

根据时分复用机制优化多路 FIR 滤波器实现结构

刘 明[†] 汪福全 闫 超

(中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 针对多路有限长单脉冲响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器实现结构的资源需求量有待降低的问题, 本文根据多路采样数据的时分多路复用传输机制, 通过使多路采样数据复用同一单路 FIR 滤波器, 对多路 FIR 滤波器的 FPGA 实现结构进行优化。分析证明, 该优化实现结构由不同类型的单路 FIR 滤波器实现结构构成时, 与典型多路 FIR 滤波器实现结构相比, 其寄存器需求量大幅降低, 同时可以保证乘法器和加法器需求量大幅降低或大致相同。

关键词 多路 FIR 滤波器, 时分复用, 现场可编程门阵列

中图分类号: TN911.72

文献标识码: B

文章编号: 1000-310X(2012)05-0393-06

Improving the implementation structure of multi-channel Finite Impulse Response filter based on time-division multiplexed mechanism

LIU Ming WANG Fuquan YAN Chao

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Because the demand for resources of multi-channel Finite Impulse Response (FIR) filter implementation structure is to be reduced, the paper optimizes the implementation structure of multi-channel FIR filter whose multi-channel input data are transported through time-division multiplexed mechanism. In the optimized structure of FIR filter which is implemented in FPGA the multi-channel input data share the same single-channel FIR filter. Compared to the typical structure of multi-channel FIR filter, the resource evaluation proves that when the optimized structure is formed by different kinds of single-channel FIR filters, it achieves significant reduction in the demand of registers, and it is roughly the same or achieves significant reduction in the demands of multipliers and adders.

Key words Multi-channel Finite Impulse Response (FIR) filter, Time-division multiplex, Field-programmable gate array

1 引言

随着数字信号处理的发展, 采样阵列规模正在

变得越来越大, 多路采样数据通常采用时分复用机制由采样阵列传输至数字信号处理平台。以水声数字信号处理为例^[1], 由于水下声场的复杂性, 单元

2012-02-27 收稿; 2012-07-16 定稿

作者简介: 刘明(1980-), 男, 山东乐陵人, 博士, 研究方向: 数字信号处理, 计算机系统结构。

汪福全 (1974-), 男, 研究员。

闫超 (1984-), 男, 博士。

[†] 通讯作者: 刘明, E-mail: liuming@mail.ioa.ac.cn

水听器无法获得目标的详细信息，因而需要将数十乃至上百个单元水听器组成大的阵列，通过水听器阵列完成声场信号的采集工作。对于大规模的光纤水听器阵列，多达数十上百单元的光纤水听器信号都是由同一根光纤传输的，所以水声数字信号处理平台中模数转换后的采样数据是由多路光纤水听器的采样数据构成，多路采样数据间采用时分复用传输机制，需要独立地进行数字信号处理。对采用时分复用传输机制的多路采样数据进行数字信号处理成为数字信号处理平台设计的研究热点，而 FIR 滤波器是数字信号处理平台的重要组成部分，所以对多路 FIR 滤波器实现结构的研究具有重要的现实意义。

近年来，国内外对 FIR 滤波器实现结构的资源需求量进行了广泛的研究，并取得了很大进展，但是这些研究主要集中在输入数据为单路数据的单路 FIR 滤波器方面，对输入数据为多路数据的多路 FIR 滤波器实现结构的研究尚不多见，如文献[2]对单路 FIR 滤波器的三种实现结构：直接型、频率抽样型和基于快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的形式进行了比较，分析了三种实现结构各自的优缺点，文献[3]根据数字信号处理平台采样率与滤波器工作频率间的差距对直接型 FIR 滤波器的实现结构进行优化，使其资源需求量大大降低，文献[4]

根据系数的对称性优化单路 FIR 滤波器实现结构，降低其资源需求量，文献[5-7]对特殊类型的单路 FIR 滤波器实现结构进行了分析，文献[8]对单路 FIR 滤波器的并行和流水线实现结构进行了分析。

数字信号处理平台中，采样数据往往需要在现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)内进行预处理，而多路 FIR 滤波器 FPGA 实现过程中会出现实现结构的资源需求量有待降低的问题，该问题在数字信号处理平台设计中具有一定的普遍性。本文基于时分多路复用传输机制，对多路采样数据时分复用同一单路 FIR 滤波器的技术进行研究，提出采用同步时分多路复用方法对多路 FIR 滤波器的实现结构进行优化，使其资源需求量得到一定程度的降低。

