

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.016

基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算

张广申¹, 毛 征¹, 曲劲松², 张 晨¹, 王明月¹

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 中国兵器装备研究院总体所, 北京 102209)

摘要: 为有效求取电视跟踪系统的作用距离, 提出一种基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算方法。该方法通过对 MODTRAN 的参数文件 Tape5 直接改写来配置大气环境参数, 调用 MODTRAN 计算指定条件下大气透过率, 通过逐次逼近的方法计算出系统的作用距离, 并进行仿真分析。仿真结果表明: 该方法能够得出作用距离与主要影响因素之间的关系, 可以为系统方案论证、设计提供参考, 使系统设计更加合理。

关键词: 电视跟踪系统; 作用距离; MODTRAN; 系统仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation of Operating Distance of TV Tracking System Based on MODTRAN

Zhang Guangshen¹, Mao Zheng¹, Qu Jinsong², Zhang Chen¹, Wang Pengyue¹

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. General Office, China Ordnance Equipment Research Academy, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to get the operating distance of TV tracking system effectively, a simulation method for calculating the operating distance of TV tracking system based on MODTRAN is proposed. This method is used to configure the atmospheric environment parameters by directly rewriting the MODTRAN parameter file Tape5, then calculate the atmospheric transmittance under the specified conditions by invoking MODTRAN, and finally calculate the operating distance of the system by successive approximation, finally do the simulation analysis. The simulation results show that this method can get the relation between the operating distance and the main influence factors, and can provide reference for system scheme demonstration and design, and make the system design more reasonable.

Keywords: TV tracking system; operating distance; MODTRAN; system simulation

0 引言

电视跟踪系统是一种集光电等多种技术于一体的综合系统, 可以对目标进行探测、识别与跟踪。该系统在军事领域应用广泛, 多与红外跟踪、激光测距等共同使用, 以达到全天候探测、识别和跟踪目标的要求。

作用距离是电视跟踪系统重要的综合性指标, 也是评价和检验电视跟踪系统的主要技术指标^[1]。分析作用距离的目的是找出目标源、大气和传感器性能三者之间的定量关系^[2]。当电视跟踪与红外跟踪、激光测距等技术配套使用时, 也可以为系统的设计研究提供科学论证, 以及为评价系统性能提供参考。目前, 国内外求取电视跟踪系统作用距离主要有 2 种方法: 外场试验与理论计算。外场试验方法比较接近真实使用情况, 但是该方法首先要制作系统样机, 具有成本高、不易操作等缺点。理论计算可以在系统设计时就对作用距离进行论证研究, 降低了成本, 并对特定条件下作用距离进行分析;

因此, 笔者采用理论计算的方法。

笔者针对 MODTRAN 精确度高、使用方便等特点, 结合电视跟踪原理, 提出一种电视跟踪系统作用距离仿真计算方法。该方法分析了作用距离与部分影响因素之间的关系, 可以为实际系统研制提供参考, 具有一定工程实用价值。

1 电视跟踪系统作用距离及满足的条件

在实际使用过程中, 为了使电视跟踪系统能够在一定距离上对目标进行稳定的跟踪, 需要满足一定的条件。通常情况下要求系统同时满足以下 3 个条件^[3]:

1) 目标辐射能量到达光学系统 CCD 靶面的照度要大于 CCD 靶面最小照度;

2) 目标在 CCD 靶面压行数要大于电视跟踪提取目标要求;

3) 目标和背景在 CCD 靶面对比度大于最小对比度要求。

笔者分别就这 3 个条件进行分析, 并由此提出

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-08-15

作者简介: 张广申(1992—), 男, 河北人, 硕士, 从事系统仿真研究。

一种电视跟踪系统作用距离仿真计算方法。

1.1 CCD 靶面照度

CCD 靶面照度 E' 的计算公式为:

$$E' = \frac{1}{4} \times E \times \tau \times \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (1)$$

