

文章编号:1001-9014(2007)03-0182-05

混凝土结构物与植物叶片之红外热像侦测研究

李友竹, 王建勋

(南台科技大学 机电科技研究所, 台南 710)

摘要: 红外热像仪准确测量温度的主要关键为物质的发射率。红外热像仪常用于战区侦测, 但战区目标物常以植物绿化达到伪装效果。为此基于能量平衡法则, 建立叶片发射率仿真模型, 可用以估算叶片发射率。另外以红外热像仪分析 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 微小温差环境中混凝土结构物与植物叶片之红外热影像, 实验结果显示两种目标物红外热像平均温度与红外热像仪发射率参数设定值的回归直线相当接近, 但两种目标物平均温度标准误差与红外热像仪发射率参数设定值的回归直线明显不同。混凝土与叶片具有不同的红外热像性质, 此一发现将有助于提升红外热像仪对微小温差目标区的侦测能力。

关键词: 红外热像; 目标探测; 回归分析; 叶片发射率; 仿真模型

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

INFRARED THERMOGRAPHY TARGET DETECTION BETWEEN CONCRETE STRUCTURE AND PLANT LEAF

LI Yu-Chu, WANG Jian-Xun

(Institute of Mechatronic Science and Technology, Southern Taiwan University of Technology, Tainan 710, China)

Abstract: The principal problem in which infrared thermographic measurements are concerned with is the emissivity of material. Infrared thermographic system was usually used to detect enemy on battlefields. However, landscape engineering is a common camouflage works on battlefields. Thus, according to energy equilibrium law, the leaf emissivity simulate model was set up to estimate the leaf emissivity. Further, the infrared thermographic system was used to analyze the thermography of concrete structure and plant leaf when the environmental temperature difference is within 0.5°C . The experimental results show that there are approximate linear regression lines between the emissivity parameter of infrared thermographic system vs. the mean temperature of these two targets. But there are obvious different linear regression lines between the emissivity parameter of infrared thermographic system vs. standard error of mean temperature of these two targets. The different characteristic of infrared thermography between concrete structure and plant leaf will promote the detecting ability of infrared thermographic system when the environmental temperature of target area is under the slight temperature difference.

Key words: infrared thermography; target detection; regression analysis; leaf emissivity; model simulation

引言

红外热像仪常用于侦测军事目标区域, 惟陆地背景红外热像常因地形、地貌而改变。地面军事目标物亦常以植物绿化达到伪装效果, 且红外抑制技术^[1]的发展都增加红外热像识别困难度。热辐射发射率为红外热像仪准确测量物体表面温度的最重要参数^[2], 依据叶片能量平衡法则, 可建立叶片发射率仿真模型, 并以木棉叶片的模型估算值与实验值进行比较对照。

美国陆军研究实验室(US Army Research Laboratory, ARL)定义红外热影像自动目标辨识系统的3个工作步骤为^[3]: (1) 目标侦察阶段、(2) 噪声排除阶段以及(3) 目标种类确认的分类阶段。大部分红外热影像自动确认系统的研究文献皆采用红外热像仪数字离散影像撷取后, 利用各种算法进行这3个步骤, 忽略了红外热像仪发射率参数设定值对红外热像数字离散数据撷取时的影响。美军战斧巡弋飞弹(Tomahawk Missile, BGM-109)等类型新式攻陆武器也搭配红外热像仪, 提升终端目标识别能力。

收稿日期: 2006-06-20, 修回日期: 2006-12-20

Received date: 2006-06-20, revised date: 2006-12-20

基金项目: 国家科学委员会专题计划(中国台湾): (NSC 94-2212-E-218-007)

