

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.07.011

海上大气信道可见光通信波长选择

张旭^{1,2}, 刘宏波¹, 陈柯威¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430030; 2. 91150 部队, 上海 200940)

摘要: 针对海上可见光通信波长选择的问题, 分析了影响海上可见光通信的背景光模型和大气湍流信道模型, 分别得出了两者对可见光通信质量产生影响的关键因子。根据背景光模型公式与 Gamma-Gamma 大气湍流模型公式, 计算推导出在强光背景和大气湍流同时影响下的可见光通信误码率。对 3 种条件下可见光通信系统进行了仿真, 得出了在不同通信距离、折射率结构参数、视场角条件下, 光源波长与误码率的相关关系。该关系的明确, 为海上可见光通信光源波长选择提供了理论依据。

关键词: 大气信道; Gamma-Gamma 分布; 强光背景; 折射率结构参数

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)07-107-06

Wavelength selection of visible light communication in atmospheric channel at sea

ZHANG Xu^{1,2}, LIU Hongbo¹, CHEN Kewei¹

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430030, P. R. China;

2. Navy 91150, Shanghai 200940, P. R. China)

Abstract: In order to address the issue of wavelength selection in offshore visible light communication, this study analyzed the background light model and atmospheric turbulence channel model that impacted marine visible light communication. The key factors that influenced the quality of visible light communication were identified. Simulations of the visible light communication system under three different conditions were also conducted. These simulations provided insights into the correlation between the light source wavelength and the bit error rate. Specifically, the correlation was examined under varying communication distances, refractive index structure parameters, and field angles. The obtained results serve as a foundation for selecting the appropriate light source wavelength in offshore visible light communication.

Keywords: atmospheric channel; Gamma-Gamma distribution; strong light background; refractive index structure parameter

可见光通信 (visible light communication, VLC) 以 LED 为信号源, 将照明与通信相结合, 不受日益紧张的频谱资源制约, 具有绿色、安全、高效、节能的特点^[1], 是光通信领域研究的热点之一。可见光通信可分为室内 VLC 和室外 VLC^[2]。室内 VLC 发展速度较快, 主要应用于宽带接入、智慧家居等领域, 目前已经达到了 10 Gbps 以上的

收稿日期: 2020-07-11

作者简介: 张旭 (1985—), 男, 硕士研究生, 高级讲师, 主要从事通信及信息技术应用方向研究。

通信作者: 刘宏波, 男, 副教授, (E-mail) wuhanliuliu@126.com。

传输速率。室外VLC技术发展相对缓慢,主要应用于智慧交通领域,由于室外环境复杂,容易受到大气和背景光噪声的影响,目前通信速率仍然不是很高,但是在应对海上复杂电磁环境通信方面前景广阔。当前,室外可见光的研究集中在调制编码和信道研究的领域,对光源选择的研究不多,笔者根据近海光线和大气特点,在综合考虑强背景光和大气湍流的前提下,采用了黑体辐射模型和Gamma-Gamma模型,简化了模型参数的选取。利用Matlab对信道模型进行了仿真,通过定量对比不同距离上波长对通信性能的影响,获得了光源波长与通信性能的关系,首次为VLC光源波长的选择提供了理论依据。

1 信道模型的建立

1.1 背景光噪声模型

背景光噪声一般是由太阳、月亮、行星以及地表释放或者反射的热量产生的,它是影响可见光通信灵敏度的重要因素之一。背景光噪声采用黑体辐射模型描述,任何在绝对零度以上的物体均被认为是黑体辐射源,其辐射功率与辐射源的波长相关,其辐射谱函数公式为

$$\omega(\lambda) = \frac{c^2 h}{\lambda^2} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中: c 为光速大小, $c = 299\,792.458\text{ km/s}$; h 为普朗克常数, $h = 6.626\,069\,57 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.380\,648\,8 \times 10^{-23}\text{ J/K}$; T 为辐射源的开氏温度,太阳表面的开氏温度大约为6000 K。

