

STBC-OFDM 技术在水声通信中的试验研究

周德富^{1,2}, 刘云涛¹, 蔡惠智³

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 北京中科海讯数字信号处理技术有限公司, 北京 100095)

摘要: 空时分组编码(Space Time Block Coding, STBC)技术能够获得满发射分集增益并且译码简单, 而正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术可对抗水声信道中的多径干扰和实现较高的频谱利用率。设计了将空时分组编码与正交频分复用相结合(STBC-OFDM)的高速水声通信系统方案, 并进行了湖上试验研究。湖试中, 在 1200m 距离下, 带宽为 4.32kHz 时有效传输速率为 3.328kbps, 误比特率低于 10^{-5} 。湖试结果表明, STBC-OFDM 技术在高速水声通信中的应用潜力。

关键词: 空时分组编码; 正交频分复用; 水声通信; 多输入多输出

中图分类号: TB567

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0466-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.004

Experimental study of STBC-OFDM technique in underwater acoustic communication

ZHOU De-fu^{1,2}, LIU Yun-tao², CAI Hui-zhi³

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039 China; 3. Beijing Zhongke Haixun Digital Signal Processing Technology Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: Space Time Block Coding (STBC) technique could achieve transmitting diversity gain and be decoded easily, and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is robust to multi-path effect in the underwater acoustic (UWA) channel and could reach higher spectrum efficiency. A novel high speed UWA communication system based on STBC-OFDM technique is proposed. It was tested in a lake. A bit rate of 3.328kbps over a bandwidth of 4.32kHz was approached within 1200m with the bit error rate (BER) lower than 10^{-5} in the lake. These results suggest that STBC-OFDM technique is an appealing solution for high data rate underwater acoustic communications.

Key words: Space Time Block Coding; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; underwater acoustic communication; multiple input multiple output

0 引言

水声信道是一个十分复杂的多径传输信道, 具有环境噪声高、带宽窄、可适用的载波频率低以及传输时延大的缺点。作为一种多载波调制技术, OFDM 技术将宽带信号载波分成许多窄带宽的子载波, 每个子载波都经历平坦衰落, 具有抗多径干扰、频谱利用率高等优点, 其在无线局域网和宽带接入中已得到了广泛应用, 如美国的 IEEE 802.11a、IEEE 802.11g 标准和宽带无线接入标准 IEEE 802.16d 都采用了 OFDM 技术。同时, 在无线通信中, 多输入多输出(Multiple Input Multiple output,

MIMO)技术是在发射端和接收端分别采用多个发射天线和多个接收天线, 利用空间分集技术, 在系统带宽不变的情况下获得更好的信噪比性能, 从而提高系统的容量或性能。而将 MIMO 和 OFDM 相结合就形成了 MIMO-OFDM 技术, 该技术是在 OFDM 系统中采用多天收发实现空间分集。若采用换能器代替发射天线, 水听器代替接收天线, 则可将 MIMO-OFDM 技术应用于水声通信, 从而大大提高数据传输速率和信道可靠性。

因此, 将 MIMO-OFDM 技术应用于高速水声通信, 成为近年来国内外水声通信技术研究的热点。2005 年, D. B. Kilfoyle^[1]对空间分集技术在水声通信中的应用进行了试验研究。Roy^[2]和 B. S. Li^[3]等从 2007 年开始, 对 MIMO-OFDM 技术在高速水声通信方面的应用进行了深入研究, 并进行了多次海试。虽然国内学者对 MIMO-OFDM 技术在水声通信方面的应用也进行了一些理论研究和仿

收稿日期: 2011-09-04; 修回日期: 2011-12-27

基金项目: “十一五”国防预研基金(1010704020501)

作者简介: 周德富(1975—), 男, 四川资阳人, 博士研究生, 研究方向为水声通信。

通讯作者: 周德富, E-mail: maysnow2000@sina.com

真^[4,5], 但是尚未有在这方面取得试验成果的报道。

基于此, 提出并实现了 2 发 4 收的空时分组编码、QPSK/16QAM 调制的 OFDM 高速水声通信系统方案, 并进行湖试。湖试结果表明 STBC-OFDM 技术在水声通信中的应用潜力: 在传输带宽为 4.32 kHz 时, 有效数据传输速率达到了 3.328 kbps。

