

基于超声射频回波分布的脂肪厚度测量

廖长义, 王 华, 周慧婷, 汤旭东, 吕 朋

(重庆医科大学 生物医学工程学院, 省部共建超声医学工程国家重点实验室, 超声医学工程重庆市市级重点实验室, 重庆 400016)

摘 要:提出了一种基于超声射频(RF)回波分布检测皮下脂肪厚度的方法。该方法首先根据浅表组织结构特征,找出射频回波信号中不同组织间界面的分布,然后采用脉冲反射法测量各层组织厚度,并将结果与B型超声诊断仪和直尺对比,最后设定阈值对射频回波进行峰值检测。实验结果证实了利用射频(RF)回波分布测量皮下脂肪厚度的可行性。

关键词:超声波; 脉冲反射法; 射频信号; 皮下脂肪厚度

中图分类号:O426.3 **文献标识码:**A

Detection of Fat Thickness Based on the Distribution of Ultrasonic RF Echos

LIAO Changyi, WANG Hua, ZHOU Huiting, TANG Xudong, LV Peng

(Chongqing Municipal Key Lab. of Ultrasound Engineering in Medicine, State Key Lab. of Ultrasound Engineering in Medicine Co-founded by Chongqing and MOST, College of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

Abstract: A new method for subcutaneous fat thickness detection based on ultrasound RF echo distribution is presented. Firstly, this method analysis superficial tissue structure characteristics, and find out the different signal features of the tissue from the RF echo signal. Secondly, the thickness of each tissue layer is detected by pulse-echo method. Then the results are compared with B-mode ultrasonography and straightedge. Finally, the threshold is set for peak detection of RF echo signals. The results of experiments indicate the feasibility of detecting the subcutaneous fat thickness by ultrasound RF echo signals.

Key words: ultrasound; pulse-echo method; RF signal; subcutaneous fat thickness

0 引言

皮下脂肪厚度测量是评价人体营养状况、体能及肥胖程度的重要指标^[1],而人体脂肪约有2/3存于皮下的脂肪层,因此,测量皮下脂肪厚度是估计体内总脂肪状况的良好指数。此外,特定部位皮下脂肪厚度的测定还可为相应塑身减肥方法提供参考依据。目前,测量皮下脂肪厚度常用方法为皮脂计(“指捏法”)和卡尺法,这两种方法都有一定局限性,且不能直观反映皮下脂肪厚度。近年来,由于医学技术的发展,在国内外已有应用超声法、CT法、MRI法等测量脂肪厚度的报道。目前认为,CT法和MRI法是测量脂肪分布和含量准确性和可重复性最好的方法,但成本较高,操作不便^[2]。超声法因其简单,直观,费用低,穿透深度大,且能显示脂肪分布而倍受关注。国内现在该方法测量方式主要利用超声诊断仪(B超),但在实际临床应用中,B超诊断

装置基本上都专用于疾病诊断,测量脂肪厚度只是其附带的一个测量项目;而且,目前市面上还没有适合家庭监控脂肪厚度或健身房个人随时观察脂肪厚度,以便随时检验运动和节食效果的小型、便携式脂肪厚度测量装置。本文利用脉冲反射法,应用自制A超装置采集组织射频回波信号进行皮下脂肪厚度测量实验,并将结果与B超、直尺测量结果进行对比,旨在提供一种测量简单,读数直观,体积小,便于携带,尤其适合家庭监控脂肪厚度或健身房个人随时观察脂肪厚度测量装置及相应的测量方法。

超声射频(RF)回波是反映组织结构特性的丰富信息源。近年来,基于超声RF信号进行组织定征(如背向散射参数、频谱分析)已有较多报道,但大都着重于肝、脾、眼、肾、心脏等实质性脏器组织的研究,对浅表组织研究较少^[3-5]。本文作者利用浅表组织中不同组织结构超声RF回波信号的分布规

收稿日期:2011-09-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)基金资助项目(2011CB707902)

作者简介:廖长义(1985-),女,重庆綦江人,硕士生,主要从事超声信号检测与处理的研究。E-mail: lcyi2010@163.com。通信作者:王华,教授,硕士生导师。E-mail: wangh@haifu.com.cn。

律,探讨通过射频回波分布测量皮下脂肪厚度的可行性。

1 检测原理

超声波脉冲反射法是应用单或双传感器将超声波入射到被测物体内部时,当遇到不同声阻抗界面时产生反射,通过对接收的超声回波信号进行处理的方法。由于生物组织(主要指人体组织)结构各异,当超声波在非均匀性组织中传播或从一种组织传播到另一种组织时,由于组织声阻抗的不同,在声阻抗改变的分界面上将产生反射、折射和透射。因此,可利用超声波脉冲反射法,采用同一个换能器发射和接收信号,并接受体内反射回来的超声回波,探查组织的生理特性。

