



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116152465 A

(43) 申请公布日 2023. 05. 23

(21) 申请号 202211648870.0

(22) 申请日 2022.12.20

(71) 申请人 中国船舶集团有限公司系统工程研究院

地址 100094 北京市海淀区丰贤东路1号

(72) 发明人 吴浩晨 张驰 李鋆 张朝金  
张立琛 张凯博 闫孝伟 李建龙

(74) 专利代理机构 中国船舶专利中心 11026  
专利代理师 李朝翠

(51) Int. Cl.

G06T 17/20 (2006.01)

G06T 3/40 (2006.01)

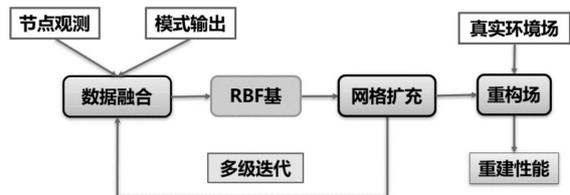
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法

(57) 摘要

本申请实施例提供了一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法。该方法用于海洋动力模式输出的低分辨网格环境场和移动节点观测的高精度数据等多源数据融合,通过多级插值重建得到高分辨、高精度的海洋环境场。多源数据融合始终在均匀网格内进行,首先通过均值替代法将移动节点观测数据融合到海洋动力模式输出的低分辨网格场中,得到融合网格场。然后构建径向基函数(RBF)网格插值模型提取网格特征,再对融合网格场进行扩充并使用网格插值模型填补网格属性值,得到扩充网格场。最后重复前述步骤,通过多级迭代完成海洋环境场的高分辨重建。本发明在海洋信息领域的多源环境场数据融合场景下,对提高环境场的分辨率和精度具有潜在应用价值。



1. 一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法,其特征在于,包括以下步骤:

- 步骤(1),移动节点观测数据融合到海洋动力模式输出的网格中;  
 步骤(2),构建径向基函数(RBF)网格插值模型提取网格特征;  
 步骤(3),扩充网格并插值填补网格属性值;  
 步骤(4),多级迭代完成高分辨环境场重建。

2. 根据权利要求1所述的一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法,其特征在于,所述步骤(1)具体包括:

假设海洋动力模式输出具有均匀网格的某海域环境场预报数据,网格点集 $T = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个网格点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该网格点的属性值(温度、盐度等);移动节点在该海域按照规划路径进行采样,可以获取到路径上的温度、盐度、深度等数据,观测点集记为 $Z = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, m\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个观测点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该观测点的属性值(温度、盐度等);

将移动节点观测数据与海洋动力模式输出的网格场融合,具体融合方法为:对于包含节点观测数据的模式输出网格点 $T_k = \{x_k, f_k\}$ ,使用该网格内所有观测点集 $Z_k = \{(x_{ki}, f_{ki}), i=1, 2, \dots, p\}$ 的属性值均值

$$f_k' = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p f_{ki}, \quad (1)$$

替代该网格属性值 $f_k$ ;对于不包含观测数据的网格,维持原数据值;最终得到属性值融合后的网格点集 $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 。

3. 根据权利要求2所述的一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法,其特征在于,所述步骤(2)具体包括:

完成网格数据融合后,构建RBF网格插值模型提取网格特征;RBF网格插值模型为:空间中给定函数 $\phi: R_+ \rightarrow R$ ,对于步骤(1)融合所得的 $n$ 个均匀网格数据点集 $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,需要找到一个函数:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (2)$$

使其满足插值条件:

$$f(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x}_k$ 为空间任意坐标点, $f(\mathbf{x}_k)$ 为该点对应的属性值 $f_k$ , $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2$ 表示任意坐标点 $\mathbf{x}_k$ 到融合网格点 $\mathbf{x}_i$ 间的欧氏距离, $w_i$ 为线性组合系数,即权重; $\phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2)$ 为 $\mathbf{x}_k$ 在中心点 $\mathbf{x}_i$ 处对应的RBF基函数,采用多二次函数形式:

$$\phi(r) = \sqrt{r^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

其中 $\sigma$ 为RBF的可变形状参数;

