

激光与光电子学进展

基于多层非对称剪裁光正交频分复用的水下光无线通信系统

刘龙, 周骥*, 王海德, 熊灿阳, 黄红斌, 刘伟平

暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632

摘要 为了提高水下光无线通信(UOWC)的频谱效率和功率效率,提出了一种基于多层非对称剪裁光正交频分复用(Layered-ACO-OFDM)的UOWC系统。该系统通过对子载波分层调制的方法,充分利用了传统非对称剪裁光正交频分复用(ACO-OFDM)中损失的频谱资源,极大地提高了光无线通信系统的频谱效率。此外,Layered-ACO-OFDM系统不需要加入直流偏置,故功率效率也得到了大大提升。考虑了可见光在海水中传输过程中的吸收和散射效应,建立了基于蒙特卡罗方法的UOWC信道模型,并较为全面地研究了海水中不同叶绿素浓度和不同接收机参数下的信道响应。结果表明,与传统ACO-OFDM相比,基于Layered-ACO-OFDM的UOWC系统具有频谱效率高的优势。同时,当信噪比为27 dB时,在清澈海水中其可以实现10 m距离下1 Gb/s的高速率通信。

关键词 光通信; 多层非对称剪裁光正交频分复用系统; 频谱效率; 蒙特卡罗仿真; 信道特征; 水下光无线通信

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2106005

Layered Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based Underwater Optical-Wireless Communication System

Liu Long, Zhou Ji*, Wang Haide, Xiong Canyang, Huang Hongbin, Liu Weiping

College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract In order to improve the spectral efficiency and power efficiency for underwater optical-wireless communication (UOWC), a UOWC system based on layered asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (Layered-ACO-OFDM) is proposed. The system makes full use of the spectrum resources lost in traditional asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) by the means of layered modulation of subcarriers, which greatly improves the spectrum efficiency for optical wireless communication system. Moreover, since the Layered-ACO-OFDM system does not need to add direct current bias, the power efficiency is also greatly improved. A UOWC channel model based on Monte Carlo method is established considering the absorption and scattering effects of visible light transmission in seawater, and the channel response under different chlorophyll concentrations and different receiver parameters is studied comprehensively. The results show that the UOWC system based on Layered-ACO-OFDM has the advantage of high spectrum efficiency compared with the traditional ACO-OFDM. When the signal-to-noise ratio is 27 dB, it can achieve high-speed communication of 1 Gb/s at a distance of 10 m in clean seawater.

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-04; 录用日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62005102,61875076)、广东省自然科学基金资助项目(2019A1515011059)、中央高校基本科研业务费资助项目(21619309)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放课题(IPOC2019A001)

通信作者: *zhouji@jnu.edu.cn

Key words optical communications; Layered-ACO-OFDM system; spectral efficiency; Monte Carlo simulation; channel characteristics; underwater optical-wireless communication

OCIS codes 060.4510; 010.7340

1 引言

21 世纪被誉为海洋经济的新纪元,随着人类水下活动的增加,海洋监测系统和通信设备也日趋完善,从早期的浮标、船舶,到近些年来自主式水下航行器(AUV)^[1]。AUV 之间在进行水下通信时,需要交换大量数据^[2-3],特别是在交换高分辨率图像和视频时,需要高比特率的传输^[4]。基于可见光传输的水下光无线通信(UOWC)^[5-7]具有宽带宽、低时延、高安全性和强灵活性的特点,它能够提供很高的信息传输速率。光系统的频谱效率和功率效率是影响信息传输速率的重要因素。当今的数据量在飞速提升,在水下有限的带宽内充分利用频谱资源是满足大容量高速率数据传输的关键因素。与此同时,在水下环境中通信设备功率大小是受限的,在保证通信质量前提下需要尽量降低功率损耗,这对提高功率效率十分重要。另外,海水中复杂的环境与实验室中理想条件不同,光的散射、接收机参数的选择均会对水下光通信产生影响,因此对 UOWC 信道的研究也非常重要。

