

# 基于经验模态分解的 GPS/伪卫星 组合基线解算模型

刘 超<sup>1,2</sup> 王 坚<sup>2</sup> 许长辉<sup>1,2</sup> 高井祥<sup>2</sup>

(1 中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室,徐州市三环南路,221008)  
(2 中国矿业大学环境与测绘学院,徐州市三环南路,221008)

**摘 要:**通过经验模态分解(EMD)的多尺度分解与重构结构,依据累积标准化模量的均值随尺幅的变化确定系统误差与噪声分离尺度的选择标准,建立系统趋势分离模型,可以有效地削弱非建模系统误差对基线解算的影响。实验表明,该模型可以很好地削弱双差残差序列的系统误差,整周模糊度固定解的可靠性明显增强,基线向量解的精度明显提高。  
**关键词:**GPS/伪卫星组合定位;经验模态分解;非建模系统误差;基线解算  
**中图法分类号:**P228.41

由于 GPS 技术能够快速得到高精度的三维坐标,因此它在地壳运动、变形监测、工程勘测等方面得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。但其定位的精度、可靠性以及可行性受到可见 GPS 卫星数量的影响,同时受到卫星分布的几何图形的制约,其高程精度通常情况下是平面精度的 2~3 倍,这就制约了 GPS 在城市高楼密集区域、露天矿区等可视卫星较少以及图形几何结构较差地区的应用,尤其是高程精度要求较高的变形监测中。伪卫星(PLs)技术为这一问题的解决提供了一条有效的途径,它通过布设在地面上的定位信号发射器发射类似 GPS 的信号,以改善 GPS 卫星的几何结构。GPS/伪卫星组合定位技术可以增加可视卫星的个数,有效地改善几何图形结构,提高定位精度,特别是提高高程方向上的精度<sup>[4,5]</sup>。

GPS/伪卫星组合定位中,主要存在非线性化误差、卫星位置偏差、多路径误差、大气延迟误差、卫星时钟误差等误差,文献[6,7]对伪卫星的主要误差进行了一些有益的研究,但 GPS 卫星多路径误差以及建模残余的系统误差仍然是影响高精度基线解算的一个重要因素。本文引入经验模态分解(EMD)方法<sup>[8]</sup>,从双差残差序列中分离出系统误差,并用来修正双差观测值,重新进行基线解算。

## 1 GPS/伪卫星组合定位

单差伪卫星载波相位观测值为:

$$\Delta\varphi^{\text{PL}} \cdot \lambda = \Delta\rho^{\text{PL}} + \Delta N^{\text{PL}} \cdot \lambda + c \cdot \Delta\delta t_{R_1}^{\text{PL}} - c \cdot \Delta\delta t_{R_2}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{orb}}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{trop}}^{\text{PL}} + \Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}} + \Delta\epsilon_{\varphi}^{\text{PL}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta\varphi^{\text{PL}}$  为单差载波相位值;  $\Delta N^{\text{PL}}$  为单差整周模糊度;  $\Delta\rho^{\text{PL}}$  为两接收机之间的单差几何距离;  $\Delta\delta t_{R_1}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\delta t_{R_2}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\delta_{\text{orb}}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\delta_{\text{trop}}^{\text{PL}}$  分别为卫星钟差、接收机钟差、卫星位置误差和对流层延迟误差;  $\Delta\delta_{\text{mp}}^{\text{PL}}$ 、 $\Delta\epsilon_{\varphi}^{\text{PL}}$  为卫星多路径误差和随机噪声。

单差 GPS 载波相位观测值为:

$$\Delta\varphi \cdot \lambda = \Delta\rho + \Delta N \cdot \lambda + c \cdot \Delta\delta t_{R_1} - c \cdot \Delta\delta t_{R_2} + \Delta\delta_{\text{orb}} + \Delta\delta_{\text{trop}} + \Delta\delta_{\text{iono}} + \Delta\delta_{\text{mp}} + \Delta\epsilon_{\varphi} \quad (2)$$

