第 36 卷　第 4 期　　气　象　科　学　　Vol. 36, No.4
2016 年 8 月　　Journal of the Meteorological Sciences　　Aug., 2016

张传亮,孙学金,卫克晶,等.基于声光信号的单站式闪电三维通道定位系统.气象科学,2016,36(4):502-509.
ZHANG Chuanliang,SUN Xuejin,WEI Kejing, et al.Three-dimensional lightning channel positioning system of single station based on acoustic and optical signals.Journal of the Meteorological Sciences, 2016,36(4):502-509. doi:10.3969/2015jms.0049

# 基于声光信号的单站式闪电三维通道定位系统

张传亮　孙学金　卫克晶　张日伟　颜万祥　李浩然
(解放军理工大学 气象海洋学院,南京 211101)

**摘要**　目前基于雷声的三维定位系统多停留在实验阶段,从业务化运行的角度考虑,改进了单站式闪电三维定位系统的麦克风阵列,设计了定位算法,利用该系统采集了 2014 年夏季南京地区的部分闪电数据,并从计算耗时的角度对三维通道实时定位的可行性进行了研究。结果表明,基于声光信号的单站式闪电三维通道定位系统可重构闪电的三维通道;对连续的雷声信号进行分帧,帧长取 0.03 s 时,声源定位点可描绘出清晰的闪电主通道;采用分组保存和处理闪电声光信号的方法,可实现实时定位,当一组数据的保存时间为 50 s 时,计算耗时为 46.507 s。

**关键词**　闪电; 三维通道; 声光信号; 互功率谱; 实时定位
**分类号**: P427.32　　**doi**:10.3969/2015jms.0049　　**文献标识码**: A

# Three-dimensional lightning channel positioning system of single station based on acoustic and optical signals

**ZHANG Chuanliang　SUN Xuejin　WEI Kejing　ZHANG Riwei**
**YAN Wanxiang　LI Haoran**
(*College of Meteorology and Oceanography*, *PLA University of Science and Technology*, *Nanjing* 211101, *China*)

**Abstract**　Considering business needs, an improved microphone array structure of three-dimensional lightning channel of single station and its related algorithms are presented in this paper. The system was used to collect part of the lightning data in Nanjing in the summer of 2014, and then the feasibility of real-time positioning of the three-dimensional lightning channel is studies from a time-consuming opearation viewpoint operation is studied. Results show that the three-dimensional lightning channel positioning system of single-station based on acoustic and optical signals can reconstruct the channel of lightning; when the continuous signal turns into frames and the frame length is set to 0.03 s, the sound positioning point can depict the main channel of lightning clearly; storage and processing of the grouping data of thunder and flash signals can achieve real-time positioning, when the time length of preservation is 50 s, and the time-consuming of computer is 46.507 s.

**Key words**　Lightning; Three-dimensional lightning channel; Acoustic and optical signals; Cross power spectrum; Real-time positioning

**收稿日期**(Received):2015-02-03;**修改稿日期**(Revised):2015-05-18; **网络出版日期**(Published on-line):2016-07-29
**网络出版地址**:http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20160729.1636.008.html
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(41575020)
**通信作者**(Corresponding author):孙学金(SUN Xuejin). xjsun2002@sina.com

## 引　言

闪电是自然大气中强烈的放电现象,并同时伴随着声、光、电、磁等多种物理现象发生,由闪电引起的灾害已被列为世界十大自然灾害之一[1,2]。同时,闪电三维通道的不确定性,也给人类合理规避闪电灾害造成困难。

目前构建闪电三维通道的方法主要有 3 种:一是利用两个以上高速相机从不同角度拍摄闪电通道[3],然后利用图像处理技术将三维通道还原,如高彦在利用高速相机进行闪电三维通道定位时,选用的三台高速相机,采样率分别为 $1\times10^4$ 帧·$s^{-1}$、$5\times10^4$ 帧·$s^{-1}$ 和 $1\times10^3$ 帧·$s^{-1}$[4];二是利用甚高频干涉仪阵列测量伴随闪电过程产生的甚高频信号的仰角和方位角,再结合雷声信号和电磁信号到达时间差求出闪电通道的三维结构,邱实等使用了 4 台甚高频干涉仪,其采样速率高达 1 GS·$s^{-1}$[5];三是利用麦克风阵列测出雷声到达不同麦克风的时延,计算声源的仰角和方位角,然后根据声信号和电磁信号的到达时间差求出闪电通道的三维结构,章涵利用此法定位时,同样使用了包含 4 个麦克风的阵列,每个声通道的采样率为 100 KS · $s^{-1}$[6]。方法一、方法二精度较高,但需处理海量的数据,难以实现实时定位,方法三数据量小,但该系统接收的电磁信号为麦克风线圈感应的信号,当雷声信号比较密集时,电磁信号易被其他雷声信号所覆盖。

上述闪电三维通道定位方法,目前还停留在实验阶段,尚未开展业务运行。与影像、电磁学等信号相比,闪电的声光信号更易获取[7,8],且数据量较小,易于实现业务化运行,利用雷声探测闪电原理与人工观测闪电一致,将会降低仪器观测结果与人工观测的差异[9],因此本文设计了基于声光信号的闪电三维通道定位系统,并从计算机处理时间的角度讨论了实时定位的可行性。

