

雨滴碰击光缆后光纤应变相位调制分析

朱辉 孙小菡

Phase modulation analysis for optical fiber strain caused by raindrop collision

Zhu Hui Sun Xiao-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024211 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171440

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171440>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于 CARS 激发源的全光纤飞秒脉冲谱压缩](#)

All-fiber spectral compression of femtosecond pulse for coherent anti-Stokes Raman scattering excitation source

物理学报.2017, 66(20): 204207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204207>

[微流芯片中消逝波激励的荧光辐射特性研究](#)

Fluorescence radiation characteristics based on evanescent wave pumping in a microfluidic chip

物理学报.2017, 66(10): 104208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104208>

[新型高双折射微结构纤芯光子晶体光纤的可调谐超连续谱的特性研究](#)

Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber

物理学报.2017, 66(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094204>

[环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析](#)

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores

物理学报.2017, 66(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024210>

[具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计](#)

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报.2015, 64(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

雨滴碰击光缆后光纤应变相位调制分析

朱辉 孙小菡[†]

(东南大学, 光传感/通信综合网络国家地方联合工程研究中心, 南京 210096)

(2017年6月22日收到; 2017年9月2日收到修改稿)

基于云动力学理论, 分析了雨滴碰击光缆后径向应变导致光纤纤芯折射率及形状发生改变, 使光纤内传输光相位受到调制的过程. 建立了雨滴碰击光缆引起光纤内传输光相位调制的模型, 获得了降雨强度与相位调制之间的关系. 研制了雨滴碰击光缆相位调制实验室验证系统, 对比了模拟降雨强度分别为3, 5, 7, 10, 15, 18, 22, 30 mm/h时的实验测试与仿真结果, 两者变化趋势一致, 误差在9%以内. 该模型可用于仿真获得不同降雨强度下雨滴碰击光缆引起的光相位调制, 为进一步研究降雨对光纤振动传感系统性能的影响, 优化光纤振动传感工程应用系统, 提出可行的雨量补偿方案提供了理论参考.

关键词: 光纤光缆, 云动力学, 振动传感, 雨滴碰击**PACS:** 42.81.-i, 92.60.N-, 07.07.Df, 92.60.Jq**DOI:** 10.7498/aps.67.20171440

1 引言

光纤振动传感技术是根据外界振动对光纤中传输光的相位调制作用, 实现对振动的测量^[1,2]. 国内外学者已经进行了大量的研究, 提出了多种光纤振动传感系统, 广泛应用于油田安全监测、周界安防、管道安全监测、交通运输等领域^[3-7]. 然而, 当传感光缆暴露在大气环境中时, 降雨直接作用于传感光缆, 雨滴碰击引起的相位调制混杂在传感信号中, 系统难以区分信号, 导致系统误报警, 严重影响传感系统的正常运行^[8,9]. 在中国长江下游地区的雨季, 集中暴雨、大雨带来的影响极其明显. 目前, 对于光纤振动传感系统中雨滴碰击光缆引起的光纤内传输光相位调制研究鲜有报道.

本文基于云动力学理论^[10], 分析了雨滴降落末速度与尺寸分布及其碰击光缆后的光纤应变相位调制, 建立了雨滴碰击光缆引起的光纤内传输光的相位调制模型, 获得了降雨强度与相位调制间的关系, 通过了实验验证, 为进一步优化光纤振动传感工程应用系统, 提出可行的雨量补偿方案提供理论参考.

2 雨滴碰击相位调制过程分析

常用的雨量等级按照12 h或24 h降雨量来划分, 每小时的等效降雨量非常小, 并不能准确反映降雨强度大小, 瞬时最大降雨强度被降低, 对实际光纤传感系统分析不利. 因此采用每小时降雨量作为划分标准, 将降雨等级分为四类, 如表1所示.

表1 降雨等级分类^[11]
Table 1. Rainfall classification^[11].

降雨等级	小雨	中雨	大雨	暴雨
降雨量/mm·h ⁻¹	≤ 2.5	2.6—8	8.1—15.9	≥ 16

从南京站降雨资料(1981—2010)来看^[12], 全市多年平均降雨量约为1090.6 mm, 年降雨量丰沛, 汛期降雨量占全年降雨量的60%—70%, 暴雨、大雨较集中, 因此光纤振动传感系统在设计和使用中必须考虑降雨条件下的环境适应能力.