1 STBC 的基本原理

假设发射天线数目为 2, 接收天线数目为 1, STBC 原理如图 1 所示。

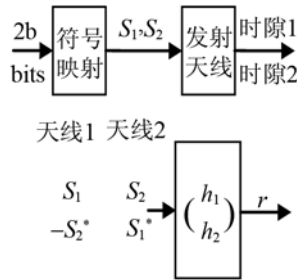


图 1 STBC 原理
Fig.1 The principle of STBC

设信道矩阵为 $H=(h_1, h_2)^T$, 接收端在时隙 1 和时隙 2 接收到的信号分别为 r_1 和 r_2 , 则

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 s_1 + h_2 s_2 + v_1 \\ -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + v_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: h_1, h_2 分别是发射天线 1、发射天线 2 到接收天线的路径增益, s_1, s_2 是准备发射的一个 OFDM 符号分组内的两个符号; v_1, v_2 是均值为零的加性高斯白噪声。经过简单线性处理可得

$$\hat{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^* = \sum_{i=1}^2 |h_i|^2 s_1 + h_1^* v_1 + h_2 v_2^* \quad (2)$$

$$\hat{s}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^* = \sum_{i=1}^2 |h_i|^2 s_2 - h_1 v_2^* + h_2^* v_1 \quad (3)$$

2 STBC-OFDM 高速水声通信系统设计方案

设计的 STBC-OFDM 高速水声通信系统框图如图 2 所示。在发射端, 首先将待传输的信息数据进行信道编码、调制等符号处理, 接着对符号进行空时编码, 得到两路 OFDM 符号的频域数据块, 然后分别进行逆傅里叶变换(IFFT), 得到其时域数据块, 并在变换后的每个时域数据块前加上循环前缀(Cyclic Prefix, CP), 最后进行数模变换(DAC), 通过换能器将信息发送出去。在接收端, 利用多个水听器接收信号, 接着通过模数变换(ADC)得到数字

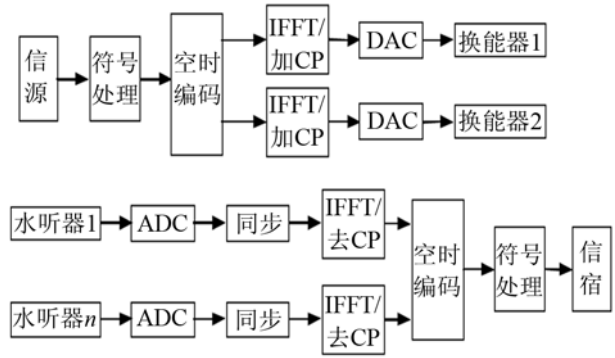


图 2 STBC-OFDM 高速水声通信系统框图
Fig.2 The block diagram of high data rate underwater acoustic communication system based on STBC-OFDM

信号, 经过帧同步、时间同步和频率同步后, 去掉 CP, 进行傅里叶变换(FFT)得到频域数据块, 然后进行空时译码, 最后进行信道译码、解调等符号处理, 得到发送端传输的信息。

2.1 发射信号的数据帧格式

发射信号采用的数据帧格式如图 3 所示, 其中 S_i 表示短训练序列, $i=1, 2, \dots, M$, 用于帧同步检测和粗多普勒估计, Preamble 表示数据帧的帧头, L_1 和 L_2 表示长训练序列, 用于定时同步和细多普勒估计, CTS 表示信道训练序列, 用于信道估计。 D_k 为第 k 个 OFDM 符号的时域数据块。

