

Simulating System Development for the Study of Life Characteristic Signal

Xuehong Li, Shuhua Yang

School of Automation, University of Science & Technology Beijing, Beijing
Email: lixuehong1220@163.com, yangshuhua@ustb.edu.cn

Received: Jul. 1st, 2015; accepted: Jul. 15th, 2015; published: Jul. 21st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the research of life characteristic signal processing, because of different status, postures and positions, the results produce huge difference. Therefore, this paper designs a monitoring system which is based on biological radar simulation system, and it could be used in the study of life characteristic signal. The system provides target signals with stable quantitation for the research of life characteristic signal processing, and the signal parameters such as frequency, amplitude are adjustable. The system realizes the non-contact life detecting experiment through simulating the cardio of human. Through the test of the simulation system under different conditions, the experimental results prove that under different conditions, the system has better SNR and is globally stable, improving the practicability.

Keywords

Biological Radar, Vital Signs, Simulation System, Cardio

用于生命特征信号识别的模拟系统研制

李雪鸿, 杨淑华

北京科技大学自动化学院, 北京

Email: lixuehong1220@163.com, yangshuhua@ustb.edu.cn

收稿日期: 2015年7月1日; 录用日期: 2015年7月15日; 发布日期: 2015年7月21日

摘要

在生命特征信号处理的研究中,由于人体状态、姿势及位置等的不同,使得其研究结果产生了很大差异。因此,本文设计了一种基于生物雷达监测系统的用于生命特征信号研究的模拟系统。该系统为生命特征信号的处理研究提供了定量稳定的目标信号,并且其信号频率、幅度等参数连续可调。本系统通过模拟人体的心肺运动,实现了非接触式生命探测实验。通过不同条件下对模拟系统的实验测试,实验结果证明了在不同工况下,该系统具有更好的信噪比,且系统是全局稳定的,提高了系统的实用性。

关键词

生物雷达, 生命信号, 模拟系统, 心肺运动

1. 引言

生物雷达(bioradar)特指探测生命体的雷达,其融合雷达技术、生物医学工程技术于一体,可穿透非金属介质(砖墙、废墟等),不需要任何电极或传感器接触生命体,可在较远的距离内探测到生命体的生命信号(呼吸、心率、血流、肠蠕动等) [1]-[3]。与基于红外、光学及超声[4]的探测技术相比,利用生物雷达检测人体的生命体征信号不受环境温度、热物体的影响,具有非接触、穿透力强、能精确定位的特点,而成为目前最具活力和潜力的生命探测技术。由于生物雷达技术可被广泛应用于灾害救援、城市反恐、临床监护、边防海关安检和军事斗争等场合,因此基于生物雷达技术对生命特征信息的处理就显得尤为重要。

通过检测人体生理活动所引起的各种微动,进而获取各类生理信息是非接触检测的一种重要方法[5],从这些微动中不但能得到呼吸、循环、代谢和精神状态方面的有关信息,而且还可能得到一些其它检测方法所得不到的信息[6] [7]。对于循环发生的心脏跳动和呼吸,生命雷达信号的频谱中有相关的频谱元素,这些元素的参数取决于呼吸和心跳的频率和强度。对呼吸和心跳的频率和强度进行测量,就可以判断生命体的有无、生命体的健康状况等方面的生命信息[8]。由于生命体的特征信息——呼吸和心跳——是生命体生存状况最直接的表现,所以大多数这方面研究首选呼吸、心率为检测目标,通过生物雷达检测系统探测所得生命特征信号是由呼吸、心跳等引起的人体体表微动信号,进而提取所需参数。然而所得生命特征信号随机性强,并且是非平稳的,容易受到外界强噪声干扰,因此在雷达式非接触生命信息处理的过程中,经常要求被测目标能够提供定量稳定的生命信号。而且在生命体情绪平稳的时候,心跳和呼吸的频率维持在一个稳定的范围,呈周期性的变化。然而以实际人体作为探测目标进行实验会存在以下问题:

1) 由于人与人之间的差异,不同人的生命信号的频率和幅度等参数也是不同的。即便是同一个人,这些参数在不同的时间段也会发生变化。另外,人体对于入射波的位置不同,对于探测所得的信号幅度的大小影响也很大。

2) 每个人在探测时的身体状态和姿势都有显著差异。甚至同一个人在不同时刻也会由于身体不自主的微动和呼吸不规律造成生命信号的差异。这些因素都会影响对系统性能的客观评价和定量检测,而且会制约生命探测中新信号提取算法和目标识别算法的研究。

