复杂空间背景下暗弱目标的快速识别方法

鄂薇, 王大轶*, 邹元杰, 李嘉兴

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

*联系人, E-mail: dayiwang@163.com

收稿日期: 2020-11-17; 接受日期: 2020-12-31; 网络出版日期: 2021-05-13

国家重点研发计划(编号: 2019YFA0706500)和国家自然科学基金(编号: U20B2055, 61525301, 61690215)资助项目

摘要 本文针对复杂空间背景下暗弱目标难以识别的问题, 提出了一种基于匹配滤波的暗弱目标快速识别算法. 首先建立了恒星跟踪模式下条纹状空间目标的成像模型, 并利用信噪比来界定空间目标的暗弱程度. 进而设计了一种条纹单元模板, 该模板避免了生成大量不同长度的条纹模板, 从而降低了图像空间滤波过程中的计算量. 最后通过仿真实验验证了该算法的有效性, 能够实现信噪比为0.5的暗弱目标的快速识别.

关键词 空间暗弱目标, 目标识别, 天基观测, 匹配滤波

PACS: 95.10.Eg, 95.40.+s, 42.30.-d

1 引言

随着航天技术的发展, 空间目标的数量也随之快速增长. 据美国空间目标监测网统计, 截至2020年12月22日, 地球轨道上已编目的空间目标总数约为22000个¹⁾, 这其中还不包含尺寸小于10 cm的目标, 尺寸在1–10 cm的目标约500000个, 而直径小于1 cm的目标数量在1亿个以上, 对空间环境的安全形势造成了极大的影响. 为了维护太空资产安全, 需要具备对空间目标状态感知的能力. 由于易受天气与大气的影

响, 空间目标更加详细的信息, 不仅可以配合地基系统进行协同观测, 也可以作为独立系统进行观测, 对空间目标进行观测逐步从地基向天基观测手段转变是未来发展的趋势.

光学敏感器具有质量轻、功耗低、结构简单等优点, 并且能够获取空间目标纹理、轮廓等丰富的图像信息, 已成为天基观测的主要手段. 天基光学观测系统在远距离对空间目标成像时, 空间目标与恒星的图像特征都极为相似, 都为光点状. 由于恒星数量众多且亮度各异, 从这种复杂的空间背景下识别出空间目标的难度较大. 为了将两者从图像的形态上进行区分, 天基光学敏感器可采用恒星跟踪与星历跟踪模式进行成像. 其中, 恒星跟踪模式是令光学敏感器指向固定的

1) CelesTnak: Curent NORAD Two-Line Element Sets. <http://celestrack.com/NORAD/elements/>

引用格式: 鄂薇, 王大轶, 邹元杰, 等. 复杂空间背景下暗弱目标的快速识别方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 214504
E W, Wang D Y, Zou Y J, et al. Fast recognition algorithm for faint targets in complex space background (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 214504, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0452](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0452)

天区, 此时在图像上恒星相对静止, 其成像特征为光点状, 空间目标由于在曝光时间内与光学敏感器产生了相对运动, 其成像特征为条纹状; 星历跟踪模式是令光学敏感器持续指向观测的空间目标, 因此空间目标的成像特征为光点状, 恒星为条纹状^[1,2]. 在这两种模式下, 恒星与空间目标具有不同的图像特征, 因此复杂空间背景下目标的识别问题可以转化为点与条纹的识别问题, 但星历跟踪模式需要已知目标的轨道参数, 并且图像中条纹数量多, 易产生条纹叠加相互干扰的现象, 因此在远距离观测时, 一般都采用恒星跟踪模式.

