

文章编号:1007-5321(2019)02-0090-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-058

面向 5G F-OFDM 的量子混沌扩展序列算法

马英杰, 赵 耿, 范晓红, 张昕然, 高 原

(北京电子科技学院 电子通信工程系, 北京 100070)

摘要: 第 5 代移动通信系统(5G)子带滤波正交频分复用技术(F-OFDM)存在较高峰均功率比(PAPR)问题,传统选择性映射算法候选序列数量少,对此,提出量子混沌扩展序列算法,以解决 5G F-OFDM 系统 PAPR 较高的问题.采用分割方法将原始信号分割为实部信号和虚部信号,用量子 Logistic 混沌映射分别与实部信号和虚部信号进行点乘,实部候选序列与虚部候选序列线性组合后再计算 PAPR,选择最小 PAPR 进行传输.仿真结果表明,提出的算法降低了系统的 PAPR,扩展了候选序列数量,降低了计算复杂度.

关 键 词: 第 5 代移动通信系统;子带滤波正交频分复用技术;量子混沌扩展序列算法;峰均功率比;计算复杂度

中图分类号:TN918

文献标志码:A

Quantum Chaotic Extended Sequence Algorithm for 5G F-OFDM

MA Ying-jie, ZHAO Geng, FAN Xiao-hong, ZHANG Xin-ran, GAO Yuan

(Department of Electronic Communication Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: High peak to average power ratio (PAPR) is a main problem of the fifth generation of mobile communications system(5G) filtered- orthogonal frequency division multiplexing (F-OFDM) systems. Aiming at the shortcomings of traditional selective mapping algorithm, such as limited number of candidate sequences, the quantum chaotic extended sequence algorithm was proposed to solve the high PAPR problem of 5G F-OFDM systems. The original signal was divided into real part signal and imaginary part signal by segmentation method, which were respectively multiplied the quantum logistic chaotic map. The PAPR was calculated by linear superposition of real sequences and the imaginary part candidate, and the minimum PAPR was selected for transmission. The simulation results show that the proposed algorithm reduces the PAPR of 5G F-OFDM system, increases the number of candidate signals and reduces the computational complexity. The proposed scheme has a broad application prospect in 5G multicarrier modulation technology.

Key words: the fifth generation of mobile communications system; filtered-orthogonal frequency division multiplexing; quantum chaotic extended sequence algorithm; peak to average power ratio; computational complexity

传统的正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)技术无法满足第 5 代移

动通信系统(5G)海量连接的需求^[1].为了解决 5G 各种应用场景和多样性的业务需求问题,学者们提

收稿日期:2018-04-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61772047)

作者简介:马英杰(1979—),女,副教授, E-mail:dmzm12@163.com.

出了适合 5G 的新型多载波技术^[2-4]. 子带滤波正交频分复用技术 (filtered-OFDM) 将系统带宽划分为多个子带, 子载波映射模块为各子带的子载波编号. F-OFDM 子带符号的频谱有一定重叠, 在实现中, 为了避免 F-OFDM 子带上的 OFDM 信号通过数模转换器时引起混淆, 需要过采样, 使系统产生较高峰均功率比 (PAPR, peak to average power ratio)^[5].

扰码技术是一种降低 PAPR 的主要方法, 其中, 选择性映射 (SLM, selective mapping) 算法结构简单、明了, 效果显著, 但运算复杂度较高, 许多研究人员对 SLM 算法进行了改良^[6-10].

笔者提出量子混沌扩展序列算法, 旨在降低 5G

F-OFDM 系统较高的 PAPR. 采用量子混沌序列代替传统伪随机序列, 作为随机相位序列矢量, 满足 5G 海量连接的需求.

1 F-OFDM 系统分析

F-OFDM 是基于子带滤波的 OFDM, 将系统带宽划分为若干子带, 每种子带根据不同业务场景需求配置不同的子载波带宽和循环前缀 (CP, cycle prefix), 从而满足不同业务的时频资源需求. 各子带上含有对子带进行滤波的子带滤波器, 从而降低子带带外频谱泄露, F-OFDM 收发机架构如图 1 所示.

