

一种基于 TLC 改进的抖动分解算法^{*}

张振声 赵同刚 高子昂

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘要: 抖动是限制电路系统性能上限的重要原因之一,对抖动的各个成分进行分解很有必要。传统的时间延迟相关抖动分解算法在分解结果的准确性、稳定性以及运算的时效性上均存在不足。本文结合最小二乘法提出了一种拟合方法,能够有效地从受到随机性抖动成分影响的 TLC 函数中提取出抖动分量信息,从而避免了随机性数据对方程组的影响,增强了算法的稳定性。同时,引入 FFT 算法,使 TLC 算法能够更准确、高效地分解出抖动分量的频点信息,减少了算法的运行耗时。为验证改进算法的有效性,本文设计实验将所提出的改进算法与已有的改进算法进行对比。实验结果表明,改进的 TLC 算法分解出的抖动参数结果更准确,稳定性大约提升了 41%~54%,时效性大约提升了 52%~68%。

关键词: TLC;抖动分解;最小二乘法;FFT

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

An improved jitter decomposition algorithm based on TLC

Zhang Zhensheng Zhao Tonggang Gao Ziang

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Jitter is one of the important reasons to limit the upper limit of circuit system performance, and it is necessary to decompose the various components of jitter. The traditional time delay correlation jitter decomposition algorithm is insufficient in the accuracy and stability of the decomposition results and the timeliness of the operation. In this paper, we propose a fitting method combined with least squares method, which can effectively extract the jitter component information from the TLC function affected by the stochastic jitter component, thus avoiding the influence of stochastic data on the system of equations and enhancing the stability of the algorithm. At the same time, the FFT algorithm is introduced, so that the TLC algorithm can decompose the frequency points of the jitter component more accurately and efficiently, which reduces the running time of the algorithm. To verify the effectiveness of the improved algorithm, this paper compares the proposed improved algorithm with the existing improved algorithm. The experimental results show that the jitter parameters decomposed by the improved TLC algorithm are more accurate, the stability is improved by 41%~54%, and the timeliness is improved by 52%~68%.

Keywords: TLC; jitter decomposition; least squares method; FFT

0 引言

在过去几十年的发展中,数字电路系统的性能飞速提升,其中以高速串行数据通信系统的提升尤为明显,例如 PCIe、HDMI 以及 USB 等,传输速率已达到 10 Gbps 级别^[1],对于这样的高速信号,抖动对系统误码率的影响很大,已然成为了其性能提升中不可忽视的重要因素^[2]。根据 SONET 的定义:“抖动是数字信号在重要时点上偏离理想位置的短期变化”^[3],抖动可以分为时间间隔误差(time

interval error, TIE),周期抖动(period jitter)以及相邻周期抖动(cycle to cycle jitter)这 3 种抖动^[4],它们之间是统一且可以相互转化的,可以使用一阶与二阶差分方程将三者联系起来^[1],但同时又各有侧重的反应了一些信号抖动的特征,例如,在异步系统的时钟恢复中,信号边沿对于保证时序关系很重要,这时反应时钟边沿抖动的 TIE 就是关键分析的对象;在观测时钟信号的质量时,时钟周期的稳定性很重要,这时分析信号的周期抖动就很有必要;而考察时钟分频器的稳定性时,相邻周期抖动便成为了关键指标^[5],实

际分析时可以根据不同的对象来选取合适种类的抖动。

电路系统的总抖动(total jitter, TJ)可以分为随机性抖动(random jitter, RJ)和确定性抖动(deterministic jitter, DJ)^[6]。而 DJ 可以再分为周期性抖动(periodic jitter, PJ),有界不相关抖动(bounded uncorrelated jitter, BUJ)以及数据相关性抖动(data dependent jitter, DDJ)^[7]。其中 DDJ 又可进一步细分为符号间干扰(inter-symbol interference, ISI)和占空比失真(duty-cycle distortion, DCD)^[8]。抖动分解实际上就是将一个系统的总抖动分解成各个抖动分量的过程。