## 1　闪电三维通道实时定位系统设计

基于声光信号的闪电三维通道定位系统由硬件部分和软件部分组成。硬件部分由麦克风阵列、光信号探测单元和信号采集卡组成,负责采集闪电声光信号数据,软件部分负责对采集的数据进行处理,计算声光信号到达时间差以及声信号到达麦克风阵列中各个麦克风的时延,进而获得闪电三维通道。

### 1.1　硬件采集系统

Few[10]首先利用雷声声源研究了闪电的三维通道,建立了基线长度为 30 m 的 Y 型测站,采集雷声信号,并重构了闪电的三维通道。MacGorman[11]认为若麦克风阵列的基线过长,雷声多径传播效应会导致通道间相关性变差,造成较大的闪声通道定位误差。随着采样技术的提高,使得短基线的单站式闪电三维通道定位系统成为可能。章涵等[6]建立的麦克风阵列基线长度为 1 m,4 个麦克风分别位于三维坐标系中的(0,0,0)、(1,0,0)、(0,1,0)和(0,0,1)点处。QIU, et al[5]搭建的麦克风阵列由 3 个麦克风组成,分别位于等腰直角三角形 3 个顶点上,两条直角边的长度为 12.5 m。

本文采用的麦克风阵列如图 1 所示,由 mic1、mic2、mic3 组成正三角形,边长为 2 m,正上方为 mic4,与底面正三角形中心的距离为 2 m。相比上述几种设计,优点在于:基线较短,可以实现闪电三维通道的单站定位;底面采用正三角形设计,稳定性好;支架采用可拆卸设计,易于实现机动化。

光传感器为深圳龙信达公司生产的 LXD-66MQ 型硅光二极管,频响范围为 200~1 100 nm,基本覆盖了紫外波段、可见光波段和近红外波段。叶江荣的研究结果表明,闪电辐射能量在可见光及近红外光谱范围内能量更为集中,其中777.4 nm和 868.3 nm 处的辐射最强。故该频响范围确保了闪电发生时,能采集到闪电的光信号。

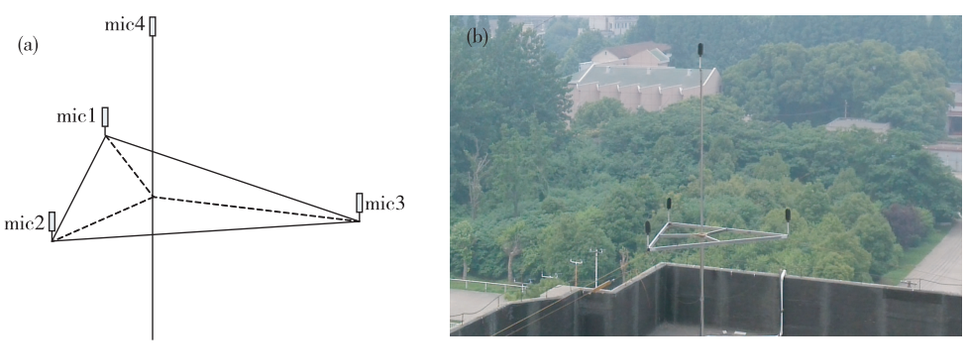


图 1　麦克风阵列:(a)示意图;(b)实物图

Fig.1　Microphone array: (a) sketch diagram; (b) real products

声信号采集卡选用了北京星烁华创开发的USB2066-1信号采集卡，采样率可达每通道1.23 MS·s$^{-1}$，可实现8路信号同时采集，分辨率为16位；光信号采集卡选用了USB9825B-20信号采集卡，采样率为每通道20 MS·s$^{-1}$，可实现4通道同时采集，分辨率为12位。可满足闪电声光信号高速、大容量数据的实时采集。

### 1.2 软件部分

软件部分主要实现的功能为采集和处理闪电的声光数据，触发信号为光信号，其流程图如图2所示。前期观测结果显示，仪器暗电流造成的噪声约为0.02 V，为了避免暗电流的干扰，本系统设计的光信号触发阈值为0.1 V。当检测线程检测到光信号幅度超过阈值时，保存线程开始工作，保存时长为50 s的声光数据，同时检测线程休眠，50 s后线程复苏。当有新数据产生时，处理线程开始工作，首先将声信号数据分为4通道，利用BP神经网络识别雷声，并对雷声信号分帧，结合麦克风阵列的结构，获取每帧雷声信号对应声源的仰角和方位角，同时检测光信号的最大值，假设系统接收到光信号最大值后，第一次接收的雷声信号是与此光信号同步产生的，继而求出每帧声信号与光信号到达测站的时间差，即可求得声信号与测站的距离，结合仰角、方位角信息，求得声源的三维坐标，最后对闪电通道进行三维定位。

