

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ДАЛЬНОМ КОСМОСЕ ПО АСТЕРОИДАМ

М. Г. Никифоров¹, А. И. Захаров¹, М. Е. Прохоров¹, Т. Ю. Галушина², А. О. Жуков¹

¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

² Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Национального исследовательского Томского государственного университета
(НИИ ПММ при ТГУ)

Задача навигации состоит в определении положения КА в пространстве. Один из возможных способов автономного определения навигации — измерение с борта КА видимого положения заранее отобранных астероидов. Если мы знаем положение такого объекта в пространстве (по эфемеридам) и его видимое положение (по измерениям с борта КА), то можно определить луч, при нахождении на котором КА наблюдает объект в положении совпадающем с видимым. Наблюдение двух объектов дает два луча, а пересечении двух лучей — пространственное положение КА.

Распределение астероидов в Солнечной системе существенно неоднородно, поэтому такой метод навигации эффективен не везде.

Ключевые слова: межпланетная навигация, автономная навигация, астероиды, параллакс.

ВВЕДЕНИЕ

Современные задачи космических исследований требуют использования космических аппаратов (КА) на всё большем удалении от Земли. При этом определение положения космического аппарата в пространстве и управление его полётом осуществляется с наземных станций слежения, что несёт ряд неудобств и отрицательно сказывается на надёжности эксплуатации КА. Поэтому космическая техника нуждается в средствах автономной навигации КА в межпланетном пространстве.

Задача навигации состоит в определении положения КА в пространстве. Одно из возможных решений — измерение с борта КА видимого положения заранее выбранных объектов Солнечной системы. Если мы знаем положение этого объекта в пространстве (по эфемеридам) и его видимое положение (по измерениям с борта КА), то можно определить луч, при нахождении на ко-

Никифоров Михаил Геннадьевич — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент

Захаров Андрей Игоревич — научный сотрудник, zakh@sai.msu.ru

Прохоров Михаил Евгеньевич — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, доцент, mike.prokhorov@gmail.com

Галушина Татьяна Юрьевна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент

Жуков Александр Олегович — старший научный сотрудник, доктор технических наук, доцент, aozhukov@mail.ru

тором КА наблюдает объект в измеренном видимом положении*, и на пересечении двух лучей — пространственное положение КА. Таким образом, для навигации необходимо иметь, по меньшей мере, два навигационных объекта.

Описанный метод автономной навигации** известен и под названием AutoNav (<http://nmp.nasa.gov/dsl/tech/autonav.html>. Date: 16.01.2010) [Riedel et al., 2000], был испытан в космической миссии Deep Space 1.

Рассмотрим возможность реализации указанного метода навигации по астероидам.

1. ОСОБЕННОСТИ НАВИГАЦИИ ПО АСТЕРОИДАМ

Астероидная навигация имеет свои преимущества и недостатки. Достоинством этого метода навигации является многочисленность астероидов, их известно уже несколько сотен тысяч*** (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>; <http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/MPNames.html>). Поэтому в плоскости эклиптики практически всегда можно что-то наблюдать. Кроме того, использование для определения местоположения КА одновременно нескольких астероидов позволит повысить точность локализации КА.

Кроме того, в отличие от планет, угловые размеры астероидов очень малы. Планеты представляют собой протяжённые объекты с неравномерной яркостью по диску, угловые размеры которых существенно больше необходимой для навигации погрешности измерений. Определение истинного центра планеты на изображении требует специального алгоритма, который вносит дополнительную погрешность. Поскольку угловые размеры астероидов меньше требуемой погрешности, то их можно считать точечными объектами, а погрешностью, связанной с конечностью их размеров, пренебрегать.

Недостатком астероидной навигации является то, что для астероидов отсутствуют эфемериды, сравнимые по точности с эфемеридами больших планет****. Для астероидов характерны кеплеровские элементы орбит, зная которые, можно вычислить положение астероида. Под действием возмущений элементы орбит эволюционируют, поэтому возникает необходимость их периодически уточнять. Эта проблема имеет три возможных решения.

Первый вариант состоит в том, что полёт КА требует информационной поддержки с Земли, при которой база данных (БД) с элементами орбит астероидов периодически обновляется, например, раз в несколько месяцев или раз в год.

* Положение КА вдоль луча при этом не определено.

** Здесь под «автономной» подразумевается навигация с использованием данных, полученных только на борту КА. Существует другое, более старое значение термина «автономная навигация», которое означает чисто инерциальную навигацию без использования внешних ориентиров.

*** По состоянию на 16 января 2014 г. в базе данных насчитывалось 632 567 объектов, из которых для 385 184 точно определены орбиты и им присвоен официальный номер; 18 241 из них на этот момент имели официально утверждённые наименования.

**** По крайней мере, с точностью эфемерид внутренних планет Солнечной системы.

Второй вариант не требует поддержки с Земли. Элементы орбит однократно вычисляются на среднюю дату полёта, при этом время миссии КА ограничено сроком, в течение которого кеплеровские элементы орбит обеспечивают надлежащую точность навигации. Это потребует предварительного отбора навигационных астероидов.

