



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105259537 B

(45)授权公告日 2017. 12. 26

(21)申请号 201510764596.7

G01S 7/35(2006.01)

(22)申请日 2015.11.10

G01S 13/50(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

G01S 13/88(2006.01)

申请公布号 CN 105259537 A

审查员 朱仲艳

(43)申请公布日 2016.01.20

(73)专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山  
武汉大学

(72)发明人 陈泽宗 陈曦 钟建波 赵晨  
张龙刚

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 赵丽影

(51)Int. Cl.

G01S 7/292(2006.01)

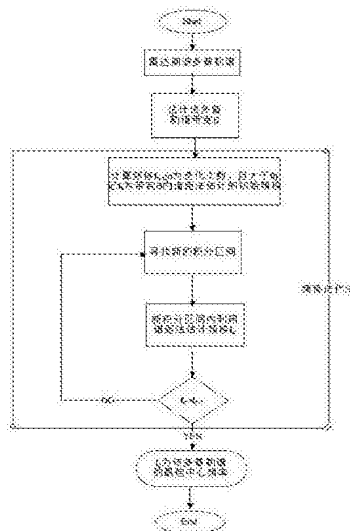
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法。该方法以谱矩法估计频移为初值,逐步改变积分区间进行迭代积分,每一次迭代都利用谱矩法估计频移,直到最后的频移结果收敛,并将该结果作为多普勒谱中心频率的最佳估计值。相对于传统的谱矩法而言,频移迭代法估计中心频率的效果更好,其平均绝对误差和均方根误差均更小,且该方法的估计精度不受频移分辨率的约束,将此方法应用于多普勒测波雷达中能够得到更准确的有效波高和平均浪周期等海浪参数。



1. 一种基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,其特征在於:包括以下步骤:

步骤1,通过实测多普勒谱初步确定噪声基底,并将该噪声基底作为门限,利用截断法实现信号和噪声的初步分离;转步骤2;

步骤2,对截断后剩余的多普勒谱采用谱矩法第一次估计多普勒频移;转步骤3;

步骤3,以该多普勒频移为对称中心,两边同时增加相同的带宽构成新的积分区间,对新积分区间内的多普勒谱再次利用谱矩法估计多普勒频移;转步骤4;

步骤4,重复步骤3,经过数次迭代后,进行收敛性判断,得到多普勒频移的收敛结果,并将该结果作为多普勒谱中心频率的最佳估计值。

2. 根据权利要求1所述的基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,其特征在於:步骤1所述的截断法实现信号和噪声的初步分离的具体方法包括以下子步骤:

步骤1.1,在实测多普勒谱的两边各选取5%的点作为左右噪声区间,分别计算左右噪声区间的噪声平均值 $Noise_{left}$ 和 $Noise_{right}$ ,并将两者之中的较大值作为噪声区间的门限 $Noise_{threshold}$ ,即 $Noise_{threshold} = \max(Noise_{left}, Noise_{right})$ ;

步骤1.2,从多普勒谱最大幅值开始,向左依次查找,直到多普勒谱幅值等于门限值,将该幅值所对应的频率作为信号区间的左边界 $f_{left}$ ;同理,从多普勒谱最大幅值向右查找获得信号区间的右边界 $f_{right}$ ,且有 $f_{left} < f_{right}$ ;

步骤1.3,记积分区间 $B_0 = [f_{left}, f_{right}]$ ,将该区间作为回波多普勒谱的信号区间。

3. 根据权利要求2所述的基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,其特征在於:步骤2与步骤3中所述的谱矩法估计多普勒频移是依照如下公式实现的:

$$f_n = \frac{\sum f_i \cdot S(f_i) df}{\sum S(f_i) df}, i=1, 2, \dots, N$$

其中, $f_i$ 表示多普勒谱的频点, $S(f_i)$ 表示多普勒谱每个频点所对应的幅值, $f_n$ 表示估计的多普勒谱频移, $n$ 表示迭代次数。

4. 根据权利要求3所述的基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,其特征在於:所述步骤3中,进行第一次迭代时是以第一次利用谱矩法得到的初始频移 $f_0$ 为对称中心,两边同时增加相同的带宽 $\Delta B_0$ ,且 $\Delta B_0$ 满足 $\Delta B_0 = \min(|f_0 - f_{left}|, |f_{right} - f_0|)$ ,此时的积分区间变为 $B_1 = [f_0 - \Delta B_0, f_0 + \Delta B_0]$ ;所得到的新的积分区间 $B_1$ 内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移可得到经过第一次迭代后的频移 $f_1$ ,接着以 $f_1$ 为对称中心,两边同时增加相同的带宽 $\Delta B_1$ ,其中 $\Delta B_1 = \min(|f_1 - f_{left}|, |f_{right} - f_1|)$ 从而得到新的积分区间 $B_2$ ;在积分区间 $B_2$ 内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移得到第二次迭代的频移 $f_2$ ,以此类推,一直重复 $n$ 次得到第 $n$ 次迭代后的频移 $f_n$ 。

5. 根据权利要求4所述的基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,其特征在於:所述步骤4中,经过了 $n$ 次迭代,得到了第 $n$ 次谱矩法估计频移后,进行收敛性判断,若满足 $f_n = f_{n-1}$ ,则将 $f_n$ 作为该多普勒谱中心频率的最佳估计值;若不满足,重复步骤3直至两者相等。

## 基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于雷达信号处理领域,涉及一种基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法。本发明适用于各种相干机制的岸基微波多普勒雷达系统和高频地波雷达。

### 背景技术

[0002] 海洋观测是人类认识海洋自然属性和环境特征的基本手段,是海洋事业发展的基石。近年来,美、英、法、德、俄、挪威、新西兰等国家都在积极开展岸基雷达海洋遥感技术的研究,从而获取无向浪高谱、海浪统计(如有效浪高、浪周期、浪向)及海洋表面流等海洋动力学要素。

[0003] 随着无线电海洋探测技术的发展,岸基微波多普勒雷达已被广泛应用于海洋表面动力学参数遥测。该雷达通过获取照度区内的回波多普勒谱,估计其中心频率得到海面水质点的径向速度,然后利用径向速度与海面浪高的转换关系,直接测量海浪参数如有效浪高、平均浪周期等。该方法无需校准即可得到准确的海浪谱等结果,是一种“直接”测量海浪的方法,而其中准确估计海洋回波多普勒谱中心频率是准确计算海浪谱的前提。因此,如何有效估计多普勒谱的中心频率是微波多普勒雷达探测海浪的重要问题,其估计精度直接决定了雷达海浪探测的准确性。

[0004] 从原理上说,频率是指在单位时间内完整波动的次数。在很多实际应用中,都可以把运动中的传输波简化为正弦信号,在某一固定点的波质点在单位时间内走过的波动的个数,就是波动频率。传统意义上的频率是指在一段时间上信号的傅里叶频率,由于时间参数在傅里叶变换中已被去除,所以傅里叶频率与时间无关。与之相反,瞬时频率却指示的是信号在某一时间点或一小段时间上的频率,其值是时间的函数。如果信号的相关函数存在,那么一定时间内的傅里叶频率和瞬时频率的均值就完全一致。雷达回波的多普勒谱是某一段时间段内信号的频谱,其中心频率就是多普勒获取时间内的均值。

[0005] 目前,多普勒谱中心频率估计方法可分为时域和频域两大类。其中时域上具有代表性的是协方差矩估计法。该方法利用相关函数来估计谱中心频率,其不足之处在于中心频率的估计偏差会随谱歪斜程度增大而增大,且要求采样周期尽量短。在频域上具有代表性的是谱矩法,该方法是将多普勒谱的能量中心所在位置作为多普勒谱中心频率。由于谱矩法计算量小且使用方便,它已成为当前最广泛的中心频率估计方法。

[0006] 然而,实际接收的雷达回波无可避免受到噪声“污染”,较小的信噪比降低了中心频率的估计精度。为了克服这一难题,国内外学者做了大量的研究工作,目前,对于多普勒谱中心频率的估计已经取得了一定的进展,但是估计效果依然没有达到最好,主要是受限于如何确定噪声水平,并将信号和噪声分离,再提取谱参数。

### 发明内容

[0007] 本发明利用了频移迭代的方法,通过多次频移估计直至收敛从而得到中心频率,可以有效地提高多普勒谱中心频率估计的精度。

[0008] 本发明的目的在于:基于实际的岸基多普勒雷达系统,提供一种具有更高估计精度的基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,从而更加准确地获得海洋动力学参数,如有效波高和平均浪周期等。

