

# 线性调频 Z 变换在舱音背景声的特征频率分析中的应用\*

程道来<sup>1,2</sup> 仪垂杰<sup>2</sup> 姚红宇<sup>3</sup> 郭海荣<sup>2</sup>

(1 上海应用技术学院建安学院 上海 200233)

(2 青岛理工大学青岛市能源与环境装备工程技术研究中心 青岛 266033)

(3 中国民航总局航空安全技术中心 北京 100028)

**摘要** 舱音背景声特征频率的确定是调查失事飞机事故原因的重要依据之一。基于舱音译码辨听和音频分析的传统方法难以准确获得舱音背景声的特征频率。本文提出采用基于 FFT 的线性 Z 变换 (CZT) 来获取舱音背景声的特征频率的新方法,该方法适用于高采样频率的信号,计算中可以调整频率的分辨率,增加了 FFT 和频谱分析的灵活性。通过仿真和对用舱音记录器测录的真实舱音背景声计算分析得出:CZT 方法是一种适合于确定舱音背景声特征频率的实用、有效方法,用以区分不同舱音在频率上的差别,满足飞机事故原因调查的需要。

**关键词** 舱音,背景声,FFT,线性调频 Z 变换,特征频率

## Application of CZT algorithm to characteristic frequency analysis in the background sound recorded by CVR

CHENG Dao-Lai<sup>1,2</sup> YI Chui-Jie<sup>2</sup> YAO Hong-Yu<sup>3</sup> GUO Hai-Rong<sup>2</sup>

(1 School of Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200233)

(2 Qingdao R&D Center of Energy and Environment, Qingdao Technological University, Qingdao 266033)

(3 Center of Aviation Safety Technology, General Civil Aviation Administration of China, Beijing 100028)

**Abstract** Characteristic frequency of the background sound recorded by a Cockpit Voice Recorder (CVR) is a key evidence in investigating accident causes for a wrecked airplane. It is difficult to obtain exact characteristic frequency with the aid of traditional methods of differentiating & hearing by cockpit voice decoding system (CVDS) and of the frequency analysis by the audio software. A new method of obtaining characteristic frequency is imposed in this paper based on the Chirp Z Transform (CZT), because the method is suitable for high sampling frequency and possessed with high flexibility of adjusting the frequency resolution & spectrum analysis. On simulation and calculation for a real background sound

2006-10-18 收稿; 2008-03-03 定稿

\* 国家自然科学基金(60772149)和中国民航总局科技项目资助(CAAC60198)

作者简介:程道来(1965-),男,湖南常德人,博士,高级工程师。主要研究方向:信号处理和频谱分析研究。

仪垂杰(1958-),男,教授,博士生导师。姚红宇(1958-),男,研究员。郭海荣(1984-),女,硕士。

† 通信联系人 E-mail: daolaicheng@163.com

recorded by CVR from an airplane, it can be concluded that it is a feasible method to determine the characteristic frequency.

