

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗВЁЗДНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПУТЁМ СРАВНЕНИЯ ПАР ЗВЁЗД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ И БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ О БЛЕСКЕ ЗВЁЗД

*А. В. Бирюков, А. И. Захаров, М. Г. Никифоров, Ф. Н. Николаев, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин*

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова  
(ГАИШ МГУ), Москва

В работе описываются и сравниваются две процедуры начального отождествления конфигураций звёзд путём сравнения угловых расстояний между парами звёзд в бортовом каталоге и парами фотоцентров в кадре. Один из алгоритмов использует информацию о блеске (звёздных величинах) навигационных звёзд, второй — только координатную информацию. Моделирование функционирования алгоритмов показало, что оба алгоритма функционируют с высокой надёжностью — 99,6 % верных отождествлений, однако оба алгоритма показывают экспоненциальное распределение времени исполнения, что не позволяет получить верхнюю границу времени их исполнения. Отождествление с использованием дополнительной информации о блеске звёзд производится примерно в 30 раз быстрее.

*Ключевые слова:* звёздный датчик, начальное отождествление, бортовой каталог звёзд, звёздные величины.

## ВВЕДЕНИЕ

Определение ориентации на основе сравнения конфигурации звёзд в кадре с бортовым каталогом при отсутствии или ограниченном характере априорной информации является обязательным этапом функционирования звёздного датчика ориентации (ЗД): в начале его функционирования или при потере ориентации.

Работа преследовала несколько целей: 1) определение работоспособности разработанного авторами алгоритма отождествления звёздных конфигураций, основанного на сравнении пар звёзд; 2) исследование характеристик этого алгоритма в применении к ЗД с узким полем зрения; 3) сравнение характеристик алгоритмов отождествления с использованием и без использования информации о блеске звёзд. Для достижения последней цели были реализованы два алгоритма, основанные на одинаковых принципах отождествления звёздных конфигураций, при этом в одном из них использовалась только информация о расстояниях между парами звёзд, а во втором — дополнительная информация о блеске звёзд (об их звёздных величинах). Исследование проводилось путём математического моделирования.

---

**Бирюков Антон Владимирович** — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: eman@sai.msu.ru.

**Захаров Андрей Игоревич** — научный сотрудник, e-mail: zakh@sai.msu.ru.

**Никифоров Михаил Геннадьевич** — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: markab@sai.msu.ru.

**Николаев Фёдор Николаевич** — младший научный сотрудник, e-mail: vorch@list.ru.

**Прохоров Михаил Евгеньевич** — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, e-mail: mike.prokhorov@gmail.com.

**Тучин Максим Сергеевич** — младший научный сотрудник, e-mail: wizard81@mail.ru.

Звёздный датчик, для которого проводилось моделирование, имел следующие параметры: поле зрения — квадрат, занимающий на небе телесный угол в 2 кв. град.; предельная регистрируемая звёздная величина  $12^m$  (соответствует 50 % вероятности регистрации звезды в кадре). Подробнее характеристики этого ЗД описаны в статье настоящего сборника *Стекольников О. Ю., Захаров А. И., Прохоров М. Е.* Конструктивные особенности узкопольного звёздного датчика ГАИШ МГУ с зеркальным объективом. Бортовой каталог навигационных звёзд (БКНЗ) этого ЗД включал звёзды до  $12^m$  в полосе чувствительности приёмника излучения ЗД. Число навигационных звёзд в нём составляло около 250 000 (см. статью настоящего сборника *Бирюков А. В., Захаров А. И., Никифоров М. Г., Николаев Ф. Н., Прохоров М. Е., Тучин М. С.* Навигационный звёздный каталог минимального объёма, привязанный к квазиравномерной сетке на небесной сфере).

Серии тестовых кадров для проверки алгоритмов строились на основе каталога звёзд до  $12^m$  (каталог построен по данным *Tucho-2* [*Tucho-2*, 1997] и *2MASS* [*Cutri et al.*, 2003]), содержащего около 2,5 млн звёзд. Звёздные величины в этом каталоге были рассчитаны для полосы чувствительности ЗД (см. статью настоящего сборника *Мошкалева В. Г., Бирюков А. В., Захаров А. И., Крусанова Н. Л., Миронов А. В., Николаев Ф. Н., Прохоров М. Е., Тучин М. С.* Расчёт блеска звёзд в спектральной полосе кремниевого фотоприёмника звёздного датчика по данным каталогов *Tucho-2* и *2MASS*). Положение центров кадров на сфере и их ориентация выбирались случайно. К звёздам, попавшим в кадр, добавлялись случайные помехи различной яркости.

