

利用雷暴闪电事件监测电离层 D 层日间波动

秦子龙^①, 祝宝友^{①②*}, 吕凡超^{①③}, 马明^{①②}, 马冬^①

① 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 中国科学院近地空间环境重点实验室, 合肥 230026;

② 中国科学技术大学, 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 合肥 230026;

③ Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA

* 联系人, E-mail: zhuby@ustc.edu.cn

2014-07-21 收稿, 2014-08-25 接受, 2015-01-30 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB441404)、国家自然科学基金(41374160, 41075001)和 2012 年度中国科技大学青年创新基金资助

摘要 电离层 D 层探测一直是空间科学领域的难题. 目前利用闪电为辐射源来探测 D 层是近年来国外学者研究的热点. 从 2011 年开始, 课题组自行组建了江淮流域 6 站同步闪电观测站网. 基于该站网, 本文实现了一种使用负地闪回击甚低频(VLF)辐射信号来探测电离层 D 层特性波动的方法. 给出的一次雷暴过程中计算 D 层反射高度变化的个例分析结果验证了方法的有效性, 同时结果显示: (1) 日间电离层 D 层对负地闪回击 VLF 信号的等效反射高度基本介于 60~75 km, 总体上表现出与太阳天顶角一致的变化趋势; (2) D 层等效反射高度的短时波动与太阳 X 射线爆发之间存在显著的负相关关系; (3) 比对当地水平面上 X 射线辐射通量密度的变化曲线与 D 层反射高度曲线, 显示后者相对前者存在 3~4 min 的时间延迟. 结果初步展现了具有事件定位和连续波形记录能力的闪电观测站网在电离层 D 层探测方面的巨大潜力.

关键词

电离层 D 层探测

闪电

电离层 D 层日间波动

太阳活动

闪电观测站网

地球电离层 D 层(以下简称 D 层)通常是指距离地面 50~90 km 高度的大气等离子体层. 该层不仅受到来自空间太阳活动以及宇宙射线的调制, 还受到来自地球近地面的各种自然(比如雷暴放电、地震等)和人类活动(比如无线电发射等)的扰动. D 层物理特性的时空变化特征一直是空间物理学科的重要研究内容之一, 该层与下部对流层之间的物质和能量耦合也是研究地球各圈层物质和能量交换的重要一环^[1].

电离层 D 层也被学术界形象得称为“未知之层”(ignorosphere), 是由于该层高度相对于气球探空观测来说太高, 相对于使用卫星平台进行就位(*in situ*)探测来说又太低^[2], 常规的地基电离层探测仪(ionosonde)无法用于 D 层电子密度廓线的探测^[3], 而非相干散射雷达技术对于电子密度低于 10^2 cm^{-3} 的电离层区域(如电离层 D 层)探测十分困难^[4]. 使用火箭

探空和中频(MF)雷达可以实现对 D 层特性的零星和单点探测, 但是存在明显的时间和空间局限性, 近年来, 一些研究者利用 D 层对极低频/甚低频(ELF, 3~3000 Hz/VLF, 3~30 kHz)频段电磁波的反射特性, 借助一些大功率长波导航电台信号来探测该层^[5~11]. 国内, 潘威炎和何光泉^[8]提出通过罗兰-C 导航脉冲信号(频率 100 kHz)来推测电离层 D 层的等效反射高度变化等特性; 王先林等人^[9]通过对罗兰-C 信号的探测和理论分析, 给出了利用罗兰-C 信号计算低电离层反射特性的近似公式; 叶宗海和邓荣华^[10]通过实验研究接收的英国 GBR 台的 VLF 天波相位变化, 研究了电离层 D 层特性变化与宇宙射线强度变化的相关性; 张东和等人^[11]利用 MF 雷达观测结果研究了太阳耀斑对电离层 D 层电子密度廓线的影响.

利用电离层 D 层对闪电放电产生的 VLF/LF 电磁

引用格式: 秦子龙, 祝宝友, 吕凡超, 等. 利用雷暴闪电事件监测电离层 D 层日间波动. 科学通报, 2015, 60: 654~663

Qin Z L, Zhu B Y, Lü F C, et al. Using time domain waveforms of return strokes to retrieve the daytime fluctuation of ionospheric D layer (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 654~663, doi: 10.1360/N972014-00223

波的反射特性,当前美国一批科学家正在开展基于闪电辐射源的电离层D层特性遥感研究^[12~25].通过假定一系列电离层D层电子密度廓线,分别计算对应于给定电子密度廓线下的电离层D层-地面波导空腔内的天波特征,寻找模拟输出结果在频谱或时域波形与观测闪电天波信号最佳吻合时的模式电子密度廓线.利用此类方法,Cheng等人^[18],Han和Cummer^[19,20]等报道了北美中纬度地区日间和夜间电离层D层电子密度廓线的变化特征.Lay和Shao^[21]以及Shao等人^[22]报道了电离层D层特性的空间不均匀性,并使用诊断雷暴的方法探讨了雷暴云对电离层D层的可能扰动.一些学者还利用雷暴放电中产生的特征性双极性窄脉冲事件(NBE)来探测D层特性^[23~25].

相比功率有限的长波电台信号,强烈的闪电信号即使使用常规天线接收也可以获得较高的信噪比.同时由于闪电随机发生的特性,使用单个固定的地面观测站也能方便地对D层实现大面积探测.近年来,随着闪电探测技术的不断发展,越来越多的区域闪电定位站网建立起来,利用VLF/LF闪电信号遥感电离层D层有望发展为未来重要的探测手段.

1 研究方法

电离层D层的电离效应比较低,自由电子与其他粒子的碰撞率约为每秒100万次,对于10 MHz以下的电磁波都有部分反射效应.对于辐射主能量集中在30 kHz以下的地闪回击辐射波^[26]而言,D层可以看成是一个良好的全反射面.为了简化问题,可以将D层与上层大气之间的分界面本身假设为电子浓度跳变的一个断面,对于闪电VLF波而言,高于此高度时电离层的电导率视为无限大,低于此高度时电导率为0.由于实际电离层D层电子密度廓线是连续变化的,因此这一假设的虚拟断面高度一般称为等效反射高度^[8,9,13],本文称这一高度为虚拟电离层反射高度.该高度的变化趋势反映了电离层D层电子密度廓线的整体变化特征.

