

基于改进子载波预留算法的正交频分复用信号峰均比抑制方法研究

刘子威 杨彪 赵珊珊* 杜鸿飞

(南京邮电大学 南京 210023)

摘要: 由于系统对线性元器件的要求非常严格, 导致目前正交频分复用(OFDM)系统产生峰值平均功率比(PAPR)过高的问题, 引起OFDM和基于OFDM的雷达一体化系统的信号失真, 影响系统性能。针对该问题, 该文提出了基于加权最小二乘法的子载波预留法(TR)。该算法首先将OFDM设计方案中的子载波分为数据子载波和预留的空白子载波, 数据子载波调制数据子载波, 空白子载波调制空白数据。然后利用原始数据通过加权最小二乘法得到最佳削峰系数和削峰数据, 并将削峰数据调制在空白子载波上面。最后将削峰数据叠加到原始数据上, 完成PAPR的抑制。仿真表明, 基于加权最小二乘法的TR算法能够在1~3次迭代下实现良好的PAPR抑制效果, 并且它的收敛速度相比于传统算法有了明显的提高。

关键词: 正交频分复用; 峰值平均功率比; 子载波预留法

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1196-07

DOI: 10.11999/JEIT230475

Research on Peak to Average Power Ratio Suppression Method of Orthogonal Frequency Division Multiplexing Signal Based on Improved Tone Reservation Algorithm

LIU Ziwei YANG Biao ZHAO Shanshan DU Hongfei

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Due to the very strict requirements of the system for linear components, the current Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system has the problem of high Peak to Average Power Ratio (PAPR), which causes signal distortion of OFDM and OFDM-based radar integrated system, and affects the system performance. To solve this problem, a Tone Reservation(TR) method based on the weighted least squares method is proposed in this paper. Firstly, the subcarriers in the OFDM design scheme are divided into data subcarriers and reserved blank subcarriers, data subcarriers modulate data subcarriers, and blank subcarriers modulate blank data. Then, the original data is used to obtain the best peak clipping coefficient and peak clipping data through the weighted least squares method, and the peak clipping data is modulated on the blank subcarrier. Finally, the peak shaving data is superimposed on the original data to complete the suppression of PAPR. Simulation results show that the TR algorithm based on weighted least squares method can achieve good PAPR suppression effect in 1 to 3 iterations, and its convergence speed is significantly improved compared with the traditional algorithm.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Peak to Average Power Ratio (PAPR); Tone Reservation (TR)

1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division

Multiplexing, OFDM)^[1-4]是一种多载波调制技术, 它能将串行传输的数据流分解成多个并行的低速子流, 然后将数据调制到相互正交的子载波上, 在子信道中完成数据的传输。相比于传统的频分复用技术, OFDM能在相同的频带宽度下传输更多的数据。作为目前通信主要的调制方式与多载波传输方案之一, OFDM技术由于其良好的抗多径能力以及子载波灵活调制特性在雷达通信一体化^[5,6]中已经得到广泛的应用。此外OFDM系统具有高速数据传输的

收稿日期: 2023-05-23; 改回日期: 2023-12-07; 网络出版: 2023-12-14

*通信作者: 赵珊珊 zhaoshanshan025@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61801233), 国防科技重点实验室基金(JKW202209)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801233), The Science and Technology Foundation of State Key Laboratory (JKW202209)

