

广义频分复用系统峰均功率比抑制算法

宁晓燕, 刘承贇, 湛星宇, 王震铎

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了降低广义频分复用系统存在着多载波系统中固有的高峰均功率比问题,本文提出了一种适用于广义频分复用系统的子载波抑制高峰均功率比算法。该算法以限幅法为基础,降低了系统的高峰均功率比,但与限幅法不同的是,该算法几乎不会对带外性能及误码率性能造成影响。由于子载波抑制高峰均功率比算法的峰均功率比抑制性能略差于限幅法,因此本文进一步提出将部分序列传输与子载波抑制高峰均功率比结合起来进一步抑制系统高峰均功率比的算法。仿真表明:本文提出的算法的高峰均功率比抑制性能与限幅法相同,且不会对系统的带外与误码率性能造成影响。

关键词:广义频分复用; 高峰均功率比; 限幅法; 子载波抑制峰均功率比; 复杂度; 部分传输序列法; 带外; 误码率

DOI: 10. 11990/jheu. 202204004

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240206.1800.006>

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0794-06

Peak-to-average power ratio reduction algorithm in generalized frequency division multiplexing system

NING Xiaoyan, LIU Chengyun, CHEN Xingyu, WANG Zhenduo

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To reduce the inherent peak-to-average power ratio (PAPR) problem in a generalized frequency division multiplexing (GFDM) system, this study proposes the PAPR reduction subcarrier (PRSC) algorithm, which is suitable for the GFDM system. Building upon the clipping algorithm, the proposed algorithm reduces the PAPR of the GFDM system. Different from the clipping algorithm, the PRSC algorithm minimally affects out-of-band and bit error rate performance. As the PAPR suppression performance of the PRSC algorithm is slightly worse than that of the clipping algorithm, this study also proposes an algorithm that combines partial transmit sequence and PRSC to further reduce the PAPR of the system. The simulation results show that this combined algorithm achieves the same level of PAPR reduction as the clipping algorithm, and the out-of-band and bit error rate performance of the system are unaffected.

Keywords: generalized frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; clipping; peak-to-average power ratio reduction subcarriers; complexity; partial transmit sequences; out-of-band radiation; bit error rate

广义频分复用 (generalized frequency division multiplexing, GFDM) 作为广义的多载波技术,将调制数据划分为多个子载波与多个子符号,将不同子符号上的全部载波以不同的滤波器进行调制^[1]。通过调整子载波与子符号的数量 GFDM 系统可退化为正交频分复用系统 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 或者单载波系统,选择不同的成型滤波器也可得不同的性能^[2]。相较于

OFDM, GFDM 系统具有良好的灵活性与更好的带外性能。高峰均功率比 (peak to average power ratio, PAPR) 的信号通过高功率放大器会使设备饱和,导致带外泄露,从而增加符号的错误率。因此多载波系统在实际应用中都需要考虑降低 PAPR。在传统 OFDM 系统中降低 PAPR 的方法可大致分为 3 类: 预畸变类、编码类和概率类。预畸变类中具有代表性的方法为限幅法^[3], 限幅法是牺牲误码率及带外性能换来了较好的 PAPR 性能。概率类方法是牺牲复杂度来获得 PAPR 性能的提升,其 PAPR 抑制效果略差于限幅法,但其误码率和带外性能不会发生改变^[4], 而预编码类则需要对信息进行预处理,会增加系统复杂度,且预编码类技术对 PAPR 的抑制

收稿日期: 2022-04-01.

网络出版日期: 2024-02-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62001138); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2021F009).

作者简介: 宁晓燕, 女, 副教授, 硕士生导师;

王震铎, 男, 副教授, 硕士生导师.

通信作者: 王震铎, E-mail: zhenduowang@hrbeu.edu.cn.

