

# 小波变换在雷达物位计信号处理中的应用

Application of Wavelet Transform in Signal Processing of Radar Material Level Meter

张敏<sup>1</sup> 冷建伟<sup>1</sup> 杜宝<sup>2</sup>

(天津理工大学复杂系统控制理论及应用重点实验室<sup>1</sup>,天津 300384;天津长飞鑫茂光缆有限公司<sup>2</sup>,天津 300380)

**摘要:** 雷达物位计信号处理的关键是去除噪声,提取有用信息。通过研究调频连续波 FMCW 雷达物位计工作原理及信号处理的基本算法,对比传统的采用傅里叶变换进行信号处理的方法,提出了采用小波变换来去除回波的干扰信号。实际应用结果表明,小波分析可以有效地应用于分析物位计回波信号,为提高测量精度等后续工作的开展提供稳定数据。

**关键词:** 小波变换 调频连续波 物位测量 雷达 锯齿波 信号处理

**中图分类号:** TP212.6

**文献标志码:** A

**Abstract:** The key of signal processing in radar material level meter is denoising and extracting useful signal. Through researching the operational principle of frequency modulated continuous wave(FMCW) radar material level meter and the basic algorithm of signal processing, and comparing the signal processing method with traditional Fourier transform, the method of using wavelet transform to eliminate interference signal in echo is proposed. The result of practical application indicates that the wavelet analysis is able to effectively analyze the echo signal of the level meter, to provide stable data for conducting follow-up jobs such as enhancing measurement accuracy, etc.

**Keywords:** Wavelet transform FMCW Measurement of material level Radar Saw-tooth wave Signal processing

## 0 引言

利用微波检测物位是军事工业所特有的雷达测量技术逐步民用化的产物。近年来,电子型物位仪表在品种和产值上都已超过机械型仪表,成为物位仪表的主流。其中,非接触式测量技术是发展最快、应用最广的物位测量方式之一。

在化工生产过程中,用来测量液位、固体料位和两种不同密度的液体分界面的仪表分别称为液位计、料位计和界面计,统称物位仪表。其中雷达类型产品增长速度达到 30% 以上,成为物位仪表市场的主流产品<sup>[1]</sup>。但是,高端的雷达物位仪表产品或者关键部件大部分依靠进口;机械型产品则采用国内加工、组装的方式。本文对调频连续波 FMCW(frequency modulated continuous wave)雷达物位计的主要工作原理进行剖析,进一步提出了采用小波变换实现信噪分离的方法,并对这种方法进行具体分析及实验数据验证。

## 1 物位计距离提取方法

在物位计测量系统中,调频连续波雷达向距离为  $R$  的目标发送一个高频脉冲,利用微波信号在不同介

电常数的界面上反射的原理,雷达天线接收反射波。测量系统示意图如图 1 所示。

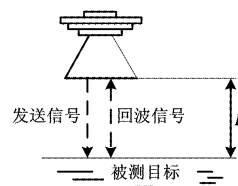


图 1 雷达物位测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of radar material level measurement system

距离  $R$  与时间  $t_d$  的关系为:

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (1)$$

式中: $t_d$ 为雷达发送和接收信号的时间差; $c$ 为真空中的光速, $3 \times 10^8$  m/s。

当雷达的压控振荡器 VCO(voltage control oscillator)为理想线性特性时,发射信号  $f_T$  和接收信号  $f_R$  的波形如图 2 所示。

