

基于激光雷达技术的输电线路山火预警研究

近年来,越来越多的输电线路穿越易引发山火的山林地带,严重威胁到输电线路和电网的安全稳定运行。为了给输电线路的安全运行和维护提供及时有效的决策信息,在了解现有的山火监测技术的基础上,提出了激光雷达应用于山火监测的新技术,并通过模拟试验验证了基于激光雷达技术监测山火的有效性和可行性。试验结果表明,当激光在无明显障碍物的空气介质中传播时,其后向散射很微弱,空气介质对激光信号的衰减也很小。而当其在传播过程中遇到烟雾气溶胶介质时,会在介质表面发生强烈的后向散射,激光信号的衰减程度会增大。试验结论可作为激光雷达技术监测山火的有效判据,对山火的预警具有很高的参考价值。

陈锡阳¹ 胡长猛² 夏云峰¹ 谢从珍² 戴 栋²/1.广东电网公司东莞供电局
2.华南理工大学电力学院



陈锡阳/高级工程师

关键词/Keywords

输电线路·
山火预警·
激光雷达·
后向散射·

据国内外研究表明^[1-4],山火在燃烧过程中,在火焰温度、周围空气密度、火焰电导率和灰烬等因素的共同作用下会造成输电线路跳闸或停运事故,对电网的安全稳定运行构成严重威胁,甚至造成大面积停电事故^[5-10]。据统计,国家电网公司和南方电网公司曾发生过多起因山火引发输电线路跳闸的事故^[11]。南非、巴西、美国和澳大利亚也都发生过因山火引发线路跳闸的事故。为保证输电线路的安全运行,开展山火预警工作具有十分重要的意义。

目前,国内外对输电线路走廊山火监测的研究尚处于起步阶段。国内外对输电线路山火的监测主要采用图像识别法^[12]、卫星遥感地面热点法^[13]和分布式

国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A120), (K-GD2012-263), 广州市科技计划项目资助(2011J2200081)。

终端监测法^[14]。传统的山火监测方法虽然有一定的监测效果,但并不能满足在实际输电线路运行过程中对山火监测的要求,故需要开发出实用的新型山火监测技术对输电线路走廊山火展开实时在线监测和预警。激光雷达技术可作为一种新型技术应用于输电线路山火预警工作中,将为输电线路的山火监测与预警提供新的思路和方法。

激光雷达设备的体系结构

激光雷达监测设备由光学系统、偏振模块、探测器、激光器、控制系统数据采集系统和计算机等组成,如图1所示。其工作原理是:先由激光器发出激光脉冲,经过两次折反射发射到空气介质中传播,激光脉冲的高电平时延很短,为纳秒级,而全周期为微秒级,因此占空比很小,人眼看上去是一束连续的光。激光脉冲在空气介质中传播时,每传播一段距离便会在介质表面发生后向散射,散射的光回到光学系统接收区,激光在纯净的空气介质表面的后向散射比较微弱。而当发生山火时,燃料的燃烧会伴随着大量烟雾。根据山火烟雾颗粒对激光的散射作用原理^[15],一旦

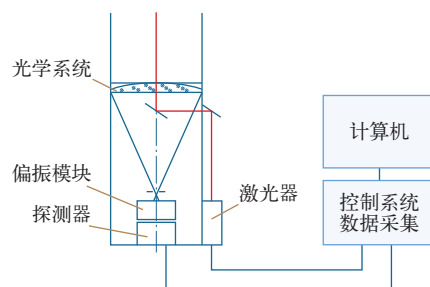


图1 激光雷达的体系结构

激光在传播过程中遇到烟雾影响时,便会在烟雾表面发生强烈的后向散射,返回到光学系统的接收区。由于干净的空气粒子属于球形粒子,而烟雾气溶胶粒子属于非球形粒子,来自非球形粒子和球形粒子的回波信号有不同的退偏振特性,分束器将回波信号按照偏振特性分成两路分别传递到探测器,从而获得回波的退偏振度。多道光子计数器按照时序分别累加平均接收的信号,同时将它们存储到数据存储单元。通过光电倍增管将光信号转化为电信号,最后经过计算机进行数据处理,得到后向散射光强度和烟雾位置等信息,从而达到监测山火的目的。

