

一种 OFDM 系统子载波及峰均比联合优化算法

郑士远, 韩 军, 赵世铎

(中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081)

摘要: 正交频分复用作为无线通信中的一种核心调制技术, 因其高频谱效率、强抗衰落能力以及稳定的传输性能而备受关注, 然而 OFDM 系统中高峰均比问题会显著影响系统效率; 同时, 传统 OFDM 系统在所有子载波上传输信息, 在严重频率选择性衰落信道中, 深衰落频点处的子载波携带信息难以正确解调, 这将导致系统误码率显著升高; 为解决上述问题, 提出了一种 OFDM 系统子载波及峰均比联合优化方法, 根据具体的应用场景和信道状态动态调整所需子载波数目及位置, 并结合 PAPR 抑制技术, 以提高信号传输的可靠性; 仿真结果表明提出方法不仅有效提升了误码性能, 同时也显著降低了 PAPR, 从而优化了系统整体性能。

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 子载波; 信道状态信息; 限幅滤波

Joint Optimization Algorithm for Subcarrier Selection and PAPR in OFDM Systems

ZHENG Shiyuan, HAN Jun, ZHAO Shiduo

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), as a core modulation technology in wireless communications, is highly regarded for its spectral efficiency, strong anti fading ability, and stable transmission performance. However, high peak-to-average power ratio (PAPR) in OFDM systems significantly affects the efficiency of the system. Moreover, traditional OFDM systems transmit the information of all subcarriers, and in severely frequency-selective attenuation channels, it is difficult to correctly demodulate the information carried by subcarriers at deep attenuation frequency points resulting in a significant increase in the system's bit error rate (BER). To address these issues, a joint optimization method for subcarrier selection and PAPR in OFDM systems is proposed. The method dynamically adjusts the number and position of subcarriers according to specific application scenarios and channel conditions, integrating PAPR suppression techniques to improve the transmission reliability of signals. Simulation results demonstrate that the proposed approach not only effectively enhances BER performance, but also significantly reduces PAPR, thus optimizing overall system performance.

Keywords: OFDM; PAPR; subcarrier; channel state information (CSI); limiting filter

0 引言

正交频分复用技术 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 在数字通信领域中被广泛采用, 它通过将高速度的数据分解成多个低速度的并行数据流, 并将这些数据流分别映射到不同的子载波上进行传输, 有效地提高了传输的效率。OFDM 的这一并行传输机制不仅能有效应对频率选择性衰落, 还能够大幅减轻符号间干扰 (ISI, inter-symbol interference), 这使

得其在复杂多径传播环境下尤为适用^[1]。

此外, OFDM 技术与多输入多输出 (MIMO) 技术的结合更是大幅提升了数据传输速率和系统容量, 成为当今高速无线通信系统中的关键支撑技术之一。得益于其高效的频谱利用率, OFDM 在无线局域网 (WLAN)、移动通信、第五代移动通信 (5G) 网络、光通信等多个频段和领域中得到了广泛应用, 展现出显著的技术优势。尤其是在 4G LTE 和 5G 通信技术中, OFDM 已被广泛采用, 成为这些技术体系中的核心部

收稿日期:2024-11-01; 修回日期:2024-11-25。

作者简介:郑士远(1999-),男,硕士研究生。

通讯作者:韩 军(1964-),男,大学本科,研究员。

引用格式:郑士远,韩 军,赵世铎. 一种 OFDM 系统子载波及峰均比联合优化算法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 293

- 300.

分,帮助实现了更高速率、更高可靠性和更高频谱利用率的目标^[2]。

但 OFDM 系统也有一些缺点。首先,OFDM 系统对频率偏移较为敏感,容易受到频率失准的影响。同时,峰均功率比(PAPR, peak-to-average power ratio)问题也是 OFDM 技术中的一个主要瓶颈,它可能导致发射机功率效率的降低^[3]。此外,由于信道特性的复杂性,尤其是在实际应用场景中,OFDM 系统的各个子载波信道状态会随着时间的、频率和空间的波动而动态变化,导致通信性能的显著波动和下降。因此,如何在这些动态环境中有效分配子载波和功率,也是提升 OFDM 系统性能的关键问题。

针对这一问题,现有研究主要集中于通过优化子载波功率分配来增强系统的鲁棒性,并结合不同用户的服务质量(QoS)需求,采用合适的分配策略以平衡系统性能和公平性。文献[4]提出了一种基于经典注水法则(Water-filling)的功率分配策略,通过在不同子载波间智能调度功率,最大化系统的总传输速率,从而在资源有限的情况下提升系统整体效率。此外,文献[5]研究了在雷达通信(RadCom)系统中集成 OFDM 波形的子载波和功率联合分配问题,探讨了如何在系统复杂性增加的情况下保持系统性能稳定并提升传输速率。与此同时,文献[6]则提出了一种更加注重公平性的子载波一功率分配方案,旨在保证多用户多载波系统中资源分配的合理性和有效性。在该方案中,系统通过公平分配子载波和功率资源,确保各用户能够获得较为均衡的通信服务质量,避免某些用户资源过度分配的问题。此外,文献[7]通过提出一种联合优化策略,在解码—转发中继系统中同时考虑子载波配对和功率分配,以在 OFDM 传输过程中有效改善信号传输质量和系统容量。