3) 当需要在废墟压埋等危险环境下进行灾害现场模拟探测实验研究时,考虑到安全因素,不宜用真人作为探测目标。

因此,研制一种量化、生命参数可调的人体呼吸运动模拟系统,为雷达式非接触生命探测提供定标信号,具有十分重要的作用和意义。

2. 系统方案设计与实现

2.1. 系统原理

由于生命信号的频率很小,如果要分辨出生命信号,就要采用高频电磁波。目前对穿墙生命信号探测最有利的电磁波段为毫米波和厘米波,一般选择在 L 或者 S 波段。Michigan 州立大学和希腊雅典国家技术大学的科学家通过不断地研制、试验,最后确定探测生命信号的最佳频率为 S 波段 2.45 GHz [9] [10]。

在生命体情绪平稳的时候,心跳和呼吸的频率维持在一个稳定的范围,呈周期性的变化,可以从时域和频域的积累上观察到这一特性。由多普勒效应公式可知,当雷达采用不同的发射频率时,所得生命信号的频率变化范围不同。俄罗斯莫斯科科学技术大学的科学家们利用他们的单频探地雷达进行了生命信号探测的实验,雷达发射频率为 1~10 GHz 的电磁波,得到心跳和呼吸的频率变化范围是:心跳 0.8~2.5 Hz,呼吸 0.2~0.5 Hz。当发射电磁波频率为 1.6 GHz 时,得到静止人的稳定心跳频率为 1.6 Hz,呼吸频率为 0.03 Hz。对于最佳探测频率 2.45 GHz,人的生命信号的频率变化范围是:0.1~3 Hz。

雷达(Radar, Radio Detection and ranging)发送电磁波信号,并感应目标引起的回波,从而获得这些目标的信息。一个典型的雷达系统包括发射机、天线、接收机、信号处理软硬件。发射机产生射频波形,并放大到足够的功率。雷达天线收发电磁波,将能量集中于目标的方向,并测定目标。接收机将射频回波信号转换为中频或基带信号,并分离信号和噪声、干扰,最后将信号放大到足够的幅度以满足后续数字电路的需求。

在非接触生命探测过程中,雷达发射的电磁波照射人体,根据多普勒原理,人体反射的回波信号被人体生命活动(如呼吸运动等)引起的体表微动所调制,使得这些回波信号的某些参数(如频率、相位)发生改变[11],经过后期信号处理,提取出人体的生命参数。人体主要是依靠心跳和呼吸时的胸腔运动和体动对雷达发出的电磁波产生多普勒效应。

该系统就是模拟人体的胸壁起伏,系统的设计思路也是由此而来。由心肺活动频率相当的电信号产生信号源,通过声卡由扬声器末端鼓膜的往复运动产生,本系统就是运用以上原理来模拟人体的心肺运动,得到定量稳定的目标信号,从而进行非接触生命探测实验。

2.2. 雷达监测模拟系统设计

根据非接触式生物雷达监测系统的工作原理,进行整个系统设计。本项目采用 2.5 GHz 的连续波雷达来发射信号,通过天线(收发双置天线)接收回波;经低噪放大、射频滤波、混频等一系列处理,将射频信号转换到中频信号送入数字下变频模块;其后对信号进行带通滤波,将信号下变频到零中频信号,并通过抽取滤波处理来实现采样率的转换,数字下变频模块输出低速的 I/Q 两路基带信号送至数字信号处理模块;数字信号处理先对 I/Q 两路基带信号进行反正切解调,提取体征信号的相位信息,再通过自适应滤波算法来进行呼吸和心跳信号的分离;最终在控显终端获得被测人体的具体体征信息,来对人体的健康状况进行推断。

生物雷达监测系统主要包括雷达探测前端、信号预处理模块、数字下变频模块、数字信号处理模块和控显终端五个部分。

雷达探测前端主要包括产生发射连续波信号的本地振荡器和将发射信号发送给目标物体的发射天线。振荡器产生的信号经定向耦合器,一路通过环行器由天线发射出去,另一路去混频器。当发射信号遇到

人体等目标后反射回来被接受天线接受，并送入混频器，该信号再经过放大、预处理、A/D 转换，通过后面的自适应滤波器在频域上将呼吸、心跳信号分开，送到 PC 机进行处理、显示。

预处理模块由课题组前期自行研制开发，主要组成部分分为前置输入级、主放大级、滤波器组、增益控制级、50 Hz 陷波级、信号输出级。前置级主要是滤波和保护电路；主放大级设置 60 dB 的增益放大模块实现对弱信号的放大，对强信号的限幅；滤波器组分为 0.5 Hz 高通滤波器组和 3.3 Hz 的低通滤波器组，经行对信号的选频，同时滤除直流和高频的干扰；增益控制电路设置调节模块实现对输出信号增益倍数的调节；陷波电路滤除 50 Hz 的工频干扰。预处理的目的是提高混频后的低频信号的信噪比，以利于后面 A/D 转换和数字信号处理。

