

基于小波分解的超宽带雷达去噪方法

焦光龙, 冯存前, 丁前军

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 为提高超宽带雷达信号的信噪比, 分析了运用小波变换的分解与重构理论来实现超宽带雷达信号去噪的原理, 并进行了仿真, 结果表明, 这种方法具有较好的去噪能力, 去噪效果与目标信号及干扰信号的特性有关。

关键词: 超宽带雷达; 小波变换; 噪声干扰

中图分类号: TN957.54 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)02-0066-03

对超宽带雷达而言, 目标不能看成简单的点目标, 而应是多散射中心组成的分布目标。由各散射中心反射的目标回波是发射信号与目标冲激响应的卷积, 且超宽带信号还会激起与目标特性有关的谐振响应, 称为晚期响应。由于目标的不可知性, 所以目标回波不能由发射信号来确定, 从而无法设计出与之相对应的匹配滤波器。本文应用多分辨理论, 通过小波分解与重构可得到具有不同分辨率信号的低频轮廓和低频细节, 用某一分辨率的低频轮廓来近似目标的雷达回波, 即可在一定程度上去除噪声和低频干扰, 以提高信噪比。

1 离散小波变换及多分辨分析

设小波母函数为 $\psi(t)$, 令尺度参数和平移参数分别为 $a = 2^j, b = 2^j k$, 则得到二进小波

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbf{Z} \quad (1)$$

信号 $s(t)$ 的二进离散小波变换为

$$C(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (2)$$

多分辨分析是把信号 $s(t)$ 分解为低频部分和高频部分^[1], 分别对应低频系数 cA_1 和高频系数 cD_1 , 再对低频部分进行下一层分解, 依次类推, 得到信号的多层分解。

设小波函数 $\psi(t)$ 对应的尺度函数为 $\phi(t)$, 分解低通滤波器和高通滤波器分别为 $h(n)$ 和 $g(n)$, 小波函数对应高通滤波器, 尺度函数对应低通滤波器, 则有

$$cA_{j+1}(m) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \overline{h(k - 2m)} cA_j(k) \quad (3)$$

$$cD_{j+1}(m) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \overline{g(k - 2m)} cA_j(k) \quad (4)$$

这里 $cA_0 = s(t)$ 。由第 j 层的低频系数 cA_j 和高频系数 cD_j 可分别重构第 j 层的信号低频轮廓 A_j 和高频细节 D_j , 重构公式如下:

$$A_j(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (5) \quad D_j(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

其中, $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$, 称为二进尺度函数。重构后各层的低频轮廓和高频细节构成对信号 $s(t)$ 的多分辨分解图, 如图 1 所示。 A_j 被分解为 A_{j+1}, D_{j+1} , 即 $A_j = A_{j+1} + D_{j+1}$, 则

$$s(t) = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = A_3 + D_3 + D_2 + D_1$$

收稿日期: 2004-04-25

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 焦光龙(1963-), 男, 陕西富平人, 讲师, 硕士, 主要从事雷达教学与研究。

