

闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算*

黄富祥¹, 郭俊柏², 冯小虎¹

(1 国家卫星气象中心, 北京 100081)

(2 中国地质大学信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:在明确虚警率和探测率概念基础上,建立了虚警率和探测率与信噪比之间相互关系的定量模型,通过模拟计算给出信噪比对虚警率和探测率的影响.计算结果表明:要使虚警率控制在 10% 以内,信噪比应该达到 5.0 以上;要使探测率达到 90%,信噪比应该达到 5.2~5.7.

关键词:关键词:卫星闪电成像仪;探测率;虚警率;阈值;信噪比

中图分类号:V474

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)12-3116-5

0 引言

静止轨道卫星闪电成像仪,从静止轨道平台对视场覆盖范围内的各种闪电进行连续不间断的成像观测,被认为是闪电探测的最有效手段^[1].正在规划中的我国新一代地球静止轨道气象卫星风云四号,有效载荷包括闪电成像仪.目前全球已经发射上天的卫星闪电成像仪,是美国的低轨道卫星闪电成像仪 OTD 和 LIS.光学瞬闪探测仪(Optical Transient Detector,OTD),是全球第一个发射上天的卫星光学闪电成像仪,1995 年 4 月由 MicroLab-1 卫星携带上天,工作到 2000 年 3 月^[1-2].改进型的闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor,LIS),于 1997 年 11 月由 TRMM 卫星携带上天,至今仍在正常工作^[2-4].OTD 和 LIS 的星载实践表明,利用光学成像技术实现闪电卫星观测的可行性,为发展静止轨道卫星闪电成像仪进行了理论和技术上的准备.根据 NASA 的规划,美国静止卫星闪电成像仪(Geostationary Lightning Mapper, GLM),将在 2014 年前后由 GOES-R 卫星携带上天.风云四号卫星闪电成像仪是我国第一次研制的卫星闪电成像仪,跨越中间的技术准备环节,直接瞄准当今世界闪电探测的最前沿,在仪器研制和产品生成等诸多方面都面临着巨大挑战.尤其是目前全球还没有静止轨道卫星闪电成像仪发射上天的先例,许多理论和方法的探索,都必须依靠我国自己的力量自主创新研究^[5].

闪电成像仪的虚警率和探测率,是两个直接反映仪器研制质量和闪电探测能力的核心技术指标,

也是应用需求对仪器研制提出的关键指标.实际的虚警率和探测率,一般要在卫星发射后根据闪电成像仪一定时间的观测表现来评估.例如,根据发射后的观测评估,OTD 探测率大约为 50%^[1],LIS 探测率大约为 90%^[2-3].另外,在发射前的实验室定标和外场观测试验阶段,可以结合观测试验结果和理论分析,对闪电成像仪的探测率和虚警率进行结算,为保证仪器研制质量提供参考依据.

卫星闪电成像仪虚警率和探测率的理论检测和评估国内尚未见公开报道,国际上只有一些理论上的分析^[1,6-7].本文在参考国外技术报告基础上,建立卫星闪电成像仪信噪比与虚警率和探测率之间的定量关系模型,通过模拟计算,定量考察信噪比对虚警率和探测率的影响.

1 闪电成像仪的工作原理

卫星闪电成像仪采用光学成像方式,利用闪电信号在 777.4 nm 附近的特征谱线,采用窄带滤光片和凝视型 CCD 面阵成像系统作本体,通过捕捉上行背景辐射的瞬闪光学脉冲信号,从卫星平台上实现对覆盖区域内的各种闪电进行高速成像探测^[1-3].窄带滤光片带宽 1 nm,可以阻挡其它波长辐射,从而获得最大闪电信噪比.从结构上来说,闪电成像仪主要由光学系统、聚焦平面阵 CCD、实时事件处理器、格式编排器和电子控制等部分组成,闪电数据处理、提取和传输等过程与之相适应^[1].