对于插值式中的权重系数 $w_i$ 的计算,将步骤(1)融合网格点集 $T'$ 代入公式(1),得到网格特征提取方程,即插值表达式:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $\phi_{ji} = \phi(\|x_j - x_i\|_2)$ . 令基函数矩阵  $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$ , 权重向量  $\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$ , 属性向量  $\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$ , 则插值表达式简写为:

$$\Phi \mathbf{w} = \mathbf{f}, \quad (6)$$

通过矩阵求逆, 可计算得到各网格点基函数对应的权重分量:

$$\mathbf{w} = \Phi^{-1} \mathbf{f}. \quad (7)$$

4. 根据权利要求3所述的一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法, 其特征在于, 所述步骤(3)具体包括:

通过求解插值表达式获取RBF插值系数 $w$ 后, 将网格点集 $T'$ 在各维度进行均匀划分扩充, 得到扩充后的网格点集 $T^1 = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n_1\}$ ; 将扩充网格坐标 $x_i$ 代入RBF插值式(3)中求解得到该网格点的属性值 $f_i$ , 从而实现扩充网格点集 $T^1$ 属性值的填充。

5. 如权利要求4所述的一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法, 其特征在于, 所述步骤(4)具体包括:

步骤(1)(2)(3)已经实现了初始网格的第1级扩充并获得1级插值网格场 $T^1$ ; 将扩充后的网格 $T^1$ 作为初始网格, 再次重复(1)(2)(3)步骤依次进行数据融合、网格特征提取、网格扩充, 进一步利用更多的移动节点观测信息, 将其融入新网格 $T^1$ 中并进一步扩充网格; 经过多级迭代, 不断扩充网格, 以实现海洋环境场的高分辨、高精度多级插值重建。

## 一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及海洋信息技术领域,尤其涉及一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法。

### 背景技术

[0002] 声波是海洋中传播信息的有效载体,也是探测海洋内部信息不可或缺的工具。然而海水中声速的变化会使声波在行进途中产生折射现象,从而影响其传播。因此,想要确知声波传播特性以满足水声探测、遥感与水下通信等方面的研究需求,就必须更好地捕捉声速的不确定性,获取海洋环境场完备知识。

[0003] 海洋中影响声速的环境因素主要有水体温度、盐度和压力,声速可结合温盐深数据通过经验公式计算。获取声速的途径主要有仪器直接观测、声传播模型反演、海洋动力学模型计算等。然而这些声速获取方式各有利弊:直接观测的数据精度、分辨率高,但只能获取局部短时温盐观测数据;声传播模型可高效反演获取声速,但只能获取声传播路径声速,且对噪声和模型参数失配较敏感;海洋动力模式可根据海洋动力学过程建模实现大范围环境场预报,但难以预测中小尺度环境场变化。因此如何多源数据的优势,进行海洋环境场的高分辨重建是一个尤为重要的研究课题。

### 发明内容

[0004] 本发明针对现有技术的不足,提供了一种融合海洋动力模式及海洋移动节点观测数据,实现海洋环境场高分辨插值重建的多级插值算法。本发明在多级插值算法上实现了:网格数据融合、网格特征提取、网格扩充、多级迭代完成高分辨重建。

[0005] 本申请实施例提供了一种基于多级插值法的海洋环境场重建方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤(1),移动节点观测数据融合到海洋动力模式输出的网格中;

[0007] 步骤(2),构建径向基函数(RBF)网格插值模型提取网格特征;

[0008] 步骤(3),扩充网格并插值填补网格属性值;

[0009] 步骤(4),多级迭代完成高分辨环境场重建。

[0010] 在一些实施例中,所述步骤(1)具体包括:

[0011] 假设海洋动力模式输出具有均匀网格的某海域环境场预报数据,网格点集 $T = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个网格点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该网格点的属性值(温度、盐度等);移动节点在该海域按照规划路径进行采样,可以获取到路径上的温度、盐度、深度等数据,观测点集记为 $Z = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个观测点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该观测点的属性值(温度、盐度等);

