

doi: 10.3788/gzxb20124102.0173

红外双色复合仿真系统测温技术研究

张晓龙^{1,2}, 刘英¹, 张盈³, 孙强¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 北京仿真中心, 北京 100854)

摘 要:为了模拟红外制导时目标和干扰的等效辐射环境,并比较单色测温 and 比色测温两种方法在复杂环境下目标测温效果的差异,利用红外双色复合仿真系统对空间 6 km 处目标和干扰弹进行了实物模拟.通过准确标定的热像仪,采用单色和比色测温两种方法对不同温度的目标和干扰进行测试.利用经标定的中波热像仪和长波热像仪对黑体测温,黑体温度为(20~60)℃时,长波热像仪的绝对误差限为 0.5℃;黑体温度为(50~120)℃时,中波热像仪的绝对误差限为 0.2℃.当目标温度为 500℃、干扰温度为 1 000℃时,用长波红外、中波红外、比色方法测得的目标温度分别为 28.5℃、148.3℃、322.4℃,干扰温度分别为 56.7℃、223.2℃、660.1℃.实验结果表明,在复杂环境下采用比色测温方法更能真实反映目标的温度特性.

关键词:红外制导;热像仪;复合仿真系统;比色测温

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0173-6

0 引言

在现代高科技战争中,飞机会经常遭到导弹的袭击.为保护自身安全,载机会释放干扰弹,它能有效对抗传统的载有单波段导引头的导弹.由于红外制导系统接收到的红外辐射必须经过大气并被衰减,尤其远距离探测时大气衰减严重,导致传统的单一波段的探测器获取的信息弱、准确度低,很难正确描述目标和干扰的特征,已不适应军事探测的要求.

红外双色复合探测代表了当前红外制导技术发展的总趋势,美、法、以色列等国都配备有红外双色制导导弹^[1-2].双色探测采用基于普朗克定律的比色测温方法,而比色测温采用双色信号相互补偿的方法可较好地消除环境及发射率的影响,有效地提高测温准确度,达到在复杂环境下识别目标和干扰的目的.在探测上,双色探测相对于单波段探测存在很多优势,但大部分尚未被证实或被量化^[3].红外双色复合仿真系统为红外探测器提供红外目标和干扰的等效辐射环境.在红外制导控制半实物仿真试验中,仿真系统产生的红外辐射投射到红外探测器,从而在实验室内实物模拟红外制导探测系统跟踪目标的全过程.

本文通过仿真系统模拟了大气传输距离为 6 km 的某种等效环境^[4-5],采用单色和比色测温的方法对目标和干扰进行测温,结果证明在上述等效环境下,采用长波红外波段测温根本不能识别目标和干扰,中波红外波段测温识别目标和干扰的几率较低,比色测温方法能有效地对目标和干扰进行识别.

1 比色测温原理

黑体是一种理想化的辐射体,其表面的发射率为 1.黑体辐射的光谱分布定律,由普朗克公式确定,即

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (1)$$

式中, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741\ 5 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$, $c_2 = hc/k = 1.438\ 2 \text{ K} \cdot \text{cm}^{[6]}$.

图 1 给出了温度在(500~900)K 范围的黑体光谱辐射出射度随波长变化的曲线.由黑体辐射曲线可以看出,黑体温度增高时,全波段内光谱辐射出射度均增加,并且短波部分增加较快.利用不同温度黑体辐射曲线的差异,可以给出黑体温度特性的定量判据.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60977001)资助

第一作者:张晓龙(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为红外辐射标定. Email: long1986lucky@163.com

