

基于 MODTRAN 的红外系统作用距离变步长评估算法

赵一鉴¹, 王茜茜¹, 宗永红², 彭中¹, 胡必强¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 在红外成像探测系统的作用距离评估中, 要用到大气平均透过率参数, 而它又是作用距离的函数, 因而一般要用程序循环迭代的方法来计算作用距离。本文介绍了一种针对点目标探测的变步长作用距离评估方法, 调用 MODTRAN 软件计算大气平均透过率和天空背景辐亮度, 利用评估模型计算设定距离下的像元个数、信噪比和调制对比度, 判断是否满足目标探测所需的最低性能指标, 从而确定最大作用距离。在设定值与真实作用距离值相差较大时, 采用较大的步长; 在设定值与作用距离值相差较小时, 采用较小的步长。相比固定步长法, 可以在保持计算精度的同时, 大大加快计算速度。

关键词: 红外成像探测系统; 作用距离; 大气平均透过率; 变步长; MODTRAN

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)11-1067-06

Variable Step Length Operating Range Evaluation Algorithm for Infrared Systems Based on MODTRAN

ZHAO Yijian¹, WANG Qianqian¹, ZONG Yonghong², PENG Zhong¹, HU Biqiang¹

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In the evaluation of the operating range of an infrared imaging detection system, the average atmospheric transmittance is used, which is also a function of the operating range. Therefore, the operating range must be calculated using iteration algorithm. A variable step length method for the operating range evaluation of point target detection is introduced. MODTRAN software is used to calculate the atmospheric average transmittance and sky background radiance. The number of pixels, signal-to-noise ratio, and modulation contrast under the set distance are calculated using the evaluation model to identify whether the minimum performance index required for target detection is satisfied, and consequently determine the maximum operating range. When the difference between the set value and real operating range is large, a large step length is adopted; when the difference is small, a small step length is used. Compared with the const step length method, the proposed algorithm can accelerate the calculation significantly while maintaining accuracy.

Key words: infrared imaging detection system, operating range, average atmospheric transmittance, variable step length, MODTRAN

0 引言

作用距离是红外成像探测系统最重要的评估指标之一, 它与目标的辐射强度、背景的辐射亮度、大气透过率、探测器的性能等多种因素有关。早期的作用距离评估方程主要有 R. D. 小哈德逊作用距离方程^[1]、基于 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference, 噪声等效温差) 的作用距离方程^[2-4], 基于 MDTD

(Minimum Detectable Temperature Difference, 最小可探测温差) 的作用距离方程^[2]、基于对比度的作用距离方程等^[4]。当前的作用距离评估模型则同时考虑目标、探测设备和大气环境的相互作用, 对于点目标探测来说, 把以下 3 个要求作为点目标能否被探测到的基本条件^[5-6]:

1) 目标在探测器上所成的像元必须具有一定大小, 一般要求在单方向上的最小像元个数 n 在 1~3

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2020-10-02.

作者简介: 赵一鉴 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事红外系统性能评估研究, E-mail: zhao_yi_jian@126.com.

通信作者: 王茜茜 (1970-), 女, 博士, 教授, 主要从事光电成像和检测技术研究, E-mail: qqwang@bit.edu.cn.

之间;

2) 目标在靶面上的照度产生的信噪比 SNR (signal-to-noise ratio) 要满足一定要求;

3) 目标和背景在探测器上的照度必须具有一定的对比度, 该对比度满足信号检测和处理所需要的最低对比度。

根据以上要求进行作用距离评估时, 一般是先根据预想的大气环境条件和观测条件, 设定目标到探测设备的距离 R , 利用 LOWTRAN 或 MODTRAN 软件计算平均大气透过率, 再根据评估模型计算以上 3 个条件, 如果满足, 说明还不到最远作用距离, 增大 R 进一步计算, 直到其中有一个条件不满足为止, 则此时得到的 R 值就是最远作用距离。如果初始设定的 R 值较大, 不满足 3 个条件, 则减小 R 直到 3 个条件都满足为止。以上方法可以手工计算, 也可以通过编程方法自动计算, 后者的效率大大提高。文献[7-8]利用编程方法调用 MODTRAN 软件逐步计算, 得到作用距离。但在此方法中, 采用通常的固定步长方法, 步长太大, 则最终的计算精度不够; 步长太小, 则计算速度较慢。下面采用的变步长方法有效地解决了计算精度和速度之间的矛盾, 大大提高了计算效率。

