#### ◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

# 空间频率域超声背散射参量用于骨质状况的评价\*

第五强强1 李博艺1 李 颖1 徐 峰1 刘成成2 他得安1

(1 复旦大学电子工程系 上海 200433)(2 同济大学声学研究所 上海 200092)

**摘要** 在超声背散射骨质评价中,不同测量感兴趣区域(ROI)的超声背散射信号会有波动,致使诊断准确 度降低。该文目的是研究超声背散射信号随测量区域的变化规律。采用空间扫描方法离体测量了35块骨 样本,将超声背散射参数从空间域变换到空间频率域。结果表明,超声背散射参数的主要空间频率成分 集中于低频部分;空间频率域超声背散射参量最大值(MASF)与骨矿密度等参数具有中高度显著相关性 ( $R^2 = 0.45 \sim 0.83$ , p < 0.001);空间频率域超声背散射参量衰减系数(AC)也与松质骨密度及结构特征有显 著相关性( $R^2 = 0.41 \sim 0.72$ , p < 0.001)。研究表明空间频率域变换方法有助于明确超声背散射信号随测量 ROI的变化规律,空间频率域的超声背散射相关新参量评价松质骨状况具有可行性。

关键词 松质骨,超声背散射,空间频率域

中图法分类号: TB551 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)01-0145-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.021

## Spatial frequency domain ultrasonic backscatter parameters for evaluation of bone

DIWU Qiangqiang<sup>1</sup> LI Boyi<sup>1</sup> LI Ying<sup>1</sup> XU Feng<sup>1</sup> LIU Chengcheng<sup>2</sup> TA Dean<sup>1</sup>

Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)
 (2 Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Ultrasonic backscattering signals changed with the different regions of interest (ROI) in ultrasonic backscattering bone evaluation, resulting in the decrease of diagnostic accuracy. The purpose of this paper is to study the variation of ultrasonic backscatter signals with the ROI changes. 35 cancellous bone specimens were measured in vitro by spatial scanning measurement. Ultrasonic backscattering parameters were transformed from the spatial domain to the spatial frequency domain. The results show that the main spatial frequency components of ultrasonic backscattering parameters were concentrated in the low frequency part. The maximum magnitude of ultrasonic backscattering parameters in spatial frequency domain (MASF) had highly significant correlation with bone mineral density and other parameters ( $R^2 = 0.45 \sim 0.83$ , p < 0.001). The attenuation coefficients of ultrasonic backscattering parameters in spatial frequency domain (AC) were also significantly related to the cancellous bone density and structure parameters ( $R^2 = 0.41 \sim 0.72$ , p < 0.001). This article shows that the method of spatial frequency domain transformation is helpful for clarifying the variation of ultrasonic backscatter signals with the ROI changes. The new parameters obtained by ultrasonic backscattering in spatial frequency bone.

Key words Cancellous bone, Ultrasonic backscattering, Spatial frequency domain

<sup>2017-11-22</sup> 收稿; 2017-12-18 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(11525416, 11504057, 11604054)。

作者简介: 第五强强 (1994-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向: 医学超声工程。

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通讯作者 E-mail: tda@fudan.edu.cn

## 1 引言

定量超声技术用于评价骨质健康状况已有多 年研究。测量松质骨的方法主要是超声透射法和超 声背散射法[1]。超声透射法同时使用两个超声换能 器进行测量,分别进行超声激励信号的发射和透射 信号的接收,使用超声信号在松质骨内传播的衰减 和声速对骨质密度等信息进行评估<sup>[2]</sup>。超声背散射 法使用一个收发一体的超声换能器,其测量原理基 于骨小梁单元对超声信号的散射作用。测得的超声 背散射信号使用信号处理方法计算得到背散射参 数,可以反映测量对象的骨质健康状况<sup>[3]</sup>。在目前 的超声背散射在体测量中,测量位置通常为人体的 跟骨,主要因为人体跟骨松质骨丰富,跟骨表面相对 平坦,附着的软组织较薄,骨小梁的排列方向多为承 重方向<sup>[4]</sup>。然而在实际测量中,同一跟骨的不同感 兴趣区域(ROI),测量信号以及背散射参数有一定 差异<sup>[5]</sup>。研究超声背散射信号随测量ROI的变化规 律,有助于提高超声背散射的测量稳定性和准确度。

