

文章编号: 1005-0930(2012)08-0563-018 中图分类号: P282 文献标识码: A
doi: 10.3969/j.issn.1005-0930.2012.08.003

基于分数进制小波变换的分辨率 可指定的 DEM 综合方法

王海江¹, 杨勤科², 王春梅¹, 郭伟玲¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 2. 西北大学城市与环境学院 陕西 西安 710069)

摘要: DEM 的尺度效应研究需要分辨率连续变化的, 空间定位基础一致的 DEM 数据作为数据源. 针对这种需求, 本文基于采样定理与分数进制小波变换, 探讨了一种由较高分辨率 DEM 生成较低分辨率 DEM 的有效综合方法. 首先基于采样定理分析了 DEM 分辨率与最高频率的关系, 提出了通过降低 DEM 有效最高频率获得分辨率指定的 DEM 的新思路; 然后基于该思路, 探讨了分数进制小波变换自由精细的时频分解性能, 以及对各分解部分的基于能量的阈值处理过程, 进而实现了一种分辨率可指定的 DEM 综合方法; 最后, 对所指定的分辨率的合理性、空间定位的一致性、所生成 DEM 的综合效果进行了实验论证, 并将所得 DEM 与由地形图派生的 DEM 以及由常规方法所得的 DEM 进行了对比分析, 结果验证了该方法的有效性.

关键词: DEM 综合; 分数进制小波变换; 分辨率; 能量; 频谱

DEM 的尺度效应深刻影响着 DEM 应用的适宜性与可靠性, 关系到 DEM 能否真正应用于实践, 成为当前研究热点^[1-2]. 尺度效应的研究, 需要分辨率能够连续变化的、空间定位一致性较好的 DEM 作为数据源. 一种途径是利用多种比例尺地形图生成多种分辨率 DEM, 但在此过程中存在着空间定位基础的配准精度问题, 其误差将给后续分析带来一定程度的不确定性^[2]. 图 1 显示了黄土高原同一地区由不同比例尺地形图经 ANUDEM 专业插值软件采用 Hutchinson 算法生成的不同分辨率的 DEM^[2-3], 以及相应的等高线叠置情况. 从中可看出这种不确定性差异. 同时该方法也无法生成分辨率连续变化的 DEM 数据.

另一途径是首先基于大比例尺地形图建立高分辨率 DEM, 然后通过对其表面综合概括, 生成空间定位基础一致的、分辨率较低的 DEM^[2]. 常规方法有双线性、双三次等内插方法, 但这些方案对于同一地区不同分辨率的 DEM 均需新构建, 各种分辨率之间无法进行转换, 同时缺乏简捷有效的逆过程^[4]. 小波变换等方法具备时频多分辨率特性, 能够在

收稿日期: 2011-01-06; 修订日期: 2011-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40971173)

作者简介: 王海江(1979—), 男, 博士研究生. E-mail: wanghaijiang_study@126.com

通讯作者: 杨勤科(1962—), 男, 博士, 教授. E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

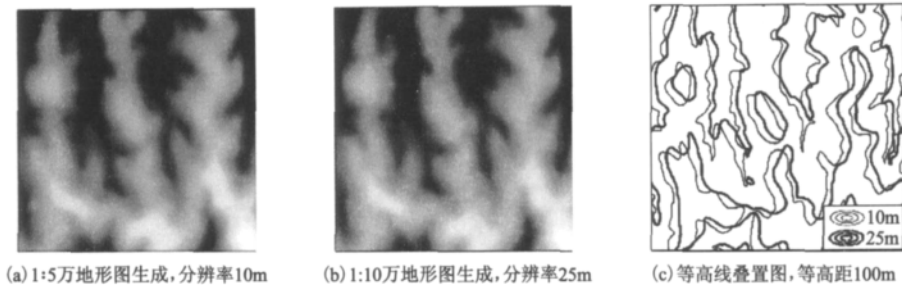


图1 同一地区由不同比例尺地形图插值生成的 DEM 的等高线叠置情况

Fig. 1 Contour overlay of DEMs interpolated from topographic maps with different scales

不同的时频分辨率下表达对象不同详细程度的特征信息,较好地弥补了上述缺陷,受到学者关注^[1-2, 4-10].然而,对于如何基于该方法进一步生成分辨率可连续变化或能自由指定的 DEM,目前研究较少,且主要是通过直接对小波高频系数作阈值处理,保留不同百分比数量的较大系数来实现^[8-10].

DEM 是一类二维信号,其空间域的采样率(或采样间隔,即水平分辨率)与其频域的最高频率之间存在着一定关系,而现有研究尚未对其深入分析.本文首先从采样定理出发分析了这种关系,在此基础上,探讨了如何通过定量降低 DEM 的有效最高频率来实现降低其采样率至指定值,即如何通过运用两者关系生成指定分辨率的综合 DEM;然后借助于分数进制小波变换实现了这一方法;最后,通过目视对比分析、高程统计指标分析、坡度与剖面曲率频率分布分析、等高线与河流总长度统计分析等,对所得的综合 DEM 进行了实验论证,结果显示了本方法在一定范围内的适用性.

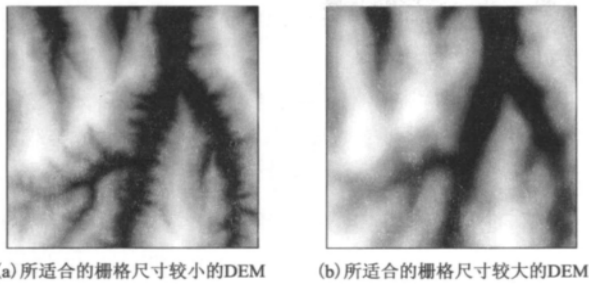
本文探讨的 DEM 均为格网型.对 DEM 的分析、综合处理在 Matlab 平台中参照相关算法编程实现;之后对所得综合 DEM 的实验论证在 Matlab 与 ArcGIS 平台中联合实现.

1 方法分析

1.1 基本原理

地面高程模型(DEM)是实际地表高程表面的逼近.具有不同逼近程度或详细程度信息的 DEM 所适合的栅格尺寸有所不同:栅格尺寸过大将导致某些细节信息无法表达,过小则造成数据冗余.此最适合的栅格尺寸即为 DEM 的水平分辨率^[11].图 2 显示了同一地区两幅具有不同详细程度地表高程信息的 DEM,两者各自所适合的栅格尺寸也不相同. DEM 作为一种二维信号,其分辨率的选取问题即是其重采样时采样间隔的选取问题,因此在这一过程中需要考虑到采样定理的约束.

假定二维信号 $g(x, y)$, $x, y \in (-\infty, +\infty)$ 具有有限带宽, $G(u, v)$ 为其傅里叶变换, f_{max_u} 和 f_{max_v} 分别为其在 u, v 方向上的带宽或最高频率(此处频率的含义为单位长度内高程值的周期性变化次数^[12]) 则有:当 $|u| \notin [0, f_{max_u}]$ 或 $v \notin [0, f_{max_v}]$ 时, $G(u, v) = 0$, 即原信号在频域(uv 域)的频谱信息集中在长宽为 $2f_{max_u}, 2f_{max_v}$ 的矩形范围内,如图 3 所示.数字技术的广泛应用需要连续信号的数字化,采样是数字化的首要过程.为确保采样时信



(a) 所适合的栅格尺寸较小的DEM (b) 所适合的栅格尺寸较大的DEM

图2 同一地区具有不同分辨率的 DEM

Fig. 2 DEMs with different resolutions, in the same area

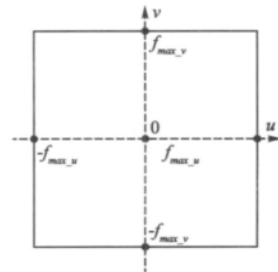


图3 *uv* 域中频谱的分布范围

Fig. 3 Distribution of spectrum

息不丢失, 采样时所采用的采样间隔或采样率必须满足采样定理, 即

$$\begin{cases} \frac{1}{\Delta x} \geq 2f_{max_u} \text{ 或 } f_{sam_x} \geq 2f_{max_u} \\ \frac{1}{\Delta y} \geq 2f_{max_v} \text{ 或 } f_{sam_y} \geq 2f_{max_v} \end{cases}$$

当信号的频谱信息并没有集中分布于一个有限的范围时, 可以采用一个低通抗混叠滤波器对其作预处理, 使其最高频率降至某指定值. 采样定理在采样过程中确保信息不丢失方面起着理论上的保证作用, 其是否能得到满足往往关系到后续处理的成败与质量^[12-43].

