

产生微下击暴流的风暴 单体中的闪电活动

P. Laroche 等

1 引言

1990年夏天,在佛罗里达的奥兰多利用多普勒雷达和一个两站闪电探测系统进行了联合实验。其目的是研究闪电与对飞机危险的天气状况如风切变、湍流和强降水之间的关系。

闪电资料的一种可能用途是,或者独立地或者与诸如联邦航空管理局(FAA)的终点多普勒天气雷达(TDWR)或机场监视雷达(ASR-9)这样一些雷达系统相结合,对微下击暴流进行预报和/或临近预报。研究表明,潮湿环境中的微下击暴流通常是与具有高地面降雨率和电活动的对流云相联系的。Williams等和Goodman等指出,在许多情况下,峰值云内(IC)电闪率是与云的最大垂直发展同相的,并且先于微下击暴流的最大微分速度几分钟。而且,IC活动在早期阶段处于支配地位,以后云地(IG)活动才达到最大。本文将介绍这一ONERA/MIT实验以及使闪电测量与云演变相联系的一些初步结果。

2 实验的描述

2.1 甚高频干涉仪

闪电探测设备是由法国DIMENSIONS公司设计和投入市场的一种新型无线电干涉测量闪电警报系统(SAFIR)。两个远距离天线系统探测来自闪电的甚高频噪声,进行微分相位测量以确定发射源的方位角。方位角测量结果通过专用的9600波特电话线路被传送给中心处理站。在这里计算和显示甚高频源的x-y位置,而原始资料则被存储起来供脱机分析之用。干涉仪在110—118MHz的国际无线电导航频带内是可调谐的。每个位置的时间分辨率为 $100\mu\text{s}$;采集能力为每秒钟100个位置。对奥兰多实验来说,水平位置的准确度在图1中的阴影区内要优于1km。在一远距离站做电场波形的宽带测量,以对IC和IG闪电加以鉴别。

2.2 1990奥兰多雷达网

多普勒天气雷达测量是利用FAA/MIT林肯实验室试验台TDWR得到的。TDWR是一台窄束(0.5°)5cm雷达。分析工作得到由MIT气象雷达(MIT)、北达科他大学(UND)雷达和试验台ASR所做的同时雷达观测的支持。更新率为至少每2.5分钟做一次体积扫描。

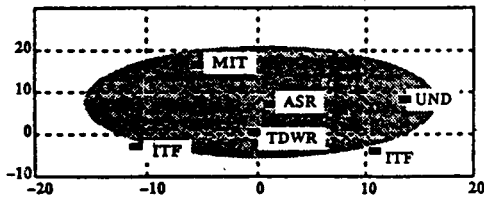


图1 奥兰多雷达网, ASR、MIT、TDWR、UND 和 SAFIR 干涉仪(ITF). 距离用 km 表示

3 甚高频活动与微下击暴流发生之间的一般比较

SAFIR 系统从 7 月中旬开始运转到 9 月中旬。在雷达和闪电探测系统的分析范围内共发生过 61 次微下击暴流,下面概述外流和甚高频活动的相对定时和大小。只考虑了那种在微下击暴流爆发以前 10 分钟内开始的甚高频活动。这样得出的微下击暴流与先行闪电活动之间的延迟要小于它们的实际值:

- 对于 93% 的微下击暴流,闪电在地面的外流开始以前发生。就其中,65% 的情况而言,延迟超过了 10 分钟。
- 对 77% 的微下击暴流来说,甚高频活动的第一个峰值最早可出现在外流开始以前 10 分钟——平均大约为 5 分钟。
- 对于 91% 的微下击暴流,最大外流以前观测到的第一个活动峰值间的平均延迟为 9 分钟。

4 详细分析

4.1 可以从甚高频系统得到的信息

一次电闪是由一系列基本的大气放电过程组成的。对电闪所产生的电磁辐射已由一些实验人员做了测量。把强度对距离及带宽归一化后作为频率函数的窄带测量表明,闪电辐射的频谱近似地以 $1/f$ 而缩小。CG 电闪中的回击过程可产生低频(LF)和甚高频(HF)范围(1kHz—10MHz)内的强辐射。我们的干涉仪所敏感的甚高频辐射大部分是由在 CG

和 IC 电闪中遇到的击穿前放电和先导放电所产生。电闪的总持续时间一般小于 1 秒钟,它可能包含以下阶段:

