

用 VLF/VHF 信号大容量采集系统 观测云地闪电放电过程*

祝宝友 刘亦风 陶善昌

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

P427 A

摘要 简述了一种高分辨、大容量闪电 VLF/VHF 信号记录系统, 报道了一次包含 12 次对地回击、平均回击间隔 70 ms、持续时间超过 800 ms 的地闪放电过程的 VLF/VHF 辐射波形全景以及分析结果。这一个典型事例揭示了一些有趣的现象: (1) 这次过程的头 5 ms 出现了强烈的 VLF 双极性大脉冲序列, 标志着云内初始击穿过程启动; 对应于一系列 VLF 辐射事件出现了强烈的 VHF 辐射爆发, 总体上看, 前 380 ms 期间 VHF 辐射异常强烈, 呈现为间歇式准连续辐射, 之后强烈 VHF 辐射则更多地表现为分立脉冲式爆发特征。(2) 与回击主电流峰期间 VHF 辐射较弱不同, 地闪最强的 VHF 辐射来自初始击穿过程和回击后云内放电通道扩展或者新通道形成过程; 在初始击穿阶段和回击间歇期, 出现了不止一次强烈的 VHF 辐射爆发并不伴随明显的 VLF 辐射。(3) 回击间歇期间一类云中放电过程产生一系列半宽为 3~4 μ s 左右、出现频率约 10^5 Hz 的 VLF 快脉冲串, 整个脉冲串持续时间约 1 ms, 频谱峰值区域在 60~90 kHz, 并伴随较强的 VHF 辐射, 这些特征都与直窜先导特征一致。很可能这是一种云内 K 事件。(4) 还给出了江淮地区地闪过程回击 VLF/VHF 辐射波形的统计特征, 统计还显示当相继两次回击间隔小于 40 ms 时后面回击幅度倾向于比前面回击弱, 当回击间隔时间大于 100 ms 时, 后面回击比前面回击强的可能性大。

关键词: 地闪过程; 回击; 初始击穿; 直窜先导; VLF/VHF 辐射

1 前言

闪电放电辐射频带极宽的电磁波, 其频率范围从几赫兹到几千赫兹乃至光波, 研究闪电在不同频段辐射特征以及它们之间的相互关系并揭示闪电放电过程的物理机理是国内外学术界长期关注的课题。早在 20 世纪 60 年代国内外就开始进行闪电过程 RF 辐射的先驱性观测和分析研究^[1,2]。Brook 等^[2]曾给出闪电电场快变化和 400~1 000 MHz 射频辐射场同步观测结果, 指出在回击期间射频辐射经常很弱或者探测不到, 而在回击启动 50~100 μ s 以后才出现显著的射频辐射并提出射频辐射与梯级先导、直窜先导以及 K 变化伴随的击穿流光一致。虽然这些观测与分析侧重电场变化与射频爆发之间的时间对应性, 未涉及两者场强大小的定量比较, 这一工作对后来的研究显然有重要的启示作用。

随着探测技术的进步, 关于闪电放电过程的 VLF/VHF 辐射信号特征和产生机理

2000-10-08 收到, 2000-12-29 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49775252 和中国科学院知识创新项目 KZCX2-201 子课题“闪电云内放电过程的观测研究”共同资助

积累了相当丰富的新知识。Krider 等^[3]给出了云内放电在 3、69、139、295 MHz 等 4 个频段的 RF 辐射与 VLF 双极性大脉冲同步观测资料, 显示上述各频段的 HF/VHF 辐射爆发都跟 VLF 脉冲的产生相对应, 而二者幅度大小之间并无一致的对应关系, 并指出云内闪电与地闪回击之前的云内过程产生的 RF 辐射有相似特征; 不过该信号记录长度只有 1 ms, 不清楚所谓的“云内脉冲 (intracloud impulse)”是孤立的云内放电 (或者云地闪电的云内活动) 的什么样具体过程所产生。Hayenga^[4]用 34.3 MHz 干涉仪观测闪电 VHF 辐射源, 给出了三例云地闪电过程 VHF 辐射和慢电场变化同步观测结果, 并指出: 初始准连续 RF 辐射随着首次回击启动而特征性地停息, 大约在回击启动之后 100 μ s 左右 VHF 辐射又强烈地爆发; 所用仪器时间分辨率偏低 (小于 50 μ s), 并且波形幅度为相对单位, 难以确切判别后继回击电场变化与 VHF 辐射之间的先后顺序和定量地比较不同时间的 RF 辐射强度。Cooray 等^[5]则报道了云地闪电正、负回击的宽带电场和 3 MHz 辐射的一个观测结果, 负回击 HF 辐射平均持续时间约 140 μ s (100 ~ 600 μ s), 而与正回击相伴的 HF 辐射持续时间长得多, 从 5 ms 至 25 ms, 并认为这种在首次回击过程发生的 RF 辐射是由回击期间先导电晕鞘 (Leader corona sheath) 的崩溃产生的。局限于信号记录长度只有 1~50 ms, 不便于比较云地闪电各个子过程的 RF 辐射相对强弱。Rhodes 等^[6]报道了用 274 MHz 干涉仪观测的二例闪电放电现象, 分析了不同类型的闪电放电电子过程的空间发展图像, 发现先导期间的 VHF 辐射持续至首次回击启动之后, 幅度在几十微秒之后显著增加, 沿着先导通道下部的连续的 VHF 辐射可能产生于沿径向发展进入回击通道的击穿过程, 而随后回击通道上部的 VHF 辐射可能起源于先导通道区域的内部或者外部, 包括回击通道分叉; 同时发现: 后继回击启动后出现大约 200 μ s 的 VHF 辐射停歇期。郟秀书等^[7]发表了闪电 20 MHz 辐射观测结果, 董万胜等^[8]报道了采用宽带干涉仪器系统观测人工引雷的结果。看来, 云地闪电放电过程的 VLF 和 VHF 辐射存在相互对应关系, 但是它们各自的生成机理似乎有所不同, 系统观测研究它们之间的对应关系有助于深入揭示闪电放电过程机理。国内外目前尚缺乏关于云地闪电放电全过程 VLF/VHF 辐射场高分辨率、大容量、定量化观测资料及分析结果的报道, 事实上这种观测不仅对于细致地考察地闪各子过程 VHF/VLF 辐射的对应关系, 确切地了解最强 VHF 辐射源的过程归属以及澄清 K 事件的物理机理, 而且对深入探讨闪电放电过程对于气象因素 (天气状况、风切变、云底高度和 0 $^{\circ}$ C 层高度等) 及地理 (如纬度)、地形条件的依赖关系也是必要的^[9]。

本文扼要介绍闪电 VLF/VHF 信号大容量采集系统, 给出一次典型的包含 12 次回击的云地闪电信号全景的分析结果, 并提供合肥地区的地闪过程回击 VHF/VLF 波形统计特征。

2 试验系统和资料

图 1 给出了大容量 VLF/VHF 闪电信号采集系统的结构框图。该系统包括 VLF/LF 接收单元、VHF 接收单元以及信号记录单元三部分。其中 VLF/LF 接收单元采用中国科学技术大学大气遥感实验室研制的单站闪电定位仪的接收机^[10], 有一个垂直电场接收通道 (电通道极性定义为下行的负电流产生负极性电场变化) 和两个相

