

doi:10.3788/gzxb20134211.1340

光电系统探测能力敏感度分析方法

谭碧涛^{1,2,3}, 陈洪斌¹, 王群书³, 关小伟³

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要:分析了光电系统探测能力的影响因素,建立了基于各影响因素的系统探测能力模型,提出各影响因素敏感因子概念,给出了敏感权重分析评价方法,并且实现对系统探测能力的敏感度分析.基于建立的敏感性分析方法,对光电系统进行了敏感性仿真分析,给出了各影响因素的敏感权重.结果表明:系统口径、系统焦距、大气透过率、探测信噪比阈值、探测象元大小以及成像象元数对探测能力的影响最为明显,且探测信噪比阈值、探测象元大小以及成像象元数的变化与系统探测能力的变化成反向关系;天空背景亮度、系统透过率、CCD的量子效率以及积分时间对探测能力的影响为其次,除天空背景亮度外,其他参量与探测能力均属正向变化;系统的遮拦比对探测能力的影响程度最小,且其变化与探测能力呈反向关系;各参量的敏感权重与参量关系基本固定,不随初始条件变化而变化.仿真结果验证了该敏感度分析方法具有一定的完备性与通用性,可为系统设计提供技术支持.

关键词:光电系统;探测能力;敏感度;权重

中图分类号:N945; O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)11-1340-5

Sensitivity Analysis Method on Detecting Ability of Electro-optical System

TAN Bi-tao^{1,2,3}, CHEN Hong-bin¹, WANG Qun-shu³, GUAN Xiao-wei³

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Based on analysis of the influence factors on detecting ability of electro-optical system, a theory model of detecting ability on the influence factors is established, concept of sensitive factors of the detecting ability is put forward, an analysis method on weights sensitivity is given, and ration sensitivity research of the factors on the detecting ability is realized. Using the ration analysis method, the sensitivity of the electro-optical system is simulated under different initial conditions, and the sensitivity weights of the factors are gained. Results show that the diameter, focus, atmosphere transmittance, detecting SNR threshold, detecting pixel size and the imaging pixel numbers may influence detecting ability obviously, and detecting SNR threshold, detecting pixel size and the imaging pixel numbers change reversely with detecting ability; the sky background brightness, optical transmittance, quantum efficiency and integral time influence the detecting ability secondly, and mainly the sky background brightness change reversely with detecting ability; the ratio of obstruction influences the detecting ability least, changes reversely with detecting ability too; and the weights do not change on different initial conditions. The

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2012AA8083027)资助

第一作者:谭碧涛(1983-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为光电探测跟踪. Email:tanbitao@aliyun.com

导师:陈洪斌(1953-),男,研究员,博导,主要研究方向为光学和光束控制技术等. Email:chbin@ioe.ac.cn

收稿日期:2013-04-11;录用日期:2013-06-06

simulation results prove the completeness and generality of the sensitivity analysis method that can provide technical support for the electro-optical system design.

Key words: Electro-optical system; Detecting ability; Sensitivity; Weights

0 引言

光电系统的探测能力往往受各种内在和外在因素的影响,诸如系统参量、大气参量、背景参量等^[1-9].在系统探测能力分析中,敏感性分析主要用于对探测能力的各种影响因素进行权重分析,通过定量手段,梳理和确定其中对系统探测能力影响最为敏感的因素,从而使系统设计更具针对性、科学性、合理性.因此,敏感性分析是系统探测能力分析的一个重要方向.

目前,光电系统探测能力的分析广泛采用一种单因素分析方法^[1-9].基本思想是:对于系统探测能力的影响因素,根据实际情况,给出各影响因素的变化范围,按一定的步长逐步变动这些因素,计算系统探测能力的变化值,比较基本指标值,即可知道各因素对于目标性能指标的影响程度^[1-9].该方法简单可行,但存在明显的局限性.各因素的分析计算是完全独立的,而实际上系统探测能力各影响因素是综合存在的,不是简单的代数迭加;而且,对于光电系统的设计上,该方法不能较好地满足系统探测能力分析需求.

本文提出了一种基于微分的系统探测能力敏感性分析方法,给出了该方法的基本原理和具体实现流程,并给出了影响因素敏感权重分析方法.结合特定光电系统,利用提出的敏感性分析方法对系统的探测能力进行了敏感性分析,给出了各影响因素的权重.

