

起伏海面的雷电电磁场传播特征及其对闪电定位精度的影响

张源源^{1,2}, 庞华基^{1,2}, 刘 钊^{1,2}, 宋 琳^{1,2}, 邓 猛³

(1. 青岛市气象灾害防御技术中心, 山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 山东 青岛 266003; 3. 山东省气象局气象灾害防御技术中心, 山东 济南 250000)

摘要: 为了研究起伏海面对雷电电磁传播的影响, 本文利用 Barrick 表面阻抗理论和 Wait 近似算法, 采用改进二维分形海面模型模拟起伏海面, 利用数值模式, 分析起伏海面的雷电电磁传播特征, 并进一步讨论了起伏海面对时差法闪电定位系统定位精度的影响。结果表明: 起伏海面对垂直电场和磁场的峰值的影响不显著, 但会引起波形的上升期时间的延长, 浪高越大, 影响越明显; 随着观测距离的增加, 雷电垂直电场波形的上升时间逐渐变长; 风速的变化与雷电垂直电场波形的上升时间成正比; 由于海面起伏引起雷电电磁场波形在传播中的变化会影响基于时差法闪电定位系统的定位精度, 定位误差可达几至十几公里。

关键词: 改进的二维分型海面; 雷电回击; 垂直电场; 水平磁场

中图分类号: P427

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)05-0034-08

DOI: 10.11759/hyxx20190726001

目前, 对闪电的定位主要采用时差法, 即利用闪电电磁场波峰到达多个测站的时间来计算闪电发生的位置, 我国气象和电力系统建设的闪电定位网均是采用这种定位方法^[1-3]。多人^[4-10]研究揭示, 当雷电电磁场沿地表传播时, 地表的起伏和下垫面电导率的不同, 均会对雷电波传输产生影响。Weidman 等^[11-12]和 Willett^[13]等观测表明, 随着观测距离的增大, 海面对雷电电磁波谱具有低通滤波功能, 超过 1 MHz 的高频分量按照频率平方的倒数迅速衰减, 超过 20 MHz 的则几乎观测不到。Ming 和 Cooray 等^[14]和张其林等^[15]利用数值模式从理论上验证了海面对雷电电磁场传播的影响。李东帅等^[16-18]利用时域有限差分算法(FDTD)分析起伏地表的雷电电磁场传播特性及其对闪电定位系统的影响, 指出由起伏地表引起的雷电电磁波上升沿时间的延迟, 会对基于时差法的闪电定位系统产生影响。

综上, 前人对陆地对雷电电磁场的传输影响以及其对闪电定位误差的影响进行了卓有成效的研究, 但对海面对雷电电磁场的传输影响及其对闪电定位误差的影响的研究较少, 本文拟在前人的基础上, 利用 Wait 近似算法分析海浪对雷电波传输的影响, 并进一步分析这种影响对基于时差法定位闪电带来的误差。

近海的闪电探测和定位对港口作业、船舶的航行及经济活动十分重要, 因此研究近海起伏海面对

闪电定位系统的影响具有重要意义。本文选取一次雷暴天气过程, 将实测的浮标站风场数据输入模式算法中, 有针对性地研究海面对雷电电磁传播的影响, 为近海雷电探测及定位误差修订提供参考。

1 起伏海面的雷电垂直电场近似算法

1.1 计算起伏海面的雷电垂直电场

假定地面的电导率无限大, 闪电通道垂直于地面, 则地表任意一点处的垂直电场的时域表达式为^[19-20]:

$$E_{v,\infty}(0, r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L(t)} \frac{2-3\sin^2\theta(z')}{R^3(z')} \int_{t_b(z')}^t i[z', t-R(z')/c] dt dz' + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L(t)} \frac{2-3\sin^2\theta(z')}{cR^2(z')} i[z', t-R(z')/c] dz' - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L(t)} \frac{\sin^2\theta(z')}{c^2 R(z')} \frac{\partial i[z', t-R(z')/c]}{\partial t} dz', \quad (1)$$

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-11-01

基金项目: 2019 年山东省气象局重点科研课题(2019sdqxz08); 2019 年度环渤海区域科技协同创新基金(QYXM201906)

[Foundation: The 2019 Annual Major Scientific Research of Shandong Meteorological Bureau Grant, No. 2019sdqxz08; Foundation of Bohai Region Science and Technology System, No. QYXM201906]

作者简介: 张源源(1987-), 女, 汉族, 山东青岛人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋雷电探测方向的研究, 电话: 0532-82799047, E-mail: zhangyy820@sina.com

其中, ε_0 为自由空间的介电常数, z' 是地面观测到闪电回击电流脉冲波头的位置, $t_b(z')$ 是地面观测到闪电回击电流脉冲从地面到目前波头位置的时间, $t_b(z') = (z'^2 + r^2)^{1/2} / c$, r 是观测点距雷电回击通道的水平距离, c 是光速。 $L'(t)$ 是 t 时刻观测到的回击通道长度, $t = L'(t) / v + [L'(t)^2 + r^2]^{1/2} / c$, v 是闪电回击速度, $i(z')$, $t - R(z') / c$ 是回击电流沿通道的分布, $\theta(z')$ 是 z' 与观测点之间的角度, $R(z')$ 是 z' 与观测点之间的距离。雷电回击过程如图 1 所示。