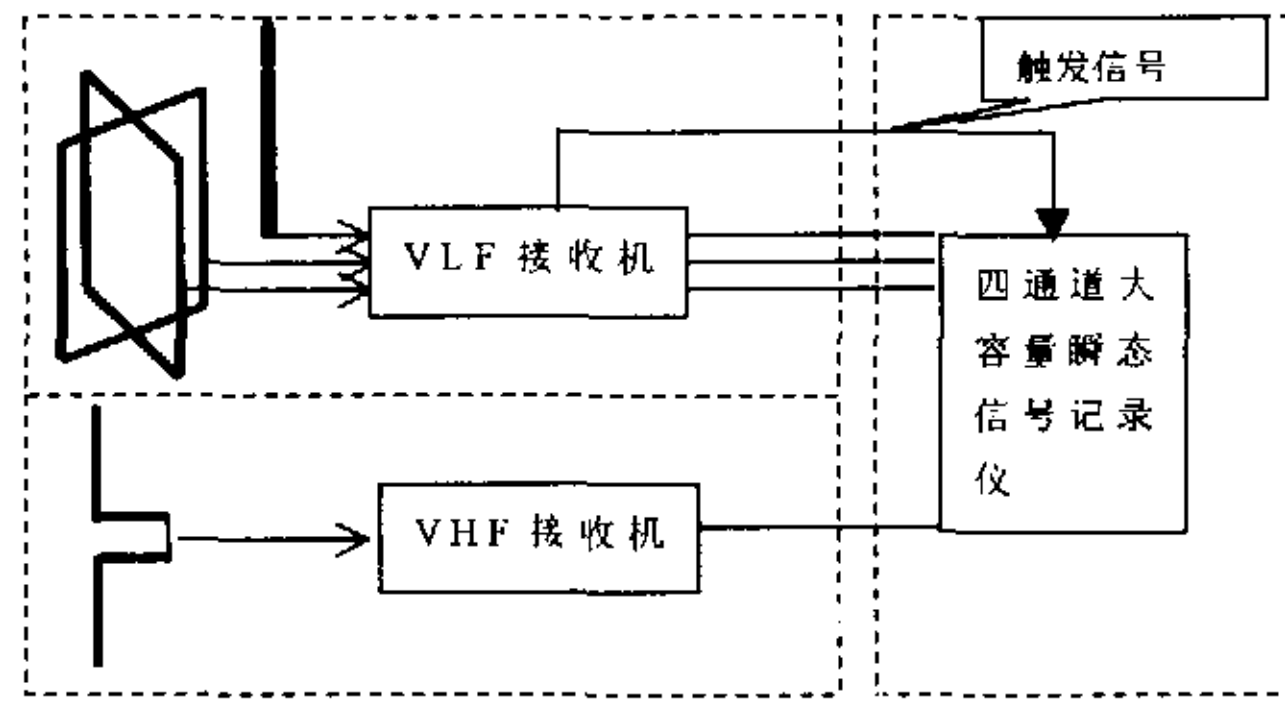


图1 大容量 VLF/VHF 闪电信号采集系统结构框图

互正交的水平磁场接收通道, 每个通道通频带宽度 800 Hz~400 kHz (对于输入阶梯波, 系统 10%~90% 上升时间约 1.25 μs ; 宽度大于 2.5 μs 的方波通过该系统后峰值和半宽度几乎保持不变)。VHF 接收单元是由接收垂直极化分量的偶极子天线 (安装在中国科学技术大学物理楼 7 楼楼顶) 以及窄带放大接收系统组成, 系统中心工作频率 127 MHz, 带宽约 100 kHz。记录单元由控制微机以及瞬态波形记录仪组成, 瞬态记录仪分辨率 8 位, 采样时间精度 0.8 μs , 最大采样容量 1 MB, 对应采样时间长度 838.8 ms, 足够记录绝大多数云闪和地闪放电全过程。系统纪录到的 VLF 电通道数字信号幅度 V 与天线处电场强度 E 之间的换算关系如下:

$$E(\text{V m}^{-1}) = \frac{V(\text{数字单位})}{14.88}, \quad (1)$$

而 VHF 天线处的场强与瞬态记录仪器记录到的数字信号幅度之间存在如下换算关系:

$$E(\mu\text{V m}^{-1}) = V(\text{数字单位}) \times 1.74. \quad (2)$$

整个系统噪声水平约一个数字单位。

数据采集期间与本系统同步运行的还有一个安徽省三站闪电定位站网系统。该系统的主站就设在中国科技大学大气遥感实验室, 紧靠我们的数据采集系统, 其他两站分别设在蚌埠和滁州市气象局内, 三站布局近似等边三角形, 站距约 110 km。为了进一步检验闪电源位置的可靠性, 还收集和参考了安徽省阜阳雷达站雷达图资料, 其中 1998 年部分地闪定位距离与阜阳 714 雷达回波比对显示, 二者距离差别小于 10%。本文分析的数据包括取自 1998 年 4 次雷暴的 177 个地闪以及 1999 年 9 月 14 日雷暴过程发生的 75 次地闪, 其中 1998 年数据只有两个 1 MB 容量水平磁通道信号, 主要用于分析地闪回击 VLF 波形和讨论回击间隔与回击幅度的关系, 1999 年数据包含两个 1 MB 容量的 VLF/VHF 电通道信号以及两个 8 kB 容量的磁通道信号 (确定地闪方位), 主要用来讨论地闪 VLF/VHF 辐射之间的对应关系 (见表 1)。由于发生距离远近不同以及地闪自身强度的因素, 1999 年 75 次地闪过程之间的 VHF 强度差异很大, 但是如果从整个地闪过程的角度来看, 这些地闪过程 VHF 辐射行为基本上是一致的, 强烈、连续的 VHF 辐射总是在首次回击前启动并在回击启动之后停熄, 之后 VHF 辐射表现为一

表 1 本文分析采用数据资料的简要情况

雷暴发生时间	地闪数目	雷暴距离	数据通道
1998-06-28	42	120~200	VLF 水平磁通道
1998-06-30	26	125~200	VLF 水平磁通道
1998-07-01	37	90~150	VLF 水平磁通道
1998-07-02	72	30~60	VLF 水平磁通道
1999-09-14	75	<80	VLF/VHF 电通道

系列间歇性的辐射特征。

3 典型的地闪放电过程 VLF/VHF 辐射场波形分析

3.1 过程概貌

图 2 是 1999 年 9 月 14 日 17:55 在合肥地区大容量信号采集系统记录到的一次负极性地闪放电过程 (以下简称地闪 1755) VLF/VHF 辐射场波形全景图。图中波形是由幅度大于 10 的所有 VLF/VHF 数字信号记录抽取而成, VLF 电信号初始脉冲以及回击脉冲的负极性表示放电过程向下输送负电荷, 单极性 VHF 信号幅度值表示 VHF 辐射波包强度。该地闪发生在合肥东偏南 60° , 距离 30 km。雷达回波资料显示产生该地闪的雷暴云体相对孤立, 直径约 10 km。图 2 的上图 VLF 辐射显示, 地闪 1755 在初始大双极性脉冲序列 (LBPs) 之后, 相继发生了 12 次对地回击事件 (R1~R12), 整个过程总持续时间超过 800 ms; 相邻回击间隔时间依次为 52.7、130.4、1.6、72.5、27.7、100.5、68.0、143.3、21.4、95.9 和 56.4 ms, 平均为 70 ms, 其中第 3 次回击与第 4 次回击间隔只有 1.6 ms。有趣的是, 除了前面 5 次回击幅度接近饱和不便比较前后回击幅度大小外, 从第 5 次回击开始, 当相邻两次回击间隔小于平均间隔 70 ms 时, 后面的回击幅度总是小于前次回击幅度, 相反, 回击间隔时间大于平均间隔 70 ms 时, 后继回击幅度又总是大于前次回击幅度 (见表 2), 我们将在后面的讨论中进一步考察雷暴过程中出现的这一现象。图 2 的下图 VHF 辐射概略显示, 对应于一系列 VLF 辐射

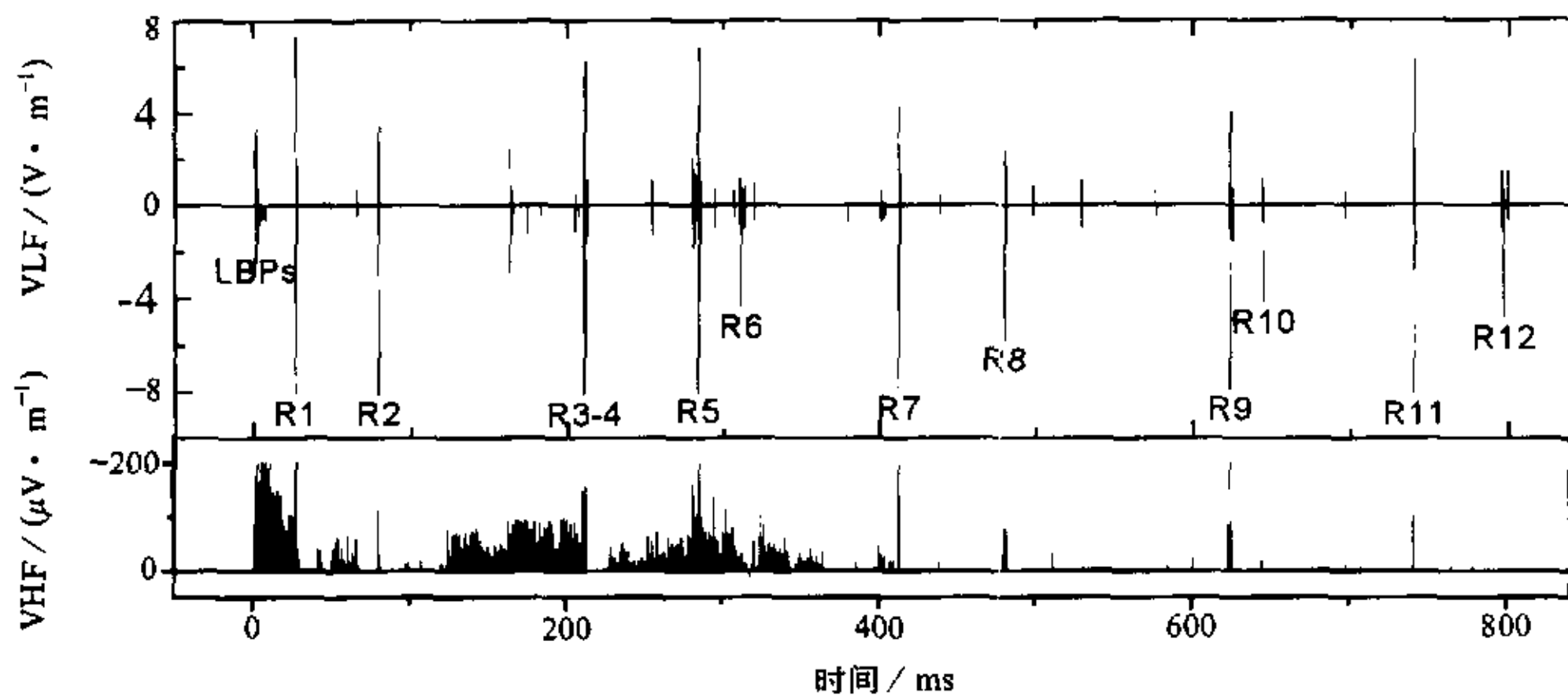


图 2 一次典型 12 次回击地闪过程 VLF 辐射 (上) 以及同步 VHF 辐射 (下) 全景图

脉冲事件发生了一次次强烈的 VHF 爆发, 总体上看在 0~380 ms 期间, VHF 辐射非常强烈, 且呈现为间歇式的准连续辐射, 之后伴随后继回击事件强烈 VHF 辐射更多地表现为分立脉冲式爆发特征 (幅度大于 $200 \mu\text{V m}^{-1}$)。至于地闪 1755 各子过程的 VLF/VHF 辐射特征精细结构以及相互之间的对应关系下面将进一步分析。

