

一种基于半符号的 PSWFs调制信号PAPR抑制方法

张 杨¹, 顾祥岐¹, 杨路铖²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 91033 部队, 山东 青岛 266000)

摘 要:针对椭圆球面波(Prolate Spheroidal Wave Functions, PSWFs)调制信号峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)较高,易受信道非线性特性影响这一问题,文章引入半符号的思想,针对仅传输半个周期的奇对称、偶对称信号,降低并行传输信号路数,提出了一种基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法。该方法在发射端仅传输部分波形,用以降低调制信号 PAPR;在接收端,利用函数良好的奇偶对称性,对信号进行恢复。理论与仿真分析结果表明,所提方法在未明显降低系统误码性能的前提下,能够有效降低椭圆球面波调制信号峰均功率比。

关键词:椭圆球面波函数;峰均功率比;半符号;奇偶对称性

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

椭圆球面波函数(Prolate Spheroidal Wave Functions, PSWFs)集是 Bell 实验室 Slepian 和 Pollak 于 1961 年定义的一类特殊函数的集合^[1],其具有完备性、奇偶性、双正交性、频谱可控性以及时频域具有最佳能量聚集性等优良特性^[2-4]。基于上述优良特性,PSWFs 被广泛应用于通信系统^[5-7]、雷达^[8]、流体力学^[9]、目标探测^[10]、滤波^[11]等领域。其中,在无线电通信领域,专利“非正弦时域正交调制方法”公布了一种基于 PSWFs 的非正弦时域正交调制方法^[12],采用时域波形叠加、频域频谱交叠的方式,有效提高了频带利用率。但 PSWFs 调制信号峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)较高,应用于卫星通信系统时,易受 PA 非线性特性影响,造成信号非线性失真,从而降低系统性能。

针对此问题,考虑到调制信号 PAPR 与并行路数密切相关,并行路数越小,调制信号 PAPR 越低;并行路数越多,调制信号 PAPR 越高,本节结合 PSWFs 脉冲信号的奇偶特性,提出了一种基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法。该方法在发射端仅传输部分波形,用以降低调制信号 PAPR;在接收端,利用函数良好的奇偶特性,对信号进行恢复,不影响系统误码性能。康家方等^[13]基于正余弦函数的奇偶特性,提出了一种基于半符号的 OFDM 调制方式:在发射端,仅发送半个周期调制信号;在接收端,利用调制信号的奇偶特性,将信号进行恢复。但由于该方法发射端调制信号仅能为奇函数或偶函数,频带利用率较原方法

没有提高。现在抑制 PAPR 的方法有很多,但仍然存在一些问题^[14-20]。

受上述方法启发,引入半符号的思想,提出了一种基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法。该方法在发射端仅传输部分波形,有效降低了并行 PSWFs 信号路数,有效降低了椭圆球面波调制信号峰均功率比。在接收端,利用函数良好的奇偶对称性,对信号进行重构、检测和解调,保证系统误码性能与传统非正弦时域正交调制方法相同。

1 基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法基本原理

基于信号峰均功率比与并行信号路数密切相关、椭圆球面波信号具有奇偶对称性的特点,图 1 给出基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法基本原理框图。在发射端,对奇对称调制信号和偶对称调制信号分开发送,前半周期发送奇对称调制信号,后半周期发送偶对称调制信号,调制信号的并行支路数降低一半。在接收端,利用调制信号奇偶性,恢复原调制信号时域波形。具体步骤如下:

1) 在发射端,截取奇对称调制信号的前 $T/2$ 周期信号,作为发射信号的前 $T/2$ 信号;截取偶对称调制信号的后 $T/2$ 周期信号,作为发射信号的后 $T/2$ 信号,如图 1 a) 所示;

2) 信号经过通信系统其他模块,进行信道传输;

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61790550)

作者简介: 张 杨(1985-),男,讲师,博士。

3)在接收端,截取接收调制信号前 $T/2$ 信号,利用奇函数的对称特性,重构奇对称调制信号;截取接收调制信号后 $T/2$ 信号,利用偶函数的对称特性,重构偶

对称调制信号,如图1 b)所示;

