

引用本文:张琳,罗文锋,叶林钧,等.一种基于哈特莱变换的低空 UAV 可见光高效传输系统[J].光通信技术,2026,50(1):47-53.

一种基于哈特莱变换的低空 UAV 可见光高效传输系统

张琳¹,罗文锋²,叶林钧²,张帆²,郭晓²,汤健³,郑杰恒³

(1.中山大学 网络空间安全学院,广东 深圳 518000;

2.广东烟草河源市有限责任公司,广东 河源 517000;3.中山大学 电子与信息工程学院,广州 510006)

摘要:为解决低空无人机系统高速数据传输中射频频谱资源受限的问题,提出了一种基于哈特莱变换(DHT)的低空无人机(UAV)可见光高效传输系统。该系统通过DHT实现实数域调制,无需传统离散傅里叶变换系统中的厄米特对称约束,从而提高了频谱利用率;设计了相应的系统结构与频域均衡方案,并推导了光域能量效率与有效频谱效率的理论表达式。仿真结果表明:与采用复数调制的传统光正交频分复用系统相比,所提系统在保持相同误码率和有效频谱效率性能的同时,可实现更高的频谱效率与传输速率。

关键词:低空无人机;哈特莱变换;可见光通信;能效;频谱效率

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0047-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.008

High-efficiency visible light transmission system for low-altitude UAV based on the discrete Hartley transform

ZHANG Lin¹, LUO Wenfeng², YE Linjun², ZHANG Fan², GUO Xiao², TANG Jian³, ZHENG Jieheng³

(1. School of Cyberscience and Technology, Sun Yat-sen University, Shenzhen Guangdong 518000, China;

2. Guangdong Tobacco Heyuan Co., Ltd., Heyuan Guangdong 517000, China;

3. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To address the limited radio spectrum resources for high-speed data transmission in low-altitude unmanned aerial vehicle(UAV) systems, this paper proposes a high-efficiency visible light transmission system for low-altitude UAVs based on the discrete Hartley transform(DHT). The system employs DHT to achieve real-domain modulation, eliminating the need for the Hermitian symmetric constraint required in conventional discrete Fourier transform(DFT) systems, thereby improving spectrum utilization. A corresponding system architecture and frequency-domain equalization scheme are designed, and theoretical expressions for the optical-domain energy efficiency and effective spectrum efficiency are derived. Simulation results show that compared with traditional optical orthogonal frequency division multiplexing systems using complex modulation, the proposed system achieves higher spectrum efficiency and transmission rates while maintaining the same bit error rate and effective spectrum efficiency performance.

Key words: low-altitude unmanned aerial vehicle, Hartley transform, visible light communication, energy efficiency, spectral efficiency

0 引言

无人驾驶空中飞行器(UAV)作为小型低空飞行

收稿日期:2025-08-09。

作者简介:张琳(1976—),女,山东烟台人,博士,副教授,IEEE高级会员,广东省高性能计算学会副秘书长。主要研究方向为无线通信网络安全、深度学习、神经网络。主持完成国家级、省部级项目5项,荣获省部级科技进步一等奖、二等奖各1项。



终端,具有视距通信、高速移动、灵活高效组网、低成本部署等优势,能够有效提升地基通信网络的服务质量。低空 UAV 物联网(UAV-IoT)不仅可作为卫星通信与海基通信的无线中继节点,支撑“空天地海”一体化泛在通信体系中的空域连接,还可集成各类传感器与边缘计算模块,实现实时数据采集、边缘计算与通信共享的融合服务,构建具备“通信感知融合”能力的空中边缘计算(AEC)平台,广泛应用于智能视频监控、物流运输等多种 IoT 场景。因此,UAV-IoT 正逐渐形

