

低信噪比缓动点目标的序贯检测算法的分析和改进

崔常崑¹, 林 英², 陈景春³

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2. Syracuse University, Syracuse, NY, 13210-3570 U. S. A.; 3. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要: 本文主要讨论的是低信噪比红外图像序列中缓动点目标的实时检测问题. 在对传统序贯假设检测(正推法)进行了分析后, 针对正推法的轨迹交叉和初始点多而引起的组合爆炸等问题, 本文给出了一种基于逆推法的统计检测算法, 并对如何利用目标的缓动特性和分段技术来提高信噪比, 如何表示轨迹等进行了论述. 实验结果表明, 该算法有较好的性能.

关键词: 点目标; 低信噪比; 序贯假设检测; 逆推法

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 06-0820-04

The Analysis and Improvement of a Low-SNR Slow-Moving Point Target Sequential Detection Algorithm

CUI Chang-wei¹, LIN Ying², CHEN Jing-chun³

(1. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China; 2. 105 Roney lane, Apt. 13 Syracuse, NY, 13210-3570 U. S. A.; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Techniques of automatic real-time detection of slow-moving point target in the low SNR infrared image sequences are discussed in this paper. After analysis of the traditional sequential hypothesis testing (forward-hypothesis based), aiming at the problems of trajectories-cross and combination inflation due to more start points, a backward-hypothesis based statistical detection algorithm is put forward. The paper also discusses the methods to improve SNR and to denote the trajectories. The experimental results show that the algorithm has good performance.

Key words: point target; low-SNR; sequential hypothesis testing; backward-hypothesis

1 引言

低信噪比缓动点目标的检测问题的解决成为卫星遥感、防空预警以及深空制导等领域信息处理的核心技术之一. 该技术必须解决以下几个问题: 1、对于初捕获时仅占或小于一个像素点的点目标, 如何有效利用它的幅值及其化特征, 进行检测; 2、在检测阶段, 图像信噪比低, 如何提高信噪比; 3、在图像序列生成频率较高时, 如何满足实时性指标.

国际上对低信噪比缓动点目标的检测问题已有较深入的研究, 并形成一些典型算法. 这些算法按照处理信息的维数可分为投影法和非投影法^[1]. 投影法的典型算法主要有最优投影法^[2]、Hough变换法^[3,4]和神经网络法^[5,6]. 非投影法包括匹配滤波器法^[7]和序贯假设检验法^[8,9]等. 二者相比, 非投影法的主要优点是能够有效提高信噪比, 因此, 对于低信噪比的目标检测一般都基于非投影法. 匹配滤波器法主要采用穷尽搜索方式, 主要优点是匹配情况下能使输出信噪比达到最大, 能在低信噪比条件下检测出恒定运动的多个点目标; 缺点是需要的设备量很大. S. D. Blostein 博士提出的序贯检测的方

法^[8,9], 实质上也是三维匹配滤波器法, 数据的树型组织与截断方法很有效, 能够检测出多个作不同方向运动的目标的能力; 但在信噪比较低的情况下, 为了减少漏报概率, 候选的轨迹起始点非常多, 易出现组合爆炸.

本文主要针对序贯检测算法的上述问题, 在序贯检测算法和基于像素点的统计决策准则的基础上, 提出了基于逆推法的统计方法.

2 基于逆推法的的序贯检测算法

2.1 相关定义^[10]

定义 1: 目标平动速度是指目标速度在图像平面上的投影, 单位是像素长度/帧; 正推法是指按照图像帧序列到达顺序, 假设某一像素点为起点, 在从起点推测轨迹终点的方法.

定义 2: 逆推法是在连续 n 帧内, 假设某一像素点为终点, 再由目标轨迹终点推测轨迹起点和中间点的检测方法.

定义 3: 正向累加就是从轨迹起点开始, 将轨迹上的各点幅值累加起来.