3.2 初始击穿过程、梯级先导过程以及首次回击

图 3 给出了地闪 1755 的首次回击和其前面 27 ms 期间的 VLF 和 VHF 辐射场波形对应关系。在头 5 ms 内出现强烈的 VLF 双极性大脉冲序列 (LBPs), 随后 VLF 双极性脉冲幅度迅速减小。这些大脉冲类似于我们曾讨论过的云内放电辐射的负双极性大脉冲^[11], 图 3d 给出了开始 3 ms 内大双极性脉冲序列的幅度谱, 显示该过程辐射能量主要集中在 60 kHz 以下, 谱峰约在 20~40 kHz 附近。VHF 辐射几乎与 VLF 辐射同时启动, VHF 包络在 4~6 ms 期间达到最大, 之后直至 20 ms VHF 幅度呈现极为缓慢地衰减特征, 20 ms 之后直至首次回击启动, VHF 包络幅度几乎不随时间变化。看来这些 LBPs 是地闪的初始云内击穿过程启动的特征性标志。稍加细致观察不难发现, VLF 脉冲幅度大小与 VHF 辐射强度之间的对应关系相当复杂, 事实上, 在 2.9、5.1、6.9、7.4 和 10.1 ms 处有 5 次峰值场强超过 $200 \mu\text{V m}^{-1}$ 的 VHF 脉冲爆发, 但是同步的 VLF 辐射却仅为 $0.2\sim 0.35 \text{ V m}^{-1}$, 最强也不超过 0.7 V m^{-1} , 相应的脉冲半宽为 3~5 μs 。

目前学术界尚未从波形特征上严格界定初始击穿与梯级先导的判据。Krehbiel^[12]认为首次回击发生之前云内发生一系列流光过程, 这些流光既可以是垂直发展的, 也可以是水平发展的, 而梯级先导碰巧由其中的一个流光发展而成并向下扩展。事实上, 一些窄带干涉仪定位结果也显示, 地闪开始阶段云内放电辐射源在空间呈现散乱分布, 但是整体上 VHF 辐射源中心却呈现为缓慢地不断下移趋势, 只是到了某个时刻之后, VHF 辐射源才呈现为有规律地向下扩展直至到达地面。从我们的 VHF 辐射波形来看, 大约在 17 ms 前后 VHF 幅度由缓慢变化趋势过渡到近乎平台发展, 我们认为这可能标志着向下发展的梯级先导开始。如果这样的话, 则梯级先导过程持续大约 10 ms, 大致跟不同作者报道的梯级先导平均持续时间 6~40 ms 符合。

图 3c 显示了首次回击电流峰期间 (这里定义为回击脉冲峰 10% 上升沿到 50% 下降沿之间部分) 及其后大约 200 μs 期间的 VLF/VHF 辐射场对应波形, 明显的是: 该回击电流峰期间 VHF 辐射相当微弱, 平均强度仅为 $17 \mu\text{V m}^{-1}$, 比梯级先导期间强度 $30\sim 70 \mu\text{V m}^{-1}$ 略小, 比起回击电流峰之后出现的强烈 VHF 辐射 (有时大于 $200 \mu\text{V m}^{-1}$) 要弱得多。

表 2 地闪 1755 距离 (30 km) 各次回击简要情况

回击序号 <i>n</i>	回击强度 / V m^{-1}	回击间隔 / ms	回击幅度比 (V_n / V_{n-1})
1	>8.1	-	-
2	>8.1	52.7	-
3	>8.1	130.4	-
4	8.0	1.6	-
5	8.0	72.5	1
6	4.7	27.7	0.59
7	6.3	100.5	1.34
8	6.0	68.0	0.95
9	7.9	143.3	1.33
10	4.4	21.4	0.55
11	>8.1	95.9	>1.86
12	5.0	56.4	<0.61

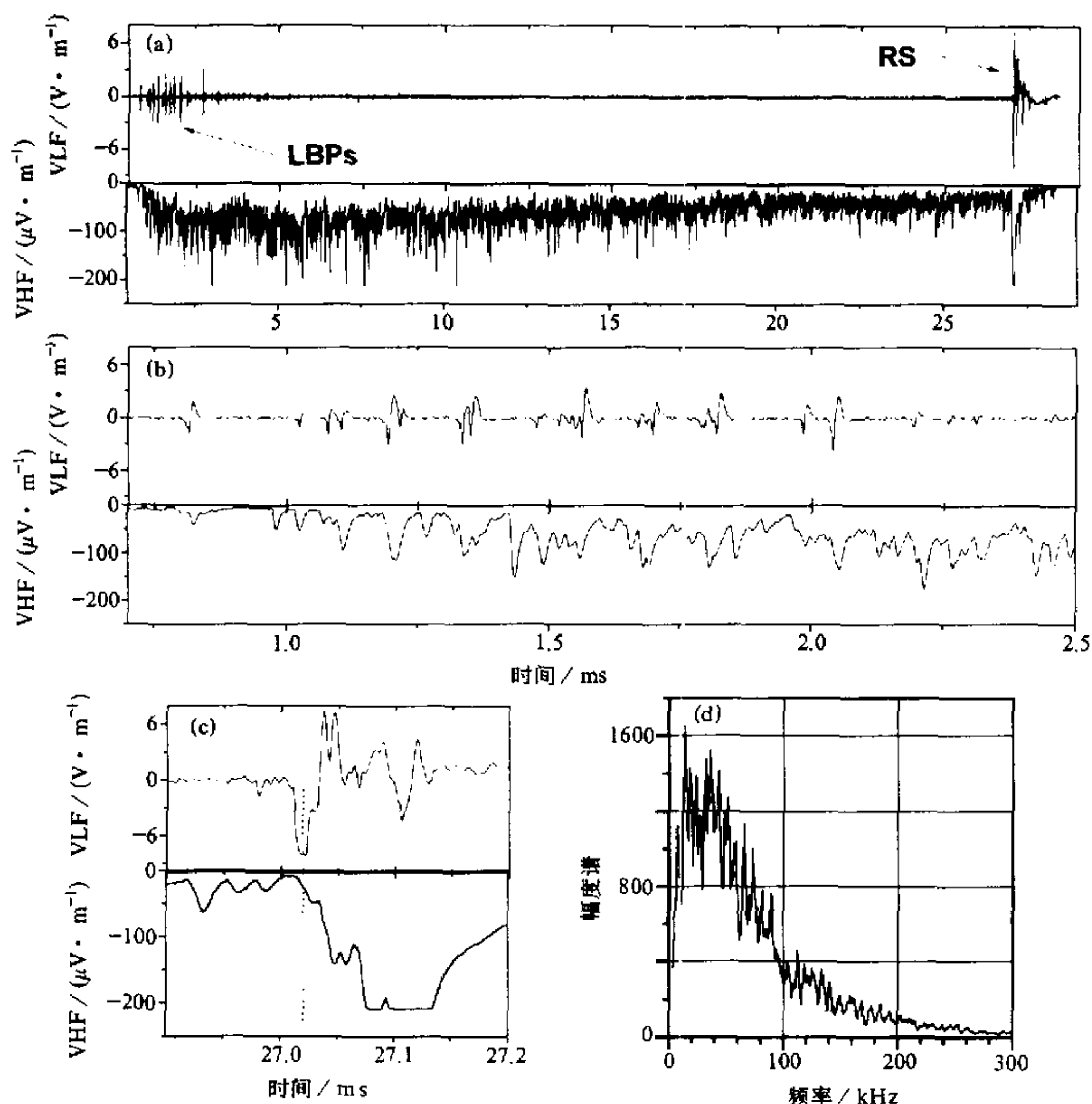


图3 地闪1755首次回击以及预击穿过程VLF辐射以及同步VHF辐射
 (a) VLF/VHF辐射总览; (b) 预击穿过程VLF/VHF辐射波形展开图; (c) 首次回击及其先导过程VLF/VHF辐射波展开图; (d) 预击穿过程VLF辐射幅度谱, 其中谱密度1000相当于 $-85.4 \text{ dB} (\text{V m}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$

3.3 直窜先导和后继回击

Kitagawa 等^[13]曾指出当两次回击间隔较长, 比如大于 100 ms 时, 后面的直窜先导向地面传播时可能会演变成梯级先导, 有人甚至认为这种情况下启动的回击过程应该被看成与首次回击类似。地闪 1755 的第 3 次、第 7 次和第 9 次等三次回击以外的回击间隔时间都短于 100 ms, 我们把它们启动之前 1~2 ms 内看成直窜先导过程 (典型直窜先导发展速度 $1 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$, 扩展范围 5~10 km^[14])。由图 4 和图 5 可以看出, 第 5 次和第 11 次回击之前的 VHF/VLF 辐射场相对较强, 第 11 次回击前的 VHF 幅度呈现两头弱中间强的近似弧型变化特征并在回击启动时停息。图 4 中直窜先导 VLF 波形呈