4)对重构信号进行解调。

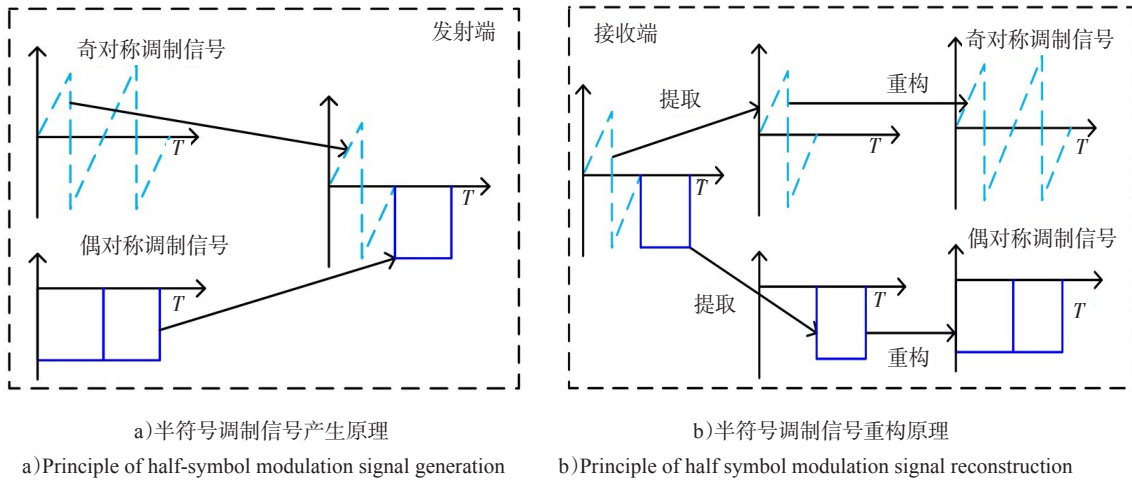


图1 基于半符号PSWFs调制信号PAPR抑制方法基本原理

Fig.1 Basic principles of PAPR suppression method based on half-symbol PSWFs modulation signal

2 系统性能分析

本节从调制信号峰均功率比、系统误码性能2个方面,对基于半符号PSWFs调制信号PAPR抑制方法的系统性能展开分析。

2.1 调制信号峰均功率比分析

根据基于PSWFs的非正弦时域正交调制模型^[1],在发射端,对于多路叠加而成的PSWFs时域正交调制信号,在第 n 个码元时间内生成的调制信号,可表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^M d_i \varphi_i(t), \quad nT_s < t < (n+1)T_s \quad (1)$$

式(1)中: T_s 为码元周期; M 为并行调制路数; $\varphi_i(t)$ 为第 i 路PSWFs脉冲; d_i 为第 n 个码元时间内第 i 路的调制数据。

由式(1)可知,对于由多路PSWFs脉冲信号叠加而成的调制信号,易产生较大峰值,调制信号PAPR较高,易受到PA非线性特性影响,导致PSWFs脉冲组间良好正交性下降,降低系统误码性能。

由基于半符号PSWFs调制信号PAPR抑制方法基本原理可知,其在第 n 个码元时间内生成的调制信

号,可表示为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^{M/2} d_{2k-1} \varphi_{2k-1}(t) \Bigg|_{\frac{nT_s}{2}}^{\frac{(n+1)T_s}{2}} + \sum_{k=1}^{M/2} d_{2k} \varphi_{2k}(t) \Bigg|_{\frac{(n+1)T_s}{2}}^{\frac{(n+1)T_s}{2}} \quad (2)$$

对比式(1)与式(2)可知,所提方法与原时域正交调制方法相比,调制信号的并行路数可以降低一半,这意味着这所提方法调制信号具有更低的峰均功率比。

2.2 系统误码性能分析

在接收端,利用信号奇偶对称特性,利用半个符号周期调制信号,构建整个符号周期的调制信号,并对调制信号进行检测、解调。下面对奇对称调制信号的构建、检测等相关问题进行说明。重构的奇对称调制信号可以表示为:

$$s_1(t) = \sum_{k=1}^{M/2} d_{2k-1} \varphi_{2k-1}(t) + n(t), \quad nT_s < t < (n+1)T_s \quad (3)$$

