

伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测^{*}

祝宝友 陶善昌 谭涌波

中国科学技术大学地球和空间科学系,合肥,230026

摘 要

闪电过程中一类双极性脉冲辐射伴随的超过常规闪电一个数量级的 VHF 辐射是卫星观测的穿越电离层的脉冲对(TIPPs)的来源。文中给出了在中国上海地区观测到的该类放电事件产生的 78 例双极性窄脉冲。典型的双极性窄脉冲上升时间约 $1.2 \mu\text{s}$, 初始峰宽度约 $2-3 \mu\text{s}$ 、半宽约 $1 \mu\text{s}$, 整个脉冲持续时间约 $15 \mu\text{s}$, 脉冲幅度与地闪首次回击幅度相当, 过冲幅度约为初始峰幅度的 $1/3$ 。这类脉冲波形特征与普通闪电双极性脉冲波形特征差异明显。根据空间双极性脉冲被电离层以及地面—电离层反射的时间延迟并假定电离层高度为 85 km , 估算了这些双极性窄脉冲发生高度。11 例负极性脉冲(对应上面负电荷区对下部正电荷区之间的放电)中有 10 例脉冲发生高度在海拔 $14.0-15.0 \text{ km}$, 一例出现在负地闪初始击穿阶段的脉冲发生高度为海拔 6.4 km 。67 例正极性窄脉冲发生高度位于海拔 $7-12 \text{ km}$, 平均海拔 9.4 km 。利用传输线电流模式以及偶极子辐射近似估计了电流在通道内传播时间以及放电电流参数, 78 例平均结果显示电流从通道底部传播到顶部经历的时间约 $1 \mu\text{s}$, 电流矩约为 $5 \text{ kA} \cdot \text{km}$ 量级。我们推断放电通道长度约 $100-300 \text{ m}$, 放电电流幅度具有 20 kA 量级, 电流传播速度与光速可比拟、具有 10^8 m/s 量级。

关键词: 双极性脉冲, TIPPs, 闪电放电, VHF 辐射。

1 引 言

20 世纪 80 年代初 Le Vine^[1]报道一类持续时间 $10-20 \mu\text{s}$ 的双极性脉冲与闪电过程中最强 RF 辐射相关。这类伴随了异常强烈高频辐射的脉冲被 Willett^[2]称为双极性窄脉冲, 其极性有正有负, 脉冲幅度与地闪回击幅度相当。这些脉冲常常单独出现, Smith^[3]认为它们是由一类称为袖珍云闪(Compact Intracloud Discharges, CIDs)的放电产生以区别于常规地闪和云闪放电。20 世纪 90 年代, 这类脉冲以及相关的放电过程再次引起电学界的重视, 它们伴随的强烈射频辐射可以穿越地球电离层而被卫星上的 VHF 传感器探测到, 即穿越电离层的脉冲对(Trans-Ionosphere Pulse Pairs, TIPPs)^[4]。这些 TIPPs 会严重干扰卫星与地面之间的无线电通讯, 可能改变中高层大气电学特性、甚至产生中层大气放电现象。1997 年发射的 FORTE 卫星正式把

TIPPs 列为主要科学探测目标之一, 期望通过空间 VHF 观测配合地面电场站网观测澄清这些 TIPPs 的源, 获得相关放电过程更多的信息^[5-7]。

地面上对这一放电事件进行较为详细的观测研究要数 Smith^[8]的工作, 其利用多站电场变化以及宽带 HF 观测资料对这些事件进行定位, 并把定位结果与雷达图像进行比较, 同时估计了事件发生高度。报道了 24 例来自普通夜间雷暴的正极性脉冲事件, 高度位于海拔 $8-11 \text{ km}$, 平均 9.5 km , 另有来自飓风过程的 100 多例放电事件(极性未知)高度为海拔 $15-17 \text{ km}$ 。这些事件通常出现在雷达反射率超过 40 dBz 的区域附近。Smith 同时指出并不是所有雷暴都产生上述放电事件, 表明这类放电事件与特定条件下的雷暴有关。

总的来说, 当前学术界对于这类放电事件的观测积累严重偏少, 而且观测主要集中在北美地区, 对于何种放电过程产生如此强烈的 VHF 辐射、它们

^{*} 初稿时间: 2005 年 12 月 9 日; 修改稿时间: 2006 年 2 月 9 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40205002, 40475004), 国家科技基础条件平台工作项目(2004DEA71070)。