张琳,罗文锋,叶林钧,等:一种基于哈特莱变换的低空 UAV 可见光高效传输系统

集成数据感知、通信中继、辅助计算与物流运输于一体的立体功能网络,为众多经济领域赋能。近年来,该技术已在智慧城市、智慧农业及军事等领域取得显著进展^[1]。

然而,随着联网设备数量的急剧增长,传统射频(RF)通信频谱资源日益紧张,亟需开发更高频段的空白频谱。在此背景下,可见光通信(VLC)技术应运而生^[2]。与 RF 通信相比,VLC 具备以下突出优势^[3-4]:可见光频段(380~780 nm)具备超过 400 THz 的免授权带宽,可有效缓解频谱资源短缺问题;不产生电磁干扰,适用于飞机、医院和水下等 RF 敏感场景;光信号对人眼安全,且发光二极管(LED)光源具备低功耗、长寿命特性,通信方式绿色经济;可见光无法穿透非透明障碍物,可有效抑制小区间干扰并增强通信安全。基于上述特点,VLC 受到学术界与工业界的广泛关注。

在 VLC 系统中,如何充分利用光源的发光特性与信道传输特性,实现信息的高效可靠传输,是其核心研究课题之一。传统的光 OFDM(O-OFDM)系统基于离散傅里叶变换(DFT)(双称 DFT-OFDM 系统),因具备高频谱效率和抗多径能力,在无线光通信中得到广泛研究,包括直流偏置光 OFDM(DCO-OFDM)^[5-6]和非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)^[7-8]2 种典型方案。然而,这种系统需通过载波的厄米特对称构造实值信号,以适应强度调制与直接检测(IM/DD)方式,导致频谱利用率下降,限制了系统传输性能的进一步提升。

针对上述问题,本文提出一种基于哈特莱变换(DHT)的低空 UAV 可见光高效传输系统(下文简称 DHT-OFDM 系统),提高频谱利用率和传输效率,满足低空 UAV-IoT 中视频、图像等多媒体业务的高速传输。

1 低空 UAV-IoT 网络架构及其信道特性

超越第五代移动通信技术(5G)网络中,得益于低空 UAV 所具有的高移动性、灵活部署和覆盖范围广等优点,UAV 可作为空中中继节点接入网络,以提高地面通信系统的通信容量并扩大通信范围^[9]。在 6G 通信网络中,低空 UAV-IoT 被视为空天地一体化网络(SAGIN)的重要组成部分^[10]。图 1 为基于低空 UAV-IoT SAGIN 的网络架构。

天基网络主要由绕地轨道卫星组成,海基网络主要由海上平台的舰艇构成,地基网络则是由地面基站与通信设备组成的无线通信网络,而空基网络则是通

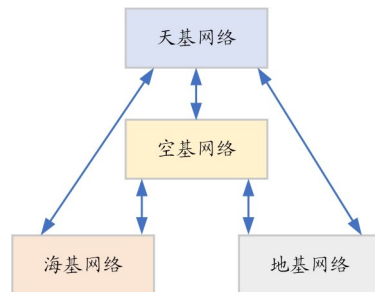


图1 基于低空 UAV-IoT SAGIN 的网络架构

过在低空空域中部署 UAV 实现空中自组网,构建低空 UAV-IoT,为海基、地基与天基网络之间的连接提供中继接入,以实现 6G 网络在空、天、地、海全域覆盖的愿景^[11-12]。

基于低空 UAV-IoT 的 SAGIN 网络架构以空对地链路(A2G)和空对空链路(A2A)的双链路协同为核心。然而,低空 UAV 具有灵活移动的特性,A2G 链路与 A2A 链路的通信信道将同时受到 UAV 三维空间运动与复杂环境散射的影响,其动态特性表现为以下特征:

1)高速移动引发的快速时变效应:UAV 空中飞行的典型运动速度范围为 0~50 m/s,这将导致信道相干时间缩短至毫秒级,从而对传统导频信道估计方法的精度造成影响。

2)三维运动导致的复合多普勒扩展:UAV 与地面设施之间的相对运动不仅产生线性多普勒频移,其高度变化与姿态调整(如俯仰、横滚、偏航等)还会引入非线性频移分量,形成复合多普勒扩展效应,影响信号接收的可靠性。

3)机体结构与旋翼遮挡引发的航空器阴影效应:UAV 螺旋桨旋转与机身金属结构对电磁波传播路径的周期性遮挡,导致接收信号功率呈现类周期性衰落。

4)复杂地形与不稳定气象条件下的剧烈信道变化:在复杂地形和不稳定的气象条件下,信道特性变化较为剧烈,传统的二维信道模型难以准确描述空域中的信道特性,导致现有通信协议难以应对高速移动和快速变化的信道环境。

