

基于高灵敏度光电探测器的长距离 光通信 OFDM 系统设计

谢福财

(中国人民解放军 91033 部队, 山东 青岛 266071)

摘要: 为解决长距离光通信中因非线性相位畸变导致子载波正交性破坏及误码率高的问题, 对基于高灵敏度光电探测器的正交频分复用系统进行了研究; 该系统在硬件层面集成高性能正交调制器、分布式拉曼放大器与超高响应度光电探测器, 以分别实现高质量光信号生成、链路损耗补偿与微弱信号检测; 在软件层面设计了抗相位畸变的 OFDM 信号生成方案, 并采用联合时频域均衡技术以优化从信号生成到解调的全流程; 实验测试结果表明, 该系统最高可实现 65 dB 的 OFDM 信号信噪比与 68% 的光纤链路损耗补偿率, 并将解调误码率最低降至 1.5%; 结论表明, 所述系统能有效提升长距离传输条件下的通信鲁棒性与质量。

关键词: 正交频分复用; 光通信; 长距离传输; 高灵敏度光电探测器; 光电二极管

Design of Long-Distance Optical Communication OFDM System Based on a High Sensitivity Photodetector

XIE Fucui

(Unit 91003 of the Chinese People's Liberation Army, Qingdao 266071, China)

Abstract: To solve the subcarrier orthogonality degradation and high bit error rate caused by nonlinear phase distortion in long-distance optical communication, based on a high-sensitivity optoelectronic detector, research is conducted on the orthogonal frequency division multiplexing system. At the hardware level, this system integrates a high-performance orthogonal modulator, a distributed Raman amplifier, and an ultra-high responsivity photo detector, achieving the high-quality optical signal generation, link loss compensation, and weak signal detection, respectively; At the software level, a phase distortion resistant orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal generation scheme is designed, and a joint time-frequency domain equalization technology is used to optimize entire process from signal generation to demodulation. Experimental test results show that the system can achieve a maximum signal-to-noise ratio of 65 dB for OFDM signals and a fiber link loss compensation rate of 68%, while reducing the demodulation error rate to a minimum of 1.5%. The conclusion indicates that the system can effectively improve its communication robustness and quality under long-distance transmission conditions.

Keywords: OFDM; optical communication; long distance transmission; high sensitivity photodetector; photodiode

0 引言

长距离光通信作为信息基础设施的核心组成部分, 在跨洋通信、深空探测等关键领域发挥着不可替代的作用。然而, 随着传输距离的延伸与数据容量的提升, 光通信系统在低信噪比、高衰减信道环境中面临严峻挑战^[1-2]。光纤信道的非线性特性会引发显著的相位畸变, 严重破坏传统正交频分复用 (OFDM, orthogonal fre-

quency division multiplexing) 系统中子载波间的正交性, 导致频域信道估计与相位补偿过程极为困难, 进而造成系统误码率居高不下。

针对上述问题, 已有研究提出了多种技术路线, 但仍存在一定局限性。例如, 文献 [3] 提出一种块状导频优化信道估计方案以提升混合非对称幅度截断光正交频分复用 (HACO-OFDM, hybrid asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing) 系统

收稿日期: 2025-09-19; 修回日期: 2025-10-24。

作者简介: 谢福财 (1979-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 谢福财. 基于高灵敏度光电探测器的长距离光通信 OFDM 系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(8): 240-247, 260.

的估计效率,然而,其固定的导频结构在时变信道中分辨率有限,无法准确跟踪快速的时变相位响应,导致频域插值误差累积。文献[4]提出改进聚类中心点的K-means算法以降低计算复杂度,但其算法核心对信道非线性响应的建模能力不足,导致该方案对非线性相位畸变的适应性较差,难以在低信噪比环境下保持子载波正交性;此外,文献[5]所设计的基于二进制开关键控(OOK, on-off keying)与自适应星座图优化(ACO, adaptive constellation optimization)-OFDM的混合系统对同步误差极为敏感,在长距离传输中易因时延扩展引发严重的子载波间干扰;文献[6]研究的非正交多址接入可见光通信(NOMA-CAP-VLC, non-orthogonal multiple access carrierless amplitude-phase visible light communication system)系统,采用载波相位估计与Volterra非线性均衡算法补偿相位偏移与非线性损伤。虽具备低复杂度优势,但其采用的Volterra非线性均衡算法对于超长距传输中复杂的相位畸变与子载波正交性破坏的耦合问题,补偿能力依然有限。

现有研究在应对长距离光通信挑战时,其核心缺陷主要体现在两方面:1)在算法层面,缺乏能够有效解耦并补偿“时频域转换过程中相位畸变与子载波正交性破坏”的协同信号处理机制;2)在硬件层面,传统光电探测器的响应度不足,直接制约了系统在极低信噪比条件下的检测灵敏度与解调下限。