数字下变频部分包含 A/D 采样和数字下变频两个过程。A/D 采样是在中频进行带通采样，中频频率为 75 MHz，采样频率为 100 MHz；数字下变频从高速中频数字信号中提取有用信号，将 75 MHz 中频信号下变频至零中频信号，下变频采用数字正交解调。先对中频信号进行采样，采样的数字信号进入数字正交解调环节，通过改变采样频率来进行选取我们所需解调的信号，通过奇偶抽取与符号校正，把中频信号中的载频(不含有用信息)下变频成零载频，中频信号变成 I/Q 两路正交的数字基带(零中频)信号，并采用时延滤波器将这两路信号采样点在时间上对齐。然后再将这两路信号送入 DSP 中进行后续处理。数字下变频的主要作用：其一是把中频信号下变频至零中频信号；其二是降低采样率。

数字信号处理部分主要包括反正切解调和自适应滤波算法。从数字下变频模块输出的 I/Q 两路基带信号送入数字信号处理部分，经过反正切解调提取 I/Q 两路基带信号的信息，根据心跳和呼吸信号的频域不同，利用自适应滤波技术将这两信号进行分离，最后用傅立叶变换进行这两种信号的频率提取，将结果送至 PC 显示，最终获得被测者实际体征情况，数字信号处理部分由 DSP 来实现。

控显终端采用的是一款基于 Windows CE 操作系统下专为嵌入式控制而设计的控制平台 LJD-eWin4S。该产品具有实时性好、移植性强、处理速度快、多任务切换等优势。系统框图如图 1 所示。

2.3. 基于雷达监测系统的生命模拟系统组成

模拟系统包括信号源、功率放大器和电-振动换能器三部分组成。信号源产生与心肺活动频率相当的电信号，在该实验系统中，实验模拟信号由计算机中的音频播放软件通过声卡发出。音频源文件的产生是基于单次的心跳和呼吸信号模板，它来自典型的人体呼吸和心跳信号振动信号，由医学数据库中的真实人体心肺相关数据记录转换而来，或通过实验测定来获取。然后将心跳与呼吸信号的模板按二者幅度的比例合成，并根据需要仿真的心率和呼吸频率，进行插值和重采样，形成一段心肺运动波形数据，存储为音频文件。音频文件由 Adobe Audition 等软件播放，即可从声卡输出心肺振动的波形。

由于心肺模拟信号频率相对音频要低很多，尤其是呼吸的低频段可能低于 0.2 Hz，普通音频输出装置并不支持 20 Hz 以下的低频信号输出，因而在声卡的设计上需要做到支持低频和直流信号的传输。具体实现方法是用 TI 的 USB 音频芯片 PCM2902 实现了数模(DA)转换，然后用运算放大器以直流耦合方式进行电平校正和放大。功率放大器将信号放大至足以推动换能器产生与人体振动幅度相仿的功率。同样出于频率范围的考虑，功率放大器也需要支持频率低至直流的信号。电-振动换能器用低音扬声器实现。考虑到人呼吸时胸壁运动幅度较大，选用线性行程较长的低音扬声器，例如 HiViResearch 的 SP10 (线性位移 15.5 mm)、seas 的 D1001 (线性行程 28 mm)等等。另外，在扬声器表面覆盖一层金属平面，以获得较强的电磁波反射能力，更有效的模拟体表反射。生物雷达监测系统实验设计的实物图如图 2 所示。

这样实验系统使音响末端鼓膜产生 3.00 cm 位移、频率为 2 Hz 的周期正弦信号。生物雷达监测系统的发射接收模块平行于音响末端并保持一定距离。这样雷达发射接受模块以 50 Hz 的频率采集反射回来的雷达信号。每个距离采集两组数据：有模拟源数据和无模拟源数据。其中受检距离为 1.6 cm~600.0 cm。

