

# 甚高频闪电辐射源的定位与同步观测试验\*

董万胜\*\* 刘欣生 郟秀书 王怀斌 张义军 张广庶

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

**摘要** 闪电宽带干涉仪是一种新型的辐射源定位系统. 该系统实现了电场变化、辐射源位置和辐射频谱等多个闪电物理参量的同步观测. 利用人工放电源对该系统的测试和误差标定发现定位角度均方根误差小于 $1^\circ$ . 对闪电的实际观测结果表明该系统能够较好地再现闪电通道时空演变特征, 并能在空中不同位置有多个辐射源同时出现的情况下进行有效定位. 该系统结构简单、容易实现, 它不仅适应于闪电观测, 也可对其他快速运动的甚高频辐射源进行追踪定位.

**关键词** 闪电 宽带干涉仪 辐射源定位

在闪电研究中, 最为直观的方法当属光学照相(或摄像), 但由于云层遮挡, 这种方法的使用受到一定限制. 近年来, 闪电辐射源定位技术以其直观的特点成为研究闪电发生、发展过程的重要手段之一. 在甚高频(VHF)波段定位闪电辐射源的方法有两种: 即时差法(TOA)<sup>[1]</sup>和干涉仪法<sup>[2-4]</sup>. 相比之下, TOA法对孤立的短脉冲波形辐射定位效果较好, 对持续时间较长的连续脉冲辐射比较困难. 而窄带干涉仪技术对孤立脉冲和连续脉冲都能连续确定其辐射源的二维位置(方位角和仰角), 但不能区别同时到达的来自不同方位的辐射<sup>[4,5]</sup>, 而在闪电频繁活动期间, 空中有多个辐射源同时出现的情况却比较常见, 为此我们设计研制了闪电宽带干涉仪系统, 并在1999年广东从化进行的雷电综合观测实验中, 利用该系统对闪电放电过程辐射源时空演变特征进行了观测, 取得了较好的观测结果.

## 1 宽带干涉仪原理

宽带干涉仪的基本原理是确定到达两个宽带天线的辐射信号的各 Fourier 频谱分量的位相差, 从而计算辐射源的仰角和方位角. 最简单的宽带干涉仪由两个相距一定距离的天线构成, 如图1所示. A和B是两个接收天线, 它们之间的距离 $d$ 称为基线长度. 宽带干涉仪利用高速数据采集系统同步记录来自接收天线的宽带信号, 到达天线A的宽带辐射信号可表示为 $f(t)$ , 则到达天线B的信号为 $f(t-\tau)$ , 这里 $\tau$ 为辐射信号的延迟时间. 宽带辐射信号的频域表达式为

2001-01-02 收稿, 2001-02-27 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:49975003), 中国科学院“九五”重大项目(批准号:Kz951-B1-405)及中国科学院知识创新工程项目(批准号:Kzcx2-201)资助

\*\* E-mail: dongwsh@ns.lzb.ac.cn

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (1)$$

$$f(t - \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} e^{-i\omega\tau} d\omega. \quad (2)$$

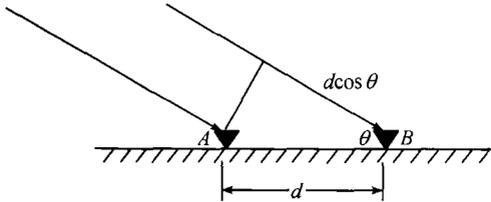


图 1 两个天线的宽带干涉仪原理示意图

(1)和(2)式仅有相位因子  $e^{-i\omega\tau}$  的差别,因此信号到达两个天线的相位差为

$$\Delta\phi = \omega\tau = 2\pi f\tau, \quad (3)$$

这里  $\tau = d\cos\theta/c$ ,  $f$  和  $\theta$  分别是频率和辐射信号的人射角,  $c$  是光速. 因此,方程(3)可写为

$$\Delta\phi = \omega\tau = 2\pi f d \cos\theta / c. \quad (4)$$

对接收的时域信号进行快速 Fourier 变换 (FFT), 即可得两个天线接收到的辐射信号之间的位相差谱, 由(4)式可得其辐射信号到达天线阵的人射角.