式中,  $\Delta\delta_{\text{iono}}$  为电离层延迟误差。

虽然伪卫星的观测方程和 GPS 观测方程相似,但因卫星位置误差、多路径误差以及对流层延迟误差等主要误差源的特征与 GPS 不同,所以需要对其进行进一步的讨论。

### 1.1 卫星位置偏差

由于伪卫星的发射器固定在地面上,其位置偏差为定值,这与 GPS 卫星的轨道偏移特征是不同的,最不利的情况下,伪卫星的单差位置偏差会

翻倍,可以引起数厘米的载波相位误差<sup>[9,10]</sup>,所以,通常应事先利用传统的测量仪器对伪卫星的位置进行精密的测量。

1.2 多路径效应

多路径效应是由直接到达接收机的信号和周围物体反射的信号干涉引起的。伪卫星的发射器设置在固定的位置,若周围环境不变,其多路径的影响可以认为是常量;而 GPS 卫星在不断运动,其多路径表现出较强的周期性和重复性,通常利用长时间的观测求平均来减小多路径误差的影响。

由于伪卫星的多路径效应为常量,可以将其多路径效应视为未知数  $\Delta\delta_{mp}^{PL}$  进行 GPS/伪卫星组合基线解算,

$$\begin{cases} V_1 = A_1 \cdot \delta X_r + B_1 \cdot \nabla \Delta N_1 + C \cdot \Delta\delta_{mp}^{PL} + L'_1 \\ V_2 = A_2 \cdot \delta X_r + B_2 \cdot \nabla \Delta N_2 + L'_2 \end{cases}$$

(3)

式中,参考卫星为 GPS 卫星; $V_1$ 为包含伪卫星的双差观测值,其中伪卫星的多路径效应值  $\Delta\delta_{mp}^{PL} = [\Delta\delta_{mp}^{PL,1} \quad \Delta\delta_{mp}^{PL,2} \quad \cdots \quad \Delta\delta_{mp}^{PL,n}]^T$ ;  $C$ 为  $n$  维单位矩阵; $V_2$ 为其余 GPS 的双差观测值。

伪卫星多路径效应求解的主要步骤为:① 选择参考卫星,利用 GPS/伪卫星观测数据建立双差观测方程,不考虑伪卫星多路径的影响,求解双差整周模糊度浮点解,并利用 LAMBDA 方法进行整周模糊度的固定;②将得到的整周模糊度固定解作为已知值,考虑伪卫星多路径的影响,重新进行基线解算,可以求得伪卫星的多路径单差未知值<sup>[6]</sup>。

1.3 大气层延迟误差

GPS 载波相位观测值的大气延迟误差包括对流层延迟误差和电离层延迟误差。对于架设在地面的伪卫星,其信号的传输仅受对流层延迟的影响。通常,GPS 对流层模型包括 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和 Black 模型,其估计精度很大程度上依赖卫星高度角,对于高度角较低、近地面气象因素影响复杂多变的伪卫星,这些模型的应用受到了较大的限制。文献[11]提出了一种简单的伪卫星对流层模型,对流层延迟达到 320.5 ppm(32.05 cm/km),说明伪卫星的对流层延迟较严重。对于较短距离的基线,在 GPS 以及伪卫星站间求载波相位观测值单差,可以较好地消除 GPS 对流层延迟误差,伪卫星的对流层延迟误差也得到了一定程度的削弱。

1.4 基于 EMD 的 GPS/PLs 基线解算模型

由式(3)可得 GPS/伪卫星组合基线解算模型为:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta L_1 &= \nabla \Delta \rho_1 + \lambda \cdot \nabla \Delta N_1 + \Delta\delta_{mp}^{PL} + \\ &\quad \nabla \Delta V_{\text{sys}_1} + \nabla \Delta V_{\sigma_1} \end{aligned}$$

(4)

$$\nabla \Delta L_2 = \nabla \Delta \rho_2 + \lambda \cdot \nabla \Delta N_2 + \nabla \Delta V_{\text{sys}_2} + \nabla \Delta V_{\sigma_2}$$

(5)