然而,现有的子载波功率分配算法通常存在较高的复杂性,尤其在用户数量较多的情况下,实现最优功率分配往往需要进行大量的计算。这种计算复杂度对实时应用提出了较高的挑战,可能会限制算法的实际部署和应用。一些资源分配算法,如遗传算法,虽然能够在一定程度上降低误码率并减少计算复杂度,但无法避免无

线信道中衰落严重的子载波对通信性能的影响,当无线信道条件恶劣时,这些子载波会使系统误码率大大增加。

基于上述问题,本文提出了一种新型的 OFDM 子载波分配方法,该方法通过优化子载波分配策略,避免由于子载波衰落严重而导致的通信性能下降,确保系统在不同信道条件下能够保持稳定的传输质量。此外,针对 OFDM 系统中常见的峰均比问题,本文进一步将新型 OFDM 子载波处理方法和传统峰均比抑制技术结合起来进行联合优化。通过该算法,能够有效减小 OFDM 系统中的峰均比,从而降低发射端因功率放大器非线性带来的信号失真,提升系统的传输效率和稳定性。

1 OFDM 子载波数优化算法

1.1 OFDM 模型

OFDM 是一种广泛应用的多载波调制技术,其核心思想是将整个信道划分为多个相互正交的子信道,以并行方式传输数据^[8],且允许相邻子载波频谱有 50% 重叠。这一技术通过将高速数据信号转换为多个低速的子数据流,并分别在每个子信道上调制传输,从而提高了频谱利用率。由于子信道间的正交性,接收端可以通过相关技术有效分离各子信道的信号,减少子信道间的相互干扰,保证系统的可靠性。此外,由于每个子信道的带宽小于信道的相关带宽,子信道上的信号可以近似看作平坦衰落信道,从而大幅度减少了码间串扰问题,提高了通信系统的抗干扰能力。同时,子信道的窄带特性使得信道均衡变得相对简单,有助于进一步提升系统的性能。

OFDM 系统的典型结构如图 1 所示,整体分为信号发射端和信号接收端。上半部分为发射端,主要负责对输入信号进行调制操作;下半部分为接收端,负责接收并解调传输信号。具体而言,在发射端,首先对输入的二进制比特流进行信道编码,通过特定的编码方案(如卷积编码、Turbo 编码等)增加数据流的纠错能力,以提升传输的可靠性。在编码后的数据流上进行星座调制,将其转换为频域信号。根据实际的传输需求,可以选择不同的调制方式,例如 QPSK、16 QAM、64

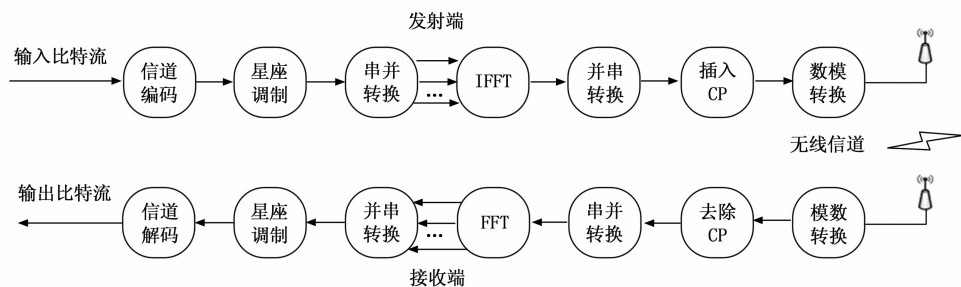


图 1 OFDM 系统模型框图

QAM 甚至更高阶的调制方法, 不同调制方式所能携带的信息量不同, 高阶调制可以传输更多数据, 但对信道条件要求更高^[7]。随后, 经过串并转换操作, 将串行的高速数据流转换为多个并行的低速子载波信号, 确保每个子载波能够以较低的速率传输数据。

接下来, 系统对这些频域信号进行逆快速傅里叶变换 (IFFT), 将频域信号调制到相应的子载波上, 生成时域信号。此时, 为避免由多径效应导致的码间干扰, 时域信号的尾部通常会添加循环前缀 (CP)。然后, 经过并串转换操作, 时域信号被转换为连续信号, 并经过数模转换 (D/A), 生成能够在无线信道中传输的模拟信号。最后, 信号通过射频放大器进行放大, 以满足远距离传输的需求。

在接收端, 处理流程基本上是发射端的逆过程。首先, 接收端接收到通过无线信道传输的射频信号, 并将其经过模数转换, 恢复为数字信号。随后, 移除信号中的循环前缀, 执行串并转换操作, 将接收到的时域信号转换为多个并行子载波信号。接下来, 执行快速傅里叶变换 (FFT), 将时域信号转回到频域信号。最后, 系统对频域信号进行星座解调和信道解码, 恢复出原始的比特流, 最终完成信号的接收和解码工作^[9]。

