

文章编号: 1671-0444 (2018)05-0766-06

一种降低 FBMC 系统 PAPR 的多随机分割算法

伏威, 袁伟娜, 马恒达

(华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 为了更有效地降低滤波器组多载波 (filter bank multicarrier, FBMC) 系统过高的峰均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR), 在部分传输序列 (partial transfer sequence, PTS) 方法的基础上提出了多随机分割算法, 该算法通过选用合适的子块数分割方法来降低系统的复杂度, 同时兼顾了随机分割法的优越性。此外, 根据其在分割顺序上的特点, 可以进一步提高系统的性能。通过仿真试验验证了新算法的有效性。

关键词: 滤波器组多载波; 部分传输序列; 峰均功率比; 多随机分割

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A

A Method for Reducing PAPR of FBMC System Based on Multi-random Segmentation

FU Wei, YUAN Weina, MA Hengda

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to reduce high peak-to-average power ratio (PAPR) of the FBMC (filter bank multicarrier) system, we proposed a multi-random segmentation algorithm based on the PTS (partial transfer sequence) method. This method decreases the complexity of the system by selecting the appropriate sub-block segmentation method, and takes account of the superiority of the random segmentation method. Its performance in the order of segmentation can further improve the performance of the system, and the validity of the new algorithm is verified by simulation.

Key words: filter bank multicarrier; partial transmit sequence; peak-to-average power ratio; multi-random segmentation

在移动通信领域内, 滤波器组多载波 (filter bank multicarrier, FBMC) 技术已经成为第 5 代 (5G) 移动通信技术研究的热点^[1-2]。由于正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术具有很强带外辐射, 需要循环前缀, 且需要保证各子载波之间的正交, 因此, OFDM 不再适合 5G 的发展需要。FBMC 较小的旁瓣缓解了偏

移对其信号传输的影响^[3], 其与正交幅度调制 (offset quadrature amplitude modulation, OQAM) 的结合可使频谱带外泄露非常低。同时, 由于 FBMC 信号在传输过程中, 信道之间的叠加产生很大的峰值功率, 从而导致较高的峰均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR)。因此, 降低 FBMC 系统的 PAPR 是一个急需解决的问题。

收稿日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61501187); 中央高校基本科研业务费资助项目

作者简介: 伏威 (1991-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为信道估计, E-mail: 1393700678@qq.com

袁伟娜 (联系人), 女, 副教授, E-mail: wnyuan@ecust.edu.cn

目前已有降低 FBMC 系统 PAPR 值的方法有限幅法、星座扩展法和信号扰码法。其中,限幅法通过对 FBMC 信号进行限幅从而降低 PAPR,但限幅引入了非线性失真,导致系统的误码率性能下降;星座扩展法在保证星座点间最小欧氏距离不变的情况下,对在外围的星座点进行扩展处理,从而改善系统误码率性能,但是其收敛速度受到限制;信号扰码法通过降低 FBMC 信号峰值出现的可能性,从而有效降低信号的 PAPR,但系统复杂度就会相应提高。文献[4]提出了多数据块联合优化算法,与现有的独立数据块优化相比较,其利用重叠信号的共有结构来优化多个数据块,可以有效降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR,但其候选旋转相位因子过多会导致选择最佳旋转相位因子的计算复杂度偏高。文献[5]提出了基于滑动窗口载波预留方法,其通过降低部分连续数据块的峰值载波来降低系统窗口的 PAPR。文献[6]提出的 DSLM (dispersive selective mapping) 算法是 OSLM (overlapped selective mapping) 算法的改进,这两种算法将相邻两个数据块之间的信号进行选择映射计算来降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR,但是这两种算法与普通 SLM(selective mapping)方法相比在性能上没有太大的改进。文献[7]将传统子载波预留的不失真和无边带信息的优势运用到 FBMC-OQAM 之中,并且根据信号叠加的特性进行改进,从而使子载波预留法能适用于 FBMC-OQAM 系统中,但是子载波预留方法的迭代次数多,导致平均发射功率增大问题依然很严重。文献[8]提出了基于部分传输序列的伪随机方案以降低系统 PAPR 的方法,但是这种方法却有很大的算法复杂度。

