

基于超声射频信号的肩袖损伤识别

徐大华¹, 宋人杰², 屠娟², 章东², 何玉冰¹, 陆倩¹

(1. 江苏省中医院, 南京中医药大学附属医院超声医学科, 南京, 210029; 2. 南京大学物理学院近代声学教育部重点实验室, 南京, 210093)

摘要: 肩袖撕裂是一种常见疾病, 超声已被认为是该疾病首选的检查方法, 但撕裂后的血肿充填易导致常规超声扫查的假阴性, 本文提出一种基于超声原始射频(Radio frequency, RF)信号的肩袖撕裂识别方法。首先将B超诊断仪设置在二次谐波扫描模式, 扫描和存储组织的原始RF数据。其次对一帧RF数据进行带通滤波并在这帧RF数据中选取感兴趣和参考区域; 然后计算感兴趣和参考区域内每条扫描线上每一个或数个周期内二次谐波的均方根值。再用Kolmogorov-Smirnov检验把各区域内每条扫描线上的均方根值与参考区域的进行比较, 计算相应 p 值。最后将感兴趣区域的算术平均 p 值除以参考区域的算术平均 p 值, 得到相对 p 值。本方法解决了当前B超检查中识别复杂生物组织异常主观性强和需要有丰富临床经验的问题, 测量准确、容易实施。

关键词: 肩袖撕裂; 超声; 射频信号; 二次谐波

中图分类号: O426.4 **文献标志码:** A

Diagnosis of Rotator Cuff Tear Based on Ultrasonic Radio-Frequency Signals

XU Dahua¹, SONG Renjie², TU Juan², ZHANG Dong², HE Yubing¹, LU Qian¹

(1. Department of Ultrasound, Jiangsu Province Hospital of Chinese Medicine, Affiliated Hospital of Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing, 210029, China; 2. Key Laboratory of Modern Acoustics, MOE, School of Physics, Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

Abstract: Rotator cuff tear is a kind of frequently-occurring disease, and ultrasonography is the preferred examination method for the disease, but the organization of hematoma in the nidus leads to false-negative in most cases. A new nonlinear approach based on statistical analysis of ultrasound radio-frequency (RF) signals is developed for identifying the lesion to improve the diagnostic accuracy. Firstly, the raw RF data is scanned and saved in the second harmonic mode, then the region of interest (ROI) and reference region (RR) are selected in one frame by applying the band-pass filter. The root-mean-square value of second harmonic in one or more cycles within ROI and RR are calculated and compared by Kolmogorov-Smirnow test for the p -value. The relative p -value is estimated by comparing the ROI and RR. The proposed method solves the problems of high subjectivity in identifying complex tissue and requisiting rich clinical experience in the ultrasound examination with accurate measurement and easy implement.

Key words: rotator cuff tear; ultrasound; radio-frequency signals; second harmonic

基金项目: 江苏省重点研发计划(BE2018703)资助项目。

收稿日期: 2018-03-30; **修订日期:** 2018-11-20

引 言

肩袖损伤是导致肩关节疼痛及功能障碍的常见原因,约占肩关节疾病的20%^[1-2],随着中国老年社会进程的推进及不健康运动方式的增加,其发病率逐年上升,严重影响患者生活质量并导致高昂的医疗费用^[3],故对其早期诊断及治疗已成为临床研究的热点。现代高频超声可清晰显示软组织结构,由于其便捷、高分辨率和无辐射等特点在肌骨疾病诊断中的应用日益广泛^[4-6]。

由于传声介质的非线性,声波在传播过程中发生畸变,并产生谐波。因此,人们利用声波在人体组织中非线性传播特性,建立了谐波成像技术。考虑二次谐波在生物组织中衰减较小,且具有良好的指向性,因此医学谐波成像中常以二次谐波作为首选信号。相比传统基波成像,二次谐波成像可以更好地反映生物组织的非线性特征参数,并且具有更高的信噪比和较强的空间分辨力,在消除近场伪像和旁瓣干扰、增强组织对比度、提高深部组织回声信息和组织特异性定征等方面都有优势,可以更清晰地显示探测目标。Tranquart等^[8]和Shapiro等^[9]分别在1999年和1998年的研究,可以帮助佐证这些结论。Tranquart等利用二谐波成像和常规成像对不同器官(如肾和胆囊)采集的图像进行比较,结果表明:对于肾脏,与传统基波图像相比,在二次谐波成像的肾脏图像中,可以显著识别出肾中的隔膜、结节以及钙化现象。对于胆囊,利用二次谐波成像可以从胆囊中明显区分和检测结石。在Shapiro等对胰腺的研究中也发现,二次谐波超声分别在2.5和4 MHz的条件下,其穿透深度、细节和总体图像质量明显优于基波信号超声,从而可以更容易地检测胰腺癌。以上研究表明,二次谐波比基础信息更具信息性^[7-12]。因此,本研究将在二次谐波成像模式下,针对肩袖损伤组织的原始射频(Radio frequency, RF)信号进行统计分析,通过 p 值计算,探讨B超RF信号统计分析对肩袖损伤的临床诊断价值。