为了针对性解决上述缺陷,设计了一种基于高灵敏度光电探测器的长距离光通信OFDM系统。所设计的技术方案与解决机制明确对应如下:

1)针对“相位畸变破坏子载波正交性”的缺陷,所设计系统并非仅简单设计抗相位畸变的信号生成方案,而是在软件层面引入了“联合时频域均衡”算法作为核心解决机制。该机制通过在频域进行初始信道估计与补偿,再在时域对残余的符号间干扰和相位噪声进行跟踪与滤除,这种迭代交互的均衡策略能够有效解耦相位畸变与子载波正交性破坏的恶性循环,从而针对性恢复子载波间的正交性。

2)针对“低信噪比下检测灵敏度不足”的缺陷,所设计系统的硬件方案的核心是采用超高响应度(0.6 A/W)的UTC-PD光电探测器。相较于传统PIN光电探测器或普通APD,UTC-PD在保持110 GHz超宽带宽和极低非线性失真的同时,其固有的高响应度特性能够将微弱光信号转换为更强的电信号。这一性能差异可直接量化地改善系统的检测下限,其转换增益比传统探测器提升约数倍,从而确保在接收端能够有效捕获被噪声淹没的信号,为后续低误码率解调奠定基础。

通过上述高性能硬件架构与智能信号处理算法的靶向性结合,设计系统旨在有效抑制非线性失真、量化提

升信号检测灵敏度,从而实现高质量、低误码的长距离光通信。下文将依次详细介绍系统的硬件设计、软件设计与实验验证。

1 系统硬件设计

此章节详细阐述为解决摘要所述“低信噪比、高衰减及非线性相位畸变”等核心难题而设计的3大核心硬件模块。各模块构成了高效协同的信号处理链。OFDM光信号生成模块从源头生成高质量、低畸变的光信号;分布式光纤链路损耗补偿模块负责在传输过程中对抗信号衰减与非线性效应;高灵敏度光电信号检测与转换模块则确保在接收端能够高效、准确地捕获并转换极度微弱的光信号,为最终的低误码率解调奠定基础。

1.1 利用正交调制器生成光信号

系统采用高性能的正交调制器,能够最大限度地保留原始信号的幅度与相位信息,抑制因调制器非线性引入的信号失真,为后续长距离传输提供一颗高质量信号,是保障整个系统子载波正交性和低误码率的基础。

正交调制器是设计系统发射端的关键硬件设备之一,主要承担着OFDM信号从电到光的转换任务,决定着OFDM信号生成的质量。与此同时,在长距离光通信OFDM信号传输过程中,正交调制器能够维持OFDM子载波的正交性,确保频谱利用率最大化,并能够通过控制自身偏置电压,抑制低频噪声与直流漂移,进而防止OFDM信号失真现象的发生^[7]。由此可见,正交调制器在长距离光通信OFDM系统中发挥着至关重要的作用,需要对其进行合理的选型与配置。

依据设计系统需求,选取型号为FTM7962EX的双偏振马赫-曾德尔调制器作为正交调制器。

为了适应长距离光通信系统的需求,对正交调制器(FTM7962EX)关键参数进行科学的配置,如下所示:

- 1) 调制带宽: 60 GHz;
- 2) 插入损耗: ≤ 5 dB;
- 3) 偏置电压漂移: < 1 mV/h;
- 4) 半波电压: ≤ 4.5 V;
- 5) 偏振消光比: ≥ 25 dB;
- 6) 驱动电压范围: 8~10 Vpp。

在设计系统集成过程中,正交调制器(FTM7962EX)主要安装在数字信号处理器后端,直接接收数模转换器输出的电OFDM信号,对其进行转换处理,生成最终的光OFDM信号。需要注意的是,正交调制器(FTM7962EX)输入端口需与数模转换器输出阻抗严格匹配,以此来避免反射现象的发生,从而降低OFDM信号畸变概率^[8]。与此同时,正交调制器(FTM7962EX)输入光功率必须低于其损伤阈值,只有这样才能降低OFDM信号的非线性损伤,从而保障

光电探测器 (UTC-PD) 结构如图 2 所示。

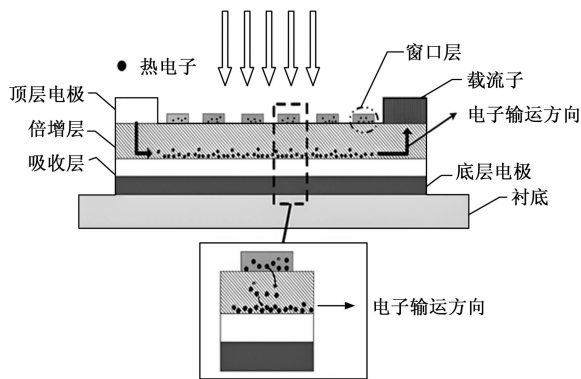


图 2 光电探测器 (UTC-PD) 结构图

高灵敏度光电探测器 (UTC-PD) 主要安装在接收端的核心位置, 并且在封装时需满足 40 dB 电磁屏蔽效能 (1~40 GHz), 以此来避免 OFDM 信号产生电容耦合干扰。与此同时, 为了提升光电探测器 (UTC-PD) 的灵敏度, 需要根据 OFDM 信号功率对其增益进行动态地调整与控制, 防止增益饱和现象的发生, 为 OFDM 信号检测与解调提供性能更优的硬件支撑^[11]。

