

引用格式:袁涛,陈建发,潘枝峰,等.光电侦察系统分辨能力研究分析[J].电光与控制,2019,26(6):85-88,91. YUAN T, CHEN J F, PAN Z F, et al. Analysis on resolution of electro-optical reconnaissance system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):85-88, 91.

## 光电侦察系统分辨能力研究分析

袁涛<sup>1</sup>, 陈建发<sup>2</sup>, 潘枝峰<sup>2</sup>, 王合龙<sup>2</sup>

(1. 海装驻武汉地区军事代表局, 武汉 430060; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 分析了影响光电侦察系统分辨能力的基本链路要素, 给出了一种通用性能预测模型的建立方法, 建立了红外光电侦察设备分辨能力计算模型, 并以最小可分辨温差 (MRTD) 作为最终评价指标。用一个具体实例进行了数值仿真计算, 说明了模型的适用性。

**关键词:** 光电侦察系统; 分辨能力; MRTD

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.017

## Analysis on Resolution of Electro-Optical Reconnaissance System

YUAN Tao<sup>1</sup>, CHEN Jian-fa<sup>2</sup>, PAN Zhi-feng<sup>2</sup>, WANG He-long<sup>2</sup>

(1. Military Representative Bureau of Navy Equipment Department in Wuhan District, Wuhan 430060, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** An analysis is made to the basic links that have effect on the resolution of the electro-optical reconnaissance system, and a method for establishing general performance predicting model is presented. With the Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD) as the ultimate evaluation index, the model for calculating the resolution of IR electro-optical reconnaissance system is constructed. A specific example is used for numerical simulation, which verifies the applicability of this model.

**Key words:** electro-optical reconnaissance system; resolution; MRTD

### 0 引言

光电侦察系统, 通过利用光电传感器发现、识别、确认、监视、跟踪并定位目标, 获取战场信息, 具有高分辨率成像、昼夜侦察、快速获取敌方情报等特点, 是提供战场支援和夺取信息优势的重要手段。机载光电侦察系统最具代表性的为美国雷神公司研制的综合传感器套件 (Integrated Sensor Suite, ISS), 红外传感器瞬时视场可达  $11.4 \mu\text{rad}$ <sup>[1]</sup>。

随着光电侦察系统对分辨能力需求的不断提高, 设计之初对系统的评估预测显得越来越重要, 这关系到系统的最终性能以及分系统的指标参数, 从而直接决定项目研发的规模及成本。现有的一些通用的预测模型, 如 FLIR92, NVTherm 和 NVThermIP, 在噪声、人眼积分滤波等方面做了大量细致的工作, 对于通用光电系统具有很强的适用性, 但对于“特殊需求”的光电系统开

发, 尤其项目设计之初牵涉到多个参数的权衡时, 设计者往往只能依靠各自建立的预测模型支撑项目开发<sup>[2]</sup>。

基于此背景, 本文首先分析了影响光电侦察设备分辨能力的各个链路, 继而给出了部分设计参数的确定方法, 并最终结合具体实例对系统分辨能力进行了预测, 给出了一种通用性能预测模型的建立方法。

### 1 基本链路分析

图1所示为光电侦察设备分辨能力的基本链路。

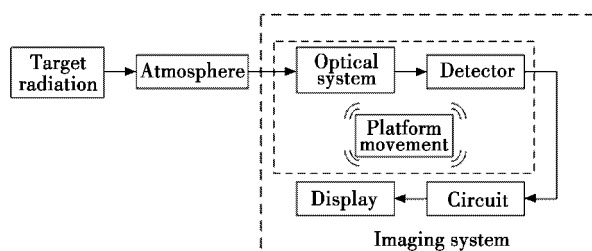


图1 分辨能力的基本链路

Fig.1 Basic links of resolution

各基本链路对光电侦察设备分辨能力的影响如下。

1) 大气链路的影响<sup>[3]</sup>主要体现在两个方面: ①由

收稿日期: 2018-05-25

修回日期: 2018-08-03

作者简介: 袁涛 (1972—), 男, 湖北武汉人, 硕士, 高工, 研究方向为光电成像系统设计。

大气湍流引起的成像附加像差造成的像模糊;②大气分子对辐射能量的吸收、散射、遮挡等作用使得目标反射(或辐射)能量衰减程度,即大气透过率。

2) 光学链路的影响主要为:光学系统像差及衍射效应使得对目标的细节存在一个最高的空间频率(光学截止频率)无法恢复。

3) 探测器的影响主要体现在两个方面。①孔径采样:探测器单个像元的孔径效应使得对积分时间内所有入射至一个像元内的光线进行平均响应,该像元大小决定了探测器可以响应的最大频率,也即探测器的截止频率。②空间采样:探测器阵列实际上是处在相互离散的位置上,这些离散位置对目标的空间采样取决于像元的中心间隔,因此像元间隔也就决定了信号可被恢复的最大频率,该频率称为探测器的奈奎斯特频率。