在远距离成像中, 当目标的亮度与信噪比较高时, 将二值化的灰度阈值设置高于背景亮度几倍后就能将目标与恒星从背景中提取出来^[3], 进而利用恒星跟踪模式下恒星与目标的形态差异进行目标识别, 如最大类间方差算法及其改进算法^[4]、形态学图像处理方法^[5,6]等, 就能够实现条纹状目标的图像识别. 但是当目标的亮度与信噪比较低时, 空间目标的暗弱条纹容易淹没在背景信号中, 提取的难度极大. 针对暗弱目标的图像识别方法, 学者们主要从利用多幅连续图像中目标的增强信息与利用目标运动状态的先验信息两方面进行研究. 在利用多幅连续图像中目标的增强信息方面, Yanagisawa等人^[7]将多幅短曝光的图像进行叠加, 并提出了一种三维空间下的线模型描述目标在时空域运动的方法, 通过在由二维图像空间与一维时间构成的三维空间中搜索位于一条直线上的光斑来识别目标. Radim等人^[8]、Dao等人^[9]以及王敏等人^[10]也提出了类似的方法, 这类方法具有较高的灵敏度, 但是计算时间随与直线连接的候选对象数量的增加而呈指数增长; 在利用目标运动状态的先验信息两方面, Zimmer等人^[11]、Ciurte和Danescu^[12]都基于Radon变换从图像序列中识别目标, 基于Radon转换的方法虽然简单快捷, 却无法识别出非常暗弱的条纹. Vallduriola等人^[13]利用边界张量识别条纹状空间目标, 该方法同样对非常暗弱的条纹识别效果差. Gural等人^[14]采用匹配滤波算法对暗弱小行星进行识别, 利用天基观测平台的观测视差实现了点目标的小行星识别, Levesque等人^[15]与Vananti等人^[16]同样采用匹配滤波算法对暗弱目标条纹进行识别, Vananti对匹配滤波算法进行了改进, 实现了在目标遮挡情况、暗弱目标周围存在较亮目标的情况下识别出目标, 但是他们在识别过程中生成了大量不同方向、不同长度的条纹模板, 算法的

计算量较大、计算时间较长.

本文提出了一种复杂空间背景下的暗弱目标快速识别方法, 该方法同样基于匹配滤波算法, 但条纹模板的设计与文献^[15,16]不同, 通过分析空间目标条纹的成像特征, 建立符合空间目标条纹灰度分布特性的单元模板, 从而不需要生成不同长度的条纹目标, 将遍历的次数降低了一个数量级, 降低了目标识别的运算量, 从而实现了暗弱目标的快速识别.

2 条纹状空间目标的成像模型

恒星与空间目标的辐射特性都可以用符合高斯分布的点扩散函数描述^[16], 表示为

$$f(x, y) = g \exp \left[\frac{-((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)}{2\sigma_T^2} \right], \quad (1)$$

式中, g 为目标亮度的峰值强度, (x_0, y_0) 为目标中心的位置, σ_T 是目标的弥散半径.

当采用恒星跟踪模式观测时, 天基观测平台的光轴指向固定的天区, 此时恒星可以看作静止的点目标, 而空间目标由于与天基观测平台之间存在相对运动, 在曝光时间段内会在图像平面内留下一段线性的运动轨迹, 可以等效点目标中心 (x_0, y_0) 沿一定方向与速度在图像平面上进行平移与亮度叠加.

定义目标在图像上的运动速度是 $v = (v_x, v_y)$, 曝光时间为 t_e , 时间步长为 Δt , 图像上目标所在区域的亮度可以表示为

$$f(x, y) = \sum_{n=0}^{t_e/\Delta t} g \exp \left[\frac{-((x-x_0-v_x n \Delta t)^2 + (y-y_0-v_y n \Delta t)^2)}{2\sigma_T^2} \right]. \quad (2)$$

3 暗弱目标的界定

本文以信噪比来衡量目标的暗弱程度, 背景信号强度可以用正态分布描述 $X \sim N(\mu_N, \sigma_N)$:

$$\mu_N = B + N_D, \quad \sigma_N = \sqrt{B + N_D + \sigma_R^2}, \quad (3)$$

式中, B 为背景辐射产生的光电数, N_D 为暗电流产生的

电子数, σ_R 为成像电路噪声.

目标信号的信噪比可以表示为

$$SNR = \frac{S}{N} \approx \frac{S}{\sqrt{S+B+N_D+\sigma_R^2}}, \quad (4)$$

式中, S 为目标辐射产生的光电数.

