

基于辐射累积和空间反演的空中弱目标检测算法

马天磊^{1,2,3}, 史泽林^{1,2}, 尹健⁴, 徐保树^{1,2}, 刘云鹏^{1,2}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 空军装备研究院总体所, 北京 100076)

摘要: 背景辐射噪声是弱信号检测面临的难点问题。提出了一种显著提升信噪比实现匀速运动弱目标的有效检测算法。建立目标坐标空间和速度空间, 以不同速度矢量控制图像叠加, 形成提升了信噪比的新的图像序列并构成图像空间; 利用恒虚警判决法在图像空间中检测候选目标点; 根据候选目标点所对应的坐标向量和速度向量分别映射到坐标空间和速度空间, 由两个空间中出现的峰值判定目标点。实际红外成像系统实拍实验表明, 算法能将信噪比提升至接近原图的 \sqrt{N} 倍, 目标检测概率和虚警概率都明显优于所对比的弱目标检测算法。

关键词: 红外图像序列; 弱目标检测; 辐射能量累积; 恒虚警判决

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3500-07

Dim air target detection based on radiation accumulation and space inversion

Ma Tianlei^{1,2,3}, Shi Zelin^{1,2}, Yin Jian⁴, Xu Baoshu^{1,2}, Liu Yunpeng^{1,2}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. The Research Institute on General Development and Argumentation of Equipment of Air Force, Beijing 100076, China;)

Abstract: Background radiation noise interference is a difficult technical problem for dim signal detection. A dim target detection algorithm was proposed which can significantly improve signal-to-noise ratio (SNR) to achieve uniformly motion dim target detection successfully. Firstly, a coordinate space and a velocity space were established. Then the original image sequence was stacked along different velocity vectors to acquire a new image sequence with SNR improved and the new image sequence forms an image space. Secondly, quasi-target points in the image space were detected by constant false-alarm ratio (CFAR) judging. Finally, velocity vectors and coordinate vectors of quasi-target points were mapped to the velocity space and the coordinate space respectively. As a result, two local peaks from the spaces will confirm true target points.

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 中国科学院光电信息处理重点实验室基金(Y0A4106401); 中国科学院国防创新重点基金(Y4A4080401)

作者简介: 马天磊(1989-), 博士生, 主要从事红外弱目标检测方面的研究。Email: matianlei@sia.cn

导师简介: 尹健(1961-), 研究员, 博士生导师, 主要从事武器系统总体设计和评估、目标跟踪与识别方面的研究。

Email: yinyin610@sohu.com

史泽林(1965-), 研究员, 博士生导师, 主要从事光电成像、光电跟踪、图像处理、目标识别方面的研究。Email: zshi@sia.cn

Experiments of real images from actual IR imaging system show that proposed algorithm can improve SNR approximately up to \sqrt{N} times of original image SNR, and the proposed algorithm is demonstrably superior to compared algorithms on detection probability and false alarm probability.

Key words: IR image sequences; dim targets detection; radiation energy accumulation; CFAR judging

0 引言

红外弱小目标检测是红外搜索与跟踪、精确制导、红外预警、卫星遥感等领域的一项共性关键技术^[1]。现有红外弱小目标检测方法整体来讲可以分为两类:基于单帧的检测算法和基于多帧的检测算法。单帧检测算法对单帧图像进行处理,单帧给出判决结果,这种方法运算速度快,但是在信噪比较低的情况下,通常会带来很大的虚警和漏警。代表性的有形态学滤波^[2]、局部对比增强^[3-4]等方法。多帧检测算法同时处理多帧图像,能够整合多帧图像中的有用信息,达到增强目标,减弱噪声的目的,这种方法能够在低信噪比环境中检测小目标,是当前的主流方向。代表性的有动态规划^[5-6]、投影变换^[7]、高阶累积量^[8]等方法。在这些多帧检测算法中,沿目标轨迹累积能量是算法的核心步骤。然而,现阶段这些多帧算法不能充分累积目标能量,信噪比提升不够理想。

文中针对红外弱小目标检测过程中受辐射噪声干扰严重的问题,面向匀速运动目标,提出一种信噪比显著提升的弱目标检测算法。算法通过辐射能量累积提升信噪比,根据坐标空间和速度空间相对应的峰值确定目标,能够充分提升信噪比,有效检测弱目标信号。

