

УДК.523.8

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ЗВЕЗД ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ИХ КООРДИНАТ В ДАТЧИКАХ ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Я.О. Замирец, В.А. Лебедь. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков.

*Проведен анализ основных методов определения центра звезд для звездного датчика - метод взвешенных расстояний (ВР) и метод оценки максимального правдоподобия (ОМП). Приведены результаты сравнения методов определения центра, в результате представлена матрица зашумленных пикселей моделируемого изображения при разных значениях визуальной звездной величины. Проведено сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП.*

*Проведено аналіз основних методів визначення центру зірок для датчика зірок - метод зважених відстаней (ЗВ) і метод оцінки максимальної вірогідності (ОМВ). Наведено результати порівняння методів визначення центру, в результаті представлена матриця зашумлених пікселів модельованого зображення при різних значеннях візуальної зоряної величини. Проведено порівняння похибок визначення центру зірок для методів ЗВ і ОМВ.*

*The main startracker centroiding methods has been analyzed - weighted sum method (WS) and maximum likelihood estimator method (MLE). The results for the centroid comparison are shown; in results the noisy pixel matrix of the simulated image for different values of visual magnitude has been proposed. WS and MLE centroiding errors has been compared.*

**Ключевые слова:** датчик звезд, метод взвешенных расстояний, метод оценки максимального правдоподобия.

## Актуальность применения датчиков звездной ориентации в системах управления космических аппаратов

Астроизмерительные системы (АИС) основаны на применении датчиков звездной ориентации, которые используются в системах управления космическими аппаратами (КА), начиная с первых шагов освоения космического пространства. Задолго до начала космической эры люди научились использовать звезды для решения навигационных задач. Поэтому создание оптических приборов, способных в автоматическом режиме выполнять слежение за звездами, было естественным развитием практических знаний человечества. Существуют специальные приборы, позволяющие определять ориентацию КА по результатам съемки данных небесных тел (солнечные датчики, построители местной вертикали), кроме того существуют датчики звездной ориентации или, как их еще называют, «звездные координаторы».

Звёздный датчик (*star tracker*) — прибор в составе космического аппарата, предназначенный для определения ориентации. Является чувствительным элементом системы ориентации космического аппарата.

Для определения ориентации космического аппарата звездный датчик регистрирует изображение

звездного неба и, отождествляя наблюдающиеся звезды по звездным каталогам, определяет направление визирования и, следовательно, ориентацию космического аппарата в пространстве. Звездный датчик может выдавать управляющий сигнал для систем стабилизации космического аппарата.

Области применения:

- определение ориентации космических аппаратов,
- обнаружение и каталогизация космического мусора

Космические системы, предназначенные для съемки Земли с высоким пространственным разрешением, появились в мире еще в начале 60х годов. Сначала на них устанавливалась фотографическая съемочная аппаратура, использующая возвращаемые капсулы для доставки фотопленки на Землю. Это приводило к низкой оперативности доставки информации.

С тех пор как появились спутники, передающие изображение по радиоканалу, возможности космических систем съемки Земли значительно возросли. Современные аппараты позволяют получать панхроматические снимки с разрешением десятки сантиметров в полосе захвата несколько десятков километров и спектрзональные снимки с разрешением единицы метров в той же полосе захвата. Системы, работающие в видимом (ближнем инфракрасном) диапазоне, являются важнейшим средством получения изображений в силу их дешевизны, информативности, легкости обработки и дешифровки получаемой информации.

Роль таких систем в решении задач дистанционного зондирования постоянно возрастает. Задачи оперативного спутникового контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных и антропогенных процессов, анализа причин, прогнозирования возможных последствий и выбора способов предупреждения чрезвычайных ситуаций являются неотъемлемым атрибутом методологии сбора информации о состоянии интересующей территории, необходимой для принятия правильных и своевременных решений.

Космические снимки находят все более широкое применение в самых различных отраслях человеческой деятельности, которые выдвигают подчас самые неожиданные и высокие требования к характеристикам получаемой информации [1].