作者简介: 李友竹(1963-), 男, 台湾省台南人, 南台科技大学机械系助理教授, 博士, 主要从事红外量测技术与太阳能工程研究。

这类武器常用于攻击敌方重要的混凝土建筑物,因此针对叶片和混凝土结构物,讨论红外热像仪发射率参数设定值对红外热像数字离散数据撷取时的影响。

1 叶片发射率仿真模型与相关实验

如图 1 所示为叶片与周遭环境能量交换模式^[4],其中 R_{abs} 为吸收的太阳能量, L 为热辐射能量, hE 为蒸散水份能量而 H 则为显热损失。叶片吸收太阳辐射能量 R_{abs} 主要集中于波长 400 ~ 2400 nm, 因此太阳光谱辐射力^[5] 乘上太阳纬度角 ϕ 与叶片太阳光吸收率 $\alpha(\lambda)$, 即可得叶片吸收能量 R_{abs} 。

$$R_{abs} = \int_{400nm}^{2400nm} solar\ spectra(\lambda) \cdot \sin\phi \cdot \alpha(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

利用 PROSPECT 叶片光学模型^[6] 计算叶片的太阳光吸收率 $\alpha(\lambda)$ 。PROSPECT 模型所需的输入参数为 (1) 结构参数 (N , structure parameter): 可由比面积 (SLA , specific leaf area) 参数估算出

$$N = (0.9SLA + 0.025) / (SLA - 0.1) \quad (2)$$

其中 $SLA = 1/C_m = A/dw$, 此处 A 为叶片面积, dw 为叶片干重。(2) 叶绿素含量 (C_{ab} , leaf chlorophyll a + b content), (3) 单位面积叶片有效水份重 (C_w , leaf equivalent water thickness)

$$C_w = (fw - dw) / A \quad (3)$$

此处 fw 为叶片鲜重。(4) 叶片干燥成份 (C_m , leaf dry matter content)。

如图 1, 叶片热辐射能量 L 可由能量守恒原理求出:

$$L = R_{abs} - hE - H \cong R_{abs} - hE \quad (4)$$

其中, 健康叶片在无风及土壤水份充足状况下, 叶温与气温相近^[7], 显热损失可予以忽略。利用重量损失法^[7] 测量叶片的蒸散水量 E , 可估算叶片蒸散能量为 $hE = h \cdot E$, 此处 h 为水蒸发潜热。此外, 物体表面辐射能量遵循热辐射方程式^[5]:

$$L = \epsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

其中 ϵ 为叶片热辐射发射率, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), T 为绝对温度 (K)。

依照 PROSPECT 叶片光学模型文献^[5] 中之实验步骤, 求取 C_{ab} 、 C_w 、 C_m 参数, 由 PROSPECT 模型计算木棉叶片吸收率 $\alpha(\lambda)$, 并由公式 (1)、(4)、(5) 计算出木棉叶片热辐射发射率 ϵ 的仿真值:

$$\epsilon = \left(\int_{400nm}^{2400nm} solar\ spectra(\lambda) \cdot \sin\phi \cdot \alpha(\lambda) d\lambda - hE \right) / \sigma T^4 \quad (6)$$

使用 AE 型热辐射发射率量测仪 (emissometer,

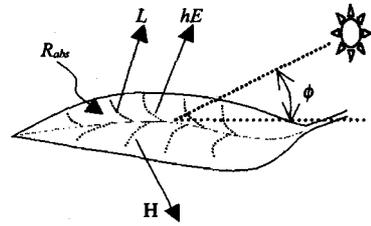


图 1 叶片能量平衡图。(R_{abs} : 吸收太阳能量, L : 热辐射能量, hE : 蒸散水份能量, H : 显热损失)

Fig. 1 Energy balance of a single leaf (R_{abs} is the leaf absorbing energy, L the leaf emitting energy, hE the leaf evaporating water energy and H the leaf sensible losing energy)

model AE, Devices & Services, USA), 测量 14 片木棉叶片发射率, 以比对仿真值。AE 型发射率量测仪准不准确度评估为 $\pm 2\%$ 。实验选取的木棉叶片面积大于量测测量测面积的 5 倍以上, 选择天气状况晴朗无云, 室外温度 $16.5 \pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度 $75 \pm 2\%$ 进行实验。