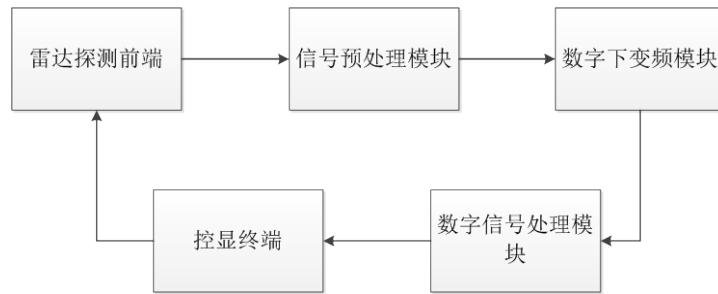


Figure 1. Biological radar monitoring system diagram

图 1. 生物雷达监测系统框图

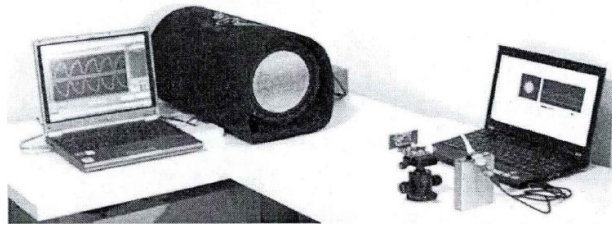


Figure 2. Real biological radar monitoring system diagram

图 2. 生物雷达监测系统实物图

并完成了这些所采集数据的处理，包括数据的筛选、解调、加窗、FFT 变换等等。生物雷达监测系统实验设计的示意图如图 3 所示。

2.4. 系统组成

本章对生命信号检测试验系统、对试验数据处理(包括去尖峰、解卷绕、滤除基线、去噪、加窗和 FFT)过程进行了设计，最后根据仿真结果给出结论。其中，采用滑动滤波去除的基线漂移，基于 FIR 数字滤波器的线性去噪，汉宁窗的选择，尤其是可变点数的 FFT 变换等，对实验仿真结果给出了有力证据。

实验数据采集及预处理过程如下：首先，获取数据，一定距离采集两组数据包括：有模拟源的截取的 6000 个数据，没有模拟源的截取的 3000 个数据。第二，对所有数据借助 MATLAB 去尖峰处理，以便处理掉采集过程中可能出现的异点和误码。第三，对所有数据加窗处理，由于需要做频域分析，故采用汉宁窗，窗长为数据的长度，为使检测结果明显故需要增大比例，这里的系数扩大 100 倍。第四，对所有数据 FFT 处理，FFT 处理后的结果做平方处理再次增大结果比例。第五，借助 MATLAB 中的 SUM 函数对所有数据在频域内求它们的功率，得到 4 组功率数据：去声噪 I 路信号功率、去声噪 Q 路信号功率、I 路声噪功率、Q 路声噪功率。第六，求去声噪的有用总功率、信噪比及基带信号的信噪比。

本实验数据获取部分主要是将各个模块进行协调和进行数据交互。首先完成初始化工作，初始化后进入循环处理，在循环过程中主要处理获得采集的数据，并将得到的数据发送到上位机。采集到数据后，首先删除明显的异常数据，由计算机软件通过设置阈值来自动完成。针对心跳的节律性，可近似认为其为准周期信号，对其进行相关处理，其自相关函数也具有周期性，而噪声和短时随机干扰在一定程度上被抑制。并且采样数据以文本格式(.txt)存储在指定位置。

实验采样频率为 50 Hz，故每一个距离采集 2 min 有源数据 6000 点以及采集 1 min 有源数据 3000 点，此时数据未经任何处理。实时数据采集如图 4 所示。