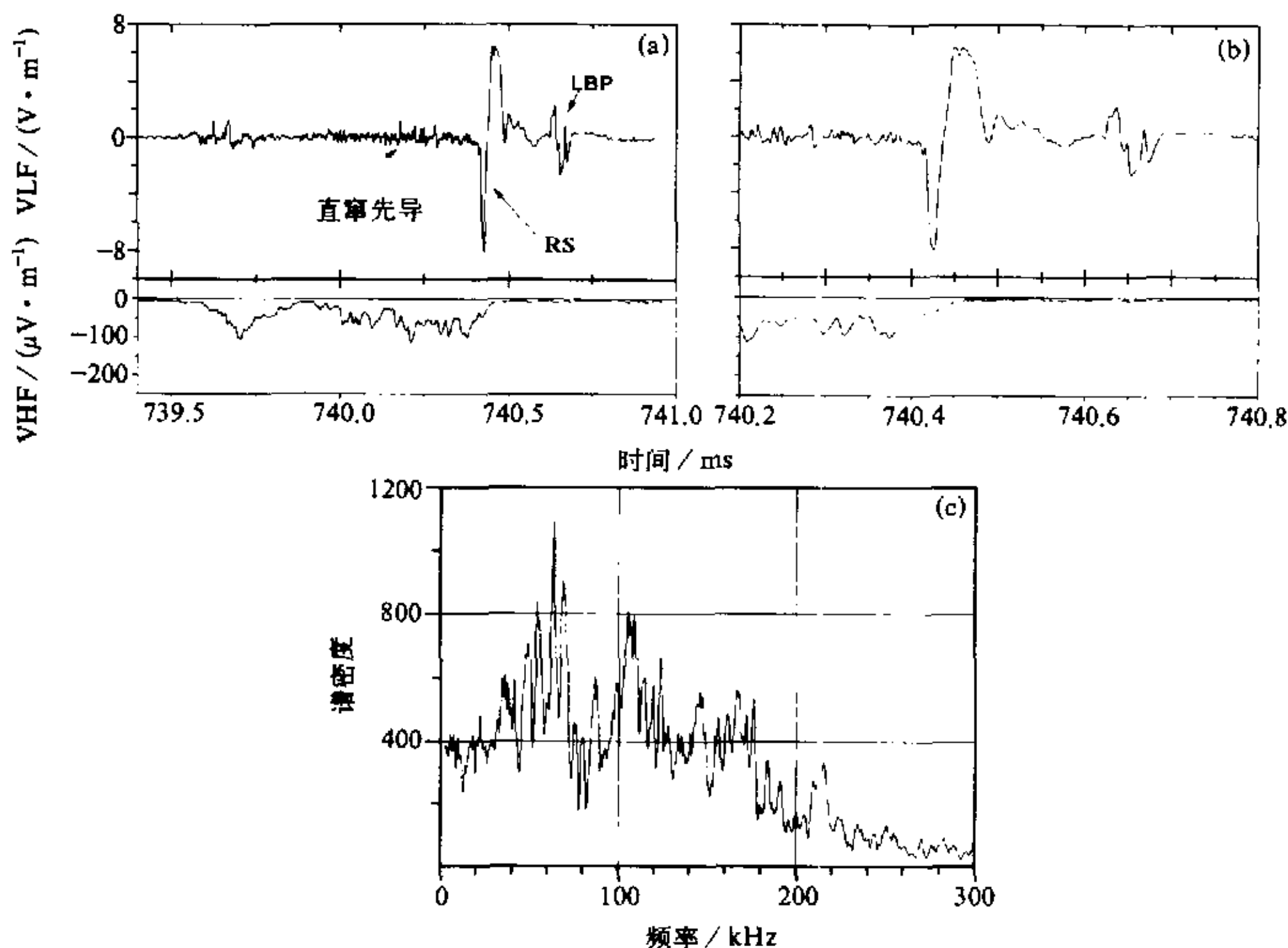


图4 地闪1755第11次回击和其前后云中过程

(a) VHF/VLF辐射波形图; (b) 回击波展开图, 注意到回击之前直窜先导VHF辐射几乎在回击启动时刻停息, 而回击之后的正双极性大脉冲对应的VHF波形上并没有显著的辐射脉冲出现; (c) 回击之前直窜先导VLF辐射频谱, 谱密度1000相当于 $-85.4 \text{ dB} (\text{V m}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$

现为一系列出现频率 10^5 Hz 、半宽 $3 \sim 4 \mu\text{s}$ 的快脉冲序列, 其波形特征与初始击穿过程的 LBP 脉冲序列特征有明显不同。图 4c 给出了这一先导事件的振幅频谱, 辐射能量主要集中在 $40 \sim 160 \text{ kHz}$ 之间, 谱峰约位于 65 kHz 附近, 而且在大约 120 kHz 附近也有一次强烈的次峰出现。不过, 有些后继回击之前的 VLF/VHF 辐射较弱 (如图 6 和图 7 所示的情况), 则看不清楚有如图 4 所呈现的波形精细结构。

第 4~6 次和第 11 次回击电流峰期间平均 VHF 强度分别是 0、17、5 和 $38 \mu\text{V m}^{-1}$, 这一结果表明, 后继回击主电流峰期间可能存在较弱的 VHF 辐射。

3.4 K 事件

按照最近 VHF 窄带干涉仪的观测结果, 有些学者^[6,15]认为: 云内 K 事件和直窜先导的 RF 辐射本质上是相同的, 这一辐射产生自沿着确定电离通道快速运动的负流光前端, 典型的快流光速度为 10^7 m s^{-1} , 持续时间约 $0.5 \sim 1 \text{ ms}$, 并认为 K 事件类似于 Proctor^[16]定义的 Q 噪声。Hayenga^[4]也指出直窜先导和 K 事件之间的区别似乎仅仅在于前者向地面发展并启动回击过程, 而后者则在雷暴云体内水平或者向上前进。图 5b 给出了地闪 1755 第 5 次回击前 4 ms 发生的一次 VLF/VHF 辐射爆发, 持续时间约 1 ms, VLF 波形特征也是一系列半宽约 $3 \sim 4 \mu\text{s}$ 、出现频率约 $1.2 \times 10^5 \text{ Hz}$ 的快脉冲序列, 对应的 VHF 辐射强度呈现两头弱中间强的弧形特征, 图 5d 为该事件的 VLF 振幅

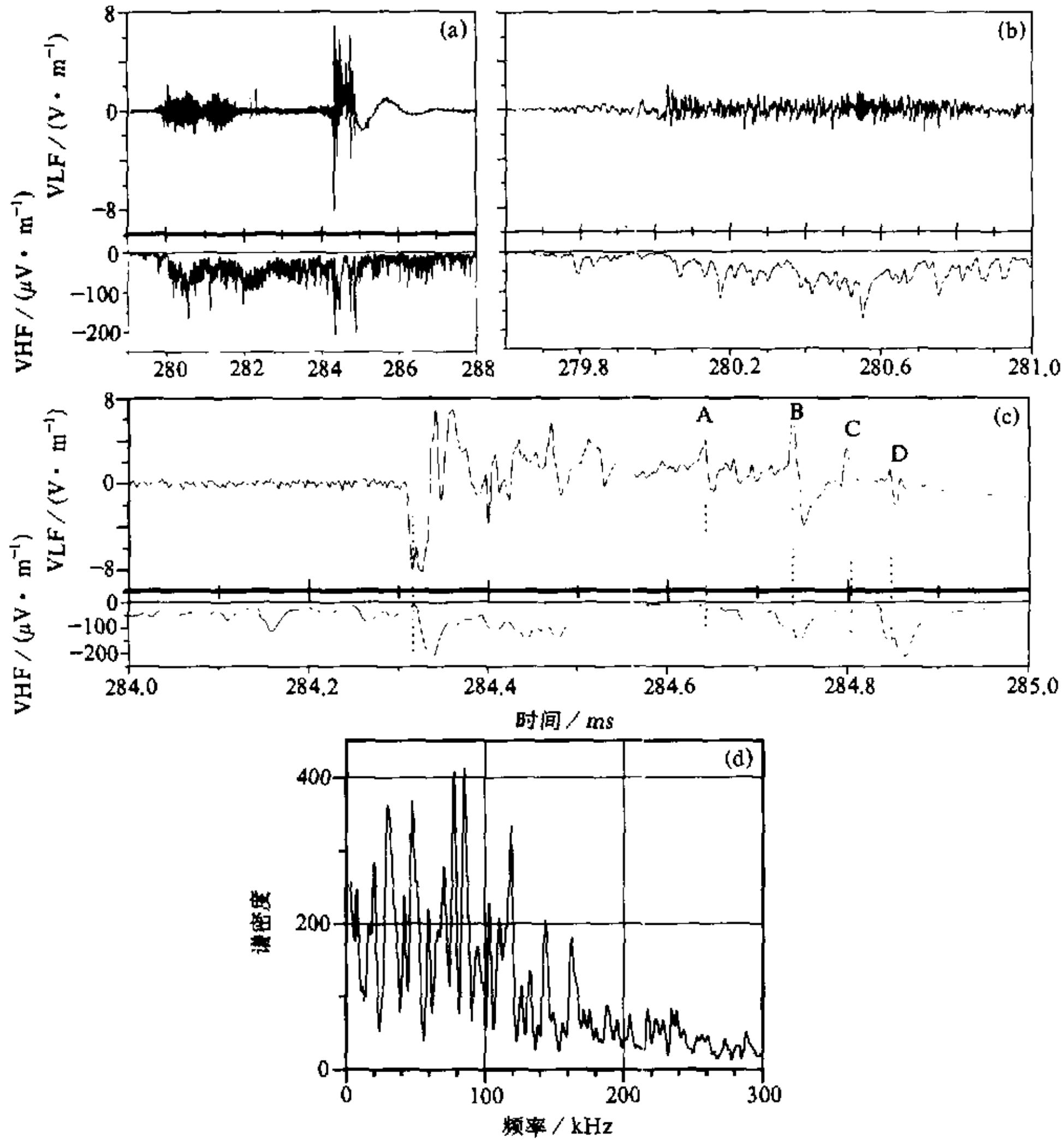


图5 地闪1755第5次回击和回击之前云中过程VLF/VHF辐射
 (a) VHF/VLF辐射总览; (b) K事件波形放大图; (c) 回击后正双极性脉冲(A~D)及其VHF辐射波形展开图; (d) K事件VLF辐射幅度谱, 谱密度1000相当于 $-85.4 \text{ dB} (\text{V m}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$