DEM 水平、垂直两个方向的采样间隔或采样率通常相等, 即有 $f_{sam_x} = f_{sam_y}$. 根据离散傅里叶变换(DFT)理论, 在一个主值周期内, 有 $f_{max_u} = f_{max_v}$ (鉴于 DFT 的快捷有效性, 本文中采用 DFT 进行傅里叶分析). 由此以下用 f_{sam} 表示空间域两个方向的采样率, f_{max} 表示为频域两个方向的最高频率(简称最高频率). 采样定理要求 f_{sam} 与 f_{max} 的比值 n 必须大于等于 2; 但 n 也不可过大, 以避免不必要的冗余.

在建立了采样率与最高频率之间的关系后, 如能通过某种方法将具有较高采样率的 DEM(以下称为原 DEM) 的最高频率降低至指定值, 即可尝试获得所适合的采样率降至指定值的综合 DEM.

1.2 实现过程

对于如何由原 DEM 生成指定分辨率的综合 DEM, 基本思路为:

(1) 从频域能量分布的角度分析如何更有效地定义与计算 DEM 的频域最高频率;

(2) 先假定通过某种方法可以得到原 DEM 在频域中的任意频域部分信息(如借助小波变换可以得到某些频域部分的空间域信息), 并能将处理后的各频域部分重构回原空间域, 然后在此基础上探讨以下内容: 如何合理划分频域范围, 如何对这些频域范围进行合理的处理, 最终使原 DEM 频域的最高频率降至指定值;

(3) 探讨实现上一步假定条件的方法: 即如何将原 DEM 分解至不同部分, 各部分包含了原 DEM 频域中指定频域范围的信息, 之后还能将处理后的各部分重构, 得到不同的频域范围被分别处理后的综合 DEM.

1.2.1 计算有效最高频率 在 *uv* 域, DEM 二维 DFT 频谱中的频率分布范围 R 为一个以原点 $(0, 0)$ 为中心的矩形区域. 其边长为其频谱中最高频率 f_{max} 的两倍. 根据 DFT 理论,

f_{max} 为 f_{sam} 的 $1/2$ 。然而,由下可知,由于 DEM 中反映的地表高程通常是逐渐变化的, R 范围内的绝大多数能量汇聚在与原点距离较近的较低频率上,并且随着与原点距离的增加频率所贡献的能量急剧减少,这样分布在外围的较高频率虽覆盖了较大频域范围,所贡献的能量却极近于 0。因此 R 中的最高频率并没有有效表达 DEM 在频域的能量分布范围。以下以具体实例进行分析。

如图 4 所示,图 (a) 和图 (b) 为两个不同地区的 DEM,两者均具有较高的空间域采样率: 栅格尺寸均为 2.5m,即水平、垂直两方向采样率均为每千米 400 个。DEM1 行列数量均为 1200,即其在水平、垂直两方向上采样个数均为 1200 个; DEM2 行列数量均为 1500,相应的在两方向上采样个数均为 1500 个。两者的坡度频率曲线如图 5 所示。图中显示: DEM1 中地形起伏与 DEM2 相比稍缓。

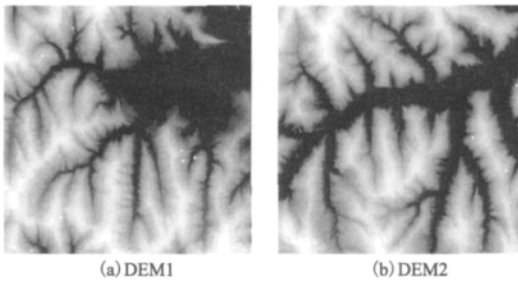


图 4 分析所用的 DEM 数据
Fig. 4 DEM data used for analysis

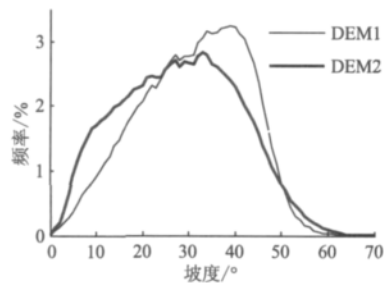


图 5 两 DEM 的坡度频率曲线
Fig. 5 Slope-frequency curves of the DEMs

首先对 DFT 幅值谱进行分析。从图 6 (a)、(b) 均可以看出(图中最低频位于原点;且为增强显示效果,对幅值 $|H|$ 作了对数变换 $\log_{10}(1 + |H|)$ [12]): 亮度由中心向四周急剧变暗,即幅值随着频率大小的减小急剧衰减。此外还可以看出,图 6 (a) 中较大亮度值的分布与图 6 (b) 相比更趋向于中心,这是因为 DEM1 与 DEM2 相比地形起伏较缓,致使频谱中较大的幅值更趋向于低频。

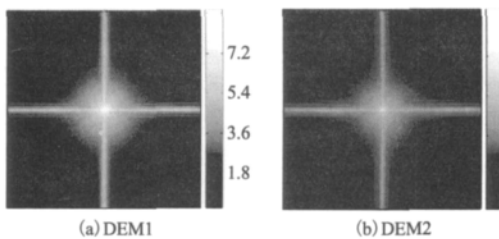


图 6 两 DEM 的幅值频谱图
Fig. 6 Amplitude-frequency spectrum of the DEMs

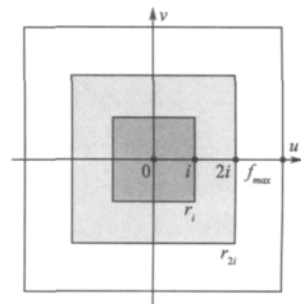


图 7 r_i 示意图

DFT 频谱只是直观地显示了随着频率的增加幅值在急剧减少。为进一步分析 R 内的能量分布,统计 R 中 $r_i (i \in [0, f_{max}])$ 范围所贡献的能量,之后绘制频率-能量图以及频率-累积能量图作进一步分析(如图 7 所示 r_i 为中心位于原点的正方形的边线所覆盖的点 (u, v) 的集合。这些点所具有的最高频率为 i ,故正方形的边长为 $2i$ 。若频率 (u, v) 属于 r_i ,

则 $|u| = i, |v| \in [0, i]$, 或 $|u| \in [0, i], |v| = i$. 具体过程为:

(1) 将幅值谱中各值 $|H|$ 由 $|H|^2$ 变换得到功率谱. 功率谱中的值为各点对应的频率所贡献的能量;

(2) 统计功率谱中 r_i 范围内值的和与 R 内值的和, 计算两者之比, 得到 r_i 范围贡献的能量与总能量的比值. 然后以 i 为横坐标, 此比值为纵坐标绘制频率-能量图, 如图 8 所示. 图中对纵坐标作了对数变换, 以更好地反映能量的急剧下降趋势;

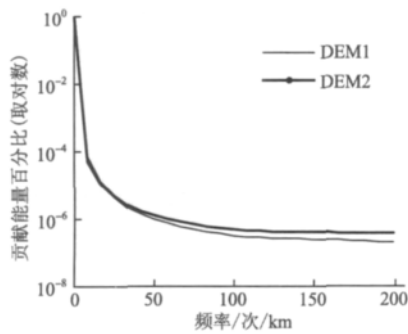


图 8 两 DEM 的频率-能量图
Fig. 8 Frequency-energy diagram

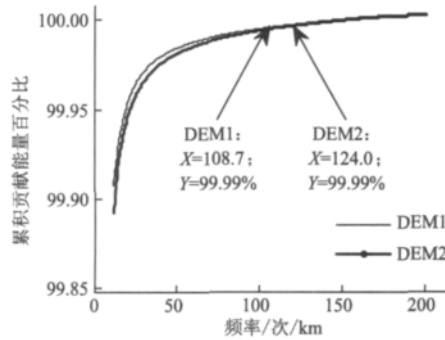


图 9 两 DEM 的频率-累积能量图
Fig. 9 Frequency-cumulative energy diagram

(3) 计算由上一步得到的序列的累积和, 得到边长为 $2i, i \in [0, f_{max}]$ 的正方形范围 $Y_{k=0}^i r_k$ 内的能量与总能量的比值(如图 7 中的各阴影部分所示, 在此范围内, $|u|, |v| \in [0, i]$). 之后以 i 为横坐标, 此比值为纵坐标绘制频率-累积能量图, 如图 9 所示.

