

基于重复编码的海上可见光通信大气信道建模

郑晓桐 郭立新 程明建 李江挺

Atmospheric channel model of maritime visible light communication based on repeated coding

Zheng Xiao-Tong Guo Li-Xin Cheng Ming-Jian Li Jiang-Ting

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 214206 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181112

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181112>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于布洛赫方程的多色信标回波光子数数值仿真

Simulations of return flux of polychromatic laser guide stars based on Bloch equations

物理学报.2018, 67(5): 054204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171940>

一个新的海边光学湍流外尺度和 C_n^2 的廓线模式

A new model for the profiles of optical turbulence outer scale and C_n^2 on the coast

物理学报.2018, 67(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171324>

基于波长 330 nm 激光激发多色激光导星回波光子数的数值计算与探讨

Numerical calculation and discussion on return photons of polychromatic laser guide stars by a laser beam with 330 nm wavelength

物理学报.2018, 67(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171025>

大气 SO_2 柱总量遥感反演算法比较分析及验证

Comparison and validation of band residual difference algorithm and principal component analysis algorithm for retrievals of atmospheric SO_2 columns from satellite observations

物理学报.2016, 65(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084204>

双孔差分闪烁法测量大气湍流的理论与实验研究

Theoretical and experimental study of atmospheric turbulence measurement using two-aperture differential scintillation method

物理学报.2016, 65(7): 074205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074205>

基于重复编码的海上可见光通信 大气信道建模*

郑晓桐¹⁾ 郭立新^{1)†} 程明建¹⁾²⁾ 李江挺¹⁾

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2018年6月7日收到; 2018年8月4日收到修改稿)

可见光通信作为一种新型无线通信技术, 在海上舰船场景中的应用吸引了广泛的关注. 海上可见光通信系统受多种因素的影响, 包括海浪随机起伏和大气湍流, 大气湍流将导致可见光信号的强度随机波动, 降低可见光通信系统在大气中的链路质量. 本文基于对数正态衰减分布, 建立了采用重复编码的海上可见光通信的链路评估模型. 在此基础上, 根据 Pierson-Moskowitz 海谱, 分析了海上风速、大气折射率结构常数、能见度、重复编码分集度以及接收器孔径对可见光通信系统平均误码率的影响. 本文提出的海上大气链路评估模型可为海上可见光通信网络的搭建提供重要参考.

关键词: 海上可见光通信, 重复编码, 大气湍流, 平均误码率

PACS: 42.68.-w, 42.72.Bj, 42.25.Bs, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.67.20181112

1 引言

随着海上交通的日益频繁, 舰船与舰船、舰船与海岸之间高质量、大容量通信问题愈发重要. 常规海上无线通信主要依靠卫星链路和水上射频频通信系统, 两者均存在高成本低速率等问题. 近年来, 可见光通信 (visible light communication, VLC) 技术作为一种新型无线通信方式引起人们的广泛关注, 该技术可以对灯塔可见光光源进行改造, 进而创建无线通信网络, 实现低成本高速率的通信^[1-6]. VLC 技术在 1999 年率先由香港大学的 Pang 等^[7] 提出在智能交通领域的应用. 经过近十几年的不断发展, VLC 在室内场景 (特别是室内定位) 的应用已经较为成熟, 但室外 VLC 的相关研究相对较少. Zhu 等^[8] 在 2008 年提出了一种基于发

光二极管信标的船舶海上无线通信系统. 2014 年以来, Kim 等^[9-11] 关于海上 VLC 技术开展了一系列的研究, 提出多输入多输出海上 VLC 系统和多跳中继 VLC 系统, 并在此基础上对不同海浪谱的仿真结果进行比较. Lin 等^[12] 进行了船岸激光信标跟踪实验, 验证了 PID 控制策略经调整后能够适用于船载平台激光通信链路的建立. 以上工作均未考虑大气湍流对海上 VLC 系统的影响. 在大气传输过程中可见光信号会受到明显的大气湍流效应影响, 强度发生随机波动, 影响海上 VLC 系统的链路性能. 因此, VLC 技术在海上船间、海岸灯语系统中的应用需要特别考虑大气湍流信道的影响.

