

1-2-2019

Application of Wavelet Transform in Simulation Model Validation of Outboard Active Decoy

Hongxi Zhang

Unit 93, No.91404 Troops of PLA, Qinhuangdao 066000, China;

Zhang Jie

Unit 93, No.91404 Troops of PLA, Qinhuangdao 066000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Wavelet Transform in Simulation Model Validation of Outboard Active Decoy

Abstract

Abstract: Aiming at the characteristics that the output signal of outboard active decoy simulation model is non-stationary random signal, a simulation model verification method based on wavelet transform is proposed. *The measured and simulated signals are decomposed into low frequency and high frequency parts by determining the wavelet function. For the low frequency part with stationary state, the characteristic data is obtained by parameter fitting with the least square method. For the high frequency part, AR model is used to fit the parameters, and the fitting parameters are used as the characteristic data, The correlation coefficient method is used to analyze and calculate the consistency of the characteristic data of low frequency and high frequenc.* According to this strategy, the outboard active decoy simulation model is verified using the external field test data under the typical application situation. The result shows that the method is helpful for improving the accuracy of model validation.

Keywords

wavelet transform, outboard active decoy, model validation, non-stationary random signal

Recommended Citation

Zhang Hongxi, Zhang Jie. Application of Wavelet Transform in Simulation Model Validation of Outboard Active Decoy[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 318-324.

小波变换在舷外有源诱饵仿真模型验证中的应用

张鸿喜, 张洁

(91404部队93分队, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 针对舷外有源诱饵仿真模型输出为非平稳随机信号的特点, 提出了一种基于小波变换的仿真模型验证方法。验证策略是: 通过确定小波函数, 将实测和仿真信号分解为低频和高频两部分。对于处于平稳状态的低频部分, 采用最小二乘法进行参数拟合取得其特征数据; 对于高频部分, 采用AR模型进行参数拟合, 将拟合参数作为其特征数据; 利用相关系数法分别对低频和高频部分特征数据的一致性程度进行分析与计算, 完成模型验证。按照该策略, 利用典型应用态势下的外场试验数据, 对舷外有源诱饵仿真模型进行了验证。应用表明, 该方法有助于提高模型验证的准确性。

关键词: 小波变换; 舷外有源诱饵; 模型验证; 非平稳随机信号

中图分类号: TJ765.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2018)01-0318-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801042

Application of Wavelet Transform in Simulation Model Validation of Outboard Active Decoy

Zhang Hongxi, Zhang Jie

(Unit 93, No.91404 Troops of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Aiming at the characteristics that the output signal of outboard active decoy simulation model is non-stationary random signal, a simulation model verification method based on wavelet transform is proposed. The measured and simulated signals are decomposed into low frequency and high frequency parts by determining the wavelet function. For the low frequency part with stationary state, the characteristic data is obtained by parameter fitting with the least square method. For the high frequency part, AR model is used to fit the parameters, and the fitting parameters are used as the characteristic data. The correlation coefficient method is used to analyze and calculate the consistency of the characteristic data of low frequency and high frequenc. According to this strategy, the outboard active decoy simulation model is verified using the external field test data under the typical application situation. The result shows that the method is helpful for improving the accuracy of model validation.

Keywords: wavelet transform; outboard active decoy; model validation; non-stationary random signal

引言

随着武器系统复杂性的不断提高, 对武器装备的试验鉴定与评估也不断提出新的要求, 建模和仿

真技术在装备试验评估中的作用越来越明显, 贯穿于试验的全过程。舷外有源诱饵作为对付反舰导弹的一种有效干扰手段, 是对传统有源、无源干扰方式的补充。在舷外有源诱饵装备试验鉴定过程中, 进行实弹试验为消耗性试验, 试验费用昂贵, 成本巨大, 不可能大量重复进行。为检验舷外有源诱饵的干扰效果, 需要通过仿真试验手段来获得大样本数据作为验前信息, 与实弹试验数据相融合, 综合进行统计推断。



收稿日期: 2015-10-08 修回日期: 2016-05-28;
作者简介: 张鸿喜(1972-), 男, 河北秦皇岛, 硕士, 高工, 研究方向为电子战仿真技术与应用; 张洁(1979-), 女, 河北秦皇岛, 工程师, 研究方向为系统建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

