

文章编号:1000-582X(2008)06-0646-06

信号等长情况下频率估计的降频域迭代分析法

刘良兵,涂亚庆

(后勤工程学院 信息工程系,重庆 400016)

摘要:从特征识别角度分析了现有频率估计方法的信号分解结构的特点,提出了一种降频域分解结构,将对应不同时间的多个单频信号融合构成一个组合信号,以利用时域已知信息并形成信息积累作用,能有效抑制干扰频率和削弱冲击噪声且计算量增加较少。为配合降频域分解结构的使用,采用了适用于信号等长情况的降频等长迭代处理算法。仿真表明该方法抗噪性和实时性好,频率估计精度比现有方法有较大提高。

关键词:频率估计;降频域;离散傅里叶变换;信息融合;迭代算法

中图分类号:TN957

文献标志码:A

Frequency-shift-domain iterative analysis for frequency estimation of equilong signals

LIU Liang-bing, TU Ya-qing

(Department of Information Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: From the view of trick recognition, features of signal decomposition structure in existing frequency estimation methods were analyzed, based on which, a frequency-shift-domain decomposition structure was proposed. A compound signal was constructed by combining several simple signals corresponding to different times. The given information in the time domain can be adopted to form an information accumulation effect, such that the interference frequency and noise can be suppressed effectively by decreasing the calculation. To match the use of a frequency-shift-domain decomposition structure, a frequency-shift equilong iterative algorithm suitable for equilong signals was proposed. Simulated experiments were carried out in numerous application environments. The results show better noise immunity and real-time performance as well as higher frequency estimation precision.

Key words: frequency estimation; frequency-shift-domain; discrete Fourier transform; information fusion; iterative algorithm

利用离散傅里叶变换(DFT)进行频率估计是信号分析领域的重要方法^[1-2],该方法采用了一维信号分解结构,即将采样信号在频率维空间分解,然后利用待测频率的频域特征信息对单频信号进行区分^[3]。DFT方法的分解结构简单,计算量较小,但

它不能描述不同时域局部内的频率分量分布,所以不能利用待测频率在时域空间的特征信息^[4]。为此,在基于短时傅里叶变换(STFT)的谱峰检测等频率估计方法中^[5-11],将信号分解结构从一维频域分解拓展到二维的时频域分解^[12],得到的各个单频信

收稿日期:2008-02-18

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2006BB2122);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2007BB2102)

作者简介:刘良兵(1981-),男,后勤工程学院博士,主要从事信号处理研究。

涂亚庆(联系人),男,后勤工程学院教授,博士生导师,(Tel)13708310256;(E-mail)yqtq@sina.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

号分别对应不同的频率和时间,可利用时域的已知信息以提高各单频信号之间的区分度。此类方法抗噪性较好,但计算量较大。

结合现有 2 种信号分解结构的优点,笔者提出一种适用于频率估计的降频域分解结构(frequency-shift-domain decomposition structure, FSDD)。FSDD 的计算量与一维频域分解结构相仿,且与二维时频域分解结构一样可以利用时域的已知信息,并适用于非平稳信号。为此,在 FSDD 中将对应不同时间的多个单频信号融合构成一个组合信号,使得每个组合信号能对应一个频率和多个时间,从而可以利用时域已知信息。并且同一组合信号中包含的多个单频信号之间将形成信息积累作用,即这些单频信号经过融合和积累之后,冲击噪声将被相互削弱,强干扰信号将被相互抑制,待测频率信号的幅度将变大。

为配合 FSDD 一起使用,笔者还采用了适用于信号等长情况的降频等长迭代处理算法(frequency-shift equi long iterative algorithm, FSEI)。为利用上述信息积累作用,在 FSEI 中给出了间接迭代等技术措施以提高信息融合效果,从而提高频率估计精度和抗噪性。在仿真实验中:对恒频谱平均法(代表现有信号分解结构)、降频谱平均法(代表 FSDD)和降频域迭代分析法(FSDD 和 FSEI 的统称, frequency-shift-domain iterative analysis, FSDI)进行对比实验,前两者的测量结果对比可以定量说明 FSDD 的优越性,后两者的测量结果对比可以定量说明 FSEI 的优越性。采用了信噪比很低等复杂工作条件以说明 FSDI 的普适性。

