

· 采集技术 ·

测试地震数据采集系统总谐波畸变的 剪切FFT算法

张永学^{*①②} 印兴耀^③ 宋建平^① 张在陆^② 薛会珍^②

(①西安交通大学电子与信息工程学院;②东方地球物理公司西安物探装备分公司;
③中国石油大学(华东)地球资源与信息学院)

张永学,印兴耀,宋建平,张在陆,薛会珍. 测试地震数据采集系统总谐波畸变的剪切FFT算法. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3): 252~256

摘要 随着地震勘探技术的发展,地震数据采集系统的配置道数和实时采集道数可多达万道甚至十万道,在不降低测试精度的前提下,对地震数据采集系统性能指标的测试效率也提出了更高的要求。本文从总谐波畸变计算公式和FFT的运算结构出发,提出了测试地震数据采集系统总谐波畸变的剪切FFT算法,该法的核心思想是只计算对目标输出有贡献的蝶型运算节点,其关键在于采用正序输入、反序输出确定与期望输出有关系的蝶型运算节点,只进行与总谐波畸变公式中所需要的基波和谐波幅度值有关的计算,建立了由输入数据到期望输出之间的计算路径,并根据确定的蝶型运算节点来计算测试数据的基波和各次谐波的幅度值,进而计算数据采集通道的总谐波畸变。理论分析和实际计算结果表明,剪切FFT算法的计算精度与标准算法完全相同,运算量显著减少,提高了测试效率,适用于大道数地震数据采集系统总谐波畸变指标的野外或室内测试。

关键词 地震数据采集系统 总谐波畸变 测试 标准算法 剪切FFT算法

1 引言

总谐波畸变是指地震数据采集系统输入正弦信号时表现在系统输出端的非线性畸变,一般用各次谐波分量幅度与基波信号幅度的均方根之比来表示。总谐波畸变是地震数据采集系统的一项重要性能指标,它反映了地震数据采集系统对地震信号的保真能力^[1],它与噪声和系统瞬时动态范围有着密不可分的联系^[2],即总谐波畸变过大,其谐波分量将会降低系统的瞬时动态范围,而总谐波畸变和噪声又决定了系统的总动态范围。为了使地震数据采集系统能够满足高分辨率精细地震勘探的需要^[3],就要对地震数据采集系统的总谐波畸变进行精确测试。随着地震勘探技术转向高覆盖次数、大炮检距与宽方位角观测、三分量采集、单点接收和高密度地震数据采集,地震数据采集系统的系统配置道数和实时采集道数不断增加(可达50000~100000道^[4]),对地震数据采集系统性能指标(包括总谐波

畸变)的测试效率也提出了更高的要求。

文中提出了一种基于剪切快速傅里叶变换的算法(FFT Pruning,剪切FFT算法),并探讨了剪切FFT算法与Goertzel算法、标准算法在计算地震数据采集系统总谐波畸变时的特点,指出标准算法的主要运算量体现在用常规方法实现DFT,而剪切FFT算法只进行与总谐波畸变公式中所需要的基波和谐波幅度值有关的计算。与标准算法相比,剪切FFT算法的计算精度保持不变,运算量却显著减少,适用于大道数地震数据采集系统总谐波畸变指标的野外或室内测试。

2 总谐波畸变的测试方法

当地震数据采集系统的输入为单频正弦信号时,其总谐波畸变(或失真度) D 为

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N H_i^2}}{H_1} \quad (1)$$

* 陕西省西安市西影路53号东方地球物理公司西安物探装备公司,710054
本文于2007年10月12日收到,修改稿于2008年3月17日收到。

式中: H_1 表示测试信号基波的幅度; H_i 表示测试数据第 i 次谐波的幅度; N 满足

$$Nf_b \leq \frac{1}{2}f_c \quad N \leq 9$$

式中: f_b 为系统所加的单频正弦测试信号的频率; f_c (f_c 可取 $0.4f_s$ 或 $0.45f_s$, 其中 f_s 为 A/D 转换器的采样频率^[5]) 为 A/D 转换器去假频滤波器的截止频率。上式表明, $N > 9$ 时的高次谐波已经湮没于噪声之中。当总谐波畸变以 dB 为单位来表示时, 式(1)可变为

$$D_{dB} = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N H_i^2}}{H_1} = 10 \lg \frac{\sum_{i=2}^N H_i^2}{H_1^2} \quad (2)$$