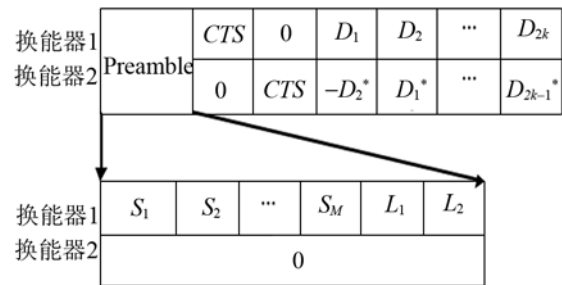


图 3 数据帧格式
Fig.3 The pattern of a data frame

2.2 数据译码算法

在 Alamouti^[6]提出的 STBC-OFDM 方案中, 发射天线数目为 2, 将前后相邻的第 $(2n-1)$ 个和第 $(2n)$ 个 OFDM 符号定义为第 n 个 OFDM 符号组, 设第 $(2n-1)$ 个 OFDM 符号第 k 个子载波上的数据为 $s_k(2n-1)$, 第 $(2n)$ 个 OFDM 符号第 k 个子载波上的数据为 $s_k(2n)$, 其中 $n=1, 2, \dots$, 则 $s_k(2n-1)$ 和 $s_k(2n)$ 依次从第一个天线的第 k 个子载波发射, $-s_k^*(2n)$ 和 $s_k^*(2n-1)$ 先后从第二个天线的第 k 个子载波发射, 记第 r 个水听器的接收向量为

$$y_k^r[n] = (y_k^r(2n-1), y_k^r(2n))^T$$

设 $A_k^r(m), B_k^r(m)$ 分别表示第 m 个 OFDM 符号

内从第一个天线和第二个天线到 r 个水听器第 k 个子载波上的信道传递函数, $\alpha_k(m), \beta_k(m)$ 分别为第 m 个 OFDM 符号内两个天线到第 r 个水听器的残留频偏引起的相位, 其中 $m=2n-1$ 或 $2n$, 定义信道转移矩阵为

$$C_k^r[n] = \begin{bmatrix} A_k^r(2n-1)e^{j\alpha_k(2n-1)} & -B_k^r(2n-1)e^{j\beta_k(2n-1)} \\ B_k^{r*}(2n)e^{-j\beta_k(2n)} & A_k^{r*}(2n)e^{-j\alpha_k(2n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

第 n 个 OFDM 符号组的发射符号向量为 $s_k[n] = (s_k(2n-1), s_k^*(2n))^T$, 噪声向量为 $v_k^r[n] = (v_k^r(2n-1), v_k^{r*}(2n))^T$, 则在第 n 个 OFDM 符号组, 第 r 个水听器接收到的信号可记为

$$y_k^r[n] = C_k^r[n]s_k[n] + v_k^r[n] \quad (5)$$

因此, 经过线性处理后, 得到数据译码为

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_k(2n-1) \\ \hat{s}_k^*(2n) \end{bmatrix} = (C_k^{rH}[n]C_k^r[n])^{-1}C_k^{rH}[n]y_k^r[n] \quad (6)$$

其中, $(\cdot)^T, (\cdot)^H$ 和 $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的转置、矩阵的共轭转置及矩阵的逆。

2.3 帧同步检测

短训练符号主要用于进行帧同步检测和粗多普勒估计。在此, 采用 T M Schmid^[7]提出的算法进行帧同步检测。

2.4 粗多普勒估计和细多普勒估计算法

帧同步完成后, 利用多个相同的短训练符号进行粗多普勒估计; 对于数据帧, 可利用 OFDM 数据块和其循环前缀(CP)进行细多普勒估计, 粗多普勒估计和细多普勒估计采用刘云涛等^[8]提出的算法。

2.5 基于导频的定时偏差估计和残留频差估计算法

由于频率同步后, 仍然会存在残留一个很小的多普勒频差, 从而引起接收符号的相位旋转, 另外, 定时偏差也会引起接收符号的相位旋转, 因此解调前必须先对残留频差和定时偏差进行跟踪估计和补偿。接收到的第 m 个 OFDM 符号块经 FFT 变换至频域得到第 k_i 个子载波上的导频符号为

$$R_{k_i}(m) = H_{k_i}(m)s_{k_i}e^{j\varphi_{k_i}(m)} \quad (7)$$

其中: $\varphi_{k_i}(m) = 2\pi k_i \Delta t_m + \gamma_m$; s_{k_i} 为第 k_i 个导频符号; $H_{k_i}(m)$ 为第 m 个符号时第 k_i 个子载波上的频响。用得到的信道估计代入式(7), 得到

$$\hat{\varphi}_{k_i}(m) = \arg[R_{k_i}(m)\hat{H}_{k_i}^*(m)s_{k_i}^*] \quad (8)$$

