

UCN 序列的抑制技术

李金宗¹, 魏祥泉¹, 李宁宁², 王 松¹

(11 哈尔滨工业大学电子与通信工程系, 黑龙江哈尔滨 150001; 21 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100087)

摘 要: 为了从低信噪比图像序列中检测出亚像元目标、点目标和少像元目标, 本文提出一种通过单帧自适应门限检测和多帧高阶互相关技术来抑制 UCN 序列的新方法. 本方法可以大大压缩候选目标轨迹数目和数据处理量, 且对红外、可见光等不同种类图像序列兼容. 文中给出了各项操作的理论分析, 实验结果证实了理论分析的正确性和算法的可行性. 对单帧信噪比为 1.5~0.5 的图像序列, 经过单帧自适应门限检测 and 两次高阶互相关处理后, 剩余非零点数只有 0.03~14.59%, 噪声抑制率为 99.97~85.41%.

关键词: 图像序列; 自适应门限检测; 高阶互相关; 目标轨迹; 数据处理

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-0982-05

The Techniques of Suppressing UCN Sequence

LI Jinzong¹, WEI Xiangquan¹, LI Ningning², WANG Song¹

(11 Dept of Electronic & Communication Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

21 Beijing Spacecraft General Design Department, Beijing 100087, China)

Abstract: In order to detect the subpixel, point and a few pixel targets from low SNR image sequence, this paper presents a new approach which can greatly suppress UCN sequence through adaptive threshold detection in single frame and high order cross-correlation with multiple frames. The number of candidate target trajectories and the quantity of data processing are greatly compressed by using the approach, and the approach is compatible with infrared and television image sequences. The theoretical analyses of various kinds of operations are expounded in the paper. The experimental results have proved the correctness of theoretical analyses and the feasibility of the optimal algorithms. For the image sequences with SNR 1.5~0.5, after adaptive threshold detection in single frame and twice high order cross-correlation, the nonzero points left are only 0.03~14.59%, and the noise rejection rate is 99.97~85.41%.

Key words: image sequence; adaptive threshold detecting; high order cross-correlation; target trajectories; data processing

1 引言

近年来, 图像目标自动识别问题的理论与技术已经取得了突破性的进展, 但这些理论与技术大都是针对近距离成像区域较大的所谓面目标识别的. 随着航空航天技术和先进武器系统的发展以及电子战的日益加剧, 战略防御系统必须具备检测与识别远距离目标的能力. 当目标与成像系统的距离较远时, 图像的分辨率和信噪比较低, 目标在一帧图像中的投影所占的像元数很少, 有时只有一个像元, 甚至还不到一个像元, 即所谓亚像元目标, 而且由于强大的图像背景使目标完全淹没在复杂的干扰杂波中. 在这种情况下如何检测运动的亚像元目标至少像元目标, 长期以来一直是理论和应用的难点和热点^[1~8]. 此类问题被统称为点目标识别.

自 1992 年以来, 我们一直在开拓系列图像分析和 DBS 技

术的理论和应用研究^[9~13]. 对真实景物的图像序列内涵进行分析, 可以发现其中同时存在着三种成分: (1) 由较强大的复杂背景形成的干扰杂波, 此种成分在相邻序列图像中具有很强的相关性, 若从图像序列中抽象出来, 称为 CN (Correlative Noise) 序列; (2) 成像传感器和处理设备等产生的不相关噪声, 此种成分若从图像序列中抽象出来, 称为 UCN (Uncorrelative Noise) 序列; (3) 在每帧图像仅占一个或很少几个像素的目标成分.

根据上述分析, 从低噪比图像序列中检测与识别点目标问题主要应包括: (1) 抑制 CN 序列; (2) 抑制 UCN 序列; (3) 点目标的检测与识别. 在以往的研究中, 我们已经有效地实现了 CN 序列的抑制^[12], 并且通过图像积累实现了在视场中相对静止点目标的自适应门限检测与识别^[13]. 在抑制 CN 序列后, 图像序列中的主要成分是 UCN 序列, 它成为检测和识别点目

标的主要障碍. 本文重点研究如何抑制 UCN 序列.

