

doi: 10.3788/gzxb20124106.0744

# 波前编码双共轭梯度平方稳定解码算法及其 TMS320DM642 平台的实现

隋元明<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 刘钦晓<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 余飞鸿<sup>1</sup>, 陈燕平<sup>2</sup>

(1 浙江大学 光电信息工程学系, 杭州 310027)

(2 宁波工程学院 科技处, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**波前编码是一种新型的光学-数字混合二次成像系统,采用三次光学编码相位板可以得到系统的非对称点扩散函数和相当景深内模糊程度一致的中间图像.本文利用空间域光学成像模型,结合反镜像边界束缚条件以及矩阵的直积分解,提出一种基于双共轭梯度平方稳定算法(Bi-CGSTAB)的图像复原算法实现波前编码系统的数字解码.该算法具有计算量小、计算速度快,几乎没有边界效应等优点.在此基础上结合 TMS320DM642 平台并行计算的特点,将新的算法重新优化并移植到 TMS320DM642 平台上.整个平台由图像采集模块、图像显示模块以及外部存储器等模块组成.通过专门设计的光学系统,分别对物距为 1m、5m 和 10m 处的物体以及人像进行成像.对中间模糊像的恢复实验结果表明,新的算法在 TMS320DM642 平台上图像复原速度快,效果好,为波前编码系统的真正便携和实用提供了可能.

**关键词:**波前编码; 三次相位板; 双共轭梯度平方稳定算法; 反镜像边界条件

**中图分类号:** O241.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)06-0744-7

## 0 引言

波前编码系统是一种采用三次相位板对成像系统进行光学编码,再利用数字解码实现大景深清晰成像的系统<sup>[1-4]</sup>,它的优点是对物距不敏感,可以大幅度提高光学系统的景深<sup>[5]</sup>.但是经过波前编码系统成像后得到的图像是模糊的,要用专门的算法来恢复出清晰图像,这个恢复的过程就是解卷积.解卷积的过程在数学上看是一个反问题,需要开发稳定的算法来保证反卷积过程的有效性同时抑制反问题处理中噪音的放大.除此之外,图像复原由于图像边界的突然截断,在恢复过程中无法得知图像边界外部的信息对光学系统所成图像的影响,通常会带来边界上图像的振铃效应和信息丢失现象.为了保持图像边界的真实性,需要结合边界处理技术,来抑制振铃效应的产生<sup>[6-7]</sup>.

目前波前编码技术仍处于实验室阶段,大部份研究集中在相位板结构以及高速 PC 平台有效算法的研究上<sup>[8-9]</sup>.为了能够真正实现波前编码系统的便携和实用化,波前编码解码算法在移动数据处理平台上的实现显得越来越重要. DSP 在数字信号处理

方面具有较大优势,同时其频率很高,运行速度很快,因此本文选择将算法在 DSP 平台上实现.

本文介绍了波前编码相关理论,给出了空间域波前编码系统的成像模型,在结合反镜像边界条件基础上,首次提出了双共轭梯度平方稳定算法用于波前编码图像恢复,并成功将其应用到 TMS320DM642 平台.实验结果表明该算法在该平台稳定有效,完整地实现编码图像的去卷积,实现了波前编码技术的实用化与便携化.

## 1 双共轭梯度平方稳定算法

### 1.1 空间域成像模型

通过将设计好的三次相位板置于波前编码光学系统的光瞳面上,在像面上得到对焦距不敏感的中间模糊像<sup>[10]</sup>.该中间像由光电转换器件接收,再经过硬件电路转换成数字信号,最后经过软件系统进行解码计算输出.

光学系统成像的过程就是一个卷积的过程,经过卷积得到模糊图像有两种恢复算法,一种是频域恢复算法,另一种是空域恢复算法.维纳滤波是经典的频域恢复算法,也是目前比较常用的算法.其优点

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 60777002)和宁波市自然科学基金(No. 200801A6003005)资助

**第一作者:**隋元明(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学仪器、图像处理等. Email: 20930085@zju.edu.cn

**责任作者/导师(通讯作者):**余飞鸿(1964-),男,教授,博导,主要研究方向为光学设计、图像处理、液晶投影等. Email: feihong@zju.edu.cn

**收稿日期:**2011-11-30; **修回日期:**2012-02-23

计算效率高. 但是其缺点也很明显,即在恢复过程中会带来图像细节丢失<sup>[11]</sup>. 本文研究将采用空间域图像恢复算法以避免这种丢失.

假设成像过程是一个线性模糊过程,清晰图像  $X$  对应的模糊图像为  $B$ ,那么存在一个矩阵  $\mathbf{K}$  满足式(1).

$$\mathbf{K}\mathbf{x}=\mathbf{b} \quad (1)$$

式中矢量  $\mathbf{b}$  和  $\mathbf{x}$  分别为图像  $B$  和  $X$  的列展开. 式(1)就是成像的正向线性模糊过程,其中  $\mathbf{K}$  为线性模糊矩阵,它跟系统的点扩散函数以及边界条件相关. 通过式(1)的求解  $X$  的过程就是空间域的图像恢复过程<sup>[12]</sup>.