Определение центра звезд является жизненно важным процессом для повышения точности координат пространственной ориентации. Без определения центра звезды невозможно получить точную пространственную

информацию при обработке изображения. Этот процесс становится особо трудным при наличии шума, так как пиксели могут содержать неизвестное количество шумовых электронов, что вызывает неточное определение центра звезды, которое будет отличаться от фактического местоположения звезды. Однако, даже в отсутствии шума, существует ограничение на точность определения центра, связанное с проблемой дискретизации.

**Изложение основного материала**

Методы определения центра способствуют расфокусировке изображения звезды на сенсор для того, чтобы повысить предварительную точность предсказания. Производительность для любого метода определения центра непосредственно зависит от мощности звездного сигнала, колебаний уровня шума, и от размера области изображения, которая попадает на сенсор. Существует два метода определения центра звезды: взвешенная сумма (Weighted sum - WS) и оценка максимального правдоподобия (Maximum likelihood estimator - MLE).

**1. Формирование звездных кластеров**

Перед определением центра звезд, пиксели должны быть соответствующим образом объединены в звездные кластеры. Как только устанавливается уровень порога шума, пиксели, которые превышают этот порог, можно считать потенциальными пикселями звезды. Звездные датчики ASTROS и DIGSTAR образуют кластеры из пикселей, с помощью отбора самых ярких пикселей на изображении, определив их как "ядро пикселей" звезд. Все пиксели, превышающие порог, которые имеют по крайней мере один смежный пиксель с ядром, затем присваиваются кластеру конкретной звезды. Таким образом, пиксели постепенно добавляются к кластеру до того момента, пока все соседние пиксели не будут иметь значение ниже порогового уровня [2].

Для LIST и FAR-MST звездных датчиков, каждый пиксель, который нарушает порог, считается частью звезды до того момента, пока не закончится процесс фильтрации изображения. Восемь соседей пикселя, в случае если они превышают шумовой порог, формируют кластер, до тех пор, пока один из этих окружающих пикселей не пересекает шумовой порог. После этого пиксель, который относился к определенной звезде, исключается из списка рассматриваемых пикселей.

Также в формировании звездных кластеров большую роль играет яркость звезды. Пиксели с высоким значением яркости легко отличить от шума (рис. 1), а пиксели с низкой яркостью трудно отличить (рис. 2).

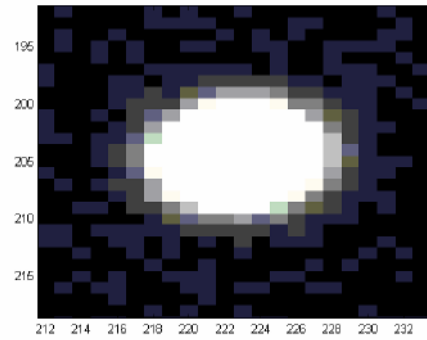


Рис. 1. Яркая звезда

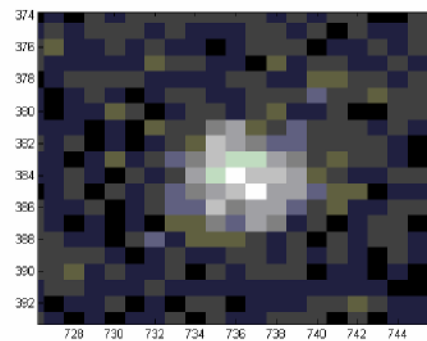


Рис. 2. Тусклая звезда

**2. Метод взвешенной суммы**

Техника метода взвешенной суммы состоит в том, что определяется местонахождение самого яркого пикселя по сравнению со своими соседними пикселями, а затем определяется центр через нахождение «центра тяжести» в конкретной области пикселей, окружающих яркий пиксель.

