

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.007

基于训练序列的光信道估计*

王惠琴 胡秋 王贺 曹明华

(兰州理工大学 计算机与通信学院 兰州 730050)

摘要:大气信道的复杂性会引起信道状态参数的随机变化,这对通信系统性能有很大影响。为此,研究了基于训练序列的沙尘光信道估计,以 m 序列为训练序列,采用时分复用方式构建了一种基于训练序列的光信道估计方案。该方案利用训练序列中的 0 序列,构造了一种噪声方差的估计方法。在此基础之上,研究了最小均方误差(MMSE)准则下不同散射路径数和训练序列长度对估计均方误差(MSE)和系统误码性能的影响。研究表明,在小信噪比的大气信道中,MMSE 准则下散射路径数不宜超过 5, m 序列长度选 63 为宜。

关键词: 大气激光通信; 沙尘信道; 信道估计; 训练序列

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Optical channel estimation based on training sequence

Wang Huiqin Hu Qiu Wang He Cao Minghua

(School of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The complexity of atmospheric channel will cause the random change of channel state parameters, which will have great influence on communication system performance. Thus, the dust optical channel estimation based on training sequence is researched in this paper. Choosing the m sequence as training sequence and adopting time division multiplexing (TDM) technology, an estimation scheme is constructed based on training sequence. Employing the 0 sequence of the training sequence, a noise variance estimation method is constructed in this scheme. On this basis, the impacts of the scattering path number and the training sequence length on the mean square error (MSE) of channel estimation and bit error performance under MMSE criterion are researched. The results show that the number of scattering path should not exceed 5, and 63 is an appropriate choice for m sequence length under MMSE criterion for the low signal to noise ratio atmospheric channel.

Keywords: atmospheric laser communication; dust channel; channel estimation; training sequence

1 引言

大气中存在的各种散射元对激光束会造成多次散射,这使得接收端接收到的信号既含有直达信号又含有多径散射信号^[1]。与直达信号相比较,多径散射信号由于到达接收器经历了不同路径而产生信号的时间延迟,

尤其是在大雨、暴雨、大雪及大雾等恶劣的天气条件下大气激光通信可能发生通信中断^[2],这将导致通信系统性能的恶化。已有研究表明,在浓雾环境中,激光的衰减高达 72 dB/km,在雨中的衰减也达到 17 dB/km^[3]。为了保证小信噪比环境中激光通信的正常运行,信道均衡和信号检测是改善系统性能的有效措施之一。但在均衡和信号检测过程中,一般需要已知信道状态参数,这就需要

收稿日期:2016-08 Received Date: 2016-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61465007,61265003,61461026)、兰州理工大学博士基金(14-0232)资助项目

对信道状态参数进行准确的估计。然而,在实际的无线光通信系统中,信道状态参数很难提前获得,因此这使得信道估计就显得尤为重要。如何进行信道估计以及参数估计是否准确,将直接关系到数据传输可靠性和系统性能的改善。

目前,常用信道估计方法有盲估计和非盲估计(即基于训练序列的信道估计)。与前者相比,后者具有数学原理比较成熟、估计精度高、收敛速度快、且易于工程实现等特点,已在射频通信领域得到了广泛的应用^[4-6]。然而与射频通信相比,激光信号在传输时受到的大气因素影响更为复杂,且信号的调制与检测技术也大不相同。受光电检测器件的限制无线光通信中通常采用单极性的强度调制/直接检测(IM/DD)技术,该方法是利用光信号的强度来传递信息,即有光为“1”,无光为“0”。而在传统的射频通信中,调制可以利用幅度(或相位或二者的同时变化)来表示信息,允许负值和复数的存在。信号调制方式的差异导致无线电通信中的信道估计与均衡的研究成果并不适应于无线光通信。为此,人们围绕针对无线光通信的调制方式和信道估计方法展开了相关研究。文献[7-9]采用单边训练序列研究了室内可见光通信系统中的信道估计问题,并分别得到克拉美-罗界(CRB)准则下时域和频域中的最优训练序列,有效的实现了信道估计。后来,针对大气激光通信中的 OFDM 系统。文献[10]采用导频辅助的方法研究了最小二乘(LS)和线性最小均方误差(LMMSE)准则下的信道估计方法,较好的完成了信道状态参数的估计。上述文献中大多是在LS准则下完成了信道估计,但是LS准则在小信噪比的情况下对噪声特别敏感,严重影响了估计的准确性,特别是在浓雾、沙尘等恶劣环境中。因此依据无线光通信自身的特点,本文针对强度调制/直接检测方式,采用最小均方误差(MMSE)准则研究基于单边训练序列的信道估计方案,以改善小信噪比环境中通信系统的性能。