激光雷达探测原理

激光雷达烟雾探测的基础是激光束与烟雾颗粒、大气分子之间的相互作用,使激光雷达继续向前传播的能量和回波信号的能量或性质发生改变的物理过程。在各种散射(米散射、瑞利散射和拉曼散射)机理中,米散射是由粒径接近于激光波长的气溶胶粒子引起的散射,主要用于探测大气气溶胶,因此适合采用米散射激光雷达来探测烟雾气溶胶^[16]。激光雷达的探测原理可以用激光雷达方程来说明。激光雷达方程是表示发射功率与回波功率之间关系的方程。米散射型激光雷达方程^[17]的表达式为

$$P(z) = P_0 Y(z) \frac{c t_p}{2} \frac{A(z)}{z^2} \beta(z) \{ \exp[-2 \int_0^z \alpha(z) dz] \}^2 \quad (1)$$

式中, $P(z)$ 为接收到的功率; z 为监测点距离; P_0 为激光发射功率; $Y(z)$ 为发射信号与接收信号的几何重叠系数; c 为光速; t_p 为脉冲宽度; $A(z)$ 为接收机有效面积; $\beta(z)$ 、 $\alpha(z)$ 分别为距离为 $z(m)$ 处总的后向散射系数和消光系数,实际上包含气溶胶散射部分和空气分子散射部分,即

$$\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z) \quad (2)$$

$$\alpha(z) = \alpha_a(z) + \alpha_m(z) \quad (3)$$

式中,下标 a 、 m 分别表示气溶胶分子和空气分子。

激光雷达方程提供了回波信号与被探测物的光学性质之间的函数关系,因此可以根据激光雷达探测到回波信号,通过求解激光雷达方程来获

取有关的气溶胶信息。由以上分析可知,激光雷达的方程有4个未知量:分子和气溶胶粒子向后散射系数 $\beta_m(z)$ 、 $\beta_a(z)$ 以及消光系数 $\alpha_m(z)$ 、 $\alpha_a(z)$ 。由于大气分子的散射比较稳定,其散射系数和消光系数可以通过标准的大气模型数据获得。激光雷达方程剩下的气溶胶的两个系数 $\alpha_a(z)$ 、 $\beta_a(z)$ 一般取^[18]

$$S_a = \frac{\alpha_a(z)}{\beta_a(z)} = 50 \quad (4)$$

$$S_m = \frac{\alpha_m(z)}{\beta_m(z)} = \frac{8\pi}{3} \quad (5)$$

在标准大气模型下,消光系数 $\alpha_a(z)$ 为

$$\alpha_a(z) = 1.235 \times 10^{-4} \times \exp\left(\frac{-z}{2\,000}\right) + 2.565 \times 10^{-7} \times \exp\left[-\left(\frac{z-2\,000}{6\,000}\right)^2\right] \quad (6)$$

运用激光雷达技术监测山火烟雾的基本原理就是通过求解激光雷达方程中的散射系数 $\beta_a(z)$ 和消光系数 $\alpha_a(z)$ 反演出烟雾气溶胶的相关信息。

试验过程

为了验证运用激光雷达技术监测烟雾的效果,本次试验采用激光雷达装置远距离监测工厂排放的烟雾。通过监测工厂排放的烟雾来模拟监测山火烟雾,以验证激光雷达的监测效果。

通过实地考察,将激光雷达设备监测的对象定为发电厂中烟囱排放的烟雾,将激光雷达设备摆放在距离工厂烟囱1 920 m处发电厂东路上空旷无障碍物的地面,工厂烟雾位置和试验位置的卫星定位图如图2所示。

摆正激光雷达装置的位置,使激光套筒大致对准烟雾排放的区域,合理地设置激光套筒的扫描范围,设置合适的水平扫描角范围和竖直扫描角范围,使激光套筒对工厂烟雾进行3D扫描,扫描得到激光发射的距离、后向散射光强度和消光系数等数据信息。