Последний вариант — прямой расчёт траекторий движения астероидов с учётом гравитационных возмущающих сил от больших планет Солнечной системы, наиболее крупных спутников планет и астероидов, сжатия Солнца и релятивистских эффектов, по одной из современных эфемерид: DE403–DE432 [Standish, Willams, 2013] или EPM87–ERM2011 [Питьева, 2013].

Другая сложность заключается в том, что основная масса астероидов будет выглядеть с борта КА как достаточно тусклые объекты, положение которых необходимо с высокой точностью определять на фоне звёзд. При этом большое число навигационных объектов позволяет с большей точностью определять положение КА, так как в этом случае можно отбирать наиболее яркие или наиболее близкие к КА объекты. С другой стороны, для отождествления и определения координат навигационных объектов потребуется каталог звёзд, блеск которых сравним с блеском объектов. Объём звёздного каталога будет расти экспоненциально с увеличением предельной звёздной величины.

2. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ АСТЕРОИДА

Оценка точности определения пространственного положения астероидов проводилась с помощью программного комплекса «ИДА» [Быкова и др., 2012] следующим образом. Для выбранного астероида по всему массиву его оптических наблюдений (при этом часть наблюдений отсеивалась по правилу «трёх сигм») методом наименьших квадратов находились его пространственное положение и скорость на начало 2013 г., а также вычислялись ошибки определения этих параметров. Далее, на основе полученной в результате улучшения ковариационной матрицы, генерировалось семейство 1000 тестовых частиц, распределённых по нормальному закону. Для построенного семейства определялись траектории с помощью интегрирования методом Эверхарта [Авдюшев, 2010] уравнений движения астероида с учётом возмущений от больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты и релятивистских эффектов от Солнца. Интегрирование велось на интервале времени 2013–2043 гг. Для этого семейства орбит определялось максимальное отклонение положений тестовых частиц от астероида на номинальной орбите (полученной в результате улучшения), которое и считалось погрешностью задания пространственного положения астероида.

Для моделирования были выбраны следующие 5 объектов: 208 Лакримоза, 279 Тул, 1248 Югурта, 1600 Высоцкий и 3375 Эми. Согласно расчётам погрешность положения этих астероидов в пространстве на интервале с 2013 по 2043 г. составляет примерно 300 км. Вероятно, специальным отбором астероидов для целей навигации эту погрешность можно уменьшить примерно в 2 раза, т.е. до 150 км.

3. ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО АСТЕРОИДАМ

Погрешность определения положения КА по наблюдениям астероидов складывается из двух частей. Первая — погрешность эфемерид астероидов Δx_1 (см. разд. 2). Будем полагать её равной 300 км для произвольных астероидов и 150 км для «точных» астероидов, отобранных для навигации.

Вторая, связанная с погрешностью измерения видимого положения астероида, описывается следующей формулой:

$$\Delta x_2 = (730 \text{ км}) \left(\frac{d\theta}{1 \text{ угл.с}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ а.е.}} \right), \quad (1)$$

где $d\theta$ — угловая погрешность определения видимого положения; d — расстояние от астероида до КА. Тогда полная погрешность выражается следующим образом:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}. \quad (2)$$

Погрешность измерения видимого положения астероида в видимом диапазоне зависит от его видимой величины и экспозиции.

Из этих формул вытекает, что при умеренной (0,1 угл.с) точности определения видимого положения астероида $\Delta x_2 < \Delta x_1$ до расстояний 2 а.е., а для высокой точности (0,01 угл.с) — до расстояний 20 а.е., т.е. в пределах всей Солнечной системы. Это означает, что снижать погрешность измерения видимого положения существенно ниже 0,1 угл.с не требуется. При этом точность определения положения КА в пространстве будет составлять примерно 150 км.

4. АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ АСТЕРОИДОВ

Карты плотности астероидов (рис. 1–8) характеризуют видимое распределение астероидов для КА на заданном расстоянии от Солнца до заданной предельной видимой звёздной величины на небесной сфере. Для их построения вычисляются общее число видимых астероидов, число астероидов на квадратный градус и некоторые статистические данные.

Карты плотности астероидов строились следующим образом. В качестве системы координат была выбрана эклиптическая система координат, связанная с КА. За точку отсчёта долгот было принято видимое с борта КА положение Солнца. Карты составлялись для диапазона долгот $\lambda \in [0^\circ, 360^\circ]$ и широт $\beta \in [-60^\circ, +60^\circ]$ с равномерным шагом в 5° по широте и долготе. На каждый момент времени для каждой ячейки определялось видимое число астероидов до 12–17-й звёздной величины. Было проведено усреднение 122 карт, построенных с интервалом 30 дней для движения КА по круговой орбите в плоскости эклиптики. В результате для каждой ячейки карты было вычислено среднее число астероидов, соответствующее каждой предельной звёздной величине, и определена дисперсия.

