

一种基于量子游走的海面高度模拟方法

技术领域

本发明涉及自然地理和海洋物理技术领域，尤其是一种基于量子游走的海面高度模拟方法。

背景技术

当前海面高度变化建模模型大致可归纳为两类：即传统模型和机器学习模型。一般而言，传统预测方法都是基于参数模型的，即在确定时间序列预测模型的基础上求解出模型的参数，完成预测。如自回归移动平均模型（ARIMA），其参数简单、计算高效，但只能较好地预测具有线性特征的平稳序列，无法挖掘出非线性特征，且通常需要满足平稳性假设，不适合用于海面高度的模拟和预测。机器学习模型是一种很强的非线性函数拟合器，即采用一些算法“学习”数据，进而挖掘出数据中隐藏的信息。如人工神经网络（ANN）、支持向量机（SVM）等。ANN 有较强的自学习能力，能够根据设定输入输出解决一些非线性映射问题，但其为黑箱模型，对于训练数据较为敏感，且没有考虑海面高度变化背后的物理意义；SVM 是以统计学习理论为基础的机器学习方法，在解决小样本、非线性问题等方面有特有的优势，但对参数和核函数敏感，在海量数据样本中表现欠佳。

全球海面高度的变化与人类的生产生活息息相关，对构建人类命运共同体至关重要，预防海面高度变化引起的自然灾害，是经济生态文明建设的重要任务。近年来，越来越多证据表明经典随机游走可以预测海面高度变化的非线性和动态特征，并给与科学的揭示。但实际上海面高度变化并不是独立的，而是多因素、多过程叠加耦合的结果，且大多数情况下并不能满足经典随机游走的独立性和随机性假设，使其无法在海面高度变化预测中发挥作用。

发明内容

本发明所要解决的技术问题在于，提供一种基于量子游走的海面高度模拟方法，从多尺度分解的角度进一步剖析海面高度变化，探索海面高度变化与海面波动模态之间的关系，基于多组分叠加耦合的视角实现海面高度变化建模模拟，是海面高度的建模和模拟方向上的一大突破。

为解决上述技术问题，本发明提供一种基于量子游走的海面高度模拟方法，包括如下步骤：

- (1) 基于量子游走生成海面高度的多波动组分；
- (2) 海面高度组分筛选；
- (3) 基于组分叠加原理模拟海面高度；
- (4) 实验验证。

优选的，步骤（1）中，基于量子游走生成海面高度的多波动组分具体为：当未进行观测时，任意站点的海面高度在任意时刻均以一定概率出现在任何高程，但在同一时刻，其只能在任意一个高程点，记作 $|\delta\rangle = \{|\delta_1\rangle, |\delta_2\rangle, \dots, |\delta_n\rangle\}$ ，其中：

$$|\delta_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, |\delta_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, |\delta_n\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

因此，量子游走的状态 $|\varepsilon(k)\rangle$ 被定义为所有基态的线性叠加：

$$|\varepsilon(k)\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i(k) |\delta_i\rangle \quad (2)$$

其中 $|\alpha_i(k)| \in [0, 1]$ ，表示海面高度在给定时间处于状态 $|\delta_i\rangle$ 的概率幅，基于酉变换，将状态向量 $|\varepsilon(k)\rangle$ 随时间的演化表示如下：

$$\frac{d}{dt} |\varepsilon(k)\rangle = iA |\varepsilon(k)\rangle \quad (3)$$

如式（3）所示，基于一定规则不断调整量子游走分辨率 k ，即根据量子游走构建每个站点所有可能的波动组分。

优选的，步骤（2）中，海面高度组分筛选具体为：在实际海面高度变化时间序列 φ 的约束下，对步骤（1）生成的所有可能的多波动组分 $(|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle)$ 进行逐步回归子集筛选，将其表示为：

$$\varphi \sim \text{sift} \left(\sum_{n=1}^N |\varepsilon(k_n)\rangle \right) \quad (4)$$

基于赤池信息量准则 AIC，使用式（4）中的逐步回归子集筛选方法对所有可能的海面高度变化模态 $(|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle)$ 进行筛选，得到模态筛选结果，记为

$\{\{\varepsilon(k_m)\}\}$ 。

优选的，步骤（3）中，基于组分叠加原理模拟海面高度具体为：基于步骤（2）筛选所得模态 $\{\{\varepsilon(k_m)\}\}$ ，建立了真实海面高度变化时间序列与海面高度变化组分间的混叠耦合关系，并将其表示为：

$$\varphi = \sum_{m=1}^M \{\alpha_m \times \varepsilon(k_m)\} + b \tag{5}$$

其中，M 为步骤（2）筛选所得的组分数， φ 为实际海面高度变化时间序列， α_m 是具有相同组分 $\{\{\varepsilon(k_m)\}\}$ 的海面高度变化尺度因子， k_m 为筛选所得组分的参数，是海面高度变化特征的重要表征参数，b 为映射常数项。