本文应用脉冲反射法测量猪皮下的脂肪厚度,实验检测原理如图1所示。当超声波进入猪浅表组织后,在各组织层界面形成反射波。根据距离公式

$$s = ct \quad (1)$$

式中: s 为超声波传播距离; c 为超声波在介质中的传播速度; t 为传播距离所用的时间。

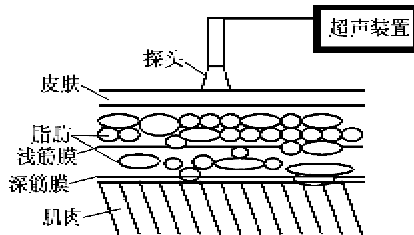


图1 实验检测原理图

只要能测出 c 和 t ,即可求得各组织层厚度。实验中分别读出示波器中离体猪浅表组织超声回波信号界面的时间 Δt ,取 $c=1500\text{ m/s}$,从换能器发射到接收传播距离为 $2d$,则组织厚度

$$d = (\Delta t \times c) / 2 \quad (2)$$

2 实验方法理论分析

在利用超声波脉冲反射法检测多层非均匀结构的浅表软组织厚度时,可用分层介质模型:“耦合介质-介质1(皮肤)-介质2(脂肪)-介质3(纤维膜)-介质4(脂肪)-介质5(筋膜层)-介质6(肌肉)”来表示浅表组织多层结构模型。本实验约定:介质2(脂肪)层上界面为一界面,介质2(脂肪)层下面各介质层之间的界面依次为二、三、四界面。

超声检测浅表软组织时,超声射频反射回波信号主要由反射(或接收)换能器与耦合层反射回波、耦合层与皮肤层界面反射回波、一界面等的界面反射回波3种波叠加而成。根据实验目的,实验只研究第三种界面反射回波的超声射频信号分布特征。

由于浅表组织的结构组成(主要是蛋白质,脂肪和水的含量)不同,各介质层声速、声衰减和声阻抗等超声性质不同^[6],接收到的超声射频回波信号的幅度、相位、波数密度、上升沿及下降沿不同。只要确定了各组织层的超声射频回波分布特征,就可根据不同的特征进行识别进而检测各组织层厚度。

皮肤、脂肪和肌肉组织间声阻抗的不同,在超声显像仪上声像图表现为多层不同回声结构^[7-9]。实验用GE公司B超诊断仪,探头中心频率为10 MHz,观察到的人腹部浅表组织声像图。如图2所示,在图上可见应用超声诊断仪观察人体浅表组织,在声像图上可显示皮肤表皮、真皮及皮下组织结构层面。表皮为平滑线状强回声,表面光滑,厚度均匀,回声均匀;脂肪组织呈低回声,脂肪细胞间有纤维膜分隔,其内可见网状强回声;肌肉层回声强于脂肪层。

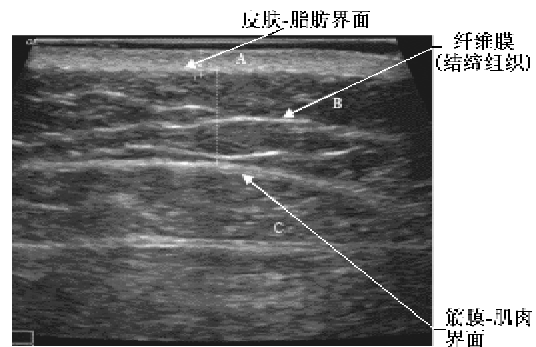


图2 人腹部浅表组织高频超声图

由图2可知,由于组织内不均匀性和组织边界散射,从皮肤到体内组织,在皮肤-脂肪界面,脂肪-肌肉界面两边组织声阻抗差异较大,将构成强超声反射界面;脂肪和肌肉组织内构成次回声区域,区域内反射信号很弱。可见,在浅表组织结构特征分析了解的基础上,浅表组织的超声射频回波分布特征可识别。

