

## استخراج اتوماتیک ردّ ماهواره در تصاویر رقومی نجومی

سعید فرزانه<sup>۱\*</sup>، محمدعلی شریفی<sup>۲</sup> و مونا کوثری<sup>۳</sup>

۱. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۱۰/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۶/۳/۲)

### چکیده

از جمله مهم‌ترین ارکان استقلال در برنامه‌های فضایی هر کشور، داشتن توانایی ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها است. یکی از روش‌های آگاهی از موقعیت دقیق ماهواره‌ها در یک چارچوب مرجع مشخص در ژئودزی ماهواره‌ای روش کینماتیک است. در این روش، مدار ماهواره به‌طور مستقیم از روی مشاهدات ایستگاه‌های ردیابی تعیین می‌شود. در این راستا روش ردیابی ماهواره با استفاده از سیستم‌های اپتیکی در صورت برقراری شرایط ایده‌آل، دقتی بیشتر از سایر روش‌های مشاهداتی مبتنی بر فاصله را دارد. در این روش می‌توان با استفاده از یک CCD و تلسکوپ مناسب، اطلاعات مربوط به ستاره‌ها و ردّ پای ماهواره را ثبت کرد. در این تحقیق روشی اتوماتیک جهت استخراج مدل اثر ردّ ماهواره ارائه شده است. در این فرایند ابتدا با استفاده از معادلهٔ نفوذ، نویز تصویری حذف و سپس ستاره‌های موجود در عکس شناسایی و حذف شده، در مرحلهٔ بعد با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی DBSCAN پیکسل‌های مربوط به ردّ ماهواره تشخیص داده شد؛ نهایتاً با استفاده از الگوریتم MSAC مدل مناسب برای ردّ پای ماهواره برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: استخراج ردّ پای ماهواره، الگوریتم MSAC، الگوریتم خوشه‌بندی DBSCAN، ردیابی ماهواره.

### ۱. مقدمه

نیازمند داشتن اطلاعات کافی از فیزیک حرکت و پارامترهای مختلف مؤثر در آن است. از آنجا که فیزیک زمین و جو آن به اندازهٔ کافی شناخته‌شده نیست، تعیین مدار ماهواره صرفاً به کمک مدل‌های موجود امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین برای تعیین دقیق‌تر مدار ماهواره‌های غیرنظامی و برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای زمان‌های گذر آن‌ها و همچنین تعیین مدار و زمان‌های گذر ماهواره‌های جاسوسی، باید مشاهدات مستقیم ماهواره انجام گیرد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای ردیابی ماهواره‌ها ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به دو دستهٔ فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در روش‌های فعال، مشاهدات در جسم تعیین موقعیت شونده بر اساس ارسال سیگنال مشاهداتی به ایستگاه زمینی و دریافت سیگنال برگشتی صورت می‌گیرد. این دسته از روش‌ها به روش‌های دوطرفه نیز موسوم هستند که از جمله آن‌ها می‌توان تکنولوژی فاصله‌یابی لیزری و تکنولوژی ردیابی رادار را نام برد (مونتربروک و گیل، ۲۰۱۲). در مقابل، روش‌های غیرفعال یا روش‌های یک‌طرفه قرار دارند که ردیابی آن‌ها بر پایهٔ

امروزه تعیین مدار ماهواره‌ها به‌عنوان یکی از بخش‌های اولیه هر مأموریت فضایی جهت طراحی در مرحلهٔ اول و کنترل آن پس از پرتاب شناخته می‌شود. از این‌رو یکی از مهم‌ترین ارکان استقلال در برنامه‌های فضایی هر کشور، داشتن توانایی ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها است. موضوع تعیین مدار، در مکانیک سماوی دارای پیشینه‌ای تاریخی است و از دیرباز دغدغهٔ دانشمندان علوم فضایی بوده است. افزایش تعداد مأموریت‌های فضایی با تعداد مختلفی ماهواره، نیاز ما را برای ایجاد روش‌های جدید تعیین دقیق مدار جهت کنترل آن‌ها از یک‌سو و شناسایی ماهواره‌های جاسوسی از سوی دیگر افزایش می‌دهد. به‌طور کلی فرایند ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها را می‌توان به دو قسمت نسبتاً مجزای مشاهدات و محاسبات تقسیم کرد. مشاهدات عبارت‌اند از داده‌های جمع‌آوری‌شدهٔ مرتبط با مکان و سرعت ماهواره که در قسمت محاسبات، روش‌ها و الگوریتم‌های ردیابی و تعیین مدار ماهواره بر روی آن‌ها اعمال می‌شود (روغنی‌زاده، ۲۰۰۹). تعیین موقعیت و وضعیت ماهواره‌های مختلف،

جمع‌آوری اطلاعات به صورت یک طرفه در ایستگاه زمینی یا در ماهواره است، از جمله این روش‌ها می‌توان به تکنولوژی ردیابی اپتیکی اشاره کرد (گاگلاردی و کارپ، ۱۹۷۶).

تحقیقات نشان می‌دهد که روش ردیابی ماهواره سیستم‌های اپتیکی در صورت برقراری شرایط ایده‌آل، دقتی بیشتر از روش‌های مبتنی بر فاصله دارد. همچنین به دلیل ساده بودن ساختار سیستم‌های اپتیکی و تجهیزات کم‌هزینه، انعطاف‌پذیری بیشتری در برابر شرایط محیطی خواهد داشت (هجداک و لامبرت، ۲۰۰۴). با توجه به دلایل ذکر شده، این روش به منظور ردیابی و تعیین موقعیت ماهواره‌ها، به دو روش دیگر ارجحیت دارد. اساس این روش، عکس‌برداری نجومی به کمک CCDهاست. عکس‌هایی که به این طریق اخذ می‌شوند حاوی اطلاعات زیادی از جمله ستاره، کهکشان و اثر ماهواره‌ها و غیره هستند (استون و اسپیلدکنت، ۲۰۰۵). از آنجا که سیستم‌های ردیاب مربوط به نظارت فضا بایستی توانایی شناسایی هرگونه جسم مداری را، اعم از ماهواره‌های فعال، فضایی‌های در حال مانور، اجسام گم‌شده و اجسام طبیعی سرگردان در فضا، داشته باشند، امکان استفاده از سیستم‌های ردیابی که بر اساس ارسال یا باز ارسال سیگنال الکترومغناطیسی توسط جسم مداری کار می‌کنند وجود ندارد، به همین دلیل برای هدف نظارت و مراقبت فضایی عمدتاً از سیستم‌های ردیابی اپتیکی استفاده می‌شود. تلسکوپ‌های عکس‌برداری که در زمره سیستم‌های ردیابی اپتیکی جای دارند، جهت شناسایی فضایی‌های ناشناس و آشغال‌های فضایی و ماهواره‌های زمین ثابت بسیار مناسب هستند (اسپیلدکنت، ۱۹۹۴).

در روش‌های تعیین مدار بر اساس سیستم‌های اپتیکی، به منظور تعیین وضعیت ماهواره از اطلاعات موقعیتی ستارگان استفاده می‌شود (شریفی و همکاران، ۲۰۱۵)؛ بنابراین در مرحله نخست بایستی موقعیت پیکسلی ماهواره و ستاره‌ها تشخیص داده شود. از آنجا که ماهواره در

تصاویر برداشت‌شده توسط سیستم ردیابی اپتیکی به صورت رد ظاهر می‌گردد، تعیین مدل مربوط به رد ماهواره از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور تشخیص رد نیاز است ابتدا خط مربوط به رد ماهواره تشخیص داده شود و سپس نقاط ابتدا و انتهای رد تعیین شود. انتخاب این نقاط بر روی وضعیت ماهواره نسبت به ستارگان و تعیین مدار تأثیر زیادی می‌گذارد؛ بنابراین برای تعیین مدار دقیق به تشخیص این نقاط با دقت بالا نیازمندیم.

موقعیت و حرکت ماهواره‌ها با استفاده از پارامترهای مدار قابل برآورد است. موقعیت به دست آمده، نوعی تقریب است. عدم اطمینان موجود در موقعیت ماهواره منجر به نقص در مدار می‌شود و قبل از اینکه میزان خطا زیاد شود، باید از تجمع آن جلوگیری کرد (هجداک و لامبرت، ۲۰۰۴). در این مقاله تلاش شده است با استفاده از تصاویر رقومی نجومی که توسط تلسکوپ‌های نوری برداشت شده است، به صورت اتوماتیک رد ماهواره استخراج گردد.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، هدف از این تحقیق استخراج اتوماتیک اثر رد ماهواره است. سایر بخش‌های مقاله در سه قسمت تدوین شده‌اند. در بخش دوم به معرفی روش‌های مربوط حذف نویز تصویر، حذف ستاره‌ها و استخراج رد ماهواره پرداخته شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی بر روی عکس رقومی نجومی دارای رد، پیاده می‌شود و در بخش آخر نتایج تحقیق بررسی و سرانجام پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه خواهد شد.