性能有限,因此其只适用于一些特定的场合^[5-6]。在 GFDM 系统中可以通过调节系统参数降低系统 PAPR,如子载波数,时隙数与成型滤波器的滚降因子^[7-8]。但是这些系统参数的改变会连带影响系统,如带外、复杂度、误码率等其他性能。近年来,学者根据前述 OFDM 系统中降低 PAPR 的方法,提出了降低 GFDM 系统的 PAPR 算法^[9-14]。其中限幅法是最有代表性的一类方法,但是会使得系统的带外性能及误码性能下降,而 GFDM 系统是通过牺牲系统误码率换来了带外性能的提升,因此传统限幅法并不适用于 GFDM 系统。

本文通过选取部分子载波来对传输信息的 PAPR 进行抑制,基于限幅法的原理,提出了一种适用于广义频分复用系统的子载波抑制高峰均功率比 (peak to average power ratio reduction sub-carriers, PRSC) 算法,利用迭代限幅来确定抑制 PAPR 的子载波上的数据。与限幅法相比,以降低系统信息传输效率为代价,在不改变系统的带外性能与高白噪声下的误码率性能的情况,获得较好的 PAPR 抑制效果。

1 广义频分复用系统模型

GFDM 系统是一种基于数据块的滤波器多载波调制系统^[2]。GFDM 调制后的离散信号为:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} d_{k,m} g_{TX}((n - mK) \bmod N) \exp(j \frac{2\pi kn}{K}), \quad n \in \{0, 1, \dots, N - 1\} \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为信息的第 n 个采样值; $d_{k,m}$ 为调制到第 k 个子载波与第 m 个子符号上的原始数据; N 为总采样点数; K 和 M 分别为总子载波数与总时隙数; $g_{TX}(n)$ 为 N 的滤波器,通常使用升余弦滤波器。

假设系统经过加性高斯白噪声 (additive white gaussian noise, AWGN), 则接收到的信号为:

$$y(n) = x(n) + w(n) \quad (2)$$

式中 $w(n)$ 是方差为 δ_w^2 的 AWGN 信道。对接收到

的信号 $y(n)$ 进行解调得到接收信息 $\hat{d}(n)$ 为:

$$\hat{d}(n) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) g_{RX}((n - mK) \bmod N) \exp(-j \frac{2\pi nk}{K}), \quad n \in \{0, 1, \dots, N - 1\} \quad (3)$$

式中 g_{RX} 为解调滤波器,而根据 g_{RX} 的不同,接收机可分为 3 种分别为:匹配接收机、迫零接收机以及最小均方误差接收机。GFDM 信号的 PAPR 为:

$$C_{\text{PAPR}} = \frac{\max_{n \in \{0, N-1\}} \{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \quad (4)$$

GFDM 系统是以数据块的形式进行数据传输,相干的子载波与重叠的子符号都会导致 GFDM 系统的 PAPR 升高。其 PAPR 的理论上限为^[15]:

$$\begin{cases} P_{\text{CCDF}}(\gamma) = 1 - \prod_{n=0}^{K-1} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{K\psi_n}\right) \right]^M \\ \psi_n = \sum_{m=0}^{M-1} |g_{TX}[(n - mK) \bmod N]|^2 \\ n \in \{0, 1, \dots, N - 1\} \end{cases} \quad (5)$$

因此 GFDM 系统与 OFDM 系统都具有高峰均功率比的问题。

2 基于子载波抑制峰均功率比的算法

本文借鉴限幅法的思路^[16],提出了采用迭代限幅方式的 PRSC 算法来降低 GFDM 系统的 PAPR。与直接限幅法相比,PRSC 算法能降低系统的 PAPR,且几乎不会影响带外及误码率性能,但其计算复杂度较限幅法更高且抑制 PAPR 的效果也不如限幅法。因此本文进一步提出将 PTS 与 PRSC 结合起来进一步抑制系统的 PAPR。

2.1 基于 PRSC 算法的 PAPR 抑制方案

PRSC 算法是在进行 GFDM 调制的子载波中选择部分子载波来传输用于抑制其余传输数据子载波产生的高 PAPR 数据的方法,其具体流程如图 1 所示。假设 GFDM 系统的子载波数为 K ,其中用于传输信息的子载波数为 I ,而抑制 PAPR 的子载波数为 D ,因此 $K = I + D$ 。

