

文章编号:1001-9014(2004)05-0436-05

采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究

王晓蕊^{1,2}, 张建奇¹, 冯卓祥², 解卫博¹

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:提出一种基于采样红外成像系统仿真图像的最小可分辨温差 MRTD 预测方法。该方法从红外成像系统信号传递方程出发,模拟生成不同空间频率、辐射温度的标准四周期矩形样条;利用调制传递函数法和象素处理法,仿真了系统各组成模块的几何扭曲、模糊效应、噪声特性和非线性效应;由多名观察者观察样条仿真图像,统计正确判断概率,实现了 MRTD 的预测。仿真结果表明:该方法预测的 MRTD 值能够与实际测量的 MRTD 值有很好的 consistency。

关键词:红外成像系统;最小可分辨温差;调制传递函数;象素处理;非线性效应

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

SAMPLED IR IMAGING SYSTEM SIMULATION & MRTD PREDICTION

WANG Xiao-Rui^{1,2}, ZHANG Jian-Qi¹, FENG Zhuo-Xiang², XIE Wei-Bo¹

(1. Institute of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A method for predicting MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) based on the sampled IR imaging system digital simulation was proposed. Standard four periodical rectangular patterns with typical spatial frequency and radiometric temperature were generated according to signal transfer equation. Then, system geometric distortion, blur effects, noise characters and nonlinear effects were simulated with modulation transfer function method and pixel processing method, respectively. Finally, MRTD prediction was accomplished according to the statistical discrimination of observers to simulated rectangular pattern. Simulation results show that there is a good agreement between MRTD prediction and MRTD experimental measure.

Key words: IR imaging system; minimum resolvable temperature difference; modulation transfer function; pixel process; nonlinear effects

引言

红外成像系统的性能评估是红外测试和评估领域的重要研究课题。近年来,随着各种新型红外成像系统在军事和民用领域的广泛应用,出现了多种红外成像系统性能预测模型:如美国 NVESD 夜视实验室建立的红外成像系统性能 1975NVL 模型, FLIR92^[1], NVTherm 模型^[2]。这些性能模型都是从成像系统的 MRTD 理论模型出发预测 MRTD 的,这

类模型虽然经过了多次改进和修正,与测量值明显接近。但 MRTD 理论模型本身存在一些不足之处: MRTD 理论模型是基于线性滤波理论的,不能有效表征成像系统的非线性因素:如采样效应和图像处理算法对图像质量的影响; MRTD 理论模型中的视觉模型,往往不能准确反映真实人眼的观察效果;理论模型中的阈值信噪比随背景辐射特性和目标大小是变化的,需要大量实验数据修正。基于以上不足,本文从红外成像系统仿真角度出发,以红外成像信

收稿日期:2003-09-05,修回日期:2004-05-24

Received date: 2003-09-05, revised date: 2004-05-24

基金项目:国家自然科学基金(60277005);高等学校博士学科点专项科研基金(20030701003)资助项目

作者简介:王晓蕊(1976-),男,山东金乡人,博士研究生,主要从事光电成像系统性能评估、系统设计及实时图像处理等研究。

号传递方程为基础,生成标准四周期矩形样条,采用频域处理和空域处理相结合的方法,模拟系统物理效应:几何扭曲、线性因素和非线性因素对标准四周期矩形样条的调制,由多名观察者观察系统输出仿真图像,利用统计判断准则确定系统的 MRTD 值. 此方法类似测量试验,所不同的是以虚拟成像系统代替真实成像系统,不仅可在系统研制阶段,分析系统各组成模块对成像质量的影响,还可以在系统成型后预测系统性能. 另外,红外成像系统的仿真样条可通过局域网发送到终端,由多名观察者同时进行观察判断试验,且相互不影响,统计正确的判断概率,可最大程度减少人眼的主观性.