Bai 等^[8]利用直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)^[9]系统进行 UOWC,提出了一种时频域交织方案,通过降低峰值平均功率比的方式,改善了误码率(BER, A_{BER})性能。然而,在使用 DCO-OFDM 系统时需要为信号添加直流偏置,进而导致功率效率降低。此外,该方案的 UOWC 信道中采用的是指数衰减模型,未考虑水对光的散射作用和接收机视场角(FOV)的影响。Elamassie 等^[10]提出了比特分配自适应算法,虽然实现了水下系统信息容量的提升,但是所用的 DCO-OFDM 系统的功率效率仍有待提升。为了解决光通信系统功率效率低的问题,Disnayake 等^[11-12]提出了非对称剪裁光正交频分复用(ACO-OFDM)系统。但是,ACO-OFDM 只利用了一半子载波调制信号,进而大大降低了光系统的频谱效率。Hessien 等^[13]将 ACO-OFDM 系统应用于水下光通信,利用正交振幅调制(QAM)的方式在 1 m 距离范围内实现了 15.36 Mb/s 的传输速率。Tokgoz 等^[14]设计了全面自适应的 ACO-OFDM 水下实验系统,可以通过改变采样率和调制方法的方

式对系统性能进行测试,在 6.5 m 距离范围内传输速率可达 10 Mb/s。在文献[13-14]的方案中,基于 ACO-OFDM 的调制方法频谱效率最高只有 $1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。因此,如果需要进一步提高速率,就需要提升频谱效率。同时,水下环境被限制在实验室的理想条件下,未考虑海水中复杂环境的影响。Wang 等^[15]在光无线通信领域中提出了多层非对称剪裁光正交频分复用(Layered-ACO-OFDM)的概念,并阐明了设计原理,这种调制格式能够提高 ACO-OFDM 的频谱利用率。此外,文献[15]分析了层数对系统频谱效率的影响,并通过仿真将背靠背条件下 Layered-ACO-OFDM 与 ACO-OFDM 的性能进行对比,发现在相同频谱效率下 Layered-ACO-OFDM 可以获得更大的信噪比增益。

本文针对水下可见光通信带宽受限以及传统 ACO-OFDM 频谱效率低的问题,提出了一种基于 Layered-ACO-OFDM 的 UOWC 系统。文献[15]从理论上对不同电信噪比和光信噪比条件下的 Layered-ACO-OFDM 系统进行了研究,验证了多层系统具有频谱效率高的优势,但没有将其应用于现实场景中,故不涉及对信道的研究。本文通过建立水下信道,对 Layered-ACO-OFDM 在不同海洋环境下的系统性能进行了测试,首先,对 Layered-ACO-OFDM 系统收发机设计原理进行了分析。然后,建立了基于蒙特卡罗方法的 UOWC 信道模型,并对海水中不同叶绿素浓度(质量分数,下同)和接收机参数下的信道响应做了较为全面地研究。最后,对 Layered-ACO-OFDM 水下系统在不同条件下的 BER 性能进行了模拟。在清澈海水中 10 m 距离下,该系统可实现了 1 Gb/s 的高速率通信。通过仿真对比发现,相同频谱效率下 Layered-ACO-OFDM 系统的 BER 远低于传统的 ACO-OFDM 系统。上述研究结果表明,Layered-ACO-OFDM 系统不仅具有功率效率高的优势,还解决了传统 ACO-OFDM 频谱效率低的问题,故其在未来的水下光通信中拥有广阔的应用前景。

2 Layered-ACO-OFDM 系统

三层 Layered-ACO-OFDM 系统可在发射端通

过分层对每一层子载波进行调制。图 1 为三层 Layered-ACO-OFDM 系统发射机框图。首先,第一层对输入比特采用 QAM 调制,并在所有奇数子载波 X_{2k+1} 上加载 QAM 符号,而将偶数子载波 X_{2k} 空置,其中 $k \in \mathbf{N}^+$ 。然后,对加载 QAM 符号后的子载波进行厄米共轭对称操作,可表示为

$$X_m = X_{N-m}^*, \quad 0 < m < \frac{N}{2}, \quad (1)$$

式中: m 为 OFDM 第 m 个位置处的子载波; N 为子载波总数。将得到的 X_0 和 $X_{N/2}$ 置为 0 后, Layered-ACO-OFDM 系统中的第一层频域信号 $X_{ACO,k}^{(1)}$ 可以表示为

$$X_{ACO,k}^{(1)} = \{0, X_1, 0, X_3, \dots, 0, X_{N/2-1}, 0, X_{N/2-1}^*, 0, X_{N/2-3}, \dots, 0, X_1^*\} \quad (2)$$