式(4)为 GPS/PLs 的双差观测值方程,式(5)为其余 GPS 的双差观测值方程。式中, $\nabla \Delta L_1$ 为双差观测值; $\nabla \Delta \rho_1$ 为卫星与接收机之间的距离双差值; $\nabla \Delta N_1$ 为双差整周模糊度; $\Delta\delta_{mp}^{PL}$ 为伪卫星单差多路径效应误差; $\nabla \Delta V_{\text{sys}_1}$ 为双差残差的趋势项; $\nabla \Delta V_{\sigma_1}$ 为随机噪声。

技术路线如图 1 所示。

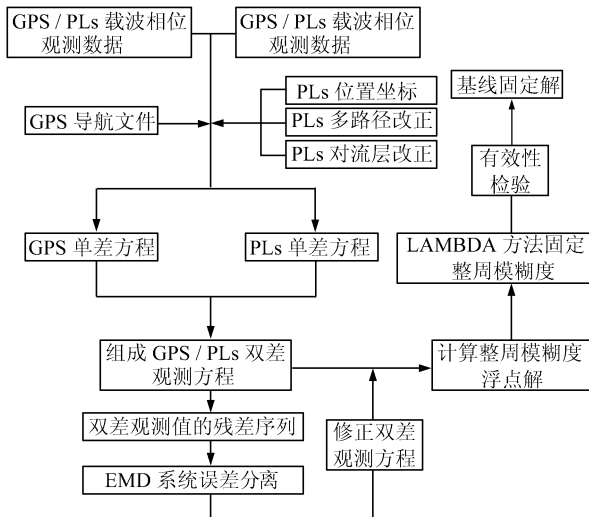


图 1 基于经验模态分解的 GPS/伪卫星组合基线解算模型

Fig. 1 Integration of GPS/ Pseudolites Baseline Solution Based on Empirical Mode Decomposition

2 实例分析

实验采用两台 NovAtel RT2 GPS 接收机和两台 IntegriNautics IN200CXL 伪卫星发射装置,于 2000 年 12 月 20 日在新南威尔士大学某大楼的楼顶进行数据采集。如图 2 所示,两台伪卫星的卫星号分别为 12# 和 16#,伪卫星仅发射  $L_1$  载波相位,基准站(BASE)和监测站(ROVE)相距 10.18 m。为了防止信号之间的干扰及远近效应,脉冲发射的占空比为 10%,信号的衰减值为 32 dB,采集数据长度为 120 min,采样间隔为 1 s,截取 1 000 历元进行实验分析。伪卫星和测站的位置事先精密测得,其坐标值见表 1。

选择 PRN17 作为参考卫星,建立载波相位观测值的双差方程,组成 5 组双差观测值 PRN17-12、PRN17-16、PRN17-6、PRN17-15、PRN17-22,其残差序列如图 3 所示。进行站间

表 1 伪卫星和测站的已知坐标/m

伪卫星号	X	Y	Z
PL12	-4 644 230.824 2	2 550 151.862 6	-3 538 977.626 4
PL16	-4 644 216.704 7	2 550 288.233 4	-3 538 904.020 9
BASE	-4 644 214.982	2 550 192.657	-3 538 966.394
ROVE	-4 644 213.013	2 550 185.908	-3 538 973.761

单差伪卫星多路径的提取,PL12 和 PL16 的多路径效应值分别为 0.236 358 周和0.109 51周。去除伪卫星多路径效应后,双差观测值的残差序列如图 4 所示可见,PRN17-12、PRN17-16 残差序列的多路径效应偏差明显消除,但仍存在较明显的系统误差。

采用经验模态分解分离系统误差和随机噪声。以 PRN17-16 为例说明分离的过程,对 PRN17-16 的双差观测值残差序列进行 9 个尺度的分解,得到 9 个模量和 1 个趋势项(见图 5)。标准化模量的累计均值与尺度的关系如图 6 所示,从尺度 5 开始出现明显的偏移,所以确定  $m$  为 5 分离系统误差,利用同样的方法对其他双差观测值残差序列进行系统误差分离,分离的结果如图 7 所示。利用提取的系统误差修正原始双差观测值,并重新进行整周模糊度的固定和基线的解算,得到重新计算后的双差观测值残差序列(见图 8),与去除系统误差前(图 4)的残差相比,表现出了较强的随机性,系统误差得到了明显的削弱。计算系统误差去除前后的  $F$ -ratio 值和  $W$ -ratio