4) 平台运动的影响主要体现在:积分时间内,平台与目标之间的相对运动使得成像发生模糊,该模糊效应的程度可以用运动的数学传递函数表达,可以通过提升控制系统的稳定精度减小这种影响。

5) 电子学链路相对于其他链路影响小得多,尤其对于凝视型探测器,其影响可以忽略。

6) 显示链路的影响主要在于因显示器类型不同,其数学传递函数也有所不同,如CRT显示器显示光斑形状为高斯形状,而液晶显示屏显示光斑形状为矩形。

除上述基本链路外,当还有其他链路成为成像系统的一部分时,同样需考虑其影响。

## 2 建模分析

光电侦察设备系统分辨能力可以通过最小可分辨温差(MRTD)表示。在工程分析中,最小可分辨温差 $D_{MRTD}$ 的算式为

$$D_{MRTD} = 0.753 \frac{N_{NETD} R_{s,N} F_T}{M_{sys} F_c \sqrt{T_e F_f}} \quad (1)$$

式中: $N_{NETD}$ 为系统等效噪声温差; $R_{s,N}$ 为信噪比; $M_{sys}$ 为系统总的调制传递函数(MTF); $F_T$ 为特征频率; $F_c$ 为截止频率; $T_e$ 为人眼积分时间; $F_f$ 为帧频。

系统分辨能力的判定标准为

$$D_{MRTD} \leq \Delta T \tau \quad (2)$$

式中: $\Delta T$ 为目标与背景的温差; $\tau$ 为大气透过率。

由式(1)和式(2)可知,系统分辨能力主要由大气透过率 $\tau$ 和系统传递函数 $M_{sys}$ 决定。

### 2.1 大气链路影响分析

大气链路的影响主要包含目标辐射能量衰减和成像模糊两个方面。

1) 目标辐射能量衰减。

大气对目标辐射能量的衰减程度(即大气透过率)

可在Lowtran和Modtran等商业软件中进行计算,以中纬度夏季的大气条件为例,假设载机高度为10 km,对地斜程探测,计算3~5  $\mu\text{m}$ 频带内的大气透过率,如图2所示。

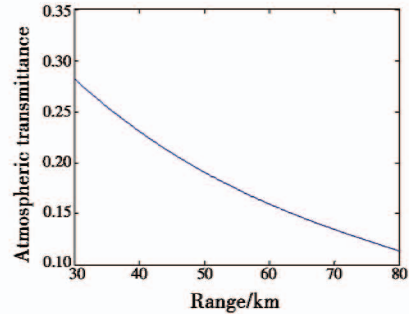
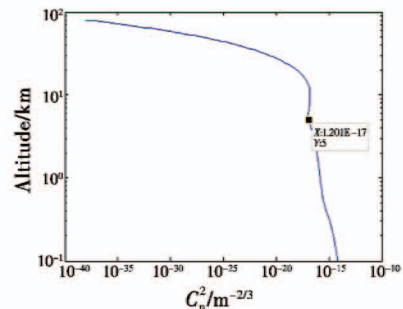


图2 大气透过率

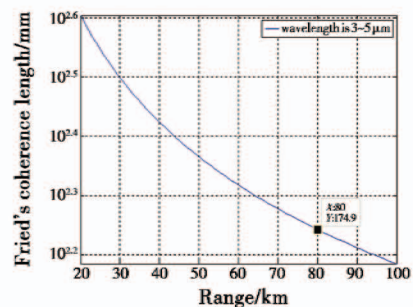
Fig. 2 Atmospheric transmittance

2) 成像模糊。

由大气湍流引起的成像附加像差造成的像模糊可以用Fried相干长度<sup>[4]</sup>与系统入瞳直径之比进行衡量。根据Hufnagel-valley5/7模型<sup>[3]</sup>计算出的不同海拔高度时折射率结构常数 $C_n^2$ 分布,对载机高度为10 km、对地斜程探测不同传输距离时的Fried相干长度进行计算,如图3所示。