[0012] 将移动节点观测数据与海洋动力模式输出的网格场融合,具体融合方法为:对于包含节点观测数据的模式输出网格点 $T_k = \{x_k, f_k\}$ ,使用该网格内所有观测点集 $Z_k = \{(x_{ki}, f_{ki}), i = 1, 2, \dots, p\}$ 的属性值均值

$$[0013] \quad f_k' = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p f_{ki}, \quad (1)$$

[0014] 替代该网格属性值 $f_k$ ;对于不包含观测数据的网格,维持原数据值;最终得到属性值融合后的网格点集 $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 。

[0015] 在一些实施例中,所述步骤(2)具体包括:

[0016] 完成网格数据融合后,构建RBF网格插值模型提取网格特征;RBF网格插值模型为:空间中给定函数 $\phi: R_+ \rightarrow R$ ,对于步骤(1)融合所得的 $n$ 个均匀网格数据点集 $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ,需要找到一个函数:

$$[0017] \quad f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (2)$$

[0018] 使其满足插值条件:

$$[0019] \quad f(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (3)$$

[0020] 其中 $x_k$ 为空间任意坐标点, $f(x_k)$ 为该点对应的属性值 $f_k$ , $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2$ 表示任意坐标点 $x_k$ 到融合网格点 $x_i$ 间的欧氏距离, $w_i$ 为线性组合系数,即权重; $\phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2)$ 为 $x_k$ 在中心点 $x_i$ 处对应的RBF基函数,采用多二次函数形式:

$$[0021] \quad \phi(r) = \sqrt{r^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

[0022] 其中 $\sigma$ 为RBF的可变形参数;

[0023] 对于插值式中的权重系数 $w_i$ 的计算,将步骤(1)融合网格点集 $T'$ 代入公式(1),得到网格特征提取方程,即插值表达式:

$$[0024] \quad \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0025] 其中 $\phi_{ji} = \phi(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_2)$ .令基函数矩阵 $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$ ,权重向量

$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$ ,属性向量 $\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$ ,则插值表达式简写为:

$$[0026] \quad \Phi \mathbf{w} = \mathbf{f}, \quad (6)$$

[0027] 通过矩阵求逆,可计算得到各网格点基函数对应的权重分量:

$$[0028] \quad \mathbf{w} = \Phi^{-1} \mathbf{f}. \quad (7)$$

[0029] 在一些实施例中,所述步骤(3)具体包括:

[0030] 通过求解插值表达式获取RBF插值系数 $w$ 后,将网格点集 $T'$ 在各维度进行均匀划分扩充,得到扩充后的网格点集 $T^1 = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n_1\}$ ;将扩充网格坐标 $x_i$ 代入RBF插值式(3)中求解得到该网格点的属性值 $f_i$ ,从而实现扩充网格点集 $T^1$ 属性值的填充。

[0031] 在一些实施例中,所述步骤(4)具体包括:

[0032] 步骤(1)(2)(3)已经实现了初始网格的第1级扩充并获得1级插值网格场 $T^1$ ;将扩充后的网格 $T^1$ 作为初始网格,再次重复(1)(2)(3)步骤依次进行数据融合、网格特征提取、网格扩充,进一步利用更多的移动节点观测信息,将其融入新网格 $T^1$ 中并进一步扩充网格;经过多级迭代,不断扩充网格,以实现海洋环境场的高分辨、高精度多级插值重建。

[0033] 本发明的有益效果包括:

[0034] (1)本发明能够实现不同来源的海洋环境场数据的融合,特别是移动节点观测数据与海洋动力模式输出数据的融合。

[0035] (2)本发明能够融合移动节点观测数据和海洋动力模式输出数据,实现海洋环境场高分辨、高精度重建,从而提升模式预报准确度。

[0036] (3)本发明所重建出的高分辨、高精度环境场,能够用于路径规划、声场计算等多个海洋工程领域。

[0037] (4)本发明能够采用多级迭代的方式逐步融合数据并扩充网格,每次迭代都会在更小的网格中更大限度地融入移动节点观测信息,从而充分地利用移动节点观测的高精度数据。

