

适用于声呐阵形估计的姿态传感器网络设计

邢 韬[†] 林晋美 蔡惠智

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要 设计了一种基于姿态传感器网络的声呐阵形估计系统,给出了系统设计的整体方案并对系统的软硬件设计进行了论述。实验结果证明了该设计的可行性。

关键词 姿态传感器, 声呐, 阵形估计

Design of digital compass module network for sonar array shape estimation

XING Tao LIN Jin-Mei CAI Hui-Zhi

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract This paper outlines a system for sonar array shape estimation. It is composed of digital compass modules and message process unit. We give the system architecture and then discuss the hardware circuit design and software design. The system is proved to be feasible to estimate array shape by field experiments.

Key words Digital compass module, Sonar, Array shape estimation

1 引言

波束成形算法通过处理水声传感器阵列数据获取目标的方位和距离信息,它要求获得阵列形状的准确信息以便确定阵列中每个传感器的位置。阵形畸变会导致波束成形结果的严重退化进而影响到方位估计的精确性并降低了信号的增益^[1]。特别是使用自适应波束成形算法的时候,水听器定位错误会造成收敛性问题进而产生错误结果^[2]。

本文提出一种应用姿态传感器网络进行

阵形估计的方法,利用 Honeywell 公司的 HMR3000-485 传感器提供的基于 NMEA0183 协议的原语,从中提取阵形采样点的方位、纵倾及横摇信息,可以在 2D 平面上实现阵形估计并能满足多种阵列阵形估计的需要。

2 数学模型

2.1 拟合的前提

阵形畸变不大;
声学模块部分长度不可拉伸;

2006-04-11 收稿; 2007-07-18 定稿

作者简介: 邢韬 (1976-), 男, 博士, 研究方向: 阵列信号处理。

林晋美 (1979-), 女, 博士。蔡惠智 (1963-), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师。

[†] 通讯联系人 E-mail: xingtao.cn@gmail.com

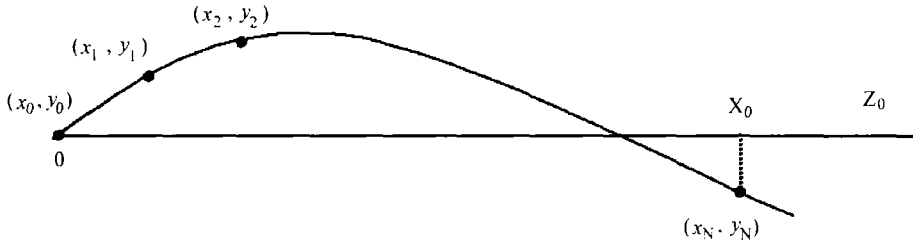


图 1 阵形畸变的线列阵

姿态传感器在声学模块上的位置固定已知。

2.2 阵形畸变分析

设声学模块长度为 Z_0 , 畸变阵水听器坐标为 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ 。如图 1 所示。

畸变前, 阵基元的坐标为: $x_i = (i - 1)d, y_i = 0, (i = 1, 2, \dots, N)$ 其中 d 为相邻基元的间隔。

假设目标射入方向为 θ , 波束形成的定向角为 θ_0 , 那么在 θ_0 方向的波束输出是:

$$D^2(\theta, \theta_0) = \left[\sum_{i=1}^N \sin(\xi_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N \cos(\xi_i(\theta) - \tau_i(\theta_0)) \right]^2 \quad (1)$$

其中

$$\tau_i(\theta) = (i - 1)d \sin \theta c 2\xi_i(\theta) = x_i \sin \theta + y_i \cos \theta c 3$$

c 是声速, (x_i, y_i) 是由 t 时刻的阵形决定的阵元坐标。

可以看出, 为了得到 θ_0 方向的波束输

出 $D^2(\theta, \theta_0)$, 必须计算出每一时刻的阵元坐标 (x_i, y_i) 才能进一步分析畸变状态下波束形成的变化情况。

2.3 计算阵形的二次抛物线函数

为得到精确的阵元坐标, 需要对阵形进行有效的拟合。如果可以通过 n 个姿态传感器得到阵上特定点的斜率, 就可以用二次抛物线拟合这两点间的曲线。

具体做法如图 2 所示, 利用 n 个姿态传感器将阵列分成 $n - 1$ 段二次抛物线, 每段可表示为 $f_i(x) = a_{2i}x^2 + a_{1i}x + a_{0i}, (i = 0, 1, 2, \dots, n - 2)$, 求出曲线参数 a_{2i} 。