由于月球等天体的辐射强度远小于太阳和地面物体,所以在计算时仅考虑太阳和地面物体。同时,在船舶可见光通信时,一般会尽量避开太阳直射的情况,所以这里仅考虑地面反射的噪声,也就是扩展光源的功率^[3]。其计算公式如下

$$P_{\text{bg}} = \omega(\lambda) \times A \times \Delta\lambda \times 2\pi [1 - \cos(\theta/2)] \times T_r, \quad (2)$$

式中: $\omega(\lambda)$ 为辐射谱函数; A 为光学接收天线的孔径面积($A = 1/4\pi D^2$, D 为光学天线孔径); $\Delta\lambda$ 为滤波器的带宽; θ 为接收天线视场角; T_r 为大气透过率。因此,式(2)即为特定波长下背景噪声的功率值。

1.2 大气湍流信道模型

光在大气中传播时会受到大气的散射、扰动的影响,其中对其影响最大的是大气湍流。大气湍流是由于地球表面冷暖空气交互动引起的紊乱现象。大气湍流中有大小2种尺度的漩涡,当光通过大气湍流时由于漩涡的作用,光照强度和相位会产生随机变化,相当于对光进行了一次调制。因此,大气湍流对可见光通信的影响是不容忽视的。

目前,主流的几种描述大气湍流的特征的概率密度分布函数有对数正态分布、Gamma-Gamma分布、 K 分布等等,其中使用最广泛的是Gamma-Gamma模型。该模型能够较好的模拟弱湍流和中强湍流的分布情况^[4],在这一模型下光照强度的概率分布公式为

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\alpha+\beta/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}-1\right)} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta I}\right), \quad (3)$$

式中: I 为光照强度; $\Gamma(\cdot)$ 表示Gamma函数; α 和 β 分别表示大小2种尺度的漩涡所引起的光强变化与光强闪烁指数 σ_I 之间的关系。 $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 代表 $\alpha-\beta$ 阶第二类修正贝塞尔函数。

可见光通信一般距离较近,为简便计算只考虑球面波的分布情况,在忽略湍流尺度影响时有

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1+1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (5)$$

式中: σ_I^2 是Rytov方差, $\sigma_I^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L_c^{11/6}$; C_n^2 为折射率结构参数; k 为一个周期内的波数($k = 2\pi/\lambda$); L_c 为通信距离。由以上公式可以看出,Gamma-Gamma模型求解的关键在于确定折射率结构参数 C_n^2 。

1.3 折射结构参数

折射率结构参数 C_n^2 用于描述 Gamma-Gamma 模型时,一般情况下认为,该参数与海拔高度相关,其计算公式如下,

$$C_n^2(z) = \begin{cases} 2.72 \times 10^{-16} [3 \langle v \rangle^2 (z/10) \exp(-z) + \exp(-z/1.5)] & z > 3, \\ 1.5 \times 10^{-13}/z & z \leq 5, \end{cases} \quad (6)$$

式中: z 为海拔高度; $\langle v \rangle$ 为风速的系综平均。

海上大气信道还会受到温度和湿度的影响,因此,折射率结构参数应由温度 T 、比湿 Q 、以及两者的结构参量 C_T^2 、 C_Q^2 以及两者的交叉结构参量 C_{TQ} 表示^[5,6]

$$C_n^2 = \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^2 C_T^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial Q}\right)^2 C_Q^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) \left(\frac{\partial n}{\partial Q}\right) C_{TQ} \quad (7)$$

温度和比湿的相关结构参数又由近地层温度特征尺度 t_* 、湿度特征尺度 q_* 、海拔高度 z 、莫宁-奥布霍夫常数 L 、温度与湿度谱相关系数 r_{TQ} 确定^[7]。

$$\begin{cases} C_T^2 = t_*^2 z^{-2/3} f(\zeta), \\ C_Q^2 = q_*^2 z^{-2/3} f(\zeta), \\ C_{TQ} = r_{TQ} t_* q_* z^{-2/3} A^{1/2} f(\zeta), \\ \zeta = z/L, \end{cases} \quad (8)$$