早期的超声背散射离体测量及在体测量中, 由于实验条件的限制多采用单点测量或者多点 测量取平均值的做法。韩海杰等[6]对1087例跟骨 进行单点多次测量,将计算得到的表观积分背 散射系数(AIB)与腰椎和髋骨骨矿密度(BMD)进 行相关性分析,发现AIB与BMD有一定相关性  $(R^2 = 0.34 \sim 0.41, p < 0.05)$ 。Malo等<sup>[7]</sup>以16个 完整的人体股骨近段作为超声背散射离体实验对 象,每个样本取10点进行多次测量,测得的AIB与 BMD 显著相关 ( $R^2 = 0.44$ , p < 0.01)。Jiang 等<sup>[8]</sup> 对1011 例病人的跟骨区域进行单点多次测量,中心 频率分别选择3.5 MHz和5 MHz,测得的AIB和频 谱质心偏移(SCS)与病人的腰椎和股骨颈BMD均 具有较强的相关性 ( $R^2 = 0.30 \sim 0.56$ , p < 0.05)。 由于松质骨为多孔结构且结构复杂无规律,选择不 同的测量区域得到的超声背散射信号会有较大差 异,计算得到的超声背散射参数也会发生变化。因 而在上述早期的研究结果中,多次测量得到的背散 射参数变化范围较大,导致与骨参数之间的相关性 较低。根据Wear<sup>[9]</sup>于2008年的超声背散射研究综 述,离体实验中超声背散射参数与BMD具有一定 的相关性且实验结果差异较大 ( $R^2 = 0.37 \sim 0.68$ ), 测量结果受超声中心频率和骨各向异性的影响。空

间扫描与平均的做法用于提高超声背散射离体实验的测量准确度,即在被测对象的同一个面上均匀选取多个位置进行测量,将得到的超声背散射信号在频域上取平均值,再计算相应的背散射参数。研究结果表明,空间平均处理后得到的背散射参数相比单点测量的结果稳定性更高,并且与骨参数之间的相关性有所提升<sup>[10]</sup>。空间平均在超声背散射测量中被广泛应用并且其有效性多次得到了验证<sup>[11]</sup>。

目前的研究中,没有明确超声背散射参数随测 量区域的变化规律,以及松质骨测量区域选择对背 散射参数的影响。明确超声背散射信号随测量区域 的变化规律,有助于提高超声背散射方法在体测量 的测量稳定性和准确度。本文开展离体实验,采用 空间扫描方法测量了35块松质骨样本不同ROI的 超声背散射信号,经过空间域傅里叶变换,将超声背 散射参数从空间域变换到空间频率域。研究超声背 散射参数在空间频率域的变化规律,提出新的参数 描述了空间频率域的变换结果,分析空间频率域新 参数评价骨质状况的可行性。

#### 2 材料和方法

#### 2.1 松质骨样本

本文采用35块松质骨样本进行离体实验,这 些样本取自牛股骨末端,根据骨的承重方向使用手 锯切割成表面平整的长方体 (约 20 mm × 20 mm × 15 mm)。在去除了皮质骨和软组织之后,使用三 氯乙烯浸泡两周以去除油脂。骨样本的密度信息和 微结构参数如表1所示,表1中列出的骨参数依次 为:骨矿密度(BMD),表观密度(BAD),骨体积分 数(BV/TV),骨面积体积比(BS/BV),骨面积与总 体积之比(BS/TV),骨小梁数量(Tb.N),骨小梁间 距(Tb.Sp),结构模型指数(SMI)。其中,BMD通过 双能X射线(Hologic DXA, Hologic Inc. Waltham, MA, USA) 测得。BAD 为松质骨样本的质量与表观 体积之比;采用高精度电子秤(精度0.01g)测量晾 干后的骨样本质量,使用游标卡尺(精度0.01 mm) 测得骨样本的外观尺寸(即长、宽、高),计算出 骨样本的"表观体积"("表观"指长方体状骨样本 的外观体积,而非骨小梁的实际体积),即可得到 BAD。表1中列出的其余骨参数由Micro-CT(Skyscan1076, Skyscan, Antwerp, Belgium) 扫描得到, 扫描空间分辨率为18 µm。