以第一段的函数为例, 首尾曲线的导数即为姿态传感器处的斜率 k_0, k_1 , 可列出方程:

$$\begin{cases} f'(x_{c0}) = a_1 + 2a_2x_{c0} + a_0 = k_{c0} \\ f'(x_{c1}) = a_1 + 2a_2x_{c1} + a_0 = k_{c1} \end{cases} \quad (4)$$

k_{c0}, k_{c1} 可由相应的姿态传感器姿态角正切值求得, x_{c0}, x_{c1} 分别为第一和第二个姿态传感器的横坐标。

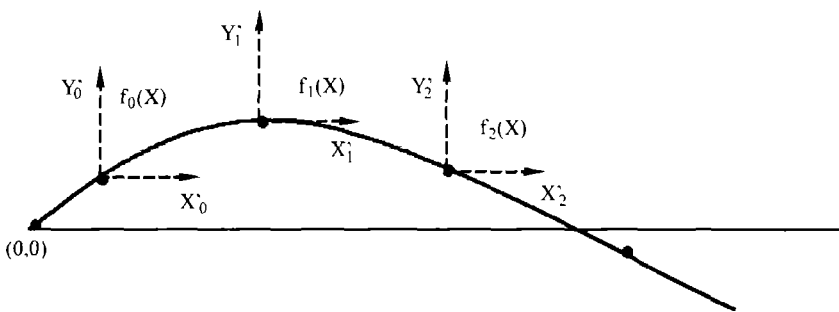


图 2 阵形分段拟合图示

令起始姿态传感器坐标为 $(0, 0)$, 则

$$\begin{aligned} a_0 &= 0, & a_1 &= k_{c0}, \\ a_2 x_{c1} &= \frac{k_{c1} - k_{c0}}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

阵上其它点的斜率可表示为

$$f'(x_j) = 2a_2 x_j + k_{c0}$$

又相邻姿态传感器间曲线距离一定, x_{c1} 可由递推公式获得:

$$x_{c1} = x_j = x_{j-1} + l \frac{1}{\sqrt{1 + (f'(x_{j-1}))^2}} \quad (6)$$

l 为声阵上选取的微元长度, 在此长度内阵形可视为一短直线, x_j 为声阵曲线上间隔为 $j \times l$ 长度的点的横坐标。

将 (6) 代入 (5), 迭代法解方程, 便可得到参数 a_2 。以此类推解出所有 a_{2i} ($i = 0, 1, 2, \dots, n-2$), 再通过平移坐标的方法将 $n-1$ 段函数拼接在一起, 得到阵形。

2.4 拟合效果

由于我们用的是二次抛物线拟合阵形, 可以保证拟合出的线形为至少二阶可导的光滑曲线。如果两点间拟合出现较大偏差时, 说明两个姿态传感器之间的畸变幅度过大, 已经不能用二次抛物线拟合。显然, 当这两点间的起伏大于半周期, 即有一个以上的波峰和波谷的时候, 抛物线拟合将失效, 如图 3 所示。所以该方法适用于畸变范围有限的阵形估计。

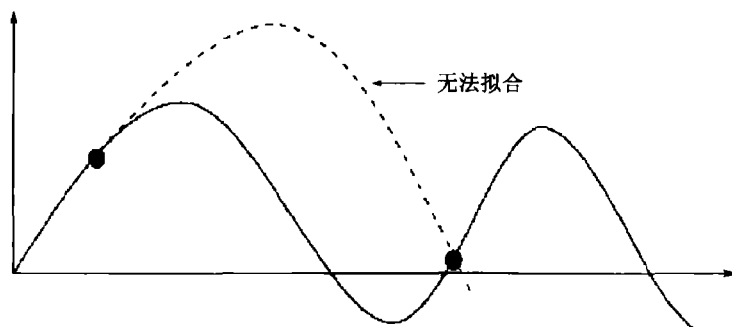


图 3 两点间无法拟合的情况

3 姿态传感器网络系统结构

阵形的拟合需要通过各个 HMR3000-485 传感器获得的方位角或纵倾数值, 得到阵上该点的水平和垂直曲线斜率。基于 HMR3000-485 传感器组成的系统分为三部分: 阵列姿态采集单元簇, 姿态信息处理单元和接收显控单元。