本文以某一终点为研究对象,以该点为坐标原点,以该点所在图像平面为坐标平面,以图像阵列中行为 x 轴,列为 y 轴,图像阵列下标增大方向为正方向,在它的邻域内建立一个坐标系,并称之为该终点在图像平面的终点坐标系(以下简称终点坐标系)。所有终点坐标系形成终点坐标系族。

定义 4:运动点目标在连续两帧图像间的坐标位置变化矢量称之为运动特征,记为 $(dx, dy)^{[11]}$ 。

2.2 正推法分析及逆推法原理

Blostein 的序贯检测方法的主要思路是以各个可能起始点开始,并使用相应假设搜索技术,将可能的轨迹组织成树形结构,然后用多级假设检验方法中的序贯似然比检验来修剪树形结构的候选轨迹片段。该算法分成两个步骤,首先对图像序列作预白化处理,经预白化处理的图像序列的噪声模型是零均值的高斯白噪声,然后应用序贯似然比检验。这里的检验统计量是根据候选轨迹点上的幅值 E_i 之和,把它序贯地与两个阈值 b_i, a_i 做比较,直到此轨迹包含目标的假设被接受 H_1 或被拒绝 H_0 。当检验统计量落在两个阈值之间时,则保留并等待下一检验。经过这样不断地对树形候选轨迹进行修剪截断,直到第 k 帧可以通过阈值的最后截断找出运动点目标的位置^[8,9]。它的缺点是为了减少漏报概率,候选的轨迹起始点非常多,可能导致后面的树权急剧增多,会使计算量迅速增大。在候选轨迹起始点特别多的时候,相邻起始点的轨迹间有许多交叉,许多非相邻起始点的轨迹也可能出现轨迹交叉现象。如果不进行截断处理,则数据量将使实时性难以满足。

如果把某一像素点作为目标终点来进行反向搜索轨迹,无论有几个目标轨迹交叉,也能够避免目标丢失等问题。因为当多个目标出现在一个像素点上时,只要判断这些轨迹的累加幅值是否超过阈值,只要其中的一个累加幅值超过阈值,我们就确定了这个终点。这就引出了我们前文定义的轨迹逆推法的概念。

逆推法的思路是假设把目标轨迹分成若干合理段,以分段中的最后一帧中的像素点作为某一阶段的轨迹终点,来推测分段内到达该终点的所有起点和中间点。在实时系统中,必须对图像来一帧处理一帧,因此,需要找到一个有效的方法解决逆推法与正向累加的矛盾。另外,在一帧图像中,每个像素点都有自己的绝对坐标位置,为了记录轨迹,有时不得不记录轨迹点的绝对坐标,一方面是计算、存储复杂,另一方面也不便于预测目标的状态。对目标检测来说,最关心的是目标在当前帧的位置,因此只要能确定目标是否在某一像素上即可。如果记录到达某一终点的所有轨迹的累积幅值统计检测量,采用最大值滤波法,就能达到我们的检测目的。对于轨迹中间点我们也可以看作临时终点进行处理。当这种路径集合只受最大目标平动速度 v 像素长度/帧的限制时,有下列递推式:

$$\begin{cases} g_{i,j}^0 = 0 \\ g_{i,j}^k = \text{Max}(g_R^{(k-1)}) + f_{i,j}^k \end{cases} \quad (1)$$

其中 R 是围绕像素点 (i, j) 的半径为 R 的区域中像素点的集合。当前位置的累积统计量是目标可能来自区域内的累积检测统计量的最大值加上当前像素值。

在点目标检测系统中,当引导头与目标距离较远、图像探

测频率较高时,目标在图像上的运动具有缓动特性(小于 1 像素长度/帧),且运动是连续的。设点目标 n 帧移动一个像素且 n 帧内点目标的轨迹连续。对于一个缓动目标,在图像序列局部片段中,目标具有一定的运动范围约束性及不动特性。因为片段是局部几帧,且运动范围已知,对目标的一些特性容易把握。不妨利用这个特性,进行合理的片段划分来提高信噪比,能使单帧检测虚警率高、组合爆炸以及整体虚警率收敛缓慢等问题得以解决。通过对具有缓动特性的目标轨迹的定量分析可以看出,当目标平动速度为 1 像素长度/ n 帧时,在连续 $n+1$ 帧图像中,以最后一帧中的某一像素点为终点的轨迹起点或中间点的坐标在终点图像平面上的投影必在该终点的邻域内,那么目标的运动特征就可以看成是以目标终点为原点的终点坐标系下的坐标。这里,用运动特征来表示轨迹,并称之为运动特征表示法。在描述运动特征时,本文采用了降维表示法,即将二维信号坐标分成两个一维信号分量坐标并分别表示。当目标平动速度小于等于 1 像素长度/帧时,目标的运动特征有九种可能,如表 1 所示。