- 击穿前的活动在一个 IC 放电中或者先于一个 CG 过程中的回击前所包含的向下负梯级先导开始之前 200 毫秒(ms)内发生。击穿前的活动在高频和甚高频范围内以数百 ms 的时段、每 $10\mu\text{s}$ 一个或几个脉冲的速率而辐射。

- 梯级先导是一种负放电过程。梯级先导致初是建立 CG 闪电到地面的通道,它也是 IC 闪电的一部分。梯级先导有零点几米的梯级长度,以大于 10^6m/s 的速度传播。它在高频和甚高频范围内辐射;梯级是以 $10\mu\text{s}$ 到 $100\mu\text{s}$ 之间的间隔重复的几 kA 的快上升时间电流脉冲。梯级先导传播的持续时间小于 10ms。

- 正先导以大于 10^5m/s 的速度传播。它和梯级先导(它同时传播)组成一个中性的双向放电过程。它的传播是脉冲式的,但其电流很小,因此辐射的能量要比负梯级先导所辐射的小得多。传播的持续时间可能为几百 ms。以前的结果显示,我们的设备没有探测到这种先导。

- 反冲流光是被假定为在由先行的正先导所造成的通道内传播的高电流 IC 连接放电。反冲流光的速度超过 10^7m/s ;峰值电流可达几十 kA。这种放电与电场中的 K 变化相对应,并且主要在甚高频范围内辐射。反冲流光的持续时间可长达 $800\mu\text{s}$,但是根据在法国西南部观测到的一次 30 分钟风暴所计算出的平均持续时间则为 $150\mu\text{s}$ 。

- 直窜先导以超过 10^7m/s 的速度在先行的闪击通道内传播并触发起第二次和继后的闪击。它的持续时间为几 ms,它在甚高频范围内辐射。直窜先导的辐射与反冲流光的辐射相类似,由至少每 μs 一个的速率辐射的脉冲组成。

- 回击是在先导与地面接通时发生的。它由在先导通道内传播的高电流脉冲组成。其

表 1 三个风暴日甚高频活动的分析

序 列	时 间(分)	点 数		电 闪 数		暴 流 数		先 导 数	暴 流/电 闪	%电 闪+先 导
		总 数	每 分 钟	总 数	每 分 钟	总 数	每 分 钟			
8—16	87	9126	105	811	9.3	1557	17.9	84	1.90	10.3
8—18I	36	2920	81	756	21.0	514	14.3	4	0.68	0.5
8—18II	59	6375	108	600	10.2	1017	17.2	77	1.69	12.8
8—22	88	9222	105	1421	16.1	1739	19.8	59	1.22	4.2
平 均	95	9295	97	1356	14.3	1531	16.1	81	1.13	6.0

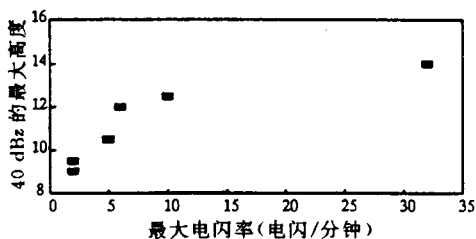


图 2 一组 7 块云的最大电闪率与 40dBz 等值线最大高度之间的相关性

速度高达 10^8 m/s, 其大小可以超过 100kA, 它的典型持续时间不到 100μ s。虽然回击的甚高频辐射在振幅方面要比低频的小得多, 但是辐射的能量却是足够大的, 以致被我们的设备探测到了。

4.2 闪电现象学分析的标准

我们定出了识别电闪及其组成的算法。利用两个标准来确定一组点是否属于一个单个电闪。(1)电闪的总持续时间必须不大于或等于一秒钟。(2)一个电闪内两个相继的点分开的水平距离不超过 25km, 即相当于水平速度不超过 5×10^7 m/s 的一段距离。

在一个电闪内, 一个反冲流光或直窜先导过程是作为具有以下两种特性的一些点的“爆发”而被识别的:(1)至少两个位置(即使以前的测量证明反冲流光平均持续时间可能小于 200μ s), (2)点的隔开不能超过 200μ s (即允许甚高频活动两个相继采样低于阈值)。以上解决了在甚高频接收机中任何灵敏度不够时出现的问题。一个负先导是至少 10 个点的一次爆发。