1 资料与方法

选择江苏省中医院院经MRI和关节镜手术证实的肩袖损伤的31名患者,以及21名正常对照患者为研究对象,采用飞依诺V70彩色多普勒超声诊断仪进行扫查,X6-16L探头,中心频率10 MHz,机器默认的肩关节扫查模式(二次谐波扫描模式)。患者取坐位,CRASS体位对冈上肌进行横断面及纵断面扫查,对于可疑病灶分别于长轴及短轴切面冻结图像,并选择仪器默认的20帧条件下存贮RF图像资料。

2 数据分析

2.1 数据采集

将Vinno70型B超诊断仪(VINNO Technology(Suzhou) Co. Ltd.)设置在二次谐波扫描模式,使用X6-16L型宽频带B超探头对组织进行扫描,获取原始RF数据。

超声在非均匀组织中传播时产生的二次谐波 $p_2(x)$ 与组织的非线性参量 B/A 的关系可表示为

$$p_2(x) = \frac{\pi f p_0^2}{\rho c^3} \int_0^x \beta(u) e^{-\int_0^u 2\alpha_1(v)dv - \int_u^x \alpha_2(v)dv} du \quad (1)$$

式中: $\beta(x) = 1 + 0.5 \times (\frac{B}{A})_x$, $(\frac{B}{A})_x$ 为位置 x 处的非线性参量; $\alpha_1(v)$, $\alpha_2(v)$ 分别为基频和二次谐波的衰减系数; p_0 , f 分别为基频声压和频率; ρ , c 分别为组织的密度和声速。非线性参量是声波在介质传播过程中表示非线性效应的量,它能反映生物组织的结构特征以及病变状态。结合式(1),前人已有研究工作^[11]说明二次谐波能有效保留生物组织结构特征和有效提高数据采集的信噪比,所携带信息相比

于基波质量也更高。

2.2 数据处理

对一帧图像存储的原始RF数据进行带通滤波,本实施例使用FIR带通滤波器提取RF数据中的二次谐波信号,中心频率取二次谐波的频率(10 MHz)。为了确保提取二次谐波信号并避免噪声干扰,带宽需设为中心频率的40%~60%,本实施例取中心频率的50%。

2.3 感兴趣区

由于常规B超图像中始终存在与目标病灶无关的其他组织(如血管、脂肪、肌肉或皮肤等)。本实验中将由超声科医生根据RF数据的灰度图,选取感兴趣区(Region of interest, ROI)和参考区(Reference region, RR)(图1)。同时,为了节省计算时间,将感兴趣区和参考区中每条扫描线都分成 N 个周期,针对每个周期计算RF信号的均方根(Root mean square, RMS)值。采用均方根值而非RF信号幅值进行计算,可以有效缩减原本庞大的数据量,并能够用于得到经验累计分布函数(Cumulative distribution function, CDF),从而可以直观地比较出病变区域的组织情况。在后续工作中,利用均方根值才能得到核心的 p 值与相对 p 值。因此,可以使用二次谐波的均方根值来定征肩袖损伤。

2.4 二次谐波均方根值

计算感兴趣区和参考区中每条扫描线上每 N 个周期二次谐波信号 $p_2(x)$ 的均方根值,受感兴趣区和参考区内扫描点数的限制, N 可取1,2或3,本实施例中 $N=2$,即计算每10个点的均方根值,计算的具体过程为

$$\bar{p}_2(n) = \sqrt{\frac{\sum p_2^2(x)}{Nf_s/f_2}}, \quad nN \frac{f_s}{f_2} < x \leq (n+1)N \frac{f_s}{f_2}, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中: f_s 为扫描频率, f_2 为二次谐波频率, x 为扫描线上的第 x 个点。从而获得每条扫描线上二次谐波均方根值数组。

