

红外辐射测量的大气修正

魏合理, 陈秀红, 詹杰, 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 大气中目标辐射特性的测量必然受到大气的影 响, 为了得到目标本征的辐射特性, 必须对大气进行修正。介绍了红外目标辐射测量中的大气透过率修正原理和必要性, 给出了几种获得外场大气透过率的方法, 并对其大气修正精度进行了讨论。

关键词: 红外辐射; 目标; 测量; 大气修正; 大气透过率

中图分类号: P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)06-0472-07

Atmospheric Correction in the Measurement of Infrared Radiance

WEI He-li, CHEN Xiu-hong, ZHAN Jie, RAO Rui-zhong

(Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The radiance measured in atmosphere is affected by the atmosphere. In order to obtain the original radiance of a target, the atmospheric transmission correction should be performed. The basic theory for atmospheric correction in the measurement of infrared radiance of target is introduced. Some methods for obtaining atmospheric transmittance are given, and the accuracy of atmospheric correction in infrared measurement is discussed.

Key words: infrared radiance; target; measurement; atmospheric correction; atmospheric transmittance

1 引言

在大气中对目标辐射特性进行测量, 必须考虑大气的影 响^[1-4]。大气中的分子和气溶胶粒子散射和吸收来自目标的辐射信号, 使测量值和目标在穿过大气之前的辐射值有很大的差别, 并且该差别随天气条件和局地大气参数 (如水汽和其它吸收气体含量、大气气溶胶、温度、气压等) 有很大的变化。所以, 为了得到目标的本征辐射信号, 必须进

行大气修正。

大气修正的任务是如何实时获得测量条件下 (包括当时当地的大气条件、光束经过的空间几何路径、光谱波段和光谱分辨率) 的大气透过率。通常的方法包括实际大气透过率的测量和根据探测的大气参数模拟计算大气透过率^[5-6]。本文讨论了红外辐射测量的大气修正问题, 给出了几种获得外场大气透过率的方法, 并对其大气修正精度进行了讨论。

收稿日期: 2007-07-26

基金项目: 中国科学院方向性创新项目 (KGGX2-SW-413)

E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

2 辐射测量的大气透过率修正基础

2.1 基本原理

实际测量时探测器接收到的信号为

$$V(L) = C_k \left\{ \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) \left[I_0(\lambda) \frac{A}{4\pi L^2} T(\lambda, L) + \int_L^0 B(\lambda, x) \frac{\partial T(\lambda, x)}{\partial x} dx \right] d\lambda \right\}, \quad (1)$$

其中, C_k 为仪器的定标系数, I_0 为点源目标的单色辐射强度, λ 为波长, A 为目标的表面积, L 为目标和探测器间的距离, T 为大气透过率, $f(\lambda)$ 为仪器波长响应函数, λ_L 、 λ_H 为仪器响应函数的波长下限和上限。(1) 式中右边的第一项为透过大气的目标的辐射, 第二项为路径大气程辐射(背景辐射)。若背景辐射 V_B 可以同时直接测量得到, 测量的目标在距离 L 处的辐射为

$$I_m(L) = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) I_0(\lambda) \frac{A}{4\pi L^2} T(\lambda, L) d\lambda = \frac{V(L) - V_B}{C_k}. \quad (2)$$

我们的任务是从测量的目标在距离 L 处的辐射, 修正得到没有经过大气衰减(大气透过率为 1, 位置为 L_0) 时的测量值 $I_{mc}(L_0)$ 。

当距离足够近时(并且满足点目标源的假设), 大气透过率为 1, 有

$$I_{mc}(L_0) = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) I_0(\lambda) \frac{A}{4\pi L_0^2} d\lambda = \frac{V(L_0) - V_{B_0}}{C_k}, \quad (3)$$

由(2)和(3)式容易得到

$$I_{mc}(L_0) = \frac{L^2}{L_0^2} \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) I_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) I_0(\lambda) T(\lambda, L) d\lambda} I_m(L). \quad (4)$$