频谱, 显示辐射能量主要集中在 $40 \text{ kHz} \sim 180 \text{ kHz}$ 之间, 谱峰出现在 80 kHz 附近。这一VLF/VHF辐射爆发事件的时域和频域特征都与图7中的直窜先导类似, 看来这是地闪1755放电过程中的一次K事件。这一过程产生了中等强度(平均强度约 $50 \mu\text{V m}^{-1}$)的VHF脉冲爆发。

3.5 回击电流主峰后的云内放电

图4~7显示, 无论首次回击还是后继回击, 在回击电流主峰之后的 $100 \sim 200 \mu\text{s}$ 期间回击波形下降沿上通常出现一系列次级波形起伏, 并伴随强烈的VHF爆发, 且场

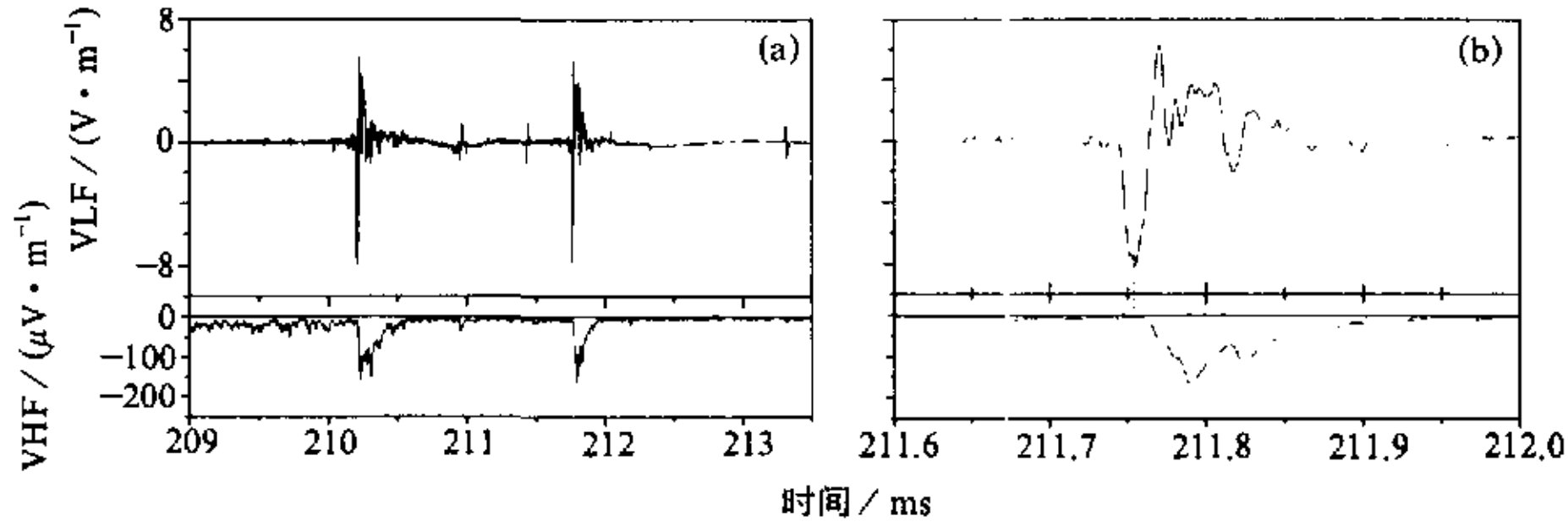


图6 (a) 地闪 1755 中第 3 次和第 4 次回击过程 VHF / VLF 辐射波形;
(b) 第 4 次回击 VLF / VHF 辐射波形展开图

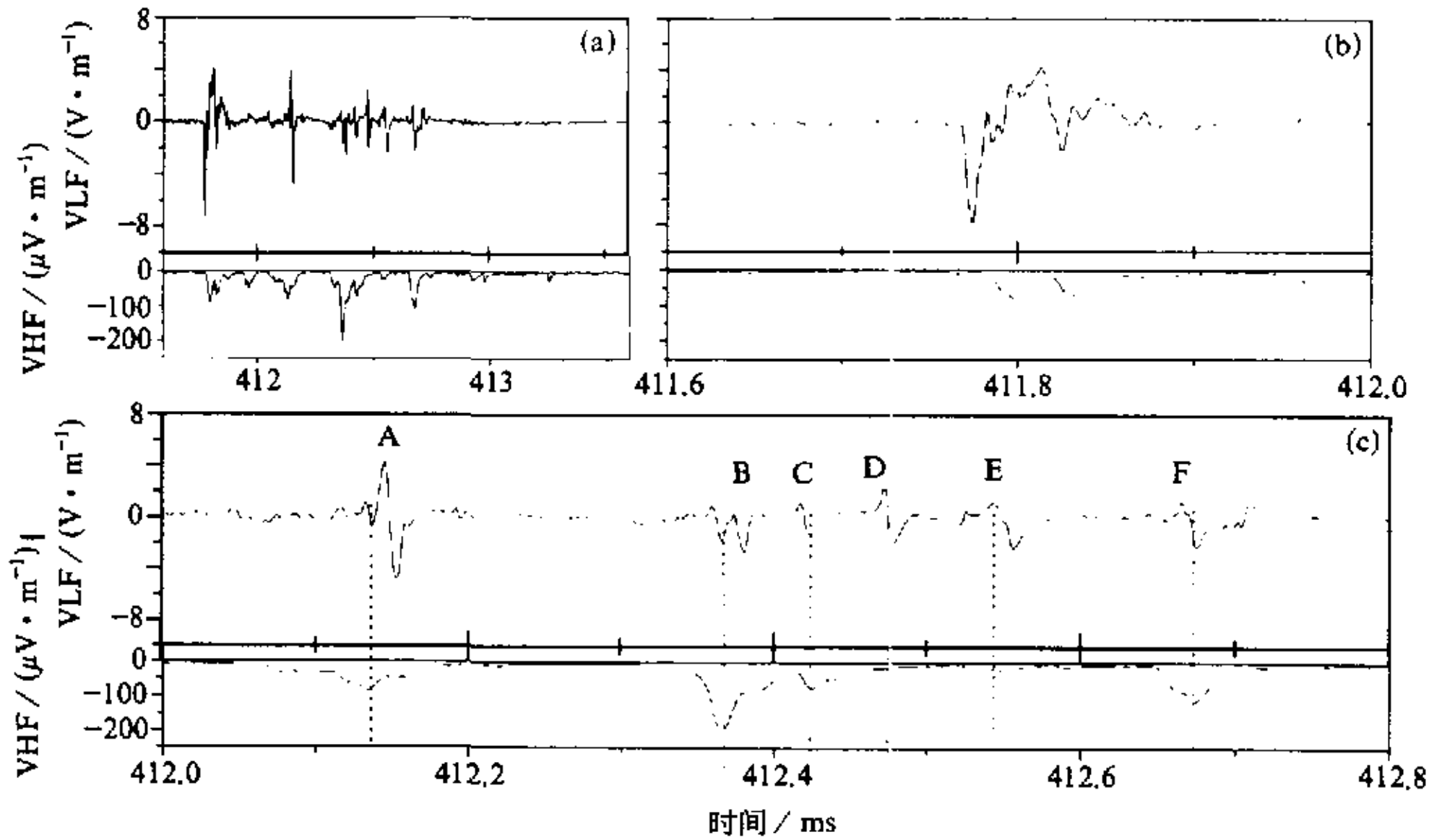


图7 地闪 1755 中第 6 次回击及回击后云中过程 VHF / VLF 辐射
(a) 辐射总览; (b) 第 6 次回击波形展开图; (c) 回击后
大双极性脉冲辐射波形展开图

强常常可以达到 $200 \mu\text{V m}^{-1}$ 以上。Le Vine 等^[17]建议: 回击通道 (尤其进入云中以后) 的曲折和分叉可以产生高频辐射, 值得进一步探讨。

图 7c 和图 5c 显示, 在回击主峰停熄之后几百微秒, VLF 波形上又出现一到几次分立的大双极性脉冲 (图 7c 中的脉冲 A~F, 图 5c 中的脉冲 A~D), 对应的 VHF 辐射或强或弱, 图 7c 中的 B 脉冲和图 5c 中的 D 脉冲对应的 VHF 强度都在 $200 \mu\text{V m}^{-1}$ 以上, 而图 5c 中脉冲 A 以及图 7c 中的 D 脉冲几乎不伴随显著的 VHF 辐射。值得指出, 这些大脉冲事件通常紧接后继回击之后出现, 在首次回击之后还没有观测到类似的现象, 而且, 越是靠近地闪后期上述大脉冲极性为正的可能性越大 (相应的回击为负极性)。我们系统记录的负极性电场对应负电荷向下运动 (或者正电荷向上运动), 则上面的正极性脉冲要么对应主负电荷区的负电荷向上移动, 要么对应云体上部正电荷区的正

电荷向下输送。考虑到序号越高的后继回击之后出现大脉冲极性为正的可能性越大, 我们认为, 这些正极性脉冲很可能是主负电荷中心与上部正电荷区之间的放电, 即随着一次次回击的反复进行, 地闪放电区域逐渐向上部正电荷区延伸。