作者简介: 祝宝友, 男, 1972 年生, 安徽寿县人, 2001 年博士毕业于中国科技大学大气物理专业, 当前研究方向为雷电物理与探测。

与雷暴放电的关系以及这一放电过程的物理机理还不甚了解。当前,积累更多的代表不同气象条件下的观测资料对于研究这一放电现象具有现实意义。本文报道我们在上海滨海地区对这一事件的初步观测结果,并用一个偶极子辐射模式估算了部分放电参数。由于这类放电事件的物理机理未明,这里暂用双极性窄脉冲事件来称呼它们。

2 观测数据

观测系统是我们自制的四通道闪电信号大容量采集系统,包括一个垂直电通道(带宽 5 k—2 MHz,极性定义为正电荷下行产生正极性场),一个 VHF 通道(中频 115 MHz,带宽不小于 5 MHz),以及两个相互正交的 VLF/LF 水平磁通道(带宽 800—400 kHz)。波形记录设备是一块四通道大容量数据采集卡,每个通道最大缓存容量 4 M 采样点,单通道最高采样率每秒 40 M 采样点,工作采样率设

置为每秒 10 M 采样点、单通道记录长度设为 512 K 采样点(对应记录时间长度约 52.4 ms)。采集卡由垂直电通道信号触发,触发阈值置于一个较高的水平,使得只有那些产生了极强电场脉冲的放电事件才能被系统记录到。该系统架设在上海气象局滨海气象雷达站站内的 3 层辅楼楼顶(31.001°N, 121.885°E,海拔低于 30 m),距离雷达机房约 20 m。

2004 年 8 月 16 日晚北京时间 20:44—23:45 系统总共记录到了 78 例伴随了强烈 VHF 辐射的双极性窄脉冲,其中正极性脉冲 67 例,负极性脉冲 11 例。图 1 和图 2 分别给出了一次正极性和一次负极性窄脉冲事件,这些窄脉冲倾向于孤立发生,它们是一次记录中仅有的辐射信号,文中以该类放电事件居多;图 3 是本次观测中唯一一例由地闪回击触发的双极性窄脉冲事件。另有少部分双极性窄脉冲后面出现了不规则脉冲,这些不规则脉冲的物理过程未知。

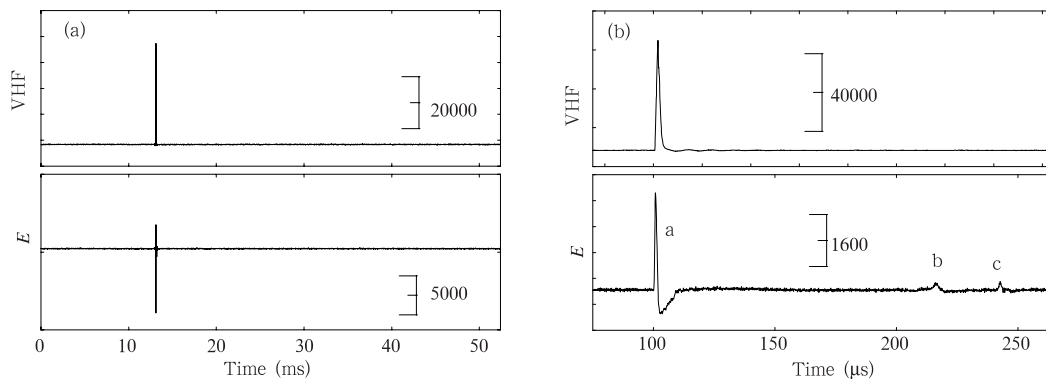


图 1 2004 年 8 月 16 日 20:53 孤立发生的正双极性窄脉冲及其 VHF 辐射

(各通道信号幅度采用相对数字单位,下同;脉冲 a 被电离层以及地面-电离层反射形成了脉冲 b 和 c;

假定电离层有效反射高度为 85 km,脉冲距离和高度估计为 353 和 9.1 km)

Fig. 1 Electric field (E) and associated VHF radiation of an isolated narrow bipolar pulse (a in Fig. 1b) of positive polarity observed at 20:53 16 BST August 2004 at the beach of Shanghai (Both electric field and VHF radiation are in relative digital unit. Assuming the ionosphere top of 85 km, the two delayed reflections of the pulse from the ionosphere(c in Fig. 1b) and Earth surface (b in Fig. 1b) give an estimate of event height and range, 9.1 and 353 km, respectively)