1 作用距离评估方程

1.1 目标像斑大小计算

不考虑弥散时, 目标在焦平面上的像斑大小 d_0 可用下式表示:

$$d_0 = l/f/R \quad (1)$$

式中: l 是目标线度; f 是光学系统焦距; R 是目标到探测设备的距离。实际的目标成像大小与多种因素有关, 主要包括系统对目标的夹角、仪器的振动、跟踪平稳情况、光学系统的弥散、大气湍流的弥散、探测器的分辨率等。

1) 无弥散时目标的张角 σ_0

$$\sigma_0 = l/R \quad (2)$$

2) 大气抖动在积分时间内引起的角弥散 σ_1

影响大气抖动造成的像点弥散的主要因素有: 大气抖动频率和均方根角值、系统帧积分时间等。总的来说, 随波长的增大, 弥散斑越小。一般情况下, 较好天气下的可见光波段的弥散取值为 3" 或 2"。

3) 探测器空间分辨率限制引起的角弥散 σ_2

$$\sigma_2 = a/f \quad (3)$$

式中: a 为单元探测器的尺度。

4) 光学系统衍射极限引起的角弥散 σ_3

$$\sigma_3 = 2.44\lambda/D \quad (4)$$

式中: D 为光学系统口径。

5) 积分时间内跟踪系统抖动造成的角弥散 σ_4

$$\sigma_4 = \omega(2f) \quad (5)$$

式中: ω 为积分时间内目标在像面上的最大位移。

6) 系统总的像斑大小 d

考虑弥散情况下, 系统总的像斑直径大小为:

$$d = 2f \cdot \tan \left[\left(\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} + \sigma_0 \right) / 2 \right] \quad (6)$$

7) 像斑所占像元个数 n

$$n = d/a \quad (7)$$

在实际应用中, 主要考虑目标短边所成的像元个数。

1.2 信噪比计算

信噪比反映目标在探测器上的信号和探测器本身的噪声的相对强度, 信噪比 SNR 可表示为^[1-2]:

$$SNR = \frac{D^* \cdot E_0 \cdot A_d}{\sqrt{\Delta f} \cdot A_d} \quad (8)$$

式中: D^* 是红外探测系统的探测率; E_0 是点目标在探测器上的辐照度; A_d 是单个像素的面积; Δf 是系统的带宽。一般情况下, D^* 、 A_d 和 Δf 作为系统参数给出, E_0 则需要经计算给出, 它的计算公式为:

$$E_0 = \frac{I_0 \cdot A_{op} \cdot \tau_{op} \cdot \tau}{R^2 \cdot A_m} \quad (9)$$

式中: I_0 是目标辐射强度; A_{op} 是光学系统接收面积; τ_{op} 是光学系统透过率; τ 是大气平均透过率; A_m 是目标在探测器上成像的面积。在这些参数中, A_{op} 和 τ_{op} 是系统参数, τ 可以由 LOWTRAN 或 MODTRAN 计算给出, A_m 可以通过计算目标长边和短边在探测器上所成像斑大小的乘积得到, I_0 可由下式计算得到:

$$I_0 = \varepsilon \cdot A_0 \cdot M_0 / \pi \quad (10)$$

式中: ε 是目标的发射系数; A_0 是目标的有效辐射面积; M_0 是目标在工作波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的黑体辐射出射度, 它可通过对普朗克公式积分得到:

$$M_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (11)$$

式中: h 是普朗克常数; c 是光速; k 是玻尔兹曼常数; T 是目标的温度。对于气动加热的物体, 表面温度可由下式计算^[1]:

$$T = T_0 \left[1 + r \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M^2 \right] \quad (12)$$

式中: T_0 是周围大气的温度; r 是恢复系数, 对于层流, $r=0.82$; 对于紊流, $r=0.87$ 。 γ 取 1.4, M 是目标

运动的马赫数。

1.3 调制对比度计算

调制对比度反映目标和天空背景在探测器上辐照度的相对比值，它可表示为：

$$C_M = \frac{E_0 - E_{bg}}{E_0 + E_{bg}} \quad (13)$$

式中： E_{bg} 是天空背景在探测器上的辐照度，其计算公式为：

$$E_{bg} = L_{bg} \cdot A_{op} \cdot \tau_{op} / f^2 \quad (14)$$

式中： L_{bg} 是天空背景辐亮度，它可由 LOWTRAN 或 MODTRAN 计算给出，但两者给出的值是特定地区天空背景辐亮度的年平均值，无法反映 L_{bg} 随太阳高度角以及复杂多变的大气条件等的变化情况^[9-10]，所以有条件的话，可以用天光光学辐射特性测量设备进行实际测量。