式中,标量 $A=0.6$ 。式(8)(9)可以使用 Bulk 法^[8]求得 C_n^2 的数值,从而确定大气湍流信道模型。

1.4 强背景光与大气湍流影响下的误码率

假设可见光通信系统采用 OOK 调制,假设发送信号“1”时,发信机发射的光强为 I_0 (即为发信功率);发送信号“0”时,发信机不发光,判决门限 $b^* = \frac{1}{2} I_0$ 。收信机接收信号表达式为

$$i(t) = I_0 \sum_m g(t - mT_s) + n_0, \quad (9)$$

式中: n_0 为均值为0;方差为 σ^2 的高斯白噪声。

在没有背景光噪音和大气湍流的情况下,其误码率为

$$P_c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\operatorname{SNR}} \right), \quad (10)$$

式中, $\operatorname{SNR} = I_0/\sigma^2$ 。当存在背景光噪声干扰时,实际上是降低了信噪比,此时

$$\operatorname{SNR}_{\text{bg}} = \frac{I_0}{P_{\text{bg}} + \sigma^2} \quad (11)$$

在大气湍流干扰情况下,通信系统的误码率公式为

$$P_{c-\text{urb}} = \int_0^\infty P_c f(I) dI = \int_0^\infty \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\operatorname{SNR}_{\text{bg}}} \right) \frac{2(\alpha\beta)^{\alpha+\beta/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}-1\right)} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} I \right) dI, \quad (12)$$

为简化计算,根据 Meijer-G 公式可以将式(12)简化为^[9]

$$P_c = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \left[\left(\frac{2}{\alpha\beta} \right)^2 \operatorname{SNR}_{\text{bg}} \left| \begin{matrix} \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (13)$$

2 仿真模拟及数据分析

2.1 参数选定

由于所关心的内容为光源波长与系统误码率以及通信距离之间的关系,因此,首先需要确定波长和通信距离的范围。

可见光波长 λ 的范围为: $380\text{ nm} \leq \lambda \leq 780\text{ nm}$ 。

由于可见光通信为视距通信(如图1所示),船舶灯光通信器材高度均为 h (假设 $h=30\text{ m}$),大气折射率的等效地球半径因子为 k (工程上一般取 $k=4/3$),两船间的最大通信距离为 L_{\max} ,根据通信距离的经验公式为^[10]:

$$L_c \leq L_{\max} = 3.57 \times \sqrt{k} \times 2\sqrt{h} = 45.2\text{ km}。 \quad (14)$$

一般情况下,按照实际应用需求,可见光通信距离都限制在10 km以内。

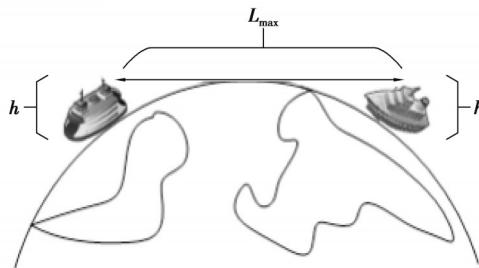


图1 最长视距 L_{\max}
Fig. 1 The longest line of sight L_{\max}

另外,设可见光的发射功率 $I_0=80\text{ W}$,接收天线孔径 $D=0.3\text{ m}$,滤波器带宽 $\Delta\lambda=150\text{ MHz}$,视场角的范围为: $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/9$,大气透过率 $T_r=0.5$,折射率结构参量采用文献[11]中的测量结果: $10^{-16}\text{ m}^{-2/3} \leq C_n^2 \leq 10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$ 。

2.2 仿真结果及分析

根据闭合表达式(12),从3个维度对通信光源波长 λ 与误码率(BER)的关系进行了考察。首先是在不同通信距离下可见光波长与误码率的关系,分别取通信距离为1 000、3 000、5 000 m,折射结构参数 $C_n^2 = 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$,视场角 $\theta=\pi/9$ 。图2表明,在1 000 m左右的通信距离上,误码率与波长成负相关,即误码率会随着波长的增加而减小。当通信距离增大后,这一规律发生急剧变化,误码率与波长的关系变成正相关,但波长对误码率的影响较小。

由于大气湍流对通信性能影响较大,所以通过调整影响大气湍流的关键因子——折射率结构参数来观察波长与误码率的关系,同时对通信距离进行了调整,做了一组对比。通过图3可以观察到,在湍流影响较