2.5 二次谐波分布差异度

利用统计学中假设检验的 p 值,对扫描线上的二次谐波的均方根值数组进行双样本Kolmogorov-Smirnov检验。将各区域内每条扫描线上的均方根值数组与参考区的进行比较,判断各区内每条扫描线上的均方根值数组与参考区的是否同分布,得到反映感兴趣区和参考区某扫描线上二次谐波分布差异度的 p 值。具体过程为

$$D = \max_n \left\{ \left| P_{21}(n) - P_{22}(n) \right| \right\} \quad n=1, 2, \dots \quad (3)$$

$$\lambda = \left(\sqrt{M/2} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{M/2}} \right) \times D \quad (4)$$

$$p = 2 \times \sum_{j=1}^{101} (-1)^{j-1} e^{-2\lambda^2 j^2} \quad (5)$$

式中: $P_{21}(n)$ 和 $P_{22}(n)$ 分别为两条扫描线上的二次谐波均方根值数组的累积分布函数, M 为二次谐波均方根值数组长度。

2.6 相对 p 值

将感兴趣区与参考区(即组织中怀疑异常的区域与正常区域)进行比较,即按式(3)计算反映组织异常的相对 p 值。

$$p_{\text{relative}} = \frac{\overline{p_{\text{ROI}}}}{\overline{p_{\text{RR}}}} \quad (6)$$

式中: $\overline{p_{\text{ROI}}}$ 和 $\overline{p_{\text{RR}}}$ 分别为感兴趣区和参考区内扫描线的算术平均 p 值。

3 结果与分析

p 值法首先假设沿着 ROI 的扫描线上的回波信号的振幅分布与邻近正常组织的 RR 不同。图 1 分别展示了在 B 模式图像(图 1(a))中和相应的 RF 数据合成图像(图 1(b))中的典型右侧肩部冈上肌腱。RF 图像通过以下步骤构建合成(例如图 1(b)): (1) 利用超声诊断系统获取原始 RF 数据; (2) 利用带通滤波器(7.5~12.5 MHz), 从原始 RF 数据中提取出二次谐波; (3) 通过希尔伯特变换得到滤波后的二次谐波信号的包络信号; (4) 将二次谐波振幅转化成灰度值, 并以此构建 RF 灰度图像。

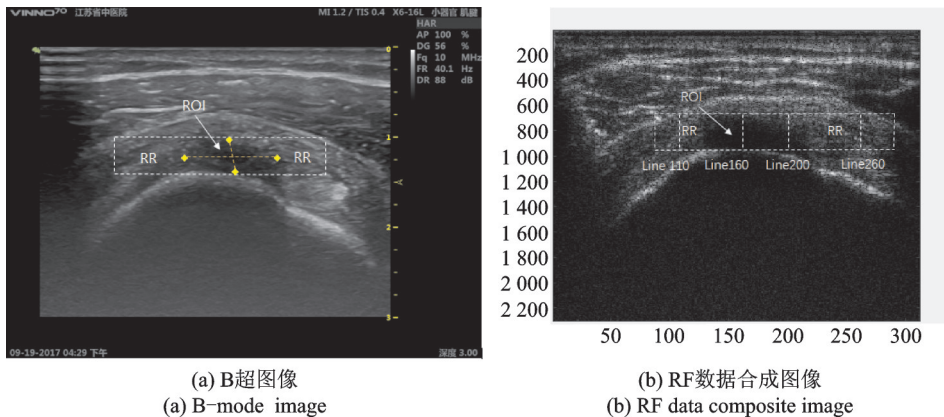


图 1 典型右侧肩部冈上肌腱的 B 超图像及 RF 数据合成图像

Fig.1 B-mode and RF images of a typical sample of the supraspinatus tendon in the right shoulder

为了显示两个区域之间的分布差异, 选取该样本的一帧 RF 数据中的 4 条不同的扫描线, 在 ROI 中选取了第 160 行和第 200 行, 在左侧 RR 中选取第 100 行, 右侧 RR 中选第 260 行。区域和线的划分在图 1 中标出, 图 1(b) 所示的 RF 图像框架的扫描总深度为 38 mm。由于声谱仪或患者的轻微运动, RF 图像的撕裂部位位置(图 1(b))可能与 B 超图像(图 1(a))略有不同。之后计算二次谐波信号 RMS(均方根值)振幅, ROI 的 RMS 通常低于 RR, 表明撕裂区具有明显的低回声结构。然后, 通过计算 RMS 各单行的 CDF 来说明 ROI 和 RR 的分布差异, 结果如图 2 所示。如果两个组的分布类似, 那么它们的 CDF 应该很接近。从图 2 可以看出, RR 中的两条线(第 110 根和第 280 根)的 CDF 是接近于彼此的, 而与 ROI 中线(第 160 根和第 200 根)的 CDF 相差甚远, 这进一步说明了所选 ROI 回波信号分布确实与相应正常组织部分不同。