**Key words** Cockpit voice, Background sound, FFT, Chirp Z Transform, Characteristic frequency

## 1 引言

飞机黑匣子中舱音记录器(Cockpit Voice Recorder-CVR)记录了多种不同的舱音背景声,如警告/警示声、开关手柄声以及机械运动声。频率是表征这些不同 CVR 背景声的重要特征之一,不同的背景声其特征频率不同,且变化范围很大(150Hz ~ 6800Hz)<sup>[1]</sup>;飞机失事后通过准确比较不同背景声的谱特征,可以从一个方面分析飞机事故的原因,所以舱音背景声的谱特征的精确获取关系到飞机的安全飞行<sup>[2]</sup>。传统的 CVR 背景声的识别分析是通过舱音译码的人工辨听以及音频软件来实现<sup>[3]</sup>,但由于(1)舱音中的噪声和话语声使得舱音更加复杂<sup>[4-5]</sup>; (2)飞机驾驶员的心理、情感因素,辨听者的听觉感知性和掩蔽效应等多因素会干扰或影响舱音辨听效果;(3)舱音背景声是快变、非平稳声信号,而其音频原理所依据的核心理论傅里叶 Fourier 变换和短时傅里叶 Fourier 变换所固有的局限性不可能充分揭示出复杂舱音内在特征,这三方面主要原因使得利用传统方法很难获得精确的特征频率。随着数字信号处理技术的发展,将时域信号进行 FFT 变换到频域分析,已是必不可少的研究方法,但是 FFT 对信号的采样周期有严格的要求,如果采样频率不是信号频率的整数倍,那么 FFT 变换得到的频域特性会有很大的误差。线性调频 Z 变换(CZT)适用于高采样频率的信号,计算中可以调整频率的分辨率,增加了 FFT 和频谱分析的灵活性<sup>[6-7]</sup>。根据线性调频 Z 变换具有频率细化等特点,本文将线性调频 Z 变换<sup>[8]</sup>引入到对舱音背景声谱特征

分析中,以确定舱音背景声特征频率来判别不同舱音在频率上的差别,取得了理想效果。

## 2 问题的提出

图 1 是通过舱音译码系统的人工多次辨听、并通过 Adobe Audition 音频软件得到的某舱音背景声—超速音频警告声的音频图形,从图中只能得到该警告声的估计频率(红颜色表示) $f_1$  在 3000Hz 左右。实际上我们只对初步估计的舱音背景声中的一小段频段  $f_1$  感兴趣,希望在该窄带频段内频率的抽样能够非常密集、提高分辨率、带外则不予考虑。运用适当理论和算法,通过增加采样点数,一次完成在估计频率  $f_1$  附近寻找最大频率  $f_{\max}$  谱值,即准确获取该警告声的特征频率。

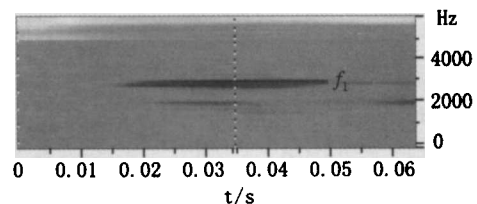


图 1 舱音背景声—超速音频警告声的估计频率  $f_1$

普通的 FFT 变换是将时间序列的  $N$  个点均匀分布在  $Z$  平面的单位圆周上,所得到的频率分辨率为  $2/N$ ,相当低;若增加 FFT 的计算点数,会使计算工作量大大增加。FFT 不适合高采样频率的测算,而且其计算结果的点数与时间序列的点数  $N$  相等,增加了约束条件。通过 CVR 现场测录下的舱音背景声采样频率  $f_s$  一般为 16000Hz, 32000Hz 等,采样频率都很高,针对 FFT 可能出现的问题,须用较高的

频率分辨率来分析舱音背景声信号,以尽量减少频域混叠现象和泄漏效应、栅栏效应的影响。

线性调频 Z 变换是沿不同的单位圆,或更一般的路径对 Z 变换取样,是一种适用于高采样频率的信号分析的方法,同时具有频率细化等特点,增加 FFT 和频谱分析的灵活性,提供了一种解决舱音背景声特征频率问题的有效途径。本文以下从线性调频 Z 变换理论、算法和仿真,以及用舱音记录器测录的真实舱音背景声计算,系统给出了准确获取舱音背景声特征频率的过程。

### 3 线性调频 Z 变换基本原理及算法

#### 3.1 线性调频 Z 变换基本原理

##### (1) Z 变换定义

Z 变换 (Z-Transform) 在数学和信号处理上是把一个离散的数字信号从时间模式转为频率模式。设  $x(n)$  为已知的时间序列 ( $0 \leq n \leq N-1$ ), 它的 z 变换为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (1)$$

