

基于小波变换的仿真模型验证方法研究

吴晓燕, 杨丽娜, 周延延, 高忠长

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:仿真模型验证是从仿真预期应用的角度来确定仿真模型表达实际系统的准确程度,是建模与仿真 VV&A 中最重要的内容之一。将小波变换理论应用于仿真模型验证,在时-频分析法方面进行了探索。应用小波变换多分辨率分析的基本理论和性质,从以小波变换系数表征信号特征的思想出发,在小波变换多尺度分解的基础上,将仿真模型输出序列与真实输出序列分解为低频部分和高频部分,针对各自特性,建立了基于小波变换系数的相容性检验算法。通过实例分析,证明了本文所提方法的有效性。

关键词:仿真模型验证;离散小波变换;多分辨率分析;相容性检验

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)06-0052-05

建模与仿真 VV&A 技术是系统仿真技术中一项非常重要的共用技术,而仿真模型验证则是 VV&A 中最重要的内容之一,它是从仿真应用目的出发,确定仿真模型代表真实系统准确程度的过程。仿真模型验证最基本的方法,就是考察在相同输入条件下,仿真模型输出与真实系统输出是否一致以及一致性的程度,即,对两者进行一致性检验或相容性检验。

目前,仿真模型验证的相容性检验方法主要分为静态性能的相容性检验和动态性能的相容性检验。静态性能相容性检验的理论和方法都已经比较成熟,而常用的动态性能相容性检验方法可分为时域法和频域法,且大都是针对平稳信号,并只能单独从时域或频域进行单一的分析^[1-3]。而实际应用中,仿真模型的输出大都是统计特性随时间变化的非平稳时间序列,必须对其先进行平稳化处理,再进行具体的验证工作,这势必会造成原始数据的失真,从而降低验证结果的准确度。小波变换在处理非平稳时间序列方面具有分辨率高、局部分析性能好等独特优点,是一种在时域和频域上同时具有良好的局部化特性的分析方法,可以自适应的调节时域和频域窗口,能够聚焦到时域和频域的任何细节,被誉为信号分析的“显微镜”。

本文应用小波变换多分辨率分析基本理论和性质,从“以小波变换系数表征信号特征”基本思想出发,在小波变换多尺度分解的基础上,将仿真模型输出序列与真实输出序列分解为低频部分和高频部分,针对各自特性,建立了基于小波变换系数的相容性检验算法,给出了应用实例,证明了所提出方法的有效性。

1 小波变换多分辨率分析

由小波变换多分辨率分析理论可知^[4],将 $L^2(\mathbf{R})$ 空间中的序列 $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$ 与 $\{W_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$ 结合起来,就相当于希尔伯特空间的正交分解,即:

$$V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 = \cdots = V_j \oplus W_j \oplus \cdots \oplus W_2 \oplus W_1$$

式中: V_j 称为尺度为 j 的尺度空间,反映 V_{j-1} 空间中信号的低频概貌或平滑部分; W_j 称为尺度为 j 的小波空间,且 $W_j = W_{j-1} - V_j$,反映相邻尺度两空间 V_j 和 V_{j-1} 中信号的高频细节差异。依据上述基本思想,任意 $s(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 函数,都可重构为^[2]

* 收稿日期:2007-10-08

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2007F40)

作者简介:吴晓燕(1957-),女,陕西西安人,教授,博士,主要从事导航、制导与控制及建模与仿真 VV&A 研究。

E-mail: x-ywu@126.com

$$s(t) = \sum_{k \in z} c_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{m=1}^j \sum_{k \in z} d_{m,k} \psi_{m,k}(t) \quad (1)$$

式中: j 为尺度因子; k 为平移参数; $\psi_{m,k}(t)$ 为离散小波函数; $\phi_{j,k}(t)$ 为多分辨率分析的尺度函数; $c_{j,k}$ 为小波低频(逼近)系数,反映了信号 $s(t)$ 在相邻两级尺度空间 V_{j-1} 和 V_j 上的 2 个平滑副本; $d_{m,k}$ 为小波高频(细节)系数,反映了 2 个平滑副本之间的差异。