在自然雷暴放电过程中,地闪回击过程总是产生能量最强的VLF电磁辐射.一次典型地闪回击的电场变化幅度归一化到100 km处可以高达3~8 V/m(初始回击在100 km处平均空间电场变化为6~8 V/m,继后回击为3~6 V/m)^[27],VLF天波(天波即电离层反射波,地波即地面直达波)在地-电离层波导中的幅度衰减仅为0.7~2 dB/Mm^[28],因此使用各种小尺寸天线

便可接收1000 km范围内的地闪回击放电及其电离层反射信号.虚拟反射高度的计算的几何关系如图1所示,假设地面有一个闪电放电源A产生的强烈电磁脉冲沿路径AMB传播到达观测点B点(地波),同时该放电产生的电磁脉冲经电离层反射沿路径ASB也传播到B点(天波),则路径ASB相对路径AMB有一个传播延迟(Δt).该时间延迟不仅与球面传播距离(AMB)有关,也与虚拟电离层D层反射高度(h)有关.通过几何关系可以推算:

$$h = R \left(\cos \left(\frac{S_{AMB}}{2R} \right) - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{S_{AMB} + c \times \Delta t}{2} \right)^2 - \left(R \times \sin \left(\frac{S_{AMB}}{2R} \right) \right)^2}, \quad (1)$$

式中, R 为地球半径, Δt 为天波(ASB)相对地波(AMB)的到达时间延迟, S_{AMB} 为地闪回击信号的沿地球表面传播距离, c 为光速.已知地闪回击事件的发生距离,从记录的波形中提取出天波相对于地波的时间延迟 Δt ,利用式(1)即可计算出虚拟电离层反射高度 h .

图2为本站网接收的一次负地闪回击事件的天波与地波波形,图中标明了天波与地波波峰.与单频电台信号不同,宽频带闪电信号无法直接使用相位差来计算反射波相对于直达地波的延时,只能靠脉冲波

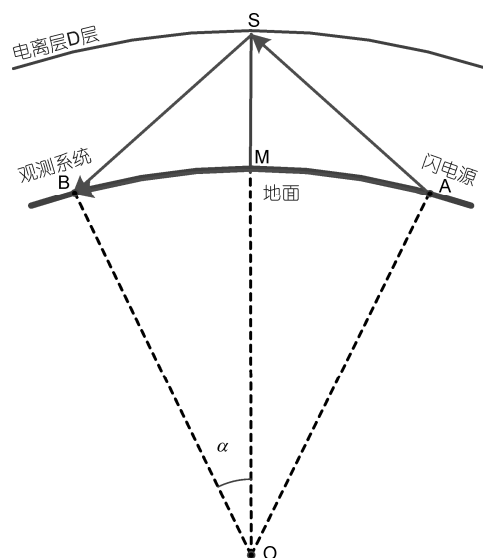


图1 虚拟电离层高度计算几何关系示意. MS为虚拟电离层D层反射高度,OB,OM,OA为地球半径,S点为第一菲涅耳反射区域中心

Figure 1 Geometry of the calculation of virtual reflection height of D region. MS is the virtual reflection height of D layer, OB, OM, OA are the radius of the Earth, and S is the center of first Fresnel reflection region

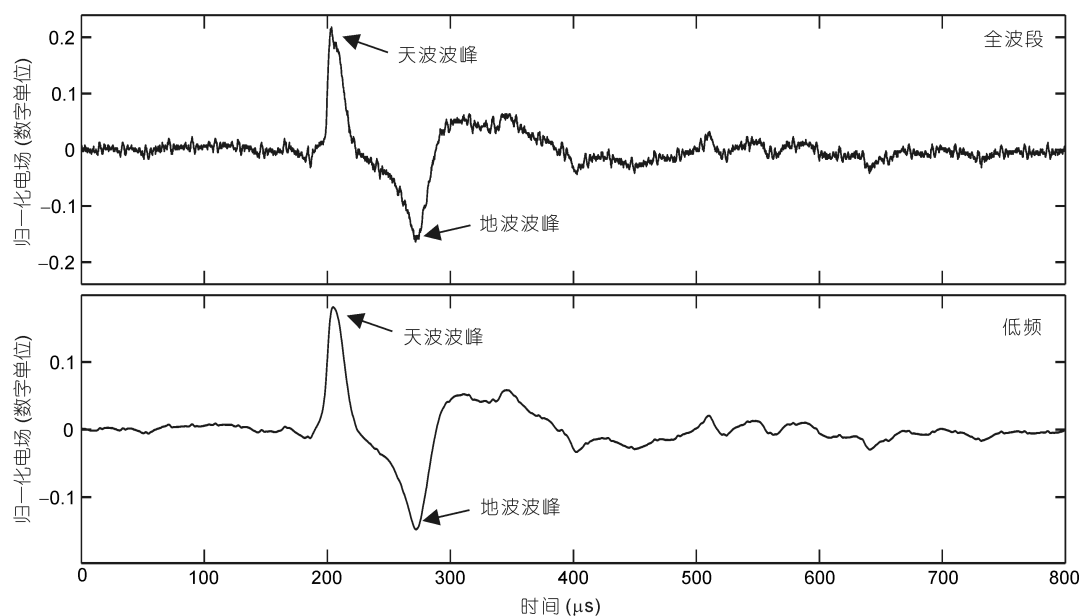


图2 用于计算电离层D层对地闪回击VLF等效反射高度的地波与天波波峰示意图. 电离层D层虚拟反射高度是根据图中地波对天波波峰的时间延迟计算出

Figure 2 The ground wave peak and ionospheric reflection peak in a RS waveform. The virtual reflection height (in VLF band) of D region is calculated by using the time difference between the ground wave peak and ionospheric reflection peak in the waveform of return stroke (RS)

群峰值点的时差来计算特征等效反射高度^[21]. 因此利用地闪回击及其电离层反射信号波形来计算虚拟电离层反射高度需要满足如下两个条件: (1) 电离层反射波可以被检测到; (2) 该电离层反射波峰可以被有效识别并计算延时.