当给出背景信号强度与信噪比后, 可以利用式(5)计算出信号强度.

$$S = \frac{1}{2} \left(SNR^2 + \sqrt{SNR^4 + 4SNR^2(B+N_D+\sigma_R^2)} \right) \\ = \frac{1}{2} \left(SNR^2 + \sqrt{SNR^4 + 4SNR^2\sigma_N^2} \right). \quad (5)$$

图1为一条长度为70 Pixel, 方向为 -10° 的条纹状的空间目标运动轨迹在不同信噪比下的仿真图像, 从图中可以看出, 在低信噪比为0.5与0.4时, 暗弱目标已经淹没在背景中, 肉眼已经无法分辨出来条纹状的形态.

4 基于匹配滤波的目标识别方法

4.1 条纹模板建模

由于目标的运动速度和运动方向未知, 导致目标在图像上留下的运动轨迹长度以及方向无法判断, 当

视场中出现多个运动特性不同的目标, 也会在图像上留下不同长度、不同方向的条纹轨迹. 因此, 在条纹识别过程中需要以一定步长生成大量的条纹匹配模板.

设点目标的模板尺寸为 $m \times m$, 令 3σ 范围内的强度都集中在目标中, 点目标模板可以表示为

$$P(x, y) = \exp \left(\frac{-((x-m/2)^2 + (y-m/2)^2)}{m^2/18} \right). \quad (6)$$

因此, 长度为 L pixel、转角为 0° 、平移步长为1 pixel的条纹匹配模板, 该模板的尺寸为表示 $(m+L) \times m$, 为了简化计算将小于模板最大值 M_{MAX} 1%的模板点强度置零:

$$M(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } M(x, y) < 0.01M_{MAX}, \\ \sum_{i=0}^L P(x-i, y), & \text{else.} \end{cases} \quad (7)$$

然后, 对该模板进行归一化处理, 使得条纹模板中强度之和为1, 表示为

$$\overline{M}(x, y) = M(x, y) / \sum_{x=1}^{m+L} \sum_{y=1}^L M(x, y). \quad (8)$$

将该模板绕中心点 $\left(\frac{m+L}{2}, \frac{m}{2}\right)$ 进行旋转即可生成沿不同方向的条纹模板, 在文献[16]中, 条纹匹配模板在长度集合 $\{L\}$ 设为3–99 pixel, 步长是2 pixel, 角度集合 $\{\alpha\}$ 设为 1° – 179° , 步长为 2° , 通过遍历所有 $\{L\}$ 与 $\{\alpha\}$ 中的元素组合组成的条纹匹配模板对图像进行空间滤波, 实现对不同长度、不同方向条纹的识别.

综上, 可以看出利用完整的目标条纹模板进行暗弱目标识别时, 需要生成大量的条纹模板, 实际上完整的条纹模板除两端外, 在垂直于目标运动方向上条纹强度的分布是相同的, 因此完整的条纹模板可以看作由若干段相同的条纹单元构成. 由于条纹模板单元的长度是固定的, 所以利用条纹单元模板对图像进行空间滤波时, 只需要在 $\{\alpha\}$ 中遍历所有的方向, 从而降低对图像进行空间滤波的次数.

本文提出了以条纹单元作为匹配滤波模板的方法, 条纹单元模板由若干段一维高斯分布的像素组成, 条纹模板与条纹单元模板对比如图2所示. 设条纹单元

图1 不同信噪比下的条纹状的空间目标图像. (a) SNR=1; (b) SNR=0.8; (c) SNR=0.5; (d) SNR=0.4

Figure 1 Streak of space target in different SNR. (a) SNR=1; (b) SNR=0.8; (c) SNR=0.5; (d) SNR=0.4.

图 2 条纹模板(a)与条纹单元模板(b). (a) $L=40$ pixel, $\alpha=60^\circ$; (b) $L=10$ pixel, $\alpha=60^\circ$
 Figure 2 Streak pattern (a) and streak element pattern (b). (a) $L=40$ pixel, $\alpha=60^\circ$; (b) $L=10$ pixel, $\alpha=60^\circ$.