1 目标和观测模型

由于距离较远,目标在大气折射、散射、光学散焦、透镜像差、光学衍射、镜头形变等因素的影响下,在传感器中所成的像表现为对比度弱、信噪比低和所占像素数少的特点,通常在成像平面表现为按规律分布的模糊的几个像素,其参数化的理论模型,可以用点扩散函数来模拟^[3],如公式:

$$s(x, y | x_c, y_c, \delta_x, \delta_y) = I_p \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-x_c}{\delta_x} \right)^2 + \left(\frac{y-y_c}{\delta_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

式中: s 代表目标信号的灰度; I_p 为目标的灰度峰值; (x_c, y_c) 为目标空间坐标的中心位置; δ_x 和 δ_y 分别为水平和垂直扩展系数。图1为实景弱目标三维显示图与方程(1)弱目标三维仿真图对比。

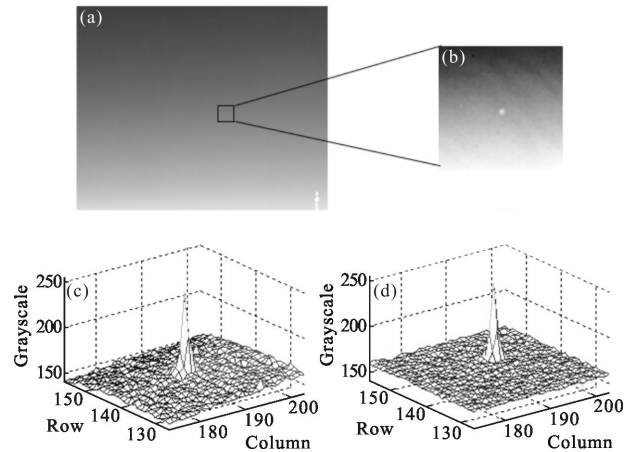


图 1 实景弱目标图与仿真图对比

Fig.1 Contrast of real scene dim target and simulated dim target

图1中,图1(a)为实际采集到的红外弱小目标图像,为了便于观察,放大图1(b)为对比度拉伸图像;图1(c)为实际图像中小目标三维显示;图1(d)为利用方程(1)仿真的小目标三维图像。

利用红外成像传感器获取的弱小目标图像数据主要由目标、背景及噪声3部分组成,图像中任意一点的数据可以用模型描述为:

$$g(\mathbf{r}, n_t) = s(\mathbf{r}, n_t) + b(\mathbf{r}, n_t) + w(\mathbf{r}, n_t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}=(n_x, n_y)$ 表示像素的坐标向量; $g(\mathbf{r}, n_t)$ 为观测值,表示第 n_t 帧像素 (n_x, n_y) 处的灰度值; $s(\mathbf{r}, n_t)$ 为信号,短时间内认为灰度为定值,文中用 A 表达。 $b(\mathbf{r}, n_t)$ 为背景杂波。 $w(\mathbf{r}, n_t)$ 是图像中服从 $N(0, \sigma^2)$ 的高斯测量噪声^[9]。

2 坐标空间与速度空间

在三维图像序列中运动的弱目标,沿时间轴投影到二维图像平面,其运动表现为目标坐标位置的变化。由于其具体位置未知,因此,需要在图像中所有可能的坐标处检测。故建立目标所有可能位置坐标构成的集合。即

$$R = \{ \mathbf{r} | \mathbf{r} = (n_x, n_y), 1 \leq n_x \leq M, 1 \leq n_y \leq N \} \quad (3)$$

式中: M 和 N 分别表示横纵坐标的最大值。

那么, R 中的元素构成了关于 n_x 和 n_y 的二维坐标空间 Z_c 。

针对匀速直线运动目标, 目标运动的速度未知, 沿目标运动速度累积目标能量是获得信噪比提升的途径, 所以必须建立目标所有可能速度的集合。速度矢量可以用大小和方向两个量进行表示, 设速度矢量为 $v=(\rho \cdot \cos \theta, \rho \cdot \sin \theta)$, 其中, ρ 为速度大小, 单位为 pixel/frame, 其最大值和最小值分别用 ρ_{\min} 和 ρ_{\max} 表示, θ 为速度方向, 在图像中可以限定在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内, 建立速度集合

$$V=\{v|v=(\rho \cdot \cos \theta, \rho \cdot \sin \theta), \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}, 0 \leq \theta < 360^\circ\} \quad (4)$$

