

运动点目标序列图像检测性能分析

莫 凡 张 涛 凌 丽

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 在点目标探测系统中, 需要在虚警率容忍限度内, 尽可能提高目标的探测概率。在单帧图像信噪比无法提升的情况下, 常常采用多帧序列图像检测。然而, 对于随机运动的点目标, 采用多帧序列图像检测在什么样的情况下能提高探测概率目前还没有完整的结论。现从建立点目标及噪声模型出发, 用理论估算和仿真实验的方法对这一问题做了分析, 并得出结论。这些结论对目标探测系统的设计具有指导意义。

关键词 目标跟踪 虚警率 探测概率 图像序列 目标检测

中图法分类号 TN911.73; **文献标志码** A

在目标探测系统中, 从低信噪比的图像中提取微弱点目标信号一直以来是研究的难点和热点, 各类方法不断涌现^[1-4]。随着探测器的帧频的提高, 帧与帧之间杂波的相关性增加了, 使得用时域滤波器或者时空域滤波器代替单纯的空域滤波器来抑制杂波从而检测目标成为新的研究趋势^[5]。Caefer等人在文献^[6,7]中提出了一组时域滤波器, 采用了在多帧图像中不断更新目标的置信度的思想^[8,9]。在文献^[10]中, Silverman等人对滤波器的参数进行了改进。最后, 在文献^[11]中对该组滤波器中挑选了六个时域和空域参数, 使用大量的实际图像并通过迭代运算, 得出了一组最优参数的滤波器。然而, 目前的研究主要集中在目标的运动速度已知或者是目标的具有确定的运动概率模型的特殊的前提下。在很多情况下, 由于目标探测系统的抖动或者其他原因等会造成目标在视场内随机运动。在这种情况下, 通过多帧图像序列的检测的方法是否一定能提高目标的探测概率, 目前还没有完整的结论。本文将从建立点目标及噪声模型出发, 用理论估算和仿真实验的方法, 从多帧能量累积和波门检测的角度对这一问题进行分析。

1 点目标及噪声成像模型

在实际探测系统中, 系统接收到的图像存在退化现象。图像退化是指由场景得到的图像没有完全的反应场景的真实内容。造成图像退化的因素主要有两类。一类是图像产生过程中产生的误差。主要有透镜的色差、像差、失焦等。由于这些误差, 无限远点目标在成像平面上会扩散成一个光斑。因此, 这一类退化常被称作模糊。另一类是在图像记录过程中产生的, 主要有传感器的电子或电磁干扰。图像中的噪声主要有, 热噪声、闪烁噪声、发射噪声等。虽然这些噪声服从不同的概率分布, 但是经过图像预处理, 都能将这些噪声转化为零均值的白噪声。因此, 系统接收到的某个像元上点目标信号为:

$$G(x,y) = I(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式(1)中 $I(x,y)$ 为点目标光斑强度; $n(x,y)$ 为白噪声。

2 能量累积对点目标探测的作用

本文中将信噪比定义为:

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (2)$$

2011年4月13日收到

国家“863”计划资助

第一作者简介: 莫 凡(1980—)男, 江苏武进人, 博士研究生, 研究方向: 电路与系统。E-mail: azuromfan@gmail.com。

式(2)中

$$\begin{aligned}\mu &= E(G); \\ \sigma &= D(G).\end{aligned}$$

能量累积采用求和取平均的方法。两帧图像能量累积的结果为:

$$\overline{G(x,y)} = \frac{G_1(x,y) + G_2(x,y)}{2} \quad (3)$$

两帧图像上的噪声一般是独立同分布的,因此有:

$$E(G_1) = E(G_2) = \mu \quad (4)$$

$$D(G_1) = D(G_2) = \sigma^2 \quad (5)$$

累积求平均后的信噪比为:

$$\begin{aligned}SNR' &= \frac{E(\bar{G})}{D(\bar{G})} = \frac{E\left(\frac{G_1 + G_2}{2}\right)}{\sqrt{D\left(\frac{G_1 + G_2}{2}\right)}} = \frac{E(G_1) + E(G_2)}{\sqrt{D(G_1) + D(G_2)}} = \\ &\frac{2\mu}{\sqrt{2\sigma^2}} = \sqrt{2} \frac{\mu}{\sigma} = \sqrt{2} SNR \quad (6)\end{aligned}$$

