

盲图像恢复中的二维盲均衡研究

刘涛 郭军

(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)

摘要 数字图像在传输过程中, 由于受到二维信道的点扩展函数(PSF)的影响, 会产生图像模糊问题。在对图像进行恢复时, 需要消除 PSF 的影响, 在许多实际应用中 PSF 的特性未知, 此时图像的恢复就是盲图像恢复。该文提出了一种应用于盲图像恢复的二维盲均衡迭代算法, 该算法是通信领域中应用的 EVA 盲均衡算法的一种二维扩展。仿真结果表明, 该算法具有信噪比增益高、收敛速度快等特点, 有较为广泛的应用前景。

关键词 盲图像恢复, 二维, 盲均衡

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1013-03

Study of 2-Dimensional Blind Equalization in Blind Image Restoration

Liu Tao Guo Jun

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract During the transmission of digital image, the signal may be blurred by the Point Spread Function (PSF) of the 2-dimensional channel. On the restoration of the image, the influence of PSF should be eliminated without the knowledge of PSF in most real applications. It is called blind image restoration when the property of PSF is unknown. A new algorithm for blind image restoration via 2-dimensional blind equalization is proposed in this article. It is essentially a 2-dimensional expansion of EVA algorithm applied in the field of communication. Experimental results show that the algorithm works with rapid convergence speed and high improvement of SNR and has the prospect of wide applications.

Key words Blind image restoration, 2-dimensional, Blind equalization

1 引言

在图像的传输过程中, 信道和噪声的影响往往会使图像产生模糊。图像恢复的目的就是消除信道和噪声的影响, 从而重建原始图像。图像的传输可以表示为代表图像的二维信号与二维时不变信道的冲击响应进行二维卷积, 其中的信道响应被称为点扩展函数(PSF)。对于PSF已知的图像恢复, 在过去的几十年中许多学者已经进行了很详尽的研究^[1], 这里不再赘述。在许多图像恢复的实际应用中PSF未知, 此时只能通过已被信道和噪声污染的观测图像来恢复原始图像。在这种情况下, 图像的恢复被称为盲图像恢复。

文献[2]中将实现盲图像恢复的方法分为两大类: (1)先对信道的 PSF 进行估计, 在此基础上再进行图像恢复; (2)对信道的 PSF 的估计和原始图像的恢复同时进行。第(1)类算法计算简单, 但是对于 PSF 的参数形式和原始图像的特征都有较为严格的限制, 因而应用范围有限。第(2)类算法的计算量比第(1)类算法大, 但是没有第(1)类算法的各种限制, 因此应用广泛。

本文提出了一种应用于盲图像恢复的二维盲均衡迭代

算法, 属于上面所说的第(2)类算法。这种算法基于二维有限冲击响应滤波器模型, 适用于量化级低于 6 比特的灰度图像恢复。EVA算法^[3]是通信领域中应用的一种性能优良的盲均衡算法, 本文提出的算法是EVA算法的一种二维扩展, 适用于包括图像信号在内的二维信号的盲均衡。

本文第 2 节建立了系统模型; 第 3 节论述了算法的数学原理; 第 4 节为算法的具体实现步骤; 第 5 节为仿真结果; 最后一节为结束语。

2 系统模型

二维图像信号的传输可以用图 1 中的单输入单输出(SISO)线性时不变系统表示。图 1 中 $x_1(n_1, n_2)$ 代表原始图像信号; $x_2(n_1, n_2)$ 表示经过信道传输后受到干扰的信号; $v(n_1, n_2)$ 为加性高斯白噪声并且与 $x_1(n_1, n_2)$ 相互独立; $y_1(n_1, n_2)$ 是经过均衡后恢复的图像信号; $y_2(n_1, n_2)$ 是参考系统的输出。 $h(n_1, n_2)$ 为信道的二维冲击响应即PSF, $e(n_1, n_2)$ 和 $f(n_1, n_2)$ 分别是均衡器和参考系统的二维冲击响应。

由图 1 可以得出如下关系:

$$\begin{aligned} x_2(n_1, n_2) &= x_1(n_1, n_2) * h(n_1, n_2) + v(n_1, n_2) \\ &= \sum_{k_1} \sum_{k_2} x_1(n_1 - k_1, n_2 - k_2) h(k_1, k_2) + v(n_1, n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_1(n_1, n_2) &= x_2(n_1, n_2) * e(n_1, n_2) \\ &= \sum_{k_1} \sum_{k_2} x_2(n_1 - k_1, n_2 - k_2) e(k_1, k_2) \end{aligned} \quad (2)$$

