

短波红外高光谱成像仪背景辐射特征研究

王跃明, 祝倩, 王建宇, 庄晓琼

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 空间主动光电技术与系统实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 文章指出背景辐射对短波红外高光谱成像仪辐射精度、信噪比是有影响的. 给出了色散型短波红外光谱仪的背景辐射定量计算模型, 分析了温度及温度变化与辐射精度的关系, 并通过实验数据进行了验证. 在背景辐射特征分析的基础上, 分析总结了小相对孔径冷屏、高精度温控、冷光学、经常性标定等几种减小背景辐射影响的措施. 本文的研究工作对于提高高光谱成像仪研制的量化水平具有参考价值.

关键词: 短波红外, 高光谱, 背景辐射, 辐射精度

中图分类号: TP706 **文献标识码:** A

Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager

WANG Yue-Ming, ZHU Qian, WANG Jian-Yu, ZHUANG Xiao-Qiong

(1. Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology and Systems, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is proved that the radiometric accuracy of short wave infrared (SWIR) hyperspectral imager and its signal-to-noise ratio could be affected by the background radiation. The quantified computing model of background radiation of dispersive SWIR hyperspectral imager is given. The relationship between the temperature and the radiometric accuracy is analyzed, which was demonstrated by experiments. Based on the analysis of the characteristics of background radiation, several methods of reducing the influence of background radiation were summarized, such as cold shield of small relative aperture, temperature controlling with high precision, cold optics, regular calibration and so on. The results in this paper is helpful to improve the quantification accuracy of hyperspectral imager.

Key words: SWIR, hyperspectral imager, background radiation, radiometric accuracy

PACS: 85.60.Gz

引言

经过近 20 年的发展, 高光谱成像技术正逐渐成为一种重要的光电遥感手段, 在环境、资源、海洋、大气等诸多应用领域^[1,2] 受到关注. 目前可见近红外谱段高光谱成像技术相对较为成熟, 短波红外谱段受半导体探测器技术和分光技术的发展制约, 应用相对较少. 在对地观测、行星探测、大气探测等领域的需求推动下, 近年国内加大了这方面的研究投入, 取得了一些进展^[3]. 本文结合作者所在研究小组近年从事的相关研究工作, 对应用于几种典型场合的短波红外高光谱成像仪的背景辐射影响因素进行分

析阐述.

1 系统信噪比影响因素

高光谱成像仪是一种图谱合一的光电仪器, 能够同时获取目标的光谱信息和空间几何信息. 系统信噪比是表征仪器辐射灵敏度的重要指标, 影响仪器系统信噪比的因素有很多, 例如仪器工作条件(太阳高度角 α , 目标光谱反照率 $\rho(\lambda)$)、仪器设计参数(相对孔径 (D/f) 、光学效率 $(\tau_o(\lambda))$ 、积分时间 (τ_{int}) 、探测器像元面积 (d^2) 、探测器量子效率 $(\eta(\lambda))$)、仪器噪声(目标信号光子噪声 $No(\lambda)$, 背景噪声 $Nb(\lambda)$, 电路随机干扰噪声 Nc)等.

通常情况下,仪器实际采集到的信号可以用光电转换后的电子数来表示,如式(1)所示.

$$S_{object}(\lambda_n) = \int_{\lambda_n - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_n + \frac{\Delta\lambda}{2}} L_{solar}(\lambda) \cdot \frac{d^2}{4F^2} \cdot \sin\alpha \cdot \rho(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot T_{int} \cdot \eta(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot d\lambda \quad (1)$$

其中 $L_{solar}(\lambda)$ 为目标表面的太阳光谱辐照度; F 为仪器的相对孔径; h 为普朗克常数; c 为光速; λ_n 为对应波段的中心波长; $\Delta\lambda$ 为仪器光谱采样间隔; 其它参数如前所述.

