

宽带波束形成在定点 DSP 上的实现

丰 平, 马晓川, 李 璇, 陈模江, 刘大鹏

(中国科学院声学研究所数字系统集成部, 北京 100190)

摘要: 阐述了宽带波束形成算法在定点 DSP 上实现时需要考虑的问题, 讨论了定点方式实现矩阵特征值分解和非线性运算。比较了宽带常规波束形成(CBF)和宽带稳健自适应波束形成(RCB)算法的定点和浮点实现结果, 给出了快速实现和验证定点数字信号处理算法的方法和步骤。通过计算实际数据验证了这些方法的正确性, 可以有效提高在定点 DSP 上开发复杂数字信号处理算法的效率。

关键词: 常规波束形成; 自适应稳健波束形成; 定点矩阵分解

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-02-0206-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.02.019

Implementation of broadband beamformer with fixed-point DSP

FENG Ping, MA Xiao-chuan, LI Xuan, CHEN Mo-jiang, LIU Da-peng

(Integrated Digital System Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Problems about implementing beamforming on fixed-point DSP, such as eigenvalue-decomposition of matrix and non-linear calculation, are discussed and solutions to these problems are given out in this paper. Two methods, conventional beamforming (CBF) and robust Capon beamforming (RCB) implemented with floating-point and fixed-point are compared. Performance of using Jacobi method to calculate the eigenvalue-decomposition of Hermitian matrix with floating-point and fixed-point are compared. Steps to quickly developing signal processing algorithms on fixed-point DSP are briefly described and given out as references for future work.

Key words: conventional beamforming; adaptive robust beamforming; matrix decomposition in fixed-point

1 引言

波束形成在声纳、雷达、无线通信、射电天文学中应用广泛。实际中为了提高波束形成的角度分辨率和计算多普勒频移, 多采用宽带波束形成技术。宽带处理需要将阵列接收信号在频域上分成多个子带, 在每个子带上利用现有的窄带波束形成技术, 比如常规波束形成(CBF)、最小方差无损波束形成(MVDR)、递推最小二乘(RLS)波束形成和稳健波束形成(RCB)^[1-3]等。

波束形成的计算量很大, 一般来说, 难以在单个处理器上实时完成宽带波束形成。文献[4, 5]中提出用多台微机通过分布式计算完成宽带波束形成。随着 DSP 的计算速度不断提高, 很多比较复杂的波束形成算法开始在 DSP 上实现^[6]。定点 DSP 以其较高的频率和较低的价格逐渐得到广泛使用。但是定

点程序的开发难度较大, 因为定点 DSP 没有直接支持复杂运算的指令和库函数。在面对矩阵分解以及非线性函数求解等复杂运算时, 其实现比较困难。

本文在已经开发出的硬件平台^[7]上, 完成了定点的宽带波束形成算法, 解决了矩阵分解和非线性函数的求解问题, 并且提出了一些解决定点计算的精度和溢出问题的方法。

2 宽带波束形成实现结构

波束形成按照实现方式可分为时域实现和频域实现两种方式^[8]。宽带波束形成多在频域实现, 因为在频域上每个子带可用窄带波束形成实现。本文所验证的两种算法就是基于图 1 的频域结构实现的。

实现过程如下: 通道数据首先按一定时间窗大小(本文选 1024 点)做 FFT, 之后抽取一些频点(一般抽取混响附近频点)构成子带做子带波束形成。需要注意的是, 由于阵列方向向量与实际频率有关, 所以不同频点处的方向向量各不相同。为了节省内存, 子带内不同频点处的方向向量用子带中心频率点的方向向量 $\mathbf{a}$ 近似, 避免存储每个频点处的方向向量。

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2009-03-25

基金项目: 国防科工委基础科研资助(A1320070067)、国家自然科学基金资助(60802072)