上述过程完成了系统硬件——正交调制器、光放大器与光电探测器的选型、设计与配置, 并对其安装位置、注意事项等进行了详细的描述, 为设计系统集成及其运行提供有力的支持。

2 系统软件设计

2.1 频域转换下正交调制器 OFDM 信号生成

在长距离光通信中, 由于存在低信噪比、高衰减特性, 传输信道的非线性会引发相位畸变, 破坏了传统 OFDM 系统子载波正交性, 且难以补偿从时域到频域转换时信道的相位畸变, 导致信号解调误码率高。而先进行频域转换下正交调制器生成 OFDM 信号, 能利用正交调制使子载波间保持严格正交, 在后续传输即便遭遇信道不良影响, 也能凭借这种特性在接收端更有效分离各子载波承载的信息, 降低了因信道问题导致的误码率, 提升信号解调的准确性。

OFDM 是现今光通信系统中广泛应用的多载波调制技术, 其具有高频谱效率、抗色散、灵活子载波分配等优势, 受到了通信领域的重点关注与研究。因此, 设计系统在发射端应用正交调制器 (FTM7962EX) 生成 OFDM 信号。

1) 信号映射:

设计系统将输入数据进行串并转换处理, 形成多个并行的低速数据流, 并且每个数据流对应一个子载波。通过信号映射模块将上述低速数据流映射到相应的星座点上, 如公式 (1) 所示:

$$s_k = I_k + jQ_k \quad (1)$$

式中, s_k 表示的是第 k 个子载波上的复数符号, 即低速数据流映射结果; I_k 与 Q_k 分别为同相分量和正交分量; j 为虚数单位。

2) 逆快速傅里叶变换:

将步骤 1) 输出的低速数据流映射结果 s_k 输入至逆快速傅里叶变换模块, 对其进行频域信号→时域信号的转换^[12], 如公式 (2) 所示:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{j \cdot 2\pi kn / N} \quad (2)$$

式中, $x(n)$ 为时域 OFDM 符号。需要注意的是, 逆快速傅里叶变换模块输出的时域 OFDM 符号是基带信号, 其带宽由子载波的数量和间隔决定; N 为子载波数量。

3) 循环前缀添加:

为了消除多径效应引起的符号间干扰, 提升 OFDM 信号生成的质量, 设计系统在每个时域 OFDM 符号 $x(n)$ 前均添加循环前缀, 即将时域 OFDM 符号的末尾部分进行复制处理, 并将其添加到时域 OFDM 符号开头。常规情况下, 循环前缀长度需要大于或者等于信道的最大时延扩展^[13]。循环前缀添加后的时域 OFDM 符号公式为:

$$x'(n) = x[(n - N_c) \bmod N] \text{ for } n \quad (3)$$

式中, $x'(n)$ 为循环前缀添加后的时域 OFDM 符号; N_c 为循环前缀的长度。

4) 正交调制器应用:

正交调制器 (FTM7962EX) 主要由两个混频器和一个本地振荡器构成, 分别处理时域 OFDM 符号 $x'(n)$ 的同相分量和正交分量, 从而将时域 OFDM 符号上变频到适合在信道中传输的载波频率, 如公式 (4) 所示:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t) x'(n) \quad (4)$$

式中, $s(t)$ 为正交调制器 (FTM7962EX) 上变频操作后的 OFDM 信号; $I(t)$ 与 $Q(t)$ 为时域 OFDM 符号 $x'(n)$ 的同相分量和正交分量; f_c 为载波频率。

上述过程利用正交调制器 (FTM7962EX) 完成了 OFDM 信号的生成, 有效提高了 OFDM 信号的频谱利用率和抗干扰能力, 为长距离光通信系统提供了可靠的调制方案支撑。

2.2 基于光放大器的 OFDM 信号光纤链路损耗补偿

长距离光通信中, 低信噪比与高衰减特性导致光信号在传输过程中能量大幅损耗, 同时光纤的非线性效应引发相位畸变, 破坏了 OFDM 系统子载波间的严格正交性。这种正交性丧失使得频域解调时子载波间干扰加剧, 而传统均衡技术难以有效补偿相位畸变, 最终导致信号解调误码率显著升高。光放大器通过直接增强光信号功率, 可补偿链路损耗以维持信噪比, 并抑制非线性