能力, 这能够提高一体化系统在雷达信号处理中处理数据的能力, 从而提高雷达的探测和跟踪性能。

由于OFDM的输出是多个子信道输出的叠加, 当多个子载波的相位非常接近或者相同时, 会导致OFDM信号的瞬间峰值很高, 带来较大的峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)^[7]。如果功率放大器的动态范围不能满足信号的瞬时功率, 则会导致OFDM子载波之间的正交性遭到破坏, 使信号产生非线性失真。目前OFDM系统抑制PAPR的方法大致分为3类: 信号预畸变技术^[8,9]、编码类技术^[10]和概率类技术^[11]。信号预畸变技术是抑制PAPR最直接、最简单的方法。该方法会对原始信号做非线性操作, 削减信号的峰值, 从而完成PAPR的抑制。但是该方法会造成信号畸变, 还会对系统的性能造成一定的影响。编码类技术是一种线性抑制方法, 它会采用不同的编码方法对OFDM信号进行编码, 然后选取最小的码组作为OFDM符号数据进行传输。但是该方法的计算复杂度比较高, 容易降低系统信息速率。概率类技术的核心思想是降低信号中峰值出现的概率。概率类技术中的子载波预留(Tone Reservation, TR)^[12-15]算法是一种线性的、不会引起信号畸变的一种PAPR抑制方法。该方法不会恶化通信系统的误码率性能, 也不需要传递额外的边带信息。TR算法的基本思想是: 将OFDM系统中一部分子载波暂时调制空白数据, 然后对原始待传输数据进行处理得到削峰数据, 并将其调制到空白子载波上, 完成PAPR的抑制。文献^[16]提出了减控制算法(Clippling Control, CC), 简称CC-TR算法。CC-TR算法会对原始数据进行阈值削峰处理, 最终得到削峰数据。但是该算法收敛速度较慢, 需要经过多次迭代才能实现较好的PAPR抑制效果。文献^[17]提出了基于最小二乘法的子载波预留算法(Least Squares Approximation, LSA), 简称LSA-TR算法。LSA-TR算法会对CC-TR中的削峰数据进行最小二乘法处理得到削峰系数, 利用削峰系数和削峰数据解决了CC-TR收敛速度较慢的问题。但是LSA-TR算法并没有充分考虑数据之间的差异性, 导致利用最小二乘法得到的削峰系数的精度并不是特别高。

针对LSA-TR算法对削峰系数的估计精度不高的问题, 本文提出基于加权最小二乘法的TR算法。本算法通过计算削峰数据和初始削峰数据之间的加权系数, 并利用加权最小二乘法完成削峰系数的最优化估计。仿真结果表明本算法能够获得良好的PAPR抑制效果, 并且收敛速度相比于LSA-TR算法有了明显的提升。

2 基于OFDM子载波分配的雷达通信一体化信号模型与PAPR

本文提出的基于OFDM的TR算法, 主要是将子载波分为数据子载波和空白子载波。数据子载波可分为雷达子载波和数据子载波, 此时系统为雷达通信一体化系统。当雷达子载波为0时, 系统为OFDM通信系统。OFDM通信系统是一体化系统的一种特殊情况, 故本文设计模型采用一体化信号模型。

基于OFDM子载波分配的雷达通信一体化波形采用如图1所示的方案。在一个相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内, 一体化信号通常包含多个脉冲, 每一个脉冲由一个OFDM符号构成, 每一个脉冲都能独立地完成雷达探测和通信传输功能。

基于OFDM子载波分配的雷达通信一体化波形设计的核心在于: 将OFDM符号内的子载波分为雷达子载波和通信子载波, 分别调制雷达数据和通信数据, 最终合成一体化信号。该一体化方案下的子载波频域示意图如图2所示。

假设一个OFDM符号内拥有 N 个子载波, 将 N_s 个子载波分配给雷达数据, 剩余 $N - N_s$ 分配给通信数据。当 N_s 为0时, 此时一体化系统为OFDM通信系统。那么用于快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)调制的子载波频域序列 $\mathbf{Y}$ 可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_r + \mathbf{Y}_c = \alpha \mathbf{r} + \beta \mathbf{s} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Y}_r = \alpha \mathbf{r}$ 为雷达数据, $\mathbf{Y}_c = \beta \mathbf{s}$ 为通信数据, $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{s}$ 均为 N 维列向量, $\mathbf{r}$ 是雷达数据向量, $\mathbf{s}$ 是通

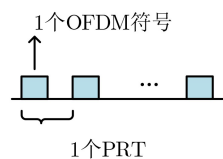


图1 一体化波形频域示意图

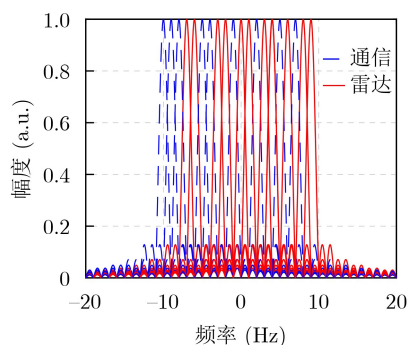


图2 基于OFDM子载波分配的雷达通信一体化的子载波分配示意图

信数据向量, α 和 β 分别为雷达数据和通信数据的数据分配矩阵, 则 α 和 β 可以表示为

$$\alpha = \text{diag}\{\alpha[0], \dots, \alpha[k], \dots, \alpha[N-1]\} \quad (2)$$

$$\beta = \text{diag}\{\beta[0], \dots, \beta[k], \dots, \beta[N-1]\} \quad (3)$$

