

文章编号: 2095-4980(2023)09-1135-09

多普勒效应对雷电源辐射定位的影响

刘琳, 王彩霞, 田杨萌, 崔丽兰, 张潇艺

(北京信息科技大学 理学院, 北京 100089)

摘要: 利用电磁辐射信号进行雷电源探测和定位是当前雷电研究的重要探测手段, 其定位结果的准确性对正确认识闪电的放电机理非常重要。本文通过数学推导建立了多普勒效应在球坐标下的定位影响理论模型; 用 Matlab 软件进行模拟, 分析了多普勒效应对阵列接收信号的影响及误差, 研究了多普勒效应对运动雷电源定位结果产生的影响。研究表明, 多普勒效应对于不同类型、不同距离、不同高度的闪电影响程度不同; 根据雷电发展的不同阶段, 雷电源的运动速度不同, 多普勒效应带来的误差也不同, 且其带来的误差是不可忽略的。该研究对实现更高时空分辨力的运动雷电源定位结果和雷电的精细化研究具有重要意义。

关键词: 多普勒效应; 定位; 波束形成算法; 运动源; 雷电源辐射

中图分类号: TN957.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021257

Influence of Doppler effect on the radiation positioning of the thunder source

LIU Lin, WANG Caixia, TIAN Yangmeng, CUI Lilan, ZHANG Xiaoyi

(College of Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100089, China)

Abstract: The employment of electromagnetic radiation signal is an important detection means in current lightning research, and the accuracy of its positioning results is very important to correctly understand the discharge mechanism of lightning. In this paper, the theoretical model of the Doppler effect on the array and on the localization result of the motion lightning source is built. The results show that the Doppler effect affects at different degrees on the lightning of different types, at different distances and heights. When the speed of the lightning source is different, the Doppler effect is different as well, and the errors cannot be negligible. This work is important for the motion lightning source localization at higher spatiotemporal resolution and the refined study of lightning.

Keywords: Doppler effect; positioning; beamforming algorithm; motion source; lightning source radiation

闪电是发生于大气中的一种瞬态的大电流、高电压的长距离放电现象, 同时伴随雷电发生的强烈电磁辐射会严重干扰电子设备、通信设备的正常工作。随着电子通信设备等的集成度提高, 雷电灾害造成的经济损失及社会影响越来越大^[1]。对闪电通道发生发展过程的研究是认识闪电物理过程的重要手段。

利用电磁辐射信号进行雷电探测和定位是当前雷电探测、雷电物理研究的一个重要手段, 其克服了光学观测中云体遮挡的限制。雷电放电过程具有频谱范围很宽的波谱, 甚高频频段的闪电信息比低频、甚低频频段丰富得多, 该频段电磁波主要反映闪电通道的小尺度击穿过程^[2]。利用闪电放电击穿过程产生的甚高频电磁辐射信号确定辐射源的位置, 可用来在小范围内较精细地刻画闪电通道的时空演变特征。

雷电发生时辐射出宽频的电磁辐射, 频率覆盖范围很大。强雷电脉冲辐射的持续时间在微秒量级, 短则少于 20 μs , 长则达到 500 μs ^[3]。Willett^[4]和 Weidman^[5]等利用示波器记录闪电电场波形, 采用傅里叶变换得到地闪的首次回击、继后回击、梯级先导、直窜先导和一些特征脉冲的特征。这些闪电过程产生的辐射脉冲均为宽频, 选取雷电发展中任一个阶段辐射的某一个频率都可以定位出雷电源的位置, 因此在仿真过程中可利用一个频率进行雷电辐射源定位。

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41375012; 41875008)

在研究运动雷电源的电磁辐射过程中, 由于雷电源具有运动特征, 会产生多普勒效应, 使信号接收装置接收的来自雷电源的观测信号失真, 如多普勒效应使回击过程的电流波测量失真, 失真的多少取决于入射波的形式、频率含量和线路延伸端速度^[6]。已有的文献中很少考虑运动雷电源辐射场接收失真的影响因素以及对雷电源定位的影响。故考虑多普勒效应对运动雷电源定位结果的影响并对其影响结果进行分析具有重要意义。

本文基于阵列传感器波束形成定位算法, 设计单站式雷电源定位系统, 对雷电源进行模拟研究。提出多普勒效应对定位结果产生影响的模型, 仿真分析运动雷电源辐射传播和接收过程中产生的多普勒效应, 研究其对接收信号和定位结果产生的影响。

1 多普勒效应对雷电辐射源定位影响模型

1.1 雷电辐射场

无论是在空间的先导通道或回击通道中闪电产生的瞬变电磁场, 还是闪电流进入大地以后产生的瞬变电磁场都会产生电磁作用。雷雨云集聚电荷、先导放电、回击等各个过程都伴随着电磁辐射, 在放电的同时, 电流产生的电磁脉冲会向各个方向传播。