1 降频域分解结构

1.1 现有信号分解结构的特点

FSDD 是一种新型信号分解结构,是对现有信号分解结构的继承和发展。为便于阐述 FSDD 的基本思想,以 DFT 和 STFT 方法中的信号分解结构为例,说明现有信号分解结构的特点。

从本质上看,可以将信号分解结构视作一种特征识别工具。如图 1 所示,DFT 方法采用一维频域分解结构,将采样信号分解成独立的单频信号构成测试模板序列,测试模板数量为离散频域空间长度 P ,分别对应离散频域空间中的每个频率点,表示采样信号在该频率点处的信号分量。然后基于各单频信号的特征参数(信号幅值)之间的差别,并结合噪声、干扰频率和待测频率在该频域空间内的先验知识,找出与先验知识匹配最好的测试模板,该测试模

板对应的频率即为待测频率估计结果。

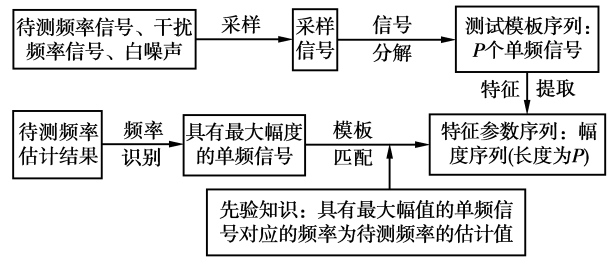


图 1 DFT 方法中的信号分解结构工作原理

如图 2 所示,以 STFT 方法中的信号分解结构为代表的二维时频域分解结构具有如下特点:

- 1) 一维频域分解结构和二维时频域分解结构的测试模板都是单频信号,但后者的每个测试模板表示采样信号在某“伪平稳”时间段内某频率点处的信号分量,即测试模板与频率和时间组成的实数对构成二维的一一映射。
- 2) 由于测试模板中包含有时域信息,所以在模板匹配过程中可利用时域辅助信息,以提高测试模板之间的区分度。
- 3) 设 Q 为“伪平稳”时间段数量,由于测试模板数量成 Q 倍增加,所以特征提取和模板匹配环节的计算量也成 Q 倍增加。

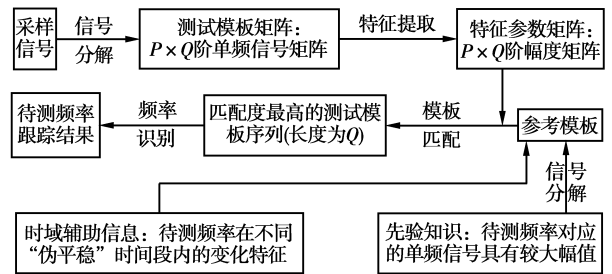


图 2 STFT 方法中的信号分解结构工作原理

1.2 降频域分解结构的特点

由上述分析可知:为利用时域辅助信息,要求信号分解得到的单频信号能与频率-时间实数对构成二维的一一映射;为减小运算量,需尽量减少测试模板的数量,从而降低特征提取和模板匹配环节中的计算量。为此,提出 FSDD(如图 3 所示),在进行二维时频域分解得到 $P \times Q$ 阶单频信号矩阵之后,基于时域辅助信息,将 Q 个单频信号组合成一个测试模板,从而构成长度为 P 的测试模板序列。该结构的特点是,基于时域辅助信息构建测试模板,既能够利用时域信息以提高频率估计精度,又可以减少测试模板的数量以减小计算量。