2 算法实现

在程序设计上，采用 Matlab 或 VC 进行界面设计，采用 Matlab 的优点是可以直接调用其积分函数 integral，对普朗克公式积分得到目标的辐射出射度。

```

INTEGRATED ABSORPTION FROM 950 TO 1335 CM-1 = 205.8790 CM-1
AVERAGE TRANSMITTANCE = 0.4652

INTEGRATED TOTAL RADIANCE = 1.001837E-03 WATTS CM-2 STER-1 (FROM 950 TO 1335 CM-1 )
MINIMUM SPECTRAL RADIANCE = 8.836095E-07 WATTS CM-2 STER-1 / CM-1 AT 1232 CM-1
MAXIMUM SPECTRAL RADIANCE = 5.742489E-06 WATTS CM-2 STER-1 / CM-1 AT 1136 CM-1

```

图1 Tape6 文件的部分数据结构

Fig.1 Part of the data structure of file Tape6

程序设计方法是把 tape6 中从文件结束前的 1000 个字符读入一个字符串数组中，再利用字符串比较命令 strcmp 来逐一比较字符串数组中的元素，如果连续找到 3 个字符串“ AVERAGE ”、“ TRANSMITTANCE ”和 “ = ”，则其后的一个字符串就是大气平均透过率的值。同样，如果连续找到 4 个字符串“ INTEGRATED ”、“ TOTAL ”、“ RADIANCE ”和 “ = ”，则其后的一个字符串就是天空背景辐亮度的值。

在读取 tape6 文件时要注意的，一定要等到 tape6 中的数据生成后再读取。由于 MODTRAN 在运行时，是先删除旧的 tape6 文件，再生成新的 tape6 文件，所以程序有可能在 MODTRAN 运行时读到空字符串。为此，程序设计了双重防读空措施，一是在读取 tape6 时，先判断 tape6 文件是否存在，如果不存在，则一直等待。二是读取数据后，先判断字符串数

在界面上输入目标、探测设备的参数，在 LOWTRAN 或 MODTRAN 的接口界面中输入大气模式等参数。LOWTRAN7 的光谱分辨率为 20 cm^{-1} ，MODTRAN 的光谱分辨率提高到 1 cm^{-1} 。下面以 Matlab 调用 MODTRAN 为例说明程序设计方法。

2.1 Matlab 与 MODTRAN 的接口

主程序与 MODTRAN 软件的数据交换是通过 MODTRAN 软件的 tape5 和 tape6 文件实现的。在 MODTRAN 软件的输入界面上选择相应的选项后，MODTRAN 会生成一个 tape5 文件，其中包含了用户输入的各种选项的格式化数据。在执行 MODTRAN 软件时，MODTRAN 调用 tape5 中的数据进行计算，得到大气透过率和天空辐亮度等数据，保存在 tape6 文件中。

主程序与 MODTRAN 软件的接口之一是读取 tape6 中的大气平均透过率和天空背景辐亮度数据，为此，需要在 MODTRAN 软件的运行模式 (Execution mode) 中选择 “ Thermal Radiance ” 选项，这样，MODTRAN 会同时计算大气透过率和天空背景辐亮度。这两个数据在 tape6 文件的最后部分，如图 1 所示，需要想办法从文本文件中把它们提取出来。

组是否为空，如果为空则继续等待。程序代码如下：

```

while(~exist('tape6','file'))
end
fp=fopen('tape6','r');
fseek(fp,-1000,'eof');
while(1)
    str=textscan(fp,'%s');
    if (~isempty(str))
        break;
    end
end
fclose(fp);

```

主程序与 MODTRAN 软件的另一个接口是改写 tape5 文件中的 R 值，即目标与探测设备的距离。改写的方法是把 tape5 文件读入到一个字符串数组中，

删去原 tape5 文件，把对应 R 值的元素值改写后再按格式写入到新的 tape5 文件中。另一个更简单的方法是先用试探法找到 R 值在文件中的位置，然后直接在此处写入新的 R 值即可。例如，假设 R 值在距文件结尾处前 112 个字符处，则可用以下代码实现：

```
fp=fopen('tape5','r+');  
fseek(fp,-112,'eof');  
fprintf(fp,'%7.3f',R/1000);  
fclose(fp);
```