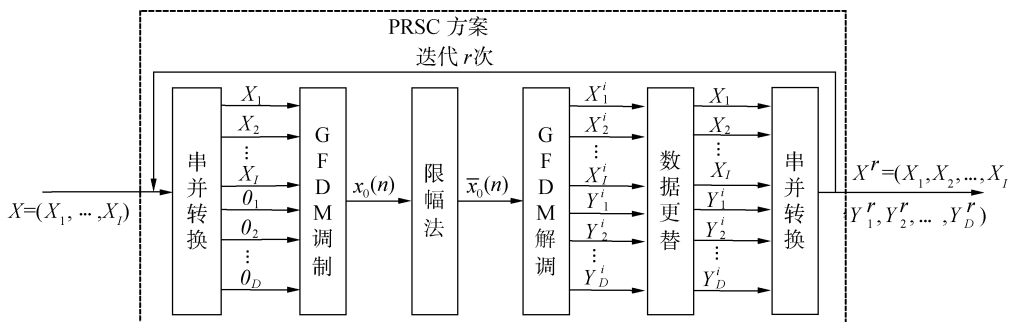


图 1 PRSC 算法流程

Fig. 1 Flow chart of PRSC algorithm

在图 1 中 X_1, X_2, \dots, X_I 为需要传输的原始数据,而 $Y_1^r, Y_2^r, \dots, Y_D^r$ 为 PRSC 模块产生的抑制 PAPR

的信息。以抑制载波的位置放在最后为例,首先将抑制载波的信息 Y_1, Y_2, \dots, Y_D 都设置为 0, 即串并转换后的每个时隙中的传输信息为 $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{L,0}, 0, \dots, 0\}$, 然后通过限幅对抑制信息进行迭代降低系统的 PAPR。设 GFDM 系统的子载波数为 K , 时隙数为 M , 总的传输信息为 N , 即 $N = K \times M$, 则算法的具体流程为:

1) 将初始信息进行 GFDM 调制得到时域信号, 即 $x = A \cdot X$, 其中 A 为 GFDM 调制矩阵, 调制信息 X 为:

$$X = \underbrace{\{X_{1,1}, \dots, X_{L,1}\}}_I \underbrace{\{0, \dots, 0\}}_D, \dots, \underbrace{\{X_{1,M}, \dots, X_{L,M}\}}_I \underbrace{\{0, \dots, 0\}}_D \quad (6)$$

2) 将得到的时域信号 $x_0(n)$ 按照限幅法来抑制 PAPR, 其中限幅阈值为 A_{\max} , 则限幅后的信号为:

$$\bar{x}_0(n) = \begin{cases} x_0(n), & |x_0(n)| \leq A_{\max} \\ A_{\max} e^{j\varphi(x_0(n))}, & |x_0(n)| > A_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

而阈值 A_{\max} 由限幅率 (clipping ratio, CR) 产生, $A_{\max} = \sigma \times 10^{(A_{CR}/20)}$, 其中 σ 为信号功率的均方根。

3) 将限幅后的信号进行 GFDM 解调得到时频域信息, 再使用初始信息来替换限幅后的信息得到 \tilde{X}^i , 其中 i 为迭代次数, 取 $1, 2, \dots, r$, 即:

$$\tilde{X}^i = \underbrace{\{X_{1,1}, \dots, X_{L,1}\}}_I \underbrace{\{Y_{1,1}^i, \dots, Y_{D,1}^i\}}_D, \dots, \underbrace{\{X_{1,M}, \dots, X_{L,M}\}}_I \underbrace{\{Y_{1,M}^i, \dots, Y_{D,M}^i\}}_D \quad (8)$$

4) 得到 \tilde{X}^i 后, 再以 \tilde{X}^i 代入步骤 1) 进行迭代, 通过一次次迭代来降低系统的 PAPR。

本文提出的 PRSC 算法的复杂度与迭代次数 r 成正比, 采用 Gabor 变换进行简化的 GFDM 系统的调制与解调的复杂度都是 $MK \ln K + M^2 K / 2$ [17], 因此 PRSC 方案的复杂度为 $2 \times r \times (MK \ln K + M^2 K / 2)$ 。而穷举法的复杂度则取决于初始序列的调制阶数以及 PAPR 抑制载波 D 的数量。随着该参数的增加复杂度呈指数上升, 迭代限幅法的复杂度较穷举法更低。在接收端只需要对 GFDM 解调后的信息进行抽样, 只抽取非抑制载波中的信息就能得到最终数据, 所以 PRSC 算法在接收端的实现复杂度低, 且不会对误码率性能造成影响。由于在限幅后使用了初始信息替换限幅后的信息, 这会使得 PAPR 再次升高, 所以 PRSC 算法的 PAPR 抑制效果略差于限幅法。因此本文又提出将概率类中的 PTS 算法与 PRSC 算法结合起来进一步降低系统 PAPR 的算法。