Shao和Jacobson^[29]使用全波电磁场模式模拟了电离层-地面波导空腔内不同距离的地闪回击直达波和电离层反射波特征, 结果显示: 当闪电源与探测器距离为200 km以内时, 电离层反射波相比直达波难以辨认; 当距离超过400 km时, 反射波开始变得清晰起来. 图3给出了本站网系统记录的一次地闪回击放电的6站不同距离电场波形, 从中可以得出与前述一致的结论. 对于该次地闪回击事件, 在近距离(25 km)观测时几乎不能发现任何电离层反射波的迹象; 232~318 km时电离层反射波逐渐明显, 但是由于反射波相对直达波幅度较小, 测算反射波相对直达波的时间延迟有较大困难. 当观测距离为415 km时, 可以清晰地辨认出反射波并测量时间延迟.

综合文献中模拟结果和站网实际观测的波形特征, 本文选取距离探测器超过400 km但小于800 km的负地闪回击波形来反演虚拟电离层反射高度. 这一距离范围内负地闪回击电离层反射波清晰且容易辨认, 而且站网系统对于发生在这一距离范围内的

闪电事件也有较好的定位精度和探测效率(见下文). 实际计算过程中首先使用30 kHz低通滤波器对原始数据进行零相位滤波, 然后分别挑选沿地表传播的直达波和电离层反射波波峰从而获取二者的时间差(图2), 再通过式(1)计算对应于该次回击波形的虚拟D层反射高度. 特别指出, D层对低频和高频电磁波的反射高度是不同的^[17], 这里计算的D层有效反射高度应理解为D层对VLF电磁波的等效反射高度, 下文不再特别指出. 图3所示为以距离蒙城站415 km远的地闪回击反射波计算得到的70 km反射高度为输入条件, 然后假定电离层水平平均一计算对应于不同距离的理论电离层反射波得到的发生时间曲线(图3中红色曲线表示). 图中各站天波波峰所在位置与时间曲线具有良好的一致性, 表明本文的电离层D层反射波识别算法具有很好的稳定性.

2 江淮地区闪电观测站网

自2011年开始本研究组筹划建设一个覆盖安徽、江苏和山东部分地区的区域闪电观测站网, 并于2012年夏进行了场地验证实验. 该站网系统可以多站同步不间断记录覆盖区域内发生的各类闪电事件的VLF/LF频段(带宽0.3~400 kHz)电磁场波形细节, 揭示雷暴过程中一类特殊的云内双极性窄脉冲事件

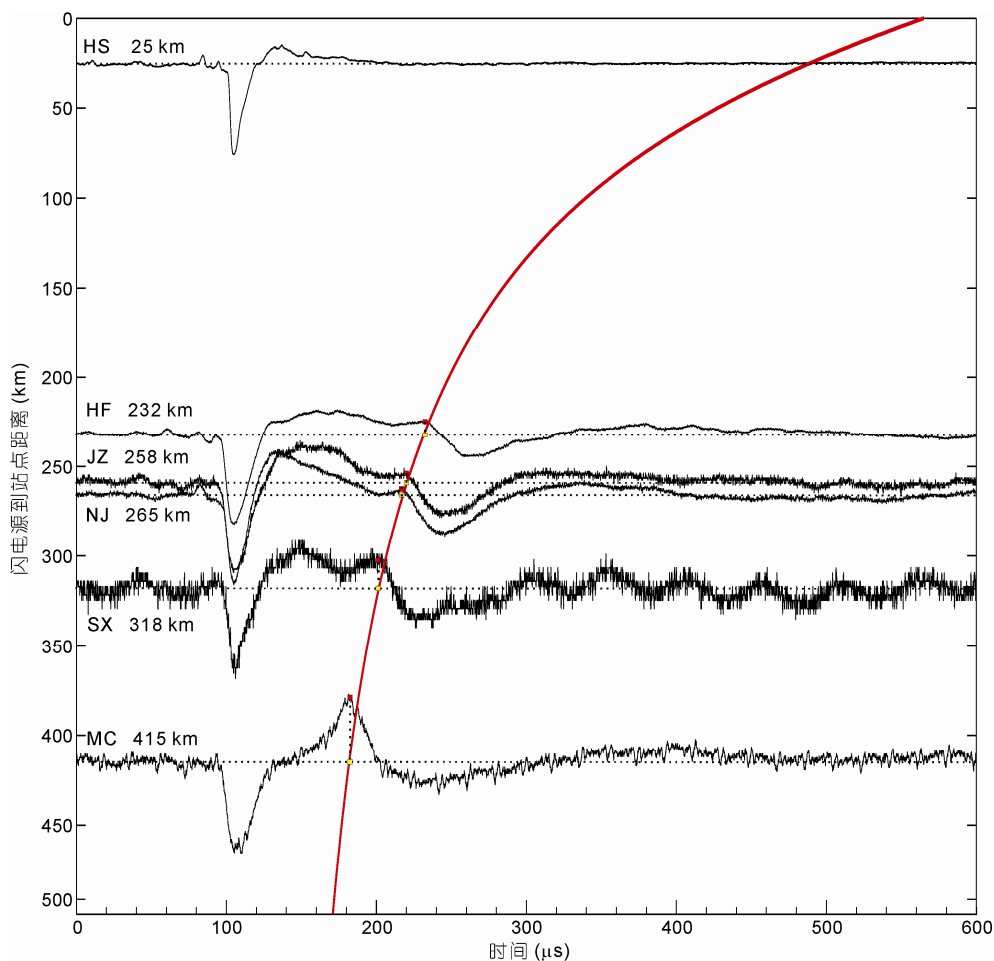


图3 一次负地闪回击同步波形的直达地波波峰与电离层反射波波峰时差与理论曲线的对比. 纵坐标为黄山(HS)、合肥(HF)、金寨(JZ)、南京(NJ)、寿县(SX)和蒙城(MC)6站分别距闪电电源的距离, 横坐标为峰值点对齐时间标尺, 红线为假设虚拟D层反射高度为70 km时的理论反射延迟曲线

Figure 3 The time difference between the ground wave peak of return stroke and its ionospheric reflection peak as a function of distance from observed sites. The solid line indicates the arrival of predicted reflection waveform versus distance when the virtual reflection height of D layer is 70 km

与普通闪电事件之间的气象学联系^[30]. 该观测站网初步规划安徽黄山(HS, 118°20'E, 29°49'N), 合肥(HF, 117°16'E, 31°50'N), 金寨(JZ, 115°55'E, 31°15'N), 寿县(SX, 116°38'E, 32°27'N), 蒙城(MC, 116°29'E, 33°22'N)以及江苏南京(NJ, 118°43'E, 32°12'N)共6个观测子站(图4), 各子站之间通过GPS实现时间同步(精度优于40 ns)并实现了雷暴闪电信号的连续无缝软件触发式采集(采样频率5 M/s), 每个子站的探测范围超过1000 km. 图3给出了本站网系统观测的一次地闪回击的多站同步波形(由各站记录后汇总到合肥主站匹配得到), 其中蒙城站记录的电离层反射波形清晰可辨.