实验中超声射频回波信号是探头反射信号经放大器放大后,直接加至示波器所显示出来的波形。多次实验证实,实验采集的浅表射频回波信号较稳定,如图3所示,图中,A为起始信号,B1为皮肤-脂肪界面,B2为脂肪-浅筋膜界面,B3为第二层脂肪-筋膜界面,B4为深筋膜-肌肉界面。由组织解剖学知:皮肤层含少量结缔组织,内有胶原蛋白成分;皮下脂肪层由大量脂肪细胞聚集而成,脂肪组织密度较低。脂肪组织含水量很少,声速低,这一情况主要决定于脂肪组织中含有较高的类脂化合物。实验检测的皮肤与脂肪层间反射信号,即界面一反射信号B1(见图3),反射回波(B1)主峰不明显且幅值较低,

波数少;筋膜层为致密的结缔组织,与脂肪声阻抗相差明显,因此,图3中,界面2(B2)幅值高,又因为脂肪层间的筋膜层很薄,超声波在筋膜层上下界面回波叠加,超声射频信号中B2波数多且密集,上升沿、下降沿陡峭;肌肉组织的基本成分是肌细胞(肌纤维),肌细胞间有少量结缔组织,密度明显高于脂肪组织。脂肪与肌肉连接处为层状的筋膜组织,层状筋膜与脂肪及肌肉层间界面超声射频回波如图2中B3、B4。B3与B2均为脂肪层与筋膜界面反射回波,都具有较高幅值,但B3在下降沿处波数较多,这可看为层状筋膜结构;B4主峰前后都有较多反射小波,这与界面4上为层状筋膜,界面下为肌肉层,内为柱状肌纤维细胞有关。可见,多层非均匀结构的浅表软组织中各组织层的结构特征在超声射频回波信号中均有不同的分布特征。

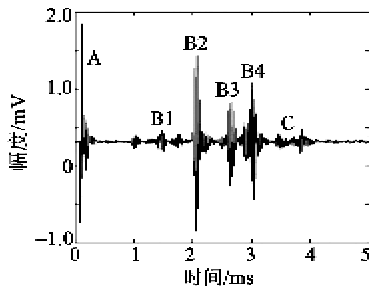


图3 离体猪背部超声射频回波信号

3 实验

3.1 实验样品准备

实验采用新鲜离体猪背部肉(包括皮肤、脂肪和肌肉组织)若干。样品切成底面(皮肤为底面)约4 cm×4 cm而厚度不作处理的方块,离体时间均约为10 h。在每块样品底面(皮肤底面)上用笔在一点作一记号,以便探头每次对准同一位置。

3.2 实验系统

实验采用自制的超声装置,超声换能器(探头)中心频率为2.5 MHz。该超声装置主要由超声换能器(探头)、电子线路和开关电路组成。电子线路包括单片机主控电路、超声发射和接收电路、放大电路和滤波电路。探头在高频电脉冲的激励下,产生超声振动,发射超声波。超声波在样品内传播,遇到不同组织的界面时,产生反射波——回波。探头接收反射波后,将其转换成电脉冲,进入接收电路,经过放大电路后由示波器采集超声射频输出信号。示波器垂直方向用于显示超声回波射频信号的幅度和形状;而示波器的水平偏转板上加载时基锯齿波,表示超声波传播时间。信号处理部分是将示波器的信

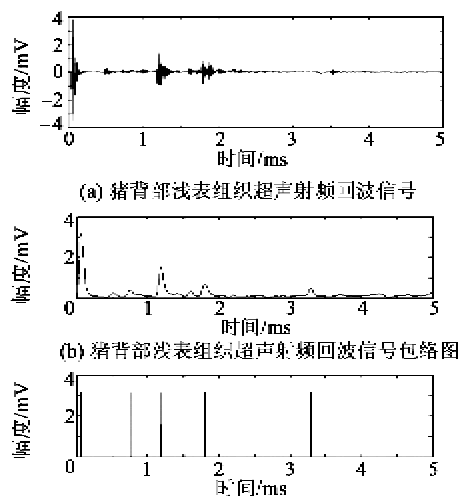
号数据存储下来,通过计算机上MATLAB软件进行波形分析处理。样品平整放置于有机玻璃箱内,将探头与样品表面垂直接触,然后探头固定在有机玻璃夹上。

3.3 实验方法

开启超声装置的开关,将探头置于输出状态,在示波器上调节始波到零刻度。采用超声波脉冲反射法,探头兼作收发两用,即探头发射超声波又接受超声波;在猪皮肤上记号处涂上耦合剂,探头需垂直接触皮上的记号(实验中要保持探头与样品静止不动且记号处垂直接触良好,以使声能最大限度的传播)。从示波器上测出始波、各反射界面的传播时间,每块样品组织测10次,取平均值;测量后,再将样品用GE公司B超诊断仪,探头中心频率为10 MHz和直尺进行测量,每块样品也测量10次,取平均值。

