

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*

王文斌¹ 郭佳林² 他得安^{1†} 左汉锋³

(1 复旦大学电子工程系 上海 200433)

(2 同济大学附属第一妇婴保健院 上海 200126)

(3 山东省产品质量监督检验研究院 济南 250103)

2011 年 3 月 30 日收到

2011 年 6 月 9 日定稿

摘要 新生儿骨发育状况的超声评价有重要意义。本文研究用超声背散射信号来评价新生儿骨发育状况的可行性。提出将超声表观积分背散射系数 (AIB) 用于评价新生儿松质骨状况, 研究了不同超声频率下 AIB 与婴儿体重、出生天数之间的关系。研究表明, 足月儿的 AIB 明显大于早产儿的 AIB; 足月儿的体重和 AIB 相关性较弱; 早产儿的 AIB 参数和出生天数具有较高的正相关性 ($R = 0.633$)。说明超声背散射信号及其参数 AIB 可用于评价新生儿松质骨发育状况。

PACS 数: 43.35, 43.40, 43.80

Feasibility of assessing neonate bone status by using ultrasonic apparent integrated backscatter parameter

WANG Wenbin¹ GUO Jialin² TA Dean¹ ZUO Hanfeng³

(1 Department of Electronic Engineering, Fudan University Shanghai 200433)

(2 First Maternity and Infant Health Hospital Affiliated to Tongji University Shanghai 200126)

(3 Shandong Supervision and Inspection Institute for Product Quality Jinan 250103)

Received Mar. 30, 2011

Revised Jun. 9, 2011

Abstract Using ultrasound to evaluate the bone development of neonates is very important. The feasibility of evaluating the bone development was studied in this paper by using ultrasonic backscatter signal. Ultrasonic apparent integrated backscatter (AIB) coefficient was introduced to assess the cancellous bone status of the neonates. The correlations between AIB and weight, AIB and birth days of the neonates in different ultrasonic frequency were studied. The results showed that AIB of the term infants is apparently higher than that of premature infants and it has little correlation with the weight; while the AIB of the premature infants was highly correlated with the birth days ($R = 0.633$). Therefore, using ultrasonic backscatter signal and AIB coefficient has the potential to evaluate the cancellous bone development of the neonates.

引言

儿童时期的峰值骨量增加 10%, 会使成年人骨质疏松症骨折的危险性降低 50%^[1]。因此, 生长发育

期的儿童获得理想的骨骼发育状态, 是骨质疏松症研究和防治的重要领域^[2]。有研究也表明, 胎儿期和新生儿时期的骨营养决定了人体骨骼的整个生长发育过程^[3-4], 因此新生儿时期评价骨的发育状况显得尤为重要。然而, 传统的 X 射线技术由于其较大

* 上海市重点科技攻关项目 (09441900400)、国家自然科学基金 (30870720)、教育部博士点基金 (20090071110066) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-10-0349)。

† 通讯作者: 他得安, Email: tda@fudan.edu.cn

的电离辐射对于新生儿这一特殊群体很不适用, 导致新生儿早期的骨质状况检查无法全面开展。

近年来, 超声技术在评价骨质状况方面受到广泛重视, 并且取得了较大的进展^[5-13], 与双能 X 射线 (DEXA) 等技术相比, 超声技术具有无电离辐射, 费用低, 操作简便, 携带方便等优点。与基于超声透射法来获得超声传播速度、宽带衰减系数等参数相比, 基于超声背散射法得到的参数不仅能够提供骨矿密度的信息, 同时也能提供松质骨在微结构方面的变化信息^[5-7]。另外由于基于超声背散射法的测量只需要一个探头, 因此其在成本控制和测量位置方面都具有更大的优势。

Hakulinen 等^[10] 研究表明, 对于人体松质骨, 在一定频率范围内, 超声背散射系数与骨的机械参数和微结构参数 (骨小梁厚度和骨小梁间距) 都有较强的统计相关性。而相比于其他常用的经衰减补偿后的超声背散射系数, Hoffmeister 等^[11] 建议使用表观 (没有对衰减进行补偿) 积分背散射系数 (AIB) 作为定征松质骨状况的背散射参数, 因为它更容易实现对体样本的 AIB 测量。黄凯等^[12] 采用 10.0 MHz 的换能器, 研究了 AIB 与松质骨微结构参数的相关性。研究表明, AIB 与骨小梁厚度成很强的正相关 ($r = 0.898, p < 0.05$), 与骨小梁间距成很强的负相关 ($r = -0.916, p < 0.05$)。