表 1 运动特征表

$\begin{matrix} & y \\ x & \end{matrix}$	正向	不动	负向
正向	(1, 1)	(1, 0)	(1, - 1)
不动	(0, 1)	(0, 0)	(0, - 1)
负向	(- 1, 1)	(- 1, 0)	(- 1, - 1)

因此考虑当目标平动速度为 1 像素长度/ n 帧时,在连续 $n+1$ 帧图像内到最后一帧图像某一终点的一维信号的情况时,它的最多可能候选轨迹就可以在终点坐标系下表示出来。假如我们当目标平动速度为 1 像素长度/ n 帧时,在连续 $n+1$ 帧图像中,一维信号轨迹可用如下矩阵表示:

$$T_{m \times k} = \begin{bmatrix} dx_{11} & dx_{12} & \dots & dx_{1k} \\ dx_{21} & dx_{22} & \dots & dx_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ dx_{m1} & dx_{m2} & \dots & dx_{mk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $m = \text{sum}(T) = 2k + 1, k$ 代表帧数,每行代表一条轨迹上各点的运动特征,每列代表 m 条轨迹在相应帧图像中所经过的点的运动特征。如图 1 是平动速度为 1 像素长度/4 帧时一维信号轨迹情况。它的轨迹矩阵表示如式(3)

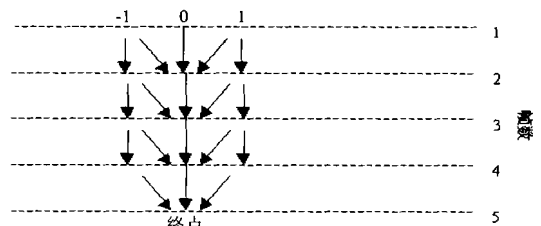


图 1 平动速度为 1 像素长度/4 帧时一维信号轨迹情况
下面是目标平动速度为 1 像素长度/4 帧的轨迹矩阵表示:

$$T_{(2i+1) \times i} |_{i=4} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在满足实时条件的情况下,当目标平动速度为 1 像素长度/ n 帧时,在连续 $n+1$ 帧图像内,以最后一帧中的某一像素点为终点的轨迹在某一帧图像中的绝对坐标位置可采用下式表示:

$$\begin{cases} x_{h,m-k+1} = x_{e_m} + t_{h,m-k+1} \\ y_{h,m-k+1} = y_{e_m} + t_{h,m-k+1} \end{cases} \quad (4)$$

其中, h 代表第 h 条轨迹, k 代表从终点算起的帧次, m 代表终点图像帧次, x_e 、 y_e 代表终点绝对坐标, $t_{h,m-k+1}$ 是轨迹矩阵元素。

采用目标轨迹的降维表示,使得记录目标的轨迹更有利于计算、存储,同时也解决了与正向累加的矛盾。

2.3 基于逆推法的序贯检测算法流程图及描述

本算法主要包括初始化、一阶累积、检测判断、四阶局部逆推累积、最大值滤波和计算阈值等。下面给出流程图和算法描述。

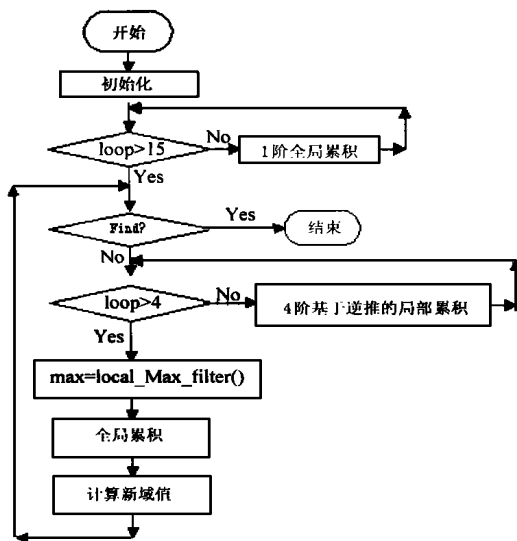


图2 算法流程图

```
void detect () {
```

```
1. initialization —define some necessary variables and the 4-stage template:
```