表1 骨样本的密度参数和微结构参数测量结果 Table 1 The measurement of bone density and microstructure

骨样本参数	均值	标准差	最小值	最大值
$BMD/(g \cdot cm^{-3})$	0.24	0.08	0.12	0.46
$BAD/(g \cdot cm^{-3})$	0.56	0.24	0.23	1.21
$(\mathrm{BV/TV})/\%$	28.21	10.17	12.80	55.70
$(BS/BV)/mm^{-1}$	16.36	3.90	9.51	25.98
$(BS/TV)/mm^{-1}$	4.35	1.13	2.33	6.73
${\rm Tb.N/mm^{-1}}$	1.32	0.38	0.66	2.14
Tb.Sp/mm	0.60	0.16	0.32	0.95
SMI	0.70	0.81	-2.77	1.77

#### 2.2 超声背散射实验

超声换能器(V305, Olympus-Panametrics Inc., MA, USA)选择中心频率为2.25 MHz的聚 焦探头, 焦距为2.54 cm。超声信号在水中传播时, 在水与骨样本的交界面会因为较大的声阻抗差异 而产生较强的反射<sup>[12]</sup>。为了避免骨样本间隙中的 气泡对超声背散射信号产生干扰, 因此在超声背散 射实验之前, 需使用气泵对浸没在水中的骨样本进 行多次真空抽气, 排出松质骨样本间隙中的气泡。 用于进行超声背散射离体实验的水槽中的水也经 过排气处理。实验时的环境温度和水温均为23 ℃。

图1为超声背散射离体实验的系统框图。超声 换能器在脉冲-回波模式工作,超声激励信号由实验 室自主研发的骨超声实验平台产生,采用三维移动



图1 超声背散射实验系统框图

Fig. 1 The block diagram of ultrasonic backscattering experiment

控制系统(Ultrapac scanning, PK268-03B, NJ, USA)控制超声换能器的移动。背向散射回的超声信号由超声换能器接收,骨超声实验平台对信号进行实时存储和显示。

在测量过程中, 松质骨样本中心位置到超 声换能器的距离为2.54 cm, 聚焦区域的直径为 0.96 mm。由三维移动控制系统移动超声换能器, 对 骨样本的冠状面、横断面和矢状面分别进行扫描, 扫描区域的大小为10 mm × 10 mm, 扫描步长为 0.5 mm, 均匀取点进行测量, 每个骨样本的每个面 上测得400个信号。参考信号由表面光滑的钢板测 得。图2为骨超声实验平台实物图。



图 2 骨超声实验平台 Fig. 2 The ultrasonic experiment platform

#### 2.3 超声背散射信号处理

图3是一个典型的超声背散射信号时域波形。 以第一个到达信号幅值8%的点作为信号的起始位 置,为去除超声信号在水与骨样本界面处产生的强 反射,从起始位置开始剔除时间长度为*T*<sub>1</sub>的信号, 从剔除信号的末尾开始选取时间长度为*T*<sub>2</sub>的信号, 作为超声背散射的有效信号。有效信号的选取对超 声背散射参数的计算有较大的影响,为找到最优的



图3 超声背散射信号示例

Fig. 3 A typical example of ultrasonic backscattering signal

有效信号选择结果,本文采用的做法是取多组*T*<sub>1</sub>、 *T*<sub>2</sub>,对每一组的有效信号均进行超声背散射信号处 理,并将超声背散射参数与骨密度等参数进行相关 性分析,取相关性较高的结果作为有效信号区间选 取的最优结果<sup>[13]</sup>。