其实, 目标的辐射强度是未知的待测值, 若假定目标的相对光谱分布 $s(\lambda)$ 已知, 即 $I_0(\lambda) = k \cdot s(\lambda)$, k 不随波长变化, 我们得到

$$I_{mc}(L_0) = \frac{L^2}{L_0^2} \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) s(\lambda) T(\lambda, L) d\lambda} I_m(L), \quad (5)$$

$$I_{mc}(L_0) = \frac{L^2}{L_0^2} \frac{I_m(L)}{T_{\text{eff}}(L)}, \quad (6)$$

我们的任务就是要得到有效大气透过率

$$T_{\text{eff}}(L) = \frac{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} T(\lambda, L) f(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_L}^{\lambda_H} f(\lambda) s(\lambda) d\lambda}. \quad (7)$$

由此我们可以看出, 要进行大气辐射修正, 除了背景辐射外, 我们必须知道大气的光谱透过率, 目标的相对光谱分布、仪器波长响应函数的相对光谱分布。

当目标辐射和仪器响应函数不随波长变化的理想情况时, 有效透过率即变为 $\Delta\lambda$ 波段内的平均透过率

$$T_{\text{eff}}(L) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} T(\lambda, L) d\lambda. \quad (8)$$

根据 Beer 定律, 大气透过率可表示为

$$T(\lambda, L) = \exp \left[- \int_0^L \beta(\lambda, x) dx \right], \quad (9)$$

式中 x 为路径, β_{ext} 为大气组分的消光系数, 主要包括

$$\beta_{\text{ext}} = \beta_a + \alpha_R + \alpha_M, \quad (10)$$

上式右边三项分别为气溶胶粒子消光系数、大气分子散射和吸收系数, 它们与大气中气溶胶的含量、吸收气体的含量、温度、气压的路径分布有关。

2.2 大气透过率修正的必要性

大气衰减降低了目标辐射强度, 不同波长上衰减强度的差别使信号光谱特征也发生改变。一方面影响了目标的识别距离, 使低于一定辐射强度的目标难以识别, 给依靠目标亮度进行目标识别的工作带来了困难; 另一方面, 在不同天气条件下测得的同一目标的辐射强度也发生了变化, 从而给依靠目标辐射强度进行识别的工作带来了困难。

各种分子(主要包括水汽、二氧化碳、臭氧以及一些微量气体等)在不同的波段对辐射产生强弱不等的吸收, 而这些吸收气体(如水汽)含量的时空变化相当大。弥漫在大气中的气溶胶颗粒对光辐射

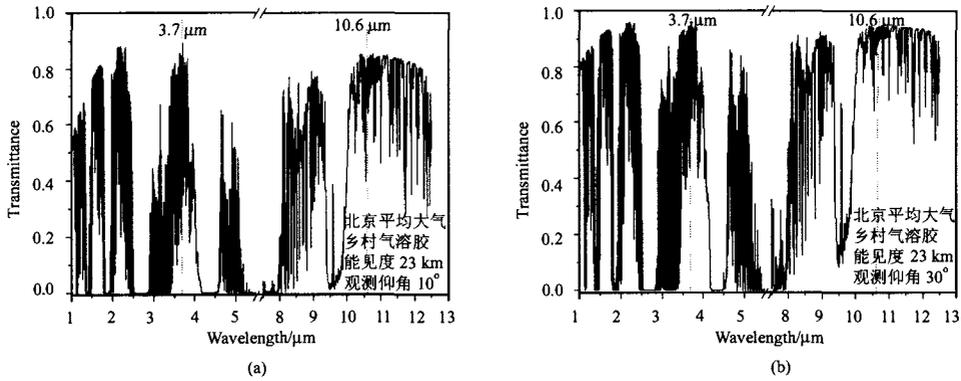


图 1 计算的红外 1~3 μm , 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的大气光谱透过率 (a) 仰角 10° (b) 仰角 30°
虚线表示在 3.7 μm 和 10.6 μm 附近的大气窗口区

Fig.1 The spectral transmittance among 1~3 μm , 3~5 μm , and 5~12 μm wavelength regions in Beijing area (a) elevation of 10° (b) elevation of 30° . The dotted lines in the diagram represent atmospheric windows at 3.7 μm and 10.6 μm

产生散射和吸收, 在大气窗口区, 气溶胶的消光尤其重要。而大气气溶胶的光学性质、时空变化非常复杂。短波范围内, 大气分子和气溶胶的散射起重要作用。

图 1 为以仰角 10° 和 30° 观测, 北京地区整层大气在红外 1~3 μm 、3~5 μm 和 8~12 μm 波段的大气光谱透过率 (假设地面海拔高度 1 km, 地面能见度 23 km)。该透过率随天气条件 (大气气溶胶、水汽和其它吸收气体含量的变化)、光路 (观测高度、观测仰角、方向) 和波段等有相当大的变化。

