

可见光通信系统调制方式对传输速率的影响分析

朱立志

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：可见光通信（VLC）技术以可见光为载体实现信息传输，调制方式作为核心环节直接影响传输速率。本文分析不同调制方式（如OOK、PPM、OFDM等）在频谱效率、抗干扰能力及实现复杂度上的差异，探讨其与传输速率的关联机制。研究发现，高阶调制虽能提升速率，但受限于信道噪声与器件带宽；多载波调制通过并行传输优化频谱利用率，但需平衡计算复杂度与系统成本。结合VLC应用场景需求，提出调制方式选择的优化策略，为提升传输性能提供理论依据。

【关键词】：可见光通信；调制方式；传输速率；频谱效率；多载波调制

DOI:10.12417/2705-0998.25.10.060

引言

随着光电器件的快速发展，可见光通信凭借高带宽、低电磁干扰等优势成为研究热点。调制方式作为信号与光载波的映射规则，直接影响信息传输效率。现有调制技术涵盖开关键控（OOK）、脉冲位置调制（PPM）及正交频分复用（OFDM）等，其频谱利用率、抗噪声能力及实现复杂度差异显著。本文从调制方式特性出发，分析其对传输速率的影响机制，为系统优化提供参考。

1 调制方式分类与基本原理

1.1 单载波调制的核心机制与特性

单载波调制是可见光通信中最早应用的技术之一，其核心在于通过控制光源的开关状态实现二进制信息的传递。以OOK为例，该调制方式通过“有光”和“无光”两种状态分别对应“1”和“0”，实现简单且易于实现。其频谱效率较低，因为每个符号仅携带1比特信息，且信号带宽与传输速率直接相关。OOK对环境光噪声敏感，误码率随信噪比下降迅速增加，尤其在强噪声环境下性能显著下降。尽管如此，OOK在低成本、低速率应用场景中仍具有优势，如智能家居中的简单控制信号传输。单载波调制的另一类技术，如脉冲幅度调制（PAM），通过改变脉冲幅度传递信息，可提升单符号信息量，但同样受限于信道噪声与器件带宽。PAM的实现复杂度略高于OOK，但频谱效率提升有限，且对信噪比要求更高。

1.2 多载波调制的原理与优势

多载波调制以OFDM为核心，针对VLC非负实值的要求，衍生出多种变体，例如直流偏置OFDM（DCO-OFDM）、不对称限幅OFDM（ACO-OFDM）以及翻转OFDM（Flip-OFDM）等。多载波正交调制通过将数据流分配至多个正交子载波实现并行传输，显著提升了频谱效率，因为每个子载波可独立调制信息，且子载波间正交性避免了符号间干扰。OFDM还通过循环前缀插入技术，有效抵抗多径效应导致的符号间干扰，进一步提升了传输可靠性。OFDM的频谱利用率可通过动态子载波分配技术进一步优化，根据信道状态调整各子载波的发射功率

与调制方式，实现资源的高效利用。多载波调制的另一优势在于其灵活性。通过调整子载波数量与调制阶数，OFDM可适配不同传输速率与可靠性需求。在高速率传输场景中，可增加子载波数量并采用高阶调制；而在低速率、高可靠性场景中，则可减少子载波数量并采用低阶调制。

1.3 其他调制方式的特性与适用场景

除OOK与OFDM外，PPM等调制方式也具有独特特性。PPM通过脉冲位置编码信息，抗噪声能力强，但带宽利用率较低。这种调制方式适用于长距离、低速率且对可靠性要求较高的场景，如水下通信或矿井通信。PPM的实现复杂度适中，但需高精度时序控制以确保脉冲位置的准确性。差分脉冲位置调制（DPPM）是PPM的变体，通过差分编码增强抗干扰能力。DPPM在相邻脉冲间引入差分关系，使得接收端可通过比较相邻脉冲位置差异解码信息，进一步提升了抗噪声能力。DPPM的带宽利用率仍较低，且需额外的差分编码与解码电路，增加了系统复杂度。还有频移键控（FSK）与相移键控（PSK）等调制方式，通过改变光信号的频率或相位传递信息。

2 调制方式对频谱效率的影响

2.1 单载波调制的频谱效率瓶颈、

单载波调制的频谱效率受限于奈奎斯特准则，即信号带宽需至少为传输速率的两倍。以OOK为例，其频谱效率较低，因为每个符号仅携带1比特信息，且信号波形简单，频谱特性单一。在高速率传输需求下，单载波调制的频谱效率瓶颈愈发明显，需通过增加信号带宽或采用更高阶调制方式来提升性能。增加带宽会推高系统成本，而高阶调制则对信噪比要求更高。单载波调制的频谱效率提升还面临技术挑战。采用高阶PAM调制虽可提升单符号信息量，但需更高的信噪比以维持较低的误码率。高阶PAM对器件线性度要求较高，需高精度模数转换器（ADC）与数模转换器（DAC），进一步推高系统成本。单载波调制在频谱效率提升方面存在局限性，需结合其他技术或调制方式实现突破。