2 典型多路 FIR 滤波器实现结构

设多路 FIR 滤波器的采样数据复用路数为 M ，多路采样数据采用时分复用机制传输时，首先连续传输第 0 路的 K 个采样数据，再连续传输其它路的各 K 个采样数据，并按照该方式循环传输各路采样数据，将连续 $M \times K$ 个采样数据的传输称为采样数据的一次传输，如图 1。设采样率为 f_1 ，则 M 路采样数据采用时分复用机制传输时的数据率为 $M \times f_1$ 。

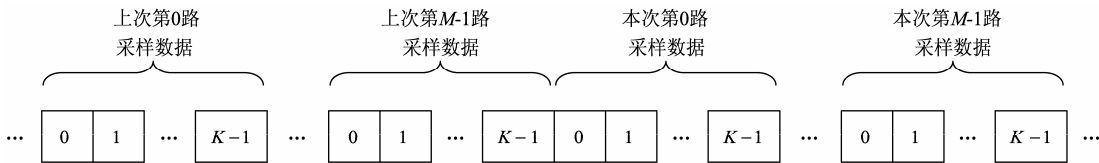


图 1 多路采样数据的时分复用传输机制

多路采样数据按照图 1 所示机制时分复用传输时，典型多路 FIR 滤波器实现结构包括 M 个单路 FIR 滤波器，各路采样数据通过选择器时分进入对应的单路 FIR 滤波器，多路采样数据间独立进行 FIR 滤波操作，如图 2，图中 $x_m(n)$ 为第 m 路采样数据， $y_m(n)$ 为第 m 路 FIR 滤波结果数据。

典型多路 FIR 滤波器实现结构中的各单路 FIR 滤波器可以由任意单路 FIR 滤波器实现结构构成。设 FIR 滤波器阶数为 N ，单路 FIR 滤波操作可以表示为：

$$y(n)=\sum_{k=0}^{N-1}h(k)x(n-k), \tag{1}$$

其中 $x(n)$ 为单路输入数据， $h(n)$ 为滤波器系数， $y(n)$ 为单路结果数据，即 N 阶 FIR 滤波器当前的输出等于其历史上 N 个输入的加权和。单路 FIR 滤波

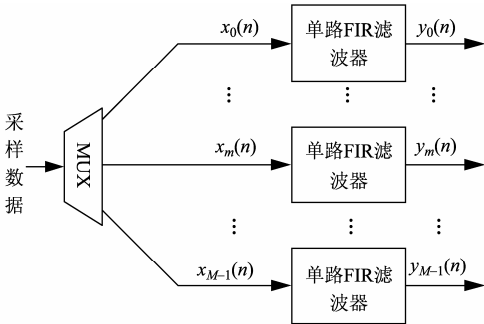


图 2 典型多路 FIR 滤波器实现结构

器实现结构通常采用直接型 FIR 滤波器实现结构和直接复用型 FIR 滤波器实现结构。

直接型 FIR 滤波器实现结构，如图 3，由 N 个寄存器、 N 个乘法器和 $N-1$ 个加法器构成。

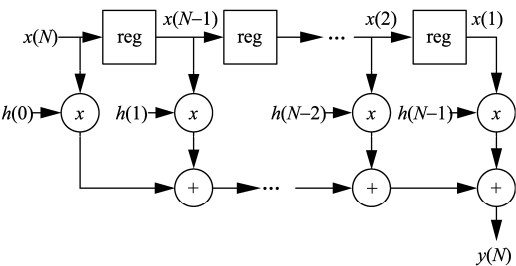


图 3 直接型 FIR 滤波器实现结构

数字信号处理平台中，采集节点的采样率较低，如水声数字信号处理系统中采样率一般为几千至几百千赫兹，雷达数字信号处理系统中采样率一般为几百千至几兆赫兹，而 FIR 滤波器以 FPGA 实现时其工作频率较高，一般可以达到数十兆赫兹，甚至百兆赫兹。设滤波器工作频率为 f_2 ，则 FIR 滤波器只要在 $p=\lceil f_2/f_1 \rceil$ ，即大于或等于 f_2/f_1 的最小整数个时钟周期内完成一个采样数据的滤波操作便可以满足性能要求。直接复用型 FIR 滤波器实现结构利用该原理通过复用乘法器和加法器实现 FIR 滤波操作，如图 4，该结构由 N 个寄存器、 $\lceil N/p \rceil$ 个乘法器和 $\lceil N/p \rceil$ 个加法器构成。

