

文章编号: 2096-1618(2021)01-0068-05

# 基于频域的声信号计权改进算法

刘 艺, 杜雨谔, 官 毓, 叶盈群

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:** 现有高精度数字声级计产品对测量精度和运算速度的要求越来越高, 以及对实时同步声压级参数计算的数量需求越来越多。在对声信号进行计算处理时, 模拟式声级计在时域下先频率计权, 再进行时间计权的传统算法, 不仅难以满足现代高精度数字声级计产品高精度和高速度的需要, 而且计算参数单一, 难以实现计权倍频程声压级等参数的同步实时计算。故提出一种基于 Parseval 定理和 FFT 谱分解, 先时间计权, 再频率计权的改进算法。将声信号做 FFT 谱分解后, 在频域下对频谱信号的功率值进行时间计权和频率计权, 最后通过能量求和等方法, 实现频率、时间计权总声压级的计算和计权声压级的倍频程分析, 以实现计算结果的多参数化。通过与传统算法结果的对比分析, 验证算法的有效性与简易性, 且满足声级计产品相关标准的基本要求。

**关键词:** 声级计; 时间计权; 频域; 1/3 倍频程; Parseval 定理

**中图分类号:** TB52

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.01.011

## 0 引言

近年来随着对环境保护逐渐重视, 噪声污染治理开始进入大众视野。声监测仪器声级计的使用越来越频繁, 对声级计的要求也越来越高。传统模拟式声级计已经很难满足高精度高速度、多功能多参数的声级计市场需要。随着电子技术、信号处理等技术的发展, 计权声压级计算和倍频程分析等功能可以一体化高速实现的多功能数字声级计正在逐步取代老式模拟声级计<sup>[1]</sup>。

人耳具有独特的声学特性, 对于不同频率的声音有不同的灵敏度, 而且对声音大小的感官具有主观差异。声级计作为一种衡量人耳所听到声音大小的电子仪器, 为了更好地符合人耳的声学特性, 需要模拟人耳对不同频率有不同灵敏度的频率特性<sup>[2]</sup>, 以及对声波反应速度的时间特性<sup>[3]</sup>。而噪声往往是多种频率的声音组合而成, 所以在声学分析中需要对噪声的各个频率成分进行分析<sup>[4]</sup>。

因此, 对声信号的频率加权、时间加权以及实现倍频程分析的算法, 是一款声级计产品的核心要素。会直接影响一款声级计产品的工作性能。传统模拟式声级计的计算算法已经很难满足高精度数字声级计的需求。一种高效且易于实现的频率时间加权和倍频程分析算法, 便成了数字声级计产品设计过程中的重中之重。

提供一种利用 Parseval (帕塞瓦尔定理) 定理<sup>[5]</sup>, 在频域下实现对声信号的时间频率计权, 并能够简单快速实现 1/3 倍频程分析的算法。

## 1 算法原理

声级计的频率计权是为了模拟人耳听觉对高低频率有不同灵敏度的频率特性而特定设置的一种计权网络。通常有 A、B、C 3 种计权方式, 其中 A 计权最为常用<sup>[6]</sup>。图 1 为 3 种计权方式的计权特性曲线, 对应了不同频率处的计权修正值。

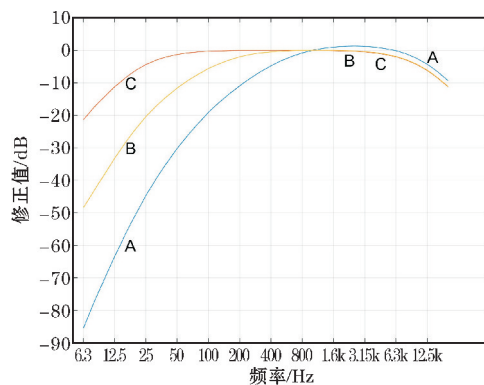


图 1 A、B、C 计权特性曲线

以 A 计权为例, 在图 1 中 A 计权网络对应的衰减値有其对应的计算公式, 公式为

$$A(f) = 20\lg[B] - A_{1000} \quad (1)$$

其中:

$$B = \frac{f_4^2 f_4^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_3^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_4^2)}$$

式中: $f$ 为某一频率; $A(f)$ 为 $f$ 频率对应修正值; $f_1 = 20.6 \text{ Hz}$ ;  $f_2 = 107.7 \text{ Hz}$ ;  $f_3 = 737.9 \text{ Hz}$ ;  $f_4 = 12194 \text{ Hz}$ ;  $A_{1000} = -2.000 \text{ dB}$ 。