那么, V 中的元素构成一个关于 ρ 和 θ 的二维速度空间 Z_v 。

3 辐射能量累积图像的信噪比

当 V 中的速度矢量与图像序列中目标运动相同时, 沿着此速度叠加图像序列, 可以得到信噪比提升的图像。公式(5)为 N 帧序列图像沿速度 v 叠加表达式:

$$f_{ac}(r)=\sum_{n_i=0}^{N-1} f(r+v \cdot n_i, n_i) \quad (5)$$

式中: f 为序列图像; f_{ac} 为叠加后的图像。将叠加后的图像 f_{ac} 均值滤波, 即:

$$f_{av}(r)=f_{ac}(r)/N \quad (6)$$

在速度空间 Z_v 中, 对于每一个 v 都能得到一个对应的 f_{av} , 则 f_{av} 所形成的集合表示为 F_{av} 。

$$F_{av}=\{f_{av}|f_{av}(r)=\sum_{n_i=0}^{N-1} f(r+v \cdot n_i, n_i)/N, v \in V\} \quad (7)$$

下面, 简要分析 F_{av} 中与目标真实速度相对应 f_{av} 的信噪比提升情况。

在公式(2)的目标、背景和噪声模型中, f 、目标真实速度相对应 f_{av} 中信噪比分别为:

$$f: w(r, n_i) \sim N(0, \sigma^2), SNR = \frac{A-\mu}{\sigma}$$

$$f_{av}: w_{av}(r, n_i) \sim N(0, \sigma^2/N), SNR_{av} = \sqrt{N} \cdot \frac{A-\mu}{\sigma} \quad (8)$$

式中: μ 为背景灰度均值。从中可以看出, 沿目标速度叠加、均值滤波之后的信噪比, 较操作之前的信噪比能够在理想情况下提升 \sqrt{N} 倍。

4 恒虚警率判决及目标点确认

对于 F_{av} 中的图像, 由公式(8)可知, 噪声分布的方差变为原图中的 $1/N$, 则从简单的二元假设角度

来看, 有:

$$g \sim \begin{cases} N(\mu, \sigma^2/N) | H_0 \\ N(A+\mu, \sigma^2/N) | H_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: 假设 H_0 为背景; H_1 为目标; g 为检测量。

给定恒虚警概率 P_{FA} , 则有:

$$P_{FA} = \Pr\{g > \gamma | H_0\} = Q\left(\frac{\gamma-\mu}{\sqrt{\sigma^2/N}}\right) \quad (10)$$

γ 为检测阈值, 那么, 有:

$$\gamma = \sqrt{\sigma^2/N} \cdot Q^{-1}(P_{FA}) + \mu \quad (11)$$

那么, 检测概率为:

$$P_D = \Pr\{g > \gamma | H_1\} = Q\left(Q^{-1}(P_{FA}) - \frac{A}{\sqrt{\sigma^2/N}}\right) \quad (12)$$

式中: $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ 。做出体现检测概率 P_D 和虚警概率 P_{FA} 关系的接收机工作特性(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线, 如图 2 所示。

