

文章编号: 1672-8785(2011)03-0004-06

静止卫星闪电测绘仪设计特点研讨

韩心志

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 自然闪电是一种全球现象。静止闪电测绘仪探测涉及全球范围内自然闪电发生的时间、地点和强度分布。这一飞行任务的功能和性能与其他对地光学遥感器有很大差别, 因此仪器的设计必须完全建立在新的理论和技术基础上。分析自然闪电的光谱特性、时间特性和空间特性, 了解空间探测闪电环境, 以及研究自然闪电和其探测环境间的相互作用, 对这种仪器的设计优化至关重要。为此, 研讨了静止闪电测绘仪的设计特点, 包括闪电信号的最大化、强背景减除和星上数据处理等。

关键词: 静止卫星; 闪电测绘仪; 多重滤波; 背景减除

中图分类号: V443+.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.03.002

Discussion on Design Features of Lightning Mapper for Geostationary Satellite

HAN Xin-zhi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Natural lightning is a global phenomenon. If a lightning mapper is onboard a geostationary satellite, it can be used to detect the location, time and strength of the lightning in a global area. Because the function and performance of such a mission are greatly different from those of other optical sensors for earth observation, its instrument should be designed on the basis of new theory and technology. The analysis of the spectral, temporal and spacial characteristics of natural lightning, the understanding of space lightning detection environment and the research on the interaction between natural lightning and its environment are very important for the design optimization of the instrument. For this reason, the design features of a lightning mapper for a geostationary satellite, including signal maximization, background subtraction and onboard data processing, are discussed.

Key words: geostationary satellite; lightning mapper; multiple-filter; background subtraction

1 引言

在地球观测系统(EOS)中, 闪电测量具有重要价值。闪电是一种全球现象, 可用作衡量全球变化中某些可变因数的尺度。闪电特性与许多气候区域产生强降雨的雷暴有关, 因而可提供更多有关局地、区域和全球陆地与海洋上空雷暴的分布、结构和可变性的信息。

由诸如热带太平洋内 ENSO 和逆-ENSO 等事件自然引发的气候变化伴随有大气远距离联系, 它们经常导致风暴路径、降雨模式和云覆盖在频度和移动上发生显著变化。这些气候变化也会使北半球和南北球的闪电活性发生变化。闪电经常会引起林火。倍增的 CO₂ (即全球变暖) 气候仿真显示, 全球的闪电频率会有 25% 的增加^[1]。

收稿日期: 2010-12-04

作者简介: 韩心志 (1935-), 男, 安徽宿城人, 教授, 主要从事航天光学遥感器理论研究与设计实践。E-mail: hanxinzhil85986@126.com

雷暴是中尺度,特别是中- γ 尺度天气系统的特征。云和降水性中尺度系统代表全球最重要和最具有科学意义的天气系统。此类系统会产生突发性暴雨、下击暴流和龙卷等强风、冰雹、雷电和严重雪暴等强烈天气现象。由于系统的尺度太小,常规的气象观测和数值预报模式难以将它们适当地分辨出来。中- γ 尺度系统的水平尺度为 2km ~ 20km,时间尺度仅为半小时至数小时量级^[2]。

全球气候变化问题已引起世界各国政府和人民的高度重视。静止卫星闪电测量凭借其大面积覆盖、局地性和实时性天气变化预报的特点以及监测风暴演变和追踪其过程的能力,不仅可为居民中心提供强风暴灾害性天气预警,为航空、航海和发射场提供风暴回避信息,为森林防火提供远区潜在森林火警等具有重大价值的信息,而且还可在全球闪电和降雨量、热带对流和海表温度、全球电系统和闪电气象学以及大气化学过程等有关全球变化的研究方面发挥非常突出的作用^[1,2]。