值,比较双差整周模糊度固定的可靠性。由表 2 可见,系统误差去除后, $F$ -ratio 值和  $W$ -ratio 值均得到了明显的提高,同时通过表 2 可以看出, GPS/伪卫星组合进行整周模糊度求解的可靠性明显高于单独的 GPS 系统。

表 2 整周模糊度求解的有效性比较

Tab. 2 Comparisons of the Validation of the Ambiguity Resolution				
可靠性指数	单独 GPS	GPS/PLs 组合	去除 PLs 多路径后	去除系统误差后
$F$ -ratio	1.32	3.12	3.03	7.79
$W$ -ratio	10.61	34.04	32.53	91.83

表 3 给出了单独的 GPS 系统、GPS/PLs 组合、去除 PLs 多路径后、去除系统误差后计算得到的基线向量,通过事先精确测得的测站坐标,得到基线向量的测量值。系统误差去除后,基线向量  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的标准差分别为 0.1 mm、0.1 mm、0.3 mm,较去除前明显减小,精度显著提高,坐标分量与测量值较差,与系统误差去除前后基本一致,一定程度上说明了 EMD 分离系统误差的可行性。

3 结 语

本文针对 GPS/PLs 组合定位技术中复杂的非建模系统误差,通过定义经验模态分解的多尺度结构,提出了非建模系统误差的分离模型。实

表 3 不同方案求解的基线向量比较

Tab. 3 Comparisons of the Baseline Solution for Different Schemes

坐标分量	单独 GPS /Std/mm	GPS/PLs 组合 /Std/mm	去除 PLs 多路径 后/Std/mm	去除系统误差后/Std/mm	测量值/m
X	1.980 1/0.7	1.940 5/0.7	1.972 5/0.8	1.972 4/0.1	1.969
Y	-6.762 0/0.4	-6.685 7/0.8	-6.742 5/0.8	-6.742 3/0.1	-6.749
Z	-7.356 0/1.1	-7.380 4/1.4	-7.362 8/1.4	-7.362 8/0.3	-7.367