系统噪声用电子数可以表示为:

$$N_{sys}(\lambda) = \sqrt{N_0(\lambda_n)^2 + N_c(\lambda_n)^2 + N_c^2} = \sqrt{S_{object}(\lambda_n) + S_{background} + N_c^2} \quad (2)$$

其中 $S_{background}$ 为目标自身辐射、仪器光机结构辐射、探测器暗电流贡献的信号电子数, 表现为图像的背景电平, 通常可以近似为直流信号. 但当目标温度、仪器光机结构温度、探测器工作温度发生变化时, 该背景电平也会发生漂移.

背景信号电子数 $S_{background}$ 的计算可以利用经典的普朗克黑体辐射公式进行. 下一节会有详细的计算数据.

当仪器工作条件、系统光学参数、探测器选用方案确定后, 系统信噪比主要受背景噪声、电路噪声决定. 以当前的探测器技术水平和电路设计能力, 实现相对小的电路噪声是不困难的. 通常情况下, 高光谱成像仪的噪声以光子噪声和背景噪声为主.

当背景噪声、电路噪声远远小于光子噪声时, 我们称仪器信噪比水平达到了光子噪声限或探测器噪声限; 当系统噪声以背景噪声为主时, 我们称系统为背景噪声限系统.

2 背景辐射特征分析

高光谱成像仪系统通常由望远镜、狭缝、分光光谱仪、探测器组件等组成. 短波红外高光谱成像仪中的探测器在信息获取过程中, 除了收集到地物目标的太阳反射光谱信息外, 还收集到地物目标的辐射、大气辐射、仪器光机结构辐射. 相比较而言, 仪器光机结构辐射的形成最为复杂, 与仪器构型密切相关.

2.1 目标背景热辐射

由于地物目标自身的温度较低(沙漠地区夏季最高温度约 80°C), 其自身辐射相对太阳光照可忽略, 图 1 给出了不同温度黑体光谱辐亮度与太阳光

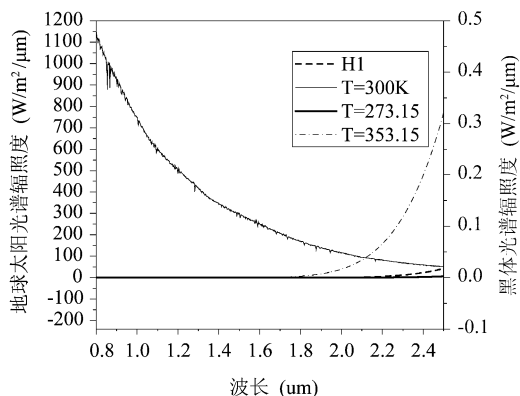


图 1 地物目标发射光谱与自身辐射光谱对比
Fig. 1 Comparison of reflectance and emission of the earth

谱辐照度的对比. 典型的 $2.5\mu\text{m}$ 波长处, 0°C 、 25°C 、 80°C 的黑体光谱辐亮度分别是地球表面太阳光谱辐照度的 0.0053% 、 0.035% 、 0.62% . 因此, 综合来看, 地物自身辐射是可以忽略不计的. 但如果仪器工作在光照条件较弱的场合, 这方面因素则不得考虑, 例如月球探测过程中, 月面最高温度 127°C 时, $2.5\mu\text{m}$ 波长处的自身辐射已占太阳光谱辐照度的 4.2% , 考虑太阳高度角因素和目标反照率因素, 实际影响还要大.

由于在短波红外谱段, 地球大气仅有少数几个吸收峰, 并且大气温度相对地面较低, 因此大气的辐射对于高光谱成像仪信号接收的影响是可以忽略不计的, 但大气的吸收影响还是比较显著的.