模板的尺寸为 $l \times m$, l 也是条纹模板的长度, 可以表示为

$$M_E(x, y) = \exp\left(\frac{-(y-m/2)^2}{m^2/18}\right). \quad (9)$$

归一化的条纹模板表示为

$$\bar{M}_E(x, y) = M_E(x, y) / \sum_{x=1}^l \sum_{y=1}^m M_E(x, y). \quad (10)$$

4.2 阈值的选取方法

利用条纹单元模板对图像空间滤波后, 条纹所在区域与背景区域的图像灰度不同, 需要设置阈值将目标与背景进行区分. 在式(3)给出了背景信号的分布, 当利用尺寸为 $l \times m$ 的条纹单元模板 $\bar{M}_E$ 对图像进行空间滤波后, 背景区域的输出响应值应为

$$Y = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \bar{M}_E(i, j) X(i, j). \quad (11)$$

背景的输出响应符合高斯分布, 表示为 $Y \sim N(x, \mu_{NO}, \sigma_{NO})$:

$$\mu_{NO} = \mu_N, \sigma_{NO} = \sqrt{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \bar{M}_E(i, j) \sigma_N}. \quad (12)$$

为了能够将绝大部分的背景信号过滤掉, 将 3σ 范围内的背景输出响应强度作为阈值, 这样能够把 99.73% 背景信号去除, 因此, 本文中将阈值设为 $\mu_{NO} + 3\sigma_{NO}$.

5 仿真结果

本文对不同信噪比下的暗弱目标进行图像仿真, 并利用条纹单元模板对图像进行空间滤波来识别条纹状暗弱目标. 在仿真图像中, 图像灰度范围为 $[0, 1]$, 背景信号强度为 $X \sim N(0.3, 0.1)$, 仿真图像中包含 7 颗不同亮度的恒星与 2 个条纹状的空间目标. 其中, 2 个空间目标的条纹轨迹长度分别为 40 和 60 pixel, 转角分别为 30° 和 -10° , 并利用式(5)分别计算在信噪比 1, 0.8, 0.5 及 0.4 时空间目标的信号强度. 仿真实验中采用的条纹单元模板长度为 15 pixel, 宽度为 9 pixel. 模板旋转角度为 $1^\circ \sim 179^\circ$, 步长为 2° .

图 3 为信噪比为 1 的暗弱目标识别效果, 其中, 图 3(a) 为原始图像, 可以看出, 信噪比为 1 的暗弱目标在图像中较为清晰, 虽然受到背景噪声的影响, 条纹区域的灰度不均匀, 但是条纹状的形态与背景具有良好的区分度. 由于恒星的亮度远大于暗弱目标, 需要将恒星从图像中剔除, 利用式(6)中点目标模板可以将恒星识别出, 并在图像中将灰度置为 0, 恒星剔除后的效果如图 3(b) 所示. 利用条纹单元模板在恒星剔除后的图像中进行空间滤波, 滤波后的效果如图 3(c) 所示, 可以看出, 利用条纹单元模板进行空间滤波后的图像中,

图 3 SNR=1 条件下的识别结果. (a) 原始图像; (b) 恒星剔除图像; (c) 滤波图像; (d) 二值化图像

Figure 3 Streak recognition result in condition of SNR=1. (a) Original image; (b) stars reduction image; (c) filter image; (d) binarization image.

绝大部分的背景已经被滤掉, 条纹状暗弱目标的所在区域也能够正确的识别出来, 如图3(d)所示.

图4为信噪比为0.8的暗弱目标识别效果, 对暗弱目标的识别过程与图3相同, 经过恒星剔除与条纹单元模板匹配滤波后, 识别出的条纹区域如图4(d)所示. 与图3进行对比可以看出, 利用条纹单元模板的暗弱目标识别结果近似, 都能够正确识别出目标所在区域.