式(3)中: $n(t)$ 为加性高斯白噪声,均值为0,方差为 δ^2 。

PSWFs脉冲间具有良好正交性,利用相干解调对信号进行检测,则第 $2i-1$ 支路检测量可以表示为:

$$d_{2i-1} = \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} \left(\sum_{k=1}^{M/2} d_{2k-1} \varphi_{2k-1}(t) + n(t) \right) \varphi_{2i-1}(t) dt = \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} d_{2i-1} \varphi_{2i-1}(t) \varphi_{2i-1}(t) dt + \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} \sum_{k=1, k \neq i}^{M/2} d_{2k-1} \varphi_{2k-1}(t) \varphi_{2i-1}(t) dt + \xi \quad (4)$$

式(4)中,

$$\xi = \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} n(t)\varphi_{2i-1}(t)dt \quad (5)$$

由于不同阶PSWFs脉冲间具有良好的正交性,假设PSWFs脉冲能量为 ε ,则式(4)可以简化为:

$$d_{2i-1} = d_{2i-1}\varepsilon + \xi \quad (6)$$

因此,第 $2i-1$ 支路的检测量的均值、方差为:

$$E(d_{2i-1}) = E(d_{2i-1}\varepsilon) = d_{2i-1}\varepsilon; D(d_{2i-1}) = D(\xi) = \delta^2 \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知,在接收端第 $2i-1$ 支路,所提方法与原时域正交调制方法相比,信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)相同。那么其归一化信噪比 E_b/N_0 是否相同?由归一化信噪比定义可知:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right) \quad (8)$$

同时,由式(1)、(2)易知,所提方法与原时域正交调制方法的信号功率,存在如下关系:

$$S_{\text{半}} = S_{\text{原}}/2 \quad (9)$$

式(9)中: $S_{\text{半}}$ 为所提方法PSWFs调制信号功率; $S_{\text{原}}$ 为原时域正交调制方法的信号功率。

通过上述分析可知,基所提方法与原时域正交调制方法的归一化信噪比,存在如下关系:

$$\left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{半}} = \frac{1}{2} \frac{S_{\text{原}}}{N} \left(\frac{W}{R} \right) = \left. \frac{E_b}{N_0} \right|_{\text{原}} \quad (10)$$

通过上述分析可知,在理论上,所提方法与原时域正交调制方法相比,系统误码性能下降3 dB,发射功耗降低3 dB。因此,对于对系统误码性能要求较低的应用场景,所提方法具有低发射功耗、低PAPR的优势。那么,对于对系统误码性能要求较高的应用场景,应如何提高所提方法的系统误码性能?

考虑到所提方法的系统误码性能低的原因在于发射功率的降低,同时由式(9)、(10)可知,将所提方法发射信号功率提高一倍,即可实现归一化接收信噪比与原时域正交调制方法相同,即系统BER相同。

基于上述分析,令

$$S_{\text{半}} = S_{\text{原}} \quad (11)$$

对应发射端调制信号

$$s(t) = \sqrt{2} \left(\sum_{k=1}^{M/2} d_{2k-1} \varphi_{2k-1}(t) \right) \left[\begin{matrix} (n+1)T_s \\ 2 \end{matrix} \right] + \sum_{k=1}^{M/2} d_{2k} \varphi_{2k}(t) \left[\begin{matrix} (n+1)T_s \\ 2 \end{matrix} \right] \quad (12)$$

此时,在理论上,所提方法与原时域正交调制方法相比,系统误码性能相同,发射功耗相同,但仍然具有PAPR较低的优势。

3 仿真分析

在Matlab仿真环境下,从调制信号功率、调制信号峰均功率比、系统误码性能3个方面对所提方法与原时域正交调制方法进行比较分析,验证理论分析的正确性。

3.1 仿真条件

1)调制信号:频带3~8 GHz,划分为4个子波带,频谱交叠度为50%,时间带宽积 $c=4 \text{ Hz} \cdot \text{s}$,按能量聚集性由高到低,每个子波带取前2阶PSWFs脉冲,叠加生成非正弦时域正交调制信号,并对调制信号幅值进行归一化处理。

2)噪声类型:加性高斯白噪声。

3)调制方式:所提方法方案1对应方式,所提方法方案2对应方式。

3.2 仿真结果与分析

1)调制信号功率。图2为走码个数为 10^4 个,原PSWFs时域正交调制信号与所提方法调制信号,功率比值的分布图。从实验仿真结果可知,功率比值均大于2,说明所提方法能够有效降低信号的发射功率(所提方法方案一)。但由于数值解法产生的PSWFs脉冲信号存在误差,以及对称点的选取,导致功率比值出现大于2的情况。