由于 tape5 中的距离以 km 为单位，所以 R 值在写入前要先转换一下。

2.2 变步长的循环算法设计

程序运行时，先设定一个较小的 R 值，计算 3 个约束条件，如果满足，则每次加一个较大的步长。例如初次步长设为 100 km，等到其中一个约束条件不满足时，则反向减小步长，第二次的步长可设为 25 km。等到再次满足条件时，完成了程序的一次循环，此时作用距离的精度是 25 km。然后再执行一次循环，正向步长设为 5 km，反向步长设为 1 km，作用距离的精度即为 1 km。如果想进一步提高精度，多执行几次循环即可，每次循环的步长都逐步减小，直到满足需要的精度要求为止。程序设计流程图如图 2 所示。

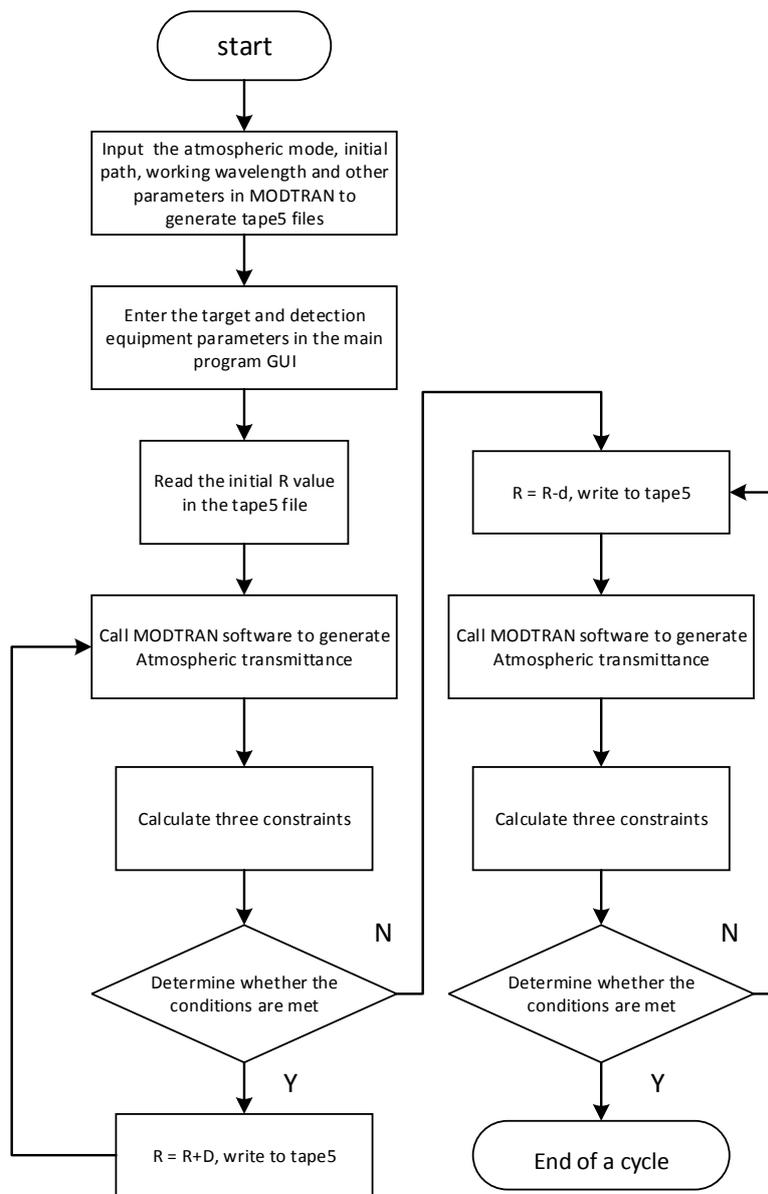


图2 变步长的一次循环计算程序框图

Fig.2 Program diagram for variable step length loop calculation

要注意的是, Matlab 程序在用 while 语句进行循环运行时, GUI 界面中编辑框的数据不更新显示。而为了监视程序中间的运行结果, 又需要观察每次循环计算时像元个数、信噪比和调制对比度的变化情况, 因此需要在输出显示代码后, 加一条延时程序, 延时时长为 1 ms 即可, 以不影响程序运行速度, 具体代码如下:

```
set(handles.edit14,'string',R/1000);
set(handles.edit15,'string',n);
set(handles.edit16,'string',SNR);
set(handles.edit17,'string',Cm);
pause(0.001);
```