另一方面, VLC 系统通常采用开关键控调制 (强度调制), 普通的编码方式抗深衰落性能较差. 通过采用重复编码发送交织码元实现时间分集,

* 陕西省重点产业创新链(群)资助项目(批准号: 2017ZDCXL-GY-06-02)、脉冲激光国家重点实验室开放基金(批准号: SKL2016KF05)、中央高校基本科研业务费(批准号: CJT150502)、西安电子科技大学研究生创新基金(批准号: 20108183448)和 华为公司创新研究计划(批准号: HO2017050001AG)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lxguo@xidian.edu.cn

可以使码字通过多条信道,降低由于单一信道出现深衰落而产生误码的可能性.在实际应用过程中,为了改善系统性能,通常利用增大发射功率等方法增大平均信噪比.然而,对于VLC系统而言,制作大功率高速率可见光发射机具有一定困难,过高的功率也会产生光污染甚至对肉眼产生伤害,采用重复编码方式可以克服这些困难.此外,重复编码的实现原理简单,在某些特殊情况下通信链路质量甚至优于复杂的正交时空编码等方案^[13].综上所述,采用重复编码方案的海上VLC系统大气信道建模具有重要的研究价值.

本文采用重复编码以实现时间分集,使用Pierson-Moskowitz (PM) 频谱模型进行海面仿真,建立了海上灯塔与舰船之间的VLC系统模型.在大气湍流条件下评估高斯光束在海洋环境中的通信性能,并推导出平均误码率闭合表达式,分析了

海浪起伏、重复编码分集度、大气折射率结构常数、能见度以及接收器孔径等因素对海上VLC系统链路性能的影响.

2 海上VLC系统和信道模型

本文提出一个服务于海岸灯语系统的开关键控VLC系统,在灯塔架设可见光信号发射器作为基站工作,舰船或海洋信标搭载接收器并通过VLC链路连接到地面网络.图1为该系统的几何模型,其中, D 为灯塔与舰船间水平距离, H 为灯塔超出海平面的高度, h_1 为舰船高度, h_2 为海浪起伏高度, θ 为天顶角.考虑到海浪的平稳性和各态历经性,使用修正PM海浪谱对海浪进行仿真^[14].在VLC中,发光二极管的闪烁同时用于通信和照明^[15],所以能够以非常低的成本增加通信覆盖区域.

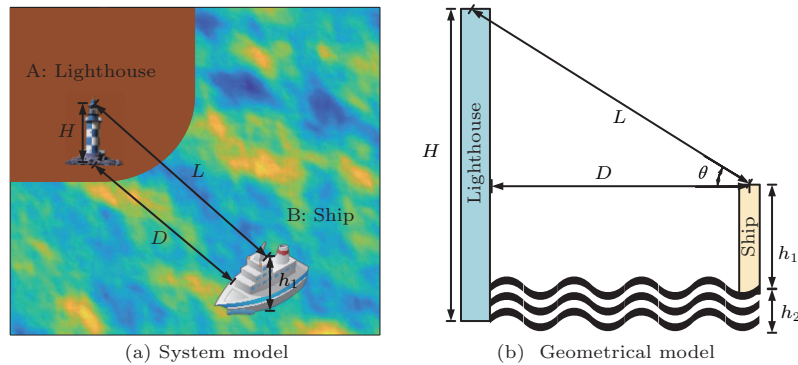


图1 海上VLC系统几何模型

Fig. 1. Geometric model of marine visible light communication system.

根据图1以及几何学知识,VLC海洋信道中信息传输路径距离 L 为

$$L = \sqrt{D^2 + (H - h_1 - h_2)^2}. \quad (1)$$

值得注意的是,由于海浪具有随机性,所以在模型中海面波高 h_2 的数值会在一定范围内波动,这导致即使舰船与灯塔间水平距离 D 恒定,信息传输路径也未必一致.这里, H 为灯塔超出海平面的高度, h_1 为舰船高度, θ 为天顶角.

该系统发射高斯光束进行通信,高斯光束可通过以下参数表征: Θ 和 Λ 是高斯波束在自由空间中的输出函数,和输入波参数之间满足关系: $\Theta = \Theta_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$, $\Lambda = \Lambda_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$.输入波参数 Θ_0 , Λ_0 与高斯波束曲率半径 F 和束腰宽度 w_0

有关,定义为: $\Theta_0 = 1 - L/F$, $\Lambda_0 = 2L/(kw_0^2)$, $\bar{\Theta} = 1 - \Theta$ 是补充参数,本文给定高斯波束曲率半径 $F = 1000$ m,束腰宽度 $w_0 = 0.01$ m.

