

## 基于拉格朗日插值的电子耳蜗分数延迟和参数失配分析

张春晓, 陈又圣, 黄鸿展

深圳信息职业技术学院, 广东 深圳 518000

**【摘要】**波束形成方法是电子耳蜗前端语音增强的重要方法之一,该方法的主要参数是增益系数和延迟参数。电子耳蜗的尺寸小,传统的波束形成方法在具体应用中会出现分数延迟的问题。本文采用拉格朗日多项式的插值方法实现电子耳蜗的分数延迟参数,通过相邻点的数值进行加权形成分数延迟的信号序列。仿真分析表明,拉格朗日多项式插值的分数延迟方法可实现低频段的幅频响应和相频响应的高度吻合,契合电子耳蜗频带特征,可实现电子耳蜗所在频段分数延迟的低误差和低计算复杂度。

**【关键词】**拉格朗日插值;电子耳蜗;分数延迟;参数失配

**【中图分类号】**TH776; R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)04-0468-04

## Fractional delay based on Lagrange interpolation and analysis of parameter mismatch in cochlear implant

ZHANG Chunxiao, CHEN Yousheng, HUANG Hongzhan

Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518000, China

**Abstract:** Beamforming is one of the most important methods for speech enhancement at cochlear implant front end, and the main parameters of this method include gain coefficient and delay parameter. Due to the small size of cochlear implant, there will be the problem of fractional delay in the traditional beamforming method. Herein Lagrange polynomial interpolation is used for realizing the fractional delay parameters of cochlear implant, and the fractional delay signal sequence is formed by weighting the values of adjacent points. The simulation results show that the fractional delay method based on Lagrange polynomial interpolation can not only achieve the high coincidence of amplitude frequency response and phase frequency response in low-frequency band, which is consistent with the characteristics of cochlear implant frequency band, but also realize the low error and low computational complexity of fractional delay in cochlear implant frequency band.

**Keywords:** Lagrange interpolation; cochlear implant; fractional delay; parameter mismatch

### 前言

目前电子耳蜗在干扰噪声环境下的识别率仍然不高,提高前端信号采集的信噪比是提高言语识别率的重要途径之一。在电子耳蜗实际使用中,目标信号与干扰噪声往往方位不一致,例如面对面交流和打电话交流过程中的干扰噪声主要来自其他方

位,来自正向方位的语音信号是常见使用场景中的目标信号<sup>[1]</sup>。麦克风阵列波束形成的方法由于增加了空间方位的信息,在近年来被应用于电子耳蜗前端语音增强中<sup>[2-5]</sup>。在基于麦克风阵列的语音增强方法中,延迟波束形成技术由于实现简单和计算量少等特点被目前电子耳蜗领域的前端信号采集和语音增强算法研究所采用<sup>[6-9]</sup>。

延迟波束形成方法中的延迟系数是决定波束指向类型的重要参数<sup>[10-11]</sup>,但在电子耳蜗小尺寸间距及语音采样率条件下,延迟具体数值往往不是整数,由此产生了分数延迟参数的实现及信号插值的问题<sup>[12]</sup>。就本质而言,分数延迟是在已有的信号采集点之间插值形成新的信号序列作为估计的延迟信号,并进一步用于语音增强算法中。

插值可以大体分为有限长单位冲激响应滤波器(Finite Impulse Response, FIR)和无限脉冲响应数字

**【收稿日期】**2020-11-20

**【基金项目】**广东省普通高校特色创新类项目(2019GKTSX094);广东省科技创新战略专项资金“攀登计划”(pdjh2021b0908)

**【作者简介】**张春晓,博士,讲师,研究方向:信号处理、计算机视觉, E-mail: zhangcx@szit.edu.cn

**【通信作者】**陈又圣,博士,讲师,研究方向:语音增强、麦克风阵列波束形成、电子耳蜗言语处理、医疗仪器设计, E-mail: chen-youshengtsinghua@aliyun.com

滤波器(Infinite Impulse Response, IIR)方法两大类,其中,拉格朗日插值方法由于其算法简单,易于率先实现等特点在很多领域应用较广<sup>[13-16]</sup>。由于尺寸限制及功耗要求,电子耳蜗对信号处理的实时性有较高要求,本文使用拉格朗日插值方法来实现电子耳蜗波束形成中的分数延迟,并探讨该插值方法的参数特征和失配特性。