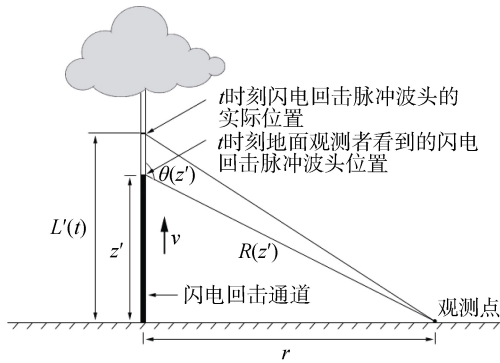


图 1 雷电回击过程示意图
Fig. 1 Geometry of lightning return stroke

根据 Wait 算法, 雷电回击过程产生的垂直电场沿起伏海面传播时, 距雷电回击通道水平距离 r 处的垂直电场为^[14]:

$$E_{v,\sigma}(0, r, t) = \int_0^t E_{v,\infty}(0, r, t - \tau) w(0, r, \tau) d\tau, \quad (2)$$

其中, $E_{v,\sigma}(0, r, t)$ 为有限电导率地表的垂直电场, $E_{v,\infty}(0, r, t - \tau)$ 为理想地表的垂直电场。 $w(0, r, \tau)$ 为场的衰减函数 $W(0, r, j\omega)$ 的时域表达式。由 Wait 提出的衰减函数的表达式为^[21-23]:

$$W(0, r, j\omega) = 1 - j\sqrt{\pi q} \exp(-q) \operatorname{erfc}(j\sqrt{q}), \quad (3)$$

$$q = -\frac{j\omega r}{2c} \Delta_{\text{eff}}^2, \quad (4)$$

其中, $j = \sqrt{-1}$, ω 为角频率, Δ_{eff} 为归一化的地表表面阻抗, “erfc” 为误差函数, ε_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率。

为了研究 Wait 近似算法的准确性, Shoory 等人^[24]分析了混合传输路径雷电电磁传播的 Wait 算法, 指出在距离闪电通道 10 km 时, Wait 近似算法的计算得到的峰值电场最大观测误差为 4.8%, 峰值上升时间的最大误差为 18%。张其林等人^[25]又进一步验证了

距离闪电通道 200~1 000 m 范围内 Wait 近似算法的精确度, 认为在距离闪电通道几百米的近距离范围内, Wait 近似算法的精确度也可以接受。

按照 Barrick 等效表面阻抗理论^[26-27], 起伏海面的等效表面阻抗 Δ_{eff} 可表示为:

$$\Delta_{\text{eff}} = \Delta + \Delta', \quad (5)$$

其中, Δ 为平静海面的等效表面阻抗, Δ' 为起伏海面引起的表面阻抗的增量。

$$\Delta = \frac{k_0}{k} \left(1 - \frac{k_0^2}{k^2} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$k = k_0 (\varepsilon_r - j60\sigma\lambda_0)^{1/2}, \quad (7)$$

$$k_0 = \omega(\mu_0\varepsilon_0)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = c / (\omega / 2\pi), \quad (9)$$

$$\Delta' = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} d\gamma \int_{-\infty}^{+\infty} G(\gamma, \eta) V(\gamma, \eta) d\eta, \quad (10)$$

$$G(\gamma, \eta) = \frac{\gamma^2 + b \cdot \Delta \cdot (\gamma^2 + \eta^2 - \omega\gamma/c)}{b + \Delta \cdot (b^2 + 1)} + \frac{\Delta \cdot (\gamma^2 - \eta^2)}{2} + \Delta \cdot \omega \cdot \gamma / c, \quad (11)$$

$$b = \frac{c}{\omega} \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - \left(\gamma^2 + \frac{\omega}{c} \right)^2 - \gamma^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

其中, γ 和 η 分别为 x 和 y 方向的波数(或空间频数)。 $V(\gamma, \eta)$ 是不规则起伏地表的高度谱密度函数。如果已知 $V(\gamma, \eta)$, 根据公式(6)~(12)可以计算起伏海面的归一化等效表面阻抗 Δ_{eff} 。