不考虑背景光强,接收信号受到大气湍流以及加性噪声的影响建模为^[16]:

$$y = Ix + n, \quad (2)$$

式中, x 是发射的调制信号; y 是接收器的信号; $I = I_l I_a$ 是瞬时信号强度增益,其中 I_l 是路径损耗, I_a 是由大气湍流引起的衰减; n 是高斯白噪声.

受海水湿度等因素影响,海洋与陆地大气湍流有一定的差异^[17].且均显示出各向异性和non-Kolmogorov特性,弱海洋湍流大气中高斯波闪烁指数满足^[18]:

$$\begin{aligned} \sigma_I^2 = & 4\pi^2 k^2 L A(\alpha) C_n^2 \kappa_m^{2-a} \left\{ \Gamma\left(\frac{2-\alpha}{2}\right) \operatorname{Re} \left[{}_2F_1\left(\frac{2-\alpha}{2}, \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -\Lambda Q_m\right) \right. \right. \\ & - {}_2F_1\left(\frac{2-\alpha}{2}, 1; 2; -iQ_m + \frac{2}{3}(iQ_m \bar{\Theta} - \Lambda Q_m)\right) \left. \right] - 0.061 \Gamma\left(\frac{3-\alpha}{2}\right) \times \operatorname{Re} \left[{}_2F_1\left(\frac{3-\alpha}{2}, \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -\Lambda Q_m\right) \right. \\ & - {}_2F_1\left(\frac{3-\alpha}{2}, 1; 2; -iQ_m + \frac{2}{3}(iQ_m \bar{\Theta} - \Lambda Q_m)\right) \left. \right] + 2.836 \Gamma\left(\frac{10-3\alpha}{4}\right) \operatorname{Re} \left[{}_2F_1\left(\frac{10-3\alpha}{4}, \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -\Lambda Q_m\right) \right. \\ & \left. \left. - {}_2F_1\left(\frac{10-3\alpha}{4}, 1; 2; -iQ_m + \frac{2}{3}(iQ_m \bar{\Theta} - \Lambda Q_m)\right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, l_0 为湍流内尺度, C_n^2 是大气折射率结构常数(假定 C_n^2 沿着传播路径为定值), λ 是工作波长, $k = 2\pi/\lambda$ 是光波数, L 是信息传输的路径距离, $A(\alpha) = \Gamma(\alpha - 1) \cos(\alpha\pi/2)/(4\pi^2)$ 是关于 non-Kolmogorov 湍流指数 α 的连续函数, $\kappa_m = \{A(\alpha)\Gamma[(5-\alpha)/2]2\pi/3\}^{1/(\alpha-5)}/l_0$, $Q_m = \kappa_m^2 L/k$, $\Gamma(x)$ 表示 Gamma 函数, ${}_2F_1(x)$ 表示超几何函数.

利用 Beer-Lambert 定律来描述传输途中引起的路径损耗^[19],

$$I_l = \exp(-\beta_l L), \quad (4)$$

其中 β_l 代表衰减系数, 在波长满足 0.69—1.55 μm 范围内, 由海雾(平流雾)引起的大气衰减系数

$$\beta_l = 10 \lg \left(\frac{0.11478\lambda + 3.867}{V} \right) \text{ (dB/km)},$$

V 表示能见度.

大气湍流信道中的光强闪烁概率密度分布一般采用对数正态分布模型或 Gamma-Gamma 分布模型. 但当采用一个大孔径接收器时, 会存在明显的孔径平滑效应, 使得对数辐照度方差 $\sigma_{\ln I}^2 = A \ln(\sigma_I^2 + 1)$, A 是孔径等效参数表示为^[20]

$$\begin{aligned} A = & \frac{16}{\pi} \int_0^1 x \exp \left[-\frac{D_s^2 x^2}{\rho_T^2} \left(2 + \frac{\rho_T^2}{w_0^2 A_0^2} - \frac{\rho_T^2 \varphi^2}{w_\zeta^2} \right) \right] \\ & \times [\cos^{-1}(x) - x(1-x^2)^{1/2}] dx, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \rho_T = & \left[1.46 k^2 L \int_0^1 C_n^2 (1-\xi)^{5/3} d\xi \right]^{-3/5}, \\ \varphi = & \Theta_0/\Lambda_0 - \Lambda_0 w_0^2/\rho_T^2, \quad w_\zeta = w_0(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)^{1/2}, \end{aligned}$$

D_s 表示接收器孔径.