2 自然闪电探测的特点和空间探测环境

2.1 闪电探测的特点

2.1.1 闪电的光谱特征

闪电产生于强对流云或云系中。当温暖、潮湿的空气通过云层迅速上升时,形成雨滴和冰,冰的运动导致摩擦起电。电能的骤然释放伴生闪电,对闪电通道周围迅速加热,产生冲击波和电磁辐射。冲击波迅速衰变为声波,即雷声;电磁辐射的范围从超低频无线电波到 X-射线。最强的辐射区之一是光学波长,峰值功率一般介于 100mW 到 1000mW 之间。这些光学辐射源于大气组元的离解、激励和随之复合,它们是在闪电通道骤然加热后形成的。由于加热是非常强烈(电子温度 > 20,000K),这些光学辐射主要以离散的原子谱线出现,仅在较短的波长处有些连续。美国航空航天局 U2 飞机的测量表明,云顶光谱中最强的辐射特征是由近红外区的中性氧和中性氮谱线产生的。例如, 777.4nm 处的

OI(1) 多重线和 868.3nm 处的 NI(1) 多重线始终为强特征谱线^[1]。

因此,闪电探测的第一个特点是特征光谱线探测,其识别谱线分别为 OI(1) 多重线和 NI(1) 多重线。

图 1 所示为闪电光谱,表明了来自闪电的光学辐射和其特征谱线在太阳光谱中的位置^[3]。

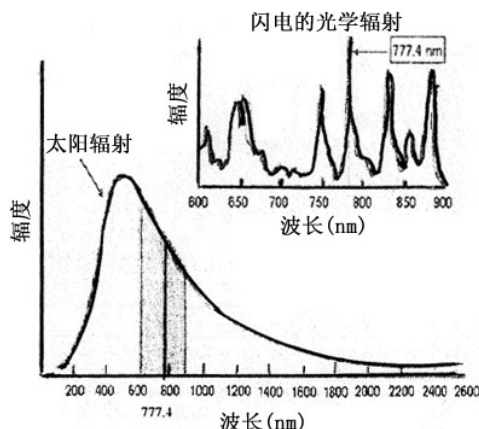


图 1 闪电光谱

2.1.2 闪电的时间特征

光学闪电信号由一系列上升时间较快的短持续期脉冲组成,与云内发生的能量释放的过程相关。

图 2 所示为闪电脉冲的瞬时变化^[3]。

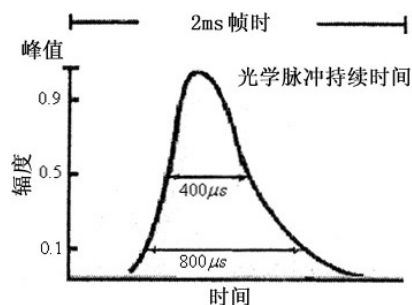


图 2 闪电脉冲的持续时间

这样,闪电探测的第二个特点是探测瞬变的目标信号。

2.2 闪电的空间探测环境

从空间探测闪电就是在云上进行观测,所观测的闪电的背景是反射阳光的云层。下面以 777.4nm 的闪电特征谱线为例,计算背景的背景强度。

如图 1 所示,在很窄的波段内,利用插入法求得:

$$\lambda = 0.7774\mu\text{m}, \quad E_{\lambda}(\lambda) = 1165.26\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

表 1 太阳光谱辐照度^[4]

波长 $\lambda(\mu\text{m})$	太阳光谱辐照度 $E_{\lambda}(\lambda)(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$
0.770	1185.0
0.780	1159.0

云背景的辐亮度为

$$I_B = \frac{\rho(\lambda)E_{\lambda}(\lambda)}{\pi} \quad (1)$$

式中, $\rho(\lambda)$ 为云层漫反射系数。设亮(典型的雷暴云漫反射系数为 0.9)的各向同性散射云场被垂直太阳入射照明($\cong 1200\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 于 777.4nm 处), 对阳光吸收效应作稍许修正, 云层的最大辐亮度达 $331.0\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ^[5], 与按式(1)计算的值($333.8\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)相符。

考虑到还包含夜间探测, 闪电探测的背景辐亮度动态范围为 $0.0\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1} \sim 331.0\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

基于硬件支持力度, 选用 1.0nm 带宽的超窄带滤光镜探测闪电的特征谱线, 则其最大有效背景辐亮度为 $331.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m} = 331.0\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