2 混凝土结构物与叶片红外热像实验

红外热影像实验使用 Thermovision 550 型红外热像仪 (infrared thermographic system, thermovision 550, Agema, USA), 这型红外热像仪采用 InSb 传感器, 接收中波段红外频谱 3.6 ~ 5.0 μm , 灵敏度小于 0.1°C , 不准确度 $\pm 2\%$ 。于 $21.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $65 \pm 2\%$ 、250 lumen 日光灯照明的空调实验室中进行红外热像实验。依实验条件设定红外热像仪参数为拍摄距离 2 m、相对湿度 65%、环境温度 21.5°C , 以修正红外热像仪与拍摄目标间环境所造成之误差。由于小于 0.5 发射率的灰体通常很少见^[1], 所以实验时红外热像仪的发射率参数设定值分别调整为 1 ~ 0.5, 间隔 0.05, 分别以红外热像仪屏幕之十字点对准 5.2 kg 的第一类波特兰水泥混凝土块与 4.4 g 的叶片之固定区域, 测量并记录温度, 取样时间 45 sec, 取样频率 1 sec^{-1} 。至于混凝土块与叶片背景则为一块发射率 0.9 之黑色钢片。最后以 AE 型热辐射发射率量测仪分别测量混凝土块发射率为 0.94、叶片为 0.71。

3 叶片发射率模型仿真结果

图 2 为 14 片木棉发射率实验值及仿真值。叶片样品 6 的实验值与仿真值有最大误差 13.2%, 主要原因为叶片蒸散量以重量损失法量测整枝树枝上所有叶片之平均蒸散量, 而个别叶片蒸散量与平均蒸散量差异所造成之。所以比较 14 片叶片的仿真平均

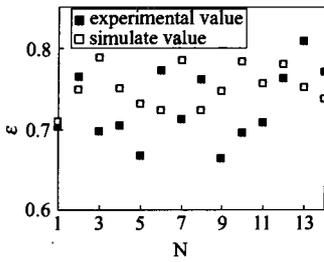


图2 木棉叶片样品编号与样品发射率间的仿真值和实验值,仿真值与实验值的标准差分别为0.044与0.025.
Fig. 2 The simulate value and experimental value of leaf emissivity of kapok tree vs. sample number. Standard deviation of simulate value and experimental value are 0.044 and 0.025, respectively.

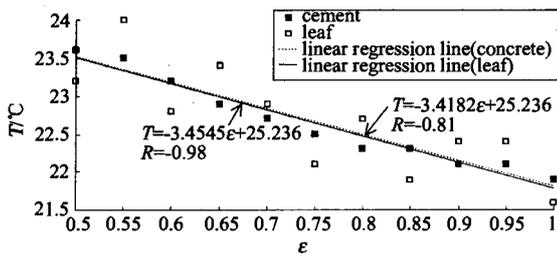


图3 ±0.5℃微小温差环境中,发射率参数设定值与水泥结构物、木棉叶片平均温度关系图
Fig. 3 The mean temperatures of concrete structure and plant leaf vs. the emissivity parameters of infrared thermographic system under the environmental temperature difference of ±0.5℃

值0.73与实验平均值0.75,则误差只有2.7%。此外,太阳辐射被大气漫射后到达地面称为漫射太阳辐射,晴天的漫射太阳辐射可造成总太阳辐射10%的变化^[8],对叶片热辐射发射率变化影响约4%差异。考量热辐射发射率量测仪器量测不准确性与漫射太阳辐射所造成的误差,14片叶片之仿真平均值可估算出14片叶片之实验平均值。

4 红外热影像实验结果

图3显示±0.5℃微小温差环境中,红外热像仪发射率参数设定值与混凝土结构物、木棉叶片的平均温度关系。发射率设定值与混凝土结构物、叶片平均温度回归分析呈高度负相关,相关系数分别为-0.98与-0.81。混凝土结构物相关系数绝对值比叶片高,主要原因为5.2 kg混凝土结构物的热容量4.5 kJ/kg·K高,温度不易变化;反之,健康叶片因植物生理作用与环境温度有±1.1℃变动影响^[7],因而出现图4a发射率设定值1的实验中,叶片温度比混凝土结构物温度低,而图4b发射率设定值0.5的实验中叶片温度比混凝土结构物高。由式(5)可