4 地闪过程回击 VHF/VLF 波形统计特征

4.1 地闪回击 VLF 波形特征

从图 3~7 可以看出, 典型地闪回击波形由一个陡峭的上升沿后跟一个相对缓慢变化的下降沿构成, 而且下降沿上通常叠加有一到数个次峰。地闪回击波形上升沿反映了回击电流变化快慢, 而首次过零时间则与电流在通道内的传播状态紧密相关^[18], 本文主要统计回击波形 10%~90% 上升时间以及过零时间两个特征, 这两个特征不仅在雷电物理研究中而且在回击防护等工程应用中都具有重要意义。特别指出, 这里的过零时间指 10% 上升时刻与辐射场首次过零时间间隔, 与传统的以回击开始点为起点的过零时间定义相比, 这里定义的过零时间可能偏小 2~4 μs 。图 8 给出了基于地闪回击磁场波形的 10%~90% 上升时间以及过零时间统计特征, 而且在统计过程中剔除了两个磁通道信号幅度都小于 40 数字单位的回击信号, 时间测量误差不大于 1.6 μs (两个采样间隔)。262 例地闪回击平均 10%~90% 上升时间 5.4 μs (标准差 1.6 μs), 有 95% (247/262) 地闪回击 10%~90% 上升时间落在 3.8~7.8 μs 区间内, 最大概率区间 5.6~6.4 μs , 只有 5% 不到在 9 μs 以上。262 例地闪回击平均过零时间为 23.8 μs (标准差 7.0 μs), 而只有 9 例回击过零时间大于 40 μs 。我们在统计过程中并没有刻意区分首次回击和后继回击, 我们指出这里给出的统计结果更多情况下反映了后继回击波形特征。Cooray 等^[19]报道在斯里兰卡观测到的首次回击 0%~100% 上升时间平均为 4.6 μs , 后继回击过零时间平均 40 μs , 在瑞典观测到的地闪后继回击过零时间平均为 49 μs , Lin 等^[20]在美国佛罗里达观测到的首次回击过零时间 52 μs , 后继回击过零时间平均为 36 μs , 这都与本文的观测结果合理地一致。值得指出, 我们的统计对象是 30~200 km 范围内发生的地闪回击波形, 传播衰减效应可能引起回击初始峰加宽 2~4 μs , 进而导致观测到的 10%~90% 上升时间可能比实际值偏大^[21]。

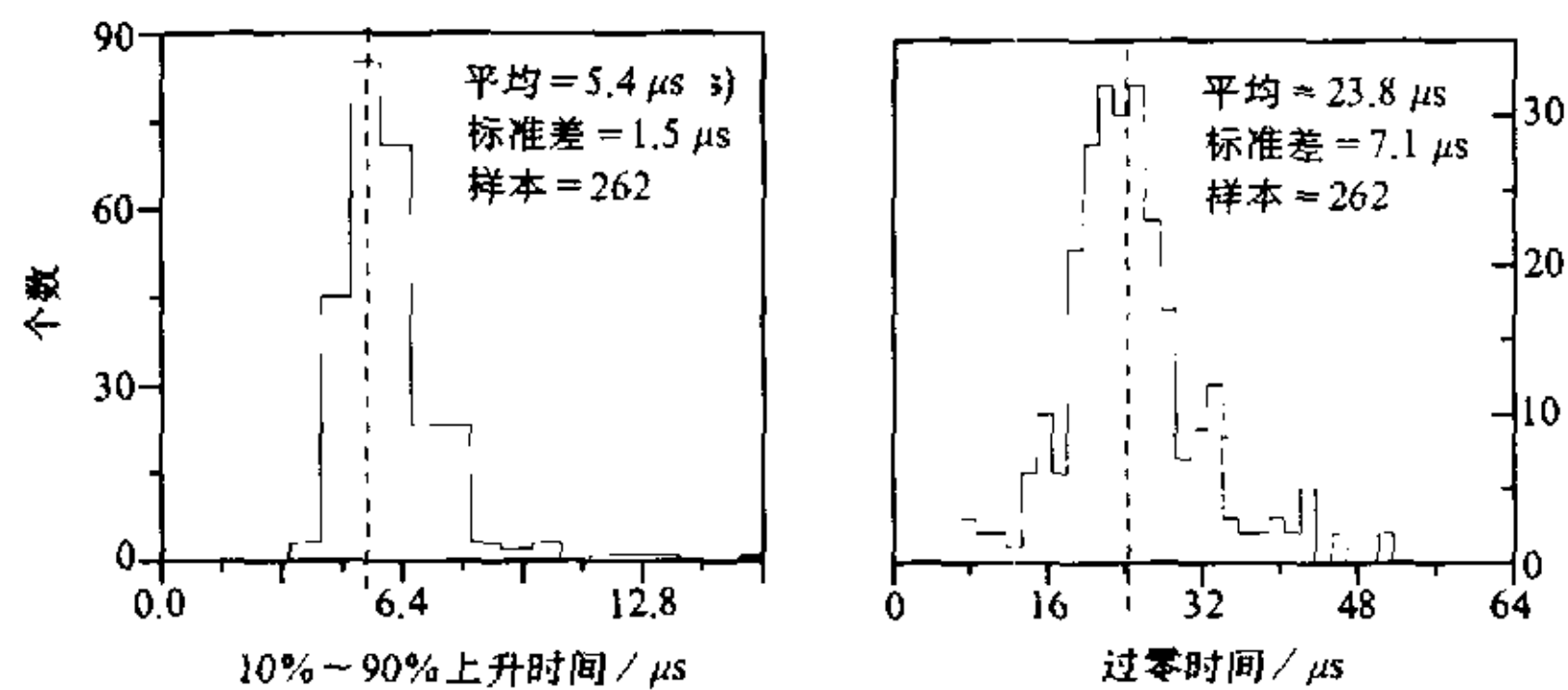


图 8 地闪回击 10%~90% 上升时间以及过零时间频率分布

4.2 地闪回击过程 VHF 辐射特征

从图 4~7 可以看出, 地闪回击期间 VHF 辐射相当复杂, 地闪首次回击期间总是可以发现强烈的 VHF 辐射发生, 在后继回击期间并不都能探测到显著的 VHF 辐射。在回击启动后几十微秒期间内, VHF 辐射特征与先导期间 VHF 辐射特征变化不大, 之后 VHF 辐射突然增强, 一系列包络宽度 $10\sim 30\ \mu\text{s}$ 的 VHF 脉冲在持续大约 $200\sim 800\ \mu\text{s}$ 后停熄 (有些情况下这些 VHF 辐射可以持续几毫秒)。我们认为回击启动之后 VHF 跃变是回击后强烈 VHF 辐射启动的标志, 图 9 给出了强烈 VHF 峰相对于地闪 VLF 峰延迟时间的统计分布以及回击期间强烈 VHF 辐射的持续时间分布。另外, 还统计了 10^8 例回击电流主峰期间 VHF 强度与回击后最强 VHF 辐射强度之比, 有 7 例比值在 $15\%\sim 25\%$ 之间, 有 81 例 (75%) 的比值小于 10%, 这显示回击后强烈 VHF 辐射不是由回击电流峰产生。事实上, 如果假定回击电流传播速度 $10^8\ \text{m s}^{-1}$, VHF 峰相对 VLF 峰时间延迟取 $50\ \mu\text{s}$, 则最强 VHF 辐射出现时回击电流在通道内传播距离大于 5 km, 显然最强 VHF 辐射应该是云内放电过程产生。Brook 等^[2]报道约有 50% 地闪回击伴随 VHF 辐射, 而且 VHF 辐射滞后地闪回击 $60\sim 80\ \mu\text{s}$, 这与我们的观测结果一致。