目前,主要的抖动分解方法有:快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)算法,尾部拟合(tail-fit)算法,时间延迟相关(time lag correlate, TLC)算法,经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法^[9]以及近年来随着人工智能的兴起,出现的与神经网络相结合的抖动分解算法^[10-11]。其中,FFT 是一种广泛用于分析信号频率信息的算法,它可以将信号从时域转为频域表示,高效地分析出信号的频率组成^[12],但是频谱泄露会使其分解出的频率信息存在误差,一般采用加窗处理以及频率补偿来对抗^[13]。尾部拟合是一种基于统计域的抖动分解算法,其原理相对易于实现,算法计算量小,分解速度相对较快,而且抗抖动样本噪声能力强^[14],但是其对于抖动样本的数量要求较高,数量不充裕的抖动样本集难以创建出较为理想的 PDF 直方图,也就难以从直方图的左右尾部中拟合出准确的 RJ 抖动分量信息,而且在对直方图进行平滑滤波操作时,滤波本身也会对直方图原有的信息造成扭曲,使得分解结果的准确性不高^[15]。EMD 是一种自适应的分解算法,其对于非线性非平稳的信号有较好的分解效果^[16],但是算法本身由于端点效应、模态混叠等问题,使得对于抖动分量分解结果的准确性及精度都存在不足,而且算法计算复杂度较高,时效性不足。与神经网络相结合的抖动分解算法是近年来新出现的一类算法,依托神经网络强大的非线性建模能力,算法可以学习到信号中不同抖动成分之间的复杂且微小的非线性特征,有助于更精准地分解出每一种抖动分量,然而正是因为借助神经网络,也让这类算法普遍存在诸如,过于依赖高质量的训练数据、模型复杂度较高、解释性较差的问题,且算法对硬件资源要求较高,相对于其他抖动分解算法难以部署到实际应用场景中。

文献[17]提出的 TLC 抖动分解算法是一种基于时域的抖动分解方法,TLC 算法不需要大量的 TJ 样本就可以良好进行,但是在实际分析中,由于 RJ 不完全遵从理想高斯分布,所以根据 TJ 样本得到的 TLC 函数并不完全符合理论推导的模型,使得 TLC 函数出现随机毛刺现象,导致算法的准确性以及稳定性都会受到不小的影响。同时又因为 TLC 算法中的解方程步骤,尤其是在 PJ 成分较多时,方程中的未知数太多,导致算法运算时间过长,时效性不高。

针对 TLC 算法的不足,本文提出拟合 TLC 函数的思路,拟合可以有效地应对 TLC 函数中的随机毛刺现象,以提升算法分解结果的准确性以及稳定性。同时,将 TLC 算法与 FFT 算法相结合,进一步减少方程中的未知数。将拟合与 FFT 算法同时用于 TLC 算法,可以取代原算法中的解方程步骤,从而避免了解超越方程组导致的耗时过长的的问题,以达到提升算法时效性的目的。

1 TLC 算法

对于一个连续的抖动函数 $J(t)$ 来说,它的自相关函数的表达式为:

$$C_J(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(t) \cdot J(t+\tau) dt \quad (1)$$

由于实际采样得到的都是一个个离散的数据点,因而对于离散的抖动函数 $J(n)$,它的自相关函数表达式为^[17]:

$$C_J(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (J(n+m) \cdot J(n)) \quad (2)$$

在对一个包含诸多分量的抖动函数求自相关函数时,抖动的各个分量间难免会计算互相关函数,但是由于抖动分量的产生原因互不相同^[7],因此可以认为抖动分量间是相互独立的,因而计算中总抖动函数的自相关函数等于各个抖动分量自相关函数的叠加。

RJ 是每个电路系统都存在的一种抖动成分,它的 PDF 理论模型是理想高斯分布^[9]:

$$J_{RJ}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(nt_s - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

其中, μ 是高斯分布的均值, σ^2 是高斯分布的方差, t_s 是样本相邻两点的的时间间隔。RJ 的自相关函数满足:

$$\begin{cases} C_{RJ}(m) = 0, m \neq 0 \\ C_{RJ}(m) = \sigma^2, m = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于理想的 RJ 分布来说,它的自相关函数只在零点不为 0,其值等于 RJ 的方差。

PJ 的 PDF 理论模型是正弦函数模型,其可以表示为^[18]:

$$J_{PJ}(n) = P \cdot \cos(\frac{\omega n}{f_s}) \quad (5)$$

其中, P 为幅值, ω 为信号的角频率, f_s 则是被测信号的频率,其自相关函数为^[17]:

$$C_{PJ}(m) = \frac{P^2}{2} \cos(\frac{\omega m}{f_s}) \quad (6)$$

PJ 的自相关函数也是正弦函数,当 m 为 0 时,其值为 $\frac{P^2}{2}$ 。

当总抖动中含有 RJ 并且只含有一种 PJ 时,此时它的自相关函数可以表示为:

$$\begin{cases} C_{TJ}(m) = \sigma_{RJ}^2 + \frac{P^2}{2}, m = 0 \\ C_{TJ}(m) = \frac{P^2}{2} \cos(\frac{\omega m}{f_s}), m \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