式中: E 为天空背景照度; τ 为大气透过率和光学系统通过率的乘积; D 和 f 分别为光学系统的通光口径和焦距。

天空背景照度在白天的变化区间为 $10^2 \sim 10^5$ lx。由式(1)可知, 总透过率 τ 和光学系统相对孔径 D/f 的不同会影响 CCD 靶面照度。一般情况下, CCD 靶面的灵敏度高于 0.1 lx 即可满足要求, 白天时 CCD 基本都能满足最低照度要求。

1.2 目标在 CCD 靶面上的压行数

电视跟踪系统进行目标跟踪首先要提取目标。为了可靠提取目标, 避免因噪点等引起的虚警, 通常要求目标在 CCD 靶面压行数大于 2。在电视跟踪系统实际使用过程中, 目标经过大气传输进入光学系统并在 CCD 靶面成像时, 不仅会发生能量衰减, 而且在 CCD 靶面上的成像会发生弥散, 这是因为受到了大气传输、仪器振动以及光学衍射等因素的影响^[4]; 因此, 考虑到目标成像的弥散, 目标在 CCD 靶面上的压行数 n 的计算公式如下:

$$n = n_{vs} \times \frac{f\sigma_\Sigma}{2.06 \times 10^5} \quad (2)$$

式中: n_{vs} 为摄像机有效靶面的垂直分辨率(电视行/mm); f 为电视望远镜的焦距; σ_Σ 是目标受到大气抖动、光学系统、仪器振动、跟踪误差等因素影响后, 在像面上引起的角弥散的均方根值, 可以写成

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_i^2} \quad (3)$$

式中 σ_1 为在电视场时间内大气介质抖动引起的弥散, 其计算比较复杂, 一般情况下取 $\sigma_1 = 3''$ 。

光学镜头衍射分辨率限制引起的角弥散为

$$\sigma_2 = \frac{1}{2.3} \times \frac{1.22\lambda}{D} \times 2.06 \times 10^5 \quad (4)$$

式中 λ 为峰值波长, 对于电视跟踪系统 $\lambda = 550$ nm。

摄像机分辨率限制而引起的角弥散为

$$\sigma_3 = \frac{1}{2.3} \times \frac{1}{n_s f} \times 2.06 \times 10^5 \quad (5)$$

式中 n_s 为电视摄像机的分辨率(电视线/mm)。

电视跟踪系统实际使用过程中跟踪不平稳引起的像弥散为

$$\sigma_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} \times K \times \text{tg}^{-1} \frac{v}{R} \times T \times 3600 \quad (6)$$

式中 K 为电视跟踪系统跟踪架的不平稳系数, 一般取 $K=0.02$; v 为目标运动速度; R 为目标到探测器的距离; T 为电视场周期。

目标对电视跟踪系统的张角为

$$\sigma_i = \frac{1}{2.3} \times 2\sqrt{A} / \sqrt{\pi} \times \frac{1}{R} \times 2.06 \times 10^5 \quad (7)$$

式中 A 为所跟踪目标的有效反射面积。

1.3 目标和背景在 CCD 靶面上的对比度

电视跟踪系统在对目标进行提取探测时, 要求目标与背景在 CCD 靶面上的对比度大于一个阈值。这个阈值就是许用对比度。通常情况下许用对比度为 5%。

空中目标亮度主要由 2 部分组成: 一是目标反射太阳辐射的亮度, 二是目标反射大气散射的漫反射光的亮度^[5]。在电视跟踪系统的光学系统中, 普遍安装有截止滤光片, 作为光谱滤波设计, 其目的是提高目标与背景的对比度。

目标在 CCD 靶面上辐照度为

$$E_m = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_0 [\tau_m \tau_a L_m + \tau_b (1 - \tau_a) L_b] k \quad (8)$$

式中: τ_0 为光学系统透过率; τ_a 为目标至电视传感器的大气透过率; τ_m 和 τ_b 分别为光谱滤光片对目标和背景的滤光系数; L_m 和 L_b 分别为目标和天空背景光亮度; k 为像点弥散系数, $k = (\sigma_i / \sigma_\Sigma)^2$ 。