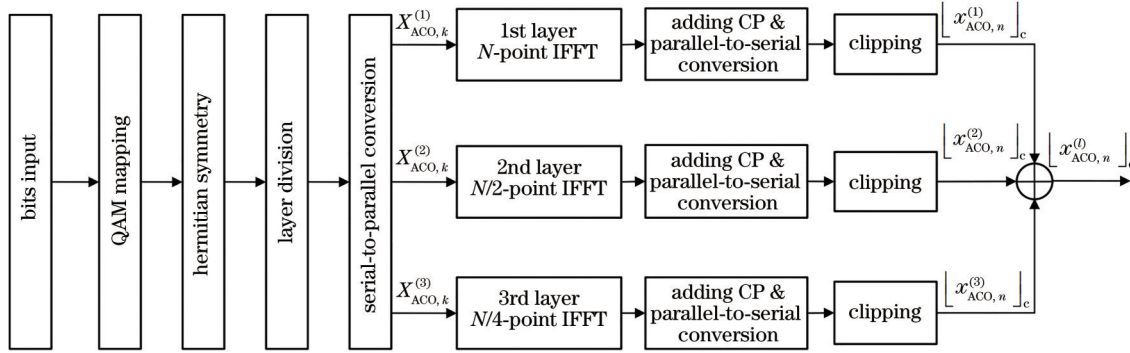


图 1 三层 Layered-ACO-OFDM 系统发射机框图

Fig. 1 Block diagram of Layered-ACO-OFDM transmitter with three layers

在 Layered-ACO-OFDM 系统的第二层中,在子载波 $X_{2(2k+1)}$ 上加载 QAM 符号,并进行厄米共轭对称操作,同时第二层中的偶数子载波 $X_{2(2k)}$ 依然空置,得到 Layered-ACO-OFDM 系统中的第二层频域信号 $X_{ACO,k}^{(2)}$ 。Layered-ACO-OFDM 系统的第三层将前两层依然未被调制的子载波 $X_{4(2k+1)}$ 加载上 QAM 符号,得到第三层频域信号 $X_{ACO,k}^{(3)}$,其余子载波不再进行调制。

将三层子载波全部加载上 QAM 符号后,分别对每层频域信号进行快速傅里叶逆变换 (IFFT), 可以表示为

$$x_{ACO,n}^{(l)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N/2^{l-1}-1} X_{2^{l-1}k} \exp(j \frac{2\pi}{N} n \cdot 2^{l-1}k), \quad (3)$$

式中: $n=0, \dots, N-1$; l 表示层数。将得到的时域信号 $x_{ACO,n}^{(l)}$ 添加循环前缀 (CP), 并进行串并转换。得到的每一层双极性时域信号 $x_{ACO,n}^{(l)}$ 具有反对称特性^[15], 对信号的负数部分做剪裁处理, 即

$$\lfloor x_{ACO,n}^{(l)} \rfloor_c = \begin{cases} x_{ACO,n}^{(l)}, & x_{ACO,n}^{(l)} \geq 0 \\ 0, & x_{ACO,n}^{(l)} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在发射光信号前, 利用剪裁后的信号 $\lfloor x_{ACO,n}^{(l)} \rfloor_c$ 对光强进行调制。

在三层 Layered-ACO-OFDM 系统接收端, 对接收到的时域信号 $r_{ACO,n}^{(l)}$ 进行快速傅里叶变换

(FFT) 后取出每层奇数子载波上的信息, 进而恢复该层信号, 恢复后的信号可以表示为

$$R_{ACO}^{(l)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r_{ACO,n}^{(l)} \exp \left[\frac{-j2\pi \cdot 2^{l-1}(2k+1)n}{N} \right], \quad (5)$$

式中: $R_{ACO}^{(l)}$ 代表第 l 层的频域信号。但是, 接收机在恢复第 l 层信号前, 需要先将第 1 至 $l-1$ 层的剪裁噪声^[16] 去除。由于第一层子载波上无剪裁噪声, 经信道均衡后可直接提取信息。第二层之后的每一层子载波中都有上层剪裁噪声的叠加噪声, 每层信号的去剪裁噪声过程可表示为

$$\hat{R}_{ACO,k}^{(l)} = R_{ACO,k}^{(l)} - \sum_{m=1}^{l-1} \hat{I}_{ACO,k}^{(m)}, \quad (6)$$