2.2 基于 PRSC-PTS 算法的 PAPR 抑制方案

PRSC 算法能对时域信号的峰值功率进行压缩, PTS 算法则是对不同类的子载波加入不同的相移, 从而降低产生过高峰值功率的可能性, 因此可将 PTS 方案与 PRSC 结合起来进一步抑制 GFDM 系统的 PAPR。若先进行 PTS 再进行 PRSC 需要多进行一次 GFDM 调制, 因此先进行 PRSC 再进行 PTS 可以省去一次 GFDM 调制。其具体流程如图 2 所示。

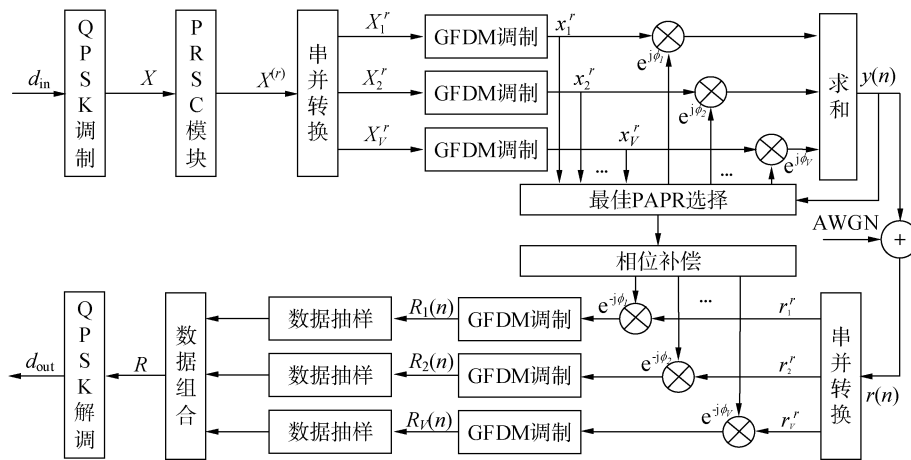


图 2 GFDM 系统 PRSC-PTS 算法总体结构

Fig. 2 Overall structure diagram of PRSC-PTS algorithm of GFDM system

先将初始信息进行 PRSC 调制得到时频信号 $X^{(r)}$, 把信号按照子载波分为 V 组, 每组不同子载波之间互不重叠, 互不重叠的部分进行补 0:

$$X^r = \sum_{i=1}^V X_i^r \quad (9)$$

对 V 个互不重叠的子载波乘以不同的相位, 可得:

$$y(n) = \sum_{i=1}^V b_i x_i^r, b_i = e^{j\phi_i} \quad (10)$$

最终比较不同相位下的 PAPR 值, 选取最佳相位进行最终的数据传输。在接收端对接收信号解调后进行相位补偿, 消除 PTS 算法中相位变化的影响, 再进行数据抽样得到最终信息。因此 PRSC-

PTS 算法也不会对误码率性能造成影响,且其 PAPR 性能相较于 PRSC 算法得到了进一步的提升。

3 抑制算法仿真分析

3.1 PRSC 算法参数影响分析

本文对所提出的应用于 GFDM 系统中的 PRSC 方法进行仿真分析,在该技术中,影响 PAPR 性能的 2 个主要参数为迭代次数及 PAPR 抑制载波的分布。其具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 PRSC 算法仿真参数

Table 1 PRSC algorithm simulation parameters

影响因素	数值
子载波数	256
时隙数	5
抑制载波数	32×5
迭代次数	1、2、3、6、8、12
抑制载波分布	块状分布,等间隔分布,伪随机分布

图 3 给出了不同 PAPR 抑制载波位置情况下的仿真对比分析,其中迭代次数固定为 8。经过 PRSC 处理后的 GFDM 系统的 PAPR 结果比 GFDM 本身更好。对比 3 种载波位置的分布可以看出,采用伪随机分布确定抑制载波位置的 PAPR 抑制效果最好,等间隔分布的 PAPR 抑制效果次之,而块状末尾分布的效果最差。以 PAPR 值为 10^{-3} 作为标准,相较于 GFDM 系统本身,末尾块分布有 0.4 dB 的增益,等间隔分布有 1 dB 的增益,伪随机分布有 1.3 dB 的增益。因此以伪随机序列来确定载波位置。