在抑制 CN 序列之后, 无论对空还是对地观测, 只要图像平均亮度足够大, 随机噪声都可以被模型化为高斯白噪声^[14]; 并且由于目标成分很少, 它不会影响噪声的基本属性, 这正是抑制 UCN 序列的主要依据. 为了抑制 UCN 序列, 本文引入两项关键技术, 即单帧自适应门限检测技术和多帧高阶互相关技术. 对这两项关键技术的要求是在保证后续操作对点目标可靠识别的前提下尽可能地抑制 UCN 序列.

2 单帧自适应门限检测技术

在抑制 CN 序列之后, 对图像序列中每帧图像的像素逐一进行检测, 判定是否可能存在目标成分, 称为单帧检测. 为此, 需要建立单帧自适应门限处理算法.

设 $f(x, y)$ ($0 \leq x < N, 0 \leq y < N$) 为某帧图像的灰度函数, 给定两种假设:

$$H_0: f(x, y) = n(x, y),$$

表示点 (x, y) 处不存在目标成分;

$$H_1: f(x, y) = S(x, y) + n(x, y),$$

表示点 (x, y) 处存在目标成分.

其中, $n(x, y)$ 表示 (x, y) 处的噪声强度, $S(x, y)$ 表示目标成分. 单帧图像的噪声均值 m 和方差 R^2 可以实时估计, 即

$$m = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - m]^2 \quad (2)$$

像素点的两个条件概率密度分别为

$$p(f|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}R} \exp\left(-\frac{(f-m)^2}{2R^2}\right) \quad (3)$$

$$p(f|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}R} \exp\left(-\frac{(f-m-S)^2}{2R^2}\right) \quad (4)$$

设 v 为检测门限, 判决规则为

$$\begin{aligned} &\text{若 } f(x, y) \geq v \text{ 则 } (x, y) \in H_1 \\ &\text{否则 } (x, y) \in H_0 \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 发现概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \int_0^1 p(f|H_1) df = 1 - 5\left(\frac{v-m-R}{R}\right) \quad (6)$$

$$P_f = \int_0^1 p(f|H_0) df = 1 - 5\left(\frac{v-m}{R}\right) \quad (7)$$

式中

$$5(F) = \int_0^F \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}y^2\right) dy$$

为满足标准正态分布的随机变量 $y < F$ 概率, 而 C 为信噪比 SNR, 即 $C = S/R$.

根据聂曼2皮尔逊准则^[15], 若要求一定的虚警概率 P_f , 则由式(7), 检测门限 v 为

$$v = 5^{-1}(1 - P_f)R + m \quad (8)$$

若要求一定的发现概率 P_d , 则由式(6), 检测门限 v 为

$$v = 5^{-1}(1 - P_d)R + m + CR \quad (9)$$

在低信噪比条件下, 抑制噪声点的同时可能会造成目标

点的损失, 即有一定的漏警概率 P_l . 为了保证点目标轨迹的可靠检测与识别, 应将 P_l 限制在一定的范围内. 这就意味着, 在运用聂曼2皮尔逊准则时, 应根据给定的 P_l 来计算判决门限 v . 由于 $P_l = 1 - P_d$, 根据式(9), 判决门限 v 与漏警概率 P_l 的关系为

$$v = 5^{-1}(P_l)R + m + CR \quad (10)$$

若要求 $P_l \leq 20\%$, 即 $P_d \geq 80\%$, 由上式得

$$v \leq (C - 0.84)R + m \quad (11)$$

式中 -0.84 是从正态分布表上查得的 $5^{-1}(0.20)$ 值. 把式(11)代入式(7)可得虚警概率 $P_f \leq 1 - 5(C - 0.84)$. 所以在确定检测门限后, 可以根据 SNR 参数 C 预计剩余噪声点数(利用正态分布表), 见表1. 可以看出, 当漏警概率 P_l 一定时, 单帧信噪比 C 越小, 单帧处理后, 虚警概率 P_f 越高, 即噪声抑制率越低, 剩余噪声点数会越多.