仿真数据的利用是有条件的, 即仿真模型的可信度必须得到保证, 这就要求必须首先对仿真模型进行验证。目前仿真模型验证的基本方法是相容性检验, 分为时域法和频域法, 常用的时频域分析方法如 TIC 法、灰色关联系数法、窗谱估计法等^[1-2], 应用已相对成熟, 但各种方法的使用都存在限制, 大多是针对平稳信号, 只能单独从时域或频域进行单一分析, 文献[3]详细介绍了这些方法的原理、使用范围和限制条件。由于要模拟导弹导引头在干扰条件下的跟踪过程, 舷外有源诱饵仿真模型的输出是非平稳随机时间序列, 使用上述经典方法前必须先进行平稳化处理, 这势必会造成原始数据的失真, 使模型验证结果的可信度降低。小波变换是一种变分辨率的时频分析方法, 在分析低频信号时, 其时间窗很大, 而分析高频信号时, 其时间窗较小, 完全符合实际应用中高频信号持续时间短, 低频信号持续时间长的规律^[4], 具有分辨率高、局部分析性能好等特点。利用小波变换理论对舷外有源诱饵模型输出信号进行处理, 可减少数据丢失, 增加模型验证的准确度。文献[5]即根据不同尺度下小波变换可以在不同粒度下对仿真数据进行仿真分析的特点, 将小波变换应用于导弹仿真模型验证。文献[6]针对履带车辆车体加速度采样信号成分复杂, 直接处理容易受到噪声的影响而缺乏准确性的特点, 利用小波变换的频段划分特性对信号进行, 可消除噪声的影响, 提高了信号分析的准确性。

综上所述, 应用小波变换理论对仿真模型进行验证已有一些较深入的研究, 但真正结合武器系统试验与评估的实际应用, 还需要根据具体情况提出系统有效的验证策略。本文以舷外有源诱饵仿真模型为研究对象, 设计了基于小波变换的仿真模型验证策略, 并以舷外有源诱饵对导弹导引头的典型干扰过程为例, 按照该策略的方法和步骤对诱饵的仿真模型进行了验证, 可为其他类似模型验证提供参考。

1 舷外有源诱饵仿真模型分析

舷外有源诱饵的干扰原理与箔条质心干扰的

作用原理基本相同, 有源诱饵通过放大和转发敌方雷达的信号, 与水面舰艇的真实回波信号共同作用来完成对导弹的诱骗^[7]。开展舷外有源诱饵的仿真工作, 主要是进行舷外有源诱饵对导弹导引头的干扰过程模拟, 研究和分析干扰效果。在文献[8]中, 对舷外有源诱饵仿真进行了详细的阐述。

舷外有源诱饵仿真模型主要包括导弹弹道模型、目标及诱饵运动模型、导引头(末制导雷达)模型、目标回波模型、诱饵信号模型等内容。其中, 核心为导引头模型, 为了尽可能逼真描述导引头在不同目标及干扰条件下的行为特性, 采用信号级仿真模型。本文对单脉冲测角体制的主动式脉冲雷达导引头, 采用零中频信号形式进行建模, 相对功能仿真, 信号仿真能复现既包含幅度又包含相位的信号, 复现这种信号的发射、在空间传输、经散射体反射、杂波与干扰信号叠加以及在接收机内进行处理的全过程。

舰载舷外有源诱饵使用时, 由于涉及到侦察装备引导和战术决策等多方面因素, 诱饵干扰的起始时刻具有随机性(反应时间不能认为是常量), 干扰样式、干扰参数随时间和空间的变化情况都是随机的, 这些先验信息是未知的。在这种情况下, 导引头的跟踪过程是一个非平稳随机过程, 这个过程与干扰效果的发展趋势有关^[9]。因此, 在舷外有源诱饵仿真中, 导引头仿真模型输出为非平稳随机序列, 如图 1、图 2 所示。在进行舷外有源诱饵仿真模型验证时, 在方法选择上要充分考虑这个特点。

2 基于小波变换进行模型验证的相关方法

2.1 小波变换

小波变换在本质上与傅里叶变换类似, 都是将信号用一组小波基函数的线性组合表示出来, 不同的是小波变换选取的基函数不同。傅里叶变换使用具有无限时宽的 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 作为基本函数, 无法提供时间定位信息。