在地震数据采集系统中, 每一个采集通道均设计了专门的测试电路, 其测试原理如图 1 所示。由图 1 可见地震数据采集系统的总谐波畸变测试流程为: 首先由高精度信号源产生具有一定幅度、一定频率、低失真 ($< 0.0003\%$) 的模拟正弦测试信号 $x(t)$, 经过前置放大后进入 A/D 转换器的输入端, 然后启动仪器以适当的采样频率对输入信号 $x(t)$ 进行采样得到离散信号 $x(n)$, 并对 $x(n)$ (进行 DFT 运算 (标准算法采用标准 FFT), 得到基波和各次谐波的幅度后, 最后利用式(1)或式(2)来计算系统的总谐波畸变。



图 1 地震数据采集系统总谐波畸变测试原理

2 计算 DFT 部分输出的主要方法

通过以上分析可知, 地震数据采集系统总谐波畸变测试的主要运算量在于 DFT 运算。要想减少运算量, 应该根据地震数据采集系统总谐波畸变测试计算的特点来考虑简化 FFT 运算。由总谐波畸变测试方法可知, 参与总谐波畸变计算的只有 N ($N \leq 9$) 个 DFT 输出数据, 可以通过 Goertzel 算法或剪切 FFT 算法只计算这些输出数据。

2.1 利用 Goertzel 算法计算 DFT^[6~9]

Goertzel 算法是一种单频率单元 DFT 算法, 原理如图 2 所示。由图 2 可知, 当时间索引 $n = N$ (时间索引 n 从 0 开始) 时, 滤波器的输出 $y(n)$ 为等于

长度为 N 的输入序列 $x(n)$ 的第 m ($0 \leq m \leq N-1$) 个 DFT 输出^[9], 即

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi mn} \quad (3)$$

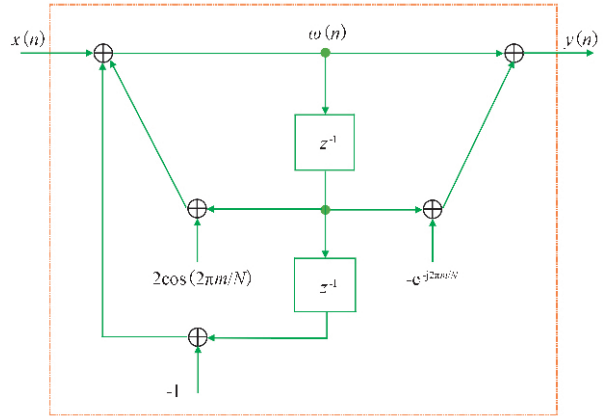


图 2 Goertzel 算法的实现框图

图中虚线框内为一个具有实反馈系数 $-1, 2\cos(2\pi m/N)$ 和复反馈系数 $e^{-j2\pi m/N}$ 的 Goertzel 滤波器, $x(n)$ 为滤波器的输入, $y(n)$ 为滤波器的输出

Goertzel 滤波器的时域差分方程为

$$\omega(n) = 2\cos(2\pi m/N)\omega(n-1) - \omega(n-2) + x(n) \quad (4)$$

$$y(n) = \omega(n) - \omega(n-1)e^{-j2\pi m/N} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知, 对于长度为 N 的实输入数据, 计算出由式(3)定义的 N 点 DFT 的其中一个输出值只需要进行 $N+2$ 次实数乘法和 $2N+1$ 次实数加法。

2.2 剪切 FFT 的基本原理^[10~13]

快速傅里叶变换(FFT)是数字信号处理的基本工具, 在计算 DFT 全部输出值时效率很高。然而, 当只需要部分 DFT 输出值或部分输入数据为 0 时, 剪切快速傅里叶变换(剪切 FFT 算法)的运算效率更高。剪切 FFT 算法的核心思想是只计算对目标输出有贡献的蝶型运算节点, 其关键在于确定哪些蝶型运算节点与所期望的输出有关系。文献[13]提出了一种反向追踪确定相关蝶型运算节点的思路, 并针对反序输入、正序输出、基-2 剪切 FFT 算法给出了如下的蝶型运算节点确定算法公式

$$S_i = S \% (N/2^{i-1}) \quad (6)$$

式中: S 表示期望的输出值的序号; $\%(M)$ 表示模 M 除法运算; N 表示测试数据的长度; S_i 表示在第 i 级与 S 有关的相关蝶型运算节点的序号。