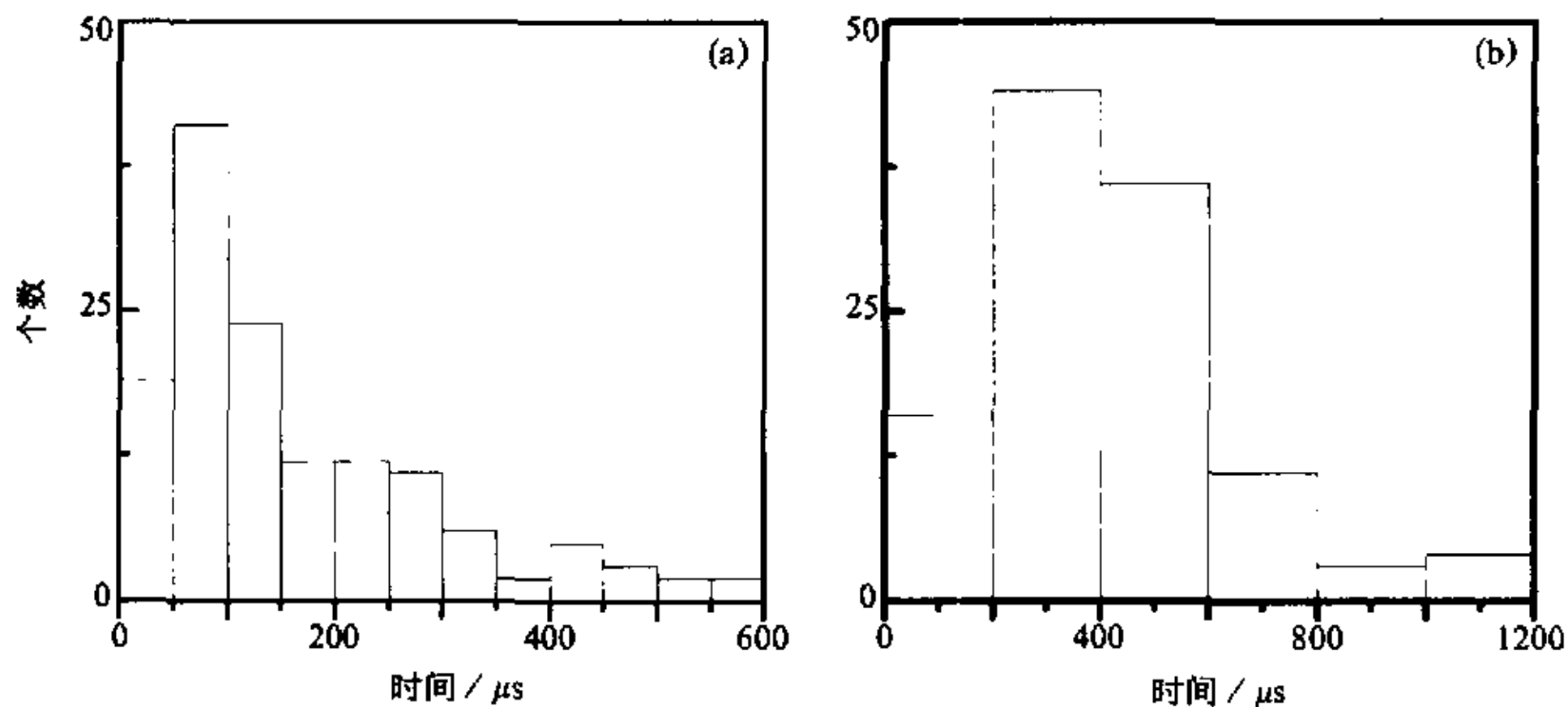


图 9 (a) 回击期间 VHF 峰滞后 VLF 峰时间频率分布; (b) 回击 VHF 辐射持续时间的频率分布

5 结论和讨论

5.1 最强 VHF 辐射源

我们的观测结果显示, 地闪首次回击之前的初始击穿过程以及地闪电流峰之后的云内放电都可以产生最强的 VHF 辐射, 有时候回击之间的云中过程也能产生最强的 VHF 辐射。这些最强 VHF 辐射, 有些对应着 VLF 波形上面的大双极性脉冲 (如图 5、图 7), 这与 Le Vine^[22]的观测事实一致, 另外一些最强 VHF 辐射并不对应显著的 VLF 辐射 (如图 3a), 这是 Le Vine 没有观测到的。从这些最强 VHF 辐射对应的放电过程发生时间来看, 初始击穿过程发生在首次回击之前, 很可能伴随着云内初始通道形

成过程, 而回击主电流峰之后的云内放电很可能对应已有通道的扩展以及新通道的形成。Le Vine 等^[17]就闪电回击通道曲折和分杈对辐射场波形影响进行了模拟计算, 假定回击电流 30 kA, 结果显示相对于垂直无曲折通道情况, 曲折和分杈通道明显提高了 100 kHz 以上的辐射频谱分量, 在 127 MHz 辐射频谱值约 $1.0 \times 10^{-4} \mu\text{V m}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ (归一化到 100 km)。而地闪 1755 回击电流峰值估计约 25 kA, 回击主峰后的最强 VHF 辐射频谱峰值达到 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{V m}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ (订正到 100 km), 超过模拟计算值一个数量级 (如果考虑传播衰减, 实际的射频强度可能更大)。Cooray 等^[5]虽论述了回击过程先导电晕鞘崩溃是产生 VHF 辐射的因素之一, 但并未做定量的强度估算。看来, 产生地闪最强 VHF 辐射的物理过程和机理还有待深入研究。

5.2 VLF 辐射与 VHF 辐射之间的对应关系

从本文的观测结果来看, VLF 辐射与 VHF 辐射之间的对应关系相当复杂, 考虑到仪器系统带宽和传播对信号波形的影响, 这里不在微秒时间尺度上深究 VLF 信号峰与 VHF 辐射峰出现的先后问题, 而是在几十微秒时间尺度 (相当于 VLF 波形 LBP 持续时间) 上观察 VLF 辐射与 VHF 爆发之间的对应性; 就地闪 1755 来说, 地闪 VHF 辐射与 VLF 辐射两者对应关系大体上可以分为三种情况:

第一, 低频辐射强, 射频辐射也强, 即 VLF 辐射信号幅度在 2V m^{-1} 以上, 伴随的 VHF 信号波包幅度大于 $80 \mu\text{V m}^{-1}$, 比如图 3、图 7 所给出的回击峰后出现 VLF 大幅度起伏都伴随强烈的 VHF 爆发: 图 3b 上图 22 ms 以前的大双极性脉冲阶段以及图 5c 和图 7c 上的一些正极性双极性大脉冲, 也对应出现强烈 VHF 爆发。另外, 有的 K 事件和直窜先导 (如图 4a) 都出现很强的 VLF/VHF 辐射。有多位研究者也报道过类似的现象^[3,6,16,23], 并认为初始击穿, K 事件等云内放电同时有 VLF 辐射和射频辐射出现, 但是地闪 1755 明显地显示了一个有趣的现象: 在初始击穿阶段以及第 4 次回击以前, 双极性大脉冲极性保持与回击极性相同, 而在第 5 次回击之后的双极性大脉冲却倾向于与回击具有相反的极性即正极性。

第二, 低频辐射强, 射频辐射却非常弱, VLF 幅度通常大于 2V m^{-1} , 但是同步的 VHF 辐射信号包络幅度常常小于 $40 \mu\text{V m}^{-1}$ 。比如地闪 1755 各次回击主电流峰期间, 图 5c 上的 LBP 脉冲 A 以及图 7c 上的 LBP 脉冲 D 期间, 均表现为“低频强, 射频弱”的对应关系。虽然有几位作者^[2,4,6]都提到了回击启动后出现数十至二百微秒的射频辐射很弱的现象, 不过地闪 1755 在回击后强烈的 VLF 辐射对应弱 VHF 辐射尚未见有人明确报道, 这是否是类似对地回击的云内小回击事件呢? 这一现象值得注意。

第三, 低频弱, 射频强, 即 VLF 辐射强度通常在 1V m^{-1} 以下, 伴随的 VHF 辐射信号包络通常大于 $80 \mu\text{V m}^{-1}$, 比如初始击穿阶段 22 ms 之后和梯级先导期间, 有数次 VHF 辐射爆发包络幅度都在 $200 \mu\text{V m}^{-1}$ 以上, 而对应的 VLF 辐射信号幅度却很小。由于我们观测系统 VHF/VLF 天线都只感应极化垂直电场分量, 这种现象很难用放电通道水平取向加以解释。看来, 闪电过程 VHF 和 VLF 辐射相互关系较为复杂, 有待继续深入探讨。

5.3 K 事件

我们的观测结果进一步揭示了一种 K 事件和直窜先导的波形精细结构, 它们呈现为一个出现频率 10^5 的快脉冲序列, 对应的频谱能量主要集中在 40~180 kHz 之间, 与

初始击穿过程频谱特征显著不同; VHF 辐射波包演化特征都表现为两头小中间大的弧形结构。事实上, 关于 K 事件^[23]最初是根据闪电电场变化记录中持续时间约 1 ms 的小幅度的阶梯电场变化特征来定义, 学术界对其特征和机理进行了长期的研究, 目前仍然有两种不同看法, 其一是 Ogawa 等^[24]提出的 K 过程是云内或者地闪放电过程中反冲流光 (recoil streamer) 或者小回击事件, 仅仅发生在云闪后期或者地闪回击间隙。Le Vine^[22]根据观测和模拟计算, 提出与云内最强烈的射频辐射爆发相伴出现的一种持续时间 10~20 μs 的大双极性快脉冲是反冲流光事件产生的, 是一种快的 K 变化。不过能否用快场变化和快电流变化机制解释最强射频爆发的现象尚存疑问。其二, 是前面已经提到过的 Hayenga^[4]和 Rhodes^[6]等的观点, 他们除了依据快电场变化观测资料, 还增加了 VHF 干涉仪的观测资料, 发现该过程持续事件 1 ms, 流光发展速度 10⁷~10⁶ m s⁻¹ 与直窜先导持续时间和行进速度一致, 甚至给出了三例向下发展但最终未能及地的快流光过程 (attempted leader)。他们把上面那种快流光称为 K 流光, 认为它类似于直窜先导, 虽然直窜先导启动了回击 (反冲事件), 但是直窜先导本身并不是反冲事件。这种观点除了符合 K 事件的经典定义, 还进一步指出了它是一种快流光, 是有合理性的, 至少可以认为是云闪和地闪放电过程中 K 事件的一种表现形态。

5.4 回击间隔与回击幅度关系探讨

表 2 显示, 两次回击间隔较短时, 后面的回击比前面回击幅度小, 相反, 两次回击间隔较大时, 后面回击幅度要大。事实上, 为什么有些回击间隔长而另外一些回击间隔短一直是困扰大气电学界的难题。研究回击间隔与回击幅度之间的关系可能会提供某些解答问题的线索。

图 10 分别给出了根据 1998 年地闪资料统计的间隔小于 40 ms 和间隔大于 100 ms 时后面回击与前面回击的幅度之比 ($R = V_n / V_{n-1}$) 的频率分布。可以看出, 两种情况下 R 的差异是明显的: 当相邻回击间隔小于 40 ms 时, 有 82% 的个例 $R < 1$, 85 例平均结果为 0.83; 当回击间隔大于 100 ms 时, $R < 1$ 所占比重 43%, 103 例的平均结果为 1.18, 即当两次回击间隔小于 40 ms 时, 后面回击倾向于比前面回击弱, 而当两次回

