

# 基于 python 的天空背景与大气扰动下无人机探测仿真

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 光电检测技术主要使用可见光和红外检测技术。可见光检测技术成熟且设备价格低, 计算机视觉技术的发展使其在各领域发挥巨大作用。红外检测技术根据温度差异进行检测, 尤其在夜间对目标的检测更为精确, 弥补了可见光的不足。然而, 实际状态下, 由于大气扰动, 探测器接收的弱小目标的辐射将受到影响。本文将对天空背景下低慢小目标中的无人机红外探测进行 python 仿真, 并对结果进行讨论与分析。

**关键词:** 红外探测 天空背景 大气扰动

**中图分类号:** TL929

**文献标识码:** A

## UAV detection simulation under sky background and atmospheric disturbance based on python

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** Photoelectric detection technology mainly uses visible light and infrared detection technology. With mature visible detection technology and low equipment price, the development of computer vision technology makes it play a huge role in various fields. Infrared detection technology according to the temperature difference, especially in the night to the target detection is more accurate, to make up for the lack of visible light. However, in the actual state, the radiation from the weak targets received by the detector will be affected due to the atmospheric disturbance. In this paper, python simulation of UAV infrared detection in low and slow small targets in sky background, and the results are discussed and analyzed.

**Key words:** infrared detection of the sky background, atmospheric disturbance

**Classification number:** TL929

**Reference code:** A

## 1 综述

### 1.1 光电检测技术

光电检测技术目前使用最多的是可见光及红外检测技术。可见光检测技术发展较为成熟, 并且其设备价格低廉。随着计算机视觉技术的发展, 可见光检测技术在各个领域都发挥了巨大作用。红外检测技术通过目标与背景的温度差异进行检测。尤其在夜间, 对目标的检测更为精确, 弥补了可见光检测技术的不足。

目前光电探测技术的研究主要分为传统检测技术与基于深度学习的检测技术。随着消费级无人机的规模迅速扩大, 低慢小目标的概念逐步得到关注。低慢小目标, 指的就是像无人机一样低空慢速的弱小目标。无人机发热量不高, 在白天由于环境影响, 使用红外成像系统

进行探测时，无人机几何特征并不明显。实际状态下无人机机身表面温度分布不均匀，电池上表面和电机处温度较高。本程序将对低慢小目标，即无人机的传统红外检测方法进行python 仿真。

## 1.2 相关物理公式

物体与外界的热对流公式可以由牛顿公式得出。物体对外辐射能量与物体温度及本身材料属性有关。著名的普朗克定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律和维恩-位移定律为我们总结出了理想黑体的红外辐射特性。

(1) 普朗克定律(Planck's law)是物理学中的一个基本定律，描述了黑体辐射的光谱能量密度与温度的关系。该定律由德国物理学家马克斯·普朗克于 1900 年提出，奠定了量子力学的基础，也为研究热辐射现象提供了重要的理论基础其数学表达式可以表示为：

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{ch}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1)$$

式中：

$c_1$  —— 第一辐射常数， $c_1 = 2\pi hc_2 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ ；

$c_2$  —— 第二辐射常数， $c_2 = ch/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ；

$M_{\lambda}$  —— 黑体光谱辐射出射度/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ；

$T$  —— 黑体温度/K；

$k$  —— 玻尔兹曼常数， $k = (1.38054 \pm 0.00018) \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

$\lambda$  —— 波长/ $\mu\text{m}$ ；

$h$  —— 普朗克常数， $h = (6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ 。

普朗克定律的实质是描述了辐射场的能量分布，它揭示了辐射场中存在着一一种基本的、离散的能量量子，这些量子的能量大小正比于它们的频率，也就是所谓的能量量子化现象。

### (2) 斯蒂芬-玻尔兹曼定律

斯蒂芬-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann law)描述了一个黑体辐射的总辐射能量与其温度的关系。该定律由奥地利物理学家约瑟夫·斯蒂芬和德国物理学家路德维希·玻尔兹曼于 19 世纪末提出，是研究热辐射现象的重要定律之一。

其数学表达式为：

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (2)$$

式中：

$\sigma$  —— 斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $\sigma = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

