

文章编号: 1001-0920(2001)03-307-05

基于小波变换的低信噪比雷达回波快速检测法

李合生¹, 毛剑琴¹, 李世玲²

(1. 北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100083; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 根据二进小波变换对信号分解的形式与特性, 给出了信号在小波域中广义子波能量的定义, 并利用子波变换的多尺度分解特性构造出广义小波能量积累器。在此基础上设计出一种直接利用广义小波能量积累对低信噪比雷达回波信号进行检测的快速算法。仿真实验结果表明, 该检测算法对强白噪声及强色噪声背景下的低信噪比信号检测比较有效, 对背景噪声具有较好的自适应性, 且该检测算法设计简单, 执行速度快, 可靠性高。

关键词: 小波变换; 信号检测; 检测概率; 虚警率

中图分类号: TN 011

文献标识码: A

Low-SNR Radar Echoes Fast Detection Algorithm Based on Wavelet Transform

LI He-sheng¹, MAO Jian-qin¹, LI Shi-ling²

(1. The Seventh Reserch Devision, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Electronic Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the wavelet transform and its multiscale decompositions, a definition of wavelet energy is proposed as well as a kind of wavelet energy accumulator is constructed, by which the wavelet energy on all different decomposition scales can be accumulated. As an application, an algorithm about weak signal fast detection on wavelet energy accumulation is developed. A piece of simulation program is designed. Simulation results indicate that weak signal detection is very successful depending on wavelet energy accumulation.

Key words: wavelet transform; signal detection; detection probability; false probability

1 引 言

雷达回波信号的传递过程因受许多随机因素的干扰而产生多种类型的随机噪声叠加在真实的雷达回波上。特别是在强噪声背景下, 真实的雷达回波将完全被淹没, 要用通常的信号处理方法对雷达回波进行检测或提纯是非常困难的。在满足一定条件下,

低信噪比雷达回波信号处理要达到实时性要求, 势必对算法设计提出比较苛刻的要求。本文针对低信噪比雷达回波信号处理的实时性要求, 利用小波变换的特有属性, 建立一套在强噪声背景下对低信噪比雷达回波信号进行直接检测的处理方法。

文献[1]研究了小波变换对低信噪比雷达回波中强干扰噪声的有效抑制方法; 文献[2]建立了一套

收稿日期: 2000-03-08; 修回日期: 2000-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(69874002); 中国工程物理研究院电子工程研究所横向合作基金项目

作者简介: 李合生(1970—), 男, 四川巴中人, 工程师, 博士生, 从事智能控制、小波变换理论等研究; 毛剑琴(1940—), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与控制工程、智能控制及应用等研究。

在强噪声背景下的低信噪比雷达回波信号的检测方法,并在工程实践中得到了较好的应用。该算法虽然对低信噪比雷达回波信号检测效果明显,但在目前雷达信号处理的常规硬件条件下,难以达到系统实时处理的要求,因为在该检测算法中,小波变换对回波噪声的抑制是一个非常复杂的处理过程,其中包括5方面的工作:1)信号在小波多尺度分解中的粗分辨率逼近和边缘细节信息获取;2)不同尺度上局部模极大值提取;3)交叉尺度上的模极大值链搜索;4)基于交叉投影算子的不同尺度边缘细节信息恢复;5)利用小波重建算法的提纯信号获取。

这一处理过程算法复杂,运算量大且耗时多。如何绕过“小波去噪”这一处理过程,利用小波多尺度分解特性建立一套高效快速的处理算法,并完成对强噪声背景下低信噪比雷达回波信号的有效检测,这正是本文所要完成的工作。其处理流程如图1所示。

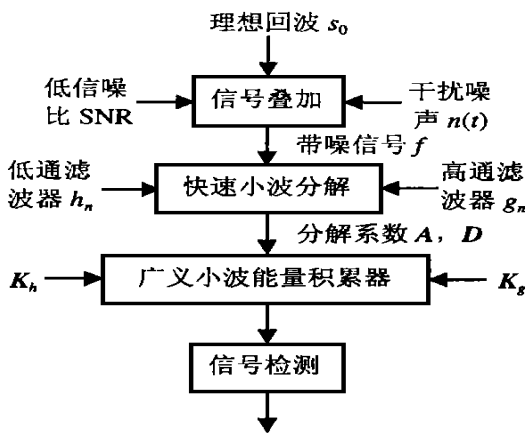


图1 基于小波变换的低信噪比回波快速检测流程图

2 小波变换对信号特征属性的有效刻画

设函数 $\Psi(t)$ 和 $\mathcal{Q}(t)$ 分别为小波变换多分辨率分析中的正交小波和对应的尺度函数, g_n 和 h_n 分别为 $\mathcal{Q}(t)$ 和 $\Psi(t)$ 的脉冲响应,且满足双尺度差分方程