若进行 J 层分解,则有

$$s(t) = A_J + \sum_{j \leq J} D_j \quad (7)$$

2 基于小波分解的去噪原理

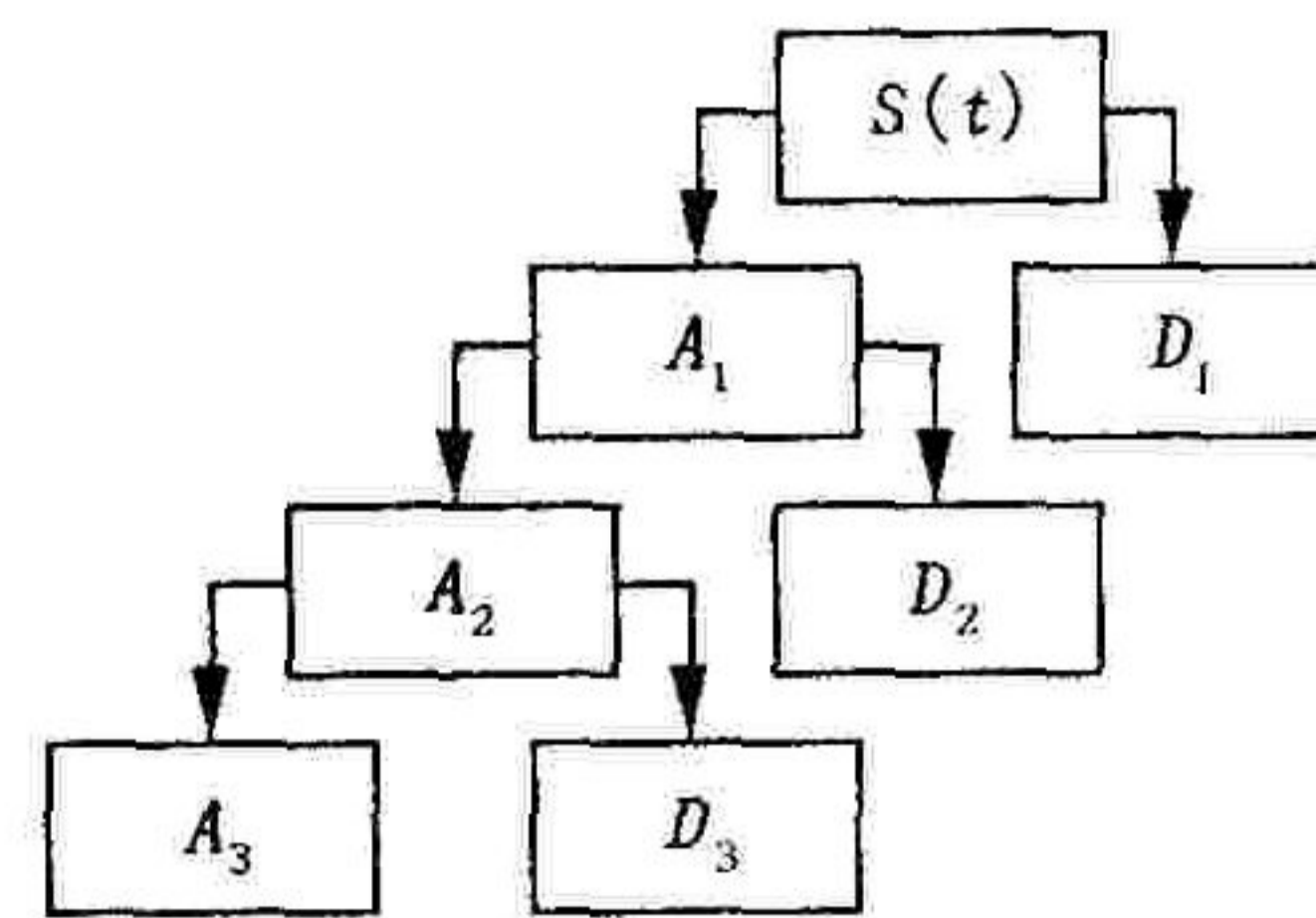


图 1 信号的小波分解

由式(6)可以看出,高频系数 cD_j 是对信号 D_j 在尺度参数 $a = 2^0 = 1$ 时进行离散小波变换得到的小波系数。结合图 1 可以看出, cD_j 也是信号 A_{j-1} 在尺度参数 $a = 2$ 时进行离散小波变换得到的小波系数。依次类推, cD_j 应等于信号 $s(t)$ 在尺度参数 $a = 2^j$ 时的离散小波变换系数,即

$$cD_j(k) = C(j, k) \quad (8)$$

式(6) 两边对 j 求和并结合式(8) 得

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} D_j(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j, k) \psi_{j,k}(t) = s(t)$$

代入式(7) 得

$$\sum_{j \in \mathbb{Z}} D_j = A_J + \sum_{j \leq J} D_j \quad (9) \quad A_J = \sum_{j \leq J} D_j \quad (10)$$