## 1 电子耳蜗波束形成及分数延迟

### 1.1 延迟参数及波束指向

对电子耳蜗实际应用来说,双麦克风的模式由于算法简单,计算复杂度低而被应用于前端信号采集及语音增强中。延迟参数是决定波束指向的重要参数,而延迟参数一般以  $d/c$  的倍数形式来表示,其中,  $d$  表示双麦克风的间距,  $c$  表示声速。双麦克风等权重情形下,不同延迟参数条件下不同方位的信号幅频响应如图1所示。

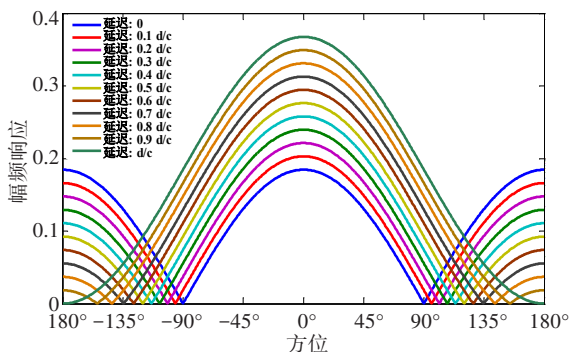


图1 不同延迟条件下系统各个方位的幅频响应

Fig.1 System amplitude response for different delay conditions at different orientations

图1表示不同延迟参数条件下系统各个方位的系统幅频响应曲线,其中,  $0^\circ$  方位表示正向,  $-90^\circ$  和  $90^\circ$  方位表示侧向,  $-180^\circ$  和  $180^\circ$  方位表示后向 ( $-180^\circ$  和  $180^\circ$  位置重合)。从图1可以看到,不同的延迟参数会产生不同的系统幅频响应曲线,由此产生了不同的波束指向。例如,延迟参数为0时,正向和后向方位的幅频响应相同,而侧向幅频响应为0,对应双极型波束指向;延迟参数为  $d/c$  时,正向的幅频响应最大,而后向的幅频响应为0,对应心型波束指向。因此,延迟参数决定着极性图的类型,在波束指向设计中,延迟参数对精度有很高的要求。

### 1.2 分数延迟

在电子耳蜗实际应用中,由于体积的限制,电子耳蜗本身所使用的双麦克风间距较小。例如,延迟一个  $d/c$  在采样率为22.05和44.10 kHz条件下分别对应延迟0.649和1.297个采样点,由此产生了分数延

迟的问题。延迟0.649和1.297个采样点实质上是在原来采集信号的基础上实现插值,对于第  $i$  个采样点  $x(i)$ ,延迟0.649是在采样点  $x(i)$  和采样点  $x(i+1)$  之间插值,而延迟1.297是在采样点  $x(i+1)$  和采样点  $x(i+2)$  之间插值。

## 2 拉格朗日插值

### 2.1 拉格朗日插值表达式

拉格朗日插值是一种多项式的插值方法,其特点是实现简单。对于原始采集的信号序列  $x(1), x(2), x(3), \dots, x(n)$ ,拉格朗日插值多项式  $L(x)$  如式(1)所示:

$$L(x) = \sum_{j=1}^n G_j(x) x(j), j = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

其中,  $G_j(x)$  为加权系数函数,其表达式如式(2)所示:

$$G_j(x) = \prod_{m=0, m \neq j}^n \left( \frac{x - x(m)}{x_j - x(m)} \right), j = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

对于分数延迟  $D$  个采样点,则采样序列由  $x(1), x(2), \dots, x(n)$  变成延迟信号序列  $L(1+D), L(2+D), L(3+D), \dots, L(n+D)$ 。对于前面所探讨的电子耳蜗实际尺寸参数来说,延迟一个  $d/c$  在22.05 kHz的采样率条件下形成新的序列:  $L(1.649), L(2.649), L(3.649), \dots, L(n+0.649)$ ;同样地,在44.1 kHz采样率条件下形成新的序列:  $L(2.297), L(3.297), L(4.297), \dots, L(n+1.297)$ 。