其中, $\alpha + \beta = \mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ 为 N_s 阶单位矩阵。 $\alpha[k]$ 和 $\beta[k]$ 的元素值都是0和1的2元变量。当 $\alpha[k] = 1$, $\beta[k] = 0$ 时, 表明第 k 个子载波承载的是雷达数据。当 $\alpha[k] = 0$, $\beta[k] = 1$ 时, 则表明第 k 个子载波承载的是通信数据。

对于雷达数据向量 $\mathbf{r}$ 而言, 若发射信号采用线性调频信号, 则 $\mathbf{r}$ 的值是线性调频信号的频谱采样值, 一共有 N_s 个数据, 那么 $\mathbf{r}$ 的值可以表示为

$$r(n) = \text{DFT} \left[\exp \left(j\pi k_r \left(\frac{n}{F_s} \right)^2 \right) \right] \quad (4)$$

其中, $n = 0, 1, \dots, N_s - 1$, k_r 是调频斜率, F_s 代表的是采样频率, 并且满足 $N_s = F_s T$, T 是线性调频信号的周期。

对于通信传输而言, $\mathbf{s}$ 中共有 $N - N_s$ 个数据。通信数据通常是通过正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)或者相位键控调制(Phase Shift Keying, PSK)产生的。若采用16QAM调制, 则通信数据可以表示为

$$s(n') = a_o(n') \cos(2\pi f_c n') - a_e(n') \sin(2\pi f_c n') \quad (5)$$

其中, $n' = 0, 1, \dots, N - N_s - 1$, f_c 是载波频率。 a_o 和 a_e 为基带信号。

对于子载波频域数据 $\mathbf{Y}$ 而言, 则其时域形式 $\mathbf{y}$ 可以表示为

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{Y}(k) \exp \left(j \frac{2\pi}{N} kn \right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

那么, $\mathbf{y}$ 的PAPR可以表示为

$$\text{PAPR}(\mathbf{y}) = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |\mathbf{y}|^2}{E[|\mathbf{y}|^2]} \quad (7)$$

其中, $E[|\mathbf{y}|^2]$ 表示的是信号 $\mathbf{y}$ 的平均功率。

为了描述OFDM系统PAPR的情况, 通常采用互补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF), 它表示的是信号中PAPR小于设定门限 z 的概率, 即

$$\text{CCDF} = P(\text{PAPR} > z) \quad (8)$$

3 基于加权最小二乘法的TR算法

基于加权最小二乘法的TR算法将基于OFDM子载波分配的雷达通信一体化中的子载波进一步分

为数据子载波和空白子载波, 数据子载波包括雷达子载波和通信子载波, 并且调制对应的雷达数据和通信数据, 空白子载波调制空白数据。则基于加权最小二乘法的TR算法中频域子载波分配示意图如图3所示。

基于加权最小二乘法的TR算法的具体的流程如下所示:

步骤1 首先设迭代次数 $i = 1$, 将削峰前的一体化频域数据 $\mathbf{Y}_i$ 进行IFFT变换得到时域数据 $\mathbf{y}_i$ 。然后将OFDM子载波划分为数据子载波和预留的空白子载波。数据子载波分为雷达子载波和通信子载波, 并且调制对应的雷达数据和通信数据。空白子载波的个数为 L , 空白子载波暂时不调制任何数据。