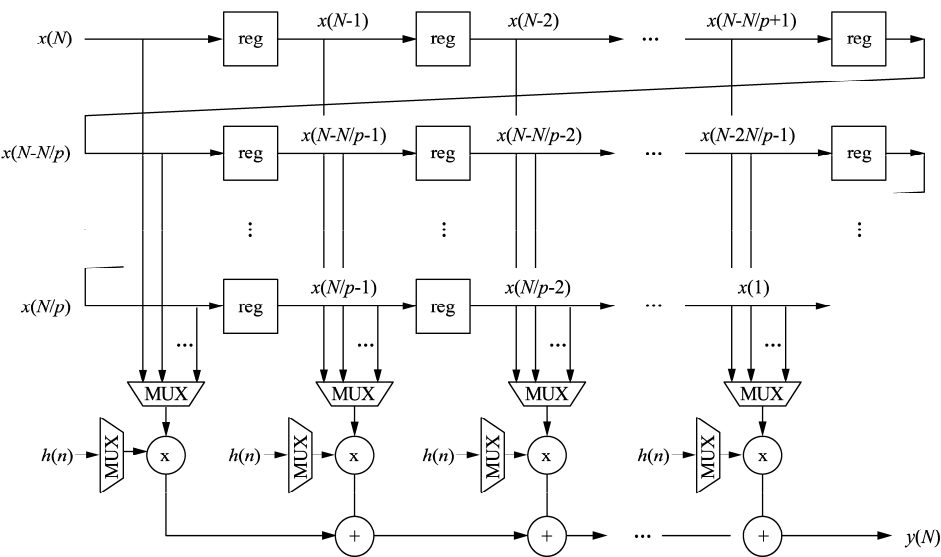


图 4 直接复用型 FIR 滤波器实现结构

综上所述，采样数据复用路数为 M ，FIR 滤波器阶数为 N 时，采用直接型 FIR 滤波器实现结构构成的典型多路 FIR 滤波器需要 MN 个寄存器、 MN 个乘法器和 $M(N-1)$ 个加法器。当典型多路 FIR 滤波器采用直接复用型 FIR 滤波器实现结构时，经优化后各单路 FIR 滤波器输入数据的数据率可以降低为 f_1 ，而不需要保持 $M \times f_1$ 的数据率，此时该典型多路 FIR 滤波器实现结构需要 MN 个寄存器、 $M\lceil N/p \rceil$ 个乘法器和 $M\lceil N/p \rceil$ 个加法器。

3 多路复用 FIR 滤波器实现结构

多路复用 FIR 滤波器实现结构利用采样数据的

时分复用传输机制，使多路采样数据通过同一单路 FIR 滤波器进行滤波操作，可以大大降低多路 FIR 滤波器实现结构对资源的需求。多路复用 FIR 滤波器实现结构如图 5，图中 $x_{m-1}(n)$ 为第 $m-1$ 路采样数据， $x_m(n)$ 为计算第 m 路 FIR 滤波结果需要的输入数据， $y_m(n)$ 为第 m 路 FIR 滤波结果数据。

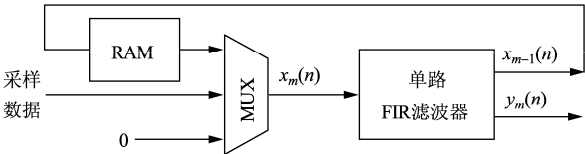


图 5 多路复用 FIR 滤波器实现结构

多路复用 FIR 滤波器实现结构中的单路 FIR 滤

波器可以由任意单路 FIR 滤波器实现结构构成，该多路 FIR 滤波器实现结构的工作原理由两部分构成：寄存器初始化和滤波操作。

3.1 寄存器初始化

由于在 FIR 滤波操作过程中，每路第一个采样数据之前的采样数据均默认为零，所以在计算每路第一个采样数据的滤波结果前需要将单路 FIR 滤波器的所有寄存器置为零。