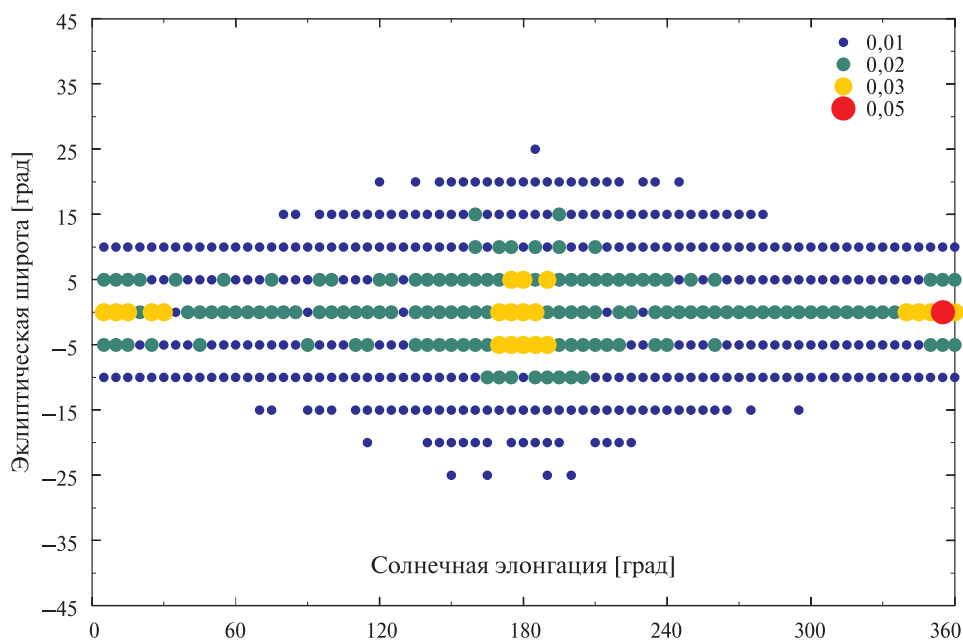


Рис. 1. Средняя плотность астероидов до 13^m , наблюдаемая с борта КА на орбите Земли (1 а. е. от Солнца). Здесь и далее (рис. 2–8): карта построена в координатах элонгация (элонгация — разность эклиптической долготы объекта и Солнца) — эклиптическая широта. Цвет обозначает среднюю плотность астероидов на квадратный градус в области $5 \times 5^\circ$

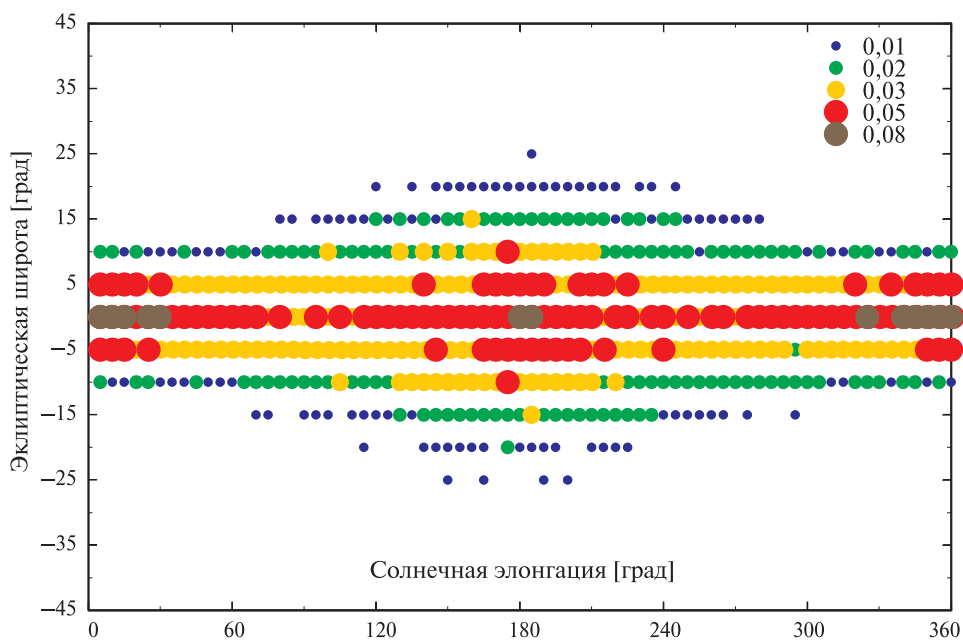


Рис. 2. Средняя плотность астероидов до 14^m , наблюдаемая с борта КА на орбите Земли (1 а. е. от Солнца)