式中: $\hat{R}_{ACO,k}^{(l)}$ 和 $R_{ACO,k}^{(l)}$ 分别代表第 l 层去噪后的信号和第 1 层至第 l 层的接收信号; $\hat{I}_{ACO,k}^{(m)}$ 代表第 m 层的剪裁噪声。估计 $\hat{I}_{ACO,k}^{(m)}$ 需要对输出的比特重新调制, 以得到第 l 层偶数子载波上的剪裁噪声。图 2 所示为三层 Layered-ACO-OFDM 系统接收机框图。该接收机利用循环迭代的方法对信号进行解调, 包括对重新生成的频域信号 $\hat{X}_{ACO,k}^{(l)}$ 进行 IFFT 以得到 $\hat{x}_{ACO,n}^{(l)}$, 再进行剪裁操作以及 FFT, 估计出第 l 层的剪裁噪声 $\hat{I}_{ACO,k}^{(l)}$ 。三层 Layered-ACO-OFDM 系统的频谱效率可提高至 ACO-OFDM 系统的 1.75 倍, 即

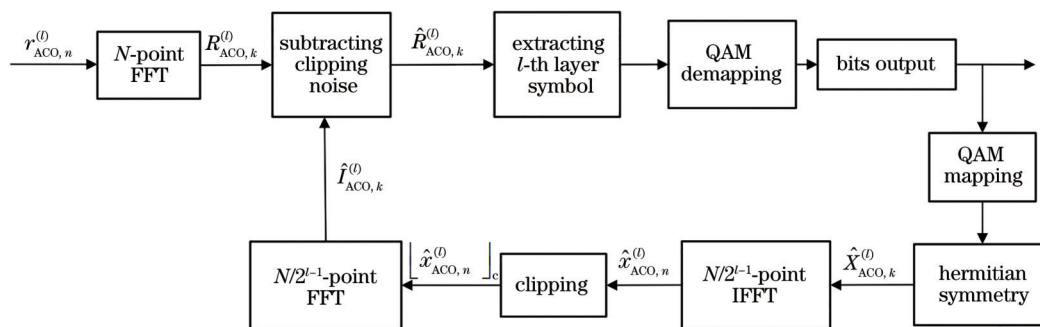


图 2 三层 Layered-ACO-OFDM 系统接收机框图

Fig. 2 Block diagram of Layered-ACO-OFDM receiver with three layers

在相同带宽下可以调制更多数据,进而大大提升了传输速率。

3 基于蒙特卡罗方法的 UOWC 信道仿真

可见光在海水中传播时,能量会逐渐衰减。光的衰减系数 c 等于吸收系数 a 与散射系数 b 之和^[17], 即 $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$, 其中 λ 为可见光波长。海水对光的吸收物质包括: 纯海水、浮游植物(叶绿素)、有色有机溶解物(黄腐酸、腐殖酸)^[18]。对光的散射包括: 纯海水散射、浮游植物散射、小颗粒散射、大颗粒散射^[18]。

可见光的波长范围为 390~770 nm, 其中海水对波长为 455~550 nm 的蓝绿光波段的吸收作用最弱, 对波长为 650 nm 以上的红光波段吸收作用最强^[18]。因此, 蓝绿光最适合用作 UOWC, 本文采用波长为 500 nm 的绿光进行仿真。同时, 光在海水中的衰减随叶绿素浓度的升高而增大^[17-18]。

利用蒙特卡罗方法对 UOWC 信道进行仿真, 将光在水下的传播看作许多光子的传输, 通过计算概率得到能到达接收机处的光子数目^[19-20]。在清澈

水域和海港水域中分别对 UOWC 信道响应进行仿真, 设置清澈海水中的叶绿素浓度为 1 mg/m³、海港水域中叶绿素浓度为 6 mg/m³。表 1 为波长为 500 nm 的绿光在两种环境中的衰减系数^[18]。

表 1 不同环境中绿光的衰减系数

Table 1 Attenuation coefficient of green light in different environments

Water type	a / m^{-1}	b / m^{-1}	c / m^{-1}
Clean water	0.0597	0.2705	0.3302
Harbor water	0.3055	1.9458	2.2513

图 3 为在接收机采用不同 FOV 条件下, 清澈水域和海港水域的 UOWC 信道响应仿真结果。在清澈水域中, 散射作用很弱, 故信号的时延扩展较小。同时, 接收光束比较集中, 较小的 FOV 也能接收到大部分光。在海港水域中, 由于叶绿素浓度较高, 故光子在传播过程中会发生较强的散射^[21], 信道响应的峰值点右移^[22], 表明此时信号的时延扩展变大。此外, 接收光束弥散, 故需要较大的 FOV 才能接收到较多的光功率。比较图 3(a)、(b) 可以发现, 海港水域的水下光衰减远远大于清澈水域的水下光衰减。