1.2 模拟起伏海面的模型

在模拟海面的雷电电磁传播过程中, 选取合适的海面模型非常关键, 近年来人们发现海浪既具有规律性又具有随机性, 利用二维分形模型能够更为贴切地描述真实海面。本文采用王运华^[28]提出的一种改进二维分形海面模型, 这种改进模型同时考虑了空间波数大于和小于基波波数的两种波浪对海面表面轮廓的影响, 海面谱的表达式为:

$$V(\gamma, \eta) = S(\gamma, \eta) D(\gamma, \eta, \phi), \quad (13)$$

其中 $S(\gamma, \eta)$ 为谱密度, $D(\gamma, \eta, \phi)$ 为方向分布函数。

$$S(\gamma, \eta) = \begin{cases} -\frac{\tau^2 \chi^2}{2 \ln a} k_0^{2(d-\xi)} \left(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2} \right)^{[-2(d-\xi)-1]}, & \sqrt{\gamma^2 + \eta^2} < k_0 \\ \frac{\tau^2 \chi^2}{2 \ln b} k_0^{2(d-3)} \left(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2} \right)^{[-2(d-3)-1]}, & \sqrt{\gamma^2 + \eta^2} \geq k_0 \end{cases}, \quad (14)$$

$$D(\gamma, \eta, \phi) = 1 + \frac{4\pi}{\sqrt{\gamma^2 + \eta^2}} \sum_{l=1}^{\infty} U(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2}, 2l) \cos[2l(\phi - \beta_0)], \quad (15)$$

其中 ϕ 为海浪和风向之间的角度, β_0 为雷电电磁场和风向之间的角度。

$$U(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2}, 2l) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \alpha_0 \sec h^2(\alpha_0 \phi) \exp(-j2l\phi) d\phi, \quad (16)$$

$$\begin{cases} \alpha_0 = 2.61(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2}/k_0)^{1.3}, 0.65 \leq \sqrt{\gamma^2 + \eta^2}/k_0 \leq 0.95 \\ \alpha_0 = 2.61(\sqrt{\gamma^2 + \eta^2}/k_0)^{-1.3}, 0.95 < \sqrt{\gamma^2 + \eta^2}/k_0 < 1.6 \\ \alpha_0 = 1.24, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

2 个例分析

2.1 长门岩浮标站风速数据的应用

本文选取 2015 年 4 月 2 日这次雷暴过程, 将青岛长门岩浮标站的风速数据输入到以上的模式中, 分析此次雷暴过程青岛近海起伏海浪对雷电电磁场的影响。

青岛长门岩浮标站位于距青岛海岸线 23.3 km 的长门岩岛。这里采用的是 10 分钟的风速平均值, 也就是十分风速。图 2 给出了 2015 年 4 月 2 日雷暴天气过程时的十分风速, 可以看出, 此次雷暴过程不同时刻风速的变化非常大, 十分风速的最大值达到 13.4 m/s, 最小值为 2.5 m/s。

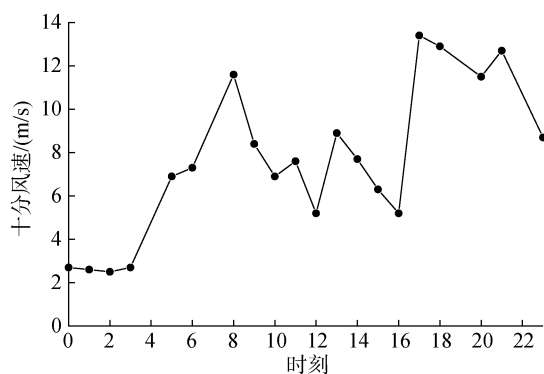


图 2 2015 年 4 月 2 日雷暴天气过程时的十分风速

Fig. 2 Ten minute-mean wind speed data of Qingdao buoy station on April 2, 2015

2.2 雷电回击通道基电流的选取

回击通道底部电流即基电流, 基电流中的击穿电流和电晕电流都采用双 Heilder 指数表达式计算^[29],

其表达式如下

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{\eta_1}}{[(t/\tau_{11})^{\eta_1} + 1]} e^{-t/\tau_{12}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{\eta_2}}{[(t/\tau_{21})^{\eta_2} + 1]} e^{-t/\tau_{22}}, \quad (18)$$

$$\eta_1 = \exp \left[-\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} \cdot \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{1/n_1} \right], \quad (19)$$

$$\eta_2 = \exp \left[-\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}} \cdot \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}} \right)^{1/n_2} \right], \quad (20)$$

其中, I_{01} 、 I_{02} 分别表示击穿电流和电晕电流最大值, η_1 、 η_2 为修正因子, τ_{11} 、 τ_{12} 、 τ_{21} 、 τ_{22} 分别表示用来确定电流上升时间、衰减时间以及峰值的时间常量, n_1 、 n_2 为电流陡度因子。这些参数具体取值见表 1, 则闪电回击通道底部基电流的波形如图 3 所示。

表 1 继后回击各参数的取值^[30]

Tab. 1 Parameters of the subsequent return strokes

继后回击 参数	I_{01}/kA	$\tau_{11}/\mu\text{s}$	$\tau_{21}/\mu\text{s}$	I_{02}/kA	$\tau_{12}/\mu\text{s}$	$\tau_{22}/\mu\text{s}$
继后回击 参数取值	10.7	0.25	2.5	6.5	2	230