激光雷达试验结果与分析

1. 后向散射光子数分布

后向散射光子数是激光套筒发出的激光在空



图2 工厂烟雾位置和试验位置的卫星定位图

气介质传播过程中遇到障碍物时发生后向散射，返回到光学系统接受区的光子数。图3、图4为试

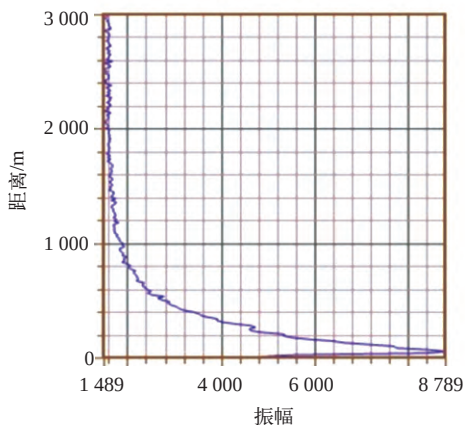


图3 激光在空气介质中传播时的数据采集图像

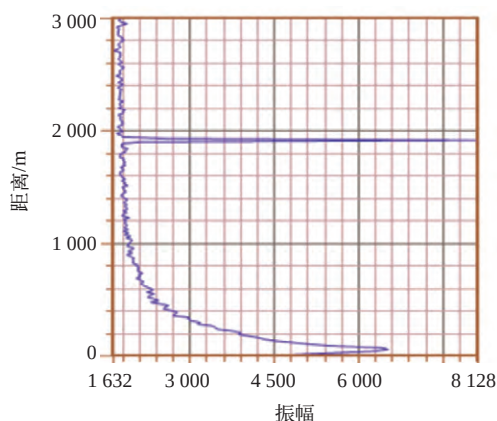


图4 激光照射在工厂排放烟雾表面时的数据采集图像

验测得的离激光套筒的距离以及对应的后向散射光子数图像，图3为激光在空气介质中传播时的图像，图4为激光照射在工厂烟雾表面时的图像。

通过比较激光在两种不同传播方式下其后向散射光子数与距离之间的对比图可以看出：在距离激光套筒100 m左右，由于距离很近，发出去的激光后向散射到套筒接受区的时间太短，探测器无法识别，致使100 m左右的区域为激光探测的盲区；激光在没有明显障碍物的空气介质中传播时，其后向散射比较微弱；当激光在空气介质中传播遇到烟雾气溶胶时，会发生强烈的后向散射，反射到激光套筒接受区的光子数剧烈增加，图4显示距离激光套筒1.9 km处的后向散射光子数比其他距离处的多很多，而比1.9 km更远处仍能监测到比较弱的后向散射，说明激光在传播过程中遇到了穿透性的障碍物，而不是像高大建筑、大树之类的非穿透性障碍物。

通过地图上的卫星定位测得工厂烟囱离激光雷达设备的距离为1.9 km，而试验测得的图像显示，正好在距离激光套筒1.9 km处的后向散射光子数比其他距离段的多很多，而在其他距离处对应的后向散射光子数图像没有出现明显的波峰，说明激光雷达设备监测到了1.9 km处的烟雾。