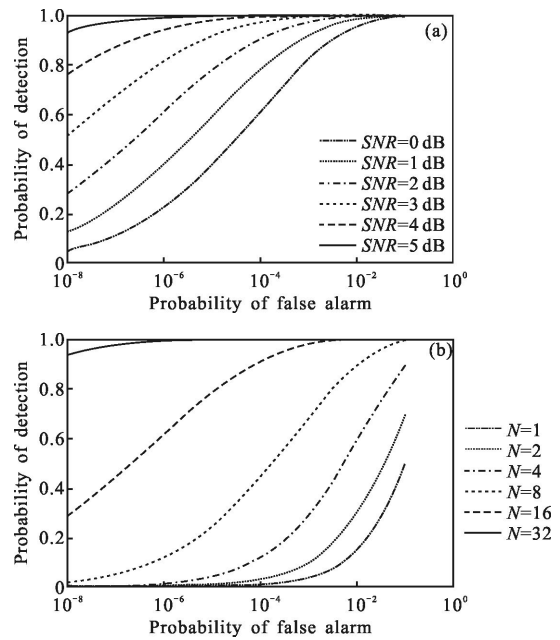


图 2 不同条件下的接收机工作特性曲线

Fig.2 ROC under different conditions

其中, 设定 $\mu=0$, 图 2(a) 为固定叠加帧数 $N=16$, 不同信噪比情况下的 ROC 曲线, 从中可以看出, 相同 P_{FA} 情况下, SNR 越高, P_D 越大。图 2(b) 为固定 $SNR=2$ dB, 不同叠加帧数情况下的 ROC 曲线, 从中可以看出, 相同 P_{FA} 情况下, 叠加帧数 N 越多, 检测概率 P_D 越高。相对于单帧检测来说, 这种多帧叠加的目标检测, 有更高的检测概率。

对于公式(11)中的阈值 γ , 其中涉及到图像均值 μ 与方差 σ^2 , 由于图像中背景分布并不是绝对均匀的^[10], 所以, 利用局部像素求取目标周围的均值与方差, 更容易获取准确值。

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{(n_x, n_y)} &= \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} g(i, j) \cdot \delta(i, j)}{\sum_{(i,j) \in \Omega} \delta(i, j)} \\ \sigma_{(n_x, n_y)}^2 &= \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} (g(i, j) - \mu_{(n_x, n_y)})^2 \cdot \delta(i, j)}{\sum_{(i,j) \in \Omega} \delta(i, j)} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: Ω 为 (n_x, n_y) 的去心邻域; $\delta(\cdot, \cdot)$ 为单位冲击函数。

将前面步骤中得到的准目标点坐标向量 (n_x, n_y) 映射到坐标空间 Z_c , 将其速度向量 (ρ, θ) 映射到速度空间 Z_v . 将两个空间分别进行局部卷积, 如果有匀速运动的目标点出现, 在坐标空间 Z_c 和速度空间 Z_v 中会分别出现相对应的局部峰值, 利用这两个平面中出现的局部峰值, 即可判定目标点, 同时能够得到目标的坐标和速度信息。

确定目标后, 需要根据目标速度, 将坐标空间中目标位置, 通过反演, 变换到原始图像序列中, 从而确定目标在原始图像中的真实位置。

至此, 可以给出算法检测流程图, 如图 3 所示。

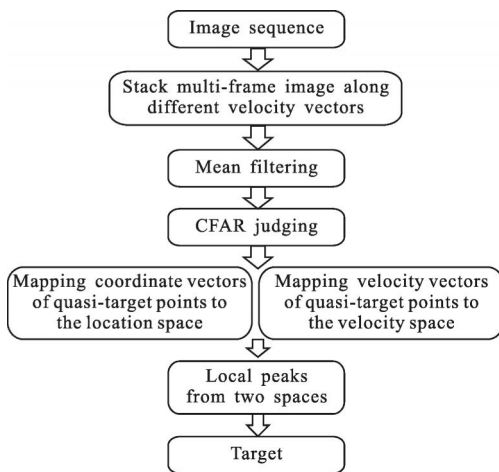


图 3 算法流程图

Fig.3 Flow chart of proposed algorithm

5 速度步长对信噪比增益的影响

假设目标以恒定的速度移动, 目标信号可以表示为:

$$s(\mathbf{r}, n_t) = s(\mathbf{r} + \mathbf{v} \cdot n_t, n_t) \quad (14)$$

如果在建立速度空间 Z_v 时, 按照 $(\Delta_\rho, \Delta_\theta)$ 为步长, 那么, 在叠加图像时, 速度大小 ρ 和速度方向 θ 的最大误差分别为 $\Delta_\rho/2$ 和 $\Delta_\theta/2$, 以最大误差把 N 帧图像叠加, 经过均值滤波之后目标变为:

$$s_{av}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{N-1} s(\mathbf{r} + \mathbf{v}' \cdot n_t, n_t) / N \quad (15)$$