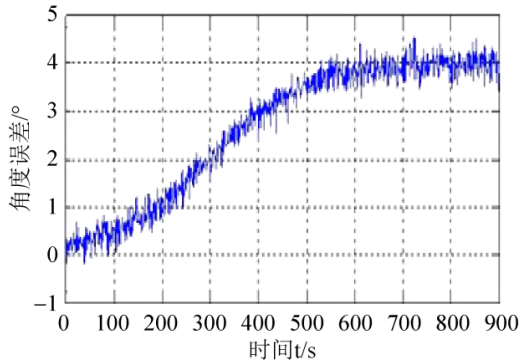


图1 舷外有源诱饵角度欺骗干扰情况下导引头跟踪过程
Fig. 1 Outboard active decoy Seeker tracking process under angle deception jamming

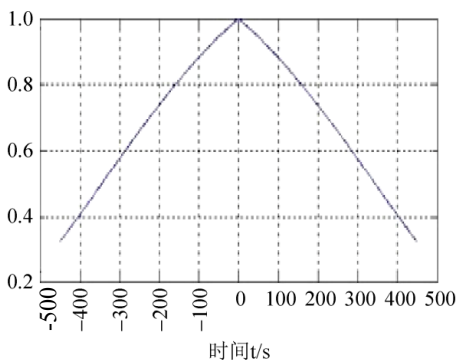


图2 导引头跟踪过程的归一化自相关曲线
Fig. 2 Normalized autocorrelation curve of seeker tracking process

为了提供时间信息,必须使用“有限时宽的波”,同时是在有限时间内不为零,两者同时具备就是小波。数学上讲,小波是一种函数,这个函数具有有限的持续时间,具有突变的频率和振幅,在整个时间范围内的幅度平均值为零,其波形可以是不规则的,也可以是不对称的。目前,简单的将小波理解为满足以下两个条件的特殊信号^[10]:

- (1) 小波必须是震荡的;
- (2) 小波的振幅只能在很短的一段区间上非零,即是局部化的。

小波基函数有多种选择,目前常用的小波函数有 Haar 小波、高斯小波、墨西哥草帽小波、Gabor 小波、Morlet 小波、Littlewood-Paley(LP)小波、Daubechies 小波等等。选用不同的小波函数分析同一问题可能会产生不同的结果,本文在前期研究工作的基础上选用 Daubechies 小波进行分析计算。

小波变换的实质是计算一个个小波分量与信号的相关系数,其直观意义是先用一个时窗最窄、频窗最宽的小波作为尺子去一步步的“丈量”信号,也就是比较这段信号与小波的相似程度。如果所用的小波波形与信号的局部匹配,其相关系数 C 值就越大;反之,如果小波波形与信号的局部相去甚远,则相关系数 C 值就越小。

对于任意函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ($L^2(\mathbb{R})$ 表示平方可积的实数空间,即能量有限的信号空间),其连续小波变换的定义如下^[11]:

$$WT_f(\alpha, \tau) = \langle f(t), \Psi_{\alpha, \sigma}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*(t - \tau/\alpha) dt$$

式中: $\psi(t)$ 为小波函数,又称为基本小波或母小波; $\psi^*(t)$ 表示对小波函数 $\psi(t)$ 取共轭运算; α 为缩放因子,对应于频率信息; τ 为平移因子,对应于时间信息; $WT_f(\alpha, \tau)$ 称为小波变换系数。

在实际应用中,连续小波必须加以离散化。 $f(t)$ 的离散小波变换以内积的形式给出^[11]:

$$d_{m,n} = \langle \Psi_{n,m}(t), f(t) \rangle$$

式中: $\Psi_{n,m}(t)$ 是对 α, τ 离散化后得到的。

由上式得离散小波系数,通过式(1)重建 $f(t)$:

$$f(t) = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} d_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (1)$$

通过离散小波变换,一个信号可以分解为它的细节部分和近似部分,细节部分代表了信号的高频部分,是信号的平稳项;近似部分代表了信号的低频部分,是信号的趋势项。对于仿真模型输出的非平稳信号,可通过小波变换将其分解为低频和高频两部分后进行分析。

2.2 AR 模型谱估计

AR 模型是用自身做回归变量的过程,利用前期若干时刻的随机变量的线性组合来描述以后某时刻随机变量的线性回归模型。对于一个广义平稳随机信号,利用 AR 模型拟合实际上是一种信号建模方法,它将信号的抽取值看成是以前若干时刻采样值的线性组合,又称最大熵估计。文献[13]对 AR 模型的建模过程做了详细的介绍。