对于一个含有 RJ 并且含有多种 PJ 的总抖动,其自相关函数则可以表示为式(8),一个 RJ 在 TLC 函数中产生一个未知数,通常一个电路系统中只存在一个 RJ。一个 PJ 在 TLC 函数中产生两个未知数,而一个电路系统中可以存在多个 PJ。因此对于含有一个 RJ 和 n 个 PJ 的总抖动函数,就会产生 $2n+1$ 个未知数。

$$\begin{cases} C_{TJ}(m) = \sigma_{RJ}^2 + \frac{P_1^2}{2} + \frac{P_2^2}{2} + \dots, m = 0 \\ C_{TJ}(m) = \frac{P_1^2}{2} \cos(\frac{\omega_1 m}{f_s}) + \frac{P_2^2}{2} \cos(\frac{\omega_2 m}{f_s}) + \dots, m \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

在对实际采得的抖动样本进行离散自相关函数计算后,从得到的样本 TLC 函数中挑选零点以及其他 $2n$ 个点就可以联立求解一个 $2n+1$ 元的超越方程组,从而解出抖动分量中的未知数,完成抖动的分解。

如图 1(a)所示,理想的 TLC 函数是一段光滑的曲线,但因为实际采样得到的 TJ 样本中的 RJ 并不完全符合高斯分布的理论模型,所以根据实际样本计算得到的 TLC 函数总是带有一些 RJ 随机噪声的特征,如图 1(b)所示。

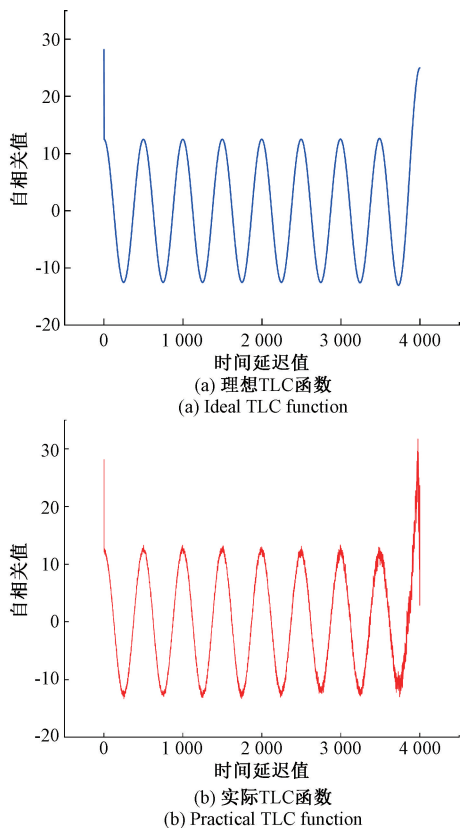


图 1 TLC 函数对比

Fig. 1 TLC function comparison

这些毛刺带有随机性,使得每次选取点的函数值带有随机性,从而使方程组的解带有随机性,导致抖动分解结果的稳定性大幅下降。同时,在多 PJ 情况下,方程中的未知数会增多,使得联立的超越方程组更复杂,导致解方程的耗

时变长,从而使算法整体的时效性降低。鉴于以上原因,传统的 TLC 算法在实际的抖动分解中略显乏力。

文献[19]提出了一种改进的 TLC 抖动分解算法,旨在对抗 TLC 函数中的随机毛刺现象,算法的思想是将 TLC 算法与 FFT 算法相结合^[20],从信号的频域表示形式中更准确、快速地获得抖动中每个 PJ 的频率信息^[13],从而减小了超越方程组的规模,提升了算法的时效性,再通过滤波算法滤除 TLC 函数中的高频分量,从而获得较为平滑的 TLC 函数,再联立方程组解出剩余的抖动分量参数,从而完成抖动的分解过程。

改进的 TLC 抖动分解算法可以在一定程度上对抗随机毛刺,但是因为实际的滤波器不具有理想的响应函数,无法实现对特定频率以外信号的完全截止。另外,噪声的频率范围通常会与抖动信号的频率范围存在重叠,使得频率低于抖动信号的噪声难以滤除。鉴于以上原因,即便使用滤波的方法得到了平滑的 TLC 函数,但是这个 TLC 函数相对于原始 TLC 函数,波形依旧是有扭曲和失真的,使得滤波后的 TLC 函数不可避免地仍会留有一些随机性,这仍会使得 TLC 分解的结果不准确且不稳定。而且该算法虽然结合了 FFT 算法减少了方程中的未知数,使得方程组的规模较小,但是仍需求解超越方程组,尤其在抖动中存在较多 PJ 时,解方程依旧会对算法运行时间造成不小的影响,时效性还存在改进空间。