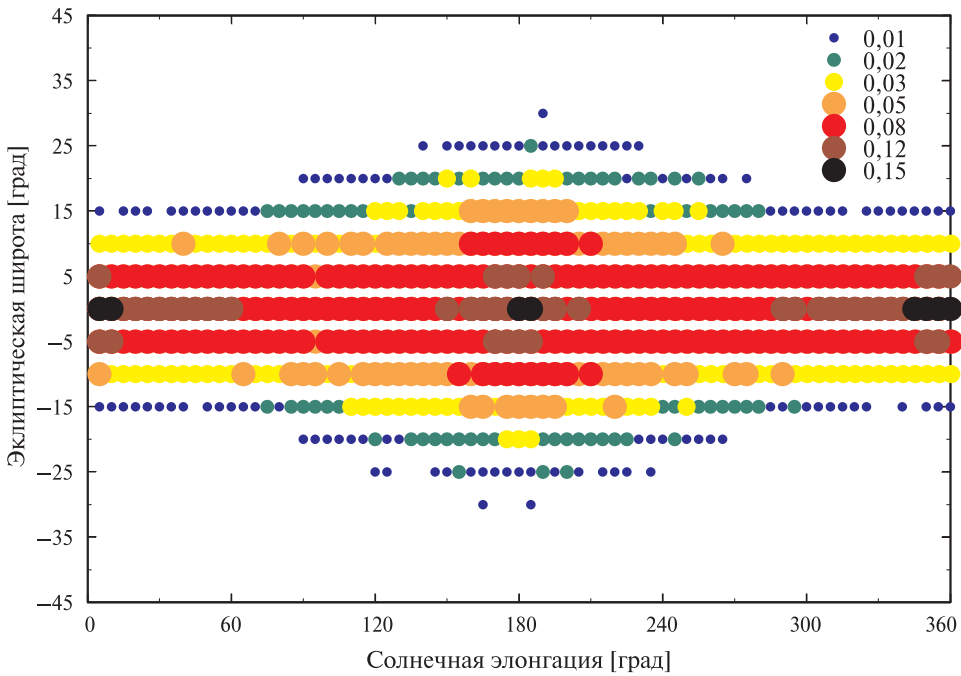


Рис. 3. Средняя плотность астероидов до 15^m , наблюдаемая с борта КА на орбите Земли (1 а. е. от Солнца)

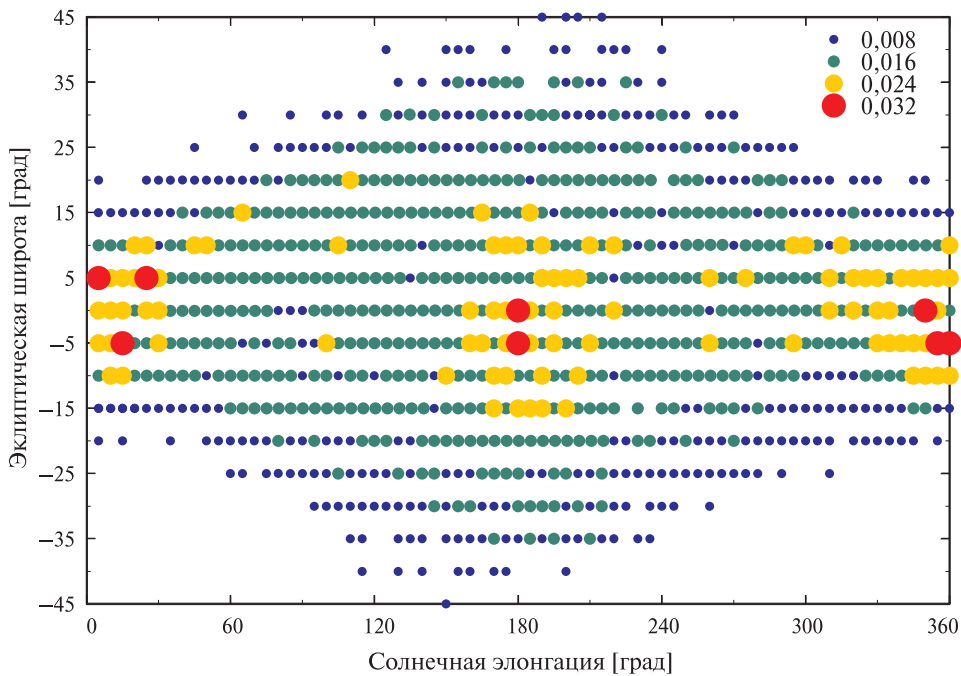


Рис. 4. Средняя плотность астероидов до 14^m , наблюдаемая с борта КА на внутренней границе главного пояса астероидов (1,85 а. е. от Солнца)