卫星闪电探测的最大困难是白天闪电信号提取.太阳光照射在云顶被反射的亮度远远高于闪电产生的辐射强度,白天的闪电信号往往被高亮度背景所掩埋.为此,卫星闪电成像仪利用闪电信号和背景噪声在时间、空间和光谱特性上的差异,综合采用多种技术,增强闪电信号.首先,使用空间滤波,保证聚焦平面阵上各探测元件瞬时视场(IFOV)与一次

* 国家高技术研究发展计划(2009AA12Z150)和公益性气象行业专项(GYHY200806023)资助

Tel:010-68409175

Email:huangfx@cma.gov.cn

收稿日期:2009-04-14

修回日期:2009-06-15

闪击照亮的典型云顶面积相匹配,获得闪电及相应背景的最优采样;其次,使用光谱滤波,在闪电光谱范围内最强发射线(777.4 nm)上进行窄带干涉滤波,进一步加大闪电信号相对于背景的信号强度;第三,使用时间滤波,利用闪电脉冲持续时间与背景照射在生命史的差异,闪电脉冲持续时间一般在 400 μs 量级,而背景则可在秒时间尺度上保持不变,卫星闪电成像仪采用 2 ms 积分时间进行成像,最大程度地改进闪电信噪比;第四,实时事件处理器采用背景减光技术,从原始数据中剥离缓慢变化的背景信号,提取并传输发生闪电的那些像元数据,极大地缩减数据量,保证对闪电事件的高效率探测^[1]。

实时事件处理器是闪电成像仪的核心部件,具有背景估计、背景减光、阈值设置、闪电事件鉴别和提取等功能。从焦平面输出的包括背景噪声和闪电信号在内的数据,输送到实时事件处理器,通过背景估计计算和背景减光处理,从减光后的帧数据中判断并提取闪电信号,将闪电信号送往数据系统。阈值的设置直接关系到闪电信号的提取,正确设置并根据需要正确改变阈值是保证闪电信号提取的关键技术^[7-8]。在 CCD 面阵不同位置的探测单元需要设置不同的阈值,而随着卫星与太阳相对位置的改变,焦平面的阈值应该不断作出相应的改变。阈值大小必须适宜,过大或过小都会影响闪电探测。阈值设置过大,可降低虚警率,但同时也降低了闪电探测率;反之,阈值设置过小,可提高闪电信号探测率,但同时也提高了虚警率。

2 基本概念

本文涉及的基本概念主要有信噪比、虚警率、探测率等。鉴于国内外很少有文献讨论这些问题,有必要首先对这些概念进行明确定义。

卫星闪电成像仪采用 CCD 面阵对视场覆盖范围内的空间进行连续观测,进入各探测单元探测器的信号主要包括闪电信号和发生闪电的云背景信号。闪电信号电子数 N_s 和背景噪声信号电子数 N_B 可用基础辐射方程计算^[8]

$$N_s = \frac{(\pi D^2/4)}{R^2} A_s Q K \left(\frac{\lambda}{hc} \right) L_s \Delta\lambda \tau \quad (1)$$

$$N_B = \frac{(\pi D^2/4)}{R^2} A_P Q K \left(\frac{\lambda}{hc} \right) L_B \Delta\lambda \tau \quad (2)$$

式中, L_s 是单位面积闪电光源发出的辐射亮度, L_B 是单位背景的辐射亮度, $L_B = E\alpha$, E 为背景照度, α 为反射率。式中其它各变量定义和典型取值见表 1:

表 1 公式(1)和(2)中各变量

变量	定义	典型取值
A_s	闪电光源平均面积	10^8 m^2
A_P	背景平均面积,取与闪电同样大小的面积	10^8 m^2
D	透镜孔径	0.1 m
R	闪电发生处距离探测器的距离	$3.56 \times 10^7 \text{ m}$
Q	探测器光子效率	0.8
K	光学系统透过率	0.5
λ	滤光片中心波长	$7.77 \times 10^{-7} \text{ m}$
$\Delta\lambda$	滤光片带宽	$6 \times 10^{-10} \text{ m}$
E	太阳辐射照在云顶的辐照度	$375 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$
h	Planck 常数	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$
c	真空光速	$3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
τ	帧时	$2 \times 10^3 \text{ s}$
α	反照率	0.8

计算式(1)时需要知道闪电光源强度 L_s 值,但实际上是个可变程度很高的变量。为了计算典型情景下闪电信号与背景信号强度差异,闪电信号计算时以典型阈值 $E_s = 4.7 \times 10^{-6} \text{ J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 代替光源强度项^[8]。