由式(7)和式(10)可以看出,对信号进行 J 层分解,信号可表示为低频轮廓 A_J 和 高频细节 $D_j (j \leq J)$ 之和, D_j 对应较小的尺度函数 2^j ,对应信号的高频成分;低频轮廓 A_J 实际上是 $D_j (j > J)$ 之和,对应大的尺度函数,对应信号的低频成分。把小波分解应用于超宽带雷达回波信号处理^[2],用某一层上的低频轮廓来近似目标的雷达回波,即可在一定程度上去除噪声和 高频干扰,以提高信噪比^[3]。

在小波分解中,信号的低频轮廓 A_j 代表着信号的发展趋势,它对应着大的小波变换的尺度参数,且随着分解层次的增加, A_j 反映的信号低频特征愈加明显,而高频细节信息会随之减少。因此,可选择某一分辨率上的低频轮廓 A_j 来近似目标回波,这种选择应考虑以下两个方面:一是应使噪声干扰作为高频细节 $D_j (j \leq J)$ 尽量被去除;二是应保持目标回波信号尽量不失真。分解与重构的次数越多,得到低频轮廓的频率越低,用低频轮廓近似目标回波时去除的高频细节信息(包括干扰和信号本身的高频成分)也越多,目标回波本身高频成分的损失将导致波形失真;反之,分解与重构的层次越低,这种近似丢失的高频细节越少,重构的目标回波 A_j 损失的高频成分也越少,目标回波的信息损失较小,但噪声干扰去除不净。因此,在选择哪一级分解重构的低频轮廓来近似目标回波时,应折衷考虑去噪效果和 目标回波信息的保留。

3 仿真结果及结论

以金属板的超宽带雷达回波叠加噪声调制干扰和 高频连续波干扰为例进行仿真^[4],干扰中心载频 $f_c = 3$ GHz,小波函数为 Daubechies4,仿真结果如图 2~5 所示。图 2~5 中,上图表示目标回波叠加干扰的波形图,下图中的实线表示用低频轮廓 A_3 近似的重构目标信号,虚线表示实际目标回波信号。