1 系统探测能力理论分析

光电系统的探测能力一般用输出信号的信噪比来评定,信噪比定义为输出信号大小比上系统探测噪声的均方根值,系统的信噪比可以表达为^[9]

$$S/N = \frac{St}{\sqrt{(S+B+I_d)t+I_r}} \quad (1)$$

式中, S 为目标单位时间内产生的光电子数; B 为背景单位时间内产生的光电子数; t 为积分时间; I_d 为暗电流噪声单位时间内产生的光电子数; I_r 为读出噪声单位时间内产生的光电子数.

星等是对空间目标亮度的度量,规定零等星在大气层外照度值为 $E_0 = 2.65 \times 10^{-6} \text{ lx}$ (lx为照度单位勒克斯).假设可见波段的波长为 $0.555 \mu\text{m}$,则

1 W辐射通量等于 683 lm 的光通量,或者 1 lm 的 $0.555 \mu\text{m}$ 的单色光通量等于 W/683 的辐射通量.因此,目标星等与照度之间的关系可表达为

$$E_m = E_0 \times 2.512^{-m} = (1/683) \times 2.65 \times 10^{-6} \times 2.512^{-m} \approx 3.9 \times 10^{-9} \times 2.512^{-m} \quad (2)$$

则针对已知口径(D)、目标星等(m)、背景亮度(b)等参量可以计算出 S 和 B ^[6].

$$S = \frac{\pi^2}{4} \times D^2 \times q \times (\bar{\lambda}/hc) \times t \times \tau_o \times \tau_d \times (1-\epsilon^2) \times 3.9 \times 10^{-9} \times 2.512^{-m} / n_{\text{pix}} = S_0 \times 2.512^{-m} \quad (3)$$

式中, $\bar{\lambda}$ 为平均波长; h 为普朗克常量; c 为光速, D 为系统口径, τ_o 为系统透过率, τ_d 为大气透过率, ϵ 为光学系统的遮拦比, t 为曝光时间, S_0 为便于后续计算而设计的替代值, n_{pix} 为成像象元数,与光学系统残差、衍射、大气湍流等有关.

$$B = \frac{\pi^2}{16} \times d^2 \times q \times (\bar{\lambda}/hc) \times t \times b \times (1-\epsilon^2) \times (D/f)^2 \times \tau_o \quad (4)$$

式中: d 为 CCD 象元大小; f 为光学系统焦距; ϵ 为光学系统的遮拦比.

为简化分析过程,以白天探测为例,其他探测条件可类似处理.为实现对空间目标的有效探测,应满足

$$S/N = \frac{S}{\sqrt{S+B}} \geq T_n \quad (5)$$

将式(3)、(4)代入式(5),则光电系统白天的极限探测能力可表达为

$$m = -\log_{2.512} \left[\frac{T_n^2 + \sqrt{T_n^4 + 4T_n^2 B}}{2S_0} \right] = -\log_{2.512} \left[T_n^2 + \left(T_n^4 + \frac{\pi^2}{4} T_n^2 \times d^2 \times q \times (\bar{\lambda}/hc) \times t \times b \times (1-\epsilon^2) \times (D/f)^2 \times \tau_o \right)^{1/2} \right] / \left[\frac{\pi^2}{2} \times D^2 \times q \times (\bar{\lambda}/hc) \times t \times \tau_o \times \tau_d \times (1-\epsilon^2) \times 3.9 \times 10^{-9} / n_{\text{pix}} \right] \quad (6)$$

式中, T_n 为探测信噪比阈值,通常取值 6.

从式(6)可以看出,系统的探测能力与诸多因素有关,具体影响因素如表 1. 这些参量中,除了平均波长 $\bar{\lambda}$ 外,其他参量都是系统探测能力敏感度分析需要考虑的参量,包括环境参量、光学系统的参量以及 CCD 参量.