这些双极性窄脉冲辐射的一个显著特征是伴随比常规闪电强一个数量级的 VHF 辐射,观测系统 VHF 通道未做标定、VHF 强度用相对数字单位表示。把这些双极性窄脉冲伴随的 VHF 辐射与普通闪电过程 VHF 辐射进行比较,同一套系统观测距离 20 km 甚至更近的闪电过程,其 VHF 辐射强度约 0.03—0.06 百万数字单位,而本文 78 例双极性

脉冲对应的 VHF 辐射订正到 20 km 距离强度最强超过 1.3 百万数字单位,最小也有 0.1 百万数字单位,平均 0.7 百万数字单位,即平均来说这些双极性窄脉冲事件伴随了比常规闪电强一个数量级的 VHF 辐射。这也可由图 3 得到进一步印证。地闪首次回击是一个强烈的 VHF 辐射源,在图 3 中大约 360 km 距离以远首次回击过程产生的 VHF 辐

射低于系统噪声水平,而同一距离双极性窄脉冲却对应了远远高于系统噪声水平的 VHF 辐射。这些 VHF 包络半宽约 $1.5 \mu\text{s}$ 、全宽约 $5.0 \mu\text{s}$,比系统带

宽(不小于 5 MHz)的倒数大数倍,表明这些 VHF 包络产生自一个宽频辐射过程。

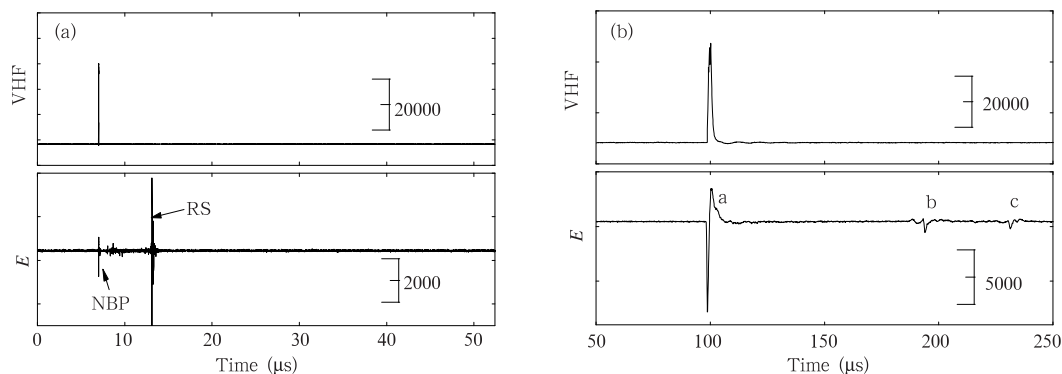


图 2 2004 年 8 月 16 日 20:54 孤立发生的负双极性窄脉冲及其 VHF 辐射
(假定电离层有效反射高度为 85 km , 脉冲距离和高度估计为 405 km 和 14.4 km)

Fig. 2 Electric field (E) and associated VHF radiation of an isolated narrow bipolar pulse (a in Fig. 2b) of negative polarity observed at 20:54 BST 16 August 2004 at the beach of Shanghai (Both electric field and VHF radiation are in relative digital unit. Assuming the ionosphere top of 85 km , the two delayed reflections of the pulse from the ionosphere (c in Fig. 2b) and Earth surface (b in Fig. 2b) give an estimate of event height and range, 14.4 and 405 km , respectively)

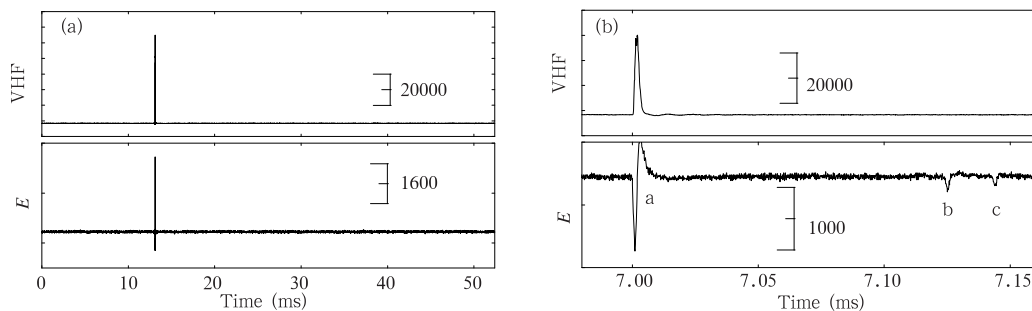


图 3 2004 年 8 月 16 日 21:18 由负地闪回击(RS)触发的负极性窄脉冲及其 VHF 辐射
(假定电离层有效反射高度为 85 km , 脉冲距离和高度估计为 360 和 6.4 km)