## 1.2 反镜像边界条件

通常在建立数学模型时,要充分考虑图像的边界情况,做出合理的假设,并引入相应的处理对策. 也就是说在考虑物面的图像时,不仅要考虑像面上得到的图像信息,还要对该图像信息的边界情况做出一定的假设,最终得到边界处理后的图像,可以用式(2)表示.

$$X_B = \begin{bmatrix} X_{B_1} & X_{B_2} & X_{B_3} \\ X_{B_4} & X & X_{B_5} \\ X_{B_6} & X_{B_7} & X_{B_8} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中  $X$  表示实际拍摄到的图像区域相对应的物平面信息,  $X_{B_1} \cdots X_{B_8}$  表示给出的边界处理信息. 根据  $X_{B_1} \cdots X_{B_8}$  可以给出不同的图像复原的边界条件. 反镜像边界的结构线性模糊矩阵  $\mathbf{K}$  是由式(3)表示为

$$\mathbf{K} = \text{Toep}(\mathbf{T}, 2) - \text{Toep}(\mathbf{H}, 2) + \text{Toep}(\mathbf{R}, 2) - \text{Hank}(\mathbf{T}, 2) + \text{Hank}(\mathbf{H}, 2) - \text{Hank}(\mathbf{R}, 2) + \text{R2corr}(\mathbf{T}, 2) - \text{R2corr}(\mathbf{H}, 2) + \text{R2corr}(\mathbf{R}, 2) \quad (3)$$

式中, Toep 矩阵为

$$\text{toep}(\mathbf{a}, 2) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_1 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_1 & 0 \\ \mathbf{a}_4 & \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_1 \\ 0 & \mathbf{a}_4 & \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hank 矩阵为

$$\text{hank}(\mathbf{a}, 2) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_3 & \mathbf{a}_4 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{a}_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

R2corr 矩阵为

$$\text{R2corr}(\mathbf{a}, 2) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_3 + 2\mathbf{a}_3 + 2\mathbf{a}_4 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}_3 + 2\mathbf{a}_4 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}_4 & 0 & 0 & \mathbf{a}_1 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{a}_2 + 2\mathbf{a}_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

所以可以说在反镜像边界条件下,得到的线性模糊矩阵  $\mathbf{K}$  是一个 BTHR2THR2B 矩阵<sup>[13]</sup>.

## 1.3 直积分解简介

在用反镜像边界条件处理后,模糊矩阵  $\mathbf{K}$  会变得非常庞大. 对于一幅  $n \times n$  的图像,其模糊矩阵  $\mathbf{K}$  的大小为  $n^2 \times n^2$ . 这么大的矩阵无论是存储还是计算都相当困难. 采用直积(又叫克罗内克乘积)分解近似的办法,可以将其分解为两个较小的矩阵,极大地降低计算的难度.

假定  $\mathbf{A}_1 \in \mathbf{C}^{m \times n}$ ,  $\mathbf{A}_2 \in \mathbf{C}^{p \times q}$  为两个矩阵,并且  $(\mathbf{A}_1)_{ij} = \mathbf{a}_{ij}$ , 那么直积  $\mathbf{K} = \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{A}_2 \in \mathbf{C}^{mp \times nq}$  可以定义为

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11}\mathbf{A}_2 & \mathbf{a}_{12}\mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{a}_{1n}\mathbf{A}_2 \\ \mathbf{a}_{21}\mathbf{A}_2 & \mathbf{a}_{22}\mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{a}_{2n}\mathbf{A}_2 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_{m1}\mathbf{A}_2 & \mathbf{a}_{m2}\mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{a}_{mn}\mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

直积具有:  $\mathbf{A}_1 \mathbf{X} \mathbf{A}_2^T = \mathbf{B} \Leftrightarrow (\mathbf{A}_2 \otimes \mathbf{A}_1) \text{vec}(\mathbf{X}) = \text{vec}(\mathbf{B})$  的性质. 利用该性质有

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{X} \mathbf{A}_2^T = \mathbf{B} \Leftrightarrow \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{A}_1 \otimes \mathbf{A}_2 = \mathbf{K} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ ,  $\mathbf{x}, \mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ ,  $\text{vec}(\mathbf{X})$  是通过将矩阵  $\mathbf{X}$  的各行堆放成一个向量  $\mathbf{x}$  而形成的 ( $\text{vec}(\mathbf{X}) = \mathbf{x}$ ).

利用式(8),离散化的噪音污染的成像模型可以表示成式(9)的矩阵相乘形式.