其中,  $N$  为时间序列的点数,  $z = Ae^{j\omega}$ ,  $A$  为实数。

##### (2) 线性调频 Z 变换定义

线性调频 Z 变换是沿不同的单位圆,或更一般的路径对 Z 变换取样。在 Z 平面单位圆内的一段螺旋线作等分角,取样点为  $Z_k$

$$z_k = AW^{-k}, k=0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$M$  为取样点数,不一定与  $x(n)$  的序列长度  $N$  相等。 $A, W$  表示为

$$\begin{cases} A = A_0 e^{j\theta_0} \\ W = A_0 e^{-j\varphi_0} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $A$  为取样轨迹起点位置,  $A_0$  表示起始取样点的半径长度,当  $A_0 > 1$  时,螺旋线在单位圆内,反之,在单位圆外;  $\theta_0$  表示起始取样点  $z_0$  的相角。  $W_0$  表示为螺旋线的伸展,  $\varphi_0$  表

示两相邻点之间的等分角,当  $W_0 > 1$  时,  $A_0 W_0^{-1} < A_0$ , 随着  $k$  的增大,螺旋线趋向圆内;对等分角  $\varphi_0$ , 由于  $\varphi_0$  是任意的,可以通过减小  $\varphi_0$  提高频率分辨率。图 2。

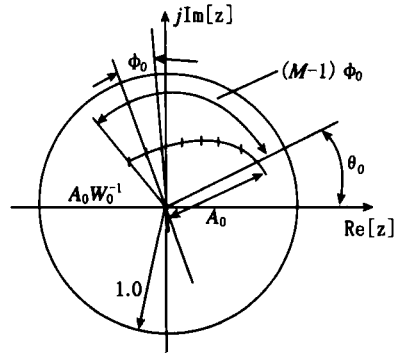


图 2 线性调频 Z 变换示意图

将式(2)代入式(1),可以得到 Z 平面上点  $z_0, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}$  的 Z 变换为

$$\begin{aligned} X(z_k) &= CZT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z_k^{-n} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)就是线性调频 Z 变换 - CZT 的定义。

##### (3) 线性调频 Z 变换流程

通过布鲁斯坦等式  $nk = [n^2 + k^2 - (k-n)^2]/2$ , 式(4)可写成

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{\frac{k^2}{2}}W^{\frac{n^2}{2}}W^{-\frac{(k-n)^2}{2}}$$

即

$$X(z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}}] W^{-\frac{(k-n)^2}{2}} \quad (5)$$

$$\text{设 } g(n) = x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}} \quad (6)$$

$$h(n) = W^{-\frac{n^2}{2}} \quad (7)$$

$$\text{则 } X(z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} g(n)h(k-n)$$

即

$$X(z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} [g(k) * h(k)] = W^{\frac{k^2}{2}} y(k) \quad (8)$$

$$y(k) = g(k) * h(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) W^{-\frac{(k-n)^2}{2}} \quad (9)$$

式中:  $k=0, 1, \dots, M-1$

式(9)的计算可由图3所示流程实现。由于系统的单位脉冲响应  $h(n) = W^{-n^2/2}$  与频率随时间成线性增加的线性调频信号(chirp)相似,因此这种算法称为 Chirp Z 变换。

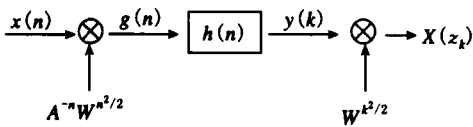


图3 线性调频 Z 变换实现流程

### 3.2 计算步骤

计算  $X(z_k)$  的关键是实现式(9)中的  $g(n)$  和  $h(n)$  的线性卷积,这可通过循环卷积达到。利用 FFT 算法,其处理区间长度选择为  $L \geq N + M - 1$ ,得到  $g(n)$  的新序列为

$$g(n) = \begin{cases} x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}} & n=0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & n=N, N+1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (10)$$