## ۲. روش تحقیق

همان‌طور که اشاره شد به منظور تعیین دقیق مدار ماهواره در سیستم‌های اپتیکی، نیاز انکارناپذیری به تشخیص رد ماهواره در عکس‌های نجومی وجود دارد. برای این منظور در این تحقیق یک روش اتوماتیک برای استخراج رد ماهواره پیشنهاد شده است. شکل ۱ مراحل کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کند (گزالز و وود، ۲۰۰۹). در سیستم‌های نوین بینایی مبنای نجومی، اخذ داده با استفاده از آرایه CCDها انجام می‌گیرد. روش ذخیره‌سازی و استخراج اطلاعات از CCD وابسته به مهار و قرائت الکترون‌ها به‌عنوان شارژ منفی و حفره‌ها به‌عنوان شارژ مثبت است که در اثر برخورد نور ایجاد می‌شوند. فتوالکترون‌های تولید شده به این ترتیب، سپس در خازن‌های موجود در ناحیه تخلیه ذخیره می‌شوند. در حین فرایند برخورد نور به سطح CCD و قرائت و اندازه‌گیری تعداد فتوالکترون‌ها و نیز تبدیل آن‌ها به عدد رقومی به‌منظور ذخیره‌سازی به‌عنوان درجه خاکستری در هر پیکسل، کوچک‌ترین اشتباهات که منجر به از دست رفتن یا اضافه‌شدن الکترون‌های مربوط به هر پیکسل می‌شود، منجر به افت کیفیت و ایجاد نویز در تصویر می‌شود. دسته اول این تأثیرات مربوط به عوامل خارجی مثل دما و شرایط فیزیکی و دسته دوم شامل عوامل داخلی مربوط به سخت‌افزار CCD مورد استفاده است (شریفی و همکاران، ۲۰۱۵).

در این مقاله با الهام از روش‌های مبتنی بر معادلات نفوذ گرما، روشی برای کاهش نویز تصاویر ارائه می‌شود که از ویژگی‌های مهم آن جلوگیری از تغییر مکان عوارض در تصاویر یا به عبارت دیگر حفظ ساختار تصویر است. روش مبتنی بر معادله نفوذ گرما روشی است که بر اساس تکرار بنا شده است (ویراتونگا و کامس، ۲۰۰۲). ایده اصلی در استفاده از معادلات نفوذ در پردازش تصویر در حقیقت استفاده از فیلتر گوسی دو بعدی است که در آن تصویر  $I(x, y)$  با  $k_{\sigma}(x, y)$  همگشت می‌شود:

$$k_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{|x|^2 + |y|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $k_{\sigma}(x, y)$  یک فیلتر گوسی با انحراف معیار  $\sigma$  است. یکی از مشکلات اساسی که با عملیات کانولوشن روی تصویر به وجود خواهد آمد، هموارشدن لبه‌هاست؛ با تلقی کردن تغییرات چگالی تصویر به‌عنوان جریان گرمایی، می‌توان این مشکل را برطرف کرد.

معادله انتشار برای یک تصویر  $I(x, y)$  به صورت رابطه ۲



شکل ۱. فلوجارت کلی روش پیشنهادی.

## ۲-۱. حذف نویز

به عنوان اولین قدم، پس از اخذ عکس، باید خطاهای موجود در عکس تصحیح شود. در نگاه کلی نویز در برابر سیگنال به‌عنوان سیگنال ناخواسته یا اطلاعات جمع‌آوری شده بدون برنامه‌ریزی قبلی شناخته می‌شود. در پردازش تصویر، نویز را می‌توان به صورت تغییرات تصادفی ناخواسته در اطلاعات رنگی یا درجات خاکستری نیز تعریف کرد. عوامل اصلی ایجاد نویز در تصاویر غالباً در مراحل ثبت و انتقال تصویر رخ می‌دهند. عملکرد سنجنده تصویربرداری وابسته به عوامل متعددی از جمله شرایط محیطی در حین اخذ تصویر و کیفیت عناصر موجود در صحنه تصویربرداری است (بودس و همکاران، ۲۰۰۵). شرایط خاص تصویربرداری از اجرام سماوی شامل پس‌زمینه با رنگ تیره و وجود عوارض نورانی، باعث حضور نویزها در تصویر می‌شود. کاهش نویز معمولاً اولین پردازشی است که در تحلیل تصاویر دیجیتال انجام می‌گیرد. فرایند حذف نویز نه تنها باید نویز را حذف کرده یا کاهش دهد، بلکه باید از مات شدن تصویر یا حذف و تغییر، به‌خصوص در لبه‌ها جلوگیری

تعریف می شود:

$$\frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = \nabla^2 I(x,y,t) = \frac{\partial^2 I(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x,y,t)}{\partial y^2} \quad (2)$$

در معادله ۲ تصویر  $I(x,y,0)=I_0(x,y)$  تصویر اولیه در  $t=0$  و  $I(x,y,t)$  تصویر در لحظه  $t$  است (پرونا و مالیک، ۱۹۹۰).

در نهایت با الهام از اصل انتقال گرما، معادله نفوذ بر روی تصویر  $I(x,y)$  به صورت رابطه ۳ اعمال می شود:

$$\frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (c(x,y,t) \nabla I(x,y,t)) \quad (3)$$

$$I(x,y,0) = I_0(x,y)$$

که در آن  $\nabla$  عملگر گرادیان،  $c(x,y,t)$  ضریب نفوذ و  $\nabla \cdot$  عملگر دیورژانس است. در روش کاهش نویز با استفاده از معادلات نفوذ به دلیل هموارشدن لبه ها از ضریب نفوذ استفاده می شود. حال اگر این ضریب تابعی از مکان نباشد، در همه نقاط یکسان عمل می کند و سبب هموارشدن لبه ها می گردد. بدین ترتیب ضریب نفوذی استفاده می شود که ویژگی های زیر را داشته باشد:

$$c(0) = 1$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} c(s) = 0 \quad (4)$$

$$c(s) \geq 0$$

تابع کاهش ضریب نفوذ نسبت به اندازه گرادیان باعث می شود که در نواحی که دارای گرادیان بالایی می باشند (مانند مرزها)، کاهش نویز اتفاق نیفتد. از آنجایی که در اطراف لبه ها، نفوذ کم است، تصحیح نویز کمتر است. بدین ترتیب روش پرونا- مالیک از نرم شدن تصویر در اطراف لبه در هنگام کاهش سطح نویز جلوگیری می کند. در تحقیق آن ها معادله ۵ را برای ضریب نفوذ پیشنهاد دادند (پرونا و مالیک، ۱۹۹۰) که در این مقاله از آن به عنوان ضریب نفوذ استفاده شده است.

$$c(x,y,t) = \frac{1}{(1 + \frac{|\nabla I|^2}{k^2})} \quad (5)$$

در معادله ۵ عدد  $k$ ، پارامتر هدایت نامیده می شود که برای کنترل اثر ضریب نفوذ در نظر گرفته می شود. شکل ۲ نشان دهنده دو تابع نفوذ و جریان است (ویراتونگا و کامس، ۲۰۰۳) که تابع جریان به صورت حاصل ضرب تابع نفوذ در گرادیان بیان می شود.