图5为信噪比为0.5的暗弱目标识别效果, 从图5(a)中可以看出, 在信噪比为0.5条件下, 条纹状的形态受到背景噪声的影响严重, 在利用条纹单元目标进行图像滤波后, 角度为 -10° 的条纹出现一定程度的角度偏折, 但是能够正确识别出目标所在区域. 同时, 在图像中右上角与左下角的区域中, 存在将与条纹分布特性类似的背景噪声识别出来的现象, 如图5(c)所示, 但是利用式(12)中的阈值计算方法能够将大部分的背景噪声删除, 并不会影响到识别结果.

图6为信噪比为0.4的暗弱目标识别效果, 在这种极低信噪比条件下, 目标已经淹没在背景中, 如图6(a)所示. 在利用条纹单元目标进行图像滤波后, 角度为 -10° 的条纹已经无法识别出来, 角度为 30° 的条纹发生较大偏折, 大量的背景噪声在滤波后的强度与条纹

的强度相近, 如图6(c)所示. 利用阈值将图像二值化后, 无法将两条空间目标全部识别出, 并且会将背景噪声

图 5 SNR=0.5 条件下的识别效果. (a) 原始图像; (b) 恒星剔除图像; (c) 滤波图像; (d) 二值化图像

Figure 5 Streak recognition result in condition of SNR=0.5. (a) Original image; (b) stars reduction image; (c) filter image; (d) binarization image.

图 4 SNR=0.8 条件下的识别效果. (a) 原始图像; (b) 恒星剔除图像; (c) 滤波图像; (d) 二值化图像

Figure 4 Streak recognition result in condition of SNR=0.8. (a) Original image; (b) stars reduction image; (c) filter image; (d) binarization image.

图 6 SNR=0.4 条件下的识别效果. (a) 原始图像; (b) 恒星剔除图像; (c) 滤波图像; (d) 二值化图像

Figure 6 Streak recognition result in condition of SNR=0.4. (a) Original image; (b) stars reduction image; (c) filter image; (d) binarization image.

错误地识别为条纹状空间目标, 如图6(d)所示.

通过对仿真图像进行暗弱目标图像识别, 利用条纹单元模板的匹配滤波算法能够在 $\text{SNR} \geq 0.5$ 条件下识别出暗弱条纹, 验证了该算法的有效性. 但是, 该算法的识别范围也存在限制, 当信噪比极低, $\text{SNR} < 0.5$ 条件下, 无法全部识别出图像中存在的暗弱目标.

在计算效率方面, 对仿真算例中给出的40与60 pixel长度空间目标, 当采用条纹模板进行滤波匹配时, 令条纹模板的长度集合 $\{L\}$ 为3–99 pixel, 步长为2 pixel, 模板旋转角度同样为 1° – 179° , 步长为 2° . 当处理相同的一张图像时, 两种匹配模板的滤波遍历次数对比如表1所示, 可以看出, 采用条纹单元作为匹配模板能够大大降低遍历次数. 当利用天基观测平台长时间对空间进行巡视时, 会产生大量的图像数据, 采用本文算法能够达到提高识别速度与降低计算量的效果.

表 1 不同匹配模板的滤波遍历次数对比

Table 1 Comparison of filter iteration times of different matched patterns

匹配模板	遍历次数
条纹	4410
条纹单元	90

6 结论

本文针对暗弱目标在图像中难以识别的问题, 提出了一种基于匹配滤波的快速识别算法, 能够实现信噪比为0.5的暗弱目标识别. 该方法通过建立条纹单元模板, 减少了所生成匹配滤波模板的数量, 从而降低了对图像进行空间滤波的计算量, 实现了复杂空间背景下对暗弱目标的快速识别.

