

一种高效的水下可见光 OFDM 通信方案

马春波, 柴晨阳, 敖珺

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了满足光正交频分复用(OOFDM)系统中发光二极管(LED)发送端信号实值正数的要求, 依据快速哈特莱变换(FHT)“实进实出”的特性, 采用 FHT 替代快速傅里叶变换(FFT), 将正交幅度调制(QAM)映射应用在基于 FHT 的非对称限幅直流偏置 OOFDM 系统, 并进行了仿真实验。仿真结果表明: 在同等级水下背景噪声的条件下, 与相同频带利用率的水下可见光 OFDM 通信系统相比, FHT 系统具有较好的误码性能。

关键词: 水下可见光通信; 光正交频分复用; 快速哈特莱变换; 水下背景噪声

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)09-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.09.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Efficient underwater visible light OFDM communication scheme

MA Chunbo, CHAI Chenyang, AO Jun

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to solve the requirement of positive real value of the signal at the light-emitting diode(LED) transmitting end in the optical orthogonal frequency division multiplexing (OOFDM) system, according to the characteristics of fast Hartley transform (FHT) "Real in Real out", FHT is used instead of fast Fourier transform (FFT), quadrature amplitude modulation(QAM) mapping is applied to FHT-based asymmetric limiting direct-current biased OOFDM system, and simulation experiments are carried out. The simulation results show that the FHT system has better bit error performance than the underwater visible OFDM communication system with the same frequency band utilization under the condition of the same underwater background noise.

Key words: underwater visible light communication; optical orthogonal frequency division multiplexing; fast Hartley transform; underwater background noise

0 引言

光正交频分复用(OOFDM)技术因其能够有效抑制海水对光的散射现象所引起的符号间干扰, 且具有较高的频谱效率, 被广泛应用于水下可见光通信的高速传输中^[1-3]。目前, 水下可见光通信系统中常用的调制方式“强度调制/直接检测(IM/DD)”是将调制电信号直接加载到光强上, 而光强的特性决定了待传输的电信号也必须是“实值正数”。因此, 传统的 OOFDM 系

统需要对输入快速傅里叶变换(FFT)端的数据进行复杂的埃尔米特(Hermitian)矩阵变化, 同时采用四类单极性方案^[2-5]。与 FFT 相比, 快速哈特莱变换(FHT)是一种实数正交变换, 因此采用 FHT 替代 FFT 成为 OOFDM 理想的调制方案^[6]。为了进一步提高基于 FHT 系统的误码性能, 本文提出一种采用正交幅度调制(QAM)映射方式的非对称限幅直流偏置光 OFDM(A-DO-OFDM)系统通信方案。

收稿日期: 2020-11-24。

基金项目: 广西自然科学基金的资助 (项目编号: 2018GXNSFAA 294056) 资助。

作者简介: 马春波(1975—), 男, 教授, 博士后, 硕士研究生导师, 先后主持和承担国家自然科学基金、预研基金、电子部与企事业单位合作等科研项目 20 余项, 主要从事光通信技术、通信系统安全技术和网络安全方面的研究工作。



1 水下光学信道模型

水下光学信道中不可忽略的光损耗、光束扩展和光束散射等因素, 使得水下可见光通信的应用仍具有挑战性。文献[7]将蒙特卡洛方法与双 HG(Henyey-Greenstein)散射函数模型相结合, 通过模拟不同类别海水中光子的传输来建立信道脉冲响应模型, 模拟结果表明光束在 Jerlov 第一类清澈海水中的传输可以忽略光束散射的影响。因此, 远海通信中只需研究背景

马春波, 柴晨阳, 敖珺: 一种高效的水下可见光 OFDM 通信方案

噪声对系统性能的影响。水下背景噪声主要由光束衰减和漫射光辐射造成, 同时水下设备上的准直透镜和设备中的暗电流等因素也会影响系统性能。文献[8]考虑以上因素后提出了水下可见光通信信噪比方程如式(1)所示。

$$R_{SN} = \left[\frac{P_i \exp(cr) D^2 \cos \varphi}{(\tan^2 \theta) 4r^2 S_{NEF}} \right] \quad (1)$$