2004-11-04 收到, 2005-04-22 改回
教育部跨世纪人才基金, 国家自然科学基金(60475007)和教育部科学技术研究重点项目(02029)资助课题

$$y_2(n_1, n_2) = x_2(n_1, n_2) * f(n_1, n_2) = \sum_k \sum_{k_2} x_2(n_1 - k_1, n_2 - k_2) f(k_1, k_2) \quad (3)$$

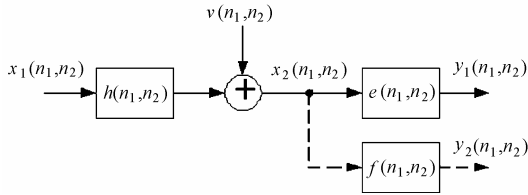


图1 系统模型

忽略噪声的影响 $y_1(n_1, n_2)$ 和 $y_2(n_1, n_2)$ 可以表示为

$$y_1(n_1, n_2) = x_1(n_1, n_2) * s_1(n_1, n_2) \quad (4)$$

$$y_2(n_1, n_2) = x_1(n_1, n_2) * s_2(n_1, n_2) \quad (5)$$

其中 $s_1(n_1, n_2) = h(n_1, n_2) * e(n_1, n_2)$, $s_2(n_1, n_2) = h(n_1, n_2) * f(n_1, n_2)$ 。盲图像恢复和与其相对应的二维盲均衡就是在仅知道 $y_1(n_1, n_2)$ 和 $x_1(n_1, n_2)$ 的部分先验信息的情况下, 对 $e(n_1, n_2)$ 进行调整最终使得 $y_1(n_1, n_2)$ 最大限度的接近 $x_1(n_1, n_2)$ 。要达到上述效果, $s_1(n_1, n_2)$ 必须满足如下形式:

$$s_1(n_1, n_2) = \alpha \delta(n_1 - p, n_2 - q) \quad (6)$$

其中 α 是非零常数, 这也就是本文所提出的算法要达到的最终目的。

3 算法原理

本文的算法基于如下假设: $x_1(n_1, n_2)$ 的均值为零且均匀分布^[4]。这个条件可以通过先对图像进行直方图均衡化, 然后再去掉其中的直流成分来近似实现。文献[5]中提出在一维的情况下, $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ 的四阶互累积量可以作为均衡效果的度量, 并由此提出了EVA算法。在二维的情况下, 经过分析发现 $y_1(n_1, n_2)$ 和 $y_2(n_1, n_2)$ 的四阶互累积量 $C_{4y_1y_2}(0,0)$ 同样可以作为二维均衡效果的度量。

$$C_{4y_1y_2}(0,0) = E\{y_1^4(n_1, n_2)\} - 3E\{y_1^2(n_1, n_2)\}E\{y_2^2(n_1, n_2)\} - 2E^2\{y_1(n_1, n_2)y_2(n_1, n_2)\} = \sum_{n_1} \sum_{n_2} s_1^4(n_1, n_2) - 3E^2\{x_1^2(n_1, n_2)\}C_{4x_1}(0,0) \quad (7)$$

$$C_{4x_1}(0,0) = E\{x_1^4(n_1, n_2)\} - 3E^2\{x_1^2(n_1, n_2)\} \quad (8)$$

是 $x_1(n_1, n_2)$ 的四阶累积量, 是由 $x_1(n_1, n_2)$ 的统计特性决定的常量。使用Schwarz不等式后得到:

$$|C_{4y_1y_2}(0,0)| \leq \max_{n_1, n_2} \{s_2^2(n_1, n_2)\} C_{4x_1}(0,0) \sum_{n_1} \sum_{n_2} s_1^2(n_1, n_2) \quad (9)$$

上述不等式取等号必须满足以下两个条件中的一个,

$$(1) \begin{cases} \max_{n_1, n_2} |s_2(n_1, n_2)| = |s_2(p, q)| \\ s_1(n_1, n_2) = s_1(p, q) \delta(n_1 - p, n_2 - q) \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} \max_{n_1, n_2} |s_2(n_1, n_2)| = |s_2(p_1, q_1)| = |s_2(p_2, q_2)| = \dots \\ s_1(n_1, n_2) = s_1(p_1, q_1) \delta(n_1 - p_1, n_2 - q_1) + s_1(p_2, q_2) \delta(n_1 - p_2, n_2 - q_2) + \dots \end{cases}$$