2.2 多载波调制的频谱优化策略

多载波调制通过并行传输多个子载波信号，显著提升了频谱效率。OFDM 的子载波间正交性避免了符号间干扰，使得信号带宽可更接近理论极限。OFDM 还可通过动态子载波分配技术，根据信道状态优化子载波利用率。在信道条件较好的子载波上采用高阶调制，而在信道条件较差的子载波上采用低阶调制，以实现频谱效率与传输可靠性的平衡。多载波调制的频谱优化还需考虑子载波数量与计算复杂度的平衡。子载波数量过多会增加 FFT 处理负担，推高系统成本；而子载波数量过少则无法充分发挥并行传输的优势。

2.3 高阶调制对频谱效率的提升与挑战

高阶调制如 16-QAM、64-QAM 等通过增加每个符号携带的信息量，显著提升了频谱效率。这种调制方式在相同带宽下可传输更多数据，但需更高的信噪比以维持较低的误码率。高阶调制对信道条件要求苛刻，尤其在可见光通信中，环境光噪声、多径效应等因素均会影响信噪比。高阶调制的应用需结合信道估计与均衡技术，以动态调整调制阶数并优化传输性能。高阶调制还面临实现复杂度的挑战。采用高阶调制需高精度 ADC 与 DAC，以及复杂的信号处理算法，如星座图映射与解映射、信道均衡等。

3 调制方式对抗干扰能力的影响

3.1 单载波调制的抗干扰能力与局限性

单载波调制如 OOK 对环境光噪声敏感，误码率随信噪比下降迅速增加。这种调制方式在强噪声环境下性能显著下降，需通过增加发射功率或采用更复杂的信号处理算法来提升抗干扰能力。增加发射功率会推高能耗并可能引发光污染问题；而复杂信号处理算法则可能增加系统复杂度与成本。单载波调制在抗干扰能力方面存在局限性，需结合具体应用场景进行权衡。单载波调制的抗干扰能力还可通过差分编码或纠错编码技术提升。差分编码通过比较相邻符号差异解调信息，对噪声具有天然的抵抗能力；而纠错编码则通过引入冗余信息增强抗突发错误能力。这些技术均会增加系统复杂度与开销，需结合性能需求与成本考虑进行选择。

3.2 多载波调制的抗干扰策略与优势

多载波调制如 OFDM 通过子载波独立调制与动态功率分配技术，提升了抗干扰能力。子载波间正交性避免了符号间干扰，而动态功率分配则可根据信道状态优化各子载波的发射功率，进一步提升传输可靠性。OFDM 还可结合信道编码与交织技术，通过冗余编码与交织处理增强抗突发错误能力。多载波调制的抗干扰优势还体现在其灵活性上。通过调整子载波数量与调制阶数，OFDM 可适配不同信道条件与干扰环境。在强噪声环境下，可减少子载波数量并采用低阶调制；而在弱噪声环境下，则可增加子载波数量并采用高阶调制。这种灵活性使得

OFDM 在复杂多变的信道条件下仍能保持较低的误码率。

3.3 其他调制方式的抗干扰特性与优化方向

除 OOK 与 OFDM 外，PPM 等调制方式也具有独特的抗干扰特性。PPM 通过脉冲位置编码信息，对噪声具有天然的抵抗能力。其带宽利用率较低，需通过优化脉冲位置编码方式或结合其他调制技术来提升性能。可采用差分 PPM 或结合 PAM 调制，以在保持抗干扰能力的同时提升频谱效率。差分调制技术如 DPPM 也可通过差分编码增强抗干扰能力。DPPM 在相邻脉冲间引入差分关系，使得接收端可通过比较相邻脉冲位置差异解码信息。DPPM 的带宽利用率仍较低，且需额外的差分编码与解码电路。未来研究可探索将差分调制与多载波调制融合，以综合提升抗干扰能力与传输速率。

4 调制方式与系统复杂度的关系

4.1 单载波调制的系统复杂度与成本优势

单载波调制如 OOK 实现简单，仅需驱动电路控制光源的开关状态，无需复杂的信号处理算法。这种调制方式对硬件要求较低，适合低成本、低速率应用场景。在智能家居中的简单控制信号传输或短距离无线通信中，OOK 可凭借其低成本与低复杂度优势占据一席之地。单载波调制的系统复杂度还可通过简化电路设计进一步降低。可采用低功耗、低成本的微控制器实现 OOK 调制与解调，减少外围电路与器件数量。单载波调制还可结合简单的纠错编码技术，如奇偶校验或汉明码，以提升传输可靠性而不显著增加复杂度。