[0038] (5)本发明进行多级插值时构建的RBF插值模型中的RBF基函数是观测点与待估计点间的距离相关函数,能够很好地利用数据点之间的空间相关性,以提高插值精度。

[0039] (6)本发明进行多级插值时可以使用不同的RBF基,这使得在不同的重建数据或场景下能够选择网格特征提取效果更好的RBF基函数,以提高插值重建精度。

## 附图说明

[0040] 附图以示例而非限制的方式大体示出了本文中所讨论的各个实施例。

[0041] 图1是本发明的多级插值环境场重建流程图;

[0042] 图2A至图2C是本发明的多级插值算法流程的简单网格变化图示;

[0043] 图3A和图3B分别是本发明的多级插值算法仿真的动力模式ROMS输出场、降采样ROMS输出场和5台移动节点采样数据图示;

[0044] 图4A和图4B分别是本发明的多级插值算法仿真4级重建结果及误差图示。

## 具体实施方式

[0045] 为了能够更加详尽地了解本申请实施例的特点与技术内容,下面结合附图对本申请实施例的实现进行详细阐述,所附附图仅供参考说明之用,并非用来限定本申请实施例。

[0046] 本发明在算法上包括以下步骤:

[0047] (1)网格数据融合

[0048] 假设海洋动力模式输出具有均匀网格的某海域环境场预报数据,网格点集 $T = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个网格点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该网格点的属性值(温度、盐度等)。移动节点在该海域按照规划路径进行采样,可以获取到路径上的温度、盐度、深度等数据,观测点集记为 $Z = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ ,其中 $x_i$ 为第 $i$ 个观测点对应的空间坐标值, $f_i$ 为该观测点的属性值(温度、盐度等)。

[0049] 将移动节点观测数据与海洋动力模式输出的网格场融合,具体融合方法为:对于包含节点观测数据的模式输出网格点 $T_k = \{x_k, f_k\}$ ,使用该网格内所有观测点集 $Z_k = \{(x_{ki},$

$f_{ki}), i=1, 2, \dots, p\}$  的属性值均值

$$[0050] \quad f_k' = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p f_{ki}, \quad (1)$$

[0051] 替代该网格属性值  $f_k$ ; 对于不包含观测数据的网格, 维持原数据值。最终得到属性值融合后的网格点集  $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 。

[0052] (2) 网格特征提取

[0053] 完成网格数据融合后, 构建径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 网格插值模型提取网格特征。RBF 网格插值模型为: 空间中给定函数  $\Phi: R_+ \rightarrow R$ , 对于步骤 (1) 融合所得的  $n$  个均匀网格数据点集  $T' = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n\}$ , 需要找到一个函数:

$$[0054] \quad f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (2)$$

[0055] 使其满足插值条件:

$$[0056] \quad f(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (3)$$

[0057] 其中  $x_k$  为空间任意坐标点,  $f(x_k)$  为该点对应的属性值  $f_k$ ,  $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2$  表示任意坐标点  $x_k$  到融合网格点  $x_i$  间的欧氏距离,  $w_i$  为线性组合系数, 即权重。  $\phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2)$  为  $x_k$  在中心点  $x_i$  处对应的 RBF 基函数, 采用多二次函数形式:

$$[0058] \quad \phi(r) = \sqrt{r^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

[0059] 其中  $\sigma$  为 RBF 的可变形状参数。

[0060] 对于插值式中的权重系数  $w_i$  的计算, 将步骤 (1) 融合网格点集  $T'$  代入公式 (1), 得到网格特征提取方程, 即插值表达式:

$$[0061] \quad \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0062] 其中  $\phi_{ji} = \phi(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_2)$ 。令基函数矩阵  $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$ , 权重向量