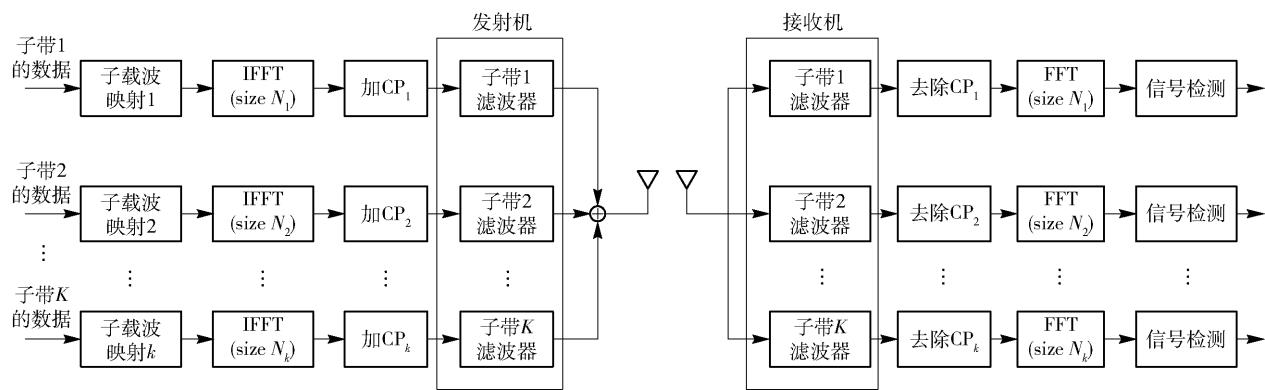


图1 F-OFDM 收发机架构示意图

时间离散的 F-OFDM 子带 OFDM 信号为

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N_s-1} X(m) e^{j2\pi \frac{mn}{N}} \quad (1)$$

其中: 用 N 个采样点表示连续时间周期为 T 的 FOFDM 子带 OFDM 信号, m/N 表示第 m 个子载波的频率, n 表示子载波编号, N_s 表示子载波数量, $N > N_s$.

式(1)的复包络为

$$A(t) = x(t) + jy(t) \quad (2)$$

F-OFDM 输入的串行数据一帧为 M bit, 每帧分为 N 组, 第 i 组有 L_i bit.

$$M = \sum_{i=1}^N L_i \quad (3)$$

第 i 组比特对应第 i 个子信道的信号 d_n ($n=0, 1, \dots, N-1$), 通过 IFFT 完成 $\{d_n\}$ 的 F-OFDM 基带调制, 则 F-OFDM 信号为

$$f(t) = \text{Re} \{ A(t) e^{j\omega_0 t} \} =$$

$$\text{Re} \{ (x(t) + jy(t)) (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t) \} = x(t) \cos \omega_0 t - y(t) \sin \omega_0 t \quad (4)$$

F-OFDM 系统与 OFDM 系统区别在于增加了子

带滤波功能, 子带滤波器冲激响应为 $h(n)$, 则其输出信号为

$$w(n) = f(n) h(n) \quad (5)$$

2 量子混沌扩展序列算法

2.1 量子 Logistic 混沌映射

耗散量子系统通常被描述为将系统耦合到谐振子的路径上, 以构造具有量子校正的量子 Logistic 映射. Akhshani 等^[11] 证明了非常低阶的量子校正可以产生下述混沌映射:

$$\phi_2(x'_n) = r(x'_n - |x'_n|^2) - ry'_n \quad (6a)$$

$$\phi_2(y'_n) = -y'_n e^{-2\beta} + e^{-\beta} r [(2 - x'_n - x'_n)^*] y'_n - x'_n z'_n{}^* - x'_n{}^* z'_n \quad (6b)$$

$$\phi_2(z'_n) = -z'_n e^{-2\beta} + e^{-\beta} r [2(1 - x'_n{}^*) z'_n - 2x'_n y'_n - x'_n] \quad (6c)$$

其中: r 为可调参数, β 为耗散参数, $x'_n{}^*$ 为 x'_n 的复共轭, $z'_n{}^*$ 为 z'_n 的复共轭.