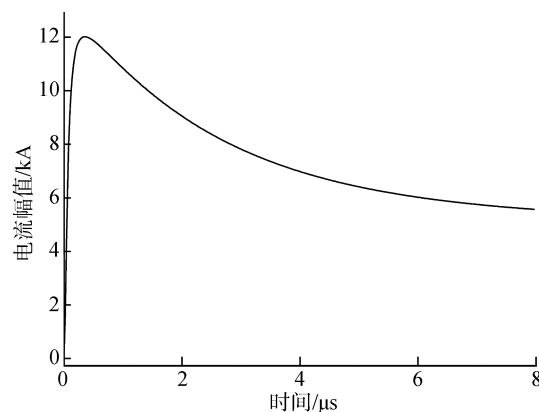


图 3 闪电通道底部采用的基电流波形

Fig. 3 Channel-based current waveform corresponding to a typical subsequent return stroke

闪电回击模型选取 MTLL(the modified transmission-line model with linear current decay with height)模型^[31], 即回击电流波形随高度呈线性衰减, 其表达式为:

$$i(z', t - z'/v) = i(0, t)(1 - z'/H), \quad (21)$$

其中, $i(z', t - z'/v)$ 为回击电流沿回击通道的分布。假设回击通道的高度 $H=7.5$ km, 回击速度 $v=1.5 \times 10^8$ m/s。

2.3 海浪对雷电电磁场传播的影响

图 4 给出了起伏海面地对地闪回击垂直电场的影响,

观测点距闪电通道的水平观测距离 d 分别为 1、30、100、200 km。假定电磁场传播方向与风向垂直。曲线 1 表示

电导率无限大的理想海面, 曲线 2、3、4、5 分别表示风速为 2.5、5.2、8.7、13.4 m/s 的海面垂直电场强度。

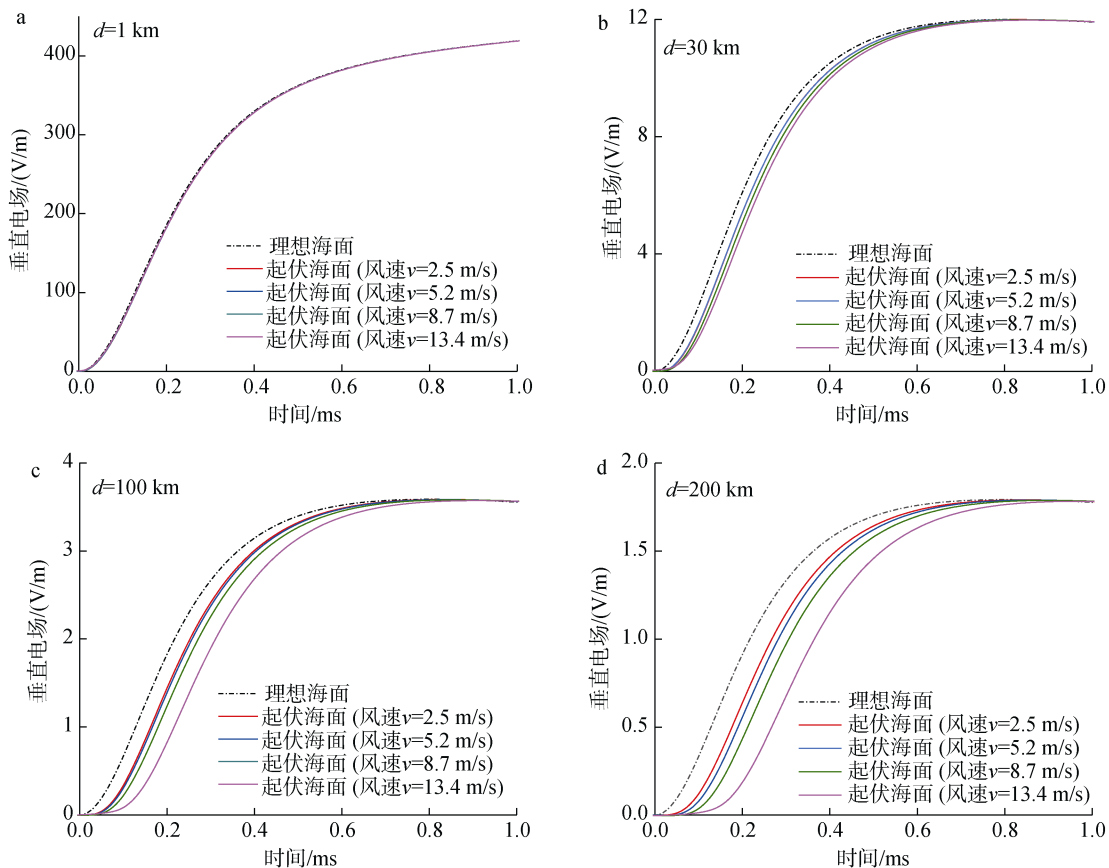


图 4 起伏海面对时域垂直电场的影响

Fig. 4 Propagation effect of sea surface on the lightning vertical electric field in the time domain at distances of 1 km (a, b), 30 km (c, d), 100 km (e, f), and 200 km (g, h) from the lightning channel