导师(通讯作者):孙强(1971—),男,研究员,博导,主要研究方向为红外光电仪器. Email: sunqiang_sklao@yahoo.com.cn

收稿日期:2011-07-18; **修回日期:**2011-09-14

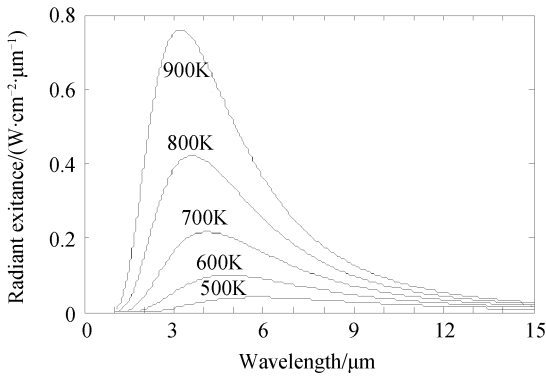


图1 黑体辐射曲线
Fig.1 Curve of blackbody radiation

同一温度黑体在 $\lambda_1 \sim \lambda'_1, \lambda_2 \sim \lambda'_2$ 波段内的辐射比系数为

$$k = \frac{M_{b(\lambda_1 - \lambda'_1)}}{M_{b(\lambda_2 - \lambda'_2)}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda'_1} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda'_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda} \quad (2)$$

根据式(2)可以得到温度-比系数关系曲线,如图2.从图中可以看出,中波红外与长波红外波段的光谱辐射出射度积分之比随黑体温度增加而单调增加.由此我们可以通过测量比系数得到被测目标的温度值,这便是比色测温的原理.

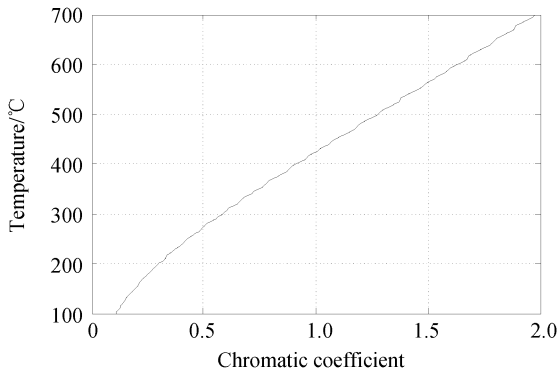


图2 温度-比系数关系曲线
Fig.2 Curve of the relationship between temperature and chromatic coefficient

2 红外双色系统的能量分布

红外双色复合仿真系统包括目标通道和干扰通道:目标通道进行目标由远逼近模拟,干扰通道进行干扰源在视场内横向及远近复合运动模拟.双光束经红外合束器合成后,由红外准直投射系统投射到无穷远处.图3为红外双色复合仿真系统标定示意图,图中虚线框内为红外双色复合仿真系统,其出瞳与标准测温型热像仪的入瞳相衔接.

图4为红外双色复合仿真系统的能量分布模型,左边虚线框为红外双色复合仿真系统,右边虚线

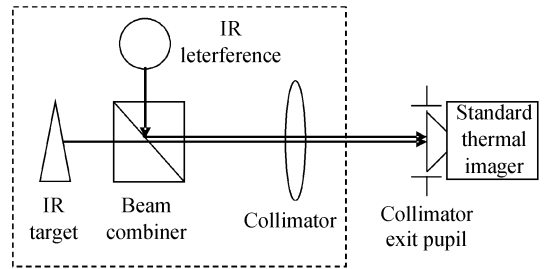


图3 红外双色复合仿真系统标定示意图
Fig.3 Schematic diagram of IR dual-band composite simulation system calibration

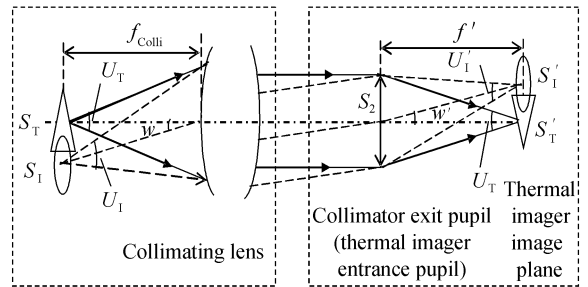


图4 红外双色复合仿真系统的能量分布模型
Fig.4 Energy distribution model of IR dual-band compound simulation system calibration

框代表红外热像仪系统.目标通道单独工作时,像面上的辐射照度为

$$E'_T = \tau_0 \tau_{co} \pi \cdot L_e \cdot \sin^2(U'_T/2) \quad (3)$$

干扰通道单独工作时,像面照度为

$$E'_I = \tau_0 \tau'_{co} \pi \cdot L'_e \cdot \sin^2(U'_I/2) \cos^4 \omega' \quad (4)$$