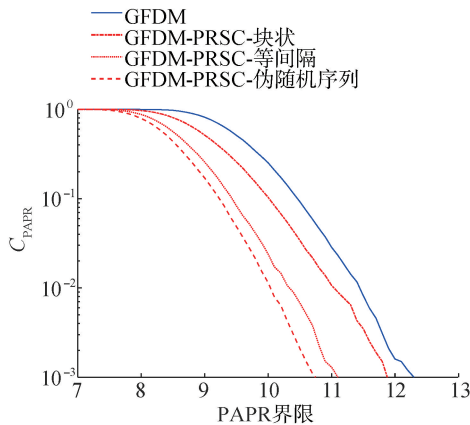


图 3 PRSC 算法在不同载波位置下的对比

Fig. 3 Comparison of PRSC algorithm under different carrier positions

图 4 给出了不同迭代次数下的 PAPR 性能,其中 PAPR 抑制载波位置的分布是采用伪随机序列确定。从仿真结果上来看,随着迭代次数的增加,系统的 PAPR 性能逐渐下降,其中迭代次数为 1、2、3 时,能看出来系统的性能明显下降,而随着迭代次数的增加,系统的 PAPR 抑制效果降低。

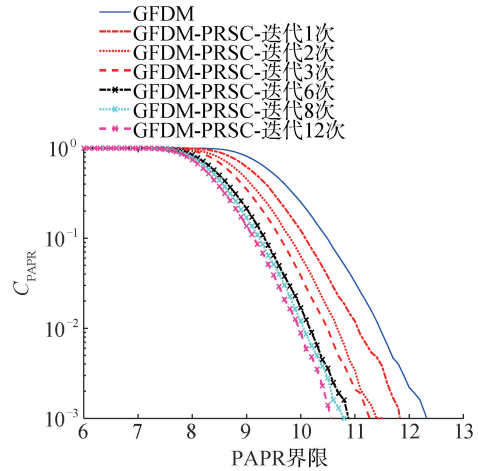


图 4 PRSC 算法在不同迭代次数下的对比

Fig. 4 Comparison of PRSC algorithm under different iteration times

为比较迭代次数对系统 PAPR 性能的影响,图 5 给出了门限 PAPR 界限为 9, PRSC 算法在 GFDM 系统处于不同参数下的收敛性对比,其中子载波数 K 取 128、256、512;时隙 M 取 3、5、7;成形滤波器阶次 a 取 0.3、0.7。由仿真结果可知,随着 K 与 M 的增加,系统 PAPR 值也会升高。当迭代次数在 5 以内时,随着迭代次数的增加, PAPR 性能提升明显,当迭代次数在 5~10 时, PAPR 性能提升变缓,而当迭代次数大于 10 时, PAPR 性能慢慢收敛。结合图 4 与图 5,当迭代次数超过 6 时,其性能降低的程度会越来越小,且与复杂度不成正比。

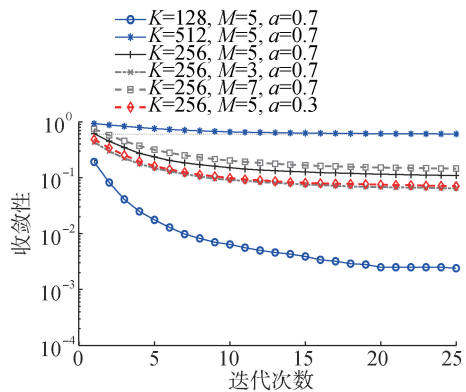


图 5 PRSC 算法在 GFDM 不同参数下的收敛性

Fig. 5 Convergence of PRSC algorithm under different parameters of GFDM

3.2 PRSC 算法, PRSC-PTS 算法与限幅法性能对比

对 3 种 PAPR 抑制算法从 PAPR, 带外和误码率 3 种方面进行讨论。其中 GFDM 系统的子载波数为 256, 子符号数为 5, 限幅率为 0.1, PRSC 技术的迭代次数为 6, PAPR 抑制载波数为 32×5 , 且抑制载波位置由伪随机序列来确定, PTS 分组将子载波分为 4 组, 32 组随机相位。