其中的 pause 语句起到延时作用, 这样, GUI 编辑框中的数据即可正常更新显示。此外, Matlab 在调用 MODTRAN 程序时, 为了不对 GUI 的显示界面造成干扰, 需要 MODTRAN 程序以后台方式运行, 可执行以下代码实现:

```
system('mod4.exe','-echo');
```

3 运行结果

软件在 Matlab 中的设计界面如图 3 所示。在主程序界面中输入目标参数和设备参数, 点击“作用距离计算”按钮, 程序就自动运行, 并在输出框中显示每次循环计算的中间及最终结果。



图3 主程序界面

Fig.3 Interface of main program

变步长循环计算的效率是很高的。假定初始 R 值为 50 km, 最终的作用距离值为 300 km。采用固定步长计算时, 为了达到 1 km 的精度, 需要设定步长为 1 km, 这样程序需要循环计算 250 次。采用前述的变步长方法, 第一次循环需要 $3+3=6$ 次, 此时 $R=275$ km。第二次循环需要 $5+5=10$ 次。这样总共只需要 16 次就可达到所需的精度。程序耗时主要在 MODTRAN 程序的运行上。假定程序循环计算一次耗时 0.5 s, 固定步长计算需要耗时 125 s, 变步长计算只需要 8 s。

4 结论

本文在 Matlab 环境下结合 MODTRAN 软件, 根据红外成像探测系统评估模型实现了作用距离的自动计算, 为红外系统性能评估提供了便利手段。针对固定步长计算耗时较长的不足, 采用了变步长的循环计算方法, 大大提高了计算效率。

参考文献:

[1] R D 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
R D Hudson Jr. *Infrared System Engineering*[M]. John Wiley & Sons,

1969.
[2] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
BAI Tingzhu, JIN Weiqi. *Principle and Technology of Photoelectric Imaging*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.
[3] 姜宏滨. 用 NETD 表达的红外作用距离方程[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(2): 40-41.
JIANG Hongbin. An IR operating range equation expressed by NETD[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, 1(2): 40-41.
[4] 牟达, 韩红霞. 红外系统作用距离方程的比较与分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2012, 35(4): 5-9.
MU Da, HAN Hongxia. Comparison and analysis for operating range equations of infrared system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 35(4): 5-9.
[5] 邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 893-896.
XING Qianglin, HUANG Huiming, XIONG Rensheng, et al. Detectability analyzing of IR FPA tracking system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 893-896.
[6] 申俊杰. 凝视型红外成像探测系统的作用距离分析与验证[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(26): 7553-7555.
SHEN Junjie. Analysis and validation of operating range of staring IR

- imaging detecting system[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2009, **5**(26): 7553-7555.
- [7] 张广申, 毛征, 曲劲松, 等. 基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算[J]. *兵工自动化*, 2018, **37**(10): 77-80.
ZHANG Guangshen, MAO Zheng, QU Jinsong, et al. Simulation of operating distance of TV tracking system based on MODTRAN[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, **37**(10): 77-80.
- [8] 赵煜, 吴平, 孙文芳. 红外系统作用距离实时计算系统[J]. *应用光学*, 2014, **35**(3): 515-519.
ZHAO Yu, WU Ping, SUN Wenfang. Real-time calculating system for operating distance of infrared system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, **35**(3): 515-519.
- [9] 王东, 赵威, 陈勇, 等. 天空背景红外辐射亮度测量及其对目标探测的影响分析[J]. *红外技术*, 2015, **37**(9): 774-777.
WANG Dong, ZHAO Wei, CHEN Yong, et al. Measurement of sky background infrared radiant intensity and analysis of its effect on target detection[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(9): 774-777.
- [10] 路大举, 杨锐, 张波, 等. 天空背景光学辐射特性测量[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(S1): 51-54.
LU Daju, YANG Rui, ZHANG Bo, et al. Measurement of sky background luminance characteristics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(S1): 51-54.