式(1)包括发射机噪声、水下信道噪声和接收机噪声。其中, 发射机发送功率 P_i 与发散角宽度 θ 为发射机噪声因素; 光束传输距离 r 与光束衰减系数 c 为水下信道噪声因素; 接收机孔径大小 D 与视场角 φ 为接收机噪声因素; S_{NEF} 则代表漫射光噪声 k 、设备暗电流噪声与准直透镜噪声的总和, 在 Jerlov 第一类清澈海水中时 k 值约为 c 值的 3 倍。

2 FHT 原理与 ADO-OFDM 系统结构

FHT 作为一种高效的正交变换被应用于 OOFDM 系统中可以提高频带利用率, 降低运算复杂度。同时, ADO-OFDM 系统作为一种新型的 OOFDM 系统在水下可见光通信中得到了广泛应用。

2.1 FHT 原理

FHT 变换是属于哈特莱(Hartley)变换的一种离散高效运算方法, Hartley 变换与 FFT 均属于正余弦正交变换。与 FFT 不同, Hartley 变换为真实数变换, 且具有正逆变换一致性。因此 Hartley 变换更加适用于 IM/DD 的 OOFDM 系统。

FHT 与 IFHT 可分别表示为:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \text{cas}(2\pi kn/N), n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}(2\pi kn/N), k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

其中, N 表示 FHT 的序列长度, $x(n)$ 和 $X(k)$ 分别表示时频域信息。核心函数 $\text{cas}(2\pi kn/N)$ 以 N 为周期并满足正交性, $\text{cas}(2\pi kn/N) = \cos(2\pi kn/N) + \sin(2\pi kn/N)$ 。

2.2 ADO-OFDM 系统结构

ADO-OFDM 系统是一种结合不对称剪裁 OOFDM (ACO-OFDM) 系统与直流偏置 OOFDM (DCO-OFDM) 系统的高功率和高频谱利用率的新型 OOFDM 系统。ADO-OFDM 发送端与接收端基本原理如下文所述。

2.2.1 发送端

图 1 为 ADO-OFDM 系统的发射端框图。信息数据位经星座图映射、Hermitian 变换后分为 2 路进行处理: 第一条支路需将频域信号 X_{odd} 调制到奇数位子载波

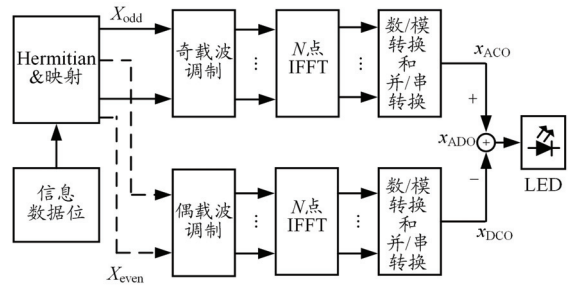


图 1 ADO-OFDM 系统发射端框图

波, 并通过 N 点逆快速傅里叶变换 (IFFT) 为具有反对称性的时域信号, $x_{\text{odd}}(n) = -x_{\text{odd}}(n+N/2)$; 第二条支路需将频域信号 X_{even} 调制到偶数位子载波, 并通过 N 点 IFFT 为具对称性的时域信号, $x_{\text{even}}(n) = x_{\text{even}}(n+N/2)$ 。将 2 路实数信号 x_{odd} 与 x_{even} 分别进行限制负值和添加直流偏置操作, 完成单极化处理。最后, 将 2 路信号叠加生成发送端信号 $x_{\text{ADO}} = x_{\text{odd}} + x_{\text{even}}$, 添加循环前缀 (CP) 后经发光二极管 (LED) 调制完成发送。

2.2.2 接收端

图 2 为 ADO-OFDM 系统的接收端框图。携带信息的光信号经信道传输, 被光电探测器转换为电信号 y_{ADO} 。经过模/数转换 (A/D), 去 CP 和串/并变换等操作后, 通过常规 FFT 解调生成频域信号 Y_{odd} , 再利用串行干扰消除 (SIC) 技术生成频域信号 Y_{even} 。将 2 条支路解调出的信号合并, 提取 Hermitian 矩阵中相应位的信息, 则可以恢复出数据。