$$T_{(2i+1) \times i} |_{i=4} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

```
2. for( loopvar = 0; loopvar + +; loopvar < k - n1) { // k1 - th 1 - stage back-ward hypothesis:
```

```
for( x = 0; x + +; x < row . max)
```

```
for( y = 0; y + +; y < col . max)
```

```
read the kth image f( x, y, tk); //reading the kth frame
```

```
image.
```

```
gk(x, y) = Max( g(k-1) ) + fk(x, y) // global - accumulation
```

```
}; // 2 - end;
```

```
3. while { // k2 - th 4 - stage back-ward hypothesis:
```

```
detect . end = detect . deal . function ( gk(x, y) ); //judge whether the targets are found,
```

```
if( detect . end) break; //if found .end.
```

```
for( m = 0; m + +; m < 4) { // 4 - stage backward hypothesis accumulation
```

```
for( x = 0; x + +; x < row . max)
```

```
for( y = 0; y + +; y < col . max) { // 3 - 1 - beginning
```

```
read the kth image f( x, y, tk); //reading the kth frame
```

```
image.
```

```
for( l . i = 0; l . i + +; l . i < 8)
```

```
for( l . j = 0; l . j + +; l . j < 8)
```

```
{
```

```
if( f( x, y) > local . threshold)
```

```
l . gk(i + T( l . i, l . j ) + T( i, l . j )) = l . g(i, j) + fk(x, y) // Local . accumulation
```

```
}
```

```
} // 3 - 1 - end
```

```
Max = Local . Max . filter( l . g );
```

```
gkx, y = Max( g(k-1) ) + Max; // global . accumulation;
```

```
new . threshold = k * ( r + μ ) - -1( pd ) * √k * . // computing the new threshold;
```

```
} // 3 - end
```

```
} // end
```

3 实验对照结果及分析

传统正推法和本算法都是在 486/66 PC 机上采用 Borland C++ 编程实现,对模拟软件产生的点目标运动速度小于 100/s 的 100 组图像(其中初始信噪比为 3dB, 2.5dB, 1.5dB, 1dB, 0.5dB)和 20 组由实时场景产生器(硬件设备)实时产生的图像(初始信噪比为 2dB)进行对照检测^[12,13]。图 3~5 是两种算法在各种初始信噪比下的一些实验指标对照结果。图 3 是两种算法的漏检组数,可以看出在初始信噪比小于 2.5dB 时,随着初始信噪比的降低,逆推法的漏检率越来越低于正推法;图 4 表明在初始信噪比小于 2dB 时,逆推法的虚警组数小于正推法;图 5 表明在初始信噪比小于 2dB 时,逆推法所需的检测帧数小于正推法。

从上面的实验结果以及表 2 可以看出,当信噪比小于 2dB 时,改进后的算法的各种指标都优于传统算法。算法的主要特点如下:(1)对于初始信噪比较低,算法尽可能地利用