注: 黑色虚线表示电导率无限大的理想海面, 彩色实曲线分别表示风速为 2.5、5.2、8.7 和 13.4 m/s 的起伏海面。观测点距闪电通道的距离为: a: 1 km; b: 30 km; c: 100 km; d: 200 km

由图 4 可以看出, 观测距离相同时, 海面的起伏对垂直电场峰值的影响不显著, 但对波形的上升时间的影响较为明显。风速越大, 即海面的起伏程度越大, 上升时间越长; 当观测距离变化时, 垂直电场达到半峰值的时间随着距离而增大。

为了具体分析风速对上升沿时间影响的原因, 图 5 给出了图 4 对应的垂直电场频谱。可以看出, 随着观测距离的增加, 地闪回击电磁波谱的高频成分优先衰减, 观测距离小于 100 km 时, 频率超过 10 MHz 以上的部分按照 $1/f^2$ 的速度快速衰减(f 为频率)。超过 100 km 时, 电磁波谱的中低频段也逐渐开始衰减。

同样的, 我们对水平磁场进行分析研究, 发现海面的起伏对水平磁场的影响与垂直电场类似。差别在于, 二者到达半峰值的时间不同, 相同的海表

情况和相同的观测距离, 水平磁场到达半峰值的时间滞后要短一些。

因此, 当观测距离很远且风速较大时, 无论是利用垂直电场还是水平磁场, 进行雷电放电参数的反演, 海面起伏的影响都不容忽视。

2.4 海浪对闪电定位精度的影响

根据以上对雷电电磁波沿起伏海面传播特性的研究揭示, 海面的起伏会导致地闪回击电磁波上升沿时间的有不同程度的滞后, 这会引起基于时差法的闪电定位系统在定位时产生误差, 从而影响闪电定位的精度。

2.4.1 山东省闪电定位系统介绍

山东省闪电定位系统于 2006 年 6 月布设完成, 由中国华云技术开发公司研制生产。系统主要由采用

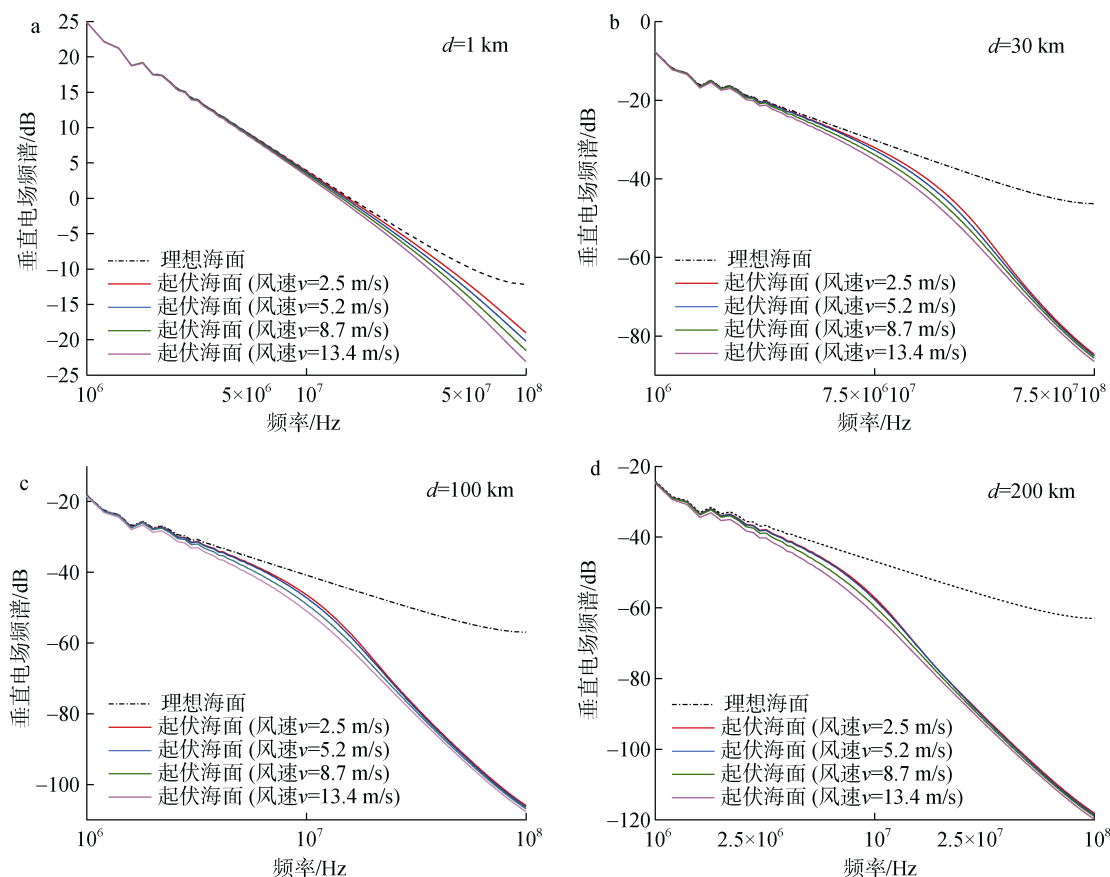


图 5 起伏海面对垂直电场频谱的影响

Fig. 5 Propagation characteristics of sea surface on the lightning vertical electric field in the frequency domain at distances of 1 km (a, b), 30 km (c, d), 100 km (e, f), and 200 km (g, h) from the lightning channel