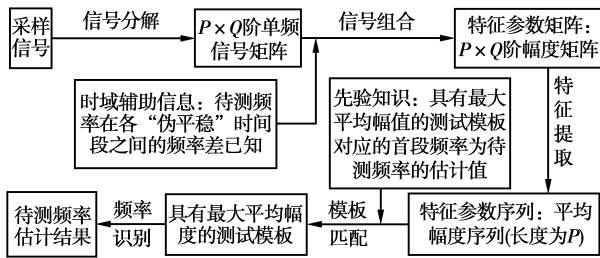


图 3 降频域分解结构的工作原理

1.3 降频域分解结构的关键步骤

如图 3 所示,信号分解之后的信号组合步骤是 FSDD 的关键,即将 $P \times Q$ 阶单频信号矩阵“压缩”成为 P 个测试模板。接下来,结合图 4 举例说明信号组合步骤的执行方法。设采样信号可划分为 5 段“伪平稳”信号,各段信号中均包含一个幅度为 2 (图 4 中圆圈内的数字表示幅度)的待测频率信号 S (其时频分布如图 4 中的虚折线所示)。虽然 S 在第 1 段信号中的待测频率 $f_0 = 100$ MHz 未知,但 f_0 与 S 在各段信号中的待测频率的差为 $[0 \ 3 \ 2 \ 1 \ -1]$ (MHz)(如图 4 中的纵坐标所示)已知,即多段信号 S 的各段信号之间构成降频关系。为求取 S 的频率,实质上只需得到 f_0 即可。若采用二维时频域分解结构,则得到的测试模板(图 4 中的每个虚线方格所在位置对应的单频信号)数量为 5×5 个,计算量大。若采用一维频域分解结构,即将对应同一频率的 5 个方格代表的单频信号组合成一个多段组合信号,则得到的测试模板(如图 4 中的 5 条灰色直线)的幅度均为 2,不能区分出 f_0 。在 FSDD 中,同样需要将对应不同时间段的 5 个单频信号组合成一个测试模板,但不同于 一维频域分解结构,此时的 5 个单频信号不再是同频的、直线型的,而是按照已知的降

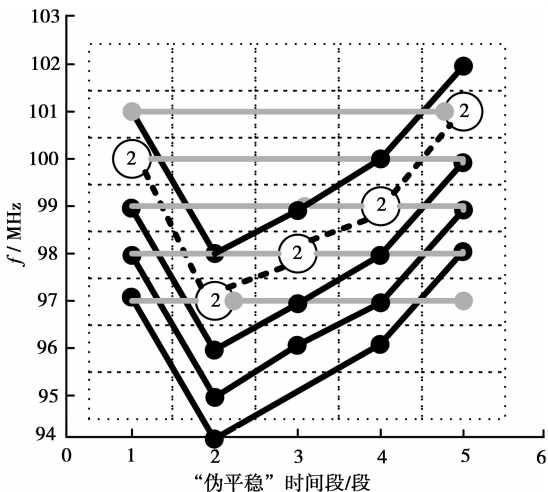


图 4 信号组合步骤的执行方法示例

频关系构成一个降频折线(如图 4 中的 5 条黑色折线),其中首段频率对应 f_0 的虚线折线的幅度最大,从而得到 S 的频率。

1.4 降频域分解结构的用途

FSDD 的重要特征是从不同时间段信号中,按照降频关系提取 Q 个单频信号,构成多段降频组合信号作为测试模板。该结构的主要用途有 2 种:

- 1) 多段降频信号的频率估计^[13-15];
- 2) 低信噪比情况下的频率估计。

当信噪比较低时,对频率估计精度有严重影响。例如,使用同一雷达对某静止物体进行 5 次距离测量,得到的 5 段中频信号如图 5 所示,其中包括频率为 f_0 、幅度为 2 的回波信号(如图 5 中的灰色直线)、幅度分别为 4 和 3 的 2 个邻近频率干扰信号(如图 5 中的 2 条黑色直线)、幅度为 10 的 2 段冲击噪声(如图 5 中的 2 个黑色圆圈)。此时,现有信号分解结构均不能检测出待测频率 f_0 ,因为:1) 一维频域分解结构不能反应局部时域信息,所以不能区分出冲击噪声。2) 二维时频域分解结构仅能从幅度特征区分待测频率,所以邻近频率干扰信号将淹没待测频率信号。

