

红外系统的 2D-TDI 方法及其增强处理

雷 春 张保民

(南京理工大学电光学院, 江苏, 南京, 210094)

摘要 提出了在红外系统中运用二维时间延迟积分(2D-TDI)方法提高信噪比的同时,利用灰度变换进行红外图像增强处理的几种方法及对系统的硬件实现.试验结果表明,这些方法优于传统的简单平均方法,并且能够实时处理,因此具有重要的实用价值

关键词 红外系统, 实时处理, 图像增强, 噪声抑制, 时间延迟积分

2D-TDI TECHNIQUE OF INFRARED SYSTEM AND IMAGE ENHANCEMENT

LEI Chun ZHANG Bao-Min

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Several infrared image enhancement methods based on 2D-TDI technique using gray transform were put forward. The test results show that these methods are superior to the simple average method and can be implemented in real time. So they have high practical value.

Key words infrared system, real-time processing, image enhancement, noise suppression, time delay integration

引言

红外热像仪是利用自然界景物的光辐射来成像的,只要光辐射存在,不管是在白天还是在夜晚,或是在完全漆黑的条件下,它都可以成像.景物的光辐射一般传输路径为:景物光辐射→大气窗口→光学系统→探测器→电子处理→显示器.景物光辐射所经过的每一级都造成了辐射能量的衰减,同时加进了噪声,比如在有雨的天气条件下用热像仪观察景物,就会发现比在晴朗的天气条件下观察得到的图像模糊,这是因为雨滴吸收了景物光辐射的能量,同时自身又产生辐射,这种辐射对热像仪来说是种噪声,图像的信噪比降低了;又如图像在经过电子处理单元处理时,电子系统的热噪声也会叠加进图像中,导致信噪比降低.因此,在热像仪的后级电子处理系统中增加去噪处理,改善图像质量是十分必要的.

1 热成像系统的噪声分析

通常用三维噪声模型来分析热成像系统的噪声.三维噪声分析所需的实验数据是以一个均匀恒定的背景为目标,热成像系统用其采集的连续数字化图像

组成噪声数据组.三维噪声分析随机响应模型为:

$$U(t, v, h) = S + N_T(t) + N_v(v) + N_H(h) + N_{TV}(t, v) + N_{TH}(t, h) + N_{vH}(v, h) + N_{TVH}(t, v, h), \quad (1)$$

式(1)中 $U(t, v, h)$ 代表获得的实验数据的总值,它是帧、垂直方向和水平方向的函数; S 是三维数据组中所有点的总平均值; $N_{vH}(v, h)$ 是固定像素噪声,由空间双向的零点平均值随机变化构成,它无时间响应.这一噪声对应于成像中二维固定空间图形,固定图形噪声即属这一类,它在凝视探测器中占主导地位. $N_v(v)$ 是固定行噪声,这一噪声描述了仅在垂直方向上零点平均值的变化.它在时间上固定不变,且在水平方向上无响应.一般来讲,它表示数据在行与行之间固定的非均匀性.这种噪声主要来自于通道间增益或电平的不适当校正及 $1/f$ 噪声. $N_H(h)$ 是固定列噪声,这一噪声类型代表仅在水平方向上零点平均值的变化,是时间和水平方向上每列数据的平均值变化,当合并焦平面阵列的不同探测元的输出时,多重通道补偿电平的变化就属这类噪声.它的另一来源为在时间延迟和积分序列中不同探测元