2 改进的 TLC 算法

针对 TLC 函数中的毛刺现象,本文结合最小二乘法^[21]提出了一种拟合方法。选用拟合方法,是鉴于实际计算所得的 TLC 函数虽存在毛刺现象,但整体上仍保留了有用信息,采用拟合手段,能够最大程度还原这些保留的有用信息,进而尽可能降低毛刺噪声对算法的干扰。同时本文也借鉴了将 TLC 算法与 FFT 算法相结合的思路^[20],以便更高效地分解出抖动分量的频率信息。FFT 算法结合拟合的操作,避免了 TLC 算法中解方程的步骤,进一步减小随机毛刺对算法的影响的同时提升了算法的时效性。图 2 是对抖动信号进行 FFT 后的频谱图,图中的尖峰即对应 PJ。

改进后的 TLC 算法流程图如图 3 所示。

本文计算 TLC 函数使用的是无偏差自相关函数^[19]:

$$C_{TJ}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^N (J(n) \cdot J(n+m)) \quad (9)$$

其中, N 为样本点数,使用无偏差的自相关函数可以获得幅值无衰减的 TLC 函数,有利于开展后续的拟合。基于无偏差的方式与传统方式计算得到的各个抖动分量的 TLC 函数相同。

在根据 FFT 算法得到各个 PJ 的频率值之后,此时方程组中的未知数还剩下各个 PJ 的幅值以及 RJ 的方差。将这些已知的频率值代入 TLC 函数中,同时去除函数中 RJ 的方差项,构建一个拟合函数:

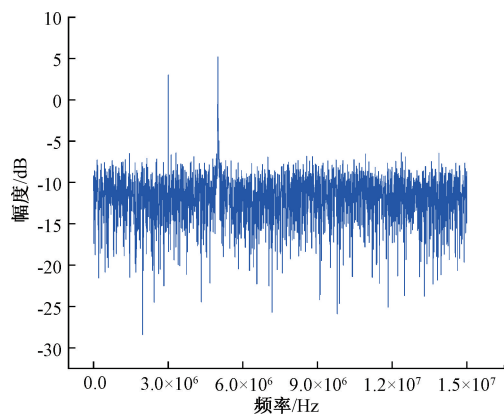


图 2 抖动频谱图

Fig. 2 Jitter spectrumgram

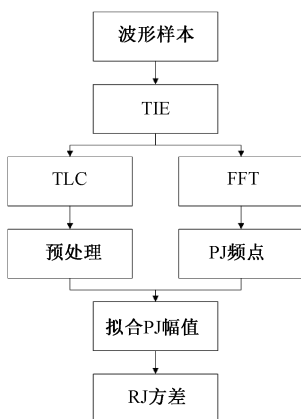


图 3 改进 TLC 算法流程图

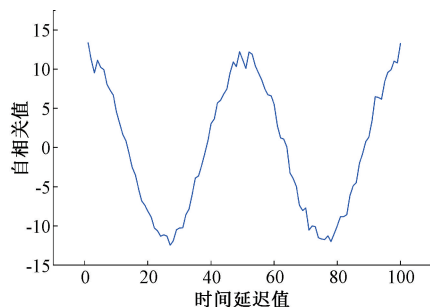
Fig. 3 Improved TLC algorithm flow chart

$$\begin{cases} C'_{TJ}(m) = \frac{P_1^2}{2} + \frac{P_2^2}{2} + \dots, m = 0 \\ C'_{TJ}(m) = \frac{P_1^2}{2} \cos(\frac{\omega_1 m}{f_s}) + \frac{P_2^2}{2} \cos(\frac{\omega_2 m}{f_s}) + \dots, m \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

将带有毛刺的 TLC 函数作为拟合样本,在拟合前还需要对其进行一些预处理。

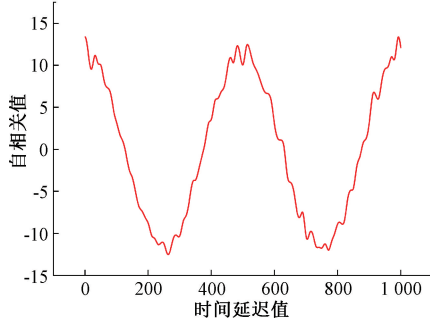
TLC 函数的零点因为叠加了 RJ 的方差与相邻的点区别很大,不利于拟合 PJ 的幅值信息。如果去掉会导致二者相位的变化,拟合函数与拟合样本相位不一致将直接恶化拟合结果。为保证二者相位相同,采取将函数的零点值修改为其后一点的值。同时,因为 TLC 函数的尾部末端失真较为严重,所以只截取函数靠近零点的一段作为拟合样本,实际拟合时可以根据抖动样本点数来灵活选取截取 TLC 函数长度的比例,从而减小抖动样本数量对算法时效性的影响。此外,样本波形的细腻程度(相邻两个样本点的时间间隔)关乎拟合结果的精度。从式(8)中可以看出,TLC 函数的样本间隔是被测信号的周期 T_s ,而对于抖动样本,一个信号波形周期产生一个抖动数据样本,抖动样本的间隔也是被测信号的周期,因此抖动样本与 TLC 样本函数的间