表2为有效信号的最优区间选取标准。每个骨 样本的每个面在同一个最优选取标准下得到400个 有效信号,应用超声背散射信号处理方法计算超声 背散射参数,包括AIB,SCS<sup>[14-15]</sup>,表观背散射频域 斜率(FSAB),表观背散射频域截距(FIAB)<sup>[16-17]</sup>。 每个样本的每个面计算得到的400组背散射参数与 松质骨样本的测量区域一一对应,35块样本的3个 面上都得到了背散射参数空间分布结果。

表 2 背散射参数的有效信号最优选取标准 Table 2 The optimal selection of SOI

背散射参数	有效信号最优选取标准		
	$T_1/\mu \mathrm{s}$	$T_2/\mu s$	
AIB	2	7	
SCS	2	2.5	
FSAB	1.5	6	
FIAB	3.5	3	

为研究背散射参数在空间中的变化规律,使用 傅里叶变换将背散射参数从空间域映射到空间频 率域。在超声背散射离体实验中,骨样本每个扫描 区域内有400个测量点,在空间中的排列方式为20 行20列,相邻测量点的间距为0.5 mm。每个扫描 区域的变换和参数计算如图4所示,取其中一行或 一列的20点背散射参数空间序列,前后分别补零22 点并使用 Hanning 窗进行截取以降低窗函数旁瓣 的影响,之后进行一维傅里叶变换得到64点长度的 空间频率域变换结果。对20行20列进行同样的计 算并对计算结果求取平均,作为扫描区域的平均空 间频率域变换结果。35块骨样本的3个扫描区域均 进行同样的处理。

用空间频率域的幅值最大值 (MASF) 描述空 间频率域的主要频率成分幅值大小,另外将变 换结果的包络进行指数拟合,拟合函数的表达 式为 $f(x) = k \cdot \exp(\alpha x) + A$ ,将 $\alpha$ 记为衰减系 数 (AC),用于描述空间频率域幅值随空间频率 的衰减速率,α一般为负值。对每个样本三个扫 描区域得到的MASF和AC取平均,并将平均后 的结果与骨样本的密度和结构参数进行相关性 分析。



图4 空间频率域变换流程图

Fig. 4 The flow diagram of spatial frequency domain transformation

#### 3 实验结果

将背散射参数从空间域映射到空间频率域,并 对20行20列的结果进行平均。对于35块牛骨样本 的三个扫描区域的测量结果进行同样的变换和计 算,得到了背散射参数的空间频率域变换结果。图5 为三个不同骨体积分数的骨样本矢状面扫描区域 的背散射参数空间频率域变换结果。

AIB与SCS的变换结果趋势相似,空间频率 域的最大幅值多取在0m<sup>-1</sup>处,随后迅速衰减;在 150m<sup>-1</sup>和250m<sup>-1</sup>等空间频率处出现极大值,极 大值的大小随空间频率增加而减小,曲线的包络为 衰减趋势;当空间频率大于600m<sup>-1</sup>后,曲线变化缓 慢,趋于定值。FSAB和FIAB的变换结果同样随空 间频率增加呈衰减趋势,空间频率域幅值在空间频 率大于600m<sup>-1</sup>之后仍有较大波动。对比不同骨体 积分数骨样本的变换结果,骨体积分数较大的样本 对应的最大幅值高于其他样本的结果,曲线的衰减 速率较快;当空间频率大于400m<sup>-1</sup>后,骨样本的变 换结果较为接近,衰减趋势变缓。

使用 MASF 和 AC 描述不同骨样本空间频率域 变换结果的差异,与骨的密度和微结构参数进行相 关性分析。表3和表4分别给出 MASF 和 AC 与骨 参数之间的相关性结果。





Fig. 5 The magnitude of transformed backscattering parameters in spatial frequency domain