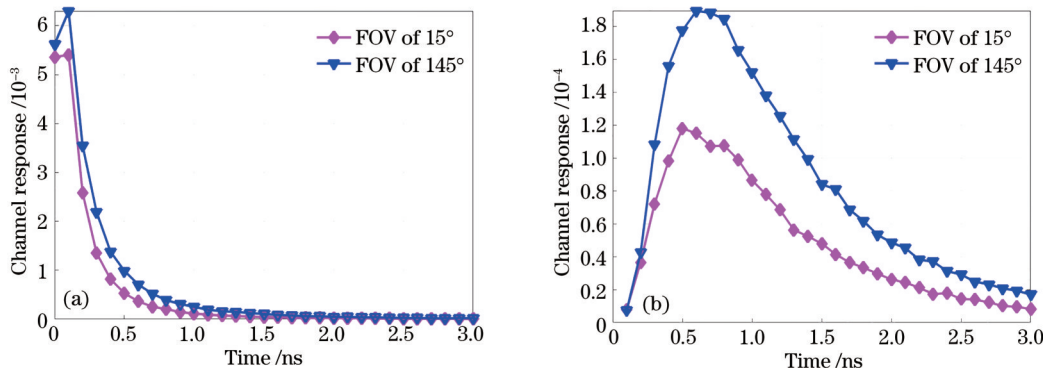


图 3 不同水域中的 UOWC 信道响应仿真结果。(a) 清澈水域; (b) 海港水域

Fig. 3 Simulation results of UOWC channel response in different waters. (a) Clean water; (b) harbor water

4 仿真结果与分析

采用 MATLAB 对基于 Layered-ACO-OFDM 的水下通信系统进行仿真, UOWC 信道参数设置如表 2 所示。为了保证足够的光功率射入接收机, 孔径直径大小设置为 50 cm。发射信号参数如

表 3 所示, 调制格式选取 16QAM, Layered-ACO-OFDM 系统频谱效率能够达到 $1.75 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。系统的有源噪声功率固定为 0.001 W。通过调节光源发射功率可改变信噪比 (SNR), 设置发射的相对功率分别为 1.00, 1.44, 1.96, 2.56, 3.24, 4.00 W。

表 2 UOWC 信道参数
Table 2 UOWC channel parameters

Water type	Light color	Mass fraction of chlorophyll / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Distance / m	FOV	Diameter / cm
Clean water	Green	1	10	Variable	50
Harbor water	Green	6	10	Variable	50

表 3 发射信号参数
Table 3 Transmit signal parameters

Number of FFT points	Cyclic prefix	Training sequence	Number of symbols	Modulation format
256	16	20	4096	16QAM

图 4 为在清澈水域与海港水域中传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 的系统 BER 性能对比。在海港水域中, 由于吸收与散射作用, 故 Layered-ACO-OFDM 的 BER 无法达到前向纠错 (FEC) 门限。在清澈水域中, 传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统传输 10 m 距离后可达到 FEC 门限, 此时 SNR 约为 27 dB。

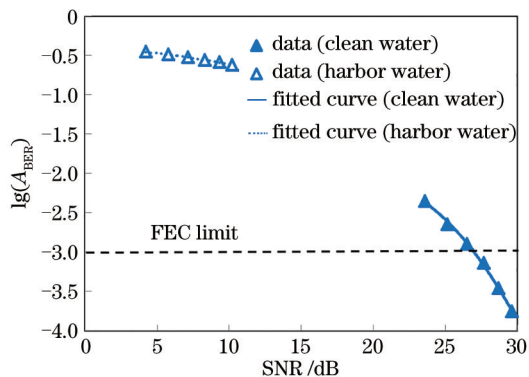


图 4 在清澈水域与海港水域中 Layered-ACO-OFDM 系统性能对比

Fig. 4 Performance comparison of Layered-ACO-OFDM system in clean water and harbor water

图 5 为在清澈水域中传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统的 BER 性能与 FOV 的关系图, 此时 SNR 为 27 dB。当 FOV 较小时, 部分光无法射入接收机, 相应的光功率损失导致 Layered-ACO-OFDM 的 BER 无法达到 FEC 门限。随着 FOV 的增大, 传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-