通过式(6)生成量子 Logistic 映射, 具有自然并行性、结构简单、容量大、不易破解等优点, 能够满足

5G 海量用户的需求。

2.2 量子混沌扩展序列算法分析

针对传统 SLM 算法候选序列数量少的缺点,提出了量子混沌扩展序列(QCES, quantum chaotic extended sequence)算法,采用分割方法将原始信号分割为实部信号和虚部信号,并采用量子 Logistic 混沌映射代替传统伪随机序列作为随机相位序列矢量分别与实部信号和虚部信号进行点乘,然后进行 IFFT 变换,实部候选序列与虚部候选序列组合后计算 PAPR,选择最小 PAPR 进行传输。

如图 2 所示,5G F-OFDM 数据块为 $x(t)$,对串行输入的信号 $x(t)$ 进行符号映射,通过串并变换分成 $2N$ 个子信道,采用分割方法将信号 $x(t)$ 分割为实部和虚部,分别在 N 个子信道上进行传输。采用量子 Logistic 混沌映射生成 N 个不同的长度为 M 的随机相位序列矢量 \mathbf{P} ,则第 m 个随机相位序列矢量为 $\mathbf{P}_m = (P_{m,0}, P_{m,1}, \dots, P_{m,M-1})$, $0 \leq m \leq N-1$ 。第 u 个数据块 $x_u(t)$ 分割为实部 $x_{u,r}(t)$ 和虚部 $x_{u,i}(t)$,分别与第 m 个随机相位序列矢量 \mathbf{P}_m 点乘,然后进行 IFFT 运算,分别产生候选传输序列 $s_{u,r}^m(t)$ 、 $s_{u,i}^m(t)$ 。

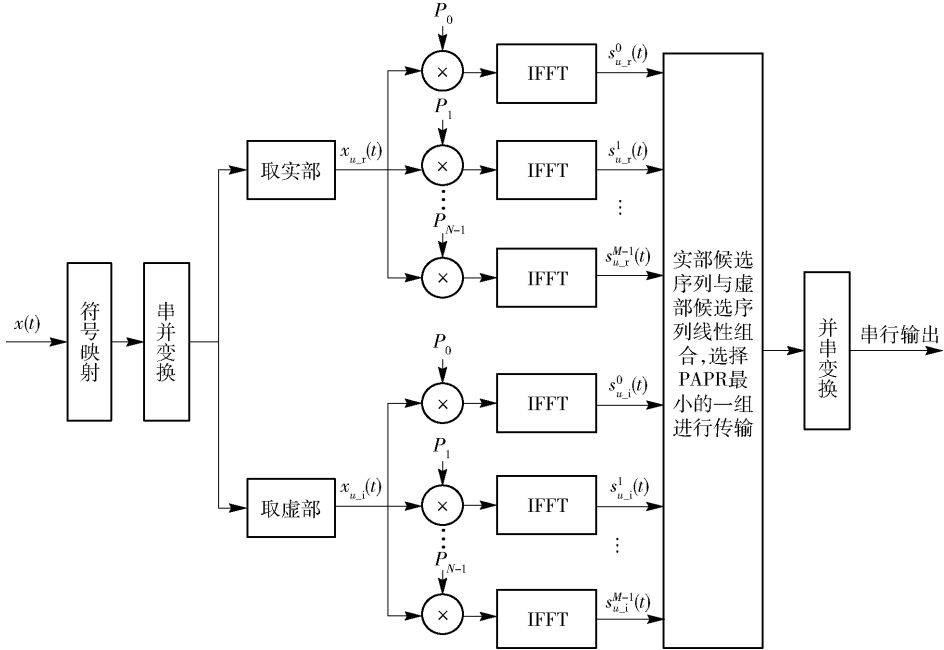


图 2 量子混沌扩展序列算法的原理图

$$s_{u,r}^m(t) = \text{IFFT}(x_{u,r}(t) \otimes P_m) = \text{IFFT}(x_{u,r,0}(t)P_{m,0}, x_{u,r,1}(t)P_{m,1}, \dots, x_{u,r,N-1}(t)P_{m,M-1}), 0 \leq m \leq N-1 \quad (7)$$

$$s_{u,i}^m(t) = \text{IFFT}(x_{u,i}(t) \otimes P_m) = \text{IFFT}(x_{u,i,0}(t)P_{m,0}, x_{u,i,1}(t)P_{m,1}, \dots, x_{u,i,N-1}(t)P_{m,M-1}), 0 \leq m \leq N-1 \quad (8)$$