天空背景在 CCD 靶面上辐照度为

$$E_b = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_0 \times \tau_b \times L_b \quad (9)$$

根据式(8)和式(9), 则目标和天空背景在 CCD 靶面上的对比度为

$$C = \frac{E_m}{E_b} = \left[\frac{\tau_m \times \tau_a \times L_m}{\tau_b \times L_b} + (1 - \tau_a) \right] \times k \quad (10)$$

大气透过率 τ_a 计算比较复杂, 需要考虑的因素较多, 其计算方法主要有 2 种: 一是使用经验公式计算, 二是使用大气辐射传输模型计算。使用经验公式计算大气透过率, 考虑的大气因素较少, 得出的结果精确度较低, 不能很好地仿真电视跟踪系统使用过程中的实际大气传输情况; 因此, 为了准确计算大气透过率, 使仿真结果更加贴近实际情况, 笔者使用大气辐射传输模型 MODTRAN 计算大气透过率。

1.4 电视跟踪系统作用距离仿真计算

由电视跟踪需要满足的 3 个条件可知，作用距离 R 是靶面照度 E' 、压行数 n 和对比度 C 的隐函数，可以通过满足这 3 个条件求取作用距离 R ；因此，根据电视跟踪需要满足的 3 个条件，笔者提出了一种基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算方法。

本仿真计算方法主要分为 3 部分，首先设置目标参数、电视跟踪系统参数和大气参数；然后根据设置的大气参数配置 MODTRAN 模型；最后按照逐次逼近的方法通过多次调用 MODTRAN 模型计算出不同距离下的大气透过率 τ_a ，并由此计算出不同距离下的靶面照度 E' 、压行数 n 以及对比度 C ，则同时满足这 3 个条件的最大距离即为电视跟踪系统的作用距离。

2 MODTRAN 简介及其使用方法

2.1 MODTRAN 简介

目前应用比较广泛的大气辐射传输模型有 6S、LOWTRAN、MODTRAN 和 FASCODE 等模型^[6]。这些大气辐射传输模型在不同时期根据不同使用目的而研制，可以较为精确地计算大气辐射传输。

笔者使用 MODTRAN 模型，即中等光谱分辨率大气透过率及辐射传输算法和计算模型，由美国空军地球物理实验室与光谱科技公司利用 FORTRAN 语言联合开发^[7]。与其他模型相比，MODTRAN 模型考虑的因素更加全面，具有模式可选择，精确度高，数据输入、结果输出方便等特点，易于操作。使用时，通过在 MODTRAN 的参数配置文件 Tape5 中输入参数，可以模拟多种大气环境，通过模型运算就能在结果文件中得到相应的大气透过率等数据；因此，笔者选用该模型来仿真计算大气传输^[8]。

2.2 MODTRAN 使用方法

MODTRAN 使用简单，易于与其他编程语言结合。笔者使用 C/C++ 语言为 MODTRAN 添加参数设置界面，使其可视化程度更高，更加易于操作。MODTRAN 计算流程如图 1 所示。

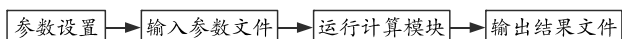


图 1 MODTRAN 计算流程

在 MODTRAN 软件使用过程中，首先对其进行参数设置，参数设置中主要设置大气模型参数、传输路径几何参数、光谱参数等。设置好的参数格式化输出为 Tape5 文件。运行计算模块后输出结果文

件 Tape6、Tape7、Tape8^[9]。对于电视跟踪系统作用距离仿真而言，只需关注结果文件中的大气透射率等结论性数据。

3 电视跟踪系统作用距离仿真计算系统

电视跟踪系统设计时要进行大量的科学实验和评估测试，而仿真可以为系统测试及性能评估提供一种经济有效的手段^[10]。通过使用仿真技术可以更加真实地仿真实际环境，进行实际系统的验证实验，具有通用性、开放性、可移植性等优点^[11]；因此，笔者提出了一种基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算方法，建立了作用距离仿真系统。该系统使用逐次逼近的方式计算一定条件下满足电视跟踪系统稳定跟踪 3 个条件的最大距离。