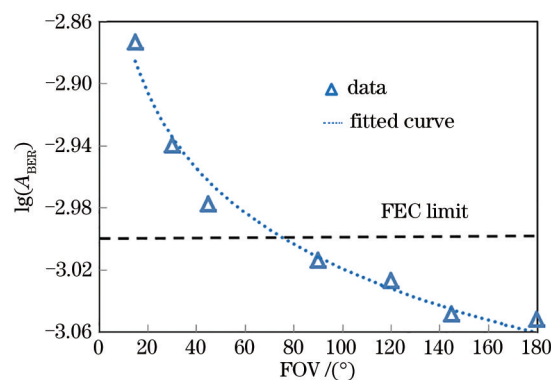


图 5 在清澈水域中 Layered-ACO-OFDM 系统性能与 FOV 的关系

Fig. 5 Relationship between performance of Layered-ACO-OFDM system and FOV in clean water

ACO-OFDM 系统在 FOV 约为 80° 时可达到 FEC 门限。

图 6 为当发射功率为 2.56 W 时, 清澈水域中 Layered-ACO-OFDM 系统的 BER 性能与传输速率的关系图。可以发现, 系统 BER 随传输速率的增大而升高。传输速率为 500 Mb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统的 BER 低于 10^{-6} 门限。传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统在清澈水域中传输 10 m 后仍然能达到 FEC 门限。

图 7 为在清澈水域中, 传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统与传输速率为 1 Gb/s 的传统 ACO-OFDM 系统的 BER 性能对比。为了保证两种系统具有相同频谱效率, Layered-ACO-

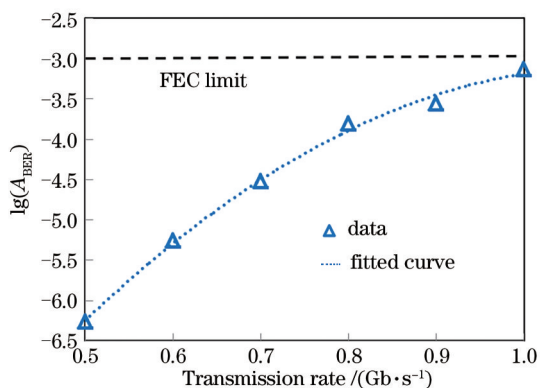


图 6 在清澈水域中 Layered-ACO-OFDM 系统性能与传输速率的关系

Fig. 6 Relationship between performance of Layered-ACO-OFDM system and transmission rate in clean water

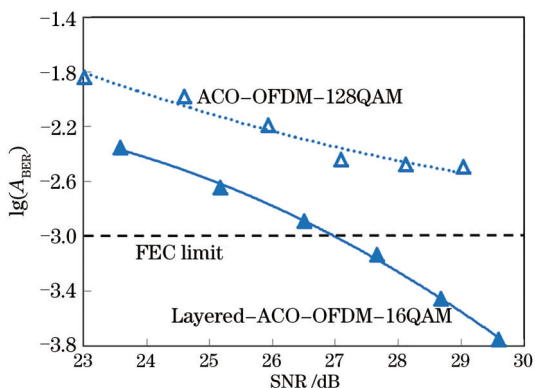


图 7 Layered-ACO-OFDM 系统与传统 ACO-OFDM 系统的 BER 性能对比(点代表仿真数据,线代表拟合曲线)

Fig. 7 BER performance comparison between Layered-ACO-OFDM system and traditional ACO-OFDM system (triangle represents simulation data, line represents fitted curve)

OFDM 系统采用 16QAM 调制,单层 ACO-OFDM 系统采用 128QAM 调制,此时频谱效率均为 $1.75 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。由于调制阶数较高,传输速率为 1 Gb/s 的传统 ACO-OFDM 系统在传输 10 m 后无法达到 FEC 门限。传输速率为 1 Gb/s 的 Layered-ACO-OFDM 系统在 SNR 为 27 dB 时可达 FEC 门限。

5 结 论

提出了基于 Layered-ACO-OFDM 的 UOWC 系统。Layered-ACO-OFDM 通过对信号剪裁的方式,避免了直流偏置的加入,从而大大提高了光通信系统的功率效率。同时,Layered-ACO-OFDM 采