## 2 闪电通道的三维定位

利用所设计的硬件和软件系统，对2014年夏季南京地区的闪电个例进行探测和分析。2014年9月28日下午南京天气突变，4 h内发生闪电5 000余次。本系统同步观测了此次雷暴过程，并采集了当天55组数据，图3为一组采集的样本，图3a-d分别为采集的4个通道的雷声信号，图3e为对应的光信号。本文将以该样本为例，计算闪电的三维通道，并从计算机处理时间的角度讨论基于声光信号的闪电三维通道实时定位的可行性。计算机的配置为：CPU为Intel Xeon E5-1620，主频为3.6 GHz；内存为16 GB。

### 2.1 雷声识别

本文利用小波变换提取雷声信号的特征量，对信号进行7层分解，提取每层小波子带的能量，并以归一化的能量值和能量值的方差为特征量[12]，利用神经网络检测雷声信号[13]，以系统预采集的10个信号作为训练集，包括脚步声、鞭炮声、鸣笛声、风声

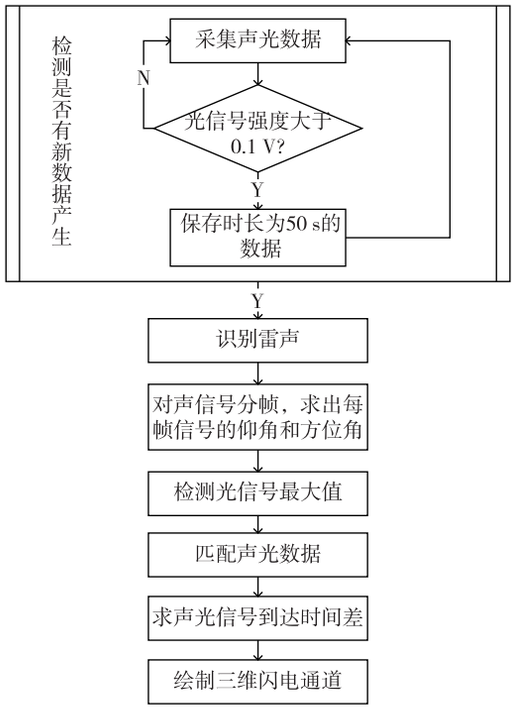


图2 软件流程图
Fig.2 The software flow chart

和雷声，以20个预采集的声信号作为验证集，17次验证正确，3次错误，正确率达85%。利用训练后的神经网络进行雷声检测，图4a为声音信号样本及识别结果，其中红色矩形所围时段为雷声信号，持续时间2 s。图4b图为对应的光信号，其中红色星号处为闪电发生光信号的时刻。

### 2.2 仰角方位角的计算及声信号分帧

结合麦克风阵列结构，求雷声到达麦克风阵列的时延与仰角、方位角的关系。本文采用投影法，将麦克风阵列分别投影到水平平面和垂直平面，当投影到水平平面时，其示意图如图5所示。其中，$AM$、$CN$为声线，由于麦克风阵列基线为2 m，相比声源与阵列的距离，麦克风阵列的基线长度可忽略不计，故可把到达各麦克风的声线看作一组平行线。$\alpha$为声源方位角，$\beta$为仰角，$A$、$B$、$C$分别为mic1、mic2和mic3。$L_1$为2 m，由如图所示的几何关系，可得：

$$v\Delta t_{13} = L_1\cos\beta\sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right). \quad (1)$$

同理可得

$$v\Delta t_{23} = L_1\cos\beta\sin\alpha. \quad (2)$$

当投影到mic3、mic4和底面正三角形中心3个点所在的平面时，其示意图如图6所示。$C$、$D$分别为mic3、mic4，$CQ$和$DP$为声线，由如图所示的几何关系，可得：