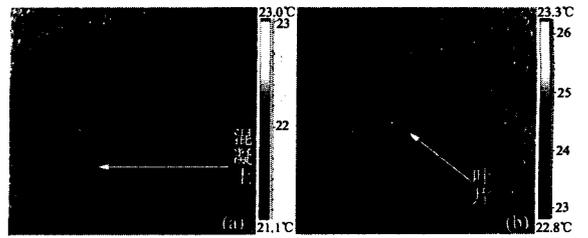


图4 ±0.5℃微小温差环境中,(a)发射率设定值1的实验中,叶片温度21.5℃比混凝土结构物温度22.1℃低。(b)发射率设定值0.5的实验中,叶片温度24.6℃比混凝土结构物温度23.7℃高。

Fig. 4 When the environmental temperature difference is ±0.5℃; (a) in the experiment of the emissivity parameter of infrared thermographic system is 1, the leaf temperature 21.5℃ is smaller than the one of concrete 22.1℃. (b) in the another experiment of the emissivity parameter of infrared thermographic system is 0.5, the leaf temperature 24.6℃ is larger than the one of concrete 23.7℃

知两种物体虽处相同温度,因物体发射率不同而导致红外热像仪所接收到的能量不同,所以显现出不同的温度值,因此一般红外热像仪皆辅以自动补偿机制,对各种不同种类的辐射源能量进行修正,以计算出温度热影像。此外,一般红外热像仪可设定发射率参数值,以准确测量温度热影像,而不同的发射率设定通常是透过增益信号放大来实现的。观察图3,两种目标物的回归直线呈高度负相关,且这两种目标物线性回归线十分接近。依热辐射发射率测量仪测量混凝土结构物与叶片发射率0.94与0.71,计算两条回归线对应的温度,结果相同为22.0℃与22.8℃,可以发现红外热像仪的发射率自动补偿与发射率设定值功能,并未在微小温差环境中发生效用。原因可归结于红外热像仪自动补偿功能常以二色温度或多色温度测定法修正,消去未知的目标物发射率参数值^[8]。二色或多色温度测定法需要两种以上频谱波段以消去未知的目标物发射率,而发射率设定功能则依不同的发射率设定参数来进行信号增益放大:当发射率设定值越小,信号增益越大。倘若考量目标面传到红外热像仪传感器的辐射能 E_{SR} 系目标物辐射能加上环境反射目标物辐射能所组成:

$$E_{SR} = \sigma \{ \epsilon_s (T_s^n - T_R^n) + \rho_s (T_a^n - T_R^n) \} \quad (7)$$

其中 σ 为Stefan-Boltzmann常数($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), ϵ_s 与 ρ_s 为目标物发射率及反射率, T_s 、 T_a 及 T_R 分别为目标物、环境与传感器温度,而 n 则为传感器固有的指数,InSb传感器 n 值为8.68^[9]。

当 $T_s \gg T_R$ 时,式(7)可简化成下式:

$$E_{SR} = \sigma \epsilon_s T_s^n + \sigma \rho_s T_a^n = \sigma \alpha_s T_s^n = \sigma T_s^{*n} \quad (8)$$

其中 α_s 称作射度系数,而 T_s^{*n} 则为红外热像仪的辐射温度.

灰体之反射系数 ρ_s 等于 $1 - \varepsilon_s$ ^[9],因此二色温度测定法利用滤波器对各波长检测能量分布,由式(8)可表示如下:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_1 : T_{s1}^{*n1} = \varepsilon_1 T_s^{n1} + (1 - \varepsilon_1) T_a^{n1} \\ \lambda &= \lambda_2 : T_{s2}^{*n2} = \varepsilon_2 T_s^{n2} + (1 - \varepsilon_2) T_a^{n2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 λ_1 与 λ_2 为两种不同波长. $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 与 T_{s1}^*, T_{s2}^* 以及 $n1, n2$ 分别为不同波长检测下的物体发射率、辐射温度与传感器固有指数. T_s 与 T_a 为目标物与环境温度.