本文提出一种基于部分传输序列方法上的改进方案,在对数据块进行分割时采用随机交织分割方案,舍去比较消耗功率的串并变换分割子数据块的方案,将随机方案与串并方案、交叉方案进行比较,同时与 OFDM 里的部分传输序列进行比较。仿真结果表明,新算法不仅在算法复杂度上有很大的降低,而且在性能方面也有很大的提升。

1 FBMC 系统模型

FBMC 系统的实现相较于 OFDM 的系统框架要复杂一些,给出其在时域上连续基带发送信号的表达式如式(1)所示。

$$s(t) = \sum_{l \rightarrow -\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} a_k(l) f(t-lT) e^{j2\pi k g(n)} \quad (1)$$

式中: k 为频率子载波下标; l 为发送信号的符号编号; K 为子载波个数; $f(t)$ 为子载波间隔; T 为符号间隔; $g(n)$ 为发送成型脉冲; $a_k(l)$ 为第 l 个符号第 k 个子载波上的发送数据。

对于一个 FBMC 信号在传输过程中,信道会有延时并且会比符号间的间隔要长得多,这里定义 $H_m(l)$ 是第 m 个子载波在第 l 子块上的信道频率响应, $\eta_m(l)$ 代表加性高斯白噪声,则输出信号表达式如式(2)所示。

$$\tilde{a}_m(l) = H_m(l)(a_m(l) + j a_m^{(*)}(l)) + \eta_m(l) \quad (2)$$

式中: $\tilde{a}_m(l)$ 为接收端频域信号; $a_m^{(*)}(l)$ 为 $a_m(l)$ 的周围符号的虚部干扰。

当子载波的信号相位相同时,将它们相加就可能得到较大的峰值功率,从而导致信号的 PAPR 值较大。

这里定义 x_n 表示经过 IFFT (inverse fast Fourier transform) 运算之后所得到的发送端的输出信号,即

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中: X_k 为第 k 个子载波上的调制信号; $W_N^{nk} = e^{j2\pi nk/N}$ 。

那么发送信号的 PAPR(γ)定义为

$$\gamma = 10 \lg \left\{ \frac{\max_{0 \leq n < N} (|x_n|^2)}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2} \right\} \quad (4)$$

由中心极限定理可得: 当子载波数 N 较大时, x_n 的实部和虚部采样点均服从均值为 0、方差为 $1/2$ 的高斯分布; 而信号的幅度则服从瑞利分布; 功率服从 χ^2 分布。

由于 PAPR 是一个随机变量,这里从统计意义角度对其进行分析。PAPR 的互补累积分布函数 CCDF (complementary cumulative distribution function) 是衡量其性能的一个评价准则。PAPR 的累积分布函数描述了一个 FBMC 符号的 PAPR 值超过给定阈值的概率,可表示为

$$F(\gamma(x(t))) = \Pr[\gamma(x(t)) > \gamma_0] \quad (5)$$

式中: 函数 $F(\cdot)$ 表示互补累积分布函数; $\gamma(x(t))$ 表示 FBMC 符号的 PAPR; $\Pr[\cdot]$ 表示概率; γ_0 为给定阈值。

推导公式如下: 设置峰均功率比门限时,其累积分布函数为

$$F(z) = \int_0^z f_s(s) ds \tag{6}$$

式中: $f_s(s)$ 为瑞利分布概率密度函数, 即 $f_s(s) = \frac{s}{\sigma^2} \exp(-\frac{s^2}{2\sigma^2})$, 将其代入式(6)得

$$F(z) = \int_0^z \frac{s}{\sigma^2} \exp(-\frac{s^2}{2\sigma^2}) ds = \int_{s=0}^{s=z} \exp(-\frac{s^2}{2\sigma^2}) d(\frac{s^2}{2\sigma^2}) \tag{7}$$