注: 观测点距闪电通道的距离为 a: 1 km; b: 30 km; c: 100 km; d: 200 km

了时差法(TOA)进行闪电定位, 由 13 个闪电定位仪组成, 分别在章丘、龙口、荣成、即墨、日照、东明、东平、沾化、夏津、鱼台、蒙阴、郯城和昌邑, 位置如图 6 所示。山东省内大部分地区闪电探测效率理论值为 95%(图 6)。



图 6 山东省 LD-II 闪电定位系统探测效率图

Fig. 6 Detection efficiency of LLS in Shandong Province

2.4.2 计算结果及分析

对于时差法的闪电定位系统, 为了减小下垫面的影响, Cooray、Honma 等人^[32-33]提出了几种确定与测量波形相关的到达时间的方法。在本文中, 我们将考虑两种方法: (1)对应于电场峰值的波头时间, (2)对应于电场的半峰值时间。

表 2 和表 4 分别给出了此次天气过程中不同风速下电场峰值对应的波头时间和半峰值时间。表 3 和表 5

表 2 电场峰值的波头时间(单位: μs)

Tab. 2 Time corresponding to the peak lightning electric field

观测点距 闪电通道 的距离 d	风速 v				
	0 m/s	2.5 m/s	5.2 m/s	8.7 m/s	13.4 m/s
1 km	1.45	1.45	1.45	1.45	1.475
30 km	0.45	0.455	0.46	0.47	0.49
100 km	0.44	0.45	0.46	0.49	0.53
200 km	0.44	0.45	0.48	0.52	0.575

表3 表2对应的不同风速下起伏海浪相对于平静海面($v=0$ m/s)时的延迟时间(单位: μs)

Tab. 3 Time delay corresponding to Table 2

观测点距闪电 通道的距离 d	风速 v			
	2.5 m/s	5.2 m/s	8.7 m/s	13.4 m/s
1 km	0	0	0	0.025
30 km	0.005	0.01	0.02	0.04
100 km	0.01	0.02	0.05	0.09
200 km	0.01	0.03	0.08	0.135

表4 电场的半峰值时间(单位: μs)

Tab. 4 Time corresponding to 50% of the peak lightning electric field

观测点距 闪电通道 的距离 d	风速 v				
	0 m/s	2.5 m/s	5.2 m/s	8.7 m/s	13.4 m/s
1 km	0.25	0.26	0.27	0.27	0.27
30 km	0.185	0.205	0.205	0.23	0.245
100 km	0.185	0.215	0.23	0.24	0.315
200 km	0.185	0.22	0.24	0.265	0.35

表5 表4对应的不同风速下起伏海浪相对于平静海面($v=0$ m/s)时的延迟时间(单位: μs)

Tab. 5 Time delay corresponding to Table 4

观测点距闪电 通道的距离 d	风速 v			
	2.5 m/s	5.2 m/s	8.7 m/s	13.4 m/s
1 km	0.01	0.02	0.02	0.02
30 km	0.02	0.02	0.045	0.06
100 km	0.03	0.045	0.055	0.13
200 km	0.035	0.055	0.08	0.165

分别对应于表2和表4的延迟时间。值得注意的是,当观测距离较近时,风速对电场峰值的波头时间影响很小。电场的延迟时间随风速以及观测距离的增大而增大。当距离可达100 km以上时,风速对峰值场的时间有显著影响。当风速达到13.4 m/s,观测距

离为200 km时,波头时间为0.575 μs ,对应的延迟时间为0.075 μs ,半峰值时间为0.35 μs ,对应的延迟时间为0.165 μs 。

为了进一步讨论海面起伏对时差法闪电定位探测精度的影响,我们选取了2015年4月2日天气过程中发生的两次闪电(图7)。这两次雷击共利用了四个测站进行定位,分别为即墨站(36.392°N, 120.469°E)、日照站(35.432°N, 119.539°E)、荣成站(37.17°N, 122.493°E)和龙口站(37.64°N, 120.341°E)。表6给出了输入参数和结果。计算得出,当风速达到13.4 km/s时,海面起伏对闪电定位精度有显著影响,由海面的起伏引起的定位误差分别为12 662 m和3 944 m。第一次闪电定位误差较大的原因是由于第一次闪击点更靠近闪电定位系统组网探测的外围区域,产生了较大的布站误差,该误差是由站点之间摆放的位置形状产生的。