以上特征导致空基 UAV 通信信道存在显著的路径损耗和时变效应。A2G 链路受地面多径散射体分布的非均匀性(如建筑物、植被)及复杂地形遮挡的影响,其小尺度衰落呈现空间非平稳性。而 A2A 链路由于空中散射体稀疏,多径分量数量较少,信道冲激响应更

趋近于莱斯分布,其阴影衰落程度通常低于 A2G 链路。

2 DHT-OFDM 系统原理

DHT 是一种定义在实数傅里叶域中的三角变换方法,能够将实数输入序列直接映射为实数输出序列,无需引入厄米特对称条件。DHT 与 DFT 在数学上具有紧密联系,DFT 的实部与虚部分别对应于 DHT 偶部与奇部的相反数,因此可基于 DHT 实现 DFT 的运算;另一方面,若将 DHT 视为一组调制器,其生成的子载波之间仍保持正交特性,从而能够以 DHT 替代 DFT 实现 OFDM 多路传输。

为提升光 DFT-OFDM 系统的频谱效率,本文采用基于 DHT 的实数域调制方案。DHT-OFDM 系统的整体结构如图 2 所示。

与 DFT-OFDM 系统相比,在发射端与接收端,DHT-OFDM 系统分别采用逆 DHT(IDHT)与 DHT 取代 DFT-OFDM 系统中的 IDFT 和 DFT,以完成信号的复用与解复用。DHT 具有自反性,其正变换与逆变换在形式上一致,因此系统可使用相同的硬件结构实现复用与解复用功能。

在 DFT-OFDM 系统中,从正变换切换至逆变换时,需对变换核函数中的复指数部分增加控制虚部符号反转的功能。而 DHT 在输入符号向量为复数时输出复数,在输入实数时输出实数。因此,当系统采用实数调制方式(如二进制相移键控等相位调制)时,DHT-OFDM 系统的频域符号无需满足厄米特对称条件,经变换后即可得到实数的 OFDM 信号。

令 T_s 表示调制模块的输出符号周期, L 表示每个 OFDM 符号周期 T_s^{OFDM} 内可传输的符号的总数,则第

$i(1 \leq i \leq L)$ 个符号看作一维实数符号强度值输入到对应的 DHT-OFDM 调制模块后,可得实值 OFDM 信号样点。

令 $x(n)$ 表示 OFDM 时域符号的第 n 个样点信号,则其可由 IDHT 表示为

$$C_{N \times N} = \begin{bmatrix} h(0) & 0 & \cdots & 0 & h(V-1) & \cdots & h(1) \\ h(1) & h(0) & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & h(V-1) \\ h(V-1) & h(V-2) & \ddots & h(0) & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & h(V-1) & \ddots & h(1) & h(0) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & h(V-1) & h(V-2) & \cdots & h(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

(1)

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \text{cas}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad \text{式 中} \quad :$$

$n = 0, 1, \cdots, N-1$, $\text{cas}(\cdot) = \cos(\cdot) + \sin(\cdot)$, $X(k)$ 为频域中第 k 个子载波上的符号, N 表示子载波的总个数。对应地,由时域符号到频域符号的解调可以由 DHT 实现,如式(2)所示。

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

若采用矩阵表示,可令 D 表示 IDHT 变换,其表达式为

$$D = \frac{1}{\sqrt{N}} \times \begin{bmatrix} D_N^{[0]} & D_N^{[0]} & D_N^{[0]} & \cdots & D_N^{[0]} \\ D_N^{[1 \times 1]} & D_N^{[1 \times 1]} & D_N^{[1 \times 2]} & \cdots & D_N^{[1 \times (N-1)]} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_N^{[(N-2) \times 1]} & D_N^{[(N-2) \times 1]} & D_N^{[(N-2) \times 2]} & \cdots & D_N^{[(N-2) \times (N-1)]} \\ D_N^{[(N-1) \times 1]} & D_N^{[(N-1) \times 1]} & D_N^{[(N-1) \times 2]} & \cdots & D_N^{[(N-1) \times (N-1)]} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $D_N^{[n \times k]} = \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)$, 可得发射端信号 x 的表达式为

$$x = DX \quad (4)$$

式中: x 表示 OFDM 时域符号的样点向量, $x = [x(0), x(1), \cdots, x(N-1)]^T$; X 表示频域符号向量, $[X] = [X(0), X(1), \cdots, X(N-1)]^T$ 。