[0009] 为实现上述目的,本发明提供的中心频率估计方法如下:

[0010] 一种基于频移迭代的多普勒谱中心频率估计方法,包括以下步骤:

[0011] 步骤1,通过实测多普勒谱初步确定噪声基底,并将该噪声基底作为门限,利用截断法实现信号和噪声的初步分离;转步骤2;

[0012] 步骤2,对截断后剩余的多普勒谱采用谱矩法第一次估计多普勒频移;转步骤3;

[0013] 步骤3,以该多普勒频移为对称中心,两边同时增加相同的带宽构成新的积分区间,对新积分区间内的多普勒谱再次利用谱矩法估计多普勒频移;转步骤4;

[0014] 步骤4,重复步骤3,经过数次迭代后,进行收敛性判断,得到多普勒频移的收敛结果,并将该结果作为多普勒谱中心频率的最佳估计值。

[0015] 步骤1所述的截断法实现信号和噪声的初步分离的具体方法包括以下子步骤:

[0016] 步骤1.1,在实测多普勒谱的两边各选取5%的点作为左右噪声区间,分别计算左右噪声区间的噪声平均值 $Noise_{left}$ 和 $Noise_{right}$ ,并将两者之中的较大值作为噪声区间的门限 $Noise_{threshold}$ ,即 $Noise_{threshold} = \max(Noise_{left}, Noise_{right})$ ;

[0017] 步骤1.2,从多普勒谱最大幅值开始,向左依次查找,直到多普勒谱幅值等于门限值,将该幅值所对应的频率作为信号区间的左边界 $f_{left}$ ;同理,从多普勒谱最大幅值向右查找获得信号区间的右边界 $f_{right}$ ,且有 $f_{left} < f_{right}$ ;

[0018] 步骤1.3,记积分区间 $B_0 = [f_{left}, f_{right}]$ ,将该区间作为回波多普勒谱的信号区间。

[0019] 步骤2与步骤3中所述的谱矩法估计多普勒频移是依照如下公式实现的:

$$[0020] \quad f_n = \frac{\sum f_i S(f_i) df}{\sum S(f_i) df}, i = 1, 2, \dots, N$$

[0021] 其中, $f_i$ 表示多普勒谱的频点, $S(f_i)$ 表示多普勒谱每个频点所对应的幅值, $f_n$ 表示估计的多普勒谱频移, $n$ 表示迭代次数。

[0022] 所述步骤3中,进行第一次迭代时是以第一次利用谱矩法得到的初始频移 $f_0$ 为对称中心,两边同时增加相同的带宽 $\Delta B_0$ ,且 $\Delta B_0$ 满足 $\Delta B_0 = \min(|f_0 - f_{left}|, |f_{right} - f_0|)$ ,此时的积分区间变为 $B_1 = [f_0 - \Delta B_0, f_0 + \Delta B_0]$ ;所得到的新的积分区间 $B_1$ 内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移可得到经过第一次迭代后的频移 $f_1$ ,接着以 $f_1$ 为对称中心,两边同时增加相同的带宽 $\Delta B_1$ ,其中 $\Delta B_1 = \min(|f_1 - f_{left}|, |f_{right} - f_1|)$ 从而得到新的积分区间 $B_2$ ;在积分区间 $B_2$ 内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移得到第二次迭代的频移 $f_2$ ,以此类推,一直重复 $n$ 次得到第 $n$ 次迭代后的频移 $f_n$ 。

[0023] 所述步骤4中,经过了 $n$ 次迭代,得到了第 $n$ 次谱矩法估计频移后,进行收敛性判断,若满足 $f_n = f_{n-1}$ ,则将 $f_n$ 作为该多普勒谱中心频率的最佳估计值;若不满足,重复步骤3直至两者相等。

[0024] 因此,本发明具有如下优点:

[0025] 1.该估计方法由于进行多次迭代直至频移收敛,因此在第一次确定积分边界的时候无需过于严格,从而降低了初始边界对于多普勒谱中心频率估计的影响。

[0026] 2.该估计方法可提高多普勒谱中心频率估计的精度,为后续处理获取无向浪高

谱、海浪统计参数(如有效波高、浪周期、浪向)及海洋表面流等海洋动力学要素提供了更加准确的信息。

[0027] 3. 该估计方法可应用于多种不同谱形的中心频率估计,应用范围广,实用性强。

#### 附图说明

[0028] 图1是本发明的算法流程图。

[0029] 图2是基于实测数据的微波雷达回波多普勒谱。

[0030] 图3是本发明基于实测数据所估计的频移的收敛过程。

[0031] 图4是在雷达信号处理过程中其他部分处理方法完全相同的情况下,运用谱矩法与本发明所得到的中心频率估计值对比图。

#### 具体实施方式

[0032] 特定距离元的雷达回波是该距离元内多种随机波动海浪反射电磁波的结果。雷达接收到来自某一特定距离元的回波脉冲序列,相当于在有效时间段内载波脉冲的幅度和相位受到了调制。设调制函数为 $A(t)$ ,其对应的频谱就是雷达回波多普勒谱,它是个复频谱。假设雷达海洋回波信号的功率谱形式为:

$$[0033] \quad S(f) = \frac{\sigma_{pp}(\theta_i)}{\sqrt{2\pi\delta f_{pp}^2}} \exp\left\{-\frac{(f-f_d)^2}{2\delta f_{pp}^2}\right\}$$

[0034] 由于雷达回波总会收到各种噪声的干扰,因此雷达回波中噪声和信号的合成功率谱统计模型可写为:

$$[0035] \quad D(f) = -\ln(1 - \text{rand}(1, m)) \cdot \left\{ \frac{\sigma_{pp}(\theta_i)}{\sqrt{2\pi\delta f_{pp}^2}} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2\delta f_{pp}^2}\right] + N_0 \right\}$$

[0036] 其中, $S(f)$ 表示的是标准的雷达回波信号功率谱; $D(f)$ 是噪声和信号的合成功率谱; $\sigma_{pp}$ 表示在不同极化方式下的雷达回波后向散射强度; $\theta_i$ 表示雷达掠射角; $\delta f_{pp}$ 表示不同极化方式下的有效谱宽; $N_0$ 表示噪声功率谱; $f_d$ 表示多普勒谱中心频率; $f$ 和 $m$ 分别表示多普勒谱频点和正整数。

[0037] 步骤1,利用上式得到多普勒谱,从多普勒谱的两边各选取5%的点作为左右噪声区间,分别计算左右噪声区间的噪声平均值 $\text{Noise}_{\text{left}}$ 和 $\text{Noise}_{\text{right}}$ ,并将两者之中的较大值作为噪声区间的初始门限 $\text{Noise}_{\text{threshold}}$ ,即 $\text{Noise}_{\text{threshold}} = \max(\text{Noise}_{\text{left}}, \text{Noise}_{\text{right}})$ 。

[0038] 步骤2,从多普勒谱最大幅值开始,向左依次查找,直到多普勒谱幅值等于初始门限,将该幅值所对应的频率作为信号区间的左边界 $f_{\text{left}}$ 。同理,从多普勒谱最大幅值向右查找获得信号区间的右边界 $f_{\text{right}}$ ,且有 $f_{\text{left}} < f_{\text{right}}$ 。

[0039] 步骤3,记第一次积分区间 $B_0 = [f_{\text{left}}, f_{\text{right}}]$ ,将该区间作为雷达回波多普勒谱的信号区间。

[0040] 步骤4,步骤2与步骤3中所述的谱矩法估计多普勒频移是依照如下公式实现的:

$$[0041] \quad f_n = \frac{\sum f_i S(f_i) df}{\sum S(f_i) df}, i = 1, 2, \dots, N$$

[0042] 其中,  $f_i$  表示多普勒谱的频点,  $S(f_i)$  表示多普勒谱每个频点所对应的幅值,  $f_n$  表示  $n$  次迭代估计的多普勒谱频移,  $n$  表示迭代次数。

[0043] 因此, 在积分区间  $B_0$  内按照以下公式第一次估计多普勒频移:

$$[0044] \quad f_0 = \frac{\sum f_i S(f_i)}{\sum S(f_i)}, f_i \in [f_{left}, f_{right}]$$

[0045] 其中,  $f_i$  表示在多普勒谱的  $B_0$  区间内的频点;  $f_0$  表示第一次得到的多普勒谱频移;  $S(f_i)$  表示该区间内多普勒谱每个频点所对应的幅值。