4 结果与分析

所有的样品经过测试系统进行射频回波信号采样后,数据都采用Mtlab软件处理。换能器接收到的样品射频信号波形如图4所示。由图可看出,当超声波在浅表组织不同组织传播时,有3个明显的反射界面B2,B3,B4。由于浅表组织中各层组织成分不同,在组织界面处衰减程度不同,因此接收到的反射信号幅值、波数不同。实验表明,猪背部浅表组织样品的射频回波中,B2幅度值最大,B3、B4受力度、探头等影响,幅度值有变化,但都较B2小。实验中采集的反射波波形较稳定。



(c) 经过峰值检测后的猪背部浅表组织反射界面的分布结果

图4 换能器接收到的样品射频信号波形

为确定射频回波信号中各波峰表示的组织界面,所有样品在用示波器采集回波信号的同时都测出入射峰值(起始波 A)和反射峰值间的传播时间,

再代入 $d=ct/2$ 计算,取 $c=1\ 500\ \text{m/s}$ 并将结果与直尺、B 超测量作对比,以便对射频回波信号中组织分布的位置进行识别。实验测量结果如表 1 所示。

表 1 猪背部浅表软组织各层厚度测量结果

测量方式	各组织层测量 10 次的平均值厚度/mm											
	皮肤			浅层脂肪			深层脂肪			肌肉层		
	样品 1	样品 2	样品 3	样品 1	样品 2	样品 3	样品 1	样品 2	样品 3	样品 1	样品 2	样品 3
脉冲反射法	6.53	4.82	4.05	6.44	11.63	4.85	11.53	8.17	7.08	29.84	45.50	32.03
B 超测量	8.85	7.42	6.85	8.03	14.25	7.28	15.38	11.42	9.26	33.05	43.22	35.48
直 尺	8.90	8.00	7.20	8.00	14.90	7.70	15.50	12.50	9.50	33.00	43.60	37.00

注:浅层脂肪:皮肤-脂肪界面至脂肪纤维膜界面;深层脂肪:脂肪-纤维膜界面至筋膜-肌肉界面。

分析猪浅表组织结构与射频信号的分布关系可知,脂肪层被一层薄筋膜隔开,脂肪与筋膜间密度不同,脂肪组织密度较低,因此 B2 为强回声界面且反射波数较少。脂肪与肌肉连接处为多层筋膜组织,因此第二层脂肪-筋膜界面 B3 也为强回声,由于超声波是从脂肪进入筋膜,B3 峰值前的波数少而峰值后的波数多。在筋膜-肌肉界面 B4 峰值前后波数都很多。肌肉层内为柱状的纤维细胞,在肌肉层中的反射(散射)信号为 C。

由表 1 可知,3 种测量方法中,B 超测量与直尺测量结果基本一致,脉冲反射法较 B 超、直尺测量结果小,平均小 2~4 mm。这可能是由于选取的软组织的超声声速(1 500 m/s)比实际猪软组织声速小,以及猪软组织比人体如组织复杂。

对于示波器采集的超声回波射频信号,为更好识别其中不同组织界面位置,在 Matlab 处理时先对信号进行深度增益补偿,然后取包络、平滑滤波,最后选取皮肤-脂肪界面回波信号的幅值为阈值进行峰值检测。图 5 为包络及峰值检测后的结果。

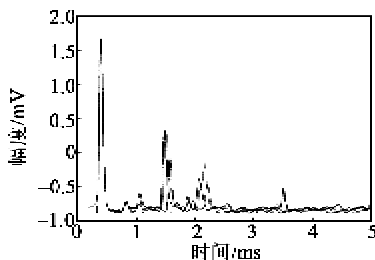


图 5 不同离体猪背部浅表组织超声回波信号

经过深度增益补偿后的信号更易识别各组织层间的界面反射信号,峰值检测结果清晰看出离体猪软组织各层组织分布情况,说明脉冲反射法测量皮下脂肪厚度的可行性。由图 5 可看出信号具有一定

的相似行,表明本实验方法具有普遍性质,适用于不同个体测量。

5 结束语

国内超声法测量皮下脂肪厚度多采用超声诊断仪(B 超),若仅用于测量皮脂厚度,虽其测量较准确,但成本较高。射频信号是没有经过后处理的原始信号,能真实、准确地显示组织结构信息。本研究应用自制的 A 超装置采集浅表组织的超声射频回波信号,采用脉冲反射原理,测量浅表组织样品中各层组织厚度。测量结果与 B 超及直尺比较找出信号中各组织层的分布。从浅表组织射频回波信号分析表明,组织的射频回波分布测量皮下脂肪厚度简单易行,能较清晰显示浅表各组织层大小、形态、内部结构及各层连接界处的界面特征。这不仅为深入进行浅表组织定征奠定基础,而且还可以为发展新的皮脂测厚仪设备有积极的推动作用。