根据电声学中的声级计标准(IEC 61672-1:2002, IDT),时间计权是对瞬时声压的平方值进行计权,是规定时间常数的时间指数函数。一款声级计产品的计权特性是由时间常数决定的<sup>[7]</sup>。

时间计权声级的计算是方均根声压与基准声压之比的以10为底的对数乘以20。通过标准时间计权和标准频率计权得到方均根声压。一段时间 $t$ 的频率 $A$ 计权和时间计权声级 $L_{Ar}(t)$ 可表示为

$$L_{Ar}(t) = 20 \lg \left\{ \frac{1}{p_0} \left[ \left( \frac{1}{\tau} \right) C \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

$$C = \int_{-\infty}^t P_A^2(\xi) e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} d\xi$$

式中, $\tau$ 为时间计权F、S、I其中之一所对应的指数时间常数 $s$ ; $\xi$ 为从过去的某时刻 $t_2$ 到观测的时刻 $t_2$ 的时间积分的变量; $P_A(\xi)$ 为 $A$ 计权瞬时声压; $p_0$ 为基准声压。

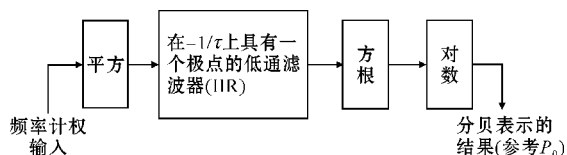


图2 形成指数时间计权声级的主要步骤

在实际应用中,不仅要测量噪声大小,而且因为人耳对于不同频率的声音感知效果存在较大差异,还需要知道噪声的频率成分,以便对不同频率做出针对性的处理,即要对噪声作频谱分析<sup>[8]</sup>。对于噪声信号,比较通用的方法是把频率划分成若干频带,测量频带对应的声压级。频程的划分采用恒定带宽比,即保持频带的上、下限之比为一常数。

上限截止频率 $f_u$ 为频带中的最高频率;下截止频率 $f_l$ 为最低截止频率;两者之差 $B=f_u-f_l$ 为带宽。若 $f_u/f_l=2n$ 为倍频程。 $n=1$ 时为倍频程; $n=1/3$ 时,称为1/3倍频程<sup>[9]</sup>。在实际应用中,倍频程和1/3倍频程最为常见。

## 2 声信号计权算法

在模拟声级计中,传统算法在有限的资源中,时域下的时间计权实现算法和倍频程分析无法兼顾,受到张登攀等噪声1/3倍频程计权声级算法<sup>[10]</sup>启发,提出

一种根据Parseval定理来快速实现倍频程与计权分析的改进算法。

### 2.1 传统时域算法

在传统算法中,对声信号的时间计权处理都是在时域下,通过IIR时间计权滤波器,以声信号的平方值实现时间加权<sup>[11]</sup>。而倍频程分析却需要在频域下,对声信号的频谱进行分析。为实现倍频程分析和频率时间计权的结合,其算法核心为FFT和IFFT。通过傅里叶变换和逆变换,求得对应频程的声压有效值,再通过设计符合频率时间计权特性的滤波器,从而实现对声信号的倍频程分析及计权声压级。

由文中所示的时间计权和倍频程计算方法,可以得到传统时域下的算法。先对声信号通过FFT进行谱分解,得到该声信号的频谱信号,再将频谱信号按照1/3倍频程划定的频带范围,划分为对应的频程信号,再对其IFFT逆变换得到频程对应的频带声压,再进行频率计权和时间计权,从而得到不同计权下的倍频程声压数据。算法流程如图3所示。

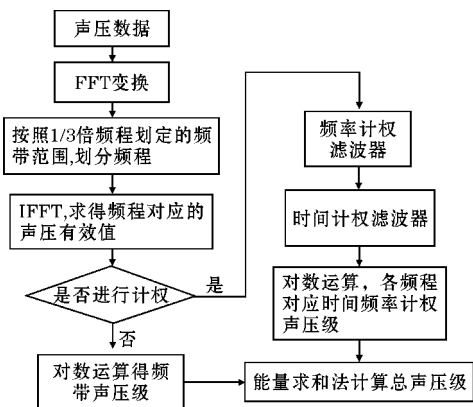


图3 传统声级计算流程图

当计算1/3倍频程时,对一段声信号 $y(x)$ 做FFT谱分解,得到 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 频谱信号,按照1/3倍频程划定的频带范围,得到32组频谱信号。假设对第 $j(j=1, 2, \dots, 32)$ 组频谱信号做IFFT逆变换,得到了第 $j$ 组信号对应的声压值 $P_j$ 。对其进行均方根计算,得第 $j$ 组对应声压有效值 $P_{ej}$ 。

$$P_{ej} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - p_{\text{mean}})^2}{n-1}} \quad (3)$$