Fig. 3 Narrow bipolar pulse of negative polarity triggered by the initial return stroke (RS, a in Fig. 3b) observed at 21:18 BST 16 August 2004 at the beach of Shanghai (Both electric field and VHF radiation are in relative digital unit. Assuming the ionosphere top of 85 km , two delayed reflections of the pulse from the ionosphere (c in Fig. 3b) and Earth surface (b in Fig. 3b) give an estimate of event height and range, 6.4 and 360 km , respectively)

3 分析结果

3.1 双极性脉冲波形特征

本文报道的正、负极性窄脉冲除了初始峰极性不同外,波形特征基本相同,这里不再区分不同极性。表 1 给出了 78 例双极性窄脉冲波形统计特征,主要包括初始峰上升时间,初始峰半宽,初始峰宽度,初始峰与过冲幅度之比(过冲比),归一化到

100 km 的脉冲幅度。初始峰上升时间最小 $0.5 \mu\text{s}$, 最大 $2.6 \mu\text{s}$, 平均为 $1.2 \mu\text{s}$, 其中有约 75% 脉冲上升时间小于 $1.5 \mu\text{s}$ 。78 例窄脉冲平均初始峰半宽 $1.1 \mu\text{s}$, 全宽 $2.2 \mu\text{s}$, 而包括初始峰和过冲的整个脉冲持续时间平均为 $15.0 \mu\text{s}$, 过冲平均持续时间(平均 $12.8 \mu\text{s}$)是初始峰宽度的 5 倍。初始峰与过冲幅度之比(过冲比)为 $1.8\text{--}5.2$, 平均 2.9 。上述脉冲特征与 Le Vine^[1] 报道同类脉冲持续时间 10.0--

20.0 μs , Willett 等^[2]报道脉冲半宽约 2.0 μs , Smith 等^[3]报道 24 例脉冲 10%—90% 上升时间 2.4 μs , 过冲比 2.7 等结果一致。然而, 这些双极性窄脉冲与合肥地区普通云闪双极性脉冲相比^[9], 前者初始峰宽度和整个脉冲持续时间只有后者的一半或者更小; 图 4 中一例双极性窄脉冲的频谱峰值频率为 100—200 kHz, 远远高于合肥地区普通云闪双极性脉冲谱峰频率 15—30 kHz, 可能表明这些双极性窄脉冲是由更短闪电通道产生的。

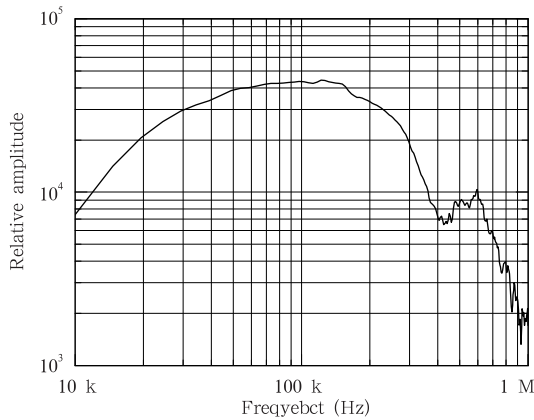


图 4 一例双极性窄脉冲频谱分布

Fig. 4 Frequency spectrum of a narrow bipolar pulse

表 1 双极性窄脉冲波形特征

Table 1 Waveform characteristics of narrow bipolar pulses

	平均	标准差	最小	最大
初始峰上升时间(μs)	1.2	0.5	0.6	2.6
初始峰宽度(μs)	2.2	0.5	1.3	3.2
初始峰半宽(μs)	1.0	0.2	0.6	1.6
脉冲持续时间(μs)	15.0	3.1	7.2	21.4
初始峰与过冲幅度之比	2.9	0.7	1.8	5.2
峰值幅度(V/m; 归一化到 100 km)	14.4	4.5	5.2	25.9