获得数据后，由于误码或者突然人为或者环境改变造成数据的急剧变化，这些突出的数据时无效数据需要去尖峰处理。图 5 是 I 路去尖峰前后数据对比。

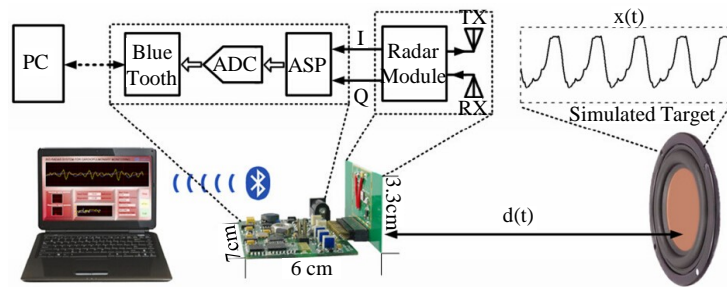


Figure 3. Biological radar monitoring system diagram
图 3. 生物雷达监测系统示意图

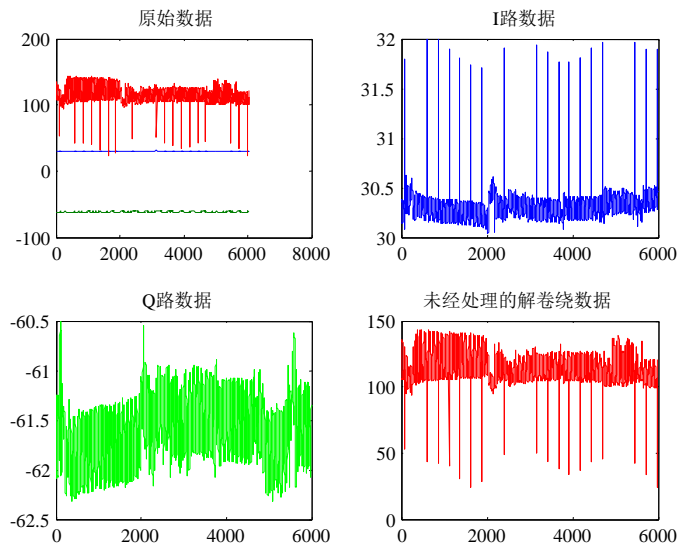


Figure 4. Real-time data
图 4. 实时数据

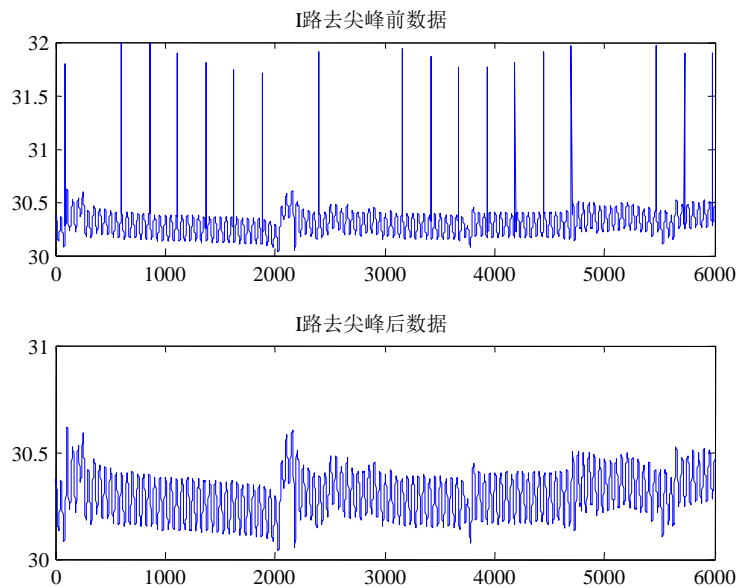


Figure 5. I way to peak data contrast
图 5. I路去尖峰前后数据对比

对于生命探测, 我们希望在距离上将多个生命体目标分辨开来。为提高距离分辨力, 选择汉宁窗对离散差拍信号进行加权处理。由于频域加权处理对应时域是周期加权处理, 因此在信号处理中, 对每个周期的离散差拍信号, 都要进行汉宁窗加权处理。线性调频连续波信号的第一级 FFT 输出的频谱与距离对应, 用频域加权匹配处理可有效抑制距离旁瓣, 提高多目标的分辨能力, 但无法避免主瓣变宽, 并使线性调频连续波信号的匹配滤波输出有信噪比损失。若采用汉宁加权, 信噪比损失为 3.52 dB [12]。图 6 是生命雷达信号的加窗处理。

本文所提及的信噪比(SNR)其计算公式为:

$$\text{SNR} = 10 \log \left[\frac{E(|X_s|^2)}{E(|X_n|^2)} \right]$$

其中, X_s 及 X_n 分别表示信号及噪声在频域里的幅值。

基于 FFT 的频域积累借助快速傅里叶变换将信号由时域转换到频域后进行积累, 这里采用可变点数 FFT 积累即不断增加参与 FFT 运算的时间点数, 达到频域积累目的。图 7、图 8 为该仿真信号常规的 1024 点 FFT 频域和时域仿真图, 为使结果明显数据的频率都扩大了 10。图中横坐标表示信号不同的频率成分, 纵坐标表示各频率分量在频域内的幅度, 此时可以清楚的看到心率在 0.3 Hz 左右, 呼吸在 1 Hz 左右。

3. 实验系统仿真及结果分析

试验系统模拟源发送 1 Hz, 最大振动幅度为 4 mm 的正弦波。实验采用了发射功率固定的一套雷达模块。根据电路的实际情况, 发射功率 = 7.5 dBm, 收发天线增 = 7 dBm, 目标截面积约为 = 0.3 m²。根据理论计算得到此时接收机在距离为 0.5 m 时, 接收功率为 = -30.41 dBm。在接收链路, 从射频输入到每一路基带信号的总增益为 46 dB, 因而在基带得到的信号功率理论上可以达到 6 dB。4 mm 位移对应的相位偏移为 0.972 rad 小于 2, 这时如果所观察的一路信号总相位在最优解调点附近, 则基带信号幅度为最大幅度的 46.7%, 基带信号功率理论值近似为 29.38 dBm。