分析位于坐标原点处的电流元产生的电磁场。设电流元为 $i(t)L$, L 为电流元的长度; 电场为 $\mathbf{E}(R,t)$, 磁场为 $\mathbf{B}(R,t)$, 可通过镜像原理计算地面的反射效应^[7]。叠加镜像电流与实际电流的电磁场, 可得到空间中任一处的电磁场强度。叠加做积分运算, 可得闪电通道中任何位置电流与电流激发的电场与磁场的积分表达式^[8-9]。

$$\mathbf{B}(r, \phi, 0, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_{H_b}^{H_t} \frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) dz' + \int_{H_b}^{H_t} \frac{r}{cR^2} \times \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(r, \phi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_{H_b}^{H_t} \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', t - R/c) dz' d\tau + \int_{H_b}^{H_t} \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' - \int_{H_b}^{H_t} \frac{r^2}{c^2R^2} \times \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] \quad (2)$$

式中: μ_0 为自由空间的磁导率; ϵ_0 为真空电导率; r 为位于原点的电流元与被测点的水平直线距离; ϕ 为磁场方位角; z 为位于坐标原点处电流元与被测点的垂直距离; R 为位于原点的电流元与被测点的空间直线距离; c 为真空中的光速; τ 为时间常数; H 为在 τ 时刻看到的电流波前在通道中的高度, 积分上限为 H_t , 积分下限为 H_b 。

式(1)中第 1 项为磁场的感应场, 在磁场传播较近的情况下, 为磁场信号的主要分量; 第 2 项为辐射场, 在磁场传播距离较远时, 占主要分量。式(2)中第 1 项为静电场, 第 2 项为感应场, 第 3 项为辐射场。远距离探测, 一般只采用最后一项进行计算, 因为经过长距离的传播, 感应场部分会大量损耗。

远场情况下, 对雷电的探测主要来自电磁辐射。通过对雷电流周围的电磁场的研究, 为进一步进行雷电流测量与雷电防护提供理论基础。

1.2 多普勒效应理论

当波源与观察者产生相对运动时, 观察者接收到的波的频率会发生变化, 这就是多普勒效应^[10]。按照波的种类的不同, 多普勒效应可分为机械波多普勒效应、电磁波多普勒效应。最初发现在声波的机械波中会出现这样的现象, 随着科学的发展, 在光这类电磁波中也同样存在多普勒效应, 即光谱会出现蓝移和红移^[11]。值得注意的是, 在多普勒效应中接收阵列接收到波的频率发生了变化, 但实际上波源的频率并没有发生改变。

研究雷电通道在发生发展过程中辐射的电磁波的多普勒频移。假设一个雷电源在远处, 雷电源的振动频率为 f_s , 雷电源、阵列传感器在其连线方向相对运动, 而波源也在其连线方向传播。多普勒效应示意图如图 1 所示。

电磁波传播不需要介质, 接收阵列的接收频率由雷电通道发生速度和接收阵列的相对速度决定, 这一点与机械波不同。由于经典力学在高速状态下不再适用, 因此接收阵列接收到的频率表达式与机械波多普勒效应有所不同。电磁波以光速传播, 在涉及到相对运动时需考虑相对论时空变换关系。计算表明^[12], 当波源与接收阵列以速度 V 沿两者连线互相趋近时, 接收频率 f_R 与波源频率 f_s 的关系, 可根据相对性原理和光速不变原理得出:

$$f_R = f_s \sqrt{\frac{c+V}{c-V}} \quad (3)$$

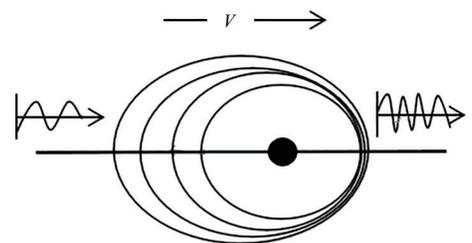


Fig.1 Schematic diagram of the Doppler effect
图 1 多普勒效应示意图

1.3 多普勒效应在球坐标下的数学表达

由于阵列对声源的方向定位通常在球坐标系下定出俯仰角和方位角，在地理学、天文学中都有广泛应用^[13]。本文同样需要定出雷电源的俯仰角以及方位角，故在考虑多普勒效应时，在三维空间内使用球坐标进行数学表达。

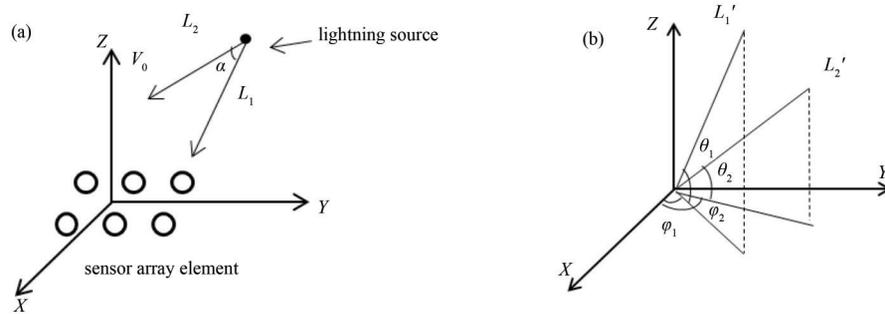


Fig.2 Schematic diagram of lightning source movement and array location
图2 雷电源运动及阵列位置示意图