图 8、图 9 显示: 在频率 i 达到一定值后, 由 r_i 范围贡献的能量将会极少, 且 r_i 外围的较大的频域范围贡献的能量极近于 0. 如在图 9 中, DEM1、DEM2 在 i 分别大于 108.7、124 时 r_i 外围的频域范围所贡献的能量已小于 0.01%. 对于这两幅具有不同地形起伏特征的 DEM, DFT 频谱图中的最高频率 f_{max} 并没有有效地反映出频率-能量图中的能量分布范围. 此外, 对具有不同地形起伏特征的其它 DEM 数据的重复试验表明, 这一现象对于 DEM 这类反映了地表高程逐渐变化的二维信号具有普遍性; 同时, 通常空间域离散信号经 DFT 变换后不具有有限带宽, 即其频率-能量图中的 f_{max} 虽然极小, 但仍不为 0. 在这种情况下, 将其频谱图中的 f_{max} 作为其最高频率并不合理. 基于以上分析, 可以用累积能量已达到某一阈值 T 时的频率 i 来更有效地表达信号的能量分布范围(如在本文设定 T 为 99.99%), 以下称其为有效最高频率 f_{eff} .

1.2.2 合理划分频域范围 为定量降低 DEM 频域的有效最高频率 f_{eff} , 在求得 f_{eff} 后, 需先将 R 分解为若干包含不同频域信息的频域范围, 即对其频域进行合理的分解, 得到若干频域范围, 再对各频域范围分别作不同的阈值处理. 如上所述, 以下先假设可通过某种方法实现频域的自由分解(即按需分解), 在此基础上分析通过划分频域范围, 以及对各频域范围作阈值处理最终实现降低原 DEM 有效最高频率至指定值的过程. 1.2.4 节探讨如何实现频域的自由分解.

借助频率-能量图可以更好地说明此过程, 如图 10 所示. 原 DEM 所需划分的各频域范围为:

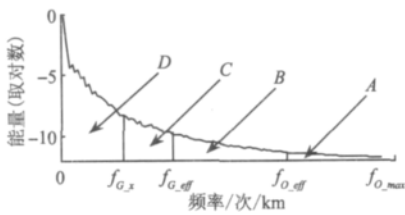


图 10 频域范围的按需划分

Fig. 10 Partition of required frequency scopes

范围 A: 此范围内 $|u|, |v| \in [f_{G,max} f_{0,max}]$, 即 $Y_{k=f_{G,max}}^{f_{0,max}} r_k \cdot f_{G,max} f_{0,max}$ 分别为目标 DEM (即欲生成的综合 DEM) 与原 DEM 频谱图中的最高频率. $f_{0,max}$ 可利用原 DEM 的采样率, 通过以上分析的其与采样率之间的关系求出. $f_{G,max}$ 与目标 DEM 的采样率也有此关系. 目标 DEM 的分辨率即采样间隔设定后, 利用采样间隔与采样率的倒数关系求得采样率. 然后根据以上分析求出目标 DEM 频谱中的最高频率 $f_{G,max}$.

范围 B: 此范围内 $|u|, |v| \in [f_{G,eff} f_{G,max}]$, 即 $Y_{k=f_{G,eff}}^{f_{G,max}} r_k \cdot f_{G,eff}$ 通过下式求得: $f_{G,max}/f_{G,eff} = f_{0,max}/f_{0,eff}$. 在此可看出: 若原 DEM 的采样间隔足够小, 即其满足采样定理, 如能通过某种方法将其 $f_{0,eff}$ 降至 $f_{G,eff}$, 则此式保证了目标 DEM 采样率与其有效最高频率的比值 n 与原 DEM 的相应值一致, 也就从理论上保证了综合 DEM 的采样率满足采样定理.

范围 C: 此范围内 $|u|, |v| \in [f_{G,x} f_{G,eff}]$, 即 $Y_{k=f_{G,x}}^{f_{G,eff}} r_k$. 其频域范围相对宽度与范围 B 相应值一致, 用以避免频域能量陡降引起的“振铃效应”^[13]. 频带相对宽度为频宽与频带中心频率的比值. 由此 $f_{G,x}$ 可依下式求出: $(f_{G,eff} - f_{G,x}) / [(f_{G,eff} + f_{G,x}) / 2] = (f_{G,max} - f_{G,eff}) / [(f_{G,max} + f_{G,eff}) / 2]$.

范围 D: 此范围内 $|u|, |v| \in [0 f_{G,eff}]$, 即 $Y_{k=0}^{f_{G,x}} r_k$. 其包含了综合处理中需保留的原 DEM 的低频信息.

1.2.3 对各频域范围实施基于能量的阈值处理 各频域范围阈值依各范围所应保留的能量分别设定. 阈值处理使各范围中的能量集中于此范围内大于该阈值的高频系数上, 从而能够最大限度地提取该频域范围的局部特征. 目标 DEM 各频域范围应保留的能量为:

$E_{G,A}$: 即目标 DEM 频域范围 A 应保留的能量, 以下类同. $E_{G,A}$ 对于原 DEM 贡献能量极少, 为 $1 - T$. 对于主要包含低频信息的目标 DEM, 可降为 0.

$E_{G,B}$: 对于目标 DEM $f_{G,eff}$ 之前的频率所贡献的能量应达到阈值 T , 故有等式:

$$E_{G,B} / (E_{G,A} + E_{G,B} + E_{G,C} + E_{G,D}) = 1 - T \quad (1)$$

$E_{G,D}$: 此范围内能量应保持不变, 即 $E_{G,D} = E_{0,D}$. $E_{0,D}$ 为原 DEM 频域范围 D 内能量, 以下类同.

$E_{G,C}$: 其设置目的是为了目标 DEM 的能量在频域出现陡降, 故范围 B、C 与 D 中能量减少率的变化应具有平滑趋势, 且为非线性. 经试验, 设置为等比数列. 因 $E_{G,D}/E_{0,D} = 1$ 如 $E_{G,B}/E_{0,B} = K$ 则 $E_{G,C}/E_{0,C} = K^{1/2}$. 故有等式

$$E_{G,B}/E_{0,B} = (E_{G,C}/E_{0,C})^{1/2} \quad (2)$$

在频域分解进而提取出所需的频域范围后, 等式(1)、等式(2)中, 只有 $E_{G,B}$ 、 $E_{G,C}$ 为未知变量. 由两式建立的方程组即可求出未知变量, 最终求出目标 DEM 在各个频域范围所应保留的能量.

按所求得能量值对原 DEM 各频域范围阈值处理后 (本文采用硬阈值方法^[12]), 各频域范围能量依需降低, 有效最高频率也被降至指定值.

1.2.4 基于分数进制小波变换自由的频域分解 可以看出,上述的所有处理环节建立在频域的自由分解能够实现的基础上. 频域分析常用的方法有傅里叶变换与整数进制小波变换方法,但在此都无法满足要求. 前者的频域分解较为精细,但却无法同时表达空间域信息;后者弥补了前者的不足,能够有效提取某些频域范围对应的空间域中的局部显著特征,但这些频域范围的位置却无法根据需要实施调整,即无法实现自由的分解频域. 分数进制小波变换使两者优势互补,能够满足本方法需求.

早期分数进制小波变换研究集中在临界采样方面(如 Aucher, Vetterli 的研究),频域分解能力得到了提高,但空间域分解能力依然不足^[14]. 2009 年 Selesnick I 等提出完备采样分数进制小波变换(Overcomplete Rational-Dilation Wavelet Transform, RWT)^[14-15],该方法在两方面的分解能力均得到提高. 这种改进在 RWT 对空间域频域平面更为稠密的采样方式中得到体现.

图 11 展示了不同小波变换方法的空间域频域平面采样方式,对其进行分析有助于理解它们的关系^[14]. 由图 12(a)中过程实现的二进制小波变换 DWT 的空间域频域采样率分别为 $\{A=2, B=2\}$; 由图 12(b)实现的临界采样分数进制小波变换的采样率为 $\{A=q/p, B=q/p\}$ ($p < q$, 且均为正整数; $p' = q - p$).