此时该声信号 $y$ 的1/3倍频程频程声压级值为

$$L_{pj} = 10 \lg \frac{P_{ej}^2}{p_0^2} \quad (4)$$

按照各个频程对应的频带范围,求出每个频带对应的频带声压,最后转换成分贝值。根据不相干声波

叠加原理,总声压级和频带声压级的关系为

$$L_{pt} = 10 \lg \left( \sum_{j=1}^{32} 10^{0.1 L_{pj}} \right) = 10 \lg \left( \frac{\sum_{j=1}^{32} P_{ej}^2}{P_0^2} \right) \quad (5)$$

式中:  $L_{pj}$  为各频带声压级;  $L_{pt}$  为总声压级。

后续再按照传统的计权方法,实现对每个频带的频率时间计权,从而得到时间计权下的倍频程分析,最后通过能量求和的方法,计算得到总声压级。

## 2.2 改进频域算法

在实际运用中,IFFT 的硬件实现较复杂,后续众多滤波器实现也会占用较多资源。故根据时域频域下能量不变的 Parseval 定理,对其改进,以实现算法的更简易实现。

由式(2)可以看出,取对数运算的函数式的分子是在观察时间  $t$  上对频率计权声压取指数时间计权的方均根值。即

$$P_{ej}^2 = \left( \frac{1}{\tau} \right) \int_{-\infty}^t P_A^2(\xi) d\xi \quad (6)$$

根据 Parseval 定理,信号的能量既可以按每单位时间的能量在整个时间内积分,也可以按每单位频率的能量在整个频率范围内积分而得到。即信号从时域变换为频域后,总能量保持不变。离散信号 Parseval 定理表达如下:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |x(k)|^2 \quad (7)$$

其中,  $x(n)$  为时域序列,  $x(k)$  为频域序列。

结合式(6)与式(7)可以得到:

$$P_{ej}^2 = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{k=0}^{n-1} |x(k)|^2 \quad (8)$$

即可用频域下的能量和代替 IFFT 后的时域能量和,从而实现取消 IFFT 步骤,达到同样的计算效果,算得各频程对应的声压级。

假设一段声信号做 1/3 倍频程处理,每个频程对应的声压为  $p_{ei}$ ,该段声信号的总声压与各频程声压的关系为

$$p_e^2 = p_{e1}^2 + p_{e2}^2 + \cdots + p_{en}^2 = \sum_{i=1}^n p_{ei}^2 \quad (9)$$

由式(9)可知,声信号的能量是各频程的能量和。合成声场噪声总声压级可表示为

$$L_p = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n p_{ei}^2}{P_0^2} \quad (10)$$

由此可见,只要能够知道噪声的每一个频程对应

的声压  $p_{ei}$ ,就可按照式(9)、(10)求得声信号对应的总声压级。因此,只要可以从噪声声压信号  $p(t)$  中分解出  $p_{ei}$ ,就能实现声级计的各种计权分析和倍频程分析。