1 基本思想

从红外成像信号传递过程出发,考虑到光学系统的光谱透过滤、探测器的响应率、放大器的增益、A/D 转换和灰度量化生成不同空间频率和不同灰度的标准四周期矩形图样(长宽比为 7: 1);利用调制传递函数和象素处理的方法,分别表征系统各组成模块的空间传递特性、非线性因素和噪声特性对标准靶成像质量的影响;然后由观察者观察最终的输出仿真周期矩形靶. 选定标准靶周期为 N_1 个象素宽度,然后调整周期靶的辐射温差,直到观察者刚好不能分辨标准周期矩形靶,则此时的温差即为周期为 N_1 个象素宽度的标准靶的最小可分辨温差;重复以上过程,可实现不同周期(单位:象素宽度)标准靶的最小可分辨温差预测. 最后根据实际成像系统的焦距和探测单元尺寸,由象素宽度计算得到不同角空间频率对应的最小可分辨温差,从而实现 MRTD 的预测.

2 红外标准靶图像的生成

红外图像生成原理:依据普朗克辐射公式,计算面目标经过红外光学系统后,单个探测器接受的辐照度,利用探测器的响应率得到探测器的输出电压信号,然后根据前置放大器的增益,A/D 转换进行灰度量化得到显示的图像. 红外图像生成流程框图如图 1 所示.

扩展源目标辐射经过探测器响应,AC 耦合,输出的感兴趣的差值信号为

$$\Delta V_{sys} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_d(\lambda) \frac{[M_c(\lambda, T_T) - M_c(\lambda, T_B)] A_d}{4F^2} \tau_{optics}(\lambda) T_{atm}(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

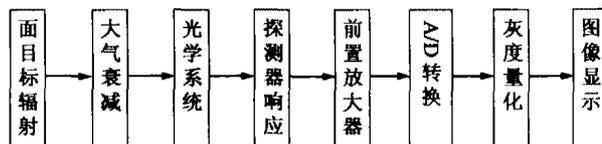


图 1 红外标准靶图像生成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of IR standard bar image generation

式中 G 为前置放大器的增益, $R_d(\lambda)$ 为探测器的响应率, A_d 为探测器的面积, $\tau_{optics}(\lambda)$ 为光学系统光谱透过滤, F 为光学系统光圈数, $T_{atm}(\lambda)$ 为大气的光谱透过滤, $M_c(\lambda, T_T)$, $M_c(\lambda, T_B)$ 分别为目标和背景的光谱辐射出射度.

依据红外成像系统的 A/D 转换器位数进行灰度量化. 假设 A/D 转换器为 8 位, 变换的电压信号范围为 $V_{min} \sim V_{max}$; 则其灰度级范围为 $0 \sim 255$, 最小灰度级 $G_{min} = 0$, 最大灰度级为 $G_{max} = 255$. 则任意电压信号对应的灰度级为

$$G_{gray} = \frac{255 - 0}{V_{max} - V_{min}} (\Delta V_{sys}). \quad (2)$$

根据图像灰度级生成灰度图像.

3 红外成像系统物理效应模拟

红外成像系统的物理效应包括系统几何扭曲, 线性调制引起的模糊效应、噪声特性和空间非线性效应, 针对以上 4 个方面的效应, 本文分别从空域和频域两方面进行物理建模仿真.

3.1 图像几何扭曲效应

几何扭曲效应主要是由光学系统引起的, 其不影响成像的清晰程度, 而只影响像与物的几何相似性. 产生畸变的原因, 可以认为是由于光学系统对共轭面上不同高度的物体有不同的垂直放大率所致.

几何效应可以在空域通过校正项来建模^[3]. 校正项描述了各点相对于其预期位置的位移. 在畸变存在的情况下, 从像平面上获得的一点 $P_i(x_i, y_i)$ 与像点 $P'_i(x'_i, y'_i)$ 有关, 在没有形变的理想光学系统情况下, 获取的点应是 $P'_i(x'_i, y'_i)$, 而不是 $P_i(x_i, y_i)$. 它们之间的关系如下:

$$\begin{aligned} x_i &= x'_i + \delta_x(x'_i, y'_i), \\ y_i &= y'_i + \delta_y(x'_i, y'_i). \end{aligned} \quad (3)$$