通过计算,在白天太阳照射情况下,云背景反射的辐射信号 N_B 大约是阈值时闪电信号 N_s 的 100 倍以上。

关于 CCD 面阵探测器噪声,有大量文献开展过讨论^[9-11]。CCD 面阵探测器的总噪声主要包括光子散粒噪声、暗电流噪声以及读数噪声等^[9]。总体来说,随机波动产生的噪声可看作满足 Gaussian 分布,其均方根误差 n 可表示为^[12]

$$n = \sqrt{N} \quad (3)$$

信噪比计算公式可表示为

$$S = N_s/n \quad (4)$$

遥感仪器的信噪比有明确的定义,由实验室测量确定。通常是在一定的输入强度条件下探测器响应值与无输入信号条件下测量值的比值。但是,对于风云四号卫星闪电成像仪来说,目前无法解决闪电光源问题,现阶段难以测量,主要通过数据计算来分析。

实时事件处理器如果由于仪器误差,导致某个探测单元噪声值超过阈值,从而将该噪声错误判断为一个闪电事件,这就是一个虚警(False Alarm)。闪电成像仪平均每秒钟输出的全部闪电事件中,虚警所占的百分率,就是闪电成像仪的虚警率 FAR (False Alarm Rate)^[6-7]。虚警率是闪电成像仪的一个关键性技术指标,直接反映了仪器在闪电探测过程中的出错状况。

假如某地发生一个闪电,其闪电辐射被卫星闪电成像仪 CCD 焦平面相应探测单元捕捉到,并正确生成闪电信号,则称该闪电事件被闪电成像仪探测. 闪电成像仪视场覆盖范围内平均每秒钟发生的可以被卫星闪电成像仪观测到的全部闪电中,实际被闪电成像仪探测到的百分率,就是探测率 LDE (Lightning Detection Efficiency) [7]. 探测率是闪电成像仪另一个关键技术指标,反映仪器对闪电信号的捕捉能力.

3 信噪比与虚警率的定量关系

如果闪电成像仪平均每秒钟输出的闪电事件总数为 n_0 , 其中的虚警事件数为 n_F , 则闪电成像仪的虚警率可表示为

$$FAR = \frac{n_F}{n_0} \quad (5)$$

噪声信号的概率密度函数可表示为[12-14]

$$Q_D(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中, $x = N$ 为噪声输出值, $\mu = \langle N \rangle$ 为实时事件处理器生成信号的平均值, $\sigma = n$ 为噪声输出的均方根.

实时事件处理器背景减光, 将输出信号减去背景值, 再将减光后的值 N_L 与阈值 T 进行比较, 如果超过阈值则判为闪电, 即

$$N_L = x - \langle N \rangle \leq N_s > T \quad (7)$$

N_L 的概率密度函数 Q_D 可表示为

$$Q_D = \frac{1}{n \sqrt{2\pi} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{N_s^2}{n} \right) \right]} = \frac{1}{n \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{S^2}{2} \right] \quad (8)$$

对 Q_D 积分得到概率分布函数 $F(Z)$ 可表示为

$$F(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-s^2} ds \quad (9)$$

式中, $Z = S/\sqrt{2}$. 一个随机噪声信号被误判为闪电的虚警概率为

$$P(x - \mu > T) = 1 - F(Z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-s^2} ds \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\exp[-S^2/2]}{S/\sqrt{2}} \quad (10)$$

闪电成像仪平均每秒钟产生虚警事件数 n_F 可表示为

$$n_F = P(x - \mu > T) [\text{Pixel number/frame}] \cdot [500 \text{ frame/s}] \quad (11)$$

则虚警率为

$$FAR = \frac{n_F}{n_0} = \frac{1}{n_0} P(x - \mu > T) [\text{Pixel number/frame}]$$

$$[500 \text{ frame/s}] = \frac{1}{n_0} \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\exp[-S^2/2]}{S/\sqrt{2}} \times 400 \times 400 \times 500 \quad (12)$$

根据 LIS 和 OTD 的在轨观测经验, 128×128 的 CCD 面阵闪电成像仪平均每秒钟生成的闪电信号数目大致在 30 个左右[7]. 在本文模拟计算中, 假设 CCD 面阵为 400×400 探测元件, 平均每秒生成闪电信号数目 n_0 取值当在 200~300 之间, 利用该范围内设定的 n_0 取值, 利用式(12)可开展虚警率与信噪比相互关系的模拟计算.

表 2 给出在 $n_0 = 250$ 和 290 两种取值下计算的不同信噪比 S 对应的虚警率.