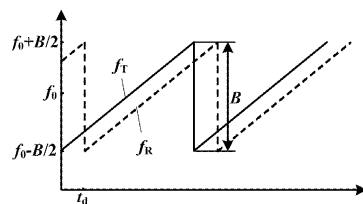


图 2 发射和接收信号波形图

Fig. 2 Waveforms of the transmitting and receiving signals

天津市科技创新专项基金资助项目(编号:08FDZDZX02000)。

修改稿收到日期:2010-05-19。

第一作者张敏,女,1977年生,2005年毕业于天津大学动力工程系,获硕士学位,讲师;主要从事电气工程及其自动化方面的研究。

在一个扫频周期内( $0 \leq t \leq T$ ),发射信号的频率 $f_T$ 可以表示为:

$$f_T(t) = f_i + \mu t \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

式中: $f_i$ 为初始频率; $\mu$ 为调频斜率。

由图2可推导出:

$$\mu = B/T \quad f_i = f_0 - B/2$$

式中: $f_0$ 为发射信号中心频率; $B$ 为发射信号扫频带宽<sup>[2]</sup>。

接收信号 $f_R$ 可以表示为:

$$f_R(t) = f_T(t - t_d) = f_i + \mu(t - t_d) \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

接收信号 $f_R$ 相对于发射信号 $f_T$ 延迟了 $t_d$ 。这是由于微波信号从仪表天线的发射天线发出后,在物料和空气的分界处产生反射,反射后的回波信号由天线的接收器接收。延迟时间的长短正比于天线到被测目标的距离 $R$ <sup>[3]</sup>。

由式(2)和式(3)可推导出线性调频连续波 LFM-CW(linear frequency modulation continuous wave)雷达的发射信号的瞬时相位 $S_T$ 和经雷达于单个点目标的距离 $R$ 延迟后接收信号的瞬时相位 $S_R$ ,即:

$$S_T(t) = A \cos(2\pi f_i t + \frac{\pi B}{T} t^2 + \theta_i) \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

$$S_R(t) = S_T(t - t_d) =$$

$$k_1 A \cos[2\pi f_i(t - t_d) + \frac{\pi B}{T}(t - t_d)^2 + \theta_i] \quad (5)$$

式中: $t_d \leq t \leq t_d + T$ ; $\theta_i$ 为振荡器的初相位; $T$ 为扫频周期; $A$ 为发射信号的幅度; $k_1$ 为与空间传播相关的衰减系数。

两路扫频信号经混频器混频并滤去高频项,得到差拍信号的中频为:

$$S_{IF}(t) = M \cos(2\pi \frac{B}{T} t_d t + 2\pi f_i t_d - \frac{\pi B}{T} t_d^2) \quad t_d \leq t \leq T \quad (6)$$

式中: $M$ 为差拍信号幅度。

令:

$$\omega_{IF} = 2\pi \frac{B}{T} t_d, \varphi = 2\pi f_i t_d - \frac{\pi B}{T} t_d^2 \quad (7)$$

则有:

$$S_{IF}(t) = M \cos(\omega_{IF} t + \varphi) \quad t_d \leq t \leq T \quad (8)$$

则差拍信号的瞬时频率为:

$$f_{IF}(t) = \frac{\omega_{IF}}{2\pi} = \frac{B}{T} t_d = \mu t_d \quad t_d \leq t \leq t_d + T \quad (9)$$

式中: $\mu = B/T$ ,为收、发频率信号的斜率。

将式(1)中的 $t_d$ 代入式(9),就可以得到用来计算物料表面与雷达天线之间距离的公式,即:

$$R = \frac{cT}{2B} f_{IF} \quad (10)$$

通常把式(9)中发送信号与接收信号之差 $f_{IF}$ 叫作

差频信号(或中频信号)。简单来说,在不考虑各种干扰因素的情况下,物位计测量天线到物料表面距离的过程,就是经过一系列数字变换得到频率差 $f_{IF}$ 后,利用式(10)得出对应的距离值 $R$ 的过程。