1.2 传统 OFDM 调制解调原理

在给定传输带宽的条件下, 传统的频分复用 (FDM) 系统将可用带宽均匀划分为若干个子频带, 并且为了避免相邻子频带之间的干扰, 每个频带之间还需保留一定的保护间隔。这种设计虽然可以实现多载波并行传输, 但由于引入了保护间隔, 导致频谱资源利用率不高。因此, FDM 系统在频谱利用效率方面存在一定的局限性, 尤其在带宽资源紧张的情况下, 这一问题尤为突出。

与 FDM 系统不同, 正交频分复用系统在设计上利用了子载波间的正交性。OFDM 系统中的 N 个子载波在频域中相互正交, 这意味着, 尽管这些子载波在频谱上相互重叠, 但它们之间不会产生相互干扰。这一正交特性使得 OFDM 系统能够更加高效地利用频谱资源^[9]。子频带之间可以实现频谱叠加, 从而在相同的带宽条件下, OFDM 系统能够传输更多的数据, 而不会因为频带重叠导致通信性能下降。相比于单载波系统, OFDM 系统更适合在多径效应和频率选择性衰落严重的无线信道中工作, 因此在现代宽带通信系统中得到了广泛应用。

OFDM 系统的调制与解调原理如图 2 所示。在信号调制过程中, 输入的比特流经过信道编码和调制后, 分别分配到多个并行子载波上。通过逆快速傅里叶变换 (IFFT) 操作, 将频域信号转换为时域信号, 形成具有正交特性的子载波序列。在接收端, 系统执行快速傅里

叶变换 (FFT), 将时域信号转换回频域信号, 并通过星座解调和解码恢复原始的数据信息。通过这种方式, OFDM 系统能够有效抵抗多径干扰, 提升传输的稳定性和效率。

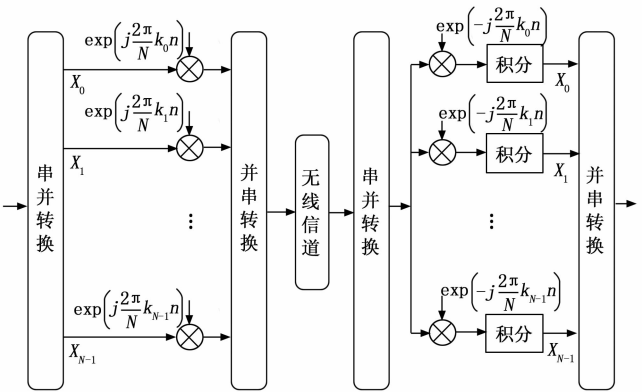


图 2 OFDM 调制解调原理图

取子载波的数目为 N , 频域信号可表示为 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, 将经过星座映射处理的 k 路子载波信号进行 IFFT 运算, 得到时域信号 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$ 。

$$X_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中: n 为时间指数, $j = \sqrt{-1}$, X_k 为经过子载波调制之后的频域信号。

调制好的时域信号通过射频发送到无线信道, 并在接收端进行解调的工作。得到的离散信号 X_n 与解调载波 $\exp(-j \frac{2\pi}{N} kn)$ 相乘, 通过积分器进行积分恢复发送端信号。

$$\begin{aligned} \tilde{X}_k &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} x_n \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn) = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} X_k \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j \frac{2\pi}{N} kn) \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn) \right] = X_k \quad (2) \end{aligned}$$

通常, 为了保证时域信号的连续性, 需要在发射端对 OFDM 信号进行过采样处理。过采样的实施过程为在原始的 N 个频域信号后插入 $(L-1)N$ 个 0, 过采样之后的 OFDM 信号可表示为:

$$\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{(L-1)N}]^T \quad (3)$$

其中: L 为过采样系数, 采样系数越高, 精确度越高, 相应的计算复杂度也会越高^[7], 通常取 $L \geq 4$ 。

1.3 基于子载波优化的 OFDM 系统设计

由于 OFDM 系统使用多个子信道进行信号传输, 子信道的状态无法保证, 在一些衰落较为严重的子信道中传输的数据误码率会增加, 进而影响系统的性能。

本文设计了一种根据信道状态信息 (CSI, channel

state information) 进行分析从而选用其中信噪比较高的子载波来进行信号传输的方法, 直接去除信道状态较差的子载波, 从而避免深衰信道对系统性能的影响。该方法过程如图 3 所示。

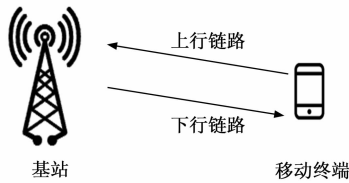


图 3 新型 OFDM 示意图

OFDM 信道状态分析过程如下:

- 1) 基站发射机通过下行链路向移动终端的接收机发出 OFDM 导频信号, 接收机收到后得到无线信道中各子载波处信道响应, 并进行 IIR 滤波。
- 2) 根据导频信号的信道状态信息选出所用子载波后, 移动终端发射机通过上行链路将子载波序号或图样信息回传给基站接收机。
- 3) 基站接收机接收到子载波位置信息后, 解出所选子载波结果, 基站发射机通过下行链路按选出的子载波进行信息传输。