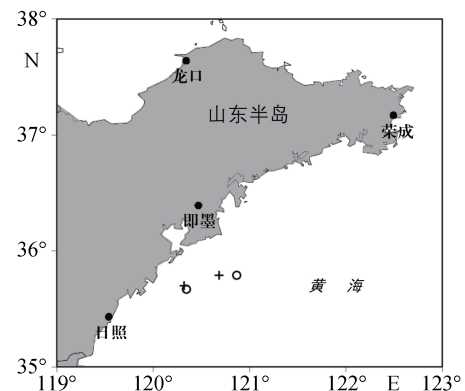


图7 海面起伏对闪电定位的影响

Fig. 7 Effect of rough sea surface on lightning location

注:“+”为闪电定位系统探测的闪击点位置,“o”为起伏海面模型修订后闪击点位置。右侧一组为第一次闪击的位置,左侧一组为第二次闪击的位置

表6 图7对应的计算参数和结果

Tab. 6 Input parameters and results corresponding to Figure 7

闪电定位系统探测 的闪击点位置	风速, $v/(\text{km/s})$	闪击点距各测站间的延迟时间/ μs				起伏海面模型修订 后闪击点位置	定位误差 /m
		即墨站	龙口站	日照站	荣成站		
35.79°N, 120.683°E	13.4	0.04	0.061	0.087	0.049	35.78°N, 120.84°E	12 662
35.7°N, 120.32°E	11	0.08	0.08	0.08	0.15	35.67°N, 120.344°E	3 944

3 结论

本文分析了海面起伏对雷电垂直电场的影响,并选取2015年4月2日雷暴天气过程,将青岛浮标站测量的风速数据输入计算模型。结果表明,海面起

伏对垂直电场的峰值影响较小,但会引起波形的上升时间的延迟,风速越大,即海面的起伏程度越大,影响越明显。随着观测距离的增加,雷电垂直电场波形的上升时间逐渐变长。分析垂直电场频谱发现,随着观测距离的增加,地闪回击电磁波谱的高频成分优

先衰减,观测距离小于 100 km 时,频率超过 10 MHz 以上的部分快速衰减。当观测距离超过 100 km 时,电磁波谱也逐渐由中低频段开始衰减。

雷电电磁场沿起伏海面引起的上升时间的延迟,将会影响基于时差法闪电定位系统的定位精度,通过个例验证,定位误差可达几至十几公里。由于闪击点位置的不同,定位误差的差异可能很大。这其中也包括了闪电定位仪组网形状产生的系统误差。

参考文献:

- [1] Cummins K, Murphy M, Bardo E, et al. A combined ToA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [2] Cummins K, Murphy M, Tuel J. Lightning detection methods and meteorological applications[C]//IV International Symposium on Military Meteorology, Polland, 2000, Sep 26-28.
- [3] Lewis E, Harvey R, Rasmussen J. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin[J]. *J Geophys Res*, 1960, 65(7): 1879-1905.
- [4] Rubinstein M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range[J]. *IEEE Trans Electro Compat*, 1996, 38(3): 531-535.
- [5] Cooray V. Propagation effects due to finitely conducting ground on lightning-generated magnetic fields evaluated using Sommerfeld's integrals[J]. *IEEE Trans Electro Compat*, 2009, 51(3): 526-531.
- [6] Cooray V, Fernando M, Sorensen T, et al. Propagation of lightning generated transient electromagnetic fields over finitely conducting ground[J]. *J Atmospheric Sol-Terrestrial Phys*, 2000, 62(7): 583-600.
- [7] Delfino F, Procopio R, Rossi M. Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground: 1. Theory and numerical evaluation of the electromagnetic fields[J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2008, 113(D5): 79-88.
- [8] Delfino F, Procopio R, Rossi M, et al. Lightning return stroke current radiation in presence of a conducting ground: 2. Validity assessment of simplified approaches[J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2008, 113(D05111).
- [9] Cooray V. On the accuracy of several approximate theories used in quantifying the propagation effects on lightning generated electromagnetic fields[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2008, 56(7): 1960-1967.
- [10] Shoory A, Mimouni A, Rachidi F, et al. Validity of simplified approaches for the evaluation of lightning electromagnetic fields above a horizontally stratified ground[J]. *IEEE Trans Electromagn Comp*, 2010, 52(3): 657-663.
- [11] Weidman C, Krider E, Uman M. Lightning amplitude spectrum in the interval from 100 kHz to 20 MHz[J]. *Geophys Res Lett*, 1981, 8(8): 931-934.
- [12] Weidman C, Krider E, Uman M. Lightning amplitude spectra in the interval from 100 kHz to 20 MHz[J]. *Geophys Res Lett*, 1981, 8(8): 931-934.
- [13] Willett J, Bailey J, Leteinturier C, et al. Lightning electromagnetic radiation field spectrum in the interval from 0.2 to 20 MHz[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95(D12): 20367-20387.
- [14] Ming Y, Cooray V. Propagation effects caused by a rough ocean surface on the electromagnetic fields generated by lightning returns strokes[J]. *Radio Sci*, 1994, 29(1): 73-85.
- [15] Zhang Q, Yang J, Li D, et al. Propagation effects of a fractal rough ocean surface on the vertical electric field generated by lightning return strokes[J]. *Journal of Electrostatics*, 2012, 70(1): 54-59.
- [16] Li D, Paknahad J, Rachidi F, et al. Propagation effects on lightning magnetic fields over hilly and mountainous terrain[C]//2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). IEEE, 2015: 1436-1440.
- [17] Li D, Azadifar M, Rachidi F, et al. Analysis of lightning electromagnetic field propagation in mountainous terrain and its effects on ToA-based lightning location systems[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(2): 895-911.
- [18] Li D, Azadifar M, Rachidi F, et al. On lightning electromagnetic field propagation along an irregular terrain[J]. *IEEE Trans on Electromagn Comp*, 2015, 58(1): 161-171.
- [19] Thottappillil R, Rakov V, Uman M. Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D6): 6987-7006.
- [20] Thottappillil R, Rakov V. On different approaches to calculating lightning electric fields[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D13): 14191-14205.
- [21] Wait J. Transient fields of a vertical dipole over a homogeneous curved ground[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1956, 34(1): 27-35.
- [22] Wait J. Recent analytical investigations of electromagnetic ground wave propagation over inhomogeneous earth models[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(8): 1061-1072.
- [23] Wait J. The ancient and modern history of EM ground-wave propagation[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1998, 40(5): 7-24.
- [24] Shoory A, Mimouni A, Rachidi F, et al. On the accuracy of approximate techniques for the evaluation of lightning electromagnetic fields along a mixed propagation path[J]. *Radio Science*, 2011, 46(2): 1-8.
- [25] Zhang Q, Li D, Fan Y, et al. Examination of the Cooray-Rubinstein (C-R) formula for a mixed propagation path by using FDTD[J]. *Journal of Geophysical Re-*