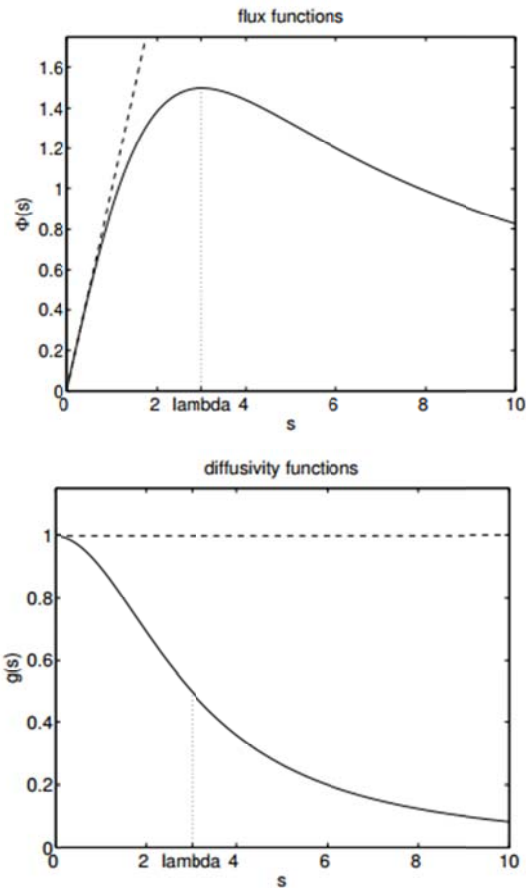
در شکل ۲ وابستگی تابع جریان به این پارامتر نشان داده شده است. اگر مشتق تابع جریان نسبت به گرادیان مساوی صفر قرار داده شود، مقدار گرادیان در نقطه بیشینه برابر با پارامتر هدایت است. پس این پارامتر به نوعی نشان دهنده مقدار گرادیانی است که قسمت جلو رونده و عقب رونده تابع جریان را از هم جدا می کند. بنابراین نقطه ای که در آن تابع نفوذ با سرعت بیشتری به سمت صفر میل می کند یا به بیان دیگر نقطه ای که تابع جریان بیشینه شود، نشان دهنده مقدار بهینه برای پارامتر  $k$  است. پارامتر  $k$  که نقش حد آستانه اندازه گرادیان و کنترل میزان نفوذ را بر عهده دارد، میزان حد آستانه گرادیان عکس را برای همکاری در نویز یا لبه برآورد می کند. تأثیر این پارامتر بر روی ضریب نفوذ نهایتاً منجر به تشخیص نقاطی می شود که نیاز به مات شدن یا حذف شدن دارند. همان طور که در شکل ۲ مشخص است، تابع جریان از نظر شیب به دو قسمت تقسیم می شود: (۱) زمانی که  $k < \lambda$  هست که در این حالت گفته می شود تابع جریان جلو رونده است. (۲) زمانی که  $k > \lambda$  است که تابع جریان عقب رونده است. به طور مثال اگر مقدار این پارامتر از  $\lambda$  کمتر باشد، باعث می شود علاوه بر لبه ها موارد اضافه زیادی در عکس باقی بمانند و اگر این پارامتر بزرگتر از  $\lambda$  انتخاب شود، باعث می شود لبه ها حذف شوند. مقدار بهینه محاسبه شده پارامتر هدایت در این تحقیق  $k=3$  است (اردم، ۲۰۱۳).

$$\begin{aligned}
 d_n &= I(x, y, -1, t) - I(x, y, t) & c_n &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_n}{k}\right)^2} \\
 d_s &= I(x, y, +1, t) - I(x, y, t) & c_s &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_s}{k}\right)^2} \\
 d_e &= I(x + 1, y, t) - I(x, y, t) & c_e &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_e}{k}\right)^2} \\
 d_w &= I(x - 1, y, t) - I(x, y, t) & c_w &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_w}{k}\right)^2}
 \end{aligned} \quad (۷)$$

پارامترهای فوق در حقیقت معادل عددی برای مشتق و ضرب نفوذ در جهات مختلف هستند. جهات مختلف به ترتیب شمال با اندیس  $n$ ، جنوب با اندیس  $s$ ، شرق با اندیس  $e$  و غرب با اندیس  $w$  بیان شده‌اند. این الگوریتم با تعداد تکرارهای متفاوت اجرا می‌شود و مقدار این شاخص برای هر تعداد تکرار محاسبه شده و تکراری که در آن مقدار شاخص بیشینه باشد، به‌عنوان تعداد تکرار بهینه انتخاب می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۰۴).

## ۲-۲. استخراج و حذف اطلاعات مربوط به ستاره

پس از تصویربرداری از ستارگان بایستی مرکز ستارگان را با دقت بسیار بالایی استخراج کرد. به عبارت دیگر هدف از این مرحله یافتن مختصات ستارگان در سیستم مختصات پیکسلی با دقت زیر-پیکسل است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی توسط شریفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ (شریفی و همکاران، ۲۰۱۵) مراکز ستارگان با دقت زیر-پیکسلی استخراج می‌شوند. روش تشخیص مراکز ستارگان، روش تبدیل ویژگی‌های مستقل از تغییر مقیاس نام دارد که براساس دسته خاصی از ویژگی‌های تصویر است. این ویژگی‌ها نسبت به تغییر مقیاس، انتقال و چرخش تصویر و همچنین تا حدودی نیز نسبت به تغییرات نور و تغییرات سه‌بعدی هندسی، ثابت هستند. در این روش، ویژگی‌ها به‌طور کارآمد آشکار می‌گردند و سپس از طریق یک روش فیلترینگ مرحله‌ای، نقاط پایدار در فضای مقیاس مشخص می‌شود که به آن‌ها کلیدهای تصویر می‌گویند. مزیت اصلی این روش در این است که



شکل ۱. تابع ضریب هدایت گرمایی و تابع جریان.

برای حل معادلات نفوذ روش‌های مختلفی وجود دارد، اما برای کاربرد آن در حذف نویز تصاویر رقومی لازم است که روش‌های عددی به کار گرفته شوند (گریگ و همکاران، ۱۹۹۲). به منظور یافتن تعداد تکرار روش عددی از شاخص شباهت ساختاری (SSI, Structural Similarity Index) استفاده شده است. شاخص شباهت ساختاری علاوه بر تغییرات درجه خاکستری، سعی دارد اطلاعات مربوط به کنتراست و ساختارهای موجود در تصویر را نیز در مقایسه تصاویر لحاظ کند. این شاخص به صورت مضربی از این سه معیار (میزان روشنایی، کنتراست و ساختار) مطابق معادله ۶ بیان می‌شود:

$$SSI = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (۶)$$

پارامترهای معادله ۶ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

بر شکل هستند؛ بنابراین تغییری در شکل ستاره‌ها و به ویژه ردّ ماهواره ایجاد نمی‌کنند (گنزالز و وود، ۲۰۰۹). برای این منظور در این تحقیق از اپراتور سایش (Erosion) برای تشخیص مرز استفاده شد. از جمله مرزهای استخراج شده در این مرحله، مرز مربوط به ستاره‌ها است که مورد توجه قرار دارند.

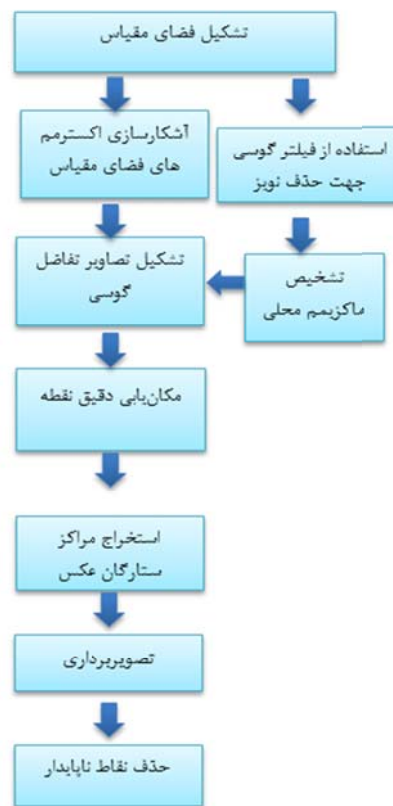
$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (۸)$$

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (۹)$$

در رابطه فوق،  $A$  تصویری است که الگوریتم حذف نویز بر روی آن اعمال شده است و  $B$  یک عنصر ساختمانی مربعی  $7 \times 7$  و  $\ominus$  عملگر سایش است. این عملگر باعث سایش عوارض موجود در تصویر ( $A$ ) می‌شود، برای این منظور از یک عنصر ساختمانی ( $B$ ) استفاده می‌شود که این عنصر با توجه به کاربرد می‌تواند از نظر ابعاد و عملکرد متفاوت باشد. در این تحقیق یک عنصر مربعی با ۹ پیکسل است و با حرکت این عنصر ساختمانی بر روی پیکسل‌های تصویر، حداقل مقدار درجه خاکستری در ۹ پیکسل قرار گرفته در عنصر ساختمانی در تصویر جدید جایگزین می‌شود و این حرکت تا انتهای تصویر ادامه پیدا می‌کند؛ بنابراین با استفاده از این عملگر مرز عوارض موجود ساییده می‌شود. در این مقاله عنصر ساختمانی  $B$  یک ماتریس مربعی  $3 \times 3$  انتخاب شده است که بر روی عکس حرکت می‌کند و با توجه به محلی که قرار می‌گیرد، مقدار آن پیکسل‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. با استفاده از معادله ۸ تصویر سایش پیدا می‌کند، عملگر سایش در واقع نواری از مرز عوارض موجود در تصویر را می‌ساید. با اعمال معادله ۹، تصویر سایش یافته از تصویر اصلی کم می‌شود و تنها لبه‌های موجود در تصویر باقی می‌ماند (وندروال و بکر، ۱۹۹۴).