大气湍流引起的可见光信号强度随机起伏满足对数正态分布^[21]

$$f_{I_a}(I_a) = \frac{1}{I_a \sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(I_a) + 0.5\sigma_{\ln I}^2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right\}, \quad (6)$$

$I = I_l I_a$ 的概率密度函数可以表示为

$$\begin{aligned} f_I(I) &= \frac{1}{I_l} f_{I_a}(I/I_l) \\ &= \frac{1}{I \sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(I/I_l) + 0.5\sigma_{\ln I}^2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

在开关键控调制模式下, 考虑大气湍流影响的系统平均误码率 BER 可表示为^[22]

$$BER = \int_0^\infty f_I(I) Q(\sqrt{SNRI}) dI, \quad (8)$$

其中, $Q(x)$ 为 Gaussian- Q 函数, 其形式为

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta;$$

SNR 为平均信噪比, 本文使用重复编码方案^[23], 系统平均误码率 BER 应相应修正为

$$\begin{aligned} BER = & \int_0^\infty f_I(I) Q(\sqrt{SNRI}) \\ & \times \frac{1}{(L-1)!} \left(\frac{I}{I_l} \right)^{L_n-1} dI, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, L_n 为分集度, 也就是分集支路的数量, 分集度为 1 时退化为不含时间分集的平均误码率表达式. 令 $x = [\ln(I) + \sigma_{\ln I}^2/2]/(\sigma_{\ln I}^2)^{1/2}$, 使用 Gauss-Hermite 正交积分近似, 有

$$\int_0^\infty \exp(-x^2) f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n w_i f(x_i),$$

平均误码率可以被精确地近似为

$$\begin{aligned} BER = & \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\pi}} w_i \sum_{i=1}^n \exp \left\{ \frac{-SNR \exp[2(\sqrt{2}\sigma_{\ln I} x_i - \sigma_{\ln I}^2/2)]}{2 \sin^2 \theta} \right\} d\theta \\ & = \frac{I_l^{L_n-1}}{\pi(L-1)!} \sum_{i=1}^n Q[I_l \sqrt{SNR} \exp(\sqrt{2}\sigma_{\ln I} x_i - \sigma_{\ln I}^2/2)] \times \exp^{L_n-1}(\sqrt{2}\sigma_{\ln I} x_i - 0.5\sigma_{\ln I}), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, x_i 是 Hermite 多项式的根.

3 仿真计算与分析

为了分析自由空间通信系统的性能, 根据 (10) 式进行仿真分析. 如无特殊说明, 文中仿真参数设置如下: 高斯波波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\alpha = 3.3$, 平均信噪比取 20 dB, 接收器口径 $D_s = 0.02 \text{ m}$, 分集度 $L_n = 5$, 能见度 $V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{3-\alpha}$.

图 2 给出不同能见度和分集度情况下, 平均误码率与平均信噪比之间的函数关系曲线. 给定传输距离 $L = 1 \text{ km}$, 能见度 V 取 1, 2, 10 km, 分别代表轻雾、薄雾以及晴朗三种气候条件 [24]. 可以看出, 在不同能见度条件下, 平均误码率随着分集度 L_n 的增加而明显降低. 晴朗天气, 平均信噪比设为 20 dB 时, 海上 VLC 系统采用重复编码方式 ($L_n = 5$) 相比较普通编码方式 ($L_n = 1$), 平均误码率可以减低 32 dB. 由此可见, 重复编码方式可以极大提升海上 VLC 系统的链路性能. 即使在信噪比较低时也可以在一定程度上降低系统平均误码率. 当 $L_n = 1$ 时, 信道中的深衰落会使得多个码元甚至整个码字消失, 采用重复编码交织码元方案后, VLC 系统仍可从其余未衰落的码元中恢复出各码字. 当然重复编码方式也会降低通信系统的信息传输速率, 所以在实际应用过程中应注意平衡信息传输速率和误码率之间的关系. 比较图 2(a)—(c) 可以看出, 当海上 VLC 系统采用同样的编码方式时, 气象条件 (大气能见度) 对海上 VLC 系统影响也非常明显, 晴朗条件下系统可以在中高信噪比条件下进行有效通信, 但薄雾条件下即使平均信噪比达到 25 dB 平均误码率也达到 2.4×10^{-4} , 轻雾及更恶劣的气候条件下更加难以进行正常通信. 如何在恶劣气候条件下进行有效通信是今后搭建海上 VLC 网络中的一个重要研究课题.