其中: $s_{u,r}^m(t)$ 为实部候选序列, $s_{u,i}^m(t)$ 为虚部候选序列。

实部的候选序列 $s_{u,r}^{k,q}(t)$ 和虚部的候选序列 $s_{u,i}^q(t)$ 进行线性组合, α_k, β_g 均为系数, 得到候选传输序列 $s_{u,r}^{k,q}(t)$ 为

$$s_{u,r}^{k,q}(t) = \alpha_k s_{u,r}^k(t) \pm j\beta_g s_{u,i}^q(t) = \alpha_k \text{IFFT}(x_{u,r}(t) \otimes P_k) \pm j\beta_g \text{IFFT}(x_{u,i}(t) \otimes P_q) \quad (9)$$

扩展后的候选传输序列 $s_{eu}(t)$ 表示为

$$s_{eu}(t) = \{s_u^0(t), s_u^1(t), \dots, s_u^n(t), \dots, s_u^{N^2-1}(t)\}, 0 \leq n \leq N^2-1 \quad (10)$$

选择第 u 个数据块候选传输序列中 PAPR 最小的一组记为 X_u , 则

$$X_u = \arg \min_{0 \leq n \leq N^2-1} \{ \text{PAPR}(s_u^n(t)) \}, 0 \leq u \leq N-1 \quad (11)$$

故输出序列为

$$X = \sum_{u=0}^{N-1} X_u \quad (12)$$

3 系统性能分析

笔者采用 QPSK 调制, 子载波数为 128, 用互补累积分布函数(CCDF, complementary cumulative distribution function)来描述系统 PAPR 的分布情况。Moon 等^[12]提出了选定数据方法(SDU, selected data

utilization), 给定特定的选择条件来旋转相位因子, 从而对传统 SLM 算法的 PAPR 性能进行改进. 笔者提出的量子混沌扩展序列算法与传统 SLM 算法和 SDU 算法的 PAPR 性能比较如图 3 所示.

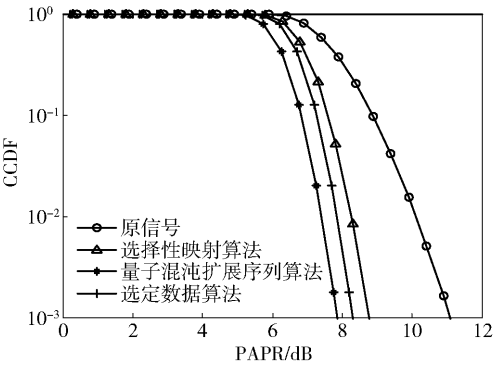


图 3 不同算法下的 PAPR 性能对比

从图 3 可以看出, 与传统 SLM 算法和 SDU 算法相比, 笔者提出的量子混沌扩展序列算法更加有效地降低了系统的 PAPR.

假设传统 SLM 算法和笔者提出的量子混沌扩展序列算法均产生 L^2 个候选序列, 子载波数为 R , 过采样率为 Q , RQ 点的 IFFT 变换需要进行 $\frac{RQ}{2}\text{lb}(RQ)$ 次复数乘法 and $RQ\text{lb}(RQ)$ 次复数加法. 传统 SLM 算法需要进行 L^2 次 IFFT 变换生成 L^2 个相位序列, 即共需要进行 $\frac{L^2RQ}{2}\text{lb}(RQ)$ 次复数乘法 and $L^2RQ\text{lb}(RQ)$ 次复数加法. 笔者提出的量子混沌扩展序列算法, L 次 IFFT 变换生成 L 个候选序列实部和虚部, 即需要进行 $\frac{LRQ}{2}\text{lb}(RQ)$ 次复数乘法 and $LRQ\text{lb}(RQ)$ 次复数加法, 然后将 L 个候选序列的实部和虚部线性组合生成 L^2 个候选序列, 需要 L^2RQ 次复数加法.