的增益差异 $N_T(t)$ 是帧间噪声, 这一噪声类型仅代表与时间有关的随机噪声, 它在数据组中是以帧与帧平均值为变量 $N_{TV}(t, v)$ 是时间行噪声, 它是由时间和垂直方向上零点平均值随机变化构成的, 在水平方向上无响应 在数据组中, 它表示时间上和垂直方向上每行数据平均值变化 这种噪声主要是在合并焦平面阵列各探测元输出时, 多重通道的补偿电平上出现的低频噪声 另外在弱信号处理中也会产生这种噪声 $N_{TH}(t, h)$ 是时间列噪声, 这一噪声类型代表时间和水平方向上的零点平均值变化, 是时间和水平方向上每列数据的变化, 主要来自于 $1/f$ 噪声和其它一些低频噪声 $N_{TVH}(t, v, h)$ 是时间像素噪声, 它代表三维坐标系中三个方向上零点平均值的变化 它与典型的电子探测器噪声很相近 这种探测器噪声开始有时间性, 继而通过成像系统时在扫描装置和焦平面的垂直与水平方向上均有表现在热成像系统中, 光子散粒噪声、电阻热噪声、放大器噪声等均属这类噪声

2 2D-TDI 图像累加方法的定义

图像累加一般有模拟相加和数字相加两种, 模拟相加用模拟方法实现, 有专门的实现芯片, 但方法不够灵活 随着微电子技术的发展, 器件的集成度越来越高, 速度越来越快, 采用将图像数字化以后存储起来, 数字相加的方法是完全可行的, 且方式方法灵活 提出一个 2D-TDI 的方法即图像二维时间延迟积分, 它将图像按帧存储起来, 然后相对应的像素数字相加, 2D-TDI 的方法至少两帧相加 时间延迟 (TDI) 等效于探测器上光点驻留时间延长, 从而增加信噪比; 2D 是指图像一帧一帧相加, 图像相加是在两个方向上进行, 这和多元探测器在一个方向上进行的时间延迟积分显然不同

在 2D-TDI 的方法中, 如果要进行 n 帧累加, 系统就需要有能存储 n 帧图像的存储器, 如果在 t_1 时刻有 f_1, f_2, \dots, f_n 帧相加, 那么在下一 t_2 时刻参与运算的这 n 帧图像中只有一帧被刷新, 即 f_2, f_3, \dots, f_{n+1} 帧相加, 这种方法解决了图像连续性显示的问题, 即帧速是不变的 只要目标的运动速度不大, 在 $n \times 20\text{ms}$ 内不超过一个像素, 那么经过 2D-TDI 处理后的图像在显示时将很正常, 否则图像会有拖尾显示, 严重时图像完全模糊

3 2D-TDI 提高图像信噪比原理

假设被探测的目标是静态的或缓慢运动的, 由

于图像信号的帧间相关性和噪声的非相关性, 经过一定时间的延迟积分后, 热像图像的信噪比就会得到有效的提高 设对红外图像序列进行 m 帧时间的 2D-TDI 积分处理, 则对应像素的信号功率 P 为:

$$P = \left(\sum_{i=1}^m V_i\right)^2 = \sum_{i=1}^m V_i^2 + 2\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} V_i V_j, \quad (2)$$

式(2)中 V_i 和 V_j 是帧间对应像素的图像信号电压幅值, C_{ij} 是图像之间的相关系数 ($0 < C_{ij} < 1$).

在热像仪的使用过程中发现, 热像仪图像的噪声主要是一些均匀分布的系统噪声, 比如热噪声, 用图像累加技术, 可以减低这种噪声, 提高信噪比, 从而改善图像质量 由于噪声时域分布特性是随机的、不相关的, 且服从泊松分布, 因此噪声之间的相关系数 $C_{ij} = 0$, 经过 m 帧 2D-TDI 处理以后, 对应像素的噪声功率 N 为:

$$N = \left(\sum_{i=1}^m V_{ni}\right)^2 = \sum_{i=1}^m V_{ni}^2 = m V_n^2, \quad (3)$$

式(3)中 V_{ni} 是帧间对应像素的噪声电压幅值, V_n 定义为等效噪声电压

对于图像信号而言, 如果被探测的目标是静态的, 或者在 m 帧积分时间内目标的运动

$$S = \left(\sum_{i=1}^m V_{si}\right)^2 = \sum_{i=1}^m V_{si}^2 + 2C_m^2 V_s^2 = m^2 V_s^2, \quad (4)$$

