

doi:10.3788/gzxb20134211.1370

基于小波变换的雷达生命信号提取方法

杨秀芳¹, 张伟¹, 王若嘉², 杨宇祥¹, 杨大伟¹

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 伦敦大学 学院土木与环境工程部)

摘要: 雷达非接触式检测生命信号因受环境噪音和被测对象微动等因素影响严重, 而且这些干扰引起的多普勒信号的非平稳性, 使其有用生命信号——呼吸信号和心跳信号用一般的信号处理方法(如数字滤波、快速傅里叶变换)无法提取出来. 针对此问题, 建立了连续波雷达生命信号模型, 用 K 波段, 频率 24 GHz, 功率 30 mW 的连续波雷达体制对一名 30 岁左右的健康男性进行了测量. 测量在办公室安静环境下进行, 雷达发射头距离被测对象 2 m, 数据采集卡采样频率 100 Hz, 对测量数据用 dB3 小波基函数进行了 8 尺度小波分解和重构, 成功地在第七层低频重构和第六层的高频重构中提取到了人的呼吸信号和心跳信号. 通过对这两层信号进行快速傅里叶变换, 获得呼吸信号和心跳信号能量峰值处的频率值分别是 0.29 Hz 和 1.07 Hz, 用传统测量方法得到的频率值分别相差 0.04 Hz 和 0.03 Hz, 表明用小波变换提取和分离雷达生命信号中的呼吸信号和心跳信号方法是可行的, 为将雷达非接触测量方法应用于临床监护和灾难营救等方面提供了理论依据和实验数据.

关键词: 小波变换; 雷达生命信号模型; 非接触测量; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN314

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1370-5

Study on the Extraction Method of Radar Life Signal Based on Wavelet Transform

YANG Xiu-fang¹, ZHANG Wei¹, WANG Ruo-jia², YANG Yu-xiang¹, YANG da-wei¹

(1 Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 University College London Civil & Environmental Engineering Department)

Abstract: Radar non-contact detection of life signals is severely affected by factors such as environmental noise and the micro movement of detecting object, and the Doppler signal nonstationarity that caused by the interference makes the useful life signals-breathing and heartbeat signals cannot be extracted with general signal processing method (such as digital filtering, fast Fourier transform). According to this problem, the mathematical model of radar non-contact measuring life information has been established. Using K-band, frequency 24 GHz, power 30 mW continuous wave radar system has measured a 30 years-old healthy men. Measurement is carried out in a quiet office environment. There is 2 m distance between radar transmitting head and measure target. Data acquisition card's sampling frequency is 100 Hz. The data measured are carried out eight scale wavelet decomposition and reconstruction by db3 wavelet basis function. It is success that extracted the person's breathing and heartbeat signals on the seventh low-frequency layer and sixth high-frequency layer respectively. Through fast Fourier transform processing of these two layers' signals, the energy frequency value of the peak area is

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61273271)和陕西省教育厅自然科学专项(No. 12JK0527)资助

第一作者: 杨秀芳(1965—), 女, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为光电检测与信息处理技术. Email: yxf5078@163.com

收稿日期: 2013-04-26; 录用日期: 2013-07-15

0.29 Hz and 1.07 Hz. The frequency difference between the traditional measuring method and the wavelet transform method is 0.04 Hz and 0.03 Hz. The results show that the wavelet transform is used to extract and separate breathing and heartbeat in radar life signals is feasible. It will provide theoretical basis and experimental data for radar non-contact measurement method applied to the clinical monitoring and disaster rescue and so on.

Key words: Wavelet transforms; Radar life signal model; Non-contact detection; Fast Fourier transform

0 引言

雷达波探测生命信号的方法是提取雷达回波中与呼吸或心跳等生命体征相关的信号分量,估计各相关参量,然后重构生命体征波形的一种非接触检测技术^[1-3]。由于这种技术能满足救灾、巷站和医疗监护等方面的需要,而引起了国内外研究者的广泛兴趣^[4];文献[5-6]应用自适应递归二乘算法提取了心跳信号;文献[7]提出了模型的基元分析(Primitive Component Analysis, PCA)和经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的非接触生命信号检测方法,实现了呼吸与心跳信号的分离;文献[8]利用近似函数法实现呼吸与心跳信号的分离,用估计的时域近似函数逼近呼吸信号,但提取的心跳信号波形较差,且算法依赖于近似函数的选取;文献[9-10]分别用动目标显示器(Moving Target Indication, MTI)滤波器法和在慢时间频域对回波数据进行处理,拟制了杂波信号对测量信号的干扰。文献[1-10]都是针对超宽谱(Ultra Wide Band, UWB)雷达体制系统。文献[11]介绍了Ka波段,功率为30 mW的连续波雷达体制用于生命信号检测,用dB4小波基函数对测量信号进行了软阈值自动降噪处理,实现了心跳信号的提取;文献[12]介绍了L波段1.15 GHz和UHF波段450 MHz的检测系统,采用杂波自动对消系统和双天线系统,利用互相关的信号处理方法有效地对运动目标反射的杂波实现对消,提高所检测信号的信噪比。

