

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.036

基于群到达时间法的雷电定位系统及其定位误差分析

蔡新景¹, 王延廷², 刘兴山², 苏有权², 王一平², 魏春龙²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 东北电网公司太平湾发电厂, 辽宁 丹东 118000)

摘要: 雷电定位系统是雷电物理和雷电防护领域的一个热点问题。当雷电放电产生的甚低频电磁辐射信号传输距离较远时,基于互相关函数的时差法往往不能准确进行雷电定位。基于此,文中深入研究了群到达时间法定位基本原理,并探讨了GPS时间误差、相位测量误差和频率测量误差对定位精度的影响。结果表明,采用群到达时间法进行雷电定位是可行的;GPS时间误差和相位测量误差导致定位误差较小,而频率测量误差对定位精度影响较大。

关键词: 雷电定位系统;群到达时间法;甚低频;群速度;相位;色散

Lightning Locating System Based on Time of Group Arrival Method and Location Error Analysis

CAI Xinjing¹, WANG Yanting², LIU Xingshan², SU Youquan², WANG Yiping², WEI Chunlong²

(1. College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Taipingwan Power Plant, Northeast Power Grid Corporation, Liaoning Dandong 118000, China)

Abstract: Lightning location systems have received much attention in the fields of lightning physics and lightning protection. When the transmission distance of VLF electromagnetic radiation signal generated by lightning discharge is long, the time difference method based on cross-correlation function is often unable to accurately locate. In this paper the principle of time of group arrival method are investigated, and the effects of error of absolute time determined from GPS, phase measurement, and frequency measurement on lightning location accuracy are analyzed. It is shown that it is feasible to use time of group arrival method for lightning location. The effects of error of absolute time determined from GPS and phase measurement on lightning location accuracy are small, however, the effect of error of frequency measurement on lightning location accuracy is comparatively larger.

Key words: lightning locating system; time of group arrival; very low frequency; group velocity; phase; dispersion

0 引言

雷电定位系统(lightning locating system, LLS)由于可实时获取云间闪和云地闪雷电过程的时空分布、强度和极性等特征,在雷电物理、雷电预警和雷电防护等领域得到广泛应用^[1-2]。雷电放电产生电磁辐射频率从甚低频(very low frequency, VLF)、甚高频(very high frequency, VHF)到光频乃至Gamma射线,一般而言雷电定位系统所探测的频率主要为VLF和VHF^[3-6]。研究表明,不同频率的电磁辐射信

号对应于不同的雷电放电阶段。VLF信号对应于大范围尺度的雷击放电过程,一般用来确定雷击通道或回击点位置;VHF信号对应于小范围尺度的放电过程,一般用来研究雷电放电的发展过程^[7-13]。目前大多数商业雷电定位系统均利用VLF信号进行定位,如全球雷电定位系统(world-wide lightning location network, WWLLN)^[14]。

VLF信号在地面和高空电离层所组成的波导结构中传播距离远,因此较适合于远距离探测(~600 km)。目前基于VLF信号的雷电定位方法主要为时差法

收稿日期:2020-05-09; 修回日期:2020-07-13

基金项目:辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(LR2019-047);辽宁自然科学基金面上项目(2020-215);国家电网公司东北分部项目(2018-66)。

Project Supported by Programs for Innovative Talents in Universities of Liaoning Province(LR2019-047), Natural Science Foundation of Liaoning Province(2020-215), Projects of Northeast Division of the State Grid(2018-66).