## 1. АЛГОРИТМЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЙ ЗВЁЗД

К каждому тестовому кадру применялась процедура начального отождествления. В этом качестве был и использован алгоритм, основанный на сопоставлении пар наиболее ярких фотоцентров в кадре с парами звёзд из бортового каталога, имеющих аналогичные параметры. Процедура была разработана в двух вариантах: 1) с использованием только информации о расстояниях между парами звёзд и парами фотоцентров и 2) с учётом информации как о расстояниях между фотоцентрами (звёздами), так и об их блеске.

Алгоритм использует следующие данные: основной бортовой каталог навигационных звёзд и дополнительный каталог расстояний между парами навигационных звёзд. В первом из них на каждую навигационную звезду приходится одна запись, содержащая координаты звёзд (угловые или в виде единичных векторов). Основной каталог содержит около 250 000 записей. В каталоге расстояний содержатся данные о расстояниях между близкими парами навигационных звёзд и ссылки на записи основного каталога, содержащие данные о звёздах пары. Близкими считаются пары звёзд, угол между которыми не превышает размер кадра (в нашем случае  $2^\circ$ ). Более широкие пары звёзд не могут одновременно попасть в кадр и, следовательно, в определении конфигураций звёзд не используются. При ограничении максимального углового расстояния между звёздами пары  $\theta_{\max} = 2^\circ$  число записей в каталоге расстояний составляет около  $9,4 \cdot 10^6$  (при  $2,5 \cdot 10^5$  записей в основном каталоге).

Для варианта алгоритма с использованием блеска звёзд в дополнительный каталог также входят данные о звёздных величинах каждой из звёзд пары.

В алгоритме отождествления используются следующие структуры данных: списки пар звёзд  $list_i$ , удовлетворяющих определённым требованиям, и список групп звёзд  $group_i$ , соответствующих возможным отождествлениям конфигурации звёзд, наблюдаемой в кадре.

Алгоритм отождествления имеет следующий вид.

1. В кадре обнаруживаются все фотоцентры, определяются их координаты  $X, Y$  (в системе координат, связанной матричным приёмником излучения), блеск  $m$  и ошибки этих величин  $\Delta i$ .

2. Список фотоцентров упорядочивается по звёздной величине.

3. Организуется цикл перебора пар фотоцентров в порядке возрастания их звёздных величин (убывания блеска).

4. Вычисляется расстояние  $r_{ph}$  между парой фотоцентров.

5. Из каталога расстояний выбираются все пары, расстояния  $r_i$  между которыми с точностью до ошибки совпадают с расстоянием между парой фотоцентров:  $|r_{ph} - r_i| < \Delta r_i$ .

Для варианта алгоритма с использованием блеска отобранные пары дополнительно должны удовлетворять условиям  $|m_{1,ph} - m_{1,i}| < \Delta m_{1,i}$  и  $|m_{2,ph} - m_{2,i}| < \Delta m_{2,i}$ . Здесь  $m_{1,ph}, m_{2,ph}$  — блеск 1-го (более яркого) и 2-го фотоцентров пары;  $m_{1,i}, m_{2,i}$  — блеск звёзд  $i$ -й пары из каталога расстояний;  $\Delta m_i$  — погрешности блеска.

Строится список пар  $list_i$ , удовлетворяющих указанным условиям.

6. Если шаг цикла не является первым, то построенный список  $list_i$  сравнивается со списками для некоторых уже обработанных пар фотоцентров  $list_j$  ( $j < i$ ). Сравнение проводится только для списков пар фотоцентров, которые имеют с текущей парой одну общую звезду. В результате сравнения находятся двойки пар, в которые входит одна и та же навигационная звезда.

7. Пары звёзд каждой двойки образуют две стороны сферического треугольника. Проверяется третья сторона этого треугольника. Если расстояние между звёздами не совпадает с расстоянием между соответствующими фотоцентрами, то переходим к следующей двойке пар.

8. При совпадении трёх сторон треугольника звёзд и треугольника фотоцентров сравниваем найденный треугольник со списком групп звёзд. Если хотя бы одна звезда треугольника совпадает со звездой  $i$ -й группы, то остальные звёзды треугольника включаются в неё. Если треугольник не совпадает ни с одной существующей группой, то создаётся новый элемент списка групп и звёзды треугольника включаются в него.