在三维球坐标空间内，设接收阵列在 XOY 平面， L_1 为雷电源相对于阵元的来波方向； L_2 为雷电源运动方向，速度为 V_0 ； L_1 、 L_2 的夹角为 α ，如图 2(a) 所示。将 L_1 、 L_2 两个向量平移至原点，平移后为 L_1' 、 L_2' 。由于雷电源运动，阵列不动，设平移后雷电源通道相对于阵元运动的来波方向 L_1 的俯仰角为 θ_1 ，方位角为 φ_1 。雷电源运动方向 L_2 的俯仰角为 θ_2 ，方位角为 φ_2 ，如图 2(b) 所示。雷电源向前发展的过程中其运动方向具有不确定性，角度 θ 的取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，角度 φ 的取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

根据图 2 得

$$V = V_0 \cos \alpha \tag{4}$$

L_1 的方向矢量为：

$$\mathbf{a} = \cos \theta_1 \cos \varphi_1 \mathbf{i} + \cos \theta_1 \sin \varphi_1 \mathbf{j} + \sin \theta_1 \mathbf{k} \tag{5}$$

式中 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 为球坐标系中 3 个方向的单位矢量。

速度 V_0 的方向矢量为：

$$\mathbf{b} = \cos \theta_2 \cos \varphi_2 \mathbf{i} + \cos \theta_2 \sin \varphi_2 \mathbf{j} + \sin \theta_2 \mathbf{k} \tag{6}$$

向量夹角为^[14]：

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} = \cos \theta_1 \cos \theta_2 \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \tag{7}$$

将式(4)代入式(3)得

$$f_R = f_s \sqrt{\frac{c + V_0 \cos \alpha}{c - V_0 \cos \alpha}} = f_s \sqrt{\frac{c + V_0 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \theta_1 \sin \theta_2)}{c - V_0 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \theta_1 \sin \theta_2)}} \tag{8}$$

对于某一波方向的辐射源，当知道辐射源的运动速度大小及方向，即可利用式(8)计算出阵列接收到的信号的频率，进而可求出多普勒效应产生的接收频率误差。

2 波束形成算法

波束形成技术具有快速、在中高频有较高的分辨力、适合远距离测量等优点，适用于稳态源和非稳态源以及运动源的定位，并有一定的抑制其他干扰信号的效果^[15]。

常规波束形成算法的增益有限，为最大限度地提高增益，本文采用最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法，用于信号频率估计。MVDR 是一种基于最大信噪比(Signal to Noise Ratio, SINR)准则的自适应波束形成算法，可以自适应地使阵列输出在期望方向上功率最小，同时信噪比最大，具有较好的空间分辨能力和较高的干扰抑制能力。

对于均匀间隔的线性阵列，从空间的角度看，假设 t 时刻，一个平面波沿着与阵列垂直方向成 θ_0 角度的方向入射到阵列上，如图 3 所示。

利用拉格朗日乘数算法求解这个约束最优化问题，可以得到期望的最优权向量为^[16]：

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \frac{\mathbf{g}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta, \varphi)}{\mathbf{s}^H(\theta, \varphi)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta, \varphi)} \quad (9)$$

式中： $\boldsymbol{\omega}_0$ 为 MVDR 算法中的权向量； $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\}$ 为空间相关矩阵， $\mathbf{x}(n)$ 为信号输入向量。

在 $g=1$ 的特殊情况下，式(9)可简化为：

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta, \varphi)}{\mathbf{s}^H(\theta, \varphi)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta, \varphi)} \quad (10)$$

这个波束形成算法被约束沿着对应于 θ_0 的观测方向产生无失真响应。

MVDR 算法的空间滤波谱为：

$$S_{\text{mvdr}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\mathbf{s}^H(\theta, \varphi)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta, \varphi)} \quad (11)$$

设 (θ_d, φ_d) 为待求的角度值 (θ, φ) 的统一表示形式，定义空间滤波 F 为输出信号与输入信号幅度的比值：

$$F(\theta_d, \varphi_d) = |\mathbf{w}_0^H \mathbf{a}(\theta, \varphi)| \quad (12)$$

式中： $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$ 为阵元导向向量。

归一化后结果为：

$$f(\theta_d, \varphi_d) = 20 \lg \frac{F(\theta_d, \varphi_d)}{\max(F(\theta_d, \varphi_d))} \quad (13)$$

当 $f(\theta_d, \varphi_d)$ 取得极大值时，所对应角度最接近入射波的入射角度。

MVDR 方法在期望方向的增益保持为 1，同时抑制其他方向的信号，在这些方向上形成零陷，约束阵列的加权向量，使波束指向方向形成一个单位幅度的输出，同时使阵列的均方输出达到最小。

3 仿真结果分析

基于阵列传感器波束形成定位算法，本文设计了单站式雷电源定位系统，主要考虑到阵元间距小于半波长时，可有效抑制栅瓣。阵元间距设为 2.5 m，雷电源信号本文主要考虑高频频段。雷电发展的过程有不同的阶段，其发展过程的速度也不同，一般在 $10^4 \sim 10^8$ m/s 量级之间。本课题组所用仪器接收到宽频频率信号，选取可接收到的电磁脉冲信号的最高频率进行仿真分析。