大气折射率结构常数 C_n^2 被用来表征折射率起伏强度, 图 3 分析了大气湍流强度对海上 VLC 系统平均误码率的影响. 通信系统性能随着大气湍流强度的减小而提升. VLC 链路受大气湍流影响明显, 当大气湍流强度达到 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{3-\alpha}$ 时, 平均误码率 $BER < 1 \times 10^{-9}$ 的通信距离约为 540 m, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{3-\alpha}$ 时该距离提高到 890 m. 大气湍流强度明显影响海上 VLC 的链路质量, 增大接收器口径增强了孔径平滑效应, 减弱了大气湍流

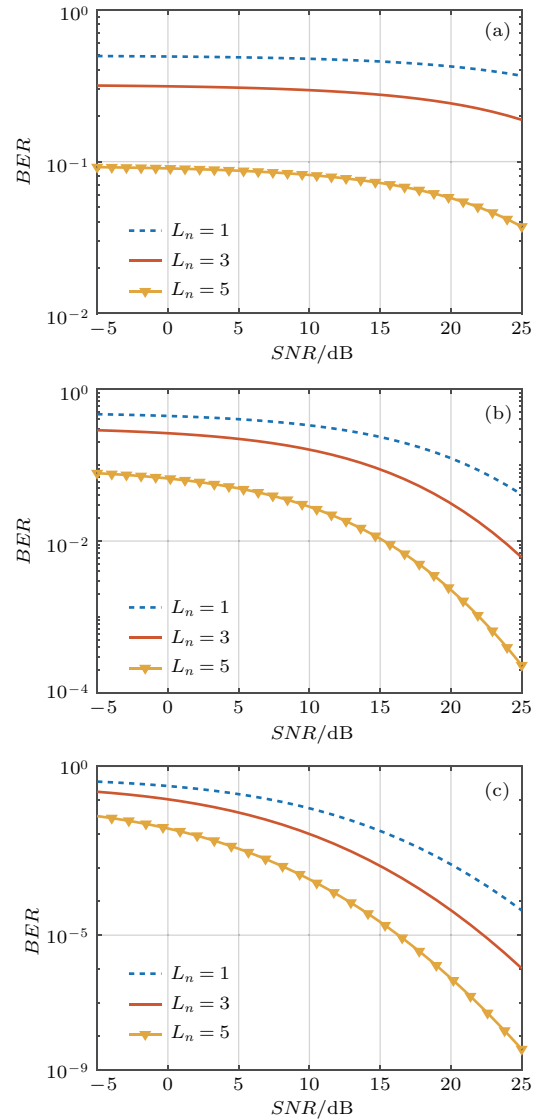


图 2 不同分集度时, 平均误码率随平均信噪比的变化 (a) $V = 1 \text{ km}$; (b) $V = 2 \text{ km}$; (c) $V = 10 \text{ km}$
 Fig. 2. Average BER versus the average SNR for various values of the numbers of diversity branches: (a) $V = 1 \text{ km}$; (b) $V = 2 \text{ km}$; (c) $V = 10 \text{ km}$.

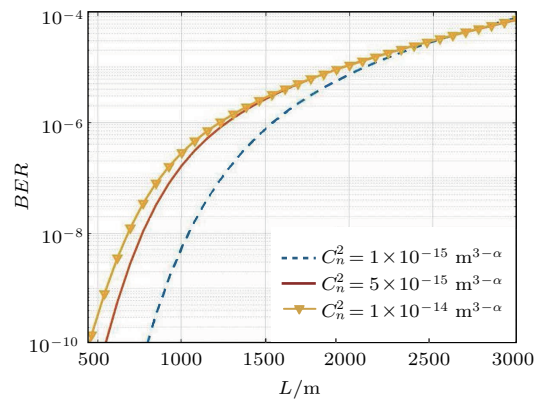


图 3 不同大气折射率结构常数时, 平均误码率随传输距离的变化
 Fig. 3. Average BER versus the transmission distance for various values of C_n^2 .

引起的信号衰落对VLC系统链路性能的影响. 在实际海上VLC系统搭建过程中可以改变接收器孔径以减弱大气湍流的影响, 后面对此进行了讨论.

图4讨论了接收器孔径对系统平均误码率的影响, 在弱湍流信道中, 当传输距离为1 km时, 接收机孔径从4 cm增加到6 cm时海上VLC系统误码率减少约10 dB. 当接收机孔径增加时, 孔径平滑效应增强, 大气湍流影响减弱, 海上VLC链路平均误码率明显降低.