به منظور حذف ستاره پنجره‌ای به ابعاد  $15 \times 15$  و به مرکز ستاره تشخیص داده شده، بر روی تصویر مرزها قرار داده می‌شود. بدین صورت که مرکز این ماتریس بر روی مختصات پیکسلی که در مرحله قبل تشخیص داده است،

ویژگی‌های محلی تصویر در برابر تغییرات مقیاس مقاوم بوده و حساسیت کمتری به نور و تغییرات هندسی سه‌بعدی دارند. در این الگوریتم بدون نیاز به نظر گرفتن شکل تابع توزیع نقطه‌ای موقعیت ستاره با دقت زیرپیکسل، به صورت کاملاً اتوماتیک تعیین می‌گردد. علاوه بر آن با تعیین صحیح پارامترهای الگوریتم پیشنهادی می‌توان ستارگان با قدرهای مشخص را از تصویر استخراج نمود که این امر باعث کاهش حجم محاسبات در مرحله تشخیص ستاره خواهد شد. مراحل استخراج مراکز ستاره با استفاده از الگوریتم مذکور در شکل ۳ نشان داده شده است (شریفی و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۳. فلوجارت کلی استخراج و حذف ستاره.

در این تحقیق پس از تشخیص مراکز ستاره‌ها، به منظور حذف آن‌ها از عکس، ابتدا با استفاده از عملگرهای مورفولوژی مرزهای موجود در عکس استخراج می‌شود. عملگرهای مورفولوژی از جمله عملگرهای ریاضی مبتنی

است و در حالت اتصال به هیچ خوشه دیگری قرار ندارند، به عنوان نویز شناسایی می‌کند (استر و همکاران، ۱۹۹۶). در مورد عکس‌های نجومی مورد بحث، سیگنال، پیکسل‌های روشن مربوط به رد در تصویر باینری و نویز، ستاره‌ها و اشیاء دیگر موجود در تصویر هستند. از آنجا که چگالی پیکسل‌ها در اطراف رد به شکل معناداری بیشتر از نویزهای موجود در عکس است؛ این روش برای تشخیص نویز در عکس‌های نجومی بسیار کارآمد است. بدین ترتیب می‌توان خوشه مربوط به رد را از نویز شناسایی کرد. خروجی این مرحله یک عکس باینری است که تنها پیکسل‌های اثر ردّ ماهواره در آن روشن باقی می‌ماند. بعد از مراحل فوق به تعداد زیادی نقاط روشن که نماینده رد هستند و تعدادی پیکسل‌های غیر ردی خواهیم رسید که به عنوان Outlier شناخته می‌شوند که بایستی جهت استخراج مدل مناسب برای اثر ردّ ماهواره این داده‌ها شناسایی شوند. بدین منظور می‌توان از الگوریتم (RANSAC, Random Sample and Consensus) که در سال ۱۹۸۱ توسط فیشر و بولر پیشنهاد شده است (فیشر و بولز، ۱۹۸۱) استفاده کرد. فرض اساسی در این روش وجود دو دسته مشاهده زیر است:

inlier: داده‌هایی که با یک مدل مشخص قابل انطباق هستند.

outlier: داده‌هایی که به مدل منطبق نمی‌گردند (داده‌های پرت).

مزیت استفاده از این روش توانایی آن در تخمین پایدار پارامترهای مدل حتی در حضور نقاط پرت است. همان‌طور که پیش از این بیان شده است، هدف از این تحقیق، استخراج اتوماتیک اثر ردّ ماهواره است. منظور از استخراج اثر ردّ ماهواره، تخمین خطی است که به ردّ موجود در شکل برازش داده شده باشد؛ بنابراین هدف از اعمال این الگوریتم محاسبه پارامترهای مدل خط در صفحه است که به صورت  $ax+by+c=0$  است. روند کلی الگوریتم مطابق با شکل ۴ است.

قرار می‌گیرد و مقادیر پیکسل‌های عکس که ماتریس بر روی آن قرار گرفته است، برابر کمینه مقدار ماتریس  $15 \times 15$  می‌شود. بدین ترتیب در هر پنجره مرکز ستاره و پیکسل‌هایی که تحت تأثیر ستاره هستند، حذف می‌شوند. برای حذف همه ستارگان این دو مرحله یعنی تشخیص و حذف ستارگان، به صورت هم‌زمان و با روند تکراری انجام می‌گیرد. ستاره‌های موجود در عکس از نظر روشنایی متفاوت هستند، از این رو تعداد پیکسل‌های متفاوتی تحت تأثیر ستارگان قرار دارند.

### ۲-۳. مدل‌سازی اثر ردّ ماهواره

به منظور مدل‌سازی اثر ردّ ماهواره باید پیکسل‌های مربوط به رد را جدا کرد. در این تحقیق برای جداسازی پیکسل‌های رد اثر ماهواره ابتدا عکس خروجی از مرحله قبل به عکس باینری تبدیل می‌شود. برای این منظور، بایستی باتوجه به مقدار روشنایی اثر ردّ هر ماهواره یک حد آستانه معرفی نمود تا تنها پیکسل‌هایی که روشن باقی می‌مانند، کاندیدای ردّ ماهواره باشند. نکته مهم در این راستا این است که با توجه به متفاوت بودن روشنایی ردهای مختلف، در این تحقیق بایستی بیشترین مقدار روشنایی که روشن ماندن رد را تضمین می‌کند، تعیین کرد. باید توجه کرد که کم بودن مقدار حد آستانه باعث می‌شود علاوه بر رد، اشیای دیگری نیز در عکس به صورت پیکسل روشن باقی بماند؛ بنابراین بایستی رد اثر ماهواره را از سایر اشیاء جدا کرد، برای این منظور از روش خوشه‌بندی بر مبنای چگالی (DBSCAN, Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) استفاده می‌شود (استر و همکاران، ۱۹۹۶). بدین ترتیب پیکسل‌های کم‌چگالی که به عنوان نویز در خارج از محدوده رد قرار دارند، با استفاده از روش مذکور شناسایی و حذف می‌گردند. این روش بر مبنای چگالی مکانی داده‌ها عمل می‌کند و با دریافت دو پارامتر حداقل نقطه و شعاع همسایگی، داده‌هایی را که تعداد آن‌ها در شعاع همسایگی موردنظر کمتر از حداقل نقطه تعریف شده

هر دو روش مشابه بوده و برابر با فاصله این نقاط از مدل است.

۲-۴. ترمیم ردهایی که بخشی از آنها در مرحله حذف ستاره از بین رفته است

در برخی تصاویر ممکن است ستاره‌ای بر روی رد ماهواره قرار گیرد و بنابراین مرحله حذف ستاره باعث می‌شود که قسمتی از رد حذف گردد. برای حل این مشکل بعد از حصول خط تخمینی، فاصله تمام ستاره‌ها از خط محاسبه شده و چنانچه فاصله ستاره‌ای از یک حد مشخص کمتر شود، ستاره یا ستاره‌های مذکور از فهرست ستاره‌های شناسایی شده حذف می‌شوند و تمام مراحل از حذف ستاره دوباره تکرار می‌شوند. به این ترتیب قسمت‌هایی از رد که پیش از این ناخواسته حذف شده بودند به رد اضافه می‌گردد و مدل دقیق‌تری برای رد ماهواره تخمین زده خواهد شد.

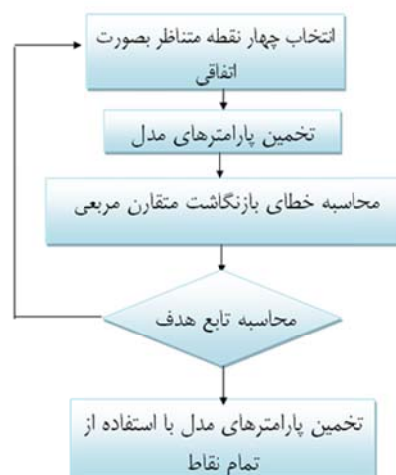
### ۳. پیاده‌سازی و ارزیابی

روش پیشنهادی این تحقیق بر روی عکسی که توسط CCDهای Ixon Ultra 888 اخذ شده، به منظور آزمایش و بررسی استفاده شده است. این دستگاه دارای تکنولوژی نوردهی از پشت و دارای ساز و کار بزرگ‌نمایی الکترون (Electron magnifier) به منظور ثبت تک فتون‌های رسیده به سطح CCD است. در جدول ۲ مشخصات کلی این دستگاه نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود این دستگاه دارای  $1024 \times 1024$  پیکسل مربعی به طول ضلع ۱۳ میکرون است.