表1 光电系统探测能力模型中各参量意义
Table 1 The parameters meaning on detecting ability

Parameter	Symbol	Meaning
Signal	$\bar{\lambda}$	Mean wavelength
Environment	b	Sky background brightness
	τ_d	Atmosphere transmittance
Optical system	D	Optical diameter
	f	Optical focal
	ϵ	Ratio of obstruction
	τ_o	Optical transmittance
CCD	T_n	SNR threshold value
	d	Pixel size
	q	Mean quantum efficiency
	t	Integral time
Other	n_{pix}	Pixel number

2 参量敏感度分析

2.1 敏感因子的定义

从式(6)可以看出,光电系统探测能力计算模型为非线性模型.因此,求解系统探测能力的状态空间呈现出鲜明非线性特性,系统在某一状态下的探测能力可由诸参量的非线性方程描述为

$$m = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (7)$$

敏感性分析是一种不确定性分析方法^[10-12].由式(7)可知,当所有因素发生变化,分别由 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 变为 $x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_n$,变化量分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_n$,则在状态空间中系统的探测能力必然改变,探测能力 m 也发射变化,由 m 变为 m' ,则可由 $\Delta m = m' - m$ 表示所有因素变化共同造成的 m 变化量.

利用多元函数的泰勒展开式为

$$\Delta m \approx \frac{\partial m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial m}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial m}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (8)$$

对于探测能力分析可以知道,由某一参量的偏离并非是发生了客观的变化,其他参量不会由此引起变化.因此,只有参量 x_i 发生变化,其他参量未变化,即 $\Delta x_i \neq 0, \Delta x_j = 0, i = j$,则 m 变化量为 Δm_{x_i} ,是 Δx_i 对 m 的影响值,表示为

$$\Delta m_{x_i} = \frac{\partial m}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (9)$$

则探测能力总体变化为

$$\Delta m = \sum_{i=1}^n \Delta m_{x_i} \quad (10)$$

定义 m 的变化率与因素 x_i 的变化率之比为 m 对 x_i 的敏感因子 S_i ,则有

$$S_i = \frac{\Delta m_{x_i} / m}{\Delta x_i / x_i} = \frac{\frac{\partial m}{\partial x_i} \Delta x_i / m}{\Delta x_i / x_i} = \frac{\partial m}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{m} \quad (11)$$

S_i 代表了探测能力 m 对某参量 x_i 变化的敏感程度. S_i 为正,则 Δm 与 Δx_i 的变化方向相同,反之,则 Δm 与 Δx_i 的变化方向相反.由式(11)可知,探测

能力敏感因子 S_i 为探测能力 m 对参量 x_i 的偏导数 $\partial m / \partial x_i$,当前参量 x_i 和 m 的函数.

2.2 敏感因子的确定

根据式(6),对表1中相关参量求偏导(平均波长除外),可以得到各参量的敏感因子 S_i 依次如式(12)~(22).

$$S_b = -(1/\ln(2.512) \times m) 2B / [\sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})] \quad (12)$$

$$S_{\tau_d} = \frac{1}{\ln(2.512) \times m} \quad (13)$$

$$S_D = 1/\ln(2.512) \times m [2 - 4B / \sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})] \quad (14)$$

$$S_f = (1/\ln(2.512) \times m) 4B / [\sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})] \quad (15)$$

$$S_\epsilon = (2\epsilon^2 / \ln(2.512) \times (1 - \epsilon^2) \times m) \cdot [(2B / \sqrt{T_n^2 + 4B} (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})) - 1] \quad (16)$$

$$S_{\tau_o} = (1/\ln(2.512) \times m) [(1 - 2B / \sqrt{T_n^2 + 4B} (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B}))] \quad (17)$$

$$S_{T_n} = -(T_n / \ln(2.512) \times m) [(1 / T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B}) + (2T_n^2 + 4B) / \sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})] \quad (18)$$

$$S_d = -(1/\ln(2.512) \times m) 4B / [\sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})] \quad (19)$$

$$S_q = (1/\ln(2.512) \times m) (1 - 2B / \sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B})) \quad (20)$$

$$S_t = (1/\ln(2.512) \times m) (1 - (2B / \sqrt{T_n^2 + 4B} \cdot (T_n + \sqrt{T_n^2 + 4B}))) \quad (21)$$