3.1 仿真系统组成

如图 2 所示，整个系统分为目标、大气传输、电视跟踪系统、仿真计算和结果显示等 5 个模块。其中，目标模块主要设置目标的有效反射面积、高度等参数。大气传输模块主要根据光电跟踪系统所处环境和探测路径等条件配置相应的大气模型，通过调用 MODTRAN 计算得到不同波长在传输过程中的平均大气透过率。电视跟踪系统模块主要设置电视跟踪系统各项性能指标参数。仿真计算模块把获取的各项参数代入计算公式中，按照逐次逼近的方法求出最优解。结果显示模块则显示电视跟踪系统作用距离。

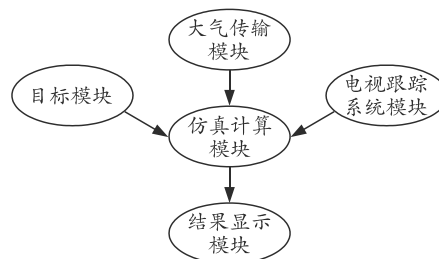


图 2 系统构成

3.2 仿真计算过程

仿真计算过程如下：

1) 人工输入电视跟踪系统参数、目标特征参数、配置大气模型、将大气参数写入 Tape5 文件。由于大气透过率本身就是作用距离 R 的函数，所以计算作用距离公式时设置初始作用距离为 R_0 。