效应对相位畸变的进一步恶化,从而保障子载波正交性在长距离传输中的稳定性,为后续均衡处理提供可行性,最终降低误码率并提升系统传输性能。

在长距离光纤通信系统中,OFDM 信号传输过程中势必会产生损耗,例如散射损耗、吸收损耗、弯曲损耗等,若是不对其进行相应的处理,会大幅度降低 OFDM 信号的传输质量,进而影响设计系统的整体性能。为了延长传输距离并保持信号质量,设计系统在光纤链路中应用光放大器(DRA-CXL-1550)对 OFDM 信号进行中继放大操作,从而有效地补偿光纤链路损耗,为 OFDM 信号高质量传输提供有力的保障。

光纤链路损耗源于多个方面,主要包括散射损耗、吸收损耗、弯曲损耗与连接器损耗。其中,散射损耗是光纤链路损耗的主要因素之一。当 OFDM 信号在光纤链路中传输时,由于光纤材料密度存在着微观不均匀性,使得 OFDM 信号与密度不均匀区域产生相互作用,进而发生瑞利散射现象,从而降低 OFDM 信号的传输质量;吸收损耗是光纤链路损耗的重要来源之一。一般情况下,光纤材料中会包含很多的杂质原子,其会吸收特定波长的光能量,并将其转化为热能,致使 OFDM 信号产生衰减现象;弯曲损耗主要来源于光纤链路的弯曲,其会改变 OFDM 信号在光纤中的传输路径,导致部分光信号泄漏,进而降低 OFDM 信号的强度;连接器损耗主要来源于光纤连接器端面污染、端面不平整、光纤轴向错位等因素,其会直接影响光纤链路的传输性能^[14]。基于上述分析内容,构造光纤链路总损耗计算公式,表示为:

$$L_{\text{total}} = s(t)(\alpha_1 l(t) + \alpha_2 l(t) + \alpha_3 l(t) + L_o) \quad (5)$$

式中, L_{total} 为光纤链路总损耗; $l(t)$ 为 OFDM 信号的传输距离,即光纤链路长度; α_1 为散射系数,主要取决于光纤材料的密度均匀性; α_2 为吸收系数,主要取决于光纤材料的性质和杂质含量; α_3 为弯曲系数,其与光纤的弯曲半径和弯曲方式相关; L_o 为连接器损耗,主要取决于连接器的质量与连接工艺。

光放大器(DRA-CXL-1550)主要是基于受激辐射原理工作。当 OFDM 信号通过光放大器时,处于高能级的稀土元素(光放大器内部元素)会发生受激辐射现象,进而产生与 OFDM 信号相位、光频率和偏振方向相同的光子,从而完成 OFDM 信号的放大,表达式为:

$$P'(t) = P(t) \cdot \zeta \cdot L_{\text{total}} \quad (6)$$

式中, $P(t)$ 与 $P'(t)$ 分别为放大前、后的 OFDM 信号功率; ζ 为光放大器增益,其需要根据 OFDM 信号频谱实际情况进行动态调整,以此来保障放大后 OFDM 信号功率符合信道传输要求。

光纤链路损耗降低 OFDM 信号功率的同时,还会相对增加 OFDM 信号的噪声,从而降低 OFDM 信号的

信噪比。光放大器(DRA-CXL-1550)应用过程中,可以控制自发辐射噪声的引入,从而降低 OFDM 信号的噪声系数,达到提高 OFDM 信号信噪比的目的^[15]。光放大器(DRA-CXL-1550)损耗补偿后 OFDM 信号表达式为:

$$\eta'(t) = \frac{P'(t)\eta(t)}{\delta} \quad (7)$$

式中, $\eta(t)$ 与 $\eta'(t)$ 为光放大器应用前、后的 OFDM 信号损耗补偿结果; δ 为噪声系数,由自发辐射噪声引入比例决定。

上述过程凭借光放大器(DRA-CXL-1550)的优异性能,通过 OFDM 信号功率提升与信噪比改善,有效地补偿了光纤链路损耗,在延长 OFDM 信号传输距离的同时,保障了 OFDM 信号的传输质量,为长距离光通信系统提供了可靠的放大解决方案支持。与此同时,将功率提升与信噪比改善后的 OFDM 信号记为 $s'(t)$,为后续 OFDM 信号检测与解调奠定坚实的基础。

2.3 时频域相位畸变补偿下 OFDM 信号光电探测器解调

尽管基于光放大器的损耗补偿技术可提升光信号功率以对抗链路衰减,但长距离光通信中低信噪比与高衰减特性仍会引发严重的非线性效应,导致信号相位畸变。这种畸变会破坏 OFDM 系统子载波间的严格正交性,使得传统频域均衡技术难以有效补偿时频域转换中的相位偏差,最终造成解调误码率居高不下。因此,需进一步引入时频域相位畸变补偿技术,通过动态校正信号相位失真来恢复子载波正交性,从而降低误码率并提升系统传输可靠性。