在接收端去除循环前缀后,接收信号 $y = [y(0), y(1), \cdots, y(N-1)]^T$ 可以表示为

$$y = Cx + n \quad (5)$$

式中: $h(V)$ 为对应的离散时间信道冲激响应。

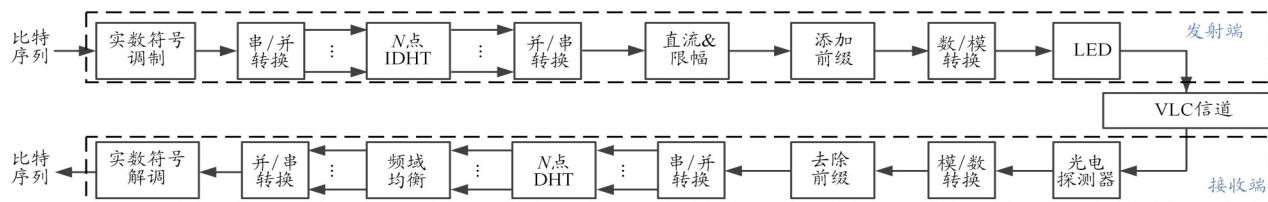


图2 DHT-OFDM 系统框图

张琳,罗文锋,叶林钧,等:一种基于哈特莱变换的低空 UAV 可见光高效传输系统

式中: $n = [n(0), n(1), \dots, n(N-1)]^T$, 而信道卷积矩阵 C 为循环矩阵, 其表达式为

3 理论性能度量

3.1 有效频谱效率(ESE)

为了全面衡量系统频谱效率, 本文采用 ESE 这一指标来对 DHT-OFDM 及传统 O-OFDM 系统的频谱利用率进行考察。ESE 定义为

$$S_{\text{ESE}} = \frac{(1 - P_{\text{FER}})M_{\text{F}}}{TB} = \frac{(1 - P_{\text{FER}})m_{\text{e}}}{Tf_{\text{s}}} \quad (7)$$

式中: P_{FER} 表示 OFDM 信号的误帧率, M_{F} 表示每帧的有效信息比特数目, m_{e} 表示平均到每个子载波的有效信息比特数目; T 表示每帧的时长, 若取一个 OFDM 符号为一帧, 则每帧的时长等于每个 OFDM 符号的时长, 有 $T = T_{\text{s}}^{\text{OFDM}}$; B 表示系统带宽, $B = Nf_{\text{s}}$, 而 f_{s} 表示子载波间的频率间隔。另外, 由于循环前缀的长度通常远小于 OFDM 符号长度, 故在 ESE 的计算中忽略了循环前缀的影响。

对于传统的基于 DFT 的 ACO-OFDM 和 DCO-OFDM 系统(下文简称 ACO-OFDM、DCO-OFDM 系统), 以及对应的基于 DHT 的方案, 有效信息比特数目 M_{F} 和 m_{e} 如表 1 所示。

表 1 不同 O-OFDM 方案中 M_{F} 和 m_{e} 的取值

系统方案	M_{F}	m_{e}
ACO-OFDM	$\frac{N}{4} \log_2 M$	$\frac{1}{4} \log_2 M$
DHT-ACO-OFDM	$\frac{N}{2} \log_2 M$	$\frac{1}{2} \log_2 M$
DCO-OFDM	$\left(\frac{N}{2} - 1\right) \log_2 M$	$\frac{N-2}{2N} \log_2 M$
DHT-DCO-OFDM	$(N-1) \log_2 M$	$\frac{N-1}{N} \log_2 M$

3.2 电域及光域信噪比与光域能量效率

在传统 O-OFDM 系统中, 误码率(BER)取决于系统接收端在直接检测后所得到的电信号的信噪比, 即电域信噪比 $E_{\text{b(elec)}}/N_0$; 而在实际系统中, 主要的限制因素通常为光信号的平均发送光功率。对于光信号 $\mathbf{x}$, 由于强度调制, 故其光域功率 P_{opt} 取决于 $E\{\mathbf{x}\}$, 而其电域功率 P_{elec} 取决于 $E\{\mathbf{x}^2\}$, 因此光域功率与电域功率的相互转换与时域信号的统计特性有关。此外, 光域信噪比 $E_{\text{b(opt)}/N_0}$ 同样也是考察不同 O-OFDM 系统的光域能量效率时常用的参数。