(time difference of arrival, TDOA), 即利用 VLF 信号到达每个子站的时间差进行定位。为确定 VLF 信号到达每个子站的时间差, 常需要计算不同子站信号的互相关函数, 进而根据互相关函数最大值所对应时刻来确定时间差^[14-15]。此方法有以下两个缺点: 仅适用于采集的 VLF 信号具有较大陡度或明显尖峰の場合, 但实际上当 VLF 信号传输 1 000 m 以上时, 波形的陡度会减小, 波的持续时间会增加 (~200 μ s), 其定位误差往往较大; 所有探测子站采集的信号均需要送到中心站, 这种状况导致信息传输量较大。基于此, 新西兰的奥塔哥大学 Dowden 等人提出了基于群到达时间法(time of group arrival, TOGA)的雷电定位方法, 即通过计算 VLF 信号相位随频率的变化率来确定雷电产生的电磁辐射信号到达探测子站的时间^[15]。

文中介绍了群到达时间法定位的基本原理, 探讨了 GPS 时间误差、相位测量误差和频率测量误差对定位精度的影响, 为研发全国范围乃至全球范围内的雷电定位系统提供参考。

1 群到达时差法定位原理

1.1 基本原理

VLF 信号主要来自于距回击点 2 km 内的电磁辐射, 而 2 km 远小于 VLF 特征波长 (~100 km), 因此可以近似认为 VLF 信号各频率成分在雷电通道处的初相位相等, 文中假设初相位为 ϕ_0 。Dowden 等人通过对探测的雷电信号进行频谱分析, 发现距离雷电通道 r 处的平板天线所测量的电压(或电场强度)信号可表示为^[15]:

$$U(r, t, \omega) = \sum A(\omega) \cos[\phi(\omega)] \quad (1)$$

$$\phi(\omega) = \omega t - k(\omega)r + \phi_0 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: ω 为角频率; $\phi(\omega)$ 为相位; $A(\omega)$ 为幅值; $k(\omega)$ 为波矢的幅值; ϕ_0 为初相位。

式(2)两边分别对 ω 求导, 可得

$$\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = t - \frac{dk(\omega)}{d\omega}r = t - \frac{r}{v_g(\omega)} \quad (3)$$

式(3)中, $v_g(\omega)$ 为群速度。

由式(3)可知, 若已知相位随角频率的变化率、采集信号所对应的绝对时间和群速度即可计算出雷电通道与探测子站的距离 r 。值得注意的是, 若探测的 VLF 信号为一窄带信号, 把窄带中心频率处的相位变化率和群速度代入式(3)即可进行雷电定位; 但实际上探测子站采集的信号频谱范围较宽, 为了充分利用信号的有用信息, 通常需要计算带宽

范围内所有频率的相位变化率和群速度的平均值。

1.2 计算步骤

为了验证群到达时间方法的有效性, 采用式(1)来模拟探测子站所采集到的 VLF 信号, 并计算此模拟信号的相位随频率的变化规律, 具体步骤为:

1) 采用 100 个余弦函数(如式(1)所示)叠加模拟 VLF 信号。其幅值和相位分别为:

$$A(\omega) = \cos^2\left(\pi \frac{\omega - \omega_a}{2\omega_r}\right) \quad (4)$$

$$\phi(\omega) = \omega\left[t - \frac{r}{v_p(\omega)}\right] \quad (5)$$

式(4)、(5)中: ω_a 对应于 VLF 信号的中心频率; ω_r 取决于 VLF 信号的带宽; $v_p(\omega)$ 为相速度。

电磁波在地面和高空电离层所组成的波导传输时满足色散方程^[16-17]

$$k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{c^2} \quad (6)$$

式(6)中: ω_0 为地面和高空电离层所组成的波导传输信号的下限截止频率; c 为光速。相速度为

$$v_p(\omega) = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}} \quad (7)$$

群速度为

$$v_g(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = c \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \quad (8)$$