部分情况下一些目标的运动速度较低，多普勒效应对定位结果的影响较小，定位精确度要求不高，可以不需要消除多普勒效应，直接进行定位计算。本文尝试通过 Matlab 仿真平台详细分析雷电源的运动特点和频率与含有多普勒雷电源信号定位结果之间的关系，并分析雷电源在不同运动状态下，未消除多普勒效应时的定位结果，得出雷电源辐射定位中考虑多普勒效应的必要性。

3.1 多普勒效应对阵列接收的影响

从式(3)可以看出，在雷电源运动过程中，阵列接收到的频率是不断变化的。当雷电源与接收阵列不断接近时， V 为正值，此时接收到的频率比雷电波源频率高；当雷电源与接收阵列相互远离时， V 为负值，此时接收到的频率比雷电波源频率低。

从雷电发展方向看，一般雷电分为下行雷和上行雷。当雷电的发展为下行雷时，雷电源与接收阵列相互靠近，此时阵列接收到的频率比雷电源波源频率高；当雷电的发展为上行雷时，雷电源与接收阵列相互远离，阵列接收到的频率比雷电波源频率低。对于不同发展类型的闪电，会产生雷电源与阵列传感器不同方向的相对运动，产生的多普勒效应对雷电源频率的影响不同。

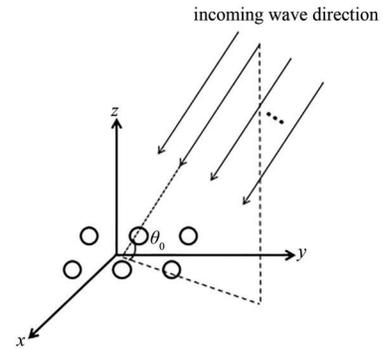


Fig.3 Planar wave incident onto the array
图3 平面波入射到阵列上

同时由于 θ 、 φ 角度的变化范围，接收到的频率与雷电源相对于阵元的来波方向俯仰角 θ_1 和方位角 φ_1 以及雷电源运动方向的俯仰角 θ_2 和方位角 φ_2 有一定的关系。假设雷电源辐射波频率为 2×10^8 Hz，雷电源的波源速度为 1×10^6 m/s，在雷电源运动过程中，改变角度 θ_1 、 θ_2 、 φ_1 、 φ_2 的取值，所得结果见表 1。

表 1 来波方向及雷电源运动方向对接收频率的影响

Table 1 Influence of the incoming wave direction and the movement direction of the lightning source on the receiving frequency

number	wave source	elevation angle	azimuth	elevation angle	azimuth angle	receive frequency	receive frequency
	frequency/Hz	$\theta_1/(^\circ)$	angle $\varphi_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$\varphi_2/(^\circ)$	/Hz	error/Hz
1	2×10^8	30	60	5	120	199 683 622	316 378
2		30	60	10	120	199 658 120	341 880
3		30	60	80	120	199 621 960	378 040
4		30	60	85	120	199 643 094	356 906
5		30	120	45	150	199 411 610	588 390
6		60	120	45	150	199 388 562	611 438
7		40	210	60	230	199 389 869	610 131
8		65	210	60	230	199 345 437	654 563

雷电主要有云闪和地闪。地闪是雷云与大地的放电，多以线状形式出现；云闪是云层内部、云与云之间的放电现象。当闪电为云闪时，尤其是云对云的放电，雷电源运动方向 L_2 的俯仰角 θ_2 很小，趋近 0° 。同理，当闪电为地闪时，尤其是地闪通道接近地面时，雷电源运动方向 L_2 的俯仰角 θ_2 很大，趋近 90° 。为方便在 Matlab 平台上进行仿真，选取俯仰角 θ_2 为 5° 、 10° 、 80° 、 85° 进行仿真对比。由表 1 中第 1~4 组数据可知，在波源频率、来波方向的俯仰角和方位角都一样的前提下，多普勒效应对地闪辐射源的接收频率的影响相比于云闪会更大一些，接收阵列接收到的频率误差会更大。

实际定位中会出现不同距离的闪电，当接收阵列位置不变时，同样的云层高度，雷电源离接收阵列越远，俯仰角越小。由表 1 中第 5~6 组数据可知，来波方向分别选取 30° 、 60° 的俯仰角，雷电源离接收阵列远，俯仰角小，受多普勒效应的影响较小，接收阵列接收的频率误差小。

也有可能闪电来自不同高度的云层，使闪电的高度发生改变，进而影响俯仰角的大小。从表 1 中第 7~8 组数据可知，来波方向分别选取 40° 、 65° 的俯仰角，雷电源的高度越高，多普勒效应对其影响越大，接收到的频率相较于波源频率误差会较大。

多普勒效应对雷电源定位阵列的影响频率因素不仅与接收阵列与雷电源运动相对方向有关，还与来波方向向量与雷电源运动向量的俯仰角及方向角的大小有关，即与不同类型的闪电和不同高度、不同距离的闪电有关。