a 不同海拔高度时 $C_n^2$ 分布



b 不同传输距离时的Fried相干长度

图3 大气湍流的影响分析

Fig. 3 Analysis on the influence of atmospheric turbulence

由图3可知,对地斜程远距探测时,由大气湍流引起的像质退化已不可忽略,其退化程度可以用调制传递函数 $M_A$ 表述。按照Fried的结论,大气湍流对成像的影响 $M_{atm}$ 的算式为

$$M_{atm} = e^{-3.44(\lambda/f_0)^{5/3}} \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为工作波长,单位mm; $f$ 为空间频率,单位cycle/



mrad;  $r_0$  为 Fried 相干长度, 单位 mm。

图4所示为大气湍流的调制传递函数, 其中, 载机高度为 10 km, 对地斜程探测为 100 km。

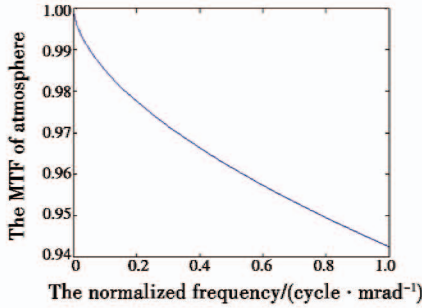


图4 大气湍流的 MTF

Fig.4 The modulation transfer function of atmospheric turbulence

### 2.2 成像系统各链路影响分析<sup>[5-6]</sup>

应用线性系统理论<sup>[1]</sup>, 成像系统各独立子系统的 MTF 连乘, 可得系统的  $M_{sys}$  为

$$M_{sys} = M_{opt} M_{dec} M_{mot} M_{cir} M_{dis} \quad (4)$$

式中:  $M_{opt}$  为光学系统的 MTF,  $M_{dec}$  为探测器的 MTF,  $M_{mot}$  为传感器平台运动的 MTF;  $M_{cir}$  为处理电路的 MTF;  $M_{dis}$  为显示器的 MTF。

#### 2.2.1 光学系统的 MTF

成像光学系统为小像差系统, 接近理想成像, 此时衍射效应成为限制光学系统截止频率的主要因素, 光学系统衍射限  $M_{opt}$  的算式为

$$M_{opt} = \frac{2}{\pi} (\arccos(f/F_o) - (f/F_o) \sqrt{1 - (f/F_o)^2}) \quad (5)$$

式中:  $f$  为空间频率;  $F_o$  为光学系统截止频率。

光学系统物空间的截止频率算式为

$$F_o = \frac{D}{\lambda} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $D$  为光学系统口径。

光学系统像空间的截止频率算式为

$$F_o = \frac{D}{\lambda(f_{efl})} \quad (7)$$

式中,  $f_{efl}$  为系统焦距。

由式(6)和式(7)可知, 在光学系统口径  $D$ 、波长  $\lambda$  不变的情况下, 增大光学系统的焦距  $f_{efl}$ , 实现光学成像系统在对物空间的角分辨率不变的情况下, 降低目标成像图像在像空间的线频率, 从而削弱探测器和显示器链路对系统 MTF 的衰减。