[0046] 步骤5, 以步骤4中利用谱矩法得到的初始频移  $f_0$  为对称中心, 两边同时增加相同的带宽  $\Delta B_0$ , 且  $\Delta B_0$  满足  $\Delta B_0 = \min(|f_0 - f_{left}|, |f_{right} - f_0|)$ , 此时的积分区间变为  $B_1 = [f_0 - \Delta B_0, f_0 + \Delta B_0]$ 。

[0047] 步骤6, 在步骤5中所得到的新的积分区间  $B_1$  内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移便可得到经过第一次迭代后的频移  $f_1$ , 接着以  $f_1$  为对称中心, 两边同时增加相同的带宽  $\Delta B_1$ , 其中  $\Delta B_1 = \min(|f_1 - f_{left}|, |f_{right} - f_1|)$  从而得到新的积分区间  $B_2$ 。在积分区间  $B_2$  内再次使用谱矩法估计多普勒谱频移得到第二次迭代的频移  $f_2$ , 以此类推, 一直重复  $n$  次得到第  $n$  次迭代后的频移  $f_n$ , 且第  $n$  次迭代后两边同时增加相同的带宽  $\Delta B_n$  的表达式为  $\Delta B_n = \min(|f_n - f_{left}|, |f_{right} - f_n|)$ 。

[0048] 步骤7, 基于已经得到迭代的多普勒频移进行频移收敛性判断, 若  $f_n = f_{n-1}$ ,  $f_n$  表示  $n$  次迭代估计的多普勒谱频移,  $n$  表示迭代次数; 则将  $f_n$  作为该多普勒谱中心频率的最佳估计值, 若不等, 则继续重复迭代直至相等。