假定目标黑体温度分别为 220 K、300 K 和 400 K, 在北京地区以 10° 仰角观测。(假定乡村气溶胶, 能见度 23 km, 地面海拔高度 1 km)。因为大

气的影响, 用不同的波段观测到的目标的亮温 (K) 见表 1。

表中前三个波段为宽带, 后两个波段为窄带 (假设带宽为波长的 1%), 选择 3.7 μm 和 10.6 μm 附近的大气窗口区。从中可以看出: 在低仰角下, 大气衰减相当严重, 不同波段衰减大不一样, 因此影响的程度也不一样。

如果不考虑大气衰减, 用 8~12 μm 波段测量 400 K 亮温的目标, 温度误差最大将超过 55 K! 辐射量在有些波段可能被大气衰减超过 80% 以上。所以, 大气衰减的修正在目标辐射量和目标温度的测量中必须予以考虑, 并且大气修正的精度直接影响目标辐射量的测量精度。

表 1 北京地区不同波段在地面观测不同温度目标的亮温

Table 1 The brightness temperatures observed on the ground in Beijing with various wavebands and various target temperatures

波段透过率	1~3 μm	3~5 μm	8~12 μm	3.7 μm	10.6 μm
目标温度 (K)				($\Delta\nu=26 \text{ cm}^{-1}$)	($\Delta\nu=10 \text{ cm}^{-1}$)
	0.324	0.237	0.527	0.651	0.835
220	193.2	195.0	203.2	214.8	213.5
300	255.6	258.1	267.9	290.4	288.1
400	335.4	334.6	343.7	383.1	379.6

3 大气透过率的实际测量

获得大气透过率最直接的方法就是直接测量大气透过率。通常目标的辐射特性测量都是采用有一定带宽的带通测量, 根据 (7) 式, 要获得在带通内的平均大气透过率, 必须测量具有较精细光谱分辨率的大气透过率。

3.1 水平大气透过率测量

对于水平情况, 可采用如下的配置来实际测量大气光谱透过率, 见图 2。发射系统由一台高温 (通常为 1000°C) 标准黑体辐射源提供光源。该光源通过一小孔光阑, 经一离轴抛物准直镜准直后, 平行地发射出去, 接收系统主要由一台干涉型 Mechelson 红外光谱辐射计构成, 光谱分辨率可以达到 1 cm^{-1} 。通过比较一定距离上测量的信号与出口处信号的比值得到大气的透过率。图 3 为我们实际测量的 1 km 距离上的大气光谱透过率。为了比较, 我们还用最近研制的通用大气辐射传输软件计算的结果做了比较 (图中左侧下边和右侧)。测

量时的大气温度 291 K , 气压 1017 hPa , 相对湿度 85% , 能见度为 3.6 km , 水汽含量 17186.9 ppmv 。

3.2 斜程大气透过率

利用辐射量恒定的恒星作光源, 测量透过整层大气后恒星的辐射光谱, 若大气外的恒星流量密度已知或用 Langly-plot 法外推大气外仪器的响应, 可以推算整层大气的透过率及其随天顶角的变化。白天以太阳光为光源, 夜晚用亮于 5 等星的恒星作光源, 我们已研制了昼夜兼用的可见光波段的大气光谱透过率测量仪^[6], 可以用来测量白天和夜晚可见光波段的大气光谱透过率。

在红外波段, 星光的辐射非常微弱, 而大气背景辐射较强, 利用星光作高分辨率的大气光谱透过率测量非常困难, 有足够亮度、适合做红外大气光谱透过率测量的恒星不多, 所以用星光测量的大气光谱透过率来实时修正目标辐射的测量值是不太现实的。