2 大气激光通信的系统模型

在强度调制/直接检测方式下,OOK调制由于方法简单且易于实现,已被广泛的应用,因此本文采用OOK

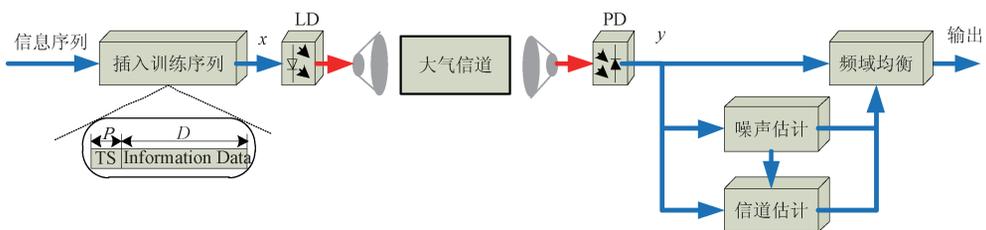


图1 基于训练序列的光信道估计

Fig. 1 Optical channel estimation based on training sequence

调制来研究大气信道中的估计方法,利用信道估计所获得的信道状态参数对接收到的 OOK 信号进行均衡,以提高 OOK 信号检测的正确性,降低系统的误码率。假设发送信号 $x(t)$ 经过大气信道到达接收端,此时接收端接收到的信号 $y(t)$ 可表示为:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) + w(t) \tag{1}$$

式中: $w(t)$ 表示由接收机噪声、背景噪声等组成的系统噪声,实际系统中可近似为高斯白噪声, \otimes 表示卷积运算, $h(t)$ 表示大气信道的脉冲响应。

以码元符号周期对式(1)中信号进行采样,可得大气激光通信系统的离散时间系统模型:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)x(n-l) + w(n) \tag{2}$$

式中: L 表示离散信道径数, $h(l)$ 代表第 l 径信道系数, $w(n)$ 为高斯白噪声序列,满足 $w(n) \sim N(m, \sigma_w^2)$, $m > 0$ 。式(2)对应的矩阵形式为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{w} \tag{3}$$

式中: $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ 表示接收信号序列, $\mathbf{h} = [h(L-1), h(L-2), \dots, h(0)]^T$ 表示信道脉冲响应, $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T$ 表示噪声向量。发送信号的循环矩阵可表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{L-1} & x_{L-2} & \cdots & x_1 & x_0 \\ x_L & x_{L-1} & \cdots & x_2 & x_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{N+L-3} & x_{N+L-4} & \cdots & x_{N-1} & x_{N-2} \\ x_{N+L-2} & x_{N+L-3} & \cdots & x_N & x_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times L} \tag{4}$$

3 基于训练序列的光信道估计

基于训练序列的光信道估计方案原理如图1所示。由图1可知,发端在发送数据前通过时分复用方式发送一定的已知训练序列,接收端运用该序列并依据一定的信道估计准则即可实现对信道脉冲响应的估计。在该方案中,训练序列的选择与插入方式、估计准则选取是直接影响参数估计的准确性和精度的重要因素,下面将针对 OOK 调制分别来描述其关键技术。