式中: $\mathbf{v}' = (\rho + \Delta_\rho/2) \cdot \cos(\theta + \Delta_\theta/2), (\rho + \Delta_\rho/2) \cdot \sin(\theta + \Delta_\theta/2)$ 。

令信噪比增益为 $\eta = SNR_{av} / SNR$, 则:

$$\eta = \sqrt{N} \cdot \frac{s_{av}(\mathbf{r})}{s(\mathbf{r})} \quad (16)$$

采用公式(1)中弱小目标的点扩散函数模型, 取 $1.9 \text{ pixel} \times 1.9 \text{ pixel}$ 的弱小目标, 那么由公式(16)可以得到 η 随 Δ_ρ 和 Δ_θ 的变化曲线如图 4 所示。

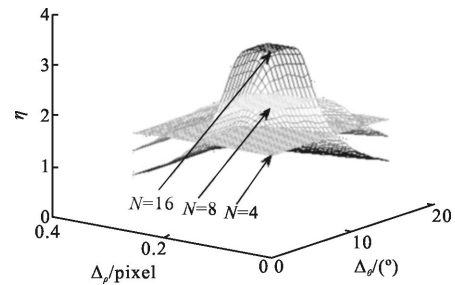


图 4 速度步长对信噪比增益的影响

Fig.4 Effect of velocity step on SNR improvement

这里只显示了有代表性的几帧叠加的情况, 从图中可以清楚地看出, 随着 Δ_ρ 和 Δ_θ 的增加, 有很明显的下降趋势, 并且 N 值越大, η 下降得越快。然而, 适当的选择 Δ_ρ 和 Δ_θ , 能够在 η 减少量可接受的情况下, 降低计算量。

6 实验结果

实验中共用到两个红外探测器, 它们的参数如表 1 所示。

表 1 实验所用红外探测器参数

Tab.1 Parameters of IR detectors used in experiments

	Camera 1	Camera 2
Spectral range/ μm	3.7-4.8	3.7-4.8
Field of view/ $^\circ$	11 \times 8	6.1 \times 4.88
Focal length/mm	46	60
Pixel size/ μm	30 \times 30	30 \times 30
Pixels	320 \times 256	320 \times 256
Frame frequency/Hz	50	50

6.1 实验室弱目标实验

在实验室环境中,用上述相机 1 拍摄匀速运动点热源图像。变化点热源与环境温差,可以模拟不同信噪比弱目标;变化点热源运动速度,可以模拟不同运动速度弱目标。对采集到的弱目标图像序列进行检测,检测结果示例如图 5 所示。

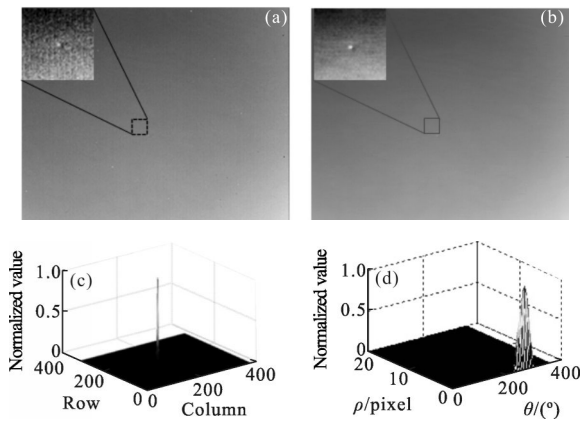


图 5 仿真弱目标检测结果

Fig.5 Detection result of simulated dim target

图 5(a)为弱目标图像序列中的一帧,由于信噪比较低,给出目标对比度拉伸后的图像,图中局部 $SNR=1.22$;图 5(c)为检测到的坐标空间局部极值;图 5(d)为检测到的速度空间局部极值;图 5(b)为检测结果,图中局部 $SNR=3.44$ 。由图 5(c)、(d)两图可以看出,检测到弱目标在坐标空间和速度空间的两个局部峰值,以此确定了图像序列中的弱目标信号。对比图 5(a)、(b)中弱目标放大图可以直观地看出,算法有效地提升了弱目标局部信噪比,检测后图像中噪声得到了明显的抑制。