距离不大于一个像素, 帧间对应像素可视为近似相等并记为 V_s , 因此帧间对应像素间的相关系数 $C_{ij} = 1$, 经过 m 帧 2D-TDI 处理后, 对应像素图像功率 S 由式(4)式可得: 式(4)中 V_{si}, V_s 是帧间对应像素的图像信号电压幅值 因此图像功率信噪比 SNR 为:

$$SNR = S/N = \frac{m^2 V_s^2}{m V_n^2} = \frac{m V_s^2}{V_n^2}, \quad (5)$$

假设处理前原始图像的功率信噪比为 SNR_0 , 有

$$SNR_0 = V_s^2/V_n^2, \quad (6)$$

于是有:

$$SNR = m \cdot SNR_0; \quad (7)$$

由此可见, 经过 m 帧的 2D-TDI 处理以后, 图像信号的功率信噪比提高了 m 倍, 因此必将对红外图像的质量有所改善

4 2D-TDI 图像累加数据处理方法

2D-TDI 方法的一个问题是图像经过累加后出现饱和导致显示器对饱和之外的区域无法显示的问题, 举例说, 如果一个 2D-TDI 系统的 D/A 转换器是 8 位的, 那么显示的图像只可能有 256 个灰度级, 如果输入图像的灰度级为 64, 累加 4 帧后灰度级扩

大 4 倍, 变成 256 级, 刚好能满足系统的要求, 如果累加 8 帧后则变成了 512 个灰度级, 那么系统只能接受其中的 256 级, 余下的 256 级灰度信息将丢失

4.1 累加平均

要解决上述问题, 最简单的方法就是累加后取平均, 设有 n 帧图像参与累加, 分别记为 f_1, f_2, \dots, f_n , 则输出图像由式(8) 决定

$$f_{out} = 1/n = \sum_{i=1}^n f_i \quad (8)$$

该方法用硬件实现时简单易行, 即截取二进制加法结果的高 8 位, 用此方法实验时发现, 当 $n = 4$ 时, 累加效果不是十分明显, 而当 $n = 8$ 时, 可看出累加平均后的图像比输入图像对比度高, 图像噪声小, 因此图像看起来要清晰, 但效果的代价是增大 n 值, 由此引起系统存储器的开销增大, 硬件实现复杂化

4.2 累加窗口滑动

在热像仪的实际使用中, 当所观察的目标距离太远, 或气象条件较差, 导致目标能量小, 噪声大, 图像信噪比低的情况时, 采用 2D-TDI 系统处理后不平均而直接输出的方式, 图像的对比度将得到显著增强, 虽然因为图像的饱和牺牲了部分图像信息, 但感兴趣的区域图像却得到了增强, 为了在累加所得到的全动态范围内找到我们感兴趣的目标, 需设置一个滑动窗口, 图像在该窗口无压缩输出, 窗口外的灰度级压缩输出, 这样就兼顾了图像全局的信息和对弱目标进行增强处理的要求, 设窗口的灰度级宽度为 W , n 帧累加后所形成的图像灰度级宽度为 $N = n * 256$, 窗口左端点所在灰度等于 A , 窗口方法要求将 N 级灰度压缩成 256 级, 其灰度变换函数为:

$$H(r) = \begin{cases} \frac{256 - W}{2A} r, & 0 < r < A \\ r - A + \frac{256 - W}{2}, & A \leq r < A + W \\ \frac{(256 - W)(r - N)}{2(N - A - W)}, & A + W < r < N \end{cases} \quad (9)$$

由式(9) 可见, 当 W 等于 256 时, 窗口之外是 0, 或是 255, 窗口之外无压缩处理, 图像的全部信息只局限于窗口内, 图像信息损失严重 但对感兴趣的目标而言, 增强效果却是最大, 我们就能在图像信息量与增强效果之间找到一个合适的平衡点