3.2 阵列选择

阵列的几何结构限制了阵列工作时的性能，是影响雷电源源识别系统性能的关键因素之一^[17]。阵列形态设计直接影响雷电源的定位精确度和定位系统的性能。

传统的一维线性阵列(Uniform Linear Array, ULA)结构比较简单，但存在一定的局限性，不能确定具体的来波方向，无法实现准确定位。相比于一维线性阵列，二维平面阵列具有更好的性能。一般常见的二维平面阵列包含十字型阵列、均匀圆形阵列等^[18]。二维平面阵列可以定位俯仰角和方位角，实现方位角 360° 、俯仰角 180° 的定位，再根据距离的估计便可以具体定位出雷电源的位置，这为精确定位雷电源提供了很大的便利^[19-20]。

利用闪电放电过程中产生的电磁辐射信号确定辐射源位置，针对远场雷电源波达方向时计算量大、对相干信号估计失准的问题，利用同心圆阵列对整个定位系统进行仿真。

由于本文定位于雷电源的高频辐射源，需要更高要求的精确度和空间分辨力，因此在圆阵列的基础上，基于 Matlab 软件，分别对圆阵列和同心圆阵列进行仿真对比，仿真过程中随机选取来波方向进行仿真。

取同为 12 阵元的均匀圆形阵列、同心圆阵列传感器进行仿真对比，如图 4 所示。

$F(\theta_d, \varphi_d)$ 随 (θ, φ) 变化的三维波束形成图如图 5 所示。从图中可以看出不同阵列下基于波束形成算法的定位结果差异。此次仿真阵列的选择主要通过波源频率 f_s 在 $3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8$ Hz 之间的变化进行对比分析。

从图 5 可得出，圆形阵列和同心圆阵列都有较好的抑制旁瓣的能力，但圆形阵列主瓣宽度更小，三维图形之间聚集点的三维圆锥形体积更小，指向性更强，定位结果更好。

通过对比仿真结果还可以看出，圆形阵列在波源频率以 10 倍的数值增长过程中，其阵型的定位结果变化不明显，从三维波束形成图上看不出太大变化，而在同心圆阵列下可看到明显的定位变化。因此相同阵元下，同心圆阵列相比均匀圆形阵列，可以更好地体现多普勒效应对雷电源辐射定位结果的影响，也便于从定位图中看到不同波源速度对雷电源辐射定位的影响。因此本文后续采用同心圆阵列研究多普勒效应对雷电源辐射定位的影响。