#### 表3 MASF 与骨参数之间的相关系数

Table 3 The correlation coefficients betweenMASF and bone features

相关系数 -	MASF				
	AIB	SCS	FSAB	FIAB	
BMD	0.80**	0.89**	0.87**	0.67**	
BAD	0.82**	0.91**	0.91**	0.68**	
$\mathrm{BV}/\mathrm{TV}$	0.79**	0.88**	0.86**	0.66**	
BS/BV	$-0.48^{*}$	$-0.74^{**}$	$-0.65^{**}$	$-0.39^{*}$	
BS/TV	0.68**	0.63**	0.64**	0.59**	
Tb.N	0.71**	0.67**	0.69**	$0.61^{**}$	
$\mathrm{Tb.Sp}$	$-0.64^{**}$	$-0.60^{**}$	$-0.61^{**}$	$-0.55^{**}$	
SMI	$-0.50^{*}$	$-0.55^{**}$	$-0.53^{*}$	$-0.40^{*}$	

注:\*: p < 0.05, \*\*: p < 0.001。

表4 衰减系数与骨参数之间的相关系数

Table 4The correlation coefficients be-tween AC and bone features

相关系粉	衰减系数 (AC)			
伯大尔奴	AIB	SCS	FSAB	FIAB
BMD	$-0.82^{**}$	$-0.84^{**}$	$-0.77^{**}$	$-0.64^{**}$
BAD	$-0.85^{**}$	$-0.84^{**}$	$-0.79^{**}$	$-0.67^{**}$
$\mathrm{BV/TV}$	$-0.81^{**}$	$-0.82^{**}$	$-0.75^{**}$	$-0.65^{**}$
BS/BV	0.43*	0.79**	0.63**	n.s.
BS/TV	$-0.71^{**}$	$-0.52^{*}$	$-0.58^{**}$	$-0.55^{**}$
Tb.N	$-0.76^{**}$	$-0.57^{**}$	$-0.61^{**}$	$-0.60^{**}$
Tb.Sp	0.69**	$0.49^{*}$	0.54**	0.55**
$\mathbf{SMI}$	$0.56^{**}$	0.54**	0.42*	0.43*

注:\*:p < 0.05,\*\*: p < 0.001, n.s.: 无显著相关性。

MASF 与骨的密度和结构参数均有一定的 相关性,和BMD、BAD等密度参数相关性较高  $(R^2 = 0.45 \sim 0.83, p < 0.001); 由 AIB、SCS、FSAB$ 得到的MASF 与骨参数之间的相关性更高,与骨密 度参数之间的相关性结果高于骨微结构参数。

AC与BMD、BAD等骨的密度参数高度相关, 与骨微结构参数如SMI相关性较为微弱。AIB和 SCS计算得到的AC与骨参数具有更高的相关性, AC与骨参数之间的相关性结果略低于MASF。总 体来看, MASF和AC与骨的密度和微结构参数多 具有较高的相关性,说明MASF和AC可以反映骨 的密度和微结构信息。

#### 4 讨论

背散射参数在空间频率域的变换结果可以得 到背散射参数在空间中变化的主要频率成分,反映 背散射参数在空间中的变化规律。AIB 和 SCS 变换 后的曲线较为相似,空间频率域频谱在空间频率为 0 m<sup>-1</sup> 处取得最大值,之后迅速衰减,随后有第二个 极大值点,以此规律重复,极大值逐渐减小,曲线趋 于定值。FSAB和FIAB的变换结果样本间差异较 大,衰减趋势与前者类似。背散射参数的主要空间 频率成分集中在低频部分,说明参数在空间中的变 化较为缓慢,考虑到离体实验中的骨样本直径多为 数十毫米,因而在同一个骨样本的同一个面上选择 不同区域进行测量,计算得到的背散射参数相对变 化率在可接受的测量误差范围内。假如采用单点多 次测量的方法,测量误差不可忽略,实验结果会受 到较大影响,背散射参数与骨的参数之间相关性较 低[7]。