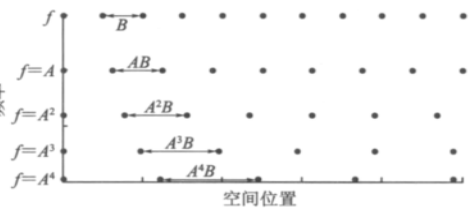


图 11 不同方法的空间域频域平面采样方式 Fig. 11 Sampling lattice in space-frequency plane

基于完备采样的小波变换的采样可更稠密,如双密度小波变换将二进制小波变换的时域采样率提高了一倍,即 $\{A=2, B=1\}$, 而由图 12(c)实现的 RWT 的采样率为 $\{A=q/p, B=s\}$ (s 为正整数). 可以看出, RWT 通过 $s, q/p$ 分别控制着空间域、频域的采样率. 两者的减小会增加分解的冗余,但却能换来较高的空间域频域采样率,使其在某些应用领域具有优势.



图 12 不同小波变换方法的分解重构过程

Fig. 12 Decomposition and reconstruction process of different methods

分析由小波变换得到的信号各分解部分所对应的频谱与原信号频谱在频域的分布关系可以进一步了解小波变换的频域分辨率性能^[12, 16]. RWT 对二维信号的分解过程与 DWT 相同: 每层分解只对上一层的低频部分进行,得到此层的一个低频部分和 3 个高频部分. 假定原信号 l_0 的采样个数为 $f_{sam} \times f_{sam}$. 图 13 展示了在空间域对 l_0 作二层分

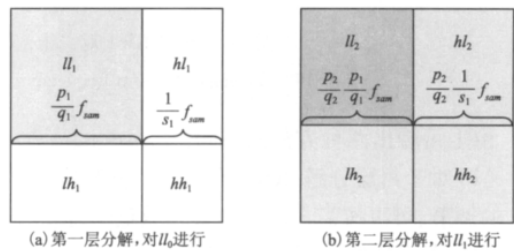


图 13 RWT 对二维信号在空间域的分解

Fig. 13 Decomposition in space domain via RWT

解的过程: 第一层分解对 ll_0 进行, 得到低频部分 ll_1 与水平、垂直、对角 3 个方向上的高频部分 hl_1 、 lh_1 、 hh_1 ; 第二层对 ll_1 进行, 得到 ll_2 与 hl_2 、 lh_2 、 hh_2 . 相应的, 第 j 层分解对 ll_{j-1} 进行, 得到 ll_j 与 hl_j 、 lh_j 、 hh_j . 图中还显示了 m 层分解前后数据量的变化: DWT 所得数据量无变化; RWT 所得数据量可适度调控, 变化率为

$$\sum_{j=1}^m (p_{j-1}/q_{j-1})^2 (p_j/q_j + 1/s_j)^2 \tag{3}$$

其中 $p_0/q_0 = 1$. 假设 ll_0 的 DFT 频谱 LL_0 中的频率大小分布范围为 $0 \sim f_{max}$. 图 14 显示了与空间域分解对应的频域分解过程, 注意由小写字母表示的空间域各部分与由大写字母表示的频域各部分之间的对应关系. 图 14 (a) 展示了二进制小波变换相应情况: 第一层分解得到的低频部分的频率大小范围(即频谱 LL_1 覆盖的频率大小范围)为 $0 \sim 1/2 f_{max}$, 高频部分的频率大小范围(即 LH_1 、 HL_1 、 HH_1 的并集覆盖的频率大小范围)为 $1/2 f_{max} \sim f_{max}$; 第二层得到的低频、高频部分的频率大小范围分别为 $0 \sim 1/2^2 f_{max}$ 、 $1/2^2 f_{max} \sim 1/2 f_{max}$. 相应的, 第 j 层分解得到的低频、高频部分的频率大小范围分别为 $0 \sim 1/2^j f_{max}$ 、 $1/2^j f_{max} \sim 1/2^{j-1} f_{max}$ [12, 16]. 可以看出采用 DWT 对频域进行分解, 分解点的位置只能为 $1/2^j$, 不能按需调整到其它位置. 图 14 (b) 展示了 RWT 的相应情况: 第一层分解时参数 p 、 q 分别取值为 p_1 、 q_1 , 所得低频、高频部分的频率大小范围分别为 $0 \sim (p_1/q_1) f_{max}$ 、 $(p_1/q_1) f_{max} \sim f_{max}$. 相应的, 第二层参数取值为 p_2 、 q_2 , 所得低频、高频部分的频率大小范围分别为 $0 \sim (p_2/q_2) (p_1/q_1) f_{max}$ 、 $(p_2/q_2) (p_1/q_1) f_{max} \sim (p_1/q_1) f_{max}$. 相应的, 第 m 层分解对 ll_{m-1} 进行, 相应的低频、高频部分的频率大小范围分别为 $0 \sim \prod_{j=1}^m (p_j/q_j) f_{max}$ 、 $\prod_{j=1}^m (p_j/q_j) f_{max} \sim \prod_{j=1}^{m-1} (p_j/q_j) f_{max}$.

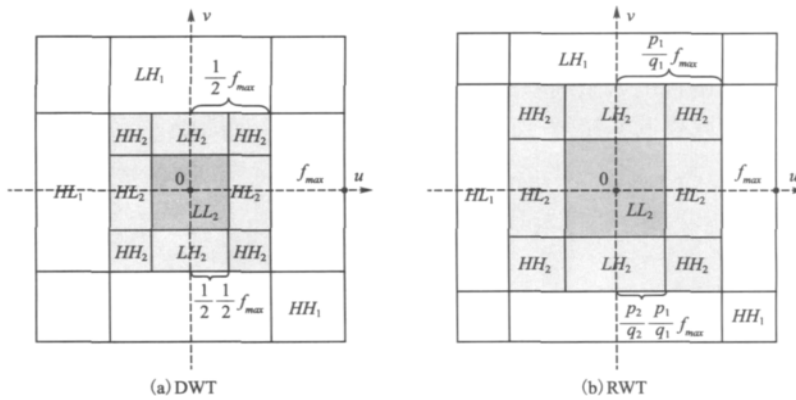


图 14 DWT, RWT 对二维信号在频域的分解

Fig. 14 Decompositions in frequency domain via DWT and RWT

由上可看出两种方法的不同:

(1) 对于每层分解, RWT 在频域的分解位置是可以控制的、不受限制的. 通过对参数 p 、 q 的调节, 可以按需自由地划分频域范围, 提取各频域范围空间域信息. 相反, DWT 的频域分解位置无法按需调整. 图 15 显示了当 p/q 取不同值时, 由 RWT 得到的高频部分贡献的能量. 由于 p/q 从 0 至 1 的变化使分解所得的高频部分覆盖的频域范围逐渐缩小, 所包含的能量呈单调下降趋势;

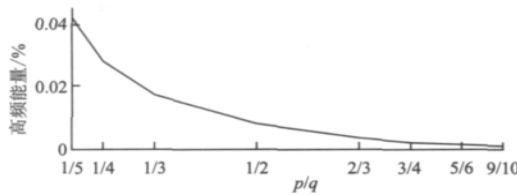


图 15 p/q 取不同值时,由 RWT 对 DEM1 分解一层得到的高频部分的能量与总能量之比

Fig. 15 Energy ratios of high-frequency parts from one-layer decomposition with different p/q

(2) 对于多层分解,由 RWT 得到的低频、高频部分的频域范围的带宽比值可按需调整.可以在各层设置不同的 $p、q$,以满足某些特殊要求,如本文 1.2.2 中所述的方法.相反,由 DWT 得到的低频部分的带宽与高频部分的带宽对于各层间不能变化.

另一方面,为了在提高频域分解性能的同时保持较高的空间域分辨能力,可以将参数 s 适量减小.如前所述,虽然这样会以增加冗余为代价,但冗余量通常较小.如当 s 取最小值 1 时,根据式(3),由 m 层分解所增加数据量与原数据量比率为: $\sum_{j=1}^m (p_{j-1}/q_{j-1})^2 (p_j/q_j)^2$.

由上可知,借助分数进制小波变换,本文的综合方法即可实现.如图 16 所示,该方法由原 DEM 起始分为上下两层处理过程.上层过程为对原 DEM 的分析过程,为下层过程提供了某些环节所需要的输入参数;下层过程为目标 DEM 的实现过程,其关键环节需要借助由上面过程计算得到的输入参数.最终得到目标 DEM.