Для определения центра звезд были реализованы два алгоритма на основе техники взвешенной суммы. Для каждой звезды на выбранном изображении, каждый алгоритм определяет положение звезды на сенсоре по X, Y координатам, общую яркость числа электронов и соотношение сторон для каждой звезды на изображении. Соотношение сторон – это второй момент, который используется для определения того факта - не создаёт ли звезда полосу на изображении, что является признаком того, правильно ли было подобрано время экспозиции. Разница между этими алгоритмами состоит в типе фильтрования, который используется для устранения шумов. Также проверяется значение сигнал-шум и соответствие точности полученных алгоритмом координат [2].

Каждый алгоритм определения центра для начала определяет все пиксели, принадлежащие конкретным звездам, которые превышают желаемое пороговое значение шума. Затем используется количество звездных фотонов в пикселях с помощью весовой функции, которая позволяет быстро определять центр звезды:

$$position = \frac{\sum_{i=1}^n (SI_i * position_i)}{\sum_{i=1}^n (SI_i)} \tag{1}$$

где  $i$  – текущий пиксель,  $n$  – общее количество пикселей для конкретной звезды,  $SI$  – количество звездных фотонов для текущего пикселя,  $position$  – координаты данного пикселя на сенсоре. Алгоритм определения центра звезды методом взвешенной суммы имеет недостаток в том, что он не учитывает колебание шумов. Звезды, которые имеют количество пикселей меньше, чем 4, считаются ложными.

### 3. Метод оценки максимального правдоподобия (ОМП)

Идея техники ОМП происходит от дифференцирования двумерной нижней границы Крамера-Рао, которая позволяет разработать нижний предел для среднеквадратической ошибки определения оценки положения. Анализ, выполненный Винником, идентичных квадратных пикселей, профиль интенсивности изображения представляется функцией Эйри и аппроксимируется кривой Гаусса, а дробовой шум и шум темнового тока определялись с помощью распределения Пуассона [3].

Размер области изображения можно регулировать путем изменения фокусного расстояния оптической подсистемы, что эквивалентно изменению ширины PSF в искусственных изображениях. Винник утверждал, что существует соотношение конкретного пикселя к точечному размеру изображения, которое сводит к минимуму оценку ошибки местоположения. Если размер области изображения слишком большой, то это означает, что изображение состоит из большого количества пикселей, а это в своё время делает трудным отличить электроны от пикселей, содержащий чистый шум. С другой стороны, если размер области изображения слишком мал, оно может содержать большинство электронов в пределах одного пикселя и, таким образом, точное разрешение невозможно определить. Цель работы Винника состояла в том, чтобы определить лучшее соотношение конкретного пикселя к точечному размеру изображения.

Согласно Виннику, оценка максимального правдоподобия, или, двумерное определение центра звезды, может быть получено на основе двумерного стандартного распределения Рао – Крамера:

$$E[(\hat{\epsilon}_x(c) - \epsilon_x)^2] \geq \left( \frac{E\left\{ \left[ \frac{\partial \ln(P(c | \epsilon_x, \epsilon_y))}{\partial \epsilon_y} \right]^2 \right\}}{E\left\{ \left[ \frac{\partial \ln(P(c | \epsilon_x, \epsilon_y))}{\partial \epsilon_x} \right]^2 \right\}} E\left\{ \left[ \frac{\partial \ln(P(c | \epsilon_x, \epsilon_y))}{\partial \epsilon_y} \right]^2 \right\}} - E\left\{ \left[ \frac{\partial \ln(P(c | \epsilon_x, \epsilon_y))}{\partial \epsilon_x} \right] \frac{\partial \ln(P(c | \epsilon_x, \epsilon_y))}{\partial \epsilon_y} \right\}^2 \right) \quad (2)$$

при том, что известно:

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon_y} \int [\hat{\epsilon}_x(c) - \epsilon_x] P(c | \epsilon_x, \epsilon_y) dc = 0, \quad (3)$$

где  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  - оценки позиции центра по  $x$  и  $y$  направлениям,  $c$  – векторная величина относящаяся к  $\epsilon_x$ ,  $\hat{\epsilon}_x(c)$  - оценка векторной величины,  $P$  – вероятность закрытого аргумента.