表1 $P_l = 0.20$ 时的虚假概率

信噪比	1.5	1.15	1.0	0.50
虚警率	0.255	0.378	0.436	0.633

由于 C, R 和 m 可以实时计算, 所以检测门限 v 是自适应的. 实际操作表明, 对 $C = 0.5 \sim 1.5$ 的噪声图像, 采取上述单帧自适应门限处理后, 噪声抑制率为 $351.74 \sim 741.66\%$, 与理论分析结果一致.

3 多帧高阶互相关

在对图像序列 $F(x, y, t_n)$ 逐帧进行自适应门限检测后, 各帧均消除了很多噪声点, 为了进一步抑制 UCN 序列, 减少剩余噪声点数, 还要对连续多帧图像进行高阶互相关处理^[16].

在一帧图像的二维空间上, 各像素噪声是高斯白噪声, 其灰度分布满足 $N(m, R^2)$. 同时, 在成像过程中一般能保证高斯噪声满足平稳的条件, 并且由于采样点数很多, 高斯噪声也具有各态历经性, 一帧图像所有像素的联合概率分布满足 $N(m, R^2I)$. 根据遍历定理^[17], 对于连续多帧序列图像, 沿时间轴看, 在各个像素之间, 噪声灰度分布也是互不相关的, 它们的联合概率分布仍然满足 $N(m, R^2I)$. 因此, 在图像序列的时空三维空间里, 高斯噪声都是不相关的.

在三维空间里作连续直线运动的点目标, 若在第 n 帧存在一个目标像素 $S(x_n, y_n, t_n)$, 那么在第 $(n-1)$ 帧必定存在一个目标像素 $S(x_{n-1}, y_{n-1}, t_{n-1})$, $S(x_{n-1}, y_{n-1}, t_{n-1})$ 是 $S(x_n, y_n, t_n)$ 的近邻, 邻域的大小由目标的帧间运动速度决定; 并且在第 $(n-2)$ 帧也必定存在一个目标像素 $S(x_{n-2}, y_{n-2}, t_{n-2})$, $S(x_{n-2}, y_{n-2}, t_{n-2})$ 是 $S(x_{n-1}, y_{n-1}, t_{n-1})$ 的近邻, $S(x_{n-2}, y_{n-2}, t_{n-2})$ 相对于 $S(x_{n-1}, y_{n-1}, t_{n-1})$ 的方向与 $S(x_{n-1}, y_{n-1}, t_{n-1})$ 相对于 $S(x_n, y_n, t_n)$ 的方向一致. 依此类推, 可以得到目标像素的轨迹, 所依据的就是目标像素固有的轨迹连续性, 也就是它们在时空三维空间里的相关性.

定义门限函数:

$$y^{(k)}(x,y,t_n)=g_1\left[Y^{k-1}(x,y,t_n)+g\left[\sum_{i=-|v|}^{|v|}\sum_{j=-|v|}^{|v|}Y^{k-1}(x+i,y+j,t_{n-1})\right]\right.\\ \left.+\sum_{m=2}^{T-1}g\left[\sum_{i=-2_m}^{2_m}\sum_{j=-2_m}^{2_m}Y^{k-1}(x+i_m,y+j_m,t_{n-m})\right]\right] \quad (19)$$

从第 T 帧开始的连续 T 帧进行二次高阶互相关操作,就得到从第(2T- 1)帧开始的二次高阶互相关处理后的图像序列,使每帧的非零点变得更加稀疏,依此类推,若做到 k 次高阶互相关操作,就可以得到从第(kT- k+ 1)帧开始的被处理后的图像序列.高级互相关操作的次数越多,UCN 序列的抑制效果越好,但处理时间也越长.因此,在实际应用中,要从抑制 UCN 序列的效果和处理时间两个方面进行折衷来决定 k 的取值.在实验中取 k= 2,即进行两次高阶互相关操作.实验结果表明,对单帧信噪比 C= 1.5~ 0.5 的图像序列,在进行单帧自适应门限检测(P₁= 0.2)和两次高阶互相关处理后,剩余非零点数只有 0.03~ 14.59%,噪声抑制率为 99.97~ 85.41%.