太阳是一个强大而稳定的辐射光源, 利用太阳

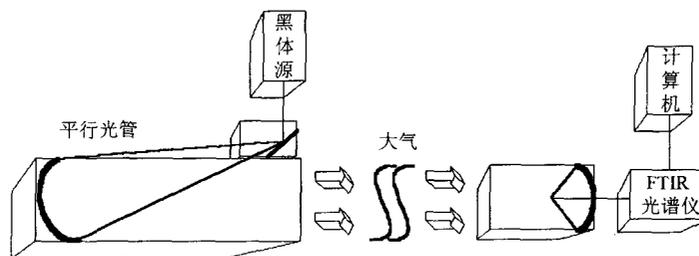


图 2 大气透过率测量装置

Fig.2 The device for measuring atmospheric transmittance

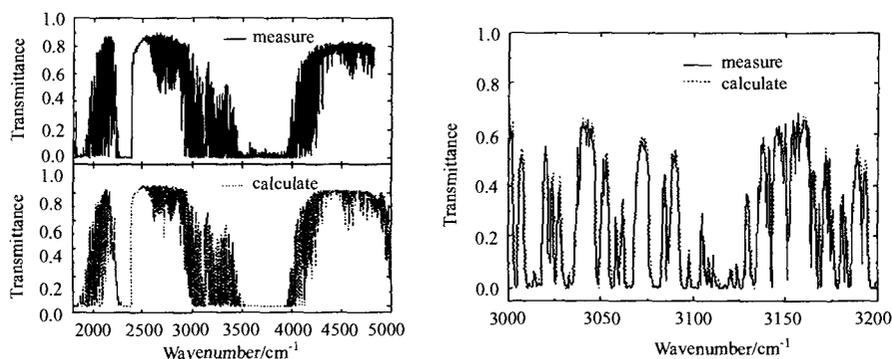


图 3 实测透过率和计算透过率比较

Fig.3 Comparison of measured transmittance with calculated transmittance

做大气光谱透过率测量是一个较为可行的方案,但是只能白天在一定方向上进行。

除非在测量时,目标附近有一个辐射量已知并且辐射量同目标辐射相近的光源可用,否则的话,很难用实际测量的大气透过率来修正测量结果。因为从式(7)中可以看出不同的光谱分辨率、不同的路径、不同的光源分布都有可能使测量的有效透过率发生变化。斜程大气透过率的测量要求不亚于目标本身的测量要求,因为大气透过率的测量除了要求测量到达探测器的信号外,还需要知道没有经过大气衰减的原始信号。

实际测量的大气透过率通常用于验证模式计算的精度、研究某地的大气光学特性等。

3.3 通过模式计算大气透过率

在实际应用中,大多数情况下无法进行实时大气透射测量,人们更关心的是如何利用易测的大气参数来获得大气传输的信息。因此,我们根据已有的红外光谱知识,编制了通用辐射传输软件 CART。该软件根据测量的大气参数可以计算空间两点或地面到大气外的大气光谱透过率,光谱分辨率为 1 cm^{-1} 。计算的大气光谱透过率包括各种分子吸收、分子散射、气溶胶散射和吸收、各种分子连续吸收

等。图 3 左下图为用 CART 计算的水平大气光谱透过率,右边为 $3000\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 间隔的大气透过率计算与测量的比较,可见测量与计算相比,两者有比较好的一致。

4 大气透过率修正精度

由于红外辐射的大气透过率和大气目标辐射具有显著的光谱特征,因此目标的静态红外辐射光谱特征和实时的天气条件是制约目标探测的大气修正的主要因素。大气是高度随机的介质,一点测量的大气参数廓线,与实际目标和探测器之间的光路的大气参数不可能完全重合,大气参数测量精度不可能达到非常高的精度。大气修正误差主要来自光传输路径的大气参数的测量误差。大气透过率的误差可据下分析

$$T = \exp\left(-\sum_i \tau_i\right), \quad (11)$$

$$\frac{\delta T}{T} = -\sum_i \frac{\delta \tau_i}{\tau_i} \tau_i = \sum_i \frac{\delta \tau_i}{\tau_i} \log T_i, \quad (12)$$

其中 T 为大气透过率, τ_i 为各种大气成分导致的的光学厚度,它与大气透过率的关系是 $\tau_i = -\log T_i$ 。从上式可以看出:大气透过率的修正误差与光学厚

表 2 西北某地区大气透过率计算误差随大气参数测量误差的变化 (观测天顶角 80° , 地面到大气顶)

Table 2 The errors of atmospheric transmittance induced by the measurement errors of atmospheric parameters in somewhere of the northwest of China (observing zenith of 80° , from ground to the top of the atmosphere)