令 $m = \frac{s^2}{2\sigma^2}$ 代入式(7)得

$$F(z) = \int_0^z \exp(-m) dm = -\exp(-m) \Big|_{m=0}^{m=z} = 1 - \exp(-z) \tag{8}$$

峰均功率比大于某个门限值 z 即 γ_0 的概率就是互补累积分布函数, 如式(9)所示。

$$p(\gamma > \gamma_0) = 1 - p(\gamma \leq \gamma_0) = 1 - [1 - \exp(-z)]^N \tag{9}$$

2 部分传输序列(PTS)法的数学模型

在发送端有长度为 N 的待调制发送信号, 其数据块将被分割成若干个互不相连的子数据块, 接着分别对每个子数据块用一个相位因子进行加权, 然后对各个子块分别进行调制, 最后将所有子块调制后相加得到最终的发送信号。但是在相位因子加权时要选择最优相位因子, 可以使得最终相加的发送信号具有较低的 PAPR, 具体的系统框图如图 1 所示。

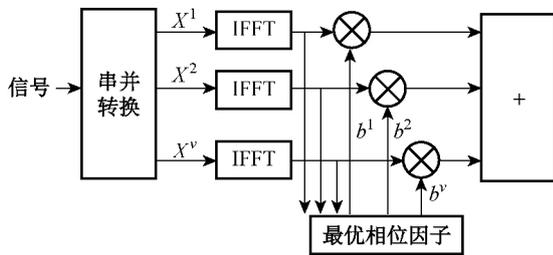


图 1 部分传输序列法的系统框图
Fig. 1 System block diagram of partial transmission sequence method

在 FBMC 系统中, 输入端的 V 个互不相交的子块:

$$X = [X^1, X^2, \dots, X^V]^T \tag{10}$$

式中: X^v 为大小相同的连续子块, $v=1, 2, \dots, V$ 。在 PTS 技术传输过程中加载一个旋转相位因子 $b^v =$

$e^{j\varphi^v}, v = 1, 2, \dots, V$, 然后经过 IFFT(F_i) 就得到:

$$x = F_i \{ \sum_{v=1}^V b^v X^v \} = \sum_{v=1}^V b^v \cdot F_i \{ X^v \} = \sum_{v=1}^V b^v x^v \tag{11}$$

使用穷搜索来选择相位向量, 从而找到使信号的 PAPR 最佳的相位因子 \tilde{b}^v , 其表达式为

$$[\tilde{b}^1, \tilde{b}^2, \dots, \tilde{b}^v] = \underset{[b^1, b^1, \dots, b^v]}{\operatorname{argmin}} \left(\max_{n=0, 1, \dots, N-1} \left| \sum_{v=1}^V b^v x^v[n] \right| \right) \tag{12}$$