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g_n \mathcal{Q}(2t - n) \quad (1)$$

$$\mathcal{Q}(t) = \sqrt{2} \sum_n h_n \mathcal{Q}(2t - n) \quad (2)$$

在信号处理中, h_n 和 g_n 分别称为小波变换的低通和高通滤波器。根据小波变换多分辨率理论,对于给定信号 $f(t)$,按照Mallat的快速小波算法可分解

成如图2所示的结构形式^[3]。

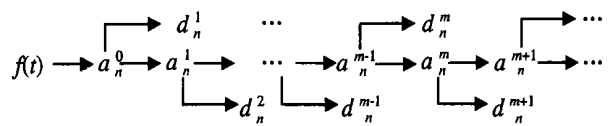


图2 信号 $f(t)$ 的Mallat分解结构

图2中, a_n^m 和 d_n^m 分别是信号 $f(t)$ 在尺度 m 下的粗分辨率逼近和边缘细节信息。小波变换在不同尺度上通过 h_n 和 g_n 对信号进行滤波处理,可得到不同尺度上关于原始信号的粗分辨率逼近和边缘细节信息,其中在一个邻域内细节信息的最大幅度线称为局部模极大值线。信号所有特征通过不同尺度上的粗分辨率逼近和细节信息予以表达,并有递推关系式

$$a_n^m = \overline{h_{k-2n} a_k^{m-1}} \quad (3)$$

$$d_n^m = \overline{g_{k-2n} a_k^{m-1}} \quad (4)$$

与式(3)和(4)相对应的有逆推重建公式

$$a_n^m = \overline{(h_{n-2k} a_k^{m+1} + g_{n-2k} d_k^{m+1})} \quad (5)$$

从上式可以看出,小波变换与傅立叶变换极为相似,但它具有多尺度分解功能。信号在时域中可用能量表示,在小波域也可定义相应的能量表示,建立一个广义能量积累器,完成对信号 $f(t)$ 在小波域中不同分解尺度上能量的有效积累。这就从小波能量的角度刻画了信号 $f(t)$ 的特征属性。由于小波变换的多尺度分解特性(根据实际需要小波分解尺度可调整),加之噪声和连续信号的小波变换在不同尺度上所表现出的特有属性^[1,4],根据不同分解尺度上的小波能量特征及其能量积累,便可构造出建立在小波多尺度分解基础上的信号检测体制。即直接对小波域中的信号能量进行检测,绕过“小波去噪”这一复杂的信号处理过程。

3 小波域中信号能量积累器的设计

3.1 多尺度小波能量积累器的构造

在Mallat快速小波变换中,随着变换尺度的增大,粗分辨率逼近相对原始信号越来越粗略和平滑。将原始信号边缘的轮廓和噪声导致的毛刺逐渐平滑掉,剩下的即为原始信号的主体部分。细节信息主要体现原始信号的边缘成分,随着变换尺度的增加,细节信息由噪声占据主导地位逐渐转为信号占据主导地位。因此,不同尺度上的粗分辨率逼近包含着原始信号不同比例成分的能量,细节信息携带的能量则体

现为信号边缘波动的剧烈程度。假定小波滤波器对信号进行 M 阶变换, 则原始信号的粗分辨逼近和细节信息分别为 M 组数据。定义 M 阶小波分解的粗分辨逼近和细节信息的系数矩阵分别为

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\} \quad (6)$$

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_M\} \quad (7)$$

其中, A_i 为通过小波滤波器对原始信号在 i 阶上的粗分辨逼近 ($1 \leq i \leq M$), D_j 为通过小波滤波器对原始信号在 j 阶上的细节信息分解 ($1 \leq j \leq M$)。根据小波滤波器对信号滤波所具有的特殊规律, 构造两组特定的能量积累参数, 分别定义为