本站网系统采用基于查找表的到达时差定位算

法(TOA)实现多站同步闪电脉冲的二维定位. 根据各站的到达时差, 生成误差查找表(查找表格点间隔为经纬度0.01°). 对于各子站记录的闪电脉冲波形, 系统软件通过时间临近性和波形相关匹配来获得同一事件的多站同步匹配时差. 最后遍历整个查找表搜索到各站位置时差最符合输入时差的定位点. 这种穷举的算法可以使用并行归约的策略实现快速求解.

由于闪电源距探测站点的位置是本文算法的输入参数之一, 所以闪电观测站网的定位误差对计算结果的影响至关重要. 这里使用蒙特卡洛的方法模拟站网内定位误差, 以经纬度0.02°为位置步长, 分别计算站网探测范围内从不同位置到达各观测站的时间, 分别加入了 $\pm 1 \mu\text{s}$ 范围的随机分布时间随机误

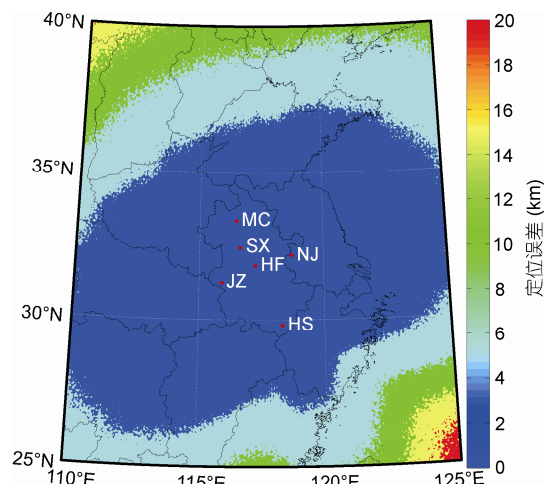


图4 闪电观测网6站分布与站距定位误差分析结果. HS, 黄山; HF, 合肥; JZ, 金寨; NJ, 南京; SX, 寿县; MC, 蒙城; 图中站距定位误差分析为取经纬度 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 大小的格点, 在给定精确时间的基准上加入了 $\pm 1 \mu\text{s}$ 的随机分布时间误差, 做出的基于6站匹配的站网定位误差分布

Figure 4 Location errors of 6-station time of arrival lightning detection network using numerical simulations. The errors are color scale being found on the right

差(本文采集系统通带宽度为400 kHz, 频率截断导致的峰值点偏移不超过 $0.2 \mu\text{s}$ ^[31], 而采集系统的采样间隔为 $0.2 \mu\text{s}$, 因此 $\pm 1 \mu\text{s}$ 范围内的时间误差输入估计是保守的), 然后再导入上述定位算法进行定位, 将得到的结果与输入位置的偏差值作为实际定位误差. 取100次模拟结果的均值作为误差估计值. 图4给出了基于6站匹配的站网定位误差分布^[32]. 就模拟结果来看, 覆盖区域的6站定位误差在6 km以内. 通常情况下, 达到4站匹配条件的闪电事件就可以定位, 对于发生在站网探测范围边缘的闪电事件, 部分使用4~5站定位的结果误差相比6站略大. 使用式(1)得到的仿真结果表明, 在闪电事件距离为400~800 km时, 即使位置误差在10 km, 计算电离层有效反射高度的误差也在1 km以内.

本文所述的D层反射高度计算方法针对负地闪回击波形, 本站网系统使用支持向量机(SVM)的分类方法对闪电波形进行分类. 根据闪电脉冲波形特征(信噪比、半宽、上升时间、初始峰宽、峰值频率和脉冲持续时间), 首先通过人工进行类型判断获取特征集, 然后使用支持向量机对正负地闪回击, 云闪脉冲, 双极性窄脉冲3种闪电事件拟合六维特征空间上的最佳分割曲面, 最后使用分割曲面对闪电事件进行分类筛选. 经初步验证, 最终筛选结果对负地闪

回击事件的识别率可以达到85%. 忽略一些强度较弱的地闪回击波形不会对本文计算电离层反射高度的结果产生影响.

3 个例研究

个例选取当地时间2012年7月7日8~18时系统记录的一次气团雷暴过程中闪电波形数据来反演电离层D层反射高度的日变化特征. 本站网系统在当天时间段内共监测到197811例可有效定位的闪电事件. 图5给出了部分距离蒙城站和合肥站400~800 km的负地闪回击事件的位置分布, 以及这些闪电信号相对于蒙城站和合肥站的电离层第一菲涅尔反射区域^[21]. 不同时段(图中色标从冷色到暖色)内连续发生的闪电事件为探讨电离层D层特性的日变化特征提供了条件.

数据处理过程中对每个回击波形, 由程序自动识别直达波峰和电离层反射波峰的时间延迟, 再使用前述方法计算事件发生时刻反射点位置的D层虚拟反射高度. 计算结果随时间分布显示于图6中, 其中每个散点代表一次负地闪回击事件计算得到的虚拟反射高度. 合肥站和蒙城站独立反演叠加的结果见图7. 无论是散点分布还是5 min平均曲线, 两站得到的D层反射高度变化趋势都合理地一致, 这说明本文的地闪回击电离层反射波识别算法是稳定的.