С учетом этого, Винник пришел к выводу, что ОМП имеет такое значение, при котором  $Q_x$  и  $Q_y$  одновременно равны нулю.  $Q_x$  и  $Q_y$  определены.  $Q_x$  и  $Q_y$  определяются следующим образом:

$$Q_x = \sum_{ij} c_{ij} \frac{\lambda_s g'_i(\epsilon_x) g_j(\epsilon_y)}{\lambda_s g_i(\epsilon_x) g_j(\epsilon_y) + \lambda_N} \quad (4)$$

$$Q_y = \sum_{ij} c_{ij} \frac{\lambda_s g_i(\epsilon_x) g'_j(\epsilon_y)}{\lambda_s g_i(\epsilon_x) g_j(\epsilon_y) + \lambda_N} \quad (5)$$

где

$$g_i(\epsilon_x) = \int_{x_i - \frac{\Delta x}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x}{2}} S(x, \epsilon_x) dx \quad (6)$$

$$g_j(\epsilon_y) = \int_{y_j - \frac{\Delta y}{2}}^{y_j + \frac{\Delta y}{2}} S(y, \epsilon_y) dy \quad (7)$$

$$g_{ij}(\epsilon_x, \epsilon_y) = \lambda_s g_i(\epsilon_x) g_j(\epsilon_y) \quad (8)$$

где  $g_{ij}(\epsilon_x, \epsilon_y)$  - среднее число электронов всего изображения звезд [3]. В формулах (4) и (5)  $c_{ij}$  - количество электронов в конкретном пикселе,  $\lambda_s$  - общее количество электронов в данной звезде,  $\lambda_N$  является стандартным отклонением шума темнового тока и шума считывания,  $x$  и  $y$  - центр пикселя,  $\Delta x$  - это ширина пикселя, и  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  - оценки позиции центра по  $x$  и  $y$  направлениям соответственно. Кроме того,  $S(x, y, \epsilon_x, \epsilon_y)$  - Гауссовский профиль интенсивности, который определяется:

$$S(x, y, \epsilon_x, \epsilon_y) = (2\pi\sigma_s^2)^{-1} \exp\left(-\frac{(x - \epsilon_x)^2}{2\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{(y - \epsilon_y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (9)$$

которое можно разложить на части:

$$S(x, \epsilon_x) = (2\pi\sigma_s^2)^{-1} \exp\left(-\frac{(x - \epsilon_x)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (10)$$

$$S(y, \epsilon_y) = (2\pi\sigma_s^2)^{-1} \exp\left(-\frac{(y - \epsilon_y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (11)$$

где  $\sigma_s$  - ширина Гауссовской кривой интенсивности и в лучшем случае аппроксимируется:

$$\sigma_s = \frac{psfWidth}{4} \quad (12)$$

Представим, что имеем двумерное Гауссовское преобразование нормированное до единицы со средним значением равным 0, и дисперсией:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

где  $r$  – радиус PSF от центра звезды. Соотношение из (12) находится при двойном интегрировании (13):

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\tilde{r}^2/2\sigma^2} \tilde{r} d\tilde{r} d\theta \quad (14)$$

$$= 2\pi \int_0^r \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\tilde{r}^2/2\sigma^2} \tilde{r} d\tilde{r} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{\sigma^2} \int_0^r e^{-\tilde{r}^2/2\sigma^2} \tilde{r} d\tilde{r} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{\sigma^2} (-e^{-\tilde{r}^2/2\sigma^2} \sigma^2) \quad (17)$$

$$= 1 - e^{-r^2/2\sigma^2} \quad (18)$$

На плоскости изображения реальную структуру звездного света представляет функция Эйри, где 86% общего количества электронов звезд занимает диск Эйри. При наложении функции Гаусса на диск Эйри желательно, чтобы Гауссовское преобразование тоже включало в себя 86% общего количества электронов:

$$1 - e^{-r^2/2\sigma^2} = 0.86. \quad (19)$$

В результате решения этого уравнения получаем:

$$\frac{r}{\sigma} = 2. \quad (20)$$

Поскольку ширина PSF равна удвоенному радиусу  $\sigma$ :

$$\frac{psfWidth}{\sigma} = 4, \quad (21)$$

что похоже на (12).