式(1)即为小波变换多分辨率分析分解公式。由式(1)可知,在多尺度小波分解基础上,完全可以根据低频系数 $c_{j,k}$ 和 高频系数 $d_{m,k}$ 重构出原始信号 $s(t)$ 。亦即, $c_{j,k}$ 和 $d_{m,k}$ 能完整描述原始信号 $s(t)$ 的特征。

2 基于小波多分辨率分析的仿真模型验证方法

2.1 验证策略

小波多分辨率分析可将信号分解到不同的频率通道上,而分解后的信号有低频与高频之分,在频率成分上比原始信号单一,且小波分解本身对信号就具有平滑作用,一些非平稳信号经过多级小波分解后,信号的低频部分完全处于平稳状态。因此,有如下验证策略^[5]:

1) 根据多分辨率的分解特性,将信号分解为低频和高频两部分。经过多尺度分解后的小波低频部分将完全处于平稳状态,故可采用传统的验证方法对信号低频部分系数进行验证。本文采用最大熵谱估计方法。

2) 信号经小波多分辨率分解后的高频部分,由于含有较多的非平稳成分(如噪声、信号的极大值点等),无法使用传统的验证方法进行验证。对此,本文基于对高频部分统计特性的分析,将高频分解系数作为仿真模型输出与真实系统输出一致性(或相容性)检验的特征参数,给出了一种相容性检验方法。

2.2 小波多分辨率分析低频部分的最大熵谱估计验证方法

设仿真模型输出信号 $s_1(t)$ 和真实系统输出信号 $s_2(t)$,经小波多分辨率分解后的低频系数分别为 $c_1(j, k)$ 和 $c_2(j, k)$,其对应的最大熵谱估计分别为 $\hat{P}_1(\omega)$ 和 $\hat{P}_2(\omega)$,它们与预测误差滤波器 AR(M) 模型的谱密度一致,当信号采样数目 N 与 AR(M) 模型的阶数 M 足够大时,最大熵谱估计是渐近无偏且渐近正态的,则相容性检验公式为^[6-7]

$$D = \left[2 \left(\frac{M_1}{N_1} + \frac{M_2}{N_2} \right) \right]^{1/2} \log \frac{\hat{P}_1(\omega)}{\hat{P}_2(\omega)} \sim N(0, 1) \quad (2)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为所取 AR 模型的阶数; N_1 和 N_2 分别为 $c_1(j, k)$ 和 $c_2(j, k)$ 的序列长度; D 为检验统计量。式(2)的接受域为

$$-Z_{\alpha/2} \leq D \leq Z_{\alpha/2} \quad (3)$$

式中: α 为检验的显著性水平; $Z_{\alpha/2}$ 为对标准正态分布的双侧 100α 百分位点(其值可通过查表获得)。

2.3 小波多分辨率分析高频部分验证方法

设 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 经小波多分辨率分解后的高频系数分别为 $d_1(m, k)$ 和 $d_2(m, k)$ 。根据小波框架理论和多分辨率分析理论^[8-9],得:

$$A \| s_1(t) - s_2(t) \|^2 \leq \sum_m \sum_k | d_1(m, k) - d_2(m, k) |^2 \leq B \| s_1(t) - s_2(t) \|^2 \quad (4)$$

式中, A 和 B 均为实数,且 $0 < A \leq B < +\infty$ 。当 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 很接近时, $\| s_1(t) - s_2(t) \|^2$ 将任意小,则由式(4)可得:

$$\sum_m \sum_k | d_1(m, k) - d_2(m, k) |^2 \approx 0 \quad (5)$$

故

$$d_1(m, k) \approx d_2(m, k)$$

反之亦然。因此,仿真模型输出信号 $s_1(t)$ 与真实系统输出信号 $s_2(t)$ 经小波变换多分辨率分解高频部分的一致性(或相容性)检验,可归结为对相应 2 组小波分解系数 $d_1(m, k)$ 与 $d_2(m, k)$ 与一致性(或相容性)的检验。