由于各地闪电事件发生位置不同, 利用闪电事件计算的D层等效反射高度对应的菲涅耳区域位置也是变化的, 因此本文个例研究选取的反射点位置均分布在经纬度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的小区域内. Lay和Shao^[21]的研究结果表明D层的反射高度存在空间上的不均匀性, 图6和7中的5 min多点平均曲线可以在一定程度上消除这种不均匀性产生的影响.

在日间太阳活动剧烈时, 太阳短波辐射特别是X射线可以穿透电离层E层到达D层, 改变D层的电子浓度, 进而影响该层对VLF电磁波的反射高度^[33,34]. 随着太阳天顶角不断降低, 辐射能量不断增强, D层中的中性分子被电离, 电子密度逐渐增加, VLF电磁波反射高度则会随之降低. 图8(a)给出了计算得到的D层反射高度与太阳天顶角的变化特征, D层反射高度从当地时间上午9时开始随太阳天顶角下降而下降, 总体上在当地时间12~14时前后达到最低点, 在下午16时30分左右太阳天顶角上升时开始明显逐渐上升, 与太阳高度角变化有很好的一致性. 同时对应

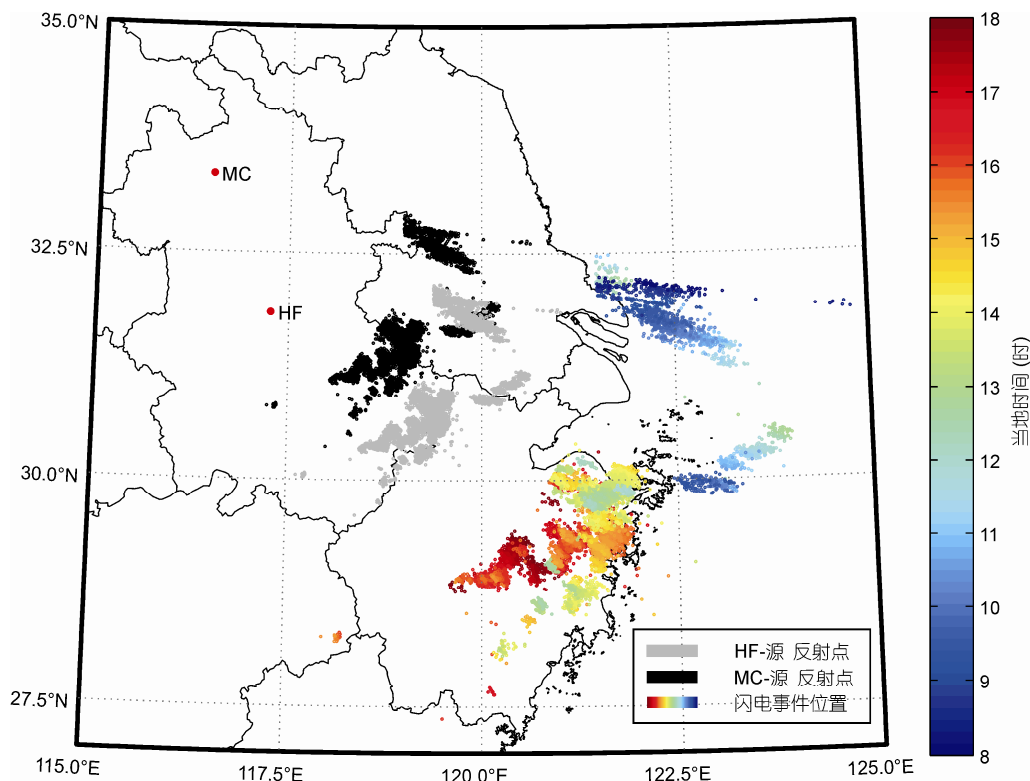


图 5 2012 年 7 月 7 日, 8~18 时(当地时间)电离层 D 层反演使用的负地闪回击事件定位点与反射点. 图中彩色点为个例分析中用于电离层 D 层反射高度计算使用的负地闪回击事件定位信息, 颜色变化为时间推移. 黑色和灰色点分别代表蒙城站(MC)和合肥站(HF)数据天波对应的非涅尔反射区域中心

Figure 5 Locations of return strokes during local time 8:00–18:00 (color scale on the right) from a local thunderstorm on July 7, 2012. The black points represent the centers of reflection region of sferics received by MC station and grey points, HF station

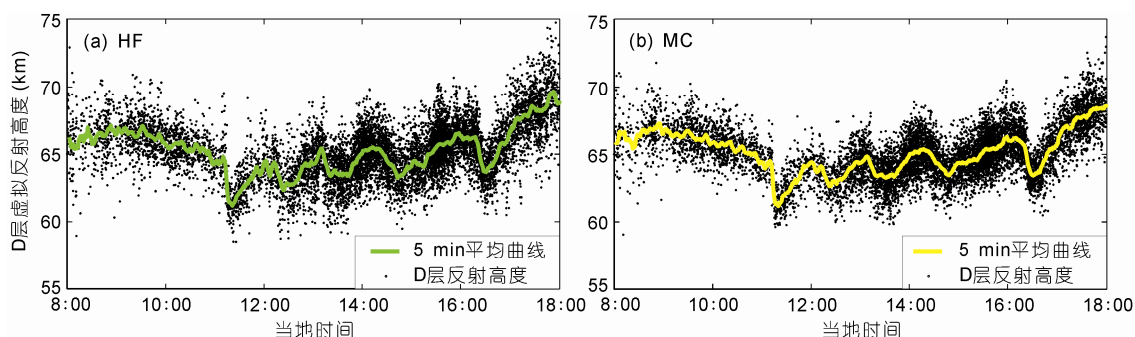


图 6 合肥站和蒙城站虚拟 D 层反射高度反演. 图中散点为每个事件反演出的虚拟电离层 D 层反射高度, 实线为以 1 min 为步进的 5 min 平均曲线; (a) 为合肥站数据反演结果, 对应图 5 中灰色区域虚拟 D 层反射高度; (b) 为蒙城站, 对应图 5 中黑色区域

Figure 6 The virtual reflection heights retrieved by HF and MC station. Each scatter in this figure represents one virtual reflection height of D layer calculated by one RS event at its occurring time. The solid line is the average curve of the heights in a timescale of 5 minutes. The retrieved heights in (a) refer to the grey region in Figure 5. (b) corresponds to the black region in Figure 5