3.1 训练序列的选取

在基于训练序列的信道估计方法中,训练序列的选取,即训练序列中符号的选取,包括训练序列的长度和符号,其对信道估计的性能起着至关重要的影响。文献[11]指出,当选取的训练序列自相关函数具有冲激响应的特性时,此时信道估计的均方误差最小。鉴于此,本方案中选取具有良好自相关特性的 m 序列作为训练序列。

m 序列是由 n 级移位寄存器和其延迟单元通过线性反馈产生的最长码元。 m 序列的周期 P 要求满足:

$$P = 2^n - 1 \quad (5)$$

式中: n 为移位寄存器级数。

典型的 m 序列反馈系数如表 1 所示。根据反馈系数 C_i 便可获得不同级数下对应的训练序列。

表 1 典型 m 序列反馈系数表

Table 1 Typical m sequence feedback coefficient

级数 n	周期 P	反馈系数 C_i (八进制)
3	7	13
4	15	23
5	31	45, 67, 75
6	63	103, 147, 155
7	127	203, 211, 217, 235, 277, 313, 325, 345, 367
8	255	435, 453, 537, 343, 545, 551, 703, 747
9	511	1021, 1055, 1131, 1157, 1167, 1175

3.2 训练序列的插入方式

在基于训练序列的估计方法中,训练序列的插入方式主要有两种:单边训练序列插入和双边训练序列插入。单边序列插入方式是将单一的训练序列放置在数据信息序列的头部,如图 2(a)所示。双边训练序列插入方式则是将长度相等的两段训练序列分别放置在数据信息序列的头部和尾部,如图 2(b)所示。相对于双边训练序列的信道估计而言,单边训练序列的估计方法实现更为简单,而且多数情况下都能够满足实际需要,因此本文选用单边训练序列的插入方式来研究信道估计。

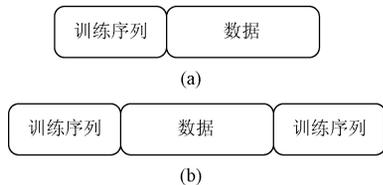


图 2 训练序列的两种插入方式

Fig. 2 Two insertion methods of training sequence

3.3 信道估计方法

信道估计方法中常用的基本准则是 LS、MMSE 准则,其中 LS 准则是以误差的平方和最小化为优化目标对

数学模型中未知参数进行估计的一种方法^[12]。虽然这种方法具有无需对信道及噪声做任何先验假设、算法简单、易于实现等优点,但是在小信噪比的情况,其估计的均方误差偏大,影响了估计的精度。与之相比,MMSE 准则由于考虑了噪声对接收信号的影响,估计效果更佳。只是在进行 MMSE 信道系数的求解时,需要已知噪声方差。实际系统中,噪声方差也是未知的,因而需要对噪声方差进行估计。

3.3.1 噪声方差估计

为了提高信道参数估计的准确性和估计精度,需要实现对当前噪声信号的准确估计,本文充分利用该方案中包含的已知训练序列,提出一种基于阈值判决与序列分离的噪声方差估计方法,该方法具体如下。

1) 首先对接收到的训练序列进行初次判决,得到估计训练序列。其判决准则为:

$$\hat{x}(n)_{\text{dec}} = \begin{cases} 0, & y(n) < \gamma, \quad n = 0, 1, \dots, N \\ 1, & y(n) \geq \gamma, \quad n = 0, 1, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{x}(n)_{\text{dec}}$ 为采用阈值判决之后的输出序列, $y(n)$ 为接收端最初获得的接收信号,判决阈值 γ 通过对每帧接收数据 $y(n)$ 取算术平均获得,即:

$$\gamma = E[y(n)] \quad (7)$$

2) 为了提高判决的准确性,将步骤 1) 所得结果与已知的训练序列进行对比,调整判决门限,作二次判决,直至估计序列和已知训练完全相同。同时,利用判决结果分离“0”、“1”序列,即:

$$y_0(n) = (1 - \hat{x}_{\text{dec}}(n))y(n), \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (8)$$

$$y_1(n) = \hat{x}_{\text{dec}}(n)y(n), \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (9)$$

式中: $y_0(n)$ 表示分离出的“0”序列, $y_1(n)$ 表示分离出的“1”序列。

3) 利用分离出的“0”序列进行噪声方差 σ_w^2 估计。方法为:

$$\hat{\sigma}_w^2 = E[y_0(n) - E[y_0(n)]]^2 \quad (10)$$

该方法有效地实现了对噪声信号的实时准确估计。

3.3.2 MMSE 信道估计

MMSE 以估计误差平方的均值最小化为优化目标来对模型中的未知参数进行估计。MMSE 准则下,估计依据为:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{MMSE}} = \mathbf{W}\mathbf{y} \quad (11)$$