$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$ , 属性向量  $\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$ , 则插值表达式简写为:

$$[0063] \quad \Phi \mathbf{w} = \mathbf{f}, \quad (6)$$

[0064] 通过矩阵求逆, 可计算得到各网格点基函数对应的权重分量:

$$[0065] \quad \mathbf{w} = \Phi^{-1} \mathbf{f}. \quad (7)$$

[0066] (3) 网格扩充

[0067] 通过求解插值表达式获取 RBF 插值系数  $w$  后, 将网格点集  $T'$  在各维度进行均匀划分扩充 (一般扩充为原来的 2 倍), 得到扩充后的网格点集  $T^1 = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n_1\}$ 。将扩充网格坐标  $x_i$  代入 RBF 插值式 (3) 中求解得到该网格点的属性值  $f_i$ , 从而实现扩充网格点集

$T^1$ 属性值的填充。

[0068] (4) 多级迭代重建环境场

[0069] 在前面的步骤中,已经实现了初始网格的第1级扩充。将扩充后的网格 $T^1$ 作为初始网格,再次重复(1)(2)(3)步骤依次进行数据融合、网格特征提取、网格扩充,进一步利用更多的移动节点观测信息,将其融入新网格 $T^1$ 中并进一步扩充网格。经过多级迭代,不断扩充网格,以实现海洋环境场的高分辨、高精度多级插值重建。

[0070] 实施例1:

[0071] 本实施例对本发明在实际应用中的总体流程进行说明,并进行仿真分析。

[0072] 如图2A中的网格及散点所示,假设海洋动力模式输出的是 $a \times b$ 的二维低分辨率网格场 $T = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,其中 $n = a \times b$ ;按规划的竖直路径航行的3台移动节点观测散点集合 $Z = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ 。将移动节点观测数据 $T$ 与海洋动力模式输出的网格场 $Z$ 使用均值替代算法进行融合,具体融合方案为:对于包含3台移动节点观测数据的模式输出网格点 $T_k = \{x_k, f_k\}$ ,使用该网格内所有观测点集 $Z_k = \{(x_{ki}, f_{ki}), i = 1, 2, \dots, p\}$ 的属性值均值

$$[0073] \quad f_k' = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p f_{ki} \quad (1)$$

[0074] 替代该网格属性值 $f_k$ ;对于不包含观测数据的网格,维持原数据值。最终得到如图2B所示的属性融合后的网格场 $T' = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,其中深色网格为属性值被替换的网格,移动节点途径的网格场均发生数据变更,以提升当前网格精度。

[0075] 构建径向基函数(RBF)插值函数式:

$$[0076] \quad f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (2)$$

[0077] 使其满足插值条件:

$$[0078] \quad f(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2), \quad (3)$$

[0079] 其中 $x_k$ 为空间任意坐标点, $f(x_k)$ 为该点对应的属性值 $f_k$ , $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2$ 表示任意坐标点 $x_k$ 到融合网格点 $x_i$ 间的欧氏距离, $w_i$ 为线性组合系数,即权重。 $\phi(\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i\|_2)$ 为 $x_k$ 在中心点 $x_i$ 处对应的RBF基函数,采用多二次函数形式:

$$[0080] \quad \phi(r) = \sqrt{r^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

[0081] 其中 $\sigma$ 为RBF的可变形状参数。

[0082] 对于任意坐标点 $x_k$ ,要求得对应的属性估计值 $f_k$ ,需要计算出RBF插值函数式的所有权重分量 $w_i$ 。将融合网格场 $T'$ 代入RBF插值表达式

$$[0083] \quad \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

[0084] 其中 $\phi_{ji} = \phi(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_2)$ 。令基函数矩阵 $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$ ,权重向量

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \text{属性向量 } \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}, \text{则插值表达式简写为:}$$

$$[0085] \quad \Phi \mathbf{w} = \mathbf{f}, \quad (6)$$

[0086] 通过矩阵求逆解方程组,可计算得到各网格点基函数对应的权重分量:

$$[0087] \quad \mathbf{w} = \Phi^{-1} \mathbf{f}. \quad (7)$$

[0088] 对融合网格 $T'$ 进行网格坐标扩充,在各维度扩充为原来的2倍。本例中,原始 $a \times b$ 的网格 $T'$ 将扩充为 $(2a-1) \times (2b-1)$ 的新网格场 $T^1 = \{(x_i, f_i), i=1, 2, \dots, n_1\}$ ,其中 $n_1 = (2a-1) \times (2b-1)$ 。对于扩充后的网格场 $T^1$ ,需要填充各网格点 $x_i$ 的属性值 $f_i$ ,属性值 $f_i$ 可通过将扩充网格坐标 $x_i$ 代入RBF插值函数式(3)中计算得到。