设计系统接收端应用高灵敏度光电探测器(UTC-PD)对 OFDM 信号 $s'(t)$ 进行检测与接收,并将光信号转换为电信号,利用下变频处理、循环前缀去除、快速傅里叶变换、信道估计与均衡等多个环节解调 OFDM 信号,从而实现数据的精准、高效传输。

高灵敏度光电探测器(UTC-PD)接收光纤链路输出的 OFDM 信号 $s'(t)$,其响应度计算公式为:

$$R = \frac{i'(t)}{\eta'(t)P'(t)} \quad (8)$$

式中, R 为高灵敏度光电探测器的响应度; $i'(t)$ 为 OFDM 信号的光电流。

常规情况下,光电探测器(UTC-PD)接收的 OFDM 信号 $s'(t)$ 为光信号,无法直接对其进行解调处理,故将其转换为电信号,如公式(9)所示:

$$\hat{s}(t) = \Gamma \left\{ \frac{s'(t)}{R^\beta} + \epsilon \right\} \quad (9)$$

式中, $\hat{s}(t)$ 为电信号形式的 OFDM 信号; $\Gamma\{\cdot\}$ 为 OFDM 光信号到电信号的转换函数; β 为辅助计算常数,其取值范围为 $0 \sim 1$; ϵ 为偏置因子,直接决定着 OFDM 信号

的转换精度。

电 OFDM 信号 $\hat{s}(t)$ 通常处于高频段，为其解调带来了较大的困难。因此，设计系统通过混频器和本地振荡器对电 OFDM 信号 $\hat{s}(t)$ 进行下变频操作，将其降至基带或中频，为后续 OFDM 信号解调提供一定的便利^[16]，如公式 (10) 所示：

$$r(t) = \hat{s}(t) \Psi\{[\tilde{I}_k + j\tilde{Q}_k] \cdot e^{-j2\pi f_c t}\} \quad (10)$$

式中， $r(t)$ 为下变频操作后的电 OFDM 信号； $\Psi\{\cdot\}$ 为低通滤波函数； $\tilde{I}_k$ 与 $\tilde{Q}_k$ 为电 OFDM 信号 $\hat{s}(t)$ 的同相分量和正交分量。

与此同时，为了消除多径干扰，利用公式 (3) 逆过程去除电 OFDM 信号 $r(t)$ 的循环前缀，并将循环前缀去除后的电 OFDM 信号记为 $r(n)$ 。然后，利用快速傅里叶变换将电 OFDM 信号 $r(n)$ 从时域信号转换为频域信号，如公式 (11) 所示：

$$R_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r(t) \cdot r(n) e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} k n} \quad (11)$$

式中， R_k 表示的是第 k 个子载波上的接收符号，即电 OFDM 信号的频域信号。

由于光纤信道的自身性能影响，致使接收符号 R_k 相位和幅度会发生一定的变化，进而影响数据传输的精确性^[17]。为了避免上述现象的发生，设计系统通过信道估计技术获取信道响应，以此为基础，引入时频域联合均衡算法。

1) 频域均衡：

采用最小均方误差均衡算法，其核心公式为：

$$\tilde{R}_k = \frac{R_k H_k^*}{|H_k|^2 + \sigma^2 / \rho} \quad (12)$$

式中， $\tilde{R}_k$ 表示均衡后的接收符号； H_k 表示信道响应； σ^2 为噪声功率； ρ 为信噪比。该算法通过计算使均方误差最小的均衡系数，补偿信道失真对频域子载波的影响。

2) 时域均衡：

引入线性横向均衡器，其抽头系数 w_l 通过递归最小二乘算法更新，更新公式为：

$$w_l(n+1) = w_l(n) + \lambda^{-n} [d(n) - \sum_{m=0}^{L-1} w_m(n) x(n-m)] x(n-l) \quad (13)$$

式中， λ 为遗忘因子（取值范围 0.95~0.999）； $d(n)$ 为期望信号； $x(n)$ 为输入信号； L 为滤波器阶数（根据信道时延扩展设置，一般取 10~20）。通过调整抽头系数，补偿时域符号间干扰。

3) 时频域联合协同机制：

进行时域线性横向均衡（迭代次数 5~10 次），初步消除符号间干扰，再将均衡后的信号进行快速傅里叶变换至频域，进行频域最小均方误差均衡。频域均衡后信号经逆快速傅里叶变换返回时域，若误码率未达到设

定阈值 10^{-3} ，则再次进行时域均衡（迭代次数 3~5 次），形成“时域—频域—时域”的迭代交互均衡流程，直至满足误码率要求或达到最大迭代次数（20 次）。