#### 4. Сравнения эффективности методов определения центра звезд

Для выбора лучшего метода определения центра было проведено сравнение метода взвешенной суммы и оценки максимального правдоподобия. Для исследования были в случайном порядке нанесены на изображение тридцать звезд одной и той же звездной величины, затем был добавлен шум, после чего смоделированные изображения анализировались с применением метода взвешенной суммы и ОМП. Для исходной ширины PSF и порогового значения шума, исследовался ряд дополнительных визуальных величин. В табл. 1 представлен список параметров, используемых при создании смоделированных изображений для первого исследования.

Параметры изображения для сравнения методов моделирования

Параметр	Значение
Количество звезд на изображении	30
Усиление	10
$FFSR (A/W)$	0.12
$tshutter (s)$	0.1
$DK$ (фотоэлектронов)	41
$RO$ (фотоэлектронов)	40
$a (m^2)$	3.14E-04
$psfWidth$ (пикселей)	10
Пороговое значение шума ( $\sigma$ )	5

Ниже приведены результаты сравнения методов определения центра. На рис. 3, 5, 7, 9 и 11 представлена матрица зашумленных пикселей моделируемого изображения. По мере увеличения значения визуальной звездной величины  $M_v$ , звезды становятся более тусклыми. Рис. 4, 6, 8, 10 и 11 показывают различие между настоящим центром звезды и центром, полученным различными методами.