步骤2 设定削峰阈值 A_i , $A_i = R_i \cdot E[\mathbf{y}_i]$ 。 $E[\mathbf{y}_i]$ 为第 i 次迭代的时域数据 $\mathbf{y}_i$ 的平均幅度, R_i 为第 i 次削峰过程中的幅度放大系数, 通常选取略大于1的数。既可保证削峰幅度不会太小, 又可以防止高峰值信号叠加后仍然出现过高的峰值。若时域数据 $\mathbf{y}_i$ 的峰值小于或等于阈值 A_i , 则 $\mathbf{y}_i$ 无需削峰处理, 可以直接输出 $\mathbf{y}_i$ 用于一体化探测和信息传输; 若时域数据 $\mathbf{y}_i$ 的峰值大于阈值 A_i , 则需要削峰处理。削峰过程如式(9)所示

$$\hat{\mathbf{y}}_i = \begin{cases} \mathbf{y}_i, & |\mathbf{y}_i| \leq A_i \\ A_i \exp(j\theta_i), & |\mathbf{y}_i| > A_i \end{cases} \quad (9)$$

其中, θ_i 是 $\mathbf{y}_i$ 的相位。

步骤3 初始的理想削峰信号 $\mathbf{f}_i$ 可以由式(10)得到

$$\mathbf{f}_i = \hat{\mathbf{y}}_i - \mathbf{y}_i \quad (10)$$

步骤4 对 $\mathbf{f}_i$ 进行FFT变换得到其频域形式 $\mathbf{F}_i$, 保留频域数据中空白子载波位置上的频域数据, 将数据子载波位置上的频域数据直接清零。则经处理可得到 $\mathbf{C}_i$

$$\mathbf{C}_i(k) = \begin{cases} \mathbf{F}_i(k), & k \in \varpi \\ 0, & k \in \varpi^c \end{cases} \quad (11)$$

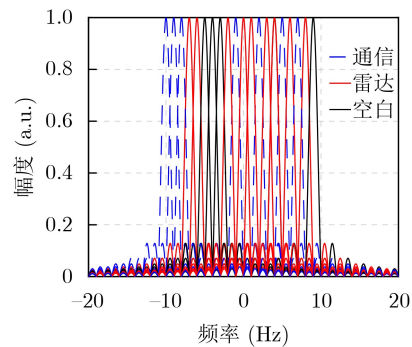


图3 基于加权最小二乘法的TR算法下的一体化子载波分配示意图

$\varpi = [L_0, L_1, \dots, L_m]$ ($0 \leq L_m \leq N-1, m=0, 1, \dots, L-1$) 是预留子载波的位置集合, ϖ^c 是 ϖ 在 OFDM 子载波集 $[0, 1, \dots, N-1]$ 的补集。

步骤5 记 $\mathcal{Y} = \{q | f_i(q) \neq 0\}$, 并记损失函数

$$L = \sum_{n \in \mathcal{Y}} \omega_n [\mu |c_i(n)| - |f_i(n)|]^2 \quad (12)$$

其中, c_i 表示对频域数据 C_i 进行 IFFT 变换成时域数据, $|c_i(n)|$ ($n \in \mathcal{Y}$) 和 $|f_i(n)|$ ($n \in \mathcal{Y}$) 表示的是 c_i 和 f_i 中需要削峰的数据, ω_n 是加权系数, μ 为削峰系数, 对损失函数 L 求 μ 的偏导数, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mu} &= \frac{\sum_{n \in \mathcal{Y}} \omega_n [\mu |c_i(n)| - |f_i(n)|]^2}{\partial \mu} \\ &= \sum_{n \in \mathcal{Y}} 2\mu \omega_n |c_i(n)|^2 - 2|c_i(n)||f_i(n)| \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{令 } \frac{\partial L}{\partial \mu} = 0, \text{ 得 } \mu^{\text{opt}} = \hat{\mu} = \frac{\sum_{n \in \mathcal{Y}} \omega_n |c_i(n)||f_i(n)|}{\sum_{n \in \mathcal{Y}} \omega_n |c_i(n)|^2}.$$

当 $\mu < \mu^{\text{opt}}$ 时, $\frac{\partial L}{\partial \mu} < 0$, 当 $\mu > \mu^{\text{opt}}$ 时, $\frac{\partial L}{\partial \mu} > 0$. 损失函数在 μ^{opt} 有最小值, 损失最小。

加权系数则是计算 $|c_i(n)|$ ($n \in \mathcal{Y}$) 和 $|f_i(n)|$ ($n \in \mathcal{Y}$) 之间的标准差得到, 计算过程为

$$t_n = \frac{|c_i(n)| + |f_i(n)|}{2} \quad (n \in \mathcal{Y}) \quad (14)$$

$$\omega_n = \frac{[| |c_i(n)| - t_n | + | |f_i(n)| - t_n |]}{2} \quad (n \in \mathcal{Y}) \quad (15)$$