优选的，步骤（4）中，实验验证的实验配置具体为：选择一组站点纬度近似相同，按经度递增分布，其中六个站点分别命名为 $N_1, N_2, \dots, N_6$ ；在多模态提取时，在研究区域不同观潮站中进行 2000 次量子游走， k 从 0.01 增加至 20，且间隔为 0.01；同时，为了评价建模效果，选取平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 来衡量模型的拟合效果，具体定义如表 1 所示；其中， δ_i 为实际海面高度； $\bar{\delta}_i$ 为海面高度平均值； $\hat{\delta}_i$ 为拟合得到的海面高度；n 为拟合样本个数；

表 1 模型建模效果评价指标定义

评价指标	公式定义
均值绝对误差（MAE）	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i $
均方根误差（RMSE）	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}$
决定系数（ R^2 ）	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i ^2}{\sum_{i=1}^n \delta_i - \bar{\delta}_i ^2}$

。

本发明的有益效果为：本发明引入量子游走这一关键方法，从多尺度分解的角度进一步剖析海面高度变化，探索海面高度变化与海面波动模态之间的关系，基于多组分叠加耦合的视角实现海面高度变化建模模拟，是海面高度的建模和模拟方向上的一大突破。

附图说明

图 1 为本发明的方法流程示意图。

图 2 为本发明的实验区及站点选择示意图。

图 3 为本发明基于量子游走的海面高度模拟结果示意图。

图 4 为本发明的建模结果精度评定示意图。

具体实施方式

如图 1 所示，一种基于量子游走的海面高度模拟方法，包括如下步骤：

- (1) 基于量子游走生成海面高度的多波动组分；
- (2) 海面高度组分筛选；
- (3) 基于组分叠加原理模拟海面高度；
- (4) 实验验证。

在全球洋流中，将相同/相似环境因子抽象为量子化的驱动粒子，则此类环境因子作用下的海面高度变化可描述为驱动粒子的高度随时间的演化过程，是海面高度变化的单个组分。在未施加观测时，粒子会以一定的概率出现在多个可能的垂直位置，形成该波动组分下粒子出现在各高程概率随时间的动态演化过程。

但在现实情况下，不同验潮站的海面高度变化特征和结构各不相同，用统一组分来表征海面高度变化是不现实的。因此，考虑在不同步长下进行量子游走，生成多个形状结构各异的海面高度变化组分，这样不仅有助于揭示海面高度的复杂结构与多种组分之间的叠加耦合关系，还为建立高精度、强鲁棒的预测模型提供了基础。

单个海面高度组分下的海面高度动态演化过程可描述为相同/相似环境因子(驱动粒子)在站点间的波动过程，并可用量子游走加以描述。在生成海面高度多波动组分的过程中，其关键是在给定的参数下，驱动粒子从固定的站点出发，在以研究区域验潮站点的邻接矩阵(拓扑结构)构成的基本骨架上进行量子游走，形成单个波动组分下海面高度分布概率随时间的动态演化。

基于量子游走生成海面高度的多波动组分具体为：当未进行观测时，任意站点的海面高度在任意时刻均以一定概率出现在任何高程，但在同一时刻，其只能在任意一个高程点，记作 $|\delta\rangle=\{|\delta_1\rangle,|\delta_2\rangle,\dots,|\delta_n\rangle\}$ ，其中：

$$|\delta_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, |\delta_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, |\delta_n\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

因此，量子游走的状态 $|\varepsilon(k)\rangle$ 被定义为所有基态的线性叠加：

$$|\varepsilon(k)\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i(k) |\delta_i\rangle \quad (2)$$

其中 $|\alpha_i(k)| \in [0,1]$ ，表示海面高度在给定时间处于状态 $|\delta_i\rangle$ 的概率幅，基于酉变换，将状态向量 $|\varepsilon(k)\rangle$ 随时间的演化表示如下：

$$\frac{d}{dt} |\varepsilon(k)\rangle = iA |\varepsilon(k)\rangle \quad (3)$$

如式（3）所示，基于一定规则不断调整量子游走分辨率 k ，即根据量子游走构建每个站点所有可能的波动组分。

虽然海面高度变化受多因子影响，结构复杂，模态各异，但诸如人为干预、影响因子的客观约束不同使得部分理想组分不可能存在于其中。步骤（1）生成的所有可能的海面高度变化组分只是一个通用的组分集合，是海面高度建模模拟的“基”，只能描述理想的海面高度变化情况。因此，在实际海面高度变化的约束下，基于特定的海面高度波动组分筛选准则，解析得到不同验潮站的海面高度变化组分，便于后续探索海面高度变化与多组分之间的叠加耦合关系。