条件(1)是希望得到的, 而条件(2)是需要避免出现的。所以, 需要在保证条件(2)不成立的情况下通过调整 $e(n_1, n_2)$ 来最大化 $|C_{4y_1y_2}(0,0)|$, 此时条件(1)必然得到满足, 从而实现了二维盲均衡即盲图像恢复。

在有噪声存在的情况下, 均衡可能偏离最佳结果。由于该算法具有抗噪声的性能, 所以仍然能够得到比较理想的效果。

4 算法实现

首先, 将 $y_1(n_1, n_2)$ 作向量表示:

$$y_1(n_1, n_2) = \mathbf{x}_2^T \cdot \mathbf{e} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{x}_2 = [\mathbf{x}_{21}^T, \mathbf{x}_{22}^T, \dots, \mathbf{x}_{2L_2}^T]^T$, $\mathbf{e} = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_{L_2}^T]^T$,

$$\mathbf{x}_{2i} = [x_2(n_1, n_2 - i), x_2(n_1 - 1, n_2 - i), \dots,$$

$$x_2(n_1 - L_1, n_2 - i)]^T, \quad i = 1, 2, \dots, L_2$$

$$\mathbf{e}_i = [e(0, i), e(1, i), \dots, e(L_1, i)]^T, \quad i = 1, 2, \dots, L_2$$

L_1 和 L_2 为均衡器的阶数。则 $C_{4y_1y_2}(0,0)$ 可以表示为

$$C_{4y_1y_2}(0,0) = \mathbf{e}^T \mathbf{C}_{4y_2x_2} \mathbf{e} \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{C}_{4y_2x_2} = E\{y_2^2(n_1, n_2)\mathbf{x}_2\mathbf{x}_2^T\} - E\{y_2^2(n_1, n_2)\}E\{\mathbf{x}_2\mathbf{x}_2^T\} - 2E\{x_2y_2(n_1, n_2)\}E\{x_2^T y_2(n_1, n_2)\} \quad (12)$$

此外, 在最大化 $|C_{4y_1y_2}(0,0)|$ 的过程中还要对 $y_1(n_1, n_2)$ 的幅度加以限制, 即要求:

$$E\{y_1^2(n_1, n_2)\} = \mathbf{e}^T \mathbf{R}_{x_2x_2} \mathbf{e} = E\{x_1^2(n_1, n_2)\} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{R}_{x_2x_2} = E\{\mathbf{x}_2\mathbf{x}_2^T\}$ 。在上述限制下, 通过最大化 $|C_{4y_1y_2}(0,0)|$ 最终得到:

$$\mathbf{C}_{4y_2x_2} \mathbf{e}_p = \lambda \cdot \mathbf{R}_{x_2x_2} \mathbf{e}_p \quad (14)$$

其中 $\mathbf{e}_p = [e_{p1}^T, e_{p2}^T, \dots, e_{pL_2}^T]^T$, $\mathbf{e}_{pi} = [e_p(0, i), e_p(1, i), \dots, e_p(L_1, i)]^T, i = 1, 2, \dots, L_2$, \mathbf{e}_p 就是所求得的符合要求的均衡器系数向量, 数值上等于矩阵 $\mathbf{R}_{x_2x_2}^{-1} \mathbf{C}_{4y_2x_2}$ 的主特征值 λ (幅度最大的特征值)所对应的特征向量。式(11)右边是关于向量 \mathbf{e} 的二次型, 是凸函数, 所以不存在局部极小问题。

文献[3]中指出在一维的情况下, 参考信道对于算法的性能有较大的影响。在二维的情况下, 参考信道 $s_2(n_1, n_2)$ 满足下面条件时算法效果较好,

$$\max_{n_1, n_2} |s_2(n_1, n_2)| = |s_2(p, q)| \gg |s_2(n_1, n_2)|_{n_1 \neq p, n_2 \neq q} \quad (15)$$

应当指出, 无论 $s_2(n_1, n_2)$ 情况如何, 经过运算后 $s_1(n_1, n_2)$ 都要比 $s_2(n_1, n_2)$ 更接近上述条件。因此, 可以将上一次运算得到的 $e(n_1, n_2)$ 作为参考信道中的 $f(n_1, n_2)$ 进行迭代运算。

第3节中提到, 本文中算法的正确性依赖于条件(2)的不成立。条件(2)要求 $s_2(n_1, n_2)$ 有多个最大值点, 实际上由于运算精度等问题条件(2)成立的可能性较小, 在进行多次迭代后基本可以保证条件(2)不成立, 由此也就保证了算法的正确性。经过一定次数的迭代后, 算法逐渐收敛, 此时均衡器的