$h(n)$  也可转换成一个  $L$  点的序列为

$$h(n) = \begin{cases} W^{n^2/2} & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0 & M \leq n \leq L-N \\ W^{-(L-n)^2/2} & L-N+1 \leq n \leq L \end{cases} \quad (11)$$

对  $g(n)$  和  $h(n)$  分别进行  $L$  点 FFT,然后将结果相乘,得到  $Y(k) = G(k) \square H(k)$  再对  $Y(k)$  作 FFT 反变换,得到  $y(k)$ ;最后进行相应的计算就得到了  $X(z_k)$  在  $Xz_k$  点的采样值。

和 FFT 相比,CZT 算法非常灵活,它的输入和输出序列点数  $N, M$  可以不相等,且可为任意数,包括素数; $z_k$  点的角间隔  $\varphi_0$  是任意的,因此频率分辨率也可任意调整;计算  $z$  变换的周线可以不是圆而是螺旋线(对语音分析有效);起始点  $z_0$  可任意选定,也就是说可从任意频率或复频率开始对输入数据进行分析,便于做窄带高分辨率分析;若  $A = 1, M = N$ ,则可用 CZT 计算 DFT。因此,在频谱的特征分析上 CZT 有明显的优越性。

### 3.3 仿真计算例

假设  $x(n)$  是由三个不同频率的正弦信号的叠加所组成,其频率分别为 8Hz, 8.22Hz 和 9Hz,采样频率为 40Hz,时域取 128 个点。图 4(a)是基于线性调频 Z 变换(CZT)计算的 DFT(离散傅里叶变换);图 4(b)是直接 FFT 求出的 DFT,所以图 4(a)和图 4(b)是一样的,但图中频率分别为 8Hz 和 8.22Hz 的两个正弦频谱不易分辨;图 4(c)是在  $7 \sim 7 + M \times 0.05\text{Hz}$  用 CZT 仿真计算出来的谱图,由于起始频率为 7Hz,频率分辨率为 0.05Hz。仿真计算表明:图 4(c)中三个正弦谱线都可分辨出来。

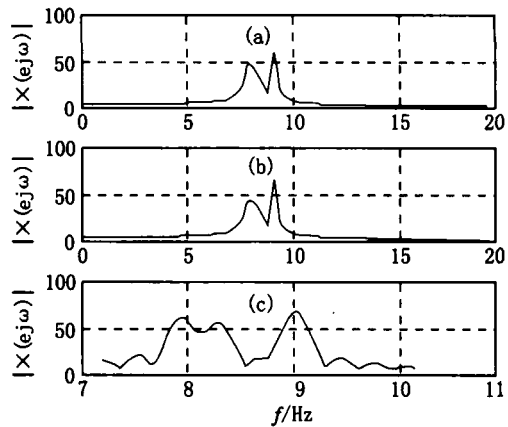


图4 线性调频 Z 变换算法仿真计算频谱图

## 4 线性调频 Z 变换算法在舱音背景声频谱特征分析中的应用

### 4.1 现场测录的舱音背景声

前面图 1 是通过舱音译码系统的人工多次辨听,利用 adobe Audition 音频软件下得到的某舱音背景声—警告声的音频图形。该警告声是利用采样频率为 16000Hz 的 CVR 在模拟飞机上测录下的。显然从图 1 中只能得到警告声的估计频率(红颜色表示)  $f_1$  在 3000Hz 左右,而实际上飞行人员或飞机事故分析专家只对警告声的特征频率(在  $f_1$  附近的最大频率  $f_{max}$ )感兴趣,这样才能正确区别和其它警告声的区别,为正确判断飞机事故原因提供可靠的依据。在此可用 CZT 算法对感兴趣频段进