假定远场情况下地面电场与磁场幅度之比是定值, 利用经过标定的 VLF/LF 磁通道幅度估算了双极性窄脉冲峰值幅度并归一化到 100 km 距离(距离估算方法参见后面 3.3 节), 由于距离估算不确定性引起的脉冲幅度误差小于 15%(表 1)。除了图 3 中发生在负回击之前的窄脉冲幅度 5.2 V/m 外, 其余脉冲幅度都在 7 V/m 以上, 最大 26 V/m, 平均 14.4 V/m。考虑到本观测系统对小幅度双极性窄脉冲不敏感, 这里给出的脉冲平均结果偏大。Willett 等^[2]报道 18 例脉冲平均归一化幅度 8.0 V/m, Smith 等^[3]报道 24 例正极性脉冲归一化幅度

9.5 V/m, 这些都与本文结果一致。这些双极性窄脉冲强度与合肥地区地闪首次回击幅度相当^[10]。

3.2 双极性脉冲放电参数

电流传输线模式下, 假定空间垂直通道长度 L 、电流传播速度记为 V 、电流 I 由底部传播到通道顶部经历的时间记为 τ ($=L/V$)。当 τ 只有 1—2 μs 时可以由远场辐射场 E 估计电流从通道底部传播到顶部经历的时间 τ 和放电电流矩^[11]:

$$I_0 L \approx 2\pi\epsilon_0 c^2 R \sum_0 \quad (1)$$

$$\tau \approx \frac{\sum_0}{E_0} \quad (2)$$

式中 c 是真空光速, R 是辐射源相对观测者距离, ϵ_0 是真空介电常数, E_0, I_0 分别是电场和电流峰值幅度, \sum_0 是如下定义的电场积分波形幅度:

$$\sum_0(t) = \int_0^t E(\tau) d\tau \quad (3)$$

对 78 例双极性窄脉冲按照上述方法估计电流从通道底部传播到顶部时间, 最大为 1.85 μs , 最小只有 0.55 μs , 平均为 0.93 μs 。如果 τ 取 1 μs , 根据表 1 并考虑可能的误差, E_0 取 10 V/m, 那么由式 (1), (2) 得到放电电流矩 ($I_0 L$) 约 5 kA · km, 这一结果比普通地闪回击电流矩小一个数量级(回击电流约 20 kA, 回击通道长度约 5 km)。

假定电流在通道内以与光速可比拟的速度传播, 比如 1×10^8 — 3×10^8 m/s, 根据上面的结果, 此时通道长度 100—300 m 量级, 相应的通道电流幅度约 15—50 kA, 这一结果与普通回击电流幅度相当; 如果放电通道很短只有约 10 m 量级, 此时放电电流传播速度具有 10^7 m/s 量级, 放电电流幅度超过 100 kA 量级, 很难想象云内能产生超过正常地闪回击放电强度数倍的电流。Hager 和 Wang^[12] 同样基于传输线电流模式, 提出了一种利用多站同步电场测量结果反演云内放电通道长度、电流传播速度甚至放电电流波形的方法。对一例伴随了强烈 VHF 辐射的云内脉冲反演结果显示, 产生该脉冲的通道长度 118 m、电流传播速度 0.61 倍光速, 即电流从通道底部传播到顶部时间 0.64 μs , 这一结果落在本文估计范围之内。综合以上因素, 我们认为这些伴随了强烈 VHF 辐射的云内窄脉冲辐射很可能是由具有 100 m 量级的短通道产生, 电流传播速度与光速可比拟、具有 10^8 m/s 数量级, 而放电电流幅度具有 20 kA 量级。Smith 等^[3] 基于偶极子产生电

场变化,推测双极性窄脉冲放电云内扩展为 300—1000 m,其下限与本文结果一致。

3.3 脉冲发生高度

夜间观测时,空间双极性窄脉冲被电离层以及地面—电离层反射,在直达脉冲之后形成一个小幅度反射脉冲对(图 1,2,3 中的小幅度脉冲 b,c)。测量反射脉冲相对直达脉冲时间延迟并假定电离层有效反射高度可以估计脉冲高度和水平距离^[8]。本文固定取电离层有效反射高度为 85 km,我们指出当电离层有效反射高度为 80—90 km,本文估计的脉冲高度不确定性小于 1 km,距离偏差最大可达 50 km。