为得到辐射源二维角度信息(方位角和仰角), 宽带干涉仪系统必须有 3 个天线构成两条不在一条直线上的基线. 为简单起见, 通常用两个相互垂直的基线——正交基线. 然后利用与窄带干涉仪相同的方法, 经简单的球面三角运算后即可得到相应辐射源的方位角和仰角.

## 2 硬件集成及辐射源定位实现方法

### 2.1 硬件集成

图 2 是整个宽带干涉仪系统的天线阵布局和硬件电器连接, 该宽带干涉仪系统有 3 个平板接收天线、一台四通道示波器、慢电场变化仪、快电场变化仪、数据采集卡和一台微机构成. 3 个天线构成一个等腰直角三角形水平放置于地面, 两条直角边分别构成东西方向和南北方向长度为 10 m 的基线. 天线通过 3 条长度相等、频响特性相同的同轴电缆分别与示波器的 3 个通道相连, 信号电缆在连接到示波器之前分别串入低端截止频率为 25 MHz 的高通滤波器.

### 2.2 辐射源定位实现方法

辐射源定位的计算方法与 Shao 等<sup>[5]</sup>的做法类似, 但略有不同. 从(4)式可以看出, 对利用示波器记录的来自两个天线的时域信号进行 FFT 变换后得到的位相差与相应频率分量成正比, 如果天线接收的信号来自同一个源, 则其相位差随频率应线性变化, 而线性变化的趋势(即直线的斜率)与辐射入射角有关. 因此, 利用整个频率范围内线性最好频段, 计算出辐射信号具有唯一性但比较粗略的入射方向, 充分利用该系统工作频段较宽的优势, 在可靠定位的基础上, 使在高频段精确入射角计算时尽可能采用较高的频率分量, 得出较精确的入射方向. 这种灵活选择精确定位频率的方法在一定程度上能识别干扰信号, 在多个沿不同方向入射的辐射信号同时到达的情况下, 对部分辐射源进行定位.

## 3 系统误差和标定结果

对宽带干涉仪系统来讲, 相位测量误差是主要的测量误差, 而入射角测量误差与相位测量误差之间有如下关系

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma_{\phi}^2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \right)^2. \quad (5)$$

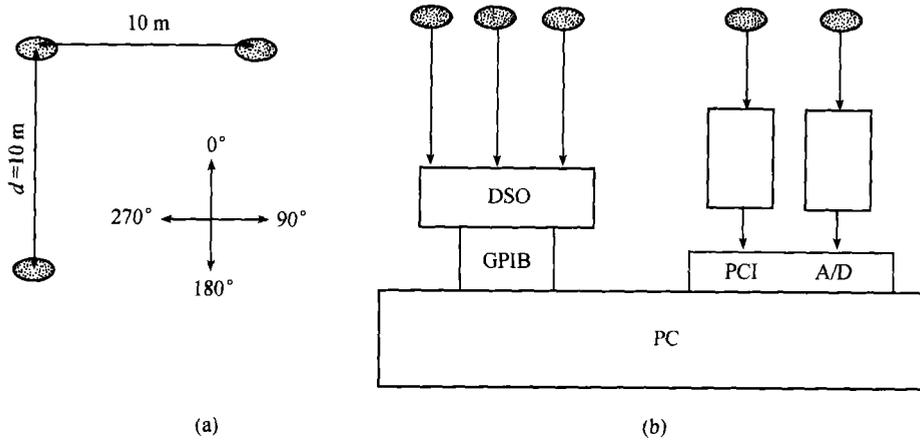


图2 宽带干涉仪系统  
(a)天线阵布局;(b)硬件集成示

对方程(4)偏微分可得

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{2\pi fd}{c} \sin \theta. \quad (6)$$