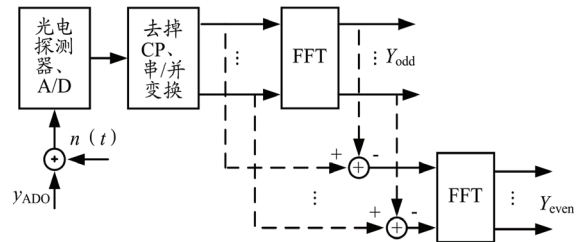


图 2 ADO-OFDM 系统接收端框图

3 基于 QAM 复数映射的 FHT 系统

本文采用 QAM 二维复数映射方式, 结合双通道 ADO-OFDM 系统, 构建了一种高性能的水下 OOFDM 通信方案, 基于 QAM 映射的 FHT 系统框图如图 3 所示。数据信息经 QAM 映射为复数符号, 该符号信息无法直接输入到逆快速 Hartley 变换 (IFHT) 中, 需要通过哈达玛 (Hadamard) 矩阵将复数符号分解至 2 路正交码组上, 实现复数到实数的转换。该转换可以定义为:

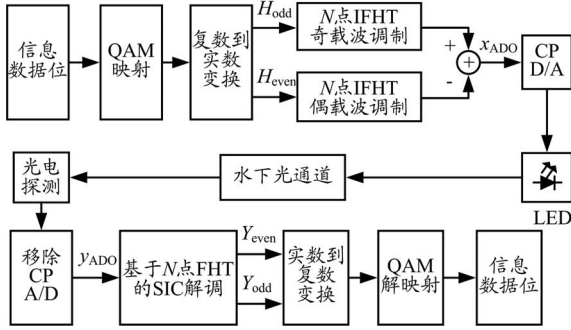


图3 基于 QAM 映射的 FHT 系统框图

$$\begin{bmatrix} H_{\text{odd}} \\ H_{\text{even}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{kr} \\ X_{ki} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, H_{odd} 与 H_{even} 表示经转换后待调制到偶载波和奇载波上的实数符号, X_{kr} 与 X_{ki} 分别表示第 k 个 QAM 映射符号的实部和虚部。由式(4)可知, 2 组实数符号具有正交性。依托 FHT 实数变化的性质, H_{odd} 与 H_{even} 此时无需再构造复杂的 Hermitian 矩阵便可满足 LED 发送端实数的要求。在第一条支路上, 频域信号 H_{odd} 被调制到奇数子载波, 经正交变换、限幅操作, 转换为时域信号, 且将 $X_{\text{odd}} = [0, X_1, 0, X_3, 0, \dots, 0, X_{N-1}]$ 通过 IFHT 转换为时域信号 $h_{\text{odd}} = [X_{\text{odd},0}, X_{\text{odd},1}, X_{\text{odd},2}, \dots, X_{\text{odd},N-1}]$ 。在第二条支路上, 频域信号 H_{even} 被调制到偶数子载波, 经正交变换、添加直流偏置操作, 转换为时域信号, 且将 $X_{\text{even}} = [X_1, 0, X_3, 0, \dots, 0, X_{N-1}]$ 通过 IFHT 转换时域信号 $x_{\text{even}} = [X_{\text{even},0}, \dots, X_{\text{even},N/2}, X_{\text{even},0}, \dots, X_{\text{even},N/2-1}]$ 。最后, 将 2 路信号叠加生成发送端信号, 通过添加 CP, LED 调制完成发送。

在接收端通过光电处理, 得到相应的叠加信号 y_{ADO} 。 y_{ADO} 首次经过 FHT 可表示为:

$$Y_{\text{ADO}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_{\text{odd}}(n) \text{cas}(2kn) + \sum_{n=0}^N y_{\text{even}}(n) \text{cas}[(2n+1)k] \quad (5)$$

由于 y_{even} 相对于自身具有对称性, 因此 y_{even} 时频变化所得 $Y_{\text{even}}(k)$ 只在偶载波上存在数据, 在奇载波上数据为 0。而 y_{odd} 时频变化所得 $Y_{\text{odd}}(k)$ 只需从奇载波上提取数据做相应处理。基于 FHT 的这种性质, 该系统在接收端可通过 SIC 技术实现符号 $Y_{\text{even}}(k)$ 与 $Y_{\text{odd}}(k)$ 的解调。

解调所得符号还需做相应的逆操作实现实数到复数的转变, 逆变换可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{kr} \\ X_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{\text{odd}} \\ H_{\text{even}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

转换所得复数符号经 QAM 逆映射, 完成数据传

输。在本系统中, 由于 H_{odd} 与 H_{even} 具有正交性, 可以在一定程度上抑制相位偏移的影响。因此, 为了提高系统性能, 可将 SIC 技术与信道均衡技术级联使用。