本文应用K波段,频率为24 GHz,功率为30 mW的雷达波探测生命信号,对雷达生命信号用dB3小波基函数进行了8尺度的分解和重构,实现了呼吸和心跳信号的提取和分离。

1 连续波雷达生命信号模型

连续波雷达生命信号模型是基于多普勒效应理论和生物电效应理论的。

1.1 基于多普勒效应的雷达生命信号模型

现假设连续波雷达的发射信号为

$$S_r(t) = A_r \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

式中, A_r 为发射信号的幅值; ω 为发射信号的圆频

率; θ_0 为发射信号的初相位。

当发射信号照射到人体后,被人体表面反射,由于心跳和呼吸运动引起的多普勒效应将产生一种窄带调相反射波 $S(t)$, 其表达式为

$$S(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta_0 + \theta' + \varphi(t)) \quad (2)$$

式中 A 为回波信号的幅值; θ' 为由被测对象与雷达间的距离所产生的相位; $\varphi(t)$ 为由多普勒效应产生的附加相移。

由多普勒效应理论可知

$$\varphi(t) = 2\pi \times \frac{2X(t)}{\lambda} \quad (3)$$

式中 $X(t)$ 为人体体动位移; λ 为雷达波波长值, 多普勒频移为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} \frac{dX(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (4)$$

式中, $v(t)$ 为人体微动速度。

呼吸信号的频率范围为0.03~0.8 Hz, 心跳信号的频率范围为0.8~2 Hz^[13]。

雷达信号 $S_r(t)$ 与回波信号 $S(t)$ 在混频器中混频, 其表达式为

$$\begin{aligned} S_r(t) \times S(t) &= A_r \cos(\omega_0 t + \theta_0) \times A \cos(\omega_0 t + \\ &\theta_0 + \theta' + \varphi(t)) = \frac{1}{2} A_r A \cos(2\omega_0 t + 2\theta_0 + \theta' + \\ &\varphi(t)) + \frac{1}{2} A_r A \cos(\theta' + \varphi(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

经低通滤波器后获得测量信号 $S_o(t)$ 为

$$S_o(t) = \frac{1}{2} A_r A \cos(\theta' + \varphi(t)) \quad (6)$$

图1是基于多普勒效应建立的雷达生命信号数学模型。

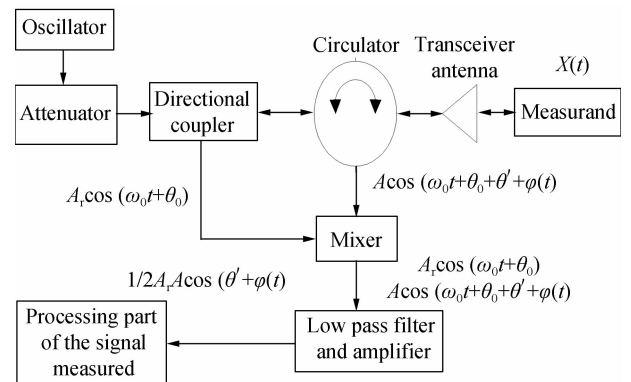


图1 多普勒效应雷达生命信号模型

Fig. 1 Radar life signal model of Doppler effect

1.2 基于生物电效应的雷达生命信号模型

测量结果表明,基于多普勒效应理论的数学模型与实测信号差异较大,如实测信号中呼吸信号与心跳信号强弱相当,这一点用多普勒效应理论无法解释,现用生物电理论对上面的数学模型进行完善.