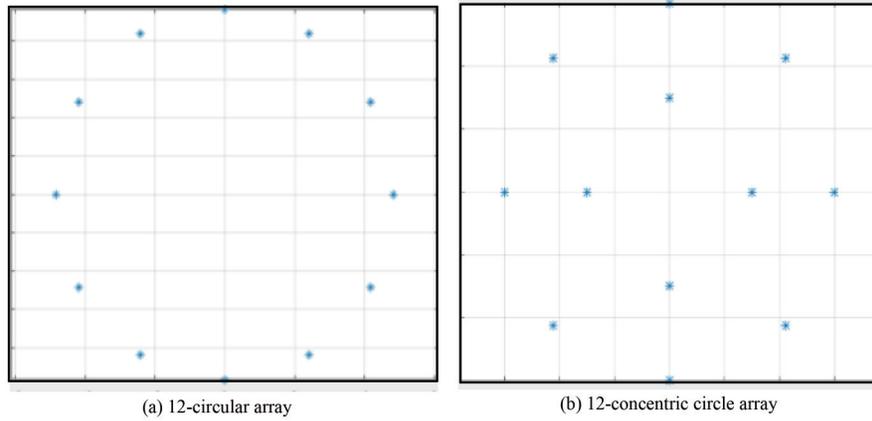


Fig.4 Array shape
图4 阵列形状

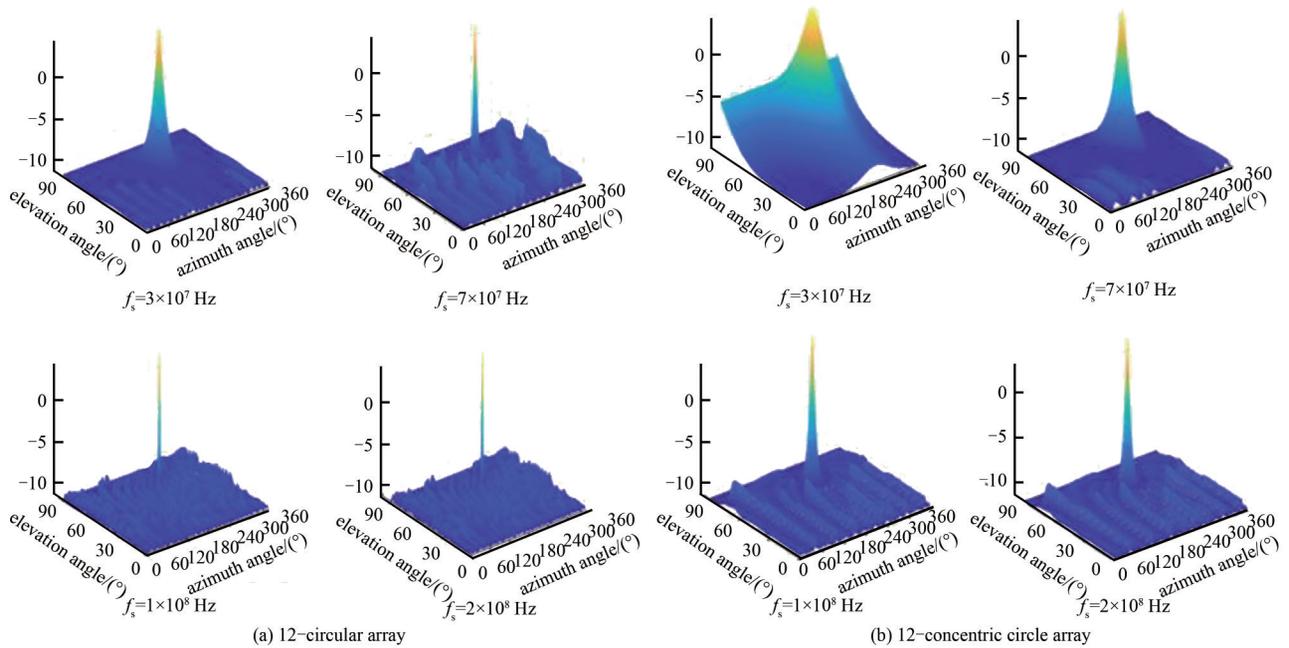


Fig.5 Array beamforming
图5 阵列波束形成图

3.3 多普勒效应对雷电源辐射定位的影响

在回击过程中，多普勒效应对回击电流的测量会产生影响，电流的测量误差不可忽略^[5]。因为回击电流是产生回击辐射场的源，回击电流的变化势必会影响电磁辐射场，根据式(2)可得，回击电流的变化会引起电场 E 、磁场 B 的变化，根据定位理论分析，辐射场变化会对定位结果产生影响。

接收阵列的尺寸远小于阵列位置与闪电之间的距离，由闪电通道产生的雷电波可以用一组平面波精确近似。因此，通过相位速度矢量和雷电源的距离，可以获得雷电信号的位置。仿真中，将雷电源看作点波源，其中雷电源频率为 1×10^8 Hz，信噪比为 5，电磁波速度为 3×10^8 m/s，俯仰角 $\theta_1=71^\circ$ 、 $\theta_2=60^\circ$ ，方位角 $\varphi_1=230^\circ$ 、 $\varphi_2=60^\circ$ 。由 12 个阵元组成均匀同心圆阵列，采用 MVDR 进行定向。多普勒效应对雷电源定位结果的影响随频率的变化如图 6 所示。从图 6 可以看出，波源速度增加同样的倍数，波源频率与接

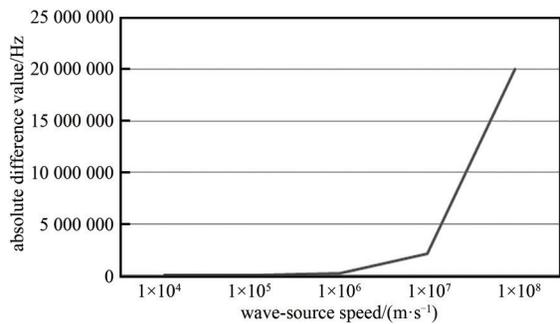


Fig.6 Difference value of the frequency variation under the Doppler influence
图6 多普勒影响下的频率变化差值

收频率的差值越来越大。即随着雷电发展，其波源速度增大，多普勒效应对定位产生的频率影响增大，且在波源速度为 10^7 数量级开始，产生的频率误差值呈现激增的趋势。

雷电的发展经历预击穿过程、阶梯先导、回击等过程，在这过程中，雷电运动的速度越来越快。为了研究频率参数对上述定位算法定位结果的影响，在保证其他测量参数一致且不变的情况下，选取不同速度的雷电源探究多普勒效应对雷电源定位结果的影响随频率的变化规律。波源速度为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8$ m/s，选取数值以 10 倍递增。表 2 为雷电源以不同的速度运行时的定位结果，波源速度从 1×10^4 m/s 增大到 1×10^8 m/s。从表 2 可知，随着雷电源运动速度变大，每个位置定位结果的绝对差值越大。但单纯只看差值是不够的，因为波源的速度本身也在增大。本文利用误差值计算方法做进一步对比，即绝对误差所占真实值的百分比：

$$e=(A-E)/(E/100) \tag{14}$$

式中： A 为测量值； E 为正常值。

表 2 多普勒影响下的频率变化差值以及误差

Table2 Difference value of frequency change and error under Doppler influence

wave source frequency/Hz	wave-source speed/(m·s ⁻¹)	receive frequency/Hz	absolute difference value/Hz	relative error/%
1×10^8	1×10^4	99 997 805	2 195	0.002 2
	1×10^5	99 978 051	21 949	0.021 9
	1×10^6	99 780 730	219 270	0.219 3
	1×10^7	97 828 465	2 171 535	2.171 5
	1×10^8	80 000 126	19 999 874	19.999 9