为了量化这一肩部冈上肌腱的异常, 在二次谐波 RF 图像(图 1(b))中, 取所选部分每一行数据的 RMS(共 220 行), 基于双尾双样本 Kolmogorov-Smirnov(K-S)测试, 与 RR 部分的每一条数据的 RMS

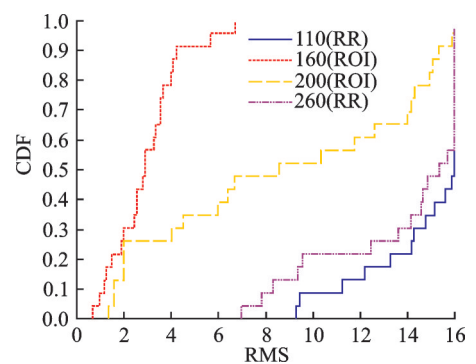


图 2 在图 1 中所选的四条线的经验累积分布函数曲线

Fig.2 Empirical CDF curve of four lines selected from Fig.1

(共 136 行)进行了比较。然后,通过对 K-S 测试给出的 p 值进行平均,可以估计出该条线的有效 p 值,同时可以用来评估其与 RR 部分的差异。其中,有效 p 值越小说明与 RR 部分的区别越大。在 RF 图像中所有扫描线的 p 值如图 3 所示。显然,ROI 部分的 p 值明显小于 RR 部分,再次表明撕裂部分与正常组织部分回波信号分布不同。这两个区域的算术平均值分别是: $\overline{p_{RR}} = 0.4553$, $\overline{p_{ROI}} = 0.0119$ 。然后对两个区域之间的 rp 值进行评估,以量化表示 ROI 的病理变化。

对共计 52 例(21 例正常,31 例损伤)病例都进行上述计算,得到每一个病例的 rp 值,并进行统计,统计结果如图 4 所示,其中“0”表示阴性,“1”表示阳性。当取 rp 值的阈值为 0.5 时,能够区分出所有的肩袖撕裂的病例,而仅有 4 例正常病例的 rp 值也小于 0.5。可得,本次实验的敏感性为 100%,特异性为 81%。由此可以说明对于诊断肩袖撕裂, p 值法是一种十分高效且准确的方法。

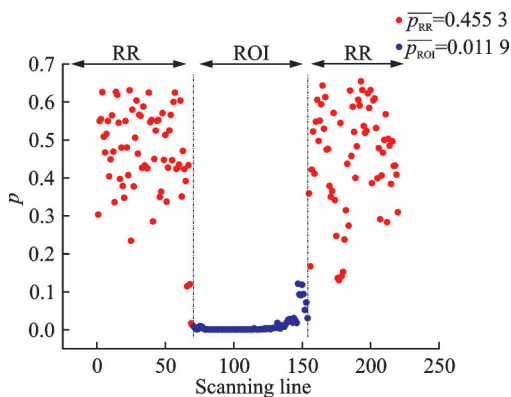


图 3 RF 图像 ROI 与 RR 区域各扫描线 p 值分布

Fig.3 p -value calculated for the scanning lines of the ROI and RR regions in the sample RF image

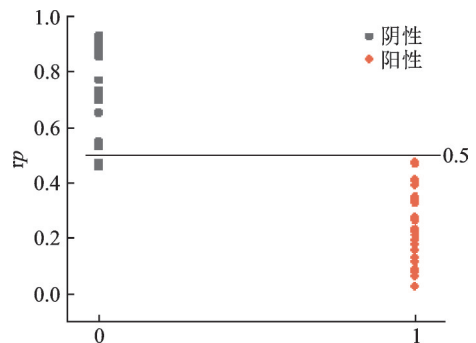


图 4 rp 值统计分布图

Fig.4 Distribution of rp -value for 52 samples

4 讨 论

本方法涉及 B 超检查和统计学中的假设检验,特别是反映生物组织特性异常的技术。更具体地说,涉及一种反映生物组织异常的参数及其测量方法。超声检查是根据人体器官组织声学性质上的差异,以波形或图像的形式显示和记录器官反射的超声波,实现发现组织异常的方法。目前使用最广的是 B 超检查。它对人体的软组织具有高分辨力、操作简单、成像快、诊断及时、非侵入性、无痛苦和无危害等优势,属于非损伤性检查。超声成像技术的广泛应用推动了利用计算机技术和信息处理技术处理和分折超声图像的研究进程。生物组织特性主要可以从形态、边界、回声、浸润表现和有无淋巴结转移等方面综合评价。