由电磁场理论可知,生命组织可等效为一时变介电系数 $\epsilon(t)$,且

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \epsilon_r X(t) \tag{7}$$

式中 ϵ_0 为真空介电常量, ϵ_r 为介质的相对介电常量, $X(t)$ 为人体体动位移,生物组织的电导率也等效为一时变电导率 $\sigma(t)$,即

$$\sigma(t) = \sigma_0 X(t) \tag{8}$$

式中 σ_0 为真空的电导率,人体散射场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t) = & \delta \omega^2 \mu_0 \epsilon_c X(t) \times \iint \mathbf{EG}(\gamma, \gamma') dS + \epsilon_c / \epsilon_0 \times \\ & X(t) \times \iint (\hat{n} \cdot \mathbf{E}) \nabla' G(\gamma, \gamma') dS \end{aligned} \tag{9}$$

式中 δ 为人体表层皮肤的厚度, ω 为人体电磁场圆频率, $\epsilon_c = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma_0}{\omega}$, \mathbf{E} 为人体电磁总场, $G(\gamma, \gamma')$ 为自由空间的格林函数, \hat{n} 为人体表面的单位法线矢量.

由式(9)可知,当雷达波被人体散射后,其散射波必然只有 $X(t)$ 与入射波相乘的形式,这说明入射的雷达波信号的幅值受到生物电场的调制,所以由人体反射回的信号为

$$S(t) = k \times X(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0 + \theta' + \varphi(t)) \tag{10}$$

式中, k 为常量,经混频、低通滤波后的测量信号为

$$S_o(t) = \frac{1}{2} A_r A \times k \times X(t) \cos(\theta' + \varphi(t)) \tag{11}$$

建立的雷达生命信号数学模型如图2.

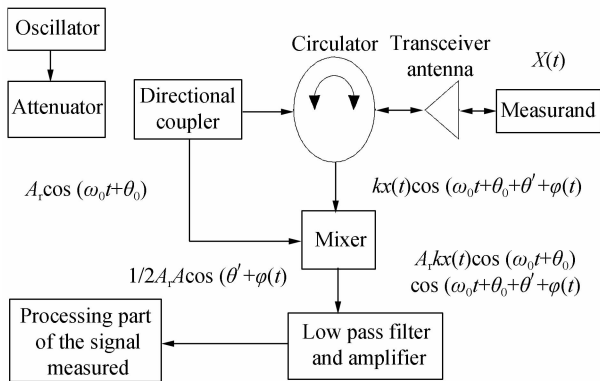


图2 雷达生命信号模型
Fig. 2 Radar life signal model

2 实验数据的小波变换处理

小波变换是在传统的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)的基础上提出的一种信号分析方法.小波变换通过小波基的伸缩和

平移实现了信号分析局部化,利用其多分辨率特性可获得干扰背景下信号的有效检测,因此在非平稳信号分析和处理中有自身独特的优越性^[14].雷达生命信号就是一个非平稳信号,文献[15]对小波变换理论做了详尽的论述,对仿真的雷达生命信号用小波去噪的方法消除雷达生命信号中的噪音,取得了较好的效果,但实际情况比仿真的雷达信号要复杂很多,这里对实测信号用小波变换的方法提取和分离被测对象的呼吸信号和心跳信号.

实验对象是一30岁左右的健康男性,用常规方法对其呼吸和心跳信号进行了测量,呼吸为15次/分,心跳为66次/分.然后用雷达系统对其进行了测量,测量是在办公室较为安静的环境下进行的.雷达发射频率为24 GHz,功率为30 mW,雷达发射头距离被测对象为2 m,数据采集卡的采样频率为100 Hz,采样了1 024个数据,所用采样时间为10.24 s.图3和图4分别为测量信号的时域图和快速傅里叶变换图.