جدول ۱. مشخصات فنی و تصویر دستگاه iXON Ultra 888.



۱۰۲۴ x ۱۰۲۴	پیکسل‌های فعال
$13 \times 13 \mu\text{m}$	ابعاد پیکسل
۱۳.۳ x ۱۳.۳	سطح تصویر (میلی‌متر)
e-۸۰	عمق چاه پتانسیل پیکسل‌ها
MHz۳۰	بیشینه سرعت قرائت
fps۲۶-۹۶۹۰	نرخ فریم قابل قرائت
$1 < e-0$	نویز قرائت
>۹۰٪	بهره‌وری کوانتومی



شکل ۴. اصول تکرار الگوریتم رنسک.

از آنجا که در الگوریتم RANSAC در صورتی که آستانه نویز خیلی کوچک در نظر گرفته شود، پارامترهای تخمین زده شده ناپایدار است. همچنین در حضور داده‌های پرت (داده‌هایی که در یک مجموعه داده هستند و تحت هیچ تبدیلی در مجموعه داده‌های دیگر یافت نمی‌شوند) ممکن است به جواب صحیحی منتهی نشوند، تور و زیرسمن (۲۰۰۰) الگوریتم (MSAC, M-estimator Sample and Consensus) را که بهبود یافته الگوریتم RANSAC است، پیشنهاد داده‌اند (تور و زیرسمن، ۲۰۰۰). بر این اساس در این مقاله به جای الگوریتم RANSAC از الگوریتم MSAC استفاده شده است. روند اجرای این الگوریتم مانند روش RANSAC است، با این تفاوت که تاثیر نقاط outlier در تابع هدفی که دنبال کمینه کردن آن هستیم، همواره مقدار ثابتی است. در حالی که در روش RANSAC تأثیر هر نقطه به فاصله آن از مدل برازش داده شده بستگی دارد. در مورد نقاط inlier تأثیر آنها در



روی تصاویر نشان داده شده در شکل ۵ اعمال شد. همان طور که گفته شد مقدار پارامتر هدایت برای این روش برابر سه در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه تعداد تکرار بهینه برای این الگوریتم، از شاخص SSI استفاده کردیم. تعداد تکراری که بیشینه مقدار شاخص را برآورد کند، به عنوان تعداد تکرار بهینه انتخاب می شود. نمودار شاخص SSI نسبت به تعداد تکرار در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است تعداد ۴ و ۳ تکرار به عنوان تعداد تکرار بهینه به ترتیب برای تصاویر نمونه برآورد شده است. خروجی این مرحله در شکل ۷ نشان داده شده است.

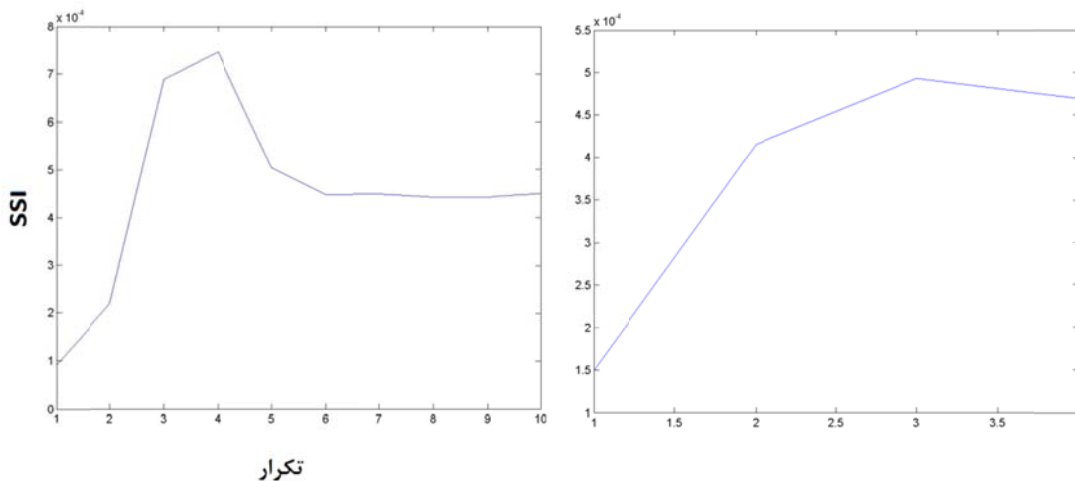
این سنجنده بهره‌وری کوانتومی بالایی دارد و بیش از ۹۰ درصد الکترون‌های رسیده به سطح سنجنده را جذب و ذخیره می کند. نرخ قرائت بالای این سنجنده قابلیت مناسبی را در تصویربرداری متوالی از اجرام سماوی فراهم می کند. پردازنده مرکزی این سنجنده، الکترون‌های جذب شده را به صورت ۱۴ بیتی رقومی سازی می کند و در قالب فایل‌هایی با پسوند fits در اختیار کاربران قرار می دهد. شکل ۵ تصاویر نمونه به کار گرفته شده در این تحقیق را نشان می دهد.

### ۳-۱. حذف نویز

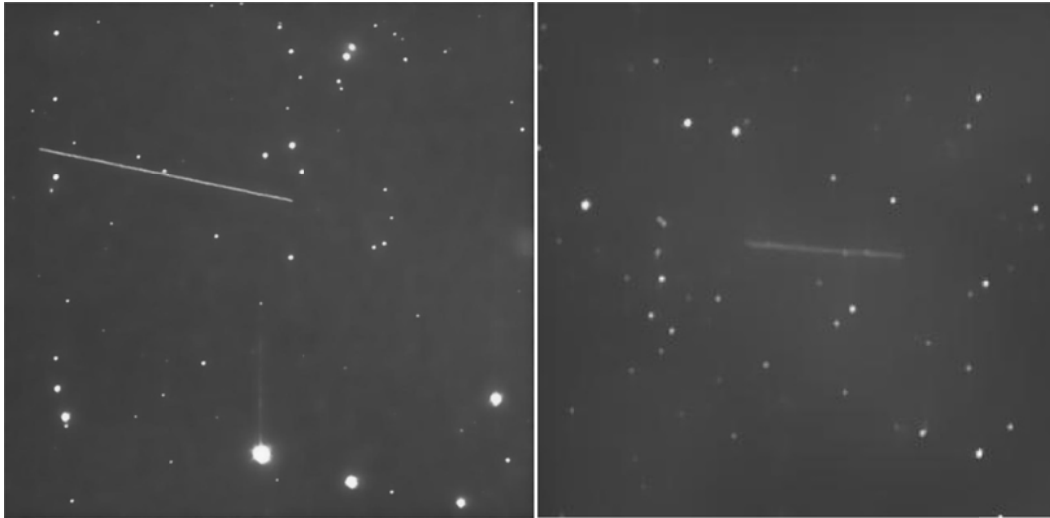
الگوریتم حذف نویز با استفاده از معادلات نفوذ بر



شکل ۵. تصاویر نمونه برداشت شده بوسیله دستگاه ixON Ultra 888 مربوط به ماهواره در مدار LEO



شکل ۶. تعیین بهینه تعداد تکرار لازم جهت حل عددی معادلات نفوذ با استفاده از شاخص بیشینه شباهت ساختاری.