日出和日落时段的虚拟反射高度存在明显的过渡特征. 图 8(b) 则揭示了电离层 D 层对太阳耀斑的响应. 由图可见, 本文得到的虚拟 D 层反射高度曲线与大气上界太阳 X 射线通量密度(数据来自美国 GOES-15 卫

星, 包含 0.1~0.8 nm, 长波波段和 0.05~0.4 nm, 短波波段)的 5 min 平均曲线密切相关, X 射线辐射通量密度跃升时(11 时 30 分、12 时 20 分、13 时 20 分、14 时 50 分和 16 时 30 分, 每一次持续约 20~30 min), 电离层 D 层

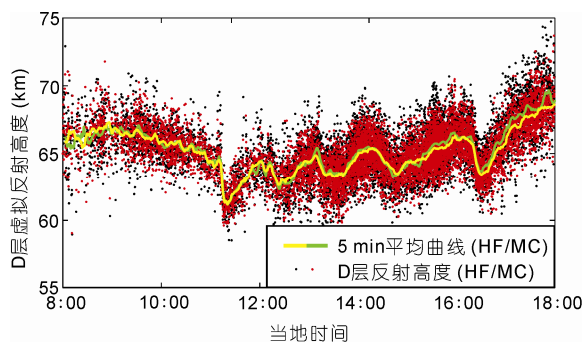


图7 合肥和蒙城站反演结果的对比. 红色点和黄色曲线为图6中蒙城站数据, 黑色点和绿色曲线为图6中合肥站数据反演结果

Figure 7 Comparison between the retrieved virtual reflection heights from HF and MC station. Red scatters and yellow solid curve refer to the heights retrieved from MC station (Figure 6(a)), and black scatters and green solid curve are from the HF station (Figure 6(b))

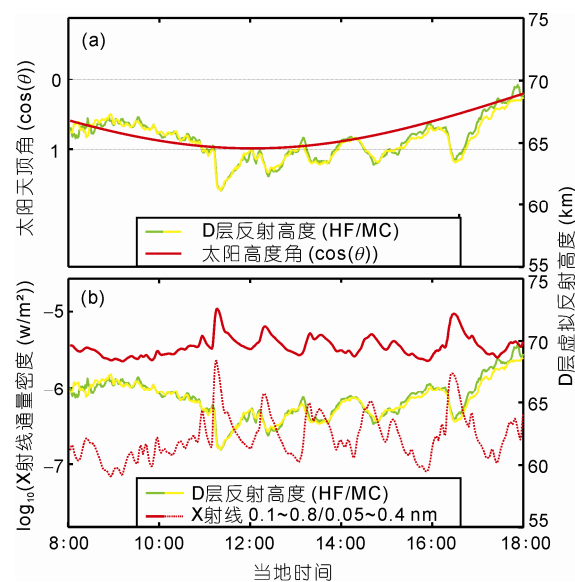


图8 虚拟D层反射高度反演结果与太阳天顶角变化(a)以及X射线辐射通量密度变化(b)对比图. 绿线和黄线分别为合肥(HF)和蒙城(MC)反演得到的D层等效反射高度曲线. (a)中红色实线是7月7日间太阳天顶角的余弦值曲线, 反映了太阳辐射的垂直分量能量比例变化; (b)中红色实线为GOES-15卫星提供的7月7日间波长为0.1~0.8 nm的X射线辐射通量密度数据, 红色虚线为0.05~0.4 nm波长数据

Figure 8 The retrieved virtual reflection heights comparing to the solar zenith angle (a) and X-ray flux density (b) on July 7th. The green and yellow solid line refer to the variation curve of reflection height of D layer retrieved from HF and MC station. The red solid curve in (a) is the solar zenith angle on July 7th, 2012, which represents the changing of energy of solar radiation in the vertical direction. The red solid curve in (b) represents X-ray flux density with wavelength of 0.1~0.8 nm. The red dash line refers the X-ray with wavelength of 0.05~0.4 nm

反射高度几乎在同一时刻降低^[33~35], 最大降低幅度达到5 km, 进一步证实了在太阳耀斑爆发时, X射线辐射是电离层D层的主要驱动能源^[34]. Han和

Cummer^[19,20]使用时域有限差分模式(FDTD)拟合实验观测结果得到D层电子密度分布随时间的变化趋势与本文结果合理一致.

为了进一步探究D层对太阳短波辐射的响应时间, 图9(a)综合该日太阳天顶角和GOES卫星测量的X射线通量密度, 给出了当日当地水平面上的太阳X射线通量密度对数(以D层有效反射高度为归一化)与合肥与蒙城站反演的D层有效反射高度的以1 min为时间步长的5 min平均曲线的对比. 对比中无论长波(0.1~0.8 nm)还是短波(0.05~0.4 nm)X射线辐射都与D层反射高度密切相关, 其中长波X射线辐射相对合肥站和蒙城站反演的D层反射高度相关系数分别为0.93和0.92, 相应于短波X射线辐射的相关系数分别为0.79和0.81. 这与Thomson等人^[34]提出的在X射线辐射大于 $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 时, D层反射高度的变化与X射线长波段辐射量之间呈对数线性关系的结论完全一致.