图 6 中给出了中心频率为 100 MHz, 子带带宽

为 15 kHz 情况下,本文提出的 PRSC 算法和 PRSC-PTS 算法与直接限幅法的带外性能对比。可以看出直接限幅法带外泄露较高,而本文提出的 PRSC 法与 PRSC-PTS 法几乎不会对带外性能造成影响。这是因为直接限幅法使时域信号产生了非连续变化,从而导致带外泄露高。PRSC 算法则是对时域信号的峰值功率进行了压缩,并没有非连续点。PTS 算法则是引入了相位,也不会产生非连续点,因此 2 种算法几乎不会对系统带外性能产生影响。

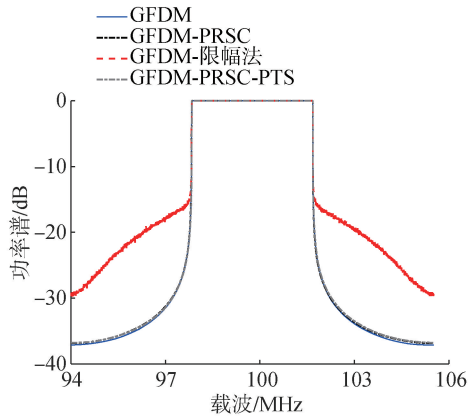


图 6 GFDM 在 3 种算法下的带外性能

Fig. 6 Out of band performance of GFDM under three algorithms

图 7 中给出了本文提出的 PRSC 算法和 PRSC-PTS 算法与直接限幅法的误码率性能对比。可以看出,直接限幅法会降低系统误码率性能,而 PRSC 法与 PRSC-PTS 法则不会对系统的误码率性能造成影响。直接限幅法由于在发射端对信号进行了不可逆的变化,因此其误码率性能会随着限幅率的提升而不断变差。PRSC 算法在对调制信息进行正常解调后,直接去掉抑制载波位置处的信息得到最终结果,因此几乎不会对误码率性能造成影响。PRSC-PTS 算法则是在 PRSC 的基础上加入了不同的相位,消除相位影响之后也几乎不会对系统性能造成影响。

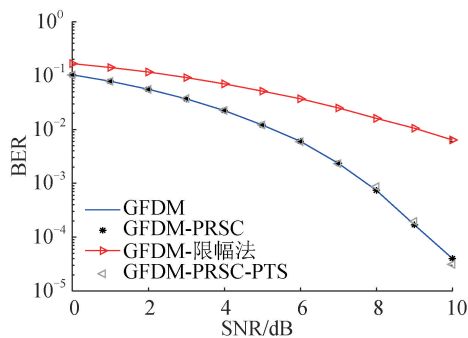


图 7 GFDM 在 3 种算法下的 BER 性能

Fig. 7 BER performance of GFDM under three algorithms

图 8 中给出了本文提出的 PRSC 算法和 PRSC-PTS 算法与直接限幅法的 PAPR 性能对比。3 种算法的 PAPR 性能均比 GFDM 系统本身的 PAPR 好,

在 10^{-3} 情况下,相较于 GFDM 系统本身,PRSC 算法有 1 dB 的增益,直接限幅法有 2.8 dB 的增益,而 PRSC-PTS 算法则有 3.3 dB 的增益。可见 PRSC-PTS 技术通过引入对多种相位的选择,降低了出现较高瞬时功率的可能性,在不影响 PRSC 技术的带外与误码率的前提下,取得了更好的 PAPR 抑制效果。

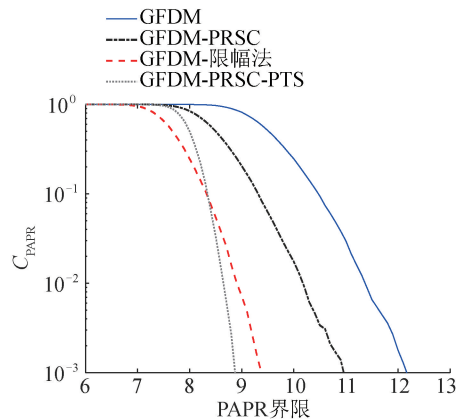


图 8 GFDM 在 3 种算法下的 PAPR 性能

Fig. 8 PAPR performance of GFDM under three algorithms

4 结论

1) PRSC 算法几乎不会对 GFDM 系统的带外及误码率性能产生影响,PAPR 在 10^{-3} 的情况下,采用 PRSC 算法的 PAPR 值较 GFDM 本身有 1 dB 左右的增益,直接限幅法则有 2.8 dB 左右的增益。