2.1 雨滴碰击动力学

雨滴对光纤的碰击和引起光相位变化的能量来自雨滴降落到光纤表面由势能转化的动能. 雨

[†] 通信作者. E-mail: xhsun@seu.edu.cn

滴在下降过程中受到重力和空气阻力的作用, 最终以匀速下落, 此速度为雨滴的降落末速度. 目前研究人员已经提出多种雨滴降落末速度的经验公式^[13,14], 对幂函数、Altas、沙玉清、牛顿等公式进行了仿真分析, 结果大致相同. 其中, 幂函数公式计算简单, 相位调制与降雨强度的比例关系直观. 雨滴降落末速度与雨滴直径的幂函数经验公式为

$$V(D) = \alpha D^\beta, \quad (1)$$

式中 $V(D)$ 为雨滴降落末速度, D 为雨滴直径, α 和 β 为率定系数, 通常 $\alpha = 3.778$, $\beta = 0.67$.

雨滴谱是指单位体积中雨滴的数量随雨滴大小的分布, 即单位体积内单位尺度间隔中的雨滴数 ($\text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$). 国内外对雨滴谱有大量研究, 建立了不同的雨滴尺寸分布模型^[15-17], 其中 M-P 指数分布是由 Marshall 和 Palmer 首次提出的一个负指数模型, 用于拟合雨滴谱, 其形式为

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D), \quad (2)$$

式中 $N(D)$ 为单位体积的雨介质内雨滴直径为 D 的雨滴数量, N_0 为雨滴平均空间密度常数, 通常取值 $8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, Λ 为降雨强度 I 的幂函数, 其表达式为

$$\Lambda = 4.1I^{-0.21}. \quad (3)$$

单位时间单位表面所接收的雨滴直径分布函数是雨滴谱函数与雨滴速度的乘积, 可表示为^[18]

$$N'(D) = V(D)N(D), \quad (4)$$

式中 $N'(D)$ 为单位时间单位表面所接收的雨滴直径分布函数.

假设雨滴的形状为球形, 忽略雨滴之间的相互作用, 雨滴以下降末速度与光纤碰击, 雨滴与固体表面低速垂直碰击时, 不同直径、不同速度的雨滴碰击力的作用时间基本一致. 雨滴碰击力的归一化曲线如图 1 中实线所示, 碰击力在快速上升和快速下降阶段持续时间约为 τ , 随后平滑下降^[19-21]. 为了简化研究, 雨滴碰击力的大小近似用周期为 2τ 的正弦波来拟合, 如图 1 中虚线所示, 且仅考虑雨滴碰击后 τ 时间段内的情况, 碰击力可表示为

$$P(D, t) = P_{\text{peak}}(D) \sin\left(\frac{\pi}{\tau}t\right), \quad 0 < t < \tau, \quad (5)$$

式中 $P(D, t)$ 为直径为 D 的雨滴碰击光纤表面的压力, $P_{\text{peak}}(D)$ 为压力最大值.

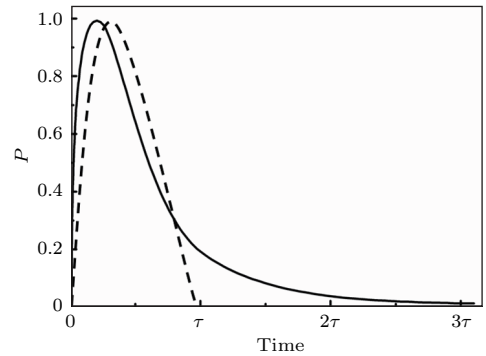


图 1 雨滴碰击力的归一化曲线

Fig. 1. Normalized curve of raindrop collision.

雨滴与光纤的碰击持续时间极短, 假设在此过程中不考虑雨滴的水气挥发及碰击造成的飞溅, 则碰击过程符合动量守恒, 假设雨滴与光纤碰击后速度变为零, 可得^[20]

$$\int_0^\tau P(D, t) dt = \int_0^{V(D)} m dv, \quad (6)$$

式中 m 为雨滴的质量.