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}_1 \mathbf{X} \mathbf{H}_2^T + \mathbf{N} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{G}$  为系统输出图像矩阵,  $\mathbf{X}$  为原始图像矩阵,  $\mathbf{N}$  为附加噪音矩阵,  $\mathbf{H}_1$  和  $\mathbf{H}_2$  代表点扩散函数矩阵 ( $\mathbf{H}_1 \otimes \mathbf{H}_2^T = \mathbf{H}$ ). 因此,根据式(8),通过矩阵的直积分解,将图像的恢复由式(1)的求解转化为式(9)的求解.

## 1.4 双共轭梯度平方稳定图像复原算法

双共轭梯度平方稳定算法(Bi-CGSTAB)是一种基于克雷洛夫子空间算法. 对于一个给定的  $n$  阶矩阵  $\mathbf{A}$  和一个向量  $\mathbf{r}^{(0)}$ ,  $\mathcal{R}_m(\mathbf{A}, \mathbf{r}^{(0)}) = \text{span}(\mathbf{r}^{(0)}, \mathbf{A}\mathbf{r}^{(0)}, \mathbf{A}^2\mathbf{r}^{(0)}, \cdots, \mathbf{A}^{m-1}\mathbf{r}^{(0)})$  为  $m$  维克雷洛夫子空间,一般可以近似认为  $\mathbf{A}\mathbf{x}^{(m)} \approx \mathbf{b}$ , 所以

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \approx \mathbf{x}^{(m)} = \mathbf{x}^{(0)} + q_{m-1}(\mathbf{A})\mathbf{r}^{(0)} \quad (10)$$

利用式(10)在空间内迭代寻找近似解是克雷洛夫方法的主要思想,通常残向量和方向向量的不同构建方法形成了不同的算法,也决定了算法的计算复杂度及其计算效率. 双共轭梯度方法中,残向量和方向向量定义为:  $\mathbf{r}^{(j)} = \phi_j(\mathbf{A})\mathbf{r}^{(0)}$ ,  $\mathbf{r}_i^{(j)} = \phi_j(\mathbf{A}^T)\mathbf{r}_i^{(0)}$ ,  $\mathbf{s}^{(j)} = \pi_j(\mathbf{A})\mathbf{r}^{(0)}$  以及  $\mathbf{s}_i^{(j)} = \pi_j(\mathbf{A}^T)\mathbf{r}_i^{(0)}$ . 因此

$$\begin{aligned} \phi_{j+1}(\epsilon) &= \phi_j(\epsilon) - \alpha_j \epsilon \pi_j(\lambda) \\ \pi_{j+1}(\epsilon) &= \varphi_{j+1}(\lambda) + \beta_j \pi_j(\lambda) \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\phi_j$  和  $\pi_j$  是  $j$  阶多项式,并且  $\phi_j(0) = 1$ . 可以发

现,定义和计算  $\mathbf{A}^T$  的残  $\mathbf{A}^T$  向量不利于高效计算,通过定义嵌套多项式  $\psi_j$  来避免这种操作: $\psi_0(\epsilon) = 1, \psi_{j+1}(\epsilon) = (1 - \mu_j \epsilon) \psi_j(\epsilon)$ ,其中  $\mu_j$  为待定参量,那么

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)} &= \psi_j(\mathbf{A}) \phi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)} \\ \mathbf{p}^{(j)} &= \psi_j(\mathbf{A}) \pi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)} \end{aligned} \quad (12)$$

将  $\psi_j$  代入式(12)有

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)} &= (1 - \mu_j \mathbf{A}) (\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)} - \alpha_j \mathbf{A} \mathbf{p}^{(j)}) \\ \mathbf{p}^{(j+1)} &= \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)} + \beta_j (\mathbf{p}^{(j)} - \mu_j \mathbf{A} \mathbf{p}^{(j)}) \\ \mathbf{q}^{(j)} &= \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)} - \alpha_j \mathbf{A} \mathbf{p}^{(j)} \end{aligned} \quad (13)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha_j &= \frac{(\varphi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \varphi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})}{(\mathbf{A} \pi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \pi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})} = \\ &= \frac{(\varphi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \pi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})}{(\mathbf{A} \pi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \pi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})} = \\ &= \frac{(\varphi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \psi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})}{(\mathbf{A} \pi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \psi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})} = \frac{(\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)}, \mathbf{r}_t^{(0)})}{(\mathbf{A} \mathbf{p}^{(j)}, \mathbf{r}_t^{(0)})}, \\ \beta_j &= \frac{(\varphi_{j+1}(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \varphi_{j+1}(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})}{(\varphi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \varphi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)})} = \\ &= \frac{(\varphi_{j+1}(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \psi_{j+1}(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)}) \alpha_j}{(\varphi_j(\mathbf{A}) \mathbf{r}^{(0)}, \psi_j(\mathbf{A}^T) \mathbf{r}_t^{(0)}) \mu_j} = \frac{(\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)}, \mathbf{r}_t^{(0)}) \alpha_j}{(\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)}, \mathbf{r}_t^{(0)}) \mu_j}, \\ \mu_j &= \frac{(\mathbf{A} \mathbf{q}^{(j)}, \mathbf{q}^{(j)})}{(\mathbf{A} \mathbf{q}^{(j)}, \mathbf{A} \mathbf{q}^{(j)})}. \end{aligned}$$