3 多随机分割算法

对于部分传输序列法分割子块的方法有 3 种, 即相邻分割、交织分割和随机分割, 如图 2 所示。

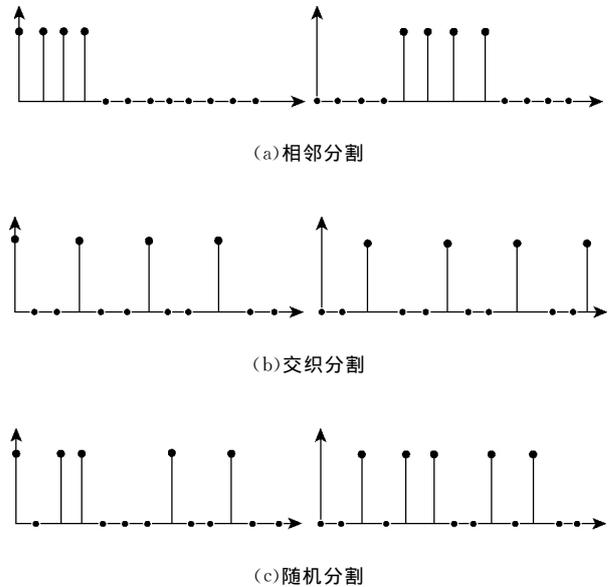


图 2 3 种分割方法

Fig. 2 Three kinds of segmentation methods

由图 2 可看出: 相邻分割是将 4 个子载波分为一个小组进行信号分割; 交织分割是将 3 个子载波分为一组进行信号分割; 随机分割体现出信号分割的随机性。相邻分割法是将 N/V 个相邻的子载波分配到同一个部分传输序列内, 且这些子载波位置关系仍然保持相邻; 随机分割法是将每个子载波都随机分配到所有的部分传输序列内; 交织分割法是将间隔为 V 的子载波分配在一个部分传输序列内。这 3 种分割方法都遵循同样的原则: 每个子载波只能出现在一个部分传输序列内, 且每个部分传输序列中所包含的子载波个数必须相等。其中, 随机分割方法在降低 FBMC 系统 PAPR 性能方面最佳, 交织分割方法在降低计算复

杂度方面效果最好。在此基础上本文提出了随机相邻分割和多随机分割方法,如图 3 和 4 所示。

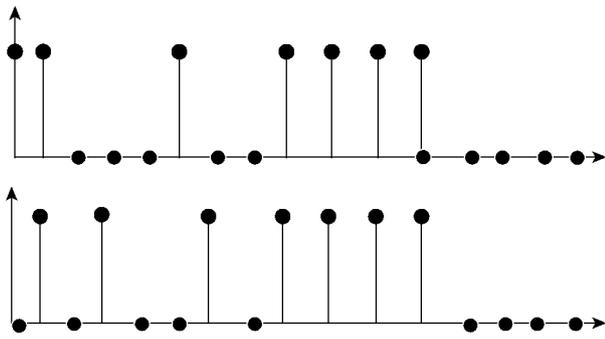


图 3 随机相邻分割方法

Fig. 3 Random adjacency segmentation method

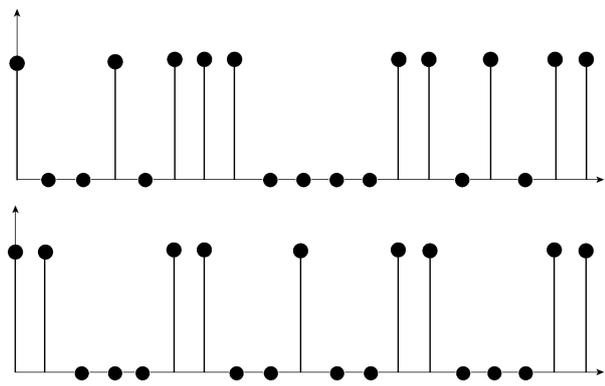


图 4 多随机分割方法

Fig. 4 Multi-random segmentation method

由图 3 可看出,随机相邻分割方法将前一半数据块采用随机分割,后一半数据块采用相邻分割。

由图 4 可以看出,在偶数子块数时,多随机分割方法按照 1001001... 的交织方式分割,奇数块数时按随机分割方式。然后再将所有子载波按顺序平均分成 M 个序列,再将其打乱,随机分配到所有部分传输序列内。

多随机分割方法考虑将两种分割方法联合使用并将随机分割方法多次使用,这样既提高系统降低 PAPR 的性能,又降低系统的计算复杂度。接着继续使用随机分割方法从而进一步提高系统性能。

最佳相位因子 \tilde{b}^v ($v=1,2,\dots,V$) 的取值与部分传输序列算法的计算复杂度和系统性能有很大影响,且与子块的分割有着密切关系。因此,可以考虑迭代搜索在降低系统的计算复杂度和提高系统性能之间取得较好的平衡,这就是对部分传输序列算法进行改进的出发点。其具体步骤如下:

(1) 将所有子载波随机分割为 V 个子序列,其

相位因子为 $b^v = \pm 1, \{v = 1, 2, \dots, V\}$;

(2) 令 $b^{2^{i-1}} = 1, (i = 1, 2, \dots, V/2)$, 此时采用随机分割的方法,在此条件下计算峰均功率比 γ_0 ;

(3) 令 $b^{2^i} = 1, (i = 1, 2, \dots, V/2)$, 此时采用交织分割的方法,在此条件下计算峰均功率比 γ_1 ;