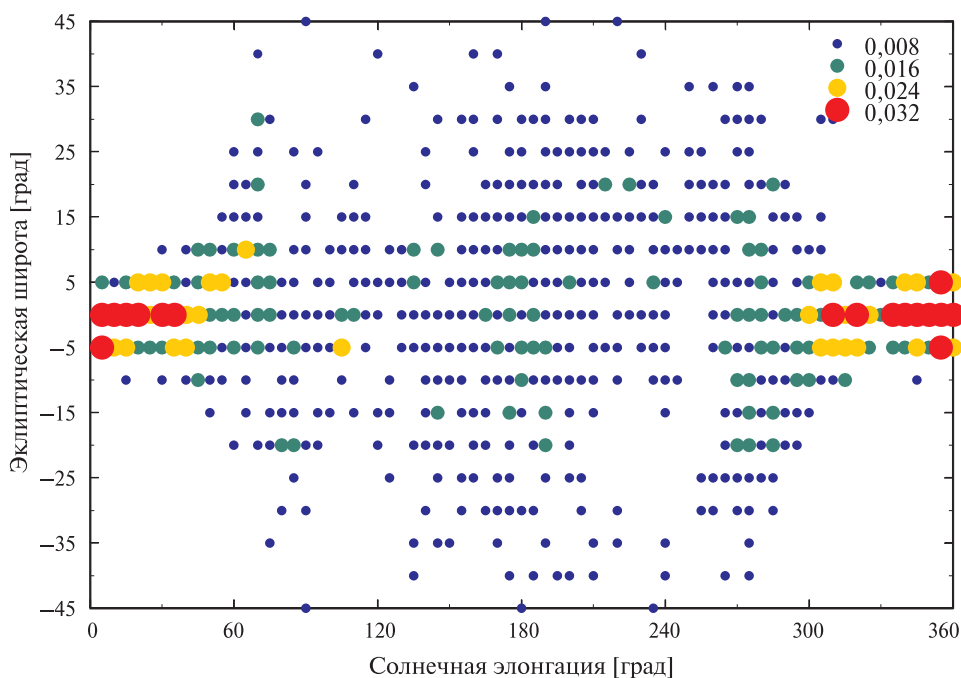


Рис. 5. Средняя плотность астероидов до 15^m , наблюдаемая с борта КА на внутренней границе главного пояса астероидов (1,85 а. е. от Солнца)

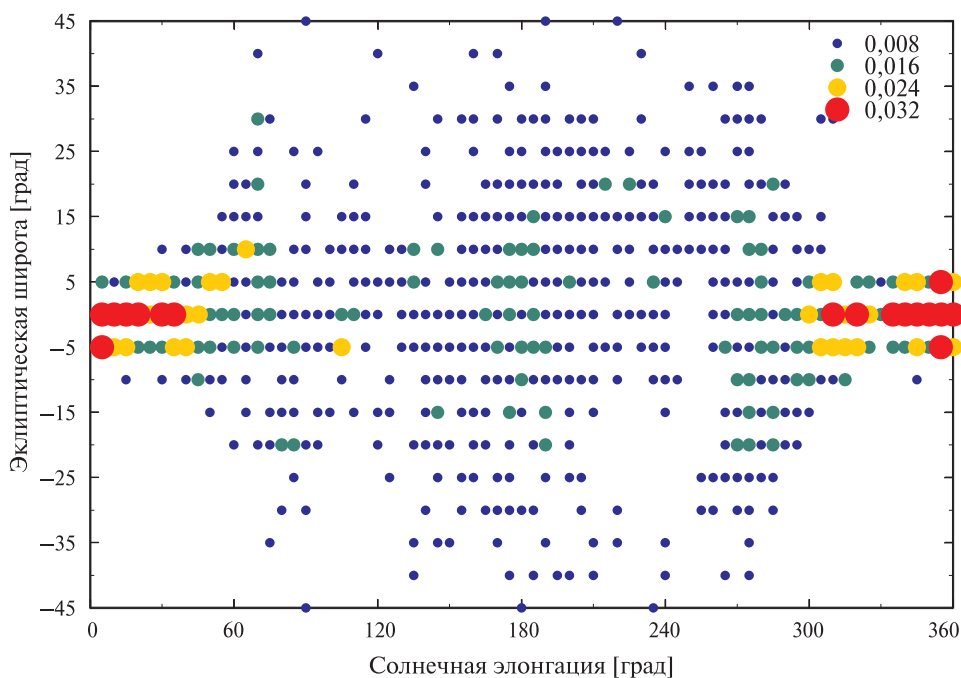


Рис. 6. Средняя плотность астероидов до 14^m , наблюдаемая с борта КА из внутренней части главного пояса астероидов (2,90 а. е. от Солнца)