由于多路复用 FIR 滤波器实现结构中所有不相关的各路数据复用同一单路 FIR 滤波器，所以多路复用 FIR 滤波器完成某一路的连续 K 点数据的滤波操作后需要将所有寄存器的值存入 RAM，待计算该路下一次连续 K 点数据的滤波操作前再将该值读入对应的寄存器。

3.2 滤波操作

寄存器初始化操作完成后便可以对某一路连续 K 点采样数据进行 FIR 滤波操作，滤波操作过程同其采用的单路 FIR 滤波器的滤波操作过程相同。

采样数据复用路数为 M ，FIR 滤波器阶数为 N 时，采用直接型 FIR 滤波器实现结构构成的多路复用 FIR 滤波器需要 N 个寄存器、 N 个乘法器和 $N-1$ 个加法器。当多路复用 FIR 滤波器采用直接复用型 FIR 滤波器实现结构时，输入数据数据率保持为 $M \times f_1$ ，则此时该多路复用 FIR 滤波器实现结构需要 N 个寄存器、 $[MN/p]$ 个乘法器和 $[MN/p-1]$ 个加法器。

4 多路复用 FIR 滤波器实现结构资源需求量评价

将采用直接型 FIR 滤波器实现结构构成的多路复用 FIR 滤波器称为 I 型实现结构，将采用该单路 FIR 滤波器实现结构构成的典型多路 FIR 滤波器称为 II 型实现结构，将采用直接复用型 FIR 滤波器实现结构构成的多路复用 FIR 滤波器称为 III 型实现结构，将采用该单路 FIR 滤波器实现结构构成的典型多路 FIR 滤波器称为 IV 型实现结构，表 1 对这四种实现结构的资源需求量进行了比较。当今主流 FPGA 均提供大量块 RAM，如 Altera Stratix III 系列 FPGA 最多提供 2034kB 的块 RAM^[9]，对块 RAM 的使用不占用 FPGA 逻辑资源，所以表 1 中没有列出各实现结构对块 RAM 的需求量。

表 1 四种实现结构的资源需求量比较

	寄存器	乘法器	加法器
I 型实现结构	N	N	$N-1$
II 型实现结构	MN	MN	$M(N-1)$
III 型实现结构	N	$[MN/p]$	$[MN/p-1]$
IV 型实现结构	MN	$M[N/p]$	$M[N/p-1]$

由表 1 可知，单路 FIR 滤波器采用直接型 FIR 滤波器实现结构时，典型多路 FIR 滤波器的寄存器、乘法器和加法器需求量固定为多路复用 FIR 滤波器的 M 倍。下面对单路 FIR 滤波器采用直接复用型 FIR 滤波器实现结构时的典型多路 FIR 滤波器和多路复用 FIR 滤波器资源需求量进行详细分析。

由表 1 可知，IV 型实现结构进行多路滤波操作时，其寄存器需求量为滤波器阶数 N 与路数量 M 的乘积，III 型实现结构进行多路滤波操作时，其寄存器需求量等于滤波器阶数 N ，与采样数据的路数量 M 无关。IV 型实现结构的寄存器需求量固定为 III 型实现结构的 M 倍。

当固定 $N=243$ 时，图 6 比较了 III 型与 IV 型实现结构的寄存器需求量，其中横轴表示路数量 M ，纵轴表示寄存器需求量。

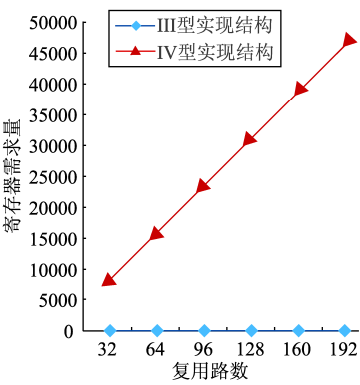


图 6 复用路数变化时的寄存器需求量比较

由表 1 可知，III 型与 IV 型实现结构需要的乘法器数量大致相同，当 N 为 p 的整数倍时，两者需要的乘法器数量相同，当 N 不为 p 的整数倍时，后者需要的乘法器数量高于前者。

当固定 $M=64$ ， $f_1=125\text{kHz}$ ， $f_2=64\text{MHz}$ 时，图 7 中比较了 N 变化时 III 型与 IV 型实现结构的乘法器需求量，其中横轴表示滤波器阶数 N ，纵轴表示乘法器需求量。