3 剪切 FFT 算法及与其他算法的比较

3.1 剪切 FFT 算法采用正序输入、反序输出确定与期望输出有关的蝶型运算节点

地震数据采集系统的总谐波畸变计算有两个特点:一是期望的 FFT 输出值较少,一般不超过 9 个值;二是多道数据同时测试时,各道测试信号的频率、采集长度、采样率都相同。因此可以得到如下认识:

- (1)为了减少蝶型运算节点的数量,可以采用剪切 FFT 计算基波和各次谐波的幅度值;
- (2)为了减少数据排序的运算量,剪切 FFT 算法应该采用正序输入、反序输出;

(3)不同采集通道数据的基波和相同次数的谐波在 FFT 输出序列中对应的位置相同,因此它们在每一级需要计算的蝶型运算节点的位置也相同。

对于采用正序输入、反序输出的剪切 FFT,不能直接套用式(6),下面我们来讨论相应的相关蝶型运算节点的确定算法。

假设 N 点基-2 FFT 运算可以分为 M 级 ($M=\log_2 N$), 首先将每一级蝶型运算节点分组, 其中在第 $i(1 \leq i \leq M)$ 级可按顺序分为 $G_i = 2^{i-1}$

个组, 每组有 2^{M-i} 个蝶型运算节点, 标号分别为 $0 \sim 2^{M-i} - 1$ 。由正序输入、反序输出基-2FFT 的算法原理可知, 从期望输出的谱线序号出发, 对于第 $i(1 \leq i \leq M)$ 级, 通过式(7)可以得到第 i 级运算中与期望输出有关的蝶型运算节点的组号, 即

$$S_i = [S/2^{M-i+1}] \tag{7}$$

式中: S 表示期望输出的序号; $[\]$ 表示取整运算; S_i 表示在第 i 级与 S 有关的蝶型运算节点的组号。需要指出的是, 对于参与运算的半蝶型运算节点也按照全蝶型运算节点进行处理, 虽然每个全蝶型运算节点比半蝶型运算节点增加了 2 次实数加法, 却降低了编程的复杂度。

以图 3 所示的 16 点基-2 剪切 FFT 为例, 运算结构共分四级。期望输出的谱线的正序输出位置为 $\{7, 12\}$ 、对应的反序输出位置为 $\{14, 3\}$ 。利用式(7), 第 4 级的相关蝶型运算节点组号为 $[14, 3]/2^{4-4+1} = [7, 1.5] = \{7, 1\}$, 第 3 级的相关蝶型运算节点组号为 $\{3, 0\}$, 第 2 级的相关蝶型运算节点组号为 $\{1, 0\}$, 第 1 级的相关蝶型运算节点组号为 $\{0, 0\}$ 。这样, 我们便得到了与期望输出有关的所有级的蝶型运算节点组号, 建立了由输入数据到期望输出之间的计算路径。