取 10 Hz 以上的平均功率作为噪声基底, 得到基底噪声为 -78 dBmV。将实曲线在 1 Hz 处的峰值功率作为信号功率, 在 1 Hz 处的峰值信号功率为 22.99 dBm。将虚线在 0.1 Hz 到 10 Hz 带宽内的平均功率作为噪声功率, 计算得到噪声功率为 -50.28 dBm, 定义信噪比为两者的比值, 根据这一定义计算得到此时基带信号的信噪比为 73.27 dB。需要指出的是, 实验测得的这路基带信号近似的处于最优解调点附近。与理论值相比, 其信号功率值偏低 6.39 dB。进一步改变模拟信号源装置与生物雷达的距离, 在每一个距离点上将测得的正交两路信号有用功率相加作为信号功率, 将无目标运动时两路信号在 0.1 Hz 到 10 Hz 带宽内的平均功率的和作为噪声功率, 计算两者的比值得到信噪比, 如图 9 为得到的基带信号信噪比与距离的关系。由图可见, 距离较远时, 基带信号功率随距离增加而呈单调的下降趋势, 随着距离由 20 cm 至 6 m 的变化, 下降斜率由 -20 dB/十倍距离逐渐增加至 -40 dB/十倍距离, 这表明信噪比随距离的变化规律由平方关系逐渐过渡到四次方关系。当距离小于约 20 cm, 由于雷达天线的近场效应, 信号的功率不再与距离的变化呈单调关系。而当距离大于 6 m 时, 此时信号功率微弱, 在有用信号中, 叠加在幅度较大的呼吸信号上的心跳振动波形受到噪声的污染严重, 解调算法难以恢复出有用信息。

由于实验数据量大, 采集过程中的干扰, 数据处理结果不很理想, 其中测距在 45 cm~95 cm 出数据有问题, 根据分析重新截取有模拟源的数据和声噪的数据, 还有就是数据结果整体应该呈下滑趋势, 但在 500 cm 以后的数据下滑太快, 不能与整体数据构成很高的相关性, 所以雷达测试距离在 5.0 m 以后的灵敏度下降。经过重新处理后的数据符合预测分析。

当雷达模块的发射功率不同时, 收发通路采用可变增益放大器(VGA), 图 10 中红、蓝、绿三条曲线分别表示发射天线的输出功率为 7.5 dBm、-8 dBm、14.8 dBm 时基带信号归一化波形。除归一化前的不