式中, L_e, L'_e 分别为目标和干扰的辐射亮度, τ_0 为热像仪光学系统的透过率, τ_{co}, τ'_{co} 分别为红外双色复合仿真系统目标通道和干扰通道的综合透过率, U'_T, U'_I 分别为目标和干扰通道的像方孔径角, ω' 为干扰通道的像方视场角.干扰通道工作时视场角较小,由此引起的余弦因子可忽略不计.准直系统出射平行光,对应于物体在物方无穷远处,所以

$$\sin^2(U'_T/2) = D^2 / (4f'^2 + D^2) \quad (5)$$

式中, D 为热像仪的通光孔径, f' 为热像仪的焦距.

3 测温型热像仪的标定

为了获得准确的目标和干扰温度,需对热像仪进行辐射标定.经分析,进行热像仪标定的实验误差主要有以下几个方面:

- 1) 实验使用的面黑体源的测温误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,发射率的误差范围为 ± 0.02 ,因黑体引起的测量误差大约在 2.24%左右;
- 2) 热像仪的输出信号误差大约在 1%左右;
- 3) 红外焦平面阵列非均匀性误差和噪音误差为 4%;

4)长波热像仪会受环境温度变化的严重影响,中波热像仪单点校正也会引来误差。

为了减小实验误差,标定长波热像仪时环境温度保持不变,且与长波热像仪测温的环境温度相一致。此外,标定中波热像仪和中波热像仪测温的单点校正温度也保持一致。图5为红外热像仪原理示意

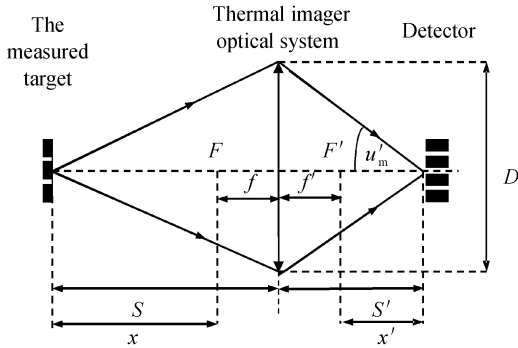


图5 红外热像仪原理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of infrared thermal imager principle

图, s 为探测距离, f' 为热像仪焦距, D 为通光孔径。根据应用光学的知识,可以得出

$$\sin^2 u'_m = D^2 / \left[4 \left(\frac{f'^2}{s-f'} + f' \right)^2 + D^2 \right] \quad (6)$$

式中, u'_m 为热像仪的像方孔径角。

像面照度计算公式为

$$E'(\lambda) = \tau_0(\lambda) \pi L_e(T_{ob}, \lambda) \sin^2 u'_m \quad (7)$$

在热像仪响应波段内进行光谱积分得到

$$E' = \int_{\lambda} \tau_0(\lambda) \pi L_e(T_{ob}, \lambda) \sin^2 u'_m d\lambda \quad (8)$$

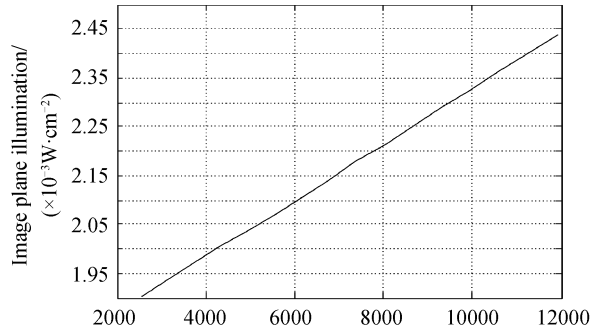
式中, $\tau_0(\lambda)$ 是波长 λ 处的热像仪光学系统透过率, $L_e(T_{ob}, \lambda) = M_\lambda / \pi$ 是波长 λ 处、温度 T_{ob} 时黑体的辐射亮度。