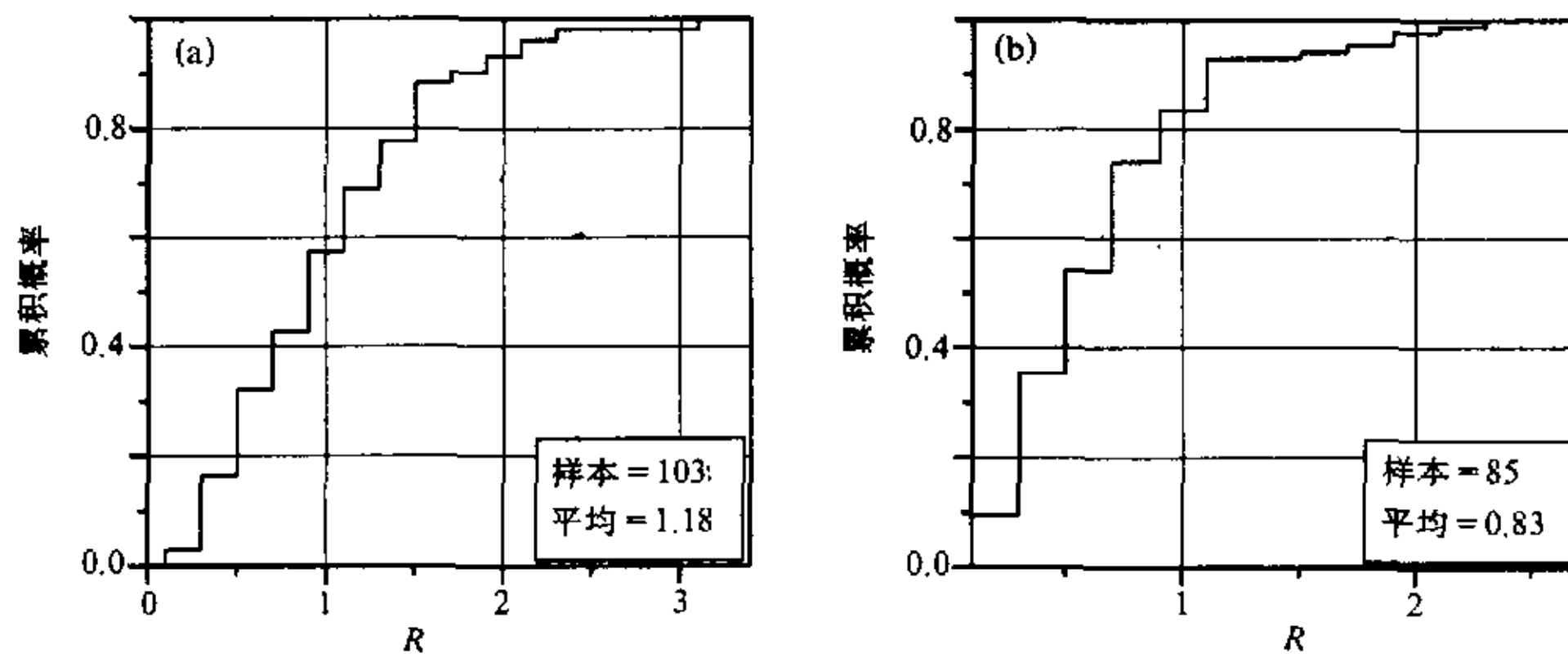


图 10 回击间隔大于 100 ms (a) 以及回击间隔小于 40 ms (b) 时 R 统计分布 (R 定义为后面回击幅度与当前回击幅度之比 $R = V_n / V_{n-1}$)

击间隔超过 100 ms 时, 后面回击比前面回击强的概率大。既然回击强度与云内电荷积累数量有关, 上述倾向性表明, 云内电荷聚集过程可能与回击间隔之间有某种关联。可能的解释是, 经过较长时间间歇之后, 先前回击通道导电性迅速降低, 有利于云内电荷大量积累, 后继回击强度大于前次回击强度的可能性较大, 如果两次回击间歇较短, 闪电回击通道还保持某种程度的导电特性, 不利于云内电荷大量聚集, 后继回击幅度比前面回击弱的可能性大。当然, 回击间隔与后继回击幅度之间的制约关系以及决定回击次数的因子十分复杂, 有必要做进一步的研究工作。

总之, 上面讨论了大容量观测系统观测到的地闪过程及其子放电过程的 VLF/VHF 辐射特征。我们的大容量观测系统可以完整地记录闪电放电过程辐射全景, 有利于我们对闪电过程的各子过程进行深入细致的研究。今后, 增加 VHF 定位并配合 VLF/VHF 大容量观测, 进一步积累不同雷暴条件下的观测资料是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 吕达仁, 陈仲文, 我国某些地区的雷暴射电特征, 大气所集刊第4号, 北京: 科学出版社, 1976, 36~51.
- 2 Brook, M. and N. Kitagawa, Radiation from lightning discharges in the frequency range 400-1000 MC/s, *J. Geophys. Res.*, 1964, **69**(12), 2431~2434.
- 3 Krider, E. P. and C. D. Weidman, The temporal structure of the HF and VHF radiation produced by intracloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(c9), 5760~5762.
- 4 Hayenga, C. O., Characteristics of lightning VHF radiation near the time of return strokes, *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(D1), 1403~1410.
- 5 Cooray, V. and H. Perez, HF radiation at 3 MHz associated with positive and negative return strokes, *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D5), 10633~10640.
- 6 Rhodes, C. T., X. M. Shao and P. R. Krehbiel et al., Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D6), 13059~13082.
- 7 郝秀书, 刘欣生, 王怀斌, 闪电的20 MHz辐射与放电过程, 高原气象, 1993, **9**(1), 93~97
- 8 董万胜, 刘欣生, 张义军, 一次人工触发闪电的观测, 科学通报, 2001, **46**(5), 427~432.
- 9 Pierce, E. T. Latitudinal variation of lightning parameter, *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**, 194~195.
- 10 陶善昌, 周秀骥, 闪电单站定位——仪器、方法及现场试验, 科学通报, 1992, **37**(21), 1970~1973.
- 11 Zhu Baoyou and Tao Shanchang, Characteristics of large pulses of radiated fields from cloud flash discharges, *Acta Meteor. Sinica*, 1997, **11**(3), 352~363.
- 12 Krehbiel, P. R., M. Brook and R. McCrory, An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground, *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**, 2432~2456.
- 13 Kitagawa, N., M. Brook and E. J. Workman, Continuous currents in cloud-to-ground lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 1962, **67**, 637~647.
- 14 Orville, R. E. and V. P. Idone, Lightning leader characteristics in the thunderstorm research international program (TRIP), *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**, 11177~11192.
- 15 Shao, X. M., P. R. Krehbiel, R. J. Thomas and W. Rison, Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 2749~2783.
- 16 Proctor, D. E., VHF radio pictures of lightning, Ph. D. Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 1976
- 17 Le Vine, D. M. and R. Menghini, Simulation of radiation from lightning return strokes: The effects of tortuosity, *Radio Science*, 1978, **13**(D5), 801~809.
- 18 McLain, D. K. and M. A. Uman, Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke, *J. Geophys. Res.*, 1971, **76**, 2104~2105.
- 19 Cooray, V. and S. Lundquist, Characteristics of the radiation field from lightning in Sri Lanka in the tropics, *J.*

- Geophys. Res.*, 1985, **90**(D4), 6099~6109.
- 20 Lin, Y. T., M. A. Uman and J. A. Tiller, et al., Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two station measurements, *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**, 6307~6314.
- 21 Cooray V. and S. Lundquist, Effects of propagation on the rise times and the initial peaks of radiation fields from return strokes. *Radio Science*, 1983, **18**(3), 409~415.
- 22 Le Vine, D. M., Sources of the strongest RF radiation from lightning, *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(c7), 4091~4095.
- 23 Uman, M. A., *The Lightning Discharge*, Int. Geophys. Ser., Vol. 39, San Diego, California: Academic, 1987.
- 24 Ogawa, T. and M. Brook, The mechanism of the intracloud lightning discharge, *J. Geophys. Res.*, 1964, **69**, 5141~5150.

Observations of Cloud-to-Ground Lightning Discharge by Using the Bulky VLF / VHF Acquisition System

Zhu Baoyou, Liu Yifeng and Tao Shanchang

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract A multi-channel bulky acquiring system, which can synchronously record VLF / VHF signals radiated during lightning discharges with a time resolution of $0.8 \mu\text{s}$ for about more than 800 ms is described. The general view of VHF radiation as well as associated VLF radiation produced by a typical cloud-to-ground (CG) lightning flash is presented. This flash lasts about more than 800 ms and has in total 12 return strokes with a mean interstroke interval of about 70 ms. The case study of this flash shows that: (1) In view of the total discharge, VLF radiation events are accompanied by VHF radiation events. The flash tends to produce intermittently a series of quasi-continuous strong VHF radiations for the first 380 ms and then a series of isolated VHF bursts occur for the rest of time. (2) The strongest VHF radiation can be produced by both preliminary breakdown before the first return stroke and extension of old channel or formation of new channel after the return stroke while VHF radiation associated with the return stroke peak is quite weak. It is noted that during the preliminary breakdown and the Intermission between return strokes, strong VHF radiations are observed for more than once to associate with weak or quiet VLF radiations. (3) Dart leaders as well as a type of K events produce a train of VLF pulses (about $3 \sim 4 \mu\text{s}$ in half width) at a frequency of about 10^5 pulses per second for a duration of about 1 ms. The amplitude spectrum of these events tends to peak in the range of 60~90 kHz. (4) Statistics on VLF / VHF waveforms of return strokes in the Changjiang-Huaihe region of Anhui Province is also presented. It is interesting to note that the former of two successive return strokes at an interval of smaller than 40 ms tends to be more powerful than the latter, while the case with an interval of greater than 100 ms shows a reverse tendency.

Key words: CG lightning; return stroke; initial breakdown; dart leader; VLF / VHF