由于采用的 N_p 个导频符号对称分布在正负子载波上, 假设正频率的导频子载波序号为 $k_1, \dots, k_{N_p/2}$, 则负频率的导频子载波序号为 $k_{-1}, \dots, k_{-N_p/2}$, 定时频偏估计和残留频差分别为

$$\Delta t(m) = \left[\sum_{k_i \in Q^+} \hat{\varphi}_{k_i}(m) - \sum_{k_i \in Q^-} \hat{\varphi}_{k_i}(m) \right] / \left[\pi N_p (k_1 + k_{N_p/2}) \right] \quad (9)$$

$$\hat{\varphi}_m = \left[\sum_{k_i \in Q^+} \hat{\varphi}_{k_i}(m) + \sum_{k_i \in Q^-} \hat{\varphi}_{k_i}(m) \right] / N_p \quad (10)$$

3 试验结果及分析

为了验证系统的实际性能, 于 2010 年 3 月进行了湖上试验。湖试的总体情况如图 4 所示。试验水域的水底为山脉地形, 水域宽度为 500~800 m, 长度为 1200 m, 水深为 20~40 m。发射机由一台工控计算机、两台功放、两个换能器组成。两个换能器吊放在试验船头, 入水深度分别为 6 m 和 7.5 m, 等功率发射空时编码后的 OFDM 信号, 发射声源级为 180 dB, 同时接收水听器固定在静止的小船上。对水听器进行编号, 其中最靠近水面的为 1 号水听器, 其余依次为 2、3 和 4 号。系统分别采用 QPSK 和 16QAM 两种调制方式, 信道编码采用(2,1,7)卷积编码, 传送数据为多幅灰度图像, 中心频率为 7.5 kHz, 带宽为 4.32 kHz, 分成 864 个子载波, 其中 32 个为导频子载波, 其余 832 个为数据子载波, 子载波间隔为 5 Hz。每个 OFDM 符号长度为 200 ms, 为了保证通信效率, 循环前缀定为 50 ms, 调制为 QPSK 时的有效数据传输速率(单位: kbit/s)约为

$$R = \frac{1}{2} \times \frac{832 \times 2}{200 + 50} = 3.328 \quad (11)$$

试验中测得的一个典型的信道冲激响应如图 5 所示, 可以看出多径情况较为复杂, 信道多径长度超过 80 ms(含弱径)。图 6 为其中一个水听器接收到的 QPSK 调制的 STBC-OFDM 信号波形。本文以其中一幅 128×128 像素的图像为例, 发端采用 QPSK 调制, 在通信距离为 1200 m 处, 同时利用 4 个水听器进行数据接收。图 7 为分别用 1 个水听器和 4 个水听器接收到的数据进行处理后得到的星座图和译码后的图像, 其中图 7(a)和 7(c)分别为用 1 个水