### (3) 维恩-位移定律

维恩位移定律(Wien's displacement law)描述了黑体辐射的峰值波长与温度的关系。该定律由德国物理学家威廉·维恩于 1893 年提出，是研究热辐射现象的重要定律之一。

其数学表达式为：

$$\lambda_{\max} T = b \quad (3)$$

式中:

$\lambda_{\max}$  —— 指绝对黑体温度条件下的红外辐射最大值所对应的波长/ $\mu\text{m}$ ;

$T$  —— 绝对黑体温度值/K;

$b$  —— 为常数/ $2.8978\mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。

维恩位移定律表明,随着温度的升高,黑体辐射的峰值波长会变短,辐射的频率也会增加,为红外探测奠定了基础。

(4) 热对流公式

$$Q = \rho \Delta T \cdot S \quad (4)$$

式中:

$Q$  —— 每秒的物体换热/W;

$\Delta T$  —— 物体与外界温度差/K;

$\rho$  —— 热对流系数,取  $40\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ ;

$S$  —— 物体表面积/ $\text{m}^2$ 。

## 2 相关物理量

### 2.1 太阳辐射

(1) 太阳高度角

太阳高度角也称太阳高度,指某地太阳光线与当地地平面所交的最小线面角,当太阳高度角为  $90^\circ$  时,辐照强度最大。在夜间太阳高度角为负值,日出和日落时,太阳高度角为  $0^\circ$ ,上午太阳高度角逐渐增大达到最大时又逐渐减小。

太阳高度角计算公式如式所示:

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (5)$$

其中,  $h$  表示当地太阳时间的小时角,  $\delta$  表示太阳赤纬,  $\phi$  表示当地的纬度。

### (2) 太阳辐照度

太阳是距离地球最近的天体,其辐射的电磁波覆盖了很宽的范围。作为一个热源星体,太阳对地球物体加热做出了很大贡献。太阳辐射大约一半的能量分布在可见光波段,43%的能量分布在红外波段。在红外探测领域,太阳辐射发挥了重要作用。

对于空中目标,一方面太阳直接照射对其红外辐射特性造成影响,另一方面还可以通过大气粒子以及目标表面材料的反射或散射间接的对其红外辐射特性造成影响。日地距离远大于地球半径,所以研究空中目标时通常将太阳光看作辐射照度均匀的平行光,其能量看作均匀分布的。将垂直于太阳光线的大气顶界单位面积上接收的总太阳辐照度称作一个太阳常数,太阳常数通常取值为  $1353\text{W}/\text{m}^2$ 。

太阳辐照度通常在给定时间段内进行积分,计算出该时间段内排放到周围环境中的辐射能(焦耳/平方米)。根据辐照度在大气吸收和散射后在空间或地球表面的测量方式,可以分

为空间辐照度和地表辐照度，空间辐照度是距离太阳、太阳周期和交叉周期变化的函数，而地表辐照度则取决于测量表面的倾斜度、太阳离地高度及大气条件等。

太阳辐照度根据测量方式的不同分成不同的类型。直接法向辐照度(Direct Normal Irradiance, DNI)是指在给定位置的地球表面，垂直于太阳辐射方向的平面测量到的太阳辐照度，是大气上方的地外辐照度在除去到达地面时吸收和散射掉部分辐照度后的剩余，而这个损失取决于一天中的时间(光通过大气层的路径长度取决于太阳仰角)、云量、含水量等。值得注意的是因为到太阳的距离不同，大气上方的辐照度也随着时间的变化而变化。散射辐照度(Diffuse Horizontal Irradiance, DHI)是指在水平面上测量得到的大气散射光在地球表面的辐射，来自于天空中所有的点。其值与太阳高度和大气透明度有关。若大气透明度非常好，则几乎没有 DHI。

全局水平辐照度(Global Horizontal Irradiance, GHI)是太阳在地球表面上的总辐照度，与直接法向辐照度和散射辐照度有直接的关系。由图 1 可知，太阳光斜入射时，辐照度将变为正入射时的太阳辐照度乘以太阳高度角的正弦。