其中, 下行链路获取子载波位置信息的主要方式是使用导频进行信道状态信息的获取, 其功能主要为信道估计、筛选子载波、信噪比估计和频偏估计等。导频首先通过信道, 得出频域信道响应, 并将其排序, 然后按照设置的需选子载波数取排序的相应部分, 即为系统所选子载波。例如在总子载波数为 512 的情况下, 可以将导频子载波数量设置为 8、16、32、64、64、128、256、512、512、512, 根据信道响应, 筛选出 1、2、4、8、16、32、64、128、256、384 个子载波, 用于信息传输。导频子载波位置尽量均匀拉开, 保证获得各选频频点间最大不相关性, 选择的子载波数量较少时, 应尽量避免选择容易受到 IIR 滤波器过渡带影响的两端子载波。由于导频所用子载波数量多于数据传输所用子载波, 导致功率分散, 从而使各子载波的信噪比下降, 因此可连发 16 个导频保证信道估计准确性。

该方法可以根据每次下行链路传输中的导频得到的信道状态信息选用不同的子载波数传输信息, 从而降低衰落严重的子载波对传输质量的影响。

2 子载波及峰均比联合优化算法

2.1 峰均比问题

OFDM 每个子载波上都会携带数据信息, 当各子载波的幅值相似或者相近时, 其合成的时域波形就会产生瞬时峰值。在这个时刻, 信号的峰值功率可能是平均功率的几倍, 此时就会出现 OFDM 系统较高的峰值平

均功率比问题^[10]。峰均比定义为信号的峰值功率与平均功率的比值。

$$\text{PAPR} = 10 \log_{10} \frac{\max \{ |x_n|^2 \}}{E \{ |x_n|^2 \}} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (4)$$

其中: $E \{ \cdot \}$ 为期望值。

2.2 PAPR 的概率分布

累积分布函数 (CDF, cumulative distribution function), 又称为分布函数, 用于描述随机变量 X 的概率分布特性。

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (5)$$

在 OFDM 系统的峰均功率比问题中, 常用统计学方法来描述信号的 PAPR 情况, 其中互补累积分布函数 (CCDF, complementary cumulative distribution function) 是 CDF 的变形, 二者关系为: $\text{CCDF} = 1 - \text{CDF}$ 。

$$F(a) = P(x > a) \quad (6)$$

本文中使用 CCDF 表示 OFDM 系统中信号的峰均功率比超过某个门限 PAPR 的概率。

$$\text{CCDF} = \Pr(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 1 - [1 - \exp(-\text{PAPR}_0)]^N \quad (7)$$

OFDM 总子载波数 512, 仿真不同选子载波数及不同调制方式的 CCDF 曲线, 部分结果如图 4 所示, 最大峰均比结果如表 1 所示。

表 1 不同子载波数最大峰均比表

子载波数	最大峰均比/dB
2	3
4	6
8	9
16	11.5
32	12
64	12.5
128	13
384	13.5

由图 4 可知, 峰均比的大小与子载波数量关系密切, 而与调制方式的关联较小。随着子载波数量的增加, 最大峰均比也相应增大。

2.3 传统峰均比抑制技术

目前, 如何有效应对 OFDM 信号中的高峰均比问题, 已成为影响 OFDM 技术广泛应用的关键挑战之一^[11]。高 PAPR 问题会导致信号在通过功率放大器时产生非线性失真, 从而严重影响系统的传输质量和效率^[12]。

为解决这一问题, 国内外研究人员提出了多种方法, 这些方法可以大致归纳为 3 个主要方向。1) 提高功率放大器的线性动态范围; 2) 采用数字预失真 (DPD, digital pre-distortion) 技术; 3) 通过优化算法