空间平均使用均值替代单点测量的结果,有 效减少了测量误差,提升了测量准确度和稳定 性<sup>[10]</sup>。从空间频率域的角度进行分析,背散射参 数在空间中的变化较为缓慢。本文中的相邻测量 点间隔为0.5 mm,对应到空间中其采样频率为 2000 m<sup>-1</sup>,而背散射参数在空间频率域的-6 dB带 宽在 0~200 m<sup>-1</sup>之内,可以认为测量过程无失真地 得到了背散射参数的主要空间频率信息。因而空间 平均的做法可以一定程度上减少测量区域选择对 实验结果的影响。

使用MASF和AC对背散射参数变换后的结果 进行描述,新参数与骨的密度和微结构参数之间 多具有较强的相关性。MASF 是空间频率域的最大 幅值,其物理意义是背散射参数主要空间频率成分 的幅值大小。MASF表征了骨样本测量区域内的超 声背散射参数主要空间频率成分大小,由所有测量 ROI 的结果共同决定:相比较于单点多次重复测量 的结果, MASF 受到测量 ROI 选择的影响较小, 更 能反映骨样本测量区域整体的骨质健康程度,因而 MASF与骨样本的密度和结构参数具有更高的相 关性结果。衰减系数AC描述了空间频率幅值的衰 减快慢,表征了背散射参数的空间频率成分在低频 部分的集中程度,绝对值较大的衰减系数意味着测 量区域内的背散射参数变化更为缓慢。骨密度更大 的骨样本,其在测量区域内的局部差异更小,测得的 背散射参数相对变化率更小,说明背散射参数的主 要空间频率成分更集中在低频部分,对应的衰减系 数绝对值更大。衰减系数为负值,因而与骨的密度 参数为负相关性。MASF和AC由骨样本扫描区域 内的所有ROI测量结果共同决定,相比于单点测量 得到的原始参数 AIB 等, 新参数受测量 ROI 选择的 影响较小,具有更好的鲁棒性,在超声背散射的应用 中可以提高测量的稳定性和准确度。与空间平均的 做法相比,空间频率域的变换方法指出超声背散射 参数的主要空间频率成份集中在低频部分;在之后 的超声背散射测量中可以根据背散射参数在空间 频率域的-6dB带宽选择合适的相邻测量点间隔, 减少扫描区域内的测量点数。因此空间频率域的变 换方法具有减少超声背散射测量复杂程度的潜力。

空间平均是目前超声背散射离体实验中常用的用于提高测量准确度、削弱测量ROI选择对背散射信号影响的做法。空间频率域变换的方法从空间频率域的角度解释了空间平均可以提高测量稳定性的原因,并且明确了超声背散射信号随测量ROI变化的规律;提出的新参数与骨的密度和结构参数具有较高的相关性,可以用于松质骨的骨质健康状况评价。

### 5 结论

本文以35块松质骨样本为实验材料,进行超声 背散射离体实验。根据背散射信号处理方法得到了 不同测量ROI对应的背散射参数,通过分析空间频 率域的背散射参数空间频率成分,明确了超声背散 射信号在空间中的变化规律,并提出MASF和AC 两个新参数进行描述。实验结果表明,新参数与骨的密度和微结构参数具有较高的相关性,可以用于 骨质健康状况的评价。另外空间频率域变换的方法 揭示了超声背散射参数随测量ROI选择的变化规 律,对超声背散射方法的在体应用有一定参考意义。