计算如式

$$GHI = DHI + DNI \times \sin(h) \quad (6)$$

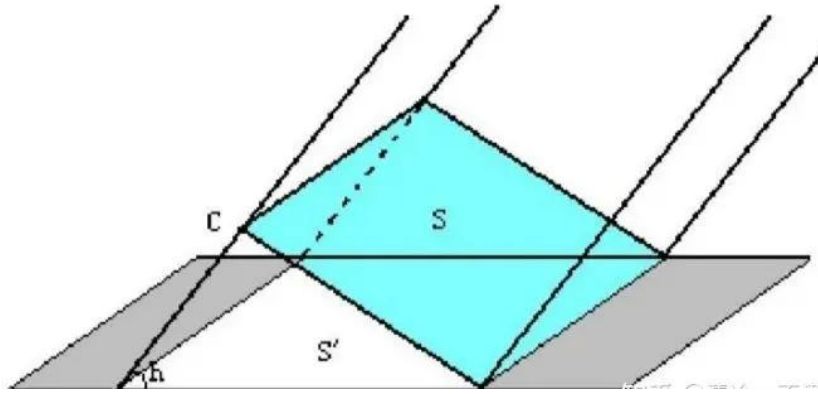


图 1 太阳斜射示意图

Fig 1.A Schematic diagram of the solar oblique radiation

## 2.2 大气透射率

假设大气为均匀截止，根据透射率的定义，有

$$\tau_0 = \frac{L(\lambda, 0)}{L(\lambda, x)} \quad (7)$$

因为光在介质中的衰减与距离成指数函数，可设

$$\tau_0(x) = ke^x \quad (8)$$

其中  $x$  为光线传播距离， $k$  为常数。

由于无人机本身执行的就是侦查功能，因此对大气能见度有一定要求。这里可以假设大气晴朗，不考虑大气污染物对光的散射与吸收，则有

$$\tau_0(H) = \frac{DNI}{DHI \sinh} = ke^H \quad (9)$$

其中  $H$  为同温层大气平均厚度, 100km。

## 2.3 无人机自身辐射

### (1) 无人机电池

目前无人机电池种类较多, 主要使用是锂离子电池。电池放电时, 其内部发生的化学反应较为复杂, 模拟电池放电过程较为困难。本文将电池看作均匀发热体。电池发热功率  $q(\text{W/m}^3)$  随放电倍率变化的关系为:

$$q = -3000 + 13600C + 2400C^2 \quad (10)$$

本文所研究的无人机飞行时间约 20min, 平均放电倍率 5C, 此时电池生热率为  $q = 99000 \text{W/m}^3$ 。

### (2) 无人机电机

本文以大疆 2312S 无人机电机为例, 由于飞行状态下无人机较为容易检测, 本文主要研究悬停状态下的无人机模型。此款电机悬停功率为 36W, 电机生热率为 9.58%, 计算得损耗值为 3.45W, 此款电机体积为  $16470 \text{mm}^3$ , 因此采用  $209469 \text{W/m}^3$  作为无人机电机发热的仿真参数。

### (3) 无人机表面积

这里假设无人机为  $180 \times 253 \times 77 \text{mm}^3$  的规则立方体。其表面积近似为  $0.15 \text{m}^2$ 。

无人机的电机则为四个  $25 \times 25 \times 25 \text{mm}^3$  的规则立方体。其表面积近似为  $0.0015 \text{m}^2$ 。

无人机的电池组为四个 Li-po 电池并联, 为四个  $25 \times 25 \times 25 \text{mm}^3$  的规则立方体。其表面积近似为  $0.0015 \text{m}^2$ 。

### (4) 无人机热平衡方程

由于无人机在空中运行了一段时间, 故可以认为无人机与环境充分热交换, 达到了热平衡。由于空气接近热绝缘体, 因此可以忽略空气的热传导。

有

$$Q_{\text{吸收太阳辐射}} + Q_{\text{电机}} + Q_{\text{电池}} = Q_{\text{热辐射}} + Q_{\text{热对流}} \quad (11)$$