2. 消光系数的分布

消光系数表示激光在介质中传播时，每段距离中对激光的衰减程度。在本次试验中测得每段距离对应的消光系数分布如图5所示。

从图5中可以看出，除去离激光雷达设备近距

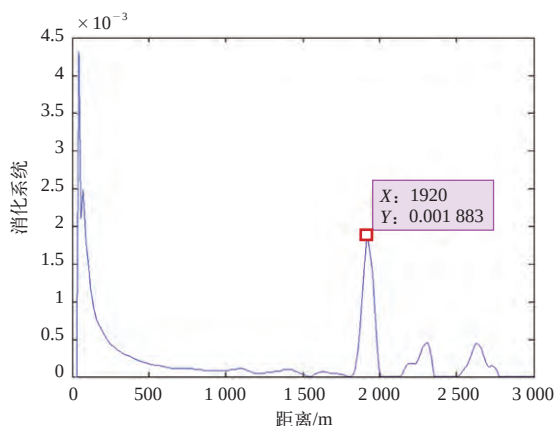


图5 每段距离对应的消光系数分布图

离的一段盲区,在离激光雷达设备1 920 m的地方消光系数最大,说明此处空气介质层发生变化,介质对激光的衰减程度最大,即只有一小部分激光穿过烟雾介质继续向前传播,大部分被散射回激光套筒的接收区被探测器检测到,从而体现了激光雷达设备监测烟雾的准确性。

结束语

介绍了一种新型输电线路山火预警技术,在野外选点对其有效性、可行性和准确性进行了试验分析和探讨,结果表明:

1) 运用激光雷达技术能对周围的物体进行360°的3D扫描,当设备发射出的激光在干净无污染的大气中传播时,激光的传播呈现出畅通无阻的状态,其后向散射的光子数很少,消散系数也很小。

2) 当激光雷达设备发出的激光在传播过程中遇到烟雾气溶胶阻挡介质时,会在其表面发生强烈的后向散射,散射的激光返回到激光套筒的接收区被探测器检测到。激光信号在穿透气溶胶介质过程中会发生明显的衰减,气溶胶处的消光系数会增大。

3) 激光雷达探测技术可用于远距离探测大气气溶胶,由于山火烟雾属于气溶胶的一种,说明激光雷达设备同样可以用于监测输电线路山火,为输电线路的安全运行和维护提供及时有效的决策信息,降低输电通道的事故发生率,提高输电线路的供电可靠性。

参考文献

- [1] 吴田,胡毅,阮江军,等.交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J].高电压技术,2011,37(5):1115-1122.
- [2] 胡湘,陆佳政,曾祥君,等.输电线路山火跳闸原因分析及防治措施探讨[J].电力科学与技术学报,2010,25(2):73-78.
- [3] Yasar Guneri Sahin. Animals as mobile biological sensors for forest fire detection[J]. Sensors, 2007(7):3084-3099.
- [4] Mphale K, Heron M. Measurement of electrical conductivity for a biomass fire[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9(8):1416-1423.
- [5] 胡湘.电网的山火防治与运行优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [6] 黄乐,舒双焰.南方电网2010年第一季度线路山火跳闸情况分析[J].广东电力,2011,24(3):95-98.
- [7] 朱时阳,邓雨荣.输电线路走廊山火监测技术研究与应用[J].广西电力,2013,36(3):25-28.
- [8] 张苏.架空输电线路山火跳闸原因分析及对策[C].2010年云南电力技术论坛论文集(文摘部分),2010:1-4.
- [9] 李勇,陶雄俊,陈立.输电线路山火故障分析及预防[J].湖北电力,2010,34(6):49-50.
- [10] 吴田,阮江军,胡毅,等.500 kV输电线路的山火击穿特性及机制研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):163-170.
- [11] 吴田,阮江军,张云,等.输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(10):138-143.
- [12] 王佳人.基于视频图像的火灾识别与预报[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [13] 王丽娜,孙丹.GIS和遥感技术在黑龙江省森林火灾监测、辅助决策中的应用[J].林火监测,2006(2):23-25.
- [14] 郭圣红.论火灾探测器的分类[J].智能建筑,2007(8):84.
- [15] 张怀清,鞠洪波,陈永富,等.沙尘天气激光雷达监测技术研究[J].林业科学,2007(12):1-5.
- [16] 刘君.大气温度及气溶胶激光雷达探测技术研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [17] 韩道文,刘文清,张玉钧,等.激光雷达监测北京城区冬季边界层气溶胶[J].大气与环境光学学报,2007,2(2):106-107.
- [18] 仲健.大气激光后向散射特性的研究和应用[D].西安:西安电子科技大学,2008.

(收稿日期:2014-05-06) EA