#### 2.2.2 探测器的 MTF

探测器的 MTF 包含像元孔径采样 MTF 和空间采样 MTF 两部分。

$$M_{dec} = \text{sinc}(\pi f a) \text{sinc}(\pi f b) \quad (8)$$

式中:  $a$  为像元大小;  $b$  为两个像元中心间隔;  $f$  为扫描方向的空间频率, 单位 lp/mm。

图5所示为探测器采样  $M_{dec}$  随空间频率的变化情

况, 选择小像元、高分辨率探测器可以提高探测器各个频率上的  $M_{dec}$ 。

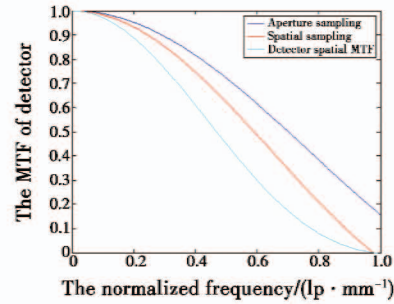


图5 探测器的 MTF

Fig.5 The modulation transfer function of detector

#### 2.2.3 运动的 MTF

对于光电侦察系统, 传感器与目标之间的运动有两类: 一类是像移引起的线性运动; 另一类是视轴抖动引起的随机运动。扫描方向上的线性传递函数为

$$M_{m\_linear} = \text{sinc}(\pi \alpha_{linear} f) \quad (9)$$

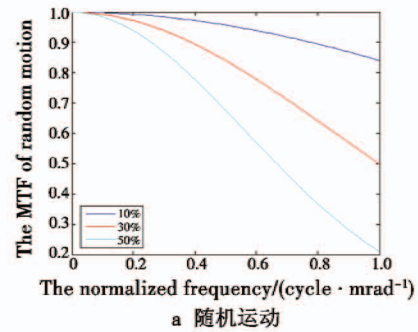
式中:  $f$  为空间频率, 单位 cycle/mrad;  $\alpha_{linear}$  为线性运动角位移, 单位 mrad。

随机运动的传递函数为

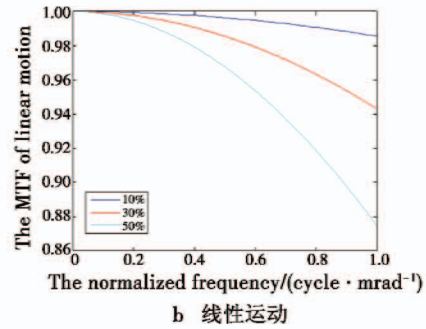
$$M_{m\_random} = e^{-2\pi^2 \sigma^2 f^2} \quad (10)$$

式中:  $f$  为空间频率, 单位 cycle/mrad;  $\sigma$  为视轴随机振动的均方根角位移, 单位 mrad。

图6所示为系统线性运动的调制传递函数, 其中, 当随机运动和线性运动造成的角位移分别为系统瞬时视场的 30% 时, 已对光电侦察系统分辨能力产生较大影响。



a 随机运动



b 线性运动

图6 运动的 MTF

Fig.6 The modulation transfer function of motion



2.2.4 显示器的 MTF

以液晶显示器为例,用  $D_w(D_h)$  表示显示器的宽(高),用  $H_{FOV}(V_{FOV})$  代表水平(垂直)视场,用  $d_w(d_h)$  代表各个显示元素的大小,则水平方向的  $M_{dis}$  为

$$M_{dis} = \text{sinc}\left(d_w \frac{H_{FOV}}{D_w} f\right) \quad (11)$$

式中,  $f$  为空间频率,单位 lp/mm。

图 7 所示为高清液晶显示器的调制传递函数。由图 7 可知,通过采用分辨率更高的显示器,可减小显示器环节对系统  $M_{sys}$  的影响。

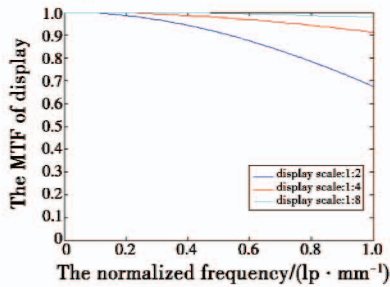


图 7 显示器的 MTF

Fig. 7 The modulation transfer function of display

由上述分析可知:

- 1) 远距斜程探测时应考虑大气湍流的影响;
- 2) 光学系统应采用长焦设计,以削弱探测器和显示器链路对系统  $M_{sys}$  的衰减程度;
- 3) 探测器采用大面阵、小像元、高分辨率配置,提高探测器环节的  $M_{det}$ ;
- 4) 采用高精度稳定平台,以抑制“运动链路”对  $M_{mot}$  的影响;
- 5) 选用分辨率较高的显示器。

3 仿真计算

3.1 设计参数

下面给出一个设计实例,说明建模方法。

- 1) 总体性能参数要求如下:典型目标尺寸为  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,目标温差为  $5\text{ K}$ ,载机高度为  $5\text{ km}$ ,识别距离为  $64\text{ km}$ 。
- 2) 探测器参数如下:波段为  $3.7 \sim 4.8\ \mu\text{m}$ ,探测器阵列为  $1024\text{ 像素} \times 1024\text{ 像素}$ ,探测器像元间隔为  $15\ \mu\text{m}$ ,填充率为  $0.95$ , $F$  数为  $4$ 。