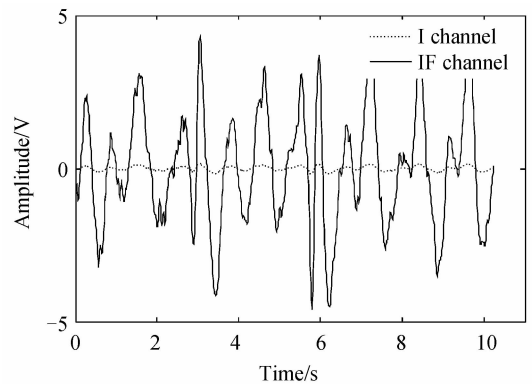


图3 测量信号时域图

Fig. 3 The time domain scheme of measurement signal

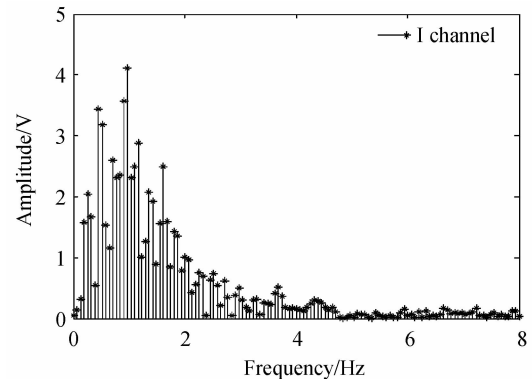


图4 测量信号 FFT 图

Fig. 4 The FFT scheme of measurement signal

从时域图中看不到与人的呼吸和心跳有关的信息,可以判断有用信号淹没在了噪音中.现用 dB3 小波基函数对测量信号进行8尺度分解,然后对8尺度低频分量和高频分量进行重构,从重构图中发现,第七层低频重构图(如图5)和第六层的高频重

构图(如图 6)中出现了周期性的缓慢变化的趋势,对这两层信号进行 FFT 变换,获得频率——幅值谱的频域图,如图 7、8.

从图 7、8 可以获得其能量集中点的频率为 0.292 97 Hz、1.074 2 Hz,即为 15.578 2 次/分、64.452 次/分.这个数据与用传统测量方法获的呼吸 15 次/分,心跳 66 次/分基本一致.

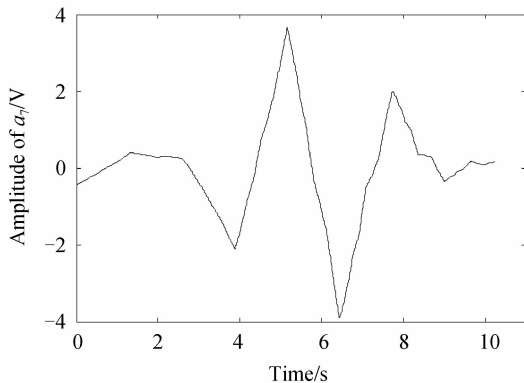


图 5 第七层低频系数重构图

Fig. 5 The seventh layer's reconstruction graph of low frequency coefficients

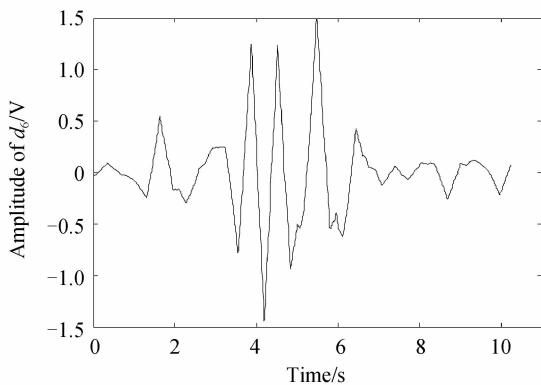


图 6 第六层高频系数重构图

Fig. 6 The sixth layer's reconstruction graph of high frequency coefficients

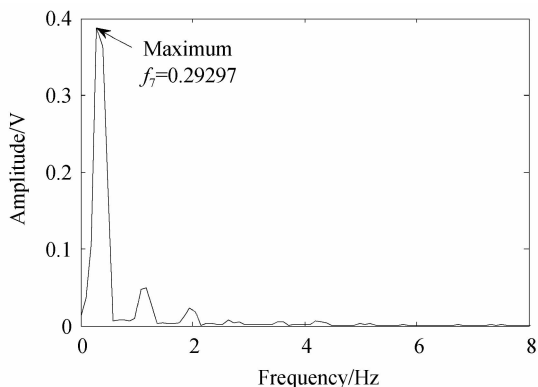


图 7 第七层低频系数幅值谱

Fig. 7 The seventh layer of low frequency coefficients of amplitude spectrum

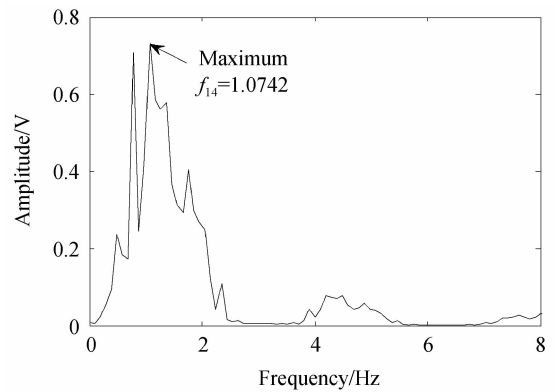


图 8 第六层高频系数幅值谱

Fig. 8 The sixth layer of high frequency coefficients of amplitude spectrum

3 结论

应用 dB3 小波基函数有效地将淹没在噪音中的生命信号提取了出来,并将人的呼吸和心跳信号分离在不同尺度的小波层上——呼吸信号在第七层低频系数重构中,心跳在定六层高频系数重构中.