作者简介: 丰平(1982-), 男, 山西大同人, 博士研究生, 研究方向为阵列信号处理、多 DSP 并行处理系统。

通讯作者: 丰平, E-mail: chanllger@hotmail.com

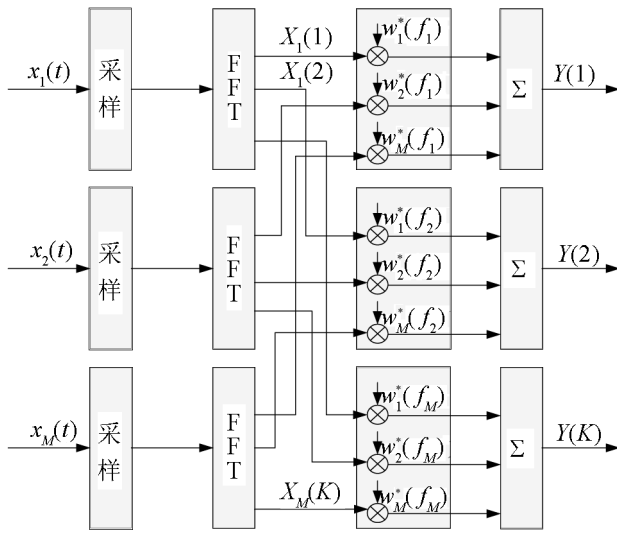


图1 频域宽带波束形成结构
Fig.1 Broadband beamformer in frequency domain

(1) 常规波束形成(CBF)

常规波束形成中, 加权向量 w 的选择取每个子带中心频率所对应的方向向量。即:

$$w = a \quad (1)$$

(2) 稳健自适应波束形成(RCB)

RCB 波束形成是一种对角加载类波束形成, 加权向量 w 可以表示为:

$$w = \alpha (\tilde{R} + \frac{1}{\lambda} I)^{-1} a \quad (2)$$

式中 $\tilde{R}$ 为估计的子带相关矩阵, α 为一个常数。 λ 可以用下式求出:

$$\|(I + \lambda R)^{-1} a\|^2 = \varepsilon \quad (3)$$

式中 ε 为事先给定的常数, 表示估计方向向量 a 与实际方向向量 a_0 的允许误差范围, 即:

$$\|a - a_0\|^2 \leq \varepsilon \quad (4)$$

实际中, 式(2)和(3)都可由相关矩阵的特征分解得到更为简便的表达式。

3 宽带波束形成的浮点实现

定点算法程序的开发需要经过三个步骤: (1) 在 MATLAB 上完成算法原型验证。(2) 完成算法的浮点实现(一般用 C 语言)。(3) 把浮点实现转化为定点实现。第二步和第三步比较关键, 第二步需要注意到在 DSP 上实现算法和在微机上实现算法有很大的不同, 在 DSP 上实现要综合考虑占用内存大小、计算复杂性问题, 所以尽管第二步浮点 C 代码的开发在微机上完成, 但是要尽量兼顾到 DSP 上的实现, 使得完成的代码只需要经过很小的改动就可以在 DSP 上实现。同时还要完成对程序中所有变量的大小范围统计, 从而为第

三步转化为定点实现提供必要的定标参考。

本文按照了上述三个步骤完成了算法开发。在浮点 C 代码开发中, 需要注意以下几点:

(1) 节约内存空间使用, 避免过大的内存空间分配, 以免转化后的定点程序占用的内存超过 DSP 芯片的内部 RAM 大小。

(2) 宽带波束形成需要计算的量都为复变量和矩阵, 定义合适的复数数据结构和矩阵数据结构有利于算法的开发。

(3) 尽量避免定点 DSP 不直接支持的运算, 比如开方和除法。为此, 可先构造对数表和指数表, 把开方和除法运算转换为移位和减法运算。

(4) 构造正弦函数表, 用查表法代替 C 库函数调用求得三角函数值。

(5) 上位机用到的 ANSI C 编译器和 DSP 的 C 编译器有一些区别, 比如 DSP 的 C 编译器不会默认把全局变量赋值为 0。

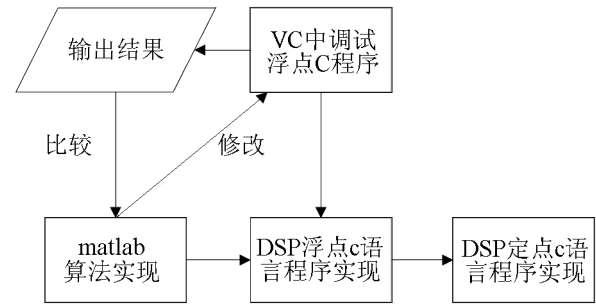


图2 定点 DSP 算法开发过程
Fig.2 Development flow of fixed-point algorithm

4 宽带波束形成的定点 DSP 实现

定点实现首先需要考虑数的定标问题, 通常用 Q 格式数来方便定点数的表示。在浮点 C 程序开发完成后需要用实际的数据作为输入激励仿真算法, 并统计程序中变量的数值范围。根据此数值范围, 确定合适的定点格式。一般常用定点的分数表示法, 如 Q15(16 位 DSP 上), Q31(32 位 DSP 上)。采用分数表示法的优点是两个小数相乘结果仍是一个小数, 所以在乘法运算中不会发生溢出。但是由于 RCB 算法涉及到倒数运算, 所以不可能用定点的整数或是分数标识法, 只能用通用的 Q 格式数来定标。定点运算中需要考虑几点:

(1) 加法运算要避免溢出。一种可行的策略是在做加法之前, 先把两个数各自右移一位, 以保证结果不会超出定点整数部分表示范围。

(2) 不同 Q 格式的定点数相加, 需要将两者的定标值调整一致。不同 Q 格式的定点数可以直接相

乘,如进行乘法运算,需要将结果的 Q 格式和两个乘数的 Q 格式进行移位调整。

(3) 乘法运算结果的二进制比特长度为两个乘数二进制比特长度的和,所以运算结果应该只保留高位字节,且要去掉最高位,因为它是一个无用的符号扩展位。

(4) 乘法运算在能够保证精度和动态范围的条件下尽量使用 16 位数据相乘,因为 DSP 在一个周期内可以完成 8 次 16 位数的相乘,但只能完成 2 次 32 位数相乘。

波束形成算法的结果是通道加权值 w ,注意到加权值幅度的变化对波束形成器的输出信干噪比 SINR 没有影响,因此在程序中只需要保持加权值的相对幅度大小即可,所以在运算后不需要保存权向量 w 的定标值,只需要保证运算没有溢出。实际中,需要把权向量的模归一化,使得输出无比例模糊,即满足 $w^H a = 1$ 。

在自适应波束形成算法中,计算通道数据 FFT 和相关矩阵的特征值分解占用了绝大部分计算量。表 1 给出了在 TMS320C6455 仿真器上用 Jacobi 迭代计算浮点特征分解和定点特征分解所需的时钟周期数。由表 1 可见,用定点实现矩阵分解比直接在定点 DSP 上完成浮点矩阵分解效率提高 8~10 倍。

表 1 Jacobi 算法在 6455 DSP 上的 profile 结果
Table 1 Profile results of Jacobi on 6455 DSP

矩阵阶数	计算所需时间周期数	
	浮点	定点
16	11464729	1238624
32	95456829	9863274
72	994104473	125689478

5 实验结果

本文采用一段实测数据来验证算法在微机和 DSP 上的浮点和定点实现。对通道数据分别做 FFT 后,取出所需子带,分别完成频域常规波束形成和 RCB 波束形成。图 3 为单个通道接收数据的时间频谱图。目标完全淹没在混响和噪声中。图 4 为在微机上用 VC 开发的浮点程序计算得到的宽带常规波束形成结果,可以明显地看到在混响频率右边有连续三个时间窗(图中白色圆圈)的目标回波。图 5 为在 TMS320C6455 定点 DSP 上实现宽带常规波束形成所得的结果。可以看到定点计算结果与浮点计算结果吻合得非常好,为了避免溢出,定点加法过程中做了幅度缩小,所以 DSP 所得的结果幅度值要小于浮点所得结果幅度值。定点和浮点 RCB 波束