若定义 $P_{\text{opt}} = E\{\mathbf{x}\}$ 和 $P_{\text{elec}} = E\{\mathbf{x}^2\}$, 对于 DCO-OFDM, 关于光域信噪比与电域信噪比的转换关系为

$$\frac{E_{\text{b(opt)}}^{\text{DCO}}}{N_0} = \frac{\eta^2}{1 + \eta^2} \frac{E_{\text{b(elec)}}^{\text{DCO}}}{N_0} \quad (8)$$

式中: η 表示 DCO-OFDM 中直流偏置水平的参量。

而对于 ACO-OFDM 则有

$$\frac{E_{\text{b(opt)}}^{\text{ACO}}}{N_0} = \frac{1}{\pi} \frac{E_{\text{b(elec)}}^{\text{ACO}}}{N_0} \quad (9)$$

为衡量不同系统的光域能量效率, 可以采用归一化 $E_{\text{b(opt)}/N_0}$ 和归一化带宽/比特速率的关系。其中, 归一化 $E_{\text{b(opt)}/N_0}$ 是指信号平均光功率为 1 时的光域信噪比。调制信号的带宽定义为信号频率谱的第一个零点位置, 通过将不同调制信号的带宽归一化到具有相同比特速率的开关键控(OOK)信号的带宽时, 即得到所谓归一化带宽, 记为 B_{norm} 。对于 DCO-OFDM 和 ACO-OFDM 信号, 其频率谱的第一个零点均位于归一化频率 $(1 + 2/N)$ 处。因此, 若调制符号阶数为 M , 信号比特速率为 B_{R} , 则对于 DCO-OFDM、ACO-OFDM、DHT-DCO-OFDM、DHT-ACO-OFDM 的 $B_{\text{R}}/B_{\text{norm}}$ 分别为 $\frac{\log_2 M}{1 + 2/N}$ 、 $\frac{\log_2 M}{2(1 + 2/N)}$ 、 $\frac{2 \log_2 M}{1 + 2/N}$ 、 $\frac{\log_2 M}{1 + 2/N}$ 。

4 仿真设置与结果分析

本文构建了低空 UAV 可见光信道模型和 DHT-OFDM 的系统模型。在系统 BER 与 ESE 的仿真中, 每一个 OFDM 模块的子载波数目设为 $N = 1\,024$, 仿真中发射端总共发送 2×10^5 个 OFDM 符号。传统 O-OFDM 系统使用四进制正交幅度调制(4QAM)、16QAM、64QAM、256QAM、1 024QAM 调制符号, 对应地, DHT-OFDM 系统使用二进制相移键控(BPSK)、四进制脉冲幅度调制(4PAM)、8PAM、16PAM、32PAM 调制符号, 以使 2 种系统在每 OFDM 符号的数据量上保持一致。在计算 ESE 时对式(7)中的 Tf_{s} 进行了归一化。

在低空 UAV 可见光信道模型中, 光源位于低空 UAV 坐标 $(0, 0, 3 \text{ cm})$ 处且指向正下方, 接收机位于地面坐标 $(-2 \text{ cm}, -2 \text{ cm}, 0)$ 处且指向正上方。在对信道冲激响应的计算中, 本文考虑了视距路径(LOS)视距路径以及一次反射路径的分量, 其余仿真参数如表 2 所示。

4.1 低空 UAV 可见光多径信道中的 BER 性能

低空 UAV 可见光多径传输信道中 ACO-OFDM 与 DHT-ACO-OFDM 系统的 BER 性能曲线如图 3 所示。可以看出, 本文采用 M^2 阶 QAM 的 ACO-OFDM 系统与

表2 VLC 多径传输信道仿真参数设置

参数	参数值
房间尺寸/m	5(长)×5(宽)×3(高)
LED 位置	(0,0,3 cm)
LED 半功率角/(°)	60
PD 响应度/(A/W)	1
墙壁反射率	0.8
接收位置	(-2 cm,-2 cm,0)
接收视场角/(°)	85
PD 接收面积/cm ²	1