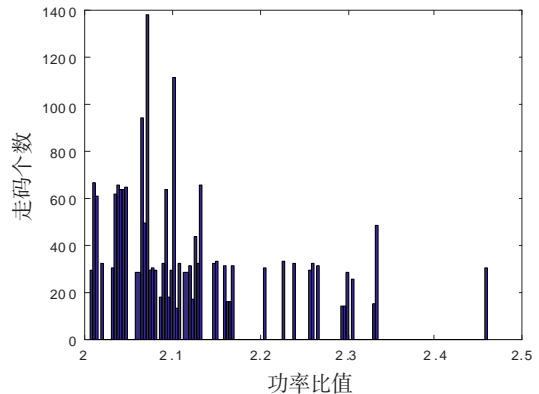
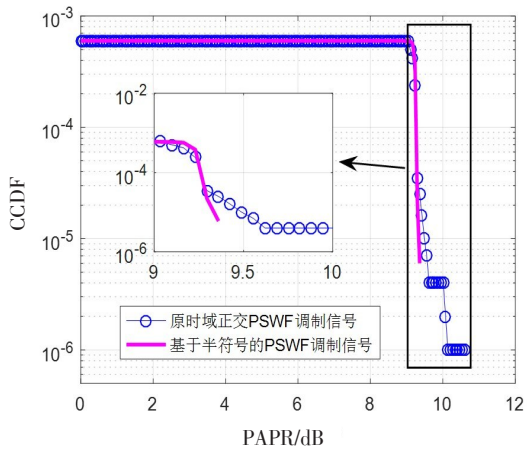


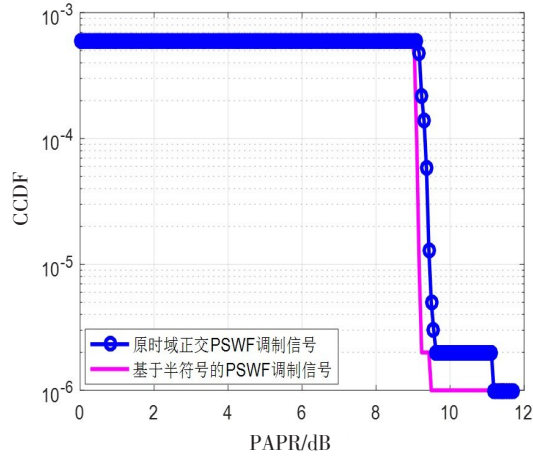
图2 信号功率比值

Fig.2 Signal power ratio

2)调制信号峰均功率比特性。图3 a)为并行路数为8路时,所提方法调制信号的互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)特性曲线。其中,CCDF定义为信号PAPR超过某一门限的概率,用来衡量调制信号PAPR统计特性。从实验仿真结果可知,所提方法调制信号PAPR略低于原时域正交调制信号,且随着CCDF的增加,PAPR抑制性能不断提高。



a) 8路 PSWFs 信号
a) 8 PSWFs signals



b) 32路 PSWFs 信号
b) 32 PSWFs signals

图3 调制信号 CCDF 特性曲线

Fig.3 CCDF characteristic curve of modulation signal

当频带为 1~10 GHz ,划分为 8 个子波带,频谱交叠度为 50% ,时间带宽积 $c = 4 \text{ Hz} \cdot \text{s}$,按能量聚集性由高到低,每个子波带取前 4 阶 PSWFs 脉冲,并行脉冲数为 32 时,所提方法调制信号的 PAPR 特性曲线可见图 3 b)。从实验仿真结果可知,较并行路数为 8 时,PAPR 抑制效果有所提高,表明随着并行路数的增加,所提方法 PAPR 抑制能力逐渐提高。

3) 系统误码性能。图 4 为所提方法调制信号,经过 AWGN 信道,在接收端,采用相关解调的条件下,系统误码率特性曲线。从实验仿真结果可知,所提方法方案一的系统误码性能,与原时域正交调制方法相比,下降 3 dB ,但其发射功耗降低 3 dB ;所提方法方案二的系统误码性能,与原时域正交调制方法相同,与理论分析一致。