隔是随被测信号的周期而固定的。想要缩短 TLC 样本的间距,本文提出使用三次样条插值算法来为 TLC 样本函数补充更多信息,这样便可以有效保证拟合结果的精度。如图 4(a)所示,是一段从 TLC 函数中截取出的曲线,图 4(b)则是对其进行 10 倍插值后的曲线,可以对比看出插值后的 TLC 样本波形比插值前更光滑细腻,所携带的信息也更多。但是插值点的数量不是越多越好,过多插值不仅会导致波形原本的信息被歪曲而且也会增加算法的运算量,导致算法的时效性与准确性下降,因此实际分解时应该根据样本点的间距选择合适的插值点数。



(a) 插值前部分TLC样本

(a) Partial TLC sample before interpolation



(b) 插值后部分TLC样本

(b) Partial TLC sample after interpolation

图 4 插值算法效果图

Fig. 4 Interpolation algorithms effect diagram

自此开始进行拟合,拟合共分为一阶拟合与二阶拟合,两者的算法思路相同,只是选取了不同的拟合范围与拟合步长。

一阶拟合是初步的拟合,可以较为快速的确定出 PJ 幅值的大概范围,是出于对算法时效性上的考虑。拟合的范围是 0 到拟合样本中的最大值,拟合步长取拟合范围的 5%。确定拟合范围与拟合步长后,按照步长遍历所有的参数组合。将每一种参数组合代入拟合函数中,根据最小二乘法的原理,用拟合函数值减样本值的平方的累加值作为评判标准,累加值越小表示拟合函数与样本更贴合,选取最小的累加值对应的参数组合作为最终的拟合结果。一阶拟合操作的流程图如图 5 所示。

二阶拟合是精确的拟合,是出于对算法准确性上的考虑。二阶拟合将一阶拟合的结果作为拟合初值,拟合范围选取一阶拟合结果的左右 20%,拟合步长应较为精细,取拟合范围的 2%。确定拟合范围与拟合步长后,剩余操作

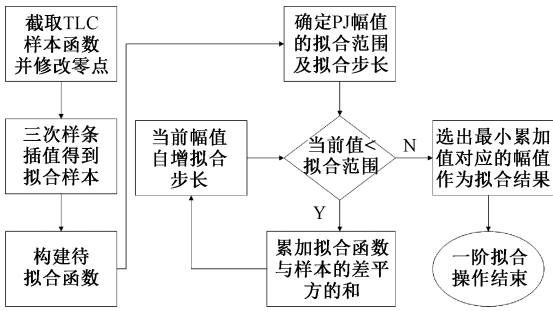


图 5 拟合流程图

Fig. 5 Fitting flow chart

与一阶拟合相同。

图 6 为拟合的最终效果图,可以看出拟合出的曲线与样本函数较为贴合,可以较好的从带有毛刺的 TLC 样本函数中提取出抖动信息。

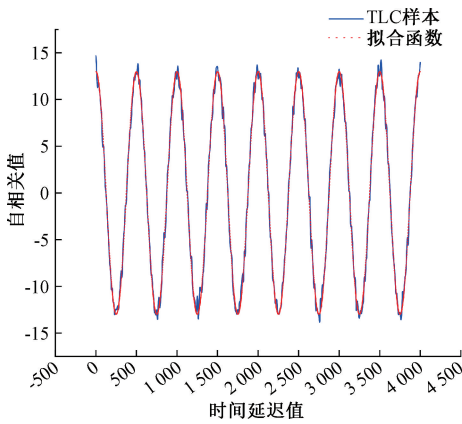


图 6 拟合结果图

Fig. 6 Fitting result diagram

此时,方程组中只剩下一个未知数,代入样本函数的零点即可求解出 RJ 的方差,从而完成了抖动的分解过程。

3 仿真实验结果对比

为验证改进算法的有效性,本文将针对算法的时效性、

稳定性以及准确性 3 个方面设计仿真实验。实验将选取文献[19]提出的改进算法作为本改进算法的对照。

实验中所使用的抖动数据是用正弦叠加高斯而成的模拟 TIE 数据,如图 7 所示,这是一种侧重反应信号边沿质量的抖动类型^[22]。

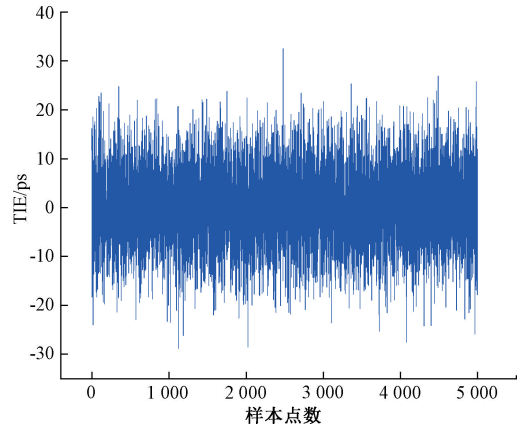


图 7 TIE 抖动样本

Fig. 7 TIE jitter sample

3.1 准确性与时效性实验

样本数量对抖动分解算法的准确性影响很大,因此实验将改变样本点数来考察在不同情况下两种算法的抖动分解效果。同时,实验将在同一台计算机上运行两种算法,记录算法运行的时间,并记录在表 1 中。