以上述均衡处理后的接收符号 $\tilde{R}_k$ 为基础，将其与同相载波相乘，并通过低通滤波器得到解调信号，如公式 (14) 所示：

$$\tilde{I}_k = \Psi[\tilde{R}_k \cos(2\pi f_c t)] = \tilde{s}_k + \tilde{O}_k \quad (14)$$

式中， $\tilde{I}_k$ 为解调信号； $\tilde{s}_k$ 为符号分量； $\tilde{O}_k$ 为噪声分量。

根据数据传输需求，设定判决门限，以此为基础，对解调信号 $\tilde{I}_k$ 判决，判决规则如公式 (15) 所示：

$$\tilde{s}_k = \begin{cases} \sqrt{E_s} & \tilde{I}_k \geq \Phi \\ -\sqrt{E_s} & \tilde{I}_k < \Phi \end{cases} \quad (15)$$

式中， $\tilde{s}_k$ 为判决后的符号估计值； E_s 为符号能量； Φ 为判决门限。

根据判决后的符号估计值 $\tilde{s}_k$ 恢复原始比特数据^[18]，其表达式为：

$$b_k = \begin{cases} 1 & \tilde{s}_k = \sqrt{E_s} \\ 0 & \tilde{s}_k = -\sqrt{E_s} \end{cases} \quad (16)$$

式中， b_k 为恢复出的第 k 个比特数据。

综上所述，在硬件单元与软件模块的协同运作下，尤其是高灵敏度光电探测器（UTC-PD）的引入与应用下，实现了长距离光通信 OFDM 系统的设计与运行，为高速串行数据流的高效、完整传输提供有力的保障。

3 设计系统应用性能测试

选取基于改进 K-means 算法的长距离光通信 OFDM 系统与基于 OOK 和 ACO-OFDM 的长距离光通信 OFDM 系统以及基于 Volterra 非线性均衡的 OFDM 系统作为对比系统 1、对比系统 2 以及对比系统 3，联合设计系统进行对比实验，通过实验数据分析应用系统的性能优劣。

3.1 实验平台搭建

基于设计系统应用性能测试需求，搭建实验平台，采用了发射、光纤段、分布式放大、再传输的循环结构，允许精确分离并研究衰减、色散、非线性效应及其累积效果对信号的影响。搭建的实验平台具备多种调制解调格式，能够处理单偏振与双偏振结构信号，可以满足不同应用系统性能测试的需求。平台结合仿真软件与真实硬件，可以在软件中灵活、低成本地改变光纤参数、注入特定类型的噪声，从而能用真实的高端仪器采集和处理数据，保证了结果的可靠性与可信度。实验平台发射端最大波特率为 46 G，接收端最大采样率为 100 G，波长范围覆盖 C 波段和 L 波段，符合设计系统应用性能测试需求。

设置路总长度设置为 200 km，由四段 50 km 的标准单模光纤首尾相接构成。每段光纤的衰减系数为

0.2 dB/km, 色散系数为 17 ps/(nm·km), 非线性系数为 $1.3 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$ 。产生的电信号由采样率 160 GSa/s, 模拟带宽 63 GHz 的数字存储示波器进行采集。采集到的数据通过 Matlab 进行离线数字信号处理, 包括同步、信道估计、均衡和解调等算法。为测试系统性能, 实验采用动态可变的信道条件和标准化的测试数据序列。设置 80、120、160 及 200 km 共 4 个距离节点, 以检验系统随距离增加的性能衰减情况。在 $-4 \sim +4$ dBm 范围内以 2 dB 为步进进行调整, 以观察并触发光纤的非线性效应, 测试系统对非线性相位畸变的容忍。

为进行公平、全面的性能对比, 实验将所设计系统与以下 3 种系统进行对比:

- 1) 对比系统 1: 基于改进 K-means 算法的长距离光通信 OFDM 系统^[4]。
- 2) 对比系统 2: 基于 OOK 和 ACO-OFDM 的长距离光通信 OFDM 系统^[5]。
- 3) 对比系统 3: 基于 Volterra 非线性均衡的长距离光通信 OFDM 系统^[6]。

为确保对比的公平性, 所有系统 (包括设计系统及 3 个对比系统) 在此次实验中的关键参数设置均保持一致:

- 1) 子载波数量: 统一设置为 256。
- 2) 调制格式: 统一采用 64-QAM。
- 3) 导频数量: 统一为 8, 用于信道估计。
- 4) 数据源: 统一采用通信系统性能测试中的长伪随机二进制序列 (PRBS-15 和 PRBS-23) 作为数据源, 以确保测试能充分覆盖足够的符号组合。