用子载波分层调制信息的方法,解决了传统 ACO-OFDM 载波资源利用不足,频谱效率低的问题。为了模拟光在真实海洋环境中的传输情况,考虑了海水对可见光的吸收和散射,建立了基于蒙特卡罗方法的 UOWC 信道模型,并对不同海水浑浊度、不同接收机 FOV 下的信道响应进行了全面地研究。在相同调制格式下,三层 Layered-ACO-OFDM 的频谱效率可以达到传统 ACO-OFDM 的 1.75 倍。仿真结果表明,基于 Layered-ACO-OFDM 的 UOWC 系统可以在清澈海水中实现 10 m 传输距离下 1 Gb/s 的高速率通信。在相同频谱效率下,Layered-ACO-OFDM 系统的 BER 性能远优于传统的 ACO-OFDM 系统,表明 Layered-ACO-OFDM 是一种具有高功率效率与高频谱效率的可行性方案。

参 考 文 献

- [1] Alam K, Ray T, Anavatti S G. A brief taxonomy of autonomous underwater vehicle design literature[J]. Ocean Engineering, 2014, 88: 627-630.
- [2] Jeong S K, Choi H S, Bae J H, et al. Design and control of high speed unmanned underwater glider[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016, 3(3): 273-279.
- [3] Battista T, Woolsey C, Perez T, et al. A dynamic model for underwater vehicle maneuvering near a free surface[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(23): 68-73.
- [4] Ling S D, Mahon I, Marzloff M P, et al. Stereo-imaging AUV detects trends in sea urchin abundance on deep overgrazed reefs[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2016, 14(5): 293-304.
- [5] Zeng F J, Yang K J, Yan X, et al. Research progress on the underwater laser communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300002.
曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 等. 水下激光通信系统研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300002.
- [6] Li T S, Yang R K, Gao X, et al. Impulse response modeling for underwater wireless laser transmission [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1101001.
李天松, 阳荣凯, 高翔, 等. 水下无线激光传输脉冲响应建模 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1101001.
- [7] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [8] Bai J R, Cao C F, Yang Y, et al. Peak-to-average

- power ratio reduction for DCO-OFDM underwater optical wireless communication system based on an interleaving technique[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(8): 086110.
- [9] Armstrong J, Schmidt B J C. Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(5): 343-345.
- [10] Elamassie M, Karbalayghareh M, Miramirkhani F, et al. Adaptive DCO-OFDM for underwater visible light communications[C]//2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), April 24–26, 2019, Sivas, Turkey. New York: IEEE Press, 2019: 18952168.
- [11] Dissanayake S D, Panta K S, Armstrong J. A novel technique to simultaneously transmit ACO-OFDM and DCO-OFDM in IM/DD systems[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), December 5–9, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011: 782-786.
- [12] Zhou J, Qiao Y J, Cai Z, et al. Asymmetrically clipped optical fast OFDM based on discrete cosine transform for IM/DD systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1920-1927.
- [13] Hessian S, Tokgöz S C, Anous N, et al. Experimental evaluation of OFDM-based underwater visible light communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 7907713.
- [14] Tokgoz S C, Boluda-Ruiz R, Yarkan S, et al. ACO-OFDM transmission over underwater pipeline for VLC-based systems[C]//2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 8-11, 2019, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [15] Wang Q, Qian C, Guo X H, et al. Layered ACO-OFDM for intensity-modulated direct-detection optical wireless transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12382-12393.
- [16] Chen L, Krongold B, Evans J. Diversity combining for asymmetrically clipped optical OFDM in IM/DD channels[C]//GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference, November 30-December 4, 2009, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2009: 11170530.
- [17] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [18] Gawdi Y J. Underwater free space optics[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2006.
- [19] Dai W H, Yan Q R, Wang M, et al. The establishment and simulation of underwater photon spatio-temporal random channel model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1706006.
戴伟辉, 鄢秋荣, 王明, 等. 水下光子时空随机信道模型的建立与仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1706006.
- [20] Cox W. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [21] Li T S, Gao X, Zhou X Y, et al. Characteristic analysis of underwater laser propagation based on Sahu-Shanmugam and Fournier-Forand volume scattering functions[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030103.
李天松, 高翔, 周晓燕, 等. 基于 Sahu-Shanmugam 和 Fournier-Forand 体积散射函数的水下激光传输特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030103.
- [22] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 226-234.