表 2 模拟计算给出的不同信噪比对应的虚警率值

n_0 取值	S	FAR/(%)
200	4	1 338.3
	4.5	142.1
	5.0	11.9
	5.5	0.8
	6.0	0.001
250	4	1 070.6
	4.5	113.7
	5.0	9.5
	5.5	0.6
	6.0	0.000 1

图 1 给出在 n_0 分别取值 200 和 250 的条件下, 虚警率随信噪比变化关系的模拟计算结果.

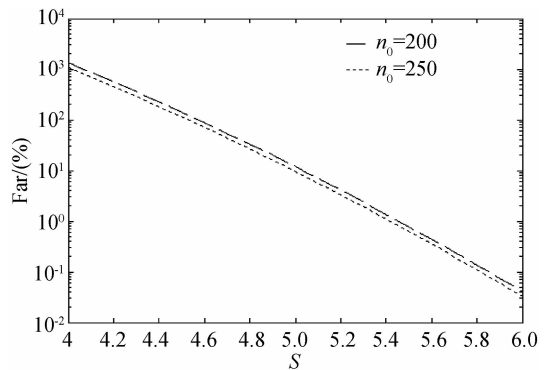


图 1 卫星闪电成像仪虚警率 FAR 与信噪比 S 的模拟计算(对数纵坐标)

Fig. 1 The simulating relationship between FAR and signal-to-noise ratio

从图 1 可见, 卫星闪电成像仪的虚警率 FAR 与信噪比 S 紧密相关, 随着 S 从 4 增大到 6, 虚警率 FAR 也迅速减小. 闪电成像仪虚警率要达到 10%, 其信噪比必须达到 5.0 左右的水平.

从计算公式(12)可见, CCD 面阵探测单元个数对 FAR 产生直接影响, CCD 探测单元个数越大, 则 FAR 越大. 这实际上很好理解, 在仪器各探测单元技术状况保持一致性的条件下, 探测单元越多, 越容

易出错, FAR 也就越大。

4 信噪比与探测率的定量关系

影响闪电成像仪探测率的因素很多,包括最小可探测信号、像元形变等等,其中信噪比是一个最直接的因素. 信噪比与探测率的关系可用公式表示如下^[7]

$$LDE = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{S - S_t}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (13)$$

式中, S_t 为闪电成像仪的阈值信噪比,即实时事件处理器阈值 T 对应的信噪比, S 为闪电成像仪探测器信噪比, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数。

误差函数 $\operatorname{erf}(x)$ 可采用级数展开近似计算如下^[15]

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-t^2] dt \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[x - \frac{x^3}{1! \cdot 3} + \frac{x^5}{2! \cdot 5} - \frac{x^7}{3! \cdot 7} \right] \quad (14)$$

图 2 给出在阈值信噪比 S_t 取 3.5 和 4 两种水平下,利用式(13)模拟计算给出的闪电探测率 LDE 随信噪比 S 的变化情况。

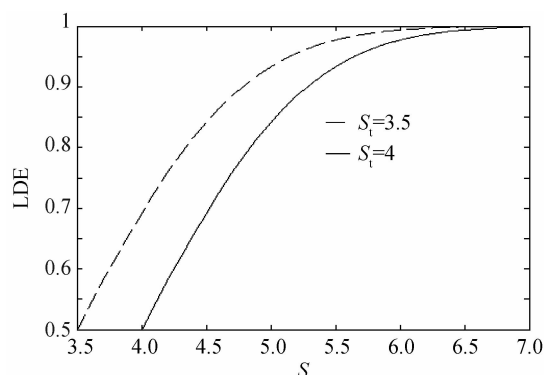


图 2 卫星闪电成像仪闪电探测率 LDE 与信噪比 S 的模拟计算

Fig. 2 Simulating relationship between LDE and signal-to-noise ratio

从图 2 可见,闪电成像仪探测率 LDE 随信噪比 S 的增大而提高,在阈值信噪比 S_t 取值 3.5 和 4.0 的情况下,探测率 LDE 要达到 90%,探测器信噪比要达到 5.2~5.7 的水平.从图 2 还可见,在相同的信噪比下,阈值信噪比 S_t 越小,探测率 LDE 越大。

此外,根据 OTD 和 LIS 观测试验,闪电成像仪探测率 LDE 还与最小可探测信号强度有关,最小可探测信号越小,闪电探测率越大^[7,10-11]。

5 讨论与结论

虚警率和探测率是卫星闪电成像仪关键性技术指标,直接反映了仪器研制质量和对闪电的探测能

力.研制高质量卫星闪电成像仪,要把虚警率控制在尽可能低而将探测率保持尽可能高。

信噪比是影响闪电成像仪虚警率和探测率的重要因素.模拟计算结果表明,要保证 10% 以下的虚警率和 90% 以上的探测率,仪器信噪比至少应该达到 5.7 以上的水平.为了提高信噪比,仪器研制应该在提高光学系统透过率、提高探测器光子效率和降低探测器噪声等方面作出努力。