根据塞德尔 (Seidel) 像差分类, 校正项 δ_x 和 δ_y 应写为

$$\delta_x(x, y) = c_d \cdot x \cdot (x^2 + y^2),$$

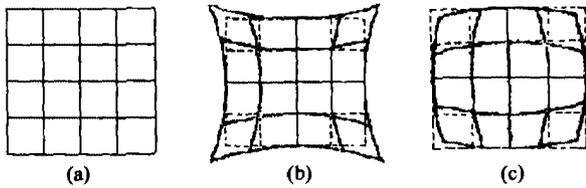


图2 光学系统的几何效应
Fig. 2 Geometric effects of optical system

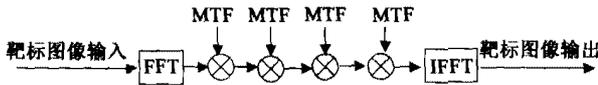


图3 红外成像系统空间模糊效应模拟流程
Fig. 3 Flow chart of modeling IR imaging system spatial blur effects

$$\delta_s(x, y) = c_d \cdot y \cdot (x^2 + y_2). \quad (4)$$

式中, c_d 是 Seidel 形变系数. 当 $c_d > 0$ 时, 系统会产生正畸变; 而当 $c_d < 0$ 时, 会产生负畸变, 如图 2 所示. 其中 (a) 是一个网状物, 由于正畸变得到了 (b), 由于负畸变得到了 (c).

3.2 线性调制模糊效应

红外成像系统线性调制模糊效应包括光学系统的像差、衍射, 探测器的空间和时间滤波效应, 信号处理电路的线性滤波效应, 显示器空间调制效应. 本文针对这些线性效应引起的模糊, 利用各组成模块的调制传递函数进行了模拟. MTF 法仿真红外成像系统的思想是: 在频域空间, 利用不同的 MTF 表征系统各个组成单元的空间线性调制传递特性, 系统总传递函数是为各个组成单元的 MTF 的乘积, 使系统 MTF 与相应周期靶标图像的傅里叶变换图作用, 最后作反傅里叶变换, 得到系统输出靶标图像, 仿真流程图如图 3 所示. 系统 MTF_{sys} 数学表达式表示为

$$MTF_{sys}(f_x, f_y) = MTF_o(f_x, f_y) \cdot MTF_d(f_x, f_y) \cdot MTF_e(f_x, f_y) \cdot MTF_m(f_x, f_y). \quad (5)$$

其中, $MTF_o(f_x, f_y)$ 、 $MTF_d(f_x, f_y)$ 、 $MTF_e(f_x, f_y)$ 、 $MTF_m(f_x, f_y)$ 分别为光学系统、探测器、信号处理系统、显示器的传输函数. 具体的函数表达式在很多文献中都已提到, 在此不作详细讨论.

3.3 噪声特性模拟

系统噪声主要来源于光子噪声、探测器的热噪声、 $1/f$ 噪声和电路的读出噪声, 及由探测器响应率的不同和多路传输前置放大器增益的不同引起的固定图样噪声.

探测器的多数噪声类型为高斯分布, 可以看成

加性噪声, 本文采用三维噪声理论模型^[4], 利用基于像素处理的方法, 仿真了不同类型红外成像系统的探测器噪声和电路噪声对图像质量的影响.

三维噪声分量通常由实验室测量和计算估计两种方法获取. 本文采用了计算估计的方法: 它是通过对传统 NETD 的噪声带宽修正计算三维噪声因子 σ_{TH} , 其它噪声因子可以参照美国 NVESD FLIR92 模型给出的比例缺省值得到.

噪声分量 σ_{TH} 的计算是通过传统的 NETD^[5] 的噪声带宽修正得到:

$$\sigma_{TH} = NETD \times \frac{\sqrt{\Delta f_p}}{\sqrt{\Delta f_n}}. \quad (6)$$

Δf_p 为探测器的系统测量口的噪声带宽, Δf_n 为用传统方法测量 NETD 时的标准带宽.

对于采用不同成像技术的系统, 占主导地位的噪声也不尽相同, 下面就分别给予说明. 对于并联扫描和串并联扫描系统, 主要噪声是 σ_{TH} 、 σ_v 和 σ_n . 对于凝视系统, σ_{vH} 是系统噪声的主要来源. 计算得到 σ_{TH} , 其它噪声均方差采用了 FLIR92 模型中的缺省关系值^[6] 获取, 即

对于凝视系统来说, $\sigma_{vH}/\sigma_{TH} = 0.40$.