在标定长波和中波热像仪时,黑体和热像仪的距离 s 分别为 2 m 和 2.22 m。对于长波热像仪,响应波段为 8 ~ 12 μm , $D = f' = 90 \text{ mm}$, $\sin^2 u'_m = 0.18567$; 对于中波热像仪,响应波段为 3.7 ~ 4.8 μm , $f' = 2D = 50 \text{ mm}$, $\sin^2 u'_m = 0.05635$ 。根据式(8)可以计算出热像仪在双波段的像面照度。

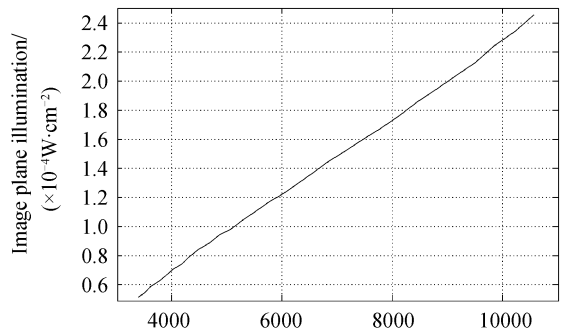
由于红外双色复合仿真系统目标和干扰源的温度变化范围较大,其准直出瞳处单波段等效温度的变化范围也较大,所以热像仪标定实验中黑体温度也必须有一定的变化范围。为了兼顾标定后的测温准确度和测温范围,对不同的黑体温度范围采用不同的增益。对于长波热像仪,图像灰度随黑体温度增高接近饱和时,本文采取降低亮度增益的方法;对于中波热像仪,图像灰度随黑体温度增高接近饱和时,本文采取降低积分时间的方法。

实验时,依次记录两个波段的热像仪在不同黑

体温度下的图像灰度 G , 运用 matlab 进行灰度-像面照度线性拟合,对不同的亮度增益或积分时间本文拟合得到了不同的线性函数关系。黑体温度较低时,中波热像仪和长波热像仪的像面照度-灰度关系分别为 $E' = 2.616 \times 10^{-8} G - 3.458 \times 10^{-5} (\text{W}/\text{cm}^2)$ 和 $E' = 5.757 \times 10^{-8} G + 1.752 \times 10^{-3} (\text{W}/\text{cm}^2)$, 如图 6。从图中可以看出,线性拟合的非线性误差很小,长波热像仪拟合的标准误差为 0.11%, 中波热像仪为 2.29%。



(a) LWIR



(b) MWIR

图6 长波、中波红外热像仪灰度-像面照度关系
Fig. 6 Relationship between gray and illumination of image plane about LWIR and MWIR thermal imager

根据所测得的热像仪像面照度-灰度关系,利用热像仪对目标进行测温时,首先由灰度反推像面照度,再根据式(8)反推单波段热像仪的测温值。为得到标定后的热像仪的测温误差,根据上述测温步骤利用标定后的热像仪对黑体进行测温实验。

通过图 7 和图 8 中长波和中波的等效温度曲线可以看出,实验所需要的长波热像仪的测温范围约为 (20 ~ 60) $^{\circ}\text{C}$, 中波热像仪的测温范围约为 (50 ~ 230) $^{\circ}\text{C}$ 。对热像仪的测温结果和黑体的显示温度进行比较,便得到热像仪测温的绝对误差。黑体温度范围为 (20 ~ 60) $^{\circ}\text{C}$ 时,长波热像仪测温的绝对误差限为 0.5 $^{\circ}\text{C}$; 黑体温度为 (50 ~ 120) $^{\circ}\text{C}$ 时,中波热像仪测温的绝对误差限为 0.2 $^{\circ}\text{C}$, 黑体温度高于 120 $^{\circ}\text{C}$ 时,中波热像仪得到的热图像像质变差,出现黑色斑点,测温的绝对误差限达 4.2 $^{\circ}\text{C}$ 。