式中  $Q$  表示热量  
带入数据可得到

$$\sigma T^4 + 5.2T - 1704.5 - \frac{\rho_{\text{suav}} \cdot GHI \cdot S}{2} \quad (12)$$

式中  $\rho_{\text{suav}}$  —— 无人机机身材料反射率。

### (5) 无人机热辐射计算

无人机温升主要是由于环境(太阳和地球)的加热以及电池和电机发热。气动加热较小, 可以忽略不计。机身温度与环境温度比较接近。无人机目标的红外辐射包括目标自身的红外辐射和其表面对环境辐射的反射两个部分。无人机目标主要有两个红外辐射产生部位: 电池

和电机。电池的红外辐射主要源于电池放电所产生的热辐射，电机的热辐射主要来源于定子与转子摩擦。目标对环境辐射的反射主要是太阳辐射。因此，无人机目标的红外辐射表示将由多个部分组成。无人机目标辐射能量  $R_u(T)$  主要包括以下四个部分：无人机自身的黑体光谱辐射  $R_{s-u}$ 、大气路径辐射  $R_{tp}$ 、无人机表面反射的大气辐射  $R_{ra-u}$ 、无人机表面反射的太阳辐射  $R_{rs-u}$ 。

综上，探测器入瞳处接收的目标辐射能量可表示为：

$$R_s(T) = \delta_{\varepsilon} (\gamma_{suav} \cdot R_{s-u} + \rho_{suav} \cdot (R_{rs-u} + R_{ra-u})) + R_{tp} \tag{13}$$

式中：

$\delta_{\varepsilon}$ —— 大气透射率；

$\gamma_{suav}$ —— 无人机机身材料发射率；

$\rho_{suav}$ —— 无人机机身材料反射率。

表 1 不同材料的发射率反射率

Tab 1.Emission rates and reflectivity of the different materials

	发射率	反射率
ABS 塑料	0.94	0.13
PC 塑料	0.9	0.8
碳纤维树脂	0.91	0.1

由于大气辐射远小于太阳辐射以及无人机自身光谱辐射，所以（13）式可简化为：

$$R_s(T) = \delta_{\varepsilon} (\gamma_{suav} \cdot R_{s-u} + \rho_{suav} \cdot R_{rs-u}) \tag{14}$$

为了简化计算，做出以下假设：无人机外表面均视为灰体辐射；忽略建筑物之间反射红外辐射等对无人机温度分布的影响；忽略无人机电池、旋翼之外零部件的相互辐射。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 光学系统有关物理量

（1）噪声等效功率 (NEP)。它定义为信号功率与噪声功率之比为 1 (即  $S/N=1$ ) 时，入射到探测器上的辐射通量 (单位为瓦) 显然，NEP 越小，噪声越小，器件的性能越好。

（2）像平面辐照度

有公式

$$E = \frac{1}{4} \pi L_0 \frac{\tau \left( \frac{D}{f} \right)^2 \left( \frac{l-f}{l} \right)^2}{\left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \left( \frac{l-f}{l} \right)^2 \right]} \tag{15}$$

式（15）中，E 为像平面辐照度，D 为通光口径，f 为透镜像方焦距，l 为物距， $\tau$  为光学系统透过率。

由于 l 远大于 f，可简化为

$$E = \frac{1}{4} \pi L_0 \frac{\tau \left( \frac{D}{f} \right)^2}{\left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \right]} \quad (16)$$

#### (6) 比探测率

只用 NEP 无法比较两个不同来源的光探测器的优劣。为此，引入新的性能参数比探测率  $D^*$ 。实验测量和理论分析表明，对于许多类型的光电探测器来说，其噪声电压与光电探测器光敏面积的平方根成正比，与测量带宽的平方根成正比。也就是归一化到测量带宽为 1Hz、光探测器光敏面积为  $1\text{cm}^2$ 。这种归一化的探测率一般称为比探测率，通常用  $D^*$  记之。根据定义， $D^*$  的表达式为