实验样本参数:RJ 标准差 $\sigma = 6$ ps, PJ 幅值 $P = 4$ ps, 频率 $f = 3$ MHz, PJ₂ 幅值 $P_2 = 8$ ps, 频率 $f_2 = 5$ MHz。TIE 样本频率 $f_s = 30$ MHz。

如表 1 所示,由于两种改进算法都是结合了 TLC 算法与 FFT 算法,故二者都可以较为准确地分解出抖动分量的频率信息,这也验证了 FFT 算法给 TLC 算法带来了不小的增益。同时,可以从图 8 中看出,在不同样本点数的情况下,本文所提的改进算法拟合出的 RJ 方差以及 PJ 幅值整体上比原改进算法用方程组计算出的误差更小,结果更准确,可以验证拟合 TLC 函数的方法是有效且可行的。

表 1 准确性与时效性实验结果

Table 1 Accuracy and timeliness test result

样本 点数	改进 TLC						新改进 TLC					
	σ /ps	P /ps	f /MHz	P_2 /ps	f_2 /MHz	耗时/s	σ /ps	P /ps	f /MHz	P_2 /ps	f_2 /MHz	耗时/s
100	5.63	4.43	3.04	9.01	5.00	0.42	6.42	3.47	3.00	7.38	5.00	0.16
300	5.89	3.73	3.00	7.35	5.00	0.44	5.77	4.35	3.05	7.66	5.03	0.14
500	6.26	4.14	3.01	7.18	5.00	0.57	6.19	3.84	3.00	7.91	5.00	0.22
1 000	5.96	3.67	3.00	7.80	5.03	0.52	5.98	3.87	3.00	8.14	5.00	0.19
3 000	5.91	3.97	3.00	8.03	5.00	0.59	6.03	3.93	3.00	8.06	4.98	0.27
5 000	5.97	3.95	3.00	8.06	4.99	0.48	5.99	4.02	3.00	8.01	5.00	0.23

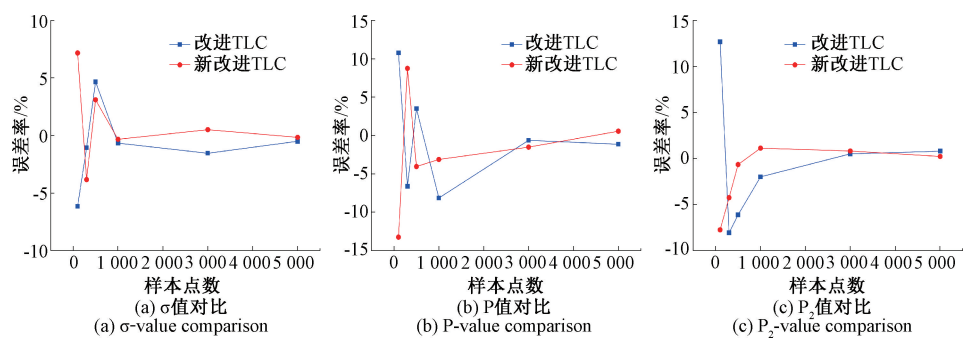


图 8 准确性测试误差率折线图
Fig. 8 Accuracy test error rate line chart

从表 1 中可知,本文提出的改进算法的运算耗时相比于原改进算法更少,这证明了解超越方程组是 TLC 算法时效性不足的重要因素,本文因为避免了解方程的操作,所以算法的时效性有所提升。同时,根据抖动样本的大小来截取作为拟合样本的 TLC 函数段,可以避免因为抖动样本的增加导致拟合样本的大幅增加,以致算法拟合时间的增加,减小了新改进的 TLC 算法的运算时间受样本数量的影响。本文所提改进算法的时效性较原改进算法大约提升了 52%~68%。

3.2 稳定性实验

本节将设计一个考查算法多次运行后结果是否有较大差异的实验。实验将固定仿真样本参数并在同一台计算机上多次运行两种改进算法,将各个抖动分量参数的分解结果记录在表 2 中。