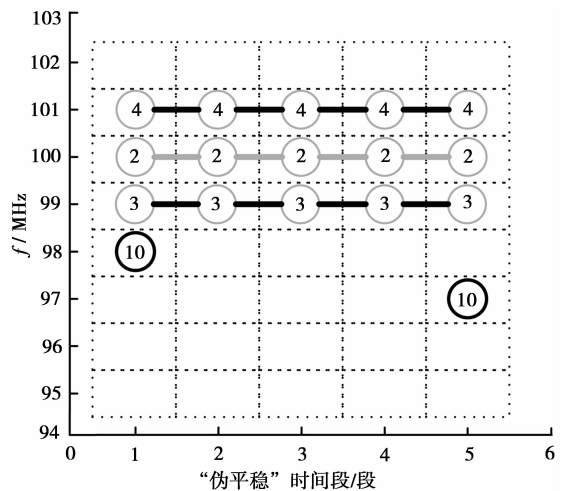


图 5 影响频率估计精度的情况示例

为此,除努力增加信噪比外,采用 FSDD 也能解决该问题。例如,在各次距离测量时,将雷达置于不同的位置,则得到的回波信号的时频分布将类似于图 4 中的黑色虚线所示。这样,将图 4 中的黑色虚线替换图 5 中的灰色直线,并采用 FSDD,则得到 5 个测试模板如图 6 中的 5 条折线所示,其中以 f_0 对应的测试模板(如图 6 中的灰色折线)具有最大的幅度且各时间段内的单频信号幅度变化较平缓,故 f_0 即为 FSDD 的测量结果。可以看出,采用 FSDD 对测量过程成本影响较小,却可以为待测频率信号

提供显著的时域特征,从而能从原理上排除冲击噪声、抑制强干扰信号,即形成信息积累作用以有效提高抗噪性。

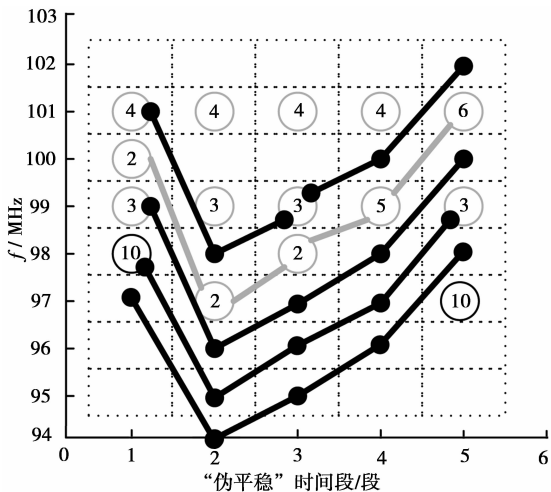


图 6 低信噪比时降频域分解结构的工作原理示例

2 降频等长迭代算法

基于 FSDD 与现有信号分解结构的差别,笔者采用一种能配合 FSDD 进行频率估计的降频等长迭代算法(FSEI),以适用于多段降频等长信号的频率估计。

为有效利用组合信号中的信息积累作用,给出 FSEI 流程如图 7 所示。

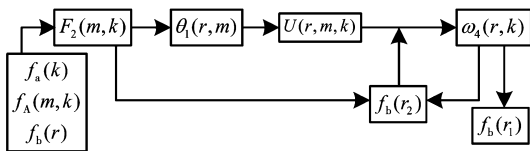


图 7 频率估计的多段降频等长信号融合算法流程

1) 根据被测频率 f_1 的初始经验估计值 f_2 及其最大相对估计误差 C_0 。确定比较频率序列 f_a 、频域分析参数矩阵 f_A 和搜索频率序列 f_b ;

2) 将各段信号进行 $f_A(m, k)$ 频率处的频谱分析(例如 Chirp-Z 变换),得到频谱分析矩阵 F_2 ;

3) 根据 $F_2(m, k)$ 和 $f_b(r)$ 得到各段信号初相的估计值矩阵 θ_1 ;

4) 生成 $U(r, m, k)$ 并确定 f_1 的一个估计值 $f_b(r_2)$;

5) 间接计算并迭代 3 次得到功率谱矩阵 ω_4 ;

6) 搜索 ω_4 的最大元素对应的搜索频率 $f_b(r_1)$, 而 $f_b(r_1)$ 就是 f_1 的估计结果。

3 仿真实验

为定量说明 FSDI 的优越性,进行恒频谱平均法、降频谱平均法和 FSDI 之间的仿真对比实验。恒频谱平均法代表现有信号分解结构,即不主动为待测频率信号添加时域特征(如图 5 中的灰色直线所示),分别对各段“伪平稳”信号进行如 Chirp-Z 变换等频域分解,然后将频谱结果累加取平均值并进行谱峰检测,属于重复测量的一般性方法。降频谱平均法代表不采用 FSEI 的 FSDD,即改动测量过程使待测频率信号构成降频关系(如图 4 中的黑色虚折线所示),然后类似与恒频谱平均法求取各多段组合信号(如图 6 中的 5 条折线所示)的幅值并进行谱峰检测。显然,在以上 3 种方法的对比中,前两种方法的测量结果差别可反映 FSDD 的作用,后两种方法的测量结果差别则体现了 FSEI 的作用。除此之外,3 种方法的工作条件完全相同,以最大程度地保证 3 种实验结果(分别代表 3 种方法的性能)之间的可比性。