系统简图如图 4 所示, 图中姿态采集单元簇和姿态信息处理单元都在湿端, 采集的信号经过传输线传送到干端的接收显控单元, 在显控单元中整理数据并做可视化处理。

湿端的 RS485 网络设计为半双工, 初始时每个姿态采集单元都处于侦听状态, 当收到姿态信息处理单元的广播查询命令时和自己的单元 ID 号进行匹配, 如果不符则无动作, 符合则将自身信息发送到姿态信息处理单元然后再次进入侦听状态。姿态信息处理单元对水下姿态采集单元数据进行轮询, 全部收到后按照一定数据帧格式通过传输接口发送到干端。

4 姿态信息采集单元设计

该单元的设计要求是能够采集该点的方位、纵倾及横摇信息并且能够和姿态信息处理单元进行信息交互。方位、纵倾及横摇信息由 Honeywell 公司的 HMR3000-485 传感器来提供, 由于该传感器不具有多机网络交互功能, 我们设计了一个接口模块来完成。姿态采集单元结构简图如图 5。

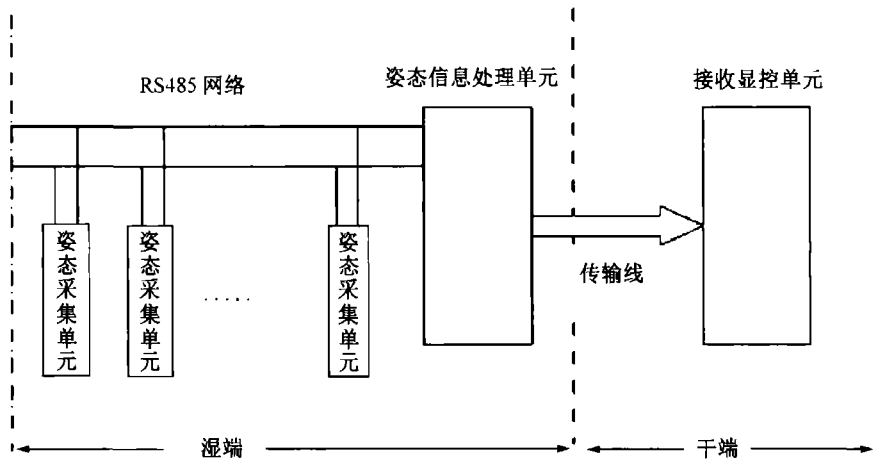


图 4 姿态传感器网络系统简图

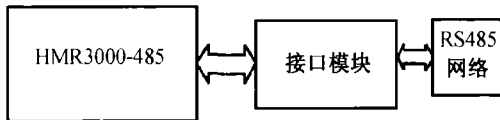


图 5 姿态传感器网络系统简图

HMR3000-485 适用于船舶航空罗盘、浮标和水下装置定位。按照 NMEA0183 格式提供航向信息输出。有关该设备详细参数见文献 [3]。

HMR3000-485 的输出使用 1 个起始位，8 个数据位 (LSB 在前，MSB 总为 0)，无奇偶位和一个停止位，本设计中波特率设为 19200。

HMR3000-485 输出三种 NMEA0183 标准格式 (HDG/HDT/XDR)，三种专用格式 (HPR/RCD/CCD)，我们采用最适合阵形估计的 HRP 原语并将其设置为连续输出，该原语的格式和意义如下：

HPR Heading, Pitch, & Roll
\$PTNTHPR, x.x,a,x.x,a,x.x,a*hh<cr><lf>

三个 a 前面的数据段分别表示了方位、纵倾和横摇的数值。[3]

接口模块的目的是和上位信息处理单元进行信息交互，我们采用了 Altera 的 MAXII 系列 CPLD^[4] 作为主控芯片，接口电平转换芯片采用 Maxim 的 MAX3070E^[5]。