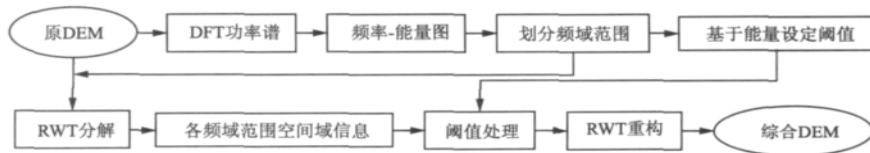


图 16 本文方法技术路线图

Fig. 16 Roadmap of this method

实验中所采用的 RWT 基于其一维算法,其滤波器设计与采样处理等均在频域实现,流程如图 12(c) 所示,详见文献 [15]. 文中通过对其实施张量积变换^[16]实现了二维 RWT. 此外,由上可知该方法与常规重采样方法相比具备简捷的逆过程.

2 实验论证

论证内容包括 5 个方面:(1) 对由以上方法得到的不同分辨率的综合 DEM,分别计算各自的有效最高频率,验证其是否满足采样定理;(2) 考察所得综合 DEM 的空间定位的一致性;(3) 验证所得到的分辨率逐渐降低的综合 DEM 是否在逐渐舍去原 DEM 局部细节信息的同时,保留了原 DEM 的骨架结构信息;(4) 将生成的综合 DEM 与由地形图插值生成的具有相应分辨率的 DEM 进行对比论证;(5) 将生成的综合 DEM 与由常规方法得到的 DEM 作对比分析.

实验中采用的 DEM 数据即为图 4 中所显示的 DEM1、DEM2,以保持分析的连续性.两者地理位置皆位于黄土高原延河流域二级支流县南沟流域,基于比例尺 1:1 万地形图(等高线、高程点与河流等信息)并利用 ANUDEM 软件插值生成^[3].

2.1 验证综合 DEM 是否满足采样定理

本方法在实现的过程中,在理论上保证了综合 DEM 采样率与有效最高频率的比值 n 与原 DEM 相应值保持一致,欲使最终得到的综合 DEM 满足采样定理,以下对实际生成的综合 DEM 进行分析.

表 1 所生成的综合 DEM 的采样率与有效最高频率

分辨率/m	2.5	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	50.0
采样率	400.0	333.3	200.0	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3	20.0
DEM1	f_{eff}	108.7	95.3	61.0	29.0	21.3	17.0	12.7	6.0
	n	3.7	3.5	3.3	3.4	3.1	2.9	3.2	3.3
DEM2	f_{eff}	124.0	98.7	62.7	34.0	22.0	17.3	13.3	6.7
	n	3.2	3.1	3.2	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0

表 1 显示,对于不同的分辨率,除个别情况外,比值 n 大致相同(n 的变化由频域分解的误差导致),且明显大于 2,即所得到的综合 DEM 均满足采样定理,各自所适应的分辨率与所指定的分辨率相符.

2.2 验证综合 DEM 空间定位的一致性

图 17(a) 显示了由 DEM1 及其综合 DEM 生成的等高线的叠合情况,等高距为 100m;图(b)显示了由 DEM2 生成的综合 DEM 的等高线叠合情况,等高距为 80m.为与图 1 作对比分析,图(c)中显示了由该区域分辨率为 2.5m 的 DEM 生成的不同分辨率综合 DEM 的等高线叠置情况,等高距与图 1 中一致.从中可以看出:由综合 DEM 与原 DEM、以及由各综合 DEM 提取的等高线能够较好地叠合,空间定位的一致性较好.

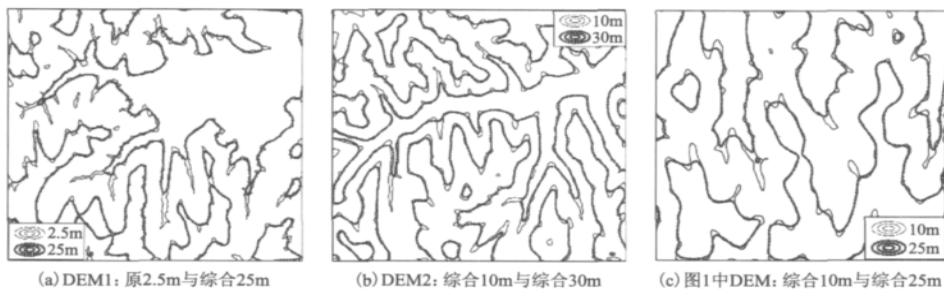


图 17 DEM 的等高线叠置图(原 2.5m 指分辨率为 2.5m 的原 DEM;综合 3m 指分辨率为 3m 的综合 DEM)

Fig. 17 Contour overlay between two generalized DEMs , or between a generalized DEM and its original DEM

2.3 考察不同分辨率综合 DEM 的综合效果

2.3.1 光照模拟图目视分析 随着综合 DEM 分辨率的降低,原 DEM 的局部细节信息应逐步舍去,而整体骨架结构应始终保留.以下从光照模拟图目视效果、坡度的频率分布、提取的等高线与河流的长度 3 个方面,通过原 DEM 与综合 DEM 系列的对比分

析,对综合 DEM 的综合效果进行考察. 实验中考察的目标分辨率有 3m, 5m, 15m, 20m, 30m.

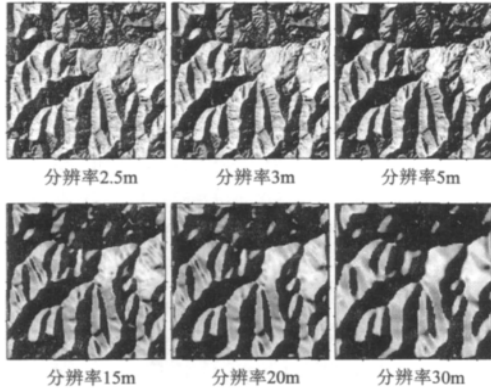


图 18 DEM1(第 1 个)及其综合 DEM (其余 5 个)的光照模拟图

Fig. 18 Hillside of DEM1 and its generalized DEMs

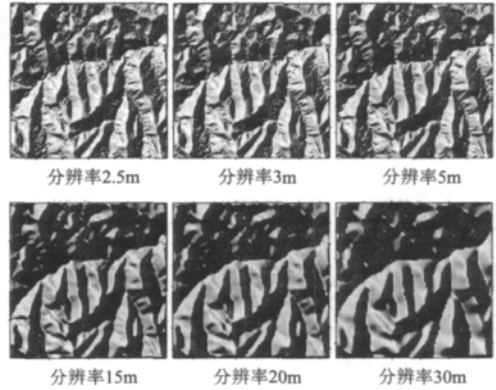


图 19 DEM2(第 1 个)及其综合 DEM (其余 5 个)的光照模拟图

Fig. 19 Hillside of DEM2 and its generalized DEMs

图 18、图 19 显示: 随着综合 DEM 分辨率的降低,原 DEM 地表局部起伏(高频信息)被逐渐剔除;而在这一过程中,山体轮廓、山脊、谷地走向等地貌形态(低频信息)得以保留.

2.3.2 坡度变化分析 图 20 表明 随着分辨率的降低,综合 DEM 的坡度频率曲线的峰值逐渐左移,说明综合 DEM 中的坡度伴随分辨率的降低逐步变缓.

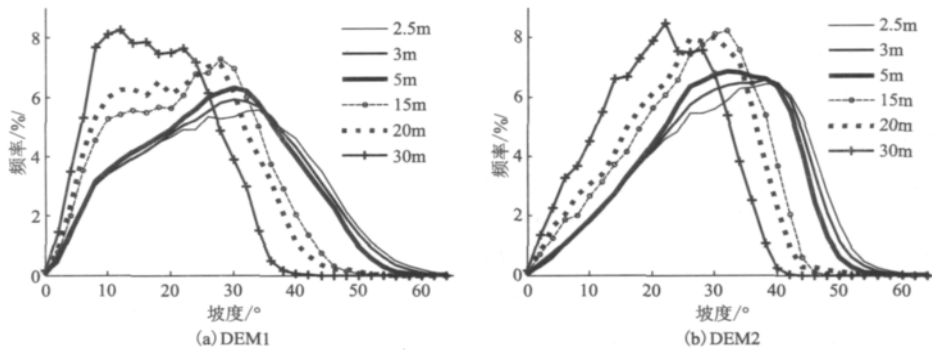


图 20 原 DEM 与由其生成的不同分辨率的综合 DEM 的坡度频率曲线

Fig. 20 Slope-frequency curves obtained from original DEM and its generalized DEMs

2.3.3 等高线与河流长度分析 由于不同分辨率的 DEM 反映了不同复杂程度的地形,而地形复杂程度与等高线的总长度相关联,因而通过对等高线总长度的对比分析,可间接判断 DEM 的综合程度^[17].表 2 表明,对于等高距分别为 10m、20m 的等高线,随着综合 DEM 分辨率的降低,总长度均在规律性减小.