$$S_{n_{\text{pix}}} = -1/\ln(2.512) \times m \quad (22)$$

2.3 敏感权重分析

为了更好地分析各敏感因子对系统探测能力的影响程度,对敏感因子进行归一化处理,处理方法为

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (23)$$

则各敏感因子的权重可表示为

$$S_i^M = S_i / S \quad (24)$$

对于多种初始条件下敏感权重表示为

$$S_{i,j}^M = S_{i,j} / S_i^s \quad (25)$$

式中, S_i^s 为某初始条件下敏感之和为

$$S_i^s = \sum_{j=1}^n S_{i,j} \quad (26)$$

3 仿真分析

3.1 参量设定

设定典型参量:平均波长为 $0.55 \mu\text{m}$,天空背景

亮度为 $14 \text{ W/m}^2/\text{Sr}$, 大气透过率为 75% , 光学系统有效通光口径为 0.6 m , 光学系统的焦距为 3 m , 光学系统的遮拦比为 0.3 , 光学系统透过率为 85% , 系统的探测信噪比阈值为 6 , CCD 象元大小为 $16 \mu\text{m}$, 平均量子效率为 85% , 曝光时间为 5 ms , 目标成像象元数为 9 .

3.2 仿真分析

根据文中提出的方法, 对系统的敏感因子与敏感权重进行仿真分析, 分析结果见表 2. 从表 2 中可以看出, 各参量对探测能力的影响程度都不一样, 系统的口径、大气透过率、系统的焦距、探测信噪比阈值、探测象元大小以及成像象元数对探测能力的影

响最为明显, 且探测信噪比阈值、探测象元大小以及成像象元数的变化与系统探测能力的变化成反向关系; 天空背景亮度、系统透过率、CCD 的量子效率以及积分时间对探测能力的影响为其次, 除天空背景亮度外, 其他参量与探测能力都属于正向变化; 系统的遮拦比对探测能力的影响程度最小, 且其变化与探测能力的变化属反向关系. 为此, 在系统设计过程中, 根据权重分析结果, 可以综合考虑器件、设计、加工等条件, 更有针对性的指导设计, 如 CCD 器件受限, 则可以通过增大系统口径、系统焦距以及优化光学系统设计减少成像象元数来提高系统的探测能力.

表 2 参量对探测能力敏感度分析

Table 2 The parameters sensitivity analysis on detecting ability

Parameter	b	τ_a	D	f	ϵ	τ_o	T_n	d	q	t	n_{pix}
Element	-0.086	0.172 5	0.172 9	0.172 1	-0.017 1	0.086 5	-0.172 1	-0.172 1	0.086 5	0.086 5	-0.172 5
Weight	0.061 6	0.123 5	0.123 8	0.123 2	0.012 2	0.061 9	0.123 2	0.123 2	0.061 9	0.061 9	0.123 5

为分析参量变化对各参量敏感权重的影响, 选取改变对系统探测能力影响较为明显的口径、大气透过率、系统的焦距、成像象元数等参量, 分析其敏感权重变化情况. 图 1 为口径在 $0.2 \sim 1.8 \text{ m}$ 变化情况下的口径敏感权重变化情况; 图 2 为口径、大气透过率、系统的焦距、成像象元数等参量分别变化情况下口径敏感权重变化情况 (此处选取口径敏感权重

变化举例, 其他参量的敏感权重变化情况类似口径敏感权重变化, 故不列图表示).

从图 1、图 2 可以看出, 在参量变化情况下, 某个参量的敏感权重变化很小, 基本保持不变, 即在此模型下, 各参量的敏感权重与参量关系基本固定, 不随参量的变化而变化, 验证了该敏感度分析方法的完备性与通用性.

4 结论

本文建立了光电系统对空间目标探测能力模型, 进而给出了系统探测能力影响因素. 针对光电系统探测能力的单因素分析方法存在的缺陷, 提出了一种基于微分的系统探测能力敏感性分析方法, 并给出了该方法的基本原理、具体实现流程和影响因素权重分析方法. 结合特定光电系统仿真分析结果可以看出, 该方法可以给出探测能力的各种影响因素的权重, 实现了定量分析, 确定其中对系统探测能力影响最为敏感的因素. 各影响因子的敏感权重不随初始条件变化而变化, 基本保持不变, 仿真结果验证了该模型下敏感度分析方法具有一定的完备性与通用性. 该方法可使系统设计更具针对性、科学性、合理性.

参考文献

[1] WU Ying-xia, ZHANG Jian-qi, YANG Hong-jian, et al. Application of Johnson criteria in evaluation field detection and recognition probability of IR system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 438-442.
吴颖霞, 张建奇, 杨红坚, 等. Johnson 准则在红外成像系统外场识别性能评估中的应用 [J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 438-442.