假设随机时间序列 $x(n)$ 的系统模型由线性差分方程表示, 即

$$x(n) = \sum_{i=0}^q b_i w(n-i) - \sum_{j=0}^q a_j x(n-j)$$

式中, $w(n)$ 为白噪声序列, 对上式进行 Z 变换, 得

$$\sum_{j=0}^q a_j x(z) z^{-j} = \sum_{i=0}^q b_i w(z) z^{-i}$$

所以, 系统的传递函数为

$$H(z) = x(z)/w(z) = \sum_{i=0}^q b_i z^{-i} / \sum_{j=0}^q a_j z^{-j}$$

这样, 确定了系数 a_j 、 b_i 后, 就能确定随机序列 $x(n)$ 的系统模型, 当 $i>0$, $b_i=0$ 时, 系统的差分方程可变为

$$x(n) = -\sum_{j=0}^q a_j x(n-j) + w(n) \quad (2)$$

上式即为自回归模型, 简称 AR 模型。

假设将功率谱密度为 $p_w(z) = \sigma_w^2$ 的白噪声作为输入, 利用 AR 模型得到的输出功率谱密度为^[16]

$$P_x(\omega) = \sigma_w^2 / |A(e^{j\omega})|^2 = \sigma_w^2 / (1 + |\sum_{k=1}^q \alpha_k e^{-j\omega k}|^2)$$

AR 模型的参数可通过 Yule-Walker 法或 Burg 法进行估计, 本文拟采用 Yule-Walker 法。通过求解 p 阶 Yule-Walker 方程:

$$\begin{pmatrix} R_x(0) & \cdots & R_x(-q) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_x(q) & \cdots & R_x(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_w^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

得到 AR 模型的参数 $\alpha_k (k=1, 2, \dots, q)$, 进而求得 $x(n)$ 的功率谱估计。

2.3 相关系数法

相关系数法的思想是先由样本序列得到二者之间的误差序列, 然后根据该序列的特征对试验结果的一致性进行判断。该方法比较直观, 物理意义明确, 通过计算相关系数 r 来判断两者的一致性程度。相关系数表征了两个时间序列之间的相关关系的近似程度, 绝对值越接近于 1, 相似度越大。

相关系数 r 通过下式给出^[14]:

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)}} \quad (4)$$

3 模型验证策略与步骤

根据上述对小波变换原理的分析可知, 小波分解本身对信号即具有平滑作用。通过离散小波变换可将信号分解为低频和高频两个部分, 分解后的信号在频率成分上较原始信号单一, 非平稳随机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^[13]。基于小波变换对舷外有源诱饵仿真模型进行验证的基本策略是: 对于实测和仿真信号, 利用小波变换方法进行分解, 通过参数拟合获得特征数据, 最后对实测和仿真信号的特征数据进行一致性检验, 得出仿真模型是否有效。

模型验证的步骤设计如下^[15]:

(1) 在选定的尺度水平下确定小波函数 $\psi(t)$, 利用公式(1)对实测和仿真信号进行分解, 将信号分解为低频和高频两部分;

(2) 对于小波分解后得到的低频部分, 完全处于平稳状态, 故可利用经典方法中最常用的最小二乘拟合法进行参数拟合, 将拟合数据作为其特征数据;

(3) 对于小波分解后得到的高频部分, 对信号采用 AR 模型进行参数拟合;

分解后的高频部分为平稳随机时间序列, 可以通过建立线性模型来拟合该时间序列, 提取其中的有用信息。时间序列分析最重要的应用是分析和表征观察值之间的相互依赖性和相关性, 但数理统计中讨论的线性回归模型对一个时间序列内部的相关关系是无法描述的。AR 模型也称为自回归模型, 它主要用于描述数据序列内部的递推的线性回归关系, 故拟采用 AR 模型拟合参数作为高频部分的特征数据。

(4) 最后, 利用相关系数法分别对信号低频部分和高频部分特征参数的相关性进行分析与计算。

4 实例分析

4.1 舷外有源诱饵试验设计

舷外有源诱饵对抗反舰导弹的典型态势过程

为：反舰导弹自平台发射后，以自控飞行方式按程序飞向目标舰艇；在距离目标一定距离时导引头开机，对目标进行搜索、捕获和跟踪，锁定目标后转入制导飞行阶段；当目标舰艇舰载电子侦察设备探测到有高速逼近的目标时，根据作战准则选择合适时机向指定空间位置发射诱饵弹；诱饵伞降过程中调整天线朝向，指向反舰导弹，按装订的干扰样式对导引头实施干扰，造成反舰导弹脱靶，达到保护目标舰艇的目的^[16]。如图3所示。