利用修正PM海浪谱对恶劣海洋气候条件下的VLC系统性能进行仿真. 其中, 灯塔位于(0, 0)处, 平均信噪比取10 dB, 风与海面夹角为45°, $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{3-\alpha}$, 能见度 $V = 1 \text{ km}$, 灯塔

发射器高度 $H = 40 \text{ m}$, 舰船接收器高度 $h_1 = 5 \text{ m}$.

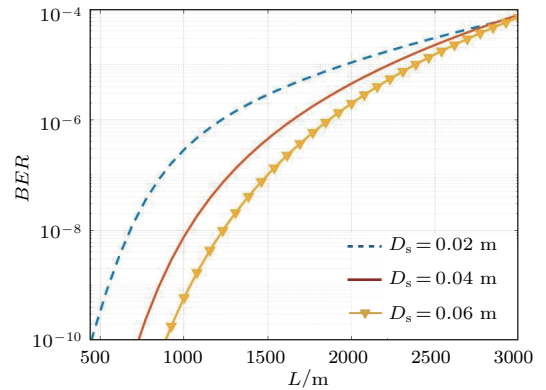


图4 不同接收器孔径时, 平均误码率随传输距离的变化
Fig. 4. Average BER versus the transmission distance for various values of the receiver aperture size.

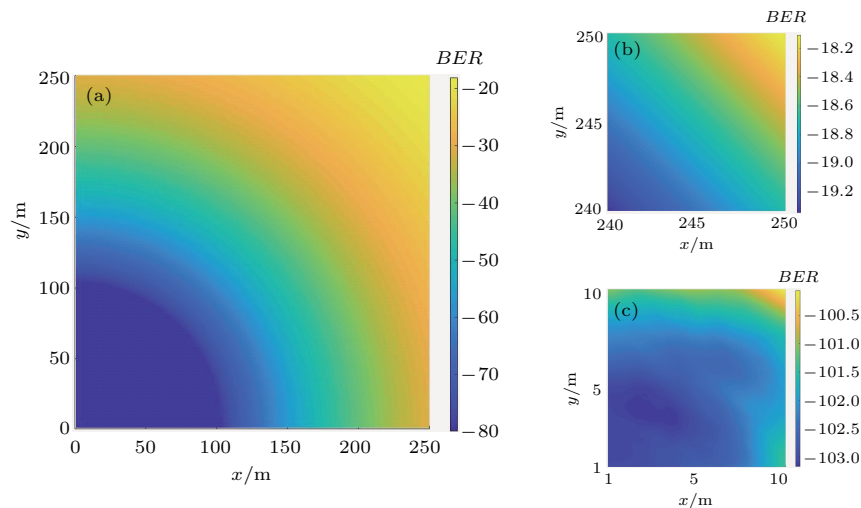


图5 风速9.26 m/s海浪起伏对平均误码率影响 (a) 0—250 m 范围; (b) 240—250 m 范围; (c) 1—10 m 范围
Fig. 5. Influence of average BER on wave fluctuation in 9.6 m/s wind speed: (a) 0–250 m range; (b) 240–250 m range; (c) 1–10 m range.

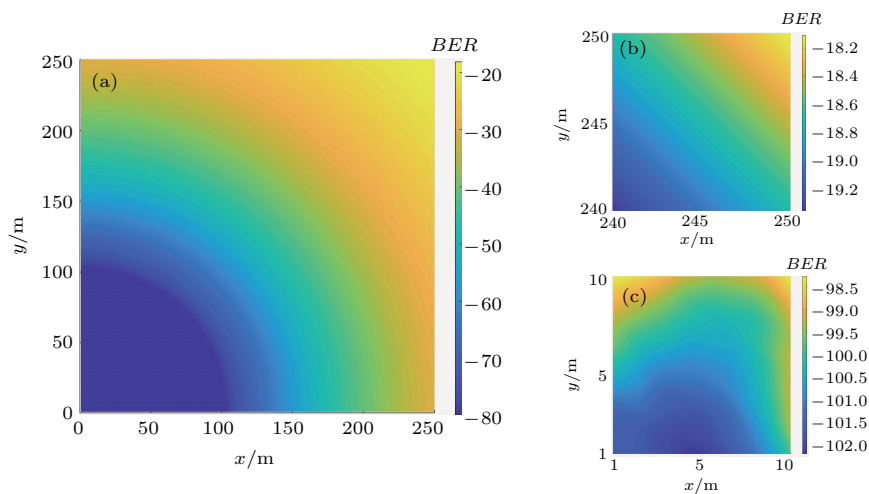


图6 风速22.5 m/s海浪起伏对平均误码率影响 (a) 0—250 m 范围; (b) 240—250 m 范围; (c) 1—10 m 范围
Fig. 6. Influence of average BER on wave fluctuation in 22.5 m/s wind speed: (a) 0–250 m range; (b) 240–250 m range; (c) 1–10 m range.