- search: Atmospheres, 2012, 117(D15).
- [26] Barrick D. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, the effective surface impedance for a slightly rough highly conducting medium at grazing incidence[J]. Radio Science, 1971, 6(5): 517-526.
- [27] Barrick D. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 2, application to HF and VHF propagation above the sea[J]. Radio Sci, 1971, 6(5): 527-533.
- [28] 王运华, 郭立新, 吴振森. 改进的二维分形模型在海面电磁散射中的应用[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5191-5199.
Wang Yunhua, Guo Lixin, Wu Zhensen. Application of an improved 2D fractal model for electromagnetic scattering from the sea surface[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5191-5199.
- [29] Heidler F. Traveling current source model for LEMP calculation[C]//Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 1985: 157-162.
- [30] Caligaris C, Delfino F, Procopio R. Cooray-Rubinstein formula for the evaluation of lightning radial electric fields: Derivation and implementation in the time domain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1): 194-197.
- [31] Caligaris C, Delfino F, Procopio R. A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations[C]//Proc. 9th Int Symp Electromagn Compat, 1991: 229-235.
- [32] Cooray V. Effects of propagation on the return stroke radiation fields[J]. Radio science, 1987, 22(5): 757-768.
- [33] Honma N, Suzuki F, Miyake Y, et al. Propagation effect on field waveforms in relation to time-of-arrival technique in lightning location[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D12): 14141-14145.

Propagation characteristics of the lightning electromagnetic fields along rough sea surface and the effects on the accuracy of ToA-based lightning location

ZHANG Yuan-yuan^{1, 2}, PANG Hua-ji^{1, 2}, LIU Zhao^{1, 2}, SONG Lin^{1, 2}, DENG Meng³

(1. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. Shandong Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Jinan 250000, China)

Received: Jul. 26, 2019

Key words: an improved two-dimensional fractal sea surface model; lightning return stroke; lightning vertical electric field; lightning magnetic field

Abstract: An improved two-dimensional fractal model was used to describe the rough sea surface, and based on Barrick's formulations and Wait's formulations, this paper selected a lightning stroke to analyze the lightning electromagnetic field along the rough sea surface. Furthermore, the effects of the sea surface fluctuation on the time-of-arrival (ToA)-based lightning location systems (LLS) were discussed. The results revealed that the sea surface fluctuation had a significant effect on the wave shape and time delay of the electromagnetic fields propagating along the rough sea surface, but had little effect on the magnitude of the electromagnetic fields. The rise time of the wave shape became longer with an increase in the wave height. When the observation distance increased, the rise times of the lightning vertical electric fields and magnetic fields became longer. The observed time delay caused by the electromagnetic field propagation along the rough sea surface might impact the location accuracy of ToA-based LLS. Affected by the sea surface, different lightning stroke points lead to different lightning location errors, and the location error reached several to ten kilometers.

(本文编辑: 丛培秀)