		1~3 μm	3~5 μm	8~12 μm
水汽	+30%	-3.31%	-7.01%	-8.8%
臭氧	+10%	-0.0003%	-0.19%	-0.78%
二氧化碳	+10%	-0.22%	-0.28%	-0.32%
气溶胶	+30%	-7.07%	-2.08%	-2.46%
总透过率		-10.4%	-9.34%	-12.1%
		1~3 μm	3~5 μm	8~12 μm
水汽	-30%	4.46%	9.48%	8.3%
臭氧	-10%	0.00025%	0.199%	0.85%
二氧化碳	-10%	0.23%	0.29%	0.33%
气溶胶	-30%	7.77%	2.13%	2.56%
总透过率		12.8%	12.4%	12.3%

度 (大气参数) 的测量误差因为存在一个比例因子 $\log T_i$, 所以引起大气衰减的各个因素中透过率越好, 光学厚度越小, 相同的大气参数测量精度对大气透过率修正误差的贡献越小; 透过率越小, 光学厚度越大, 相同的大气参数测量精度对大气透过率修正误差的贡献越大。

我们以西北某地区的历史探空平均廓线 (包括温度、湿度和气压的高度分布) 来研究大气参数 (水汽、二氧化碳、臭氧、气溶胶) 廓线的探测精度对大气透过率修正误差的影响。并假定西北某地区的地面海拔高度为 1 km。计算以 10° 仰角, 从地面斜距传输到大气顶, 对沙漠型气溶胶模式, 地面能见度为 23 km, 若水汽测量误差控制在 30% 以内, 气溶胶消光的误差在 30% 以内, 臭氧和二氧化碳的含量测量误差控制在 10% 以内, 则大气透过率的计算误差见表 2~5。

从表 2~5 可以看出, 在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 影响大气透过率修正精度的主要因素是水汽和气溶胶在时间和空间上的变化。如何准确地获得这些参数成为大气修正的关键。当传输条件越差 (大气透过率小时), 大气参数测量精度对大气透过率修正精度越重要。

表 3 西北某地区年平均水汽透过率的计算误差随水汽含量测量误差的变化
(观测天顶角 80° , 地面到大气顶)

Table 3 The errors of atmospheric transmittance induced by the measurement errors of atmospheric water profiles with the yearly-average atmospheric model in the area
(observing zenith of 80° , from ground to the top of the atmosphere)

		$1\sim 3\ \mu\text{m}$	$3\sim 5\ \mu\text{m}$	$8\sim 12\ \mu\text{m}$
水汽	+10%	-1.19%	-2.53%	-2.85%
	-10%	1.31%	2.79%	2.80%
	+20%	-2.29%	-4.86%	-5.8%
	-20%	2.78%	5.92%	5.57%
	+30%	-3.31%	-7.01%	-8.8%
	-30%	4.46%	9.48%	8.3%

表 4 西北某地区七月水汽透过率计算误差随水汽含量测量误差的变化
(观测天顶角 80° , 地面到大气顶)

Table 4 The errors of atmospheric transmittance induced by the measurement errors of atmospheric water profiles with the average July atmospheric model in the area
(observing zenith of 80° , from ground to the top of the atmosphere)

		$1\sim 3\ \mu\text{m}$	$3\sim 5\ \mu\text{m}$	$8\sim 12\ \mu\text{m}$
水汽	+10%	-1.34%	-3.06%	-8.01%
	-10%	1.49%	3.42%	8.22%
	+20%	-2.60%	-5.90%	16.01%
	-20%	3.16%	7.28%	16.5%
	+30%	-3.74%	-8.44%	-23.5%
	-30%	5.03%	11.7%	24.8%

表 5 西北某地区气溶胶透过率误差随气溶胶含量测量误差的变化 (沙漠型气溶胶, 地面能见度 23 km 时; 观测天顶角 80° , 地面到大气顶)

Table 5 The errors of atmospheric transmittance induced by the measurement errors of atmospheric aerosol profiles in the area (desert aerosol model, surface visibility 23 km, observing zenith of 80° , from ground to the top of the atmosphere)

		$1\sim 3\ \mu\text{m}$	$3\sim 5\ \mu\text{m}$	$8\sim 12\ \mu\text{m}$
气溶胶	+15%	-3.62%	-1.05%	-1.24%
	-15%	3.79%	1.06%	1.27%
	+30%	-7.07%	-2.08%	-2.46%
	-30%	7.77%	2.13%	2.56%
	+50%	11.4%	3.45%	4.05%
	-50%	13.4%	3.58%	4.33%