### 2.2 分数延迟及分数采样点数值计算

对于不同的阶数,拉格朗日插值可形成特定的插值模式。一阶的拉格朗日插值形成最简单的线性插值方法,如果用原始采集的信号序列  $x(1), x(2), x(3), \dots, x(n)$  来表示延迟序列,则对于延迟0.649和1.297个采样点所形成的信号序列如式(3)和(4)所示:

$$L(j + 0.649) = 0.351x(j) + 0.649x(j + 1), \quad (3)$$

其中,  $j = 0, 1, \dots, n$

$$L(j + 1.297) = 0.703x(j + 1) + 0.297x(j + 2), \quad (4)$$

其中,  $j = 0, 1, \dots, n$

从式(3)和(4)可以看到,一阶的拉格朗日插值是对相邻两点的插值,并通过给予相邻两点的加权形成新的信号延迟的插值点。同样地,  $N$  阶的拉格朗日插值是通过相邻的  $N$  个点的加权形成的。

## 3 拉格朗日插值的特征及失配分析

### 3.1 插值滤波器的幅频响应失配

从式(3)和(4)可以看到,一阶的拉格朗日插值是对相邻两点的插值,并通过给予相邻两点的加权形成新的信号延迟的插值点。同样地,  $N$  阶的拉格朗日插值是通过相邻的  $N$  个点加权和形成的。而从系统输入输出角度看,通过拉格朗日插值方法实现的插值可以看成是一个延迟滤波器。

如果延迟  $D$  个采样点,则理想的分数延迟滤波器的系统函数  $H_{ideal}$  表达式如(5)所示:

$$H_{ideal} = e^{-j\omega D} \quad (5)$$

由式(5)可以看到,理想的分数延迟滤波器是具有线性相位的全通系统,即系统幅频响应恒为1 ( $|e^{-j\omega D}|=1$ ),相位具有线性变化的特征。由于线性相位的全通系统是非因果系统,不能实时实现,因此不适合直接应用在电子耳蜗实时信号处理的过程中。对于实时处理的拉格朗日插值方式,其对应的滤波器系统响应存在失配,在采样率 22.05 和 44.1 kHz 条件下延迟一个  $d/c$  的拉格朗日插值滤波器在不同阶数情形下的系统幅频响应分布如图2所示。

图2表示阶数为1~10时拉格朗日插值滤波器系统幅频响应分布情况。对比不同阶数和归一化频率条件下的幅频响应变化,可以看到,当频率较小时,

系统的幅频响应变化不大。归一化频率范围在  $0 \sim 0.1 f_s$  (采样率 22.05 kHz 时对应的频带范围是  $0 \sim 2\,205$  Hz, 采样率 44.1 kHz 时对应的频带范围是  $0 \sim 4\,410$  Hz) 时的幅频响应几乎为1,与理论的分数延迟滤波器的幅频响应一致性较好。而当频率增大时,幅频响应的变化增大,有正的偏差和负的偏差,并且阶数越大,高频位置的幅频响应偏差越大。因此,拉格朗日插值滤波器在低频位置的误差较小,高频位置误差较大,高阶会增大高频误差。

### 3.2 插值滤波器的相频响应失配

在采样率是 22.05 kHz 和 44.1 kHz 条件下延迟一个  $d/c$  的拉格朗日插值滤波器在不同阶数情形下的系统相频响应曲线如图3所示。

图3对比了不同阶数的拉格朗日插值滤波器系统相频响应曲线,其中图3a和图3c分别是直接通过反正切计算拉格朗日插值滤波器在采样率是 22.05 kHz 和 44.1 kHz 条件下延迟一个  $d/c$  的相位曲线结果。