从表 2 中可以直观地看出，波源速度从 1×10^4 m/s 增大到 1×10^8 m/s 时，相对误差值越来越大。

从图 6 与表 2 的结果可以看出，当接收信号中包含有多普勒效应，雷电源接近阵列时，雷电源运动速度越快，多普勒效应导致的误差越大。这种误差会给实际对雷电源的辐射定位带来巨大影响，因此高速运动的雷电源产生的多普勒效应误差不可忽略。

从表 2 中分别选出 1×10^4 m/s、 1×10^6 m/s 两个不同速度下受多普勒效应影响的接收频率。在同一个速度下，将不考虑多普勒效应的定位效果与考虑多普勒效应影响的定位结果进行对比，结果如图 7~8 所示。

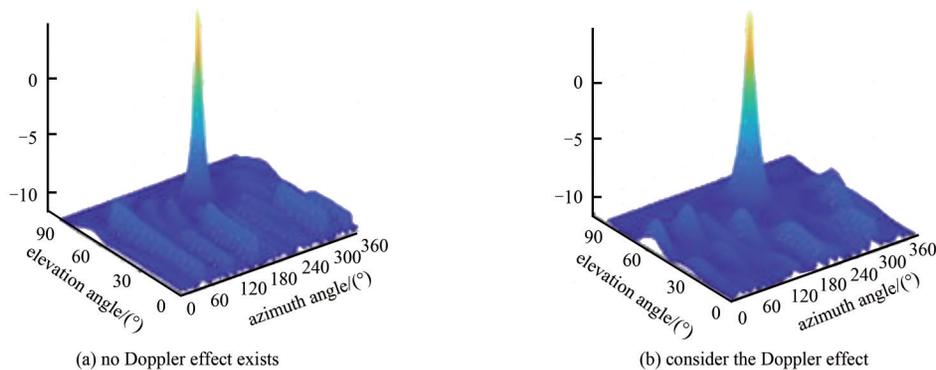


Fig.7 Comparison of Doppler effect on positioning results($V_0=10^4$ m/s)

图 7 多普勒效应对定位结果的影响对比($V_0=10^4$ m/s)

如图 7 所示，当雷电源运动速度为 1×10^4 m/s 时，考虑多普勒效应影响的雷电源辐射定位图，阵列主瓣变宽，同时副瓣电平升高；三维波束形成方向图指向性较差，三维图形不够聚集，三维图形聚集点的三维圆锥形体积大一些。说明在受到多普勒效应的影响下，雷电源辐射定位的准确度有所下降。

图 8 的三维波束形成方向图的变化趋势与图 7 基本一致，但由于雷电源运动速度为 1×10^6 m/s，从图 8 中可以看出，2 个三维图形之间聚集点的三维圆锥形体积差距更大，说明当雷电源运动速度提高时，多普勒效应带来的误差会变得更大。

目前对于雷电的精细化研究是逐渐加强的，辐射源定位是非常重要的探测手段和研究方法。其定位结果的准确性对正确认识闪电的放电机理非常重要。因此多普勒效应带来的定位结果误差是不可忽略的。

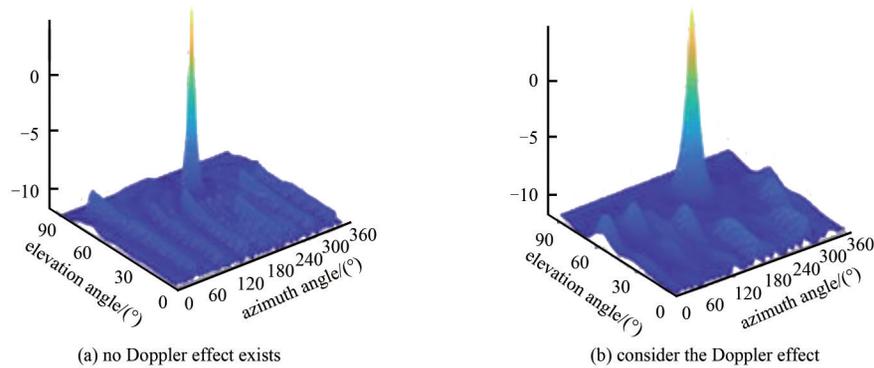


Fig.8 Comparison of Doppler effect on positioning results($V_0=10^6$ m/s)
图8 多普勒效应对定位结果的影响对比($V_0=10^6$ m/s)

4 结论

本文通过 Matlab 平台仿真研究了运动雷电源定位中多普勒效应的影响。通过大量的仿真数据得出：在波源频率、来波方向的俯仰角和方位角都一样的前提下，多普勒效应对地闪辐射源的影响相比于云闪会更大一些，频率误差会更大；不同距离的闪电，雷电源离接收阵列远，受多普勒效应的影响较小，其频率误差小；同时不同高度的云层，雷电源的高度越高，多普勒效应对其的影响越大，产生的频率误差会较大。

在考虑多普勒效应的影响下，雷电源辐射定位的准确度有所下降。雷电发展过程经历预击穿过程、阶梯先导、回击等阶段，随着雷电的发展阶段，雷电源的运动速度逐渐提高，多普勒效应带来的误差会变得更大。尤其是波源速度超过 1×10^7 m/s(主要是雷电的回击阶段)，产生的频率误差值呈现激增的趋势，多普勒带来的误差是显而易见的。