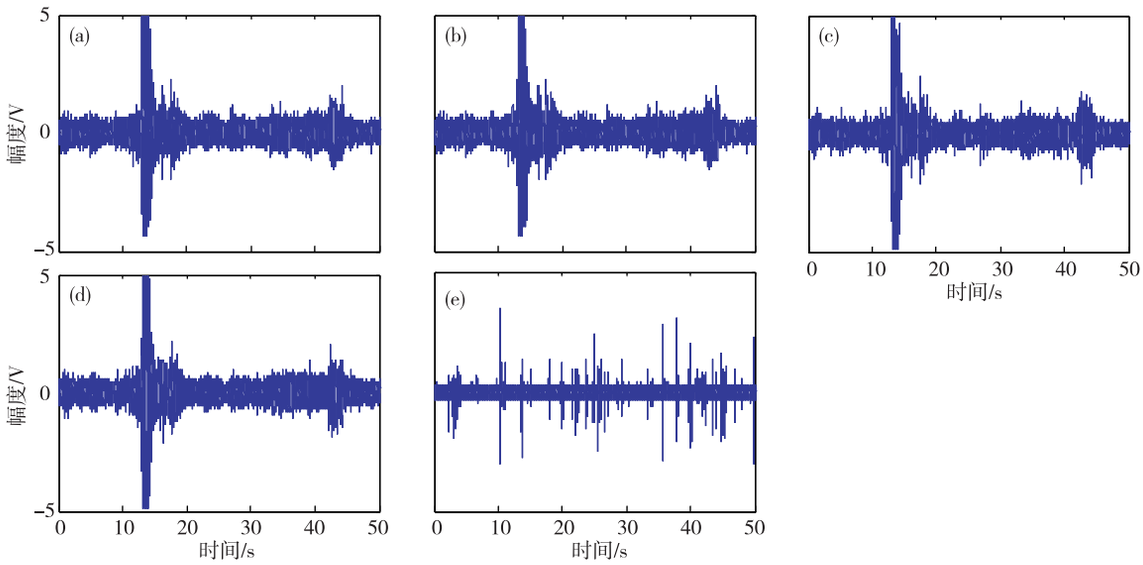


图 3　闪电声光信号样本:(a)声通道 1;(b)声通道 2;(c)声通道 3;(d)声通道 4;(e)光信号

Fig.3　Lightning acoustical and optical signal samples:(a) acoustical channel 1;(b) acoustical channel 2;(c) acoustical channel 3;(d) acoustical channel 4;(e) optical channel

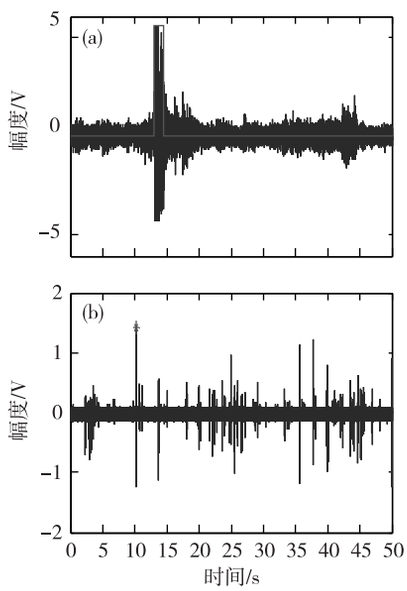


图 4　雷声信号检测结果及对应的光信号:(a)声信号识别结果;(b)光信号及其最大值点

Fig.4　Thunder signal detection results and synchronous optical signal:(a) thunder signal detection results;(b) synchronous optical signal and its maximum points

$$v\Delta t_{34} = -L_2\cos(\alpha + \frac{\pi}{6})\sin(\frac{\pi}{6} - \beta) \quad 。(3)$$

确定了雷声到达各个麦克风的时延与仰角方位角的关系后,首先建立查找表,根据公式(1)和(3),计算 0~90°的仰角和 0~359°的方位角对应的 $\Delta t_{13}$、$\Delta t_{34}$,角度分辨率为 1°;第二步根据各个麦克风探测到的雷声信号的差异求雷声到达各个麦克风间的时延;第三步是利用最小二乘法,求与实际求得的时延最接近的那组查找表中的时延值,对应的仰角、方位角即为声源处的仰角、方位角。

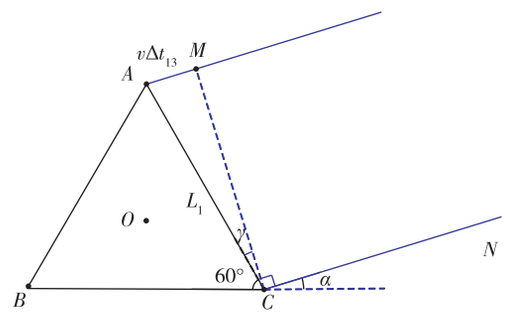


图 5　麦克风阵列的水平投影

Fig.5　The horizontal projection of microphone array

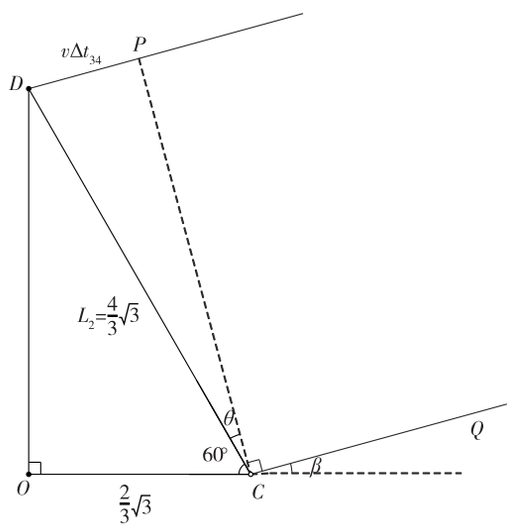


图 6　麦克风阵列的垂直投影

Fig.6　The vertical projection of the microphone array

时延在雷声三维定位的算法中居于核心位置,由于雷声在大气中传播易受大气环境因素[14]和其他声源影响,故时延算法抗噪能力的强弱,将直接关系到闪电的三维定位准确与否。Few[10]、MacGorman[11]、章涵等[6]和 QIU, et al[5]在求时延时,采用了广义互相关函数法(Generalized Cross-correlation Function,以下简称 GCC),Few 在其后的研究中,指出了 GCC 不能区分同一时刻到达麦克风阵列的不同声道产生的不同声波频率的雷声[15]。Akiyama, et al[16]和杨了等[17]分别用互功率谱法(Cross Spectrum Power,以下简称 CSP)和改进的 CSP 求时延,得到了较为理想的闪电通道