从图3a和图3c可以看到,部分阶数条件下高频位置会出现曲线的跳变,这是由于计算时反正切的相位范围是  $-\pi \sim \pi$ , 因此超过该范围会出现跳变。进一步通过解卷绕得到对应的实际相位曲线图3b和图3d。在图3中,理想分数延迟滤波器的相位是线性变化的(黑色虚线),而拉格朗日插值滤波器的相位则是非线性的曲线。当归一化频率较小时 ( $0 \sim 0.2 f_s$  频段),相位线性度好,与理想分数延迟滤波器的相位非常接近,当归一化频率大于  $0.2 f_s$  时,相位失配增大。从高频的相位曲线分布看,拉格朗日插值滤波器相位与理想分数延迟滤波器的相位的失配包括正的偏差和负的偏差,阶数增大时失配更大。

## 4 结 论

本文采用拉格朗日插值的方式实现电子耳蜗延迟参数的实现,分析了拉格朗日插值的特征和分数延迟的参数,并从多参数情形下研究了拉格朗日插值对分数延迟失配的影响。拉格朗日插值多项式从表达式看是多项式的插值方法,其功能是通过相邻的若干个

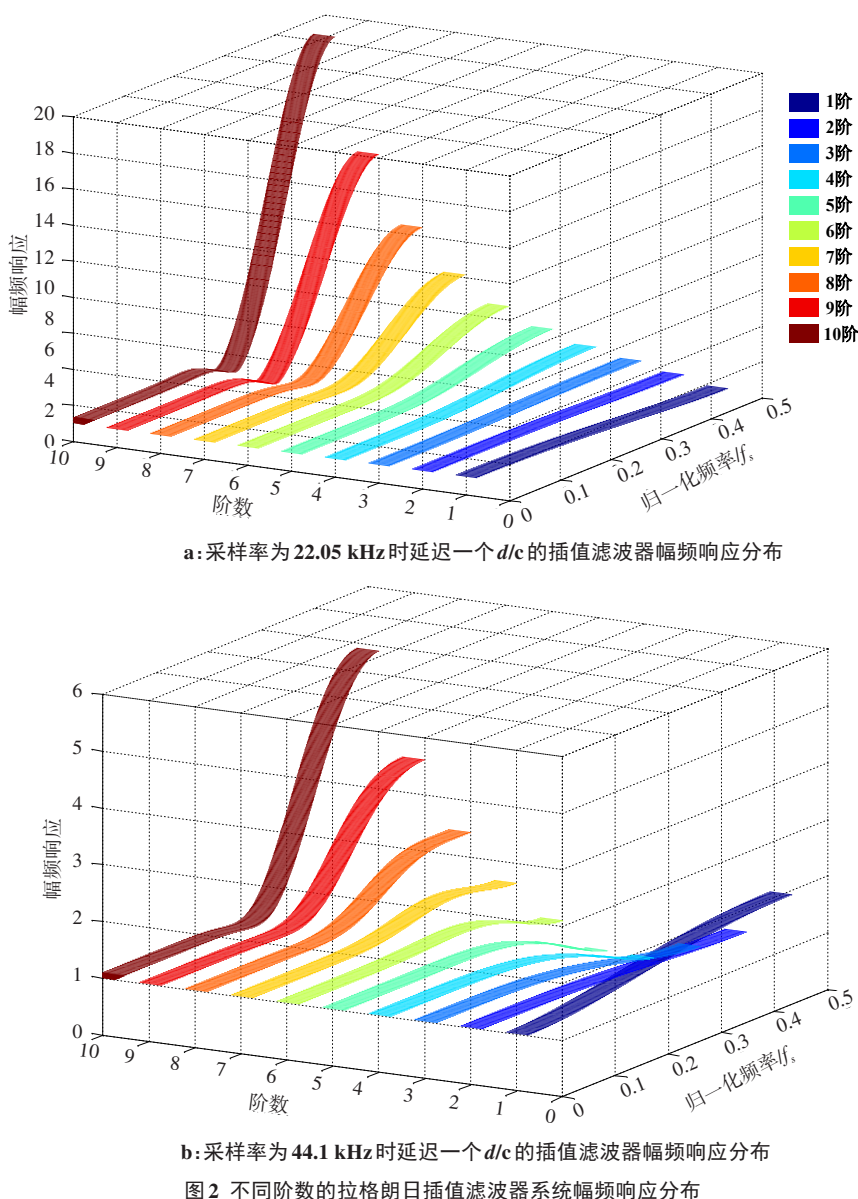


Fig.2 System amplitude response distribution of Lagrange interpolation filter for different filter orders