由于雷电的研究趋向精细化，其定位结果的准确性对正确认识闪电的放电过程具有至关重要的意义。本文主要研究多普勒效应对雷电定位的影响和对雷电定位结果带来不可忽略的误差，接下来将进一步研究多普勒效应对雷电源定位结果带来误差的修正工作，使定位结果更准确。

参考文献：

- [1] 章涵. 基于雷声到达时间差的单站闪电通道三维定位方法研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2011. (ZHANG Han. A single-station-based 3D lightning channel location method by using differential arrival time of thunder[D]. Beijing, China: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011.)
- [2] 张广庶,赵玉祥,鄒秀书,等. 利用无线电窄带干涉仪定位系统对地闪全过程的观测与研究[J]. 中国科学(地球科学), 2008,38(9):1167-1180. (ZHANG Guangshu,ZHAO Yuxiang,XI Xiushu,et al. Observation and study of radio N-band interferometer positioning system[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018,38(9):1167-1180.)
- [3] 苏红超. 甚高频雷电探测站数字处理系统设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2011. (SU Hongchao. The design and implement of VHF lightning detection station digital processing system[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science and Technology, 2011.)
- [4] WILLET J C,BAILEY J C,LETEINTURIER C,et al. Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 0.2 to 20 MHz[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 1990,95(D12):20367-20387.
- [5] WEIDMAN C D,KRIDER E P. The amplitude spectra of lightning radiation fields in the interval from 1 to 20 MHz[J]. Radio Science, 1986,21(6):964-970.
- [6] SHOORY A, RACHIDI F, RUBINSTEIN M. Correction to "relativistic Doppler effect in an extending transmission line: application to lightning"[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2012,117(D13):D13104.
- [7] 李明. 一种长基线阵列地面单站无源定位方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):569-572. (LI Ming. Passive location method to long baseline antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):569-572.)
- [8] SCHULZ W,DIENDORFER G. Lightning peak currents measured on tall towers and measured with lightning location systems [C]// The 18th International Lightning Detection Conference. Helsinki,Finland:Vaisala, 2004:1-5.
- [9] MASTER M J,UMAN M A. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole[J]. American Journal of Physics, 1983(51):118-126.

- [10] MASTER M J, UMAN M A. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole[J]. American Journal of Physics, 1983(51):126-130.
- [11] 高博源. 多普勒效应的理论推导和实际应用[J]. 当代化工研究, 2017(9):113-114. (GAO Boyuan. Theoretical derivation and practical application of Doppler effect[J]. Modern Chemical Research, 2017(9):113-114.)
- [12] LYU Tao, HAN Xiyu, WU Shisong, et al. The effect of speckles noise on the laser Doppler vibrometry for remote speech detection[J]. Optics Communications, 2019(440):117-125.
- [13] 李翠莲. 新工科大学物理[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2020:178-179. (LI Cuilian. New engineering university of physics[M]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020:178-179.)
- [14] 马铭福, 亓健, 费祥历. 高等数学(下册)[M]. 3版. 东营:中国石油大学出版社, 2008:16-18. (MA Mingfu, QI Jian, FEI Xiangli. Higher Mathematics(Volume II)[M]. 3rd ed. Dongying, China: China University of Petroleum Press, 2008:16-18.)
- [15] 杨殿阁, 李兵, 王子腾, 等. 运动声源识别的动态波叠加方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5):295-304. (YANG Diange, LI Bing, WANG Ziteng, et al. Dynamic wave superposition method for moving sound sources[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5):295-304.)
- [16] 鄢社锋. 优化阵列信号处理[M]. 北京:科学出版社, 2018:48-55. (YAN Shefeng. Optimal array signal processing[M]. Beijing, China: Science Press, 2018:48-55.)
- [17] 张杰. 基于麦克风平面阵列的运动噪声源定位及算法研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2014. (ZHANG Jie. Research on moving noise source localization methods based on plane microphone array[D]. Hangzhou, China: China Jiliang University, 2014.)
- [18] 张祺. 基于圆形麦克风阵列的声源定位算法研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2020. (ZHANG Qi. Research on sound source localization algorithm based on circular microphone array[D]. Wuhan, China: Hubei University of Technology, 2020.)
- [19] 张自嘉, 李贺, 花晓蕾, 等. 基于波束形成算法的声源定位与DSP实现[J]. 压电与声光, 2015, 37(1):117-121. (ZHANG Zijia, LI He, HUA Xiaolei, et al. Beam-forming algorithm based on sound source localization and DSP implementation[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(1):117-121.)
- [20] 钟迪, 朱民. 基于波束形成法定位管内声源的改进方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(10):1293-1297. (ZHONG Di, ZHU Min. Improved sound source localization in ducts with beamforming methods[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2014, 54(10):1293-1297.)

作者简介:

刘琳(1995-), 女, 硕士, 主要研究方向为微电子学与固体电子学. email:641252907@qq.com.

王彩霞(1972-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电声技术与信号处理、雷电物理.

田杨萌(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁波.

崔丽兰(1992-), 女, 硕士, 主要研究方向为基于无人机的麦克风阵列声源定位.

张潇艺(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向为通过人工智能手段处理研究闪电图像及数据.