本发明以逐步回归子集筛选法作为海面高度变化模态筛选方法，在实际海面高度变化时间序列 φ 的约束下，对步骤（1）生成的所有可能的多波动组分 $(|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle)$ 进行逐步回归子集筛选，将其表示为：

$$\varphi \sim \text{sift} \left(\sum_{n=1}^N |\varepsilon(k_n)\rangle \right) \quad (4)$$

基于赤池信息量准则 AIC，使用式（4）中的逐步回归子集筛选方法对所有可能的海面高度变化模态 $(|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle)$ 进行筛选，得到模态筛选结果，记为 $\{|\varepsilon(k_m)\rangle\}$ 。

基于步骤（2）筛选得到的各验潮站的多个海面高度组分，基于叠加组合的思想构

建海面高度组分与海面高度间一对多的混叠耦合的映射关系，最终达到基于多组分模拟海面高度变化的目的。

基于步骤（2）筛选所得模态 $\{\varepsilon(k_m)\}$ ，建立了真实海面高度变化时间序列与海面高度变化组分间的混叠耦合关系，并将其表示为：

$$\varphi = \sum_{m=1}^M \{\alpha_m \times \varepsilon(k_m)\} + b \quad (5)$$

其中，M 为步骤（2）筛选所得的组分数， φ 为实际海面高度变化时间序列， α_m 是具有相同组分 $\{\varepsilon(k_m)\}$ 的海面高度变化， k_m 为筛选所得组分的参数，是海面高度变化特征的重要表征参数，b 为映射常数项。

本发明实验验证的实验配置具体为：选择一组站点纬度近似相同，按经度递增分布，其中六个站点分别命名为 $N_1, N_2, \dots, N_6$ ；在多模态提取时，在研究区域不同观潮站中进行 2000 次量子游走， k 从 0.01 增加至 20，且间隔为 0.01；同时，为了评价建模效果，选取平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 来衡量模型的拟合效果，具体定义如表 1 所示；其中， δ_i 为实际海面高度； $\bar{\delta}_i$ 为海面高度平均值； $\hat{\delta}_i$ 为拟合得到的海面高度；n 为拟合样本个数。

表 1 模型建模效果评价指标定义

评价指标	公式定义
均值绝对误差 (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i $
均方根误差 (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}$
决定系数 (R^2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i ^2}{\sum_{i=1}^n \delta_i - \bar{\delta}_i ^2}$

如图 2 所示，本发明以赤道—太平洋区域海面为研究区域，选取一个月时间窗口的海面高度变化序列作为实验数据，完成了海面高度的模拟实验，模拟结果如图 3 所示。各站点模态数显示（表 2），海面波动模态数在 16(N6)~85(N2)之间，表明赤道—太平洋区域海面高度变化情况复杂，存在复杂的多尺度振荡。如图 4 所示的统计量显示，六个站点的平均模拟精度(R^2)为 0.825，MAE 范围为 11.14(N2)~26.52(N6)，RMSE 范围为

14(N2)~32.32(N6)，表明基于量子游走的海面高度模拟方法具有较高的建模精度，能够重建和反演不同频率组分的海面高度变化的随机振荡。六个站点中，N2 站点模拟精度最高，为 0.97，此外，N6 站海面高度变化最剧烈，其 MAE 为 26.52，RMSE 为 32.32，其 R^2 为 0.72，表明基于量子游走的海面高度模拟方法对不同站点的模拟误差普遍较低，即使对误差较高的站点仍有较高的模拟精度，证明了本发明提出的方法的有效性。

表 2 各站点海面高度变化模态数及评价指标

站点	海面高度变化组分数	MAE	RMSE	R^2
N1	34	24.31	31.04	0.79
N2	85	11.14	14.00	0.97
N3	50	21.51	27.14	0.83
N4	43	16.87	20.97	0.82
N5	56	20.02	25.69	0.82
N6	16	26.52	32.32	0.72