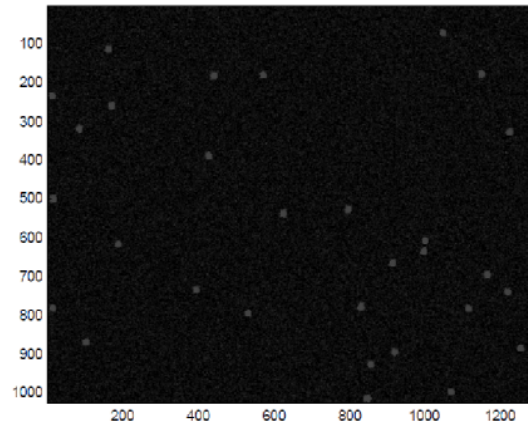


Рис. 3. Смоделированное изображение шума для  $M_v = 1$

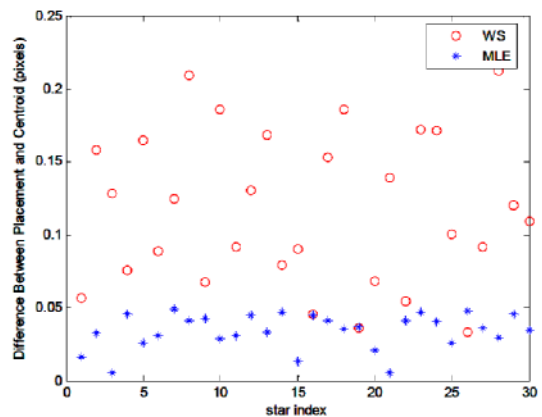


Рис. 4. Сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП при  $M_v = 1$

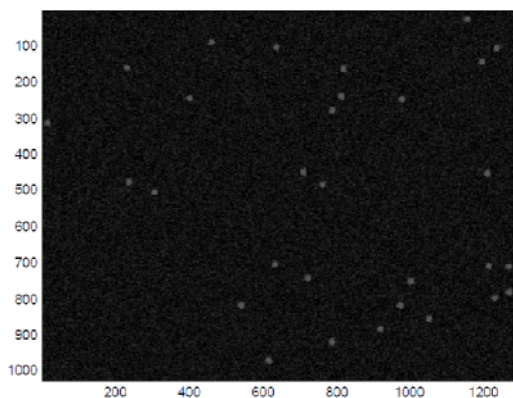


Рис. 5. Смоделированное изображение шума для  $M_v = 2$

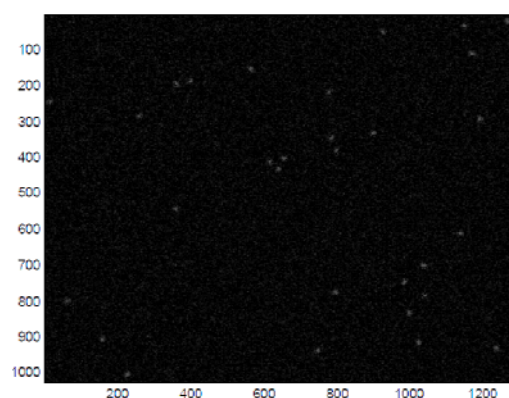


Рис. 9. Смоделированное изображение шума для  $M_v = 4$

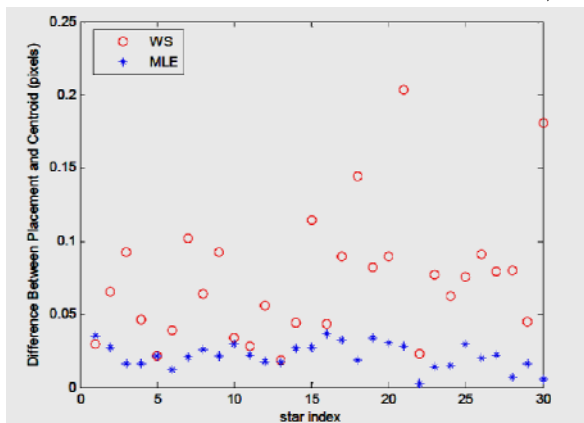


Рис. 6. Сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП при  $M_v = 2$

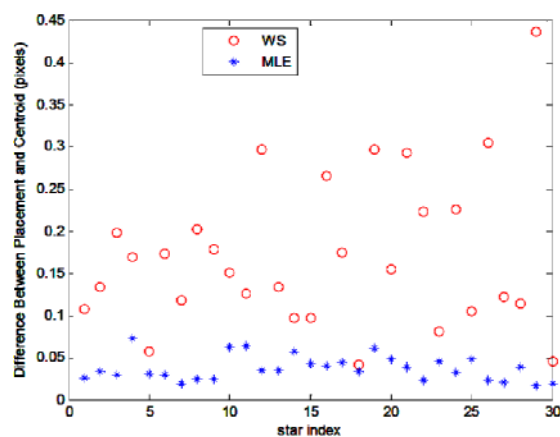


Рис. 10. Сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП при  $M_v = 4$

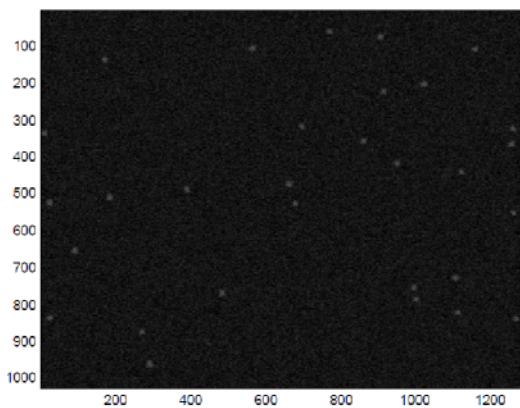


Рис. 7. Смоделированное изображение шума для  $M_v = 3$

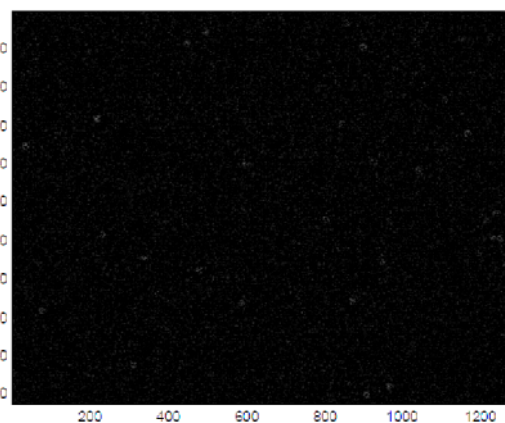


Рис. 11. Смоделированное изображение шума для  $M_v = 5$

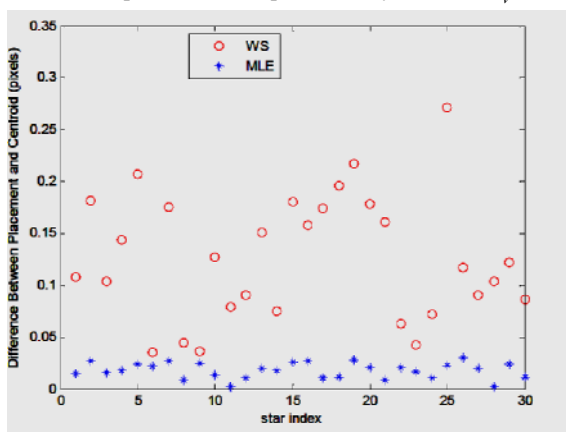


Рис. 8. Сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП при  $M_v = 3$

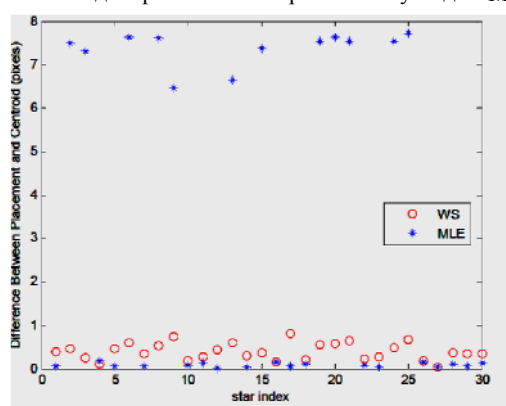


Рис. 12. Сравнение погрешностей определения центра звезд для методов ВР и ОМП при  $M_v = 5$

**Выводы**

В результате исследование показало, что оба метода лучше работают для ярких звезд. Но тем не менее во всех случаях, кроме последнего ( $M_v=5$ ), метод ОМП дал лучшие результаты. Как бы то ни было, компромисс с высокой точностью, которая в общем случае составляла примерно 0,1 пиксель вызывает большие затраты к временным ресурсам, представленные в табл. 2. Методы определения центра сравнивались с использованием программной среды MatLab.