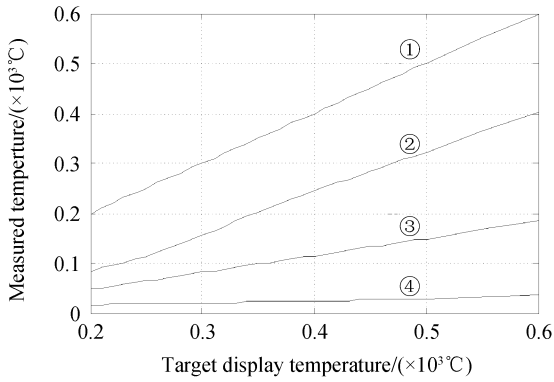


图7 目标通道测量温度对比图

Fig. 7 Comparison chart of target channel temperature measurement

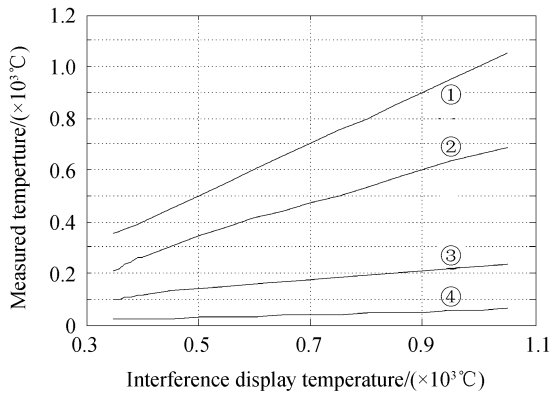


图8 干扰通道测量温度对比图

Fig. 8 Comparison chart of interference channel temperature measurement

4 红外双色复合仿真系统的标定

通常情况下,目标温度范围为 500 K ~ 900 K^[7],干扰弹温度为 1 500 K ~ 2 000 K^[8].受实验仪器所限,实验时,目标温度的调节范围为 200 °C 至 600 °C,每 10 °C 记录一次实验数据;干扰源温度的调节范围为 350 °C 至 1 050 °C,每 50 °C 记录一次实验数据.本文用不同波段的热像仪分别记录了双波段内的图像灰度,并依据热像仪标定结果反推像面照度和单色等效温度,再依据数学模型计算比色系数(不同波段的辐亮度积分之比),反推比色温度.

本文分析目标通道单独工作时仿真系统透过率 τ_{co} 对测温结果的影响.记仿真系统目标通道在长波和中波波段的平均透过率分别为 τ_L 和 τ_M ,根据式(3)计算得到的长波、中波波段的像面照度分别为 E_L^r 和 E_M^r ,若不考虑 τ_{co} ,即 $\tau_{co} = 1$,则计算得到的两波段像面照度 E_L^i 和 E_M^i .

若用单色测温,由于 τ_{co} 取值很小,所以 $E_L^i \ll E_L^r$, $E_M^i \ll E_M^r$,灰度大大降低.根据灰度反推像面照度,再由式(8)反推温度时不考虑 τ_{co} ,所以得到的单色测温值远低于真实温度.

若用比色测温,则热像仪像面的比色系数

$$k'' = \frac{E_M^i}{E_L^i} = \frac{\tau_M E_M^r}{\tau_L E_L^r} = k' \cdot \frac{\tau_M}{\tau_L} \quad (9)$$

式中, k' 为不考虑 τ_{co} 时的比色系数,近似为目标真实比色系数.可以看出,若两波段的透过率相差较小,则两者相互抵消,比色系数和比色测温值和真值相差较小;若透过率相差较大,则比色系数和比色测温值会受一定影响.

干扰通道工作时的情况与目标通道类似.由于红外材料透过率的光谱差异以及自身温度对透过率的影响等因素^[9-10],红外双色复合仿真系统在工程应用中的透过率经验值如表 1.

表 1 双波段的综合透过率在不同目标温度下的取值
Table 1 Integrated transmission values of dual-band at different target temperatures

Target display temperature/(°C)	MWIR (3.7~4.8 μm)	LWIR (8~12 μm)
200	0.032	0.12
250	0.029	0.10
300	0.027	0.08
350	0.025	0.065
400	0.025	0.055
450	0.025	0.049
500	0.025	0.044
550	0.025	0.039
600	0.025	0.036

在大气传输过程中,红外辐射的衰减与大气吸收、散射以及因气象条件(云、雾、雨、雪)造成的衰减有关^[5].由于气象条件具有很大的随机性,而且随着探测距离和探测波段的不同,目标或干扰发出的红外辐射的大气透过率也会发生较大变化.本文通过红外双色复合仿真系统模拟了不同目标(干扰)温度下的大气透过率,从表 1 中可以看出:中波红外波段的透过率远低于长波红外波段的透过率,符合大气传输模型^[5];随目标温度的增高,长波红外透过率大幅度下降,这是由于仿真系统自身引起的,正可模拟不同的大气透过率.