4.3 三个风暴日的一般电活动情况

本节介绍对三个微下击暴流日的闪电和

雷达资料的分析。图 2 对所详细分析的 7 个单体的每个单体中 40dBz 回波的最大高度和最大电闪率进行了比较。正如由 Williams 以前做的分析所预计的, 最大电闪率随云高迅速增加, 因此它是对雷暴对流活动的一个很好的量度。

表 1 对所分析的每天列出了闪电位置、电闪、暴流和先导的总数。一个技术问题在 8 月 18 日中造成了一次 7 分钟的间隙。从这些统计资料我们注意到:

(1)除 8 月 18 日的第一部分(8 月 18 日 I)之外, 平均甚高频源或“点”探测率对于 1 个半小时(每分钟 105 个位置)的持续时间基本相同。

(2)三个序列之间识别出的爆发率是彼此一致的(每分钟约 18 次爆发), 而 8 月 18 日 I, 平均爆发率和其平均定位率一样, 比在其它情况下小 30%。

(3)具有类似的点探测率的三个序列(8 月 16 日、8 月 18 日 II 和 8 月 22 日)显示出不同的电闪率和不同的具有负先导探测的电闪百分率。

(4)8 月 18 日 I 是一个强闪电活动段的初始阶段。我们观测到一个高平均电闪率和探测到先导的电闪却有最低的百分率。这些电闪中许多是通过单点而被识别出来的, 因此可能没有探测到先导。过去的工作(例如 Williams 等)指出, 活动的开始可能只包含较少数的 CG 电闪, 即较少数的负先导。

4.4 8 月 16 日的第 6 号微下击暴流

6 个外流是于 1990 年 8 月 16 日由 TDWR 识别出来的。本节将分析由 TDWR 在

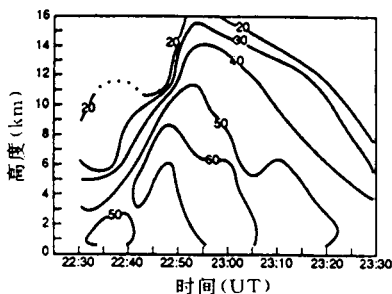


图3 MB6 母云最大反射率的时高廓线. 反射率等值线是以 10dBz 的增量画出的

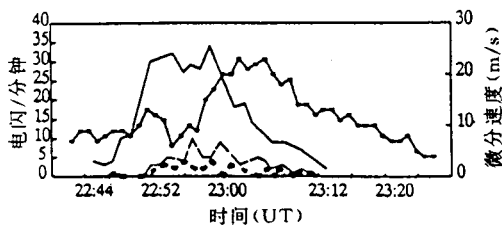


图4 MB6 的微下击暴流微分速度(带点的实线)和相关的闪电演变——总电闪率(实线)、CG 电闪率(长划线)和先导率(粗虚线)

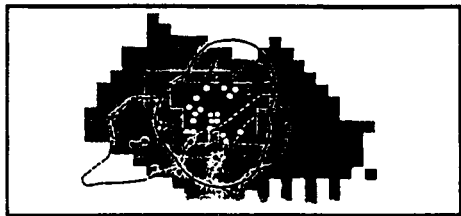


图5 电活动的位置(阴影区)、先导质心(白点和黑点)、地面反射率(实轮廓线)和外流(虚线). 在 22 时 45 分到 23 日期间电活动以每个 16 次电闪/公里²的间隔增加阴影度

22 时 42 分首先识别出来的第 6 号外流(MB6)。

造成外流的风暴单体的演变是由最大反射率的时间高度廓线(图 3)及电闪率和外流曲线(图 4)来加以描绘的。在时高廓线中, 40dBz 回波达到 14km 的最大高度。一个 60dBz 反射率的强核心在中间高度形成, 22 时 48 分开始降落到地面。在高空, 连续的强垂直发展与最大电闪率的时期相一致(见图

4)。22 时 54 分 IC 活动达到最大; 一分钟以后 CG 活动达到峰值。总峰值电活动是在 22 时 58 分发生的, 具有 34 个电闪/分钟的值。在 22 时 55 分反射率核心的着地与在 23 时 06 分产生最大微分速度为 24m/s 的微下击暴流的爆发同时发生。与以前的研究类似(Williams 等和 Goodman 等), 雷达回波的垂直发展与电闪率同相, 并先于地面的峰值外流 8 分钟。

微下击暴流位置叠加在图 5 中所表示的甚高频活动的广大区域上。这一单体中的电活动与最活跃阶段相对应, 有以下特点:

- 探测到 4720 个甚高频源(181 个源/分钟),
- 463 个电闪(17.8 个电闪/分钟),
- 826 个暴流(37.7 个暴流/分钟),
- 探测到 36 个负先导(全部电闪的 7.8% 探测到先导)。

这一电活动要比在同一天观测到的平均一般活动大(表 1)。我们注意到在先导率探测与 CG 电闪率之间有良好的定性相关性。这支持了这样一种想法, 即我们识别为负先导的放电过程是与 CG 闪电相联系的。

我们曾观测到每个电闪的爆发数和爆发平均持续时间的有规律的增加(23 时前后每个电闪最多 8 个爆发和持续时间为 600 μ s)。爆发平均水平速度的分布显示峰值出现率是在 2 与 5 $\times 10^7$ m/s 之间。相继爆发之间时间间隔的出现率分布显示有三个峰值:

- 1 和 3ms 之间为 1.8%,
- 10 和 30ms 之间为 12.0%,
- 100 和 300ms 之间为 13.3%。

这一点在第 5 节中将做比较充分的讨论。

关于负先导及其与微下击暴流的关系令人感兴趣的一点是, 先导的水平发展是被局限在一个直径大约为 5km 的区域内, 先导的平均位置始终在微下击暴流位置的附近(见图 5)。

4.5 8 月 16 日的第 5 号微下击暴流

这一外流(MB5)是从 23 时 07 分到 23

时 33 分在 MB6 的西南发展起来的。23 时 17 分外流速度达到最大，为 20m/s。甚高频活动则是在 22 时 31 分到 23 时 28 分之间在 MB5 的附近观测到的。

MB5 母云最大反射率的时高廓线如图 6 所示。这一单体表现出强的垂直发展，但不如前面个例中那样强。本例 40dBz 等值线达到 11km 高。和在前面的个例分析中的一样，23 时 04 分在中间高度形成了一个 65dBz 核心，这一核心降落到地面与微下击暴流同相。

电闪率在 23 时—23 时 20 分期间内达到最大(图 7)，与冻结高度(~4.7km)以上反射率的强向上发展同相。和以前一样，这种高空发展要先于反射率核心的着地，它是造成峰值电闪率与微下击暴流强度之间 3 分钟延迟的原因。

正如以前所指出的，垂直发展的程度比较小导致了电闪率要比在以前情况下的电闪率小。23 时 05 分 IC 活动达到第一个峰值；8 分钟后 CG 活动达到峰值(图 7)，这与 Williams 等和 Goodman 等的结果相一致。这一活动要比在这一天观测到的平均总电活动弱得多：

- 1402 个位置(24.6 个位置/分钟——1/4 平均率)，
- 101 个电闪(1.8 个电闪/分钟——1/5 平均率)，
- 239 个暴发(4.2 个暴发/分钟——1/4 平均率)，
- 由于干涉仪观测到 12 个负先导(全部电闪的 11.9%——类似于平均率)。

我们注意到，各个负先导大部分是在外流的附近发展的(见图 8)。

每个电闪的爆发数、爆发平均持续时间和电闪平均持续时间一直到电活动结束都在有规律地增加。爆发平均水平速度的分布显示最大出现率是在 5×10^6 和 10^7 m/s 之间。相继爆发之间时间间隔的分布，其特点与 MB6 的情况相同，即观测到出现率的三个局部最大值：