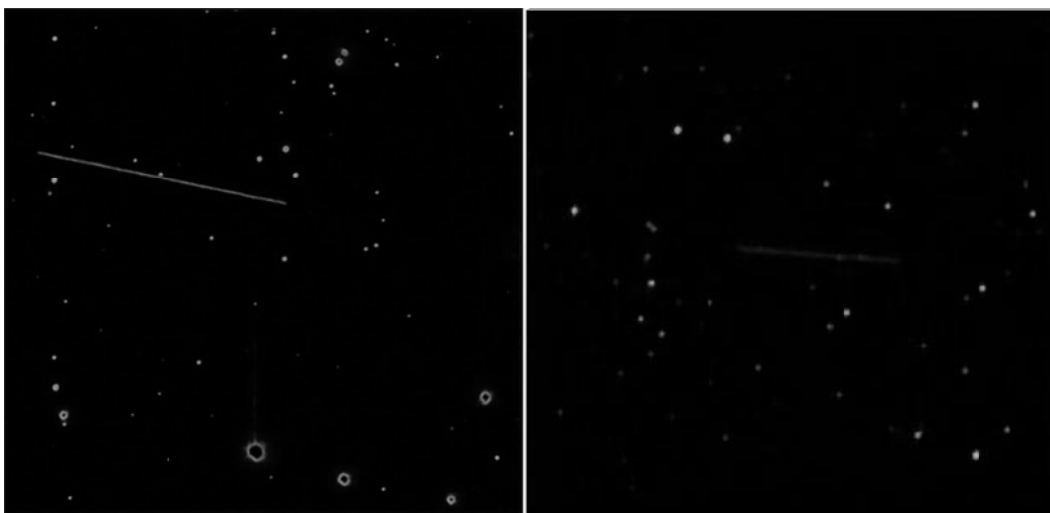


شکل ۷. تصاویر نمونه فاقد نویز با استفاده از حل عددی معادلات نفوذ.

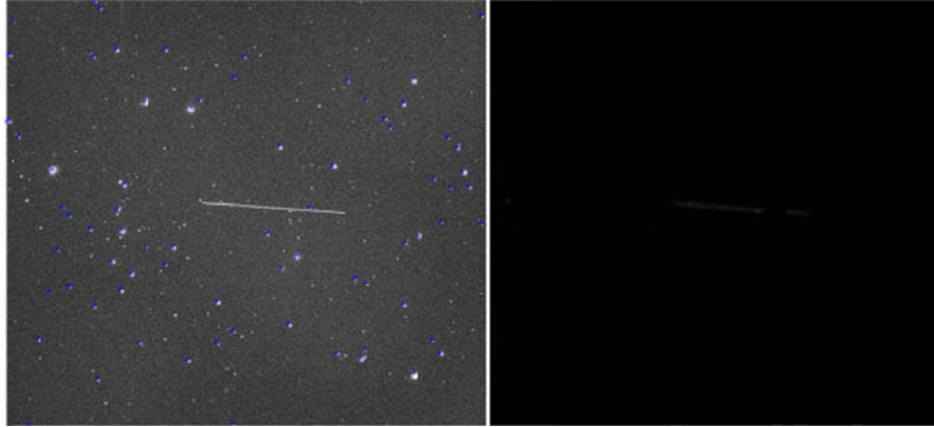
### ۲-۳. حذف ستاره

پس از حذف نویز، ستاره‌های موجود در عکس را شناسایی کردیم و با الگوریتم پیشنهاد شده حذف نمودیم. در این مقاله برای حذف ستارگان ابعاد پنجره  $15 \times 15$  انتخاب شد. شکل ۸ نشان‌دهنده تصویر لبه‌های موجود در عکس است که با به‌کارگیری عملگرهای مورفولوژی

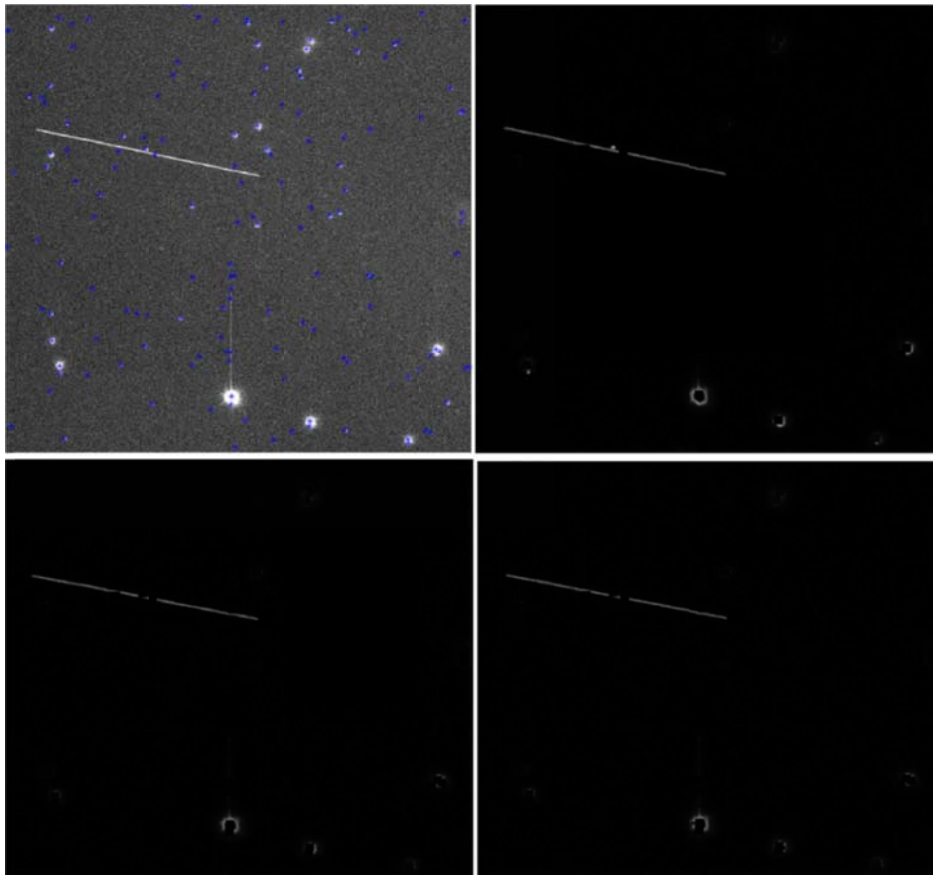
استخراج شده است. این عملگرها به منظور شکل‌شناسی، استخراج نقاط کلیدی تصویر، حذف نقاط غیرمفید تصویر و موارد مشابه دیگر استفاده می‌شوند. با اجرای روند تکراری تشخیص و حذف ستاره در سه تکرار همه ستاره‌ها شناسایی و حذف شدند. شکل ۹ و ۱۰ خروجی این مرحله است.



شکل ۸. استخراج لبه‌های موجود در تصاویر نمونه با استفاده از اپراتور سایش.



شکل ۹. تشخیص ستاره با استفاده از روش SIFT و حذف آنها بدون تکرار در اولین تصویر نمونه.



شکل ۱۰. تشخیص ستاره با استفاده از روش SIFT و حذف آنها بدون تکرار در دومین تصویر نمونه.