标定红外双色复合仿真系统的实验误差来源:

1) 仿真系统使用的小型面黑体源的温度分辨率为 0.1 °C,而且由于实验次数繁多,黑体的温度稳定性较差,为 ± 0.1 °C ~ ± 0.4 °C;

2) 仿真系统没有冷光阑,开机时间越长,光阑温度可能越高,光阑发出的进入光学系统红外辐射能量也随之增加,影响测量;

3) 标定热像仪和仿真系统的实验环境不可能完全相同,而长波热像仪受环境温度影响严重,背景辐射也会产生一定程度的变化;

4) 中波热像仪开始工作前要进行单点校正,校正时也难免产生误差.

减小误差的方法:长波热像仪受环境温度影响严重,实验过程中要保证环境温度基本一致且标定长波热像仪的环境温度与仿真系统的室内温度基本相同。其次,标定仿真系统实验重复性较差,因此进行了三组实验,并选择整体上灰度值居中的一组数据作为最终数据。此外,仿真系统没有冷光阑,开机时间越长,光阑温度可能越高,为此,在系统稳定后开始实验。

5 实验结果及分析

通过双波段热像仪对仿真系统的标定,得到了目标和干扰的长波等效温度、中波等效温度、准直出瞳比色温度,如图 7 和图 8。图中①、②、③、④分别代表目标(干扰)显示温度、比色温度、中波等效温度和长波等效温度。从图中可看出:

1)单色测量温度远低于目标(干扰)的真实温度,主要原因是仿真系统模拟大气环境有较大的衰减,因此这种直接用单色测温而不进行温度补偿的测温方法并不可靠。在长波红外波段根本不能区分目标和干扰,如目标温度为 500℃、干扰温度为 1 000℃时,在该波段测得的目标干扰温差仅为 28.2℃,在实际应用中易被噪音和复杂背景湮没;在中波红外波段如果目标温度较高时也很难区分,如目标温度为 500℃、干扰温度为 1 000℃时,在该波段测得的目标干扰温差为 74.9℃,相对于实际温差也很小。如果要想用单波段热像仪较精确地测温,必须对系统的透过率有大致地了解,而进行红外探测时大气透过率会随时变化,很难进行实时计算。

2)比色测温法的测温准确度较单色测温有很大改善,虽然和目标真实温度相差较大,但完全可以区分目标和干扰,如目标温度为 500℃、干扰温度为 1 000℃时,比色测温法测得目标干扰的温差为 337.7℃,足以区分目标和干扰。

由于目标伪装、环境干扰、大气衰减等,单一波段红外探测系统的探测能力和准确度下降。采取 3.7~4.8 μm 和 8~12 μm 双波段探测器将提高系统对假目标的鉴别能力,还可以进一步提高系统的探测距离。

6 结论

传统的单色测温在整个测试中存在衰减、目标发射率未知或目标未充满视场的情况,这样会导致测温误差很大,甚至毫无意义,难以反映目标的真实温度特性。比色测温法采用双色信号对比的办法,测温准确度较单色测温有较大改善,能够反映目标的温度特性。如果合理的选择两个工作波段,则由上述

因素而引起的测量误差可以基本得到消除,极大地提高测温准确度。本文分别用单色、比色方法对目标和干扰进行了测温,突出表现了比色测温在红外制导上的优势。实验结果表明,进行红外制导跟踪探测时,尤其是较远距离探测及较恶劣的气象条件下,如空气中有烟雾、灰尘、蒸汽和颗粒的情况下,采用双色探测法更能有效地区分目标和干扰。