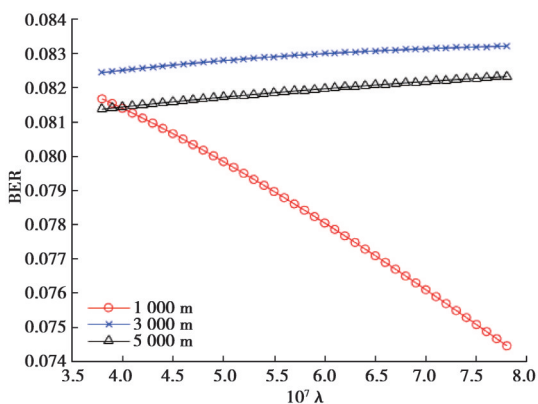


图2 不同通信距离下误码率与波长的关系

Fig. 2 Relationship between λ and BER at different distance

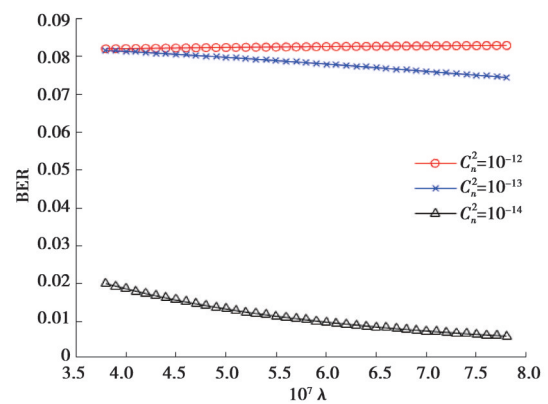


图3 不同湍流影响下误码率与波长的关系(1 000 m)

Fig. 3 Relationship between λ and BER

大时误码率普遍较高,湍流影响较小时误码率较低,并且在小湍流影响下,波长与误码率成负相关关系,但波长对误码率影响不大。对比图4可以看出,当通信距离拉大后,波长对误码率影响逐渐加强,同时在湍流较小时误码率与波长呈显著的负相关。

最后,选取不同的视场角,观察误码率与波长的关系,由于视场角一定程度上决定了背景光噪声对系统的影响,即调整视场角实际上就是对系统的信噪比进行了调整。图5表明,在视场角较大时,由于背景光噪声的提升降低了系统信噪比,使得误码率整体提升。同时,波长与误码率成凸函数关系,为两边低中间高的走势,在波长较小和较大时均可以达到较低的误码率。

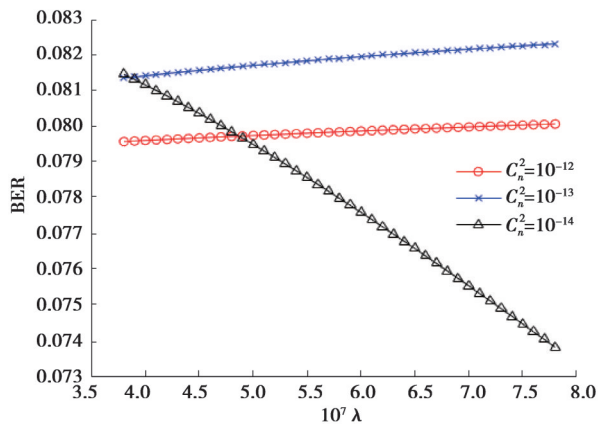


图4 不同湍流影响下误码率与波长的关系(5 000 m)

Fig. 4 Relationship between λ and BER

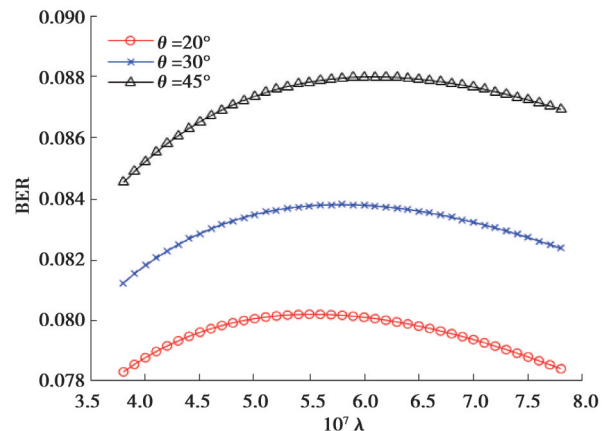


图5 不同湍流影响下误码率与波长的关系(5 000 m)