按照上述方法估计放电事件的距离和发生高度,结合两个水平 VLF/LF 磁通道估算的方位信息得到了各事件的空间三维分布(图 5a),图 5a 显示这些双极性窄脉冲倾向于成簇聚集出现。这些双极性窄脉冲发生距离从 350 km 到 450 km 不等,考虑电离层高度不确定带来的误差,这些双极性窄脉冲事件发生在 300 km 以外。值得指出,我们架设在雷达站的闪电单站定位系统显示对应于这些双极性窄脉冲发生时段,距离 250 km 以内发生了持续的雷电活动,但是本文并没有观测到来自这些雷暴活动的双极性窄脉冲事件。这表明这些双极性窄脉冲可能与特定雷暴有关。

图 5b 给出了这些脉冲事件的高度分布。67 例正极性脉冲的离地高度为 7.0—12.0 km,其中有 44 例为 8.0—11.0 km,有 29 例出现在 9.0—10.0 km,平均 9.5 km。滨海雷达站 3 层辅楼楼顶的海拔高

度估计在 30 m 以下,因此这里的离地高度就是海拔高度。注意到 Smith 等^[3]报道 24 例正极性窄脉冲平均海拔高度 9.4 km,与本文结果高度一致。另外,本文还观测到 11 例负极性窄脉冲,除了图 3 中出现在首次回击之前的那次高度为海拔 6.4 km 外,其他 10 例负极性窄脉冲发生高度为海拔 14.0—16.0 km。本文电场极性规定为上面的正极性电荷堆向下面的负极性电荷堆放产生正极性电场,这里的正极性脉冲对应了上正下负的电荷配置,很可能是由雷暴云内主负电荷区与上部的正电荷区放电产生的,而发生高度在 14—16 km 的负极性脉冲最有可能是由雷暴云顶部的负极性屏蔽电荷层与下部空域的放电产生的。

另外,我们在合肥地区的观测显示^[9,13]:普通闪电过程中正、负双极性脉冲出现频率大体相当,而且云闪初始击穿(云内主负电荷区与上部正电荷区之间的放电)和地闪初始击穿(云内主负电荷区向下的放电)是重要的双极性脉冲产生源。然而本文中正极性窄脉冲(对应下面负电荷区与上面正电荷区之间的放电)出现频率远远高于负极性窄脉冲,只观测到一例发生在云内较低区域的负双极性窄脉冲,观测到 10 例负极性窄脉冲出现在云顶附近。是否这些双极性窄脉冲倾向于出现在雷暴云内中上部区域,或者本观测系统较高触发水平掩盖了发生在雷暴云下部区域、幅度较弱的双极性窄脉冲辐射,这些都有待更多的观测研究予以澄清。

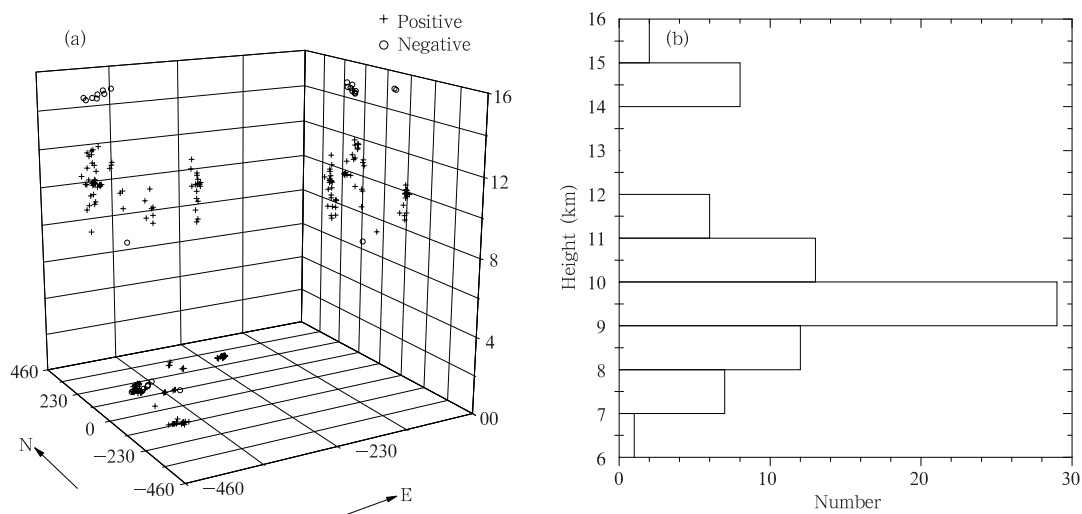


图 5 双极性窄脉冲事件的空间三维分布和高度分布

Fig. 5 3D distribution of narrow bipolar pulses (a) and histograms of sources heights (b)