该算法流程如图4所示。

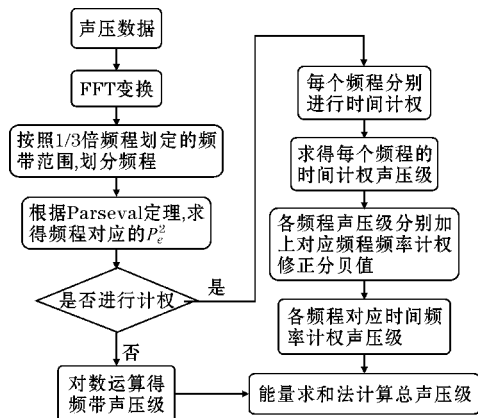


图4 倍频程计权声压级改进算法流程

## 3 仿真对比分析

为验证算法的准确性,采用数字仿真的方法对同一段声信号(安静房间中的背景噪声,时长3 s,采样率48 kHz,如图5)分别使用传统算法和改进算法进行计算。

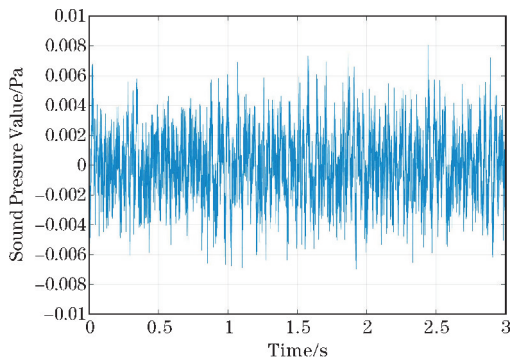


图5 声信号

以计算频率时间计权总声压级  $L_{AF}$  为例。在声信号信噪比分别处于 -10 ~ 20 dB 时,采用蒙特卡洛方法 (Monte Carlo method),分别用两种算法对声信号  $L_{AF}$  参数计算 100 次,分别得到传统算法和改进算法的均方差随 SNR(信噪比)的变化曲线图,如图6所示。以比较二者算法在对声信号处理过程中的准确度。

由图6可以看出,在低信噪比的情况下,对声信号的时间频率计权参数  $L_{AF}$  的计算,改进频域算法的计算结果在离散程度方面优于传统算法的结果。随着信噪比的提高,二者的离散度逐渐趋近,但改进算法时钟优

于传统算法。

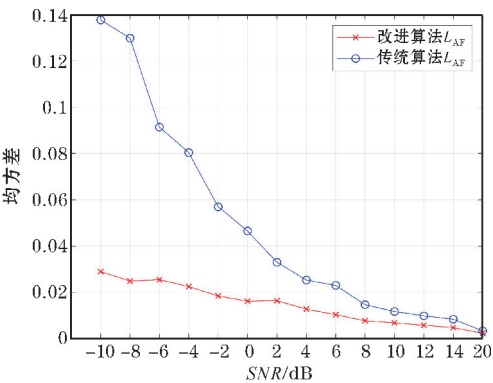


图 6 均方差随 SNR 变化曲线

分别通过改进算法和传统算法对该段声信号处理计算得对应的 1/3 倍频程声压级,再通过能量求和的方法,分别得到对应的不计权总声压级  $L_Z$ 、A 计权总声压级  $L_A$  和 F 计权总声压级  $L_F$ 。其中 1/3 倍频程声压级的计算对比以 F 计权声压级  $L_F$  为例,基于改进算法和传统算法的频率不计权数据,分别进行 F 时间计权,计算结果如图 7、8 所示。

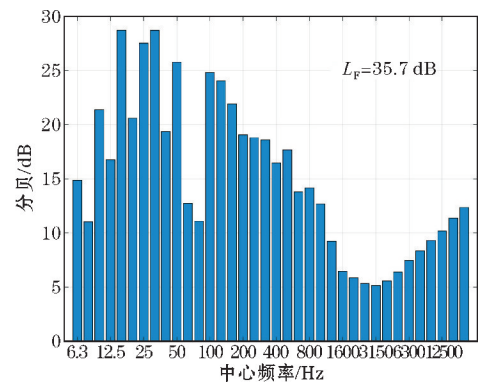


图 7 改进算法 F 时间计权 1/3 倍频程谱

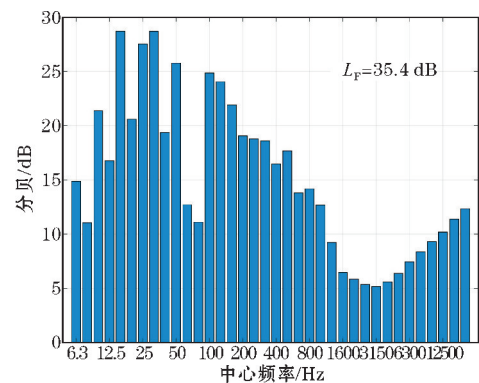


图 8 传统算法 F 时间计权 1/3 倍频程谱

以法国 01dB 公司的声级计产品“DUO”型声级计(符合 IEC 61672-1-2013 的一级声级计标准)及配套软件为标准,对该段声信号进行同样处理,得对应声压级数据作为准确值。三者所得结果如表 1 所示。

表 1 2 种算法的计权总声压级 单位: dB

计权类型	改进算法	传统算法	DUO 声级计
不计权( $L_Z$ )	37.7	37.4	37.9
A 计权( $L_A$ )	24.2	24.0	23.6
F 计权( $L_F$ )	35.7	35.4	36.2