2) 进入仿真计算模块，根据设置的大气参数与初始作用距离，调用 MODTRAN 计算出大气透过率数据 τ_a ，代入公式，分别求出靶面照度、压行数和对比度。

3) 判断是否满足电视跟踪的 3 个条件, 如果不足, 则初始作用距离 R_0 以步长 d 逐次减小, 直到 3 个条件都满足, 则临界值即为作用距离; 如果满

足, 则初始作用距离 R_0 以步长 d 逐次增大, 直到 3 个条件中有一个不满足, 则临界值即为作用距离。系统程序流程如图 3 所示。

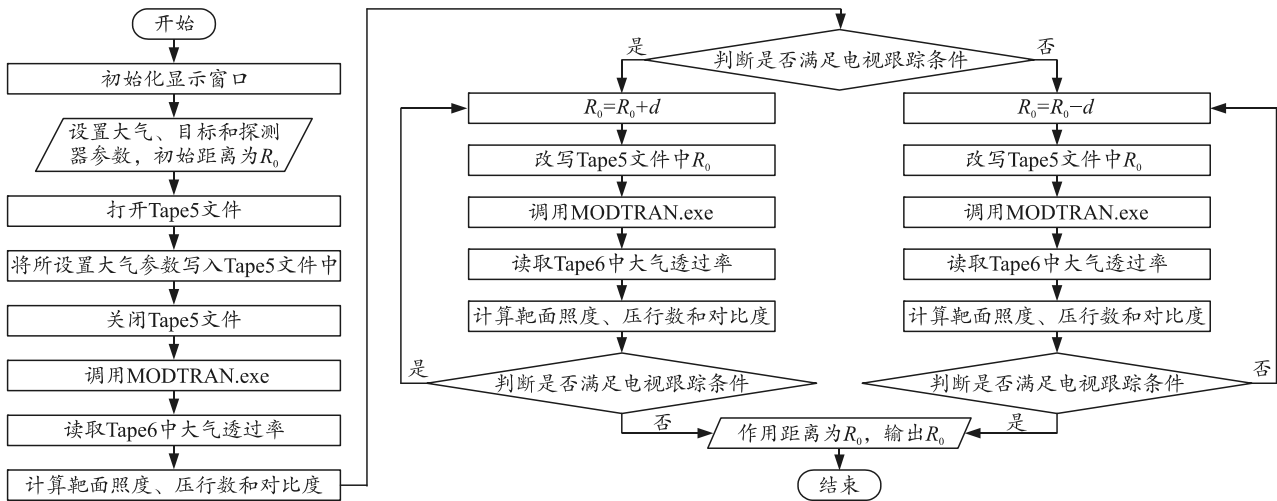


图 3 系统程序流程

4 仿真结果与分析

设定目标有效反射面积为 0.2 m^2 , 飞行速度为 340 m/s , 光学系统透过率为 0.5 , 系统焦距为 700 mm , 无云雨, 能见度为 16 km , CCD 的灵敏度为 0.1 lx , 峰值波长为 550 nm 。根据经验, 取初始作用距离 $R_0=9 \text{ km}$, 步长 $d=0.2 \text{ km}$ 。此时计算出的作用距离为 7.6 km 。

为分析单一参数对作用距离的影响, 每次只改变以上参数中的目标有效反射面积、系统焦距、能见度中的一个参数, 其他均保持不变。通过 Matlab 分析作用距离与特定参数的关系。作用距离与目标有效反射面积、系统焦距、能见度的关系分别如图 4、图 5、图 6 所示。

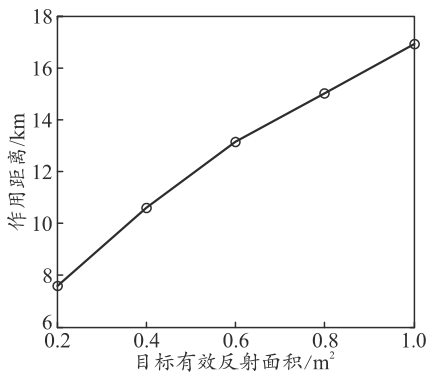


图 4 作用距离与目标有效反射面积的关系

图 4 表示改变目标有效反射面积对作用距离的影响。其作用距离基本与目标有效反射面积的 $1/2$ 次方成正比关系。

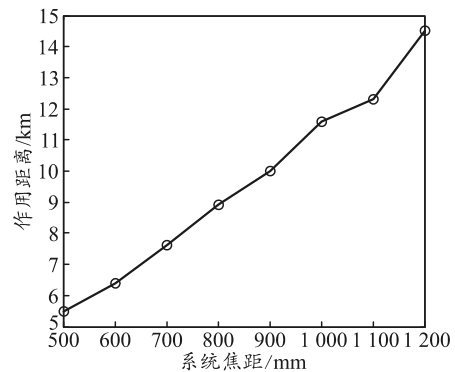


图 5 作用距离与系统焦距的关系

图 5 表示改变系统焦距对作用距离的影响, 除去计算中误差的影响, 作用距离基本与系统焦距成正比关系。

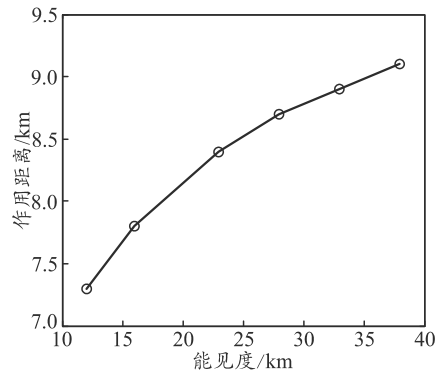


图 6 作用距离与能见度的关系

图 6 表示改变能见度对作用距离的影响, 其作用距离随着能见度的增大而增大, 当达到一定能见度后, 作用距离变化越来越慢。

其频率分辨率约为 1.07 MHz, 只要频率波动不超过分辨率的一半, 其测频结果就不会有变动; 因此, 在 4 组数据中傅里叶变换的测频结果标准差才一直为零。

4 结束语

笔者针对被动雷达测频精度问题, 引入了相位测频法, 并在多种条件下与测频常用的傅里叶变换法、计数法进行了仿真对比。实验结果表明: 在较高载频和信噪比的条件下, 3 种方法相差无几; 但对于信噪比较低且波形未达到一个完整周期的低载频频脉冲而言, 傅里叶变换法和计数法都无法准确提取载频值, 只有相位测频法在所进行的 4 组实验中一直表现良好。由此可知, 相位测频法可应用于雷达脉冲载频提取, 能明显提高测频精度和鲁棒性, 可进一步应用于雷达脉内载频调制和脉内动态指纹