(4) 若 $\gamma_1 > \gamma_0$, 则 $b^v = -1$, 否则 $b^v = 1$;

(5) 若 $i < V/2$ 时返回到步骤 (2), 否则输出得到相位因子 $b^v = \pm 1$;

(6) 将所有子载波按顺序平均分成 M 个序列,再将其打乱,随机分配到所有部分传输序列内。

理论上 b^v 定义式中的相位可以在 $[0, 2\pi]$ 之间取任何数值,但是一般的相位会在一个离散相位集合中取值,当这个集合的规模比较大时,对于 V 个子序列的部分传输序列方法来说, $\{b^v, v = 1, 2, \dots, V\}$ 的取值有 N 个 IFFT 变换,对于每个 N 点的 IFFT 所需要的复数乘法和复数加法的运算量 n_{mul} 和 n_{add} 分别为

$$\begin{aligned} n_{mul} &= \frac{N}{2} \log_2 N \\ n_{add} &= \frac{N}{2} \log_2 N \end{aligned} \quad (13)$$

为了降低 FBMC 系统的计算复杂度,可以使用交织分割方法对这 N 个子载波进行分割,组成 V 个部分传输序列,其中每个子序列都包括 $L = N/V$ 个子载波。间隔为 V 的子载波信号将被分配在一个相同自序列中,且如果第 k 个子载波出现在 $X_i, (i = 1, 2, \dots, V)$ 中,则不再出现在 $X_j (j \neq i)$ 中。

对于交织分割,采用了 FFT (fast Fourier transform) 算法来降低系统复杂度,表 1 即为其自序列安排表。

表 1 FFT 自序列安排表

Table 1 FFT self-sequence arrangement

	0	1	...	$J-1$
0	X_0	X_V	...	$X_{(J-1)V}$
1	X_1	X_{V+1}	...	$X_{(J-1)V+1}$
...
$V-1$	X_{V-1}	X_{2V-1}	...	$X_{(J-1)V+(V-1)}$

根据 FFT 算法对每一行和每一列进行调制之后,可以得到时域信号对于每个子序列来说都需要计算 N 点 IFFT 和 N 次复数乘法,一次得到需要的复数乘法和复数加法的运算量分别为

$$\begin{aligned} n_{mul} &= \frac{N}{2V} \log_2 \frac{N}{V} + N \\ n_{add} &= \frac{N}{V} \log_2 \frac{N}{V} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(13)和(14)可知,与相邻分割和随机分割相比,交织分割方法可以有效降低 V 个 N 点 IFFT 的运算量,从而降低 FBMC 系统的计算量。

对于多随机分割方法,在奇数子块数时系统进行了 $N/2$ 次循环操作,即 $2^x = (N/2)^{N/2}$ 的运算式,因此可求得运算量为

$$\begin{aligned} n_{mul} &= \frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{2} \\ n_{add} &= \frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

由上述分析可以看出:在目前使用的 3 种分割方法中,交织分割方法在降低系统的计算量方面是最佳的;与随机分割方法相比,多随机分割方法在降低系统 PAPR 方面有一定提高,在降低算法复杂度方面也有很大的改善。

4 仿真试验与分析

仿真的系统为 $N = 256$ 个子载波,调制方式为 16QAM(quadrature amplitude modulation),每个 QAM 符号的比特数是 4。针对不同数据子块数($V = 2, 4, 8, 16, 32, 64$)时 FBMC 系统的 PAPR 性能如图 5 所示。由图 5 可以看到,当子块数增加时,PTS 抑制峰值功率的性能逐渐提升,但是,其计算复杂度也会相应提高。