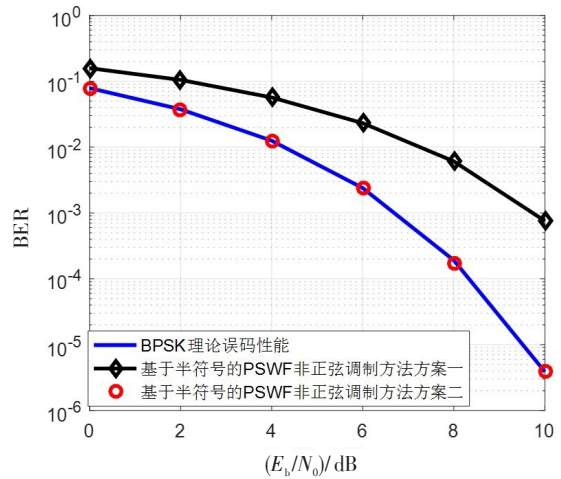


图4 系统误码特性曲线

Fig.4 Characteristic curve of system bit error

4 结语

针对 PSWFs 调制信号 PAPR 较高的问题,考虑到调制信号 PAPR 与并行路数密切相关。基于 PSWFs 脉冲信号的奇偶特性,将半符号的思想引入到信号 PAPR 抑制,本文提出了一种基于半符号 PSWFs 调制信号 PAPR 抑制方法。该方法能够在明显降低系统误码性能的前提下,有效降低信号 PAPR,且随着并行传输 PSWFs 信号路数增加,信号 PAPR 降低程度不断增加。此外,本文所提方法能够为其他调制信号 PAPR 抑制提供一种新思路。如,正弦波信号时域波形在 $T/2n$ 周期内对称,即仅提取 $T/2n$ 周期内波形进行传输,在接收端利用奇偶对称信号仍旧能够恢复整个周期信号的调制信号,这将会更进一步降低并行传输的信号路数,抑制调制信号 PAPR。

参考文献:

[1] SLEPIAN D, POLLAK H O. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty- I[R]. The Bell System Technical Journal, 1961 :43-63.

[2] LANDAU H J, POLLAK H O. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty- II[R]. The Bell System Technical Journal, 1961 :65-84.

[3] 王红星,陆发平,刘传辉,等. 椭圆球面波信号间交叉项时频分布特性研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6) : 1319-1325.

WANG HONGXING, LU FAPING, LIU CHUANHUI, et al. Study on time-frequency characteristics of cross terms between prolate spheroidal wave function signal[J]. Jour-