参考文献

- Sharma J, Stoke G H, Von Braun C, et al. Toward operational space-based space surveillance. *Lincoln Lab J*, 2002, 13: 309–334
- Virtanen J, Poikonen J, Sääntti T, et al. Streak detection and analysis pipeline for space-debris optical images. *Adv Space Res*, 2016, 57: 1607–1623
- Wang D Y, Zhang L, Zhu W H, et al. Autonomous relative navigation for noncooperative target using stereo vision measurements (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 024509 [王大轶, 张磊, 朱卫红, 等. 基于双目光学图像信息的空间非合作目标自主相对导航方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 024509]
- E W. Vision Measurement Method of Noncooperative Spacecraft and Flexible Tether in Automatic Rendezvous (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. 31–37 [鄂薇. 自主交会中非合作航天器及其柔索结构视觉测量方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. 31–37]
- Laas-Bourez M, Blanchet G, Boër M, et al. A new algorithm for optical observations of space debris with the TAROT telescopes. *Adv Space Res*, 2009, 44: 1270–1278
- Diprima F, Santoni F, Piergentili F, et al. Efficient and automatic image reduction framework for space debris detection based on GPU technology. *Acta Astronaut*, 2018, 145: 332–341
- Yanagisawa T, Uetsuhara M, Banno H, et al. Comparison between four detection algorithms for GEO objects. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui, 2012
- Radim A, Martin M, Franc V. RANSACing optical image sequences for GEO and near-GEO objects. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui, 2013
- Dao P, Crabtree P, McNicholl P. Blind search of faint moving objects in 3D data sets. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui, 2013
- Wang M, Zhao J Y, Chen T, et al. Moving point object detection from faint space based on temporal-spatial domain (in Chinese). *J Electron Inform Tech*, 2017, 39: 1578–1584 [王敏, 赵金宇, 陈涛, 等. 基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法. 电子与信息学报, 2017, 39: 1578–1584]
- Zimmer P, Ackermann M, Mcgraw J T. GPU-accelerated faint streak detection for uncued surveillance of LEO. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui, 2013
- Ciurte A, Danescu R. Automatic detection of MEO satellite streaks from single long exposure astronomic images. In: *International Conference on Computer Vision Theory & Applications*. Porto, 2015

- 13 Vallduriola G V, Suárez Trujillo D A, Helfers T, et al. The use of streak observations to detect space debris. *Int J Remote Sens*, 2018, 39: 2066–2077
- 14 Gural P S, Otto P R, Tedesco E F. Moving object detection using a parallax shift vector algorithm. *Publ Astron Soc Pacific*, 2018, 130: 074504
- 15 Levesque M P. Image Processing Technique for Automatic Detection of Satellite Streaks. Technical Report. Defence R&D Canada, 2007
- 16 Vananti A, Schild K, Schildknecht T. Improved detection of faint streaks based on a streak-like spatial filter. *Adv Space Res*, 2020, 65: 364–378

Fast recognition algorithm for faint targets in complex space background

E Wei, WANG DaYi^{*}, ZOU YuanJie & LI JiaXing

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Imaging characteristics of stars and artificial targets in space are very similar in long-distance space-based observation as they are both light spots described by point spread function with a Gaussian distribution. In the condition of low signal-to-noise ratio, the signal of space artificial targets is faint on the image, which is covered with background and noise signals; thus, it is more difficult to recognize the faint space artificial targets from complex backgrounds. To solve this problem, this paper proposes a fast recognition algorithm for faint targets on the basis of matched filters. First, the imaging model of space artificial targets is built in the star tracking observation mode, wherein space artificial targets and stars appear as streaks and points, respectively. Therefore, the faint point target recognition problem is transferred to faint streak pattern recognition from light spot background. Second, the signal-to-noise ratio is used to define the faint degree of targets to evaluate the recognition limit of the algorithm. Then, a streak element pattern is designed. It is a part of the whole streak pattern; thus, the generation of streak patterns with varying lengths in the progress of matched filter can be avoided, so the calculation is decreased and the recognition speed is increased. Finally, to verify the fast recognition algorithm of faint targets, several images with stars and faint space artificial targets under different signal-to-noise ratios are simulated. The fast recognition algorithm of faint targets is tested using these simulation images; the results reveal that faint targets can be recognized from simulation images using this algorithm when the signal-to-noise ratio is above 0.5.

space faint targets, target recognition, space observation, matched filter

PACS: 95.10.Eg, 95.40.+s, 42.30.-d

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0452](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0452)