate the resolution of range-gated imaging system under certain atmosphere conditions, a simulating measurement setup is designed. Two light sources are used for simulating the signal and backscatter light respectively. Based on the method of equivalent irradiance on photo-cathode, the methods of power calculation and power range determination for simulating light sources are provided. In the case of image intensifier using S-20 photo-cathode coupled with CCD, based on the model of optical backscatter and signal for range-gated imaging system, the power of simulating light sources are calculated.

Keywords Laser technology; Range-gated imaging; Equivalent irradiance; Resolution; Backscatter

Li Li was born in 1970, in Liaoning Province of China. She graduated from Optical Physics Department of Changchun Optics and Fine Mechanics Institute and received the Master's degree in 1996. From 1996 to 2001, she worked in Research Institute of Chemical Defense. She is presently pursuing the Ph. D. degree in Beijing Institute of Technology. Her major interests are range-gated imaging, photoelectric measurement technology.