- nal of Electronics & Information Technology, 2017, 39 (6):1319-1325. (in Chinese)
- [4] 王红星,陆发平,刘传辉,等.严格奇偶对称的椭圆球面波函数信号构建与低复杂度检测方法[J].中国科学:信息科学,2020,50(5):766-776.
WANG HONGXIN, LU FAPING, LIU CHUANHUI, et al. Strict parity symmetry PSWFs signal construction and low complexity detection method[J]. Science China: Information Science, 2020, 50(5):766-776. (in Chinese)
- [5] 陆发平,王红星,刘传辉,等.基于功率复用的椭圆球面波函数非正交调制方法[J].航空学报,2019,40(9):311-320.
LU FAPING, WANG HONGXIN, LIU CHUANHUI, et al. Power domain non-orthogonal pulse modulation based on prolate spheroidal wave function[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2019, 40(9):311-320. (in Chinese)
- [6] 赵志勇,王红星,刘锡国,等.正交椭圆球面波函数脉冲调制方法[J].电子与信息学报,2012,34(10):2331-2335.
ZHAO ZHIYONG, WANG HONGXIN, LIU XIGUO, et al. Orthogonal prolate spheroidal wave functions pulse modulation method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10):2331-2335. (in Chinese)
- [7] ZHU N. Study on application of PSWF function in pulse shaping of CDMA communication system[J]. Wireless Internet Technology, 2015, 21(11):45-46.
- [8] CHEN C Y, VAIDYANATHAN P P. MIMO radar space-time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2):623-635.
- [9] OSIPOVE A, ROKHLIN V. On the evaluation of prolate spheroidal wave functions and associated quadrature rules [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2014, 36(1):108-142.
- [10] DU W, LIAO G, YANG Z. Robust space time processing based on bi-iterative scheme of secondary data selection and PSWF method[J]. Digital Signal Processing, 2016, 52:64-71.
- [11] NEVES L C, DE ARAUJO G M, COSTA J C D, et al. Design of a PSWF impulse response filter for UWB systems [C]//2012 IEEE International Symposium on Circuits & Systems (ISCAS). Seoul, South Korea: IEEE, 2012: 0271-4302.
- [12] 王红星,赵志勇,刘锡国,等.一种非正弦时域正交调制方法:中国,ZL200810159238.3[P]. 2011-02-02.
WANG HONGXIN, ZHAO ZHIYONG, LIU XIGUO, et al. Non-sinusoidal time-domain quadrature modulation method: China, ZL200810159238.3[P]. 2011-02-02. (in Chinese)
- [13] 康家方,王红星,钟佩琳,等.基于符号对称性的半符号OFDM调制方法[J].电子科技大学学报,2014,43(5):647-652.
KANG JIAFANG, WANG HONGXIN, ZHONG PEILIN, et al. Half symbol OFDM modulation based on symbol symmetry[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2014, 43(5):647-652. (in Chinese)
- [14] ZHANG W, ZHANG C, CHEN C, et al. Joint PAPR reduction and physical layer security enhancement in OFDMA-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9):998-1001.
- [15] HASSAN M E, CRUSSIÈRE M, HELARD J F, et al. EVM closed-form expression for OFDM signals with tone reservation-based PAPR reduction[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4):2352-2366.
- [16] VIJAYALAKSHMI M, REDDY K R. An effective hybrid approach for PAPR reduction in MIMO-OFDM[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2020, 102(1):145-153.
- [17] MORITA H, MIYAJIMA T, SUGITANI Y. Adaptive FIR filtering for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, 2019, E102.A(8):938-945.
- [18] TAHKOU BIT K, PACHA A A, SHAIK H, et al. Iterative dichotomy PAPR reduction method for multicarrier waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11):2073-2076.
- [19] HAQUE U, SHARIF M. PAPR reduction in OFDM system using clipping and filtering methods based on CCDF [J]. International Journal of Computer Network and Information Security, 2019, 9(10):12-18.
- [20] MOON J H, NAM Y R, KIM J H. PAPR reduction in the FBMC-OQAM system via segment-based optimization [J]. IEEE Access, 2018(6):4994-5002.

A Novel PAPR Suppression Method Based on Half-Symbol PSWF's Modulation Signal

ZHANG Yang¹, GU Xiangqi¹, YANG Lucheng²

(1. Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China;

2. The 91033rd Unit of PLA, Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: A novel PAPR suppression method based on half-symbol Prolate Spheroidal Wave Functions (PSWFs) modulation signal is proposed for the reduction of Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of PSWFs orthogonal modulation signal, which adopts the idea of introducing a half-symbol to reduce the number of channels of parallel transmission signals and transmits odd-symmetric and even-symmetric signals for only half cycle. This method transmits part of the waveform at the transmitter to reduce the PAPR of the modulated signal, and uses the good parity symmetry of the function to recover the signal at the receiver. Both the mathematical deduction and simulation result show that the proposed method can effectively reduce the peak-to-average power ratio of the prolate spheroidal wave modulation signal without significantly reducing the system error performance.

Key words: prolate spheroidal wave function; peak-to-average power ratio; half-symbol; parity symmetry

简讯:

海军航空大学在第十九届全国大学生机器人大赛 Robomaster 机甲大师赛获佳绩

2020年8月25日,第十九届全国大学生机器人大赛Robomaster 2020 机甲大师赛落下帷幕,海军航空大学航空基础学院机械创新俱乐部首次参加该项比赛,荣获单项赛全国三等奖1项,军队院校中仅有2所院校获奖。

全国大学生机器人大赛Robomaster 机甲大师赛由共青团中央、深圳市人民政府联合主办,大疆创新发起并承办的机器人赛事,是全国高水平的大学生机器人竞赛之一,被纳入教育部全国高校学科竞赛评估项目。该项比赛为全世界青年工程师打造了机器人竞技平台,吸引了来自国内外近800支队伍,300余所院校参加。受疫情影响,此次大赛首次采用线上远程答辩的方式进行。

针对竞赛作品制作难度大、涉及学科知识广、学员知识考查要求高、同台竞技对手强的特点,机械创新俱乐部自2019年10月开始筹备比赛,先后历时10个月,教研室多名指导教师跟进比赛、多次组织学员到地方院校学习交流、疫情期间远程指导培训,学员返校后加班加点进行制作,为保证竞赛取得优异成绩奠定了扎实的基础。