9. Если число элементов в изменённом элементе списка групп превышает  $N = 3$ , то производится проверка возможного отождествления. Для этого выполняются следующие действия.

10. По звёздам группы, отождествлённым с фотоцентрами кадра, определяется матрица 3-мерного поворота, отображающего кадр на небесную сферу (и обратно).

11. Границы кадра проецируются на небесную сферу.

12. Из основного бортового каталога выбираются все навигационные звёзды, попадающие внутрь границы кадра. Их число равно  $K$ .

13. Координаты выбранных звёзд переводятся в систему координат кадра.

14. Для каждой навигационной звезды проверяется наличие совпадающего с ней фотоцентра в кадре (по формулам из п. 5 алгоритма).

15. Если число совпавших с фотоцентрами навигационных звёзд превышает  $K/2$ , отождествление считается успешным:

- выдаётся сообщение об отождествлении;
- выдаётся найденная конфигурация звёзд;
- вычисляется ориентация;
- алгоритм начального отождествления завершается.

16. Конец цикла перебора пар фотоцентров (см. п. 3).

17. Выдаётся сообщение о неудаче отождествления.

Заметим, что сравнение расстояний между парами фотоцентров и парами звёзд — один из наиболее распространённых методов начального отождествления, который достаточно широко используется в звёздных датчиках различных производителей. Описанный выше алгоритм независимо разработан авторами этой работы. Отметим, что особенности реализации алгоритмов начального отождествления могут существенно сказываться на надёжности и скорости их функционирования.

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И СБОР СТАТИСТИКИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Каталоги были реализованы в виде таблиц базы данных PostgreSQL [PostgreSQL, 1996]. Основной каталог был упорядочен и проиндексирован по номерам навигационных звёзд (primary keys). Каталог расстояний был проиндексирован по расстояниям и по звёздным величинам. База данных (БД) была установлена на удалённом сервере, доступ к ней из программы, реализующей алгоритм отождествления звёздных конфигураций, осуществлялся через сеть.

Программа, реализующая алгоритмы отождествления, была написана на скриптовом (интерпретационном) языке программирования perl и выполнялась на персональном компьютере (PC) под управлением Windows.

В ходе проведения испытаний нас интересовало получение ответов на следующие вопросы: надёжность начального отождествления и длительность выполнения этой процедуры.

Надёжность начального отождествления оценивалась как вероятность успешного отождествления конфигурации звёзд, попадающих в поле зрения ЗД, при его случайной ориентации. Вероятность оценивалась как отношение числа успешно отождествлённых кадров к общему числу попыток.

Поскольку эта реализация алгоритма коренным образом отличается от той, которая может применяться в ЗД, время исполнения алгоритма на PC практически не связано с временем его выполнения на аппаратной базе ЗД. Во время реализации алгоритма выполняются действия двух существенно различных типов: обращение к БД (или файловой структуре), содержащей каталоги, и обработка данных, извлечённых из БД. Поэтому в ходе моделирования вместо времени исполнения собиралась другая информация, на основе которой можно было провести необходимые оценки. К ней относились следующие данные:

- число запросов к БД;
- число записей, извлечённых из БД в каждом запросе;

- размеры сравниваемых списков пар звёзд;
- число двоек пар, найденных при сравнении списков;
- число групп на момент отождествления;
- число фотоцентров в кадре, обработанных к моменту отождествления.

### 3. ИСПЫТАНИЯ АЛГОРИТМОВ

Во всех испытаниях, описанных ниже, использовались следующие параметры алгоритмов отождествления конфигураций звёзд:

- различие расстояний между парой фотоцентров и парой звёзд из каталога расстояний принималось равным  $\Delta r = 5$  угл. с (1 пиксел изображения 3Д);
- различие звёздных величин фотоцентра и звезды для каждой из звёзд пары при выборе из дополнительного каталога принималось равным  $\Delta m_i = 3\sigma_i$ , где  $\sigma_i^2$  — дисперсии звёздных величин соответствующих фотоцентров.

#### 3.1. Тесты на малой выборке

Для выполнения этих тестов были сгенерированы 100 случайных тестовых кадров, координаты центров которых были равномерно распределены по небесной сфере. Сначала к каждому тестовому кадру был применён алгоритм отождествления конфигураций звёзд, использующий только расстояния между звёздами. Результаты этой серии испытаний показаны в табл. 1.