参考文献

- [1] ZHAO Chao, YANG Hao. Brief introduction to infrared compound guidance techniques[J]. *Guidance & Fuze*, 2007, **28**(2): 1-7.
赵超, 杨号. 红外复合制导技术概述[J]. 制导与引信, 2007, **28**(2): 1-7.
- [2] BAI Hong-bin, HU Fan-jun. Summarize of the infrared guidance technology development[J]. *Science & Technology Information*, 2009, **19**: 29-29.
白洪斌, 胡凡俊. 红外制导技术发展综述[J]. 科技信息, 2009, **19**: 29-29.
- [3] ADOMEIT U, EBERT R. Improved target detection by IR dual-band image fusion[C]. *SPIE*, 2009, **7481**: 74810B1-74810B8.
- [4] YAO Mei, LEI Ping, ZHANG Le. Application and comparison of two kinds of atmospheric radiative transfer software in performance simulation of infrared detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(Sup): 389-393.
姚梅, 雷萍, 张乐. 两种大气辐射传输软件在红外探测系统性能仿真计算中的应用及其比较[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(增刊): 389-393.
- [5] WANG Di, LI Cheng-fang, XIONG Fei. The method of calculate the transmittance of infrared radiation through atmosphere and compared with MODTRAN [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(Sup): 293-298.
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**(增刊): 293-298.
- [6] WILLIAMS G M, BARTER A. Dual-band MWIR/LWIR radiometer for absolute temperature measurements [C]. *SPIE*, 2006, **6205**: 62050M1-62050M13.
- [7] SHI Xiao-hua, ZHANG Tong-he. The counter-countermeasures technology for dual-band multi-element IR seeker[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(6): 311-314.
史晓华, 张同贺. 红外双色多元导引头抗干扰技术研究[J]. 红外技术, 2009, **31**(6): 311-314.
- [8] DU Shao-jun, LU Qi-sheng. Study on IR dual spectral detection[J]. *Infrared Technology*, 2000, **22**(2): 36-38.
杜少军, 陆启生. 红外双色探测研究[J]. 红外技术, 2000, **22**(2): 36-38.
- [9] LI Yu-bin, XU Yun-sheng. Preparation of polycrystalline ZnS for 8~12 μm long-wave infrared[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2003, **32**(5): 508-511.
李玉斌, 徐运生. 8~12 μm 长波红外材料 ZnS 多晶的制备[J]. 人工晶体学报, 2003, **32**(5): 508-511.
- [10] FENG De-shen, SU Xiao-ping, MIN Zhen-dong, et al. Growth and properties of Φ300 mm germanium monocrystal [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2006, **30**(5): 692-694.
冯德伸, 苏小平, 闵振东, 等. Φ300 mm 红外锗单晶生长及性能测试[J]. 稀有金属, 2006, **30**(5): 692-694.

Thermometry Technology of IR Dual Color Composite Simulation System

ZHANG Xiao-long^{1,2}, LIU Ying¹, ZHANG Ying³, SUN Qiang¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to simulate the equivalent radiation environment of target and interference in the IR guidance process, and compare the effect of differences in target thermometry between monochromatic thermometry and chromatic thermometry under complex environment, the target and interference on space 6 km is simulated using IR dual color composite simulation system. Through the IR thermal imager calibrated accurately, the target and interference at different temperatures is tested using two methods of temperature measurement-monochromatic thermometry and chromatic thermometry. Blackbody temperature is measured by calibrated MW thermal imager and calibrated LW thermal imager, in the range from 25 °C to 40 °C of Blackbody temperature, the absolute error limit of LW thermal imager is 0.5 °C, and in the range from 50 °C to 120 °C of Blackbody temperature, the absolute error limit of MW thermal imager is 0.2 °C. When the target temperature is 500 °C and the interference temperature is 1000 °C, the temperatures of target measured with LWIR, MWIR and chromatic thermometry are 28.5 °C, 148.3 °C and 322.4 °C, and the temperatures of interference are 56.7 °C, 223.2 °C and 660.1 °C respectively. The experiment result indicates that the characteristics of target temperature can be better reflected using chromatic thermometry than monochromatic thermometry under complex environment.

Key words: IR guidance; Thermal imager; Composite simulation system; Chromatic thermometry