(上接第 80 页)

通过以上仿真结果可以看出: 在电视跟踪系统其他参数确定的情况下, 分别改变目标有效反射面积、系统焦距、能见度等参数, 能够对系统的作用距离产生较为明显的影响。

另外, 在本仿真算法中, 初始作用距离 R_0 与步长 d 的选取对计算量有直接影响, 适当的取值可减少仿真计算次数、提高计算精度。如果 R_0 较实际值大, 则 d 为负值; 如果 R_0 较实际值小, 则 d 为正值。如果 d 值较大, 则收敛速度较快; 反之, 则收敛速度较慢, 但计算精度较高。 d 的选取应根据实际计算精度要求确定。

5 结束语

笔者分析了电视跟踪需要满足的 3 个条件, 提出了一种基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算方法, 建立了基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算系统, 进行了多次仿真计算, 并通过 Matlab 对仿真结果进行了分析。该仿真计算方法可以对比分析单一因素对作用距离的影响, 能为电视跟踪系统设计提供参考, 有一定的工程实用价值。

特征的分析识别。

参考文献:

- [1] 胡来招. 数字瞬时测频——直接计数法测频[J]. 电子对抗, 2004, 27(5): 44-49.
- [2] HAHN S L. Hilbert Transform in Signal Processing[J]. Artech House Publish, 1996, 23(4): 34-38.
- [3] 颜彪, 杨娟. 关于希尔伯特变换的分析和研究[J]. 电气电子教学学报, 2004, 26(5): 27-29.
- [4] 胡志祥, 任伟新. 基于递归希尔伯特变换的振动信号解调和瞬时频率计算方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 39-43.
- [5] 朱泽锋, 张军, 孟凯. 基于 DRFM 的脉冲雷达干扰信号产生方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(12): 90-94.
- [6] 刘莲霞, 孔辉, 谢一春. 相位测频法在雷达信号脉内特征分析中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(4): 77-79.
- [7] 汪正军, 潘磊, 纪国瑞. 基于离散相位差检测的频率测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 994-1000.

参考文献:

- [1] 史学舜, 刘红元. 成像跟踪系统作用距离测试方法探讨[J]. 科技信息, 2009, 26(29): 807-807, 845.
- [2] 赵妙娟, 车宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(Z2): 501-503.
- [3] 赵建川, 姜润强, 王伟国. 光电跟踪仪作用距离分析[J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 15-16, 43.
- [4] 王杰, 孙艳丽, 周伟. 基于多特征直方图的红外图像目标跟踪[J]. 兵器装备工程学报, 2017(8): 103-106.
- [5] 王伟国, 陈涛, 张同双, 等. 电视成像系统作用距离分析[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 948-950.
- [6] 王迪, 李承芳, 熊飞. 大气红外辐射传输的简便算法与 MODTRAN 的比较[J]. 光学技术, 2006, 32(Z1): 293-295.
- [7] 马鹤. 基于 MODTRAN 的复杂大气条件下红外系统作用距离计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] 楚天鹏. 不完全信息下分布式目标跟踪算法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 39-44.
- [9] 张志波. Lowtran 在红外成像仿真中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(7): 24-26.
- [10] 邱杰, 吴涛, 孙进平. 一种被动雷达探测系统仿真平台的设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(2): 64-65.
- [11] 远菲, 毛征, 吕春花, 等. 激光探测系统仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(2): 144-147, 187.
- [12] 李惠明, 赵东华, 李超, 等. 基于 FPGA 技术的旋转编码器跟踪模拟训练系统研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 32-34.