Затем к этой же тестовой выборке был применён алгоритм отождествления, использующий данные о блеске звёзд. Результаты этой серии испытаний показаны в табл. 2.

Из сравнения этих таблиц видно, что некоторые характеристики проведённых тестов совпадают, а некоторые серьёзно различаются. Так, в этих тестах совпадает число фотоцентров, обработанных до правильного отождествления конфигураций, и число обращений к БД, а также число фотоцентров (равное трём) в группе, по которой было выполнено верное отождествление.

Однако средние числа попыток отождествления и записей, извлечённых из БД, различаются примерно в 100 раз. Это различие подтверждается тем фактом, что выполнение первой серии тестов на РС заняло примерно в 30 раз больше времени, чем второй.

Оба алгоритма показали очень высокую надёжность — ни одного неудачного отождествления не было выявлено (в обоих вариантах). При этом были отмечены очень большие вариации времени и статистических параметров отождествления от кадра к кадру.

#### 3.2. Тесты на большой выборке

Результаты, полученные в предыдущих тестах, потребовали увеличения тестовой серии. Число случайных кадров было увеличено в 10 раз — до 1000. Это увеличение было связано, в первую очередь, с желанием определить значимое отклонение вероятности успешного отождествления от единицы.

**Таблица 1.** Минимальные, максимальные и средние величины статистических параметров для алгоритма, использующего только расстояния в тестовой серии из 100 кадров

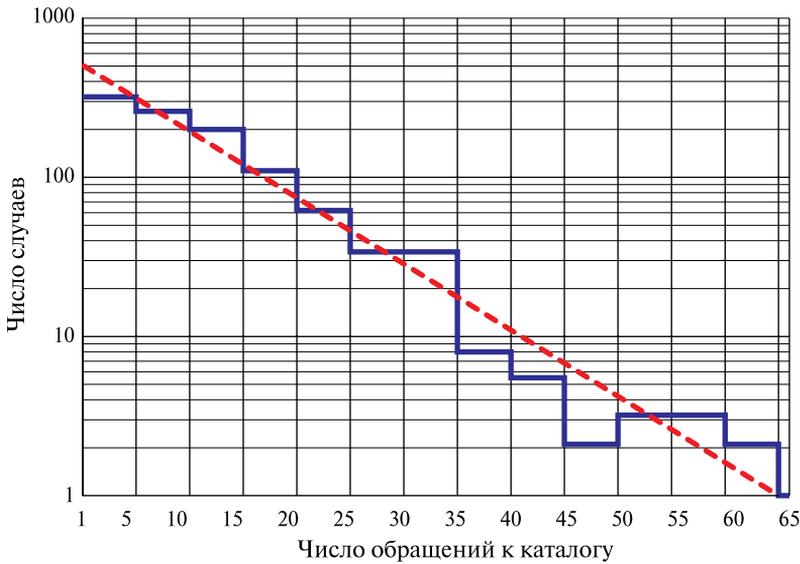
Величины	Обработано фотоцентров	Из них звёзд		Обращений к БД	Считано записей из БД	Попыток отождествления	Успешных отождествлений	Звёзд в кадре	
		звёзд	помех					отождествлённых	всего
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
max	13	3	10	77	700 690	4346	100 из 100	16	16
min	3	3	0	2	12 975	1		7	7
средние	5,5	3	2,5	12,1	118 160	158,8		11,8	12,2

**Таблица 2.** Минимальные, максимальные и средние величины статистических параметров для алгоритма, использующего блеск звёзд в тестовой серии из 100 кадров

Величины	Обработано фотоцентров	Из них звёзд		Обращений к БД	Считано записей из БД	Попыток отождествления	Успешных отождествлений	Звёзд в кадре	
		звёзд	помех					отождествлённых	всего
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
max	13	3	10	77	13451	19	100 из 100	16	16
min	3	3	0	2	11	1		7	7
средние	5,6	3	2,6	13,0	1350	1,24		11,8	12,2

**Таблица 3.** Величины статистических параметров для алгоритма, использующего блеск звёзд на серии из 1000 кадров

Величины	Обработано фотоцентров	Обращений к БД	Считано записей из БД	Попыток отождествления	Успешных отождествлений	Звёзд в кадре	
						отождествлённых	всего
(1)	(2)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
max	22	211	77 329	1231	996 из 1000	16	16
min	3	2	2	1		7	7
средние	5,6	12,5	1682	5,02		11,8	12,2



Относительное распределение отождествлённых кадров по числу обращений к БД (к каталогу расстояний) до достижения успешного отождествления

К каждому тестовому кадру большой серии применялся только алгоритм отождествления конфигураций звёзд, использующий данные о блеске звёзд\*. Результаты этой серии испытаний приведены в табл. 3.