## 2 小波变换的应用

根据 FMCW 雷达测量原理,为了得到距离信息,首先需要测出差频信号 $f_{IF}$ 的频率值。线性调频连续波 LFM-CW 雷达从目标回波提取距离信息时,最适合用快速傅里叶变换 FFT 来处理。微波物位仪测量范围一般在 100 m 以内,因而发射功率要求比较低,几个毫瓦即可,但对测量精度要求较高,一般在 1 cm 以内,因而对系统的频率稳定性和线性度要求极高。LFMCW 雷达测量液位最简单的方法是利用 FFT 找出反射波与发射波的差频频率,从而计算出物料高度。这种方法的分辨率 $r_b$ 与发射波扫频带宽 $B$ 成反比,即:

$$r_b = \frac{c}{2B} \quad (11)$$

式中: $c$ 为真空中的光速, $3 \times 10^8$  m/s。

由式(11)可知,当雷达物位计的带宽 $B = 1$  GHz 时, $r_b = 15$  cm。因此,要达到毫米级分辨率,需要极宽的扫频带宽,这在技术上很难实现。所以直接根据 FFT 得到离散频谱峰值不能满足高精度测量的要求,需要采用校正方法来提高精度,但这会给系统增加大量的运算负担,并降低稳定性。

傅里叶分析只能从整体上获得信号的频谱分析,不能对信号作局部分析。而小波分析不但同时在时域和频域具有良好的局部化性质,而且对高频成分采用逐步精细的时域取样步长,可以聚焦到对象的任意细节。因此,小波变换优于傅里叶变换,它可被形象地视为自适应的加窗傅里叶变换。

假设信号 $f(t) \in L^2(R)$ ,则它的连续小波变换定义为:

$$(W_\psi f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\Psi}(\frac{t-b}{a}) dt \quad (12)$$

式中: $\bar{\Psi}(t)$ 为基本小波。

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi(\frac{t-b}{a}) \quad a \in \mathbf{R}, a \neq 0; b \in \mathbf{R} \quad (13)$$

为了提高雷达物位计测量精度而采用的宽带雷达技术,与传统的点目标回波相比,具有更多更好的局部起伏特性,特别是当被测的储料容器进料或出料时,物位计的回波信号是瞬变的。从广义上来说,它也是一种非平稳过程<sup>[4]</sup>,因而可以使用小波变换技术来分析,以改善雷达信号处理的性能。

一维小波变换实现的算法是 Mallat 算法,即对较大尺度的信号进行小波变换,再选取其中的低频部分在原尺度的 1/2 尺度上进行小波变换。Mallat 分解树如图 3 所示。

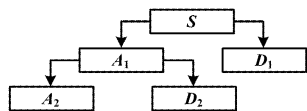


图 3 Mallat 分解树

Fig. 3 Mallat decomposition tree

从图 3 可以看出,信号可分解为:

$$S = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = \dots \quad (14)$$

式中: $A_i$ 为低频信号; $D_i$ 为高频信号。

雷达回波信号中通常包含目标回波信号和各种具有随机起伏特性的干扰和噪声,从噪声背景中提取弱目标信号则是雷达信号检测的首要任务和难点<sup>[6]</sup>。测试时所用天线中心频率为 1 GHz,选用时窗为 18 ns,每次扫描采样点数为 256 个。实测波形如图 4 所示。