接收控制逻辑在 CPLD 内完成，包含基于 VHDL 的 UART, 单向 SWITCH, 发送 TIMER,

其中 UART 实现接收 RS485 网络广播并转换到单向 SWITCH 的译码使能端；SWITCH 实现打开 HMR3000-485 的数据和 RS485 网络之间的通道；TIMER 则设定了发送数据的时间，时间结束关闭单向 SWITCH 重新启动 UART 进入侦听状态。

系统状态转换如图 6 所示。

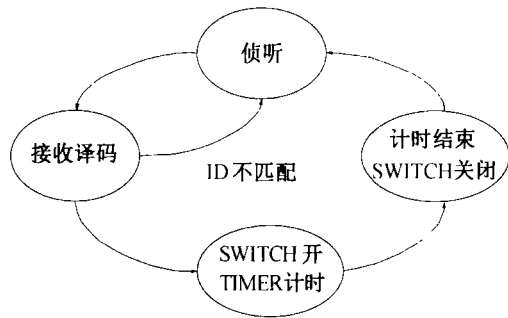


图 6 接口逻辑状态转换图

5 姿态信息处理单元和接收显控单元设计

姿态信息处理单元完成水下姿态采集信息的获取和整合，按协议将数据帧发送到接收显控单元。接收显控单元将上行数据帧解包提取阵形网络各采样点航向信息再进行后续处理。两个单元模块之间根据具体任务不同采用不同的连接方式。本文以 RS485 直接传输为例。

姿态信息处理单元结构框图如图7所示。

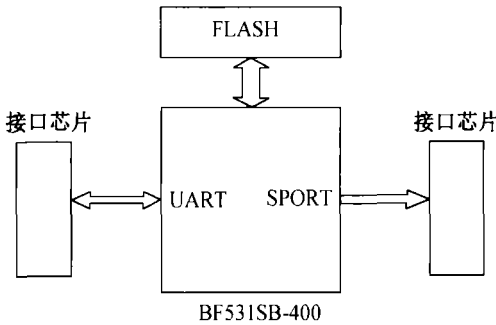


图7 姿态信息处理单元结构框图

以BF531SB-400为核心的处理单元结构简单但可以满足设计需要，其自带的UART

接口可以直接接收信息采集单元的航向信息，同时利用其串行口将数据帧发送到显控模块。BF531SB-400主要参数见文献[6]。

5.1 姿态信息处理单元软件设计

帧结构见图8，其中 C_i 是第 i 个姿态传感器的数据段标识， C_i DATA用来放置第 i 个姿态传感器的航向数据。

软件开发基于ADI的集成开发环境VDSPP++^[7]。姿态信息处理的软件方案是通过在主程序中查询接收字数寄存器 C_i -COUNTER状态完成数据段指针移动、串口DMA及系统广播等功能，软件流程图如图9所示。