为了验证所提算法信噪比提升能力,笔者选取 5 个弱目标图像序列,统计所提算法检测前后的目标局部信噪比,并与检测后理论信噪比进行对比。检测过程选用叠加帧数为 $N=8$,统计结果如表 2 所示。另外,为了直观显示算法检测前后弱目标信噪比的提升,对 5 个弱目标图像序列任选一帧,给出其检测前后弱目标图像对比,如图 6 所示。

表 2 算法检测前后信噪比对比

Tab.2 Contrast of SNR before/after detection

	SNR before detection	SNR after detection	Theoretical SNR
Sequence 1	1.68	4.68	4.75
Sequence 2	1.77	4.90	5.01
Sequence 3	1.87	5.14	5.28
Sequence 4	2.00	5.42	5.65
Sequence 5	2.13	5.85	6.03

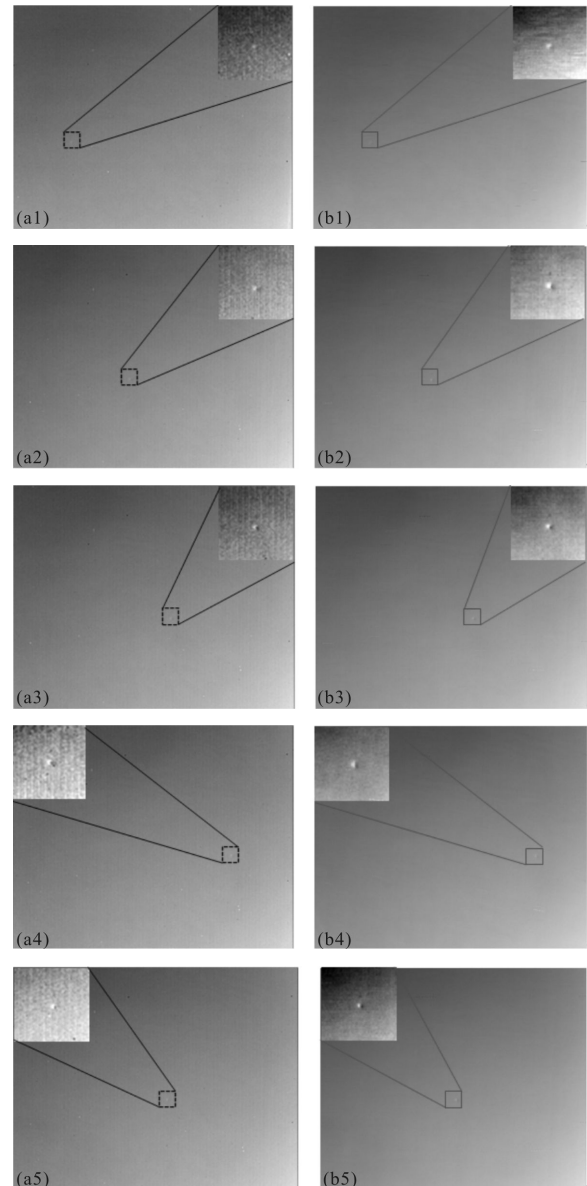


图 6 算法检测前后弱目标图像对比

Fig.6 Contrast of dim targets before/after detection

图 6(a1)~(a5)分别为检测前序列 1~5 中的 1 帧图像,其中放大图为弱目标经过对比度拉伸的图像;图 6(b1)~(b5)分别为图 6(a1)~(a5)经检测后、所对应信噪比提升的图像,从其对比可以看出,弱目标信噪比得到了明显的提升。此外,表 2 中数据可进一步证明,与检测前相比,检测后信噪比有了大幅度提升,且与理想信噪比保持一致,信噪比提升能够逼近 \sqrt{N} 。分析与理论信噪比有微小差距的原因之一,是速度空间中速度向量为离散值,当速度向量与目标实际速度存在偏差时,导致不能完全累积目标的能量,从而信噪比提升小于理想情况。