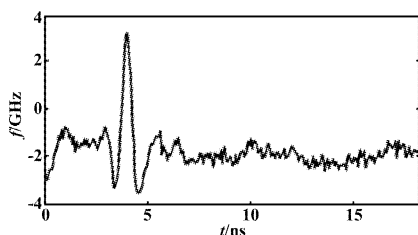


图 4 实测波形

Fig. 4 Test waveform

对含噪声的物位雷达信号,采用 Mallat 算法,则各层分解结果如图 5 所示。

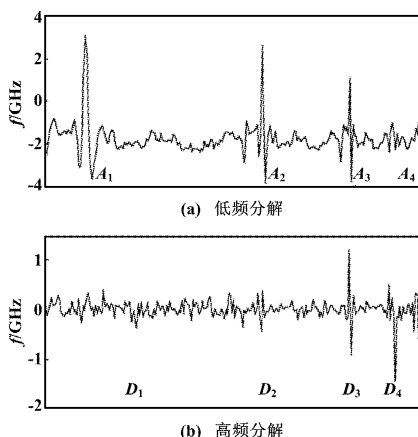


图 5 Mallat 算法各层分解结果

Fig. 5 Decomposed results of Mallat algorithm

图 5 中: $A_1$ 为第一次分解结果的低频成分; $A_2$ 为第二次分解结果的低频成分,以此类推; $D_1$ 为第一次分解

结果的高频成分; $D_2$ 为第二次分解结果的高频成分,以此类推。

从图 5 可知, $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 包含了主要的噪声。在此,可以用阈值消噪法的形式对小波系数进行处理,然后对系数进行重构,从而达到消噪的目的。

实际雷达接收到的回波信号(即中频信号)为:

$$X(t) = S_{\text{IF}}(t) + e(t) \quad (15)$$

式中: $e(t)$ 为干扰和噪声。

为了去噪,采用离散正交小波对  $X(t)$  作小波变换。由于噪声的影响表现在小波系数的各个尺度上,而目标信号的主要特征分布在几个较大的、有限的系数上,且大尺度上的小波系数可以很好地重构原始信号,即小波变换可以使一个信号的能量在小波变换下集中于少数系数上。相对来说,这些系数的取值大于其他系数上的信号或噪声的值,所以可以采用基于信号和噪声奇异性差异的模极大值原理消噪方法。

模极大值原理消噪算法的原理是:在小波变换后的模极大值图中(一般尺度较多情况下)去除那些幅度随尺度减小的极值点而保留随尺度增加的点,然后从去噪后的模极大值图中重构原信号,分离有用信号和噪声,然后用处理后的系数进行小波反变换,以重构信号,达到消噪的目的<sup>[7]</sup>。

信号经消噪处理后的输出波形如图 6 所示。

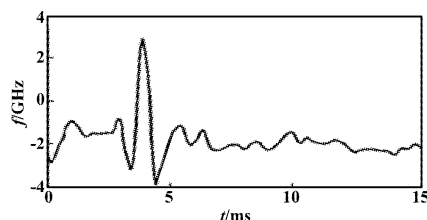


图 6 消噪处理后的输出波形

Fig. 6 Output waveform after denoising

对比图 6 与图 4 可知,实测信号中的噪声得到了较好的滤除,消除噪声后的信号大体上显示了实测信号的形状,并明显去除了噪声所引起的干扰。这说明,将小波变换 Mallat 算法应用于物位计雷达回波信号的滤波去噪能够取得一定效果,由此可进行物位计算。

### 3 结束语

雷达信号处理的目的是消除干扰,以最大可能的分辨率来显示目标反射波,提取有用参数。近年来,迅速发展起来的小波变换以其良好的时频特性在工程信号处理领域得到广泛应用,也为雷达信号处理开辟了一条新的途径。随着超高频半导体器件技术的发

(下转第 30 页)

现 100% 语句覆盖至少需要设计 6 个测试用例,每个用例必须包含预期输入和预期输出,并分别覆盖一条路径,具体参见表 2。

表 2 示例程序的测试用例数据  
Tab.2 Test cases for example code

序号	预期输入	预期输出
CAL_CURRENT_TestCase1	Percent0 = 0. 50	X2_0 = 12. 0
CAL_CURRENT_TestCase2	Device_status. CurrentFixed = 1	X2_0 = 16. 0
CAL_CURRENT_TestCase3	Device_status. Malfunction = 1, AlarmSel = 1	X2_0 = 3. 80
CAL_CURRENT_TestCase4	Device_status. Malfunction = 1, AlarmSel = 0	X2_0 = 22. 0
CAL_CURRENT_TestCase5	Percent0 = - 0. 007 < - 0. 00625	X2_0 = 3. 9
CAL_CURRENT_TestCase6	Percent0 = 1. 1 > 1. 05	X2_0 = 20. 8