表 2 由原 DEM 及其综合 DEM 提取的等高线总长度

Table 2 Total lengths of contours extracted from original DEM and its generalized DEMs

统计项目	DEM1				DEM2			
	等高距 = 10m		等高距 = 20m		等高距 = 10m		等高距 = 20m	
	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%
原 2.5m*	520456.9	100.00	259761.3	100.00	575944.3	100.00	288609.6	100.00
综合 3m*	502510.6	96.55	251064.4	96.65	554022.2	96.19	277972.3	96.31
综合 5m	481979.3	92.61	240860.4	92.72	534554.1	92.81	267281.6	92.61
综合 15m	393214.0	75.55	195785.3	75.37	454419.8	78.90	226521.2	78.49
综合 20m	365654.6	70.26	181252.1	69.78	430786.3	74.80	215061.5	74.52
综合 30m	293797.5	56.45	147484.2	56.78	357200.2	62.02	178057.3	61.69

DEM 中地形信息的复杂程度在一定程度上也与由其提取的河流总长度相关联^[17]。表 3 显示,随着综合 DEM 分辨率的降低,由不同汇流面积所得到河流总长度均在规律性地减小。

表 3 由原 DEM 及其综合 DEM 提取的河流的总长度

Table 3 Total lengths of rivers extracted from original DEM and its generalized DEMs

统计项目	DEM1				DEM2			
	汇流面积 = 1250m ²		汇流面积 = 2500m ²		汇流面积 = 1250m ²		汇流面积 = 2500m ²	
	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%
原 2.5m	151367.1	100.00	100185.9	100.00	147276.7	100.00	100938.6	100.00
综合 3m	117686.9	77.75	81965.3	81.81	118486.4	80.45	79313.2	78.58
综合 5m	65199.3	43.07	47783.6	47.69	63527.2	43.13	43837.5	43.43
综合 15m	22189.4	14.66	17009.3	16.98	21732.1	14.76	16337.6	16.19
综合 20m	16760.8	11.07	12070.2	12.05	16842.7	11.44	12903.9	12.78
综合 30m	12470.9	8.24	8346.9	8.33	13450.5	9.13	8901.4	8.82

表 2、表 3 表明随着分辨率的降低,综合 DEM 中地形信息的复杂程度或详细程度在逐渐降低,综合程度在逐渐增加。

2.4 综合 DEM 与由地形图生成的 DEM 的对比论证

由不同比例尺地形图插值生成的 DEM(以下简称为插值 DEM)虽然在空间定位上存在着配准精度问题,但仍具有一定的参考价值,如在一些能够体现整体特征的统计指标上。以下从 4 个方面对综合 DEM 与具有相应分辨率的插值 DEM 作对比分析。所采用的插值 DEM 包括:两 DEM 区域分别由 1:5 万、1:10 万、1:25 万比例尺地形图经 ANUDEM 软件插值生成的 10m、25m、50m 分辨率 DEM。

2.4.1 目视效果对比分析 图 21(a)显示了 DEM1 相应情况:①对于 10m、25m 分辨率,综合 DEM 与插值 DEM 较为接近;对于 50m 分辨率,两者之间有一些差别;②与插值 DEM 相比,在分辨率变化的过程中,各综合 DEM 中的地形骨架结构较为接近。同样,图(b)显示了 DEM2 的类似情况。

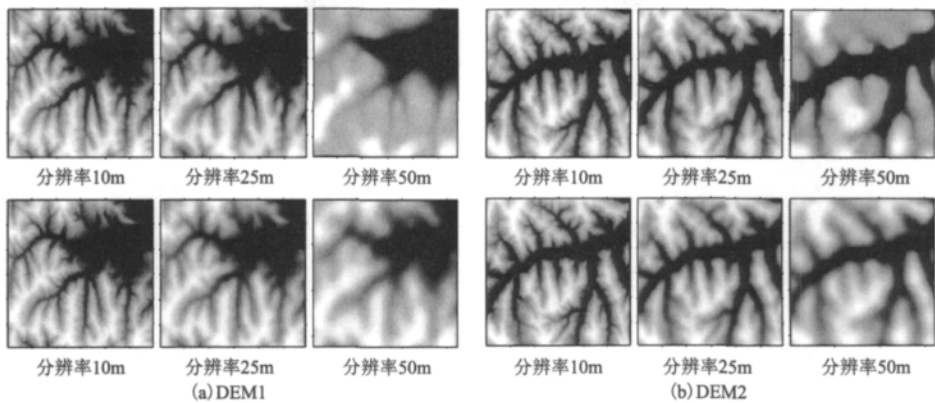


图 21 具有相同分辨率的插值 DEM(上层)与综合 DEM(下层)的目视对比分析

Fig. 21 Visual comparison between interpolated DEMs(upper layer) and generalized DEMs(down layer)

2.4.2 高程统计指标的变化 表 4 显示: ①随着分辨率的降低, 除个别情况外, 插值 DEM 与综合 DEM 的最小高程均在逐渐增大, 最大高程均在逐渐减小. 此外, 对于综合 DEM, 这一趋势更为明显. ②与插值 DEM 相比, 综合 DEM 的平均高程在分辨率变化的过程中较为稳定. ③随着分辨率的降低, 综合 DEM 的标准差在平稳减小, 而插值 DEM 的标准差在减小的过程中波动较大.

表 4 插值 DEM 与综合 DEM 的高程统计指标

Table 4 Statistical indexes of interpolated DEMs and generalized DEMs

统计项目	DEM1				DEM2			
	Min/m	Max/m	Mean/m	Std	Min/m	Max/m	Mean/m	Std
原 2.5m	1155.5	1428.0	1287.1	58.1	1055.8	1337.3	1189.7	55.4
插值 10m*	1160.5	1435.4	1292.6	58.0	1064.0	1336.0	1194.8	55.8
综合 10m	1154.7	1427.9	1287.1	57.9	1055.8	1335.8	1189.7	55.2
插值 25m	1156.2	1434.9	1290.2	58.5	1065.1	1334.6	1193.4	54.6
综合 25m	1153.0	1421.4	1287.2	56.7	1056.2	1325.8	1189.8	53.8
插值 50m	1161.9	1410.3	1287.0	51.2	1078.8	1315.6	1188.7	52.9
综合 50m	1158.4	1405.1	1286.8	53.4	1068.5	1310.5	1189.4	48.9

插值 10m 指由文中所提及的相应比例尺地形图得到的分辨率为 10m 的插值 DEM.

可以看出, 由于各综合 DEM 均是通过对同一原 DEM 进行综合概括而得到的, 随着分辨率的降低, 各综合 DEM 在使原 DEM 中的局部地形逐渐变缓的同时, 较好地继承了原 DEM 中宏观地形的起伏趋势.

2.4.3 坡度与剖面曲率变化分析 图 22 显示, 插值 DEM 与综合 DEM 的坡度、剖面曲率频率曲线与累计频率曲线在分辨率为 10m、25m 时较为接近, 而在分辨率为 50m 时有一些差异. 此结果与 2.4.1 中的目视分析结果相对应.