为了进一步验证所提算法的检测性能,检测不同信噪比环境下的弱目标图像序列,得到一组 ROC 曲线,如图 7 所示。

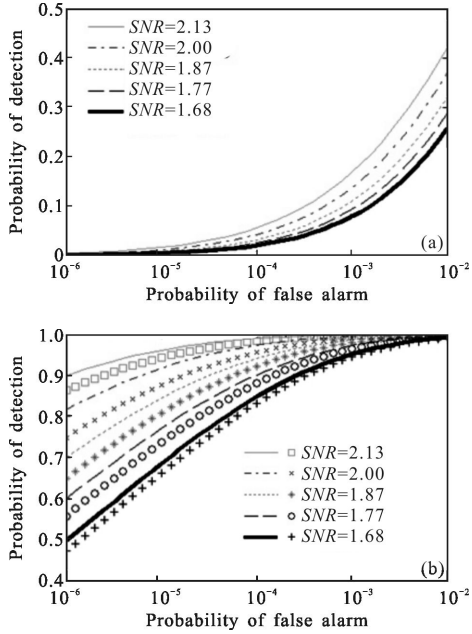


图 7 不同信噪比下的 ROC 对比
Fig.7 Contrast of ROC under different SNR

图 7(a)为单帧检测不同信噪比下的理论 ROC;图 7(b)为文中算法得到的不同信噪比下的 ROC,其中线对应于理论值,点对应于实际值。由图 7(a)、(b)两图比较可知,相同虚警率情况下,文中算法对检测概率有很明显的提升效果;由图 7(b)中的实际值与理论值比较可知,所提算法检测性能与理论分析保持一致。

6.2 实景弱目标实验

实验采用真实对空场景获取的远距离飞机弱目标图像序列,所用探测器为上述相机 2。采用 8 帧图像序列进行检测,检测结果的两个示例如图 8 所示。

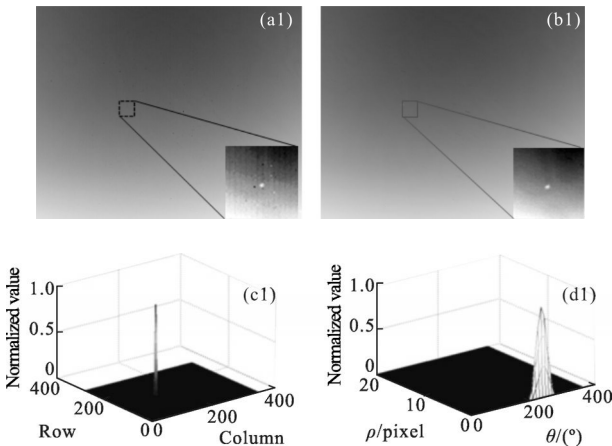


图 8 实景弱目标检测结果

Fig.8 Detection result of real scene dim target

图 8(a1)、(a2)为序列图像中的一帧,放大图为弱目标对比度增强后的图像,图 8(a1)局部 SNR 为 2.07,图 8(a2)局部 SNR 为 1.66;图 8(c1)、(c2)为检测到坐标空间局部极值;图 8(d1)、(d2)为检测到速度空间局部极值;图 8(b1)、(b2)为检测结果,图 8(b1)中弱目标局部 SNR 为 5.47,图 8 (b2) 中弱目标局部 SNR 为 4.69。

最后做一组对比实验,利用实景弱目标图像测试所提算法的检测性能,同时选取四种弱目标检测算法进行比较。实验素材为 6 组实景弱目标、低对比度图像序列,每组序列有 1000 帧图像,6 组图像序列的平均信噪比和对比度^[11]数值如下。序列 1:SNR=3.42, C=1.02×10⁻¹; 序列 2:SNR=2.28, C=6.88×10⁻²; 序列 3:SNR=1.84, C=5.70×10⁻²; 序列 4:SNR=1.76, C=4.09×10⁻²; 序列 5:SNR=1.69, C=3.27×10⁻²; 序列 6:SNR=1.61, C=2.14×10⁻²。实际检测概率和虚警概率分别如表 3 和表 4 所示。这里使用参考文献[11]中的检测概率和虚警概率统计方法,如公式(17)、(18)所示。前两种为单帧检测算法,其中,第一种是单帧 CFAR 检测算法。后三种为多帧检测算法。由于第一种和后三种算法都基于 CFAR,故将它们的虚警概率统一设定为 P_{FA}=10⁻⁴,并且将后三种算法设定处理帧数 N=8。

$$P_D = \frac{\text{图像序列中检测到的真实目标数量}}{\text{图像序列中真实目标数量}} \times 100\% \quad (17)$$

$$P_{FA} = \frac{\text{图像序列中检测到的虚假目标数量}}{\text{图像序列中检测到的目标数量}} \times 100\% \quad (18)$$