假设信号 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 近似相等(或相关),且两者相互独立,即:

$$s_1(t) = s(t) + v_1(t), \quad s_2(t) = s(t) + v_2(t)$$

式中, $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 为均值为零、方差为 σ_1^2, σ_2^2 的正态分布。若选择合适的离散小波函数 $\psi_{m,k}(t)$, 对 $s_1(t)$

与 $s_2(t)$ 进行正交小波变换^[9],可得:

$$d_1(m, k) - d_2(m, k) = \int_R (s_1(t) - s_2(t)) \psi_{m,k}(t) dt \quad (6)$$

且

$$|d_1(m, k) - d_2(m, k)|^2 \leq N \int_R |s_1(t) - s_2(t)|^2 |\psi_{m,k}(t)|^2 dt \quad (7)$$

式中, N 为小波多分辨率分解高频系数长度。进一步,根据正态分布性质可得^[10,11]:

$$|d_1(m, k) - d_2(m, k)|^2 \leq 9N(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \int_R |\psi_{m,k}(t)|^2 dt \quad (8)$$

在正交小波变换下, $\psi_{m,k}(t)$ 为归一化正交基,则有:

$$|d_1(m, k) - d_2(m, k)|^2 \leq 9N(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (9)$$

上式表明,若 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 的小波分解高频系数 $d_1(m, k)$ 与 $d_2(m, k)$ 满足式(7),则仿真模型输出与真实系统输出一致性或相容性假设成立。

3 应用实例

某仿真模型输出和真实系统输出时间序列如图1所示(虚线为仿真结果,实线为真实数据,以下类同)。

对2组信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 进行3尺度小波多分辨率分解,如图2所示。应用最大熵谱估计法对信号小波多分辨率分解1-3阶低频系数相容性检验结果如图3所示。由图3可以看出,检验统计量 D 几乎趋近于零,说明两组信号的低频部分一致性程度非常高。依据式(9)对2组信号的小波变换3阶高频部分系数相容性检验结果为

$$\sum_m |d_1(m, k) - d_2(m, k)|^2 = 5.9297 < 9N(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) = 41.8970$$