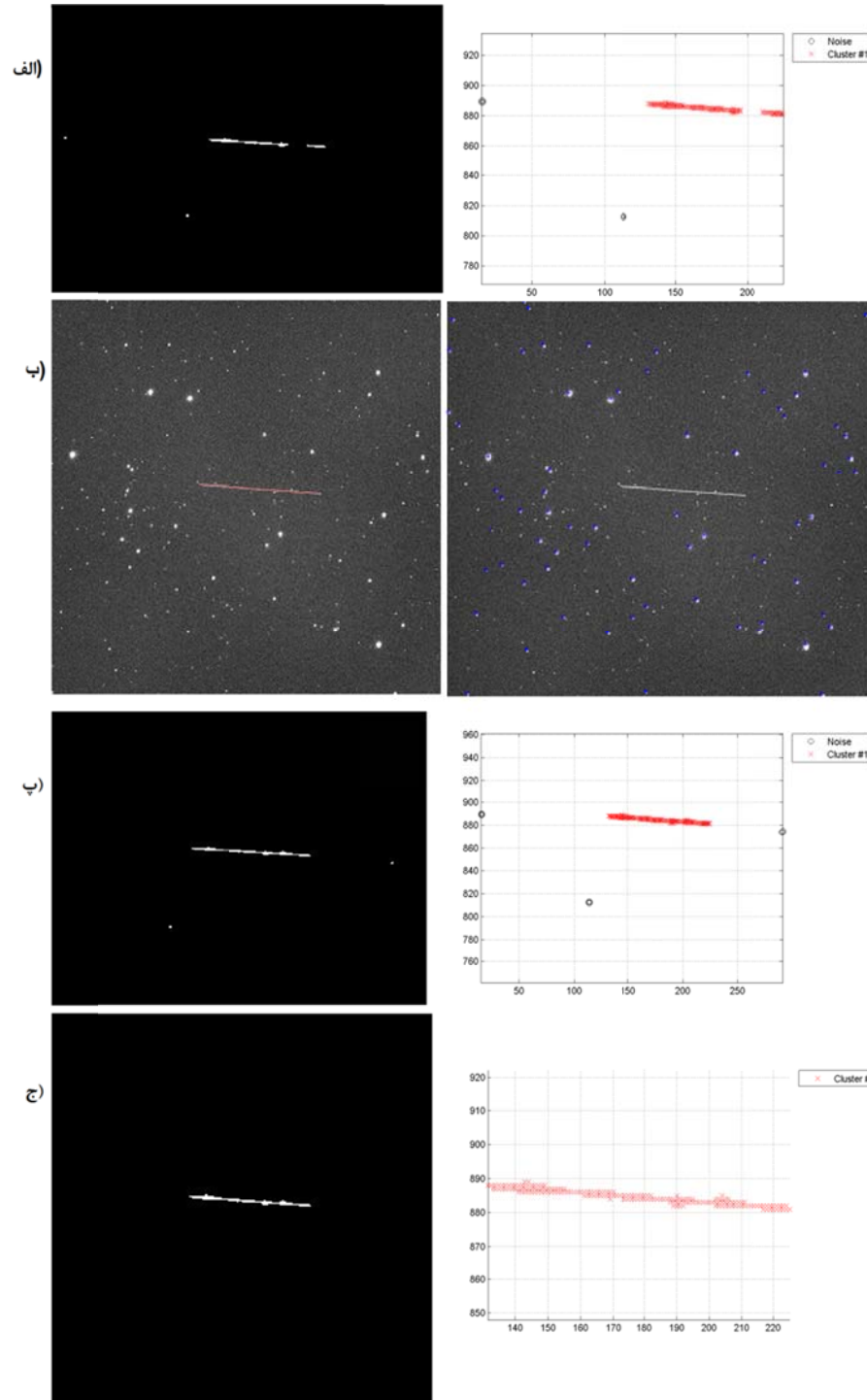
### ۳-۳. مدل‌سازی ردّ ماهواره

در این مرحله به منظور مدل‌سازی ردّ ماهواره ابتدا با انتخاب حد آستانه ۱۵ برای روشنایی پیکسل‌ها (این مقدار به شکل تجربی به اندازه کافی کوچک انتخاب شده

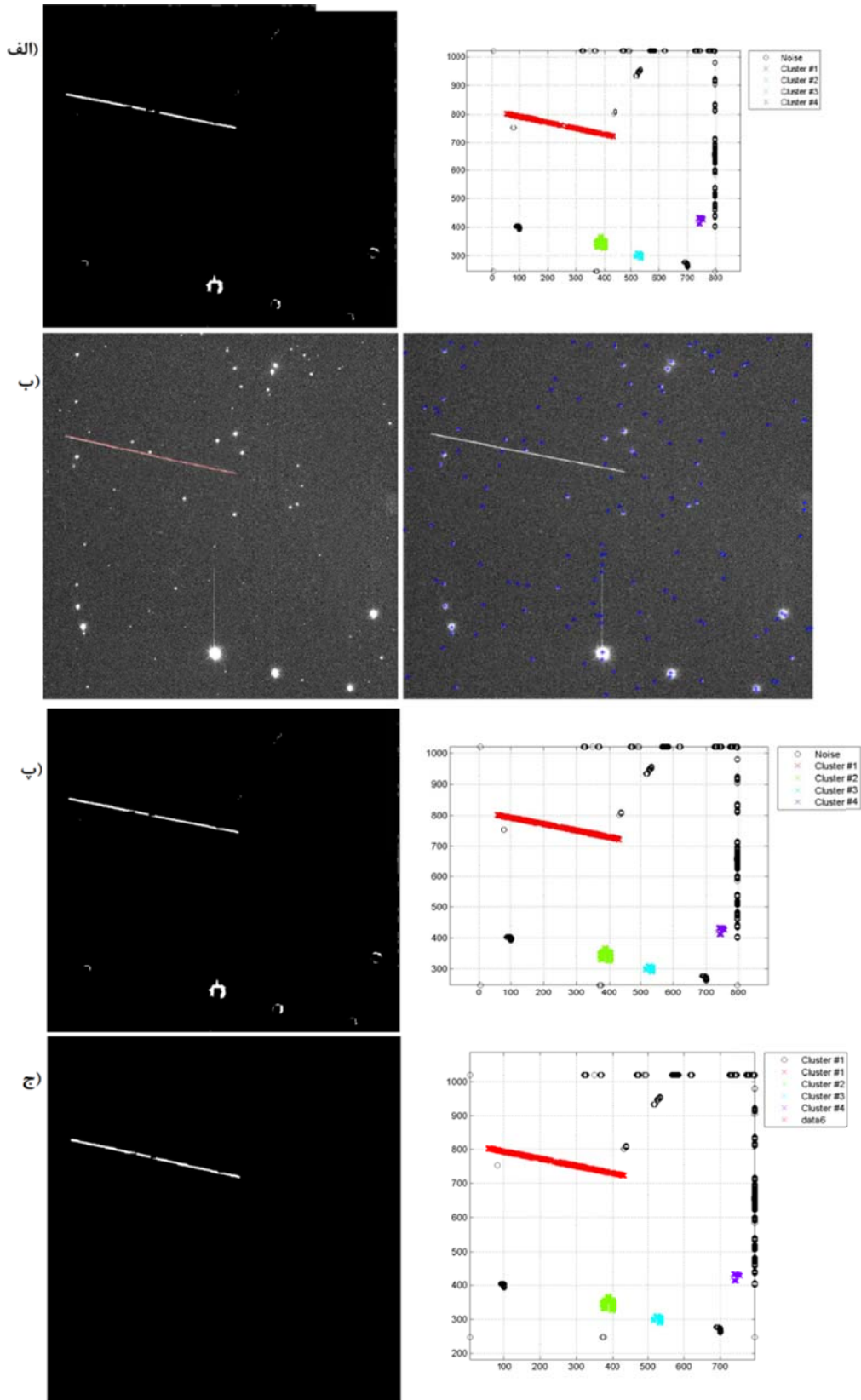
است)، عکس باینری تولید شد، بدین معنا که مقدار تمام پیکسل‌هایی که دارای روشنایی کمتر از ۱۵ بودند، به صفر تبدیل شد و برای مقادیر پیکسل‌های دارای روشنایی بیشتر و مساوی ۱۵، عدد ۲۵۵ جایگزین شد.

تجربی به اندازه کافی بزرگ هستند تا از هیچ ردی چشم‌پوشی نشود و همچنین هیچ ردی به دو یا چند خوشه تقسیم نشود (رجوع شود به شکل ۱۱-الف و ۱۲-الف).

پس از تولید عکس باینری بایستی خوشه‌بندی انجام گیرد. لازم به ذکر است که در مرحله خوشه‌بندی مقدار پارامترهای حداقل نقطه و شعاع همسایگی به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰ پیکسل اتخاذ شد. این پارامترها به شکل



شکل ۱۱. خوشه بندی و تشخیص خوشه اثر رد ماهواره و استخراج تصویر باینری رد ماهواره در اولین تصویر نمونه.



شکل ۱۲. عمل خوشه بندی و تشخیص خوشه اثر رد ماهواره و استخراج تصویر باینری رد ماهواره در دومین تصویر نمونه.

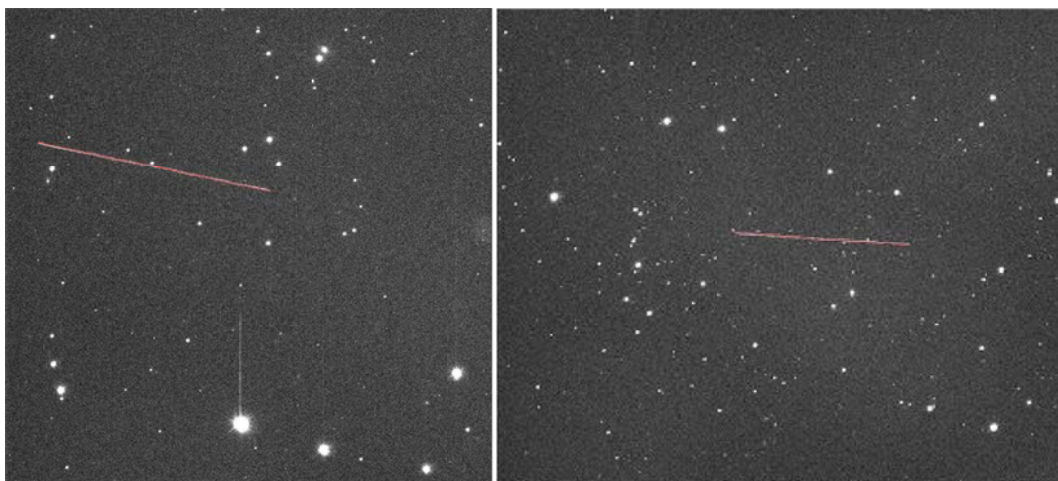
موجود در تصویر کاهش پیدا کرده و مدل تخمینی دقیق تری برآورد شود. در نهایت خروجی ردّ ماهواره به صورت عکس باینری مطابق با شکل ۱۳ به دست خواهد آمد.