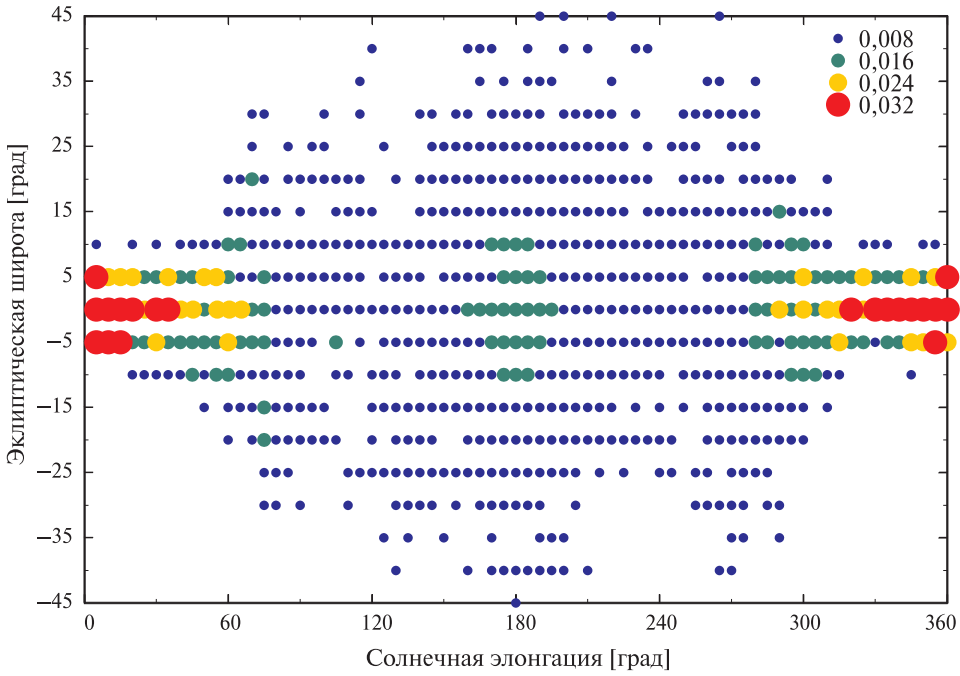


Рис. 7. Средняя плотность астероидов до 15^m , наблюдаемая с борта КА из внутренней части главного пояса астероидов (2,90 а.е. от Солнца)

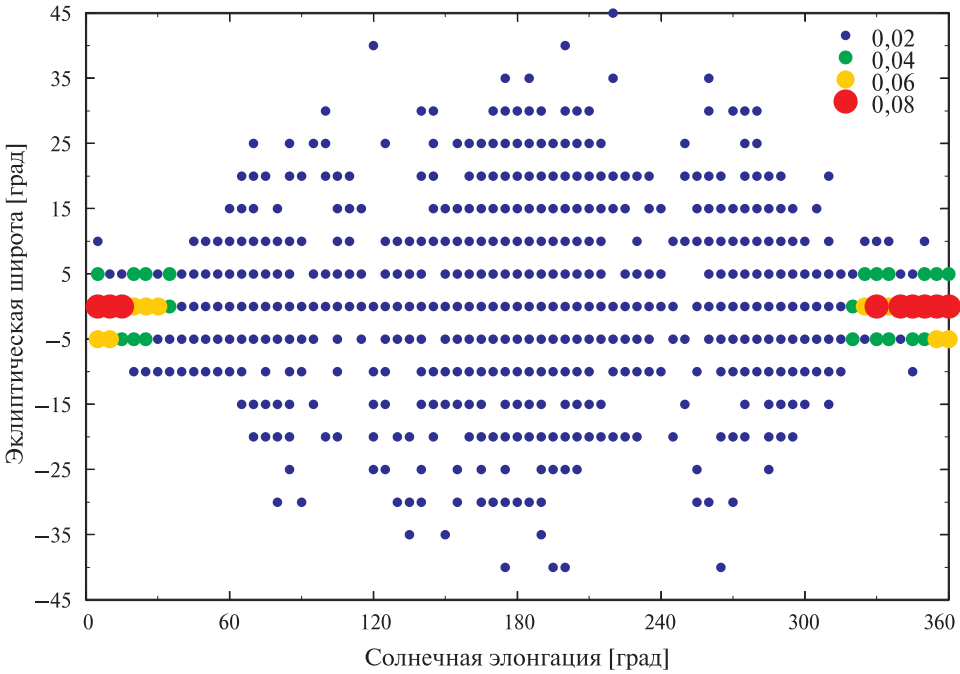


Рис. 8. Средняя плотность астероидов до 15^m , наблюдаемая с борта КА на внешней границе главного пояса астероидов (4,27 а.е. от Солнца)

Оценим возможность навигации по астероидам на разных расстояниях от Солнца. Проследим, как изменяется плотность астероидов в зависимости от радиуса орбиты КА и видимой звёздной величины астероида.

На рис. 1–3 приведены построенные карты плотности астероидов, для КА на земной орбите. Центр карты соответствует антисолнечной точке. Линия нулевой эклиптической широты — линия эклиптики. На картах показана плотность астероидов, усреднённая по клетке $5 \times 5^\circ$.

На орбите Земли в ячейку размером $5 \times 5^\circ$ в плоскости эклиптики попадает в среднем менее одного объекта ярче 13^m , менее двух объектов ярче 14^m , 3–4 — 15^m , и наконец, порядка 10 — 16^m . Максимум плотности астероидов наблюдается в антисолнечном направлении. Картина качественно одинакова для всех планет земной группы: для Венеры и Меркурия плотность чуть ниже, для Марса — чуть выше (на 10...15 %). Плотность астероидов ярче 13^m для планет земной группы одинакова.

Это объясняется тем, что внутри марсианской орбиты находится лишь несколько десятков астероидов с абсолютной звёздной величиной меньше 17^m . На рис. 1–4 показаны карты для орбиты Земли для разных предельных звёздных величин.

Для КА на внутренней границе главного пояса астероидов ($a = 1,85$ а.е.) плотность астероидов вблизи эклиптики существенно не изменяется, но общее их число увеличивается вследствие появления астероидов на широтах в диапазоне $\beta \in [-40^\circ, -20^\circ] \cup [20^\circ, 40^\circ]$. Это связано с тем, что, во-первых, орбита астероида проходит непосредственно вблизи основной массы пояса астероидов, а, во-вторых, орбиты многих астероидов имеют большой наклон. Одновременно возрастает число астероидов в солнечном направлении (см. рис. 4 и 5).