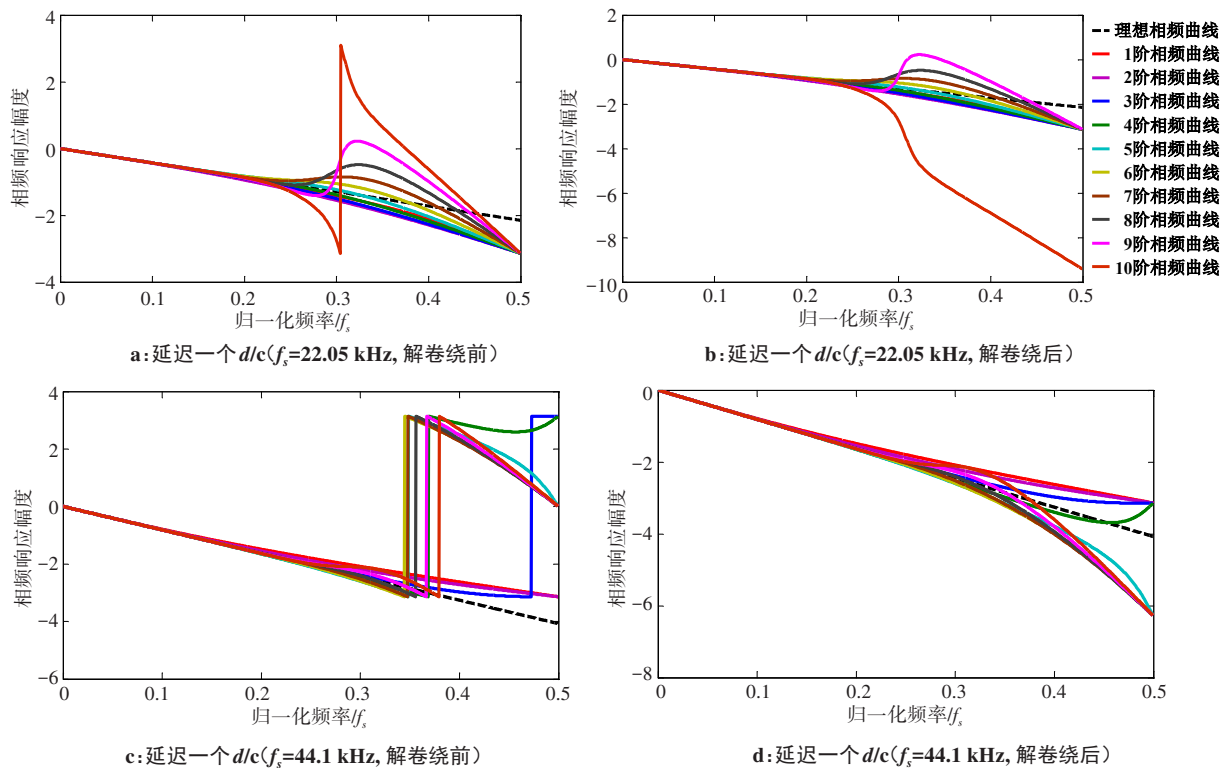


图3 不同阶数的拉格朗日插值滤波器系统相频响应曲线

Fig.3 System phase response curves of Lagrange interpolation filter for different filter orders