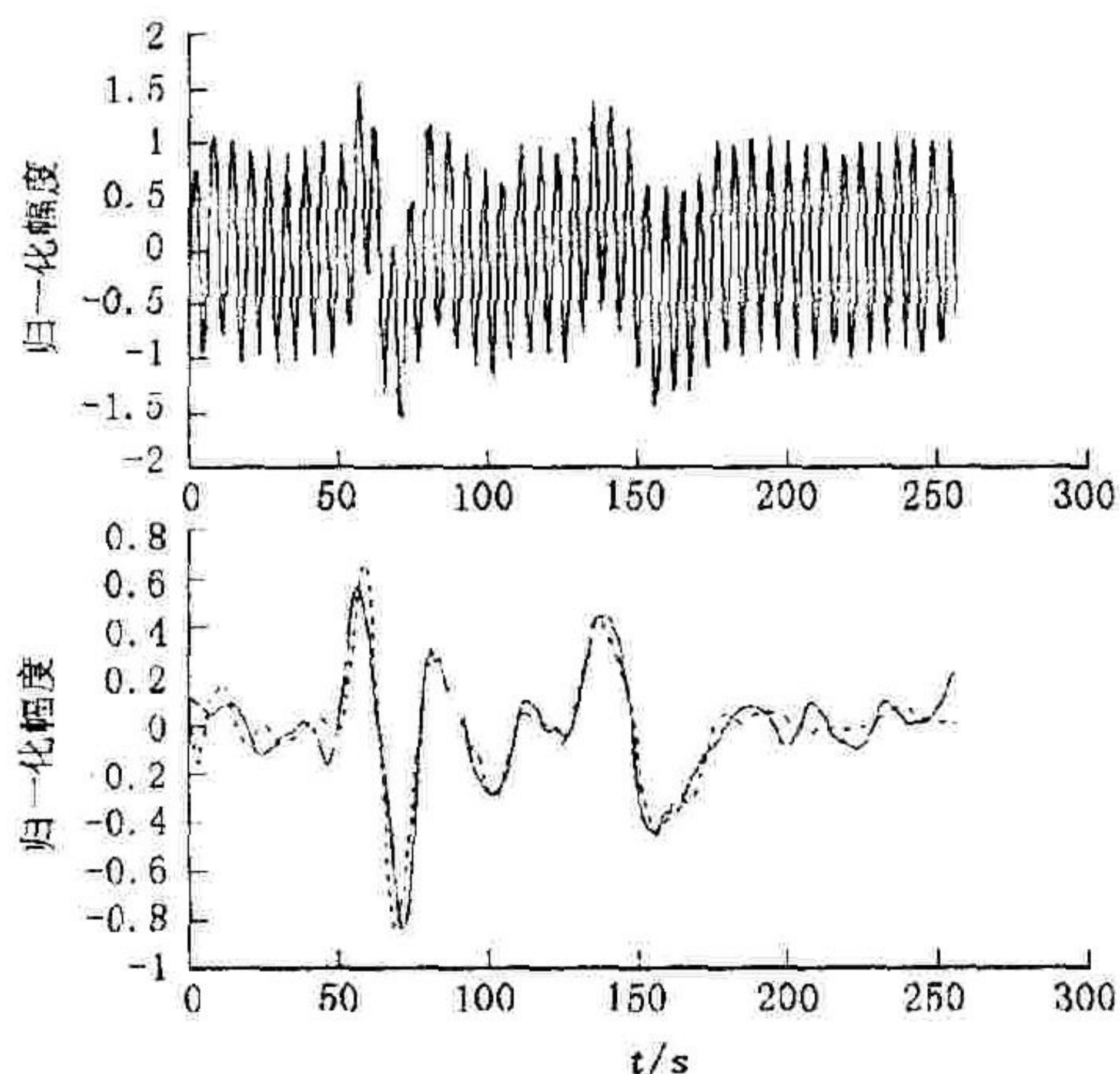


图 2 噪声调频干扰的仿真结果

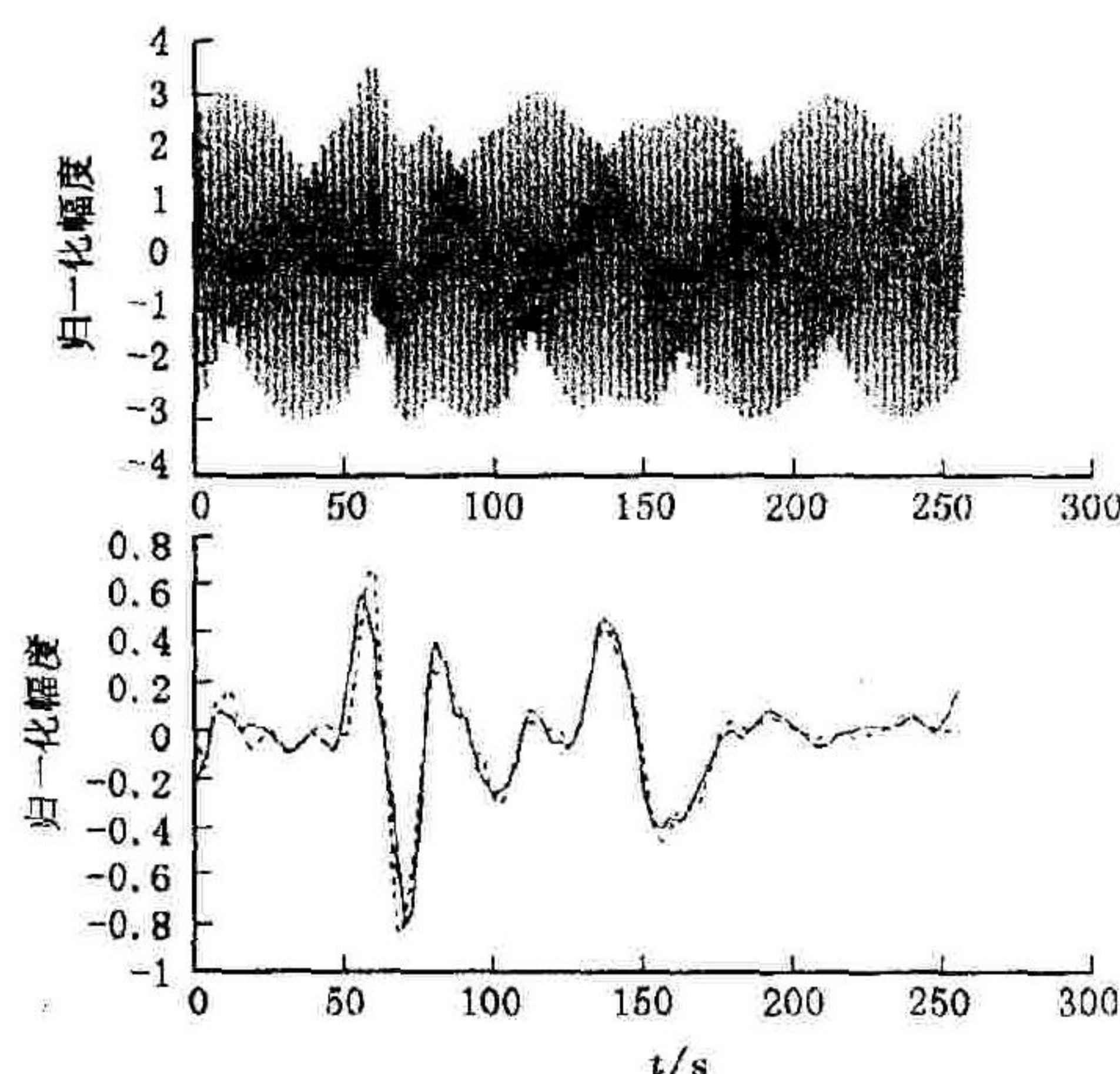


图 3 高频连续波干扰的仿真结果

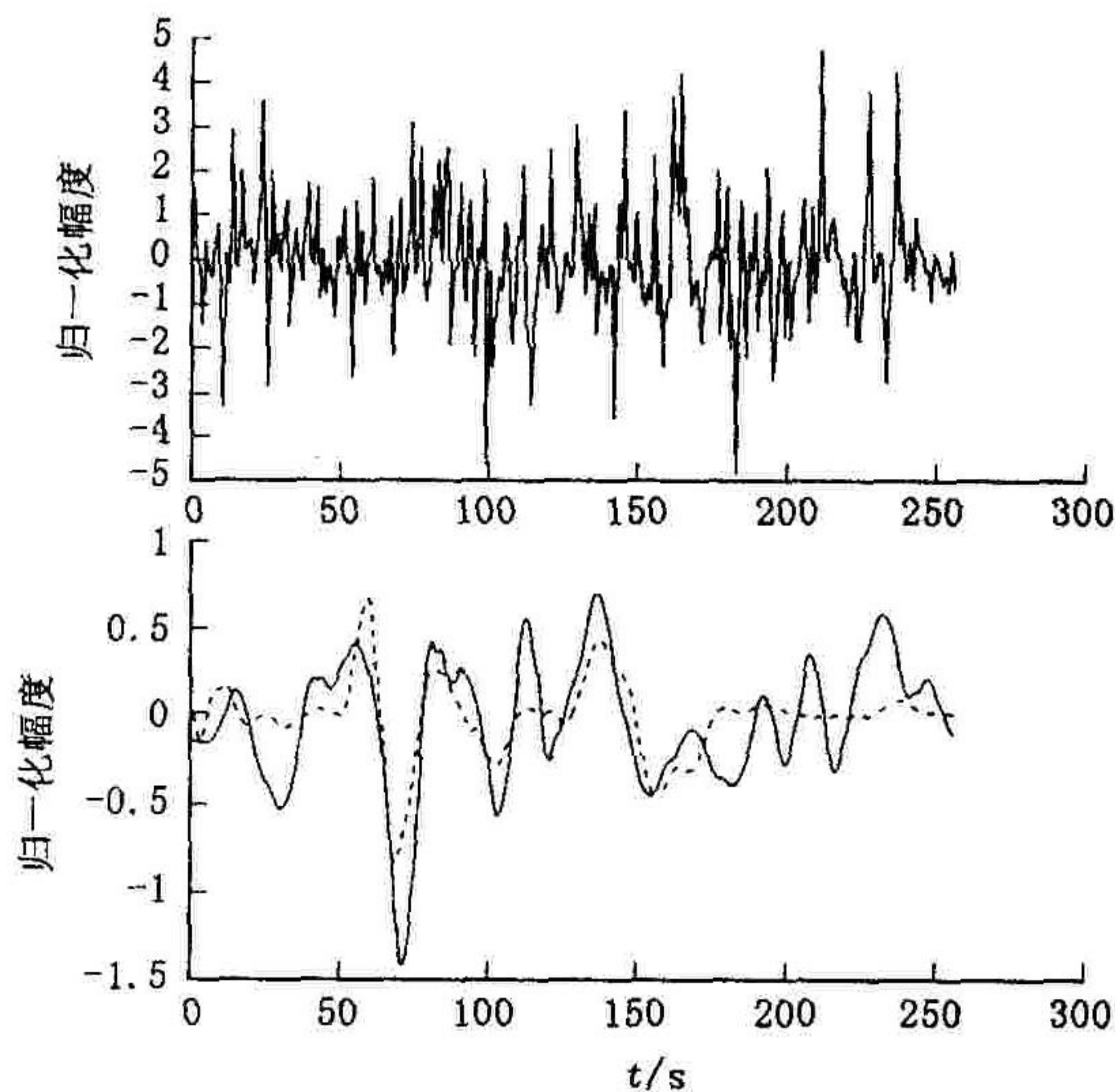


图4 噪声调幅干扰的仿真结果

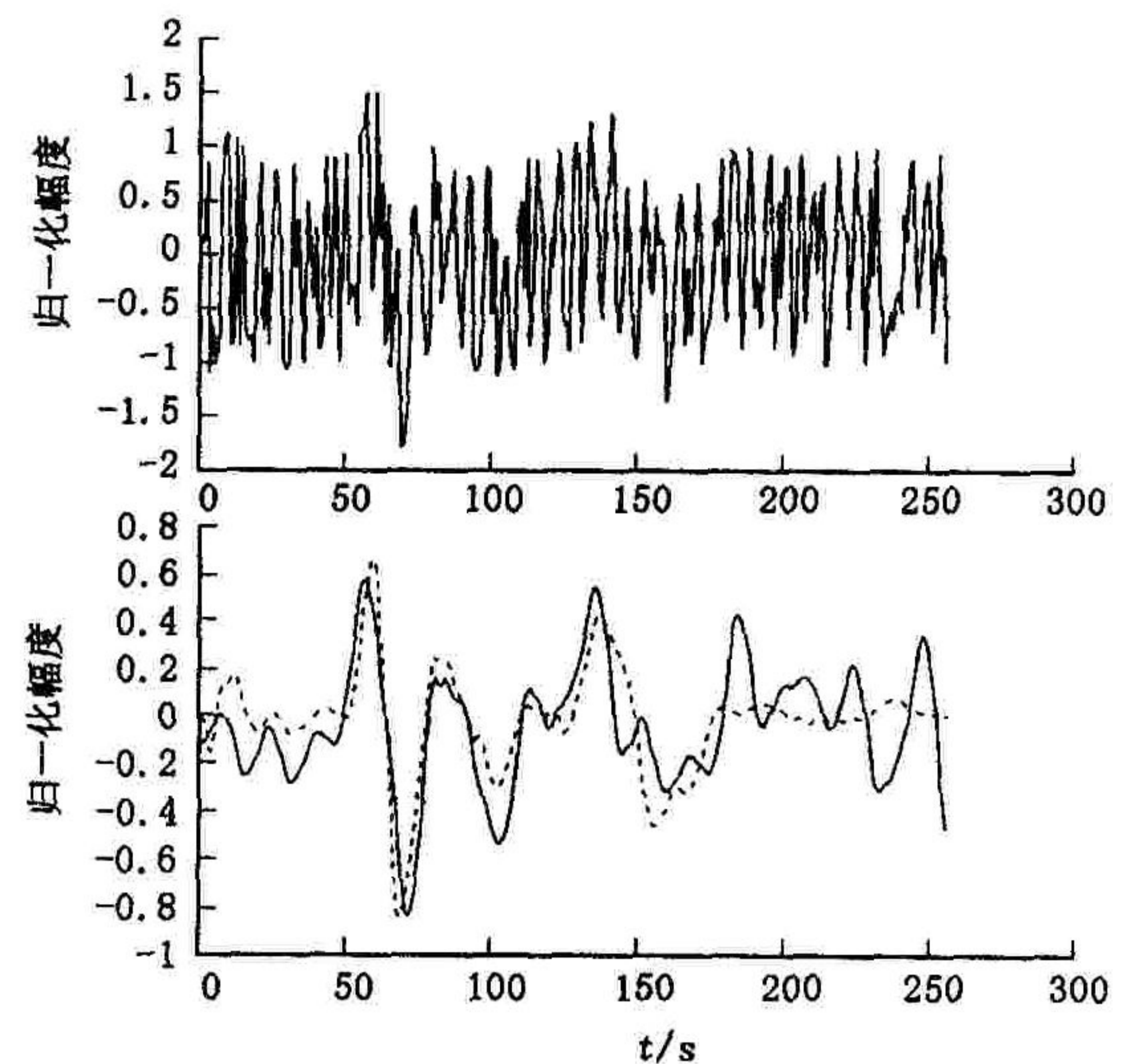


图5 噪声调相干扰的仿真结果

从图2~5可以看出,对噪声调频干扰和连续波干扰,重构的目标信号失真小,干扰滤除效果也较好;而对噪声调幅和噪声调相干扰,重构的信号失真大,高频干扰成分滤除不干净,这说明低频轮廓 A_3 中包含较多的干扰信号频谱成分,如果采用更高层的低频轮廓来近似,则重构信号相对目标信号的失真太大。进一步的仿真表明,如果中心载频太小,则去噪失效,这是因为低频的干扰分量总是包含于低频轮廓中。