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} \quad (17)$$

### 3.2 系统示意图

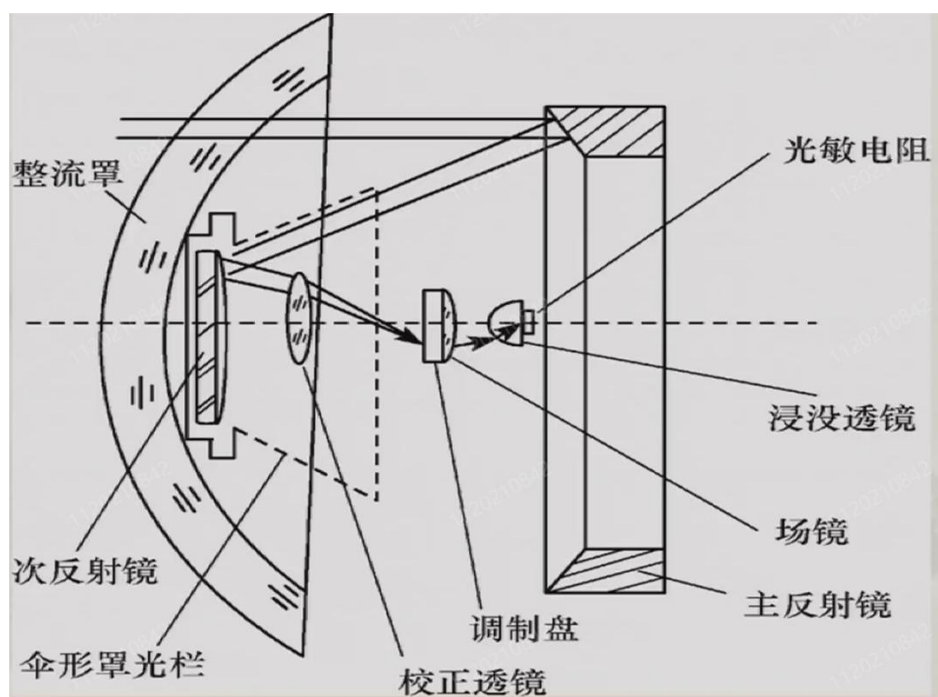


图 2 光学系统示意图

Fig 2. A Schematic diagram of the system

这里假设所有杂散光全部被光敏电阻接收，即光敏器件接收了通光孔径的 GHI。

## 4 程序代码

#### 4.1 计算太阳辐照度

```
def clearsky(self, site_location, time_str):
    cur_time = datetime.datetime.strptime(time_str, '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
    times = pd.date_range(start=cur_time, freq='1min', periods=20, tz=site_location.tz)
    # 使用默认的内部模型生成晴天数据
    start=f'{cur_time.year}-{cur_time.month}-{cur_time.day} {cur_time.hour}:{cur_time.minute}'
    # get_clearsky 方法返回具有 GHI、DNI 和 DHI 值的数据表
    clearsky = site_location.get_clearsky(times)
    irradiance = pd.DataFrame({'GHI': clearsky['ghi'], 'DNI': clearsky['dni'], 'DHI': clearsky['dhi']})
    irradiance.index = irradiance.index.strftime("%H:%M")
    ghi = irradiance['GHI'].iloc[0]
    dni = irradiance['DNI'].iloc[0]
    dhi = irradiance['DHI'].iloc[0]
    return ghi, dni, dhi
```

#### 4.2 计算无人机温度

```
ghi, dni, dhi= self.clearsky(
    location.Location(self.ui.lat.value(), self.ui.lon.value(), tz=self.ui.region.currentText()),
    self.ui.localtime.dateTime().toString("yyyy-MM-dd hh:mm:ss"))
altitude = self.calculate_altitude(self.ui.localtime.dateTime().toString("yyyy-MM-dd hh:mm:ss"),
                                    self.ui.lat.value(), self.ui.lon.value(),
    self.ui.utctimezone.value())
r = [0.13, 0.8, 0.1]
# 发射率, ABS,PC,碳复合
epsilon = [0.94, 0.9, 0.91]
# 发热/面积
battery = 9.9 * pow(10, 4)
motor = 2.1 * pow(10, 5)
# 自变量无人机温度
T = Symbol('T')
expr1 = self.σ * T ** 4 + 5.2 * T - battery*0.0015/10-motor*0.0015/25-40*275*0.13- (1 - r[0]) *
ghi * 0.15
T = solve(expr1)
T = T[1]
self.printf(f'无人机温度 {T} K')
```