取 $\omega_a = 12$ kHz, $\omega_r = 7$ kHz, $\omega_0 = 1.67$ kHz, $c = 3 \times 10^8$ m/s, 假定 VLF 信号频率为 2~22 kHz, 100 个余弦函数的频率在 2~22 kHz 区间取等间隔数据^[18]。当 $r = 0, 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000$ km 时模拟 VLF 波形见图 1。值得一提的是, 图 1 横坐标时间为 $(t - r/c)$ ms。从图 1(a) 可以看出, 当 $r = 0$ 即探测子站处于雷电通道位置时, VLF 信号波形两边对称, 正峰值两边会出现对称的两个负尖峰, 波没有色散现象。从图 1(b)-(d) 可以看到, 波形不再对称, 出现了色散现象, 随着距离的增加, 波的陡度越来越不明显, 此时基于峰值检测和互相关函数时差法就会失效。

2) 计算相位或相位变化率随频率的变化规律。通常来说, 在工程上测量相位比测量相位变化率更容易实现, 因此文中仅计算相位随频率的变化规律。若 $t = r/c$ 时, 相位

$$\phi(\omega)|_{t=r/c} = \omega \frac{r}{c} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}\right) \quad (9)$$

式(9)表示雷电放电产生的电磁辐射信号以光速传递到探测子站所对应时刻的相位。若 $t = r/v_g$ 时

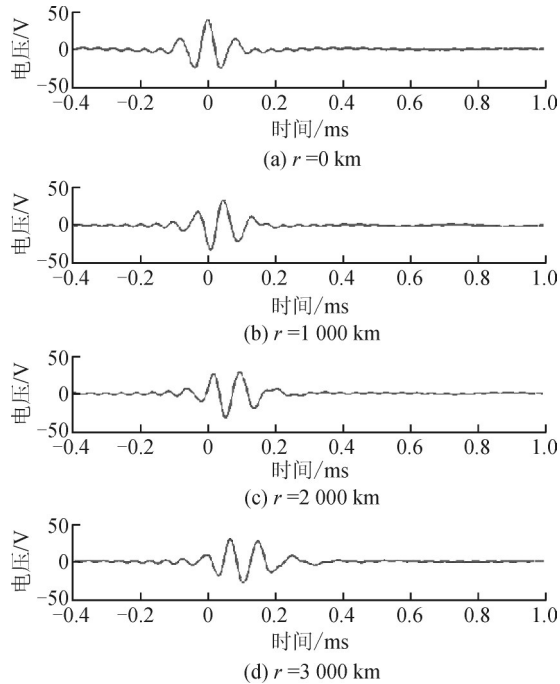


图1 不同距离的天线采集的VLF信号波形

Fig. 1 VLF signals measured by antennas at different distance

$$\phi(\omega)\big|_{t=r/v_g} = \omega \left(\frac{r}{v_g} - \frac{r}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \right) \quad (10)$$

式(10)中, v_g 为 VLF 信号在 2~22 kHz 平均群速度。

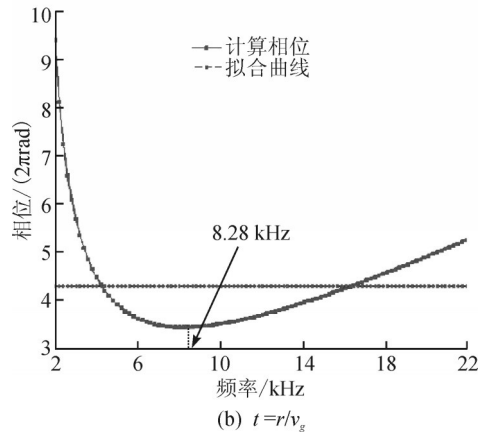
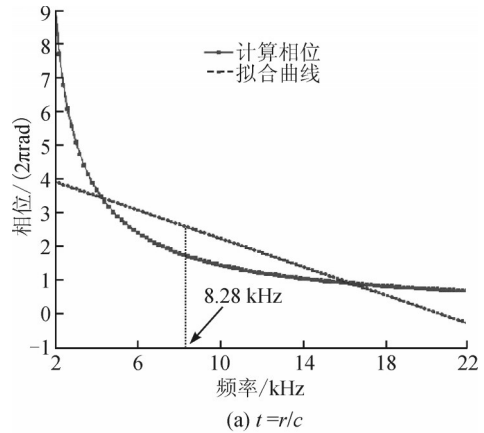
当 $r=3\ 000\text{ km}$ 时信号(如图 1(d)所示)的相位随频率变化曲线见图 2, 其中图 2(a)为 $t=r/c$ 时刻相位变化曲线, 图 2(b)为 $t=r/v_g$ 时刻相位变化曲线。从图 2(a)可以看出, $t=r/c$ 时相位随频率的增加而减小。当频率处于 2~6 kHz 时, 相位随频率的变化率较大; 当频率处于 6~22 kHz 时, 相位随频率变化率较小。采用线性回归模型拟合相位曲线所得直线见图 2(a)中虚线所示, 通过计算可知, 线性回归直线与相位曲线在 8.28 kHz 时相位斜率相等, 因此可以认为 VLF 信号在 2~22 kHz 平均群速度等于 8.28 kHz 时的群速度。