图5和图6分别描述风速为9.26和22.5 m/s时在250 m × 250 m范围内海上VLC系统平均误码率的变化规律,其中平均误码率单位为分贝.随着灯塔与舰船之间链路距离的增加,VLC系统的平均误码率整体呈增加的趋势.在图5(b)、图5(c)、图6(b)和图6(c)中,进一步分析VLC系统平均误码率在不同10 m × 10 m区域内的分布.在较近传输距离内,海上VLC系统平均误码率受海浪起伏影响明显,且平均误码率变化与海浪高度一样,均呈现随机性与复杂性,随着风速的增加,海面情况变得更加恶劣,平均误码率变化波动也更加剧烈.而在传输距离较远时,影响平均误码率的主要因素由浪高转变为水平传输距离,平均误码率整体呈平稳增加的趋势.在实际通信过程当中,舰船光通信接收器接收面积较小,而海浪起伏会由于风力增大和涌浪大量叠加而增加,造成舰船位移和倾斜,导致VLC系统性能进一步下降.

4 结 论

本文建立了采用重复编码方式的海上VLC系统的链路评估模型.重点分析了海浪起伏、分集度、接收器孔径大小、大气湍流强度及大气能见度等因素对海上VLC系统平均误码率的影响.结果表明,小范围内的灯塔-舰船之间通信链路性能受海浪起伏的影响较为明显,平均误码率变化与海浪一样均呈现随机性与复杂性.随着大气风速增加,海上环境变得更加恶劣,平均误码率波动也随之变强.大气湍流强度和能见度对系统性能影响较为明显,增大接收器孔径和重复编码方案在一定程度上均可以改善链路性能.本文结果可为实际海上VLC系统的设计以及性能估计提供一定参考.大气湍流与海浪起伏对海上VLC系统的共同影响较为复杂,相关研究大部分仍处在模型构建和理论推导阶段,对其进一步深入的仿真分析和实践并对不同方案进行比较,进而提出一套较为完整的解决方案是未来的研究重点,该研究方向将为海上VLC系统平台搭建和性能估计提供更具实用价值的参考.

参考文献

- [1] Mo Q Y, Zhao Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 072902 (in Chinese) [莫秋燕, 赵彦立 2015 物理学报 **60** 072902]
- [2] Jovicic A, Li J, Richardson T, Research Q 2013 *IEEE Commun. Mag.* **51** 26
- [3] Grobe L, Paraskevopoulos A, Hilt J, Schulz D, Lassak F, Hartlieb F, Kottke C, Jungnickel V, Langer K, Institute H H 2013 *IEEE Commun. Mag.* **51** 60
- [4] Chai S R, Guo L X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 060301 (in Chinese) [柴水荣, 郭立新 2015 物理学报 **64** 060301]
- [5] Ergul O, Dinc E, Akan O B 2015 *Phys. Commun.* **17** 72
- [6] Vetelino F S, Young C, Andrews L, Reclons J 2007 *Appl. Opt.* **46** 2099
- [7] Pang G, Kwan T, Chan C H, Liu H 1999 *IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems Proceedings* Tokyo, Japan, October 5–8, 1999 p788
- [8] Zhu N, Zhong Q, Zhu J 2008 *Optoelectronic Materials and Devices III* Hangzhou, China, October 26–30, 2008 p71350E-1
- [9] Kim H, Sewaiwar A, Chung Y H 2015 *J. Opt. Soc. Korea* **19** 514
- [10] Kim H, Chung Y H 2015 *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.* **19** 1773
- [11] Kim H J, Tiwari S V, Chung Y H 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 050607
- [12] Lin Y X, Ai Y, Shan X, Liu H Y 2014 *J. Optoelectron. Laser* **25** 478 (in Chinese) [林贻翔, 艾勇, 单欣, 刘宏阳 2014 光电子·激光 **25** 478]
- [13] Safari M, Uysal M 2008 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **7** 5441
- [14] Wang T Y, Zhuang S L 2009 *International Conference on Optical Instrumentation and Technology* Shanghai, China, October 19–22, 2009 p251
- [15] Sewaiwar A, Han P P, Tiwari S V, Chung Y H 2015 *J. Opt. Soc. Korea* **19** 74
- [16] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S 2012 *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB* (Florida: CRC Press) pp138–146
- [17] Grayshan K J, Vetelino F S, Young C Y 2008 *Waves Random Complex Medium* **18** 173
- [18] Cheng M J, Guo L X, Zhang Y X 2015 *Opt. Express* **23** 32606
- [19] Naboulsi M C A, Sizon H 2004 *Opt. Eng.* **43** 319
- [20] Li Y Q, Wu Z S, Zhang Y Y, Zhang H L 2012 *Adv. Mater. Res.* **571** 337
- [21] Gracheva M E, Gurvich A S 1965 *Soviet Radiophys.* **8** 717
- [22] Cheng M J, Zhang Y X, Gao J, Wang F, Zhao F 2014 *Appl. Opt.* **53** 4011
- [23] Tse D, Viswanath P 2005 *Fundamentals of Wireless Communication* (Cambridge: Cambridge University Press) p62
- [24] Li F 2013 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [李菲 2013 博士学位论文(合肥:中国科学技术大学)]