当温度介于 293 ~ 400K 时, ε_1 与 ε_2 相等,式(9)可简化消去发射率 ε . 当红外热像仪发射率设定值小时,信号增益 m 放大,由式(9)可得:

$$T_s = T_{s2}^{* \frac{m+n2}{2-n1}} \cdot T_{s1}^{* \frac{m+n1}{2-n1}} \quad (10)$$

其中 m 为大于 0 的实数,代表讯号增益放大值.

考虑式(10),对 m 微分可得:

$$\frac{dT_s}{dm} = \frac{1}{n2 - n1} T_{s2}^{* \frac{m+n2}{2-n1}} T_{s1}^{* \frac{m+n1}{2-n1}} (\ln T_{s2}^* - \ln T_{s1}^*) \quad (11)$$

由于 $n2 \neq n1$, 所以 $\frac{dT_s}{dm} > 0$. 因此图 3 中发射率

设定值降低时,讯号增益 m 变大,导致目标物温度 T_s 上升. 分析发射率设定参数并未发生效用的原因,透过式(8)、(9),可得微小温差环境中的射度系数为 1,红外热像仪传感器的辐射能 E_{SR} 与目标物发射率 ε 无关.

图 5 显示 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 微小温差环境中,发射率参数设定值与水泥块、木棉叶片平均温度的标准误差 (standard error) 关系. 发射率设定值与混凝土结构物、叶片平均温度标准误差回归分析呈高度负相关,相关系数分别为 -0.96 与 -0.80 . 两种目标物的回

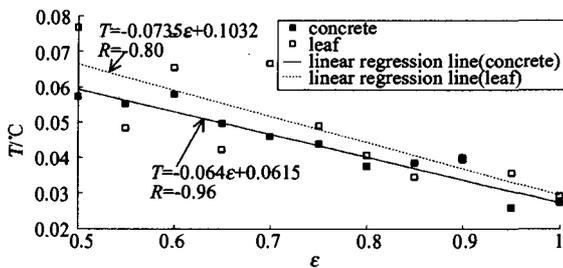


图 5. $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 微小温差环境中,发射率参数设定值与水泥块、木棉叶片平均温度的标准误差关系图.

Fig. 5 The standard errors of mean temperature of concrete structure and plant leaf vs. the emissivity parameters of infrared thermographic system under the environmental temperature difference of $\pm 0.5^\circ\text{C}$

归直线呈高度负相关的原因可归之发射率设定参数越小,讯号增益放大后,噪声随之变大,图 3 中叶片回归直线斜率绝对值比混凝土结构物大,代表叶片温度经讯号增益放大后,噪声增大值比混凝土结构物高,归咎主要原因为叶片温度易随环境温度扰动. 此外,图 5 显示两种目标物 45 sec 平均温度测量值的标准误差皆小于分辨率 0.1°C ,而实验测量结果则可表为 $\bar{X} + \sigma_{\bar{X}}$,其中 \bar{X} 为取样 45 次测量取样之平均值, $\sigma_{\bar{X}}$ 则为平均值之标准误差. 因所有测量取样结果标准误差皆小于分辨率 0.1°C ,因此可判断该型红外热像仪精密度高. 且虽然叶片与环境温度有 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 变动,但所有叶片量测实验结果标准误差皆小于 0.1°C ,可判断 45 sec 取样时间内叶片温度变动小于 0.1°C .

对图 3、5 的 4 条回归线进行简单线性回归分析,所有直线的截距 β_0 与斜率 β_1 皆达到 0.005 的显著水准,结果列于表 1. 图 3 叶片显著水准略高于混凝土,原因为与环境温度有 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 变动范围. 但回归直线仍然很可靠,主要原因为平均温度之标准误差小于 0.1°C .