На рисунке показано распределение отождествлённых кадров по числу обращений к БД, потребовавшихся для нахождения верного отождествления. Как следует из данных рисунка, распределение имеет экспоненциальный вид, частота событий описывается соотношением

$$F(n) \propto 10^{-n/25}.$$

Здесь  $F$  — относительная частота событий;  $n$  — число обращений к БД.

### 3.3. Тесты на сокращённом каталоге расстояний

Объём дополнительного каталога расстояний очень велик. При размере основного каталога в 250 000 записей (навигационных звёзд) и максимальном расстоянии между звёздами пары  $\theta_{\max} = 2^\circ$ , объём каталога расстояний составляет 9,4 млн записей, т. е. примерно в 40 раз больше основного каталога. Размещение такого объёма данных в памяти ЗД представляет серьёзную проблему. Поэтому интересен вопрос об уменьшении объёма дополнительного каталога.

Число записей (пар звёзд) в каталоге расстояний примерно равно половине произведения числа навигационных звёзд на среднее число навигационных звёзд в круге с радиусом, равным максимальной ширине пар, используемых при отождествлении. Наиболее эффективным способом уменьшения

\* В связи с очень большой длительностью моделирования при использовании только расстояний.

объёма каталога расстояний является уменьшение максимальной ширины пар. Объём каталога при этом уменьшается пропорционально квадрату максимального углового расстояния.

Для большой серии из 1000 тестовых кадров были проведены две серии испытаний, в первой из которых максимальная ширина пары бралась равной  $\theta_{\max} = 1,4^\circ$  (что соответствует стороне кадра ЗД), а во второй —  $\theta_{\max} = 0,7^\circ$  (половина стороны кадра ЗД). Размеры дополнительного каталога для этих случаев приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Параметры каталогов расстояний для различных  $\theta_{\max}$

$\theta_{\max}$	$N(\theta_{\max})$	$N(\theta_{\max})/N(2^\circ)$	$N(\theta_{\max})/N_{\text{нав}}$	Пояснение
$2^\circ$	$9,4 \cdot 10^6$	1	37,6	$\theta_{\max}$ = диагонали кадра
$1,4^\circ$	$4,6 \cdot 10^6$	0,49	18,4	$\theta_{\max}$ = стороне кадра
$0,7^\circ$	$1,1 \cdot 10^6$	0,12	4,3	$\theta_{\max}$ = 1/2 стороны кадра

Для каждого варианта были проведены испытания, аналогичные описанным в п. 3.2.

Испытания показали, что уменьшение  $\theta_{\max}$  до указанных значений не сказывается на надёжности функционирования алгоритма отождествления звёздных конфигураций, из 1000 тестовых кадров неудачное отождествление имело место только для четырёх\*, т.е. вероятность успешного отождествления в обоих испытаниях составила 0,996. При этом объём каталога расстояний для  $\theta_{\max} = 0,7^\circ$  в 10 раз меньше каталога расстояний для  $\theta_{\max} = 2^\circ$  и уже сравним с объёмом основного навигационного каталога.

## ВЫВОДЫ

Обе процедуры отождествления звёздных конфигураций, как использующая только расстояния между парами звёзд, так и привлекающая данные о блеске звёзд, показали очень высокую надёжность отождествления. Вероятность успешного отождествления в проведённых экспериментах составила 0,996.

Испытания показали, что длительность отождествления в обоих алгоритмах сильно варьируется в зависимости от «качества» кадра — числа попавших в кадр ярких звёзд и числа ярких помех. Распределение кадров по числу обращений к БД (величина, пропорциональная времени исполнения алгоритма) имеет экспоненциальный вид, т.е. число ситуаций, требующих длительного отождествления, быстро падает с увеличением длительности выполнения процедуры.

Исследование показало, что процедура с использованием информации о звёздных величинах требует примерно в 100 раз меньшего числа обращений к БД, чем процедура, использующая только расстояния.

Процедуры начального отождествления, применяемые в большинстве звёздных датчиков, используют только информацию о координатах звёзд.