- 在 1 和 3ms 之间为 6.7%，
- 在 10 和 30ms 之间为 15.5%，
- 在 100 和 300ms 之间为 11.3%。

除 1—3ms 间隔之外，总峰值出现率在 100 和 200ms 之间为 10%。这些值接近于对 MB6 得到的值，现讨论如下。

5 讨论

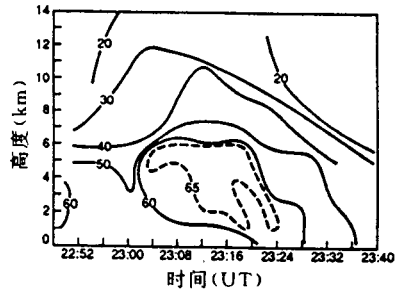


图 6 MB5 母云最大反射率的时高廓线。反射率等值线是以 10dBz 增量画出的，附加的虚线是一条 65dBz 等值线

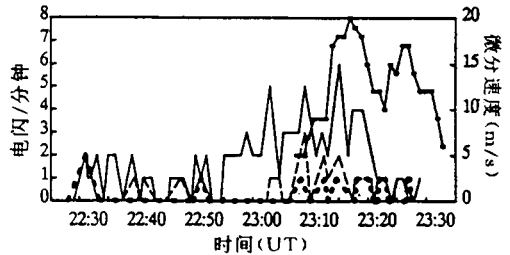


图 7 与图 4 同，但是关于 MB5 的

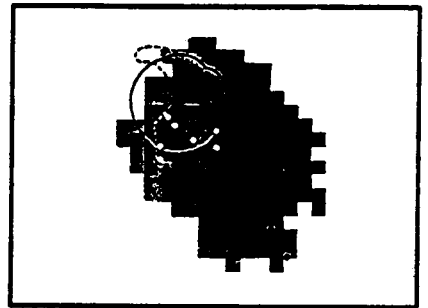


图 8 和图 6 相同，但是关于具有电活动的 MB5 的。在 23 时至 23 时 30 分期间电活动 5 个电闪/公里²

(转封四)

(接 58 页)

本实验将闪电和以空间分辨率比对流单体要小的雷达观测结果做了比较。在 91% 的情况下, IC 活动的峰值要先于最大外流, 这证实了 Williams 等和 Goodman 等的结果。对于一些个例, 我们观测到了 IC 电活动的开始与中间高度和高空倾斜辐散(即在 7km 和 7km 以上沿 PPI 的辐散)发展之间的相关性。这一特征的存在可能暗示在这些高度上有一上升气流。虽然这种解释与时高廓线相一致, 但是这一特征的解释及其与电活动的关系却尚待多普勒分析的证实。

资料证实, 电闪率是与雷雨云的垂直发展密切相关的。因此, 它是对云的对流能量以及发生强降水、湍流和风切变的可能性的一种似乎合理的量度。

干涉仪探测到了最强的和最近的负梯级先导过程。我们还确认了, 当风暴比较靠近测量站时, 探测到先导与电闪比率增加。与一回击识别系统的时间比较证实, 这些先导是与先于回击的 CG 过程相联系的。

已知所观测到的爆发传播乃是反冲流光或直窜先导过程所致。用高分辨三维干涉仪所得到的这种现象的速度分布表明, 对于在法国西南部一个 20 分钟的风暴期间所探测到的一组 800 个爆发, 其平均速度为 $2 \times 10^7 \text{m/s}$ 。这些结果与在这里所介绍的佛罗里

达风暴的结果一致。即使实际分布是集中在一个稍低的速度上(例如, MB5 为 10^7m/s), 这也意味着传播主要是在水平方向。这一点支持了由 Krehbiel 所得到的结果, 即正先导的传播(在认为反冲流光在其中传播的通道内)具有一个重要的水平分量。

相继爆发之间时间间隔的分布多半包含三个峰值。第一个峰值(1 到 3ms)的典型是对 M-变化所观测到的, 在那种情况下可能与一个连续过程(和正放电的传播相对应)有关。第二个峰值(10 到 30ms)与相继反冲流光之间的平均间隔相对应。第三个峰值(100—200ms)可能与先于回击过程的直窜先导相对应。这一点可以从一些统计结果中推知。这些统计结果表明, 在肯尼迪空间中心(KSC), 自然闪电的闪击之间的平均间隔为 86ms, 和在 KSC 用电线和火箭技术引发的一切电闪的平均间隔相同。就这两个实验而言, 已经查明每个电闪的平均闪击数为两个或三个。此先导数和最后一类的爆发数之比的结果是与这一观点是一致的。

另一次 ONERA/MIT 实验是为 1991 年夏季计划的。三台多普勒雷达观测与甚高频活动的三维绘图结合, 闪电测量在对飞机危险的天气预报的应用上人们将有更多了解。

郑志超译自《第 25 次国际雷达气象学会会议文集》 郭昌明校

气象科技

(季刊, 1973 年创刊)

1994 年第 3 期(总 139 期)

主办单位 气象科技情报研究所

编辑 气象科技编辑部

(主编 汪永起)

出版 气象出版社

(北京西郊白石桥路 46 号)

印刷装订 中国地质大学(北京)轻印刷厂

一九九四年九月出版

国内统一刊号 CN11-2374 (国内发行) 定价: 3.00 元