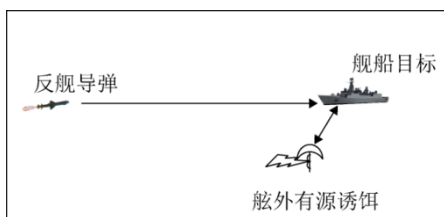


图3 舷外有源诱饵对抗反舰导弹典型态势示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the outboard active decoy against anti-ship missile typical situation

在进行外场试验时，考虑可实现性，一般以导引头固定架设的方式进行。试验时，从上述对抗过程的导引头开机开始，到诱饵落水为止，在诱饵整个工作过程中记录对导引头的干扰效果。试验结果评判一般是以监测干扰前后以及干扰过程中导引头输出的跟踪误差变化，考核舷外有源诱饵干扰对导弹制导性能的影响。为了使用外场试验实测数据对舷外有源诱饵仿真模型进行验证，仿真试验也按该过程进行。

4.2 验证过程

按照上述试验过程进行仿真，得到导弹导引头跟踪角度的仿真数据。选取在相同的初始状态、气象条件和诱饵的布放信息等情况下的外场试验数据，对模型进行验证，如图4所示。

针对上述试验数据，按照第3节所介绍的流程对舷外有源诱饵的仿真模型进行验证。所有算法均通过编写 matlab 程序实现。

4.2.1 信号分解

利用小波方法将信号的低频部分和高频部分

分别提取出来，选用 db 小波，基于 Mallat 算法对信号进行分解获得的低频部分和高频部分见图5。

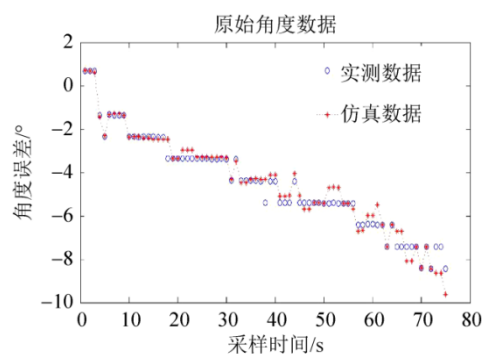


图4 导引头跟踪角度的实测数据和模型输出数据
Fig. 4 Measured data of the seeker tracking angle and output data of the model

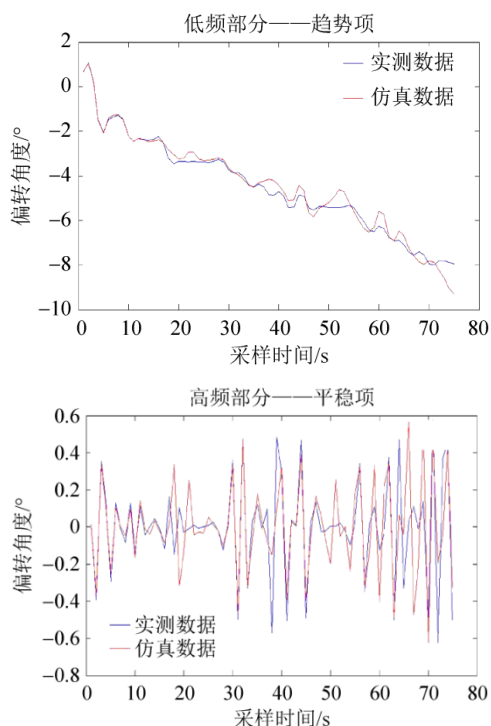


图5 数据分解后的低频部分与高频部分
Fig. 5 Low frequency part and high frequency part after data decomposition

由图5可知，运用小波方法可以很好的将非平稳随机信号分解为低频部分和高频部分，通过对两者进行参数拟合，利用经典模型验证方法进行分析。

4.2.2 数据拟合

对分解后的低频数据和高频数据分别进行参

数拟合。

(1) 低频部分

对于低频部分采用最常用的最小二乘法进行曲线拟合, 经多次分析确定拟合次数为 9, 即利用九次多项式进行参数拟合。得出低频部分的拟合结果多项式系数分别为(-0.327 6, 0.002 835, 2.083, 0.325 3, -4.52, -1.147, 3.491, 0.962 9, -2.485, -4.649)和(-0.229 4, -0.018 86, 1.369, 0.360 5, -2.913, -1.156, 2.183, 0.913 4, -2.153, -4.467), 拟合结果如图 6 所示。