当候选序列为 L^2 时, 笔者提出的量子混沌扩展序列算法与传统的 SLM 算法计算复杂度比较如表 1 所示.

表 1 不同算法下的计算复杂度对比

算法	复数乘法次数	复数加法次数
传统 SLM	$\frac{L^2RQ}{2}\text{lb}(RQ)$	$L^2RQ\text{lb}(RQ)$
QCES	$\frac{LRQ}{2}\text{lb}(RQ)$	$LRQ\text{lb}(RQ) + L^2RQ$
QCES/传统 SLM	$\frac{1}{L}$	$\frac{1}{L} + \frac{1}{\text{lb}(RQ)}$

由表 1 可知, 当候选序列均为 L^2 时, 所提出的量子混沌扩展序列算法需要的复数乘法次数为传统 SLM 算法的 $\frac{1}{L}$, 复数加法次数为传统 SLM 算法的 $\left(\frac{1}{L} + \frac{1}{\text{lb}(RQ)}\right)$, 随着候选序列数量的增加, 该比值均不断变小, 所以笔者提出的量子混沌扩展序列算法采用分割方法与线性组合变换, 扩展了候选序列数量, 相比传统 SLM 算法的计算复杂度大大降低, 可以更高效地传输数据.

4 结束语

对传统的 SLM 算法进行了改进, 提出了量子混沌扩展序列算法, 解决了 5G F-OFDM 系统的高 PAPR 问题. 面向 5G 海量连接需求, 采用量子混沌序列代替传统伪随机序列, 可提供大量随机相位序列矢量. 采用分割方法, 扩展了候选序列数量, 降低了计算复杂度, 提高了传输效率, 在 5G 多载波调制技术中具有一定的应用价值.

参考文献:

[1] 钱嘉娇. 5G 移动通信系统中 F-OFDM 关键技术的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.

[2] Liu Ling, Zhou Yiqing, Garcia V, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2741-2755.

[3] Garica V, Zhou Yiqing, Shi Jinglin. Coordinated multi point transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4297-4308.

[4] Bi Meihua, Jia Weikang, Li Longsheng, et al. Load diversity based optimal processing resource allocation for super base stations in centralized radio access networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE Press, 2014: 5119-5124.

[5] 杨立章. F-OFDM 系统中子带滤波器设计及 PAPR 抑制方法的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.

[6] Xiao Yaoqiang, Wang Zhiyi, Cao Jun, et al. Time-frequency domain encryption with SLM scheme for physical-layer security in an OFDM-PON system[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(1): 46-51.

[7] Hu Weiwen. SLM-based ACO-OFDM VLC system with

- low-complexity minimum amplitude difference decoder [J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(3): 144-146.
- [8] 胡武君, 杨霖. MIMO-OFDM 系统中基于循环移位和信号联合的改进 SLM 算法. *通信学报*, 2015, 36(4): 1-8.
HU Wujun, YANG Lin. Modified SLM algorithm based on cyclic shift and signal combination in MIMO-OFDM system[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(4): 1-8.
- [9] Sudha V, Syamkumar M, Kumar D S. A low complexity modified SLM and companding based PAPR reduction in localized OFDMA [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(2): 3207- 3226.
- [10] Yuan Jianguo, Shen Qian, Wang Jingxin, et al. A novel improved SLM scheme of the PAPR reduction technology in CO-OFDM systems [J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(2): 138-142.
- [11] Akhshani A, Akhavan A, Lim S C, et al. An image encryption scheme based on quantum logistic map [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(12): 4653-4661.
- [12] Moon J H, Nam Y R, Choi E J, et al. Selected data utilization technique for the PAPR reduction of FBMC-OQAM signals [C] // 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). New York: IEEE Press, 2017: 741-743.