本文的原创性在于提出用超声背散射信号的表观积分背散射系数 (AIB) 来研究新生儿松质骨状况。采集了 100 例婴儿的松质骨超声背散射信号, 计算并分析早产儿和足月儿、不同发射频率以及时间、体重等各方面因素情况下该参数的变化情况, 希望得到对超声评价新生儿松质骨发育有意义的结果。

1 参数计算方法

在超声背散射法中, 超声背散射系数 (BSC) 是衡量背散射能量的一个重要参数, 它有助于定征松质骨强度, 并可用于诊断骨质疏松。它的具体定义是: 在与入射声波成 180° 方向上的单位体积和单位立体的微分散射截面能量, 其具体计算公式如下^[6]:

$$BSC(f) = 8.68 \ln \left(\frac{\langle S_s(f) \rangle}{S_r(f)} C_{au}(f) F(f) \right),$$

其中, f 是发射信号频率, $\langle S_s(f) \rangle$ 是松质骨背散射信号的空间平均幅度谱, $S_r(f)$ 是参考信号的幅度谱, $F(f)$ 是对汉明窗、声速宽度、形状等的补偿项, $C_{au}(f)$ 是对声衰减的补偿项。表观超声背散射系数 (BC) 不考虑这些补偿项的计算, 因此可以简化

为下面的形式^[14]:

$$BC(f) = 8.68 \ln \left(\frac{\langle S_s(f) \rangle}{S_r(f)} \right),$$

所有获取的超声背散射信号, 选择从发射波形后 3 mm 处开始计算以去除新生儿脂肪及皮质骨厚度的影响, 然后取时间宽度为 $2.5 \mu\text{s}$ 的一段回波, 乘以汉明窗, 求得其功率幅度谱。

表观积分背散射系数 (AIB) 是表观背散射系数 (BC) 在 -3 dB 频率范围内的平均值, 其计算公式如下^[12]:

$$AIB = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} BC(f) df,$$

其中 f_{\min} 和 f_{\max} 分别是探头带宽的最小值和最大值。

2 实验测量

超声背散射信号的实验测量系统如图 1 所示, 主要包括 5900PR 型超声分析仪; H54642A 数字型示波器; 收发两用纵波宽带直探头 (Panametrics), 中心频率 / 带宽分别为: $3.5 \text{ MHz} / (1.43 \sim 5.05 \text{ MHz})$ 和 $5.0 \text{ MHz} / 2.62 \text{ MHz} \sim 6.32 \text{ MHz}$ 。

利用上述系统得到 100 例新生儿 (其中 79 例足月儿, 男性 42 例, 女性 37 例; 21 例早产儿, 男性 11 例, 女性 10 例) 的超声背散射信号, 79 例足月儿的平均体重为: $3286.8 \text{ g} \pm 418.4 \text{ g}$, 出生天数均为生后 1 天; 21 例早产儿的平均体重为: $1633.3 \text{ g} \pm 307.1 \text{ g}$, 平均出生天数为: 16.8 ± 8.7 天。采集方法如下: 首先把超声耦合剂均匀涂抹在新生儿左脚后跟部位, 然后把超声探头固定在脚后跟处并进行采集。参考信号是用同一换能器从放置在水槽中探头焦距处的抛光钢板的反射超声信号。所有信号经过超声换能器接收后, 经超声分析仪放大、滤波后, 送往示波器进行显示, 然后再经 IEEE488 接口总线由计算机进行采集和分析处理 (分析软件为 MATLAB2010)。采样频率均为 40 MHz, 用 256 点进行平均以抑制噪声。