Для КА внутри пояса астероидов ($a = 2,90$ а.е.) плотность астероидов $15\text{--}17^m$ возрастает в 3–4 раза по сравнению с внутренней границей пояса и достигает максимального значения (см. рис. 6 и 7). Максимум плотности лежит на небольших угловых расстояниях от Солнца, где их наблюдение осложняется засветкой и высоким уровнем фона неба.

Вне орбиты КА, движущегося на внешней границе пояса астероидов ($a = 4,27$ а.е.), объектов очень мало, поэтому почти все яркие астероиды видны вблизи Солнца, и возможность навигации вызывает сомнение (см. рис. 8). Аналогичная картина наблюдается и на орбите Юпитера ($a = 5,20$ а.е.).

Ещё дальше от Солнца, у Сатурна и Нептуна, плотность видимых астероидов ещё сильнее уменьшается. Приближение к поясу Койпера не меняет ситуацию, так как транснептуновые объекты оказываются слишком тусклыми для наблюдений.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Обсудим следующие вопросы: выбор предельной видимой звёздной величины для навигационных объектов, возможность использования для неподвижной (неповоротной) оптической системы, параметры этой системы и звёздный каталог.

Неподвижный (неповоротный) датчик гораздо проще по конструкции и обладает более высокой надёжностью из-за отсутствия подвижных частей.

Проведём оценку предельной звёздной величины звёздного каталога, который необходим для навигации внутри пояса астероидов. Для этого рассмотрим только те астероиды, которые находятся от КА не дальше чем на одну астрономическую единицу. Оптическая система неподвижного датчика может быть направлена произвольно* или в плоскости эклиптики**. В поле зрения неподвижного прибора должен попадать хотя бы один навигационный объект. Отметим, что чем шире поле зрения, тем ниже точность определения координат звёзд и объектов [Прохоров и др., 2013]. Для субсекундных координатных измерений ширина поля зрения вряд ли будет превышать 1° (см., например, [Стеколыщиков и др. 2013]). В этом случае использовать неповоротную оптическую систему с произвольной ориентацией невозможно, а система, направленная в плоскости эклиптики, будет надёжно работать при плотностях звёзд выше 2-3 на квадратный градус. Из рисунков видно, что такие плотности вдоль всей эклиптики не достигаются ни в одной области Солнечной системы. Следовательно, неподвижные системы для навигации по астероидам не пригодны.

Для поворотной оптической системы достаточно наличия двух подходящих навигационных объектов на небесной сфере. При этом можно обойтись одной оптической системой, которая будет измерять навигационные объекты по очереди. Одновременно, можно для наблюдений выбирать оптимальные навигационные объекты, сочетающие высокую яркость с близостью к КА.

Для планет земной группы поворотный датчик может работать по астероидам 14^m , а возможно, и 13^m , на внутренней границе и внутри пояса астероидов — по 14^m – 15^m . Поскольку экспозиция может быть достаточно длительной, для регистрации таких объектов не потребуются оптической системы большого диаметра [Прохоров и др., 2013].

На выбор ширины поля зрения влияют следующие соображения:

- при одной и той же матрице приёмника излучения, чем больше фокусное расстояние (т.е. чем уже поле зрения), тем выше точность определения координат;
- в поле зрения должны попадать несколько звёзд той же величины или ярче, чем навигационный объект;
- система поворота оптической системы должна иметь погрешность наведения, в несколько раз меньшую ширины поля зрения.

Минимальная плотность звёзд ярче 13^m на небе составляет 47 на квадратный градус, 14^m — 90, 15^m — 180. Таким образом, для нахождения в поле зрения не менее 10 звёзд 13^m достаточно поля зрения шириной $0,5^\circ$, а для 14^m – 15^m , соответственно, $1/3...1/4^\circ$. При такой ширине поля зрения последнее возражение оказывается несущественным.

Вопрос о возможности навигации по астероидам за внешней границей главного пояса астероидов требует дополнительного исследования.

Оценим объём каталога звёзд. На небесной сфере звёзд ярче 13^m около 5,7 млн, 14^m и 15^m , соответственно, около 12 и 27 млн. Это очень большие объёмы данных. Объём каталога можно уменьшить, если вести измерения

* Исключая близкие окрестности Солнца.

** Постоянно такая ориентация возможна не для всех типов КА.

астероидов только вблизи плоскости эклиптики, например, в полосе $\pm 5^\circ$. Площадь этой полосы около 3600° , что составляет примерно 8,7 % площади небесной сферы.