步骤6 结合最佳削峰系数 μ^{opt} 并将其叠加到 y_i 上

$$y_{i+1} = y_i + \mu^{\text{opt}} c_i \quad (16)$$

步骤7 返回步骤2, 并更新迭代次数, 继续进行削峰判断。

只考虑1次迭代的情况, c 表示为初始削峰数据, f 表示初始理想削峰数据。此时 $\mu^{\text{opt}} c$ 是 f 的基于加权最小二乘逼近, 并且相比于 LSA-TR 算法削峰系数的估计更加精确。这是因为 LSA-TR 算法中的损失函数为

$$L_1 = \sum_{n \in \mathcal{Y}} [\mu |c(n)| - |f(n)|]^2 \quad (17)$$

在计算 μ 时并没考虑 c 与 f 之间的数据差异, 导致所有的数据对损失函数 L_1 的贡献率都一致。而在基于加权最小二乘法的 TR 算法中, 通过计算 c 与 f 之间的权重系数, 优化了不同数据对损失函数的贡献, 差异性大的数据赋予较大的权重, 差异性小的数据赋予较小的权重。因此相比于 LSA-TR 算

法, 通过基于加权最小二乘的 TR 算法计算得到的 μ^{opt} 可以更好地完成对削峰系数的估计, 从而优化迭代过程中的收敛速率与 PAPR 的抑制效果。

4 复杂度分析

在 TR 类算法中, TR 算法每次迭代需要进行两次 FFT/IFFT 运算和 3 次矩阵计算, 记 1 次 N 点的 FFT/IFFT 运算的复杂度为 $O(N \log_2 N)$, TR 算法的复杂度为 $I \times (2 \times O(N \log_2 N) + 3N)$, 其中 I 为迭代次数。在 LSA-TR 算法中, 增加了 μ 的计算, 需 3 次矩阵计算, 因此, LSA-TR 算法 1 次迭代计算需要两次 FFT/IFFT 运算和 6 次矩阵计算, 复杂度为 $I \times (2 \times O(N \log_2 N) + 6N)$ 。本文基于加权最小二乘法的 TR 算法, 相比于 TR 算法, μ 的计算需要额外 5 次矩阵计算, 因此, 1 次迭代计算需要两次 FFT/IFFT 运算和 8 次矩阵计算, 计算复杂度为 $I \times (2 \times O(N \log_2 N) + 8N)$ 。

由于基于加权最小二乘法的 TR 算法经过 1 次计算能够得到很好的抑制效果, 取 $I = 1$, 计算复杂度为 $2 \times O(N \log_2 N) + 8N$, LSA-TR 算法的迭代次数一般需要 3 次以上, 计算复杂度大于 $6 \times O(N \log_2 N) + 18N$, TR 算法的迭代次数一般在 6 次以上, 计算复杂度大于 $12 \times O(N \log_2 N) + 18N$ 。因此, 相比之下, 本文提出的算法复杂度最小。

5 仿真分析

本节首先对基于加权最小二乘法的 TR 算法的 PAPR 抑制效果进行仿真。然后将基于加权最小二乘法的 TR 算法与经典的 CC-TR 算法和 LSA-TR 算法做了对比, 以体现改进算法的先进性。接着从不同的角度分析了基于加权最小二乘法的 TR 算法性能表现。最后分析了基于加权最小二乘法的 TR 算法的计算复杂度。

在一体化仿真设计中, TR, LSA-TR 和本文算法的仿真参数一样, 发射系统发送 1 000 个脉冲, 每一个脉冲包含一个完整的 OFDM 符号, 每个符号包含 256 个子载波, 前 240 个为数据子载波, 其中前 128 个子载波调制雷达数据, 后面 112 个子载波调制 16QAM 数据, 末尾预留 16 个空白子载波调制削峰数据。对于不同迭代次数 i , 令幅度放大系数 $R_i \equiv 1.2$, 则阈值门限 $A_i = 1.2E[y_i]$, $E[y_i]$ 为第 i 次迭代的时域数据的平均幅值, A_i 为第 i 次迭代的阈值门限。其余仿真数据如表 1 表示。