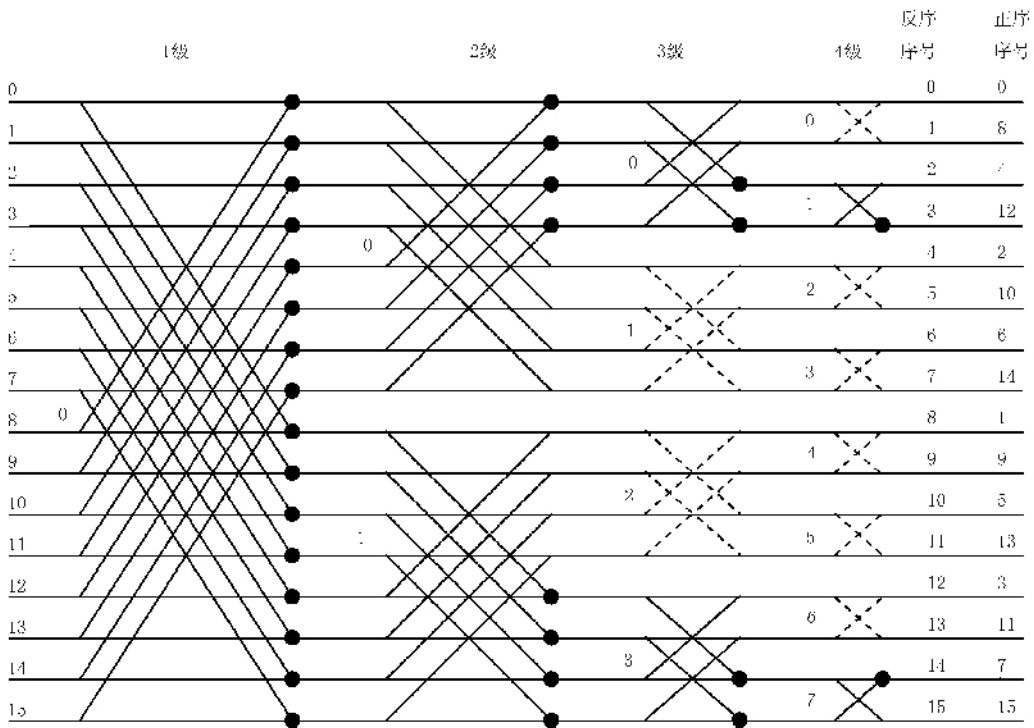


图 3 16 点基-2 改进的剪切 FFT 运算结构示意图

--- 与期望输出无关不参与运算, —— 与期望输出无关参与运算, —●— 与期望输出有关

3.2 基于剪切 FFT 计算地震数据采集系统总谐波畸变的主要步骤

(1)根据测试信号的频率、测试数据的长度和采样率,计算出基波和各次谐波在 FFT 反序输出序列中的位置,再利用式(7)计算出与期望输出有关的所有蝶型运算节点并进行合并整理;

(2)将某一数据采集通道测试数据由数据缓冲区载入运算缓冲区,并选择合适的窗口来抑制频谱能量泄漏;

(3)根据步骤(1)确定的蝶型运算节点来计算测试数据的基波和各次谐波的幅度值;

(4)利用式(1)或式(2)来计算该数据采集通道的总谐波畸变;

(5)重复步骤(2)~(4),得到该系统所有数据采集通道的总谐波畸变结果。

3.3 三种总谐波畸变算法的比较

通过对比 Goertzel 算法、标准算法、剪切 FFT 算法,可得到以下认识:

(1)三种算法的区别在于计算基波和各次谐波幅度值的方法不同;标准算法使用标准 FFT、Goertzel 算法使用 Goertzel 法、剪切算法使用剪切 FFT;

(2)三种算法的计算精度完全相同,其中剪切 FFT 算法和标准算法的本质是一样的,只是前者在计算基波和各次谐波的幅度值时只计算对目标输出有贡献的蝶型运算节点。

(3)剪切 FFT 算法的运算效率明显高于 Goertzel 算法和标准算法。与标准算法相比,剪切 FFT 算法既省略了与输出无关的计算,又缩短了数据排序时间。

4 实例

笔者采用标准算法、Goertzel 算法和剪切 FFT 算法在 PC 机上编程对 GYZ4000 高精度遥测地震

仪的同一组总谐波畸变实际测试数据分别进行了计算。测试环境:Microsoft Windows XP 操作系统,P4/ CPU /2.8GHz,512MB 内存,软件编程工具为 Microsoft Visual C++ 6.0。测试参数:测试信号类型为正弦波;测试信号频率为 31.25Hz;信号采样频率为 4kHz;信号采样长度为 2048 点;谐波分析次数为 2~9 次;通道数为仿真 100000 道(1 道数据计算 100000 次)。表 1 为利用 Goertzel 算法、标准算法、剪切 FFT 算法得到的同一道测试数据的基波、各次谐波的幅度值和总谐波畸变计算值,三种算法的结果完全相同,表明三种算法的计算精度完全相同。表 2 为三种算法的运算效率对比,从表 2 可以看出:①虽然剪切算法的准备工作(主要是确定与期望输出有关的各级的蝶型运算节点)消耗了一些时间,但是平均到所有通道(如 100000 道)上,该时间较短,可忽略不计;②剪切算法的实数乘法、加法次数远小于 Goertzel 算法和标准算法,其数据排序的运算量也远小于标准算法,剪切 FFT 算法、Goertzel 算法、标准算法计算基波和各次谐波幅度所消耗的运算时间比例为 1:2.12:5.48,三种算法的“其他时间”基本相同,三种算法计算总谐波畸变所需的合计时间比例为 1:1.84:4.42。