4 系统性能分析

本文从 FHT 频带利用率、抗噪性能和水下性能仿真 3 个方面讨论基于复数映射的 FHT 系统性能。

4.1 FHT 频带利用率

OFDM 中的频带利用率被定义为所传输的信息速率与子载波带宽之比。双通道 ADO-OFDM 系统的频带利用率可以表示为 2 条支路的频带利用率之和, 其计算公式为:

$$\eta_{\text{ADO}} = \eta_{\text{odd}} + \eta_{\text{even}} = \frac{N_{\text{odd}} \log_2 M}{K(N_{\text{odd}} + N_{\text{CP}})} + \frac{N_{\text{even}} \log_2 M}{K(N_{\text{even}} + N_{\text{CP}})} \quad (7)$$

其中, N_{odd} 与 N_{even} 为携带信息数据的子载波数, M 表示星座映射阶数, N_{CP} 表示 CP 长度, K 为发送子载波的倍数。系统频带利用率研究表明: 当采用相同的子载波数与 M 值时, $K=2$ 的 FHT 系统频带利用率约为 $K=4$ 的 FFT 系统的 2 倍。因此, 基于 FFT 的双通道 ADO-OFDM 系统频带利用率约为传统 OOFDM 系统的 2 倍。

4.2 抗噪性能分析

OFDM 系统的误码因素主要来自于映射星座点之间的最小欧氏距离。系统抗干扰性能随欧式距离减小而降低, 从而导致误码率(BER)上升。在可见光通信中常用“平均比特能量/噪声功率谱密度”(E_b/E_0)来衡量系统 BER 性能, 本文将从 E_b 角度来分析不同星座图尺寸对系统 BER 性能影响。假设 t 时刻 OFDM 发送端信号为 $x(t)$, LED 载波信号为 $h(t)$, 则当采用实数映射脉冲幅度调制(PAM)与复数映射 QAM 时, 系统平均比特能量 E_b 可表示为:

$$E_b^{\text{PAM}} = \frac{2(M^2-1)}{3\log_2 M} E_h, E_b^{\text{QAM}} = \frac{M-1}{3\log_2 M} E_h \quad (8)$$

其中, E_h 表示载波符号能量。本文以能量为标准基重新定义星座图坐标, 则星座点之间的最小欧氏距离用 E_b 分别表示为:

$$D_{\text{min,PAM}} = \sqrt{\frac{6\log_2 M}{M^2-1} E_b^{\text{PAM}}}, d_{\text{min,QAM}} = \sqrt{\frac{6\log_2 M}{M-1} E_b^{\text{QAM}}} \quad (9)$$

由式(8)分析可得, 在具有相同 E_b 条件下, 当最小欧氏距离 d_{min} 随着星座映射阶数 M 变化时, 复数 QAM 映射相较于实数 PAM 映射拥有较大的 d_{min} , 因此基于复数映射的 FHT 系统拥有较好的抗噪性能。

4.3 水下性能仿真

根据式(1), 本文通过控制系统频带利用率的变化, 对 FFT 系统(64QAM-FFT、16QAM-FFT)、实数映

马春波, 柴晨阳, 敖珺: 一种高效的水下可见光 OFDM 通信方案

射 FHT 系统(8PAM-FHT、4PAM-FHT)和复数映射 FHT 系统(8QAM-FHT、4QAM-FHT)在 Jerlov 第一类清澈海水中的误码性能进行仿真研究。图 4 为系统发射机与接收机硬件平台及水下测试效果图。

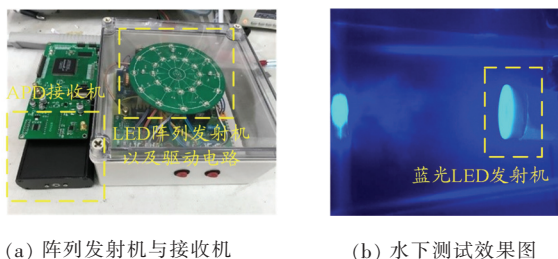


图 4 系统硬件平台

考虑单个 LED 发光功率有限的因素, 水下发送机采用 24 个蓝光 LED 组成阵列发射机。发射机总功率 $P_t \geq 24 \text{ W}$, 发散角 $\theta \approx 40^\circ$ 。水下接收机采用雪崩光电二极管 (APD) 用于光信号的检测。接收机孔径大小 $D \approx 4 \text{ mm}$, 视场角 $\varphi \approx 10^\circ$, 海水对光束衰减系数 $c = 0.02 \text{ m}^{-1}$, 噪声等效功率取值则由漫射光噪声、暗电流噪声等共同决定。