2.2 雨滴碰击光缆后产生径向应变的过程

图 2 所示为雨滴碰击光缆过程的等效示意图. 雨滴在下降过程中与水平敷设的光缆表面碰击, 在光缆的正中心位置, 雨滴与光缆表面垂直碰击, 其他位置的雨滴与光缆表面碰击有一定接触角. 雨滴碰击与光缆表面接触角的变化对碰击力以及碰击过程中的运动阶段影响很小, 不同接触角的雨滴碰击力峰值差别不大, 而且碰击力随时间的变化也基本保持一致^[22], 因此可等效为沿光缆径向施加碰击力. 同时, 光缆径向受到碰击后产生径向应变,

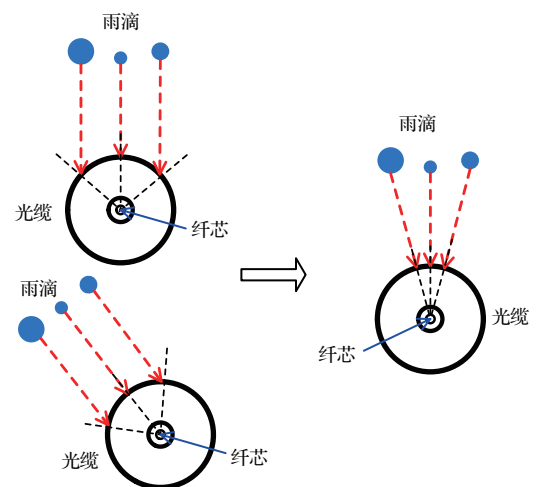


图 2 雨滴碰击光缆过程等效示意图

Fig. 2. Equivalent process of raindrop collision.

且应变沿径向施加到其中的光纤纤芯, 致使纤芯折射率及形状发生改变, 从而对其中的传输光波相位进行调制. 光缆外径远大于单模光纤内径, 光缆内光纤数量对传送光波受降雨作用的相位调制影响很小, 可以忽略不计.

2.3 光纤内传输光相位调制模型

假设雨滴都沿半径方向垂直碰击光缆表面, 则单个直径为 D 的雨滴碰击光缆引起的相位变化 $\varphi(D, t)$ 可表示为^[23]

$$\varphi(D, t) = cP(D, t), \quad (7)$$

式中 c 为压力与光纤内传输光相位变化的传递系数.

压力与光纤内传输光的相位变化成正比, 光沿着光纤传输, 传输过程受到雨滴碰击力的作用发生相位变化, 光缆单位表面、单位时间内在碰击持续时间 τ 内的所有雨滴都能引起光相位的变化. 假设碰击持续时间 τ 内雨量大小不变, 光缆上单位表面由直径为 D 的雨滴引起的相位变化 $\varphi_p(D)$ 可写为

$$\begin{aligned} \varphi_p(D) &= \int_0^\tau N'(D)\varphi(D, t)dt \\ &= cN'(D) \int_0^\tau P(D, t)dt. \end{aligned} \quad (8)$$

将 (4) 式和 (6) 式代入 (8) 式中, 可得

$$\begin{aligned} \varphi_p(D) &= V(D)N(D) \int_0^\tau cP(D, t)dt \\ &= cmV^2(D)N(D). \end{aligned} \quad (9)$$

假设光缆直径为 R , 受雨滴碰击的光缆长度为 L_r , 雨滴碰击光缆的面积即为光缆的水平投影面积, 则光通过这段光缆的过程中由直径为 D 的雨滴引起的相位变化 $\varphi_d(D)$ 可以写为

$$\varphi_d(D) = \varphi_p(D)RL_r = cmRL_rV^2(D)N(D). \quad (10)$$

降雨包含了大小不同的雨滴, 则光通过这段光缆的过程中雨滴碰击引起的总相位变化 $\varphi_r(I)$ 理论表达式为

$$\begin{aligned} \varphi_r(I) &= \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \varphi_d(D) dD \\ &= cRL_r \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} mV(D)^2 N(D) dD, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 D_{\min} 和 D_{\max} 为降雨中包含的最小雨滴直径和最大雨滴直径.

(1) 式和 (2) 式代入 (11) 式, 可得

$$\begin{aligned} \varphi_r(I) &= \frac{1}{6}c\rho\pi N_0 RL_r \alpha^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{2\beta+3} \\ &\quad \times \exp(-\Lambda D) dD. \end{aligned} \quad (12)$$

当 $D_{\min} \rightarrow 0, D_{\max} \rightarrow \infty$ 时, (12) 式可化为 Gamma 函数的形式, 即

$$\varphi_r(I) = \frac{c\rho\pi N_0 RL_r \alpha^2}{6\Lambda^{2\beta+4}} \Gamma(2\beta + 4). \quad (13)$$

令 $k_1 = \frac{1}{6}c\rho\pi N_0 \alpha^2 \Gamma(2\beta + 4)$, k_1 为常数, 将 $\Lambda = 4.1I^{-0.21}$ 和 $\beta = 0.67$ 代入 (13) 式中, 光经过直径为 R 、长度为 L_r 的受雨滴作用的光缆, 雨滴碰击对光纤内传输光的相位调制 $\varphi_r(I)$ 可化为

$$\varphi_r(I) = 5.34 \times 10^{-4} k_1 RL_r I^{1.1214}. \quad (14)$$

在实际的降雨过程中, 降雨强度 I 是一个不断变化的量, 因此雨滴引起的相位调制也在不断变化.