通过表 1 可以看出,2 种算法分别在不计权、A 计权和 F 计权的情况下,与“DUO”声级计测得声压级偏差均在  $\pm 1$  dB 以内,符合二级声级计误差标准,验证了算法的正确性。

根据图 3 的算法流程结合 A、B、C 3 种频率计权和 F、S、I 3 种时间计权,对图 5 的声信号进行全参数的计算,其中包括倍频程分析,6 种计权声压级计算,总声压级等。除去基本运算,总共需要用到 1 次 FFT,1 次 IFFT、3 个频率计权滤波器复用,9 个时间计权滤波器复用。而同样的全参数运算,改进算法所用资源为 1 次 FFT、3 个时间计权滤波器。在 MATLAB 环境,2 种算法所需资源和运算时间具体如表 2 所示。

表 2 2 种算法耗用资源和运算时间比较

资源类型	改进算法	传统算法
FFT	1	1
IFFT	0	1
频率计权滤波器	0	3
时间计权滤波器	3	9
所用时间/s	6.227056	10.180969

由表 2 可以看出,改进算法在资源占用和计算时间上,较传统算法更适合现在高精度数字声级计,能满足其高速便捷的算法需求。

4 结束语

基于 Parseval 定理和谱分解的声信号计权 1/3 倍频程算法,一方面实现在单一 FFT 参数下对声信号计权分析的运算,避免逆变换的使用,解决了通过 IFFT 频域时域转化来实现算法导致的算法复杂和硬件实现难度大的问题,一方面给出一种能一体化实现频率时间计权和倍频程分析的算法。并且通过数字仿真实验平台与现有算法结果对比,验证了算法的准确性,在精度、资源耗和计算时间上,都优于传统算法。为新型高精度数字声级计的研发提供算法上的新思路。

参考文献:

[1] 周星,张晨,裴真,等. 全数字式声级计系统的设



- 计与实现[J]. 信号处理, 2005, 21(S1): 609-612.
- [2] 陈剑林, 白滢, 牛峰, 等. 声级计的频率计权特性[J]. 计量技术, 2008(6): 47-50.
- [3] 陈剑林, 帅正萍, 白滢, 等. 声级计的时间计权特性[J]. 计量技术, 2007(7): 44-46.
- [4] 王东生. 分贝的由来和 1/3 倍频程算法[J]. 橡塑资源利用, 2005(5): 45-46.
- [5] Oppenheim A V. 信号与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [6] 何岭松. 频率计权网络的公式化表达[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(5): 540-542.
- [7] 李靖. 数字声级计中 I 计权算法设计与本底噪声估计技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [8] 成峰, 周宝焜, 程利青, 等. 基于 MATLAB 的 13 倍频程 FIR 数字滤波器设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2003(2): 160-165.
- [9] 王孚懋, 王建春. 噪声测量中 1/3 倍频程与倍频程频谱的关系与计算[J]. 噪声与振动控制, 1996(3): 39-41.
- [10] 张登攀, 高志强. 噪声 1/3 倍频程计权声级算法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 709-712.
- [11] 吴胜举, 张明铎. 声学测量原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

## Improved Algorithm of Acoustic Signal Weighting based on Frequency Domain

LIU Yi, DU Yuming, GUAN Yu, YE Yingqun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Existing high-precision digital sound level meter products have higher and higher requirements for measurement accuracy and calculation speed, as well as the number of real-time simultaneous sound pressure level parameter calculations. When calculating and processing sound signals, the traditional algorithm of analog sound level meters in the time domain for frequency weighting and time weighting is not only difficult to meet the high precision and high speed of modern high-precision digital sound level meters. Need, and the calculation parameters are single, it is difficult to realize the simultaneous real-time calculation of the weighted octave sound pressure level and other parameters. Therefore, an improved algorithm based on Parseval's theorem and FFT spectrum decomposition is proposed, which is time-weighted first, and then frequency-weighted. After the acoustic signal is decomposed by the FFT spectrum, the power value of the spectrum signal is time-weighted and frequency-weighted in the frequency domain. Finally, the calculation and calculation of the frequency and time-weighted total sound pressure level are realized through methods such as energy summation. The octave band analysis of the weighted sound pressure level to realize the multi-parameterization of the calculation results. The comparison and analysis with the results of traditional algorithms verify the effectiveness and simplicity of the algorithm and meet the basic requirements of the relevant standards of sound level meters.

**Keywords:** sound level meter; time weighting; frequency domain; 1/3 octave band; Parseval theorem