#### 参考文献

- Chaffai S, Peyrin F, Nuzzo S, et al. Ultrasonic characterization of human cancellous bone using transmission and backscatter measurements: relationships to density and microstructure[J]. Bone, 2002, 30(1): 229–237.
- [2] 刘庆凯, 万柏坤, 朱欣, 等. 超声定量诊断骨质疏松症的方法研究 [J]. 应用声学, 2001, 20(2): 27–30, 6.
  Liu Qingkai, Wan Baikun, Zhu Xin, et al. A method of diagnosis of osteopososis by quantitative ultrasound[J]. Journal of Applied Acoustics, 2001, 20(2): 27–30, 6.
- [3] 他得安, 王威琪. 超声背散射法评价松质骨状况的研究 [J]. 应 用声学, 2013, 32(3): 199–204.
  Ta Dean, Wang Weiqi. Assessment of cancellous bone based on ultrasonic backscatter method[J]. Journal of Applied Acoustics, 2013, 32(3): 199–204.
- [4] 黄凯, 他得安, 王威琪. 骨小梁中超声背散射信号的频率分析 及其微结构的估计 [J]. 应用声学, 2009, 28(4): 308-313. Huang Kai, Ta Dean, Wang Weiqi. Analyzing the frequency dependence of ultrasonic backscatter in trabecular bone to estimate its microstructure[J]. Journal of Applied Acoustics, 2009, 28(4): 308-313.
- [5] Karjalainen J P, Riekkinen O, Töyräs J, et al. Multi-site bone ultrasound measurements in elderly women with and without previous hip fractures[J]. Osteoporosis International, 2012, 23(4): 1287–1295.
- [6] 韩海杰,王文斌,许凯亮,等. 超声表观积分背散射系数与骨 矿密度的相关性分析 [J]. 声学技术, 2013, 32(1): 29–32. Han Haijie, Wang Wenbin, Xu Kailiang, et al. Correlation analysis between ultrasonic apparent integral backscatter coefficient and bone mineral density[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(1): 29–32.
- [7] Malo M K H, Töyräs J, Karjalainen J P, et al. Ultrasound backscatter measurements of intact human proximal femurs—Relationships of ultrasound parameters with tis-

sue structure and mineral density[J]. Bone, 2014, 64(64): 240–245.

- [8] Jiang Y, Liu C, Li R, et al. Analysis of apparent integrated backscatter coefficient and backscattered spectral centroid shift in calcaneus in vivo for the ultrasonic evaluation of osteoporosis[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2014, 40(6): 1307–1317.
- [9] Wear K A. Ultrasonic scattering from cancellous bone: a review[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(7): 1432–1441.
- [10] Hoffmeister B K. Frequency dependence of apparent ultrasonic backscatter from human cancellous bone[J]. Physics in Medicine and Biology, 2011, 56(3): 667–683.
- [11] Hoffmeister B K, Spinolo P L, Huber M T, et al. Ultrasonic backscatter difference measurements of cancellous bone: relationships with microstructure and bone mineral density[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(4): 3081–3081.
- [12] Liu C, Ta D, Fujita F, et al. The relationship between ultrasonic backscatter and trabecular anisotropic microstructure in cancellous bone[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(6): 064906.
- [13] Liu C, Tang T, Xu F, et al. Signal of interest selection standard for ultrasonic backscatter in cancellous bone evaluation[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2015, 41(10): 2714–2721.
- [14] Tang T, Liu C, Xu F, et al. Correlation between the combination of apparent integrated backscatter-spectral centroid shift and bone mineral density[J]. Journal of Medical Ultrasonics, 2016, 43(2): 167–173.
- [15] 王文斌,郭佳林,他得安,等. 超声表观积分背散射系数评价新生儿骨状况的可行性研究[J]. 声学学报, 2012, 37(2): 177-180.

Wang Wenbin, Guo Jialin, Ta Dean, et al. Feasibility of assessing neonate bone status by using ultrasonic apparent integrated backscatter parameter[J]. Acta Acustica, 2012, 37(2): 177–180.

- [16] Liu C, Zhang R, Li Y, et al. An ultrasonic backscatter instrument for cancellous bone evaluation in neonates[J]. Engineering, 2015, 1(3): 336–343.
- [17] Hoffmeister B K, Wilson A R, Gilbert M J, et al. A backscatter difference technique for ultrasonic bone assessment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(6): 4069–4076.