另一方面, 云在显著改变云顶光学信号的特性的同时, 不会屏蔽这些辐射。云表现得像一个守恒散射器, 即大部分光学能量会透过云层逸出。测量表明, 90% 的闪电脉冲具有 $4.7\mu\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 或更大一点的峰值辐射能密度^[1]。此值被选为仪器的最小可探测信号。

按图 2 所示的 400 μs 闪电脉冲持续时间计算, 闪电的辐亮度为 $11.75\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

背景辐亮度是闪电辐亮度的 28 倍以上。

可以看出, 即使使用 1.0nm 带宽的超窄带光谱滤光镜极大地削弱了阳光背景辐亮度, 在极大背景和最小可探测信号的最不利条件下, 背景的辐亮度也远远超过闪电信号。

按美国航空航天局 U2 给出的数据, 对于闪电强度即最大积分辐亮度 / 事件, 所观测的最大值为 $100.0\mu\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 低于此强度的事件

百分数达 98.4%^[6]。相应地, 其最大辐亮度为 $250\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$, 动态范围为 $(4.7 \sim 250)\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

和背景比较后可以看出, 白天从空间探测闪电, 在一定条件下是从反射阳光的强背景云中检测弱闪电信号。这是闪电探测的第三个特点。

以上三个从空间探测闪电的特点, 使其和已往的对地光学遥感探测产生重大区别。这种区别导致闪电探测必须采用全新的方法和技术。

3 静止闪电测绘仪设计特点

基于上述原因, 静止闪电测绘仪应是单通道、近红外光学闪电遥感器。作为 3 轴稳定静止气象卫星系统的一部分, 它可以在地球全圆盘范围内连续测量总闪电活性。

闪电测绘仪的输出数据是自然闪电发生的地点、时间和强度, 依此可绘制出闪电的地理分布图、时间分布图和强度分布图, 使人们能从各角度全方位了解闪电, 为国民经济和科学研究提供服务, 并积累长期数据, 追踪闪电活性的十年变化^[3]。

为此, 闪电测绘仪的设计具有和其他对地光学遥感器不同的 3 大特点。即

- 最大化待测信号
- 背景减除
- 实时事件处理

3.1 最大化待测信号

根据被观测目标的特性确定设计诸元是光学遥感器的设计准则; 但最大化被测信号却是闪电探测仪器的特点。

闪电测绘仪使用大面阵 CCD 作为辐射探测器。由于白天闪电信号隐于强背景中, 在一帧时间内由一个像元积累的光电子数 N 可表达为

$$N = N_B + N_L + N_r \quad (2)$$

式中, N_B 为由背景产生的光电子数, N_L 为由闪电信号产生的光电子数, N_r 为由电子噪声产生的光电子数。

在式(2)中, 只有 N_L 是所要求的有效待测信号, 所有其余的各项均为不希望有的信号, 被视为噪声。

在确定闪电测绘仪设计诸元时, 一个重要的原则是提高 N_L 在总信号 N 中的权重, 即闪电信号的最大化。

3.1.1 仪器的光谱特性确定

(1) 中心波长 λ_c

从图 1 中可以看出, 在闪电辐射的两个最强谱线中, 虽然 777.4nm 谱线在阳光中的位置会造成较强的背景 (此缺点可在背景减除后削减), 但在闪电信号中较 868.3nm 谱线强。此外, 在近红外区使用的 CCD 阵列中, 前者的量子效率也高^[6]。因此, 一般确定 777.4nm 作为中心波长。

(2) 波段宽度

O(1) 多重线有近似等强度的 3 条线, 分别在 777.198nm、777.418nm 和 777.540nm 处。

用超窄带滤光镜分离出这 3 条线并阻断其他辐射后实现的闪电特征探测, 称为光谱滤波。但过窄的滤光镜通带不仅难于获得, 而且还会因各种原因造成的滤光镜通带中心波长漂移和带宽变化而损害其探测能力^[6,7]。