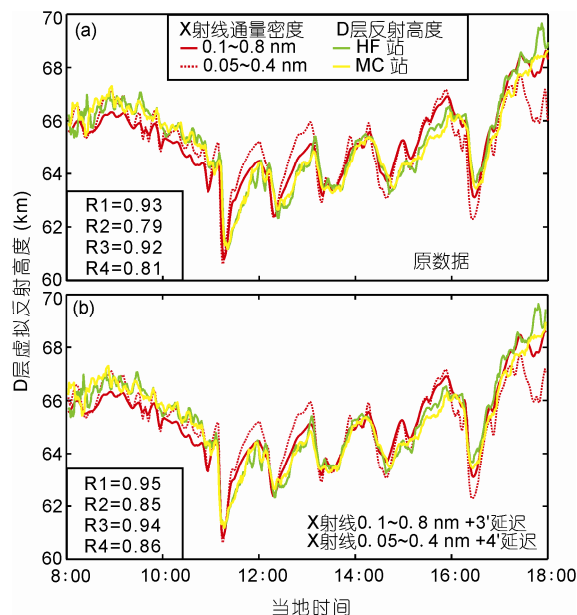


图9 当地水平面上的X射线辐射通量密度与虚拟电离层D层反射高度的对比. R1, R2 分别为合肥站对0.1~0.8 nm, 0.05~0.4 nm波段X射线辐射通量密度变化曲线的相关系数, R3, R4 分别为蒙城站对两个波段X射线辐射通量密度变化曲线的相关系数. (b)为加入时间延迟后的对比结果, 当0.1~0.8 nm波段X射线数据向后延迟3 min, 0.05~0.4 nm波段延迟为4 min时, 两者的相关度最高

Figure 9 Comparison between the X-ray flux density in local horizontal plane and the reflection heights of D layer. R1, R2 are the relevances between the reflection heights of D layer from HF station and the X-ray flux density in two band. R3, R4 are the relevances from MC station. When applying a lag of 3 minutes on 0.1~0.8 nm X-ray flux density and a lag of 4 minutes on 0.05~0.4 nm X-ray data (b). All relevances mentioned above reach the maximum

但是仔细观察图9(a), 可以看出D层反射高度相对太阳X射线辐射略有延迟. 对两者进行滑动相关分析结果显示: 当长波X射线通量密度对数变化曲线相对D层反射高度曲线平移3 min时, 两者相关系数达到最大, 分别达到0.95和0.94; 对于短波波束辐射, 平移4 min时, 两站得到的相关系数分别达到0.85, 0.86, 时间平移之前和之后的相关系数均呈现减小趋势, 平移后的曲线对比如图9(b)所示. 由此我们推测, 电离层D层对太阳耀斑爆发的响应时间约为3~4 min. 这种调制的机理还有待继续研究.

4 结论

如序言中所述, 当前一些科学家正在开展基于强烈闪电信号的电离层D层遥感方法研究, 展现了这类方法在电离层D层探测方面的巨大潜力. 随着区域闪电定位站网在世界上许多地区建立起来, 这一方法有望成为未来电离层D层探测的重要方法, 用于对电离层D层进行持续监测, 获取电离层D层的电子密度廓线, 研究其时间和空间变化, 探索雷暴放电与电离层D层的相互作用, 分析各种扰动导致的电离层局地不均匀性等等. 利用闪电信号遥感电离层D层的方法仍在不断完善和发展中.

本文基于江淮地区6站闪电观测站网记录的闪电事件波形和定位信息, 对不同类型的闪电事件进行自动分类, 针对2012年7月7日一次雷暴过程中距离

子站在400~800 km之间的负地闪回击事件反演了该日电离层D层对地闪回击VLF信号的反射高度, 并分析了其日变化特征及其对太阳辐射的响应. 结果显示: (1) 电离层D层对地闪回击信号的反射高度呈现随太阳天顶角系统性变化特征, 太阳辐射增强时, 反射高度随之降低; (2) 短时间内来自太阳的X射线爆发引起显著的D层反射高度波动, 两者之间呈现显著的负相关关系; (3) D层反射高度相对太阳耀斑爆发存在3~4 min的时间延迟. 本文结果验证了利用具有闪电波形记录能力的闪电观测站网在电离层D层探测方面的有效性. 特别值得指出, 利用该类系统对于雷暴闪电的不间断记录能力, 有望获得高时间分辨率的电离层D层特性及其时间波动特征.

下一步工作, 我们计划利用江淮地区6站闪电观测站网分析更多雷暴日的电离层D层波动特征, 验证D层对太阳X射线辐射的时间响应. 同时考虑到电离层探测需求, 在江淮地区观测站网建立之初同期本组在广州从化也建立了一套GPS时间同步的不间断观测系统, 同步接收来自江淮地区的地闪回击波形, 未来希望结合长波波束模式, 基于假定对数线性电子密度廓线分布, 计算D层-地面波导空腔内电磁波的传播特性、寻找模拟结果与观测结果最佳拟合时的电子密度廓线, 开展大空间尺度的电离层D层探测. 力争把江淮地区闪电观测站网建设成一个可以实现持续电离层D层探测的系统监测网.

致谢 感谢南京信息工程大学、安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站在观测场地方面的大力帮助以及两位评审人给出的宝贵建议.

参考文献

- 1 Xiao Z. Ionospheric research in China over the past 50 years (in Chinese). *Physics*, 1999, 28: 661–667 [肖佐. 50年来中国的电离层研究. *物理*, 1999, 28: 661–667]
- 2 Inan U S, Cummer S A, Marshall R A. A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E36, doi: 10.1029/2009JA014775
- 3 Hargreaves J K. *The Solar-terrestrial Environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- 4 Mathews J, Breakall J, Ganguly S. The measurement of diurnal variation of electron concentration in the 60–100 km ionosphere at Arecibo. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 1982, 44: 441–448
- 5 Thomson N R. Experimental daytime VLF ionospheric parameters. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 1993, 55: 173–184
- 6 Bickel J E, Ferguson J A, Stanley G V. Experimental observation of magnetic field effects on VLF propagation at night. *Radio Sci*, 1970, 5: 19–25
- 7 Inan U S, Pasko V P, Bell T F. Sustained heating of the ionosphere above thunderstorms as evidenced in the early/fast VLF events. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1067–1070