$$K_h = \{K_{h_1}, K_{h_2}, \dots, K_{h_M}\} \quad (8)$$

$$K_g = \{K_{g_1}, K_{g_2}, \dots, K_{g_M}\} \quad (9)$$

利用这两组能量积累参数, 可将小波滤波器对信号在不同尺度上分解的能量积累起来, 从而有效地解决了小波变换域中波内能量的积累问题。对此进行定性描述的表达式如下

$$E = K_h \otimes A \oplus K_g \otimes D \quad (10)$$

其中, 符号“ \otimes ”和“ \oplus ”分别为广义能量积累算子和广义能量求和算子。

3.2 多尺度小波能量积累器参数的确定

连续信号和噪声的小波变换特性具有规律性^[1]: 随着变换尺度的增加, 噪声的小波变换模极大值逐渐减小, 连续信号的小波变换模极大值逐渐增加。进一步还有确定的变化规律: 噪声模极大值随变换尺度的递增以半数减少, 在非常小的尺度上, 模极大值几乎完全由噪声控制; 在比较大的尺度上, 模极大值几乎完全由信号控制。从能量角度看, 粗分辨逼近所携带的能量将逐渐转化为原始信号能量的主体部分, 噪声与原始信号耦合的能量比快速减小, 最后在比较大的尺度上噪声能量几乎完全消失。

为了有效抑制边缘细节信息中的噪声成分, 提高不同尺度上边缘细节信息对原始信号在能量上的贡献, 同时有效地抑制粗分辨逼近中干扰噪声与原始信号耦合的能量, 提高不同尺度上粗分辨逼近对原始信号的能量贡献, 不同尺度上细节信息的能量积累参数必须以 2 倍的比率递增, 不同尺度上粗分辨逼近的能量积累参数也必须采取大幅度递增的方式进行设计。根据实际工程需要可采取以 2 倍的比率递增。

假定小波滤波器对信号进行 M 阶变换, 则 K_g 和 K_h 的取值规律为

$$K_g = \{K_g^0, 2^1 K_g^0, \dots, 2^{M-1} K_g^0\} \quad (11)$$

$$K_h = \{K_h^0, 2^1 K_h^0, \dots, 2^{M-1} K_h^0\} \quad (12)$$

其中, $K_g^0 > 0, K_h^0 > 0$, 原则上取值偏小为佳。进一步可对 K_g 和 K_h 进行归一化处理

4 基于小波能量积累的雷达回波信号快速检测算法

设 $s_0(t)$ 表示理想雷达回波某一瞬态信号, 在加性噪声 $n(t)$ 作用下, 实际接受到的回波信号为 $f(t) = s_0(t) + n(t)$ 。对每次接受到的信号 $f(t)$ 进行检测, 必须完成两项任务: 1) 判断 $f(t)$ 是否为地面目标反射回波; 2) 确定回波前沿到达时刻。为此, 本文设计出直接基于小波能量积累的信号检测方法如下:

步骤 1: 对带噪信号 $f(t)$ 进行 Mallat 快速小波变换, 本文选取 $M = 6$;

步骤 2: 由步骤 1 得到 $f(t)$ 在 M 个分解尺度上的粗分辨逼近 a_m^m ($m = 1, 2, \dots, M$) 和相应尺度上的细节信息 d_m^m ($m = 1, 2, \dots, M$), 小波能量积累器的二系数矩阵可表示为

$$A = \{a_{n_1}^1, a_{n_2}^2, \dots, a_{n_M}^M\} \quad (13)$$

$$D = \{d_{n_1}^1, d_{n_2}^2, \dots, d_{n_M}^M\} \quad (14)$$

步骤 3: 用前面设计的小波广义能量积累器 (10), 对信号 $f(t)$ 在 M 个分解尺度上的粗分辨逼近和细节信息进行广义能量积累;

步骤 4: 确定统计检测门限 T , 对检测信号进行判别, 若 $K_h \otimes A > T$, 则认为捕捉到的信号 $f(t)$ 为地面目标反射回波; 若 $K_h \otimes A < T$, 则捕捉到的信号 $f(t)$ 不是真实地面反射回波;

步骤 5: 在 $f(t)$ 被判定为地面目标反射回波的前提下, 根据脉冲体制雷达的大地回波特性 (即回波波峰对应的时刻恰好为波达时刻), 小波分解在不同尺度上的细节信息中, 最大局部模极大值线对应的时刻在理论上是回波波峰对应的时刻, 故由 $\max(K_g \otimes D)$ 所对应的时刻即为回波前沿到达时刻。