结合方程(5)和(6)可得

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{\phi}}{2\pi df \sin \theta}. \quad (7)$$

从(7)式可见,辐射信号入射角度 $\theta$ 的测量误差与相位测量误差 $\sigma_{\phi}$ 成正比,与基线长度和频率成反比,也和入射角 $\theta$ 的正弦成反比,后者意味着沿水平方向入射信号的测量误差将远大于垂直入射信号.相位测量误差 $\sigma_{\phi}$ 一般与硬件加工误差和系统参数设置两方面的因素有关.

为测试宽带干涉仪系统相位测量误差,利用一高压放电装置作为测试信号源,在距天线阵中心25~50 m范围内的多个不同位置利用火花放电产生的宽带辐射脉冲对宽带干涉仪系统的相位差进行标定,由于每次测试点的位置精确可知,我们可以利用几何原理精确计算出不同频率辐射信号到达不同天线时的相位差,而对应天线间的实测相位差则可通过对记录到的脉冲信号的快速 Fourier 变换解出不同频率信号到达天线的相位差,两者相比较就可得出测量值相对于理论计算值的偏差.标定结果表明当信噪比大于10 dB时,相位差测量误差的均方根差小于0.43.

在标定了宽带干涉仪系统的相位差测量误差之后,利用(7)式可估计入射角测量误差.在基线长度选定后,入射角测量误差不仅与频率有关,而且与入射角大小有关.表1列出了由公式(7)得出的不同入射角时,入射角测量均方根误差与频率和入射角大小的关系.

从表1可明显看出,辐射源沿其基线方向入射角的测量误差与入射角大小密切相关.特别是沿基线方向入射(入射角接近 $0^{\circ}$ )时,由此引起的入射角测量误差急剧变大.因此,干涉仪系统对较近距离的闪电放电过程的辐射源定位有较高的精度.入射角定位精度与具体定位频

率的选择有关,定位频率越高,其定位精度也就越高.在实际观测中,我们主要针对较近的距离闪电进行观测,这时闪电放电过程产生的辐射源都有较高的仰角,且一般情况下用该系统进行辐射源定位计算的频率在 200~300 MHz 范围,该宽带干涉仪系统定位误差小于  $1^\circ$ .因此,对较近距离的闪电,宽带干涉仪系统应能较客观地反映闪电辐射源时空演变特征.

表 1 强度大于 10 dB 的不同频率信号在不同入射角时的均方根误差

频率/MHz	入射角				
	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
15	$\infty$	0.268(15.36°)	0.202(11.57°)	0.165(9.46°)	0.143(8.19°)
30	$\infty$	0.142(8.14°)	0.100(5.75°)	0.082(4.70°)	0.071(4.07°)
90	$\infty$	0.048(2.75°)	0.034(1.94°)	0.028(1.61°)	0.024(1.36°)
150	$\infty$	0.028(1.60°)	0.019(1.09°)	0.016(0.92°)	0.014(0.80°)
240	$\infty$	0.018(1.03°)	0.013(0.72°)	0.010(0.57°)	0.009(0.52°)

注:括号中为相应的角度误差

## 4 观测和结果

### 4.1 观测和资料采集

在进行观测和资料采集时,示波器选择 1 GHz 采样频率,为能比较完整地记录到整个闪电放电过程,采用分段记录方式,即把每个通道 2 M 的记录长度分成 1800 个段,每段 1000 个采样点,每个记录段均采用预触发方式记录,预置点数为 400 样点.示波器记录的宽带辐射信号、每个记录段的触发时刻、时间常数分别为 6 s 和 0.1 ms 的电场慢变化和快变化信号被同步记录存盘.电场信号的采样频率 1 MHz,每通道记录长度 1 M 样点.