表 1 Goertzel 算法、标准算法、剪切 FFT 算法的数值计算结果

计算内容	标准算法	Goertzel 算法	剪切算法
基波幅度	1024.00	1024.00	1024.00
二次谐波幅度	0.0046544	0.0046544	0.0046544
三次谐波幅度	1.0192×10^{-5}	1.0192×10^{-5}	1.0192×10^{-5}
四次谐波幅度	1.2057×10^{-5}	1.2057×10^{-5}	1.2057×10^{-5}
五次谐波幅度	1.6212×10^{-5}	1.6212×10^{-5}	1.6212×10^{-5}
六次谐波幅度	2.3542×10^{-5}	2.3542×10^{-5}	2.3542×10^{-5}
七次谐波幅度	2.2361×10^{-6}	2.2361×10^{-6}	2.2361×10^{-6}
八次谐波幅度	7.0673×10^{-6}	7.0673×10^{-6}	7.0673×10^{-6}
九次谐波幅度	7.4532×10^{-6}	7.4532×10^{-6}	7.4532×10^{-6}
总谐波畸变	4.5454×10^{-6}	4.5454×10^{-6}	4.5454×10^{-6}

表 2 Goertzel 算法、标准算法、剪切 FFT 算法的运算效率对比

算法名称	准备时间 s	单道测试数据基波和谐波幅度运算			其他时间 s	合计时间 s
		实加次数	实乘次数	运算时间/s		
标准算法	0	67584	45056	0.001403	8.5	149.1
Goertzel 算法	0	36873	18450	0.000542	7.9	62.1
剪切算法	0.000012	12534	8456	0.000256	8.1	33.7

注:“其他时间”主要指数据缓冲区的开辟与释放、测试数据由数据缓冲区载入运算缓冲区等操作所需要的时间。本表中所列时间为 100000 道测试数据处理所用的时间

5 结束语

总谐波畸变是地震数据采集系统的一项重要性能指标,需要在野外或室内经常测试。随着地震勘探技术的发展,地震数据采集系统的配置道数和实时采集道数可多达万道甚至十万道。在不降低测试精度的前提下,对地震数据采集系统性能指标(包括总谐波畸变)的测试效率也提出了更高的要求。本文从总谐波畸变计算公式和 FFT 的运算结构出发,提出了测试地震数据采集系统总谐波畸变的剪切 FFT 算法,该法的核心思想是只计算对目标输出有贡献的蝶型运算节点,其关键在于采用正序输入、反序输出确定与期望输出有关系的蝶型运算节点,只进行与总谐波畸变公式中所需要的基波和谐波幅度值有关的计算,建立由输入数据到期望输出之间的计算路径,并根据确定的蝶型运算节点来计算测试数据的基波和各次谐波的幅度值,再利用式(1)或式(2)计算数据采集通道的总谐波畸变。理论分析和实际计算结果表明,剪切 FFT 算法的计算精度与标准算法完全相同,运算量显著减少,提高了测试效率,适用于大道数地震数据采集系统总谐波畸变指标的野外或室内测试。

参 考 文 献

[1] 罗福龙. 地震仪器概述及其指标分析(二). 物探装

- 备, 2004, 14(4): 278~283
- [2] 刘益成等. 地震数据采集系统谐波畸变测试方法研究. 石油物探, 2006, 45(4): 431~434
- [3] 张永学等. GYZ4000 型高精度遥测地震仪的研制. 石油机械, 2000, 28(增刊): 109~111
- [4] 韩晓泉等. 新一代地震仪器要解决的几个问题. 物探装备, 2006, 16(4): 243~248
- [5] 张在陆. 数据采集系统信号混叠的研究. 石油仪器, 1998, 12(1): 8~12
- [6] Robert B et al. Finite-precision goertzel filters used for signal tone detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2001, 48 (6): 691~700
- [7] Richard G L 著, 朱光明等译. 数字信号处理. 北京: 机械工业出版社, 2005, 358~360
- [8] 程乾生. 信号数字处理的数学原理(第二版). 北京: 石油工业出版社, 1993, 203~205
- [9] Oppenheim A V 等著, 黄建国等译. 离散时间信号处理. 北京: 科学出版社, 1998, 483~484
- [10] John D M. FFT Pruning. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1971, 19 (4): 305~311
- [11] Holm S. FFT pruning applied to time domain interpolation and peak localization. *IEEE Transactions on Acoustics Speech Signal Processing*, 1987, 35 (12): 1776~1778
- [12] He Shousheng et al. Computing partial DFT for comb spectrum evaluation. *IEEE Signal Processing Letters*, 1996, 3 (6): 173~175
- [13] Hu Zhong et al. A novel generic fast Fourier transform pruning technique and complexity analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(1): 274~282

(本文编辑:刘勇)

欢 迎 订 阅

2008年《石油地球物理勘探》期刊

全年定价: 294.00 元; 合订本价: 315.00 元

联系电话: 0312-3739320; 传真: 0312-3822804

联系人: 苏丽霞