Следует заметить, что координаты с погрешностью меньше 0,1 угл. с сегодня имеют (массово) только звёзды ярче 11^m – 12^m (полученные в эксперименте HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite — высокоточный спутник для сбора параллаксов»; название созвучно с именем древнегреческого астронома Гиппарха; др.-греч. Ἰππάρχος. URL: <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS&page=Overview>). Точность определения координат интересующих нас звёзд 13^m – 15^m для навигации непригодна. Возможно, ситуация изменится в результате начатого в этом году космического эксперимента GAIA [Perryman, 2005], в котором должны быть с миллиардсекундными точностями измерены координаты звёзд, по крайней мере, до 17^m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Навигация по астероидам возможна вплоть до внешней границы главного пояса астероидов. Ожидаемая погрешность определения пространственного положения КА составляет 150 км. Для этого необходима поворотная оптическая система с полем зрения $1/2 \dots 1/4^\circ$, обеспечивающая погрешность определения координат звёзд и астероидов до 13^m – 15^m порядка 0,1...0,01 угл. с.

Возможность такой навигации между поясом астероидов и Юпитером требует дополнительного исследования. Навигация за орбитой Юпитера, по видимому, невозможна.

ЛИТЕРАТУРА

- [Авдюшев, 2010] Авдюшев В. А. Интегратор Гаусса-Эверхарта // Вычисл. технологии. 2010. Т. 15. № 4. С. 31–47.
- [Быкова и др., 2012] Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Батулин А. П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Известия ВУЗов. Физика. 2012. Т. 55. № 10/2. С. 89–96.
- [Питьева, 2013] Питьева Е. В. EPM2011 — обновлённые планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований // Астрономич. вестн. 2013. Т. 47. № 5. С. 419–435.
- [Прохоров и др., 2013] Прохоров М. Е., Захаров А. И., Тучин М. С. Расчёт оптимальных характеристик оптической системы и матричного приёмника излучения звёздного датчика ориентации по его тактико-техническим характеристикам // 3-я Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Россия, Таруса, 10–13 сент. 2012: сб. тр. / Под ред. Г. А. Аванесова. 2013. № 13. С. 80–90. Сер. «Механика, управление и информатика». URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013/avanesov.pdf>.
- [Стекольников и др., 2013] Стекольников О. Ю., Захаров А. И., Прохоров М. Е. Конструктивные особенности узкопольного звёздного датчика ГАИШ МГУ с зеркальным объективом // 3-я Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Россия, Таруса, 10–13 сент. 2012: сб. тр. / Под ред. Г. А. Аванесова. 2013. № 13. С. 69–79.

Сер. «Механика, управление и информатика». URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013avanesov.pdf>.

- [Bowell et al., 1994] *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // Asteroids, Comets, Meteors: Asteroids, Comets, Meteors 1993: Proc. IAU Symp. 160 / Eds. Milani A., di Martino M., Cellino A. 1994. P. 477–481.
- [Perryman, 2005] *Perryman M. A. C.* Overview of the Gaia Mission // Proc. Gaia Symposium “The Three-Dimensional Universe with Gaia” / Eds. C. Turon, K. S. O’Flaherty, M. A. C. Perryman. ESA SP-576. 2005. P. 15–22.
- [Riedel et al., 2000] *Riedel J. E., Bhaskaran S., Desai S., Han D., Kennedy B.* et al. Using Autonomous Navigation for Interplanetary Missions: The Validation of Deep Space 1 Autonav // IAA-L-0807. 4th Intern. Conf. Low-Cost Planetary Missions. Laurel. Maryland. 2000. P. 1–10.
- [Standish, Willams, 2013] *Standish E. M., Willams J. G.* Orbital Ephemerides of the Sun, Moon, and Planet // Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. 3rd Ed. / Eds. S. E. Urban, P. K. Seidelmann. USA: University Science Book. 2013. Ch. 8. P. 305–346.

THE POSSIBILITY OF SPACECRAFT AUTONOMOUS NAVIGATION BY ASTEROIDS IN DEEP SPACE

M. G. Nickiforov¹, A. I. Zakharov¹, M. E. Prokhorov¹, T. Yu. Galushina², A. O. Zhukov²

¹ Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University (SAI MSU)

² Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics (NII PMM) of National Research Tomsk State University (TSU)

Navigation is determination of spacecraft (SC) spatial position. One method of autonomous navigation is the measurement from the board of SC apparent position of preselected asteroids. If we know the position of the object in space (from ephemeris) and its apparent position (as measured on SC), we can define the ray where the SC observed object in a position coinciding with the visible. The observation of two objects gives two rays, the intersection of this rays defines the spatial position of SC.

Distribution of asteroids in the Solar system is substantially non-uniform, so this method of navigation is effective not everywhere.

Keywords: Interplanetary navigation, autonomous navigation, asteroids, parallax.

Nickiforov Mikhail Gennadievich — scientist, PhD

Zakharov Andrey Igorevich — scientist, zakh@sai.msu.ru

Prokhorov Mikhail Eugenyevich — head of a laboratory, doctor of physico-mathematical sciences, assistant professor, mike.prokhorov@gmail.com

Galushina Tatiana Yurievna — senior scientist, PhD

Zhukov Aleksandr Olegovich — senior scientist, doctor of technical sciences, associate professor, aozhukov@mail.ru