[0089] 此时已完成第1级网格扩充,再次重复数据融合、RBF插值模型构建、网格特征提取、网格扩充并填充属性值,以实现第2、3、...、 $n$ 级扩充,直到获得如图2C所示的满足分辨率要求的网格场,此时环境场重建完成。进一步地,如图1所示,将重建后的高分辨环境场与真实环境场数据进行对比,可以分析重建场的精度和多级插值算法的重建性能。

[0090] 实例说明:为验证基于多级插值法的海洋环境场插值重建算法的有效性,下面进行海洋环境场的二维仿真分析。图3A所示为区域海洋模式系统(ROMS)输出的某海域 $321 \times 321$ 的温度网格场,对其附加 $N(1, 0.25)$ 的高斯噪声(单位: $^{\circ}\text{C}$ ),并在此基础上降采样得到 $21 \times 21$ 的ROMS降采样场,作为模式输出数据,而原ROMS场用于和多级插值重建场进行对照。在原ROMS网格场中模拟规划5台移动节点的航行路径并采样路径上各点所对应网格点的温度值,作为高精度观测数据。图3B展示了降采样ROMS场和模拟的移动节点采样散点温度值。使用多级插值重建算法,首先进行数据融合、构建RBF基提取网格特征、扩充网格并插补温度值,经4级迭代扩充网格(网格点数变化依次为 $21 \times 21 \rightarrow 41 \times 41 \rightarrow 81 \times 81 \rightarrow 161 \times 161 \rightarrow 321 \times 321$ )后,重建得到温度复原场如图4A所示。将温度复原场与原始ROMS输出温度场进行对比,图4B展示了温度复原场的误差绝对值,可以看出在移动节点采样路径附近,复原场的误差明显较低,重建效果较好,移动节点路径较远处,因为与观测点距离较远,观测点所提供的高分辨高精度信息量有所降低,因此重建误差较高。整体而言,本发明的多级插值算法在本例中表现较好,尤其是对移动节点观测路径附近网格的重建。

[0091] 以上描述仅为本申请的较佳实施例以及对所运用技术原理的说明。本领域技术人员应当理解,本申请中所涉及的公开范围,并不限于上述技术特征的特定组合而成的技术方案,同时也应涵盖在不脱离上述公开构思的情况下,由上述技术特征或其等同特征进行任意组合而形成的其它技术方案。例如上述特征与本申请中公开的(但不限于)具有类似功能的技术特征进行互相替换而形成。