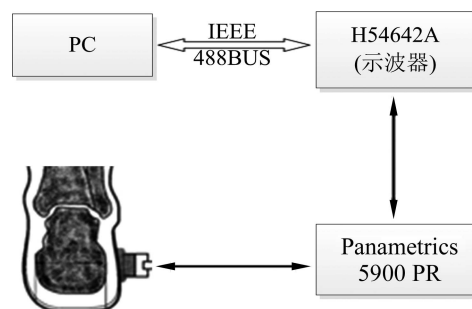


图 1 实验测量系统框图

3 结果与讨论

将实验中得到的所有信号经过上述的截取、加窗处理后计算 AIB。在中心频率 3.5 MHz 和 5.0 MHz 下早产儿和足月儿 AIB 的均值及其标准差，如表 1 所示。

表 1 3.5 MHz 和 5.0 MHz 下 AIB 的均值和标准差

	早产儿 (n = 21)	足月儿 (n = 79)
3.5 MHz	-4.62 ± 1.52	-1.31 ± 1.36
5.0 MHz	-5.07 ± 2.27	-1.23 ± 0.98

图 2 表示不同频率下足月儿和早产儿的表观积分背散射系数 (AIB)，其中图 2(a) 表示 3.5 MHz，图 2(b) 表示 5.0 MHz 的情况。图 2 中叉点代表足月儿的 AIB，圆点代表早产儿的 AIB；横坐标表示样本数，纵坐标表示 AIB。

从图 2 中可以看出，早产儿和足月儿 AIB 的差别比较明显。足月儿的 AIB 明显大于早产儿的 AIB，说明足月儿的骨质状况要好于早产儿。从两图中还可看出，5.0 MHz 时足月儿和早产儿 AIB 的区分误差明显小于 3.5 MHz。

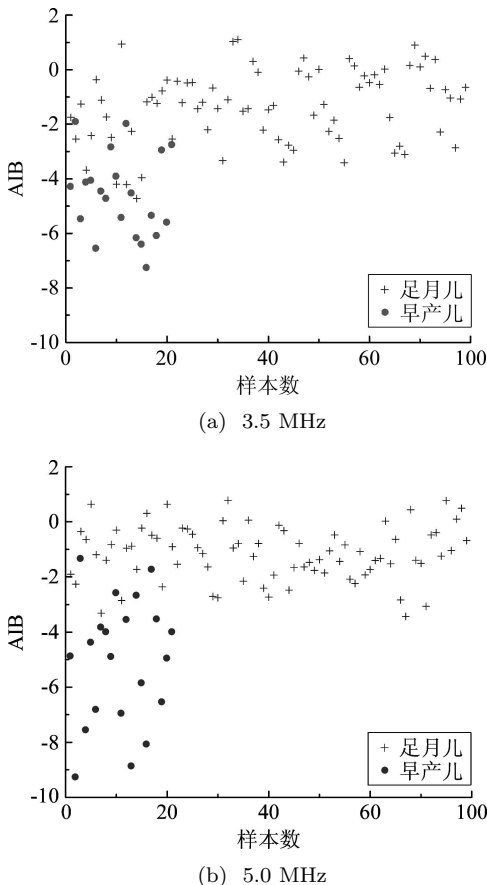


图 2 不同频率下足月儿和早产儿的表观积分背散射系数 (AIB)

图 3 显示了在不同频率下早产儿和足月儿 AIB 均值柱状图，从图中可以看出，无论是 3.5 MHz 还是 5 MHz 的发射频率，早产儿的 AIB 均小于足月儿，这是因为早产儿相比足月儿来说，由于提前分娩，错过了在子宫里最后阶段的骨骼增长期，从母体获得的维生素 D 和钙、磷、锌等矿物质先天不足，致使出生时骨质强度和密度的不足^[3]，从而对超声的背向散射作用也较弱，因此 AIB 系数较小。