3) 其他参数如下:系统  $N_{NETD}$  为  $50\text{ mK}$ ,图像信噪比  $R_{s,N}$  为  $6$ ,人眼积分时间  $T_e$  为  $2\text{ ms}$ ,帧频  $F_t$  为  $50\text{ Hz}$ 。

3.2 关键参数确定

1) 光学系统焦距。

表 1 所示为  $64\text{ km}$  处  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$  目标的特征尺寸对应不同焦距时所占的线对数。由表 1 可知,当系统焦距为  $1350\text{ mm}$  时,刚好满足目标特征尺寸在  $64\text{ km}$  处的识别需求(依据约翰逊法则,目标特征尺寸对应 6 线对),因此系统焦距应不小于  $1350\text{ mm}$ 。

表 1 不同焦距时目标特征尺寸所占的线对数

Table 1 Line pairs at different focal lengths

焦距/mm	系统截止频率/ (cycle · mrad <sup>-1</sup> )	64 km 处 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 特征尺寸 每周期所占线对数
1000	33.3	4.4
1200	40	5.3
1300	43.3	5.74
1350	45	6

2) 光学系统口径。

此时,光学系统截止频率应大于系统截止频率 ( $45\text{ cycle/mrad}$ ),由式(3)可知,对应光学系统的口径应大于  $191.25\text{ mm}$ ,光学系统的体积与口径关系较大,该值应尽量取小,可确定为  $200\text{ mm}$ 。

3) 伺服系统参数。

系统像元尺寸为  $15\ \mu\text{m}$ ,对应  $1350\text{ mm}$  焦距,单像元角分辨率为  $11\ \mu\text{rad}$ ,由 2.2 节分析可知,随机和线性运动的均方根角位移优于  $3.3\ \mu\text{rad}$ 。

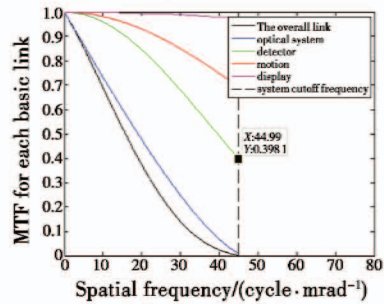
4) 显示器参数。

显示器应选用 1:4 以上的输出比例,可选用分辨率为  $4096\text{ 像素} \times 4096\text{ 像素}$  的液晶显示器。

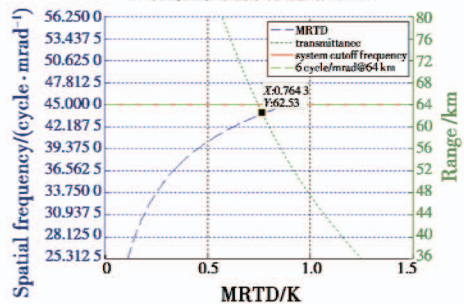
至此,除焦距外,已基本确定了系统的所有设计参数,而焦距的具体取值需根据系统分辨能力是否满足设计要求进行调整。

3.3 分辨能力计算

图 8a 所示为成像系统所有环节 MTF 随归一化频率的变化情况,图 8b 所示为系统分辨能力的计算结果,此时满足目标识别的探测距离为  $62.53\text{ km}$ ,并不满足系统需求,由 2.2 节分析可知,需进一步增大焦距。



a 成像系统所有链路 MTF



b MRTD 与空间频率、探测距离关系

图 8 系统分辨能力计算

Fig. 8 System resolution calculation

(下转第 91 页)



表2 不同斜距下测量精度

Table 2 Measurement precision at different slant distances

目标斜距/km	无卡尔曼滤波/m	卡尔曼滤波/m	目标斜距/km	无卡尔曼滤波/m	卡尔曼滤波/m
20	134.08	9.92	120	813.64	57.73
40	388.17	13.76	140	1 011.91	67.76
60	397.85	17.92	160	1 098.63	74.04
80	552.98	31.67	180	1 223.75	82.54
100	701.54	42.04	200	1 331.38	94.56

由表2可知,目标距离超过100 km后,不用卡尔曼滤波算法对数据进行处理,目标的探测误差超过了700 m,已无法满足作战要求。而采用基于蒙特卡罗法的卡尔曼滤波算法对数据进行处理后,即使目标距离达到200 km,其探测精度也在100 m以内,探测精度得到了极大提升。