根据 (14) 式, 不同光缆直径和长度下降雨引起的光相位调制如图 3 所示. 随着降雨强度的增大, 相位调制也越来越大; 光缆长度一致时, 光缆直径越大, 相位调制越大; 光缆直径一致时, 光缆长度越大, 相位调制越大. 雨滴引起的相位调制与光缆的直径和长度呈正相关关系, 与光缆表面所接收的降雨强度有关, 会随着降雨强度的变大而变大, 且单调上升.

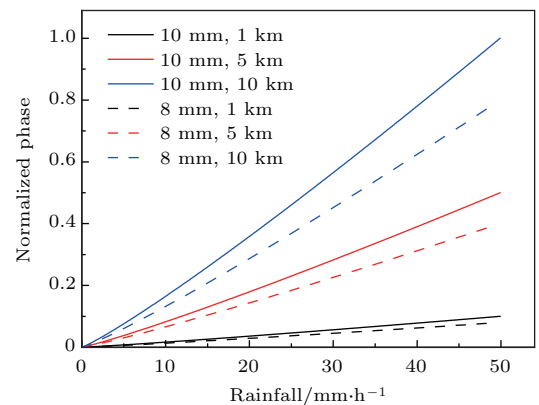


图 3 不同光缆直径和长度下降雨引起的光相位调制

Fig. 3. Optical phase modulation caused by raindrop collision for fibers with different radii and lengths.

3 实验验证

为了验证模型, 搭建了一个雨滴碰击光缆相位调制实验室验证系统, 如图 4 所示. 系统由 Sagnac

双光束干涉光路(含传感光缆和延时光纤), 3 dB耦合器、超辐射发光二极管(SLD)光源模块、光接收机等构成. SLD光源输出光谱中心波长为1310 nm, 谱宽为40 nm, 峰值输出功率为40 mW. 传感光缆使用长为100 m、直径为9 mm的四芯单模光纤. 外界振动作用于光纤光缆后, 光纤内传送光波相位发生微弱变化, 这些相位变化在3 dB耦合器处发生等程干涉, 转换为强度变化信号. Sagnac环中加入5 km延时单模光纤环, 使得传感光缆位于其一侧, 避开了中间对称不敏感区, 增加了顺、逆时针光束受降雨作用后的时间差, 从而使得外界振动导致的相位调制增大.

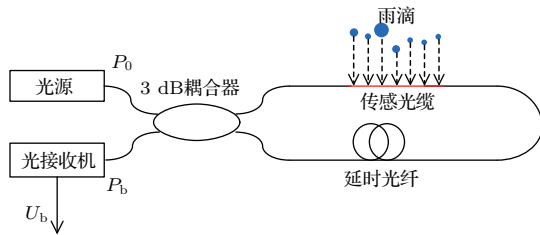


图4 雨滴撞击光缆相位调制实验室验证系统
Fig. 4. Experimental system of phase modulation by raindrop collision.

当雨滴作用于传感光缆时, 对光纤中传播的光相位产生调制, 干涉将相位变化转换为光功率 P_b 的变化, 光接收机将光功率信号转换为电压信号 U_b 输出, 其输出信号为^[24]

$$U_b(I) = \frac{\eta P_0}{2} \{1 - \cos[\varphi_r(I_1) - \varphi_r(I_2)]\}, \quad (15)$$

式中 $\varphi_r(I_1)$, $\varphi_r(I_2)$ 分别为顺时针和逆时针传输的光受到雨滴撞击后发生的相位调制, η 为光接收机光电转换效率, P_0 为光源发射的光功率.