2.2 光机结构背景热辐射

仪器自身的光机结构辐射对于系统辐射灵敏度的影响究竟有多显著, 下面根据高光谱成像仪的结构特点来分析. 如图 2 所示, 高光谱成像仪光机结构通常由光学镜片、狭缝、分光元件(通常为光栅或棱镜)、探测器组件、支撑结构等组成. 不难看出, 探测器除了接收到瞬时视场内的目标信号外, 还会接收到光机结构、光学元件、探测器杜瓦外壳的自身热辐射. 由于光学元件具有较高的反射率, 因此其贡献的自身辐射是可以忽略不计的. 为了减小冷损, 杜瓦腔体的内表面通常也都经过抛光处理, 具有较低的发射率. 狭缝安装在望远镜的焦面上, 作为系统的光阑. 望远镜的结构背景辐射通过狭缝进入光谱仪后, 正好能够被光谱仪的结构吸收. 因此仪器光机结构的背景辐射主要来自光谱仪内部.

为简化分析, 假设地物目标与仪器结构均为 300K 的理想黑体. 那么高光谱成像仪的狭缝组件实际可以等效为黑体发射面和线发散光束(相对孔径

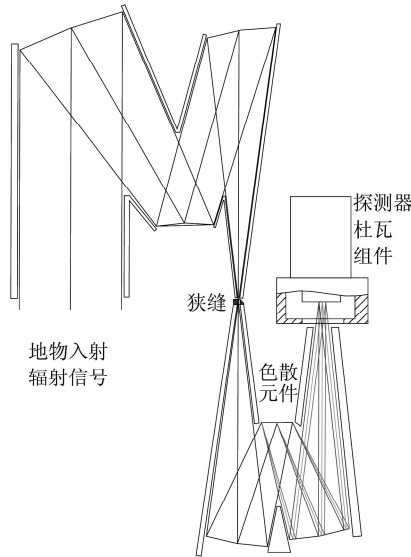


图2 典型高光谱成像仪光机结构示意图
Fig.2 Optomechanical Architecture of hyperspectral imager

与望远镜匹配)的叠加。

由于光谱仪是一个2次成像系统,其狭缝组件与探测器焦面构成物像关系,光谱仪背景辐射可以简化为杜瓦窗口内壁的热辐射与探测器杜瓦窗口孔径立体角对应的黑体辐射,如图3所示.下面分别建模分析。

根据图3模型,杜瓦内壁的辐射光子流密度可以用式(3)表达:

$$R_{dewar} = \varepsilon_{dewar} \int_0^{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2c/\lambda^4}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \left[\int_r^R \frac{d^2 h^2}{(x^2 + h^2)^2} x dx + \int_0^h \frac{d^2 h^2}{(x^2 + h^2)^2} dx \right] d\lambda d\alpha \quad (3)$$