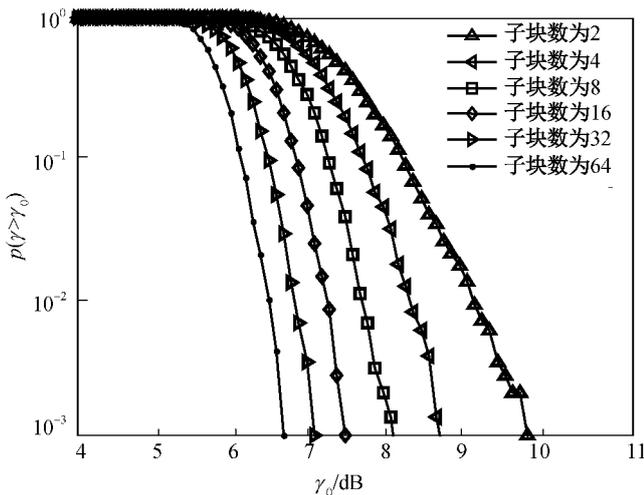


图 5 不同子块数时 FBMC 系统的 PAPR 性能
Fig. 5 PAPR performance of FBMC system with different number of sub-blocks

采用 Matlab 仿真方法来研究本文提出的基于多随机分割方法降低系统 PAPR 性能。此仿真试验中,子载波数设置为 128,每路子载波均采用 QPSK(quadrature phase shift keying)调制映射方式。当每个子载波利用 QPSK 调制方式且基于随

机相邻分割的优化算法的 PAPR 性能做了比较,仿真结果如图 6 所示,其中,PTS 的子块数 V 为 64。

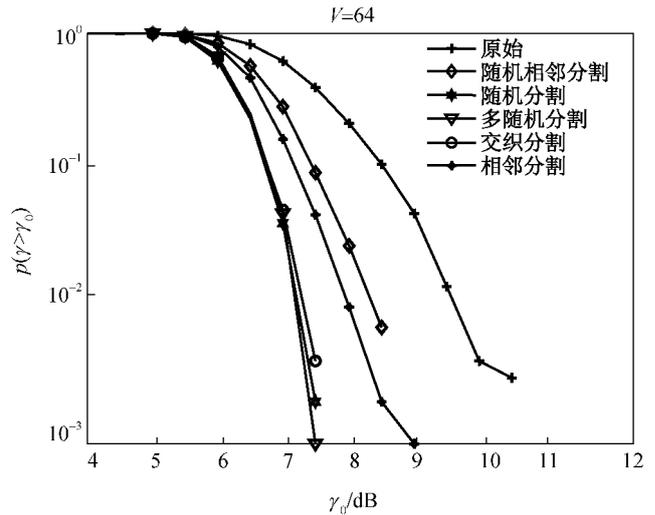


图 6 不同分割方法的比较
Fig. 6 Comparison of different segmentation methods

由图 6 可以看出,从降低 PAPR 性能上考虑,在子块数量相同的情况下,多随机分割方法是最好的,在 γ_0 为 7.5 dB 时,多随机分割方法的互补累积分布概率为 10^{-3} ,随机分割方法的互补累积分布概率为 2×10^{-3} ,因此,多随机分割方法降低了峰值功率出现的概率。从而可以看出,与常规的部分传输序列分割算法相比,本文改进算法在降低 PAPR 性能方面有所提高,同时也在很大程度上减小了计算的复杂度。

5 结 语

与单载波系统相比,FBMC 信号存在着较高的峰均功率比,因此,降低峰均功率比是 FBMC 系统一个急需解决的重要问题。本文首先通过搜索相位向量找到最小相位因子,接着对子块数数量的分析从而选定合适的子块数,最后在分割方法上选择了性能最佳的随机分割和复杂度最低的交织分割进行组合。本文提出的多随机分割方法通过奇数、偶数子块交叉分割,不仅有效地降低 PTS 算法的复杂度,而且更好地提高了 FBMC 系统降低峰均功率性能。

参 考 文 献

[1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, et al. What will 5G be? [J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal on, 2014, 32 (6) : 1065-1082.
[2] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键