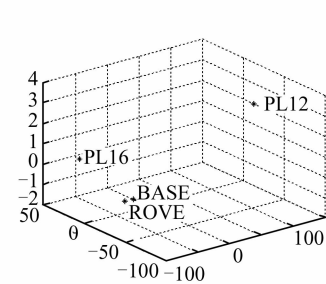


图 2 伪卫星和测站的分布图  
Fig. 2 Distributions of Pseudolites and Stations

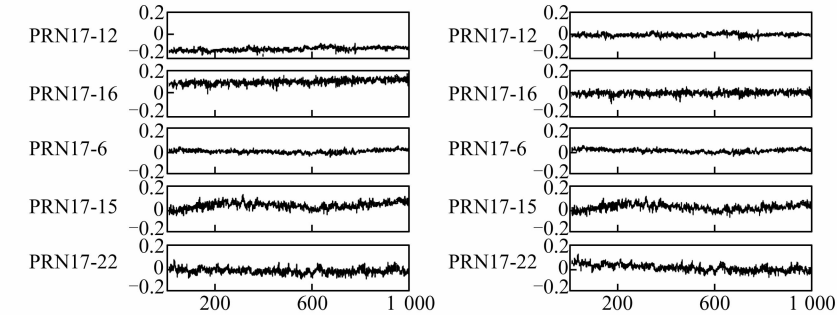


图 3 双差观测值残差序列  
Fig. 3 Residuals Series of DD meanments

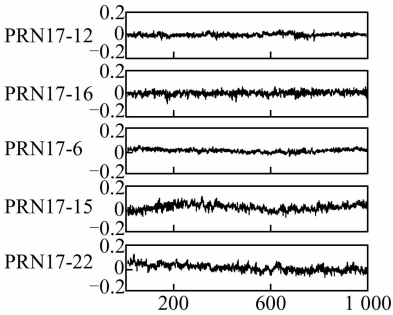


图 4 双差观测值残差序列(去除伪卫星多路径)  
Fig. 4 Residuals Series of DD Meanments

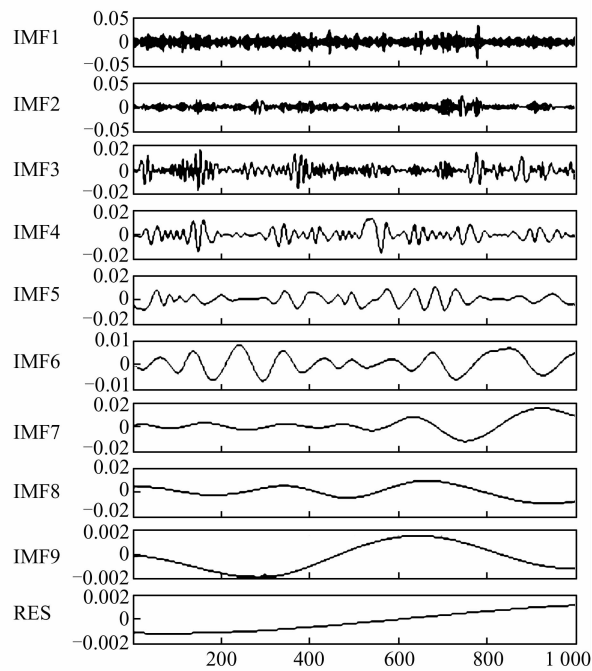


图 5 PRN17-16 双差观测值残差序列 EMD 多尺度分解

Fig. 5 Multi-scale EMD Decomposition of PRN17-16 Residuals Series of DD Measurements

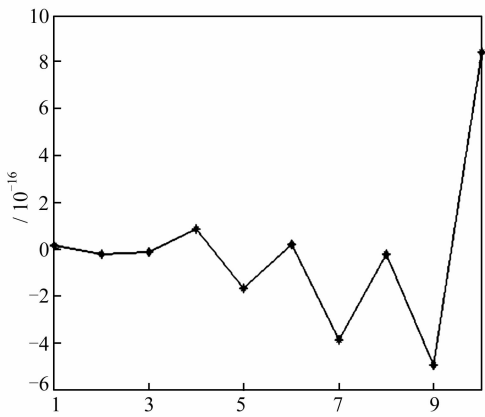


图 6 标准化模量的累计均值与尺度的关系图

Fig. 6 Relationship Between Scales and the Means of Standardized Accumulated Modes

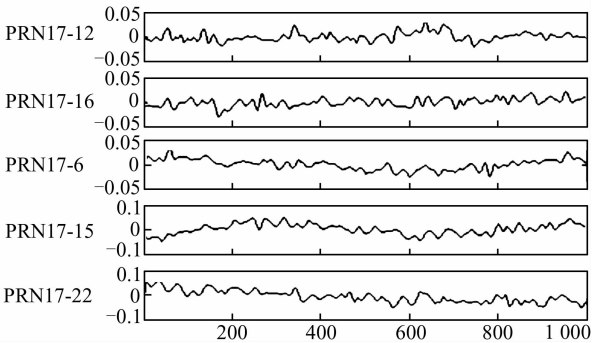


图 7 双差观测值的系统误差分离结果

Fig. 7 Systematic Errors Series of DD Measurements

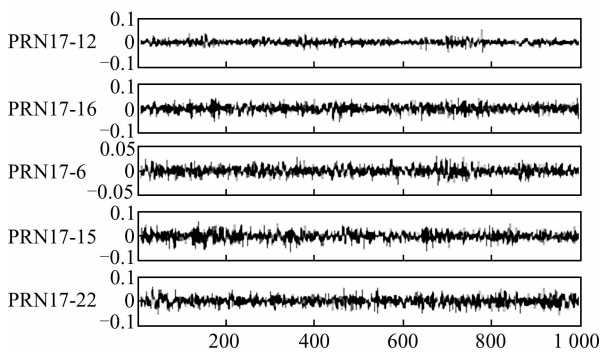


图 8 重新计算的双差观测量残差序列

Fig. 8 Recalculating DD Measurements Residual Series

测数据计算和分析证明该模型可以较好地消除非建模系统误差的影响,提高基线解算的精度和可靠性,对 GPS/PLs 组合定位技术高精度基线解算有重要的意义。但本文实验的选例基线相对较短,对于基线长度较长的载波相位双差残差,其影响因素将会较复杂,需要进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 吴云,孙建中,乔学军,等. GPS 在现今地壳运动与地震监测中的初步应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003,28(S1):79-82