对于扫描系统来说, 采用的数据如表 1 所列.

依据计算得到的各噪声分量方差, 考虑到成像系统本身的灰度量化关系, 生成不同噪声成份的噪声图像, 然后利用像素处理的方法, 将得到的系统噪声图像与目标图像像素值相加.

3.4 空间非线性调制效应

成像系统的空间非线性效应包括 2 个方面: 采样效应和图像增强算法.

(1) 采样效应

新型成像系统很多都是欠采样成像系统, 并出现了多种针对采样成像系统的性能模型^[7]. 由于采样效应的非线性特征, 没有唯一的 MTF 可描述采样效应, 在基于 MRTD 的性能模型中无法给予准确的表征. 有限尺寸的二维阵列像素采样, 包含两个不同的调制传递函数 MTF: 一个描述与采样间隔有关的采样过程, 一个描述与像素尺寸有关的采样平均处

表 1 扫描系统的噪声成份缺省设置值

Table 1 Noise components default values for scanning system

相关噪声	低噪声	中等噪声
σ_n/σ_{TH}	0.25	0.75
σ_v/σ_{TH}	0.25	0.75

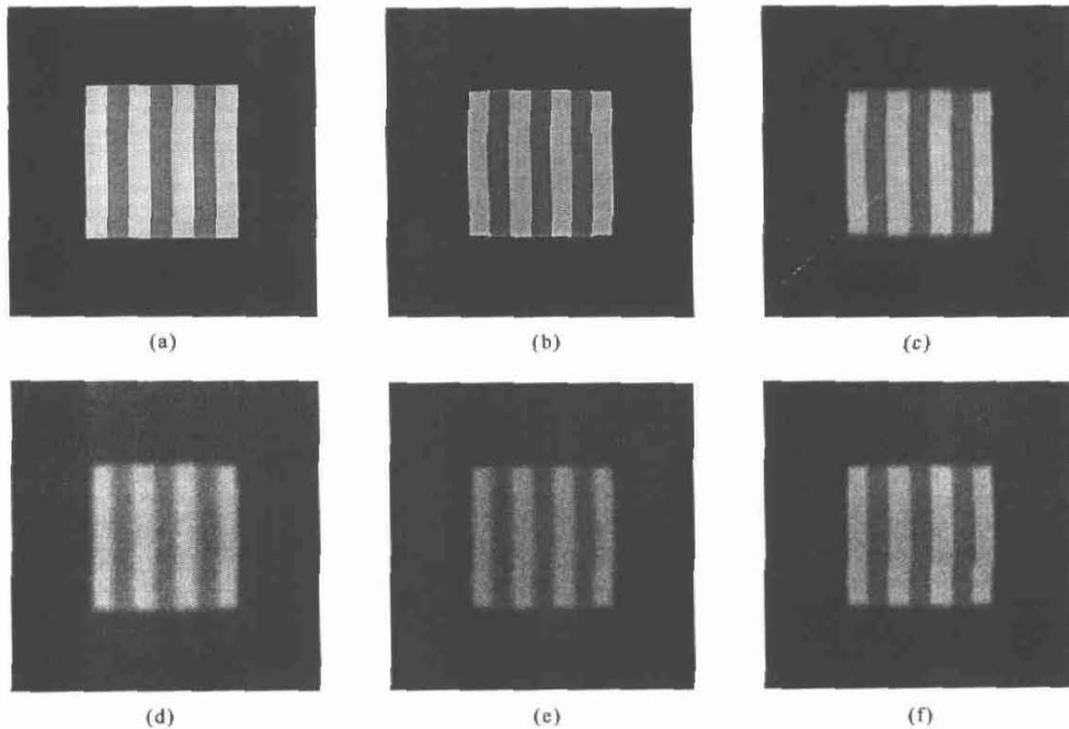


图4 红外成像系统物理效应仿真效果图
Fig.4 Simulation image of IR imaging system physical effects

理过程.对于2-D矩形象素,像素有限尺寸引起的MTF为辛格函数

$$\begin{aligned} \text{MTF}_{\text{pixel}}(f_x, f_y) &= \text{sinc}(\alpha f_x) \text{sinc}(\beta f_y) \\ &= \frac{\text{sinc}(\pi \alpha f_x)}{\pi \alpha f_x} \frac{\text{sinc}(\pi \beta f_y)}{\pi \beta f_y}, \end{aligned} \quad (7)$$