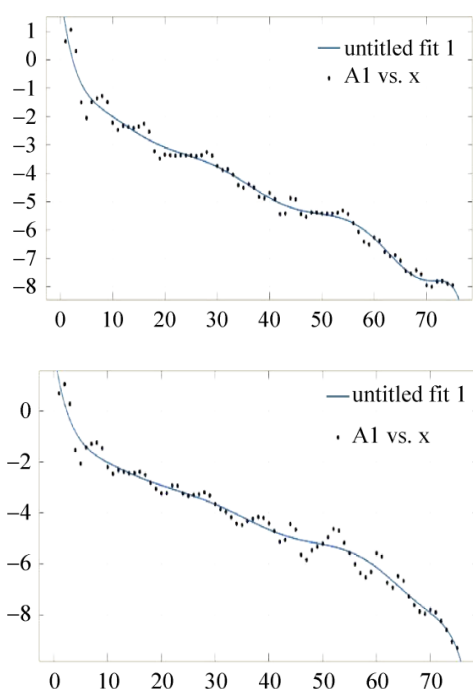


图 6 低频部分拟合结果

Fig. 6 Low frequency partial fitting results

(2) 高频部分

高频部分利用 AR 模型进行参数拟合。按照第 3 节的思路, 首先按照公式(2)建立 AR 模型, 然后运用 Yule-Walker 方法, 即公式(3)计算模型的相关参数, 取 n 值为 10, 最后求得 AR 参数误差自相关参数分别为(1.000 0, 1.543 2, 1.920 6, 1.928 8, 1.759 1, 1.355 9, 1.063 4, 0.624 1, 0.351 2, 0.112 8, -0.004 0)和(1.000 0, 1.546 4, 2.032 7, 2.022 6, 1.871 3, 1.454 9, 1.267 2, 0.909 7, 0.602 8, 0.294 8)。

图 7 显示了拟合结果及拟合的自相关参数。

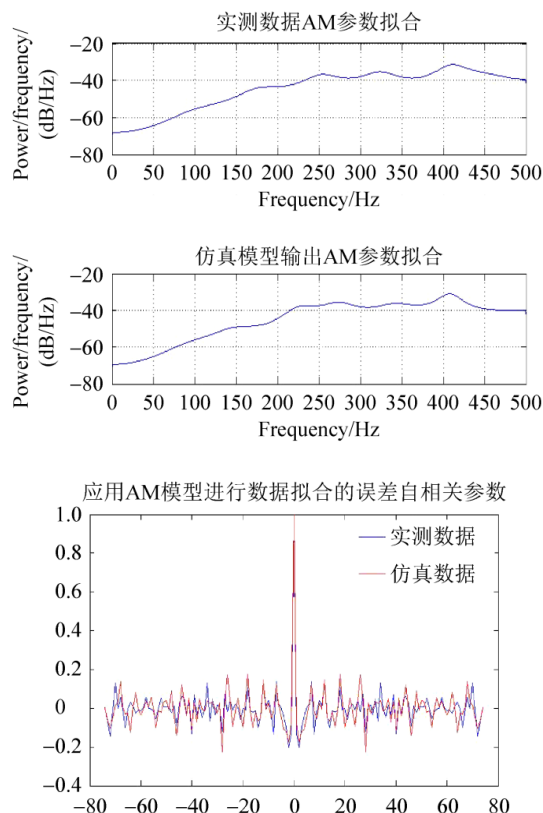


图 7 高频部分拟合结果

Fig. 7 High frequency partial fitting results

4.2.3 相关性分析

通过上述分析与计算, 分别得到了外场试验和仿真模型输出的低频和高频拟合数据。下面利用相关系数法, 对两组数据的一致性程度进行判断, 从而完成对仿真模型的验证工作。

实测数据和模型输出数据记为 x_i 和 y_i ($i=1,2,\dots,75$), 根据 2.3 分别计算两者低频部分和高频部分的相关系数。

对于低频部分, 计算得 $\bar{x}=-4.476$, $\bar{y}=-4.418$, 带入式(4), 得到相关系数为 $r=0.930 5$ 。对于高频部分, 计算得 $\bar{x}=-0.001 4$, $\bar{y}=-8.886 1 \text{ e-}04$, 带入式(4), 得到相关系数为 $r=0.902 1$ 。