综合以上考虑, 一般确定滤光镜的通带带宽 $\Delta\lambda = 1.0\text{nm}$ 。

3.1.2 时间特性确定

按图 2, 选定闪电测绘仪的帧时, 使帧时 T_i 和闪电脉冲持续期 T_L 相同, 可消减闪电之外的背景能量。这种方法称为闪电探测的时间滤波。

下列因素会影响这一选择^[6]:

因为闪电发生的时间相对于帧取样时间是随机的, 过短的帧时会增大一个闪击在时间上分裂到两帧之间的几率, 从而降低闪电探测的能力。

此影响可用闪击时间分裂因子 ξ 来表示:

$$\xi = \left(1 - \frac{T_L}{3T_i}\right), \quad T_i \geq T_L \quad (3)$$

式 (3) 表示, 对确定的 T_L 选择的帧时 T_i 增大, 闪电脉冲分裂所造成的能量损失减小, ξ 值增加。

另一方面, 如图 3 所示, 当 $T_i = T_L$ 时, 信噪比 (SNR) 最大。 T_i 的进一步增大会导致 SNR

过低。但自然闪电的 T_L 值不是定值, T_L 的变化会因 SNR 过低而导致闪电脉冲探测率发生显著变化。为了减小事件脉冲宽度变化时 SNR 的大变化, 须折衷选择 T_i/T_L 的值。

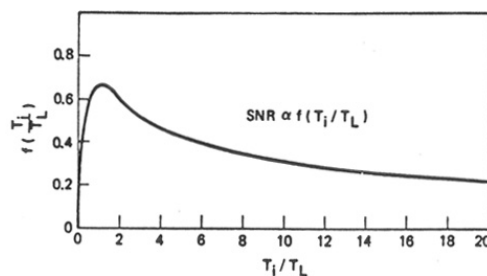


图 3 时间因子对 SNR 的影响

而且, 如果 T_i 选择得太小, 会导致帧速率过大, 因而必须选用高速 CCD 阵列和高速读出电路, 这势必会造成仪器研制难度过大。

综上所述, 确定帧时 $T_i = 2\text{ms}$, 即 500 帧/s 的帧速率。

3.1.3 仪器空间特性确定

当闪电测绘仪从空间探测闪电时, 使该仪器的地面像元尺寸恰被一个风暴单体充满, 这种方法称为空间滤波。

被闪电闪光照明的云顶区域取决于云内发生闪光的地方, 闪光的几何和物理外延以及扩张闪电通道和散射辐射的云的特性。人们用 Monte Carlo 法对光学闪电信号辐射传递进行的仿真和美国航空航天局用 U2 飞机进行的研究表明, 与单个风暴单元相关的云顶照明直径一般为 10km 量级。

航天飞机对大风暴系统的观测表明, 被照明的区域可超过 60km^[1]。

类似地, 这里所述的理想空间滤波也存在下列问题。

(1) 自然闪电源的空间尺寸也并非固定不变的。在世界各地, 50% 的源尺寸处在小于 0.1km 到 25km 的范围内, 其中大部分又落在 2km 到 10km 的范围中^[6]。

美国的静止闪电测绘仪的星下点地面采样距离取为 10km(阈值), 目标为 0.5km^[3]。

可见像元尺寸 A_B 和闪电源尺寸 A_S 相等的空间滤波, 仅对于典型的源尺寸和星下点采样是可能的。实际的闪电源尺寸变化和由于地球表面曲率造成的偏离星下点的像元变形和增大, 会对闪电探测产生明显的影响。

(2) 在闪电测绘仪探测时, 事件的中心可能随机地落到具有敏感像元面的任何地方。即使事件的面积小于在源处像元的面积, 仍然会存在事件跨立于两个或更多个像元边界间的几率。

表示此像元空间分裂影响的术语为几何分裂因子 v 。显然, v 是填充因子 (A_B/A_S) 和闪电所在地理纬度的函数^[6]。

3.2 背景减除

使闪电信号最大化, 可提高闪电信号在总信号中的比重, 但存在两个不足:

(1) 由于闪电信号隐于其背景中, 无论何种滤波, 均不能滤掉隐藏其中的背景, 即使滤光镜的通带窄到仅包含三条氧线, $T_i = T_L$ 和 $A_B = A_S$ 。

(2) 尽管可尽量使仪器的设计诸元与自然闪电的特性参数达到最佳耦合, 但很多因素依然会削减对背景抑制的能力。例如, 放宽滤光镜的通带宽度, 令 $T_i > T_L$, 以及偏离星下点的 A_B 增大和探测尺寸较 A_B 小的闪电等。

由此, 虽然使用了上述三种“滤波”方案, 背景照度对闪电信号的比, 在焦面处仍经常超过 100:1, 因而必须应用第 4 种技术, 即改进的帧-帧背景减除, 从离开测绘仪焦平面的原始数据中除去缓慢变化的背景信号。

图 4 所示为利用连续平均法减除背景的框图^[6]。

背景减除电路的作用是从背景中离解出闪电信号。

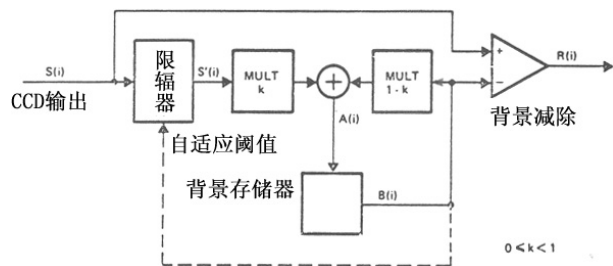


图 4 用连续平均法的背景减除框图

将来自焦平面 CCD 的一路输出按由式 (2) 获得的总信号 N 输入背景减除放大器, 同时将另一路输出输入背景测量电路, 并把测得的结果输入同一减除放大器。两路信号在放大器中相减得出:

$$(N - \mu) > T \quad (4)$$

式中, N 是像元按式 (2) 在积分时间内积累的离焦平面总信号; μ 是背景信号, 其中包括了式 (2) 中的 N_B 和 N_r ; T 是触发减除后处理系统所要求的光电子数。

满足式 (4) 的结果被认定为一闪电事件, 并在其后电路中被贴上时间和地址标签, 再经格式化后被发送到地面。

在式 (2) 中不含 N_L 而仍能满足式 (4) 者即为虚警, 这是由系统内部的强噪声或其他原因引起的。例如, 地面高反射目标所造成的阳光闪烁。

闪电测绘仪必须处理焦平面众多端口可能以高达每秒约 300M 像元的速率产生的数据, 以产生包括位置和强度的事件记录, 而闪电事件仅以 10 事件/s 的平均速率发生, 最大速率为 1000 事件/s。高速数据处理必须在保持高灵敏度和低虚警速率 (例如, 小于 10%) 的条件下实施。这样, 事件数据必须在星上处理, 只下传已确定的闪电的数据。这样便可以大幅度地减少下传数据, 减轻地面处理的压力, 并可向卫星接口提供如 64kbps 大小的数据流。此即闪电测绘仪设计的第三个特点。

4 结束语

静止闪电测绘仪是一种新型的对地光学遥感器。被探测目标的特性及其空间探测环境决定了这类仪器的设计特点。无论是目标探测原理和所要求使用的技术方案都与以往的对地观测仪器存在很大的差别。空间闪电探测是从强烈的背景中检出弱小信号的典型范例。被测信号的最大化、强背景的减除和星上数据处理构成了仪器设计的三大特点。研究被测目标的光谱特性、时间特性和空间特性, 深刻了解空间探

测环境, 以及建立目标和其探测环境间的互相作用关系, 对这种仪器的设计都是完全必要的。

参考文献

- [1] Hugh J Christian, Richard J Blakeslee, Steven J Goodman, et al. Marshall Space Flight Center, Marshall Space Flight Center, Alabama. NASA Technical Memorandum 4350, Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System [R]. National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program, 1992: 1–23.
- [2] W R Cotton, R A Anthes. 叶家东, 范蓓芬, 程麟生, 等译. **风暴云动力学** [M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [3] Effective Date: July 12, 2005, Responsible Organization: COES-R/Code 417, 417-R-GLMPORD-0057, Version 0.0, Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), GOES-R Series, Geostationary

Lightning Mapper (GLM), Performance and Operational Requirements Document (PORD) [R]. Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 2005, (12): 7–8.