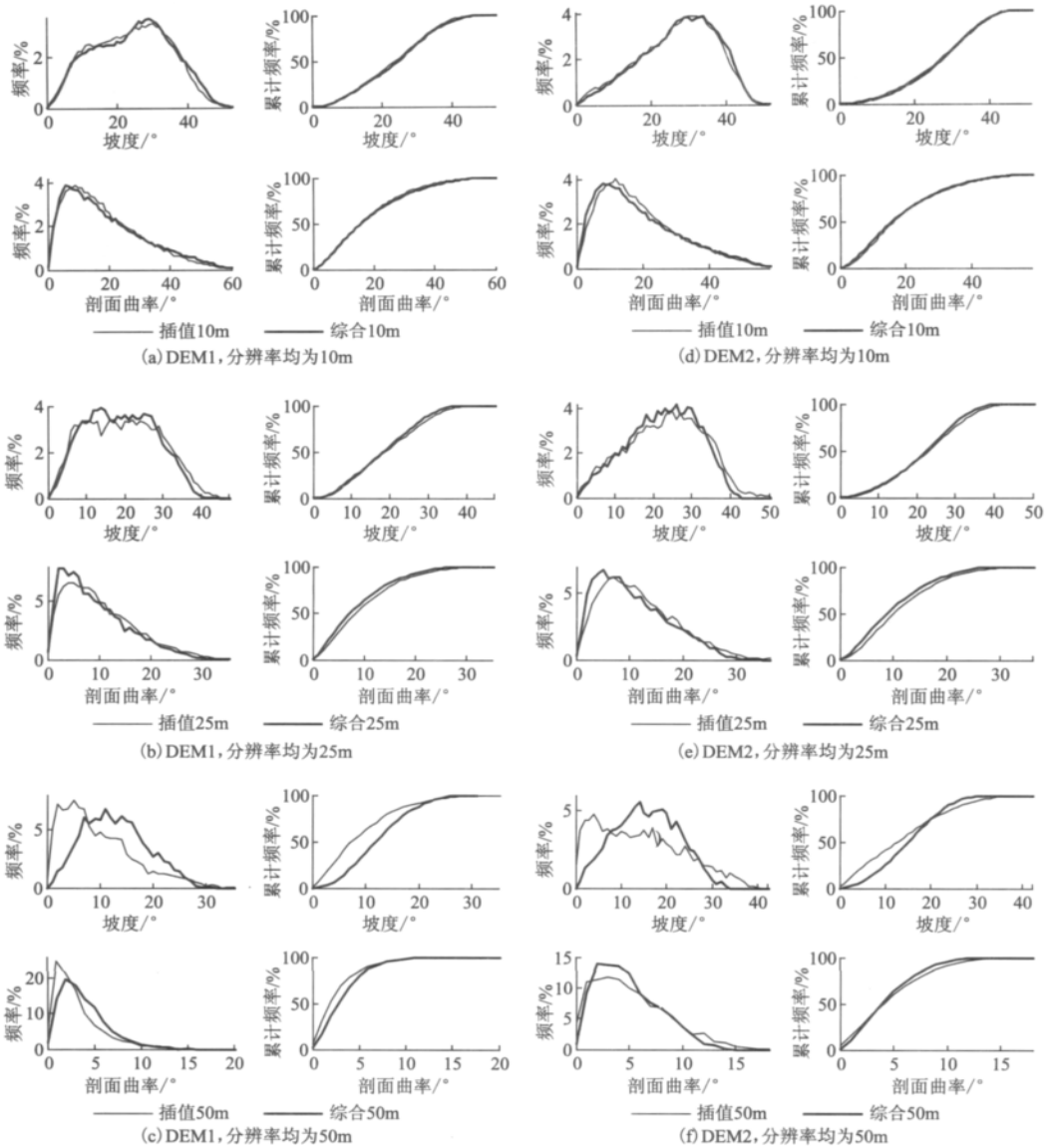


图 22 具有相同分辨率的插值 DEM 与综合 DEM 的坡度、剖面曲率频率曲线与累计频率曲线

Fig. 22 Frequency curves and cumulative frequency curves of slope and profile curvature from interpolated DEMs and generalized DEMs

2.4.4 等高线与河流长度的变化 表 5、表 6 表明 ①对于不同的等高距与汇流面积，随着分辨率的降低，由插值 DEM 与综合 DEM 提取的等高线总长度与河流总长度均在逐量减小。②对于同一分辨率，由插值 DEM 与综合 DEM 提取的等高线总长度以及河流总长度较为接近。在等高距与汇流面积取不同值时均有此类情况。

基于本文所收集的由地形图插值生成的 DEM 数据以及对其它地区 DEM 的重复分析表明，当分辨率在一个范围内取值时，综合 DEM 与插值 DEM 较为接近。然而应当指出，如

上所述 综合 DEM 与派生 DEM 的对比分析只具有相对参考意义.

表 5 由插值 DEM 与派生 DEM 提取的等高线总长度

Table 5 Total lengths of contours extracted from interpolated DEM and generalized DEMs

统计项目	DEM1				DEM2			
	等高距 = 10m		等高距 = 20m		等高距 = 10m		等高距 = 20m	
	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%
原 2.5m	520456.9	100.00	259761.3	100.00	575944.3	100.00	288609.6	100.00
插值 10m	421802.7	81.04	218336.2	84.05	480073.0	83.35	241542.4	83.69
综合 10m	432312.4	83.06	216394.8	83.31	490921.4	85.24	245860.8	85.19
插值 25m	337228.0	64.79	167701.4	64.56	404477.8	70.23	203874.0	70.64
综合 25m	324242.7	62.30	162464.9	62.54	389932.5	67.70	194448.3	67.37
插值 50m	159026.4	30.56	84289.0	32.45	238973.1	41.49	118969.6	41.22
综合 50m	196823.6	37.82	96972.5	37.33	266054.0	46.19	132108.2	45.77

表 6 由插值 DEM 与派生 DEM 提取的河流总长度

Table 6 Total length of rivers extracted from interpolated DEM and generalized DEMs

统计项目	DEM1				DEM2			
	汇流面积 = 1250m ²		汇流面积 = 2500m ²		汇流面积 = 1250m ²		汇流面积 = 2500m ²	
	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%	长度/m	长度/%
原 2.5m	151367.1	100.00	100185.9	100.00	147276.7	100.00	100938.6	100.00
插值 10m	31150.2	20.58	24154.2	24.11	31934.5	21.68	24456.7	24.23
综合 10m	30347.9	20.05	23371.6	23.33	30763.4	20.89	23352.5	23.14
插值 25m	16283.9	10.76	11607.2	11.59	14629.1	9.93	10626.9	10.53
综合 25m	15910.7	10.51	11818.2	11.80	15120.5	10.27	11858.7	11.75
插值 50m	6826.3	4.51	3967.7	3.96	6856.6	4.66	4106.9	4.07
综合 50m	6433.4	4.25	3627.8	3.62	6012.9	4.08	3572.1	3.54

2.5 综合 DEM 与由常规方法生成的 DEM 的对比分析

本节分析文中方法与常规方法(包括双线性、双三次方法)的综合精度.为客观公正地实施定量评价,分析结果应具有明确的可比对象或真值^[18].由于在实际 DEM 上的分析无法满足此要求,此处采用文献中常用的在连续曲面生成的 DEM 上实施精度分析的方法^[18-19].方法本质是建立与实际地形相似的连续数学曲面,在由其生成的较高分辨率原 DEM 上实施综合处理,将所得结果与由曲面数学表达式求得的高程真值作对比分析.此处选用常用的高斯合成曲面,其表达式见式(4),式中 $m = n = 500$, $x, y \in [-500m, 500m]$,对 A, B 与 C 的不同设置可生成不同复杂度的地形曲面.实验中选取了复杂度不同的两种曲面,各参数见表 7,其中的地形复杂度参数来源于刘学军的研究^[18].图 24 为 G_2 的三维显示.较高分辨率原 DEM 的分辨率选取为 2.5m,综合 DEM 的目标分辨率分别选取为 5m,10m,15m,20m.采用均方根差作为精度评价指标^[18],其式见式(5),式中 h_{ij} 与 h_{ij}^* 分别为真值与综合所得值.