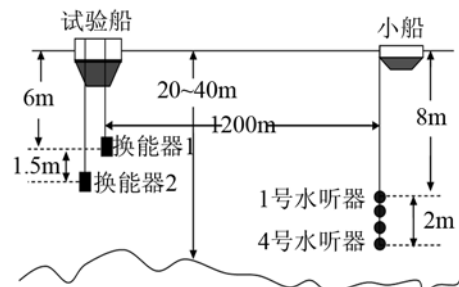


图 4 试验的基本情况

Fig.4 The setup of the lake experiment

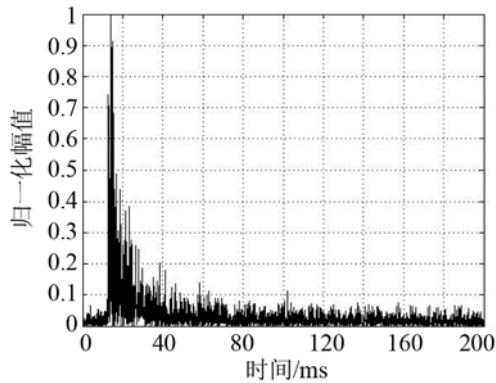


图 5 试验水域典型的信道响应
Fig.5 A typical channel pulse response

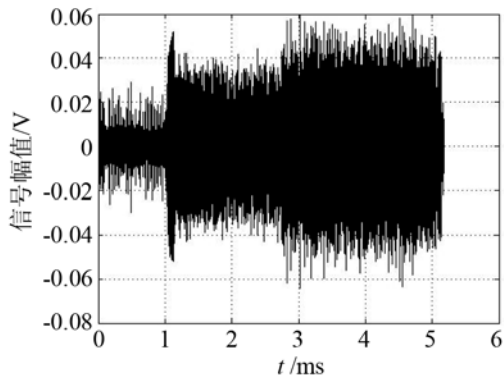


图 6 水听器接收到的信号波形
Fig.6 The signal received by a hydrophone

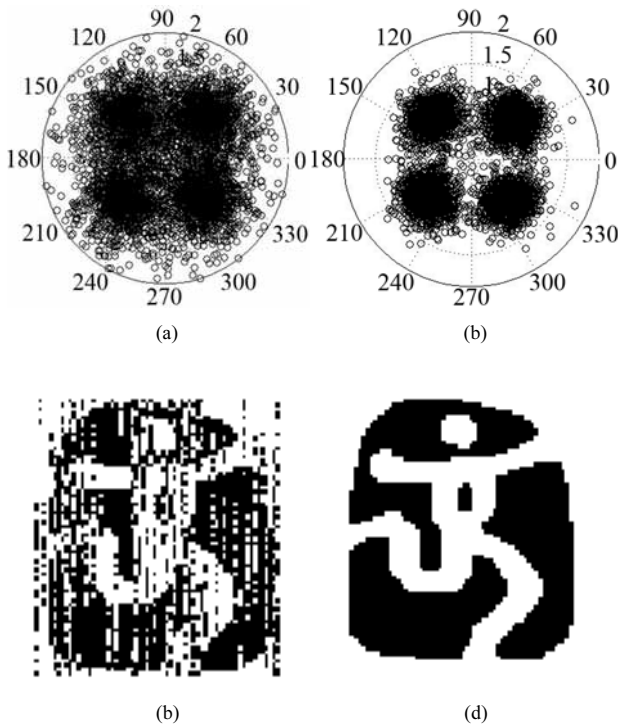


图 7 通信距离为 1200m 时,采用 QPSK 调制,分别用 1 个水听器接收与 4 个水听器接收得到的处理结果比较
Fig.7 The processing results for the data of QPSK modulation received by one hydrophone and four hydrophones respectively over 1200 meters shallow water channel

听器接收到的数据处理得到的星座图和图像,图 7(b)和 7(d)分别为用 4 个水听器接收数据处理得到的星座图和图像。接收星座图比较分散主要是由于接收信噪比较低。2 发 4 收、QPSK 调制和 16QAM 调制的正交频分复用水声通信系统试验结果分别如表 1、表 2 所示。

表 1 QPSK 调制的 2 发 4 收水声通信系统试验结果
Table 1 The experiment results for underwater acoustic communication system of 2 transmitters and four receivers with QPSK modulation

接收水听器个数	接收信噪比/dB	纠错译码前的误比特率	纠错译码后的误比特率
1(1 号水听器)	14	0.0723	0.0104
2(1~2 号水听器)	14,16	0.0206	$<10^{-5}$
3(1~3 号水听器)	14,16,13	0.0078	$<10^{-5}$
4(1~4 号水听器)	14,16,13,10	0.0069	$<10^{-5}$

注:表中估计的信道多普勒因子为 1.084×10^{-5} 。

表 2 16QAM 调制的 2 发 4 收水声通信系统试验结果
Table 2 The experiment results for underwater acoustic communication system of 2 transmitters and four receivers with 16QAM modulation

接收水听器个数	接收信噪比/dB	纠错译码前的误比特率	纠错译码后的误比特率
1(1 号水听器)	12	0.1988	0.2648
2(1~2 号水听器)	12,15	0.1421	0.0806
3(1~3 号水听器)	12,15,11	0.1215	0.0752
4(1~4 号水听器)	12,15,11,9	0.1165	0.0580

注:表中估计的信道多普勒因子为 3.737×10^{-5} 。

4 结论

设计了基于 STBC-OFDM 的高速水声通信系统方案,包括同步技术、数据译码及基于导频的相位跟踪算法。湖试结果表明,设计的 2 发 4 收的空时编码与正交频分复用相结合的水声通信系统能有效克服水声信道的多径,并获得空间分集增益,从而得到较高的频谱利用效率和较低的误码率,为今后实现更可靠的高速水声通信打下坚实基础。