4 结 论

本文分析了 78 例独特的双极性窄脉冲的初步观测结果。这些脉冲伴随的比常规闪电放电强一个数量级的 VHF 辐射是卫星观测的穿越电离层的脉冲对(TIPPs)的来源。这些双极性窄脉冲具有短持续时间、大峰值幅度特征,而且倾向于孤立出现,这些特征与其他作者在北美的观测结果一致。典型脉冲上升时间约 $1.2 \mu\text{s}$,初始峰宽度约 $2.0\text{--}3.0 \mu\text{s}$ 、半宽约 $1.0 \mu\text{s}$,整个脉冲持续时间约 $15.0 \mu\text{s}$ 。这些脉冲的幅度与地闪首次回击幅度相当,过冲与初始锋幅度之比约 $1/3$ 。

利用大幅度双极性窄脉冲与电离层以及地面—电离层反射波之间的时间延迟,并假定电离层有效反射高度固定为 85.0 km ,估算了这些脉冲发生高度。67 例正极性窄脉冲发生高度位于海拔高度 $7.0\text{--}12.0 \text{ km}$,平均海拔高度 9.4 km ,11 例负极性脉冲中有 10 例脉冲发生高度为海拔 $14.0\text{--}16.0 \text{ km}$,只观测到一例负极性窄脉冲发生高度 6.4 km ,而且该脉冲出现在地闪初始击穿开始。显然,本文结果显示这些窄脉冲更倾向于出现在云内中高层。

利用传输线电流模式由单站电场波形估计了电流在通道内传播时间以及电流矩。78 例平均结果显示电流从通道底部传播到顶部经历的时间约 $1 \mu\text{s}$,电流矩约为 $5 \text{ kA} \cdot \text{km}$ 量级。本文猜测这些云内窄脉冲辐射很可能是在长度 100 m 量级的短通道内产生,则电流幅度具有 $20\text{--}50 \text{ kA}$ 量级,而电流传播速度与光速可比拟、具有 10^8 m/s 量级。这一电流幅度、电流传播速度与典型的地闪回击结果相当。

上述结果无疑丰富了我们对于这一伴随了超强 VHF 辐射的双极性窄脉冲事件的认识。将来我们打算开展进一步的多站观测,澄清如下一些基本问题:

(1) 双极性窄脉冲是孤立的放电事件抑或是闪电初始击穿过程的一部分。本文观测的很大一部分双极性脉冲具有孤立出现特征,在脉冲之后大约 40 ms 内不出现任何可以辨别的闪电脉冲信号。但是我们也观测到一例负双极性窄脉冲出现在地闪初始击穿的开始阶段。开展地闪或云闪过程尺度(约 500 ms)的大容量观测将有助于澄清这一问题。

(2) 产生双极性窄脉冲的雷暴条件。本文以及 Smith 在美国新墨西哥州的观测都显示,不是所有

的雷暴都产生这些独特的双极性窄脉冲。特别是 Smith 提到了这些脉冲倾向于出现在超过 40 dBz 的雷达高反射率区域附近,在一次飓风过程中 $15.0\text{--}17.0 \text{ km}$ 高度区域观测到了大量的该类放电事件,飓风内部无疑有强对流存在。只有在积累了大量的双极性窄脉冲资料和雷暴观测资料后才能得到具有统计意义的结论。

(3) 云内下层区域是否大量存在双极性窄脉冲事件。近年来在研究大气放电过程中提出了逃逸击穿(Runaway breakdown)的概念,来自宇宙的高能粒子在背景电场作用下引起大气雪崩式电离击穿,雪崩可以在比传统热击穿阈值小一个数量级的电场环境下发生。已有学者将这些双极性窄脉冲事件归因于大气中的逃逸击穿过程^[14]。显然,雷暴云中上部的宇宙高能粒子数目将远远多于雷暴云下部粒子数目。本文以及 Smith 在美国新墨西哥州地区观测结果表明,这些双极性窄脉冲似乎更多出现在雷暴云中上层区域甚至云顶附近,云内主负电荷区之下区域是否大量存在双极性窄脉冲,也有待进一步的观测澄清。