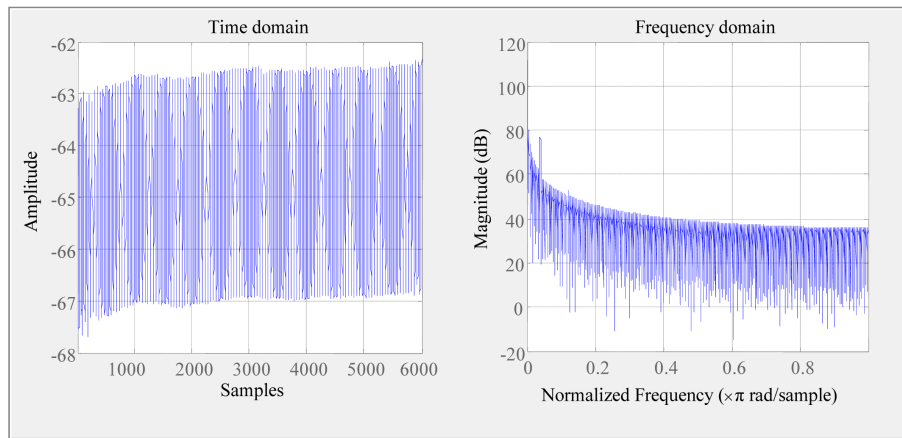


Figure 6. Life of radar signal and window treatments
图 6. 生命雷达信号的加窗处理

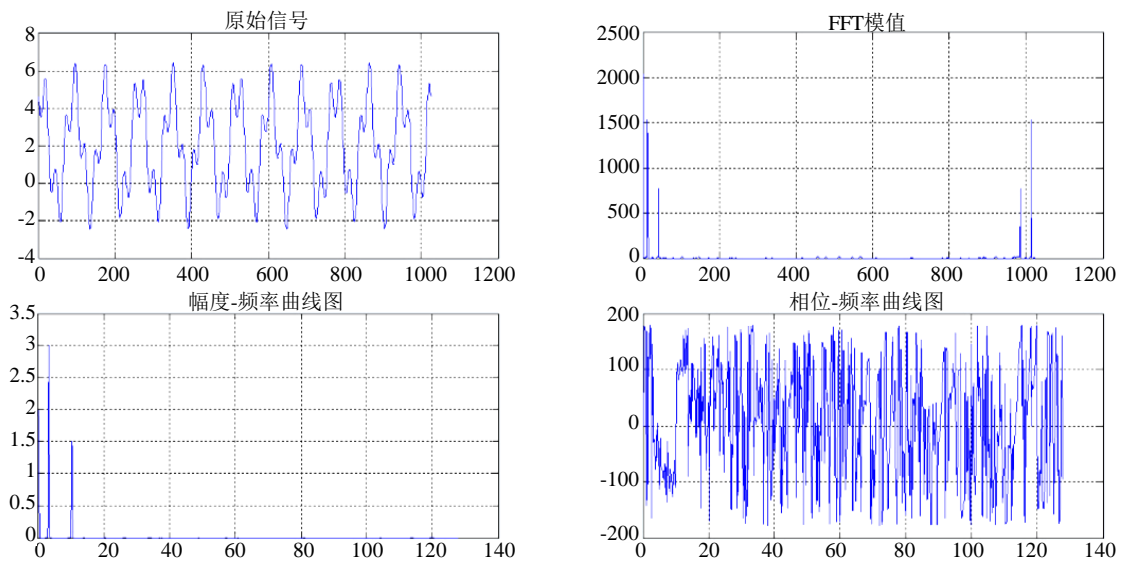


Figure 7. FFT frequency domain simulation
图 7. FFT 频域仿真图

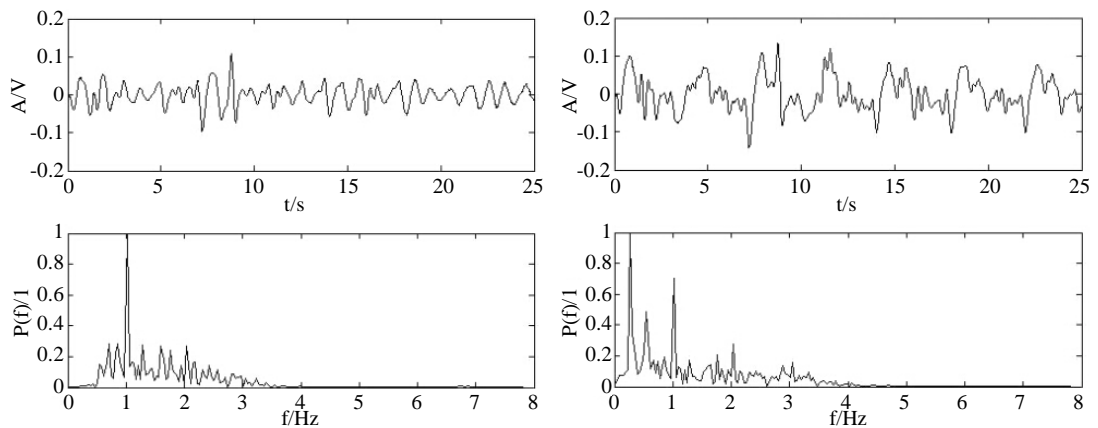


Figure 8. Time domain simulation comparison before and after FFT
图 8. FFT 前后时域仿真对比图

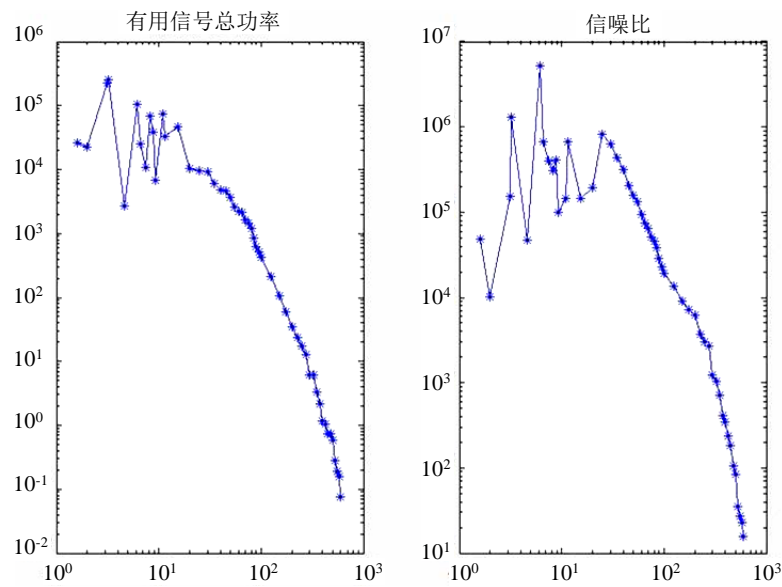


Figure 9. Relationship between baseband signal SNR and distance
图 9. 基带信号信噪比与距离的关系