采用实时的水汽廓线测量数据, 将水汽测量精度控制在 10% 以内, 气溶胶消光廓线测量精度控制在 30% 以内, 对好的天气 (能见度大于 23 km), 当仰角大于 10° , 地面海拔高度高于 1 km 时, 大气修正精度将能达到好于 15% 的精度。关键是高精度的实时水汽廓线和气溶胶消光廓线的观测。

目前对水汽廓线的实时观测可采用多频段微

波辐射计或拉曼散射激光雷达来实时遥感得到。气象探空是获得水汽和温度廓线的常规方法,也是精度最高的方法,但探空不能获得实时性强和固定方向的廓线数据。

大气参数的测量误差估计:

用实时的探空廓线或其它方法(如多频段微波辐射计或拉曼散射激光雷达)实时获得水汽廓线,水汽的测量精度能达到 10% 左右。CO₂ 含量:变化一般不超过 10 ppm,所以误差小于 3%;气溶胶消光:用仪器(如激光雷达)测量精度估计在 20% 以内。地面能见度测量误差一般在 30% 以内。

因此,结合大气透过率计算模式,在较好的天气条件下,各波段上的大气透过率的修正精度可以达到 15%,该精度需经过实际观测来检验。

根据上述分析以及大气辐射传输软件的输入要求,红外辐射测量大气修正需要实时观测的大气参数包括: 1) 大气水汽高度分布廓线; 2) 气溶胶消光高度分布廓线; 3) 大气温度和气压的高度分布廓线; 4) 地面能见度; 5) 其它微量气体成分的高度分布廓线(因为微量气体成分对总的大气衰减影响很小,可简单地使用模式大气中的微量气体廓线)。

若不进行实时的大气廓线测量(特别是水汽的廓线测量),采用地面参数或直接采用模式大气,水汽含量廓线估算误差会超过 30%,这时,在该地区七月,仅水汽含量的估算误差引起的大气透过率修正误差将达到 $\pm 25\%$,对于低纬度和低海拔的地区,大气修正的误差将会更大。

大气透过率的修正精度与地域和季节关系较大。一般来说,在高纬度、高海拔地区、在寒冷干燥的冬季大气修正精度较高;在低纬度、低海拔地区和炎热潮湿的地区大气透过率修正精度较差。

5 小 结

外场目标红外辐射特性测量必须考虑大气修正。根据标准大气模式计算的大气透过率误差可能会超过 30%,而根据实际测量的大气温度、水汽和气溶胶廓线计算的大气修正误差在好的天气条件下

和高纬度地区可以达到优于 15% 的精度。该大气透过率的修正精度与地域和季节关系较大。

参考文献:

- [1] Chen Du, Xu Xiufang, Liu Yinnian, et al. The study of measuring infrared spectrum of space target[J]. *Infrared*, 2005, 7: 8-12(in Chinese).
陈 杜, 徐秀芳, 刘银年, 等. 空间目标红外辐射谱测量技术研究 [J]. *红外*, 2005, 7: 8-12.
- [2] Liu Hao, Wu Kaifeng. Effect of environmental meteorology on characters of optical detector[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2006, 22: 46-48(in Chinese).
刘 浩, 吴开峰. 环境气象条件对光学探测器性能的影响研究 [J]. *航天电子对抗*, 2006, 22:46-48.
- [3] Lu Yuan, Ling Yongshun, Li Yubo. The infrared radiation of ground object and its protection[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2003, 18: 37-40(in Chinese).
路 远, 凌永顺, 李玉波. 地面目标红外辐射及防护研究 [J]. *电子对抗技术*, 2003, 18: 37-40.
- [4] Wang Jiang-an, Xiao Wei-an, Shen Lin. Analysis of infrared radiation feature of targets in background of sea and sky[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2001, 13: 29-31(in Chinese).
王江安, 肖伟岸, 申 林. 海空背景下目标红外辐射特征分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2001, 13: 29-31.
- [5] Zhao Jun, Zhang Jian, Du Cuilan. Reversible function of IR radiation atmospheric transmissivity[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36: 866-867(in Chinese).
赵 军, 张 建, 杜翠兰. 红外辐射大气透过率修正函数 [J]. *激光与红外*, 2006, 36: 866-867.
- [6] Zhan Jie, Guo Ruipeng, Rao Ruizhong. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near-infrared[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 179-183(in Chinese).
詹 杰, 郭瑞鹏, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3): 179-183.