参考文献

- [1] Le vine D M. Sources of the strongest RF radiation from lightning J Geophys Res, 1980,85 (C7): 4091-4095
- [2] Willett J C, Bailey J C, Krider E P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high frequency radiation. J Geophys Res, 1989,101:26641-26668
- [3] Smith D A, et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. J Geophys Res, 1999,104(D4): 4189-4212
- [4] Holden D N, Munson C P, Devenport J C. Satellite observations of trans-ionospheric pulse pairs. Geophys Res Lett, 1995,22: 889-892
- [5] Jacobson A R, Knox S O, Franz R, et al. FORTE observations of lightning radio-frequency signatures: Capabilities and basic results. Radio Sci, 1999,34: 337-354
- [6] Smith D A, et al. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. J Geophys Res, 2002,107 (D13):4183, doi:10.1029/2001JD000502
- [7] Rison W, et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. Geophys Res Lett, 1999, 26 (23): doi: 10.1029/1999GL010856
- [8] Smith D A. Compact intracloud discharges: [Ph. D. Dissert-

- tation]. Dept. of Electrical Engineering, University of Colorado, Boulder, 1998
- [9] Zhu Baoyou, Tao Shanchang. Characteristics of Large pulses of radiated fields from cloud lightning flash discharges. *Acta Meteor Sinica*, 1997, 11(3): 352-363
- [10] 祝宝友, 陶善昌, 刘亦风. 合肥地区地闪特征. *高原气象*, 2002, 21(3): 296-302
- [11] 祝宝友, 陶善昌, 马明等. 用远场辐射场反演云闪放电参数. *气象学报*, 2004, 62(4): 498-503
- [12] Hager W W, Wang Dongxing. An analysis of errors in the location, current, and velocity of lightning. *J Geophys Res*, 1995, 100 (D12): 25721-25729
- [13] 祝宝友, 马明, 陶善昌. 地闪与云闪初始击穿 VHF/VLF 辐射特征观测比较. *高原气象*, 2003, 22(3): 239-245
- [14] Gurevich A V, Yu V Medvedev, Zybin K P. New type discharge generated in thunderclouds by joint action of runaway breakdown and extensive atmospheric shower. *Physics Letters A*, 2004, 329: 348-361

INITIAL OBSERVATIONS OF THE LIGHTNING NARROW BIPOLAR PULSE WITH VERY POWERFUL VHF RADIATION

Zhu Baoyou Tao Shanchang Tan Yongbo

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract

Recently, a class of bipolar pulses is of great interest to the lightning community because their associated powerful VHF radiation is the source of satellite-observed TIPP (Trans-Ionosphere Pulse Pairs) which are an order stronger than that of normal lightning discharges. In the present paper we report the measurements of 78 such events observed in Shanghai. Typical narrow bipolar pulses are characterized in waveforms by a sharp rise of $1.2 \mu\text{s}$, an initial peak width of $2-3 \mu\text{s}$, and a total duration of about $15 \mu\text{s}$. These pulses are comparable to the initial return strokes of ground flashes in strength and the overshoot is about one third of the initial peak. Two delayed reflections of the pulse from the ionosphere and Earth surface are utilized here to estimate the source height by assuming the ionosphere top of 85 km. Among 11 negative pulses (it is defined here that discharge between an upper negative charge region and a lower positive charge region produces the electric field of negative polarity), 10 occurred at altitudes between 14.0 and 16.0 km above MSL, and one at the breakdown stage of a ground flash at the height of about 6.4 km. 67 positive pulses occurred at altitudes between 7 and 12 km above MSL, with a mean of 9.4 km. Calculations indicate that these pulses might be produced by the current moment of the order of $5 \text{ kA} \cdot \text{km}$, and took about $1 \mu\text{s}$ to reach the top of the channel. we conclude that the discharge involves a spatial extent of 100-300 m, a peak current of 20 kA in order, and a current traveling velocity of 108 m/s in order.

Key words: Bipolar pulse, TIPP, Lightning discharge, VHF radiation.