[2] LI Xu-dong, FENG Ai-guo, ZHOU Xin-ni, et al. Radiation characteristics of IR target simulator used in field [J]. *Journal*

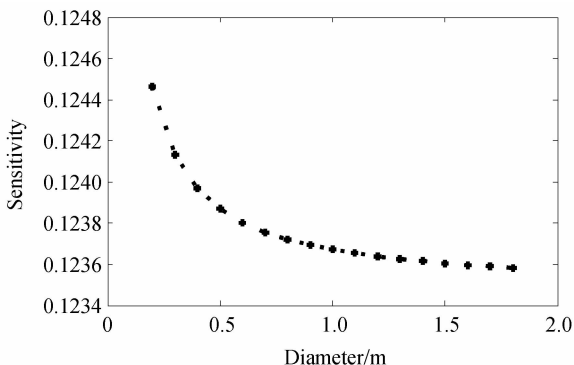


图 1 不同口径下对应敏感权重变化曲线

Fig. 1 The sensitivity curve on different diameters

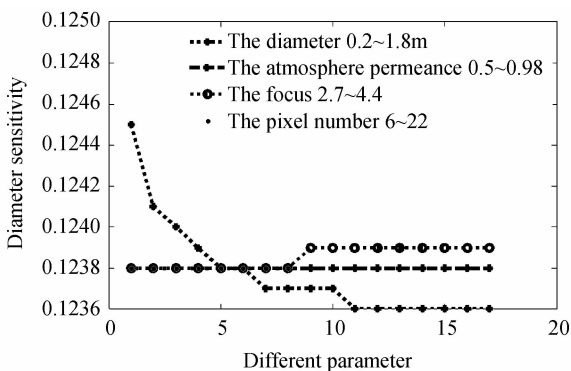


图 2 不同参量变化下口径敏感权重变化曲线

Fig. 2 The diameter sensitivity curve on different parameter

- of *Applied Optics*, 2010, **31**(2): 256-260.
李旭东, 冯爱国, 周新妮, 等. 外场用红外目标模拟器辐射特性测量研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(2):256-260.
- [3] TAN Bi-tao, JING Chun-yuan, WANG Bao-guo, *et al.* Precision of magnitude measurement caused by spectral filtering technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 187-191.
谭碧涛, 景春元, 王宝国, 等. 光谱滤波技术对星等测量准确度影响[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2):187-191.
- [4] WEI He-li, Chen Xiu-hong, Yu kai, *et al.* Analysis of the detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2): 187-191.
魏合理, 陈秀红, 余凯, 等. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(2):187-191.
- [5] WAN Yu-zhu, SONG Hui, KANG Zhi-yu. The research of identification on calculation model of equivalent magnitude of space targets [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(6): 2292-2295.
万玉柱, 宋晖, 康志宇. 基于空间光学探测的空间目标星等特性分析研究[J]. *宇航学报*, 2009, **30**(6):2292-2295.
- [6] TAN Bi-tao, JING Chun-yuan, ZHANG Xin, *et al.* Research on imaging simulation of electro-optical system for space target [J]. *Computer Simulation*, 2009, **29**(5): 240-243.
谭碧涛, 景春元, 张新, 等. 光电系统对空间目标成像仿真技术研究[J]. *计算机仿真*, 2009, **29**(5):240-243.
- [7] CHEN Fang-han, WANG Wen-sheng, YANG Kun. Detection and recognition of infrared target based on the multiwavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 295-299.
陈方涵, 王文生, 杨坤. 基于多小波变换的红外目标探测与识别[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 295-299.
- [8] CHEN Rong-li, HAN Le, CHE Chi-cheng. Research on unilluminant space target visual detection technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1438-1440.
陈荣利, 韩乐, 车驰骋, 等. 非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1438-1440.
- [9] SUN Xin, BAI Jia-guang, WANG Zhong-hou. Optical system design of an airborne multispectral camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3160-3164.
孙鑫, 白加光, 王忠厚. 一种机载多光谱相机的光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3160-3164.
- [10] OAKLEY J E, O HAGAN A. Probabilistic sensitivity analysis of complex models a Bayesian approach[J]. *Royal Statistical Society*, 2004, **66**(3): 751-69.
- [11] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Techno Metrics*, 1999, **41**(1): 39-56.
- [12] TARANTOLA A S. On the relative importance of input factors in mathematical models safety assessment for nuclear waste disposal [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2002, **97**(459): 702-709.