本发明认为海面高度波动是由多个具有结构相异的波动组分叠加而成的复杂的地理时空过程。在全球范围内挑选任意观潮站，利用量子游走生成连续时间内验潮站海面高度所有可能的海面高度变化组分，并在实际海面高度波动时间序列的约束下，利用特定规则筛选波动组分子集，探索多波动组分与海面高度之间的映射转化关系，实现对海面高度的建模模拟。

权利要求书

1、一种基于量子游走的海面高度模拟方法，其特征在于，包括如下步骤：

- (1) 基于量子游走生成海面高度的多波动组分；
- (2) 海面高度组分筛选；
- (3) 基于组分叠加原理模拟海面高度；
- (4) 实验验证。

2、如权利要求1所述的基于量子游走的海面高度模拟方法，其特征在于，步骤(1)中，基于量子游走生成海面高度的多波动组分具体为：当未进行观测时，任意站点的海面高度在任意时刻均以一定概率出现在任何高程，但在同一时刻，其只能在任意一个高程点，记作 $|\delta\rangle = \{|\delta_1\rangle, |\delta_2\rangle, \dots, |\delta_n\rangle\}$ ，其中：

$$|\delta_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, |\delta_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, |\delta_n\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

因此，量子游走的状态 $|\varepsilon(k)\rangle$ 被定义为所有基态的线性叠加：

$$|\varepsilon(k)\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i(k) |\delta_i\rangle \quad (2)$$

其中 $|\alpha_i(k)| \in [0, 1]$ ，表示海面高度在给定时间处于状态 $|\delta_i\rangle$ 的概率幅，基于酉变换，将状态向量 $|\varepsilon(k)\rangle$ 随时间的演化表示如下：

$$\frac{d}{dt} |\varepsilon(k)\rangle = iA |\varepsilon(k)\rangle \quad (3)$$

如式(3)所示，基于一定规则不断调整量子游走分辨率 k ，即根据量子游走构建每个站点所有可能的波动组分。

3、如权利要求1所述的基于量子游走的海面高度模拟方法，其特征在于，步骤(2)中，海面高度组分筛选具体为：在实际海面高度变化时间序列 φ 的约束下，对步骤(1)生成的所有可能的多波动组分 $(|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle)$ 进行逐步回归子集筛选，将其表示为：

$$\varphi \sim \text{sift} \left(\sum_{n=1}^N |\varepsilon(k_n)\rangle \right) \quad (4)$$

基于赤池信息量准则 AIC，使用式（4）中的逐步回归子集筛选方法对所有可能的海面高度变化模态 $\{|\varepsilon(k_1)\rangle, |\varepsilon(k_2)\rangle, \dots, |\varepsilon(k_n)\rangle\}$ 进行筛选，得到模态筛选结果，记为 $\{|\varepsilon(k_m)\rangle\}$ 。

4、如权利要求 1 所述的基于量子游走的海面高度模拟方法，其特征在于，步骤（3）中，基于组分叠加原理模拟海面高度具体为：基于步骤（2）筛选所得模态 $\{|\varepsilon(k_m)\rangle\}$ ，建立了真实海面高度变化时间序列与海面高度变化组分间的混叠耦合关系，并将其表示为：

$$\varphi = \sum_{m=1}^M \{\alpha_m \times |\varepsilon(k_m)\rangle\} + b \quad (5)$$

其中，M 为步骤（2）筛选所得的组分数， φ 为实际海面高度变化时间序列， α_m 是具有相同组分 $\{|\varepsilon(k_m)\rangle\}$ 的海面高度变化尺度因子， k_m 为筛选所得组分的参数，是海面高度变化特征的重要表征参数，b 为映射常数项。

5、如权利要求 1 所述的基于量子游走的海面高度模拟方法，其特征在于，步骤（4）中，实验验证的实验配置具体为：选择一组站点纬度近似相同，按经度递增分布，其中六个站点分别命名为 $N_1, N_2, \dots, N_6$ ；在多模态提取时，在研究区域不同观潮站中进行 2000 次量子游走， k 从 0.01 增加至 20，且间隔为 0.01；选取平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 来衡量模型的拟合效果，具体定义如表 1 所示；其中， δ_i 为实际海面高度； $\bar{\delta}_i$ 为海面高度平均值； $\hat{\delta}_i$ 为拟合得到的海面高度；n 为拟合样本个数；

表 1 模型建模效果评价指标定义

评价指标	公式定义
均值绝对误差（MAE）	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i $
均方根误差（RMSE）	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}$
决定系数（ R^2 ）	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i - \hat{\delta}_i ^2}{\sum_{i=1}^n \delta_i - \bar{\delta}_i ^2}$

。