可以保证  $\mathbf{r}^{(j)} = \mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}^{(j)} \perp \mathcal{R}_j(\mathbf{A}^T, \mathbf{r}_t^{(0)})$ , 并且  $\|\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)}\|_2$  尽量小,以找到最佳近似解.

基于反镜像边界条件的双共轭梯度平方稳定算法的计算步骤如下:

步骤 1: 选择  $\mathbf{X}^{(0)}$ , 计算  $\mathbf{r}_{\text{STA}}^0 = \mathbf{G} - \mathbf{H}_1 \mathbf{X}^{(0)} \mathbf{H}_2^T$ , 选择任意矩阵  $\mathbf{r}_t^{(0)}$ , 令  $\mathbf{p}^{(0)} = \mathbf{r}_t^{(0)}$ ,  $j=0$ .

步骤 2: 计算  $\alpha_j = (\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)}, \mathbf{r}_t^{(0)}) / (\mathbf{H}_1 \mathbf{p}^{(j)} \mathbf{H}_2^T, \mathbf{r}_t^{(0)})$ ,  $\mathbf{q}^{(j)} = \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)} - \alpha_j \mathbf{H}_1 \mathbf{p}^{(j)} \mathbf{H}_2^T$ .

步骤 3: 计算  $\mu_j = (\mathbf{H}_1 \mathbf{q}^{(j)} \mathbf{H}_2^T, \mathbf{q}^{(j)}) / (\mathbf{H}_1 \mathbf{q}^{(j)} \mathbf{H}_2^T, \mathbf{H}_1 \mathbf{q}^{(j)} \mathbf{H}_2^T)$ .

步骤 4: 计算  $\mathbf{X}^{(j+1)} = \mathbf{X}^{(j)} + \alpha_j \mathbf{p}^{(j)} + \mu_j \mathbf{q}^{(j)}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)} = \mathbf{q}^{(j)} - \mu_j \mathbf{H}_1 \mathbf{q}^{(j)} \mathbf{H}_2^T$ . 如果  $\mathbf{X}^{(j+1)}$  到达预定准确度则停止.

步骤 5: 计算  $\beta_j = ((\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j+1)}, \mathbf{r}_t^{(0)}) / (\mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)}, \mathbf{r}_t^{(0)})) (\alpha_j / \mu_j)$ .

步骤 6: 计算  $\mathbf{p}^{(j+1)} = \mathbf{r}_{\text{STA}}^{(j)} + \beta_j (\mathbf{p}^{(j)} - \mu_j \mathbf{H}_1 \mathbf{q}^{(j)} \mathbf{H}_2^T)$ ,  $j=j+1$ , 转到第 2 步.

## 2 嵌入式平台及算法实现

上面第 1 部分给出的结合了反镜像边界条件的双共轭梯度平方稳定算法,由于采用了空间域成像模型,算法在实现的过程中涉及到大量的矩阵运算,包括矩阵乘法、奇异值分解、直积分解等,因此,高效率的矩阵运算是保证双共轭梯度平方稳定算法实现的前提.

### 2.1 平台简介

如图 1 所示,完整的系统包括三部分:波前编码光学系统、光电转换电路以及嵌入式处理模块.波前编码系统将目标物体在像面上成等程度的模糊像,经过光电转换电路将中间像转化为数字化信号,该数字化信号接着输入到嵌入式处理系统进行采集同解码处理,最后将恢复到的清晰图像交给用户.

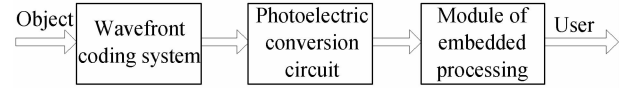


图 1 平台工作框图

Fig. 1 The block diagram of platform

### 2.2 嵌入式处理模块

嵌入式处理模块是整个系统的核心,负责图像的采集、处理和显示. DM642 是德州仪器公司基于 C64x 内核的 32 位高性能定点 DSP, 峰值计算速度高达 5 760 MIPS. 作为专门面对影像处理的 DSP, DM642 拥有 3 个视频口, 可轻松实现视频采集与显示功能. 嵌入式处理模块整体框图如图 2.