本文利用模拟信号综合考虑了 GCC、CSP 以及不同加权函数下的 CSP 求时延的效果以及抗噪能力,GCC、CSP 的表达式如式(4)和(5)所示:

$$R_{12}(\tau) = \alpha_1\alpha_2 E[x_1(n-\tau_1)x_2(n-\tau_2-\tau)], \quad (4)$$

$$R_{12}(\tau) = 2\pi\int_{-\infty}^{+\infty} a(f)G_{12}(f)e^{j\cdot(2\pi f\tau)}\mathrm{d}f。 \quad (5)$$

其中,$x_1(n)$、$x_2(n)$ 为麦克风 1 与麦克风 2 接收到的声信号,$\alpha_1$、$\alpha_2$ 为两路声信号采集系统的增益,$G_{12}(f)$ 为两路声信号的互功率谱函数,$a(f)$ 为加权函数。各类加权函数的表达式见表 1[18]。

**表 1 各种加权函数的表达式**

Table 1 The expression of various weighting functions

| 名称 | 表达式 |
|---|---|
| roth | $\frac{1}{G_{11}(f)}$ |
| scot | $\frac{1}{\sqrt{G_{11}(f)\cdot G_{22}(f)}}$ |
| phat | $\frac{1}{\lvert G_{12}(f)\rvert}$ |
| cps-m | $\frac{1}{(G_{11}(f)\cdot G_{22}(f))^{\frac{3}{4}}}$ |

模拟信号为调幅信号,采样率为 1 kHz,时延为 0.04 s,并加上了高斯白噪声,信号的信噪比为 30,如图 7 所示。分别选用了 GCC、CSP、以及基于 CSP 的“roth”、“scot”、“phat”、“cps-m”加权函数求时延[19],结果如图 8 所示。

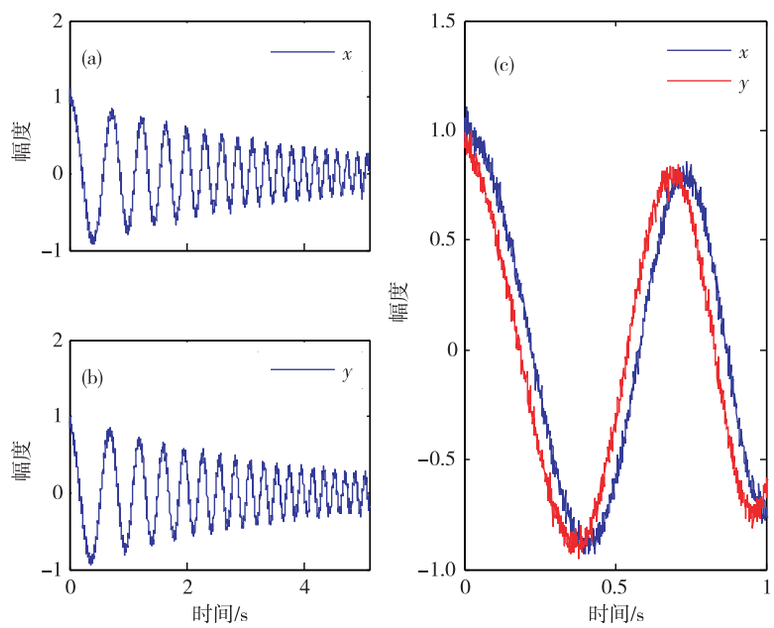


图 7 模拟的调幅信号及其中的一段截取信号:(a)模拟的调幅信号;(b)延时后的模拟信号 (c)截取信号

Fig.7 Analog AM signal and the period of a section of signal: (a)analog AM signal; (b) analog signal with delay; (c) a section of signal

由图 8 可以看出,这几种方法都要通过求最大值点求时延,虽然 6 种方法都能求得正确的时延值,但基于“roth”、“phat”、“cps-m”加权函数方法的计算结果只有一个峰值,抗噪能力相比其它方法要好。从算法的复杂度考虑,本文选择了计算量相对较小的 phat 加权法。

利用时延算法求得 $\Delta t_{13}$、$\Delta t_{34}$后,利用最小二乘法在已建立的查找表中寻找与之对应的 $\Delta t'_{13}$、$\Delta t'_{34}$。定义最小二乘系数 $\delta^2$ 为

$$\delta^2 = (\Delta t_{13} - \Delta t'_{13})^2 + (\Delta t_{14} - \Delta t'_{14})^2。 \quad (6)$$