从图 2(b)可以看出, $t=r/v_g$ 时相位在 2~8.28 kHz 随着频率的增大而减小, 在 8.28~22 kHz 随着频率的增大而增大。当频率为 8.28 kHz 时, 此时相位变化率为 0, 此结论也可由式(3)推出。 $t=r/v_g$ 时线性回归直线见图 2(b)中虚线所示, 此回归直线斜率为 0, 这与文[15]结果一致。

2 定位误差影响因素

2.1 GPS 时间误差的影响

全球定位系统 GPS 民用时间最大误差为 $\pm 100\text{ ns}$ ^[19-20]。频率为 8.28 kHz 时群速度为 $0.98c$, 故 GPS 时间误差导致的定位误差最大为 $\pm 29.4\text{ m}$ 。

图2 $r=3\ 000\text{ km}$ 时相位随频率变化曲线Fig. 2 Phase curve versus frequency at $r=3\ 000\text{ km}$

2.2 相位测量误差的影响

若相位测量误差为 $\pm 0.01\text{ rad}$, 则相位变化率最大误差为 $7.96 \times 10^{-7}\text{ s}$ ($f=2\text{ kHz}$)。相应的, 最大雷电定位误差为 $\pm 233.96\text{ m}$ 。假设雷电通道距离探测站为 $3\ 000\text{ km}$ 时, 相对误差为 $\pm 7.80 \times 10^{-5}$ 。

2.3 频率测量误差的影响

若 2~22 kHz 的频率范围测量误差为 $\pm 1\text{ Hz}$, 则相位变化率最大误差约为 $6.44 \times 10^{-5}\text{ s}$, 最大雷电定位误差为 $\pm 1.89 \times 10^4\text{ m}$, 相对误差为 $\pm 0.63\%$ 。可以看出, 频率测量误差对雷电定位误差影响较大。若想要减小雷电定位误差, 必须减小频率的测量误差。

3 结论

1) 当 VLF 信号相位随频率的平均变化率为 0 时, 随对应的时间即为群到达时间。

2) GPS 时间误差导致的定位误差最大为 $\pm 29.4\text{ m}$; 相位测量误差为 $\pm 0.01\text{ rad}$ 时, 雷电定位相对误差为 $\pm 7.80 \times 10^{-5}$; 频率范围测量误差为 $\pm 1\text{ Hz}$ 时, 雷电相对误差为 $\pm 0.63\%$ 。

3) 与基于互相关函数的时差法相比较, 当电磁辐射信号存在色散现象时群到达时间法更加有效。另外, 探测站向中心站仅需要传输一个相

位,减少了传输数据量,较适合于组建全国乃至全球的雷电定位系统。

参考文献:

- [1] 曾 嵘,周 旋,王泽众,等. 国际防雷研究进展及前沿评述[J]. 高电压技术,2015,41(1):1-13.
ZENG Rong, ZHOU Xuan, WANG Zezhong, et al. Review of research advances and fronts on international lightning and protection[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 1-13.
- [2] CUMMINS K L, MURPHY M J. An overview of lightning locating systems: History, techniques and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 499-518.
- [3] SCHULZ W, CUMMINS K L, DIENDORFER G, et al. Cloud-to-ground lightning in Australia: A 10-year study using data from a lightning location system[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D9): 09101.
- [4] CUMMINS K L, MURPHY M J, BARDO E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National lightning detection network[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [5] KRIDER E P, NOGGLE R C, UMAN M A. A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(3): 301-306.
- [6] LEE C L. An operational system for the remote location of lightning flashes uses a VLF arrival time difference technique[J]. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 1986, 3(4): 630-642.
- [7] THOMAS R J, KREHBEIL P R, RISON W, et al. VHF sources powers radiated by lightning[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 143-146.
- [8] 王彦辉,张广庶,张 彤,等. 闪电VHF辐射源三维定位系统仪器误差处理[J]. 高原气象,2012,31(5): 1407-1413.
WANG Yanhui, ZHANG Guangshu, ZHANG Tong, et al. Error correction in three-dimension location system of lightning VHF radiation[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(5): 1407-1413.
- [9] 张 泉,郅秀书,张广庶. 短基线时差法闪电辐射源探测系统和初步定位结果[J]. 高原气象,2003,22(3): 226-234.
ZHANG Quan, XI Xiushu, ZHANG Guangshu. Short-baseline time of arrival lightning radiation detection system and preliminary location results[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(3): 226-234.
- [10] 曹冬杰,郅秀书,段 树,等. 基于VHF辐射源短基线定位系统对闪电放电过程的研究[J]. 物理学报,2012,61(6):510-522.
CAO Dongjie, XI Xiushu, DUAN Shu, et al. Lightning discharge process based on short-baseline lightning VHF radiation source locating system[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 510-522.
- [11] SUN Zhuling, QIE Xiushu, LIU Mingyuan, et al. Lightning VHF radiation location system based on short baseline TDOA technique-validation in rocket-triggered lightning[J]. Atmospheric Research, 2013(129/130): 58-66.
- [12] ZHANG Guangshu, WANG Yanhui, QIE Xiushu, et al. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge process[J]. Science China Earth Science, 2010, 50(4): 591-602.
- [13] MASHAK S V, MALEK Z A, MEHRANZAMIR K, et al. Modeling of time of arrival method for lightning location systems[J]. Advance in Meteorology, 2015(1): 870290.
- [14] RODGER C J, BRUNDELL J B, DOWDEN R L, et al. Location accuracy of long distance VLF lightning location network[J]. Annales Geophysicae, 2004, 22(3): 747-758.
- [15] DOWDEN R L, BRUNDELL J B, RODGER C J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64(7): 817-830.
- [16] THIDÉ B. Electromagnetic field theory[M]. Uppsala: Uppsala Books, 2001.
- [17] DOWDEN R L, HOLZWORTH R H, RODGER C J, et al. World wide location using VLF propagation in the earth-ionosphere waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine, 2008, 50(5): 40-60.
- [18] WAIT J R. Reflection of VLF radio waves at a junction in the earth-ionosphere waveguide[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1992, 34(1): 4-6.
- [19] RAMACHANDRAN V, PRAKASH J N, DEO A, et al. Lightning stroke distance estimation from single station observation and validation with WLLN data[J]. Annales Geophysicae, 2007, 25(7): 1509-1517.
- [20] NAITAMOR S, COHEN M B, COTTS B T, et al. Characteristics of long recovery early VLF events observed by the North African AWESOME network[J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2013, 118(8): 5215-5222.

蔡新景(1980—),男,博士,副教授,主要从事等离子体输运、流注放电和雷电防护方面的研究工作(E-mail: cxj06@hotmail.com)。