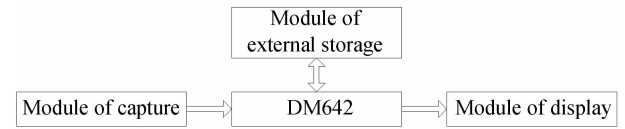


图 2 嵌入式处理模块

Fig. 2 The module of embedded processing

图像采集模块负责同光电转换器件通信,并通过视频口将图像数据采集进来. 图像显示模块负责配置显示通讯芯片,然后将处理好的图像数据通过视频口输出. 外部存储器模块包括 SDRAM 和 FLASH, 负责数据和程序的存储. 模块的核心 DM642 负责运行算法程序.

嵌入式处理模块的工作流程如下: 系统上电复位后, 程序从 Flash 自举, 完成程序加载和系统初始化. DM642 通过 I2C 总线对视频编码芯片和视频解码芯片进行配置, 配置好之后启动视频的采集与显示. 采集到的视频数据通过 VP1 送入 DM642, 当数据量达到视频口 FIFO 中设定的阈值后通过 EDMA 送入片外的 SDRAM 中. 当 SDRAM 中的数据达到一帧后, 对内存中的数据进行解卷积运算. 数据处理完之后存入 SDRAM 中的另一地址区域, DSP 发出信号启动 EDMA 将数据送入 VP2 的 FIFO 中, 再通过视频编码芯片输出.

### 2.3 软件实现

双共轭梯度平方稳定算法的流程图如图 3 所示. 算法分为两部分: 第一部分是根据反镜像边界条件对模糊矩阵  $\mathbf{K}$  进行直积分解; 第二部分是双共轭梯度平方稳定算法的实现. 由于系统在计算中所用

到的所有 PSF 都是一样的,因此只需在第一次运算中对 PSF 进行处理,并将结果保存.以后每次计算时直接调用即可,可以节约大量的空间和时间.

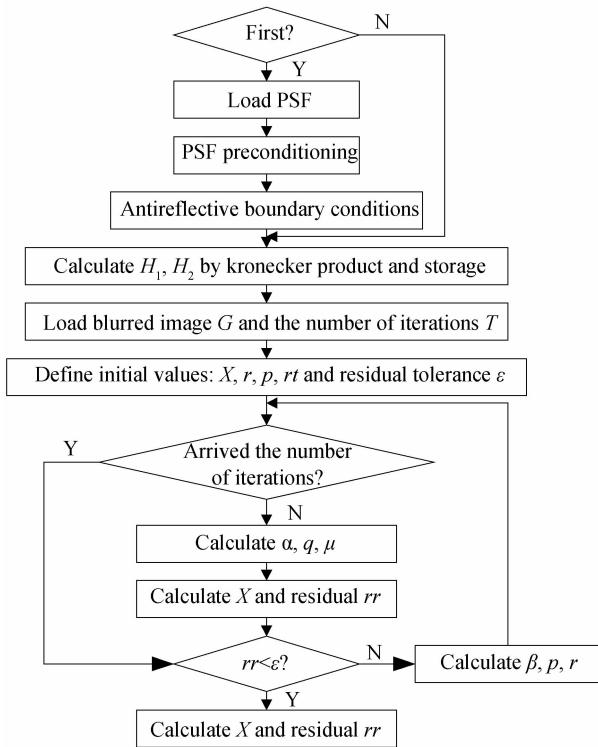


图3 双共轭梯度平方稳定算法流程  
Fig.3 The flowchart of Bi-CGSTAB Algorithm

按照上述流程在 DM642 平台上编制原始的波前编码图像恢复处理程序,在此基础上还需要对程序特别针对 DM642 平台进行相应的优化,以保证程序的性能能够达到要求.

完整的 DSP 应用程序的开发过程如图 4,主要包括三部分:功能实现、C 代码优化和汇编优化.功能实现部分一般采用 C 语言,这是因为 C 语言的程序易于维护,开发效率也比汇编要高.优化部分分为 C 代码优化和汇编代码优化两部分.首先对程序进行分析,然后对 C 代码优化,如果 C 代码优化后的程序还打不到预期的结果,那么就对程序进行汇编优化.一般来讲,对 C 代码进行充分的优化后,程序的性能已经能够达到要求.

对于 C 代码,采用的优化手段有:

1)选择合适的编译选项.使用 -o3 编译选项,考虑 -mt 编译选项.当使用 -o3 选项时,编译器会尽可能的采用软件流水技术对代码进行优化.所谓的软件流水是指通过编排循环指令,使得循环可以并行运行多个迭代,这是一种用来优化循环的技术.软件流水的示意图如图 5.图中,每个循环可以用 A, B, C, D, E 五个阶段来表示,同一时间最多可执行 5 个循环迭代.图中的阴影部分为循环核(kernel),在循环核中,循环的 5 个阶段可以并行执行.循环核之前