表 1 简单回归分析实验结果

Table 1 Results of simple linear regression

Linear regression line	β_0, β_1	Coefficient	t Statistic	P-Value
Emissivity versus concrete temperature in Fig. 3	β_0	25.23636	135.8147	<0.0001
	β_1	-3.45455	-14.25	<0.0001
Emissivity versus leaf temperature in Fig. 3	β_0	25.23636	40.34001	<0.0001
	β_1	-3.41818	-4.18802	<0.0005
Emissivity versus standard error of concrete temperature in Fig. 4	β_0	0.091488	19.37961	<0.0001
	β_1	-0.06402	-10.3944	<0.0001
Emissivity versus standard error of leaf temperature in Fig. 4	β_0	0.103162	7.398449	<0.0001
	β_1	-0.0735	-4.04049	<0.0005

*P < 0.05, reach statistical significance.

5 结论

侦测混凝土目标物与植物红外热像时,需有效估算混凝土目标物与植物之热辐射发射率,以设定红外热像仪发射率参数值. 惟植物叶片系生命体发射率,不易决定叶片发射率参数值. 如图 2 所示,同一树枝上的木棉树木的叶片发射率最大差异可达 0.14 之谱. 因此基于能量平衡法则建立的叶片热辐射发射率仿真模型,14 片叶片仿真平均值与实验平均值相差了 2.7%,为一简便可靠之叶片热辐射发射率预估方法.

混凝土结构物与叶片的红外热像实验结果显示,红外热像仪发射率参数设定值与混凝土结构物、

叶片红外热影像温度的回归直线相当接近,回归直线的斜率差异仅 1%,代表红外热像仪发射率设定功能于微小温差环境 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 并没有发挥效用.但红外热像仪发射率参数设定值与混凝土结构物、叶片红外热像平均温度标准误差的回归直线则有明显不同,两种目标物平均温度标准误差之回归直线的斜率差异达 13%.

REFERENCES

- [1] SHAN Yong, ZHANG Jing-Zhou, LI Li-Guo. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (单勇,张靖周,李立国.直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(2): 95—100.
- [2] Avdelidis N P, Moropoulou A. Emissivity considerations in
 ~~~~~  
 (上接 163 页)
- [3] LI Jun-Ming, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Comparison of 3 mm and 8 mm waveband passive detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李俊明,张祖荫,郭伟.3mm 与 8mm 波段无源探测特性的比较. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 71—74.
- [4] Stephen A Mass. *Nonlinear Microwave and RF Circuits* [M]. 2nd ed. Artech House, INC. 2003, 301—315.
- [5] GAN Ti-Guo. Schottky diode applications in mm-wave integrated circuits [J]. *Telecommunication Engineering* (甘体国.肖特基势垒二极管在毫米波集成电路中的应用. *电讯技术*), 1994, 34(5): 12—17.
- [6] Atwater H A. The Design of the Radial Line Stub: A Useful building thermography [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35: 663—667.
- [3] Syed A R, Nasser M N. Fusion of FLIR automatic target recognition algorithms [J]. *Information Fusion*, 2003, 4: 247—258.
- [4] Lincoln T, Eduardo Z. *Plant Physiology* [M]. Massachusetts: Sinauer Associates Publisher, 1998.
- [5] Mills A F. *Heat Transfer* [M]. Massachusetts: Irwin Publisher, 1992.
- [6] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, 34: 75—91.
- [7] Hopkins W G. *Introduction to Plant Physiology* [M]. New York: John Wiley Publisher, 1997.
- [8] Yunus A G. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* [M]. New York: McGraw-Hill Press, 1997.
- [9] Ri Quang Yi. *Infrared thermal measurement and remote sensing technique* [M]. Taiwan: Fu Han Publisher (依日光.红外线遥感测热法.台湾:复汉出版社), 1996.
- Microstrip Circuit Element [J]. *Microwave Journal*, 1985, 149—156.
- [7] Franco Giannini, Roberto Sorrentino, Jan Vrba. Planar circuit analysis of microstrip radial stub [J]. *IEEE MTT-S Digest*, 1984, 124—125.
- [8] SHEN Xiao-Fang, YAO Qi-Jun, LIN Zhen-Hui, et al. Measurement of the frequency spectrum of a submillimeter CW source by heterodyne mixing and direct detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (申小芳,姚骑均,林镇辉,等.用外差混频和直接检波方法测量亚毫米波连续波源的频谱. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 321—327.