5 基于小波能量积累的快速检测法仿真实验

计算机仿真时, 选取的仿真模型参数如下: 原始信号 $s_0(t) = u(t) - u(t - \tau)$ 为脉冲信号, 其中 $\tau = 4$ 为脉冲宽度, $u(t)$ 为阶跃信号; 噪声 $n(t)$ 分别选为强度不同的零均值高斯白噪声和模拟回波色噪声; 带噪信号 $f(t) = s_0(t) + n(t)$, 即 $s_0(t)$ 叠加 $n(t)$;

表1 在恒虚警 $P_f = 10^{-6}$ 条件下检测概率 P_d 与信噪比 SNR 的相互关系

检测类型	信 噪 比 SNR									
	1dB	2dB	3dB	4dB	5dB	6dB	7dB	8dB	9dB	10dB
类型 I	0.003 0	0.000 5	0.001 0	0.002 9	0.005 0	0.012 3	0.035 7	0.075 7	0.155 0	0.279 0
类型 II	0.902 0	0.929 0	0.937 0	0.953 0	0.961 3	0.973 0	0.987 0	0.991 0	1.000 0	1.000 0
类型 III	0.175 0	0.225 0	0.393 0	0.528 0	0.679 0	0.818 0	0.905 0	0.957 0	0.990 0	1.000 0

信噪比 SNR 变化范围为(0~10)dB; 采样率 $T_s = 25\text{MHz}$; 小波基选取文献[5]中紧支撑样条小波 $\Psi(t)$; 能量积累参数 $K_g^0 = 1, K_h^0 = 1$; 每组实验的仿真次数 $T = 1000$ 次。

通过脉冲信号分别叠加理想高斯白噪声和色噪声在不同信噪比下进行信号检测仿真实验。为说明本文设计的快速小波能量检测法对弱信号检测的有效性, 现列出在恒虚警 $P_f = 10^{-6}$ 的条件下, 平方律包络检波器对非起伏目标和单个脉冲的检测概率 P_d 与信噪比 SNR 的相互关系^[6], 如表1中类型 I 所示; 快速小波能量检测法对叠加理想高斯白噪声和色噪声在不同信噪比下, 单次检测概率 P_d 与信噪比 SNR 的关系分别如表1中类型 II 和类型 III 所示。

用本文设计的快速小波能量检测法对回波前沿到达时刻进行估计, 仿真结果如图3和图4所示。图中坐标纵轴为回波前沿估计时刻 t_E 与真实回波前沿时刻 t_r 的误差偏移点数 $\Delta t = t_E - t_r$, 坐标横轴为对

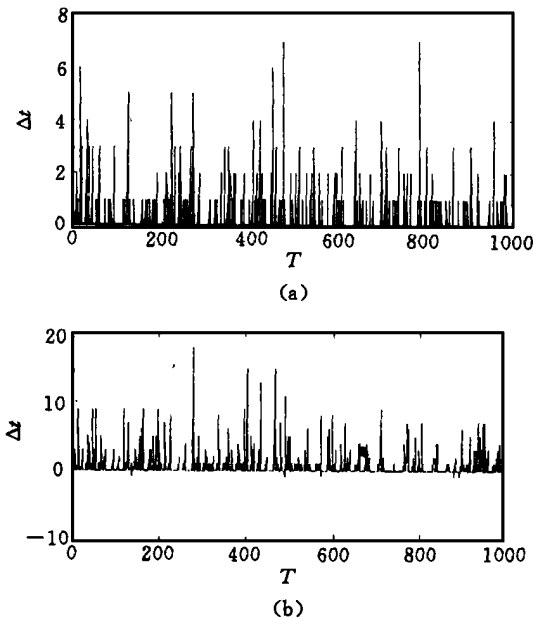


图3 叠加噪声(SNR = 3dB) 单次检测的回波前沿估计
(a) 叠加高斯白噪声, $E(\Delta t) = 0.3210, \sigma(\Delta t) = 0.8380$
(b) 叠加色噪声, $E(\Delta t) = 0.6550, \sigma(\Delta t) = 1.8443$