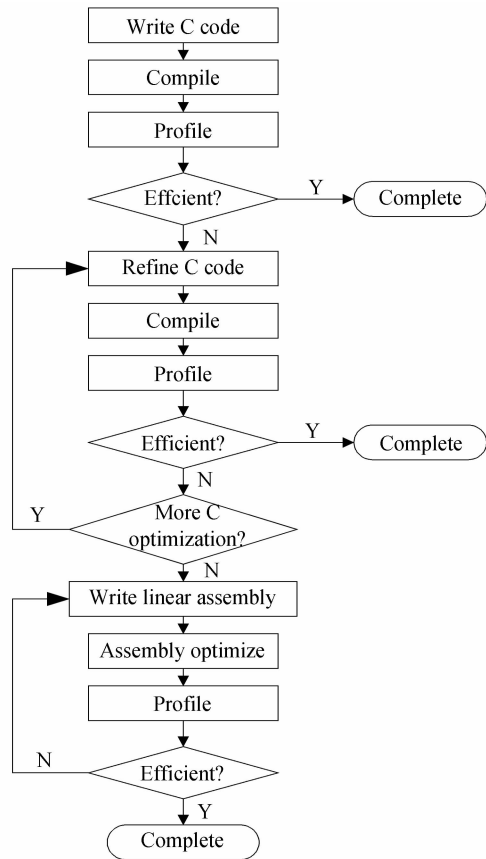


图4 DSP 程序开发流程  
Fig.4 The flowchart of DSP program development

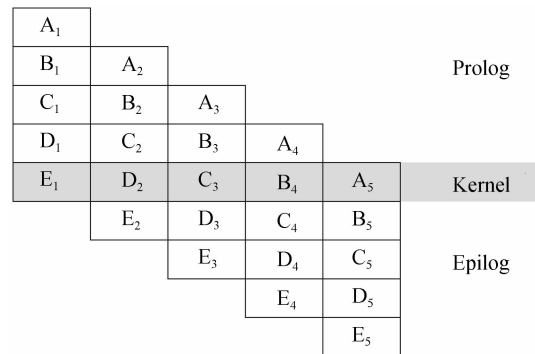


图5 软件流水示意图  
Fig.5 The diagram of software pipeline

的部分叫做循环填充(prolog),循环核之后的部分叫做循环排空(epilog).

2)使用 restrict 关键词来降低循环传递依赖约束(Loop Carried Dependence Bound).当函数中的指针指向同一块内存缓冲区时,会增加循环的传递依赖约束,而循环传递依赖约束的增加会导致 DSP 花费更多的时钟周期来完成一个循环. restrict 关键词可以通知编译器,对于给定的函数,其指针不会指向同一块内存缓冲区,从而降低了系统的循环传递依赖约束.

### 3 实验结果

为完成实验,设计了一个大景深大视场波前编

码镜头,其光学结构如图 6. 在系统的光瞳面上放置一块特别设计的三次相位板,经相位板调制得到系统的中间模糊像,并通过光电转换器接收此模糊像. 在表 1 给出了该系统的主要光学参量. 光电转换器件采用 Sony 公司生产的 2/3 英寸的 ICX285AL 型号的黑白 CCD,它的最大分辨率达到 79 线对/毫米.

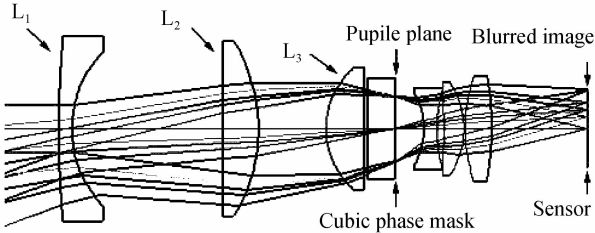


图 6 针对 DM642 特别设计的波前编码光学系统  
Fig. 6 The particularly designed wavefront coding system for DM642

表 1 大景深大视场波前编码镜头的主要光学参量表  
Table 1 Chief optical parameters of deep-field and large-viewing angle wavefront coding lens

Effective focal length	Aperture	Angle of vision	The biggest angle of incidence in the pupil plane
12 mm	2.2	50.3°	13°

图 7 给出了系统的点扩散函数. 将系统的点扩散函数做反镜像边界条件以及直积近似,得到模糊矩阵  $K$ . 然后采用 Bi-CGSTAB 算法反卷积,即可得到恢复后的图像.