因为两条路径的相位调制差为极小值, 忽略高阶项可近似为

$$\begin{aligned} U_b(I) &= \frac{\eta P_0}{4} [\varphi_r(I_1) - \varphi_r(I_2)]^2 \\ &= \frac{\eta P_0}{4} [(I_1 - I_2) \varphi'_r(I)|_{I=I_1}]^2. \end{aligned} \quad (16)$$

模型中的降雨强度是指光纤表面的降雨强度, 在相同的大气降雨强度 I_m 下存在时间上的随机性, 其最大值与 I_m 呈正相关. 假设模型中的降雨强度变化范围为 $[0, aI_m]$, 其中 a 为相关系数^[10]. 则大气降雨强度 I_m 下输出信号的最大电压为

$$U_{b \max}(I_m) = \frac{\eta P_0}{4} [aI_m \varphi'_r(I)|_{I=aI_m}]^2. \quad (17)$$

将(14)式代入(17)式, 可得

$$U_{b \max}(I_m)$$

$$= 9 \times 10^{-8} a^{2.2428} \eta P_0 k_1^2 R^2 L_r^2 I_m^{2.2428}. \quad (18)$$

在实验室模拟不同等级的降雨, 进行多次实验, 获取多组系统输出信号. 为了防止外界噪声的影响, 实验中最大电压 $U_{b \max}(I_m)$ 取输出信号中电压最大的3个值的平均. 实验中降雨高度为10 m, 雨滴直径在6 mm以下, 所有雨滴都能达到其降落末速度. 在模拟降雨强度分别为3, 5, 7, 10, 15, 18, 22, 30 mm/h时, 获得了各降雨强度下的最大电压, 归一化的最大电压如图5黑线所示. 随后基于所建模型及相位调制与输出信号之间的关系, 在以上8组不同降雨强度下对输出信号最大电压进行模拟仿真, 结果如图5红线所示. 对比实验及仿真结果, 可见二者基本一致, 误差在9%以内. 因此, 在不同降雨强度下该模型都能够较好地仿真计算雨滴撞击光缆引起的光相位调制.

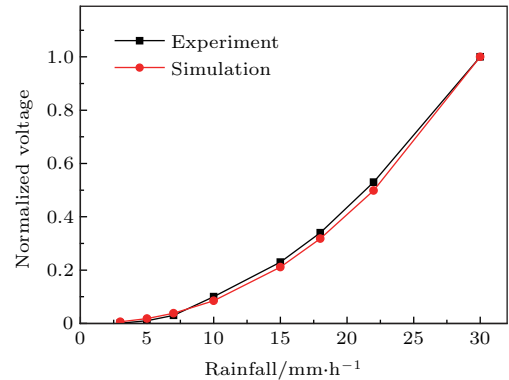


图5 不同降雨量下系统输出信号实验和仿真结果
Fig. 5. Experiment and simulation results of output signal under different rainfall conditions.

4 结 论

基于云动力学理论, 分析了雨滴降落末速度与尺寸分布及雨滴撞击光缆后光纤应变产生的相位调制, 建立了雨滴撞击光缆引起的光纤内传输光的相位调制模型, 获得了降雨强度与相位调制之间的关系. 研制了雨滴撞击光缆相位调制实验验证系统, 获得了雨滴引起的相位调制与系统输出信号之间的关系, 为模型的实验验证提供了可行方案. 实验获得了不同模拟降雨强度下的输出信号最大值, 并与仿真结果进行了对比, 实验与仿真结果基本一致, 误差在9%以内. 结果表明, 该模型可用于仿真获得不同降雨强度下雨滴撞击光缆引起的光相位调制.