به منظور استخراج مدل رد، با استفاده از مختصات پیکسلی نقاط مربوط به ردّ ماهواره و با به کارگیری الگوریتم MSAC مدل متناسب با داده‌ها تخمین زده شد. شکل ۱۴ مدل رد استخراج شده برای دو تصویر را نشان می‌دهد. تعداد تکرار، تعداد نقاط نمونه در هر تکرار و حد آستانه برای تعیین نقاط inlier و outlier پارامترهایی هستند که باید به این الگوریتم معرفی شوند. در این تحقیق به ترتیب مقادیر ۵۰۰، ۲۰ و ۰/۰۴ با استفاده از شاخص SSI انتخاب شدند.

به منظور ترمیم ردهایی که به دلیل وجود ستاره ناقص شده‌اند بایستی فاصله تمام ستاره‌ها از خط تخمینی محاسبه گردد و ستاره‌هایی که فاصله کمتر از ۱۰ پیکسل از رد داشته‌اند، از فهرست ستاره‌ها حذف شوند (شکل ۱۱-ب و ۱۲-ب). سپس مراحل حذف ستاره تا برآورد پارامترها بار دیگر تکرار شوند. تنها با این تفاوت که پس از خوشه‌بندی DBSCAN با پارامترهای حداقل نقطه و شعاع همسایگی به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰ پیکسل، نویزهای شناسایی شده حذف شده (شکل ۱۱-پ و ۱۲-پ) و سپس خوشه‌بندی بار دیگر با در نظر گرفتن پارامترهای ۲۰۰ و ۲۰ پیکسل انجام گیرد (شکل ۱۱-ج و ۱۲-ج). قابل ذکر است که این مرحله برای تمام ردها تکرار می‌شود تا با کم کردن شعاع همسایگی، نقاط غیر رد



شکل ۱۳. استخراج تصاویر باینری نهایی با استفاده از الگوریتم خوشه بندی در تصاویر نمونه.



شکل ۱۴. استخراج معادله رد اثر ماهواره در مدار LEO

این موضوع سبب جابه‌جاشدن نقاط ابتدا و انتهای رد خواهد شد که بر دقت تعیین مدار تأثیر مستقیم دارد.

#### مراجع

روغنی زاده، ا.، ۲۰۰۹، تعیین مدار ماهواره LEO با استفاده از امواج ارسالی از ماهواره. کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

شریفی، م. ع.، فرزانه س. و سیف، م. ۲۰۱۵، تشخیص اتوماتیک ستارگان در یک سامانه نجومی بینایی مبنا برای ردیابی ماهواره‌ها.

- Buades, A, Coll, B. and Morel, J. M. 2005, A review of image denoising algorithms, with a new one, *Multiscale Modeling & Simulation* 4(2), 490-530.
- Erdem, E., 2013, *NONLINEAR DIFFUSION*.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. and Xu, X., 1996, A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise.
- Fischler, M. A. and Bolles, R. C., 1981, Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM* 24(6), 381-395.
- Gagliardi, R. M. and Karp, S., 1976, *Optical communications*, New York, Wiley-Interscience, 1976. 445 p. 1.
- Gerig, G., Kubler, O., Kikinis, R. and Jolesz, F. A., 1992, Nonlinear anisotropic filtering of MRI data, *IEEE Transactions on medical imaging* 11(2), 221-232.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2009, *Digital Image Processing*, Pearson Education.
- Hejduk, M., Lambert, J., Williams, C. and Lambour, R., 2004, Satellite detectability modeling for optical sensors, *AMOS Technical Conference*.
- Montenbruck, O. and Gill, E., 2012, *Satellite orbits: models, methods and applications*, Springer Science & Business Media.
- Stöveken, Schildknecht, T. 2005, Algorithms for the optical detection of space debris objects.
- Schildknecht, T. 1994, Optical astrometry of fast moving objects using CCD detectors, *Geod.-*

#### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

به منظور ردیابی و تعیین مدار با استفاده از سیستم ردیابی اپتیکی، تشخیص اثر ردّ ماهواره از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است طی ۴ مرحله (حذف نویز، تشخیص و حذف ستاره، خوشه‌بندی و تعیین مدل ردّ ماهواره) پارامترهای متناسب مدل استخراج شود. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، بیانگر توانایی بسیار آن در تعیین نقاط ابتدا و انتهای ردّ ماهواره است. نکته اساسی در این روند عدم جابه‌جایی پیکسل‌های روشن در هر مرحله است؛ چراکه

- Geophys. Arb. Schweiz*, No. 49 49.
- P. Prona and Malik, J., 1990, Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol (12), p 629-639
- Torr, P. H. and Zisserman, A., 2000, MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, *Computer Vision and Image Understanding* 78(1), 138-156.
- van der Wal, A. C., Becker, A., Van der Loos, C. and Das, P., 1994, Site of intimal rupture or erosion of thrombosed coronary atherosclerotic plaques is characterized by an inflammatory process irrespective of the dominant plaque morphology, *Circulation* 89(1), 44-36.
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R. and Simoncelli, E. P., 2004, Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE transactions on image processing* 13(4), 600-612.
- Weeratunga, S. K. and Kamath, C., 2002, PDE-based nonlinear diffusion techniques for denoising scientific and industrial images: an empirical study, *Electronic Imaging 2002*, International Society for Optics and Photonics.
- Weeratunga, S. K. and Kamath, C., 2003, Comparison of PDE-based non-linear anisotropic diffusion techniques for image denoising. *Electronic Imaging 2003*, International Society for Optics and Photonics.

## Automatic satellite streaks detection in astronomical images

Farzaneh, S.<sup>1\*</sup>, Sharifi, M. A.<sup>2</sup> and Kosary, M.<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

3. M.Sc. Student, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 09 Jan 2017, Accepted: 23 May 2017)

### Summary

In the current state of colonization of near Earth space by satellites, there is an increasing need to know exactly the real status of occupation of this space. Thus, orbital parameters for all objects travelling in this space must be known with a high degree of accuracy, and this knowledge must be periodically updated, because this situation is always changing. Atmospheric drag, solar wind, moon and planetary gravitational perturbations, Earth oblateness, etc. are all sources of interference that generate orbital perturbations beyond what the best orbital model can predict. The solution is to periodically observe all the satellites, particularly the debris (because active satellites themselves contribute to maintain the knowledge of their orbital parameters), determine with precision their positions and update their known orbital parameters. There is a real need for sky surveillance in order to monitor either the satellites or the non-functional space objects for different purposes, such as to correct the satellites deviations from their trajectories, to detect uncataloged space debris objects and to avoid possible collisions. In order to define the location of the satellite in the sky and then to update its orbital parameters, an optical satellite tracking system can be designed which acquires sequences astronomical images from the sky. Such system is composed of many sensors like a telescope, a CCD camera, a GPS receiver, etc. Also, some reference data such as the star catalogues and the Two Lines Element (TLE) database are used. The telescope is used to search the sky and point to the satellite, precisely. The CCD camera acquires some sequences images in a current time provided by GPS. The star catalogues are employed to calibrate the image plane to the celestial coordinate systems. The TLE database contains the out-dated orbital parameters to estimate the satellite position. For this purpose an algorithms and software that can automatically detect and report the presence of satellite streaks in the acquired images are needed. The algorithms presented in this document were developed for this purpose. The image processing technique presented in this document is a collection of algorithms used to detect and classify everything that can be observed in the image, such as stars, satellite streaks and image artefacts. First due to the use of digital imagery, the quality of digital images is critical and affects the final product. Different noises in imaging phase could degrade the quality of image, for this purpose the non-linear diffusion filter has been used. This technique, is based on the use of partial differential equations, the idea behind the use of the diffusion equation in image processing arose from the use of the Gaussian filter in multi-scale image analysis. Second for the removal of the image background the stars have been detected using SIFT method. In this method the star's centers are extracted with sub-pixel precision, then they have been subtracted from image in an iteration producer. Third the clustering method has been applied for satellite streak detection. In this way the Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) which is a density-based clustering algorithm has been used, finally MSAC algorithm has been implemented for streak model extraction.

**Keywords:** Satellite tracking, Satellite streak detection, MSAC algorithm, DBSCAN clustering algorithm.