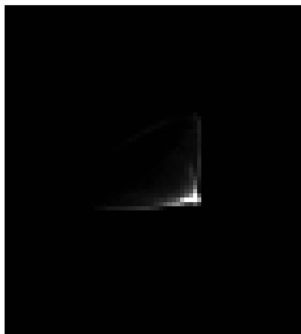


图 7 系统点扩散函数  
Fig. 7 The point spread function of system

图 8、图 9 和图 10 分别给出了物距为 1 m、5 m 和 10 m 的物体的中间模糊像以及由 Bi-CGSTAB 算法恢复的清晰像,图像大小为  $200 \times 200$  个像素. 子图(a)表示的是波前编码系统所成的模糊像;(b)表示的是采用 Bi-CGSTAB 算法得到的恢复图像. 对于 1 m 处的物体而言,恢复图像可以清晰地看到书上的文字. 对于 5 m 和 10 m 处的人像,可以看到恢复图像很清晰,在保留了图像细节同时避免了边界效应. 对分辨率大的图像,可以将图像分解成小的子图像. 分别对每个子图像求解,将得到的清晰子图像拼接在一起即可得到完整的恢复图像.

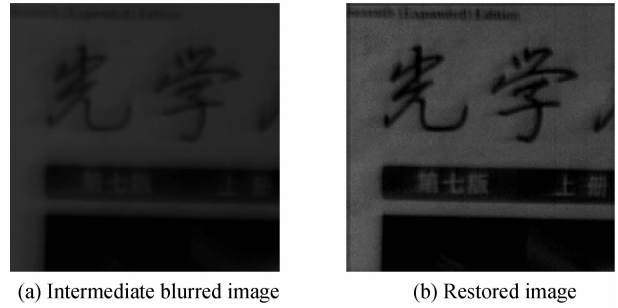


图 8 物距 1 m 处物体恢复图  
Fig. 8 Results restored of object at 1m object distance

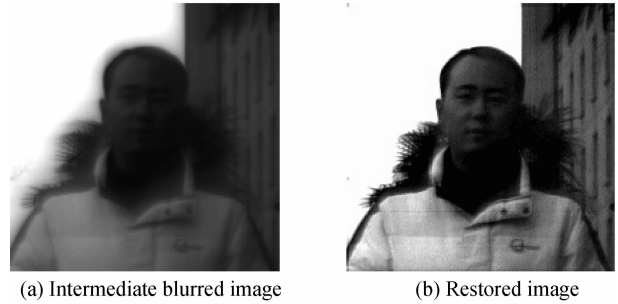


图 9 物距 5 m 处物体恢复图  
Fig. 9 Results restored of object at 5m object distance

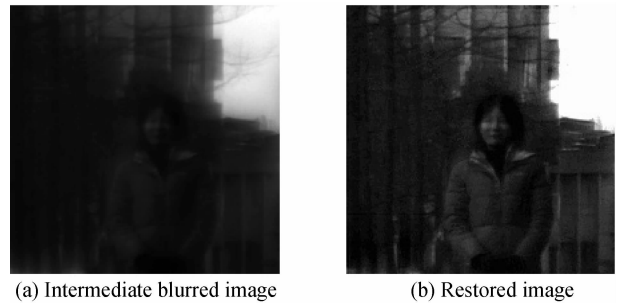


图 10 物距 10 m 处人像恢复图  
Fig. 10 Results restored of people at 10m object distance

图 11 给出了 Bi-CGSTAB 法与截断奇异值分解法 (TSVD) 恢复结果的比较图. 可以看出,用

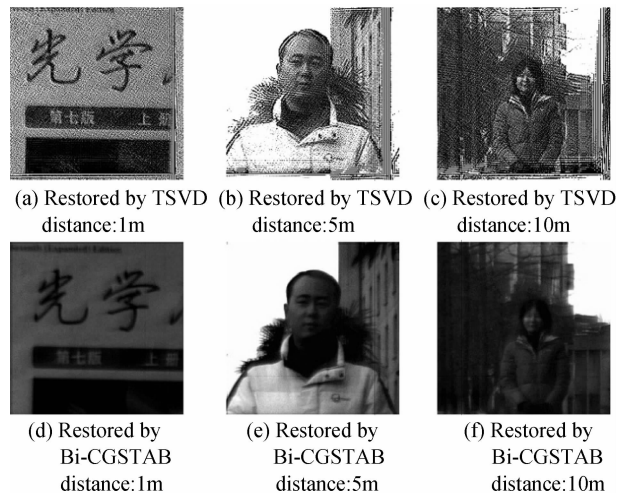


图 11 Bi-CGSTAB 算法与 TSVD 算法恢复效果对比图  
Fig. 11 Restored image comparison of Bi-CGSTAB and TSVD

TSVD 算法恢复出的图像噪声很大,有明显的颗粒效应,同时图像的边缘存在较大的边界效应,可看到明显的振荡.而采用新算法恢复出的图像则非常细腻,有效地抑制了噪声,同时在图像边缘几乎没有边界效应,恢复效果明显优于 TSVD 算法.

#### 4 结论

本文结合反镜像边界条件,提出了一种适于三次相位板波前编码系统图像复原的双共轭梯度平方稳定算法,基于反镜像边界条件的双共轭梯度平方稳定算法可以有效地改善图像边缘和物体边界的振铃效应.在此基础上,结合 DSP 程序开发的特点,成功将该算法应用于 DM642 平台上.实验结果表明,算法在 DM642 的嵌入式处理平台上表现良好,能够准确地复原波前编码图像.为波前编码系统的真正实用化应用提供了可能.