本文虽然只是用小波分解的低频轮廓来近似目标回波信号,但可以对这种去噪方法进行进一步研究,比如考虑选择合适的小波函数,由某些高频细节(而不是忽略所有 $D_j, j \leq J$)和低频轮廓 A_j 来重构目标信号,以保证在一定信噪比的前提下,减小目标信号固有的高频成分损失,即减小目标回波所包含目标信息的损失。可见,基于小波分解的去噪方法为提高超宽带雷达回波的信噪比提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [2] 陈隽永. 超宽带雷达中基于小波变换的时延估计方法[J]. 电波科学学报,2001,16(2):245-248.
- [3] 付红卫. 一种提高冲激雷达信噪比的方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,1(2):32-35.
- [4] 胡昌华. 基于Matlab的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.

(编辑:田新华)

Method of Eliminating Noise from Ultra - wideband Radars Based

on Wavelet Decomposition

JIAO Guang-long, FENG Cun-qian, DING Qian-jun

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

Abstract: The principle of applying the decomposition and reconstruction theory of wavelet transform to eliminating the noise from UWB radar signal is analyzed, and the simulation is carried out. The result shows that this method is better in noise elimination. The effectiveness of this method is related to the characteristics of the target signal and jamming signal.

Key words: UWB radar; wavelet transform; noise jamming