\* Неудача отождествления в обеих сериях произошла в тех же четырёх кадрах, что и неудача в испытаниях, описанных в п. 3.2.

Привлечение данных о блеске звёзд имеет несколько очевидных недостатков: увеличение объёма бортовых каталогов и появление систематических ошибок отождествления звёздных величин из-за деградации оптики и приёмника излучения. Помимо этого необходимо уметь с малой погрешностью пересчитывать блеск звёзд из фотометрических полос, в которых проводятся астрономические наблюдения, в полосу чувствительности ЗД.

Однако положительный эффект от использования звёздных величин в алгоритмах отождествления ЗД, описанный выше, перевешивает эти недостатки.

Уменьшение объёма дополнительного каталога расстояний путём уменьшения максимального расстояния между включаемыми в него парами звёзд существенно уменьшает объём каталога расстояний и позволяет если не решить, то существенно снизить остроту проблемы дефицита памяти в ЗД.

Изменение спектральной чувствительности оптического тракта ЗД из-за деградации приёмников излучения и линзовых элементов оптической системы имеют место в условиях космической эксплуатации прибора. Это приводит к появлению систематических различий между звёздными величинами фотоцентров в деградировавшей фотометрической системе ЗД и данными из бортового каталога. В алгоритме, использующем только расстояния между звёздами, такого эффекта нет. Проблему можно решить увеличением используемой в алгоритме допустимой разности  $\Delta m$ . Естественно, увеличение  $\Delta m$  сопровождается увеличением среднего времени выполнения отождествления (увеличение  $\Delta m$  до бесконечности превращает второй вариант алгоритма в первый).

Полученные результаты указывают на перспективность методов начального определения ориентации на основе информации о блеске звёзд, несмотря на имеющиеся у этого метода недостатки.

Опубликованные научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашения № 8059, 8239, 8758).

## ЛИТЕРАТУРА

- [Tycho-2, 1997] The Hipparcos and Tycho Catalogues. ESA SP-1200. 1997.
- [Cutri et al., 2003] *Cutri R. M., Skrutskie M. F., van Dyk S., Beichman C. A., Carpenter J. M., Chester T., Cambresy L., Evans T., Fowler J., Gizis J., Howard E., Huchra J., Jarrett T., Kopan E. L., Kirkpatrick J. D., Light R. M., Marsh K. A., McCallon H., Schneider S., Stiening R., Sykes M., Weinberg M., Wheaton W. A., Wheelock S., Zacarias N.* The 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources. The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive. 2003. URL: <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/>.
- [PostgreSQL, 1996] PostgreSQL. The PostgreSQL. Global Development Group. 1996–2012. URL: <http://www.postgresql.org>.

## EFFICIENCY OF THE STAR PATTERN RECOGNITION METHODS BY COMPARISON STELLAR PAIRS WITH AND WITHOUT STAR BRIGHTNESS INFORMATION

*A. V. Biryukov, A. I. Zakharov, M. G. Nikiforov, F. N. Nikolaev, M. E. Prokhorov, M. S. Tuchin*

Sternberg State Astronomical Institute of Moscow State Lomonosov University (SAI MSU), Moscow

We describe and compare the two procedures initial identification configurations stars by comparison of the angular distances between pairs of stars in the catalog and pairs photocenters in the frame. One of these algorithms use information about the brightness of navigational stars, the second — only coordinate information. Modeling of the algorithms found that both algorithms operate with high reliability — 99.6 % correct identifications. However, both algorithms show an exponential distribution of execution time, which does not allow to obtain an upper bound on the identification time. Identification with additional information about the stellar brightness is about 30 times faster.

*Keywords:* star tracker, star pattern recognition, navigational stellar catalogue, stellar magnitudes.

---

**Biryukov Anton Vladimirovic** — scientist, PhD (physico-mathematical sciences), e-mail: eman@sai.msu.ru.

**Zakharov Andrey Igorevich** — scientist, e-mail: zakh@sai.msu.ru.

**Nikiforov Mikhail Gennadievich** — scientist, PhD (physico-mathematical sciences), e-mail: markab@sai.msu.ru.

**Nikolaev Fedor Nikolaevich** — junior scientist, e-mail: vorch@list.ru.

**Prokhorov Mikhail Eugenyevich** — head of a laboratory, doctor of physico-mathematical sciences, e-mail: mike.prokhorov@gmail.com.

**Tuchin Maxim Sergeevich** — junior scientist, e-mail: wizard81@mail.ru.