(1) PAPR 性能表现。基于加权最小二乘法的 TR 算法的 PAPR 抑制效果的 CCDF 曲线如图 4 所示。

对图 4 分析可得, 取 $\text{CCDF} = 10^{-3}$, 经过 5 次迭代后, PAPR 已经出现较大的降低, 约 2 dB。这

表1 PAPR仿真参数

参数	数值
雷达载频	1.5 GHz
信号带宽	1 MHz
信号时宽	64 μ s
采样频率	2 MHz
脉冲周期	480 μ s
信噪比	20 dB
迭代次数	5

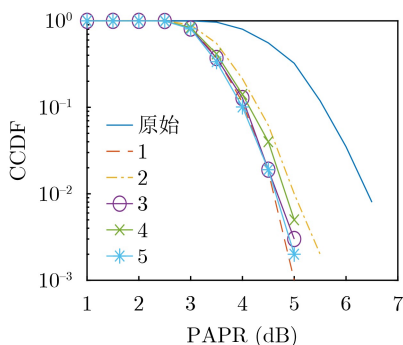


图4 基于加权最小二乘法的TR算法的PAPR抑制效果的CCDF曲线

表明基于加权最小二乘法的TR算法能够在有限的迭代次数中取得较好的PAPR抑制效果,并且算法的收敛速度非常快。但是当进行第2次迭代时,PAPR的抑制效果出现了轻微的反噬现象,这表明一体化信号中的高峰值信号数量开始增多。而第3次迭代又能够抑制住第2次迭代出现的高峰值信号,第5次迭代同样地抑制住了第4次出现的PAPR反噬现象。综合上述分析,迭代次数的增多只会提高算法的复杂度,而PAPR的抑制效果并没有出现改善,反而会出现轻微的恶化,奇数次迭代的效果是要优于前一次的迭代效果。因此该算法选择奇数次迭代次数比较合理,且迭代次数要少,最好是第1,3,5次。

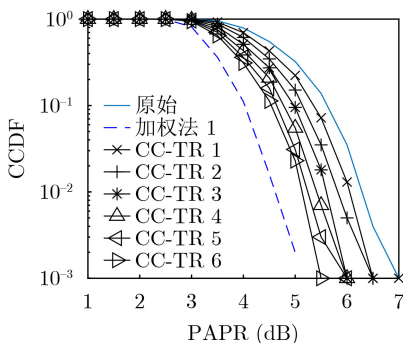


图5 基于加权最小二乘法的TR算法与CC-TR算法的PAPR抑制效果的PAPR的CCDF曲线

(2) 基于加权最小二乘法的TR算法与CC-TR和LSA-TR的算法比较。

(a) 与CC-TR算法的比较。对图5分析可得,取 $\text{CCDF} = 10^{-3}$,基于加权最小二乘法的TR算法经过1次迭代后,PAPR的抑制效果非常明显,下降约2 dB。而CC-TR算法每一次的迭代后的削峰幅度非常小,PAPR抑制效果也非常有限,经过六次迭代后,PAPR下降约为1.5 dB,抑制效果不如本文所提算法。

(b) 与LSA-TR算法的比较。对图6分析可得,取 $\text{CCDF} = 10^{-3}$,LSA-TR算法经过3次迭代后,PAPR的抑制效果才能取得本文提出算法的第1次迭代效果。并且随着迭代次数的增多,LSA-TR算法的抑制效果并没有得到明显的提高,而多次迭代就意味着算法复杂度的提升和系统资源的消耗。与LSA-TR算法相比,本文算法的优势在于可以利用更少的迭代次数,取得良好的PAPR抑制效果,减小了系统计算的复杂度。

仿真参数与表1保持一致,分别改变幅度放大系数和预留空白子载波个数的大小,比较系统改变对抑制效果的影响,如图7、图8所示。

(3) 基于加权最小二乘法的TR算法中幅度放大系数对PAPR抑制效果的影响如图7所示。

对图7分析可得,幅度放大系数分别取0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4,且迭代次数设置为1次的情况下,PAPR的抑制效果随着幅度放大系数的取值不同而呈现不同的抑制效果。从0.8开始,随着幅度放大系数的增大,第1次迭代后的PAPR抑制效果越来越好。当 $R = 1.2$ 时,PAPR抑制达到最佳的效果。但是随着系数的增大,PAPR的抑制效果出现了恶化。综合来看,本参数下的最佳的幅度放大系数为 $R = 1.2$ 。