参考文献

- [1] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, GOODMAN S T. The detection of lightning from geostationary orbit[J]. *J Geo Res*, 1989, **94**(D11): 13329-13337.
- [2] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, BOCCIPPIO D J, et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector[J]. *J Geo Res*, 2003, **108**(D1): 4005.
- [3] CHRISTIAN H J, BLAKESLEC R J, GOODMAN S T. Lightning imaging sensor (LIS) for earth observing system [M]. NASA 1992 TM 4350:1-36.
- [4] DOUGLAS M M, HUGH J C, RICHARD J B, et al. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor[J]. *J Geo Res*, 2007, **112**(D09210).
- [5] HUANG Fu-xiang. The mission and challenge of FY-4 lightning imagery[J]. *Mete Sci Tec*, 2007, **35**(sup): 35-42. 黄富祥. FY-4 卫星闪电成像仪的使命和挑战[J]. *气象科技*, 2007, **35**(增刊): 35-42.
- [6] Goddard Space Flight Center, Geostationary Lightning Mapper (GLM) performance and operational requirements document [M]. NASA-GSFC, 2005, Document Number 417-R-GLMPORD-0057.
- [7] KOSHAK W J, STEWART M E, CHRISTIAN H J, et al. Laboratory calibration of the optical transient detector and the lightning imaging sensor[J]. *J Atm Oce Tec*, 2000, **17**: 905-915.
- [8] SLATER P N. Remote sensing: optics and optical systems [M]. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
- [9] ZHANG Wen-wen, CHEN Qian. Noise characteristics of electron multiplying charge coupled devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 756-760. 张闻文,陈钱. 电子倍增 CCD 噪声特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 756-760.
- [10] BAO Jun-lin, ZHUANG Yi-qi, DU Lei, et al. A model for 1/f noise in optoelectronic coupled devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1359-1362. 包军林,庄奕琪,杜磊,等. 光电耦合器件闪烁噪声模型[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1359-1362.
- [11] JIANG Xiao-guo, QI Shuang-xi, WANG Wan-li, et al. Flat-correction method for fiber optic taper coupled CCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1239-1242. 江孝国,祁双喜,王婉丽,等. 光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1239-1242.
- [12] EATON L R, POON C W, SHELTON J C, et al. Lightning Mapper Sensor Design Study [M]. 1983, NASA-MSFC-CR-

- 170909.
- [13] CHRISTIAN H J, GOODMAN S J. Optical observations of lightning from a high-altitude airplane[J]. *J Atm Oce Tec*, 1987, **4**: 701-711.
- [14] GOODMAN S J, CHRISTIAN H J, RUST W D. A comparison of the optical pulse characteristics of intracloud and cloud-to-ground lightning as observed above clouds[J]. *J App Met*, 1988, **27**: 1369-1381.
- [15] GUO Da-jun. College Mathematics Manual [M]. Ji Nan: Shan dong scientific press, 1985:564.
- 郭大钧. 大学数学手册[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985:564.

Simulating Calculation of Lightning Detection Efficiency and False Alarm Rate for Lightning Imagery on Geo-satellite

HUANG Fu-xiang¹, GUO Jun-bai², FENG Xiao-hu¹

(1 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

(2 Information Engineering College, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the clear define of lightning detection efficiency and false alarm rate, and quantitative models is built to illuminate the influence of signal-to-noise ratio on LDE and FAR. Simulating calculation results show that to control FAR below 10%, the signal-to-noise ratio should be as big as 5.0 at least; and to keep LDE 90%, the signal-to-noise ratio should be between 5.2 to 5.7.

Key words: Lightning imagery; Lightning detection efficiency (LDE); False alarm rate (FAR); Threshold; Signal-to-noise ratio (SNR).



HUANG Fu-xiang was born in 1967. He received the Ph. D. degree from Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences in 2000, and finished his post Doctor research from Institute of Atmospheric Physics in 2002. Now, he works at National Satellite Meteorological Center as an associate. His research interests focus on lightning detection from Geostationary satellite and atmospheric ozone remote sensing.