将测量数据代入式(1)中, 通过控制光束传输距离 r 的变化可以得到 R_{SN} 的离散取值。当采用 $2 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 频带利用率时, 仿真结果如图 5(a) 中圆圈线所示, 分析可得复数 FHT 系统在不同传输距离中均能保持较好的误码性能, 且在达到最优 $\text{BER} = 10^{-4}$ 时, 基于复数映射的 FHT 系统的信噪比比较基于实数映射的 FHT 系统提高了 6 dB, 相较于基于 FFT 的系统提

高了 8 dB; 当采用 $3 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 频带利用率时, 仿真结果如图 5(a) 中星号线所示, 分析可得系统整体的误码性能亦随 SNR 的增大而降低, 但复数 FHT 系统仍将保持最优的误码性能。

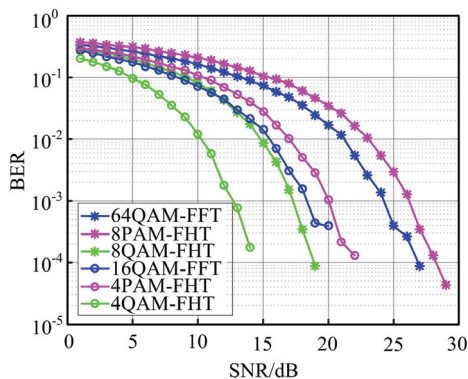
传输带宽对系统误码性能的影响如图 5(b) 所示。可以看出, 相较于高阶映射, 采用低阶映射方式的系统在不同通信距离中均拥有较好的误码性能。但低阶映射限制了传输带宽, 因此在发送端需要通过提高系统发射功率、补偿相位噪声和采用合适星座图等方法对高阶映射方式的误码性能进行改善。

5 结束语

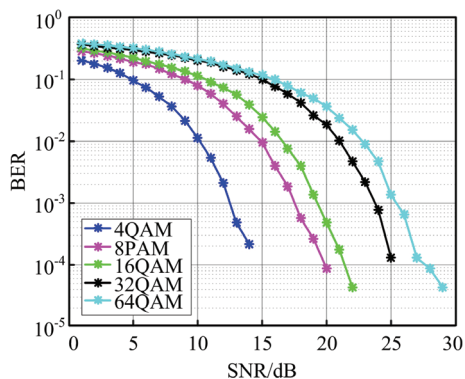
本文提出了一种复数映射 FHT 系统通信方案, 通过理论与仿真实验对该系统的频带利用率、误码性能进行了研究。水下背景噪声对比仿真表明: 在不同距离的通信中, 该系统均具有最优的误码性能。同时, 在此基础上, 我们将来通过提高 LED 调制速率的方法, 设计一套高速水下 OFDM 通信系统。

参考文献:

- [1] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518–1547.
- [2] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(7): 1063–1072.
- [3] DISSANAYAKE S D, PANTA K, ARMSTRONG J. A novel technique to simultaneously transmit ACO-OFDM and DCO-OFDM in IM/DD systems[C]//2011 IEEE Globecom Workshops, Dec. 5–9, 2011, Houston, US-A. Piscataway: IEEE Globecom Workshops, 2011: 782–786.
- [4] TSONEV D, SINANOVIC S, HAAS H. Novel unipolar orthogonal frequency division multiplexing (U-OFDM) for optical wireless[C]//IEEE. Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 1–5.
- [5] FERNANDO N, HONG Y, VITERBO E. Flip-OFDM for unipolar communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12): 3726–3733.
- [6] MOREOLO M S, MUOZ R, JUNYENT G. Novel power efficient optical OFDM based on Hartley transform for intensity-modulated direct-detection systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(5): 798–805.
- [7] GABRIEL C, KHALIGHI M AND BOURENNANE S. Monte-carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. Optical Communications and Networking IEEE/OSA Journal, 2013, 5(1): 1–12.
- [8] GILES J W, BANKMAN I N. Underwater optical communications part 2: basic design considerations[C]//IEEE. Proceedings of 2005 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2005: 1700–1705.



(a) 频带利用率对误码率影响



(b) 传输带宽对误码率影响

图 5 系统误码率性能对比