### 4.2 自然闪电观测

这次地闪观测资料来源于 1999 年夏季广东从化综合雷电观测试验,发生时间为 7 月 15 日 10 时 42 分(北京时间),编号为 9907151054.图 3 是这次地闪的电场变化波形,整个放电过程持续时间约 500 ms,梯级先导(L)开始前有相对较长时间的预击穿和云内发展过程(P, I),图中下部垂直短线表示宽带辐射记录段的触发时刻,从这些垂直短线的疏密程度可见,地闪不同放电过程辐射特征差异较大,但梯级先导过程辐射最强.图 4 是这次地闪放电过程辐射源

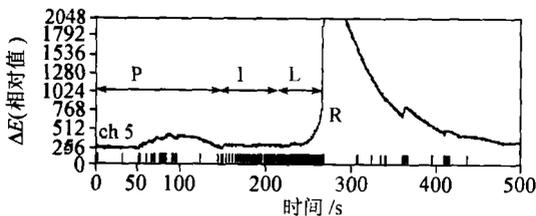


图 3 地闪 9907151054 电场变化波形

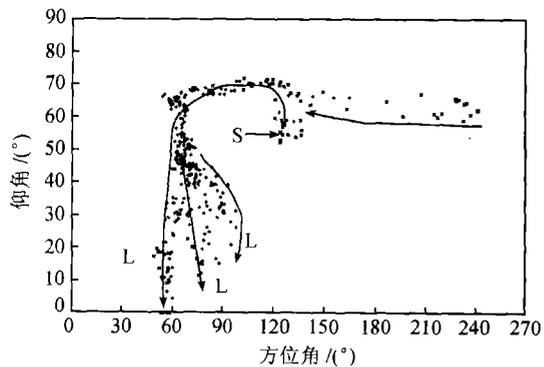


图 4 地闪 9907151054 辐射源定位结果

■, +, × 分别表示辐射源发生的时序

定位结果,闪电起始位置用S表示,闪电通道发展方向如图中箭号所示.从图4可见,闪电梯级先导向地面发展过程中有几个明显分枝同时向下发展,但只有一个先导接地引起回击过程,这与以前的光学观测结果一致.而在窄带干涉仪的观测中却很难观测到几个先导分枝通道同时向下发展的特征,由此可以看出宽带干涉仪定位闪电辐射源的优势,它能在有多个辐射源同时发生的情况下得到较好的定位结果.宽带干涉仪观测也可同时得到某一闪电不同放电过程或不同时间段的辐射频谱特征,如图5是该地闪电梯级先导向地面发展过程中,不同时段辐射频谱特征之间存在一定的差异.这种闪电辐射源定位与其频谱特征的同步观测对闪电物理机制的研究有重要意义.

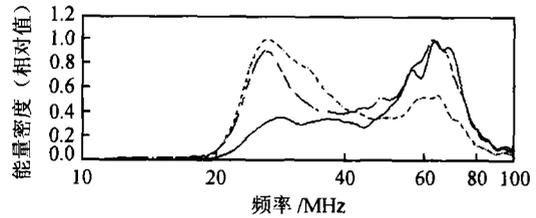


图5 9907151054地闪电梯级先导阶段辐射频谱特征  
实线、虚线和点划线分别相应梯级先导开始、中间和接近  
地面的不同时段

### 参 考 文 献

- 1 Proctor D E, et al. VHF radio pictures of lightning flashes to ground. *J Geophys Res*, 1988, 93: 12683
- 2 Rhodes C, et al. Observations of lightning phenomena using radio interferometry. *J Geophys Res*, 1994, 99: 13059
- 3 Shao X M, et al. Radio interferometer observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100: 1749
- 4 Mazur V, et al. Comparison of lightning mapping with operational time-of-arrival and interferometric systems. In: *Proc of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*. USA: Williamsburg, 1995
- 5 Shao X M, et al. Broadband radio interferometry for lightning observations. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1917