当 $\delta^2$ 取值最小时,$\Delta t'_{13}$、$\Delta t'_{34}$对应的仰角、方位角即为声源处的仰角、方位角。

一组雷声数据可得到一个声源,要计算闪电的三维通道,需要将一段连续的雷声信号分为若干个

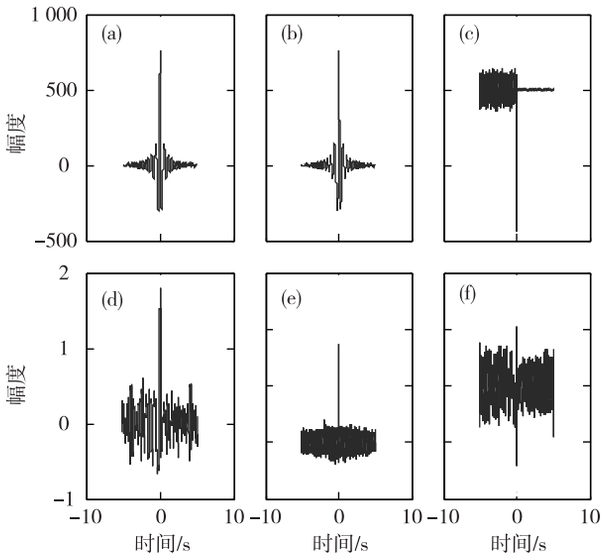


图 8　6 种求时延方法比对图:
(a)GCC;(b)CSP;(c)roth;(d)scot;(e)phat;(f)cps-m
Fig.8　The comparison chart of six kinds of time delay estimation method:(a)GCC;(b)CSP;(c)roth;(d)scot;(e)phat;(f)cps-m

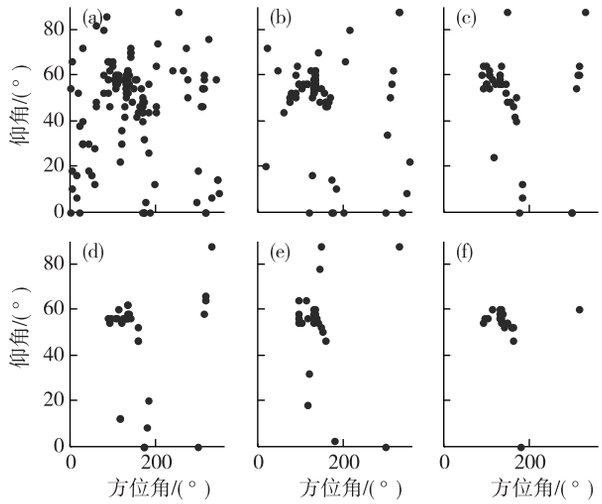


图 9　不同帧长下仰角和方位角的散点图:
(a) 帧长为 0.01 s;(b) 帧长为 0.02 s;(c) 帧长为 0.03 s;
(d) 帧长为 0.04 s;(e) 帧长为 0.05 s;(f) 帧长为 0.06 s
Fig.9　The scatter plots of elevation and azimuth for frame length:(a)0.01 s;(b) 0.02 s;
(c)0.03 s;(d)0.04 s;(e)0.05 s;(f)0.06 s

声源,这就要对该雷声信号进行分帧。Few 的研究表明,利用雷声进行闪电三维定位的关键在于将声信号分帧,若分帧不合理,将无法得到一条较为连续的闪电通道[15]。本文分别选用了 0.01~0.06 s 的 6 种帧长对图 5 所示的雷声数据进行分帧,得到了不同帧长下仰角和方位角的散点图,如图 9 所示。由图可知,当帧长小于 0.03 s 时,由于数据量过小,造成通道间相关性变小,出现较大的定位误差;当帧长为 0.03 s、0.04 s、0.05 s 时,能清晰地分辨闪电主通道;当帧长为 0.06 s 时,声源点过少,无法分辨闪电主通道。为了更加细致地重构闪电通道而同时又减少定位误差,本系统选择的帧长为 0.03 s。

## 2.3　声光信号到达时间差

由图 3 闪电信号的声光波形可以看出,采集的闪电声音数据和光数据并不是一一对应的关系。大气中往往存在许多常亮的背景光源,而闪电的光信号属于突变光源,为了采集到较为纯净的闪电光源,系统在光信号采集卡上增加了直流滤波器。另外,目前闪电光信号的识别算法大多是基于光信号脉冲的时间参数,而滤除直流后导致光信号波形失真,无法利用现有的算法进行识别。如 GUO, et al[20] 研究表明,闪击光信号的宽度介于 103~235 μs 之间;项震等在研究闪电光信号的识别时,设计的采样频率为 3 $MS\cdot s^{-1}$,并选择了信号开始时间差、到达峰值时间差、脉冲上升沿时间差和脉冲宽度时间差作为特征量,利用模糊算法进行识别[21]。而且,增加光信号识别算法也会增加计算机的计算量。

由于上述原因,本系统采取了折衷的方法,即不进行闪电光信号的识别,只检测光信号的最大值,并假设当大气中有闪电击穿现象时,相对背景光源,闪电光信号的亮度最大,故当检测到光信号最大值时,只要系统在同一时刻保存的声信号中识别出了后续的雷声,就认为此光信号就是闪电产生的光信号,并认为此闪光发生后,系统第一个识别的后续雷声是与之同步产生的。如图 4 中红色矩形区域的雷声和星号标记的光信号就认为是一次闪电过程产生的声光效应。系统在该段数据中,只计算该段闪击过程三维通道。