4 仿真实验结果

利用上述自适应算法,分别用模拟图像序列和真实图像序列(抑制了 CN 序列)进行了大量的仿真实验.在实验中,取 P₁= 0.2,当 SNR ≥ 1.0 时,取 T= 15,当 SNR < 1.0 时,取 T= 20.图 1~ 4 给出了典型实验结果,其中,图 1 和图 4 为计算机生成的模拟图像序列,信噪比分别为 11.5 和 0.5,图 2 为红外真实图像序列,在抑制 CN 序列后, SNR= 11.5,图 3 为可见光真实图像序列,在抑制 CN 序列后, SNR= 1.0.图 1~ 4 中的(a)为一帧原图,(b)为单帧自适应门限检测结果,(c)为一次高阶互相关结果,(d)为二次高阶互相关结果.实验典型数据见表 2.

表 2 仿真实验典型数据

图像序列	SNR	单帧门限检测抑制率	一次高阶互相关后抑制率	二次高阶互相关后抑制率
图 1	1.5	74.66%	99.9%	99.97%
图 2	1.15	66.02%	83.56%	95.74%
图 3	1.0	59.96%	71.61%	85.41%
图 4	0.50	35.74%	51.46%	90.33%

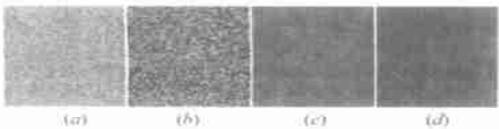


图 1 模拟图像序列实验结果(SNR= 1.5)

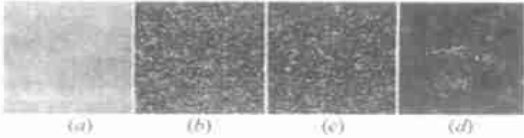


图 2 红外真实图像序列实验结果(SNR= 1.15)

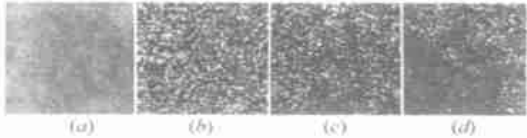


图 3 可见光真实图像序列实验结果(SNR= 1.0)

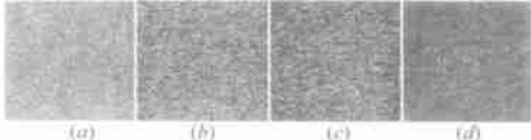


图 4 模拟图像序列实验结果(SNR= 0.5)

由表中数据可以看出,当 SNR ≥ 1.0 时, SNR 越大,剩余噪声点越少,经过单帧自适应门限检测和一次高阶互相关操作后,剩余噪声点少于 30%,经过两次高阶互相关操作后,剩余噪声点少于 15%;随着 SNR 的降低,剩余噪声点迅速增加.当 SNR < 1.0 时,为了提高噪声抑制率,在实验中由 T= 15 变为 T= 20,所以经过单帧自适应门限检测和两次高阶互相关操作后,剩余噪声点小于 10%,其噪声抑制率提高了,但处理时间也有所增加.因此,在实际应用中, T 的取值也要从抑制 UCN 序列的效果和处理时间两个方面考虑折衷决定.

5 结束语

本文通过理论分析和实验,研究了一种通过单帧自适应门限检测与多帧高阶互相关技术来抑制 UCN 序列的新方法.在实际的图像序列中,经过 CN 序列的抑制后,每帧仅含极少的点目标成分,UCN 序列占有支配地位.通过单帧自适应门限检测和两次高阶互相关处理可以有效地抑制随机噪声,使非零点变得非常稀疏,大大压缩候选轨迹的数目和数据处理量.文中给出了各个操作的详细理论分析,针对实际应用导出了一系列的公式,并且对模拟图像、真实红外图像和真实可见光图像的实验结果及数据分析充分证明了理论分析的正确性与计算公式的可靠性.此方法在航空航天、遥感图像处理、图像精确制导和机器视觉中均有重大应用价值.