参考文献

- [1] Taylor H F, Lee C E 1993 US Patent 5194847 [1993-03-16]
- [2] Choi K N, Taylor H F 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 386
- [3] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, Taylor H F 2005 *J. Lightw. Technol.* **23** 2081
- [4] Kurmer J P, Kingsley S A, Laudo J S, Krak S J 1992 *SPIE Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors* San Francisco, USA, January 29–31, 1992 p117
- [5] Wan K T, Leung C K Y 2007 *Sens. Actuators A* **135** 458
- [6] Tan J, Chen W M, Zhu Y, Wang D 2006 *Acta Photonica Sinica* **35** 228 (in Chinese) [谭靖, 陈伟民, 朱永, 王丁 2006 光子学报 **35** 228]
- [7] Hu Z X, Zhang G L, He J, Zhang L, Zhou J X 2003 *Journal of Transducer Technology* **22** 48 (in Chinese) [胡志新, 张桂莲, 何巨, 张陵, 周进雄 2003 传感器技术 **22** 48]
- [8] Mahmoud S S, Katsifolis J 2009 *SPIE Defense, Security, and Sensing* Orlando, USA, April 14–16, 2009 p731604
- [9] Zhu H, Pan C, Sun X 2014 *SPIE Sensing Technology and Applications* Baltimore, USA, May 5–9, 2014 p91130F
- [10] Robert A, Houze J 2014 *Cloud Dynamics* (2nd Ed.) (Philadelphia: Academic Press) pp47–53
- [11] <https://wenku.baidu.com/view/ca52ef4b0b4c2e3f572763cf.html> [2017-08-31]
- [12] <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0029.0005.html> [2017-06-14]
- [13] Laws J O 1941 *Earth. Space Sci.* **22** 709
- [14] Gunn R, Kinzer G D 1949 *J. Meteor.* **6** 243
- [15] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S 1973 *Rev. Geophys.* **11** 1
- [16] Ulbrich C W 1983 *J. Climate Appl. Meteor.* **22** 1764
- [17] Marshall J S, Palmer W M K 1948 *J. Meteor.* **5** 165
- [18] Hall R L, Calder I R 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 18465
- [19] Fu X, Li H N, Yang Y B 2015 *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* **147** 85
- [20] Li R, Ninokata H, Mori M 2011 *Prog. Nucl. Energy.* **53** 881
- [21] Mitchell B R, Nassiri A, Locke M R, Klewicki J C, Korkolis Y P, Kinsey B L 2016 *ASME 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference* Phoenix, USA, November 13–16, 2016 pV001T02A047
- [22] Li J, Zhang B, Guo P, Lv Q 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 214903
- [23] Hocker G B 1979 *Appl. Opt.* **18** 1445
- [24] Hoffman P R, Kuzyk M G 2004 *J. Lightw. Technol.* **22** 494

Phase modulation analysis for optical fiber strain caused by raindrop collision

Zhu Hui Sun Xiao-Han[†]

(National Research Center for Optical Sensing/Communications Integrated Networking, Southeast University,
Nanjing 210096, China)

(Received 22 June 2017; revised manuscript received 2 September 2017)

Abstract

Optical fiber vibration sensing technology is based on the phase modulation of the transmitted light caused by the external vibration to achieve vibration measurement. A lot of researches have reported a variety of schemes for optical fiber vibration sensing and set up several application systems, achieving the functions of oil field safety monitoring, perimeter security, pipeline safety monitoring, etc. The phase modulation caused by raindrops is mixed with the sensing signal, however, when the sensing fiber cable is exposed to the atmospheric environment and the rainfall directly acts on the sensing cable. It is difficult to distinguish the valid signal which can cause the false alarms, which thereby seriously affects the normal operation of the sensing system. To our knowledge, to date, there has been no report on the phase modulation of the transmitted light in the optical fiber caused by raindrops.

Based on the theory of cloud dynamics, the transformations of refractive index and shape in the core of optical fiber and the phase modulation of light caused by raindrop collision with optical fiber cable are analyzed. The model of optical phase modulation caused by raindrop collision with optical fiber cable is established, and the relationship between phase modulation and rainfall intensity is obtained. With the increase of rainfall intensity, the phase modulation increases. When the length of the optical fiber cable is fixed, the larger the cable diameter, the larger the phase modulation is. The larger the length of the cable, the greater the phase modulation is, with the cable diameter fixed. The phase modulation caused by raindrops has a positive correlation with the cable diameter and the cable length, which is related to the rainfall intensity received on the cable surface, and increases monotonically with the rainfall intensity. A laboratory verification system for phase modulation caused by raindrop collision with optical fiber cable is established, and the relationship between the phase modulation caused by raindrops and the output signal is obtained. The experimental results are compared with the simulation results at the rainfall intensities of 3, 5, 7, 10, 15, 18, 22, and 30 mm/h. The experimental and simulated results are consistent with each other under different rainfall intensities and the error is less than 9%. The results show that the model can be used to simulate the phase modulation caused by rainfall under different rainfall intensities. It provides a theoretical basis for studying the effect of rainfall on the vibration sensing system, based on which the application system can be optimized and the feasible rainfall compensation scheme can be found.

Keywords: optic fiber cable, cloud dynamics, vibration sensing, raindrop collision

PACS: 42.81.-i, 92.60.N-, 07.07.Df, 92.60.Jq

DOI: [10.7498/aps.67.20171440](https://doi.org/10.7498/aps.67.20171440)

[†] Corresponding author. E-mail: xhsun@seu.edu.cn