3.1 低信噪比条件下的对比实验

为测试 3 种方法在较低信噪比(SNR)条件下的频率估计精度,将实验参数取表 1 所示的一般设定值,进行 2 000 次随机实验,其中 $C=1-f_2/f_1$,表示 f_2 中的初始相对误差,即 f_2 的一般设定值为 10.5 MHz。另外,每次实验的被处理信号中的噪声除了随机生成的加性高斯白噪声,还包括一个邻近待测频率的干扰频率信号

$$x_n(b) = 1.2 \cos[\theta(1) + 2.2\pi f_1 b / f_s], b \in [1, B_0].$$

表 1 实验参数的一般设定值

参数名	SNR/dB	f_1 /MHz	C	f_s /MHz	D /点	M /段	C_0	d /kHz	$\theta(m)$
设定值	-5	10	-0.05	40	50	4	0.1	[0 30 60 90]	满足幅度为 2π 的高斯分布

实验结果如图8所示,可以看出,当信噪比为-5 dB时:

1)曲线1集中于干扰频率11 MHz处,说明恒频谱平均法测量失败;曲线2在部分情况下能接近待测频率的真实值10 MHz,说明了FSDD的优

越性。

2)曲线3比曲线2更接近待测频率的真实值,说明了FSEI的优越性;曲线3的突出毛刺较少,说明了FSDI的误差较好地保持在一个较小的范围内。

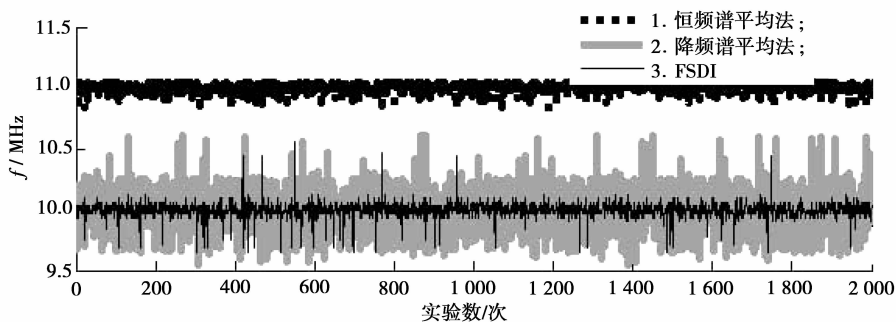


图8 低信噪比条件下3种方法的频率估计结果对比

3.2 间接迭代计算的应用效果

为测试间接迭代计算在较低信噪比条件下的应用效果,按照上述的实验参数进行2000次随机实验,分别使用恒频谱平均法、直接计算和间接迭代计

算3种方法进行频率估计。

实验结果如图9所示,可以看出,当信噪比为-5 dB时,与直接计算方法相比,间接迭代计算的精度有所降低,但仍明显优于其他方法。

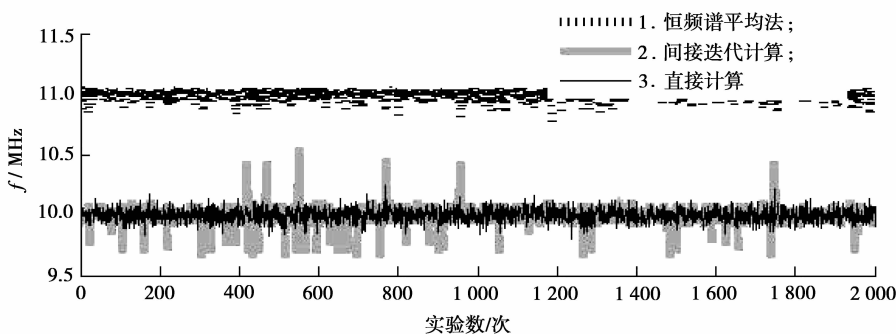


图9 间接迭代计算与其他方法的应用效果对比

4 结论

现有频率估计方法中使用的信号分解结构可以分为两类,一维频域分解结构和二维时频域分解结构。从特征识别角度看,两者均采用单频信号作为测试模板,而使用不同的映射关系和已知信息类型,在计算量和区分度等方面各有优点。作为两者的继承和发展,FSDI与一维频域分解结构的测试模板数量相同,从而计算量较小,并且采用与二维时频域分解结构相同的映射关系、已知信号类型以保证抗噪性和区分度。SDD能广泛适用于多段降频信号,且尤其适用于低信噪比情况。