参考文献:

[1] Jae2Ho Choi, A R Sarah. Thre2dimensional location estimation of tra2jectories of point targets using a projector2based transformation method [J]. Optical Engineering, 1995, 34(3): 933- 939.
[2] I S Reed. Optical moving target indication algorithm for optical image sequences[J]. IEEE T2AES, 1990, 26(3): 434- 440.
[3] Y Bamiv, O Kella. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets part II: analysis [J]. IEEE T2AES, 1987, 23(6): 776-

787.

- [4] S D Blostein, T S Huang. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing [J]. IEEE TSP, 1991, 39 (7): 1611- 1629.
- [5] S L Wang, X S Zheng. Detection of moving point targets with neural networks [A]. IJCNN [C]. Beijing: IJCNN, 1992. 53- 61.
- [6] J F Rivest, R Fortin. Detection of dim targets in digital infrared imagery by morphological image processing [J]. Optical Engineering, 1996, 35 (7): 1886- 1893.
- [7] M S Dennis, I E Abdou, R E Warren. Optimum detection of small targets in a cluttered background [J]. Optical Engineering, 1998, 37 (1): 83- 92.
- [8] R N Strickland, D M Zoucha. Object detection using subband decomposition [J]. Optical Engineering, 1998, 37 (1): 320- 330.
- [9] R Y Tsai, T S Huang. Estimating 3D parameter of a rigid planar patch [J]. IEEE TASSP, 1984, 32: 213- 220.
- [10] 李金宗, 王传起. / 单二0组合检测技术的唯一性研究 [J]. 宇航学报, 1991, 4: 26- 31.
- [11] 李宁宁. 低分辨率图像序列少像元目标检测技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995. 39- 46.
- [12] 李金宗, 李宁宁. CN 序列的抑制技术 [J]. 电子学报, 1996, 24 (10): 14- 19.
- [13] 李金宗, 李宁宁. 图像积累与自适应门限检测技术的研究 [J]. 电子学报, 1997, 25 (1): 77- 79.
- [14] N C Mohanty. Computer tracking of moving point targets in space [J]. IEEE T2PAMI, 1981, 5 (3): 606- 611.
- [15] 李金宗. 模式识别导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 117- 121.
- [16] Ren2Jean Liou, R A Maimood. Din target detection using high order correlation method [J]. IEEE T2AES, 1993, 29 (3): 841- 856.
- [17] P L Chu. Optimal projection for multidimensional signal detection [J]. IEEE T2ASSP, 1988, 36 (5): 775- 786.

作者简介:



李金宗 男, 1940 年生于安徽砀山, 教授, 博士生导师, 1964 年毕业于哈尔滨工业大学无线电工程系, 1985 年 3 月))) 87 年 3 月在原西德研究图像序列分析技术, 回国后研究 D3S 技术的理论

和应用, 其中涉及信号检测理论、图像处理和系列图像分析、模式识别、精密制导和寻的跟踪、三维视觉和空间交会对接等领域, 已完成六项部级



魏祥泉 男, 1974 年出生于山东沂水, 1998 年在哈尔滨工业大学研究生院毕业, 并获信号与信息处理学科硕士学位, 当年留校任教, 讲师, 在



李宁宁 女, 1970 年出生于安徽砀山, 1995 年毕业于哈尔滨工业大学研究生院, 获信号与信息处理学科硕士学位, 目前在中国空间飞行器总体设计部工作, 主要从事弱信号检测和图像处理、数据管理和通讯等方面的研究, 对亚像元检测技术有较深入的研究。

王 松 女, 1975 年出生于辽宁盖平, 1999 年在哈尔滨工业大学研究生院毕业, 并获信号与信息处理学科硕士学位, 现在青岛朗讯公司工作, 主要从事图像处理和模式识别及通讯等方面的研究工作。