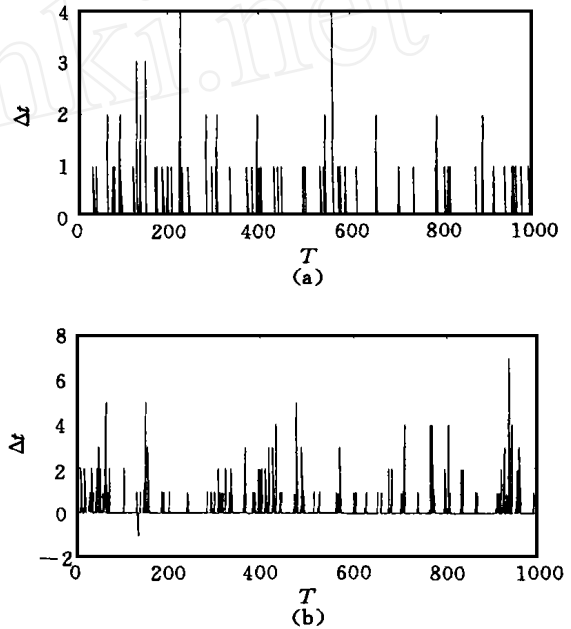


图4 叠加噪声(SNR = 3dB) 并积累 16 次的回波前沿估计
(a) 叠加高斯白噪声, $E(\Delta t) = 0.0900, \sigma(\Delta t) = 0.3742$
(b) 叠加色噪声, $E(\Delta t) = 0.1790, \sigma(\Delta t) = 1.6734$

应的仿真次数 T , 其中 $E(\Delta t)$ 和 $\sigma(\Delta t)$ 分别为 Δt 的均值和方差。

6 结 论

本文介绍的快速小波能量检测法与常规检测法相比, 其单次检测的检测概率有明显的提高, 而且对白噪声和色噪声都实用, 具有较强的实用性和理论指导性。该检测方法在强噪声背景下对回波前沿时刻的估计非常有效, 能准确捕捉回波前沿的到达时刻, 为解决困扰高精度雷达设计的瓶颈问题提供了一定的理论参考。由于绕开了“小波去噪”这一复杂耗时的过程, 快速小波能量检测法算法简单, 运算速度大为加快。实践证明该算法能满足系统实时性的要求, 在实际工程中具有较好的应用前景。

(下转第 317 页)

法每次总能得到 2 859.81 的最好结果, 改进了 15%。不同的是, 在 1 000 次实验中, β 算法 100% 收敛于现有最好结果, 求解质量极为稳定。

对于随机产生的 160 个问题, β 算法有 50% ~ 95% 的几率得到优于 GCA 的结果, 无劣于 GCA 的情况出现。结果平均改善了 3.65% ~ 11.76%, 大幅度超过了遗传算法和模拟退火算法, 求解质量也非常稳定。

(上接第 310 页)

参考文献:

- [1] 李合生, 毛剑琴, 韩宇. 小波变换在大地回波噪声处理中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 221-225
- [2] 李世玲, 李合生, 李治. 小波滤波器在弱信号检测中的应用及设计[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1): 86-89
- [3] S M Sllat, W L Hang. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans on Inf Theory, 1992, 38(2): 617-643

(上接第 313 页)

5 结 论

本文研究了混合动态系统的稳定性问题, 导出了一系列等价性的结论。关于 Lyapunov 函数和本文结论中的一些函数的结构性问题将在后续文章中给出。这些问题包括: 是否存在同一函数对所有的子系统均成立, 如果存在这样的函数, 其结构如何; 对每一个子系统, 都有其各自的 Lyapunov 函数, 在这种情形下, 其结构又该如何。

参考文献:

- [1] W Hahn. Stability of motion [M]. Berlin: Springer-Ver-

参考文献:

- [1] 汪泓, 韩文秀. 一种新的优化算法: β 算法[J]. 系统工程学报, 1999, 14(3): 276-279
- [2] I H Osman, G Laporte. Metaheuristics: A bibliography [J]. Annals of Operations Research, 1996, (63): 513-628
- [3] 汪泓. 复合随机全局优化算法的理论、方法与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 1999.

- [4] 陈逢时. 子波变换理论及在信号处理中的应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998. 184-191
- [5] Daubechies I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE Trans on Inf Theory, 1990, 36(3): 961-1005
- [6] 杰里 L 伊伏斯, 爱德华 K 里迪. 现代雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991. 274-279

- lag, 1967.
- [2] A N Michel, K Wang. Qualitative theory of dynamical systems [M]. New York: Marcel Dekker, 1995
- [3] K M Passino, A N Michel, P J Antsaklis. Lyapunov stability of a class of discrete event systems [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(2): 269-279
- [4] S Pettersson, B Lennartson. LM I for stability and robustness of hybrid systems [A]. Proc American Control Conf [C]. New Mexico, 1997. 1714-1718
- [5] H Ye, A N Michel, L Hou. Stability theory for hybrid dynamical systems [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1998, 43(4): 461-474