其中 ε_{dewar} 为杜瓦内壁的表面发射率, R_{dewar} 为探测器

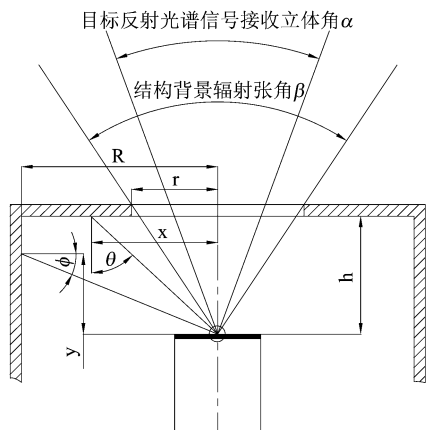


图3 仪器背景辐射简化示意图
Fig.3 Simplified schematic of instrument's background

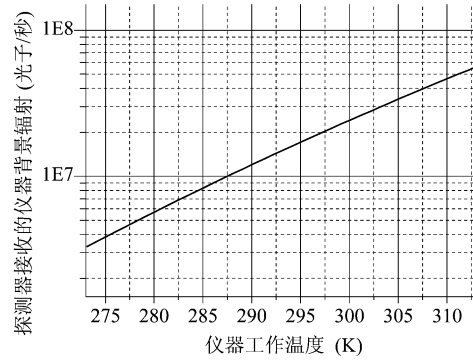


图4 结构背景辐射光子流密度随温度变化趋势
Fig.4 Background at different temperature

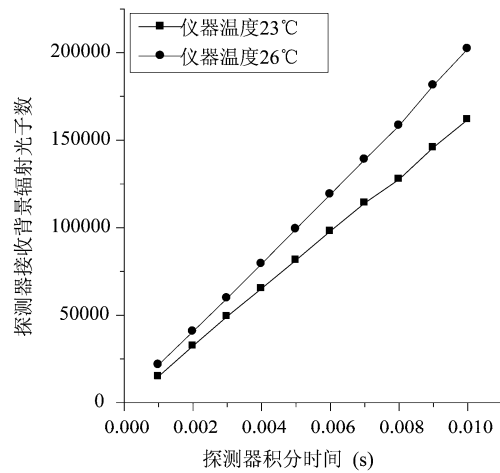


图5 短波光谱仪背景辐射信号试验数据
Fig.5 Background radiation of a prism-based spectrometer

接收到的杜瓦内壁的辐射光子流密度(个/秒)。

结构背景辐射光子流密度可以用式(4)表达:

$$R_{结构} = \varepsilon_{结构} \int_0^{2\pi} \int_0^r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2c/\lambda^4}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \frac{d^2 h^2}{(x^2 + h^2)^2} x d\lambda dx d\alpha \quad (4)$$

已知某短波红外碲镉汞焦平面斯特林制冷组件的相关参数如下:

光谱响应范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$: $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$; 量子效率约为 60%; $\varepsilon_{dewar} = 0.1$; $\varepsilon_{结构} = 0.9$; $r = 9.6 \text{mm}$; $h = 3 \text{mm}$; $R = 15 \text{mm}$; 根据这些参数可以计算出结构背景辐射光子流密度与结构温度之间的关系,如图4所示。

为了验证分析的正确性,课题组利用一石英棱镜分光的光谱仪进行了背景辐射测试,测试结果表明,在仪器温度为 23°C (296K) 时,仪器背景辐射的光子流密度为 1.6×10^7 光子/秒; 在仪器温度为 26°C (299K) 时,仪器背景辐射的光子流密度为 2.0×10^7 光子/秒,可以认为测试结果与理论分析基本是相符的。

表 1 短波红外光谱仪背景辐射测量结果
Table 1 Background of SWIR spectrometer at 23°C and 26°C

探测器积分时间 (s)	探测器采集的背景辐射光子数	
	仪器温度 23°C	仪器温度 26°C
0.001	14943	21611
0.002	32349	40684
0.003	49247	59604
0.004	65241	79338
0.005	81390	99279
0.006	97977	119037
0.007	114141	138922
0.008	127691	158331
0.009	145816	181354
0.01	161723	202090

背景辐射对系统信息获取过程的影响主要表现为两个方面:背景辐射噪声和系统动态范围的漂移(由于结构温度的漂移).下一节主要阐述系统设计中背景辐射影响的考虑及相关措施.

3 减小背景辐射影响的技术途径

根据上节分析计算,常温 20°C 时,结构背景辐射约为 1.5×10^7 光子/秒.在 20°C 时,背景辐射随温度的变化约为 1×10^6 光子/秒·°C.下面分析在几种典型系统设计过程中,如何采取措施减小背景辐射对仪器辐射精度的影响.

高光谱成像仪根据探测目标特点大致可以分为对地观测、大气、深空探测 3 大类,这 3 类仪器的特点分别是:对地观测型高光谱成像仪主要用于资源、环境、农林等,仪器光谱采样间隔通常在 5 ~ 10nm,空间分辨率 5 ~ 30m,目标信号较强,例如美国 EO-1 卫星 Hyperion 仪器等;大气类高光谱成像仪探测的目标信号通常都很弱,光谱分辨率优于 0.1nm;目前的深空探测以火星和月球探测为主,火星到太阳的距离是地球的 1.52 倍,其外层空间的太阳常数是地球的 43%,火星月球等深空目标还具有表面平均反照率低的特点,例如月球表面平均反照率 0.09,火卫二的平均反照率仅为 0.07,深空探测中的高光谱成像仪目标信号也较弱.