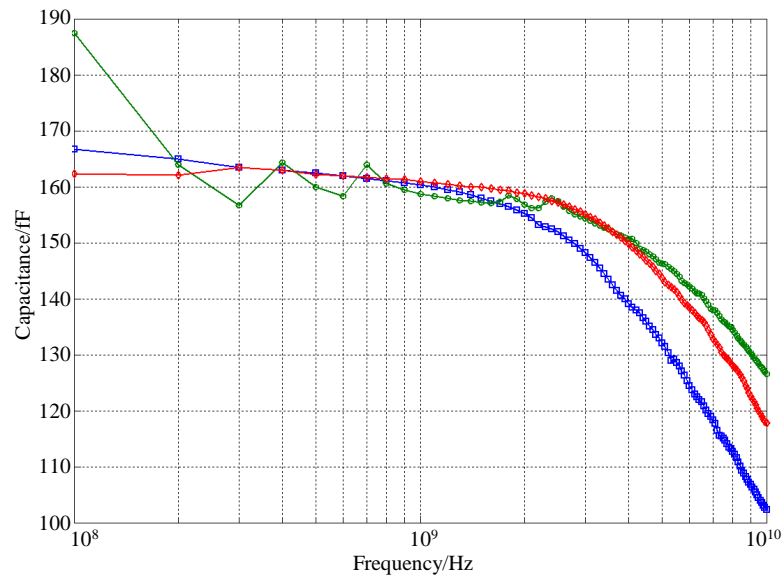


Figure 10. Baseband signal waveform
图 10. 基带信号波形

另外，波形与原始信号基本保持一致。当距离小于 3 cm 时，信号的直流偏移将导致接收通路饱和，采集到的基带信号出现过载而丢失信息，因而 3 cm 可认为是雷达模块能正常工作的最近检测距离。当距离为 275 cm 时，噪声的幅度很大可以和有用信号波形中心跳振动的幅度相比拟，这时心跳波形的恢复困难。计算基带信号的信噪比，得到距离为 250 cm 以内时信噪比高于为 6 dB，信号波形容易恢复，对于心率参数的估计误差在可接受的范围，因而可认为 250 cm 是该频率下雷达模块能正常工作的最远检测距离。

4. 结论

实验表明，本系统能够较好地模拟人体的心肺运动，心跳和呼吸的频率、幅度、时间比等参数连续

可调,为雷达式非接触生命探测提供了定量、稳定的目标信号。并经过模拟实验系统生命特征信息采集、加工、处理等为开发心跳信号与呼吸信号的分离提取新算法提供了客观的评价和依据。该系统能够代替真人完成废墟压埋等危险环境下的探测实验,为该领域的深入研究提供了方便、有力的工具。

参考文献 (References)

- [1] Droitcour, A., Lubecke, V., Lin, J., et al. (2001) A microwave radio for Doppler radar sensing of vital signs. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, **1**, 175-178. <http://dx.doi.org/10.1109/mwsym.2001.966866>
- [2] Boric-Lubecke, O. and Lubecke, V.M. (2002) Wireless house calls: Using communications technology for health care and monitoring. *IEEE Microwave Magazine*, **3**, 43-48. <http://dx.doi.org/10.1109/MMW.2002.1028361>
- [3] Droitcour, A.D., Boric-Lubecke, O., Lubecke, V.M., et al. (2004) Range correlation and I/Q performance benefits in single-chip silicon Doppler radars for noncontact cardiopulmonary monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **52**, 838-848. <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2004.823552>
- [4] Samkov, S.V. (2004) Signal processing in UWB radars of small distance. 2004 *Second International Workshop Ultra-wideband and Ultrashort Impulse Signals*, Sevastopol, 19-22 September 2004, 208-210. <http://dx.doi.org/10.1109/UWBUS.2004.1388103>
- [5] 齐颂扬 (1990) 医学仪器: 上册. 高等教育出版社, 北京.
- [6] Chen, Y.F., Misra, D., Wang, H., et al. (1986) An X-band microwave life-detection system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **7**, 697-701. <http://dx.doi.org/10.1109/TBME.1986.325760>
- [7] Miyakawa, M. (1993) Tomographic measurement of temperature change in phantoms of the human body by chirp radar-type microwave computed tomography. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **31**, S31-S36. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02446647>
- [8] Holzrichter, J.F., Burnett, G.C., Ng, L.C., et al. (1998) Speech articulator measurements using low power EM-wave sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **103**, 622-625. <http://dx.doi.org/10.1121/1.421133>
- [9] Chen, K.M., Huang, Y., Zhang, J. and Norman, A. (2000) Microwave life-detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **47**, 105-114. <http://dx.doi.org/10.1109/10.817625>
- [10] Bimpas, M., Paraskevopoulos, N. and Nikellis, K. (2004) Development of a three band radar system for detecting trapped alive humans under building ruins. *Progress in Electromagnetics Research*, **49**, 161-188. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER04030501>
- [11] 王健琪, 董秀珍 (2001) 基于毫米波的呼吸、心律非接触检测实验. *第四军医大学学报*, **2**, 180-182.
- [12] 叶勇, 王健琪, 穆飞航, 等 (2005) 基于 DSP 的非接触生命探测系统中信号处理单元的研制. *医疗卫生装备*, **3**, 16-17.