行计算分析,如下图 5 所示。

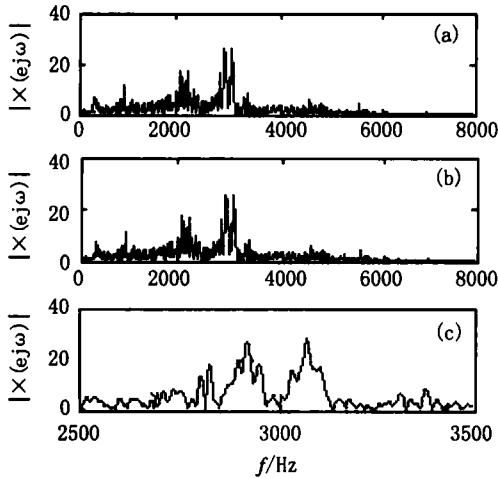


图 5 某警告声的线性调频 Z 变换算法频谱图

#### 4.2 舱音背景声特征频率的获取

图 5(a)是用 CZT 计算的 DFT(离散傅里叶变换),图 5(b)是直接 FFT 求出的 DFT,图 5(a)和图 5(b)是一样的,但由于用 CZT 和直接用 FFT 求出的 DFT 的频率分辨率是 10Hz,频率范围都是 0~8000Hz,两图中频率不易分辨,更不能从 10Hz 大间隔的谱线得到该警告声的在  $f_1$  附近的特征频率。本文只对警告声(测录的一种舱音背景声)的  $f_1$  附近存在的特征频率(最大频率  $f_{\max}$ )感兴趣,所以对 5(a)或图 5(b)中 2500Hz~3500Hz 频段用 CZT 算法进行了细化计算,其中起始频率为 2500Hz,频率分辨率为 1.0Hz。图 5(c)是用 CZT 计算的频谱,从图 5(c)可分辨出警告声特征频率  $f_{\max} = 3063\text{Hz}$ 。

本文通过 CZT 计算的警告声的结果和利用小波理论计算该警告声的特征频率( $f_{\max} = 3057\text{Hz}$ )基本吻合<sup>[9]</sup>,在允许的范围内;这说明基于线性调频 Z 变换的舱音背景声的特征谱获取方法是一种可行的方法。

## 5 结论

文中提出采用基于 FFT 的线性调频 Z 变换来计算并获取舱音背景声的特征频率新方法,实现了对舱音背景声高采样频率的声信号计算,而且可根据不同背景声实际需要任意调整频率的细化程度,从而既降低了程序计算的工作量,并进一步提高了频率的分辨率,增加了 FFT 变换和频谱分析的灵活性。

通过仿真和用小波理论的多尺度计算结果对比,用线性调频 Z 变换算法获取的真实舱音背景声特征频率在理论上是可行的、计算结果也是可靠的。

## 参 考 文 献

- [1] 杨琳,舒平. 航空记录器的发展回顾和未来趋势. 飞行技术与航空安全研究,成都:四川科学技术出版社,2006,100-107.
- [2] 王昌顺. 国际国内民航安全形势及中国民航对策. 飞行技术与航空安全研究,成都:四川科学技术出版社,2006,1-5.
- [3] 舒平,钟民主,杨琳. 舱音记录器译码系统的改进. 北京:航空工业出版社,2004.97-100.
- [4] 程道来,仪垂杰,梁祖峰. 飞机噪声及控制对策的研究. 噪声与振动控制,2005,25(5):47-51.
- [5] 程道来,仪垂杰,杨琳,等. 基于 WFT 的驾驶舱语音记录器声信息分析和识别. 上海交通大学学报,2006,vol(8):7-10.
- [6] 王建军,孙万蓉,张旭. 通过频谱分析测量血氧饱和度. 生物医学工程研究,2005,23(3):167-169.
- [7] 刘凤新,张砚川,王磊. 科. 矢流量计 DSP 算法及其仿真研究. 传感技术学报,2004,17(3):42-45.
- [8] 胡广书. 数字信号处理—理论与算法(第二版). 北京:清华大学出版社,2003,60-88.
- [9] 程道来,郭健翔,仪垂杰,等. 飞机超速音频警告信号的精确分析. 振动与冲击专辑,2006年,25(sup):939-941.