3.2 评价指标确定

为了客观评价设计系统的应用性能, 选取 OFDM 信号信噪比, 光纤链路损耗补偿率与 OFDM 信号解调误码率作为评价指标, 计算公式为:

$$\begin{cases} \eta = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_v} \right) \\ C = \frac{L_{\text{total}} - L'_{\text{total}}}{L_{\text{total}}} \times 100 \% \\ B = \frac{N_w \{b_k\}}{N_{\text{total}} \{b_k\}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, η 为 OFDM 信号信噪比, 直接反映着 OFDM 信号的生成质量。一般情况下, 信噪比 η 数值越大, 表明 OFDM 信号生成质量越好; 反之, 信噪比 η 数值越小, 表明 OFDM 信号生成质量越差; P_s 为 OFDM 信号功率; P_v 为噪声功率; C 为光纤链路损耗补偿率。 C 数值越大, 表明应用系统光纤链路损耗补偿效果更佳; L'_{total} 为补偿后的光纤链路总损耗; B 为 OFDM 信号解调误码率, 其直接反映着应用系统的整体性能。通常情况下, 误码率 B 数值越小, 表明应用系统数据传输精度更高; 反

之, 误码率 B 数值越大, 表明应用系统数据传输精度更低; $N_w \{b_k\}$ 为错误比特数据数量; $N_{\text{total}} \{b_k\}$ 为比特数据总数量。

3.3 实验结果分析

3.3.1 OFDM 信号生成质量分析

应用设计系统、对比系统 1、对比系统 2 和对比系统 3 生成 OFDM 信号, 通过公式 (16) 对其信噪比进行计算, 以此来分析 OFDM 信号生成质量, 具体如图 3 所示。

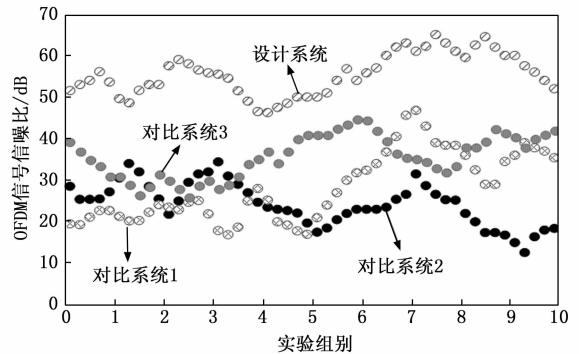


图 3 OFDM 信号信噪比示意图

图 3 中, 所设计系统曲线显著高于两个对比系统, 且最大值达到 65 dB, 原因是正交调制器只需较低的驱动电压即可实现高消光比的调制, 极大降低了由调制器本身引入的非线性失真和谐波分量, 保证了信号的纯净度, 有效抑制了偏振态波动引起的信号幅度抖动, 确保了信号功率的稳定性, 这对于对幅度敏感的高阶 QAM 调制至关重要, 保证了调制器工作点的长期稳定性, 避免了因工作点漂移导致的信号畸变。同时, 正交调制器还具备出色的端口隔离度, 可以有效隔离同相分量和正交分量, 避免两者之间的相互干扰, 从而减少了串扰噪声的产生, 进一步提高了 OFDM 信号的信噪比。而对比系统 1 侧重于算法优化, 但其硬件的固有非线性限制了其最大信噪比。对比系统 2 由于其非对称削波和混合调制机制, 本质上会产生更高的带内噪声和谐波干扰, 导致其 SNR 较低。而对比系统 3 虽在非线性均衡方面具有一定优势, 但其 Volterra 均衡器对计算复杂度与参数敏感度较高, 在应对超长距离传输中快速变化的非线性相位畸变时, 仍难以完全跟踪与补偿, 导致其信噪比提升幅度有限, 尤其在高峰均功率比条件下表现不及设计系统从硬件根源优化的调制方案。由此可见, 设计系统因为正交调制器 (FTM7962EX) 的引入与应用, 显著提升了 OFDM 信号信噪比, 说明设计系统 OFDM 信号生成质量更高。