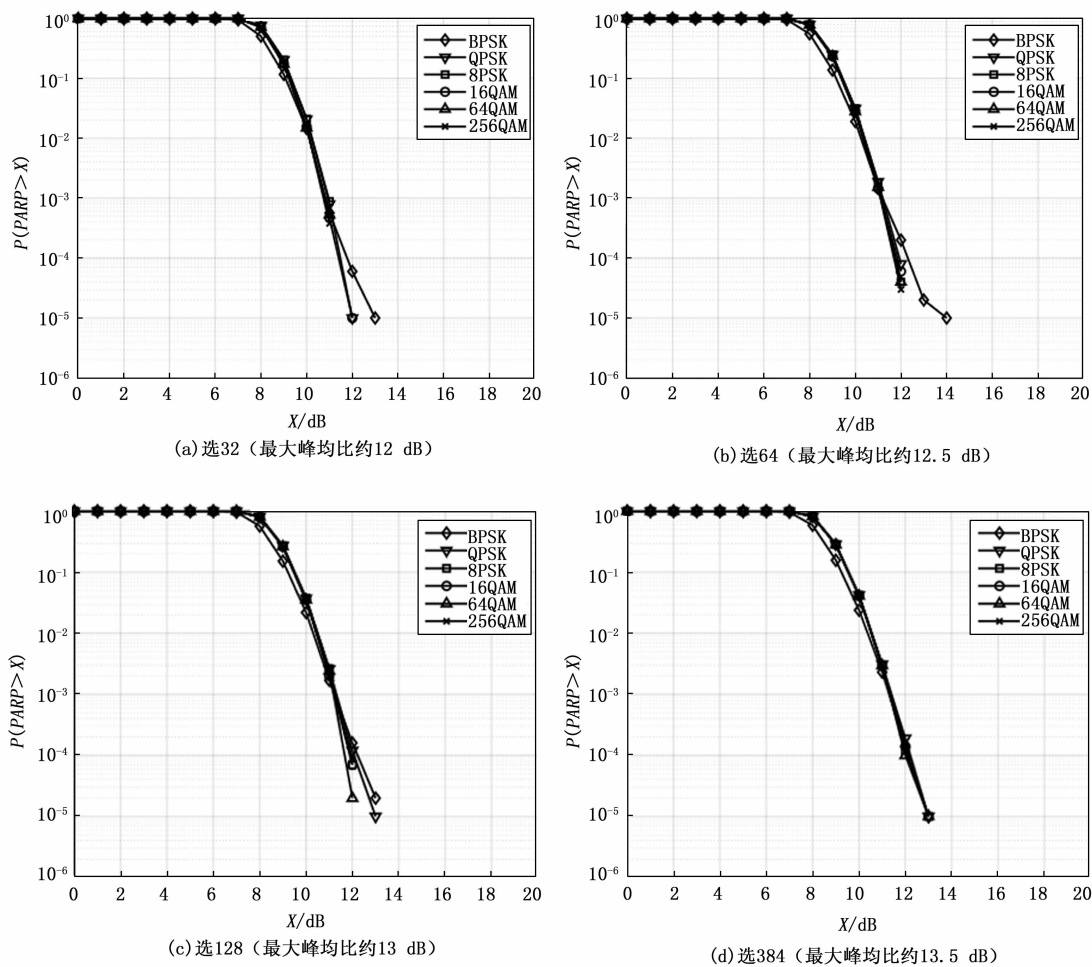


图 4 OFDM 波形 CCDF 曲线仿真结果

来降低 PAPR。与前两种方法相比，算法降低 PAPR 的方式具有不增加硬件成本、可以直接应用于现有通信系统等显著优势，因而成为该领域研究的重点方向。

根据算法对信号的影响，降低 PAPR 的算法可以分为 3 类：限幅类技术、编码类技术和概率类技术。其中，限幅滤波是降低 OFDM 信号 PAPR 最简单的限幅类方法^[13]，这种方法采用一个限幅器，当信号包络超过预定的限幅门限值会被削减，未超过时信号值不会发生任何变化，限幅操作可以表示为：

$$f_c[x(n)] = \begin{cases} x(n), & |x(n)| \leq A \\ Ae^{j\angle x(n)}, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (8)$$

其中： $\angle x(n)$ 为 $x(n)$ 的相位， A 为由限幅率 γ 决定的限幅门限，限幅率 γ 的定义为：

$$\gamma = \frac{A^2}{E[|x(n)|^2]} = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (9)$$

限幅滤波法是最早提出的一种用于抑制 OFDM 系统峰均比的技术，其基本原理是借鉴时域信号限幅滤波的思想，将超出设定门限值的信号峰值进行削减，并通过滤波操作来缓解因信号幅度失真导致的带内干扰以及

带外频谱扩展问题^[14]，其原理如图 5 所示。该方法以其简单直接的特性受到广泛关注，能够在较低的计算复杂度下有效地将信号的 PAPR 控制在预设范围之内。由于其实现容易且效果显著，限幅滤波法已成为目前应用最广泛的 PAPR 抑制方法之一^[15]。

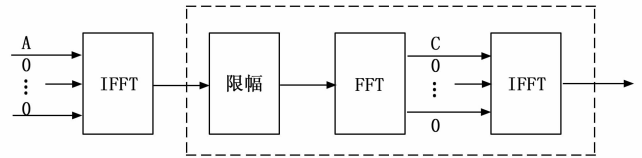


图 5 插值后限幅滤波原理图

限幅滤波法的主要优势在于其对峰值信号的削减操作高效且简单，能够显著降低系统的 PAPR。然而，该方法的主要不足在于它对信号施加了非线性变换，削减峰值的过程不可避免地引入了限幅噪声。这种噪声会导致系统带内信号出现失真，进而影响比特误码率 (BER, bit error ratio)，使系统的通信性能下降。此外，限幅滤波还会引起带外辐射，使得频谱扩展，进而

对相邻信道造成干扰。虽然带外干扰可以通过进一步的滤波操作来消除,但这种滤波操作可能引起信号峰值的再生,部分抵消了限幅操作的效果,从而增加了系统复杂度。

为了解决限幅滤波过程中带外干扰和峰值再生问题,迭代限幅滤波(ICF, iterative clipping and filtering)技术应运而生。该方法的主要目标是在降低信号 PAPR 的同时,有效抑制带外干扰。传统的迭代限幅滤波过程如图 6 所示。ICF 方法通过反复执行限幅和滤波操作,逐步削减信号峰值,从而在降低 PAPR 的同时保持较高的功率放大器效率。此外,ICF 还具有抑制带外功率干扰的能力,因此在实际通信系统中得到了广泛应用。