实验样本参数 1: RJ 标准差 $\sigma=8$ ps, PJ 幅值 $P=6$ ps, 频率 $f=1$ MHz。TJ 样本点取 3 000 点 TIE 样本频率

$f_s=10$ MHz。

实验样本参数 2: RJ 标准差 $\sigma=8$ ps, PJ 幅值 $P=4$ ps, 频率 $f=1$ MHz, PJ₂ 幅值 $P_2=8$ ps, 频率 $f_2=3$ MHz。TJ 样本点取 3 000 点,样本间隔 $f_s=30$ MHz。

表 2 稳定性实验结果-样本 1
Table 2 Stability test result-sample 1

实验 轮次	改进 TLC			新改进 TLC		
	σ /ps	P /ps	f /MHz	σ /ps	P /ps	f /MHz
1	7.82	6.16	1.00	8.09	6.02	0.99
2	7.95	5.98	0.98	7.85	6.15	1.00
3	8.16	6.09	1.00	7.95	6.04	1.00
4	8.02	6.05	1.05	8.12	5.89	1.01
5	8.18	5.84	1.00	7.91	6.06	1.00
6	7.84	6.04	1.00	8.04	6.03	1.03

表 3 稳定性实验结果-样本 2
Table 3 Stability test result-sample 2

实验 轮次	改进 TLC					新改进 TLC				
	σ /ps	P /ps	f /MHz	P_2 /ps	f_2 /Hz	σ /ps	P /ps	f /Hz	P_2 /ps	f_2 /MHz
1	7.95	3.98	1.00	7.87	2.98	8.02	3.99	1.00	7.96	3.00
2	7.82	4.11	1.01	8.16	3.00	7.99	4.16	1.00	8.15	3.00
3	8.08	3.84	1.00	8.09	3.00	8.06	4.04	1.01	8.02	3.00
4	8.18	3.89	1.00	8.26	3.00	7.95	3.87	1.00	7.88	3.00
5	8.06	3.96	0.98	8.03	3.03	8.12	4.06	1.00	8.00	3.00
6	8.11	4.21	1.00	7.81	3.00	7.86	4.13	0.99	7.82	3.00

如图 9 所示,本文所提出的改进 TLC 算法比原改进算法分解结果的方差更小,各个实验轮次分解出的结果更相近,这证明了拟合的方法比滤波的方法可以更有效地对抗

因 RJ 引起的分解结果带有随机性的问题,从而进一步减小随机因素对于算法稳定性的干扰,验证了新改进的算法较原改进算法更加稳定,稳定性大约提升了 41%~54%。

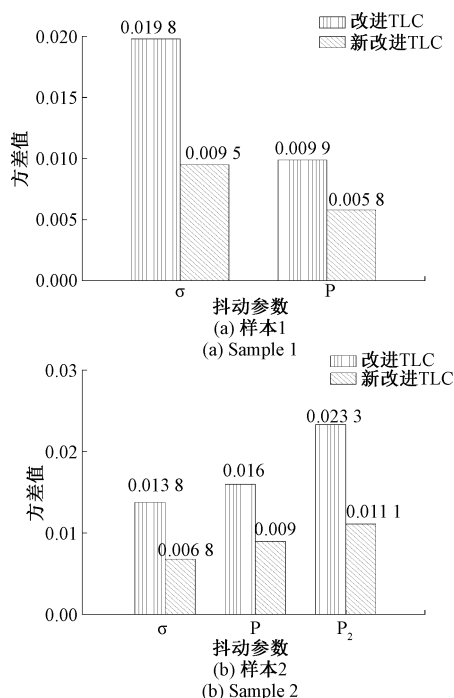


图9 稳定性测试方差直方图

Fig. 9 Stability test variance histogram

4 结 论

TLC算法在抖动分解中存在分解结果准确性不足、运行耗时过长以及稳定性较差的缺陷,本文在原有的TLC算法的理论基础上对其进行改进,实验表明改进后的TLC算法在分解结果的准确性、稳定性以及时效性上都有改善,使得TLC算法更加成熟高效,性能进一步提升,成为抖动分解领域中的一种更加优秀的算法。

参考文献

- [1] 任楠. 高速串行链路信号抖动分解技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
REN N. Research on jitter decomposition of pattern signal in high-speed serial link [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2022.
- [2] 王一雄,粟涛. 用于测量数字电路抖动的波形扩展方法[J]. 电子测量技术,2022,45(5):26-32.
WANG Y X, SU T. Waveform expansion method for measuring digital circuit jitter [J]. Electronic Measurement Technology,2022,45(5):26-32.
- [3] 吴文婧. 基于时频域的抖动分离和分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
WU W J. Jitter separation and analysis based on time and frequency domain[D]. Xi'an: Xidian University,2011.
- [4] 王博成. 示波器眼图与抖动分析软件设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.