Fig. 5 Relationship between λ and BER at different field of view

综上所述,大气湍流对系统影响较大时,波长对误码率的影响可以忽略不计。但在中低强度的湍流中,波长对误码率影响较大,总体趋势是随着波长的增大误码率逐渐降低,同时这种趋势随着通信距离的增加而越发显著。

3 结 论

通过研究背景光噪声模型和大气湍流模型,确定了两者可对可见光通信系统的影响要素,并通过简化的闭合表达式,对3种情况波长与误码率的关系进行了模拟仿真,得出了可见光通信过程中波长与误码率关系的大致趋势,首次为海上可见光通信光源选择问题,提供了理论支持。但是,在工程应用中,可见光通信的光源选择还需要考虑光波的透雾能力,人眼的安全性和敏感度,以及LED光源的发光效率等多项因素,因此,可见光波长选择还需要结合以上多个方面综合考量,以信道模型为基础通过仿真获得的结论,可为下一步研究提供理论借鉴。

参考文献

- [1] Shin H S, Park S B, Lee K, et al. Investigation of visible light communication transceiver performance for short-range wireless data interfaces[C]// The Seventh International Conference on Networking and Services. ICNS, 2011.
- [2] 刘宏展,吕晓旭,王发强,等.白光LED照明的可见光通信的现状与发展[J].光通信技术,2009,33(7):53-56.
Liu H Z, Lv X X, Wang F Q, et al. The Current situation and development trend of indoor visible light communication by white LED illumination[J]. Optical Communication Technology, 2009, 33(7): 53-56.(in Chinese)
- [3] 秦岭,郝雅楠,杜永兴,等.强背景光下LED交通灯的可见光通信误码率分析[J].电子测量与仪器学报,2017,31(5):676-681.
Qin L, Hao Y N, Du Y X, et al. Research on visible light communication's BER of LED traffic light under strong background noise[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 676-681.(in Chinese)
- [4] Tranter W H, Taylor D P, Ziemer R E, et al. Near optimum error correcting coding and decoding: turbocodes[M]// The Best of

the Best: Fifty Years of Communications and Networking Research. Wiley-IEEE Press, 2007: 45-55.

- [5] 戴福山, 李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 191-196.
Dai F S, Li Y K. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 191-196.(in Chinese)
- [6] 李云波, 黄小毛, 余军浩, 等. 近海面大气光学湍流计算模型的比较与改进[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 31-36.
Li Y B, Huang X M, Yu J H, et al. Comparison and improvement of the atmospheric optical turbulence model in near sea surface[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 31-36.(in Chinese)
- [7] Davidson K L, Schacher G E, Fairall C W, et al. Verification of the bulk method for calculating overwater optical turbulence[J]. Applied Optics, 1981, 20(17): 2919-2924.
- [8] Frederickson P A, Davidson K L, Zeisse C R, et al. Estimating the refractive index structure parameter (σ_n^2) over the ocean using bulk methods[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(10): 1770-1783.
- [9] 韩立强. 大气湍流下空间光通信的性能及补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Han L Q. Research on performance and compensation method of space optical communication under atmospheric turbulence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [10] 李鑫, 张兴周, 吕科, 等. 舰船激光通信中大气湍流对信道的影响[J]. 应用科技, 2008(4): 14-17.
Li X, Zhang X Z, Lyu K, et al. The effect of turbulence on the channel in the laser communication between the ships[J]. Applied Science and Technology, 2008(4): 14-17. (in Chinese)
- [11] 陈栋, 李红刚, 倪志波, 等. 海洋大气湍流对激光通信系统性能的影响分析[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(3): 178.
Chen D, Li G G, Ni Z B, et al. Research on the influence of marine atmospheric turbulence to the performance of laser communication system[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(3): 178.

(编辑 郑洁)