在这两层的频域图中得到了呼吸和心跳的频率值,这个频率值与用传统方法得到的呼吸和心跳的次数相差 0.58 次/分和 -1.55 次/分,这说明用小波变换提取和分离雷达生命信号中的呼吸和心跳信号是成功的,这是其它信号处理方法不能达到的,这为将这一信号分析技术应用于临床医学,或在灾难中探测生命信息,具有重要的意义.

参考文献

- [1] BUGAEV A S, VASIL'EV I A, IVASHOV S I, *et al.* Radar methods of detection of human breathing and heartbeat[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, **51**(10): 1154-1168.
- [2] LI Chang-zhi, CUMMINGS J, LAM J, *et al.* Radar remote monitoring of vital signs[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2009, **10**(1): 47-56.
- [3] LAZARO A, GIRBAU D, VILLARION R. Analysis of vital signs monitoring using an IR-UWB radar[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, **100**: 265-284.
- [4] GAUGUE A C, POLIMNO J L. Overview of current technologies for through-the-wall-surveillance [C]. *SPIE*, 2005, **5989**: 59891H-1.
- [5] LU Guo-hua, YANG Guo-sheng, WANG Jian-qi, *et al.* The study on detection of the life signals of human subject based on micropower UWB radar[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2005, **26**(2): 15-18.
路国华, 杨国胜, 王健琦, 等. 基于微功率超宽带雷达检测人体生命信号的研究[J]. *医疗卫生装备*, 2005, **26**(2): 15-18.
- [6] WANG Yuan-dong, WANG Jian-qi, LU Guo-hua, *et al.* Separation of respiration and heartbeat signal in non-contact life parameters detecting based on RLS algorithm[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2009, **30**(3): 25-27.

- 王元东, 王健琪, 路国华, 等. 基于自适应RLS算法的非接触式生命参量检测中呼吸和心跳信号的分离[J]. 医疗卫生装备, 2009, **30**(3): 25-27.
- [7] DAI Shun, ZHU Fang, XU Yan-yun, *et al.* Vital signal detection method based on principal component analysis and empirical mode decomposition for ultra wideband radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, **40**(2): 344-349.
- 戴舜, 朱方, 徐艳云, 方广有等. 基于PCA与EMD的超宽带雷达生命信号检测算法[J]. 电子学报, 2012, **40**(2): 344-349.
- [8] PAVLOV S N, SAMKOV S V. Algorithm of signal processing in ultra-wideband radar designed for remote measuring parameter of patient's cardiac activity[A]. 2nd International Workshop on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signal[C]. IEEE, 2004: 205-207.
- [9] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理(第三版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
- [10] MOU Miao-hui, ZHU Guo-fu, HE Feng, *et al.* A clutter suppression method for detecting micro-motion features of static human behind the wall[J]. *Electronic Technology*, 2010, **37**(2): 19-21.
- 牟妙辉, 朱国富, 贺峰, 等. 一种用于墙后静止人体微动特征检测的杂波抑制方法[J]. 电子技术, 2010, **37**(2): 19-21.
- [11] FEI Xiang-yu, WANG Chun-he, HUANG Su-zhen, *et al.* Extraction and discriminant of non-contact life parameter signal based on radar[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, **296**(9): 38-40.
- 费翔宇, 王春和, 黄素贞等. 雷达式非接触生命参量信号的提及判别[J]. 现代电子技术, 2009, **296**(9): 38-40.
- [12] CHEN K M, HUANG Yong, ZHANG Jian-ping. Microwavelife-detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2000, **47**(1): 105-114.
- [13] YOU Lin-ru, WU Qing-jia, WEN Xiao-qin. Technology of through-the wall surveillance based on super-low-frequency electromagnetic wave [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, **27**(6): 24-26, 30.
- 游林儒, 吴庆家, 文小琴. 基于超低频电磁波的穿墙生命探测技术[J]. 传感器与微系统, 2008, **27**(6): 24-26, 30.
- [14] 施文康, 余晓芬. 检测技术(第三版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2010. 1.
- [15] ZHANG Zhen, LIU Fang. Application of wavelet analysis technique in the signal de-noising of life sign detection[J]. *Physics Procedia*, 2012, **24**: 2124-2130.