对于静止点目标采用能量累加的方法,两帧累加,信噪比提高到原来的 $\sqrt{2}$ 倍。同理, n 帧累加信噪比提高到原来的 \sqrt{n} 倍,作用明显。

3 能量累积法适用范围的估算

在点目标随机运动的情况下,光斑的能量累积往往不能对齐。造成后续图像序列中对应像元的信号强度下降,能量累积后的信噪比随之下降,当点目标的运动范围达到某个临界点时,累积后的信噪比等于单帧的信噪比。可以证明,在这个临界点时,第二帧的能量 $E(G_2)$ 与第一帧的能量 $E(G_1)$ 满足关系

$$E(G_2) = (\sqrt{2} - 1)E(G_1)。证明如下:$$

第一帧的信噪比:

$$SNR_1 = \frac{E(G_1)}{D(G_1)};$$

与第二帧累积后的信噪比:

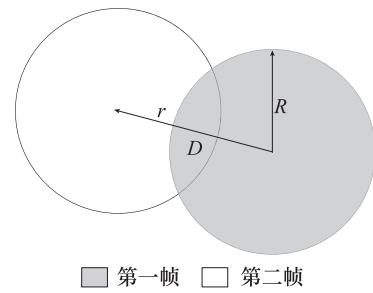
$$SNR = \frac{E(\bar{G})}{D(\bar{G})} = \frac{E(G_1) + E(G_2)}{\sqrt{D(G_1) + D(G_2)}}。$$

令 $SNR_1 = SNR$, 可得

$$\begin{aligned}\frac{E(G_1) + E(G_2)}{\sqrt{D(G_1) + D(G_2)}} &= \frac{E(G_1)}{D(G_1)} \frac{E(G_1) + E(G_2)}{\sqrt{2\sigma^2}} = \\ \frac{E(G_1)}{\sigma} E(G_2) &= (\sqrt{2} - 1)E(G_1)\end{aligned} \quad (7)$$

证毕。

此时,虽然经过图像累积,但是信噪比并没有增加。



■ 第一帧 □ 第二帧

图 1 连续两帧的光斑位置

现在我们把点目标光斑近似成一个半径为 R 能量分布均匀的圆形光斑(如图 1 所示),光斑帧间运动服从均匀分布,其概率密度函数为:

$$f(r) = \begin{cases} \frac{1}{\pi l^2}, & 0 \leq r < l; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

其中 l 为抖动范围。

那么,第二帧光斑落在原来区域里平均能量正比于第一帧光斑与第二帧光斑相交的平均面积,该面积为:

$$\begin{aligned}S &= \iint_D S_b f(r) r dr d\theta = \\ &\iint_D \left(2R^2 \arccos \frac{r}{2R} - \frac{r}{2} \sqrt{4R^2 - r^2} \right) \frac{1}{\pi l^2} r dr d\theta = \\ &2R^2 \arccos \frac{l}{2R} - \frac{R^3}{l} \sqrt{4 - \frac{l^2}{R^2}} + 4 \frac{R^4 \arcsin \frac{l}{2R}}{l^2} + \\ &\frac{1}{4} \frac{(4R^2 - l^2)^{\frac{3}{2}}}{l} - \frac{1}{2} \frac{R^2}{l} \sqrt{4R^2 - l^2} - \\ &2 \frac{R^4 \arctan \frac{l}{\sqrt{4R^2 - l^2}}}{l^2}.\end{aligned}$$

令 $a = l/R$ 。

$$S = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{a}{2} - \frac{\sqrt{4-a^2}}{\pi a} + 4 \frac{\arcsin \frac{a}{2}}{\pi a^2} + \frac{1}{4\pi a} (4-a^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{4-a^2}}{a} - 2 \frac{\arctan \frac{a}{\sqrt{4-a^2}}}{\pi a^2}.$$

再令 $S = \sqrt{2} - 1$ 可解得

$$a = 1.46405 \quad (8)$$

上述近似计算表明,当光斑的运动半径超过其自身半径的 1.46 倍时,多帧能量累积的方法反而引入了更多的噪声,信噪比下降。

4 多帧波门检测的仿真实验及分析

多帧累积算法需要缓存多帧图像,对处理系统有较高的要求。如果视场内目标不多,可以将某一帧内过阈值的像素的坐标存储,然后在波门范围内寻找后续图像序列中的过阈值像素,如果找到过阈值像素,那么判定为有目标。显然对于静止目标来说,多帧检测有利于提高探测概率。下面的仿真实验,主要用来估计多帧检测抖动点目标的抖动容忍范围 l 。

实验中,假设信噪比为 3,光斑充满一个像元,光斑的抖动服从均匀分布概率密度。光斑的样本数 5 000,并分别取 $l=0.46, 0.2, 0.8$ 。通过比较与其相应的单帧探测概率-虚警率曲线,来评价各自的探测效果。