频等长迭代算法,利用降频域分析参数矩阵、相位差补偿因子矩阵、搜索频率序列、间接迭代计算等技术措施以提高信息融合效果,从而提高频率估计精度和抗噪性。在较复杂应用环境状态下进行了多次对比仿真实验,分别说明了FSDI和FSEI的优越性。

该方法结构新颖,抗噪性和实时性好,适用范围广且易于实现,具有重要的理论意义和潜在实用价值。

参考文献:

- [1] 周传德,秦树人,汤宝平,等. 频率细化分析方法及其在虚拟仪器中的应用[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005, 28(8): 1-3.

为充分利用FSDD的信息积累作用,采用了降

- ZHOU CHUAN-DE, QIN SHU-REN, TANG BAO-PING, et al. Frequency refining analysis and its applications in the vls [J]. Journal of Chongqing University; Natural Science Edition, 2005, 28(8): 1-3.
- [2] ABOUTANIOS E, MULGREW B. Iterative frequency estimation by interpolation on Fourier coefficients[J]. Signal Processing, 2005, 53(4): 1237-1242.
- [3] 朱冰莲, 杨磊. 心音信号的短时傅立叶变换分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2004, 27(8): 83-85.
- ZHU BING-LIAN, YANG LEI. Short-time Fourier transform analysis of the phonocardiogram signal[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(8): 83-85.
- [4] 邓振森, 刘渝. 正弦波频率估计的牛顿迭代方法初始值研究[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 104-107.
- DENG ZHEN-MIAO, LIU YU. The starting point problem of sinusoid frequency estimation based on Newton's method[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 104-107.
- [5] GUNAWAN D D S. Sinusoidal frequency estimation based on the time derivative of the STFT phase response [C] // Information, Communications and Signal Processing. Sydney: [s. n.], 2005: 1452-1456.
- [6] STEFAN F, SANJIT K, MITRA G D. Frequency estimation using warped discrete Fourier transform[J]. Signal Processing, 2003, 83(8): 1661-1671.
- [7] WOOD J C, BARRY D T. Radon transformation of time-frequency distributions for analysis of multi-component signals[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(11): 3166-3177.
- [8] WOOD J C, BARRY D T. Linear signal synthesis using the Radon-Wigner transform[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(8): 2105-2111.
- [9] DURAK L, ARIKAN O. Short-time Fourier transform: two fundamental properties and an optimal implementation [J]. IEEE Trans on SP, 2003, 51(5): 1231-1242.
- [10] LI JIA-QING, JIN RONG-HONG, GENG JUN-PING. Estimation for instantaneous frequency using a combined fractional time-frequency representation[J]. IEICE TRANSACTIONS on Communications, 2007, E90-B(1): 189-191.
- [11] CHENA H, QUAN C, TAYA C J. Instantaneous velocity measurement of dynamic deformation by digital holographic interferometry [J]. Optics Communications, 2007, 279(1): 27-34.
- [12] 周刚毅, 叶中付. 基于FRFT的线性调频信号映射方法的快速算法[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(3): 264-267.
- ZHOU GANG-YI, YE ZHONG-FU. Fast computation algorithm for mapping method of multicomponent linear-FM signal based on fractional Fourier transform[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(3): 264-267.
- [13] LIU LIANG-BING, TU YA-QING. A liquid nonlinear acoustic parameter B/A measuring system based on information fusion [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Information Reuse and Integration. Nevada: Las Vegas, 2004: 559-563.
- [14] 刘良兵, 邓明晰. 采用二次回波法的液体非线性声参量 B/A 测量系统[J]. 声学技术, 2004, 23: 169-172.
- LIU LIANG-BING, DENG MING-XI. A liquid nonlinear acoustic parameter B/A measuring system based on the second-order echoe method[J]. Acoustic Technology, 2004, 23: 169-172.
- [15] LIU LIANG-BING, TU YA-QING. A new realizable structure to improve VCO linearity[C] // Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Xi'an: [s. n.], 2007: 625-629.

(编辑 李胜春)