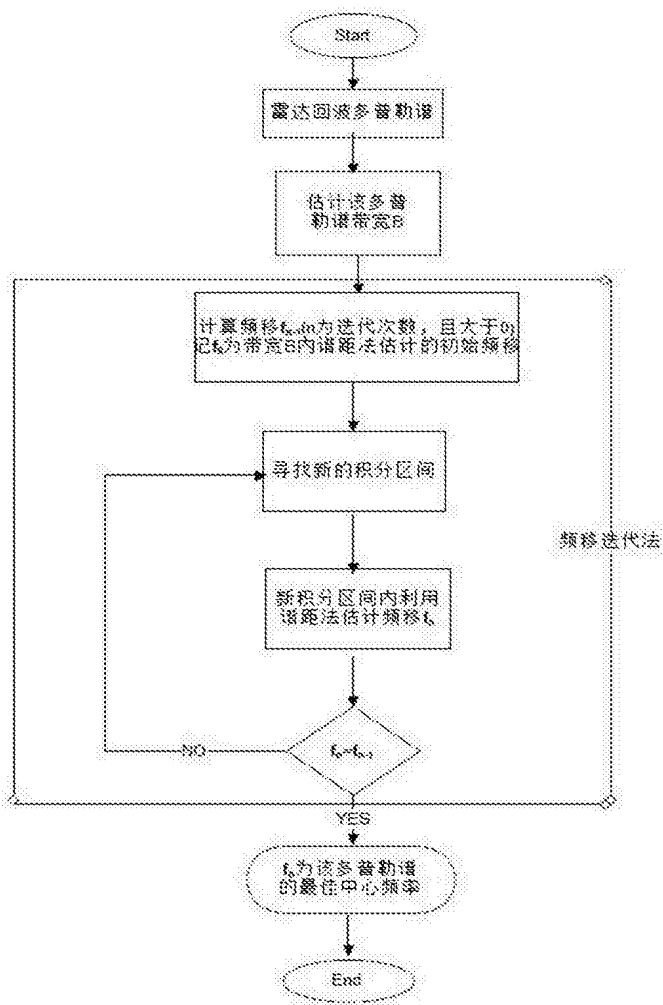


图1

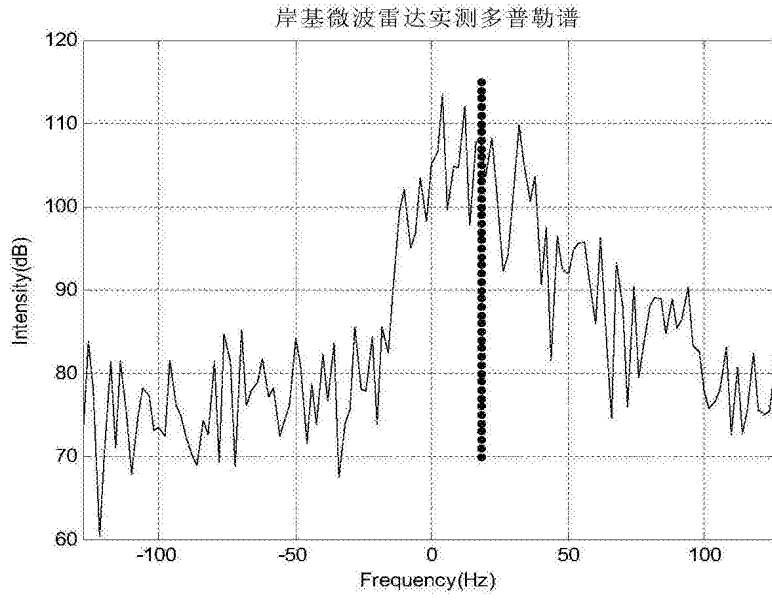


图2

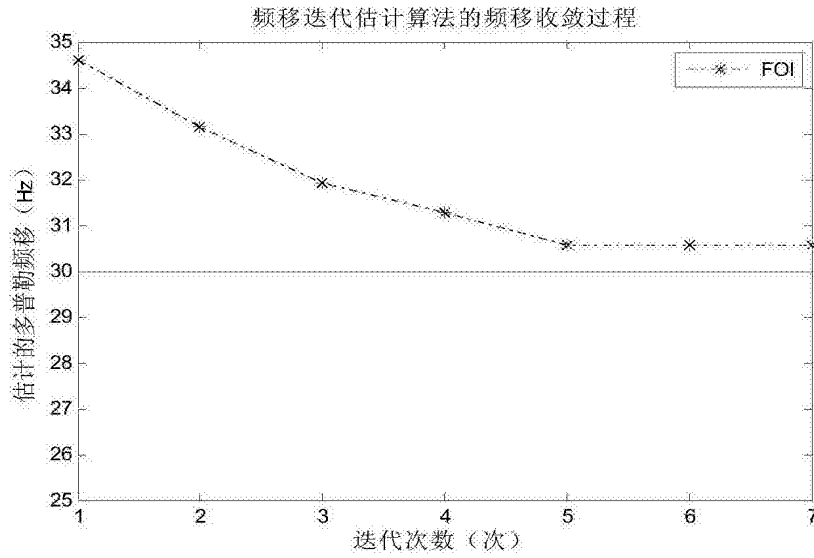


图3



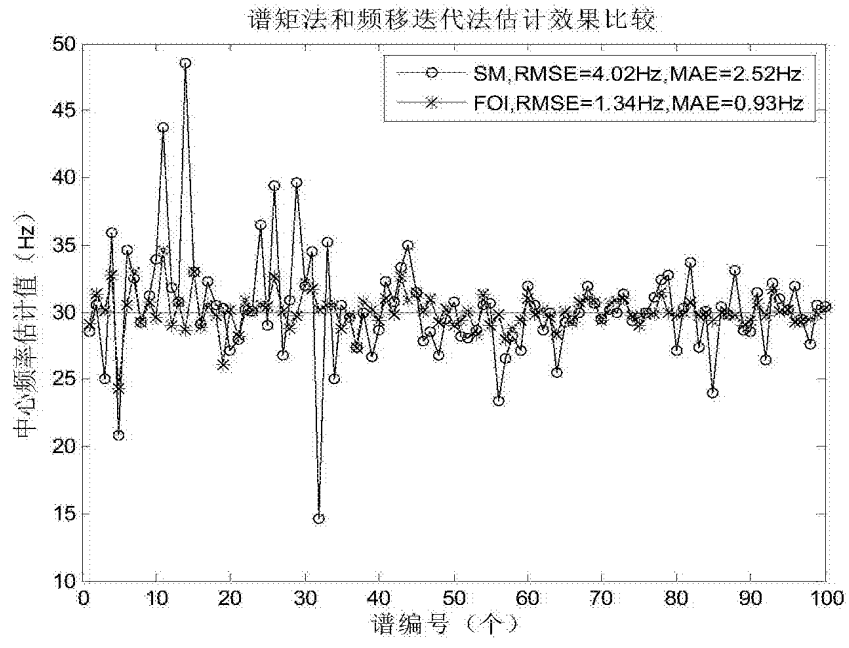


图4