目前,主要通过 B 超诊断检查生物组织并找出感兴趣区,然后根据选择的区域进行相应处理。另一方面,基于超声成像技术的处理超声图像识别和提取组织特征的方法也在近年来得到发展,并建立了计算机辅助诊断系统。计算机辅助判别已成为国内外学术界的热点之一。这个系统包括图像采集、图像预处理、感兴趣区区域分割、特征提取并识别等步骤。从 B 超图像中提取的包括分形维数的纹理信息和形态特征等难以单独用于反映组织异常。目前具有较高准确率的方法是综合这些参数,使用人工神经网络或支持向量机作为分类器对图像进行识别。然而这个方法需要大量样本,多种特征的提取,计算复杂,同时受图像本身信息量限制。超声图像获取的是经处理的背向散射信号,只包括了散射信号的幅度信息,影响了反映组织特性的准确性。信息量的丢失,在成像过程中是不可避免的。特别

对于结构多源的复杂组织,只用图像往往难以诊断。

也有研究学者提出了利用原始 RF 信号提取组织特性的方案^[13-14],RF 信号不仅包括了幅度信息还包含有相位信息。文中提及其主要贡献的特征是由 RF 信号时间序列提取的数个特征,也同时说明了 B 超图像信息量低的结论。但是,RF 信号时间序列的采集过程中不可避免的会因医生或病人的抖动引入误差,而这种抖动,对小面积的变异来说影响也会很大。另一方面,人们开始研究组织的分布函数,通过函数中的参数反映组织异常。如 Shankar 等^[14]曾尝试根据 Nakagami 分布的统计学计算来诊断乳腺组织异常,但这种方法计算复杂,尚处于探索阶段,目前很少有研究将统计学分析方法应用于肩袖损伤的 B 超图像诊断应用中。

本方法有如下优点:(1)作为一种反映生物组织异常的参数测量方法,在二次谐波扫描模式下获取原始 RF 数据,并利用原始 RF 数据进行带通滤波和感兴趣区域划分,然后将感兴趣区和参考区内每条扫描线上得到的均方根值数组与参考区的进行比较,再计算反映组织异常的相对 p 值,相对目前仍处于探索阶段的计算组织具体分布(例如 K 分布,瑞利分布),利用分布参数反映组织异常的方法,有计算简单、通用性高的优势;(2)作为一种反映生物组织异常的参数测量方法,仅需要厂家公开原始 RF 数据,不需要额外的仪器就能得到反映组织异常的相对 p 值,相比从 B 超图像提取特征的方式,有较高的信息量^[15-17];(3)作为一种反映生物组织异常的参数测量方法,在 B 超检查中,无需医师综合多方面(形态、边界、回声等)因素概括生物组织异常,有效地解决了 B 超检查中主观性强和需要有丰富临床经验的问题,也避免了抖动引入的误差,是一种测量准确,容易实施的反映生物组织异常的参数测量方法。

5 结束语

肩袖肌腱撕裂后局部肌纤维中断、部分纤维挛缩,裂口处无回声血肿充填,超声可较清晰显示病变部位,裂口未见积液而裂口处滑囊的凹陷充填超声亦可作为肩袖撕裂的间接征象对于进行诊断,但对于肩袖撕裂后裂口内血肿机化充填或增生的低回声滑膜充填于裂口时常规超声声像图显示病变处的肌腱形态结构正常、滑囊面的弧形结构光滑,同时由于肩袖肌腱附着点处肌纤维相互交织,常规的灰阶图像难以提供足够的影像学诊断依据,这是导致肩袖肌腱损伤超声诊断假阴性的主要原因,本研究对基于超声射频流的 RF 信号的分析,发现 ROI 的 p 值明显小于 RR 的 p 值,可有效避免肌腱撕裂后血肿充填导致的假阴性,显著提高了对肩袖损伤的超声诊断正确率,具有重要的临床意义。