[2] 陈永奇, Lutes J. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(4):324-328

[3] 黄声享,刘经南,吴晓铭. GPS 实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用[J], 武汉大学学报·信息科学版,2005,30(9):813-816

[4] Wang J, Tsujii T, Rizos C, et al. GPS and Pseudo-satellites Integration for Precise Positioning [J]. Geomatics Research Australasia, 2001,74:103-117

[5] Lemaster E, Rock S. Mars Exploration Using Self-calibrating Pseudolite Arrays[C]. The 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Nashville, USA, 1999

[6] 何秀凤. 变形监测新方法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:71-128

[7] 杨光. GPS 和伪卫星组合定位技术及其在形变监测中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2004

[8] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [C]. Roy Soc London A, London, Great Britain, 1998

[9] Dai L, Zhang J, Rizos C, et al. GPS and Pseudolite Integration for Deformation Monitoring Applications [C]. The 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Salt Lake City, USA, 2000

[10] Wang J, Tsujii T, Rizos C. Integrating GPS and Pseudolite Signals for Position and Attitude Determination: Theoretical Analysis and Experiment Results[C]. The 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Salt Lake City, USA, 2000

[11] Hein G W, Eissfeller B, Werner W, et al. Practical Investigations on DGPS for Aircraft Precision Approaches Augmented by Pseudolite Carrier Phase Tracking [C]. The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Kansas City, USA, 1997

第一作者简介:刘超,博士生,研究方向为 GPS 动态精密定位与变形监测的理论及应用。  
E-mail:celianglang@163.com

## Integration of GPS / Pseudolites Baseline Solution Based on Empirical Mode Decomposition

LIU Chao<sup>1,2</sup> WANG Jian<sup>2</sup> XU Changhui<sup>1,2</sup> GAO Jingxiang<sup>2</sup>

(1 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Chinese University of Mining and Technology, South Sanhuan Road, Xuzhou 221008, China)  
(2 School of Environment Science & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, South Sanhuan Road, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** A multi-scale decomposition and reconstruction architecture is defined on the basis of the empirical mode decomposition (EMD) theory, and the systematic errors mitigation model is demonstrated. A standard of the scale selection for the systematic errors elimination is given in terms of the means of the accumulated standardized modes. Then, the scheme of the GPS/PLs baseline solution based on the EMD is suggested. The experimental results show that the proposed scheme dramatically improves the reliability of ambiguity resolution and the precision of baseline vector after systematic error eliminated.

**Key words:** integration of GPS/PLs positioning; empirical mode decomposition; un-modeled systematic errors; baseline solution

About the first author: LIU Chao, Ph.D candidate, majors in the theory and application of GPS precise dynamic positioning and deformation monitor.  
E-mail: celianglang@163.com

(上接第 916 页)

## A Hierarchical Approach for Nodes Matching Based on Structural Spatial Relations

DENG Min<sup>1</sup> XU Kai<sup>1</sup> ZHAO Binbin<sup>1, 2</sup> XU Rui<sup>1</sup>

(1 School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)  
(2 School of Communication and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, 45 Chiling Road, Changsha 410076, China)

**Abstract:** A hierarchical approach is proposed to match the corresponding nodes from two different datasets. In this approach, node types are first of all distinguished and described, and the limitations of existing description methods are pointed out. On this basis, structural properties of node and its linked segments are considered to build the three geometric constraints, including distance, topology, and direction. They are further used to filter the candidates for matching reference nodes. Indeed, this process is of a hierarchy. Hence, it is also called a hierarchical approach. An experiment is employed to illustrate the rationality of the approach proposed in this paper.

**Key words:** node; matching; hierarchy; structural spatial relations

About the first author: DENG Min, professor, Ph.D, Ph.D supervisor, majors in span spatial relations, measurement of spatial information, and detection of spatio-temporal outlier.  
E-mail: dengmin208@tom.com