α, β 分别为像素的水平宽度和垂直宽度.为了近似描述了采样效应,文献^[8]通过对像素阵列采样强度的统计处理推导了采样传递函数,采样传递函数为辛格函数.

$$\text{MTF}_{\text{samp}}(f_x, f_y) = \text{sinc}(\Delta_x f_x) \text{sinc}(\Delta_y f_y). \quad (8)$$

式中, Δ_x, Δ_y 分别为水平采样间隔和空间采样间隔,总的采样—平均传递函数由以上2个函数的乘积给定

$$\text{MTF}(f_x, f_y)_{\text{total}} = \text{MTF}(f_x, f_y)_{\text{pixel}} \times \text{MTF}_{\text{samp}}(f_x, f_y). \quad (9)$$

上式显示了2个参数决定了采样图像的质量:像素的尺寸和像素阵列间的采样间隔.

本文在频域空间,使标准四矩形周期样条图像的傅里叶变换图与采样效应传递函数相乘,作反傅里叶变换,实现采样效应对图像质量的影响仿真.

(2) 图像增强算法

红外成像系统的数字视频图像经过图像增强算法后,系统噪声将受到一定程度的抑制,成像系统的

成像质量和探测识别性能将获取很大提高.系统性能参量表现为MRTD的降低,而MRTD理论模型仅能对简单的图像增强算法定量建模,对复杂的图像噪声抑制算法尚不能定量建模.本文直接从数字图像仿真的角度,可仿真各种复杂算法对矩形周期样条图像质量的改善,由人眼观察算法处理后的矩形周期样条;判断得到算法处理后的MRTD.

4 成像系统物理效应仿真效果图

根据以上各种物理效应的建模方法,针对某种成像系统仿真的效果图,如图4所示.(a)为生成的原图像,(b)为加入几何扭曲,(c)为加入空间线性模糊效应,(d)为加入系统噪声效应,(e)为加入采样模糊效应(f)为加入均值滤波算法

5 性能预测方法及性能预测结果分析

针对典型红外成像系统进行仿真,系统参数如下:

光学系统:光学衰减0.8,光学焦距250mm,光学孔径125mm,波长下限 $8\mu\text{m}$,波长上限 $12\mu\text{m}$;

探测器:探测器水平尺寸 $25\mu\text{m}$,垂直尺寸 $25\mu\text{m}$,水平采样间隔 $32\mu\text{m}$,垂直采样间隔为 $32\mu\text{m}$,串联数目4,并联数目288,扫描效率0.75,过扫比0.7,帧频30,时间常数 $2e-7\text{s}$,峰值响应度 $1e+$

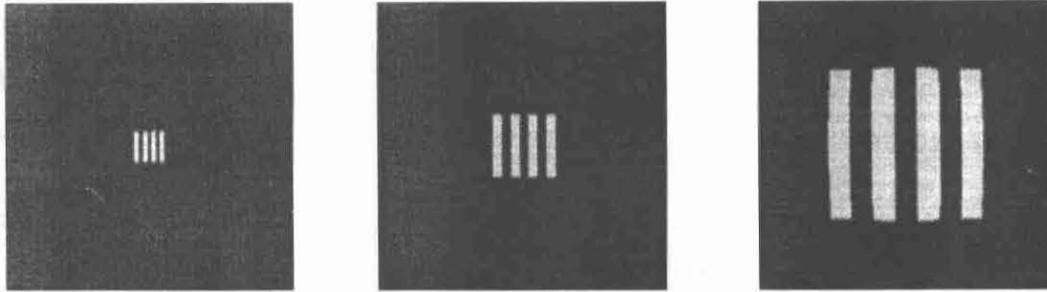


图5 红外成像系统仿真不同空间频率的标准靶输出图像

Fig.5 IR imaging system standard bar output image with different spatial frequency