3.3.2 光纤链路损耗补偿效果分析

应用设计系统、对比系统 1、对比系统 2 和对比系统 3 对光纤链路损耗进行补偿处理, 通过公式 (16) 计

算光纤链路损耗补偿率，以此来分析光纤链路损耗补偿效果，具体如图 4 所示。

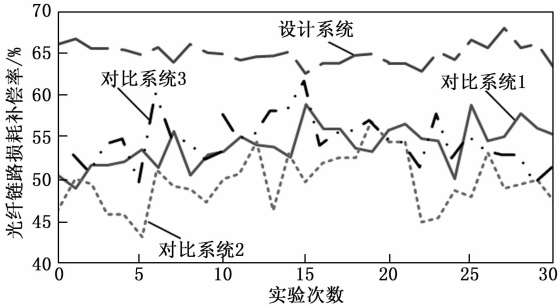


图 4 光纤链路损耗补偿率示意图

在图 4 所示的光纤链路损耗补偿率对比中，设计系统应用后的补偿率显著高于对比系统 1、对比系统 2 以及新增的基于 Volterra 非线性均衡的对比系统 3，其最大值达到了 68%。这主要得益于设计系统所采用的分布式拉曼放大器（DRA-CXL-1550），其通过受激拉曼散射效应，利用传输光纤本身作为增益介质，在传输过程中对信号进行分布式放大，从而有效避免了功率在链路末端跌落至临界水平，抑制了非线性效应与噪声的积累。同时，该放大器具有宽增益带宽、高增益平坦度和极低的噪声系数，能够为所有 OFDM 子载波提供均匀且纯净的功率提升。相比之下，对比系统 1 与 2 受限于集中式放大方案或有限的增益带宽，补偿效率较低；而对比系统 3 虽在电域采用 Volterra 均衡进行非线性补偿，但其无法在物理层面直接补偿光纤的分布式功率衰减，对链路损耗的补偿能力本质上依赖于接收端电信号处理，因此其补偿率仍显著低于设计系统从传输介质层面实现的主动、分布式光放大机制。由此可见，设计系统凭借先进的分布式光放大技术，在硬件层面实现了对光纤链路损耗的更高效补偿，为长距离传输的稳定性奠定了坚实基础。

3.3.3 OFDM 信号解调精度分析

应用设计系统、对比系统 1 与对比系统 2 对 OFDM 信号进行解调处理，通过公式 (16) 计算误码率，以此来分析 OFDM 信号解调精度，如图 5 所示。

与对比系统 1、对比系统 2 及对比系统 3 相比，设计系统应用后 OFDM 信号解调误码率显著更低，最小值达到了 1.5%。这主要得益于系统在接收端引入了高灵敏度 UTC-PD 光电探测器，其凭借优化的光吸收层与载流子传输层结构，实现了高达 0.6 A/W 的响应度与 110 GHz 的带宽，能够高效、准确地将经长距离传输后极度微弱且失真的光信号转换为高保真度的电信号，为后续精准解调奠定了坚实基础。该探测器皮秒级的响应时间确保了对信号快速变化的实时跟踪，有效避免了因响应延迟导致的波形失真；同时，其优异的抗串

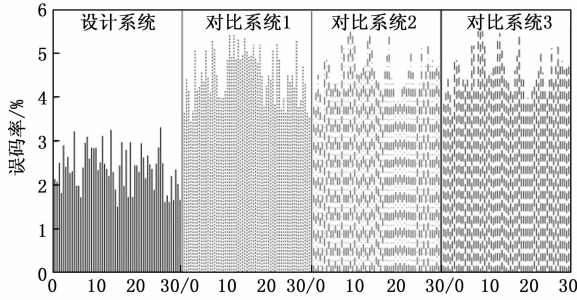


图 5 OFDM 信号解调误码率示意图

扰特性保障了目标信号的独立性与完整性。相比之下，对比系统 3 虽采用 Volterra 非线性均衡算法在电域进行补偿，但其性能受限于前端光电探测器的响应灵敏度与线性度，在极低信噪比条件下对微弱信号的检测与转换能力不足，导致其误码率性能仍显著高于设计系统。由此可见，设计系统通过高灵敏度光电探测器与联合时频域均衡算法的协同作用，实现了从信号检测到失真修复的全链路优化，从而在极端信道条件下依然保持了卓越的解调精度与通信可靠性。

4 结束语

针对长距离光通信中因非线性相位畸变与高衰减特性导致的子载波正交性破坏及误码率攀升这一核心难题，设计并实现了一种基于高灵敏度 UTC-PD 光电探测器的 OFDM 系统。通过硬件创新与软件算法的协同优化，构建了一套从信号生成、传输补偿到接收解调的完整高性能解决方案。在硬件层面，系统采用 FTM7962EX 正交调制器从源头保障了高线性、低相位噪声的 OFDM 光信号生成；通过 DRA-CXL-1550 拉曼放大器的分布式放大机制，在补偿链路损耗的同时有效抑制了噪声积累与非线性的恶化；借助 UTC-PD 光电探测器的超高响应度与带宽特性，实现了对微弱失真信号的精准检测与转换，为高性能解调奠定了坚实基础。在软件层面，设计了与之深度协同的信号处理算法链，包括抗相位畸变的 OFDM 波形生成、自适应的损耗与噪声管理策略以及先进的频域信道估计与联合均衡算法，共同致力于修复受损的信号正交性。实验结果表明，所提出的系统取得了 65dB 的 OFDM 信号生成信噪比、68% 的光纤链路损耗补偿率及 1.5% 的解调误码率的优异性能，充分验证了设计系统在抑制非线性效应、维持子载波正交性及提升接收灵敏度方面的有效性与先进性。

参考文献：

[1] 左海赫，王子雄，马 闯，等. 基于压缩感知的可见光通信定位一体化系统性能分析 [J]. 重庆邮电大学学报（自然科学版），2024，36（1）：172-180.

（下转第 260 页）