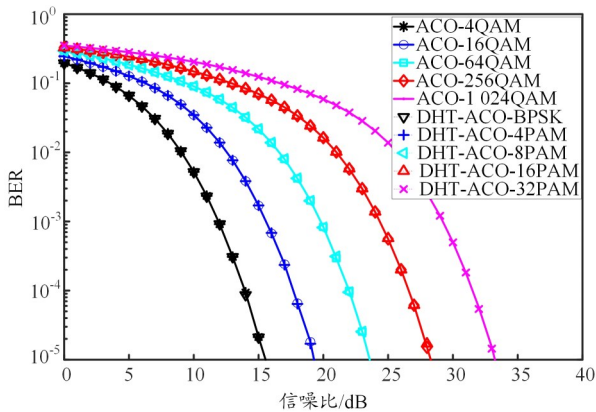


图3 ACO-OFDM与DHT-ACO-OFDM

在低空 UAV 可见光多径信道的 BER 性能

采用 M 阶 BPSK 或 PAM 的 DHT-ACO-OFDM 系统具有相同的 BER 性能。这说明基于 DHT 的“双抽头”频域均衡方法在 DHT-ACO-OFDM 系统中所起的作用,与基于 DFT 的“单抽头”频域均衡在 ACO-OFDM 系统中的作用相当。

在直流偏置 I_{DC} 分别为 13、7 dB 时,DCO-OFDM 与 DHT-DCO-OFDM 系统在低空 UAV 可见光多径传输信道中的 BER 性能曲线如图 4 所示。与 ACO-OFDM 系统相似,采用 M^2 阶 QAM 符号的传统 DCO-OFDM 系统与采用 M 阶 BPSK 或 PAM 符号的 DHT-DCO-OFDM 系统具有相同 BER 性能。此外,对应于不同的直流偏置水平,DCO-OFDM 系统的性能差异显著。当直流偏置较大($I_{DC}=13$ dB)时,信号中引入的限幅噪声较小,在信噪比足够大的情况下,即使对于高阶调制符号依然可以达到理想的 BER 水平,如 10^{-3} 或更低;当直流偏置较小($I_{DC}=7$ dB)时,信号受限于限幅噪声,即使在信噪比足够大的情况下,高阶调制的 BER 会明显增大。

4.2 低空 UAV 可见光多径信道中的 ESE 性能

图 5 为低空 UAV 可见光多径信道中 ACO-OFDM

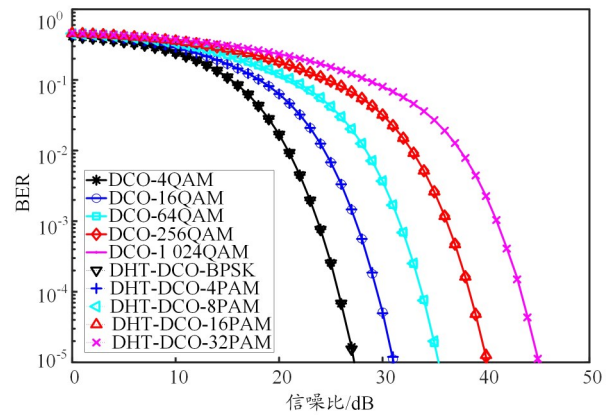
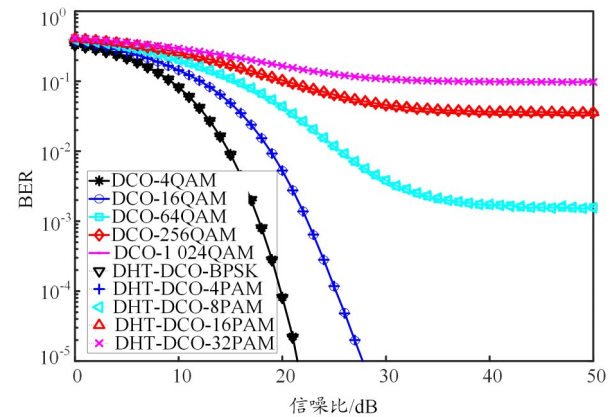
(a) $I_{DC} = 13$ dB(b) $I_{DC} = 7$ dB