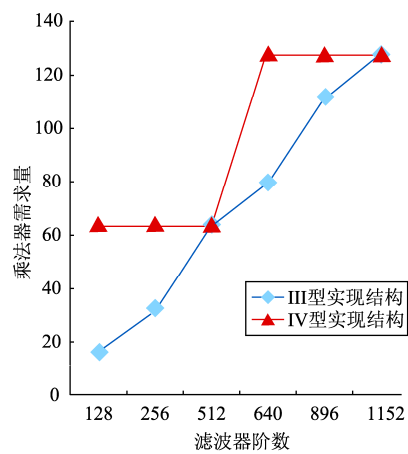


图 7 滤波器阶数变化时的乘法器需求量比较

当固定 $M=64$, $f_2=64\text{ MHz}$, $N=243$ 时, 图 8 中比较了 f_1 变化时 III 型与 IV 型实现结构的乘法器需求量, 其中横轴表示采样数据的数据率 f_1 , 单位为 kHz, 纵轴表示乘法器需求量。

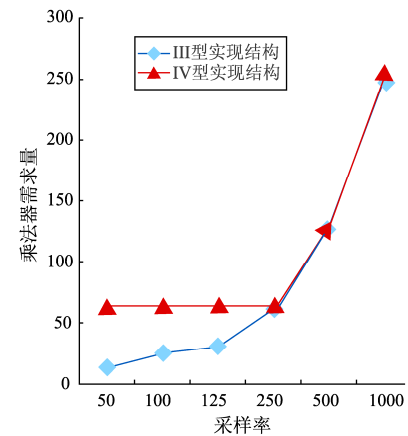


图 8 采样率变化时的乘法器需求量比较

由表 1 可知, III 型与 IV 型实现结构需要的加法器数量大致相同, 当 N 为 p 的整数倍时, 后者需要的加法器数量比前者少 $M-1$ 个, 当 N 不为 p 的整数倍时, 后者需要的加法器数量是否低于前者需要根据实际情况判断。

当固定 $M=64$, $f_1=125\text{ kHz}$, $f_2=64\text{ MHz}$ 时, 图 9 中比较了 N 变化时 III 型与 IV 型实现结构的加法器需求量, 其中横轴表示滤波器阶数 N , 纵轴表示加法器需求量。

当固定 $M=64$, $f_2=64\text{ MHz}$, $N=243$ 时, 图 10 中比较了 f_1 变化时 III 型与 IV 型实现结构的加法器需求量, 其中横轴表示采样数据的数据率 f_1 , 单位为 kHz, 纵轴表示加法器需求量。

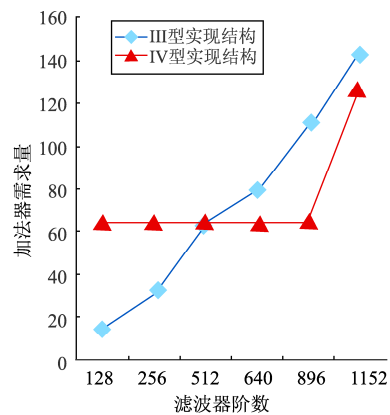


图 9 滤波器阶数变化时的加法器需求量比较

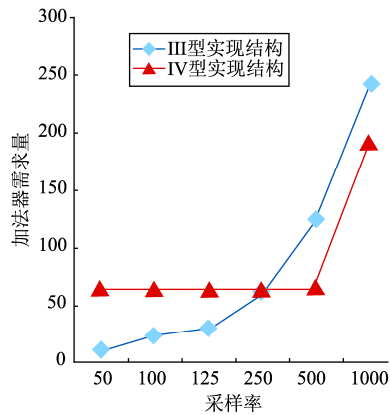


图 10 采样率变化时的加法器需求量比较

总之, 与典型多路 FIR 滤波器实现结构相比, 采样不同类型的单路 FIR 滤波器实现结构时, 多路复用 FIR 滤波器实现结构的资源需求量有不同程度的降低。当采用直接型 FIR 滤波器实现结构时, 多路复用 FIR 滤波器实现结构的寄存器、乘法器和加法器需求量均大幅降低。当采用直接复用型 FIR 滤波器实现结构时, 在保证乘法器和加法器需求量大致相同的情况下, 多路复用 FIR 滤波器实现结构的寄存器需求量大幅降低。