4.3 累加局部增强

实验中发现, 压缩处理的方法损失了图像的整体信息, 应设法寻求能同时兼顾增强效果和图像整体, 将 N 级灰度转换成 256 级的方法 通过适当的

灰度变换函数, 我们就可以实现这个目标, 我们应用图 1 中的变换曲线做灰度变换函数, 由图 1 可见, 该灰度变换函数是连续的, 这样就保证了变换后的图像灰度的连续性 其变换式如公式(10) 所示

$$H(r) = \begin{cases} 2 \cdot (r - \text{int}(r/128) \cdot 128) & \text{当 } \text{int}(r/128) \text{ 为偶时,} \\ - 2 \cdot (r - (\text{int}(r/128) + 1) \cdot 128) & \text{当 } \text{int}(r/128) \text{ 为奇时,} \end{cases} \quad (10)$$

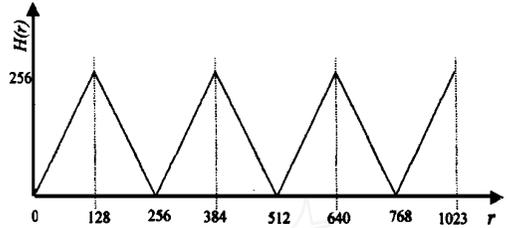


图 1 灰度变换函数

Fig. 1 Gray transform function

5 2D-TDI 方法的数字实现

2D-TDI 系统必须含有存储器存储数字图像, 为了能做到处理的实时性, 累加运算采用并行结构实现, 参与运算的数据必须事先存储起来, 因此, n 帧累加需要 n 份帧存, 我们以 $n = 4$ 为例说明 2D-TDI 处理器的原理, 其系统结构框图如图 2 所示 从热像仪输出的视频信号首先经过低通滤波, 放大等预处理后被量化成 8 位图像数据, 同时视频信号经过同步分离后, 进入逻辑控制器, 形成系统所需的所

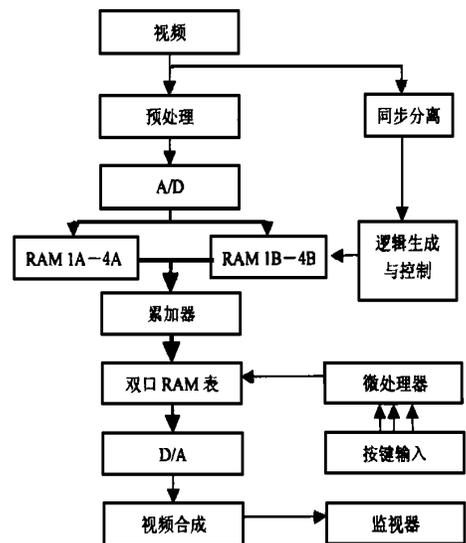


图 2 2D-TDI 处理器功能框图

Fig. 2 Schematic diagram of 2D-TDI processor

有控制信号, 帧存采用乒乓结构, 即奇场是存储状态, 偶场就是输出状态; 反之偶场是存储状态, 奇场就是输出状态, 这样可以实现读写操作互不干扰, 同时降低对存储器的速度要求。存储时只有一个存储器被写入, 输出时 4 个存储器全部输出; 下一帧数据来到时, 数据存储在一个帧存体中, 如此循环反复就可以实现图像 4 帧的延迟; 4 个 8 位输出并行相加, 结果为 11 位, 这 11 位数据经过一个双口 RAM 存储器构成的表函数转换成 8 位数据, 供给 8 位 D/A 转换。双口 RAM 的另一个端口与微处理器相接, 微处理器接受按键的信息, 实时改造表函数, 完成系统的控制功能。