Таблица 2

Затраты по времени для двух методов

$M_v$	ВР	ОМП
1	5.74	81.07
2	5.10	77.57
3	2.81	74.56
4	1.61	67.60
5	0.73	46.78

Как видно из таблицы время для ОМП метода немного больше, чем для метода ВР для всех пяти величин  $M_v$ . Для обоих методов время уменьшается с увеличением параметра  $M_v$ , потому что количество пикселей для обработки каждым методом уменьшается

при увеличении  $M_v$ , с того момента, как неяркие звезды содержат все меньшее количество пикселей, превышающих пороговое значение шума. Из-за огромного увеличения вычислительных требований, было решено, что небольшое увеличение точности определения центра не стоит времени и памяти, необходимых для метода ОМП, так как это не подходит для микро-датчиков звезд. Таким образом, для использования в качестве метода определения центра звезд в звездных датчиках больше подходит по требованиям метод взвешенной суммы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Габрук С. В., Гершензон В. Е. *Космические системы дистанционного зондирования Земли [Текст]* / С. В. Габрук, В. Е. Гершензон – М, 1997.
2. Kara M. Huffman *Designing Star Trackers to Meet Micro-satellite Requirements* // B.S. *Aeronautical and Astronautical Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign*. – 2004. – pp. 25 – 53
3. Winick, K. "Cramer-Rao bounds on the performance of charge-coupled-devide optical position estimators," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 3, No. 11, November 1986, pp. 1809-1815