表明2组信号的高频部分一致性程度也非常高。

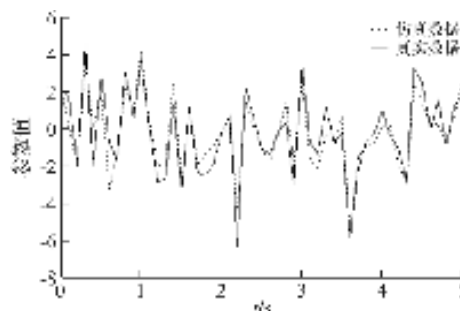


图1 仿真模型输出与真实系统输出

Fig.1 The output of the simulation model and real system

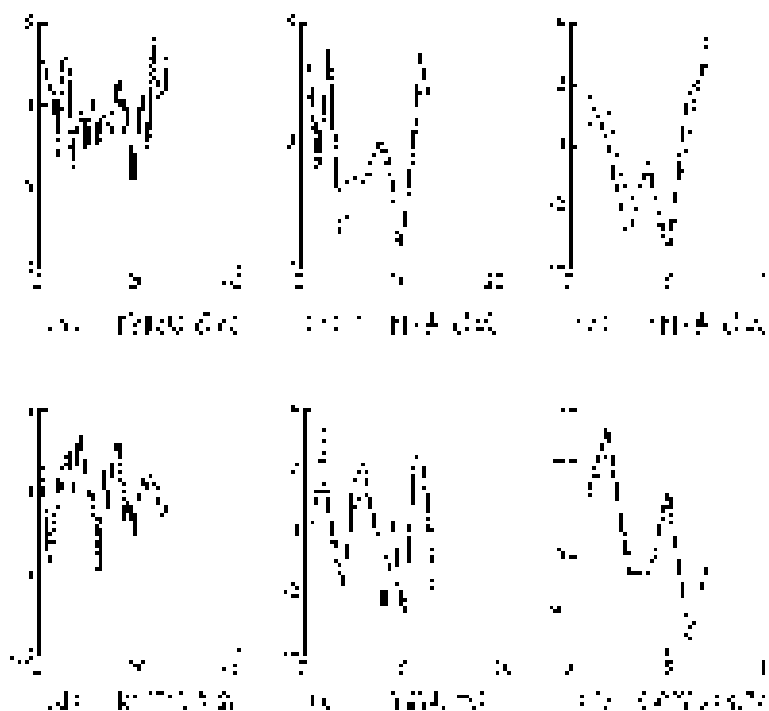


图2 3尺度小波多分辨率分解

Fig.2 The multi-resolution decomposition with three scales wavelet transforms

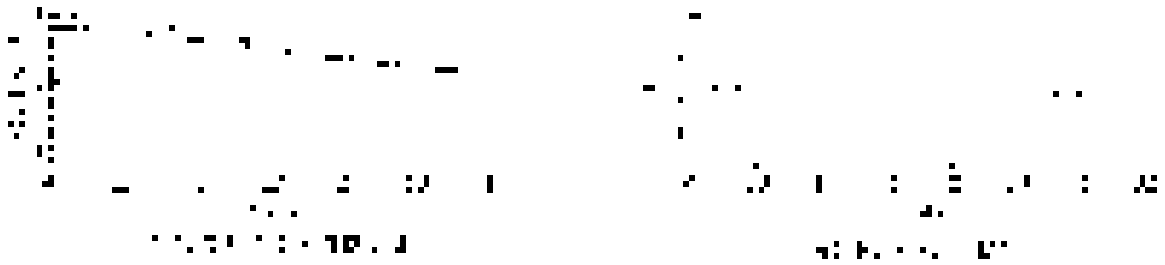


图3 低频系数最大熵谱估计及其相容性检验

Fig. 3 The max entropy spectral estimate and consistence test of low frequency coefficient

4 结束语

本文讨论的仿真模型验证方法,通过小波多分辨率分解的两组非平稳信号总体相容性检验,无需对信号进行平稳化处理,避免了由于平稳化过程信号失真所造成的误差。更重要的是,通过小波变换的“显微镜”作用,可以聚焦仿真输出信号与真实系统信号的任意细节,观察信号频率随时间变化的趋势并与真实系统加以对比,从而修正仿真模型,使其精度更高。本文下一步将在这方面进行研究。

参考文献:

- [1] Osman Balci. Principles of Simulation Model Validation, Verification, and Testing [J]. Transactions of the Society for Computer Simulation International, 1997,14(1):3-12
- [2] IEEE 1278. 4. 1997. IEEE Standards for Distributed Interactive Simulation - Verification, Validation and Accreditation[S].
- [3] Department of Defense. VV&A Recommended Practice Guides, BUILD 2[EB/OL]. [2001-11-30]. <http://www.msiac.dmsi.mil/vva/>
- [4] 刘涛,曾祥利,曾军.实用小波分析入门[M].北京:国防工业出版社,2006.
LIU Tao, ZENG Xiangli, ZENG Jun. Practice Application Wavelet Analysis Introduction[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Abdourrahmane M. On the Statistical Decorrelation of the Wavelet Packet Coefficients of A Band-limited Wide-sense Stationary Random Process [J]. IEEE Transactions Signal Processing, 2007,87:2320-2335.
- [6] 李鹏波,高霞.应用最大熵谱估计进行导弹系统的仿真模型验证[J].系统仿真学报,1999,21(2),9-12.
LI Pengbo, GAO Xia. Application of MESA on Validating Missile Simulation Model[J]. System Simulation Transaction, 1999,21(2):9-12. (in Chinese)
- [7] 刘鹏.复杂仿真系统可信度评估理论方法研究[D].西安:空军工程大学,2000.
LIU Peng. Research on Theory and Method of Credibility Evaluation for Complex Simulation System[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2000. (in Chinese)
- [8] 邓凯旭,宋宝瑞.小波分析在管理数据处理中的应用[J].上海理工大学学报,2005,27(4):312-314.
DENG Kaixu, SONG Baorui. Application of Wavelet Transformation in the Analysis of Management Data [J]. Journal Shanghai University of Science and Technology, 2005,27(4):312-314. (in Chinese)
- [9] 吴正国,夏立,尹为民.现代信号处理技术:高阶谱、时频分析与小波变换[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
WU Zhengguo, XIA Li, YIN Weimin. Modern Signal Processing Technology: High Order Spectrum, Time-Frequency Analysis and Wavelet Transform[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 盛骤,谢世千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2002,116-117.
SHENG Zhou, XIE ShiQian, PAN Chengyi. Probability theory and Mathematics Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 徐毓,金以慧.基于多尺度小波变换和短时分形理论的航迹关联方法[J].控制与决策,2003(7),18(4),432-435.
XU Yu, JIN Yihui. Target Tracks Association Based on Multi-resolution Wavelet Transform and Short-time Fraction [J]. Control and Decision, 2003,18(4):432-435. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Research of the Method for Simulation Model Validation Based on Wavelet Transform