式中: \mathbf{W} 表示信道估计算子^[13]。此时,只要找到使估计均方误差最小的 \mathbf{W} 值,即可得到 MMSE 准则下满足估计性能最佳的估计参数。

MMSE 准则下对应的估计均方误差 (MSE) 为:

$$\text{MSE}_{\text{MMSE}} = E\{\|\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}_{\text{MMSE}}\|^2\} = E\{\|\mathbf{h} - \mathbf{W}\mathbf{y}\|^2\} \quad (12)$$

为了获得最小均方误差,对式(12)关于 \mathbf{W} 求导,并令其结果等于 0,即:

$$\frac{\partial \text{MSE}_{\text{MMSE}}}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial E\{(\mathbf{h} - \mathbf{W}\mathbf{y})(\mathbf{h} - \mathbf{W}\mathbf{y})^H\}}{\partial \mathbf{W}} = 0 \quad (13)$$

求解(13)式可得 MMSE 准则下的信道估计算子为:

$$\hat{\mathbf{W}} = \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H (\mathbf{X} \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H + \mathbf{R}_w)^{-1} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{R}_h = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$ 表示信道的协方差矩阵, $\mathbf{R}_w = E[\mathbf{w}\mathbf{w}^H]$ 表示噪声的协方差矩阵。将式(14)的结果代入(11)可得 MMSE 准则下满足均方误差最小的信道估计结果为:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{MMSE}} = \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H (\mathbf{X} \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H + \mathbf{R}_w)^{-1} \mathbf{y} \quad (15)$$

由式(15)可知,基于 MMSE 准则的信道估计需要信道的协方差矩阵和噪声的协方差矩阵。与基于 LS 准则的信道估计方法相比,该算法虽然计算复杂度较高,实现较为复杂,但该算法考虑了噪声对系统性能的影响,可获得更准确的参数估计。

4 仿真及性能分析

为了说明该信道估计方法的性能,利用仿真实验对其性能进行了分析。仿真中信号调制方式为 OOK 调制,信道为衰落信道,数据块长度选取 $N = 6\ 000$ 。所用信道系数矩阵为 $[0.722\ 1, 0.356\ 0, 0.174\ 9, 0.085\ 9, 0.048\ 7, 0.034\ 6, 0.027\ 9]$ 。该参数是在激光波长为 $3.8\ \mu\text{m}$, 沙尘能见度和传输距离分别为 $1\ \text{km}$ 、 $1.5\ \text{km}$ 条件下,利用沙尘天气下大气信道的脉冲响应按码元周期为 $5\ \text{ns}$ 对其抽样所得^[14]。

图3所示为 MMSE 准则下改变散射路径数 L 对估计 MSE 的影响。此时选取的训练序列长度为 15。图中,散射路径数 L 分别为 3、5 和 7。由图3可知,当散射路径数一定时,估计的 MSE 随信噪比(SNR)的增大而变小;当信噪比一定时,估计的 MSE 随散射路径数的减少而变小,说明此时估计出的参数较准确。

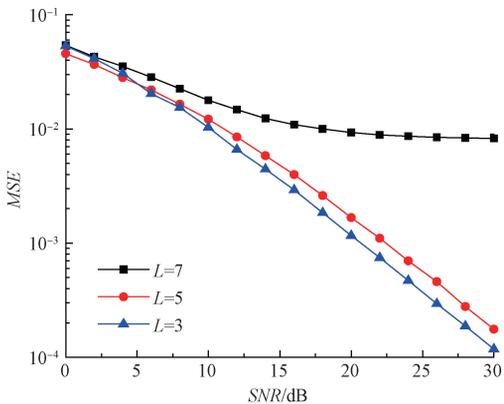


图3 MMSE 准则下散射路径数对估计均方误差影响
Fig.3 The influence of the number of scattering paths on the mean square error of the MMSE criterion