#### 参考文献

- [1] DOWSKI E R, CATHEY JR W T. Extended depth of field through wavefront coding[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(11): 1859-1866.
- [2] ZHANG Wen-zi, YE Zi, ZHAO Ting-yu, *et al.* Point spread function characteristics analysis of the wavefront coding system [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1543-1552.
- [3] ZHAO Ting-yu, YE Zi, ZHANG Wen-zi, *et al.* Wide viewing angle skewed effect of the point spread function in a wavefront coding system[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(10): 1220-1222.
- [4] ZHAO Ting-yu. Theory analysis, design and realization of imaging system with deep-field depth and large-viewing angle based on wave coding[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 1-20.  
赵廷玉. 大景深大视场波前编码成像系统理论研究、设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 1-20.
- [5] PAN Chao, CHEN Jia-bi, ZHANG Rong-fu, *et al.* Study on principle and simulation of extending of depth of field with phase plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1679-1682.  
潘超, 陈家璧, 张荣福, 等. 用位相板实现景深延拓的原理与模拟实验研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1679-1682.
- [6] STEFANO S C. A note on antireflective boundary conditions and fast deblurring models[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2003, **25**(4): 1307-1325.
- [7] ZHAO Ting-yu, ZHANG Wen-zi, YE Zi, *et al.* Design of wavefront coding system based on evaluation function of fisher information[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1096-1101.  
赵廷玉, 张文字, 叶子, 等. 应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1096-1101.
- [8] ZHANG Wen-zi, CHEN Yan-ping, ZHAO Ting-yu, *et al.* Simple OTF stability based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2017-2021.  
张文字, 陈燕萍, 赵廷玉, 等. 一种基于 OTF 稳定性的波前编码相位板优化方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2017-2021.
- [9] HUANG Wei-wei, YE Zi, ZHAO Ting-yu, *et al.* Elimination of field effect of wavefront coding system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 983-986.  
黄薇薇, 叶子, 赵廷玉, 等. 波前编码系统相位板视场效应的消除[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 983-986.
- [10] CHEN Yan-ping, ZHANG Wen-zi, ZHAO Ting-yu, *et al.* Imaging characteristics of wavefront coding system within spatial domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1425-1429.  
陈燕萍, 张文字, 赵廷玉, 等. 波前编码系统成像特性的空间域分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1425-1429.
- [11] LIU Qin-xiao. Theory research and application of the decoding algorithm based on wavefront coding imaging system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010, 4-17.  
刘钦晓. 波前编码成像系统解码算法研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010, 4-17.
- [12] LIU Qin-xiao, ZHAO Ting-yu, ZHANG Wen-zi, *et al.* Image restoration based on generalized minimal residual methods with antireflective boundary conditions in a wavefront coding system[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(12): 127005-1~127005-5.
- [13] LIU Qin-xiao, ZHAO Ting-yu, ZHANG Wen-zi, *et al.* Iteration algorithm for color image restoration of wavefront coding system with cubic phase mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2738-2743.  
刘钦晓, 赵廷玉, 张文字, 等. 三次相位板波前编码系统彩色图像恢复的迭代算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2738-2743.

## Realization of Biconjugate Gradient Stabilized Decoding Algorithm of Wavefront Coding System Based on the TMS320DM642

SUI Yuan-ming<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, LIU Qin-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, YU Fei-hong<sup>1</sup>, CHEN Yang-ping<sup>2</sup>

(1 *Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(2 *Science and Technology Department, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 310027, China*)

**Abstract:** Wavefront coding system is a new type of optical-digital two-step imaging system. The cubic phase mask is used to get asymmetric point spread function and the intermediate blurred image which nearly the same in a considerable depth of field. Combined with spatial domain optical imaging model and kronecker product, an image restoration algorithm which based on the Bi-CGSTAB (BiConjugate Gradient Stabilized) and antireflective boundary conditions was used in the digital decoding part of the wavefront coding system. This algorithm has advantages such as small computing amount, high computing speed and nearly no boundary effect. The new algorithm was optimized and transplanted with the characteristics of parallel computing for the platform of TMS320DM642. The whole platform consists of image capture module, image display module and external memory module. By a specially designed optical system, the experiment imaging the human and object with the object distance of 1 m, 5 m and 10 m. From the experimental result of middle blurred images, the effect of this new algorithm on the platform of TMS320DM642 is good, and it gives the possibility to realization of the truly portable and practical of the wavefront coding system.

**Key words:** Wavefront coding; Cubic phase mask; Biconjugate Gradient Stabilized (Bi-CGSTAB); Antireflective boundary condition