6 运用与结论

图 3(a)~(d) 为我们将上述方法运用于 2D-TDI 系统进行图像处理时的结果, 并注意到累加平

均的方法对图像的改善效果不明显; 从图 4(b) 的直方图看出窗口内灰度间距大, 窗口外灰度间距小, 这说明在灰度窗口内的图像得到了增强, 同时也兼顾了图像的整体, 使用中还发现, 如果 A 值太小, 图像偏亮, A 值太大, 图像又偏暗, 这是该方法的不足之处; 当窗口最宽等于 256 时, 灰度窗口内图像得到最大增强, 我们可看到图 4(c) 中的吉普车异常醒目; 图 4(d) 使用局部增强, 从吉普车的轮子的轮廓上看, 该方法增强效果是明显的, 但此方法对噪声敏感, 另外由于灰度变换函数非单调递增, 每隔 128 出现一个变化, 使得图像灰度不真实。

综上所述, 2D-TDI 系统在降低噪声提高信噪比的同时, 通过适当的灰度变换函数实现图像增强, 加强了系统对弱目标的观察能力, 由于目前处在实验阶段, 只做了累加 4 帧的实验, 对于累加 8 帧, 16 帧的效果, 还有待进一步实验。

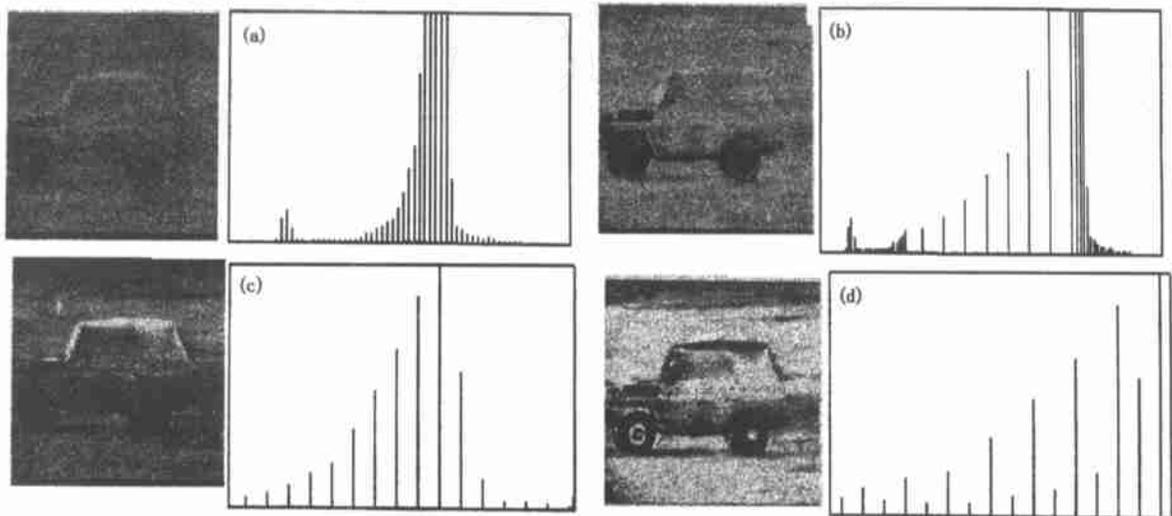


图 3 2D-TDI 系统进行图像处理时的结果

(a) 累加平均 (b) 累加窗口滑动 ($W = 128, A = 400$) (c) 累加窗口滑动 ($W = 256, A = 400$) (d) 累加局部增强

Fig. 3 Results of image processing of 2D-TDI system

(a) accumulation average (b) accumulation slide window ($W = 128, A = 400$)

(c) accumulation slide window ($W = 256, A = 400$) (d) accumulation local enhancement

REFERENCES

- [1] ZHANG Bao-Ming. *Analysis and Discussion on Imaging System*. Beijing: National Defense Industry Press (张保民 成像系统分析导论 北京: 国防工业出版社), 1992, 1—20
- [2] Wang Y. Real-time video displaying technique for LLL digital image accumulation, *SPIE*, 1998, **3530**: 199—202
- [3] Woods R E, Gonzalez R C. Real-time digital image enhancement, *Proc. IEEE*, 1981, **69**(5): 634—654
- [4] Huang T S. *Image Sequence Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1981, 210—230
- [5] D'Agostino John, Webb Curtis. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise, *SPIE*, 1991, **1488**: 110—120