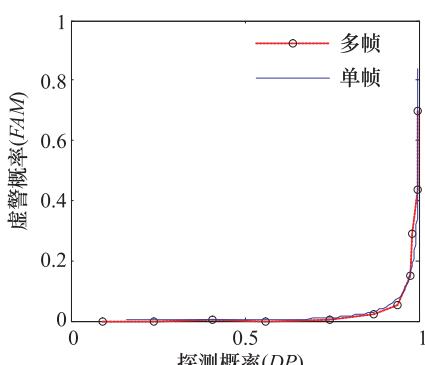


图 2 $l=0.46$ 时探测概率-虚警率曲线

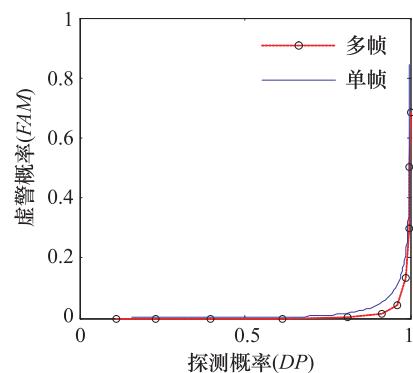


图 3 $l=0.2$ 时探测概率-虚警率曲线

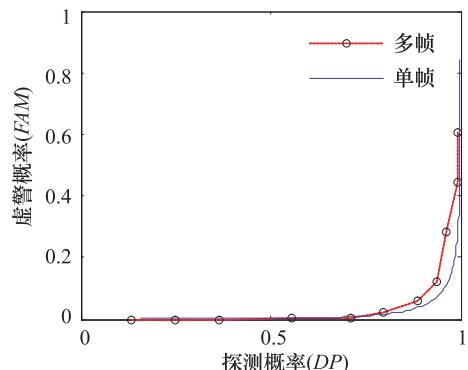


图 4 $l=0.8$ 时探测概率-虚警率曲线

实验结果表明,当 $l=0.46$ 时,多帧检测的探测概率虚警率曲线与单帧的基本拟合,表明在此条件下多帧检测效果与单帧的相当。 $l=0.2$ 时多帧检测的曲线在单帧的右侧,表明多帧检测效果优于单帧检测。当 $l=0.8$ 时,多帧曲线在单帧曲线的左侧,表明在此条件下多帧检测的效果反而不如单帧的。

5 结论

从直观意义上讲,采用多帧序列图像检测点目标有利于提高目标的检测效果,但实际情况并非如此。本文通过理论估算和仿真实验的方法分别对能量累积检测法和波门阈值检测法进行分析,得出了各自的多帧检测点目标抖动容忍范围,这个范围不是很大。如果点目标在视场内的随机运动是由于系统的抖动造成的,消除系统的抖动或者获取系

统的抖动偏差的实时数据,对提高目标检测概率贡献很大。

参 考 文 献

- 1 Kassebaum J. 3-D target-based distributed smart camera network localization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010;19(10):2530—2539
- 2 Chang Chein I. Constrained subpixel target detection for remotely sensed imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000;38(3):1144—1158
- 3 Manolakis D. Hyperspectral subpixel target detection using the linear mixing model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001;39(7):1392—1408
- 4 Dijk J. Superresolution reconstruction for moving point target detection. *Optical Engineering*, 47(9):096401-1-096401-12
- 5 Reiss D B. Spatial signal processing for infrared detection. *Proceedings of SPIE* 2235, 1994;38—51
- 6 Caefer C E. Point target detection in consecutive frame IR imagery with evolving cloud clutter. *Proceedings of SPIE* 2561, 1995;14—24
- 7 Mooney J M. Point target detection in consecutive frame staring infrared imagery with evolving cloud clutter. *Optical Engeer*, 1995;34:2772—2784
- 8 Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985; AES-21(6):144—156
- 9 Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets, Part II: Analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987;AES-23(6):776—788
- 10 Caefer C E. Signal processing algorithms for point target detection in consecutive frame staring imagery. *Proceedings of SPIE* 2020, 1993;93—107
- 11 Caefer C E. Optimization of point target tracking filters. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, 2000;36(1):15—25

Performance Analysis of Detecting Moving Target by Image Sequence

MO Fan, ZHANG Tao, LING Li

(Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, P. R. China)

[Abstract] To enhance the detecting probability under prescribed false alarming rate is an universal task in detecting and tracking system for point target. Detecting moving target through image sequence is naturally used in the cases that single image provides no room for further improving the detecting probability. However, till now there is no complete theory for whether detecting through image sequence contributes to improving the detecting probability. Evolving from the mathematic model of image noise and point target, the problem with theoretical estimation and experiment are analysed. A generic conclusion is put forward which may be helpful in design target detecting and tracking system.

[Key words] target tracking false alarming rate detecting probability image sequence
target detecting