光在空气传播的速度为 $3\times10^8$ $m\cdot s^{-1}$,声在 20 ℃的标准大气压下传播速度为 340 $m\cdot s^{-1}$,相对声音的传播时间,光传播时间可以忽略不计,故声源与麦克风阵列的距离为

$$D = v_s \Delta t \ , \tag{7}$$

$D$ 为声源与麦克风阵列的距离,$v_s$ 为声速,$\Delta t$ 为闪光与雷声到达测站的时间差。

## 2.4　闪电通道的三维定位

已知每帧声信号的声源的仰角、方位角及其与测站的距离,即可求得该声源的三维坐标。利用该段连续雷声的若干帧声源信号的三维坐标即可大致描绘闪电的三维通道,如图 10 所示。

从闪电的三维通道图可以看出,闪电的主通道位于声源点比较密集的部分,大致位于测站(坐标原点处)南方,此次地闪的落地点位于与距离测站大概1 000 m 处的南方,与当日人工观测结果吻合。

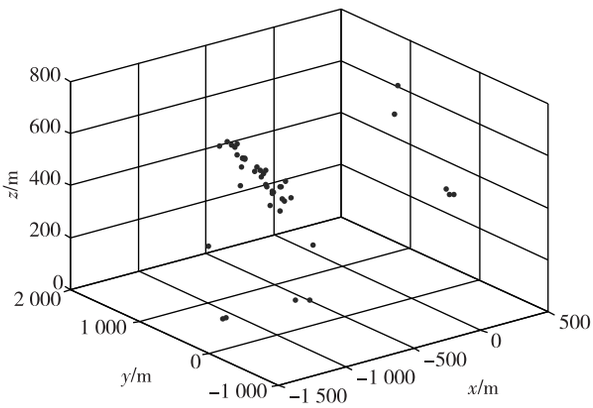


图 10 闪电三维通道
Fig.10 The three-dimensional lightning channel

## 3 实时定位可行性研究

本文主要从计算机运算时间考虑实时定位可行性。挑选了预采集的 14 组不同时长雷声信号的样本,运行 10 次,统计了处理的平均时间,并对其进行拟合,结果如图 11 所示。当采集时长为 50 s 时,计算机计算闪电三维通道所需时间为 46.507 s,可实现闪电三维通道的实时定位。

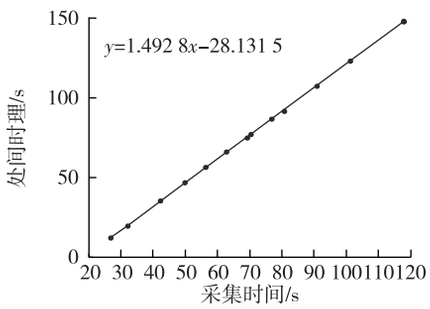


图 11 不同长度的数据进行闪电通道三维定位所需时间
Fig.11 The time required for the three-dimensional positioning using different time lengths of data

## 4 结论与讨论

本文在前人研究的基础上,对单站式闪电三维通道定位系统进行了设计,并利用搭建的硬件系统和设计的软件对闪电三维通道实时定位的可行性进行了研究。主要结论如下:

(1)利用设计的麦克风阵列,根据其几何结构,利用投影法,可获得声信号到达各个麦克风间的时延与仰角、方位角的关系,并利用声光信号到达时间差可对闪电通道进行三维定位,定位结果与人工观测较为吻合。

(2)基于互功率谱的“phat”加权法算法相对比较简单,抗噪能力强,可用于进行时延的计算。

(3)通过对连续的雷声信号进行分帧处理,可对闪电通道进行重构。帧长对闪电通道的重构有一定影响,当帧长为 0.03 s 时,能得到比较清晰的闪电通道。

(4)采用分组保存和处理闪电声光信号的方法,可实现闪电通道的实时定位处理。当一组数据的保存时间为 50 s 时,运算所需时间为 46.507 s。

由于闪电的声光信号在大气中传播是易受大气环境的影响和背景环境的干扰,通过麦克风阵列和光传感器进行闪电三维通道的定位精度相比高速相机定位法和 VHF 与声信号结合的定位法要低,但其优点在于成本较低,对架设的环境要求低、算法相对简单,易于实现实时定位,适合机动式自动观测,可作为闪电观测的一种有效补充。下一步工作,还须改进雷声识别算法,提高识别的正确率,并研究简单有效的闪电光信号识别算法,使该系统在闪电的三维结构的自动化观测中发挥更大的作用。

## 参 考 文 献

[1] 陈渭民. 雷电学原理. 北京: 气象出版社, 2003: 1-2.
CHEN Weimin. Physics of the thunder and lightning. Beijing: Meteorological Press (in Chinese), 2003: 1-2.

[2] 李京校, 扈海波, 樊荣, 等. 雷电监测预警对雷击风险评估的影响分析. 气象科学, 2013, 33(6): 678-684.
LI Jingxiao, HU Haibo, FAN Rong, et al. Impact of lightning monitoring and warning on lightning risk assessment. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2013, 33(6): 678-684.

[3] 李俊, 张义军, 吕伟涛, 等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测. 应用气象学报, 2008, 19(4): 401-411.
LI Jun, ZHANG Yijun, LYU Weitao, et al. Observation of a natural cloud to ground lightning with multiple return strokes. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2008, 19(4): 401-411.