### 4 结论

本文采用卡尔曼滤波算法与蒙特卡罗法相结合的方法,首先通过蒙特卡罗法计算测量误差的方差,以此作为卡尔曼滤波算法的输入。与不使用卡尔曼滤波算法得到的测量结果相比,不仅定位精度提高了一个数

量级,而且随着测量次数的增多,测量结果可以快速地向目标真实位置收敛。此方法操作简单,易于工程实现,不仅可以应用于雷达探测,同样适用于激光定位等其他探测方式,具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 孙晓闻. 无人/有人协同探测作战应用研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(4): 331-334.
- [2] 郝晓静, 李国新, 李明珠, 等. 无迹卡尔曼滤波算法在目标跟踪中的研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(13): 161-164.
- [3] 游胜玉, 姜林, 李祥. 基于渐消记忆自适应 Kalman 滤波的 GPS/DR 数据融合[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(21): 4720-4723.
- [4] 彭勇, 陈俞强. 基于改进卡尔曼滤波的北斗 GPS 联合定位算法[J]. 计算技术与自动化, 2018, 37(2): 59-62.
- [5] GAO W X, MIAO L J, NI M L. Multiple fading factors Kalman filter for SINS static alignment application[J]. Chinese Journal of Aeronautics. 2011, 24(4): 476-483.
- [6] 逯志宇, 王建辉, 巴斌, 等. 修正容积卡尔曼滤波数据域直接定位算法[J]. 航空学报, 2018, 39(9): 167-174.

(上接第88页)

将系统焦距由1350 mm增大为1500 mm(焦距的增大牺牲了系统的物方视场,具体设计时需仔细斟酌,此时,系统F数为7.5,与探测器F数不匹配,可考虑引入外置热光阑解决<sup>[7]</sup>),系统分辨能力计算结果如图9所示,由图可知系统分辨能力已满足要求。

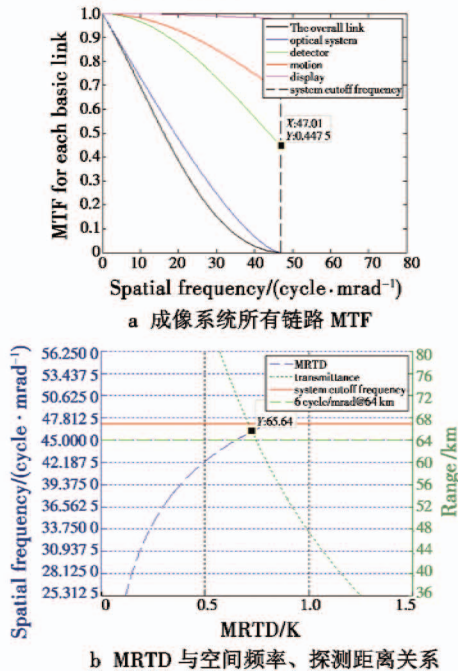


图9 增大焦距后系统分辨能力计算

Fig.9 System resolution calculation after enlarging the focal length

### 4 总结

本文对影响光电侦察设备分辨能力的各个环节进行充分细致的分析,给出了系统部分具体设计参数的确定方法,并给出一个具体实例,对系统分辨能力进行了预测分析。虽然本文是针对凝视型光电侦察设备进行讨论的,但对建模方法的讨论是普遍适用的,稍加修改就可以应用于大多数的光电成像系统,可为工程人员建模预测性能提供一定帮助。

### 参考文献

- [1] 王合龙. 机载光电系统及其控制技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2016.
- [2] OLSON C, THEISEN M, PACE T. et al. Model development and system performance optimization for staring Infrared Search and Track (IRST) sensors [C]//SPIE, 2016. doi:10.1117/12.2225862.
- [3] SMITH F G. Atmospheric propagation of radiation [M]. Bellingham:SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [4] WAN W. Passive IR sensor performance analysis using Mathcad modeling [C]//SPIE, 2009. doi:10.1117/12.815238.
- [5] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [6] CAMPANA S. Passive electro-optical systems [M]. Bellingham:SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [7] 陈建发, 赵泉, 蔡猛, 等. 基于热光阑的大F数制冷型红外光学系统[J]. 光电与控制, 2017, 24(3): 81-84.