参考文献:

- [1] LIEM D, BUSCHMANN V E, SCHMIDT C, et al. The prevalence of rotator cuff tears: Is the contralateral shoulder at risk [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(4): 826-830.
- [2] SAMBANDAM S N, KHANNA V, GUL A. Rotator cuff tears: An evidence based approach[J]. *Mounasamy V World J Orthop*, 2015, 6(11): 902-918.
- [3] ABAJOBIR A A, ABATE K H, ABBAFATI C, et al. Measuring progress and projecting attainment on the basis of past trends of the health-related sustainable development goals in 188 countries: An analysis from the global burden of disease study 2016[J]. *Lancet*, 2017, 390(10100): 1423-1459.
- [4] COLLIN P, YOSHIDA M, DELARUE A, et al. Evaluating postoperative rotator cuff healing: Prospective comparison of MRI and ultrasound[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2015, 101(6): S265-268.
- [5] GUPTA H, ROBINSON P. Normal shoulder ultrasound: Anatomy and technique[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2015, 19(3): 203-211.
- [6] NABETANI Y, WATANABE T, Terabayashi N. Diagnostic ability of ultrasonography for the rotator cuff tear: Comparison with ultrasonography and MRI findings[J]. *Rinsho Byori*, 2014, 62(1): 31-37.
- [7] TRANQUART F, GRENIER N, EDER V, et al. Clinical use of ultrasound tissue harmonic imaging[J]. *Ultrasound in Med &*

- Biol, 1999, 25(6): 889-894.
- [8] SHAPIRO R S, WAQREICH J, PARSONS R B, et al. Tissue harmonic imaging sonography: Evaluation of image quality compared with conventional sonography[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 1998, 171(5): 1203-1206.
- [9] WARD B, BAKER A C, HUMPHREY V F. Nonlinear propagation applied to the improvement of resolution in diagnostic medical ultrasound[J]. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(1): 143-154.
- [10] ROSEN E L, SOO M S. Tissue harmonic imaging sonography of breast lesions Improved margin analysis, conspicuity, and image quality compared to conventional ultrasound[J]. *Clin Imaging*, 2001, 25(6): 379-384.
- [11] ZHANG D, GONG X F. Experimental investigation of the acoustic nonlinearity parameter tomography for excised pathological biological tissues[J]. *Ultrasound in Med & Biol*, 1999, 5(4): 593-599.
- [12] GONG X F, ZHANG D, LIU J H, et al. Study of acoustic nonlinearity parameter imaging methods in reflection mode for biological tissues[J]. *J Acoust Soc Am*, 2004, 116(3): 1819-1825.
- [13] SHANKAR P M, DUMANE V A, REID J M, et al. Classification of ultrasonic B-mode images of breast masses using Nakagami distribution[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2001, 48(2): 569-580.
- [14] SHANKAR P M. A compound scattering PDF for the ultrasonic echo envelope and its relationship to K and Nakagami distributions[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2003, 50(2): 339-343.
- [15] LIZZI F L, GREENEBAUM M, FELEPPA E J, et al. Theoretical framework for spectrum analysis in ultrasonic tissue characterization[J]. *J Acoust Soc Am*, 1983, 73(3): 1366-1373.
- [16] MORADI M, ABOLMAESUMI P, ISOTALO P A, et al. Detection of prostate cancer from RF ultrasound echo signals using fractal analysis[C]//*Proceedings of Conference IEEE Eng Med Biol Soc. [S.l.]: IEEE, 2006: 2400-2403.*
- [17] UNIYAL N, ESKANDARI H, ABOLMAESUMI P, et al. Ultrasound RF time series for classification of breast lesions[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2015, 34(2): 652-661.

作者简介:



徐大华(1979-),男,主治医师,研究方向:肌骨超声诊断与介入治疗,E-mail: dadahua1026@sina.com。



宋人杰(1993-),男,硕士研究生,研究方向:医学超声应用。



屠娟(1976-),女,教授,研究方向:非线性声学、声空化及医学超声研究,E-mail:juantu@nju.edu.cn。



章东(1969-),男,教授,通信作者,研究方向:非线性声学、声空化及医学超声研究,E-mail: dzhang-@nju.edu.cn。



何玉冰(1984-),男,主治医师,研究方向:肌骨及浅表器官超声诊断。



陆倩(1980-),女,主治医师,研究方向:肌骨及浅表器官超声诊断。

(编辑:王静)