对地观测类高光谱成像仪的目标信号光子流密度一般在 1.0×10^6 光子/秒量级.减小结构背景辐射的影响,可以通过小相对孔径冷屏设计、高精度的温度控制和经常性标定 3 种手段.结构背景辐射与光学系统相对孔径的平方成反比,小相对孔径冷屏设计可以降低结构背景辐射.但是对于带狭缝的色散型高光谱成像仪来说,冷屏只能抑制光谱仪支撑

结构的背景辐射,狭缝组件的背景辐射必须通过高精度的温度控制来减小其涨落对辐射精度与动态范围的影响;经常性标定是进一步修正背景辐射引起的辐射精度误差的手段.例如 EO-1 卫星的 Hyperion 仪器通过采取这 3 个手段,实现了很好的辐射精度和定量化水平^[5].

大气探测类高光谱成像仪则大大不同,由于光谱分辨率很高,探测器接收的信号很弱,因此通常采用增加积分时间的方法来保证系统的信噪比.在积分的过程中,背景辐射同时被探测器接收采集,因此背景辐射对辐射精度的影响就十分显著.对地观测的高光谱成像仪光谱分辨率 $R(\lambda/\Delta\lambda)$ 通常为 1/100,即 10nm 左右的分辨率,而大气探测则要求优于 1/10000 的光谱分辨率,这意味着其有效信号不到陆地探测的 1/100.在这种情况下,仅靠上面的三种方法是不够的,因为如果让光谱仪在 20°C 条件下工作,温控精度的要求达到 $\pm 0.01^\circ\text{C}$,这在工程上几乎不可能实现.解决问题的方法是将光谱仪的工作温度降下来,即所谓的冷光学措施.根据第 2 节的分析,当温度降低后,仪器光机结构的背景辐射大幅减小,因此温度的变化引起的背景辐射涨落也大大减小,从而降低了对控温精度的要求.例如,美国 OCO 卫星的大气探测高光谱成像仪在 $1.61\mu\text{m}$ 谱段光谱采样间隔为 0.076nm,其平均光子流密度约为 1.5×10^5 光子/秒.为了保证探测精度,该仪器就采取了冷光学的技术思路^[6].

高光谱成像仪还可以应用于地外行星或其它星体的科学探索领域.对于一些行星/卫星着陆器载的高光谱成像仪,则要关注仪器工作温度变化引起的辐射精度下降.由于热控难度大和目标自身温度变化范围大,实现定量化探测的难度很大.必须采取温度控制和实时背景标定相结合的办法.温度控制系统将仪器的温度尽可能控制在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 左右的范围内,避免背景辐射变化范围太大.实时背景标定的前提是,在短时间内,温控系统可以将仪器的温度水平控制在足够的范围内,在信号处理时将标定的背景电平减掉,获取目标的有效光谱信号.例如,基于 AOTF 的高光谱成像仪比较适合于近场在位高光谱探测,是深空探测着陆器载高光谱成像仪经常采用的技术方案.但由于 AOTF 的相对孔径较小,深空目标反照率低等原因,导致 AOTF 高光谱成像仪获取的有效光信号较弱,需要通过长时间积分来获得较高的信噪比,此时结构背景辐射的影响十分显著.在这种情况下,通过实时背景标定和探测器多次积分

叠加,仍能获得满足要求辐射精度。

4 结论

由于短波红外高光谱成像仪探测的目标信号主要是太阳反射光谱,长期以来,仪器自身的背景辐射经常被忽视。通过本文的分析研究,认为背景辐射对短波红外高光谱成像仪的辐射精度有显著影响,主要表现为动态范围的漂移和背景噪声。其影响程度取决于仪器工作环境与目标信号的强弱,因此改进方案也需要根据应用场合来确定。主要通过小相对孔径冷屏、高精度温控、冷光学和经常性标定等手段。本文的研究工作对提高高光谱成像仪研制的量化水平具有重要的参考价值。

REFERENCES

- [1] SUN De-Yong, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Study on remote sensing estimation of suspended matter concentrations based on in situ hyperspectral data in lake taiwaters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙德勇, 李云梅, 王桥,

等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2):124—128.