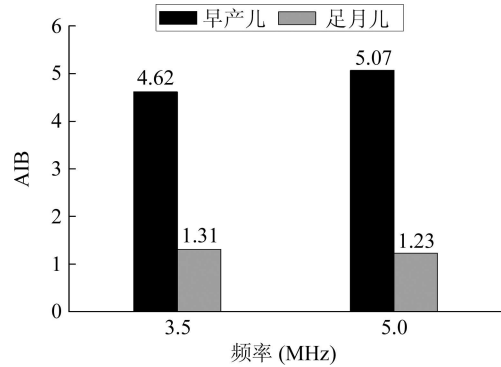
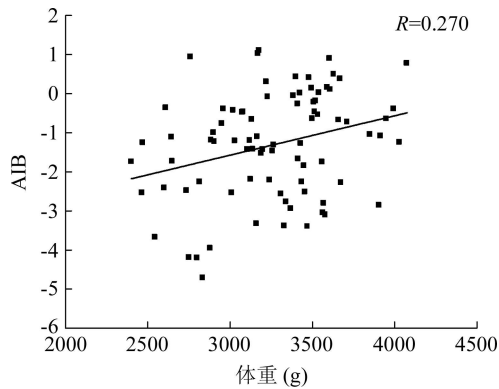


图 3 不同频率下的 AIB 比较

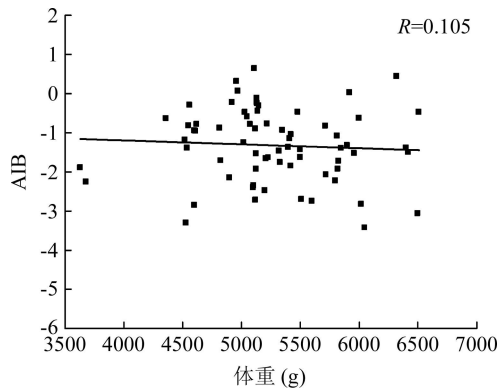
另外从图 3 中也可以看到，5.0 MHz 中心频率下的足月儿 AIB 均值大于 3.5 MHz 中心频率下足月儿的 AIB 均值，而 5.0 MHz 中心频率下的早产儿 AIB 均值小于 3.5 MHz 中心频率下的早产儿的 AIB。综合以上对均值大小和分类图像的分析，可以认为 5.0 MHz 频率下更容易评价新生儿的骨发育状况，这是因为婴儿的骨小梁间距较小，5.0 MHz 中心频率的超声波长更小，因此能够更好的定征松质骨的微结构，提供更高的分辨率。

图 4 表示足月儿体重与 AIB 的相关性，其中图 4(a) 和图 4(b) 分别表示出生第 1 天和生后第 42 天的情况，其中超声发射频率为 5.0 MHz。从图中看出，足月儿的体重和 AIB 的相关性较小 ($R = 0.27, n = 79, p < 0.001$ 和 $R = 0.105, n = 79, p < 0.001$)。

图 5 表示在 5.0 MHz 下早产儿的 AIB 随出生天数的变化。从图中可以看出，AIB 和出生天数具有较高的正相关性 ($R = 0.633, n = 21, p < 0.001$)，在早产儿出生的前面一段时间内，AIB 随着天数增加有明显的增加，到了一定的时间以后，AIB 增加的幅度减小并趋于稳定。这是因为早产儿在出生后会追赶生长^[3]，对各种营养素的需求量较大，骨的合成增加，但是尽管如此，由于骨负荷影响骨的形成，当胎儿在子宫内处于羊水环境中，胎动有利于骨强度的增加，早产使得骨负荷减少^[3,15]，所以早产儿到达足月年龄时，骨强度仍然低于同龄足月儿，即表现在图中的稳定时的 AIB 仍小于足月儿的 AIB。



(a) 产后第 1 天



(b) 产后第 42 天

图 4 足月儿体重与 AIB 相关性

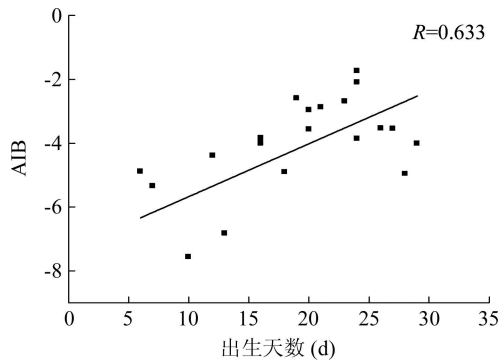


图 5 早产儿出生天数与 AIB 的相关性 (中心频率为 5.0MHz)