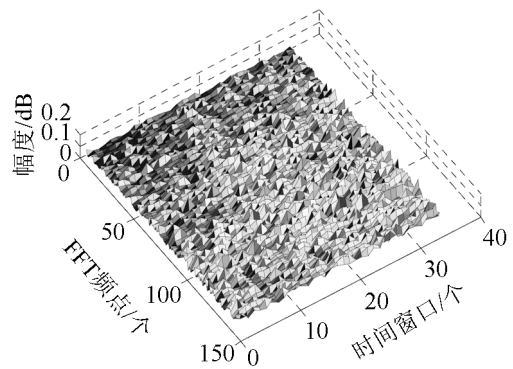


图 3 单通道数据时频图
Fig.3 Time-frequency spectrum of single channel data

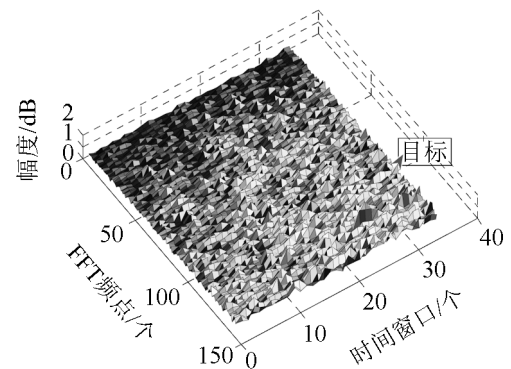


图 4 浮点宽带常规波束形成时频图(VC)
Fig.4 Time-frequency spectrum of conventional beamformer in floating-point

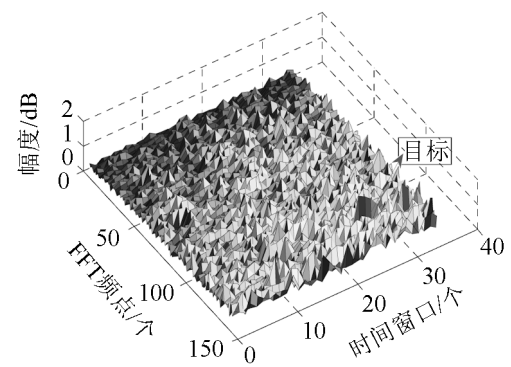


图 5 定点宽带常规波束形成时频图(DSP)
Fig.5 Time-frequency spectrum of conventional beamformer in fixed-point

形成也有类似的结果。

6 结论

本文论述了在定点 DSP 上实现宽带波束形成遇到的问题和解决办法,这些方法经过工程实际验证,可以有效提高在定点 DSP 上开发复杂数字信号处理算法的效率。通过对比两种宽带波束形成的浮点和定点实现结果,验证了这些方法的正确性。应该指出,对于定点算法程序,还可以在很多方面继

续优化算法实现以提高效率, 比如使用汇编程序编写关键代码, 限制存储器访问冲突以缩短数据存储读取时间, 使用计算效率比较高的矩阵特征分解算法(如 QR 分解)等。

参 考 文 献

- [1] LI J, Stoica P, Wang Z. Doubly constrained robust capon beamformer[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, **52**: 17-30.
- [2] LI J, Stoica P, Yardibi T. Covariance beamforming, covariance matrix tapers and matrix beamforming are related[J]. Electronics Letters, 2008, **44**: 22-23.
- [3] 王静, 黄清. 稳健宽带自适应波束形成[J]. 声学技术, 2003, **22**(2): 90-94.
WANG Jing, HUANG Qing. Robust broadband adaptive beam forming[J]. Technical Acoustics, 2003, **22**(2): 90-94.
- [4] GEORGE A D, GARCIA J, KIM K, SINHA P. Distributed parallel processing techniques for adaptive sonar beamforming[R]. HCS Research Lab, 2000.
- [5] SINHA P, GEORGE A D, KIM K. Parallel algorithms for robust broadband MVDR beamforming[R]. High-performance Computing and Simulation (HCS) Research Laboratory Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, 2000.
- [6] Claesson I, Nordholm S E, Bengtsson B A, P Eriksson. A multi-DSP implementation of a broad-band adaptive beamformer for use in a hands-free mobile radio telephone[J]. IEEE Transactions on Vehicular echnology, 1991, **40**(9): 221-234.
- [7] 陈模江, 马晓川, 丰平. 基于 TI DSPs 的稳健自适应波束形成系统的设计[J]. 信号处理, 2006, **23**(4A): 57-60.
CHEN Mojiang, MA Xiaochuan, FENG Ping. Design of a robust adaptive beamforming system using TI DSPs[J]. Signal Processing, 2006, **23**(4A): 57-60.
- [8] 鄢社锋, 马晓川. 宽带波束形成器的设计与实现[J]. 声学学报, 2008, **33**(4): 316-326.
YAN Shefeng, MA Xiaochuan. Design and Implementations of Broadband Beamformers[J]. ACTA. ACUSTICA, 2008, **33**(4): 316-326.