- [2] SHEN Yuan-Ting, NI Guo-Qiang, XU Da-Qi, *et al.* Study on gas exploration by hyperion hyperspectral remote sensing data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈渊婷, 倪国强, 徐大琦, 等. 利用 Hyperion 短波红外高光谱数据勘探天然气的研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3):210—213.
- [3] TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping, WAN Yu-Qing, *et al.* Remote sensing monitoring method of hyperspectral and high resolution for underground coal bed combustion [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谭克龙, 周日平, 万余庆, 等. 地下煤层燃烧的高光谱及高分辨率遥感监测方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(5):349—352.
- [4] MA Yan-Hua, JING Zhong-Liang, WANG Jian-Yu, *et al.* Radiation matching technology for wide-view hyperspectral imager based on field-dividin [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马艳华, 敬忠良, 王建宇, 等. 基于视场分割方式的宽视场高光谱成像系统的辐射匹配技术. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6):457—460.
- [5] Hugh H Kieffer, Thomas C Stone, *et al.* On-orbit radiometric calibration over time and between spacecraft using the Moon [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4881**:287—298.
- [6] Livermore T R, Crisp D. The NASA Orbiting Carbon Observatory Mission [J]. *Aerospace Conference*, 2008:1—6.

(上接 223 页)

几种结构可以产生包含两个频率成份的 THz 波,也可以将目标函数确定为含有多个频率成份,具有任意强度相对值的 THz 波谱,利用模拟退火算法仍然可以得到相应的晶体畴结构的理想模型。

REFERENCES

- [1] Hu B B, Darrow J T, Zhang X C, *et al.* Optically steerable photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1990, **56**(10):886.
- [2] You D, Jones R R, Bucksbaum P H, *et al.* Generation of high-power sub-single-cycle 500-fs electromagnetic pulses [J]. *Opt. Lett*, 1993, **18**(4):290.
- [3] Huber R, Brodschelm A, Tausser F, *et al.* Generation and field-resolved detection of femtosecond electromagnetic pulses tunable up to 41 THz [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000, **76**(22):3191.
- [4] Hebling J, Stepanov A G, Almási G, *et al.* Tunable THz pulse generation by optical rectification of ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(10):593.
- [5] Shikata J, Sato M, Taniuchi T, *et al.* Enhancement of terahertz-wave output from LiNbO₃ optical parametric oscillators by cryogenic cooling [J]. *Opt. Lett*, 1999, **24**(4):202.
- [6] Ding Y J, Khurgin J B. A new scheme for efficient generation of coherent and incoherent submillimeter to THz waves

in periodically-poled lithium niobate [J]. *Opt. Commun*, 1998, **148**(1-3):105.

- [7] Chamberlain J M, Miles R E. *New Directions in Terahertz Technology*, 1997 [C]. Berlin: Springer, 1997.
- [8] Knoesel E, Bonn M, Shan J, *et al.* Charge transport and carrier dynamics in liquids probed by THz time-domain spectroscopy [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2001, **86**(2):340.
- [9] Yun-Shik Lee, Meade T, Perlin V, *et al.* Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000, **76**(18):2505.
- [10] Weiss C, Torosyan G, Avetisyan Y, *et al.* Generation of tunable narrow-band surface-emitted terahertz radiation in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett*, 2001, **26**(8):563.
- [11] Yun-Shik Lee, Theodore B Norris. Terahertz pulse shaping and optimal waveform generation in poled ferroelectric crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(11):2791.
- [12] LIU Xin-hai, WU Jian, DUAN Wen-hui, *et al.* Generation of narrow-band terahertz radiation with preset frequency components in poled ferroelectric materials [J]. *J. Appl. Phys*, 2005, **97**(11):114108.
- [13] QIN Yi-qiang, GUO Hong-chen, TANG Sing-hai. Theoretic considerations for multi-mode terahertz generations in multi-periodically poled dielectric material [J]. *J. Phys. : Condens. Matter*, 2006, **18**(5):1613.