(4) 基于加权最小二乘法的TR算法中不同预留空白子载波个数对PAPR抑制效果的影响如图8所示。

对图8分析可得,随着预留的空白子载波数量

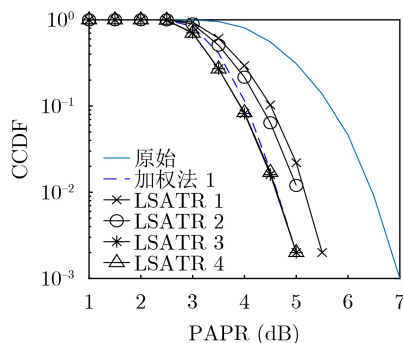


图6 基于加权最小二乘法的TR算法与LSA-TR算法的PAPR抑制效果的PAPR的CCDF曲线

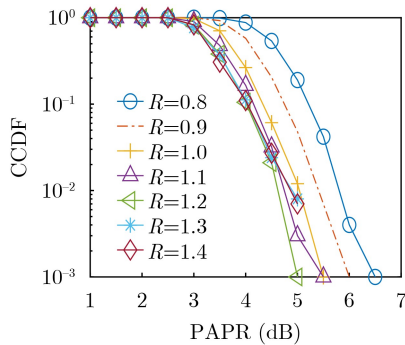


图7 基于加权最小二乘法的TR算法中不同幅度放大系数下的第1次迭代后的PAPR的CCDF曲线

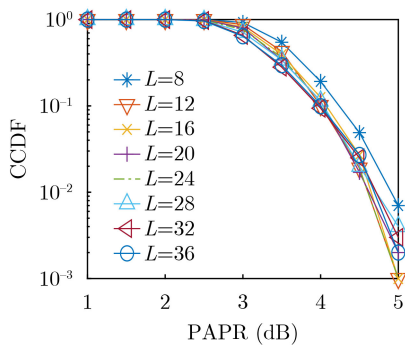


图8 基于加权最小二乘法的TR算法中不同空白子载波个数下的第1次迭代后PAPR的CCDF曲线

的增多，基于加权最小二乘法的TR算法的PAPR抑制效果越来越好。但是随着空白子载波数量的增多，削峰数据不仅没有完成对高峰值信号的削峰，PAPR的抑制效果反而出现了略微反噬。综合来看，本参数下的最佳的预留子载波个数为12或者16。

6 结论

针对基于OFDM子载波的雷达通信一体化中存在PAPR过高的问题，以及LSA-TR对削峰系数的估计不够精确的问题，本文提出基于加权最小二乘法的TR算法，优化了削峰系数的估计。仿真结果表明，本算法能够在1~3次的迭代过程下取得良好的PAPR抑制效果，并且收敛速度也有了明显的提高。

参考文献

- [1] 马丁友, 刘祥, 黄天耀, 等. 雷达通信一体化: 共用波形设计和性能边界[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 198–212. doi: [10.12000/JR21146](https://doi.org/10.12000/JR21146).
MA Dingyou, LIU Xiang, HUANG Tianyao, *et al.* Joint radar and communications: Shared waveform designs and performance bounds[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 198–212. doi: [10.12000/JR21146](https://doi.org/10.12000/JR21146).
- [2] 刘飞峰, 刘鸿杰, 缪颖杰, 等. 基于无网格压缩感知的雷达通信一体化系统目标参数估计方法研究[J]. 信号处理, 2022,