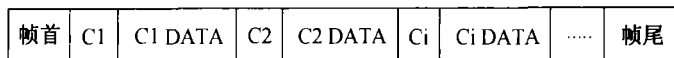


图8 姿态信息处理帧结构

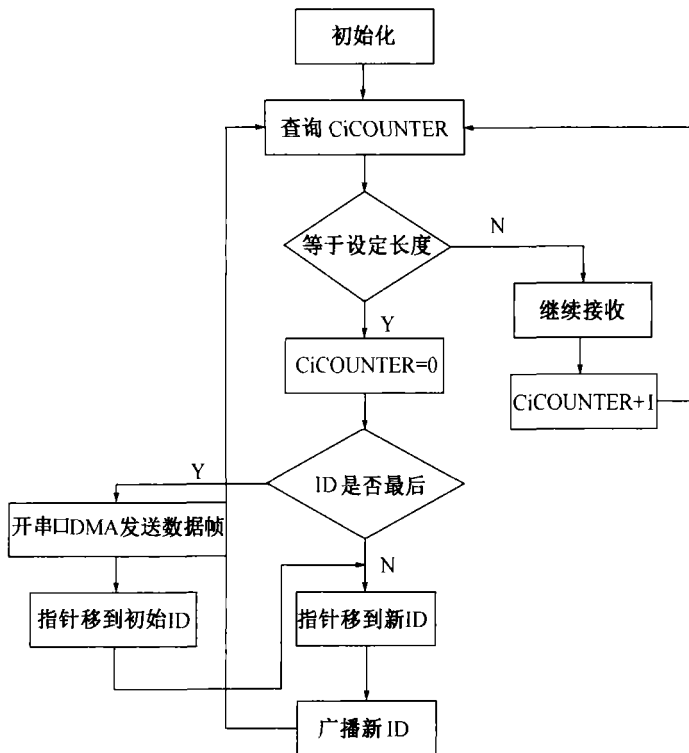


图9 姿态信息处理单元软件流程图

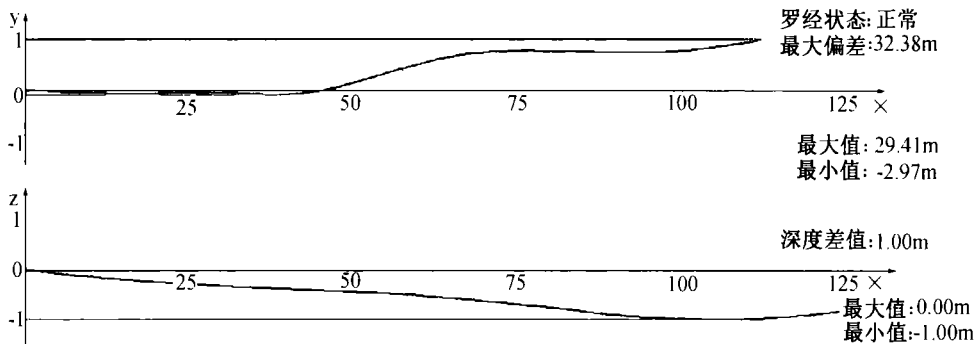
5.2 姿态信息处理单元软件设计

利用高级语言在主机上提取上行数据帧相关数据，编制界面将数据可视化显示，实现方法不再详述。

6 实际应用

本文讨论的系统已经应用在实际的工程项目中，图 10 中显示的是应用 8 个姿态传感器

构成传感器网络对一条警戒声阵列在 X-Y 和 X-Z 平面的阵形分别进行估计的截图。上面曲线显示的是水平方向阵形曲线，下图显示的是垂直方向阵形曲线。图形的显示做了归一化处理，图中的最大偏差和深度差值表示了阵在水平和垂直方向上的最大摆幅，而最大和最小值则表示了阵形距规定正方向上的最大摆幅。图形下方姿态传感器数据信息列表中显示了每个姿态传感器给出的方位纵横摇数值。



罗经批号	罗经 1	罗经 2	罗经 3	罗经 4	罗经 5	罗经 6	罗经 7	罗经 8
Pitch	-0.8	-0.5	-0.3	-0.4	-0.7	-0.9	-0.2	0.6
Roll	9.7	11.0	-3.9	-9.2	-2.8	-7.3	3.6	-3.8
Azimuth	167.9	184.8	171.2	230.4	44.2	358.3	355.2	29.3

图 10 实际应用阵形估计显示界面截图

为了检验姿态传感器阵形估计系统的实际应用效果，我们进行了实验验证。在实验中，我们将声阵放置成不同形状，经过阵形估计后得出拟合阵形，观察拟合阵形与实际阵形的差异并通过常规波束形成比较拟合校正和未经拟合校正对目标方位估计的影响。