- 技术[J]. 中国科学(信息科学),2014,44(5):551-563.
- [3] MEDJAHDI Y, TERRE M, RUYET D L, et al. Performance analysis in the downlink of asynchronous OFDM / FBMC based multi-cellular networks[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on,2011, 10(8):2630-2639.
- [4] QU D M, LU S X, JIANG T. Multi-block joint optimization for the peak-to-average power ratio reduction of FBMC-OQAM signals[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on,2013, 61(7):1605-1613.
- [5] LU S X, QU D M, HE Y J. Sliding window tone reservation technique for the peak-to-average power ratio reduction of FBMC-OQAM signals [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(4):268-2714.
- [6] KRISHNA C BS S, SHAIK H, ROVIRAS D, et al. Reduction of PAPR for FBMC - OQAM systems using dispersive SLM technique [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Wireless Communications Systems, 2014: 568-572.
- [7] LAABIDI M, ZAYANI R, BOUALLEGUE R. A new tone reservation scheme for PAPR reduction in FBMC / OQAM systems [C]// Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International. IEEE,2015.
- [8] MÜLLER S H, HUBER J B. A novel peak power reduction scheme for OFDM[C]//International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication. 1997; 1090-1094.

(责任编辑:徐惠华)

(上接第 765 页)

该界面主要由查询参数设置、历史数据显示、历史数据处理 3 部分组成。查询参数设置部分,主要是对序列号及所要查询的时间段进行设置。历史数据显示部分,主要是将所查询的各项历史数据以曲线的形式显示出来,工作人员可快速地观察到曲线的走向及波动程度。历史数据处理部分,主要对所查询数据进行一定的分析处理,获取最大值、最小值、平均值以及标准差,该 4 项指标对于立体织物的质量等级评定具有重要意义。

4 结 语

本文系统针对立体织机多经轴经纱张力检测的具体要求,利用 LabVIEW 设计了人机友好的工作界面,可以实时检测多个经轴的经纱张力情况,并对检测的张力数据进行处理和分析,相较于以往的张力检测系统,该系统显得要更为直观。高精度传感器及数据采集卡提升了本文系统检测精度。系统稳定性好、安全性高、环境适应能力强,可以实时检测出送过程中经纱的张力,通过对当前数据的分析降低了立体织物残次品出现的几率。同时,该检测系统通用性良好,也可应用于其他纱线张力检测领域。

参 考 文 献

- [1] 鲁喜,杨建成. 用于碳纤维织物的多层织机经纱张力检测方法[J]. 纺织学报,2016,37(7):137-141.
- [2] 张成俊,左小艳,张弛,等. 基于 ARM 的纱线张力检测系统设计[J]. 针织工业,2013(1):17-20.
- [3] 倪敏娜,李萍,李艳. 基于模糊多属性群决策的经纱张力检测及控制方案优选[J]. 东华大学学报(自然科学版),2014,40(3):282-287.
- [4] 杨建成,蒋秀明,周国庆. 织机经纱张力 Fuzzy-PID 控制及其检测方法[J]. 纺织学报,2008,29(10):105-108.
- [5] 吴震宇,陈琳荣,李子军. 接触式纱线张力传感器动态测量模型[J]. 纺织学报,2013,34(8):138-142.
- [6] 黄健. 纱线张力控制系统的设计与实现[D]. 杭州:杭州电子科技大学电子信息学院,2014:11-21.
- [7] 赵梅,胡天亮,张倩,等. 基于 LabVIEW 的 AMT 数据采集系统设计与研究[J]. 山东大学学报,2011,41(6):70-79.
- [8] 胡彩凤,张新. 基于 LabVIEW 的多绳提升钢丝绳张力动态检测系统[J]. 煤矿安全,2010(7):87-89.
- [9] 吕东阳,王显军. 基于 LabVIEW 的电机转台数据采集及检控系统[J]. 测控技术,2014,33(4):75-78.
- [10] ZHANG M L, YUN J T, JIN G G, et al. System on temperature control of hollow fiber spinning machine based on labVIEW[J]. Procedia Engineering, 2012, 29:543-570.
- [11] 张丙才,刘琳,高广峰,等. 基于 LabVIEW 的数据采集与信号处理[J]. 仪表技术与传感器. 2007(12):74-75.

(责任编辑:杜 佳)