$10\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 峰值响应波长 $10.5\mu\text{m}$, 三维噪声值取 FLIR92 缺省值;

电路: 数字量化动态范围 $0 \sim 256$; 图像处理算法: 中值滤波;

显示器: 光点强度分布因子 0.1mrad ;

根据以上参数, 利用标准靶图像生成流程, 产生温度和空间分辨率可调的标准靶图像, 加入以上讨论的系统各种物理效应, 得到系统输出的标准靶图像. 输出效果图像可以通过局域网络, 传输给多台计算机终端, 由多个观察者进行同时判断标准靶图像, 根据自己的观察确定最小可分辨温差, 统计最小可分辨温差的平均值, 作为系统的最小可分辨温差, 图5给出其中3种空间频率的标准靶输出图像. 调整标准靶图像的温度和分辨率, 由观察者判断是否可看清靶标图像, 记录此时标准靶图像对应的温度和分辨率. 表2给出了5种典型空间频率的仿真标准靶图像, 预测的最小可分辨温差. 并与实际测量红外成像系统 MRTD 进行比较, 比较显示: 采用红外成像系统仿真图像预测温差的方法, 预测的最小可分辨温差 MRTD 与实际测量的 MRTD 有很好一致性.

6 结语

利用红外成像系统仿真的方法, 模拟生成标准靶图像, 仿真系统各种物理效应, 实现 MRTD 的预测. 能够克服基于 MRTD 性能模型对几何效应和非线性效应建模的困难; 且不需要建立复杂的视觉模型, 仿真标准靶图像能通过计算机网络, 由多名观察

者进行同时预测系统的最小可分辨温差, 求平均 MRTD, 可最大程度地消除人的主观性; 与实际测量 MRTD 相比, 可大大节省时间, 并且可在成像系统设计之前, 预测系统的性能. 另外, 此方法不仅可预测红外成像系统的成像质量, 还可以预测系统的性能, 实现了图像仿真与系统性能预测结合. 稍加改进, 以标准等边三角形靶替换四周期矩形样条靶, 此方法可用于三角方向鉴别阈值温差—TOD^[9]的预测.

REFERENCES

- [1] Scott L, Agostino J D, NVEOD FLIR92. Thermal imaging systems performance model[J]. *SPIE*, 1992, **1689**: 194—203.
- [2] Driggers R G, Vollmerhausen R, Edwards T. The target identification performance of infrared imager models as a function of blur and sampling[J]. *SPIE*, 1999, **3701**: 26—34.
- [3] Garnier Christelle, Collorec Rene, Flifla Jihed, et al. Physically-based infrared sensor effects modeling[J]. *SPIE*, 1999, **3701**: 81—94.
- [4] Agostino J D, Webb C. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[J]. *SPIE*, 1991, **1488**: 110—121.
- [5] Wittenstein Wolfgang. Performance prediction and experimental assessment of advanced thermal imagers[J]. *SPIE*, 1994, **2269**: 563—574.
- [6] Holst Gerald. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*[M]. America: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, Second Edition; 2000, 371—374.
- [7] PENG Xin-Hong, WU Yong-Chang, CHEN Yu-Liang. Performance evaluation of Sampled imaging system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(彭新红, 吴常泳, 陈雨良. 采样成像系统性能评估. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(6): 477—480.
- [8] Hadar O, Dogariu A, Boreman G D. Angular dependence of sampling MTF[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(28): 7210—7216.
- [9] WANG Xiao-Rui, ZHANG Jian-Qi, CHANG Hong-Hua, et al. A new method to characterize IR imaging system performance[J]. *Infrared Technology*(王晓蕊, 张建奇, 常红花, 等. 一种表征红外成像系统性能的新方法. *红外技术*), 2003, **25**(2): 24—28.

表2 不同空间频率的预测 MRTD 与测量 MRTD 的比较
Table 2 Comparison between predicted MRTD and measured MRTD at different spatial frequency

空间频率 (c/mrad)	0.198	0.278	0.417	1.042	2.083
预测温差(K)	0.12	0.15	0.18	0.4	0.86
测量温差(K)	0.16	0.18	0.25	0.52	0.96