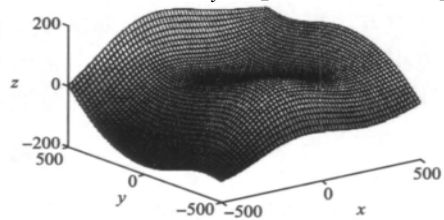


图 24 高斯合成曲面 G_2

Fig. 24 Gauss synthesized surface G_2

$$z = A [1 - (x/m)^2] e^{-(x/m)^2 - (y/n+1)^2} - B [0.2(x/m) - (x/m)^3 - (y/n)^5] e^{-(x/m)^2 - (y/n)^2} - C e^{-(x/m+1)^2 - (y/n)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (h_{ij} - h_{ij}^*)^2 / (n \times m)} \quad (5)$$

表 7 所用连续曲面参数

Table 7 The parameters of the continuous surfaces used here

参数	表达式参数			地形复杂度参数		
	A	B	C	地形波动/m	高程偏差/m	坡角/°
曲面 G ₁	3	10	1/3	20.4	3.36	<8
曲面 G ₂	150	500	24	737.5	131.2	>25

图 25、26 显示,对于两种复杂度的原 DEM 以及不同的目标分辨率,除个别情况外,由本方法所得的 DEM 的均方根误差均小于由双线性、双三次方法得到的结果。

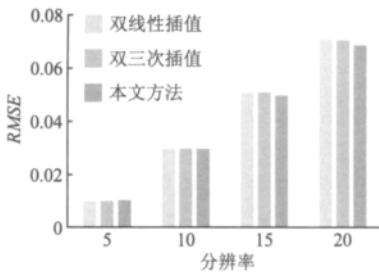


图 25 由 G₁ 所得结果

Fig. 25 Results from G₁

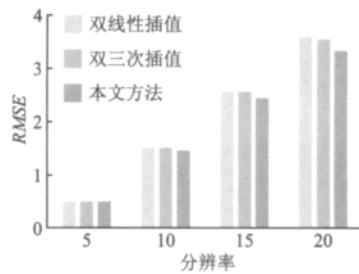


图 26 由 G₂ 所得结果

Fig. 26 Results from G₂

3 结论与讨论

本文基于 DEM 空间域分辨率与频域有效最高频率的关系,分析了如何在最大限度的保留空间局部显著特征的同时,通过降低 DEM 有效最高频率至指定值,得到指定分辨率的综合 DEM。验证结果显示,由此方法生成的综合 DEM 具有指定的分辨率;不同分辨率之间,综合 DEM 空间定位的一致性较好;同时,随着分辨率的降低,在整体骨架信息得以保留的同时,局部细节信息被逐步剔除。

文中方法需作进一步研究,如该方法在实现的过程中所借助的分数进制小波变换属可分离小波,只能有效提取 3 个方向上的高频信息。为更好地表达 DEM 不同方向上的显著特征,后续研究中可以探讨非分离分数进制小波变换在此领域的应用。

参考文献

[1] 汤国安,刘学军,房亮,等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版) 2006, 32(12): 1059-1063
Tang Guoan, Liu Xuejun, Fang Liang, et al. A review on the scale issue in DEMs and digital terrain analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 2006, 32(12): 1059-1063

[2] 杨勤科,赵牡丹,李锐,等. DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界 2009, 2(1): 25-31

- Yang Qinke ,Zhao Mudan ,Li Rui ,et al. Application of DEMs in regional soil erosion modeling [J]. *Geomatics World* , 2009 2(1) : 25-31
- [3] 杨勤科 ,师维娟 ,Tim R McVica 等. 水文地貌关系正确 DEM 的建立方法[J]. *中国水土保持科学* 2007 5(4) : 1-6
Yang Qinke ,Shi Weijuan ,Tim R McVica ,et al. On constructing methods of hydrologically correct DEMs[J]. *Science of Soil and Water Conservation* 2007 5(4) : 1-6
- [4] 吴凡 ,祝国瑞. 基于小波分析的地貌多尺度表达与自动综合[J]. *武汉大学学报(信息科学版)* 2001 6(2) : 170-176
Wu Fan ,Zhu Guorui. Multiscale representation and automatic generalization of relief based on wavelet analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* 2001 6(2) : 170-176
- [5] 杨族桥 ,郭胜利 ,牛冀平. DEM 多尺度表达与地形结构线提取研究[J]. *测绘学报* 2005 3(2) : 134-137
Yang Zuqiao ,Guo Qingsheng ,Niu Jiping. A study on multiscale DEM representation and topographic feature line extraction[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica* 2005 3(2) : 134-137
- [6] 吴纪桃 ,王桥. 复杂地貌形态多比例尺表达的二维小波分析研究[J]. *遥感学报* 2003 7(2) : 93-97
Wu Jitao ,Wang Qiao. A study on the multi-scale representations of the complex landforms based on two-dimensional wavelet transformation [J]. *Journal of Remote Sensing* 2003 7(2) : 93-97
- [7] 刘春 ,王家林 ,刘大杰. 多尺度小波分析用于 DEM 网格数据综合[J]. *中国图象图形学报* 2004 9(3) : 341-344
Liu Chun ,Wang Jialin ,Liu Dajie. Generalization of DEM grid data based on multi-band wavelet analysis [J]. *Journal of Image and Graphics* 2004 9(3) : 341-344
- [8] 郭伟玲. 基于小波理论的 DEM 尺度变换研究[D]. 西安: 西北农林科技大学 2008: 18-43
Guo Weiling. The study on DEM scaling based on the wavelet theory [D]. Xi'an: Northwest A & F University 2008: 18-43
- [9] 林璐. 基于小波分析的多尺度 DEM 表达及地形分析效应研究—以黄土高原样区为例 [D]. 西安: 西北大学 , 2008: 26-62
Lin Lu. Multi-scale DEM representation and terrain analysis effects based on wavelet analysis—a case study in the Loess Plateau [D]. Xi'an: Northwestern University 2008: 26-62
- [10] 谷天阳. 基于小波的大规模地形数据组织与连续多分辨率表现 [D]. 哈尔滨: 国防科学技术大学 2004: 14-27
Gu Tianyang. Large-scale terrain data construction and multi-scale resolution representation using wavelet transform [D]. Harbin: National University of Defense Technology 2004: 14-27
- [11] 杨勤科 ,Tim R McVica ,Tom G Van Nie 等. 基于信息含量分析法确定 DEM 分辨率的方法研究[J]. *长江科学院院报* 2006 5(23) : 21-23
Yang Qinke ,Tim R McVica ,Tom G Van Nie ,et al. Optimizing DEM resolution with information content analysis [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* 2006 5(23) : 21-23
- [12] 余松煜 ,周源华 ,张瑞. 数字图像处理[M]. 上海: 上海交通大学出版社 2007: 147
Yu Songyu ,Zhou Yuanhua ,Zhang Rui. Digital image processing [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press , 2007: 147
- [13] Gonzalez R C. 数字图像处理[M]. 阮秋琦译. 北京: 电子工业出版社 2003: 218
Gonzalez R C. Digital image processing [M]. Translated by Ruan Qiuqi. Beijing: Electronic Industry Press 2003: 218
- [14] Bayram I ,Selesnick I W. Overcomplete discrete wavelet transforms with rational dilation factors [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing* 2009 57(1) : 131-145
- [15] Bayram I ,Selesnick I W. Frequency-domain design of overcomplete rational-dilation wavelet transforms [J]. *IEEE Trans on Signal Processing* 2009 57(8) : 2957-2972
- [16] Daubechies I. Ten lectures on wavelets [M]. Philadelphia: SIAM ,1992: 203
- [17] 杨勤科 ,David Jupp ,李锐 等. 基于滤波方法的 DEM 尺度变换方法研究[J]. *水土保持通报* 2008 28(6) : 58-62
Yang Qinke ,David Jupp ,Li Rui ,et al. Generalizing the fine resolution DEMs with filtering method [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2008 28(6) : 58-62
- [18] 刘学军 ,龚健雅 ,汤国安 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. *测绘学报* 2004 33(3) : 259-263
Liu Xuejun ,Gong Jianya ,Tang Guoan ,et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM) [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica* 2004 33(3) : 259-263
- [19] Kidner D B. Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models [J]. *INT J Remote Sensing* ,2003 ,14(24) : 2981-2987

Resolution-assignable DEM Generalization Based on Rational-dilation Wavelet Transform

WANG Haijiang¹, YANG Qinke², WANG Chunmei¹, GUO Weiling¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract

A DEM generalization method to obtain lower-resolution DEM based on higher-resolution DEM was proposed by applying sampling theory and rational-dilation wavelet transform (RWT), as scale impact researches require the DEM dataset possessing continuously changeable resolutions and uniformly spatial location base. The relation between DEM resolution and sampling theory was analyzed and a new way to obtain resolution-assignable DEM by reducing the efficient max frequency in frequency-domain was presented. The freely and finely time-frequency decomposition via RWT was studied, and the energy-based threshold processing to the decomposed parts was proposed. A generalization method to generate resolution-assignable DEM was then obtained. The assigned resolution's validity, the spatial location consistency and the generalized effectiveness were proved, and the generalized result's advantage over the interpolated DEM from topographic map and the DEM from conventional methods were analyzed via experiments. The result shows the method's effectiveness.

Keywords: DEM generalization; rational-dilation wavelet transform; resolution; energy; spectrum