图4所示为 MMSE 准则下不同散射路径数对系统误码率(BER)的影响。此时选取的训练序列长度为 15。由图4可知,当散射路径数一定时,系统的 BER 随 SNR 的增大而减小;当 SNR 一定的情况下,散射路径数越少,系统 BER 性能越好。这是因为当散射路径数较少时,说明系统中存在的码间串扰较小的缘故。另外,值得注意的是,当散射路径数小于 5 时,估计 MSE 和系统 BER 随 SNR 的变化并不是十分明显,因此在实际系统的设计中应选取散射路径数不超过 5 个为宜。

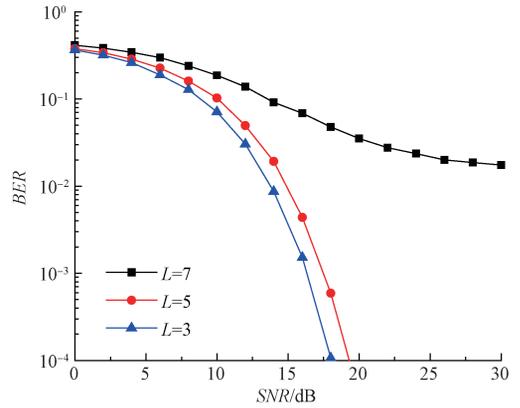


图4 MMSE 准则下散射路径数对系统误码率影响
Fig.4 The influence of the number of scattered paths on the system error rate under the MMSE criterion

图5所示为 MMSE 估计准则下训练序列长度 P 对估计 MSE 的影响。此时信道的散射路径数为 5。图中训练序列的长度 P 分别为 15、31、63、127。由图5可知,随着训练序列长度的增加,MMSE 准则下的估计 MSE 随 SNR 的增大而减小,并且逐渐趋近于线性比例关系;当 SNR 一定时,训练序列长度越长,对应的估计 MSE 越小,说明估计的结果越准确。

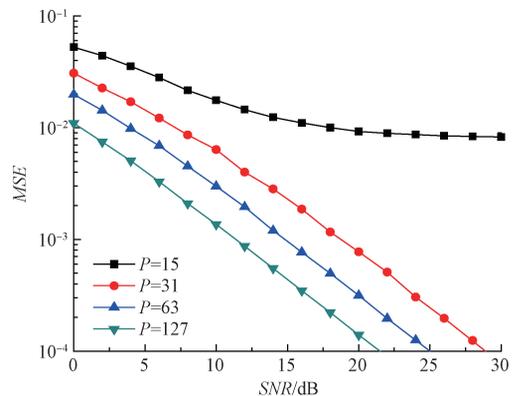


图5 MMSE 准则下训练序列长度对估计均方误差的影响
Fig.5 The effect of training sequence length on the estimation of mean square error in MMSE criterion

图6所示为MMSE估计准则下训练序列长度 P 对系统BER的影响。此时信道的散射路径数为5。由图6可知,SNR一定的情况下,采用的训练序列长度越长,系统的BER性能越好。但是当随着训练序列长度的增大,系统的频带利用率就会降低。另外,当 P 为63和127时,系统BER性能的改善不是特别明显,同时二者的MSE性能相差较小,因此,综合考虑系统性能后,建议在实际系统中训练序列的长度选用63为宜。

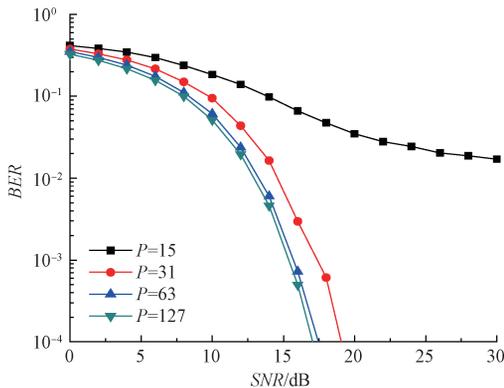


图6 MMSE准则下训练序列长度对系统误码率影响
Fig.6 The effect of training sequence length on system bit error rate under MMSE criterion