参 考 文 献

- [1] Kilfoyle D B, Preisig J C, Baggeroer A B. Spatial modulation experiments in the underwater acoustic channel[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 406-415.
- [2] Roy S, Duman T M, McDonald V, et al. High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: Receiver structures and experimental-results[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(3): 663-688.
- [3] Li B S, Zhou S L, Stojanovic M, et al. MIMO-OFDM over an underwater acoustic channel[C]// Vancouver, BC, Oceans 2007, 2007: 1196-1201.
- [4] 姜煜, 白兴宇. 一种稳健的水声 MIMO 通信系统调制技术[J]. 声学与电子工程, 2010(3): 6-9.

- JIANG Yu, BAI Xingyu. A robust modulation technique for underwater acoustic MIMO communication system[J]. *Acoustic and Electronics Engineering*, 2010(3): 6-9.
- [5] 张歆, 孙小亮, 张小蓓. 基于频谱扩展分层空时编码的水声通信方案[J]. *西北工业大学学报*, 2010, **28**(2): 192-196.
- ZHANG Xin, SUN Xiaoliang, ZHANG Xiaoji. A novel scheme combining layered space-time(LST) coding with spectrum spreading(SS) for underwater acoustic communication system[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, **28**(2): 192-196.
- [6] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, **16**(8): 1451-1458.
- [7] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, **45**(12): 1613-1621.
- [8] 刘云涛, 蔡惠智, 邓红超, 等. 一种正交频分复用系统抗水下时变多径信道的频率偏移估计方法[J]. *声学学报*, 2009, **34**(6): 521-526.
- LIU Yuntao, CAI Huizhi, DENG Hongchao, et al. A robust frequency offset estimation scheme for orthogonal frequency-division multiplexing in time-varying and multipath underwater channels[J]. *Acta Acustica*, 2009, **34**(6): 521-526 .

• 简 讯 •

2012 年超声医学和医学超声论坛在中山大学附属肿瘤医院举行

由中国声学学会生物医学超声工程分会与中国生物医学工程学会医学超声分会和中国工程院医药卫生学部联合主办, 广东省超声医学工程学会、广州军区超声专委会、广州市超声医学会和深圳大学协办、中山大学附属肿瘤医院承办的“2012 年全国超声医学和医学超声论坛”已于 2012 年 9 月 22 日在中山大学附属肿瘤医院召开。本次论坛旨在促进理工医相结合, 建立跨学科的交流平台, 使医学超声及超声医学界的专家和同道一起交流相关的基础与临床研究的经验、成果及新技术。

出席本次论坛的主要嘉宾有: 中国工程院院士、中国声学学会生物医学超声工程分会和中国生物医学工程学会医学超声分会名誉主任委员王威琪教授, 复旦大学附属华山医院超声科主任、中国声学学会生物医学超声工程分会主任委员王怡教授, 复旦大学附属肿瘤医院超声诊断科主任、中国生物医学工程学会医学超声分会主任委员常才教授, 上海中山医院徐智章教授, 深圳市政协副主席、深圳大学国家工程实验室主任陈思平教授, 中国工程院医学部赵西路主管。来自全国 11 所高校、8 家超声制造厂家和超声医生共 200 多人出席为期一天的大会。

如何更好地利用学会平台将理工医三个领域的优秀人才请到一起, 研讨目前超声医学和医学超声的最新技术、发展方向以及帮助国产超声仪器快速进步一直是大会组织者思考的事。2 年前在上海华山医院的大会和广东省超声医学工程学会举办三次的“理工医三结合论坛”都是回答这个思考的尝试。

论坛的主要议题是超声弹性成像, 共分为三场专题学术报告。共有 12 位特邀专家做了报告。

与会专家和全国同道一起就超声医学和医学超声基础研究和临床应用的发展趋势和遇到的难题进行了互动讨论, 并分享了取得的经验、成果及新技术。

王威琪院士和徐智章教授分别对本次论坛进行了点评。王威琪院士充分肯定了本次论坛所取得的成果, 指出中国声学学会生物医学超声工程分会和中国生物医学工程学会医学超声分会会有很多相似之处, 鼓励两个分会以后还要一起办会。徐智章教授就超声设备标准化和超声术语的规范化发表了看法。