6.1 声阵最大水平偏离 2m，阵形呈 S 形

如图 11 所示，△连线表示未经拟合时默认的声阵铺设方向，即没有经过拟合校正时的假定阵形，* 连线表示实际阵形，○ 连线表示拟合阵形。

图 12 显示了拟合校正和未经拟合校正常规波束形成的结果，目标在 80° 方向。实线为

拟合校正后常规波束形成结果，虚线为未经拟合校正的结果。

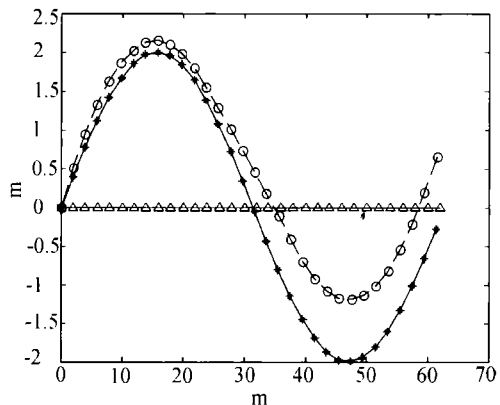


图 11 最大水平偏离 2m 的 S 型阵形估计图

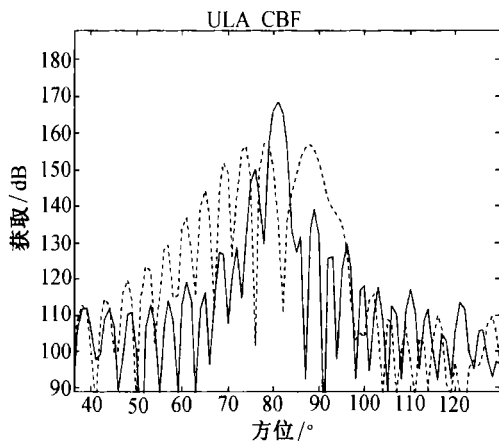


图 12 最大水平偏离 2m 的 S 型阵校正前后常规波束形成结果比较

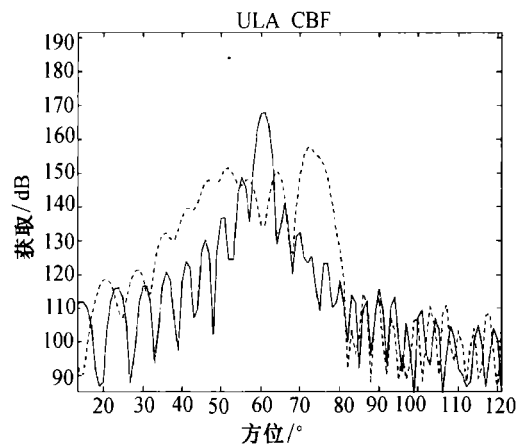


图 14 最大水平偏离 4m 的弧形阵校正前后常规波束形成结果比较

6.1 声阵最大水平偏离 4m, 阵形呈弧形

如图 13 所示, Δ 连线表示未经拟合时默认的声阵铺设方向, 即没有经过拟合校正时的假定阵形, * 连线表示实际阵形, \circ 连线表示拟合阵形。

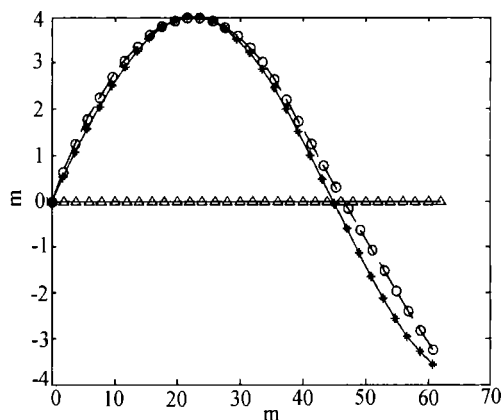


图 13 最大水平偏离 4m 的弧形阵阵形估计图

图 14 显示了拟合校正和未经拟合校正常规波束形成的结果, 目标在 60° 方向。实线为拟合校正后常规波束形成结果, 虚线为未经拟合校正的结果。

7 结束语

本文介绍了通过构建姿态传感器网络实现声阵阵形估计的方法, 实验证明在声阵阵形畸变不大情况下是一种行之有效的办法。

参 考 文 献

- 1 Feng Lu, Evangelos Milios. New Towed-Array Shape-Estimation Scheme for Real-Time Sonar System. IEEE Journal of Oceanic Engineering, July 2003, 28(3).
- 2 Stergiopoulos S. Implementation of adaptive and synthetic-aperture processing schemes processing in integrated active-passive sonar systems. Proc. IEEE, Feb. 1988, 86: 358-396.
- 3 Honeywell Corporation. HMR3000 Digital Compass Module User's Guide.
- 4 Altera Corporation. MAX II Device Handbook.
- 5 MAXIM. +3.3V, $\pm 15\text{kV}$ ESD-Protected, Fail-Safe, Hot-Swap, RS-485/RS-422 Transceivers MAX3070 E-CMAX3079E.
- 6 Analog Devices Inc. ADSP-BF531/ADSP-BF532/ADSP-BF533.
- 7 Analog Devices Inc. Assembler and Preprocessor Manual.