5 结论

针对IM/DD方式的大气激光通信系统,本文提出了一种基于单边训练序列的大气信道估计方案,采用理论分析和仿真相结合的方法,研究了该估计方案在LS、MMSE准则下的系统性能。针对MMSE准则下分别研究了散射路径数和训练序列长度对估计MSE和系统BER的影响。结果表明,当SNR不变时,信道的散射路径数越少、发送的 m 训练序列长度越长,估计MSE与系统的BER性能越好。但是,当训练序列长度越长时,意味着所占用的频带资源也就越多,导致有用信号的传输速率就会下降。因此,实际系统中必须综合考虑系统的各种性能后合理的确定训练序列的长度,针对沙尘天气下的大气信道选取序列长度为63的 m 序列比较合适。

参考文献

- [1] 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
JIANG H L. Space Laser Communication Technology and System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [2] 柯熙政,殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京:科学出版社,2009.

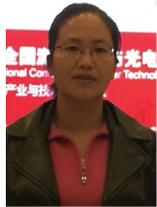
KE X ZH, YIN ZH Y. Encoding Theory in Wireless Optical Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2009.

- [3] CHIMELIS V. Extinction of CO₂ laser radiation by fog and rain [J]. Applied Optics, 1982, 21 (18): 3367-3372.
- [4] ARSLAN H, BOTTOMLEY G E. Channel estimation in narrowband wireless communication systems[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2001, 1 (2): 201-219.
- [5] OZDEMIR M K, ARSLAN H. Channel estimation for wireless OFDM systems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(2):18-48.
- [6] FIMOFF M, NERAYANURU S M, OZEN S, et al. Best linear unbiased channel estimation for frequency selective multipath channels with long delay spreads[P]. United States Patent 7203257, 2003.
- [7] WANG J B, JIAO Y, XIE X X. Complementary sequences based channel estimation for diffuse wireless optical communications[J]. Optical Engineering, 2011, 50(7): 075 003-075003-6.
- [8] WANG J B, JIAO Y, DANG X Y. Training sequence based channel estimation for indoor visible light communication system [J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(3):213-216.
- [9] WANG J B, JIAO Y, SONG X Y. Optimal training sequences for indoor wireless optical communications[J]. Journal of Optics, 2011, 14 (1): 15401-15405.
- [10] 朱耀麟,孟超,柯熙政. 大气激光通信下的OFDM导频信道估计方法[J]. 光通信研究, 2012(6):28-30.
ZHU Y L, MENG C, KE X ZH. An atmospheric laser communication under OFDM pilot channel estimation method[J]. Optical Communication, 2012 (6): 28-30.
- [11] CROZIER S N, FALCONER D D, MAHMOUD S A. Least sum of squared errors (LSSE) channel estimation [C]. IEEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1991, 138(4): 371-378.
- [12] 黄龙,冯国英,李洪儒,等. 室内可见光通信信道估计的研究[J]. 光电子技术,2014, 34(4):255-259.
HUANG L, FENG G Y, LI H R, et al. Study on the channel estimation of indoor visible light communication [J]. Photoelectron Technology, 2014, 34(4): 255-259.
- [13] LEE H N, POTTIE G J. Fast adaptive equalization/diversity combining for time-varying dispersive channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998,46 (9):1146-1162.
- [14] 王惠琴,王彦刚,曹明华,等. 沙尘天气下能见度对光

脉冲时延和展宽的影响[J]. 光学学报, 2015(7): 9-16.

WANG H Q, WANG Y G, CAO M H, et al. Effects of visibility on the time delay and broadening of optical pulses in dust weather [J]. Journal of Optics, 2015(7): 9-16.

作者简介



王惠琴 (通讯作者), 1972 年出生, 博士, 现为兰州理工大学计算与通信学院教授, 主要从事无线光通信理论与技术方面的研究工作。

E-mail: whq1222@lut.cn

Wang Huiqin (Corresponding author) was born in 1972, Ph. D., professor in Lanzhou University of Technology. The main research direction is wireless optical communication theory and technology.



胡秋, 1990 年出生, 现为兰州理工大学在读硕士研究生, 主要从事无线光通信信道估计技术方面的研究。

E-mail: 18293120849@139.com

Hu Qiu was born in 1990. And he is a M. Sc. candidate in Lanzhou University of Technology now. His main research interest includes channel estimation technology of wireless optical communication.