- 38(11): 2276–2286. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.11.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.11.005).
- LIU Feifeng, LIU Hongjie, MIAO Yingjie, *et al.* Research on target parameter estimation method of radar communication integrated system based on grid-less compression sensing[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(11): 2276–2286. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.11.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.11.005).
- [3] TIAN Xuanxuan and SONG Zhaohui. On radar and communication integrated system using OFDM signal[C]. Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 318–323. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944220](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944220).
- [4] LIU Gaogao, WANG Youming, and YANG Wenbo. Radar sensor and data communication system based on OFDM without cyclic prefix[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 7578–7590. doi: [10.1109/JSEN.2022.3229034](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3229034).
- [5] SHI Chenguang, WANG Fei, SALOUS S, *et al.* Joint subcarrier assignment and power allocation strategy for integrated radar and communications system based on power minimization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11167–11179. doi: [10.1109/JSEN.2019.2935760](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2935760).
- [6] 赵玉振, 陈龙永, 张福博, 等. 一种基于OFDM-chirp的雷达通信一体化波形设计与处理方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 453–466. doi: [10.12000/JR21028](https://doi.org/10.12000/JR21028).
ZHAO Yuzhen, CHEN Longyong, ZHANG Fubo, *et al.* A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM-chirp[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 453–466. doi: [10.12000/JR21028](https://doi.org/10.12000/JR21028).
- [7] CUI Xiaoyan, LIU Kaiming, and LIU Yuan'an. Novel linear companding transform design based on linear curve fitting for PAPR reduction in OFDM systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(11): 3604–3608. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3107410](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3107410).
- [8] 韩东升, 杨维, 刘薇. 一种改进的限幅滤波降低PAPR算法[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(4): 44–48. doi: [10.13190/j.jbupt.2014.04.010](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2014.04.010).
HAN Dongsheng, YANG Wei, and LIU Wei. Improved clipping and filtering algorithm applied to reduce PAPR[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2014, 37(4): 44–48. doi: [10.13190/j.jbupt.2014.04.010](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2014.04.010).
- [9] KOU Y J, LU W S, and ANTONIOU A. Peak-to-average power-ratio reduction algorithms for OFDM systems via constellation extension[C]. 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kobe, Japan, 2005: 2615–2618. doi: [10.1109/ISCAS.2005.1465162](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2005.1465162).
- [10] 李自琦, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 基于分组格雷编码的OFDM雷达通信一体化系统峰均功率比抑制[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 548–

555. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14059](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14059).
- LI Ziqi, MEI Jinjie, HU Dengpeng, *et al.* Peak-to-average power ratio reduction for integration of radar and communication systems based on OFDM signals with block golay coding[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 548–555. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14059](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14059).
- [11] WANG Yajun, CHEN Wen, and TELLAMBURA C. Genetic algorithm based nearly optimal peak reduction tone set selection for adaptive amplitude clipping PAPR reduction[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2012, 58(3): 462–471. doi: [10.1109/TBC.2012.2191029](https://doi.org/10.1109/TBC.2012.2191029).
- [12] CHEN J C and LI C P. Tone reservation using near-optimal peak reduction tone set selection algorithm for PAPR reduction in OFDM systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(11): 933–936. doi: [10.1109/LSP.2010.2077278](https://doi.org/10.1109/LSP.2010.2077278).
- [13] GOKCELI S, PERUGA I, TIROLA E, *et al.* Novel tone reservation method for DFT-s-OFDM[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(10): 2130–2134. doi: [10.1109/LWC.2021.3094887](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3094887).
- [14] NGUYEN Q, NGUYEN T K, NGUYEN H H, *et al.* Novel PAPR reduction algorithms for OFDM signals[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 77452–77461. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3188675](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188675).
- [15] SUPPITUX S, TANGKACHAVANA S, VINICHHAYAKUL T, *et al.* Enhancing PAPR reduction for tone reservation algorithms by deep clipping[C]. ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, Thailand, 2010: 415–419.
- [16] GATHERER A and POLLEY M. Controlling clipping probability in DMT transmission[C]. Conference Record of the Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (Cat. No. 97CB36136), Pacific Grove, USA, 1997: 578–584. doi: [10.1109/ACSSC.1997.680443](https://doi.org/10.1109/ACSSC.1997.680443).
- [17] LI Haibo, JIANG Tao, and ZHOU Yang. An improved tone reservation scheme with fast convergence for PAPR reduction in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(4): 902–906. doi: [10.1109/TBC.2011.2169622](https://doi.org/10.1109/TBC.2011.2169622).
- 刘子威: 男, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、雷达自适应抗干扰技术和阵列信号处理。
- 杨 彪: 男, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。
- 赵珊珊: 女, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、雷达自适应抗干扰技术和阵列信号处理。
- 杜鸿飞: 男, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。
- 责任编辑: 余 蓉