的值加权求和形成的预测值。拉格朗日插值具有低频率幅频响应和相频响应误差最小化的特征,有助于应用于电子耳蜗的分数延迟实现。

## 【参考文献】

- [1] GONG Q, CHEN Y S. Parameter selection methods of delay and beamforming for cochlear implant speech enhancement[J]. Acoust Phys, 2011, 57(4): 542-550.
- [2] CHEN Y S, GONG Q. Broadband beamforming compensation algorithm in CI front-end acquisition[J]. Biomed Eng Online, 2013, 12: 18.
- [3] CHEN Y S, GONG Q. Real-time spectrum estimation-based dual-channel speech-enhancement algorithm for cochlear implant[J]. Biomed Eng Online, 2012, 11: 74.
- [4] 陈又圣, 宫琴. 基于双TP型麦克风的电子耳蜗前端指向性语音增强系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1952-1958.
- [5] CHEN Y S, GONG Q. Study on dual TP microphone-based directional speech enhancement system for cochlear implant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1952-1958.
- [6] 陈又圣, 陈艳. 电子耳蜗前端双麦克风语音增强及波束形成算法研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(3): 468-477.
- [7] CHEN Y S, CHEN Y. Research of front-end speech enhancement and beamforming algorithm based on dual microphone for cochlear implant[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2019, 36(3): 468-477.
- [8] LASHI D, QUEVY Q, LEMEIRE J. Optimizing microphone arrays for delay-and-sum beamforming using genetic algorithms[C]. 2018 4th International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech). Brussels, Belgium, 2018.
- [9] TAGUCHI T, NAKADAI T, EGUSA R, et al. Investigation on optimal microphone arrangement of spherical microphone array to achieve shape beamforming[C]. 2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. IEEE, 2014: 330-333.
- [10] RAFAELY B. Spatial sampling and beamforming for spherical microphone arrays[C]. 2008 Hands-Free Speech Communication and Microphone Arrays. IEEE, 2008: 5-8.
- [11] VU N C, YE H, WHITTINGTON J, et al. Small footprint

- implementation of dual-microphone delay-and-sum beamforming for in-car speech enhancement[C]. 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2010: 5-8.
- [10] 陈又圣, 张春晓, 陈伟芳, 等. 电子耳蜗双麦克风信号采集及不同参数波束形成特征研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(7): 811-815.
- [11] CHEN Y S, ZHANG C X, CHEN W F, et al. Dual-microphone based signal acquisition and different parameters based beamforming features for cochlear implant[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(7): 811-815.
- [12] 陈又圣, 张春晓, 林炜臻, 等. 方向性麦克风的极性图特性及增益变化特征研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(12): 1468-1472.
- [13] CHEN Y S, ZHANG C X, LIN W Z, et al. Beam pattern characteristics of directional microphone and features of gain changes in cochlear implant[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(12): 1468-1472.
- [14] CHEN Y S, GONG Q. Small-space microphone array fractional delay algorithm based on FIR filter for cochlear implant[J]. Tsinghua Sci Technol, 2011, 16(1): 90-94.
- [15] 刘忠汉, 周岳雷. 基于拉格朗日插值法的Asaoka法在土工后沉降量计算中的应用[J]. 中国水运, 2020, 20(4): 255-256.
- [16] LIU Z H, ZHOU Y L. Application of Asaoka method based on Lagrange interpolation method in calculation of soil settlement after construction[J]. China Water Transport, 2020, 20(4): 255-256.
- [17] 齐宗会, 汪晖, 刘永平. 连续可导函数类的最优拉格朗日插值[J]. 高等学校计算数学学报, 2020, 42(1): 87-96.
- [18] QI Z H, WANG H, LIU Y P. Optimal lagrange interpolation for continuously differentiable functions[J]. Journal of Computational Mathematics in Colleges and Universities, 2020, 42(1): 87-96.
- [19] 胡沛然, 陈少辉. 权重归一化拉格朗日插值及其空间降尺度应用[J]. 遥感信息, 2019, 34(6): 63-71.
- [20] HU P R, CHEN S H. Weight normalization based lagrange interpolation and its application in downscaling[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(6): 63-71.
- [21] 鲁小红. 基于拉格朗日插值法的水库库容测算应用研究[J]. 华北自然资源, 2019(5): 76-77.
- [22] LU X H. Application research of reservoir capacity calculation based on Lagrange interpolation method[J]. Huabei Natural Resources, 2019 (5): 76-77.

(编辑: 薛泽玲)