Atmospheric channel model of maritime visible light communication based on repeated coding*

Zheng Xiao-Tong¹⁾ Guo Li-Xin^{1)†} Cheng Ming-Jian¹⁾²⁾ Li Jiang-Ting¹⁾

1) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

(Received 7 June 2018; revised manuscript received 4 August 2018)

Abstract

Visible light communication (VLC) is a new type of wireless communication technology, and its applications in offshore ships and ship-shore lamp signal systems are drawing increasing attention as a supplement of communication net. In maritime environment, VLC system is affected by many factors, of which the wave fluctuation and atmospheric turbulence are the most noticeable. The turbulence will make signal intensity fluctuate randomly, and thus reducing the performance of VLC system operating in the atmosphere. To establish an effective VLC network in the actual marine environment, an effective channel transmission model needs to be established and used to study the performance of the maritime VLC link. Considering large aperture diameter receiver with the aperture averaging effect, log-normal distribution model is employed to deduce the mathematical expression of average bit error rate of maritime VLC system in atmospheric turbulence.

By using time-diversity to transmit interleaved symbols with repeated coding in a maritime VLC system, it is possible to ensure that the code-word passes through multiple channels to resist the deep fade performance, and to reduce the bit error rate due to the occurrence of deep fading in a single channel. In the actual application process, in order to improve the system performance, the average signal-to-noise ratio usually increases with the transmission power increasing, but for a VLC system, there are some difficulties in making the high-power high-rate visible light transmitters. And the power will produce light pollution and even damage the naked eye. The implementation of the repetitive coding principle is simple, and in some special cases it is even better than the complex orthogonal space-time coding and other schemes, so studying the system performance of the repetitive coding scheme is of considerable value for practical application.

Based on the modified Pierson-Moskowitz spectrum, the effect of wave height, transmission distance, atmospheric turbulence intensity, receiver aperture size and visibility on the average bit error rate of VLC system are analyzed. The performance of the VLC system between lighthouse and ship is affected by the fluctuations of the sea waves, and the average bit error rate changes with randomness and complexity like the sea waves in a short distance. As the wind speed increases, the marine environment becomes worse and the average bit error rate is undulate. The average bit error rate of maritime VLC increases with the increasing of transmission distance and atmospheric turbulence intensity, and with the decreasing of receiver aperture size, wavelength and average signal-to-noise ratio. Atmospheric turbulence intensity and visibility have a significant effect on the system performance, and it should be emphatically considered to take measures to reduce the influence. Increasing receiver aperture and repetitive coding are effective to a certain extent. In the present work a new model is proposed for evaluating the performance of a maritime VLC system and providing reference for practical application.

Keywords: maritime visible light communication, repeated coding, atmospheric turbulence, average bit error rate

PACS: 42.68.-w, 42.72.Bj, 42.25.Bs, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.67.20181112

* Project supported by the Key Industrial Innovation Chain Project in Industrial Domain of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017ZDCXL-GY-06-02), the Open Research Fund of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, China (Grant No. SKL2016KF05), the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. CJT150502), the Innovation Fund of Xidian University, China (Grant No. 20108183448), and the Huawei Innovation Research Program, China (Grant No. HO2017050001AG).

† Corresponding author. E-mail: lxguo@xidian.edu.cn