2) 本文算法的 PAPR 值有 3.3 dB 的增益,PAPR 抑制性能与限幅法相同,且不会对系统带外及误码率性能造成影响。

发射端需要对传输的信息进行处理,复杂度较高。在未来的工作中,将致力于研究更适用于 GFDM 系统的复杂度较低的 PAPR 抑制算法。

参考文献:

- [1] MICHAÏLOW N, MATTHE M, GASPAR I S, et al. Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks[C]//Communications IEEE Transactions on, Garmen, 2014, 62(9): 3045-3061.
- [2] FETTWEIS G, KRONDORF M, BITTNER S. GFDM-generalized frequency division multiplexing[C]//VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 1-4.
- [3] TANG Bo, QIN Kaiyu, MEI Haibo, et al. Iterative clipping-noise compression scheme for PAPR reduction in OFDM systems [J]. IEEE access, 2019, 7: 134348 - 134359. 4359.
- [4] 蔡建辉, 李光球, 沈静洁. 降低 GFDM 峰均功率比的低复杂度算法[J]. 电信科学, 2021, 37(4): 82-89. CAI Jianhui, LI Guangqiu, SHEN Jingjie. Low complexity

- algorithm for PAPR reduction in GFDM system[J]. *Telecommunications science*, 2021, 37(4): 82–89.
- [5] KALBAT F, AL-DWEIK A, IRAQI Y, et al. Direct bit loading with reduced complexity and overhead for precoded OFDM systems[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, 68(7): 7169–7173.
- [6] RAJABZADEH M, STEENDAM H. Precoding for PAPR Reduction in UW-OFDM[J]. *IEEE communications letters*, 2021, 25(7): 2305–2308.
- [7] MICHAÏLOW N, FETTWEIS G. Low peak-to-average power ratio for next generation cellular systems with generalized frequency division multiplexing [C]//*Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2013 International Symposium on. IEEE, 2014: 651–655.
- [8] SANDRYHAILA A, MOURA J M F. Discrete signal processing on graphs[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2013, 61(7): 1644–1656.
- [9] SENDREI L, MARCHEVSKY S, MICHAÏLOW N, et al. Iterative receiver for clipped GFDM signals [C]//2014 24th International Conference Radioelektronika. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1–4.
- [10] LIU K, DENG W F, LIU Y. An efficient nonlinear companding transform method for PAPR reduction of GFDM signals[C]//2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, Beijing, 2018: 460–464.
- [11] WEI Peng. N-continuous signaling for GFDM[J]. *IEEE transactions on communications* 68. 2(2020): 947–958.
- [12] TAI C L, SU B, CHEN P C. Optimal filter design for GFDM that minimizes PAPR under performance constraints[C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, Chennai, 2018: 1–6.
- [13] SHARIFIAN Z, OMIDI M J. Linear precoding for PAPR reduction of GFDM[J]. *IEEE wireless communications letters*, 2016, 5(5): 520–523.
- [14] SIM Z A, JUWONO F H, REINE R, et al. Performance of GFDM systems using quadratic programming pulse shaping filter design[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 37134–37146.
- [15] 邓炜锋. 广义频分复用(GFDM)系统 PAPR 抑制及干扰消除技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- DENG Weifeng. Research on PAPR reduction and interference cancellation of GFDM systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [16] CHOI J J, YANG S C, SHIN Y. A PRSC selection scheme based on PN code for OFDM PAPR reduction [C]//*Proceedings of 2004 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2004. ISPACS. Piscataway, 2005: 222–225.
- [17] MATTHÉ M, MENDES L L, FETTWEIS G. Generalized frequency division multiplexing in a Gabor transform setting[J]. *IEEE communications letters*, 2014, 18(8): 1379–1382.

本文引用格式:

宁晓燕,刘承赞,湛星宇,等. 广义频分复用系统峰均功率比抑制算法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(4): 794–799.

NING Xiaoyan, LIU Chengyun, CHEN Xingyu, et al. Peak-to-average power ratio reduction algorithm in generalized frequency division multiplexing system[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(4): 794–799.