输出就是恢复出的图像信号。

算法的主要运算量集中在特征向量的求取上, 对于主特征值所对应的特征向量通过使用众所周知的“Power Method”直接求出, 而不必求出所有的特征向量, 这样可以节省很多运算量。另外, 由于图像信号全部为实数值, 不存在复数运算, 这也可以减少运算量, 使得算法更为实用。

5 仿真结果

本节给出了算法的计算机仿真结果, 用以说明算法的效果。选择一幅 8bit 灰度级的图像作为测试图像, 第 1 步对该图像进行直方图均衡化, 得到近似均匀分布的二维图像信号。第 2 步从第 1 步得到的信号中减去原图像信号的均值, 得到均值为零的均匀分布的信号。第 3 步将第 2 步得到的信号均匀量化, 得到 4bit 灰度级的初始图像信号, 从而满足了算法所依赖的各种假设。

选用 5×5 的 PSF, 作为二维信道的冲击响应 $h(n_1, n_2)$ 。同时在 $x_2(n_1, n_2)$ 中加入了零均值的高斯噪声 $v(n_1, n_2)$, 信噪比 BSNR 为 70dB。处理前后的信噪比增益 ISNR^[2] 是衡量图像恢复效果的常用标准, 它与图像一起在图 2 中给出, 与文献[4]中的算法相比, 信噪比增益由 6.5dB 提高到 8.1dB。由图 2 可见本文的算法仅需 20 次迭代即可基本收敛, 明显快于文献[1]中所给出的其它算法。图 3 中给出了信道 $h(n_1, n_2)$ 和收敛后的均衡器 $e(n_1, n_2)$ 的二维 DFT 的幅度特性。

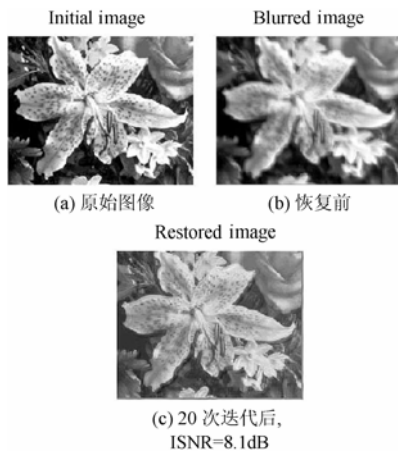


图 2 盲图像恢复结果(4bit 灰度级, BSNR=70dB)

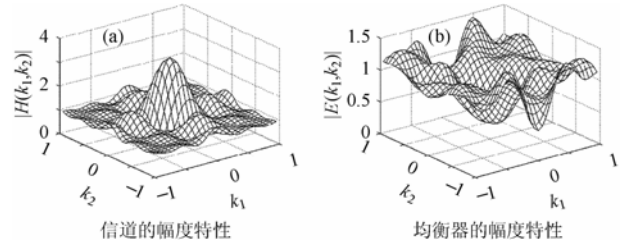


图 3 信道和收敛后的均衡器的幅度特性

6 结束语

本文提出了一种基于二维有限冲击响应滤波器模型的应用于盲图像恢复的二维盲均衡算法, 这种算法是通信领域应用的 EVA 算法的一种二维扩展。由于这种算法对于二维信道的相位特性没有限制, 所以可以应用于非最小相位系统的均衡。在图像恢复的过程中, 由于计算全部为实数计算, 同时使用了“Power Method”来计算主特征值所对应的特征向量, 这使得算法的运算量大为降低从而更为实用。仿真结果表明: 这种算法具有收敛速度快、信噪比增益高的特点, 对于量化级数低于 6bit、信噪比 BSNR 大于 30dB 的灰度图像的恢复效果最为理想, 有较为广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Bahnam M A, Katsaggelos A K. Digital image restoration. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, 14(2): 24-41.
- [2] Kundur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(3): 43-64.
- [3] Jelonnek B, Boss D, Kammeyer K D. Generalized eigenvector algorithm for blind equalization. *Signal Processing*, 1997, 61(3): 237-264.
- [4] Vural C, Sethares W A. Blind deconvolution of noisy blurred images via dispersion minimization. 14th international conference on Digital Signal Processing, Santorini Hellas, Greece 1-3 July 2002, 2: 787-790.
- [5] Jelonnek B, Kammeyer K D. A closed-form solution to blind equalization. *Signal Processing*, 1994, 36(3): 251-259.

刘 涛: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为智能信息处理。
郭 军: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为模式识别、中文信息处理及网络管理与控制。