从结果可以看出, 外场数据和仿真模型输出的低、高频部分的一致性程度非常高。由此, 可以判断出该仿真模型是可用的。

5 结论

本文从舷外有源诱饵靶场试验鉴定与评估的

实际出发,提出了一种基于小波变换的仿真模型验证策略。利用该方法无需对非平稳随机数据进行平稳化处理即可进行分析,最大限度保留了原始数据的信息。从验证结果来看,小波变换在仿真模型验证中可以发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 董德志, 王江云, 张平. 基于 OMLHD 的仿真模型验证方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 766-770.
Dong Dezhi, Wang Jiangyun, Zhang Ping. Simulation model verification method based on OMLHD[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 766-770.
- [2] 李亚男. 仿真系统模型验证方法和工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Li Ya'nan. Research on model verification method and tool for simulation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [3] Law A M, Kelton W D. Simulation modeling and analysis [M]. Second edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
- [4] 吴晓燕, 杨丽娜, 周延延, 等. 基于小波变换的仿真模型验证方法研究[J]. 空军工程大学学报, 2008, 9(6): 52-55.
Wu Xiaoyan, Yang Lina, Zhou Yanyan, et al. Research on simulation model verification method based on Wavelet Transform[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2008, 9(6): 52-55.
- [5] 符文星, 朱苏朋, 王建华, 等. 小波变换在导弹仿真模型验证中的应用研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 174-176.
Fu Wenxing, Zhu Supeng, Wang Jianhua, et al. Application of wavelet transform in missile simulation model verification[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2): 174-176.
- [6] Ewins D J. Model Validation for Structural Dynamics in the Aero-Engine Design [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering(S1673-7393), 2009, 3(4): 480-491.
- [7] 许海龙, 周水楼, 李宏中. 舰载舷外雷达有源诱饵作战应用和效能分析[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 35(7): 50.
Xu Hailong, Zhou Shuilou, Li Hongzhong. Analysis of shipboard radar active decoy combat application and effectiveness[J]. Electronic information warfare technology, 2007, 35(7): 50.
- [8] 邓杏松. 舰载舷外有源诱饵干扰效果研究与分析[J]. 舰船电子对抗, 2011, 12(12): 42-45.
Deng Xingsong. The research and analysis of the jamming effect of Shipborne outboard active decoy[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 12(12): 42-45.
- [9] 穆虹. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 546.
Mu Hong. Design of radar seeker for air defense missile[M]. Beijing: Aerospace Press, 1996: 546.
- [10] 于凤琴. 实用小波分析十讲[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 3-13.
Yu Fengqin. Ten practical wavelets analysis[M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University press, 2012: 3-13.
- [11] 刘文钊, 戚宗锋, 洪丽娜, 等. 基于小波变换和经验模式分解的多路径误差提取及验证方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(1): 86-89.
Liu Wenzhao, Qi Zongfeng, Hong Lina, et al. Research on multi path error extraction and verification method based on wavelet transform and empirical mode decomposition[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(1): 86-89.
- [12] Abdourrahmane M. On the Statistical Decorrelation of the Wavelet Packet Coefficients of A Band-Limitedwide-sense Stationary Random Process[J]. IEEE Transactions Signal Processing, 2007, 87(5): 2320-2335.
- [13] Yang F B, Wang X X. Combination method of conflictive confidence in D-S evidencetheory [M]. Beijing: National Denfense Industry Press, 2010: 66-89.
- [14] 吴方. 时频域分析方法在仿真模型验证中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wu Fang. Application of time domain analysis method in simulation model verification[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [15] 黄书华, 姚宜斌, 何军泉. 利用总体最小二乘估计 AR 模型参数及其在变形监测中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 12(12): 41-43.
Huang Shuhua, Yao Yibin, He Junquan. Estimation of AR model parameters by using total least squares and its application in deformation monitoring[J]. Engineering Investigation, 2013, 12(12): 41-43.
- [16] 黄文亮, 刘丽明, 顾振杰. 舰载舷外有源诱饵载荷动态干扰效果仿真试验系统设计[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(2): 74-77.
Huang Wenliang, Liu Liming, Gu Zhenjie. Design of simulation system of shipboard active decoy jamming effect of dynamic load[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2013, 36(2): 74-77.