在测试报告中可看到每个用例的执行情况和该次测试的总体信息。关于测试覆盖率的信息,将由 Codewarrior 调试环境自带的 Coverage 组件统计,如果语句覆盖未达到 100%,则需说明对该模块的逻辑结构未实现完全覆盖。

#### 4 结束语

在当今对嵌入式软件可靠性要求越来越高的背景下,参考软件开发 V 模型进行嵌入式软件的设计和验

证是提高软件可靠性的一个可行思路。本文主要从软件开发 V 模型的编码阶段出发,探讨嵌入式软件代码静态分析和动态测试技术的实现,着重讨论了编码标准的制定、静态分析工具的选择和测试用例设计等问题,并针对智能仪表等片上资源较为紧缺的嵌入式软件开发了一个代码测试框架。该框架以较少的资源占用实现了基本的测试功能。

#### 参考文献

[1] IEC. IEC 61508 - 3 ed. 2 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems part 3: software requirements[S]. 2010; 47 - 59.

[2] Xiao S, Pham C. Performing high efficiency source code static analysis with intelligent extensions [C]//Proceedings of the 11th Asia-Pacific Software Engineering Conference, Busan, Korea, 2004; 346 - 355.

[3] MISRA Limited. MISRA C; 2004 guidelines for the use of the C language in critical systems [CP/OL]. [2005 - 02 - 05]. <http://www.misrac.com>.

[4] Hatton L. Language subsetting in an industrial context; a comparison of MISRA C 1998 and MISRA C 2004 [J]. Information and Software Technology, 2007, 49(5): 475 - 482.

[5] Carnegie Mellon University. CERT C programming language secure coding standard [CP/OL]. [2007 - 12 - 28]. <http://www.cert.org/secure-coding>.

[6] Williams G. Unity compact test framework for C [CP/OL]. [2009 - 12 - 07]. <http://sourceforge.net/apps/trac/unity/wiki>.

[7] Baresi L, Pezze M. An introduction to software testing [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2006, 148(1): 89 - 111.

(上接第 25 页)

展,高性能、低价格的微波物位测量仪器的推出则使其在石油、化工、冶金等众多领域得到广泛的应用,拥有广阔的发展前景<sup>[8]</sup>。

#### 参考文献

[1] 李竞武. 物位测量新技术及我国的物位仪表行业概况 [J]. 中国仪器仪表, 2007(9): 5.

[2] 刘贵忠, 邸双亮. 小波分析及其应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992: 124 - 130.

[3] 胡翔, 王东进. 一种提高 LFM CW 雷达调频线性度的新思路 [J].

中国科学技术大学学报: 自然科学版, 2001, 31(1): 63 - 67.

[4] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 32 - 35.

[5] 陈淑珍, 谢秋洪, 肖柏勋. 时间尺度域匹配滤波器设计与实现 [J]. 武汉大学学报: 理学版, 2005, 51(1): 91 - 93.

[6] 顾明超, 王雷, 赵国庆. 基于小波分析的雷达信号调制方式识别 [J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(6): 83 - 85.

[7] 张振宇, 王绪本, 刘艳. 基于小波变换的探地雷达信号去噪方法 [J]. 电子元器件应用, 2009, 11(4): 68 - 70.

[8] 郑伟, 陆广华, 陈卫东, 等. 线性度校正的新方法与系统应用 [J]. 火控雷达技术, 2005, 34(4): 12 - 15.

## 第十二届工业仪表与自动化学术会议征文启事

行业信息

由中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会、中国仪器仪表学会可靠性工程分会、中国自动化学会仪表与装置专业委员会、中国仪器仪表行业协会自动化仪表分会和《自动化仪表》编辑部联合主办的第十二届工业仪表与自动化学术会议将于 2011 年 6 月在上海召开。热忱欢迎广大科技、管理和应用工作者及大专院校师生等积极撰写论文,踊跃参加本届学术会议。学术会议论文投稿邮箱: [iiac@sipai.com](mailto:iiac@sipai.com)。