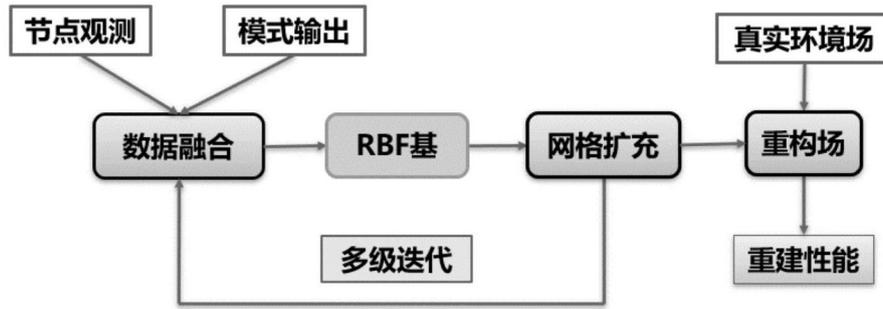


图1

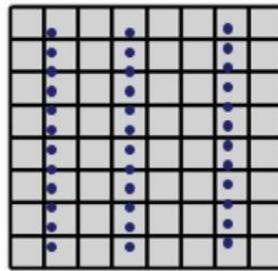


图2A

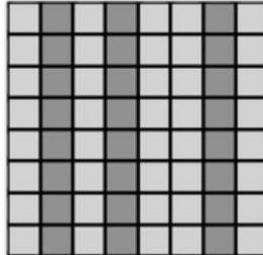


图2B

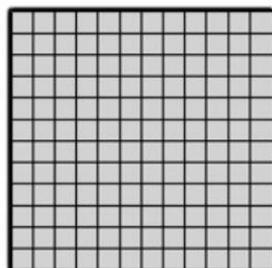


图2C

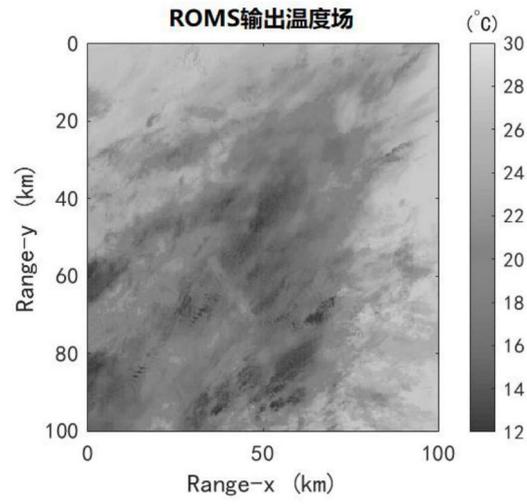


图3A

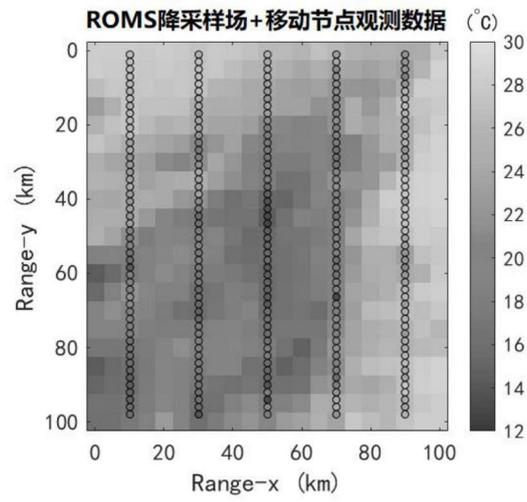


图3B

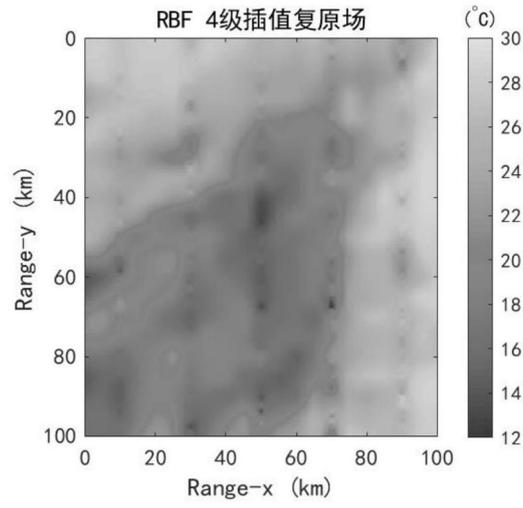


图4A

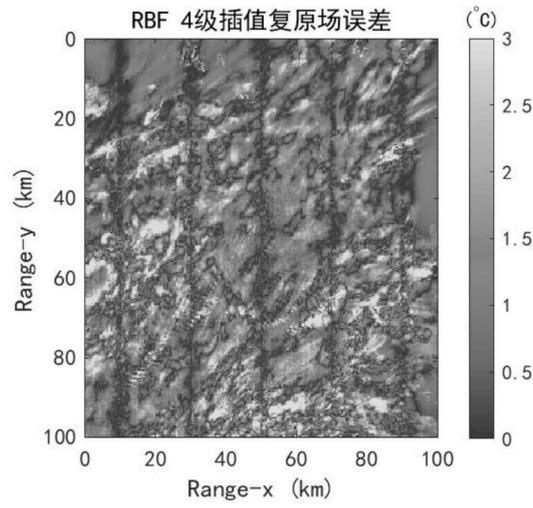


图4B