图4 DCO-OFDM与DHT-DCO-OFDM

在低空 UAV 可见光多径信道的 BER 性能

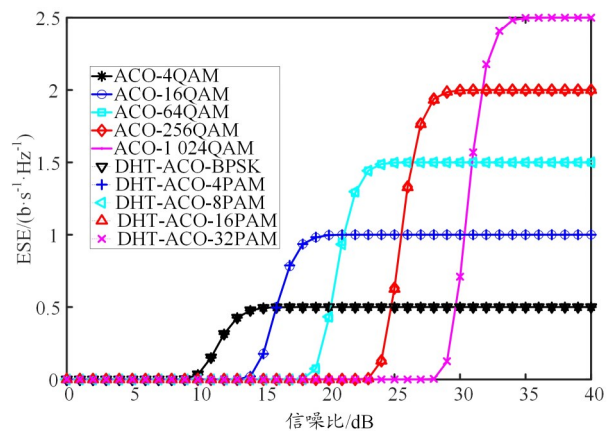


图5 ACO-OFDM与DHT-ACO-OFDM

在低空 UAV 可见光多径信道的 ESE 性能

与 DHT-ACO-OFDM 系统的 ESE 曲线。可以看出,采用 M 阶 BPSK 或 PAM 的 DHT-ACO-OFDM 系统与采用 M^2 阶 QAM 的 ACO-OFDM 系统具有相同的曲线上升趋势,而由于 DHT-ACO-OFDM 系统无需厄米特对称,独

张琳,罗文锋,叶林钧,等:一种基于哈特莱变换的低空UAV可见光高效传输系统

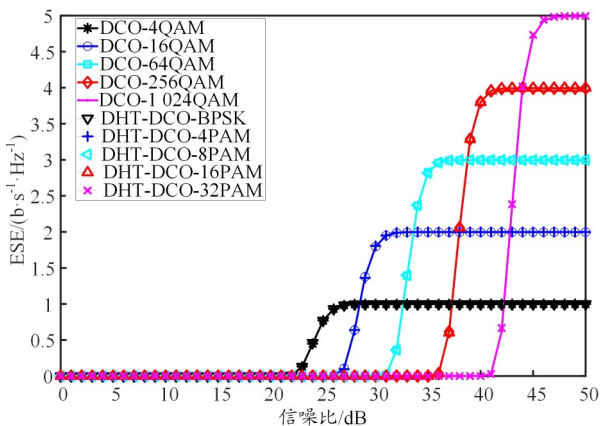
立符号数的增倍同样使得其具有与ACO-OFDM相同的最大频谱利用率。

当直流偏置 I_{DC} 分别为13、7 dB时,DCO-OFDM与DHT-DCO-OFDM系统在可见光多径信道中的有效频谱效率曲线如图6所示。可以看出,采用 M 阶QAM的DCO-OFDM系统与采用 M 阶BPSK或PAM的DHT-DCO-OFDM系统具有相近性能,其曲线上升趋势和最大ESE值均相同。当 $I_{DC}=13$ dB时,采用BPSK调制的DHT-DCO-OFDM系统需要约27 dB信噪比才能达到1 b/(s·Hz⁻¹)的最大ESE;当 $I_{DC}=7$ dB时,仅BPSK(4QAM)和4PAM(16QAM)调制系统能够达到最大ESE。

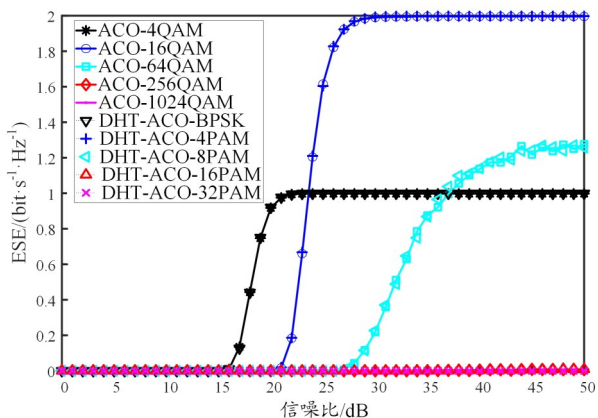
4.3 2种系统的性能对比

本文不仅仿真了DHT-OFDM系统在低空UAV VLC的多径信道性能,亦对比了其在加性高斯白噪声(AWGN)信道下的性能。结果表明,二者在误码率与符号估计误差方面表现相近,主要差异如下:

1) ACO-OFDM与DHT-ACO-OFDM的BER性能



(a) $I_{DC} = 13$ dB



(b) $I_{DC} = 7$ dB

图6 DCO-OFDM与DHT-DCO-OFDM
在低空UAV可见光多径信道的ESE性能

在低空UAV可见光多径信道模型中,尽管频域均衡方法能够有效抑制多径干扰,但“迫零”均衡会引入噪声放大,因此系统在多径信道中的BER性能仍低于AWGN信道。在相同系统参数下,为达到与AWGN信道相同的BER水平,多径信道中需要更高的信噪比。

2) DCO-OFDM与DHT-DCO-OFDM的BER性能

与AWGN信道相比,低空UAV可见光多径信道中相同系统的BER性能有所下降。例如,在AWGN信道中,采用32PAM调制的DHT-DCO-OFDM系统在约22.5 dB信噪比时可实现 10^{-5} 的BER,而在多径信道中则需要约27 dB。

3) ACO-OFDM与DHT-ACO-OFDM的ESE性能

与AWGN信道相比,低空UAV可见光多径信道中相同参数系统需额外约3 dB的信噪比才能达到其最大ESE。例如,对于BPSK(等效于4QAM)调制系统,在AWGN信道中约32 dB时可达2.5 b/(s·Hz⁻¹)的最大ESE,而在多径信道中则需要约35 dB。

4) DCO-OFDM与DHT-DCO-OFDM的ESE性能

在达到最大ESE时,低空UAV可见光多径信道比AWGN信道中需要更大的信噪比。

5 结束语

本文针对UAV通信系统因RF资源受限而导致传输速率不足的问题,提出了本文提出一种DHT-OFDM系统,设计了系统架构与均衡方案,并推导了光域能量效率与ESE的理论表达式。通过在AWGN信道和低空UAV可见光多径信道中对DHT-OFDM系统进行BER与ESE的仿真分析,并与传统O-OFDM系统进行比较,结果表明:DHT通过消除厄米特对称约束,有效提升了系统频谱效率;此外,DHT-OFDM系统与DFT-OFDM系统在BER与ESE方面性能相当。在实际系统中,为进一步提升频谱效率,O-OFDM还可与颜色键控等实数调制方案级联使用,从而进一步增强系统传输能力。

参考文献:

- [1] Cao X, Yang P, Alzenad M, et al. Airborne communication networks: a survey[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1907-1926.
- [2] Wu J, Zhang P, Huang Y, et al. Exploring the potential of utilizing nonlinear-of-sight channels for networking in visible light communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(15): 31723-31736.
- [3] Liu Y, Sheng C, Wang Y, et al. Real-valued precoding-enabled ACHO-FBMC for band-limited visible light communications[J]. IEEE Photonics

Technology Letters, 2025, 37(10): 595–598.

[4] Qiu J, Wang J, Lian J, et al. Clipping distortion analysis for DFT-precoded visible light communication OFDM systems with dimming control[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(22): 37246–37256.

[5] Carruthers J B, Kahn J M. Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(3): 538–546.

[6] Gonzalez O, Perez-Jimenez R, Rodriguez S, et al. OFDM over indoor wireless optical channel[J]. IEEE Proceedings-Optoelectronics, 2005, 152(4): 199–204.

[7] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM[J]. Electronics Letters, 2006, 42(6): 370–372.

[8] 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.

[9] Vaezi M, Azari A, Khosravirad S R, et al. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: a survey on 5G advances and the road toward 6G[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2022, 24(2): 1117–1174.

[10] 张海君,夏清悦,马旭,等. 6G 低空通信场景下的 UAV 部署优化研究[J]. 航空学报, 2024, 46(11): 148–173.

[11] Wang L, Yang H, Long J, et al. Enabling ultra-dense UAV-aided network with overlapped spectrum sharing: potential and approaches[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 85–91.

[12] 陈新颖,盛敏,李博,等. 面向 6G 的 UAV 通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781–789.