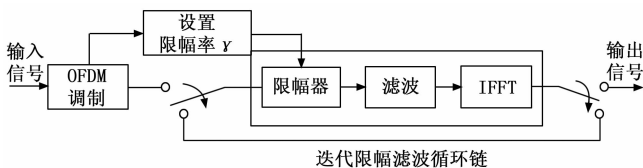


图 6 迭代限幅滤波过程图

尽管 ICF 方法在降低 PAPR 方面表现出色,但其局限性也不可忽视。首先,由于 ICF 是基于多次迭代的限幅与滤波操作,这不可避免地会对带内信号引入非线性失真。该失真会进一步恶化系统的比特误码率性能,尤其在高精度通信系统中,信号失真的累积效应会显著影响解调精度。其次,传统的 ICF 方法在收敛到期望的 PAPR 值时速度较慢,通常需要多次迭代才能达到预期效果,这无形中增加了发射端的计算复杂度和处理延迟。频繁的迭代操作不仅提高了系统的实现难度,还对系统的实时性提出了挑战,尤其是在资源受限的环境中,迭代次数的增加可能导致系统性能的下降。

因此,通过优化算法来减少收敛到期望 PAPR 值所需的迭代次数,将有助于降低系统的计算复杂度,提升系统效率。

2.4 子载波及峰均比联合优化设计

联合优化的主要技术路线如图 7 所示,将新型 OFDM 子载波技术与限幅滤波 PAPR 抑制技术结合,融入现有的 OFDM 调制体系。

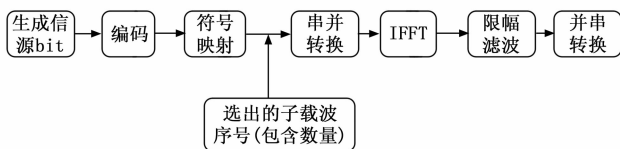


图 7 联合优化技术图

传统的迭代限幅滤波 PAPR 抑制技术需要对发射信号进行多次限幅滤波,才能将 PAPR 压缩至目标值。

算法的主要计算量为对限幅滤波算法的重复次数,则算法复杂度为 $O(n)$, n 为迭代次数,每次信号限幅滤波的迭代次数越多, PAPR 抑制效果越显著,同时计算复杂度也越高。传统方法不能灵活控制迭代次数,针对不同的信道环境选用的迭代次数相同,因此算法的时间复杂度较高。

为降低计算复杂度,将选子载波法和迭代限幅滤波技术联合优化,系统先根据选出的子载波数量进行串并转换,将传输的信息分到各个被选出的子载波上,再根据子载波的数量灵活调整迭代次数,从而减少达到目标 PAPR 值的迭代次数,有效降低发射端的计算负担。每个选子载波数对应的迭代次数都可根据仿真结果得出,当系统选择所需的子载波数时,即可调用所需的对应迭代次数,避免限幅滤波操作重复过多。

3 仿真结果

3.1 OFDM 子载波数优化算法

分别在 Gaussian 信道和瑞利信道中对不同子载波数的 OFDM 系统进行仿真并对比性能,总子载波数为 512,其中瑞利信道参考经典的 7 径信道模型^[16],信道的时延-功率谱如图 8 所示,每条路径均服从瑞利衰落,且衰落特性相互独立。信道的多径时延展宽通过 (10) 确定^[17]:

$$D_c = \frac{1.2d^2}{f_c Ma} \quad (10)$$

式中, d 为收发两站的大圆距离,仿真中取 180 km, f_c 为工作频率,仿真中取 4.7 GHz, M 为天线口面直径,仿真中取 1.2 m, a 为地球等效半径,仿真中取 8 500 km。在上述参数下可计算得到 $D_c = 0.811 \mu s$, 7 条路径的时延在该范围内均匀分布。

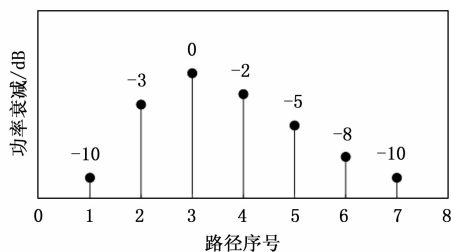


图 8 瑞利信道仿真时延-功率谱

为保证足够的系统容量和更高的抗多径干扰能力,本文中仅选取 3 个子载波数较多的模式进行仿真,仿真参数和结果分别如表 2 和图 9 所示。

表 2 OFDM 子载波数仿真参数

序号	子载波数	调制方式	编码方式	编码码率
1	128	16 QAM	Turbo	1/2
2	256	16 QAM	Turbo	1/2
3	384	16 QAM	Turbo	1/2