由表 3 和表 4 可知,文中算法对 6 组图像序列的检测概率是最高的,同时,文中算法对 6 组图像序

列的虚警概率是最低的。虽然参考文献[7-8]的算法在前两组序列中检测概率和虚警概率都与文中算法接近,但是,随着信噪比的下降,其算法性能呈现出明显的恶化,甚至检测概率低于单帧检测算法,虚警概率高于单帧检测算法,这种性能的恶化与其算法本身不能有效累积目标能量有很大关系。总体来讲,文中算法在检测概率和虚警概率方面都明显优于其他4种算法。

表3 不同算法实景弱目标检测概率

Tab.3 P_d of different algorithms under real scenes

	CFAR	Reference [2]	Reference [8]	Reference [7]	Proposed algorithm
Sequence 1	87.40%	88.50%	97.00%	100%	100%
Sequence 2	72.70%	86.60%	97.60%	100%	100%
Sequence 3	64.90%	75.00%	72.80%	71.70%	90.30%
Sequence 4	67.40%	72.90%	60.70%	41.50%	91.60%
Sequence 5	63.70%	70.70%	50.80%	39.30%	84.80%
Sequence 6	58.00%	58.00%	50.60%	43.70%	78.90%

表4 不同算法实景弱目标虚警概率

Tab.4 P_{fa} of different algorithms under real scenes

	CFAR	Reference [2]	Reference [8]	Reference [7]	Proposed algorithm
Sequence 1	4.22%	17.29%	2.31%	1.48%	0%
Sequence 2	4.97%	14.26%	1.91%	2.53%	0.30%
Sequence 3	3.85%	19.27%	3.83%	7.48%	0%
Sequence 4	0%	1.62%	4.15%	1.43%	0%
Sequence 5	1.85%	6.36%	5.40%	0%	0%
Sequence 6	0.68%	7.64%	4.33%	3.96%	0%

7 结论

针对红外弱目标检测遇到的共性问题——背景辐射噪声干扰,提出了一种提升信噪比的弱目标检测算法。理论分析和红外成像系统实拍弱目标实验都证明,这种算法能够将序列图像信噪比提升至接近原图的 \sqrt{N} 倍,进而有效地提高探测概率,降低虚警概率。

文中所提算法面向匀速运动弱目标,而目标的复杂运动在短时间内可以用简单规律运动近似,所提算法的有效实施,可以为下一阶段研究匀加速运动、曲线运动等复杂运动的弱目标检测奠定共性方

法基础。

参考文献:

- [1] Chen Fei. Research on dim point target detection and tracking in low SNR infrared image sequences [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003. (in Chinese)
- [2] Bai Xiangzhi, Zhou Fugen. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dimsmall target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43: 2145-2156.
- [3] Kim Sungho, Yang Yukyung, Lee Joohyoung, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system forIRST [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2009, 30: 994-1011.
- [4] Philip Chen C L, Li Hong, Wei Yantao, et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 51(1): 574-581.
- [5] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 228-242.
- [6] Huang Linmei, Zhang Guilin, Wang Xinyu. Detecting of small infrared moving object based on dynamic programming algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 303-306. (in Chinese)
- [7] Zhang Fei, Li Chengfang, Shi Lina. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46: 323-328.
- [8] Zhang Qiang, Cai Jingju, Zhang Qiheng. Dim-small moving target detection in infrared image sequences [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3312-3316. (in Chinese)
- [9] Nicola Acito, Alessandro Rossi, Marco Diani, et al. Optimal criterion to select the background estimation algorithm for detection of dim point targets in infrared surveillance systems [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(10): 107204: 1-12.
- [10] Xue Yonghong, Rao Peng, Fan Shiwei, et al. Infrared dim small target detection algorithm based on generative Markov random field and local statistic characteristic [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(5): 431-436. (in Chinese)
- [11] Shao Xiaopeng, Fan Hua, Lu Guangxu, et al. An improved infrared dim and small target detection algorithm based on the contrast mechanism of human visual system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55: 403-408.