- WANG B C H. Design of oscilloscope eye diagram and jitter analysis software[D]. Xi'an: Xidian University,2023.
- [5] 焦林羽. 串行分析仪的眼图与抖动分析模块设计[D]. 成都:电子科技大学,2024.
JIAO L Y. Design of eye diagram and jitter analysis module for serial analyzer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2024.
- [6] 陈星燎,高恩辉,刘通. 一种测量误码率谱构建眼图的方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(3):219-229.
CHEN X L, GAO E N H, LIU T. Measuring BER based method of building an eye-diagram[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2024,38(3):219-229.
- [7] 吕雅军. 抖动和串扰影响下的高速链路统计眼图分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.
LYU Y J. Under the influence of jitter and crosstalk high-speed link statistical eye diagram analysis [D]. Xi'an: Xidian University,2023.
- [8] 吴桐. 高速串行通信信号抖动关键技术的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2023.
WU T. Research on key technologies of jitter in high-speed serial communication signals[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2023.
- [9] 雷伟文. 抖动的时频域分析与研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
LEI W W. Analysis and research of jitter in time and frequency domain [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2021.
- [10] REN N, FU Z M, ZHOU D D, et al. Jitter decomposition meets machine learning: 1D-convolutional neural network approach [J]. IEEE Communications Letters,2021,25(6):1911-1915.
- [11] KU C K, GOAY C H, AHMAD N S, et al. Jitter decomposition of high-speed data signals from jitter histograms with a pole-residue representation using multilayer perceptron neural networks [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2019,62(5):1-11.
- [12] 李浩,王厚军,肖磊,等. 高速并行数字调制信号的产生与实现[J]. 仪器仪表学报,2023,44(2):110-118.
LI H, WANG H J, XIAO L, et al. Generation and implementation of high-speed parallel digital modulation signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(2):110-118.
- [13] 马亮. 基于FFT的抖动分析与分离方法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
MA L. The research on analysis and decomposition of jitter based on FFT[D]. Xi'an: Xidian University,2011.

- [14] 吴逢时,高子昂,忻向军,等. 一种分离宽带取样示波器中随机性抖动与确定性抖动的方法[P]. 北京:CN202310819443.2,2023-10-03.
- WU F SH,GAO Z ANG,XIN X J,et al. A method to separating random jitter from deterministic jitter in a broadband sampling oscilloscope[P]. Beijing:CN2023-10819443.2,2023-10-03.
- [15] SOLIMAN G. Improved jitter distribution tail-fitting algorithm for decomposition of random and deterministic jitter [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2019,62(5):1-7.
- [16] 李承阳,田书林,杨扩军,等. 高速数据采集系统中基于 EMD 的异常信号捕获方法研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(12):98-106.
- LI CH Y,TIAN SH L,YANG K J,et al. Research on the anomaly detection method based on EMD in the high-speed data acquisition system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2024,45(12):98-106.
- [17] DOU Q Q,ABRAHAM J. Jitter decomposition by time lag correlation[C]. 7th International Symposium on Quality Electronic Design, IEEE,March 2006:525-530.
- [18] 孙静静. 宽带数字示波器信号完整性分析模块设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- SUN J J. Design and implementation of signal integrity analysis module for broadband digital oscilloscope [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2020.
- [19] 朱健,黄伟,李辉,等. 一种改进的 TLC 抖动分解算法[J]. 通信与信息技术,2014(1):51-55.
- ZHU J,HUANG W,LI H,et al. An improved TLC jitter decomposition algorithm[J]. Communication & Information Technology,2014(1):51-55.
- [20] PANG H,ZHU J,HUANG W. Jitter decomposition by fast fourier transform and timelag correlation[C]. IEEE 7th International Conference on Communications, Circuits and Systems,2009:365-368.
- [21] 王顺霞,黄成泉,罗森艳,等. 邻域信息加权的最小二乘投影双支持向量聚类[J]. 电子测量技术,2024,47(12):59-70.
- WANG SH X,HUANG CH Q,LUO S Y, et al. Weighted least square projection twin support vector clustering with neighborhood information[J]. Electronic Measurement Technolog,2024,47(12):59-70.
- [22] 银子燕. 等效时间采样的高速串行数据处理与分析[D]. 太原:中北大学,2024.
- YIN Z Y. High-speed serial data processing and analysis with equivalent-time sampling[D]. Taiyuan: North University of China,2024.

作者简介

张振声,硕士研究生,主要研究方向为数字电路信号完整性分析。

E-mail:Kzsz1231@163.com

赵同刚(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带取样示波器中时钟特性。

E-mail:zhaotg@bupt.edu.cn

高子昂,博士研究生,主要研究方向为电路通信系统与光学工程。

E-mail:zagao@bupt.edu.cn