5 结论

典型多路 FIR 滤波器实现结构中各路采样数据分别通过不同的单路 FIR 滤波器进行滤波操作, 该结构的资源需求量较大。本文根据多路采样数据的时分复用传输机制, 提出同步时分多路复用 FIR 滤波器实现结构。该结构通过使多路采样数据复用同一单路 FIR 滤波器, 对多路 FIR 滤波器的 FPGA 实

现结构进行优化，使其资源需求量得到一定程度的降低。

参 考 文 献

[1] 张仁和, 倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. 应用声学, 2004, 33 (7) : 503-507.

[2] EMMANUEL C I, BARRIE W J. Digital signal processing: a practical approach. second edition[M]. New Jersey: Pearson Education, 1993. 151-154.

[3] 陈宇, 李平. 基于 FPGA 的光纤水听器 PGC 解调算法实现[J]. 应用声学, 2006, 25 (1): 48-54.

[4] ABDSAMAD B, KHALED B. Novel area-efficient FPGA architectures for FIR filtering with symmetric signal extension[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2009, 17(5):709-722.

[5] DANIEL L, MARIOS P, ALONZO V. A dynamically reconfigurable platform for fixed-point FIR filters[C]. In: 2009 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, Cancun, Mexico, 2009. 332-337.

[6] SEAN G P, LINDA S D. Sparse FIR filters and the impact on FPGA area usage[C]. In: 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, California, USA, 2008. 1862-1866.

[7] PRAMOD K M, SHRUTISAGAR C, ABBES A. FPGA realization of FIR filters by efficient and flexible systolization using distributed arithmetic[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(7):3009-3017.

[8] DEEPAK G, MEHER P K, SLUZEK A. Performance characteristics of parallel and pipelined implementation of FIR filters in FPGA platform[C]. In: 2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iasi, Romania, 2007. 11-14.

[9] Altera corporation. Stratix III device handbook[EB/OL]. 2005, <http://www.altera.com>: Altera corporation.



2012 年度全国物理声学学术会议在内蒙古通辽市召开

由中国声学学会物理声学分会主办，内蒙古民族大学协办的全国物理声学学术会议于 2012 年 8 月 2 日~4 日在内蒙古通辽市举行。来自北京、上海、江苏、重庆、吉林、陕西、黑龙江、内蒙古等地高等院校，科研院所等单位的专家学者共 80 余名代表参加了会议。

本届会议的主题是“前景与展望：二十一世纪的物理声学”，学术交流范围涵盖与声学相关的所有基础和应用基础研究领域。论文涉及的专业领域大致划分为物理声学、水声学、超声学、噪声控制、语言声学、声学信号处理等几个方面。本次会议得到全国各地声学工作者的热烈响应，共征集到学术论文 45 篇，其中大会特邀报告 4 篇。反映出物理声学作为声学的重要基础学科处于蓬勃发展之中。

物理声学分会主任委员王新龙教授、内蒙古民族大学孙国权副校长和通辽市科协宋锦遇主席在开幕式上作了热情洋溢的讲话。学术交流大会分特邀报告和分组报告进行，“千人计划”入选者，哈尔滨工业大学曹文武教授，同济大

学程茜副教授，南京大学卢明辉副教授，中国科学院声学研究所林伟军研究员分别在会上作了精彩的专题报告。分组交流分为四组，在分组报告结束后，由专家组成的学术委员会，评选出优秀论文 6 篇，并给优秀论文作者颁发了证书。

本次学术会议充分体现了到会专家教授严谨、求实的治学态度。在这次会议上提交的论文和所作的报告，在较大程度上反映了我国声学科技在以上几个专业的发展方向和水平，具有较高的学术价值和实际开发应用前景。会议上学术气氛浓厚，代表们对此次会议给予了高度评价。

这次会议的成功召开，得到了南京大学声学研究所的积极支持，《声学技术》杂志编辑部也将以增刊的形式出版会议论文集，内蒙古民族大学作为协办单位为本次会议的成功举行做了大量的工作。同时，本次会议也得到了中国声学学会和通辽市科协的关心与支持。

(中国声学学会物理声学分会)