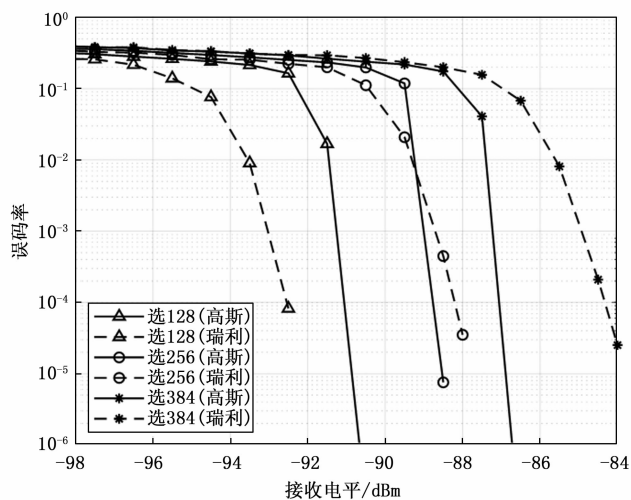


图 9 不同子载波数误码率对比

由图 9 可见, 随着选子载波数的减少, 瑞利信道性能越来越好。在 128 子载波数时, 瑞利信道的性能略微优于高斯信道; 在 256 子载波数时, 瑞利信道的性能略微差于高斯信道; 在 384 子载波数时, 瑞利信道的性能明显差于高斯信道^[18-19]。

而在 128 子载波数时出现瑞利信道的性能会优于高斯信道的原因如图 10 所示, 系统通过导频得出的信道状态信息, 选出频域信道响应较好的子载波进行通信, 将响应较差的子载波排除出去, 从而有效避免其对通信质量的负面影响。

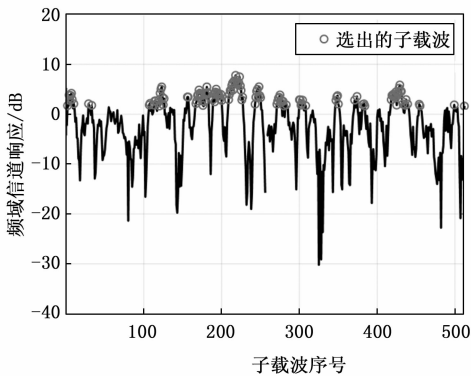


图 10 OFDM 一次选子载波结果示意图

3.2 子载波及峰均比联合优化

上文中提到 128 子载波数时瑞利信道性能优于高斯信道, 且瑞利信道性能优于更高子载波数, 因此选用 128 子载波数进行验证仿真。由图 4 可知, 128 子载波数的最大峰均比约为 13 dB, 图 11 为进行限幅滤波操作后的峰均比, 可以看出最大峰均比大大降低, 约为 7 dB。

为了确定在不同子载波数情况下的最佳迭代次数, 需要进行多次仿真, 得出每个子载波数对应的最佳迭代次数。这样在系统选择特定子载波数时, 能够依据预先

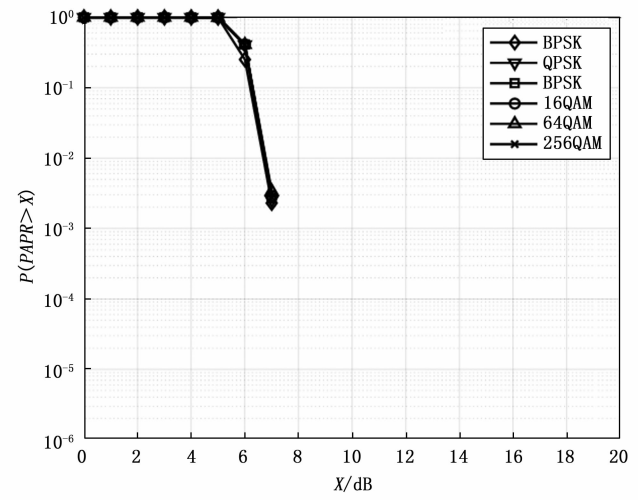


图 11 限幅滤波法降低峰均比效果图

确定的迭代次数进行选择, 从而在保证系统性能的同时, 降低计算负担^[20-21]。

以上文的 128 子载波数 OFDM 系统举例, 调制方式选用 BPSK 进行仿真, 得出结果如表 3 所示。

表 3 迭代次数效果表

迭代次数	最大峰均比/dB	计算时间/s
1	7	14.936
2	6	17.652
3	5	20.324
4	4	23.358
5	4	25.556
6	4	27.481
7	4	30.678
8	4	33.807
9	4	36.138
10	4	38.004
11	4	40.393
12	4	42.881

由表 3 可知, 当迭代次数达到 4 次时, 门限值为 4 dB。此后, 即使增加迭代次数, 门限值的下降幅度变得不明显, 峰均比的抑制效果提升有限, 而计算时间则显著增加。因此, 对于 512 选 128 个子载波的 OFDM 系统, 选择 4 次迭代的限幅滤波方法可以在降低峰均比的同时, 确保计算负担最小并维持良好的系统性能。

为验证限幅滤波法不会对系统误码性能造成严重影响, 进行仿真, 仿真参数如表 4 所示。

表 4 限幅前后误码性能对比仿真参数

模式	子载波数	调制方式	编码码率
1	128	BPSK	1/4
2	128	8 PSK	1/4
3	128	16 QAM	1/2
4	128	64 QAM	1/2