4.2 多载波调制的系统复杂度与性能权衡

多载波调制如 OFDM 需进行 FFT 处理，对数字信号处理器（DSP）性能要求较高。OFDM 还需结合信道估计、均衡与编码等技术，进一步增加了系统复杂度。这些复杂处理带来了显著的性能提升，如频谱效率优化与抗干扰能力增强。在高速率、长距离可见光通信中，多载波调制的性能优势使其成为首选方案。多载波调制的系统复杂度可通过算法优化与硬件设计创新降低。可采用低复杂度 FFT 算法或自适应调制技术，减少计算负担并提升性能。还可开发高性能、低功耗的 DSP 芯片与专用集成电路（ASIC），以满足多载波调制的处理需求。这些优化措施有助于平衡性能与成本，推动多载波调制在可见光通信中的广泛应用。

4.3 系统复杂度优化策略与未来方向

为降低系统复杂度，可探索算法优化与硬件设计创新。算法优化方面，可研究低复杂度 FFT 算法、自适应调制与编码技术等，以减少计算负担并提升性能。可采用基于快速傅里叶变换的稀疏 FFT 算法，减少计算量并提升实时性。还可结合机器学习算法，如神经网络或支持向量机，实现智能调制与编码参数优化。硬件设计方面，可开发高性能、低功耗的 DSP 芯片与 ASIC，以满足多载波调制的处理需求。这些芯片需具备高速运

算能力、低功耗特性与可编程性,以适配不同调制方式与信道条件。还可探索将可见光通信与其他无线通信技术融合,如射频通信或毫米波通信,以实现优势互补并降低系统复杂度。

5 调制方式优化策略与未来方向

5.1 基于应用场景的调制方式选择策略

调制方式的选择需综合考虑传输速率、可靠性、实现复杂度及成本等因素。在室内短距离通信中,可优先采用 OFDM 或高阶调制,以通过多载波并行传输与频谱效率优化提升速率。在智能照明系统中,可通过 OFDM 实现高速数据传输与照明控制功能的融合。在长距离或强噪声环境下,宜选择 PPM 或低阶调制,以牺牲速率换取可靠性。在水下通信或矿井通信中,PPM 的抗干扰能力可确保信息传输的稳定性。还需考虑应用场景对能耗、成本及安全性的要求,以选择最适配的调制方式。

5.2 自适应调制技术的探索与应用

自适应调制技术可根据实时信道状态动态切换调制方式,以优化传输性能。这种技术需结合信道估计与预测算法,以准确感知信道变化并调整调制参数。在信道条件较好时,可采用高阶调制提升速率;而在信道条件较差时,则切换至低阶调制确保可靠性。自适应调制还可结合机器学习算法实现更智能的调制方式选择与参数优化。可通过神经网络学习信道状态与调制参数间的映射关系,实现实时、动态的调制方式调整。这种

智能自适应调制技术有望进一步提升可见光通信的性能与灵活性。

5.3 可见光通信与其他技术的融合创新

可见光通信可与射频通信、毫米波通信等技术融合,以实现高速率、低延迟的混合通信系统。这种融合系统可充分利用不同技术的优势,如可见光通信的高带宽与低电磁干扰特性,以及射频通信的广覆盖与移动性支持。在室内定位与导航系统中,可通过可见光通信实现高精度定位,同时结合射频通信实现广域覆盖与数据传输。未来研究可探索混合通信系统的架构设计、资源分配与干扰管理等问题。可研究如何优化可见光与射频信号的频谱分配,以避免相互干扰并提升整体性能。还可探索将可见光通信与其他新兴技术融合,如物联网、人工智能等,以推动可见光通信技术的进一步发展。

6 结语

调制方式作为可见光通信系统的核心环节,对传输速率、频谱效率、抗干扰能力及系统复杂度具有显著影响。单载波调制以简单性见长但速率受限,多载波调制通过频谱优化与抗干扰能力提升性能但需平衡复杂度。未来需结合应用场景需求,探索自适应调制与混合通信技术,以实现速率与可靠性的协同优化。随着器件性能提升、算法优化及跨学科技术融合,可见光通信有望在高速率、低延迟、高可靠性领域展现更大潜力,为未来无线通信技术的发展提供新的方向。

参考文献:

- [1] 周颖,李宝龙,李正权.融合 VOOK 的混合 ACO-OFDM 可见光通信技术研究[J].光电子·激光,2020,31(05):556-562.
- [2] 魏同成,王岩红,林昌永,等.基于高阶 PAM 室内可见光通信系统设计与实现[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2021,41(05):53-58.
- [3] 徐宪莹,岳殿武.可见光通信中正交频分复用调制技术[J].中国光学,2021,14(03):516-527.
- [4] 王熹,李婕,罗鸣.DPPM 在相干光通信中的应用研究[J].光通信研究,2022,(05):18-23+32.