实验中, 新生儿跟骨的超声背散射信号中包含了软组织以及皮质骨的反射信号, 在 AIB 计算中, 通过时域窗的方法来去除这部分信号的影响, 但这样的处理方法比较简单, 实际的影响有待进一步的研究。另外, 信号获取是通过将超声探头放置在婴儿的脚后跟的位置, 因此位置选取上的差异也会带来一定的误差, 这可以通过对多个位置测量后取平均的方法来减少误差。以上将是下一步要研究的工作。

4 结论

本文研究了新生儿 (早产儿和足月儿) 跟骨超声背散射信号的表现积分背散射系数 (AIB), 并分析了

AIB 与新生儿体重、出生天数之间的联系。研究结果表明, 足月儿的 AIB 明显大于早产儿的 AIB, 说明足月儿的骨质状况要好于早产儿; 在较高的超声频率下, 更容易评价新生儿的骨发育状况; 足月儿的体重和 AIB 的相关性较小; 早产儿的 AIB 和出生天数具有较高的正相关性 ($R = 0.633, n = 21, p < 0.001$)。以上首次得到的结果对新生儿骨发育状况的评价有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Van der Sluis I, Muinck KSS. Osteoporosis in childhood: bone density of children in health and disease. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2001; **14**(7): 817—832
- 2 廖祥鹏, 颜崇淮, 刘忠厚. 儿童骨代谢指标的检查. *中国骨质疏松杂志*, 2010; **16**(12): 956—960
- 3 刘晓莉, 白增华. 早产儿和足月儿骨营养状况的分析研究. *中国优生与遗传杂志*, 2010; **18**(5): 132—134
- 4 McDevitt H, Ahmed S F. Quantitative ultrasound assessment of bone health in the neonate. *Neonatology*, 2007; **91**: 2—11
- 5 Wear K A. Ultrasonic scattering from cancellous bone: A review. *IEEE Trans. UFFC*, 2008; **55**(7): 1432—1441
- 6 TA De'an, WANG Weiqi, HUANG Kai *et al.* Analysis of frequency dependence of ultrasonic backscatter coefficient in cancellous bone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008; **124**(6): 4083—4090
- 7 杨白丁, 他得安, 王威琪. 基频估计算法研究平均骨小梁间距. *声学学报*, 2011; **36**(2): 172—178
- 8 宋小军, 他得安, 王威琪. 基于时频分布的盲信号分离方法研究长骨中的多模式导波信号. *声学学报*, 2011; **36**(3): 318—324
- 9 罗春荷, 他得安, 李维, 王威琪. 时频方法分析长骨中的超声导波及皮质骨厚度. *声学学报*, 2009; **34**(5): 416—422
- 10 Hakulinen M A, Day J S, Toyras J *et al.* Prediction of density and mechanical properties of human trabecular bone in vitro by using ultrasound transmission and backscattering measurements at 0.2 ~ 6.7 MHz frequency range. *Phys. Med. Biol.*, 2005; **50**: 1629—1642
- 11 Hoffmeister B K, Johnson D P, Janeski J A *et al.* Ultrasonic characterization of human cancellous bone in vitro using three different apparent backscatter parameters in the frequency range 0.6 ~ 15.0 MHz. *IEEE Trans. UFFC*, 2008; **55**: 1442—1452
- 12 黄凯, 他得安, 王威琪. 超声表观背散射参数成像定征松质骨结构的可行性研究. *仪器仪表学报*, 2009; **30**(11): 2455—2460
- 13 Hoffmeister B K, Jones C I, Caldwell G J *et al.* Ultrasonic characterization of cancellous bone using apparent integrated backscatter. *Phys. Med. Biol.*, 2006; **51**: 2715—2727
- 14 Riekkinen O, Hakulinen M A, Toyras J *et al.* Spatial variation of acoustic properties is related with mechanical properties of trabecular bone. *Phys. Med. Biol.*, 2007; **52**: 6961—6968
- 15 李红辉. 婴儿骨营养状况临床应用研究进展. *中国儿童保健杂志*, 2007; **15**(1): 69—70