#### 4.3 计算像平面辐照度

```
Ad = 0.5 * 0.1 * 0.1
# 0.5 平方厘米
delta_f = 5000
# 赫兹
D_star = pow(10, 11)
# 比探测率
D = D_star / pow(Ad * delta_f, 0.5)
# 探测率
```



```

NEP = 1 / D
E = NEP*pow(10,8)
self.printf(f'噪声等效功率{NEP}W')
# 噪声等效功率, 最小探测功率,算出为 5e-11
M0 = epsilon[i] * self.σ * pow(T, 4)
# 物体辐射出射度
L0 = M0 / math.pi
# 物体辐射亮度
t = 1
# 成像系统透过率
f = self.ui.foc.value()
S = pow(math.fabs(4*E*f*f/(t*t0*math.pi*L0-E)),0.5)
self.printf(f'最小通光孔径{S}m')
# 像平面辐照度
Lb = ghi * S
self.printf(f'光敏器件接受背景辐射{Lb}W')

```

## 5 计算结果示例



MainWindow

地方时: 2023/10/27 0:00

大洲/地区: Asia/Shanghai

UTC时区: 8

经度: 121.00

纬度: 33.00

探测器透镜焦距 (米): 0.05

无人机材料: ☒ ABS ☐ PC ☐ 碳纤维树脂

相关参数: 计算

计算结果:

无人机温度280.272117947585K  
 噪声等效功率5e-11W  
 最小通光孔径0.04234288323805837m  
 光敏器件接受背景辐射0.0W

图 3 结果示例

Fig 3. Example of Result

MainWindow

地方时

2023/10/27 12:00

大洲/地区

Asia/Shanghai

UTC时区

8

经度

121.00

纬度

33.00

探测器透镜焦距（米）

0.15

无人机材料

☐ ABS
☒ PC
☐ 碳纤维树脂

相关参数

计算

计算结果

最小通光孔径

0.04234288323805837m

光敏器件接受背景辐射0.0W

无人机温度298.197600768455K

噪声等效功率5e-11W

最小通光孔径

0.10441572363598813m

光敏器件接受背景辐射

74.58911788962426W

图 4 结果示例

Fig 4. Example of Result

MainWindow

地方时

2023/10/27 12:00

大洲/地区

Asia/Shanghai

UTC时区

8

经度

121.00

纬度

33.00

探测器透镜焦距（米）

0.09

无人机材料

☐ ABS
☐ PC
☒ 碳纤维树脂

相关参数

计算

计算结果

0.10441572363598813m

光敏器件接受背景辐射

74.58911788962426W

无人机温度298.197600768455K

噪声等效功率5e-11W

最小通光孔径

0.062262826815959016m

光敏器件接受背景辐射

44.47729870366163W

图 5 结果示例

Fig 5. Example of Result

## 6 结果分析

根据图 3、图 4、图 5 可见,在正午时无人机温度高于午夜时。透镜焦距增加后,通光孔径也随之增加,符合(16)式的要求。无人机的外壳温度在 273K 到 350K 直接,符合现实经验。

### 参考文献

- [1] 苏晓磊. 城市环境下低慢小目标光谱特性及红外辐射特性研究[D]. 郑州航空工业管理学院, 2023. DOI:10.27898/d.cnki.gzhgl.2023.000098.
- [2] 李达, 李云霞, 蒙文等. 低慢小目标面阵推进式激光成像探测方法研究[J]. 激光技术, 2014, 38(01):44-48.
- [3] 蔡雨. 天空背景下“低慢小”目标近红外探测与跟踪技术研究[D]. 南京理工大学, 2022. DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.001887.
- [4] 罗华钧, 罗刚, 崔植等. 中等分辨力的远距离中波红外大气透过率工程计算方法[J]. 光学技术, 2021, 47(06):728-732. DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2021.06.015.
- [5] 金伟其、王霞等.辐射度、光度与色度及其测量[M].北京:北京理工大学出版社, 2016.