WU Xiao-yan, YANG Li-na, ZHOU Yan-yan, GAO Zhong-chang

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Simulation Model Validation is one of the key content in modeling and simulation VV&A. The methods of simulation model validation include time domain, frequency domain and time – frequency analyses. Though the methods of time domain and frequency domain are used widely, the analytic means is considered single. However the methods of time – frequency analyses have particular advantage. The application of wavelet transform has been involved in many fields in recent years, for example, signal processing, pattern recognition and fault diagnosis etc. The paper attempted to apply wavelet transform to simulation model validation. The basic theory and property of multi – resolution analysis on wavelet transform are applied, based on the idea that the signal characteristic is described by using the wavelet transform coefficients. On the basis of multi – scale decomposition of wavelet transform, the output sequences of the simulation model and real system are divided into low frequency and high frequency parts, and the consistence test method based on the discrete wavelet transform coefficients is built according to their respective characteristics. The application example is given and the validity of the method proved.

Key words: simulation model validation; discrete wavelet transform; multi – resolution analysis; consistence test

(上接第 32 页)

The Analysis of Channel Characteristic of UAV High Speed Date Link Based on Sea Atmospheric Guide

BAI Yang, LIANG Jun, ZHANG Qiang, XUE Guo – hong

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Because the evaporation of seawater and the onflow of the sea breeze, the atmospheric humidity dimension with altitude in range of offing, it makes Atmospheric Guide. The high speed data link of unmanned aerial vehicle(UAV) is affected badly by the multiple channels of atmospheric guide in sea navigating. The APM model is made for computing the transmittal loss, which shows that the energy fastens on the Atmospheric Guide, so strong branches and dispersion are caused. By combining the reality radar echo figures and the mechanism, the model of dispersion discrete multiple channels is given. The course of academic analysis and idiographic actualizing methods of the model are expatiated, which can provide an important theory basis for the measurement of the channel characteristic.

Key words: high speed data link; atmospheric guide; dispersion channel model; discrete channel model

(上接第 51 页)

Layered Dynamic Identification Assigning Algorithm for Wireless Sensor Network

TANG Jian^{1,2}, SHI Hao – shan¹, YANG Qi¹, LI Xue – song^{1,2}

(1. School of Electronics and information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Sensor network, which is made by the convergence of sensor, micro – electro – mechanism system and networks technologies, is a novel technology about acquiring and processing information. Wireless communication module is the most important component of the energy consumption on the WSN node boards, node identity is necessary in each communication with others. We consider the wireless sensor network (WSN) as a unknown anonymous network (UAN) and analyze the disadvantage of assigning distinct identities which have been proposed to nodes of an UAN. The paper discusses the three phases of the identity assigning, then presents a new Layered Dynamic Identification Assigning (LDIA) algorithm for WSN, which is a distributed and energy efficient solution. The performance of the LDIA is verified under the NS2 simulation environment and in comparison with the DFS、0 – 1 – Split、L – P and W&L methods, and a number of experiments are performed under the NS2 Simulation Environment. The simulation results indicate that the proposed algorithm can satisfy the requirements for flexible deployment, low cost, high scalability and it is more effective.

Key words: wireless sensor network (WSN); unique node identification; anonymous network; layered dynamic ID assigning