- 8 Pan W Y, He G Q. A method for obtaining equivalent height and the reflection coefficient of lower ionosphere by measuring Loran-C signal waveforms (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 1986, 1: 28–40 [潘威炎, 何光泉. 利用罗兰-C 讯号获取低电离层等效反射高度和反射系数的一种方法. *电波科学学报*, 1986, 1: 28–40]
- 9 Wang X L, Shen L, Huang Z R. Experiments and calculations of the 100 kHz sky-wave (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 1986, 6: 227–232 [王先林, 沈力, 黄泽荣. 100 kHz 天波的实验和计算. *空间科学学报*, 1986, 6: 227–232]
- 10 Ye Z H, Dong R H. The possibility of the intensity variation of galactic cosmic rays in the ionospheric D-region determined from the VLF phase changes (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1985, 28: 348–355 [叶宗海, 邓荣华. 根据 VLF 的相位变化确定 D 层宇宙线强度变化的可能性. *地球物理学报*, 1985, 28: 348–355]
- 11 Zhang D H, Xiao Z, Wu J, et al. The study of the electron density in ionospheric D region using MF radar during flares period (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2003, 23: 334–342 [张东和, 肖佐, 吴健, 等. 利用 MF 雷达对耀斑期间电离层 D 区电子密度的观测研究. *空间科学学报*, 2003, 23: 334–342]
- 12 Cummer S A, Inan U S, Bell T F. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics. *Radio Sci*, 1998, 33: 1781–1792
- 13 Jacobson A R, Holzworth R, Shao X M. Low-frequency ionospheric sounding with Narrow Bipolar Event lightning radio emissions: Energy-reflectivity spectrum. *Ann Geophys*, 2008, 26: 1793–1803
- 14 Jacobson A R, Shao X M, Holzworth R. Full-wave reflection of lightning long-wave radio pulses from the ionospheric D region: Numerical model. *J Geophys Res*, 2008, 114: A03303, doi: 10.1029/2008JA013642
- 15 Jacobson A R, Shao X M, Holzworth R. Full-wave reflection of lightning long-wave radio pulses from the ionospheric D region: Comparison with midday observations of broadband lightning signals. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E27, doi: 10.1029/2009JA014540
- 16 Jacobson A R, Holzworth R, Lay E, et al. Low-frequency ionospheric sounding with Narrow Bipolar Event lightning radio emissions: Regular variabilities and solar-X-ray responses. *Ann Geophys*, 2007, 25: 2175–2184
- 17 Hu W, Cummer S A. An FDTD model for low and high altitude lightning-generated EM fields. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2006, 54: 1513–1522
- 18 Cheng Z, Cummer S A, Su H T, et al. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses. *J Geophys Res*, 2007, 112: A06318, doi: 10.1029/2006JA011840
- 19 Han F, Cummer S A. Midlatitude daytime D region ionosphere variations measured from radio atmospherics. *J Geophys Res*, 2010, 115: A10314, doi: 10.1029/2010JA015715
- 20 Han F, Cummer S A. Midlatitude nighttime D region ionosphere variability on hourly to monthly time scales. *J Geophys Res*, 2010, 115: A09323, doi: 10.1029/2010JA015437
- 21 Lay E H, Shao X-M. High temporal and spatial-resolution detection of D-layer fluctuations by using time-domain lightning waveforms. *J Geophys Res*, 2011, 116: A01317, doi: 10.1029/2010JA016018
- 22 Shao X-M, Lay E H, Jacobson A R. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm. *Nat Geosci*, 2013, 6: 29–33
- 23 Smith D A, Heavner M J, Jacobson A R, et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records. *Radio Sci*, 2004, 39: RS1010, doi: 10.1029/2002RS002790
- 24 Lü F C, Zhu B Y, Zhou H L, et al. Observations of compact intracloud lightning discharges in the northernmost region (51°N) of China. *J Geophys Res*, 2013, 118: 4458–4465
- 25 Wu T, Dong W S, Zhang Y J, et al. Discharge height of lightning narrow bipolar events. *J Geophys Res*, 2012, 117: D05119, doi: 10.1029/2011JD017054
- 26 Cummer S A, Inan U S, Bell T F. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics. *Radio Sci*, 1998, 33: 1781–1792
- 27 Krider E P, Guo C M. The peak electromagnetic power radiated by lightning return strokes. *J Geophys Res*, 1983, 88: 8471–8474
- 28 Watt A D. *VLF Radio Engineering*. Oxford: Pergamon Press, 1967
- 29 Shao X-M, Jacobson A R. Model simulation of very low frequency and low frequency lightning signal propagation over intermediate Ranges. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2009, 51: 519–525
- 30 Lü F C. Comparative studies of NBEs at greater Khingan range and Jianghuai area based on multi-station observations (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 [吕凡超. 东北和江淮地区 NBE 的多站观测与对比研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2013]
- 31 Jackson J D, Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. New York: Wiley, 1962
- 32 Shao X M, Stanley M, Regan A, et al. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA). *J Atmos Oceanic Technol*, 2006, 23: 1273–1288
- 33 Mitra A P. *Ionospheric Effects of Solar Flares*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974
- 34 Thomson N R, Rodger C J, Dowden R L. Ionosphere gives size of greatest solar flare. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L06803, doi: 10.1029/2003GL019345

- 35 Todoroki Y, Maekawa S, Yamauchi T, et al. Solar flare induced D region perturbation in the ionosphere, as revealed from a short-distance VLF propagation path. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L03103, doi: 10.1029/2006GL028087

Using time domain waveforms of return strokes to retrieve the daytime fluctuation of ionospheric D layer

QIN ZiLong¹, ZHU BaoYou^{1,2}, LÜ FanChao^{1,3}, MA Ming^{1,2} & MA Dong¹

¹ CAS Key Laboratory of Geospace Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Mengcheng National Geophysical Observatory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

³ Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA

It suffers great difficulties in remote sensing of the lower ionosphere by using conventional probing measurements during past 50 years. By far a new sounding technique basing on the powerful very low frequency(VLF) radiation emitted by lightning discharges is under developing. In this study, we introduced and established a lightning based detection network to locate the lightning events and record lightning waveforms during 2012. Basing on acquired waveforms occurring in a life cycle of thunderstorm and calculation of the virtual ionosphere heights, fluctuations of ionospheric D layer can be retrieved. One case study in 8:00–18:00(local time) July 7th, 2012 is performed in this article. The results indicate that in this case study the virtual D layer reflection height of VLF radiation emitted by lightning discharges is in the range of 60–75 km and its variation trend is consistent with changing of solar zenith angle. Further correlation analysis between D layer reflection heights and solar X-ray flux densities recorded by GOES satellite reveals that solar flares will cause significant modification of the lower ionosphere in 3–4 min.

detection of ionospheric D layer, lightning, daytime fluctuation of ionospheric D layer, solar activity, detection network of lightning

doi: 10.1360/N972014-00223