- [4] William L Wolfe, George J Zissis. The Infrared Handbook [M]. Office of NaVal Research, Department of the Navy, Washington, DC, 1978: 3–35.
- [5] William J Koshak, Mike F Stewart, Hugh J Christian, et al. Laboratory Calibration of the Optical Transient Detector and the Lightning Imaging Sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, **17**(7): 905–915.
- [6] NASA CONTRACTOR REPORT, NASA CR-170909, LIGHTNING MAPPER SENSOR DESIGN STUDY [R]. Final Report, September 1983, Prepared for NASA-Marshall Space Flight Center, Marshall Space Flight Center, Alabama 35812, 1983: 42–139.
- [7] 龚祖同顾问, 李景镇主编. **光学手册** [M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1986.

(上接第 3 页)

本文从 FDTD 模拟出发, 通过改变尺寸参数来控制太赫兹的滤波频率。这一结构本身对于太赫兹波存在偏振调制效应。这种结构可根据尺寸进行滤波频率选择, 滤波范围从 2.5THz 到 20THz, 且均可以实现。该结构还可以向红外和微波区间延伸, 具有重要的应用意义。基于滤波频带较窄这一结果, 通过微加工技术在半导体基底上生长厚度为 $1\mu\text{m}$ 的金属十字结构, 也可以实现本文中所提到的滤波效果了。因此, 太赫兹成像系统可以使用这种结构作为滤波片来提高分辨率。

参考文献

- [1] N I Landy, C M Bingham, T Tyler, et al. Design, Theory, and Measurement of a Polarization-insensitive Absorber for Terahertz imaging [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12): 125104.
- [2] 葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用 [J]. **红外与毫米波学报**, 2010, **29**(1): 15–18.
- [3] E Pickwell, B E Cole, M B Johnston. Three-dimensional Carrier-dynamics Simulation of Terahertz Emission from Photoconductive Switches [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **71**(19): 195301.
- [4] 曹丙花, 张光新, 周泽魁. 基于太赫兹波时域光谱的纸页定量检测新方法 [J]. **红外与毫米波学报**, 2009, **28**(4): 241–245.

- [5] 刘丹, 吴胜伟, 马明旺, 等. 水和二氧六环水溶液的 THz 波段介电性质 [J]. **核技术**, 2010, **33**(9): 273–276.
- [6] 邓朝, 邢春飞, 吕默, 等. 连续太赫兹波远距离成像 [J]. **光学学报**, 2009, **29**(S1): 50–52.
- [7] A E Costley, K H Hursey, G F Neill, et al. Free-standing Fine-wire Grids: Their Manufacture, Performance, and Use at Millimeter and Submillimeter Wavelengths [J]. *OSA*, 1977, **67**(7): 979–981.
- [8] Melo A M, Kornberg M A, Kaufmann P, et al. Metal Mesh Resonant Filters for Terahertz Frequencies [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6064–6069.
- [9] H Yoshida, Y Ogawa, Y Kawai, et al. Terahertz Sensing Method for Protein Detection Using a Thin Metallic Mesh [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(25): 253901.
- [10] H T Chen, W J Padilla, J M O Zide, et al. A Metamaterial Solid-state Terahertz Phase Modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3): 148–151.
- [11] W L Chan, H T Chen, A J Taylor. A Spatial Light Modulator for Terahertz Beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(21): 213511.
- [12] Yong Ma, A Khalid, Timothy D Drysdale, et al. Direct Fabrication of Terahertz Optical Devices on Low-absorption Polymer Substrates [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1555–1557.
- [13] Yong Ma, Qin Chen, A Khalid, et al. Terahertz Dual-band Resonator on Silicon [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(4): 469–471.