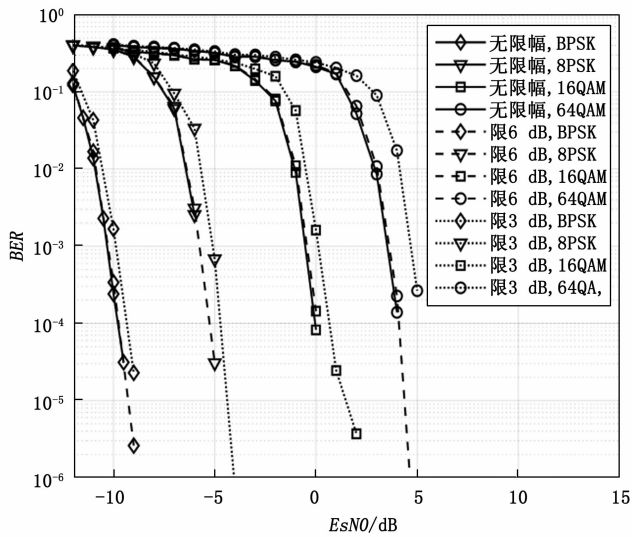


图 12 限幅前后误码性能对比

由图 12 可知,不同调制方式下,对系统进行限幅滤波操作,直接限幅到 6 dB 峰均比时,误码性能几乎无损失;限幅到 3 dB 时误码性能损失仅 1 dB,验证了提出的方法在降低峰均比的同时对误码性能的影响较小。

4 结束语

OFDM 已经广泛应用于移动通信、雷达、物联网等多个领域,作为当前及未来至关重要的调制方式,其提升通信性能和降低峰均比一直是 OFDM 研究中的重要方向。高 PAPR 不仅会导致功率放大器效率降低,还会引发非线性失真,影响系统整体性能。因此,研究有效的 PAPR 抑制技术具有重要意义。本文首先提出了一种新型的子载波处理方法,通过避开受严重衰落影响的子载波,显著提高系统的抗衰落能力,并有效降低误码率。此外,本文将该方法与迭代限幅滤波技术相结合,根据选出的子载波数量自适应调整迭代次数,从而在减轻发射端计算负担的同时,有效抑制系统的 PAPR。更为重要的是,在 512 选 128 子载波的 OFDM 系统中,该方法在显著降低峰均比的同时,对系统的误码性能影响较小,确保了通信质量的稳定性。

参考文献:

- [1] 胡一晨,耿虎军. 基于改进遗传算法优化的 RBF 网络的信道估计 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (1): 165 - 171.
- [2] 唐 昊,韩东洪,周 蕊. 浅析 OFDM 技术及其应用 [J]. 网络安全技术与应用, 2019 (5): 62 - 64.
- [3] 冯卓明. OFDM 信号的峰均比线性优化技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [4] 武林俊,李燕文. 多用户多速率 OFDM 中的子载波分配

和功率控制 [J]. 电子与信息学报, 2007 (8): 1911 - 1915.

- [5] CHEN Y, LIAO G, LIU Y, et al. Joint subcarrier and power allocation for integrated OFDM waveform in radcom systems [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27 (1): 253 - 257.
- [6] ABD-ELNABY M, SEDHOM G G, MESSIHA N W, et al. Fair subcarrier-power allocation scheme for multiuser multicarrier systems [J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 3033 - 3041.
- [7] HSU C N, SU H J, LIN P H. Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011: 59 (1): 399 - 414.
- [8] 袁丽娜,苟先彬. 4G 技术中降低 OFDM 系统 PAPR 的研究 [J]. 无线互联科技, 2015 (8): 16 - 17.
- [9] 魏世威. 基于 OFDM 系统的峰均比抑制算法研究 [D]. 燕山大学, 2022.
- [10] 柯 苗. OFDM 系统中高峰均比的抑制技术分析 [J]. 电子技术, 2011, 38 (7): 65 - 68.
- [11] 刘 芳. 基于预留子载波的 OFDM 系统峰均比抑制算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [12] 张 鑫. OFDM 峰平比抑制关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [13] 王晓敏. OFDM 系统降低峰均比问题的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [14] 赵俊飞,葛文萍,张大帅,等. 基于扰码降低 OFDM 峰均比算法的研究 [J]. 激光杂志, 2014, 35 (11): 84 - 86.
- [15] 雷 霞,赵 颖,唐友喜,等. OFDM 系统中限幅非线性失真迭代对消法性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2006 (10): 1866 - 1869.
- [16] 李志勇,秦建存,梁进波. 对层流散射通信工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [17] WU J, LU W, PENG H, et al. Simultaneous wireless information and power transfer in OFDM systems based on subcarrier allocation [C] // 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWC-MC). Paphos, Cyprus, 2016: 926 - 929.
- [18] 马云思,周三文,闫朝星. 一种 OFDM 信号峰均比抑制算法设计 [J]. 遥测遥控, 2016, 37 (1): 6 - 10.
- [19] 赵 乐,宋爱民,刘 剑,等. W 频段卫星通信中的恒包络 OFDM 技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2660 - 2662.
- [20] 罗仁泽,师向群,黄 岚,等. OFDM 系统降低 PAPR 技术的比较 [J]. 电信科学, 2007 (5): 64 - 67.
- [21] 孙柏昶,李佳宣,张金波,等. 正交频分复用信号峰均比抑制技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48 (1): 126 - 131.