此外,受操作人员手法、探头位置及力度变化等因素影响,射频回波信号中各反射界面间传输时间测量会有误差,因此,脉冲反射法测量的各组织层厚度与 B 型超声诊断仪和直尺比较存在误差。

参考文献:

[1] 贾镛,赵立国,马洪波,等. B 超测量皮脂厚度的临床应用[J]. 肠外与肠内营养,2003,10(1):12-14.
 JIA Lei, ZHAO Liguang, MA Hongbo, et al. Clinical application of B-mode ultrasonographic measurement of sebum thickness[J]. Parenteral & Enteral Nutrition, 2003,10(1):12-14.

[2] 魏斌,赵志刚,田志强,等. 腹内脂肪的超声定量检测及其临床价值[J]. 重庆医学,2006,35(9):787-793.
 WEI Bin, ZHAO Zhigang, TIAN Zhiqiang, et al. Ultrasonography-determined visceral fat and its clinical significance[J]. Chongqing Medicine, 2006, 35(9):

- 787-793.
- [3] WAGNER R F, INSANA M F, BROWN D G. Statistical properties of radio-frequency and envelope-detected signals with applications to medical ultrasound[J]. *Opt Soc Am A*, 1987, 4(5): 181-183.
- [4] MAKE E L. Absorption and attenuation in soft tissues II-experiment results[J]. *IEEE Transation on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1988, 35(4): 511-521.
- [5] 严碧歌. 脂肪-肌肉组织超声衰减特性的研究[J]. *压电与声光*, 2007, 29(1): 93-95.
YAN Bige. A study on ultrasonic attenuation characteristic of fat-muscular tissue [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2007, 29(1): 93-95.
- [6] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1995: 105-121.
- [7] 李艳宁, 李智贤, 卢月华, 等. 高频超声对正常成人皮肤厚度测量及声像研究[J]. *中国医学影像技术*, 2008, 24(10): 1622-1624.
LI Yanning, LI Zhixian, LU Yuehua, et al. Measure of skin thickness and study of skin sonogram in adult by high-frequency ultrasound[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2008, 24(10): 1622-1624.
- [8] 郑荣琴, 张嗣汶, 林骅杰, 等. 正常人体皮肤 15 MHz 声像研究[J]. *中华超声影像学杂志*, 1997, 6(3): 85-87.
ZHEN Rongqin, ZHANG Siwen, LIN Yejie, et al. Study of normal human skin with 15 MHz ultrasound [J]. *Chinese Journal of Ultrasonography*, 1997, 6(3): 85-87.
- [9] WANG P, TAN Y, JIN X C. Study on feasibility of the skin detection by high resolution ultrasound[J]. *Chinese J Ultrasound Med*, 2001, 17(2): 211-213.
-
- (上接第 805 页)
- [8] 孙凯, 杨青, 郭广平. 喷水穿透超声 C 扫描自动检测系统的研制[J]. *无损探伤*, 2006, 30(6): 21-23.
SUN Kai, YANG Qing, GUO Guangping. Development of the C-scan to spray penetration automatic testing system[J]. *Nondestructive Testing*, 2006, 30(6): 21-23.
- [9] 曹宗, 杰潘希, 德薛锦, 等. 弧形电触头超声 C 扫描图像校正问题的研究[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(1): 36-38.
CAO Zong, JIE Panxi, DE Xuejing, et al. Study on ultrasonic C-scan image correction in nondestructive evaluation of arc surface electric contact [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(1): 36-38.
- [10] 郭建中, 林书玉, 高伟. 超声换能器电感电容匹配电路的改进[J]. *压电与声光*, 2005, 27(3): 257-259.
GUO Jianzhong, LIN Shuyu, GAO Wei. A modification of matching circuit for ultrasound transducer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(3): 257-259.
- [11] 马浪, 郭建中, 刘波. 软组织超声散射子频率特性的研究[J]. *压电与声光*, 2011, 33(5): 761-767.
MA Lang, GUO Jianzhong, LIU Bo. Study on the frequency property of ultrasonic scatter in soft tissue[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(5): 761-767.
-

欢迎订阅《压电与声光》杂志