[4] 高彦. 闪电连接过程中先导三维发展特征的分析[硕士论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
GAO Yan. The three-dimensional propagation characteristics of flash leaders in the attachment process[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science (in Chinese), 2014.

[5] QIU Shi, ZHOU Bihua, SHI Lihua. Synchronized observations of cloud-to-ground lightning using VHF broadband interferometer and acoustic arrays. J. Geophys. Res.: Atmos., 2012, 117(D19). doi:10.1029/2012JD018542.

[6] 章涵, 王道洪, 吕伟涛, 等. 基于雷声到达时间差的单站闪电通道三维定位系统. 高原气象, 2012, 31(1): 209-217.
ZHANG Han, WANG Daohong, LYU Weitao, et al. A single-station-based 3D lightning channel imaging system using differential arrival time of thunder. Plateau Meteorology (in Chinese), 2012, 31(1): 209-217.

[7] 欧阳玉花, 袁萍, 贾向东, 等. 用信号处理技术及传播理论还原雷声频谱. 物理学报, 2013, 62(8): 084303-1-084303-7.
OUYANG Yuhua, YUAN Ping, JIA Xiangdong, et al. Thunder acoustic spectrum obtained by using digital signal processing and propagation effects. Acta Physica Sinica (in Chinese), 2013, 62(8): 084303-1-084303-7.

[8] 张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 2006, 17(5): 611-620.
ZHANG Yijun, MENG Qing, MA Ming, et al. Development of lightning detection technique with application of lightning data. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2006, 17(5): 611-620.

[9] 钟颖颖, 冯民学, 周曾奎, 等. 闪电定位资料与目测雷暴日的对比分析. 气象科学, 2010, 30(6): 851-855.
ZHONG Yingying, FENG Minxue, ZHOU Zengkui, et al. Comparative analysis of lightning location data and observed thunderstorm days. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2010, 30(6): 851-855.

[10] Few A A. Lightning channel reconstruction from thunder measurements. J. Geophys. Res., 1970, 75: 7517-7523.

[11] MacGorman D R. Lightning location in a storm with strong wind shear[D]. Houston, Tex: Rice University, 1978.

[12] 柴烨, 张有光. 基于小波分析的雷声信号特征提取. 电子技术应用, 2007, 33(5): 118-120.
CHAI Ye, ZHANG Youguang. The feature extraction of thunder signal based on wavelet analysis. Computer Technology and Its Applications (in Chinese), 2007, 33(5): 118-120.

[13] 王新江, 程飞, 王孝红. 雷电声音模式识别. 信息技术与信息化, 2011(1): 80-82.
WANG Xinjiang, CHENG Fei, WANG Xiaohong. Voice-pattern recognition of thunder. Information Technology and Informatization (in Chinese), 2011(1): 80-82.

[14] 张景川, 袁萍, 欧阳玉花. 雷声在大气中传播的吸收衰减特性研究. 物理学报, 2010, 59(11): 8287-8292.
ZHANG Jingchuan, YUAN Ping, OUYANG Yuhua. Characteristics of absorption and attenuation of thunder propagating in atmosphere. Acta Physica Sinica (in Chinese), 2010, 59(11): 8287-8292.

[15] Few A A, Teer T L. The accuracy of acoustic reconstructions of lightning channels. J. Geophys. Res., 1974, 79: 5007-5011.

[16] Akiyama H, Ichino K, Horii K. Channel reconstruction of triggered lightning flashes with bipolar currents from thunder measurements. J. Geophys. Res.: Atmos., 1985, 90(D6): 10674-10680.

[17] 杨了, 吕伟涛, 张阳, 等. 改进的互功率谱相位法在雷声声源定位中的应用. 应用气象学报, 2014, 25(2): 193-201.
YANG Liao, LYU Weitao, ZHANG Yang, et al. Application of improved cross power spectrum phase method to acoustic source localization of thunder. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2014, 25(2): 193-201.

[18] 王震. 基于互功率谱相位时延估计的声源定位系统研究[硕士论文]. 天津: 天津大学, 2010.
WANG Zhen. Research on sound source localization system based on time delay estimation cross-power spectrum phase[D]. Tianjin: Tianjin University (in Chinese), 2010.

[19] 崔玮玮, 曹志刚, 魏建强. 声源定位中的时延估计技术. 数据采集与处理, 2007, 22(1): 90-99.
CUI Weiwei, CAO Zhigang, WEI Jianqiang. Time delay estimation techniques in source location. Journal of Data Acquisition & Processing (in Chinese), 2007, 22(1): 90-99.

[20] GUO Changming, Krider E P. The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. J. Geophys. Res.: Oceans, 1982, 87(C11): 8913-8922.

[21] 项震, 刘明, 李鹏, 等. 闪电信号的探测分析及其模糊识别研究. 光电工程, 2011, 38(2): 28-33.
XIANG Zhen, LIU Ming, LI Peng, et al. Detection analysis and fuzzy recognition investigation for lightning signal. Opto-Electronic Engineering (in Chinese), 2011, 38(2): 28-33.