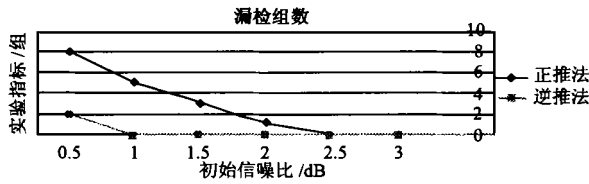


图 3 漏检组数对照图

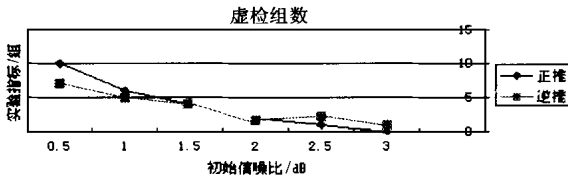


图 4 虚警组数对照图

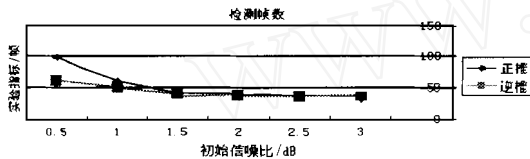


图 5 检测帧数对照图

了缓动特性形成的轨迹约束条件,在保证不漏检的情况下使用精细搜索,即避免了组合爆炸,又有效地提高了信噪比,减少了检测帧数;(2)帧候选点比较多时,降维组合表示法只需记录候选轨迹终点的坐标位置,避免了轨迹跟踪记录的复杂性,降低了时间和空间开销。(3)数据表示规范,便于并行处理。

表 2 图像尺寸为 10 × 10 的轨迹对照统计信息

帧次	轨迹数					
	正推		逆推			
	理论轨迹	剪枝后	1 像素/1 帧	1 像素/2 帧	1 像素/3 帧	1 像素/4 帧
1	100	100	100	2177	4268	7056
2	1168	1168	100	100	4268	7056
3	(1168) ²	6821124	100	2177	100	7056
4	(1168) ³	204633676	100	100	4268	100
5	(1168) ⁴	8183344865	100	2177	4268	7056
6	(1168) ⁵	477907289662	100	100	100	7056

4 结论

在解决低信噪比条件下点目标的检测问题上,传统序贯假设检测的基本方法由于复杂的数据结构使得实现起来开销较大。本文给出了基于逆推法的改进方案,解决了由于初始点多而出现的组合爆炸问题,同时有效地提高了信噪比,并找到了一种有效的轨迹表示方法,使算法检测性能提高。实验结果表明,改进后的算法较好地满足了实时检测的要求。

参考文献:

[1] 梁民. 点目标自动识别的研究现状和发展趋势 [J]. 系统工程与电子技术, 1990, 8: 23 - 25.

[2] Chu P.L. Optimal projection for multidimensional signal detection [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1989, AES-25(3) : 144 - 156.

[3] D G Falconer. Target tracking with the Hough transform [A]. Proc of Asilomar Conf. on Circuits [C]. Systems and Computers, 1977.

[4] A E Cowart, W E Snyder and W H Ruedger. The detection of unresolved targets using the Hough transform [A]. CVGIP [C], 21. 3. 1983.

[5] Roth M.W. Neural networks for extraction of weak targets in high clutter environments [J]. IEEE trans. Systems, Man and Cybernetics, 1989, SMC-19: 763 - 782.

[6] 陈茂亮, 郑小松. 人工神经网络用于点目标运动轨迹的检测 [J]. 遥测遥控, 1994, 10: 24 - 28.

[7] Reed I S, Cagliardi R M, Shao H M. Application of three dimensional filtering to moving target detection [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1983, AES-19(6) : 123 - 126.

[8] S D Blostein and T S Huang. Detecting small moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1991, 39(7) : 1611 - 1629.

[9] S D Blostein, H S Richardson. A sequential detection approach to target tracking [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1) : 197 - 211.

[10] 崔常崑. 低信噪比红外图像序列中运动点目标的检测技术 [D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1997.

[11] 钱浙滨, 刘小红, 李介谷. 实时的点目标检测算法的设计和实现 [J]. 系统工程和电子技术, 1998, 2: 1 - 3.

[12] 863-409-3 课题组. 长波红外导引头目标检测、识别和跟踪算法验收大纲 [Z].

[13] 目标模拟器与目标识别课题组. 数字式红外目标模拟器 [R]. 863-409-3 研究报告, 1993.

作者简介:



崔常崑 男. 北京无线电测量研究所软件工程师, 1997年毕业于哈尔滨工业大学计算机应用专业, 获工学硕士学位. 主要研究方向是: CIMS, 图像处理, 模式识别, 数字信号处理, 分布式网络数据库。

林 英 1997年毕业于哈尔滨工业大学通信与电子工程专业, 获工学硕士学位. 现在 Syracuse 攻读电子工程博士学位, 研究方向为数字信号处理, 图像处理, 通信网管等。

陈景春 哈尔滨工业大学计算机科学与工程系教授, 主要研究方向是: 图像处理, 模式识别。